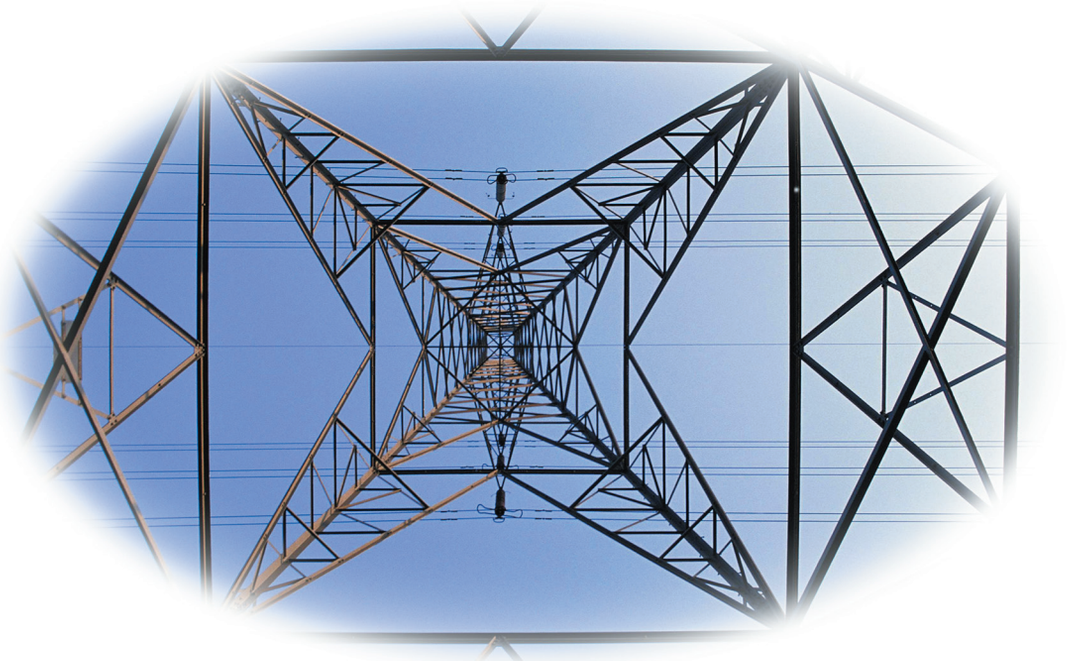
经全国中小学教材审定委员会 2004 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书 · 通用技术（必修 2）

技术与设计 2

高中一年级下册

河南省基础教育教学研究室
河南科学技术出版社 组编



河南科学技术出版社

· 郑州 ·

微信公众号：电子课本大全

总 主 编：傅水根

本册主编：李喜桥　范　悦

编写人员：李喜桥　范　悦　杨伟群

责任编辑：崔春娟

美术编辑：张　伟　黎隆安

责任校对：耿宝文

普通高中课程标准实验教科书·通用技术(必修 2)

技术与设计 2

高中一年级下册

河南省基础教育教学研究室
河 南 科 学 技 术 出 版 社　组编

★

河南科学技术出版社出版发行
(郑州市经五路 66 号)
邮政编码：450002　电话：(0371) 65737028
辉县市文教印务有限公司印刷
全国新华书店经销

★

开本：890mm × 1 240mm　1/16　印张：8.25　字数：205 千字
2005 年 5 月第 1 版　2016 年 1 月第 18 次印刷
ISBN 978-7-5349-3124-6
定价：9.49 元

如发现印、装质量问题，影响阅读，请与出版社联系调换

微信公众号：电子课本大全

前　言

同学们，你们好！高中“通用技术”系列教材已经与大家见面了。它由《技术与设计 1》《技术与设计 2》《简易机器人制作》《家政与生活技术》《电子控制技术》《汽车驾驶与保养》《现代农业技术》《建筑及其设计》和《服装及其设计》共 9 个模块组成。这套教材中的《技术与设计 1》和《技术与设计 2》两个模块为必修模块，后面的 7 个模块为选修模块。其中的必修模块是一定要选的，而选修模块则可以根据同学们各自的兴趣、需要和爱好来选择。例如，喜欢机器人，就可以选《简易机器人制作》；喜欢汽车，可以选择《汽车驾驶与保养》；有些同学喜欢电子技术，那么可以选《电子控制技术》；还有一些同学乐意为我国的农业现代化施展才华，则可以选《现代农业技术》；如此等等。这样有利于同学们发展个性，培养创造性。

可能同学们还不清楚，为什么在高中的课程设置中开“通用技术”系列课程呢？原因很简单，就是为了使我们的国家能够尽快地更加强大起来，迅速赶上发达国家的科学技术水平，永远屹立于世界民族之林。

同学们已经知道，我国的“神舟”5 号航天飞船于 2003 年发射成功并胜利返航，首位航天员杨利伟已经成为民族英雄；而美国相继发射的“勇气”号和“机遇”号探测器，不但经历了浩瀚而漫长的太空之旅顺利抵达火星，而且开始了对火星的探索，并向地球发回了一系列清晰的图片。更让人羡慕的是，当“勇气”号出现技术故障暂时失去功能时，处在星际之遥的地球科学家经过精心设计和维修，竟然使它又站了起来，重新开始探索计划。科学技术的发展速度和水平真是前所未有，我们不能不惊叹人类的智慧与才华！事实上，除了空间技术外，同学们只要放开视野，环顾四周，从日常使用的电视机、电冰箱、微波炉、数码相机，到造型新颖的汽车、不断提速的火车、洲际旅行的喷气式飞机，一直到运算神速的计算机和“鼠标一点，全知天下”的互联网，就不难发现，我们身边到处都充满着设计与技术的应用。看到这些，同学们应该认真地思考一下，自己所肩负的责任是什么？

尽管在新中国成立后，特别是改革开放以来，我国科学技术发展的速度也很快，但总体来说，国家的经济实力，尤其是综合的科技竞争力与发达国家相比，仍然存在很大的差距。为了缩小这个差距，必须尽快建立起国家的创新体系，培养出一大批理论基础宽厚、工程实践能力强、综合素质高，并富于开拓创新能力的人才，同时也要培养出更大量的技能高超的技术工人。要实现这一目标，不仅我国的高等教育需要继续深化改革，而且面向更广大中学生的基础教育改革更是刻不容缓。

微信公众号：电子课本大全

由于长期以来，我国的基础教育是以“应试教育”为主体的知识性教育，学生所具有的知识体系并不理想，而能力的培养又没有受到足够的重视，因此技术素养差、实践能力差、心理素质差，以及高分低能的现象并不鲜见。同学们从自己的所见、所闻和所做中，可能也会意识到这一点。

“通用技术”系列教材在高中的推广使用，一方面是为了改善同学们的知识结构，以适应知识经济和竞争性社会发展的需要；另一方面是希望通过紧密结合课程内容的系列活动，不断深化同学们的认知层次，增加参与机会，提高实践能力，领悟设计与技术活动的综合性，培养对科学与技术的兴趣，明察自己的优势与弱点，发展独立思维和创新思维能力，为日后进一步深造或就业创造条件。事实上，中国的今天和明天，不仅需要爱因斯坦和陈景润，而且需要爱迪生和倪志福，同样还需要千千万万各具特长，甚至身怀绝技的能工巧匠。总之，我们需要用全体公民的聪明才智来托起共和国的坚实大厦，来创造中华民族更加美好的明天。

那么，同学们选择的必修课《技术与设计 2》有什么特色？它与《技术与设计 1》有什么联系与区别呢？

应该说，这两本书属于姊妹篇，编写的主要指导思想是一样的，所具有的特点也基本一致，因此不再多花笔墨。大体说来，《技术与设计 1》主要是使同学们在理解技术及其性质的基础上，经历一般的技术设计的全过程，从而对技术与设计建立起宏观的认识和理解。当然为达此目的，也贯穿了一些细节问题，如对工具和材料的选择，对工程技术语言——制图与识图的介绍，以及关于技术评价的过程和方法等。

《技术与设计 2》作为在《技术与设计 1》基础上的必修模块，主要介绍了具有典型意义的专题性技术设计，它们是结构及其设计、流程及其设计、系统及其设计、控制及其设计，这些设计专题具有丰富的思想内涵和广泛的应用性。同学们在后续的选修课程中将会一再看到它们的应用。

同学们在学习过程中，与《技术与设计 1》一样，一定会遇到不少难题。例如构件在静态下的受力分析，这本来是大学“理论力学”中的一部分重要内容。实际上，对于一个受力构件来说，还可能受到匀速运动甚至加速运动的影响，这又进一步涉及力学中的运动学和动力学问题。所有这些，并不需要我们在高中阶段予以解决。还有很多深入性的问题，对于同学们来说，只是开始接触和感受，并伸出自己的思维触角。在高中阶段，重点是通过对具体案例的分析和对教学活动的参与，解决相对简单的综合性问题，并逐步掌握解决技术问题的思路和方法。

与《技术与设计 1》一样，为了拓宽同学们的知识视野，培养实践能力和创新思维能力，本书同样精心设计了“学习目标”“探究与交流”“实践与体验”“阅读材料”“小资料”“新视窗”和“活动延伸”等，在附录中也给出了“部分中英文词汇对照表”。

上面所提及的内容，同学们可能一下子还难以深入理解。但是当你们在学习

微信公众号：电子课本大全

中逐步进入角色时，就会发现这是一个学习知识、增强能力、提高素质、培养和施展才华的新领域。当然，有一点还要提醒一下，由于技术与设计课程所涉及的知识比较综合，同学们在学习的过程中可能会遇到某些困难，但只要和任课老师密切配合，积极思考，认真探讨，相信同学们一定能够打开思路，学有所获。

还要提到的一点是，尽管本教材的编者们付出了很大的努力，但囿于对基础教育改革理念的领悟水平、编写时间的短促，以及编者水平所限，这本书仍然会存在许多不足甚至错误之处，恳请同学们在学习的过程中积极思考，努力发现存在的问题，和任课老师一起，向我们提出宝贵的意见，以便使本书在今后的修订中日臻完善。

普通高中课程标准实验教科书《通用技术》总主编　傅水根

2004 年 4 月 10 日于北京

微信公众号：电子课本大全

微信公众号：电子课本大全

目　录

第一章　结构及其设计 …… (1)

第一节　结构的概念 …… (2)
一、结构的含义 …… (2)
二、结构的作用 …… (3)
三、常见的结构类型 …… (4)
第二节　结构是如何承受应力的 …… (7)
一、结构的受力分析 …… (8)
二、结构弯曲的受力分析 …… (10)
三、抵抗张力结构的受力分析 …… (11)
第三节　影响结构强度和稳定性的因素 …… (13)
一、结构大小和形状的影响 …… (15)
二、材料性能的影响 …… (18)
三、连接方式的影响 …… (21)
第四节　结构的模型或原型的设计与制作 …… (24)
一、分析结构的作用和受力情况 …… (24)
二、设计计算 …… (27)
三、绘制设计图样 …… (27)
四、制作模型或原型的意义 …… (28)
五、材料、工具和加工设备 …… (30)
六、制作方法和步骤 …… (31)
第五节　结构的技术评价和文化欣赏 …… (34)
一、桥梁结构分类与技术评价 …… (34)
二、建筑结构欣赏 …… (36)

第二章　流程及其设计 …… (41)

第一节　流程的概念 …… (42)
一、流程的含义 …… (42)
二、流程的作用与实例 …… (47)
第二节　流程的设计 …… (49)
一、流程设计的步骤 …… (49)
二、流程设计分析 …… (50)
三、流程的表达 …… (51)
第三节　流程的优化 …… (58)
一、流程优化的目的与途径 …… (58)

微信公众号：电子课本大全

二、流程优化实例分析 …… (60)

第三章　系统及其设计 …… (66)

第一节　系统的概念 …… (67)
一、系统的含义 …… (67)
二、系统的功能 …… (72)
三、整体突现性 …… (73)
四、系统分析 …… (74)
第二节　系统的结构与层序 …… (76)
一、系统的结构 …… (76)
二、系统的层次与秩序 …… (78)
第三节　系统的设计 …… (81)
一、系统设计的原则与步骤 …… (81)
二、系统设计实例 …… (83)
三、系统的优化 …… (86)

第四章　控制及其设计 …… (91)

第一节　控制的概念 …… (92)
一、生产、生活中的控制问题 …… (92)
二、控制的含义 …… (94)
第二节　控制技术的分类 …… (96)
一、按照控制方式分类 …… (96)
二、按照反馈方式分类 …… (97)
三、按照被控量分类 …… (98)
四、遥控与数控 …… (101)
第三节　控制系统 …… (103)
一、控制系统的组成 …… (104)
二、传感器 …… (105)
三、控制器 …… (107)
四、执行器 …… (109)
五、反馈环节 …… (109)
六、干扰因素 …… (110)
第四节　控制系统的设计与制作 …… (112)
一、控制系统设计流程 …… (112)
二、温度控制装置的设计 …… (114)

微信公众号：电子课本大全

三、温度控制装置的制作和调试 …… (115)
四、时间控制装置的设计与制作 …… (116)

附录　部分中英文词汇对照表 …… (118)

微信公众号：电子课本大全



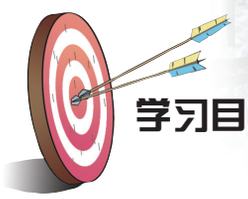
第一章
结构及其设计

技术革新和进步直接推进了社会的文明与现代化，技术的实施结果最后都会体现在某一种具体产品上。为了取得技术实施的最佳效果，在一个产品诞生之前，必须进行精心的设计。设计活动是人类思维灵性的体现，设计活动一定是针对某一具体目的或为解决某一具体问题进行的，它以科学理论为依据，同时必须结合实践经验并受一定条件的约束。每一个有形的具体产品，无论其大小或复杂程度，首先要考虑一个有效的空间表现形式，同时它还要有具体的功能，以满足使用者的需求。结构及其设计是表现空间形态、实现功能的核心内容。正确恰当地选择结构方式是产品设计的关键。有时相同的功能要求可以采用不同的结构方式，不同的结构方式又直接影响功能，并可获得不同的外观艺术效果。

本章主要讨论有关结构的概念、结构应用分析、影响结构的因素、结构设计的实施与制作、结构评价与赏析等内容。由于结构设计是将力学原理、材料和工艺等理论和物质条件相结合的工程学科，教和学的过程中知识跨度较大，要注意学会用科学性和系统性的方法来解决实际问题。本章的教学目的是希望通过这些内容的学习及配合案例思考，使学生能够将基础理论或知识迁移到日常生活中分析或解决实际问题，初步学会简单结构设计的思路和基本方法，有条件的可以进行技术实验，并注意将产品的技术原理与环境和人文科学结合起来，培养学生的工程技术素养和创新意识。

微信公众号：电子课本大全

第一节　结构的概念



学习目标

1．了解结构的含义，能从力学角度理解结构概念。
2．能辨识几种简单的结构形式。

我们平时接触的每一事、每一物都有其结构可言，如关系国计民生的经济结构、涉及人类本身奥秘的人体结构，以及探讨人生足迹的人生结构等。但在本书中我们主要关注在工程技术领域应用的结构及其设计。

一、结构的含义

从广义上讲，结构是指物体各个组成部分之间的空间搭配和排列，结构决定了事物的性质和形态。

从力学的角度讲，结构是指可承受一定载荷和应力的架构形态，结构可以抵抗能引起形状和大小改变的力。



探究与交流

三种不同的结构形式

从日常生活中就可以观察到不同用途的结构形式，请说一说图 1.1 ～图 1.3 所示三种结构形式的功用和特点。

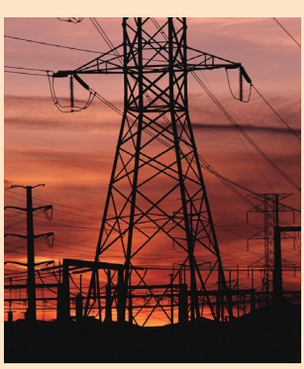


图 1.1　高压线铁塔

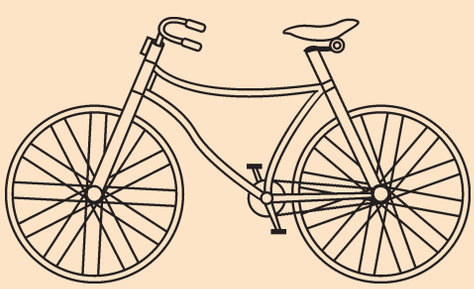


图 1.2　早期的自行车



图 1.3　藤条制成的休闲躺椅

微信公众号：电子课本大全

结构名称	结构形式与用途	结构特点
高压线铁塔		
早期自行车		
藤制休闲躺椅		



小资料　　中国国家大剧院的蛋壳结构

屹立在北京人民大会堂西侧的中国国家大剧院的椭圆形壳体屋面是由钢结构组成的“六层蛋壳结构”：以钢结构骨架为分水岭可分为内壳和外壳，内壳一层主要是防火阻燃的装饰材料，外壳五层从外向里依次是钛合金板、压型钢板、岩棉材料、镀锌钢板和吸音涂层。

二、结构的作用

结构犹如人体的骨骼，人类的一切活动都离不开骨骼系统，人体的“硬件”实际上是由有限个“部件”用关节连接成的骨骼系统，各个“部件”之间存在肌肉和肌腱联系，可施加作用力以改变相对运动状态，而肌肉和肌腱的作用力受神经中枢这一“软件”的控制。因此，人体的骨骼除了具有传统的经典力学研究的机械运动以外，还有经典力学无法解释的力学现



新视窗·思维外延

在机器及电器制造业中，所涉及的结构更为复杂一些，它除了要具有抵抗由外力引起的形状和大小变化的能力外，还要实现特定要求的空间运动功能。如图 1.4 表示一个有五个自由度、用于焊接作业流水线上的示教型机器人。它由操作臂、控制系统、液压源、液压系统以及支持所有这些系统装置的本体所组成。其操作臂运动结构模拟人体关节，可实现臂的水平摆动、上下俯仰、前后伸缩，以及腕回转及手部夹持器的开闭。操作臂中各个构件的运动均由计算机控制。

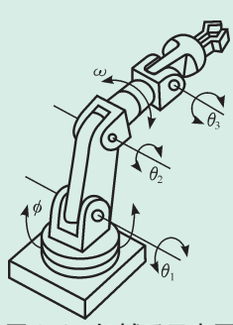


图 1.4　机械手示意图

微信公众号：电子课本大全

象，如肌肉控制力矩、生物作用力的传递方式等。所以在研究某个具体对象的结构时，既要遵循力学普遍规律，又要考虑其特殊性。

对于应用于工程建设（如建筑、机械、冶金、化工）的结构，目前我们主要依据由伽利略、牛顿奠基的经典力学原理来评定其宏观作用，结构要能安全地使用，必须有足够的承载能力，这一能力包括以下三方面的要求：

(1) 应保证在一定的载荷作用下不致发生破坏（包括材料的塑性变形），也就是具有足够的强度；

(2) 应在使用过程中不产生过大的弹性变形，也就是具有足够的刚度；

(3) 保证在载荷作用下不致发生平衡状态的突然改变，也就是具有足够的稳定性。

影响结构工作性能或使用性能的主要因素有：各种形式的载荷、温度变化、材料性能、几何特征等。如永久载荷、可变载荷、温度变化、地震等。

结构满足功能要求，则结构为“可靠”或“有效”；反之，则结构为“不可靠”或“失效”。介于“可靠”与“失效”的临界状态称为“极限状态”。比如结构一旦达到最大承载能力，则可能出现下列情况：结构失去平衡（滑移、倾覆）；结构变形过大不能继续使用；结构形成几何可变体；结构丧失稳定性。

三、常见的结构类型

建筑物是建筑材料按一定规则组成的受力骨架体系，其中有些部分如梁、柱、框架等相互联结成一个整体，起着支撑质量载荷并将其传递到基础的作用，这一骨架体系常被称为土木工程结构，简称工程结构。常见的工程结构有桁架结构、薄壳结构和实体结构三大类。

（一）桁架结构

是以刚性的杆件作为组成结构的基本单元，杆件的基本特征是它的长度远大于其他两个尺寸——截面的宽度和高度，杆件按一定的规律在空间排布成复杂的形状，支持比自身质量大得多的质量载荷。

桁架的种类很多，它可用木材制造，也可用金属制造，不仅应用在厂房建筑、桥梁结构中，也常用于民用机械和航空工业中，比如飞机的机翼就常用轻型桁架作为骨架。如图 1.5 所示的工厂厂房的屋顶，图 1.6 所示的我国“神舟”5 号飞船发射塔，都是典型的桁架结构。

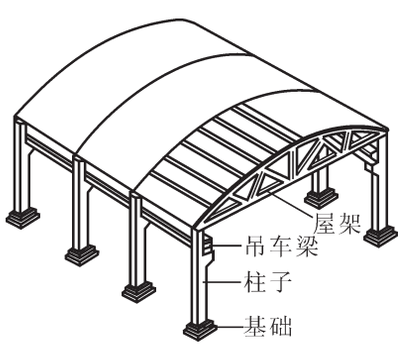


图 1.5　厂房的桁架结构



图 1.6　飞船发射塔的桁架结构

（二）薄壳结构

是由若干块薄板组成，板的厚度远小于其他两个尺寸的结构，可以做成具有曲面轮廓的外形，造型轻巧而优雅。如图 1.7 所示的圆顶体育馆，由于采用薄壳结构屋顶，大大减少了场地中间的立柱，满足了体育馆的使用要求。

微信公众号：电子课本大全



图 1.7　薄壳结构屋顶

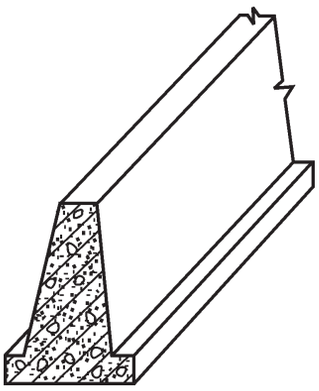


图 1.8　挡土墙示意图

（三）实体结构

指三个方向的尺度大约为同一数量级的结构，如图 1.8 所示的挡土墙。

另外，在生产中有时需要设法将多个物体或材料连接起来，形成一个整体，共同发挥作用，就可以用下列两种结构。

（四）捆扎结构

用缠绕或捆绑的方式对容易溃散或滑移的物体施加约束，可以保持整体结构的稳定性，如建筑工程的钢筋混凝土中常用到的箍筋结构（图 1.9），可以有效地维持钢筋作为受力骨架的作用，限制混凝土裂缝的扩展。

（五）焊接结构

两个物体接触部分利用高温局部熔化，使材料融合，冷却后连成一体。大型的金属材料结构件都需要焊接（图 1.10）。

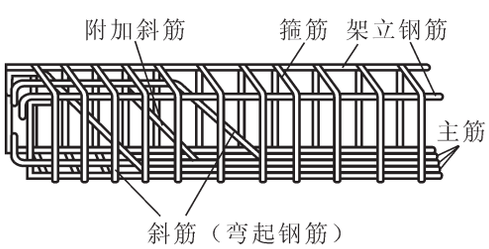


图 1.9　箍筋结构

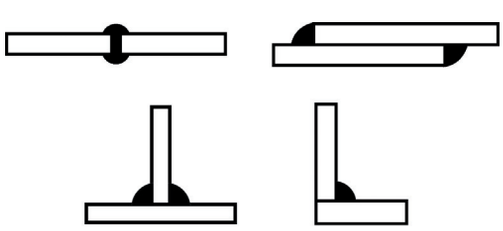


图 1.10　材料焊接结构

在加工制造某些产品时为了使加工过程尽量简单和易操作，结构设计还要考虑工艺的要求，例如铸造结构。

（六）铸造结构

它是为了适应铸造工艺而设计的零件结构。所谓铸造就是将加热熔化了的金属注入所需形状的铸型型腔中，使其冷却凝固而制成零件毛坯的过程。铸造过程的一般程序是：首先制作与零件轮廓形状相似的模型（多数是木制的，称为木模），并将其埋入砂箱的型砂中，经过捣实，将模型取出而制成铸型（造型），然后，用熔炼炉熔炼金属（流动状态的金属称为金属液），并将熔融金属注入铸型（将金属液注入铸型的操作称为浇注）。冷却凝固后，从型砂里取出铸件。图 1.11 给出了铸造流程示意图。

用铸造方法完成的零件往往比较粗糙，尺寸也不精确，还需要做进一步加工（铸造零件有时叫作铸造毛坯）。从图 1.11 可以看到，铸件形状和设计的零件形状有所差别，铸件的侧面都有斜

微信公众号：电子课本大全

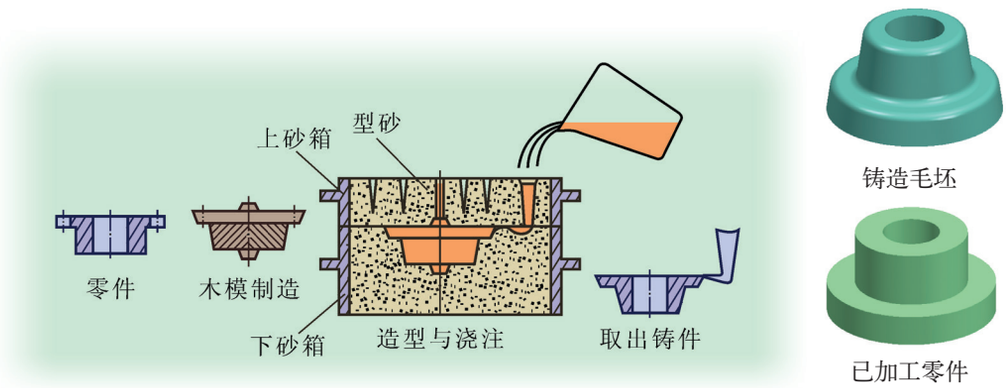


图 1.11　铸造流程示意图

度，这一结构形式称为起模斜度，其目的是为了造型时易于从型砂中取出模型。另一明显差别是铸件的棱边必须是圆角形状，其原因是用砂制作的铸型，其尖锐的棱角部分容易脱落型砂，所以应做成圆角。

这一例子告诉我们，在进行结构设计的过程中，有时还要考虑到后续的制造或生产工艺问题，不同的结构特点往往对应于不同的制造方法。

另外，有时为了合理地利用材料，需要将同种或异种材料按一定空间排列方式组合成一个整体来使用，常称为复合结构，具有复合结构的材料的使用性能远好于单一的材料。如图 1.12 所示就是用作包装纸盒的瓦楞纸板。单独一张硬纸板折成的盒子抵抗外力变形的能力极为有限，而纸板的复合结构瓦楞纸板具有很高的抵抗变形的能力。用瓦楞纸板做成的包装盒，即使内装很重的物体，依然可以堆垛很高，从而节省库存面积和便于产品包装运输。

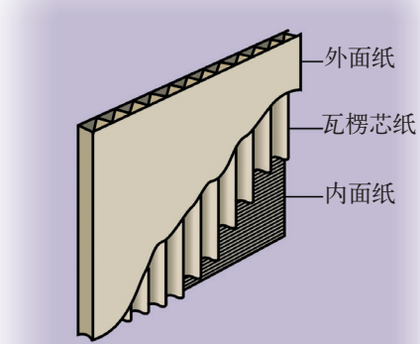


图 1.12　瓦楞纸板



活动延伸

1．请观察一下公路边的广告牌钢架、空竹篓、摩托车发动机外壳、自行车三角横梁，看它们分别属于哪类结构类型？

2．参观一个当地的铸造厂，仔细观察铸造毛坯的生产过程，分析一下铸造毛坯的外形特征。



阅读材料

安全剃须刀的诞生

合理和巧妙的结构是满足功能和安全的基本条件。

在今天，人们早上刮脸只需很短时间，但直到 20 世纪初，它还是费时和较为危险的日常生活内容。大多数普通人都找理发

微信公众号：电子课本大全

师刮脸。理发师首先把肥皂沫涂在顾客脸上，然后拿出一把刮刀，先在磨石或皮革带上磨快刀刃，然后再刮脸。一些富人自己有剃刀，但这种剃刀很昂贵，因为它们是用最好的锻钢制成的，这种钢能够保持锋利的刀刃。在制造过程中，刀刃要经过仔细的手工打磨以后才可能保持锋利。使用这种剃刀，再熟练也是一种危险的事；对于不太熟练的人来说，很容易使剃刀抖动以致割破皮肤。因此止血用的明矾便成了当时刮脸时的一种必备品。

1895 年，美国一位名叫金·吉勒特 (King Gillette) 的行商推销员在寻求快速生财之道时，悟出了一个道理：如果能够制造出人们可以随意使用，并且会三番五次购买的产品，那么，自己就能够很快变成富翁。一天，他在理发馆修面时对于整个理发业使用的刮脸剃刀感到非常恼火，于是他决定进行研究，看看能否做某些改进。经过反复思考，他提出了一种大胆的设想：能否做一种不用磨刃的剃刀？他首先总结了锻钢的作用：第一，使刀刃保持锋利；第二，使刀片刚度好。如果要使刀片为价廉的商品，则必须选刚性小的薄钢片制成。为克服刚性不足的缺点，他决定只保持刀片的利刃，并在靠近刀片利刃的地方将其夹紧，以获得刚性。这一灵感的出现导致了一种新型剃刀的诞生 (图 1.13)。一个易弯曲的双面刀片被夹在一种坚硬的金属薄板与一种弯曲且有沟槽的保护架之间，保护架沿皮肤表面滑动，使刀片和皮肤表面之间保持适当的接触，T 形手柄使得剃刀能够灵活地绕下巴滑动。这种剃须刀不仅省去了磨刀，也安全得多。

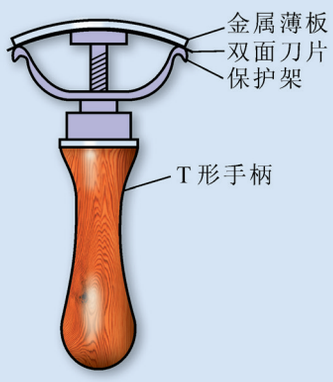


图 1.13　吉勒特的安全剃须刀



第二节　结构是如何承受应力的

学习目标

1．能够对简单结构的受力情况进行分析。
2．理解不同受力形式所引起的结构变化。

无论是机械产品的设计还是建筑结构的设计，人们总是在满足功能要求的情况下，追求用最少 (或最轻) 的材料组成结构，同时追求结构的刚度或强度的最大化。为了达到这一目的，我们必须首先学会如何观测和分析结构的受力行为。

微信公众号：电子课本大全



探究与交流　结构小试验

做一个互动性试验，先找一副扑克牌和几张比扑克牌纸略薄的纸，照图 1.14 所示分别将纸展平、弯曲并定型、曲折后放在两叠同高度书本上。请问：如果将扑克牌轻轻放到纸上面，哪种情况可以放最多的纸牌而纸不塌掉？可以边动手做边分析。

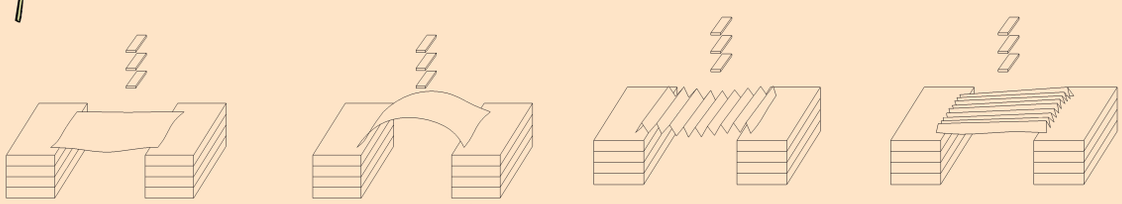


图 1.14　在架空的不同结构的纸上放纸牌

一、结构的受力分析

当我们用手拉弹簧时，弹簧就会伸长，同时会感到弹簧在拉我们的手，这是因为在弹簧材料内部各个部分或粒子之间存在着相互作用力，称为内力。显然如果要想拉断弹簧，我们必须克服材料的内力，内力反映了材料抵抗载荷破坏的能力，即强度的大小。但为了研究强度问题，光知道内力的大小是不够的，譬如用同样的内力，作用在两个材料相同但粗细（即截面积）不同的绳子上，显然细绳子更容易拉断。研究强度问题，还需要了解内力在材料截面上的聚集程度，所以在工程上我们把单位面积上的内力称为应力，应力的法定计量单位是帕斯卡（Pa），简称帕，$1Pa=1N/m^2$。但在工程上我们习惯用兆帕（MPa）作为应力计量单位，$1MPa=10^6Pa$。如果仅从受力的角度出发，应力可以作为表示结构强度（抵抗材料破坏）和刚度（抵抗材料变形）的基本指标，刚度（有时也叫刚性）越大结构越稳定，而强度越大结构受破坏的可能性越小。

拉伸和压缩及变形是物体发生应力作用的最简单的现象。承受拉力的有电梯钢丝绳、电力传输线路的电线、起重机上的吊钩等；承受压力的有建筑物中的立柱、墙壁以及桥梁等。如图 1.15 所示，砖以一定的形式码放，并用水泥灰浆砌在一起，砖承受压缩应力。有些建筑物靠廊柱支撑，柱子受到轴线方向的压缩应力。



图 1.15　物体受压示例

微信公众号：电子课本大全

拉伸和压缩是由外力引起的，外力在力学中又叫作载荷，它可以分为两类：

(1) 分散载荷。例如平屋顶上积着一层雪，那么整个屋顶都要受到雪的压力，这种载荷是连续不断地分布在屋顶整个面积上的。

(2) 集中载荷。例如人站在楼板上，这时，楼板上的受力部分只限于人脚所站的地方，所以这种力集中于一块很小的面积上，在计算时我们通常假定集中载荷作用在一点上。

在工程结构设计中总是希望载荷能在受力对象内均匀分布，尽量避免载荷集中。

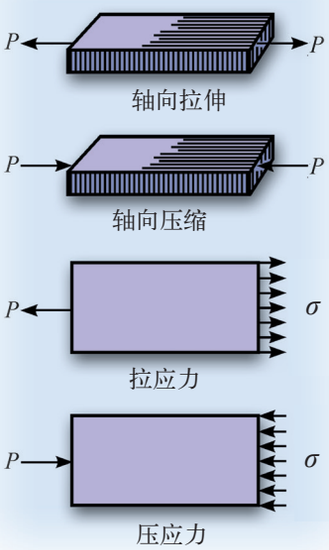


图 1.16　拉伸和压缩受力图

如图 1.16 所示，用两个大小相等、方向相反的力（方向相背时称作拉力，相对时就是压力），作用在一根直杆的两端，这时杆件变形，由于这里所说的拉力或压力都是沿着杆件的中心线，所以又叫作轴向拉伸或压缩。现在需要分析计算拉应力和压应力，必须首先假设轴向载荷均匀分布在整个截面上，这样杆件所受的应力就可以按下面的式子来计算：

$$\sigma = P / A ,$$

式中，P 为拉伸或压缩载荷，单位为 N；A 为拉伸或压缩所作用的截面面积，单位为 mm^2；σ 为拉伸或压缩应力，单位为 MPa。

一旦受到载荷作用，材料一定会发生变形。受到拉伸时，在拉伸方向材料的尺寸会增大，而垂直于拉伸方向的尺寸要减小，垂直于拉伸载荷作用力的截面积也要减小。

当载荷增加到一定时候，材料会发生破坏，此时受力处于临界极限状态。通过试验可以测出每一种材料的极限应力值，也就是材料的抗拉强度，其大小可以表征材料抵抗变形或破坏的能力。



实践与体验

四种金属丝的抗拉强度

做如图 1.17 所示的实验，取相同长度，截面积都是 $1mm^2$ 的铅、铝、铜、铁四种金属丝，用重力将它们拉断，请计算并比较四种金属丝的抗拉强度（应力），再分别称一下四种金属丝的质量，计算一下拉断单位质量所需的应力。



新视窗 · 思维外延

你能否不用任何工具，仅凭你的两只手将 1mm 直径的钢丝弄断？如果弄不断请分析原因，如果能弄断也请分析原因。

微信公众号：电子课本大全

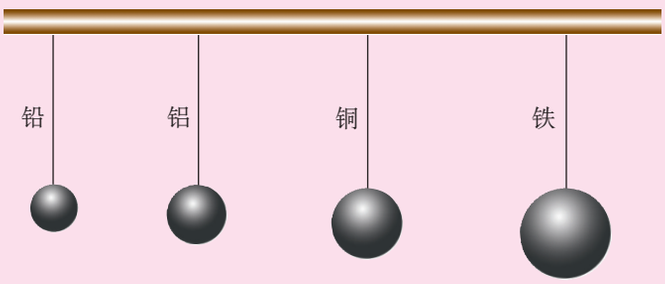


图 1.17　金属丝的抗拉强度

二、结构弯曲的受力分析

建筑物的横梁、桥梁的跨间以及各种机器上的轴类零件在工作时都会发生弯曲变形，那么弯曲时材料内部受什么样的作用力呢？我们来做这样的试验（图 1.18），将一个即将被弯曲的杆件侧面先画上格子，当杆件弯曲后，我们观测格子的尺寸和形状变化可以得出这样的结论：当零件承受弯曲变形时，它的一面（这里指上面）被压缩，另一面却被拉伸。这两个面之间有一个中间层，它不承受压缩也不承受拉伸，故称为中性层。如果弯曲的是一圆形杆件，这一中性层就成为中性轴了。所谓弯曲变形就是同时在零件以中性层分界的两个面上产生拉伸和压缩变形。

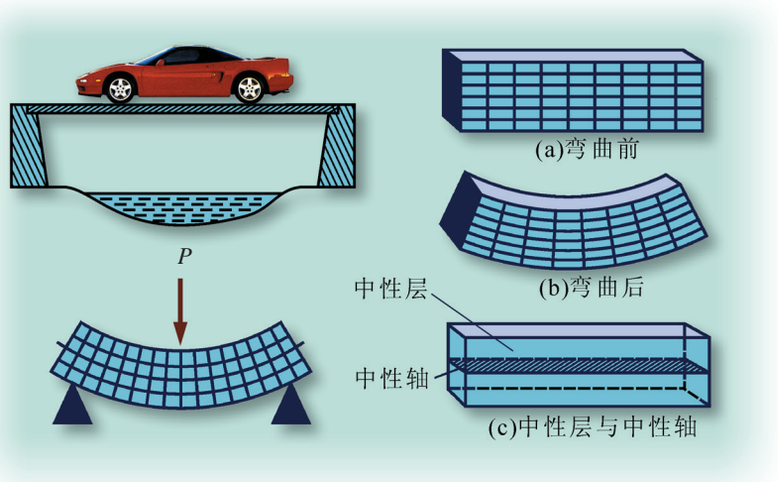


图 1.18　材料弯曲时的受力分析

在建筑结构中常用到拱形结构，这种结构有一个重要特性就是可以将所受的弯曲应力变成压缩应力。例如图 1.19(a) 所示的是古代建筑中常见的用石块堆砌的拱形窗框（或门洞），现在研究拱形顶部一块石头上的作用力的情况。一般说来，这块石头在本身质量及上部一些石头质量的作用下，总是企图往下运动，就这样，这第一块石头如同一个楔子向自己两边的石块施加压力，而两边的石块则抵抗这种压力并压缩第一块石头，其他一些石块也互相压缩而形成一个半圆

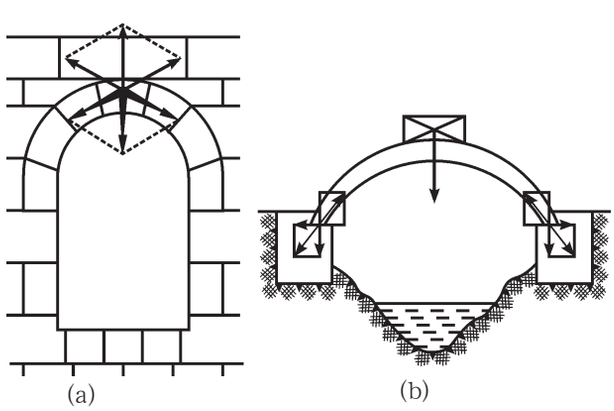


图 1.19　拱形结构：用压缩力代替弯曲力

微信公众号：电子课本大全

拱。作用于圆拱两端石块上的力是互相排斥的，叫作横向推力。同样道理，作用于拱形桥[图1.19(b)]上的这些力都被河岸上的反作用力所平衡。这一现象说明拱形结构可以用压缩力来代替弯曲力，改善结构的受力状态，从而提高结构的承载能力和稳定性。



探究与交流

哪一种梁的承重能力强?

这里有一个很有意思的题：我们取两根大小完全相同的矩形梁，一根平放，一根竖放（图 1.20），请你判断一下，哪一种放法梁承受的质量大？这里的答案是“竖放”。如果你观察一下古代的建筑，你就可以看到所有矩形截面的木质梁都是竖放的，这说明几百年前的古人也知道竖放比平放好。其中的道理何在呢？

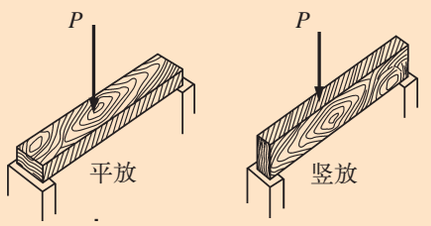


图 1.20　矩形梁的两种放置

三、抵抗张力结构的受力分析

在第一节中提及的桁架结构、薄壳结构、捆扎结构都会受到张力（拉力）作用，与压缩力相比，张力对结构的破坏作用相对要大一些，因此在结构设计时要尽量避免集中载荷的发生，并要想办法分散受力，让结构的每一部分都合理受力。

（一）球罐的受力

压力容器广泛应用于石油、化工生产中，如各种储罐、反应塔等。从压力容器的结构上看，它的体积大，壁薄，而直径较壁厚大几十倍甚至上百倍。压力容器绝大部分为圆柱形或球形，其中圆柱形压力容器的制造比球形容器简单。从压力容器的受力情况看，它除了承受容器内部介质的工作压力外，还受到自身质量和其他附加设备重力的作用，球形容器各点的受力状态均匀分布，球壳体一般需要数十片（大型球罐则是数百片）球瓣拼装构成。由于球体的几何形状呈高度对称性，各球瓣焊接的焊缝所受到的应力大小基本一致，所以在压力容器的壁上不会产生集中的张力，球体形状容器的抗张（力）强度高，圆柱形或其他几何形状容器的抗张（力）强度就不如球形容器。

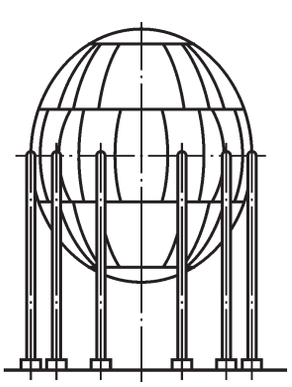


图 1.21　球罐结构示意图

（二）圆拱的受力

在建筑结构设计中，有一种奇妙的圆拱屋顶结构，这一构思最早受到大家熟知的鸡蛋壳的启发。沿着鸡蛋壳长轴线方向用两手掌挤压，试一试能否将它压破[图 1.22(a)]。即使能够压破它，那么和弄碎小块鸡蛋壳相比也必须付出较大的力气。至今，圆屋顶结构的计算原理已经研究得很详细了。已经有这样的圆屋顶结构，它的薄壳厚度对直径的比值仅为鸡蛋壳相应比值的几分之一。

从现代建筑技术的观点来看，圆拱或圆屋顶结构的主要缺点是屋顶是曲线形的。对于下层住户来说，有一个圆顶棚结构并不会感到不方便，但是对上层的住户是否方便呢？当然可以把圆顶棚搞平，往往是铺上一层平板，这不仅浪费了材料，也使圆屋顶结构的优点消失了。圆拱

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 思维外延

当你理解了有关拱形结构和桁架结构的受力特点后，就不难解释图 1.23 所示的桁架和圆拱相结合的结构合理性了。

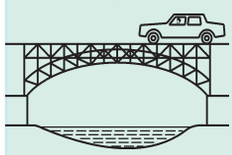


图 1.23　桁架和圆拱的组合结构

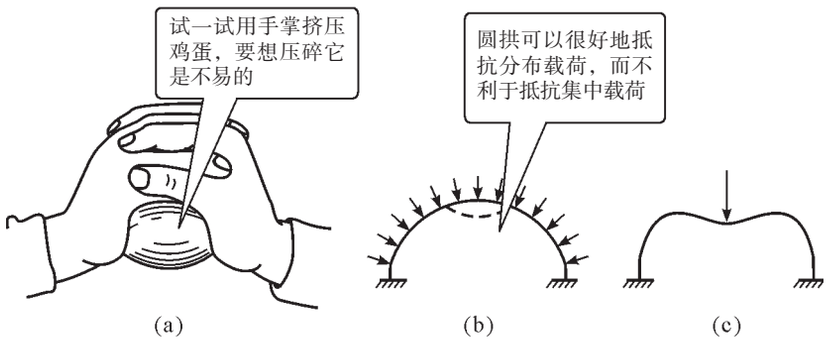


图 1.22　圆拱的受力特点

和圆屋顶结构的另一个缺点是抗集中载荷的性能差。请看图 1.22(b)、(c)的圆拱受力情况。

图 1.22(b) 中的圆拱载荷如果是平均分布的，则作用于圆拱上面一点的垂直力总是企图把圆拱的半圆弯曲成虚线表示的那样。可是作用于这些半圆上的另外一些力则反作用于这个弯曲力，因此圆拱的材料仅仅承受压缩力。图 1.22(c) 中另一个圆拱的上面有一个垂直的力作用着，这个垂直的力企图把圆拱两侧折弯。而现在，抵抗折弯的力没有了，因此圆拱可能被破坏。所以一旦圆拱受到集中载荷，结构受破坏的可能性增加。

如何解决这个问题呢？办法是将圆拱的两段弧拉直 [图 1.24(a)]，这时垂直的力就可以压缩桁架斜臂 (由于压缩力沿着杆的中心轴线，所以并不弯曲它)。这种形状的桁架不仅有利于结构的强度增加，而且可以节约建筑材料 (因为斜臂比圆拱的弧线短)。

是不是可以把斜臂厚度减小，节省一半材料呢？如果简单地减小斜臂厚度，就会发生纵向弯曲的危险。为了节省材料而又避免发生这种现象，可以把斜臂上节省下来的材料应用于每个斜臂中间与桁架横拉杆中间的连接上。现在的桁架形状就会像图 1.24(c) 表示的那样，补加的拉杆可以加强桁架。

假设有一作用力企图使左侧斜臂产生纵向弯曲，此时斜臂中间部位必然会向上突出。如果补加了拉杆，斜臂中间部位必然通过拉杆把桁架的横向拉杆向上拉动，但是横向拉杆却被两侧斜臂下端所拉紧，因此也就防止了两侧斜臂的纵向弯曲。与此情况相同的是，也可以防止两侧斜臂中间部

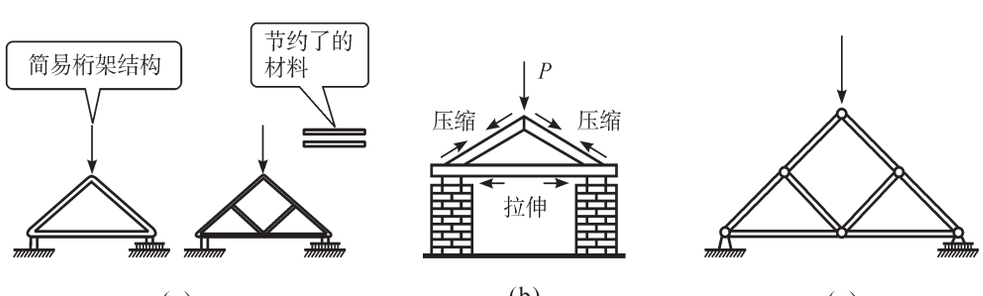


图 1.24　桁架结构分析简图

微信公众号：电子课本大全

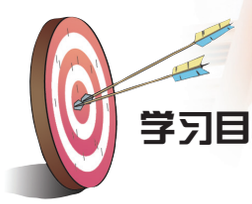
位向下弯曲。这样，作用于桁架上的弯曲变形力就会变成作用于所有拉杆上的拉力和压缩力。构成桁架的各个拉杆之间可采用铰链连接，以便于结构施工和装配。



活动延伸

仔细观察一下教室里的桌椅，分析一下它们的结构和受力方式。如果你发现它用起来有点晃动或不够稳定，能否找出它在结构设计方面的原因，然后大胆提出你的改进设想。

第三节　影响结构强度和稳定性的因素



学习目标

1．了解尺寸和形状是如何影响结构的强度和稳定性的。
2．略知不同材料的性能，能为结构选择合适的材料。
3．会选择正确的构件连接方式。

在初步学会了分析结构所受力和应力的基础上，我们还需要理解影响结构强度和稳定性（刚度）的因素，如果暂时不考虑使用环境或生产方式对结构的影响（属于外因），结构本身的大小及尺寸、结构材料的选择、结构所用的连接方式都属于重要的影响因素。可以这样讲，无论是机器设计还是建筑设计，它们的稳定性或安全性都取决于能否为机器的每一个零件或建筑物的每一个构件选择适当的材料和尺寸（包括形状）。

在进行下面的课程内容之前，建议同学们先做下面的小实验。



探究与交流

四种梯子的比较

图 1.25 是我们生活中经常见到的四种梯子式样，每种式样的承载的质量、支撑稳定性、结构强度和适用的材料都不大一样，请在表 1.1 中列出或说明它们的比较次序。

梯子是需要方便地移动或携带的，同时使用起来又要安全可靠。梯子的结构形式属于简单的桁架，由纵横梁或杆连接而成。请从梁或杆的材料选择、连接方式、截面形状三方面考虑提出你的最佳设计方案。

微信公众号：电子课本大全



（a）直梯　（b）人字梯　（c）带横梁人字梯　（d）可折叠梯

图 1.25　常见的四种梯子式样

表 1.1　四种梯子的比较

比较项目	(a)	(b)	(c)	(d)
承载的质量				
支撑稳定性				
结构整体强度				
选用木材				
选用铝合金				



实践与体验　杆件“失稳”试验

取一根细长的杆件，例如薄木条，不用很大的力往下压，这根木条就要被压弯（图 1.26），再用力一点，它就要折断。杆件越细长，越容易被压弯，用术语来说就是，杆件越细长，就越容易“失稳”。如果把同样的薄木条锯成短短的一段，再去压它，那么，即使你用力再大一些，也休想将它压弯折断。这时，它只可能在应力达到强度极限时被压坏。

从这一现象可以知道，薄木条的“失稳”破坏，不是由于压应力超过了强度极限而产生，而是因为它在受压时不能保持自己的直线形状而发生弯曲的缘故，也就是说，它不是由于强度不够，而是由于失去了稳定性。显然，使木条丧失稳定的压力，比起它受到强度破坏时的压力，要小得多。

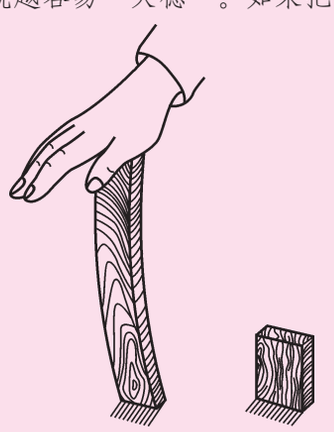


图 1.26　杆件受压时的“失稳”

微信公众号：电子课本大全

一、结构大小和形状的影响

考虑结构的尺寸大小和形状时要善于分析结构的受力特点和功能要求。

传说在古代，有个城市的居民为了使自己的城市名扬四海，决定在他们的城内修建一座高塔（根据他们的说法“高要高到天上”）。他们花费了很大的力量，塔是逐渐地高起来了，但最后塔的质量超过塔基所能承受的质量，塔也就像传说的那样“自己压倒了自己”。

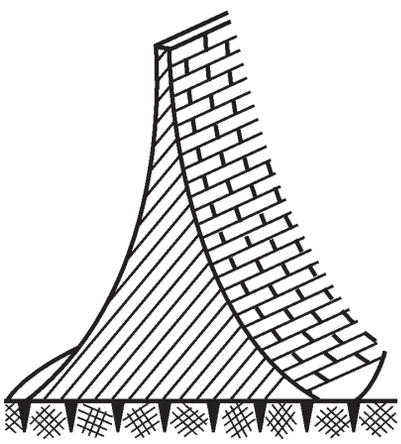


图 1.27　墙的最佳截面

由于拉伸和压缩变形强度的计算比较简单，所以问题很快得到解决。人们由此也就明白了，砖墙的容许最大高度与它的厚度无关。比方说，假设厚度为一块砖的墙可砌高到 50m，是不是可以将墙的厚度增大到两块砖而同时增加墙的高度呢？显然不行，因为墙的厚度增大一倍，墙本身的质量也增大一倍，而墙基单位面积上所承受的力并没有发生变化。如何使墙砌得更高一些呢？有两种办法。一是把墙基加宽，不增加墙的质量；另一种办法是减少墙自身的质量，而不减小墙基宽度，这就必须使墙的上半部厚度小于墙基的宽度。经过计算证明，墙的截面为某种曲线形时最佳，如图 1.27 所示。

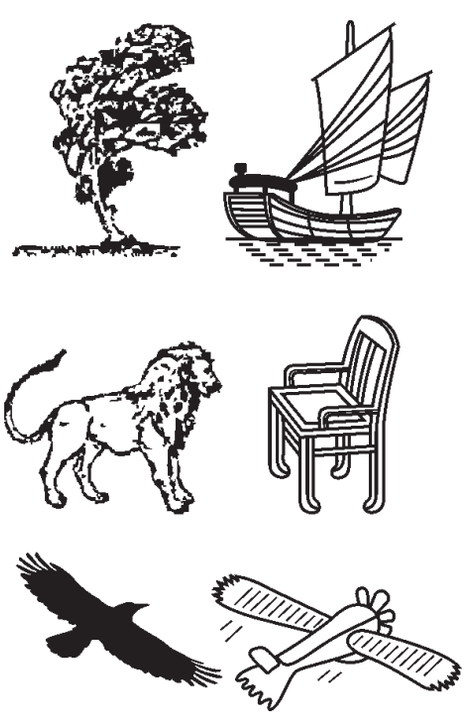


图 1.28　自然界对结构设计形状的启发

零件的形状首先与它的用途有关，其次与零件承受什么样的力有关。从古代到现在，对于同一用途的零件形状往往可以形成一种“标准”。大自然这个设计家经常告诉人们如何选择零件的形状。船用桅杆在任何时候都是根部较粗顶部较细，是人们从大树在狂风中不倒的现象得到了启发；第一架飞机的机翼类似于飞鸟的翅膀，源于人们对飞鸟的观察；而明清时期许多桌子、椅子的腿都是按照动物爪子的形状做成的（图 1.28）。

我们已知道用于结构的材料



新视窗·知识外延

在生物圈有这样一种现象：陆生动物与水生动物的骨骼结构存在着明显的差异，比如骨架的形状、大小等。你能根据结构的受力特点来简述其中的道理吗？

微信公众号：电子课本大全

的截面尺寸大小直接影响受力的大小，对于同种材料来说，截面积越大承载能力越强。那么现在我们进一步研究另一种情况：两个截面面积相等，但形状不同的截面中，究竟哪一种截面更有利于结构的强度和稳定性？

（一）工业用型材的截面形状

就拿具有矩形和圆形截面的同种材料来比，假设它们的截面面积相等（图 1.29），从上一节的材料弯曲变形后的受力分析可知，在梁的上下边缘处应力最大，而越靠近中性轴处应力越小。圆形截面在离中性轴较远的上下边缘地方的面积较小，而接近中性轴的地方面积放大，这样就有很大一部分材料没有充分发挥作用。显然矩形截面比圆形截面要好些，圆形截面材料不及矩形截面材料来得经济。

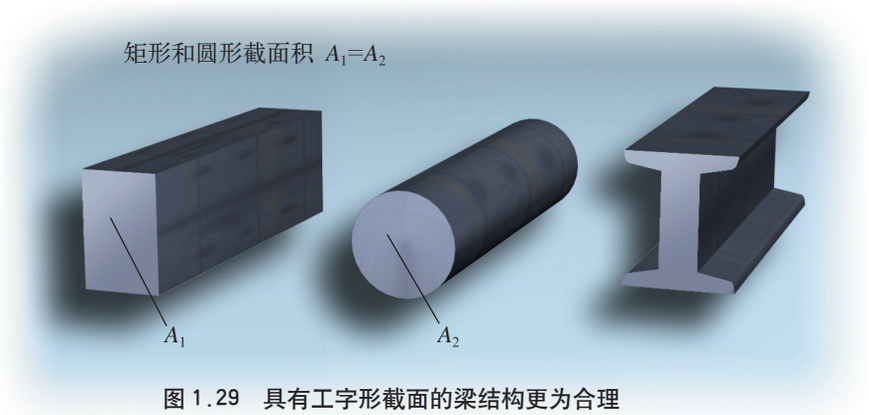


图 1.29　具有工字形截面的梁结构更为合理

当然，矩形截面还不是最经济的，最经济的办法就是尽量做到物尽其用，即尽量将中性轴附近的材料移放到离中性轴较远的地方去。根据这个原则，于是就出现了工程上常用的工字梁等型钢的截面（图 1.29）。拿标准的工字钢梁来看，它的强度大约要比高度和截面面积相同的矩形截面梁大一倍。所以，在工业和民用建筑以及桥梁等工程上，常常采用工字钢梁，它可以在减轻自重的同时有效地提高结构的稳定性。

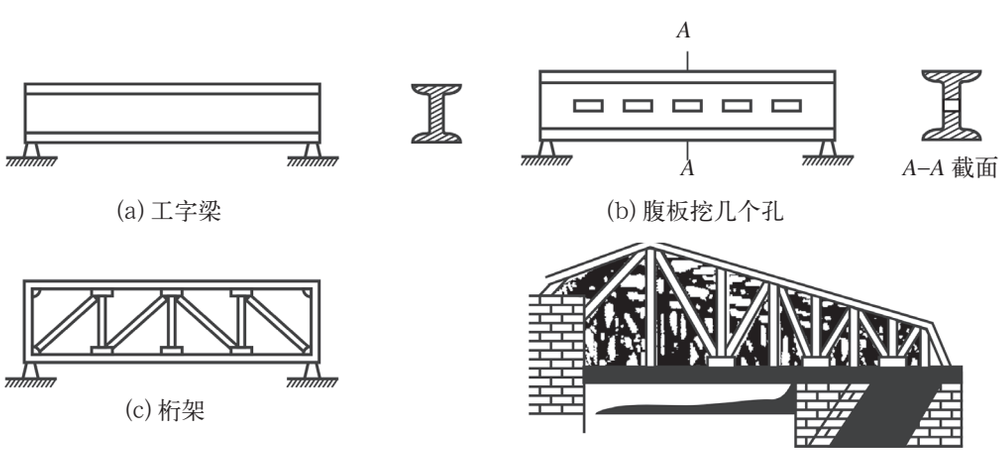


图 1.30　对工字梁结构的再改进

微信公众号：电子课本大全

那么是不是工字梁就是最经济的梁呢？还不是，为什么？因为：

(1) 它的腹板部分（工字梁的上、下两个“翅膀”叫作翼板，中间部分叫腹板）的材料仍然不能被充分利用；

(2) 当跨度很大时，梁的自身质量将会引起较大的弯曲。例如，高 20cm、长 20m 的工字梁，由于自身质量产生的弯曲使梁的中点下移达到 13cm，若长度达 50m，梁就会因自重而折断。所以，对于大跨度的情况，工字梁就无能为力了。

要弥补上述第一个缺点，可以将工字梁腹板中的一部分材料挖去，形成许多孔口[图 1.30(b)]。由于这个想法，自然而然使我们又想到了用杆件铰接成的结构来代替工字梁。这种结构就是前面提到的桁架[图 1.30(c)]。桁架的特点是各个杆件都只受到轴向拉伸或压缩的作用，而不受弯曲。这就等于将弯曲变为拉伸和压缩了。因此，桁架与工字梁相比，不但大大节省了材料，而且由于它的性能改变了，很适于做大跨度的桥梁结构，这样也就克服了上述工字梁的第二个缺点。



实践与体验

哪一个蛋更容易被撞破？

美国《科学和发明》杂志于 20 世纪 30 年代曾提出一个引起广泛兴趣的问题：“如果你左手握住一个鸡蛋不动，右手拿一个鸡蛋去撞它（假如两个蛋都是一样的坚硬，而且都是用同一部分互相碰撞），问哪一个更容易被撞破：是被撞的那一个呢，还是去撞的那一个？”根据上面讲述的有关结构与强度的概念，你能否试着回答这一问题。

提示：请根据薄壳结构的受力失效特点和运动着的蛋壳内流体对蛋壳的作用力来分析问题。

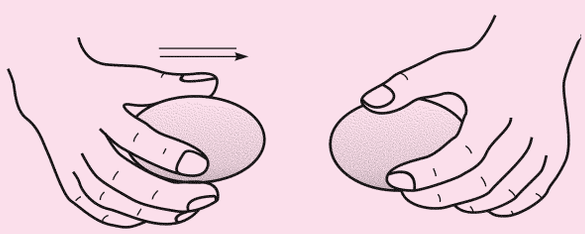


图 1.31　哪一个鸡蛋更易碎

（二）几何形状与结构稳定性的关系

桁架的几何形状与结构稳定性还有直接关系。在不考虑材料变化的条件下，结构体系受力后若能保持其几何形状和位置不变，则可称为几何不变体系，图 1.32(a) 所示的三角形桁架即为这类体系的一个例子。我国农村的许多木结构房子到处可见三角形桁架。可是另有一类体系，如图 1.32(b) 所示为一个四边形桁架结构，即使只受到很小的载荷 F_P 作用，也非常容易引起几何形状的改变，这类体系称为几何可变体系。显然，土木

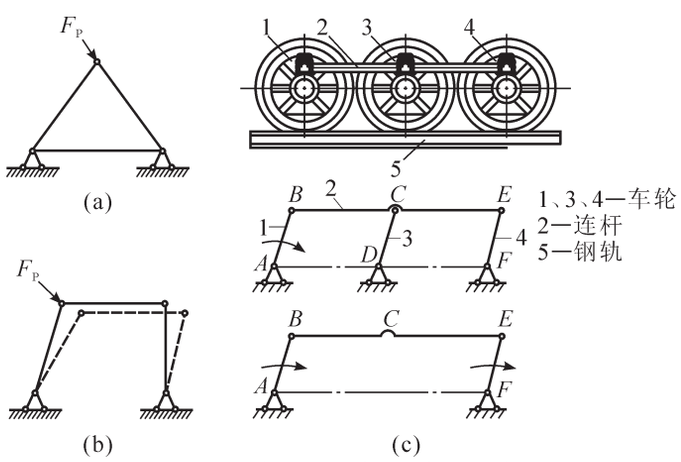


图 1.32　三角形和四边形桁架及其应用

微信公众号：电子课本大全

工程的建筑结构为了保持结构稳定性不能采用几何可变体系，而只能采用几何不变体系。但是在机器制造时，有时需要使零件之间能够相对运动，就需要采用几何可变体系。图 1.32(c) 所示为火车车轮联动机构，采用了平行四边形结构，它是由 1、2、3、4 四根刚性杆联动，杆的相交节点类似铰链形式，车轮 1 为主动轮，当主动轮转动时通过杆 2 驱动后两轮的杆 3、4 绕轴转动，三个轮子就可以实现等速联动。

（三）结构与对称

结构的对称与均衡同稳定性也有关系，对称与均衡是指物体在中心轴线两侧以某种形式表现出的一种同等分配的状态。图 1.33(a) 所示是一种对称的静态平衡，具有稳定性，它表现为两种等形等量的对象关于中心轴线对称与均衡。图 1.33(b) 和 (c) 则是一种非对称的动态平衡，具有视觉上的不稳定感。它们表现为两种在视觉上等量不等形的对象 (b) 或不等量也不等形的对象 (c) 对竖直轴线中心点进行调整后重新达到平衡。对称与均衡是自然界事物存在的法则之一，也是结构设计中的美学原则之一。如果我们细心观察就不难发现，自然界存在的许多美的形体都是对称而均衡的，如人体、昆虫、树叶等都是对称的形体。

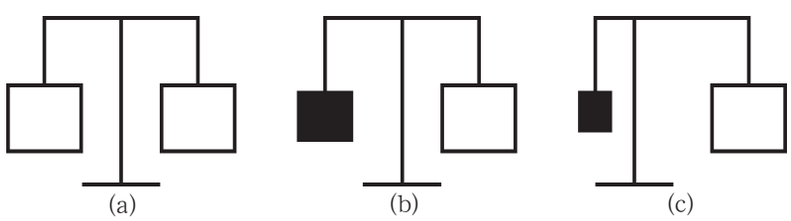


图 1.33　对称与均衡的表示

二、材料性能的影响

由于不同种类材料的密度、极限强度、变形方式、工艺特点各不相同，所以在结构设计时，还要考虑材料的选择问题。《技术与设计 1》中已讲过材料，这里再比较深入具体地介绍一下在日常生活中经常见到的木材、钢铁和塑料材料，主要着眼于它们的力学性能。

（一）木材

木材是最古老的结构材料，也是越来越稀缺的资源。无论在视觉上和触觉上，木材都是多数材料无法超越的。木材独特美丽的纹理、视觉上的温暖感和亲和力，以及它的易于加工、造型与雕刻，一直都是古今中外各行业设计与制造的重要材料。我国的古代建筑几乎是清一色的木结构，我国古代建筑工匠发明的木材卯榫结构充分体现了木结构设计的博大精深。在现代社会，木材在家具设计中仍扮演着重要的角色。

总的说来，木材的强度和刚度不及钢材，所以在重载结构场合不再使用；但木材的质轻、高韧性、易加工性非常适合同学们作为制作或实验用的模型材料。应当指出：木材的内部纤维组织与其他材料不同，它在不同的方向具有不同的力学性能，这叫作各向异性。如果取木材试件来做拉伸压缩试验，就可看到当受力方向与木纹方向相同时（叫作顺木纹），它的强度极限要比受力方向与木纹方向垂直时（叫作横木纹）大 3 ～ 8 倍。因此，在工程上，用木材来做构件时，要注意木纹的使用方向（图 1.34）。

微信公众号：电子课本大全

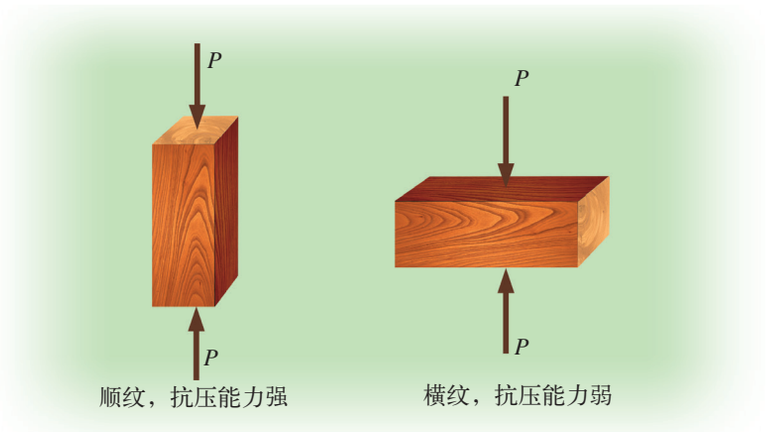


图 1.34　木材的各向异性

（二）金属

金属材料主要指钢铁、铜和铜的合金、铝和铝的合金以及镁和镁的合金等。如果我们需要强调结构设计的耐久性、稳定性、可靠性，尤其对于像工程机械、建筑物、运载工具这些承载大、可靠性要求高的结构件，几乎都首先考虑用金属材料制造。金属材料作为结构材料的优点是显而易见的：

(1) 密度大、强度高：例如钢材密度大，其强度和刚性较高，所设计构件的截面小，自重轻，便于运输和装拆。

(2) 材质均匀、工作可靠：钢材内部组织均匀，各个方向的物理力学性能接近，是理想的弹塑性材料，用一般工程力学方法计算的结果与结构的实际受力状况较为符合，工作可靠。

(3) 塑性和韧性好，抗冲击和抗震动能力强：由于塑性好，一般情况下不会因偶然超载或局部载荷而发生断裂破坏；由于韧性好，对动态载荷的适应性强。



图 1.35　各种钢材、木材、塑料制成的椅子



新视窗·背景外延

现代家具的发展趋势正在从传统的“木器时代”跨入“金属时代”与“塑料时代”。

将金属材料、塑料等广泛应用于家具设计是从20世纪开始的，开创了现代家具设计的新方向。图 1.35 中的各种椅子设计体现出弹性与强度、坚固与轻巧、纤细与粗犷、美观与实用的设计风格，这样的产品是综合运用结构原理、先进工艺、造型美学的结果。

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 方法外延

合理利用材料可以有效提高结构的稳定性，例如钢筋混凝土结构。

人们最早利用混凝土只不过把它当作人造石材，并没有想到会有今天这样惊人的效果和影响。今天混凝土已经渗透到我们生活、生产的各个角落，从海港建筑到高山上的岗亭，从一般的平房到摩天大楼，从乡间小道到万人广场都能见到混凝土。为什么混凝土能得到如此广泛的应用呢？

首先是混凝土找到了一个很好的伴侣——钢材。作为人造石材的混凝土与一般石材一样，虽有较好的耐压性能，但经不起拉力，除了其形状很容易满足人们

（4）制作工业化程度高，施工周期短：结构件在专业化工厂生产，质量易于保证，现场拼装方便。

基于以上优点，金属结构在国民经济各部门中得到了广泛的应用。例如，建筑部门的工业厂房建筑结构和大跨度、多层或高层民用建筑结构，交通运输部门的车辆、船舶和桥梁结构，化工部门的容器，水利电力部门的水工闸门、压力钢管和输电铁塔，机械部门的重型机械、工程机械和起重机械的结构等，都采用金属结构。

但是大型金属结构由于焊接产生的残余应力和其他缺陷的影响，在低温（−20℃以下）或直接承受较大动力载荷时可能发生突然断裂。另外，如防腐不好则容易锈蚀。钢材在高温（超过 300℃）时会产生蠕滑变形而失去承载能力。这些问题，设计者应予以足够重视。

（三）塑料

日常生活和工业生产上用的塑料基本上属于人工合成材料，来源于石油、煤炭等有机矿物的裂解产物，主要在轻型、耐腐蚀、低能耗、低成本结构中使用，在大型的工程结构中目前尚不能单独作为结构材料应用。塑料的耐老化、耐高温性能和稳定性较金属差。

所谓合成材料，实际上就是高分子化合物。这些材料的每个分子含有大量的碳氢原子，而且它们是以各种各样的方式结合在一起的。这些巨大的分子的相对分子质量可能达到数十万甚至数百万。

按合成材料的性能特点来分，主要有三大类：合成橡胶、合成塑料和合成纤维。

例如，尼龙丝是一种合成纤维，其纤维方向的拉伸强度与结构钢丝的强度相当，所以降落伞的绳索就可以用尼龙纤维来制作，质轻而高强。

用苯酚和甲醛合成的酚醛树脂和玻璃纤维黏结在一起，可制成一种又结实又轻盈的材料——玻璃钢。用它可以制造船体、汽车车身等，甚至飞机的机身也开始采用玻璃钢。

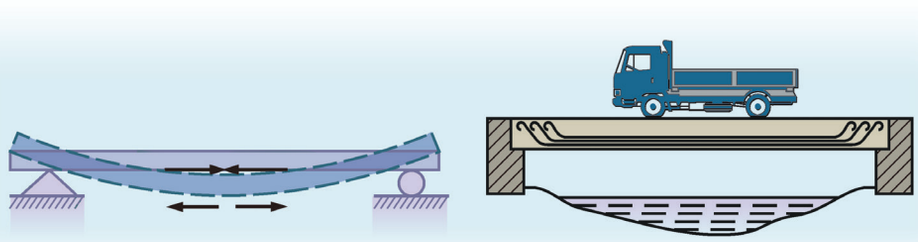


图 1.36　桥梁混凝土材料

微信公众号：电子课本大全

三、连接方式的影响

工程上的结构是由多个构件按不同的连接方式组合而成的，这里介绍常见的焊接、铆接、螺接、胶接、榫接等方式。

（一）焊接

即两种材料通过高温熔化，产生原子间的结合和扩散作用而形成焊缝，从而将两个零件连接成一个整体[图 1.37(a)]。这是钢材连接的主要方法，优点在于构造简单、省料省工，能实现自动化操作，焊缝的气密性、水密性都很好；但也存在焊接影响区使材质变脆、产生残余内应力与零件变形的缺点，可能影响结构的承载力和正常使用。焊接属于永久性不可拆卸连接。

（二）铆接

这种方式需事先在构件上钻孔，然后再用加热的铆钉或常温下的铆钉进行铆合[图 1.37(b)]。铆接的最大优点在于韧性和塑性好，传力可靠；缺点是费料费工。现在已很少采用大面积的平面铆钉连接了，铆接属于可拆性连接。法国巴黎著名的埃菲尔铁塔就是采用铆接的。

（三）螺栓连接

它是在被连接件上钻孔，穿入螺栓，拧紧螺帽，实现可拆式连接的一种方式[图 1.37(c)]，简称螺接，通常用于结构的安装连接。普通螺栓连接件还有螺母、垫圈或弹性垫圈。为了保持连接的紧密性和可靠性，必须适当拧紧螺母，从而在螺杆内产生一定的预紧力。为了防止螺母在工作中松动，可采用弹簧垫圈或双螺母锁紧等措施。

（四）胶接

它是在一定条件下，用胶黏剂将两个零件连接在一起，并使其接合处具有足够强度的一种连接工艺。胶黏剂之所以能将两个零件牢固地连接在一起，其根本原因在于胶黏剂和被粘物表面间发生了物理或化学作用。

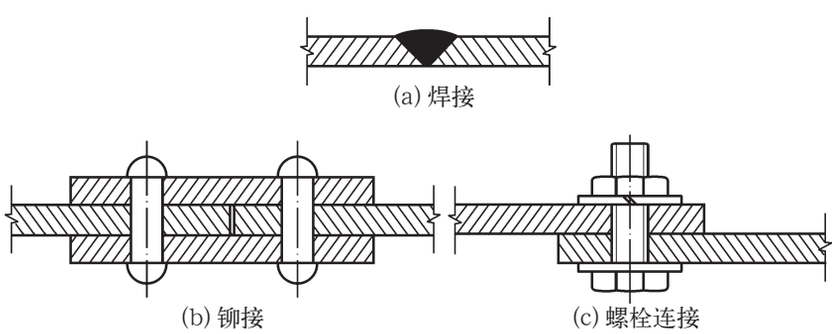


图 1.37　焊接、铆接和螺接示意图

胶接大量用于飞机制造业，如占整个飞机表面积的 85%～90%的铝制蒙皮就采用胶接技术[图 1.38(a)]，从而替代了几十万个铆钉。由于没有铆钉，减少了机身表面的“起皱”和凸凹，降低了空气对飞机的飞行阻力，



新视窗·方法外延

的要求外，它与石材相比并没有什么特殊的优点。但是它有一个重要的性质，那就是它的膨胀系数与钢材很接近，因此它可以与钢材紧密结合起来。两种材料要永远黏合在一起，关键是它们的膨胀系数要一样，否则热胀冷缩，彼此胀缩不同就要脱离开来，而混凝土与钢材的结合是经得起长期考验的。另外，混凝土善于受压，钢材善于受拉，两者结合起来作为梁来使用正好能够发挥彼此的长处。因为在梁里总是有一侧受压而另一侧受拉的。图 1.36 所示是所谓简支梁，即两头的支座均能允许梁端自由转动。它在受载过程中，要产生向下的弯曲变形，这必

微信公众号：电子课本大全

又减小了飞机的质量，因而提高了飞机的飞行性能。飞机机翼内部的蜂窝结构也多使用胶接 [图 1.38(b)]。

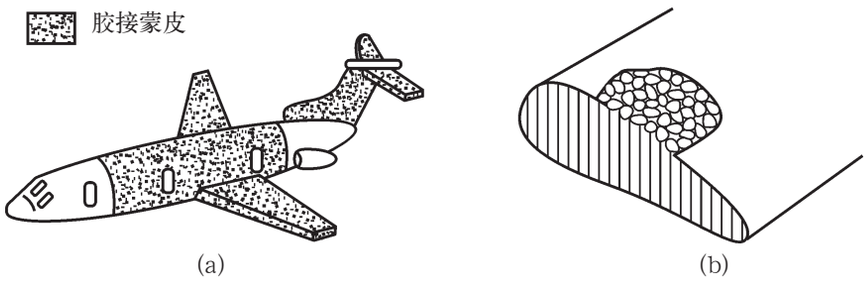


图 1.38　胶接在飞机上的应用

（五）榫接

主要是家具或建筑构件中木材的连接方法，使用榫接可以有效地避免钢钉、螺钉连接所产生的应力集中，减少结构的重量，提高结构的整体强度。

榫接的榫头形状、连接形式如图 1.39 所示。

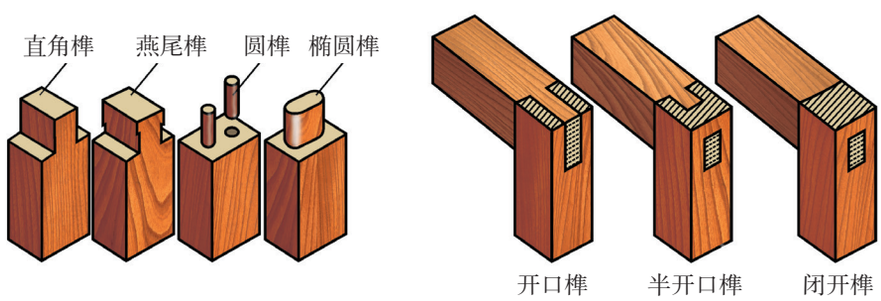


图 1.39　榫接示意图

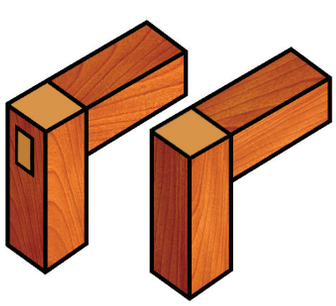
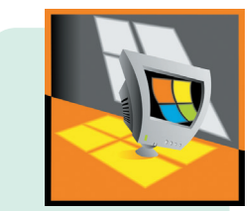


图 1.40　明榫和暗榫

榫接可以做成明榫或暗榫接合（图 1.40），明榫榫端外露，影响家具的外观和装饰质量，但接合强度大；暗榫榫端隐蔽以增加美观，但接合强度弱于明榫。一般家具，为保证其美观性多采用暗榫接合。受力大且隐蔽或非透明涂饰的制品，如沙发框架、床架、工作台等可采用明榫接合。

箱柜是由四块以上的板材构成的框体或箱体，如老式的衣箱、抽屉等。箱柜的接合方式可采用直角多榫接合、燕尾榫槽接合、直角榫槽接合、插入榫槽接合等榫接方式，见图 1.41。



新视窗 · 方法外延

然使上边的材料缩短，下边的材料拉长，即总是上边受压下边受拉。进一步可以说：任何承受弯曲的构件总是一边受拉，一边受压。若把钢筋放在受拉一边，将混凝土放在受压一边，正好符合梁内的受力分布原则。

微信公众号：电子课本大全

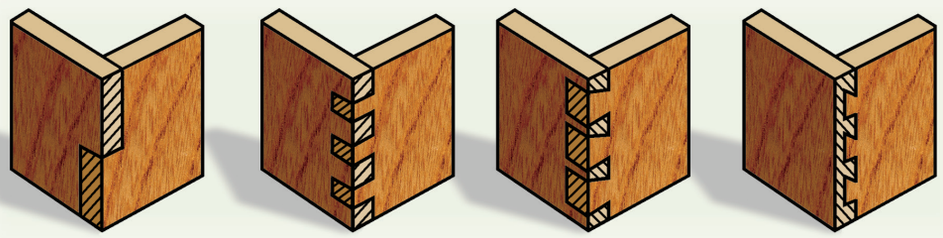


图 1.41　用于箱柜的榫接方式

（六）连接处的过渡处理

在结构连接处需要考虑过渡的方式，如图 1.42(a) 所示结构为薄壁圆管垂直立于基板表面，由于管壁薄受力后在轴线方向上易变形。如果在圆管和基板连接处均匀分布加强筋板，就可减少或避免管的变形，有利于提高结构的稳定性 [图 1.42(b)]。

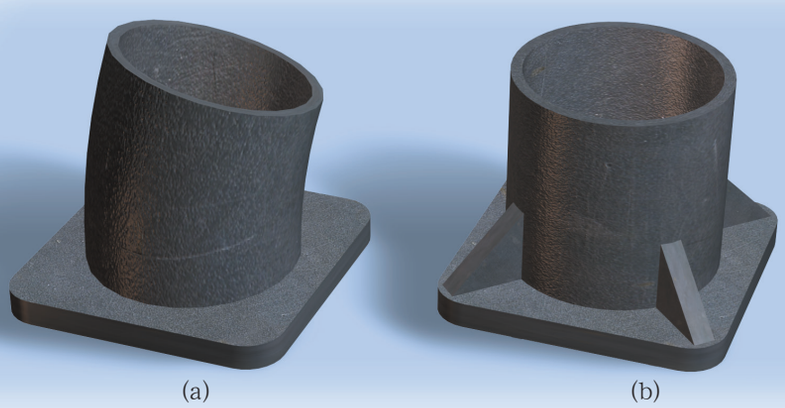


图 1.42　过渡处的筋板有利于提高结构稳定性



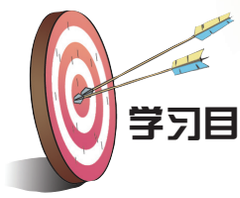
活动延伸

1. 观察一下你的自行车，看看有哪些零件是由金属材料制成的，哪些零件是由塑料制成的，哪些金属材料零件是可以用塑料替换的（并讲明原因）。
2. 家具和装修都要用到胶合板，如我们常用到的三合板、五合板，它们通常是由多层很薄的木片依靠胶黏剂作用叠压而成的，想一想为什么必须是奇数层？如有条件可参观一下胶合板加工厂，看看每一层木片的木纹方向有何规律，想想其中有什么道理。
3. 观察一下身边的桌椅，分析一下它们用到哪些连接方式；如果你发现桌椅用起来有点晃动或不够稳定，能否找出它在连接方面的原因。

微信公众号：电子课本大全



第四节　结构的模型或原型的设计与制作



学习目标

1．学会提出设计方案并确定最佳方案。
2．学会操作工具、量具和设备对材料进行加工，完成某种产品的结构模型或原型制作。
3．学会通过实验判断结构是否合理和科学，发现问题并改进。

当你对结构的概念、结构的应力分析和影响结构优劣的因素等原理性知识有了基本的理性认识后，应该将上述知识要点应用到具体的实践活动中来，用你已经领悟的道理来指导结构的设计或制作，并能发现或分析新的问题。当然结构设计或制作过程是一个脑和手并用的过程，所以这也是一个借助于工具进行操作的技能学习过程。在从事结构设计及制作过程中应注意培养以下几方面的基本能力或素质：

(1) 良好的空间几何概念；
(2) 视觉记忆能力（善于观察并记住想做出的图形）；
(3) 对结构外形的比例是否匀称感觉灵敏；
(4) 能绘制设计图，并学会利用规格、标准、技术指导资料以及设备或工具的使用说明书；
(5) 了解工程美学和人机工程学的基本要求。

《技术与设计 1》介绍了模型与原型的概念、简单模型的制作等基本知识和方法，本节以野外考察休闲椅为例，进一步介绍产品结构设计的一般过程以及产品模型的制作方法。

一、分析结构的作用和受力情况

野外考察休闲椅是为野生动物园的游客野外考察及休闲设计的。游客既可坐在椅子上对野外动物进行考察，又可在椅子上休息。考察休闲椅的结构设计，首先要保证游客的安全和舒适，其次要考虑实施结构所需的材料、工艺和成本等因素统筹兼顾，所涉及的工作内容如图 1.43 所示。

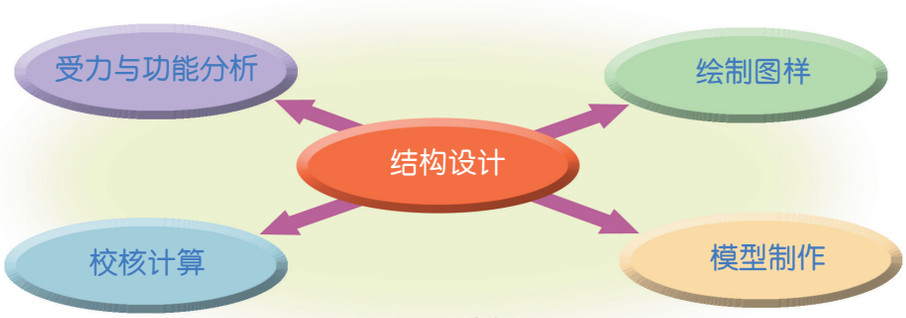


图 1.43　设计内容

微信公众号：电子课本大全

（一）设计问题的确定

(1) 名称：野外考察休闲椅。

(2) 目的：为了满足部分游客在野生动物园进行考察及休闲的需要，就需要设计一个安装在树干上、高度可调的、可供一边观察一边休闲的椅子。

(3) 总体要求：

①椅子应该可以折叠，以便携带；

②安全并且舒适；

③距离地面 1.5 ～ 3m(图 1.44) ；

④椅子的最大承受载荷大约 150kg；

⑤结构要求尽量简单、轻巧，适于放置在小汽车后备厢内。

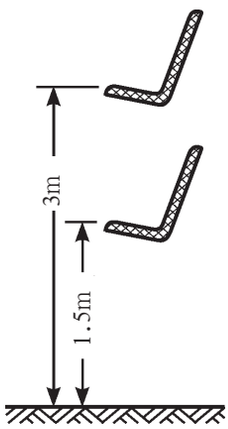


图 1.44　野外考察休闲椅的高度

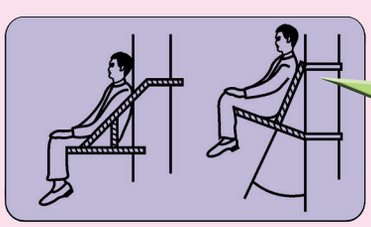
（二）列出初步设计方案

这一阶段可以尽可能多想一些方案，并需要徒手绘图技术绘制初步的构思草图，也可以结合使用工程设计要求的绘图方法和其他图示法。

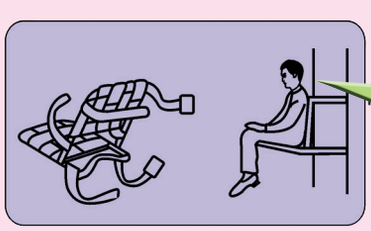


实践与体验　三种考察休闲椅设计方案比较

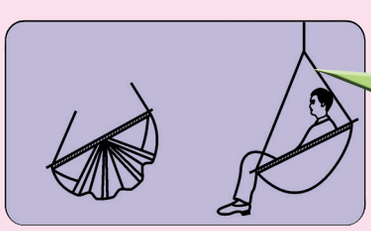
初步拟订的结构设计方案有三种，分别如图 1.45 所示。同学们可以在老师的引导下讨论一下方案的取舍（当然，鼓励提出自己的设计创意与此三种方案比较），主要考虑下面三个问题：



方案 1：拟采用桁架结构，由钢或铝型材杆架和木质薄板构成，坐垫角度如可调则更舒适。



方案 2：拟采用高强度尼龙编织＋空心钢管结构，用带子将椅子捆绑在树上。



方案 3：拟采用帆布＋钢管结构，钢管对帆布起支撑和固定作用，钢管做成的围框靠尼龙吊绳固定在树上。

图 1.45　三种初步的构思草图

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 知识外延

尼龙绳的蠕变现象：你如果在两棵树之间系上一根尼龙绳并使绳子绷紧，然后挂上一重物，过两天后你取下重物，一定会发现尼龙绳变松了，实际上它是比原来延长了，这一现象就叫作材料蠕变。

（1）首先需要考虑安全性。因为尼龙或帆布材料在长时间应力作用下易发生蠕变，采用尼龙或帆布材料编织椅座并与树干绑定、悬吊的安全性受到质疑；

（2）考察需要有开阔的视野，椅子的结构应有利于观察；

（3）根据经验，位于空中的座椅应该强调结构的整体刚性，否则游人容易产生不安全感，影响考察与休闲。

提示：由于桁架结构轻巧稳固，整体结构刚性较强，有利于考察和休闲。所以，最后决定采用方案 1。

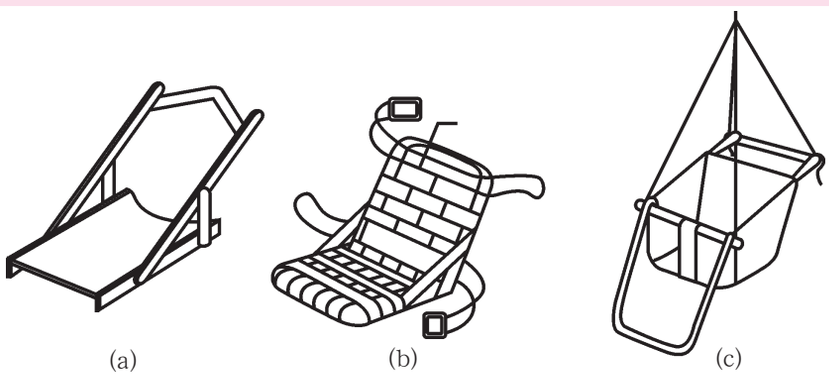


图 1.46　三种方案的立体图

（三）设计决策（参看装配图 1.49）

（1）结构：采用可变角度的三角桁架结构支撑载荷和维持整体稳定，靠树干和钢架、胶垫的摩擦力保持高度，整体结构较轻同时具有足够的刚度。

（2）材料：选用 15 ～ 20mm 厚的木质层合板做坐垫，选用 3# 等边角钢做椅子左右的可变角度的三角桁架，4# 等边角钢做 V 形支架，连接件选用 M8 螺栓螺母、ϕ6 抽芯铆钉、6mm 厚橡胶垫片。

（3）适用范围：直径 25 ～ 45cm 的树干，固定载荷质量不大于 150kg。

（四）结构分析

本结构的主要载荷是人的质量，属于恒定静载荷，所以仅需在强度校核时考虑主要受力件的极限应力（就是材料的抗拉强度，材料一旦选定，抗拉强度数值可从手册中查出）是否小于实际应力（由载荷决定）。

考察休闲椅的主受力部分如图 1.47 所示，为三角形的桁架支撑系统，结构稳定性主要取决于 A、B 两杆强度。为便于分析、理解，这里假设

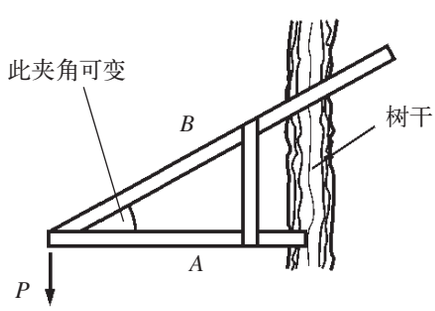


图 1.47　考察休闲椅主要构件的受力分析简图

微信公众号：电子课本大全

载荷集中在图 1.47 所示的铰接点上。这时 A 杆受压力，B 杆受拉力，考察休闲椅的负载可用矢量图示法决定，从中计算出每一根钢架上应该承受的载荷。

为了进一步分析验证，建议可分别按缩小比例和 1∶1 比例做考察休闲椅的实物模型。测试考察休闲椅的实际性能和设计要求是否吻合，并检验它的舒适性和安全性。

二、设计计算

（一）应力计算

人的重力直接作用在坐垫板上，板的两侧用三角形桁架托住。三角形桁架结构简单，工作稳定，主要受力部分三角架结构由斜拉杆（此杆受拉）、横压杆（此杆受压）和两根连接杆组成，三杆的紧固件用螺栓和铆钉。坐垫板和三角架受力后，V 形架和橡胶垫与树干会产生足够的摩擦力，使椅子不会下滑。

在所有的受力构件中，三角形桁架的斜拉杆承受的是整个系统的最大拉应力。因此需要分析它的应力并进行强度校核，为后面制作原型提供选择材料的依据。

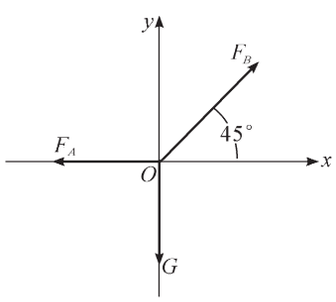


图 1.48　受力分析简图

设计前，首先给定考察休闲椅的最大载荷为 150kg，即 G = 150kg × 9.8m/s^2 = 1 470N。

在假定夹角为 45° 的情况下，画出考察休闲椅的受力分析简图（图 1.48）。由静力平衡条件 $\sum F_x = 0$，$\sum F_y = 0$，可以计算出斜拉杆所承受的拉力 F_B = 2 079N。

若选用 3# 角钢作为斜拉杆，其单根横截面积 $S \approx 150\text{mm}^2$，在全部载荷由一个三角架承担的条件下（人坐偏的极端情况），斜拉杆所承受的最大应力 $\sigma_{max} = F_B / S = 13.86\ \text{N/mm}^2$。

（二）强度校核

强度校核的目的是校验所选择的斜拉杆（3# 角钢）能否安全使用。其安全使用的条件是

$$\sigma_{max} \leqslant [\sigma]\ ,\quad [\sigma] = \sigma / k\ 。$$

式中，$[\sigma]$ 称为许用应力；σ 是所选材料的强度极限值；k 称为安全系数，其数值的大小主要由经验决定（一般可取 2 ~ 4）。由材料手册查出，3# 角钢所用材料的抗拉强度 σ_b 约为 220N/mm^2，取安全系数 k = 2，则 $[\sigma] = \sigma_b / k = 220 \div 2 = 110\ \text{N/mm}^2$。前面已经算出斜拉杆所承受的最大应力 σ_{max} = 13.86 N/mm^2，即 $\sigma_{max} < [\sigma]$，所以，选择 3# 角钢做考察休闲椅的斜拉杆是安全的。

增加安全系数最基本的办法是增加材料的截面积，但由此会引起重量的增加，所以增加结构的安全系数与减小结构的重量是一对矛盾。有关应用请参考本节后面的阅读材料。

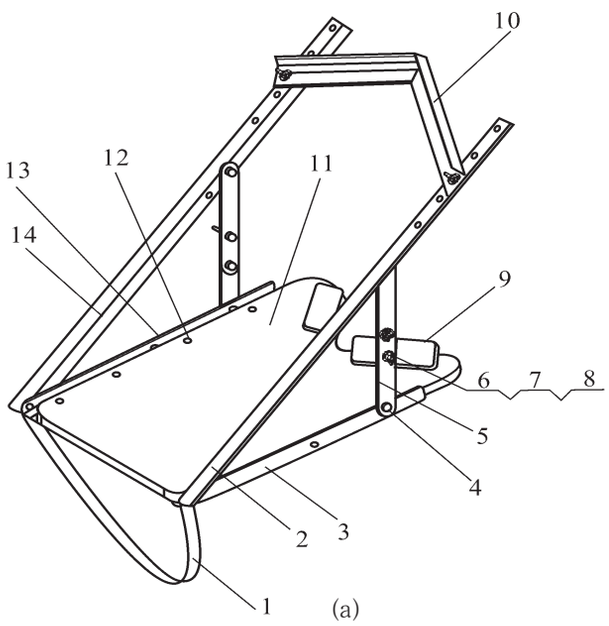
实际应用时，A、B 杆的夹角可能会在 30° ~ 60° 之间变化，上述计算未考虑夹角变化时引起的斜拉杆应力变化。构件的受力分析和强度校核需要比较深入的知识，这里只是介绍解决问题的基本思路和方法。

三、绘制设计图样

绘图是技术设计的重要环节，技术制图是工程师交流的语言，这里我们需要将前面提到的考察休闲椅的结构、组成、技术要求等内容表达清楚。图 1.49 用立体图样表达了整个椅子的结构

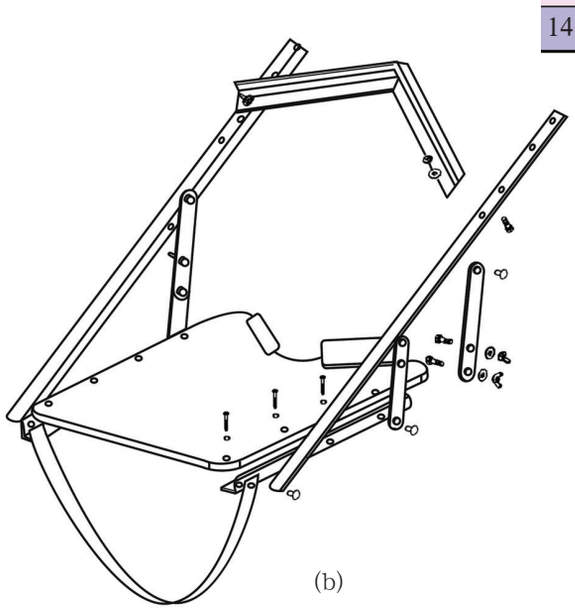
微信公众号：电子课本大全

和形状，组成椅子共有多少个零件或构件以及所选材料的规格型号。为了将每个零件制作出来，需要知道每个零件的材料、尺寸和形状，图 1.50 给出了主要零件图。



(a)

序号	代号	名称	数量	材料	备注
1	001	脚蹬	1	尼龙或帆布带	
2	002	左斜拉杆	1	3# 角钢	
3	003	左横压杆	1	3# 角钢	
4	004	铆钉	6	铝	ϕ8 抽芯
5	005	连接件	4	钢	厚度 4mm
6	006	六角头螺栓			M8
7	007	蝶形螺母			M8
8	008	垫圈			ϕ8
9	009	橡胶垫片	2		厚度2~4mm，弹性好
10	010	V 形钢架	1	普通钢	
11	011	坐垫	1	多层胶合板	厚度 20mm
12	012	螺钉 / 螺母	8		M5 十字槽沉头
13	013	右横压杆	1	3# 角钢	
14	014	右斜拉杆	1	3# 角钢	


(b)


(c)

图 1.49　考察休闲椅的装配图和效果图

四、制作模型或原型的意义

制作模型或原型能够通过以下几个方面给设计过程提供帮助：

(1) 获得在美学上可以接受的形态与色彩的设计；

(2) 检验细节设计及布局的有效性；

微信公众号：电子课本大全

(3) 检查零部件与整体结构的安全性；

(4) 便于直观地观察零部件之间是否相互干涉、影响，以及安装和维修的难易程度。

常用的模型有下列几种：

1．全尺寸模型

当要解决的问题涉及人机交互作用时，例如需要知道上面设计的椅子使用时是否舒服和安全，全尺寸模型应是最起码的要求，其制作方式和所用材料应尽量和实际产品一样。这种模型对设计者、使用者和负责制造过程的工艺人员都是十分有价值的。这种模型能够在设计过程的早期就显示出异常的部分，而这种异常部分若在设计后期才发现而给予矫正的话，往往是困难的和代价昂贵的。

2．比例模型

对于表现整体外表、用于展示目的或者实际设备太大时，缩小的比例模型将是一种极为便利的方法。但当从人机交互作用的因素来考虑时，这种模型的缩小比例仍应有一个严格的限制。对于每一项设计，其适当的缩小比例是由模型细节的表达程度和便于展览的可携带性确定的。

3．数字模型或电子样机

这是现代新产品开发中利用三维 CAD 技术，基于互联网，将结构设计、分析仿真、加工工艺合成的模型设计。例如，由于像挖掘机这样的工程机械产品有上万个零件，加工时间较长，为了避免制造实物样机所产生的时间和成本上的风险，现在有越来越多的制造企业在产品的招标会

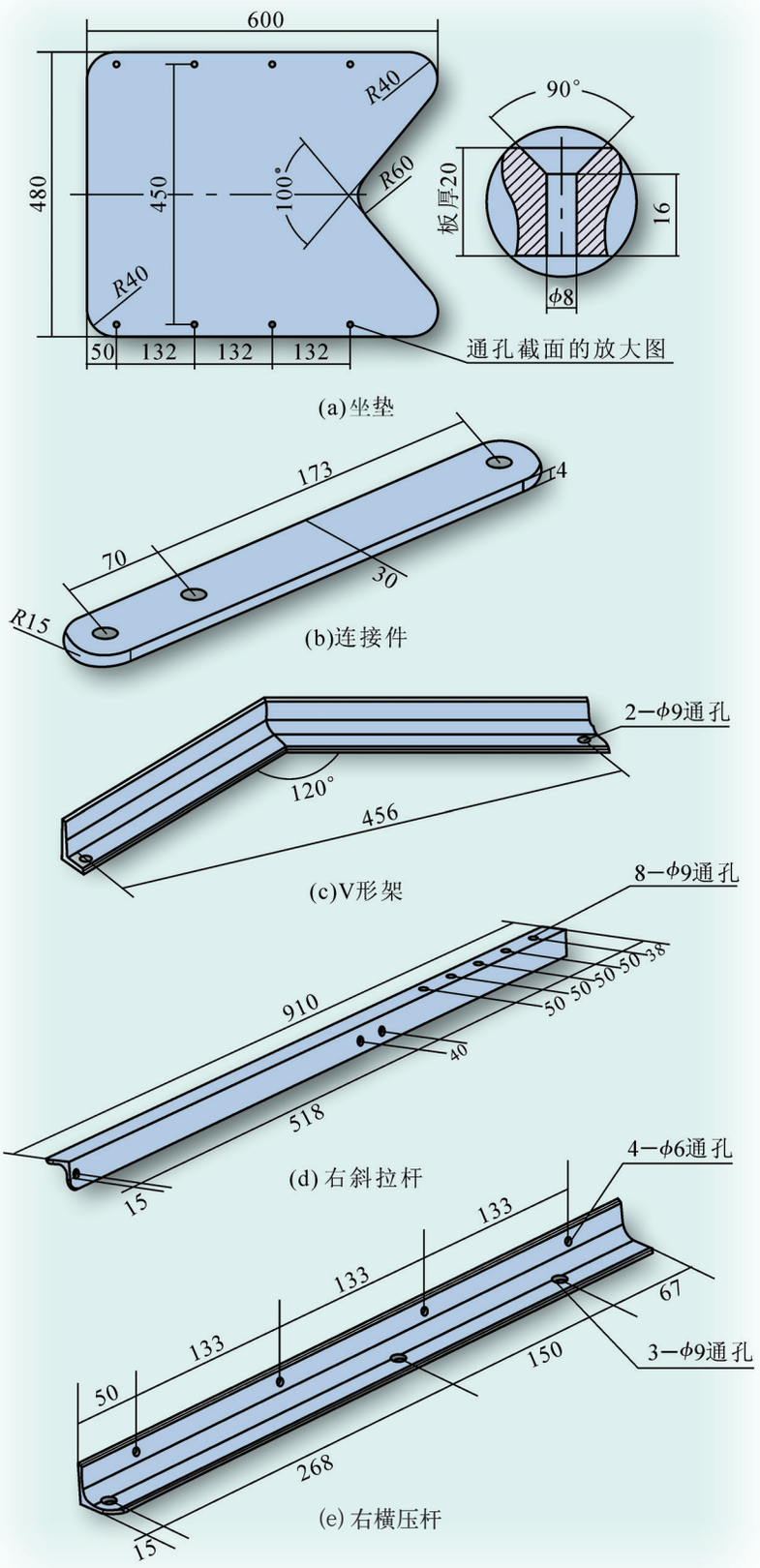


图 1.50　主要零件图（单位：mm）

微信公众号：电子课本大全

上直接向用户展示用计算机辅助设计 / 制造软件工具设计的三维数字化产品模型。这类模型包含了产品的结构、工艺、成本、功能等信息，通过这样的模型，用户可以深刻地理解产品的设计意图、功能特点和外观造型，而生产现场的技术人员可以依靠这一数字模型生成工艺图纸、生产设备的控制程序等制造信息，用最快的速度将产品生产出来。所以现代企业已经可以直接依靠三维数字化产品模型获取订单，极大地缩短了新产品开发周期，同时有效地降低了竞争风险，节约了人力和物力资源。例如图 1.51 就是某柴油机厂使用国产自主版权的 CAXA 三维实体设计软件完成的新型挖掘机的渲染设计界面。

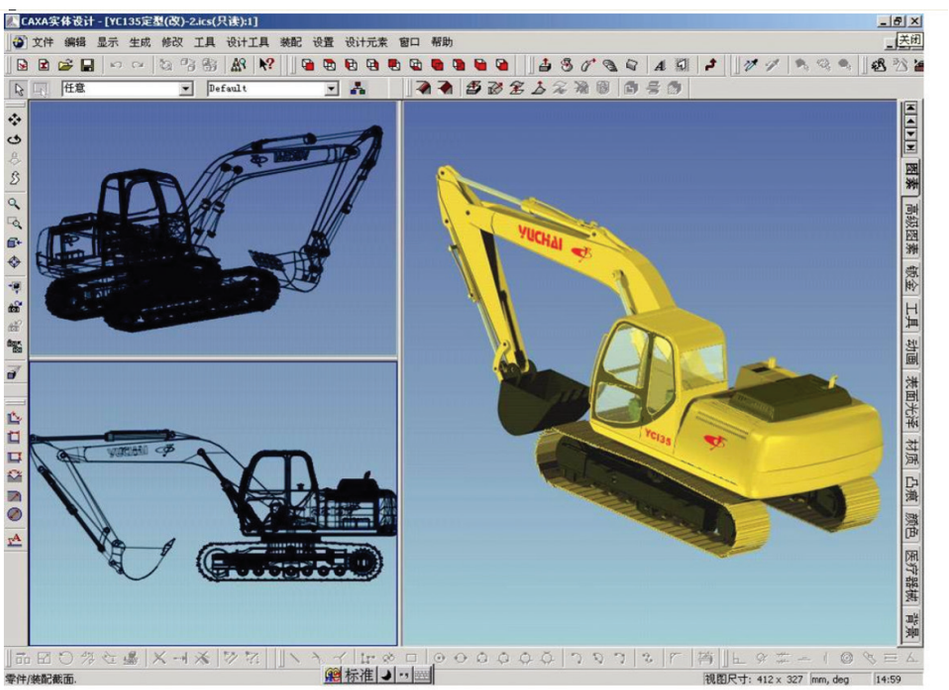


图 1.51　挖掘机的三维数字化模型

对于本章的实例，由于选用的材料较为便宜和易得，制作所需设备工具也很简单，建议同学们能亲手制作 1 : 1 的原型样品，这样同学们可以亲自验证一下，椅子是否舒适，吊在树上是否稳定安全。如果条件尚差，建议制作木质比例模型。

五、材料、工具和加工设备

（一）材料的准备

3#、4# 热轧等边角钢，4# 扁钢，15 ～ 20mm 厚的木质层合板，半圆头铝铆钉（ϕ8）或抽芯铝铆钉（ϕ8），M8 × 20 六角螺栓，M8 蝶形螺母，ϕ8 垫圈和 M5 × 25 十字槽螺钉，6 ～ 8mm 厚的橡胶垫，30mm 宽、0.5mm 厚的尼龙带或帆布带，2 ～ 3 种颜色的醇酸油漆。

（二）常用的测绘工具以及量具

图 1.52 所示为几种常用量具。测量精度要求不高的尺寸，一般用钢直尺、内外卡钳；测量较精确的尺寸时则用游标卡尺。

微信公众号：电子课本大全

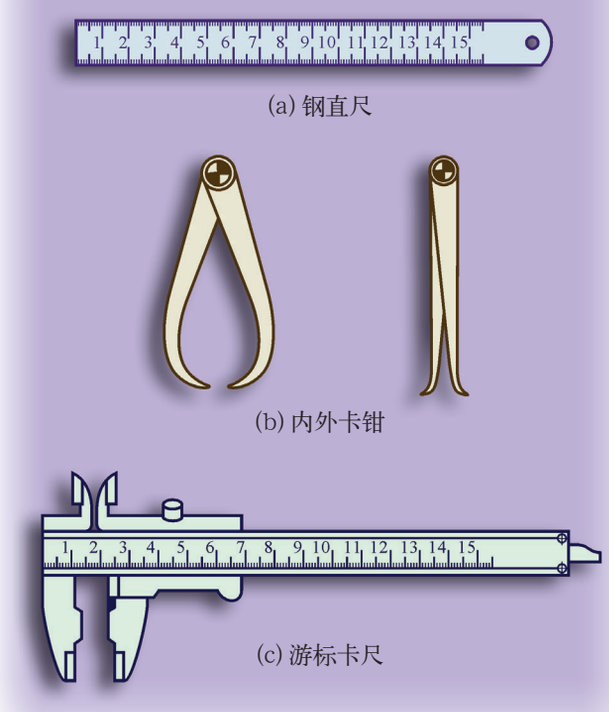


图 1.52　几种常用的测量工具

（三）制作工具或加工设备

制作时用到的五金手工工具有：扳手、手锤、手钳、钢锯、螺丝刀、钢锉刀、拉铆枪、电动曲线锯、电动手砂轮、划针等。

制作时用到的简单五金设备有：台虎钳、台钻或手电钻（带 ϕ5 ~ ϕ10 钻头）和角钢弯曲模工装。

六、制作方法和步骤

考察休闲椅的制作流程如图 1.53 所示。

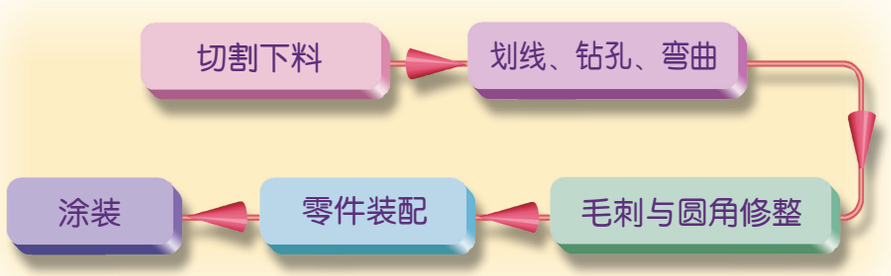


图 1.53　考察休闲椅制作流程



新视窗 · 背景外延

根据同学们所知或进一步调研，看看还有哪些其他制作模型的常用设备或工具？

微信公众号：电子课本大全



实践与体验　　考察休闲椅的制作

(1) 切割下料。利用台虎钳、钢锯等工具，根据零件图尺寸完成左右斜拉杆、左右横压杆、连接杆（扁钢）和 V 形架角钢的切割。

先用铅笔在层合板上绘出坐垫板的轮廓，利用曲线锯将其切割成所需形状。将尼龙或帆布带、橡胶垫切割成所需尺寸。

(2) 划线、钻孔和弯曲。使用划针和测量工具，在角钢上标出需要打孔的圆心位置，V 形角钢的弯曲稍麻烦些，需要预先准备一个弯曲模，如图 1.54 所示。如果弯曲力较大，可以在角钢的一端套上一圆钢管增加力矩。

请分析一下角钢弯曲处二直角边的受力，一边受拉力，一边受压力，如果弯曲角度很小，弯曲处会出现什么情况？

(3) 切割和打孔边缘处都会有毛刺，需要用锉刀锉掉。拉杆和横杆的一端需要用砂轮打磨成圆角以便于装配。

(4) 按装配图进行装配。先装配左右两侧的杆架，然后将坐垫板装配到杆架上，最后装配 V 形架。铆钉的铆接方法说明如下：

手工冷铆时，先把铆钉从被铆接件的钉孔中穿入，顶住铆钉头并将被铆接件压紧，然后用手锤锤击伸出钉孔之外的铆钉杆端头，在钉杆被镦粗的同时形成伞状钉头。锤击时方向、力量要适当，且次数不宜过多，否则会使钉头产生裂纹。（仔细想一下，为什么？）

如果采用抽芯铆钉（图 1.55），需使用拉铆枪。拉铆操作的主要过程是：首先根据铆钉芯棒直径选定铆枪头的孔径，并调整导管位置，然后将铆钉穿入钉孔、套上拉铆枪，夹住铆钉芯棒，枪端顶住铆钉头部，使芯体的凸肩部分对铆钉形成压力，铆钉出现压缩变形并形成铆钉头，同时芯棒被拉断。

一旦铆钉铆歪或开裂，这时可能需要清除原有铆钉重新铆一次。去掉半圆头铆钉钉头的常用方法是：将半球形钉头用手砂轮磨平，然后用平顶钻头将铆钉头轻轻划掉；也可先把钉头的圆顶锤平，再用略小于铆钉直径的钻头在钉头上沿轴线方向钻孔至适当深度，然后在孔中插入大小适当的铁芯折去钉头。

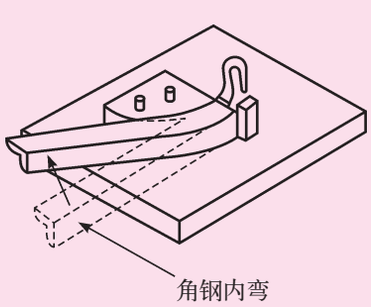


图 1.54　角钢在弯曲模上折弯



图 1.55　抽芯铆钉



活动延伸　　时钟模型的制作

将全班学生分成若干个小组（每组 3 ～ 5 人），参考图 1.56 自主设计并制作时钟模型，大小尺寸大致和台灯相近，设计的形状和结构要尽量不同于图 1.56 的式样。要求钟的整体质量尽可能小，连接可靠，尽量少用金属连接件，摆放稳定。课后比一下哪一组制作的时钟模型最轻巧且最稳定。说明：

微信公众号：电子课本大全

（1）要求从下述材料中选出部分或全部用来制作：厚度 3 ～ 5mm 的有机玻璃板材（应至少有 2 种以上颜色）、直径 8 ～ 12mm 的铝管或钢管、直径 10 ～ 15mm 的光滑圆木棒、厚度 10 ～ 20mm 的木板或塑料板。

（2）准备下列制作工具和器材：五金工具一套（内含螺丝刀、钳子、榔头和锉刀等），曲线锯和钢锯，手钻或台钻及钻头若干；测量工具（钢尺、圆规、卡尺等）；直径 3 ～ 5mm 螺钉、铆钉等金属连接件，或者外购些 502 或 914（环氧树脂）胶黏剂。

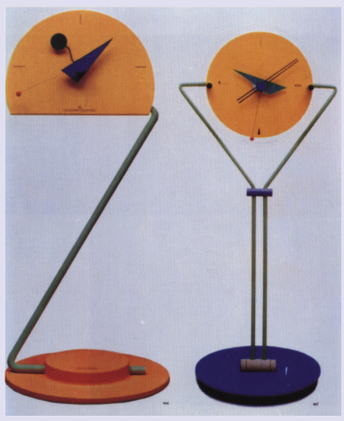


图 1.56　时钟示例



阅读材料

如何提高结构设计的安全性

在设计计算一个桥梁混凝土墩柱所能承受的载荷值时，假如混凝土材料的最大强度极限可以事先知道，能不能在确定桥墩的体积时，使混凝土内产生的应力正好等于强度极限呢？似乎是不可能的。因为，当用混凝土浇灌桥墩柱时，在混凝土内可能产生一些缺陷，这就会降低混凝土的强度。这就使实际强度远比在实验室内试验混凝土所得的强度要低。这些缺陷究竟是什么性质？它在混凝土内有多少？能使混凝土的强度降低多少？所有这些都是无法预先计算和测定的。混凝土有这种情况，其他材料也有这种情况。用金属材料制成的机器零件的实际使用强度总是比用同样材料在实验室进行试验所测得的强度值要低。

有以下三种情况，是无法预先估计到的：第一，现在的科学技术水平，还无法精确地知道在机器或结构工程使用的期限内，是否会发生各种载荷同时重叠的现象；第二，还不能预先精确地知道，这种重叠的总载荷值到底有多大；第三，还不能精确地知道，制成的零件实际强度会比理论强度（在实验室对试样进行仪器测试获得的强度）降低多少。

由于以上种种原因，在选择零件的尺寸时，不得不考虑到材料应具有一定的安全系数，也就是说材料实际承受的应力比它所能承受的要小。

根据结构的用途和种类的不同，可以选择不同的安全系数。特别是某些机器和工程结构有可能产生危及人的生命安全的问题时，安全系数选得要大一些。

但是，也存在这样一些机器和工程结构，增大零件的安全系数，反而会降低它们的可靠性。现代飞机大多数零件的制造就是这样的。增大这些零件的安全系数，不可避免地就要增加这些零件的质量或尺寸。而且零件质量比安全系数增加得要快，这就势必增加

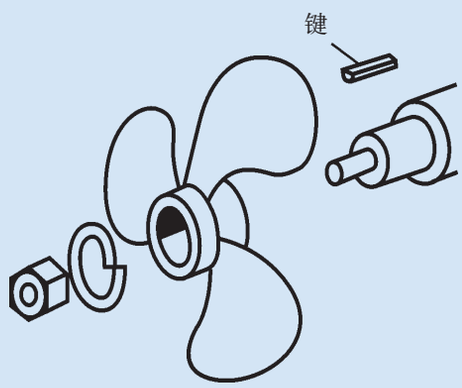


图 1.57　损坏键要比损坏螺旋桨和轴的损失小得多

微信公众号：电子课本大全

飞机的质量，也就是增大了作用于零件上的载荷，因此飞机的可靠性反而降低了。

也有这样一些机器和结构工程，增大它们的安全系数不但无益反而有害。例如，摩托快艇的螺旋桨是用一个旋转轴来推动旋转的，它与轴是靠一个键来连接的（图 1.57），这个键的强度比轴低。当螺旋桨在转动时遇到障碍，键就会被切断失去连接作用，而比较贵重的零件螺旋桨及轴，就能保持完整无损。

综上所述，现代科学的一个主要任务是想尽一切办法来降低这个安全系数，但同时又不降低机器或工程结构的可靠性。

第五节　结构的技术评价和文化欣赏



学习目标

1．初步学会从技术角度来评价结构设计。
2．能够从文化美学角度来欣赏结构外形。
3．培养技术设计中的文化素养和审美情趣。

在评价结构设计时，我们要学会将结构技术的科学美与视觉构图的艺术美结合起来。结构形式的要素就是功能（满足用户需求）、效率（最少量材料）、经济（最低的成本）和美观（最大限度地表现出美）。这些要素构成了当代文明生活的基础。

一、桥梁结构分类与技术评价

我国古代桥梁结构最早的形式是石拱桥，《技术与设计 1》书末的阅读材料中提到的建于隋代的河北赵县安济桥（赵州桥），已有 1 000 多年历史。它全长 64.40m，净跨达 37.20m，桥宽约 10m，采用 28 条并列的石券砌成拱圈承重，为世界上最早的敞肩式石拱桥。它外形美观、受力合理，显示了我国古代建桥史上的辉煌成就。除此之外，由于我国冶炼技术发展较早，早在公元 1706 年（康熙四十五年），就成功地将熟铁用于桥梁结构中，建造了长达 100m 的由多条悬索组成的泸定桥。

后来随着建筑材料尤其是水泥和钢材的进步，桥梁结构的跨度越来越大，结构体系也发生了变化，出现了钢（铁）拱桥、悬索桥和预应力钢筋混凝土梁桥，形成了现代桥梁结构的三种基本形式。

如果再分得细些，桥梁按桥跨结构可分为梁式桥、桁架桥、拱桥、刚架桥、悬索桥、斜拉桥等。桥梁结构所受载荷除了有结构自重、人和车辆的载荷外，还需要计算由车辆运动引起的动力效应。桥梁结构由三部分组成：桥跨结构（上部结构）、桥墩 / 桥台结构（下部结构）和墩台基础，下面比较不同结构类型的桥梁。

微信公众号：电子课本大全

（一）梁式桥

梁式桥以墩台为支撑形成一连续梁结构，它在竖向载荷作用下不产生水平反力，见图 1.58。梁式桥结构简单，但跨越能力有限。普通钢筋混凝土梁每跨跨度一般为 5 ～ 25m，预应力混凝土梁可达 10 ～ 50m。梁截面形式有实心板式、空心板式，当跨度较大时梁截面可做成 T 形或箱形以增加结构的抗弯能力，并减轻自重。

（二）拱桥

拱桥的主要受力结构是拱券。它在竖向载荷作用下，将在两端支撑处产生水平推力，使得拱券内的弯矩大大减小，因此桥拱主要以受压为主，可利用抗拉性能差而抗压性能好的石材。拱桥的跨越能力通常比普通的钢筋混凝土梁桥大得多，加上拱桥造型丰富、曲线优美，在

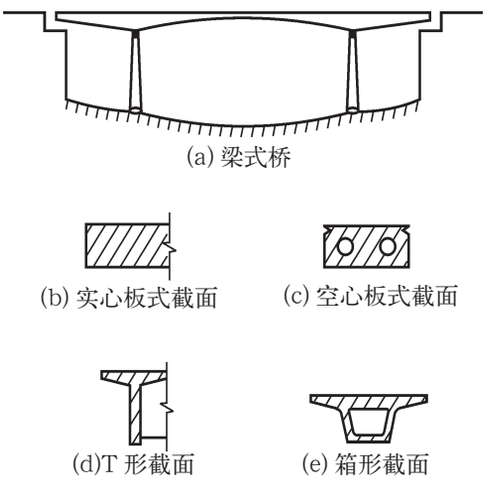


图 1.58　梁式桥及其常用的截面形式

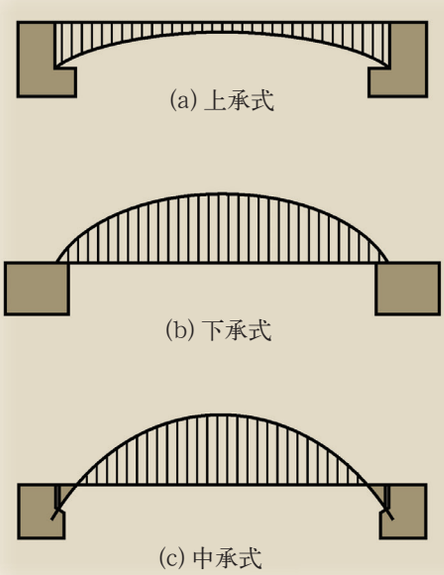


图 1.59　拱桥

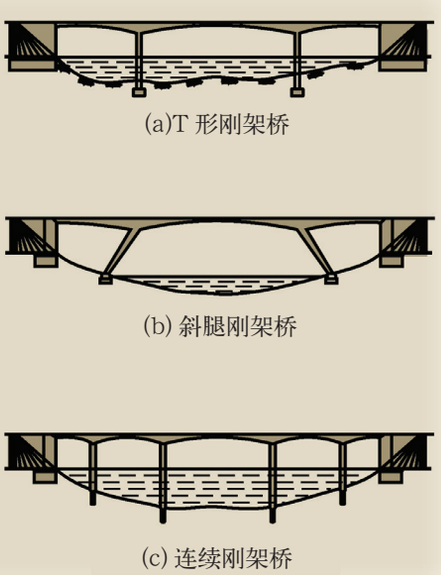


图 1.60　刚架桥

桥梁工程中得到了广泛的应用。根据受力形态，拱桥可做成上承式、下承式和中承式三种类型，见图 1.59。

（三）刚架桥

刚架桥是将桥面梁与支撑柱整体连接在一起的桥梁结构。它在竖向载荷作用下，梁主要受弯曲作用，柱脚有推力产生，受力状态介于拱桥与梁式桥之间。刚架桥主要有 T 形刚架桥（刚构桥）、斜腿刚架桥和连续刚架桥三种（图 1.60）。T 形刚架桥在两个伸臂端上挂梁后，能形成很大跨度的刚架，通常在大跨度桥梁中应用；斜腿刚架桥造型美观，经常用在跨越陡峭河岸和深邃峡谷的桥梁中；连续刚架桥整体性强，具有很好的抗震性能。

（四）悬索桥

悬索桥是一种悬吊体系，它通过两个主塔将缆索架起，缆索上固定一定数量的吊杆将桥面系的承重梁悬吊住，桥面上的竖向载荷通过吊杆、缆索传给主塔，缆索由两岸桥台后的巨大的锚钩

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 背景外延

仔细观察或回顾一下你所在城市、乡镇或外出旅游中所看到的桥梁，分析一下它们应归于哪一类桥梁？并评价一下它们各自的造型风格和美学特点。

平衡（图 1.61）。悬索桥中的吊杆、缆索受拉，主塔受压，这样可以利用不同性能的材料制成，如缆索可利用高强钢丝编制而成，因此整个结构非常轻巧，可以跨越很大的跨度，同时施工时可用无支架悬吊拼装，适合在大江、湖海或深沟、深谷处采用。

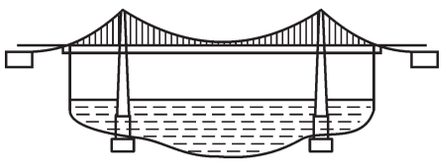
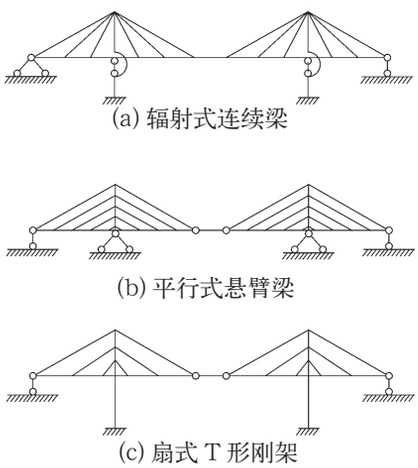


图 1.61　悬索桥

（五）斜拉桥

斜拉桥是从索塔上用若干斜向拉索将桥面梁吊起，在梁跨内增加了一些弹性支点，从而大大减少了梁内弯曲，使梁的截面尺寸减小，跨越能力增大。斜拉桥的抗风稳定性比悬索桥好，而且不需要设集中锚钩，同时也便于无支架施工，因此目前应用广泛。斜拉桥的拉索可布置成辐射式、平行式、扇式；主梁可分为连续梁、单悬臂梁、T 形刚架和连续刚架（图 1.62）；索塔有单柱式、A 形和倒 Y 形。



(a) 辐射式连续梁　(b) 平行式悬臂梁　(c) 扇式 T 形刚架

图 1.62　斜拉桥

同学们可以从受力分析、跨度大小、造型美感以及桥体与周围自然环境的协调性等方面来学着综合评价各种桥梁的特点。

二、建筑结构欣赏

建筑被誉为凝固的音乐，一座座建筑往往能反映不同历史时期工程技术和社会文化的进步水平，是人类智慧和劳动的结晶。

建筑结构欣赏 1　山西应县木塔

我国古代房屋结构形式多采用木框架承重、木楼盖及砖砌墙壁，类似现代建筑结构形式。山西应县木塔（图 1.63），是中国现存最高的古代木构建筑，仅存的一座木塔。它建于公元 1056 年，建在 4m 高的两层石砌台基上。木塔通高 67.31m，底层直径约为 30m，平面为八角形，五层六檐，但是塔内夹有暗层四级，实为九层。塔内各层均用内、外两圈木柱支撑，每层外有 24 根柱子，内有 8 根，木柱之间使用了许多斜撑、梁、枋和短柱组成不同方向的卯榫连接木架，使整个塔连接为一个整体，既坚固又壮观。塔建造至今已有 900 多年

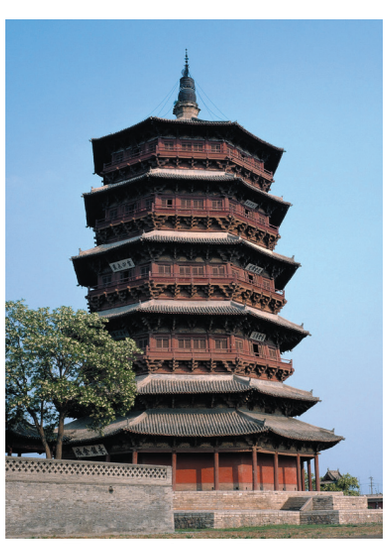


图 1.63　山西应县木塔

微信公众号：电子课本大全



探究与交流

自然界对高层建筑设计灵感的启发

麦秆有不寻常的强度，拿黑麦秆来说，麦秆平均粗细约有4mm，却高到1.5m还能支撑麦穗的质量。在建筑技术上最细最高的建筑物是烟囱，它的平均直径约5.5m，高度可达140m。这个高度是直径的25倍，但是对黑麦秆来说，这个比值为375。所以从结构设计上看似乎可以认为，大自然的产物要比人类技术的产物完善得多。因此许多建筑师往往从一些修长外观造型（经常受到艺术家颂扬）的植物茎秆（如麦秆、竹子等）得到启发从而获得高层建筑的设计灵感。就拿竹子来讲，其下粗上细的形状，可以确保各段在受弯时抗力均匀，因为在风载荷作用下竹子的根部总是弯得最厉害，故要求其端面最粗。而竹竿的空心结构加上其致密材质使其可以抵抗很大的弯曲变形，并且是越长越韧，同时竹节部分还可起到“补强作用”。显然，这是一种力学上最合理、材料使用最经济的方式。

同学们可以结合背景资料〔美国西尔斯大厦（后更名为韦莱集团大厦）和我国上海金茂大厦的简介〕对这个问题展开讨论。

历史，它经历了多次大地震仍巍然屹立。它是建筑结构与使用功能设计合理以及造型艺术的典范之作，是中国古代建筑史上的一大奇迹。

建筑结构欣赏 2　巴黎埃菲尔铁塔

一座完美的建筑能把结构形状与建筑空间艺术形象融合起来，使两者成为统一体。如著名的巴黎埃菲尔铁塔（图 1.64），原设计是 1889 年巴黎世界博览会临时的标志性建筑，高 320m，为铁结构，重 9 000t。它不仅

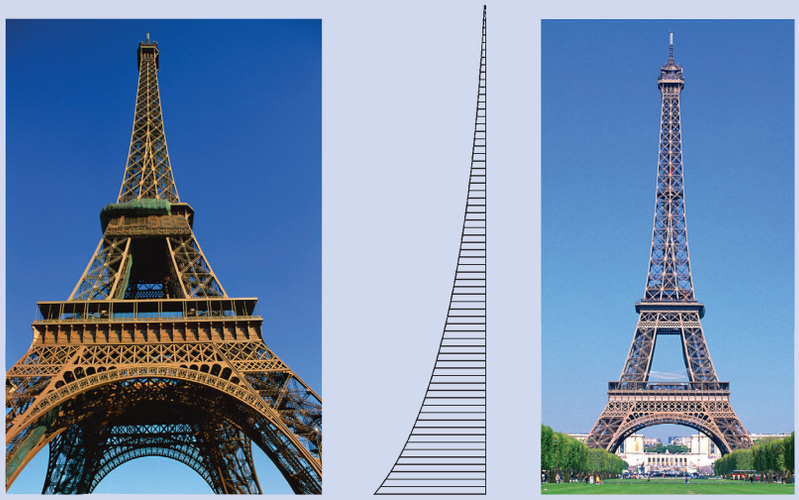


图 1.64　巴黎埃菲尔铁塔



新视窗·背景外延

当今的著名建筑处处体现出巧妙的空间结构布局。1974 年美国芝加哥市建成了西尔斯大厦（Sears Tower），共有 110 层，高 443m（加上天线高约 500m）。底层平面为 68.7m×68.7m 的正方形，由于框筒边长过大，为减少结构的失稳现象，采用了将大框筒分为 9 个小框筒的筒束体系，小框筒为 22.9m × 22.9m 的正方形，向上在 51 层以上、67 层以上和 91

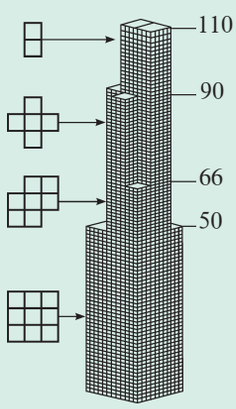


图 1.65　芝加哥西尔斯大厦（一）

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 背景外延

层以上分别减少 2 ～ 3 个小框筒，最后剩两个小框筒到顶（图 1.65）。框筒密柱采用 H 形截面，柱截面底层为 1 070mm × 609mm × 102mm，向上逐渐分段减小，顶层截面为 1 070mm × 305mm × 19mm。设计总用钢量为 7.6 万 t，钢材的平均用量约为 150kg/m^2，比高度低约 30m 的世界贸易中心大楼还小，可见合理的结构体系，对超高层建筑是十分重要的。



图 1.67　芝加哥西尔斯大厦（二）

满足了展览功能，并且以其造型优美、结构合理、建筑与结构的完美统一而被世人称颂，一直保留至今。从力学方面分析，铁塔可看成是嵌固在地基上的悬臂梁，对于高耸入云的铁塔来说，风载荷将是其主要载荷。由于铁塔的总体外形与风载荷引起的受力图十分相似，因此充分利用了塔身材料的强度和刚度，受力非常合理；塔身底部所设大拱，轻易地跨越了一个大跨度，车流、人流在塔下畅通无阻，更显铁塔的雄伟壮观。埃菲尔铁塔可谓是建筑美学与结构完美统一的代表，人们一看到铁塔，就会想起巴黎，想起法国；一提到法国马上会想起埃菲尔铁塔。如今它已成为巴黎和法国的象征。可见一栋优秀的建筑在政治、经济和文化中所起的重大作用。

建筑结构欣赏 3　悉尼歌剧院

1973 年落成的悉尼歌剧院（图 1.66）是建在海边的一座新颖奇特的建筑，外形像一组扬帆出海的船队，又像海滩上洁白的大贝壳，里边有音乐厅、剧院、图书馆、展览馆、餐厅等大小 900 多个房间，在周围海景的衬托下，建筑十分美丽，被誉为当代建筑史上的一件“稀世之作”，是由丹麦建筑师伍重设计的。



图 1.66　悉尼歌剧院

设计师当时考虑要从四面八方都能看到这座建筑，不仅可以从海面上、陆地上、街道上、大桥上看到它，可以从悉尼港南北两岸的高层建筑上看到它，也可以从经过悉尼上空的飞机上清楚地看到它。因此，它不仅应该有东、南、西、北四个漂亮的立面，还应该有一个从上面看下来的第五个漂亮的立面。倘若采用一般歌剧院的形式，则无法避免在舞台的上方设置一个方方正正、沉重封闭、单调沉闷的吊布景用的台箱，并且突出在整个剧院的最高处。于是设计师为歌剧院设计了三组既像贝壳、又像白帆的屋顶。伍重的设计方案虽然被选中，但是在实施时遇到了不小的困难。由于这群造型奇特的薄壳结构在方案设计阶段仅仅是源于一时的灵感，没有考虑结构受力和施工方法，经过科学计算，原先粗估的壳顶厚 10cm，底部厚 50cm，如此巨大的薄壳根本无法实现。工程师们一直设想以各种形式的薄壳来解决问题，比如抛物线薄壳、带筋的薄壳、双层薄壳等，还做了各种模型试验，结果全都失败了；最后不得不放弃单纯的薄壳形式而代之以预应力 Y 形、T 形钢筋混凝土筋骨拼接的三角瓣壳体。经过长达 6 年的计算、试验与施工，歌剧院终于落成。悉尼歌剧院已经成为悉尼港的象征，它仿佛是一座白色的雕塑，形若洁白的贝壳，又像是迎风扬起的白帆，在碧海、蓝天、绿树的衬托下异常美丽动人，特别富有诗意，充满浪漫色彩。

微信公众号：电子课本大全



活动延伸

建议上网查找并收集一下关于2008年奥运会主场馆“鸟巢”设计方案的有关技术说明和网民的评论，然后发表你个人的看法和建议。

风致振动——自然环境对结构的影响



阅读材料

1940年，美国西海岸华盛顿州建成了中央跨径为853m、居当时世界第三位的塔科马悬索桥(Tacoma Bridge)，其设计风速为60m/s。然而4个月后，却在19m/s的风速袭击下，产生强烈扭曲振动而遭破坏(图1.69)。这次事故震惊了桥梁工程界，经过广泛深入研究，提出了桥梁风致振动问题。可以说塔科马桥的风毁开辟了土木工程界考虑空气动力问题的新时期。

风是一种自然现象，是由于太阳对地球周边大气的加热不均匀而引起的。由于地球表面的地形起伏和各种障碍物的影响，使靠近地面

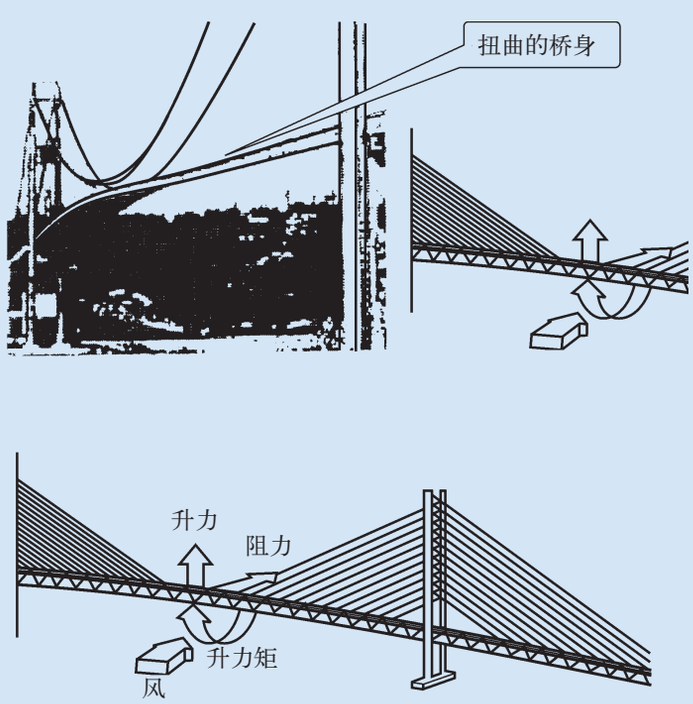


图1.69　塔科马悬索桥的风致破坏



新视窗·背景外延

金茂大厦(图1.68)位于上海浦东陆家嘴金融开发贸易区，大厦高420.5m，建筑面积28.7万㎡，占地2.3万㎡。大厦地下3层，地上主体88层。大楼平面为八角形，外形轮廓13层，每隔若干层渐渐收进，很像中国古代的宝塔，具有独特的民族风格。

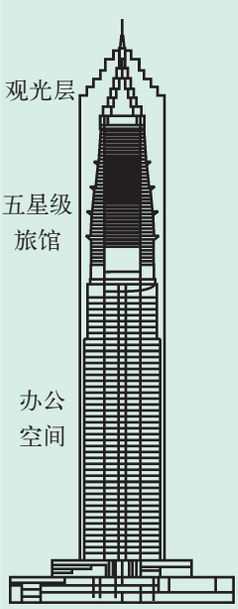


图1.68　金茂大厦

微信公众号：电子课本大全

的风的流动发生紊乱，造成风在速度、方向及其空间分布上都是非定常的（即随时间变化的）和随机的。为方便计，人们在处理风对桥梁的作用时，首先将风分成两部分：①假定其中一部分风速在时间和空间上都是不变的，称此类风为平均风（稳定风）；②另一部分为风速在时间和空间上都改变，称为脉动风。从而再将风对桥梁的作用也归纳为两类：一类是风的静力作用，另一类是风的动力作用。

如果设计的桥梁刚度很大，在平均风作用下，桥梁保持静止不动或者其本身振动不影响气流的作用力，此时的定常反应随时间而变化，称为风的静力作用。这时垂直于桥梁的气流作用力可分解为三个分量（图 1.69），即气流方向的阻力、与其垂直方向的升力及升力矩。它们通常被称为气流作用力的三分力，与风速、桥梁截面形状及风对桥梁的攻角等因素有关。

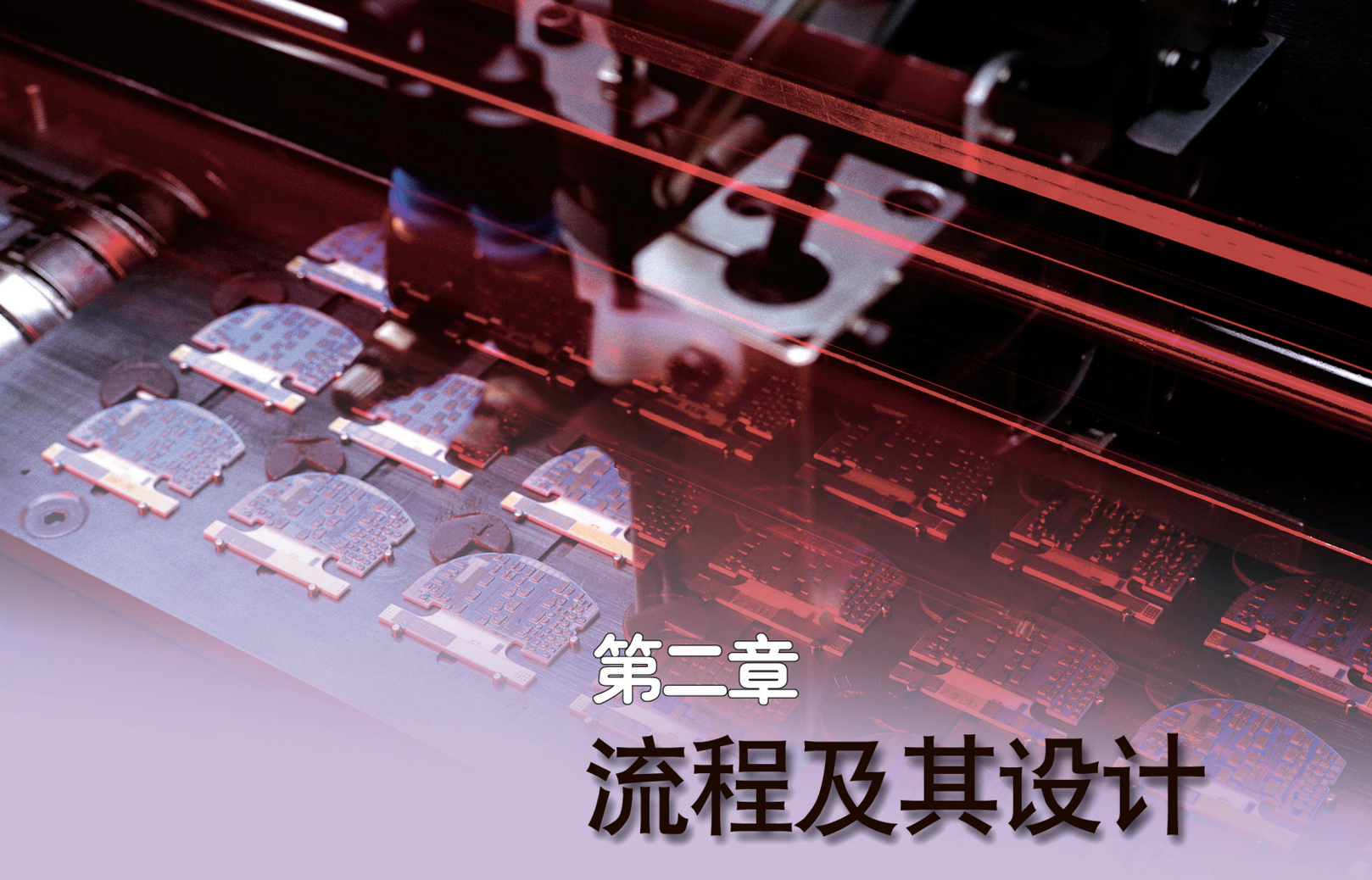
如果设计的桥梁是个柔性结构，风的作用力可能引起桥梁振动，而振动的桥梁反过来又将改变气流作用力，产生附加的气动力，形成风与桥梁的相互作用体系，这种环境对结构的作用，我们称之为风对桥梁的动力作用——风致振动。



新视窗·背景外延

金茂大厦主体结构中部为八角形型钢配钢筋混凝土核心筒束，筒壁厚459～800mm，筒内井字形墙到56层结束，然后单筒升到337.3m，核心筒四周为8根钢筋混凝土大柱，截面由1.5m×5m逐渐收至1m×3.5m，以适应逐渐收进的外形。上海地区地下淤泥层很深，地基条件较差，金茂大厦采用钢管桩基础，桩深达82.5m，地下整体桩承台尺寸为64m×64m×4m，混凝土用量达13 500m^3。为提高基础的整体性，采用整体一次浇注。金茂大厦建成时是我国第一高楼，世界第三高楼。

微信公众号：电子课本大全



第二章
流程及其设计

同学们早晨由家里出来，乘车来到学校。在学校上完了数学、语文、地理、英语、体育等课程，又乘车回到家中。可以说，你完成了今天在校学习的过程。你是否知道，描述这个过程还可以说：你完成了今天在校学习的“流程”。事物是作为过程向前发展的，因此生活中的很多事件以及任何产品的生产过程，都可理解为流程。

微信公众号：电子课本大全

第一节　流程的概念

学习目标

1．理解流程的含义及其对生产、生活的意义。
2．理解流程中的环节与时序的意义。

一、流程的含义

（一）什么是流程

流程来源于英文“process”，中文也译作过程。对于流程的定义名家所言各有不同，但一般可以理解为：流程是一系列按照一定顺序进行的活动的组合（图 2.1）。



图 2.1　流程的示意图

只要认真观察和思考，不难发现，流程的种类虽然很多，但都具有以下一些共同特点：

（1）目标性。流程有明确的目标或任务，如物品的送达或产品的生产等。

（2）内在性。流程包含于任何事物或行为中。这些事物或行为都可以进行同样的描述，即“输入资源→中间系列活动→输出结果→创造价值”（图 2.2）。

（3）整体性。流程至少由两个活动组成，仅仅一个活动不能成为流程。

（4）动态性。流程是按照一定的时序关系展开的，由一个活动到另一个活动，是运动的和变化的。

（5）层次性。组成流程的活动本身也可以是一个流程，称为“子流程”，子流程还可以继续

微信公众号：电子课本大全

分解为若干活动，依此类推。

(6) 结构性。流程结构可以有多种表现形式，如串联、并联、反馈等。不同的结构形式，对输出结果有很大的影响。

流程的以上六个基本特点也可以称为流程的六个要素，如图 2.2 所示。可见，流程设计的目的不仅是产生结果，重要的是使流程产生更大的效益和具有可持续发展性。

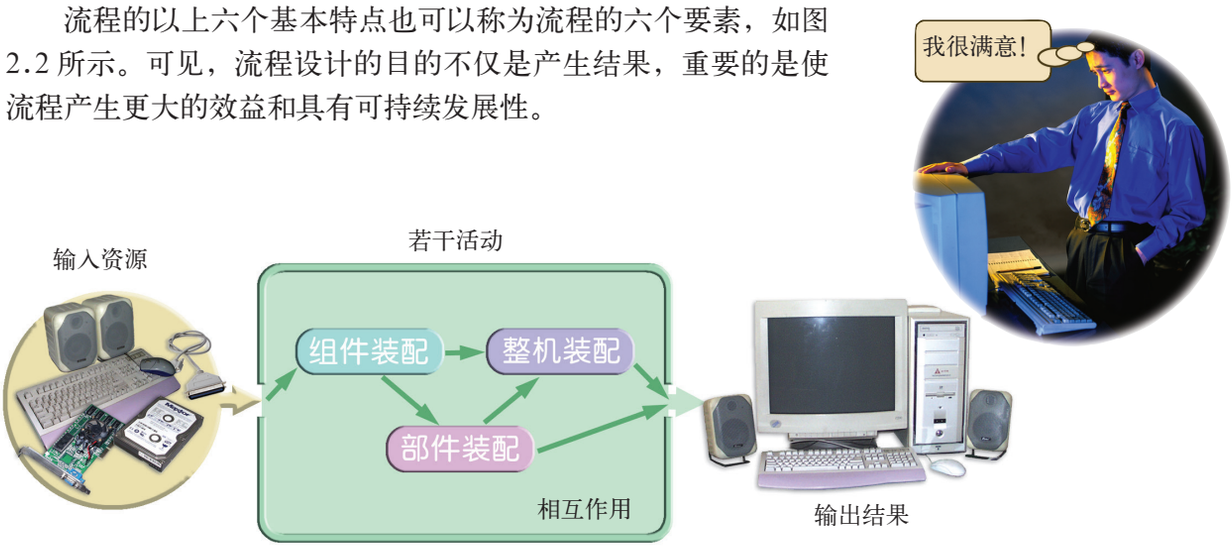


图 2.2　流程的基本特点



探究与交流

流程的基本功能

流程作为完成一项任务或某一项工作的全过程，具有多项基本功能：

1. 完成一定的目标或任务。流程是一个过程，这个过程是否需要视其对某项任务或工作目标的完成是否有作用而定，没有作用的流程应该淘汰。流程为保证完成一定的目标或任务而存在。当任务与工作发生变化时，原来的流程就不再需要了，要进行流程改造，或者重新设置新的效率更高的流程。

2. 帮助分工。为提高效率和最终目标的实现，一项比较复杂的工作往往需要进行分工。

应用流程的概念可以帮助我们把这些工作按照内在逻辑划分为系列工作环节或工作步骤，再按照完成任务和目标的先后顺序组成一个高效、有序的工作流程。

3. 界定执行者的责任。把一项工作按照流程分割成一个个相对独立的工作环节（工作岗位和工作步骤），便可以界定每一个工作环节执行者的责任，确保整个流程功能的发挥，从而更有效地保证完成工作任务。

4. 提高效率。工作按照流程分解后，可以估算出完成每个工作环节、工作步骤所需要的时间。要提高效率可以有目的地到每个工作环节与工作步骤中去寻找，研究在完成这项工作时，哪些动作是必要的，哪些是不必要的，哪些是科学合理的，哪些是违反科学的，等等，从而比较容易达到提高效率的目的。

微信公众号：电子课本大全

（二）流程中的环节与时序

1．环节

环节是指事件在发展过程中，依据某种特征或方式而被分解成的若干个小的过程。上述的每一个“活动”，就是流程中的一个环节。换句话说，流程是由一个个环节组成的。

一个事件可以分解成若干环节，一个环节又可以分解成若干“子环节”，子环节还可以再分，分到什么时候为止呢？分解到可以简单顺利地完成这个环节的工作，一般不会出什么问题时为止。如果这个环节还经常发生问题，那么就有必要把这个环节看作一个“子流程”，进一步研究分解下去。

例如，把信件的邮寄工作看作一个事件，那么它可以分解为收集、分拣、投递三个环节（图 2.3）。如果在分拣环节上经常出问题，多次出现分拣错误，就应该研究一下分拣的流程，进一步细分为国外分拣、国内分拣、省区分拣、本地分拣等环节。这些工作本来是存在的，只不过原来没有明确为环节。

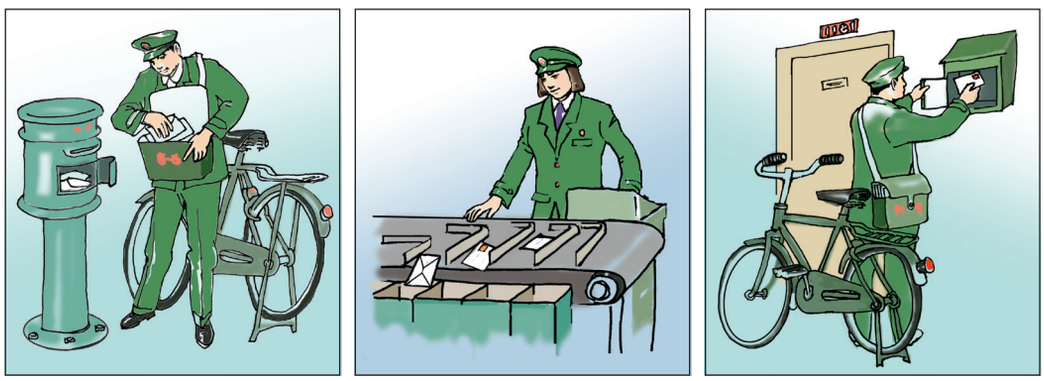


图 2.3　邮寄信件的工作环节

2．时序

时序是指随时间变化的发展经历，也就是“活动”的先后顺序。如上例，信件的邮寄工作流程，必须先收集信件，再分拣、投递信件，次序不能颠倒。

例如，中学化学课程中大家比较熟悉的合成氨的生产工艺流程如图 2.4 所示。

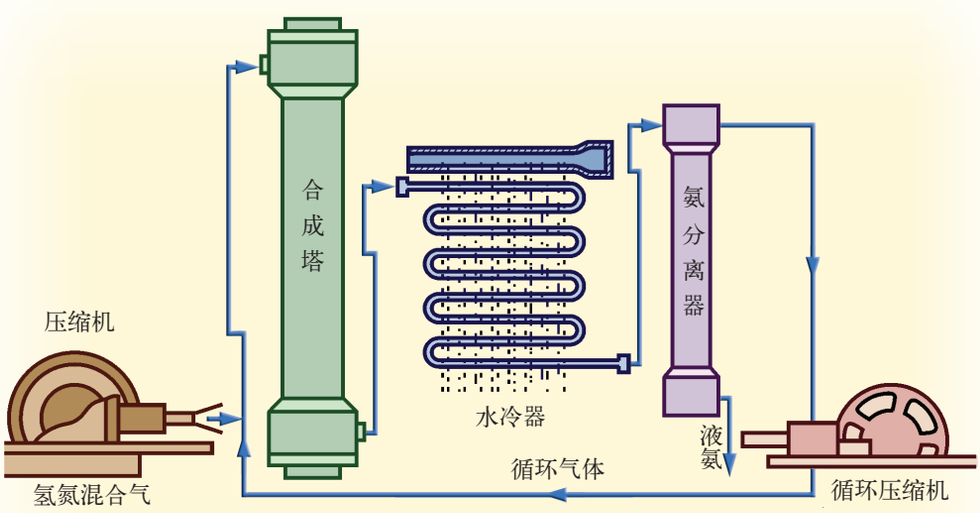


图 2.4　合成氨的生产工艺流程

微信公众号：电子课本大全

首先利用适当的方法生产大量合成氨的原料——氮气、氢气，以及氮气和氢气的混合气体，在合成塔的 600℃高温、200Pa 的压力下，通过催化剂的作用产生氨气，再通过氨分离器不断把生成的氨分离出来，未转化的反应气体又进入合成塔循环加工。这就是合成氨的生产工艺流程。

在此流程中，有氮气和氢气的混合和氨的合成、分离、循环这几个主要生产环节，它们的顺序是不可倒置的。

（三）常用流程

流程涉及人们生产、生活、学习、工作的各个方面。根据不同的应用领域，流程有许多种类，常见的流程有工作流程与生产流程。

1．工作流程

工作流程是指人或机器实现其功能的流程。这一类流程所包含的内容广而杂，如人事管理流程、小麦种植流程、发动机运转流程、快餐配送流程、图书销售流程、网络购物流程等。

2．生产流程

生产流程主要是指工业生产的过程。如产品设计流程、齿轮加工工艺流程、汽车装配流程等。生产流程通常称作生产工艺过程。在各类流程中，生产流程的环节与时序规范得最为严格。为此，国家针对不同行业制定了许多的技术标准。

（四）流程的规模

流程的规模取决于它的内容多少及复杂程度。设计和制造难度大的产品的流程规模较大。一般家用产品（如家具、厨房用具等）与飞机、轮船等工业产品相比较，一般家用产品的设计及制造难度较低。因此，一般家用产品的设计流程及工艺流程的规模较小。

用户使用难度大的产品，其销售服务流程规模也较大。例如，对于用户来说，桌子、空调器、软件这三种产品的使用难度是不同的，因此这三种产品的销售服务流程的规模也不尽相同。桌子这种产品使用简单，不需要企业培训，流程最简单（图 2.5）。软件产品比较复杂，往往需要向用



图 2.5　桌子的销售服务流程

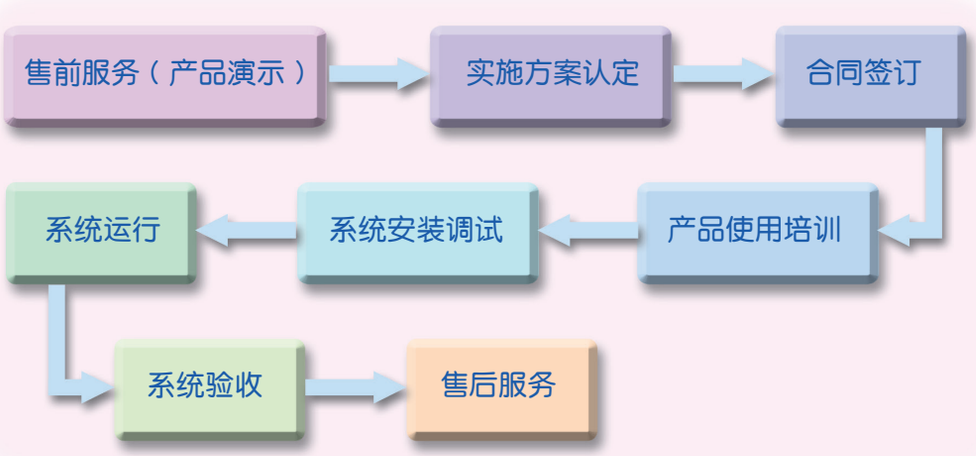


图 2.6　软件产品的销售服务流程

微信公众号：电子课本大全

户提供培训和安装调试服务（图 2.6）。

对于某些销售集团，由于其销售的产品种类较多，流程的内容较多，流程的规模也就较大。图 2.7 为国内以电视机、空调器和计算机为主要产品的某电器集团销售中心的业务流程图。

无论哪一类流程，都是“输入资源→中间系列活动→输出结果→创造价值”的过程。

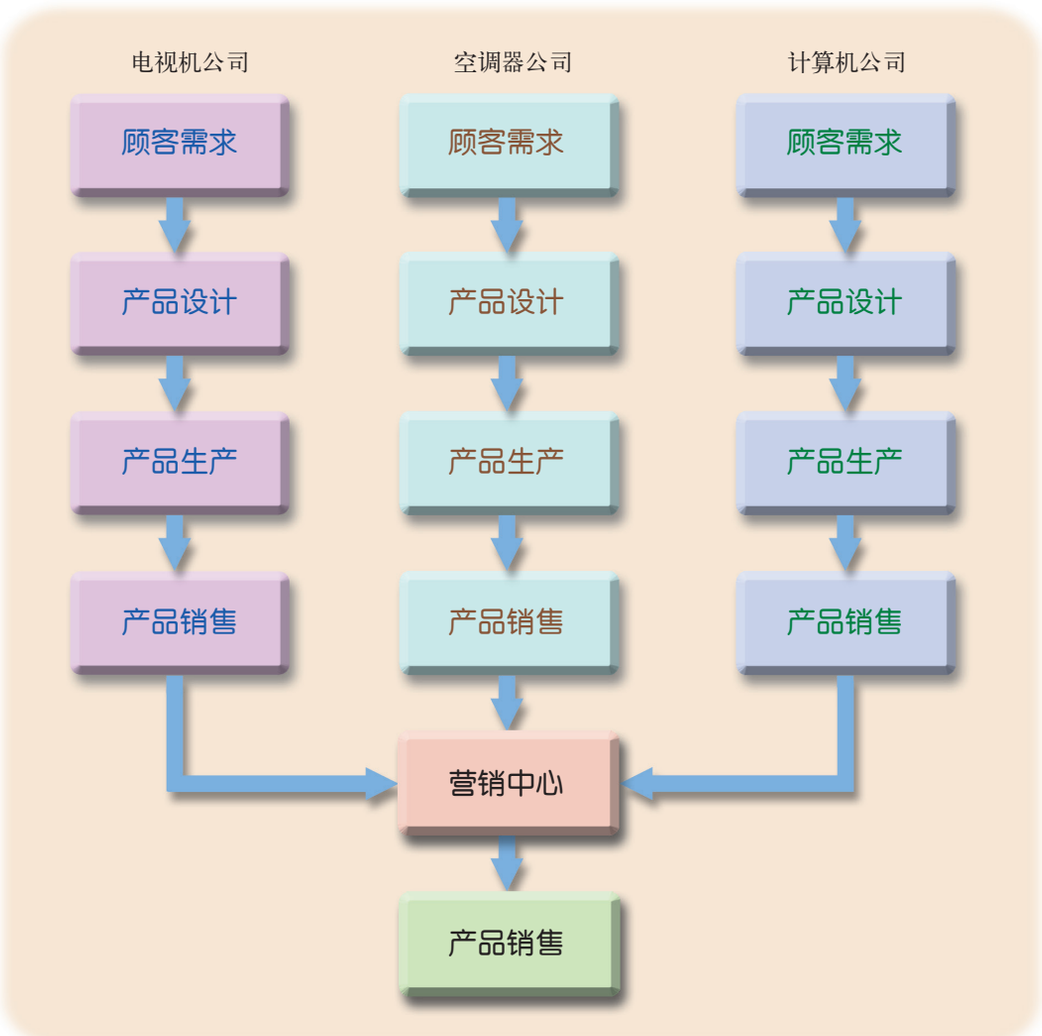


图 2.7　某电器集团销售中心的业务流程图



实践与体验

服装公司的工作流程（环节与时序）

流程设计首先要考虑目的性，如生产一批新颖的夏季时装。然后可以开始划分环节，如划分为设计、采购布料、成衣制作三个环节。最后考虑时序问题（前述顺序已经合理）。如果实际生产中还需要更详细的流程，则可将上述各环节分解，如成衣制作可分解为制模板、（依模板）剪裁、缝合三个环节。这时，“成衣制作”就成了高于“制模板”等三个环节的“子流程”。该流程出现了三个层次：工作流程、子流程、环节。

微信公众号：电子课本大全

二、流程的作用与实例

（一）流程的重要性

其实，我们的生活和生产活动的每一刻都处在某种“流程”之中，如去学校上学、去商店购物、去银行取钱等，不管是否意识到“流程”的存在，我们都是按照一定的时间次序在活动。如果我们有意识地安排好这些活动次序，使它们更加合理，就能够大大提高这些活动的效率。

流程对于企业就更加重要。有些小企业在高速发展过程中没有顾及流程，流程更多地依赖个人的经验。在这个阶段，即使部门内部有人做得不规范，从企业的角度也很容易纠正。当企业规模不断扩大后，流程对于企业管理和企业生产的重要性就显露出来。例如部门之间协调的效率低下，核心员工及关键技术流失，差错、事故、质量问题多等，这种状态被称为无序状态[图 2.8(a)]。这时，流程就成为企业的重中之重。设计科学合理的管理流程和生产工艺流程，使无序变有序[图 2.8(b)]，可以提高企业运营效率、减少人为差错和延误、量化考核业务、改善企业资源利用、减少浪费，最终达到提高劳动生产率和增加企业利润的目的。

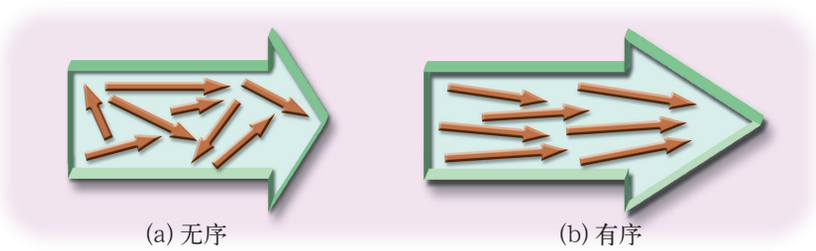


图 2.8　无序与有序状态

（二）几个流程实例

1．快餐配送流程

现在，由于大家的工作学习都很忙，常常需要用订购快餐的办法解决吃饭问题。订餐人通常会打电话给快餐店，说明要订的快餐种类和价格及送达的详细地址；快餐店的工作人员将订餐要求写入订餐单（一式两份），并将订餐单交给配餐室；配餐室的配餐员按照订餐单配餐并装盒（打包）；配餐员将快餐交给配送员；配送员乘交通工具按照订餐单上的地址送餐；送达后订餐人收取快餐，并交纳快餐费；配送员返回快餐店找会计交款结账。

上述快餐配送流程可表示如下：

订餐→配餐→送餐→收取→结账。

2．零件加工流程

零件加工要按照规定的程序进行，零件加工流程中的环节称作工序。如图 2.9 所示的带键槽

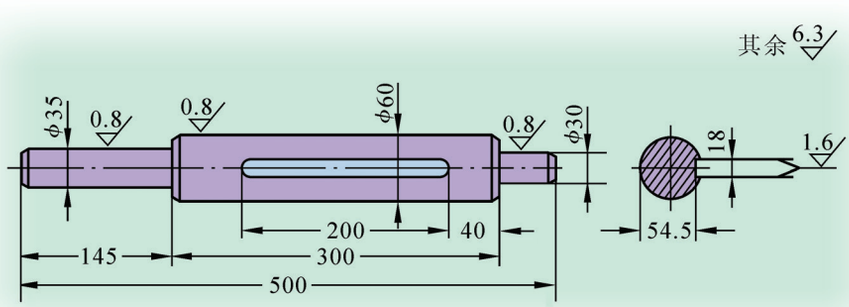


图 2.9　阶梯轴零件简图（单位：mm）

微信公众号：电子课本大全

的阶梯轴的加工工艺流程（工艺过程）可以表示如下：

车削端面和外圆→钳工划键槽线→铣键槽→磨外圆→去毛刺→检验。

3．纯净水生产流程

目前，在我国瓶装饮用水市场上，有矿泉水和纯净水两种，它们的生产过程大同小异。首先采用原水经过砂滤、活性炭过滤、软化和离子交换等预处理工序，再经过二级反渗透的工艺，得到的是已清除各种有害物质和致病菌的纯净水，同时配以紫外线和臭氧杀菌及全自动密封灌装系统，从而生产出符合国家标准的桶装和小瓶装饮用水。如图 2.10 所示，纯净水生产经历了原水、砂滤、活性炭过滤、软化、二级反渗透、纯净水、罐装的工艺过程。

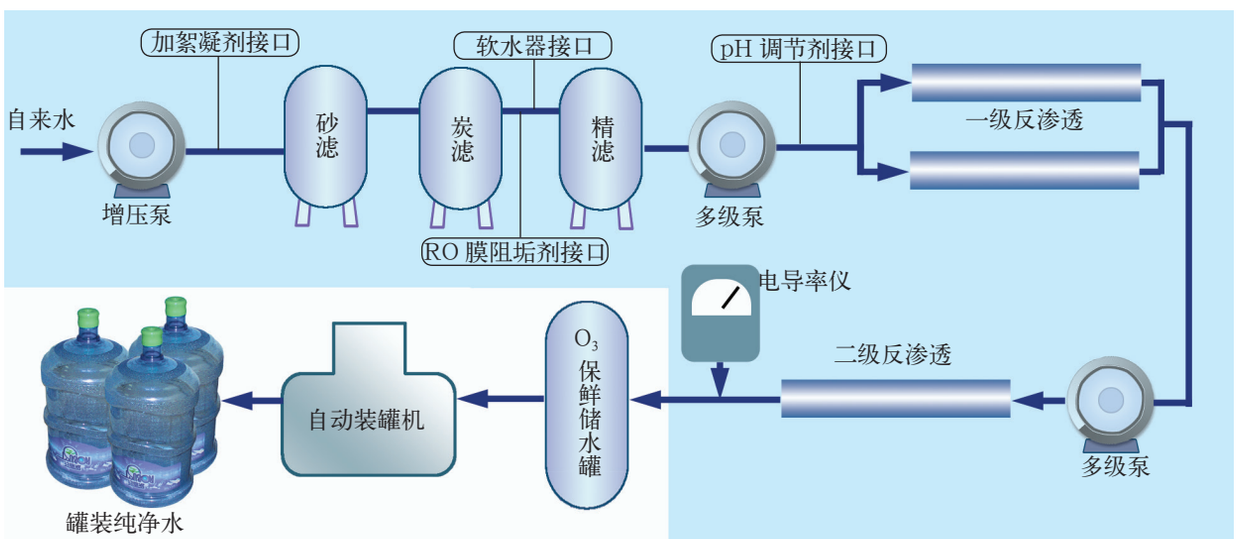


图 2.10　纯净水全自动生产流程



活动延伸

在实地调研和查阅资料的基础上：

1．设计冲洗照片的工作流程（注意确定目标、环节和时序）。

2．设计法院处理一个案件的工作流程（注意确定目标、环节和时序）。

3．设计城市污水处理的工艺流程（注意确定目标、环节和时序）。

南辕北辙的故事



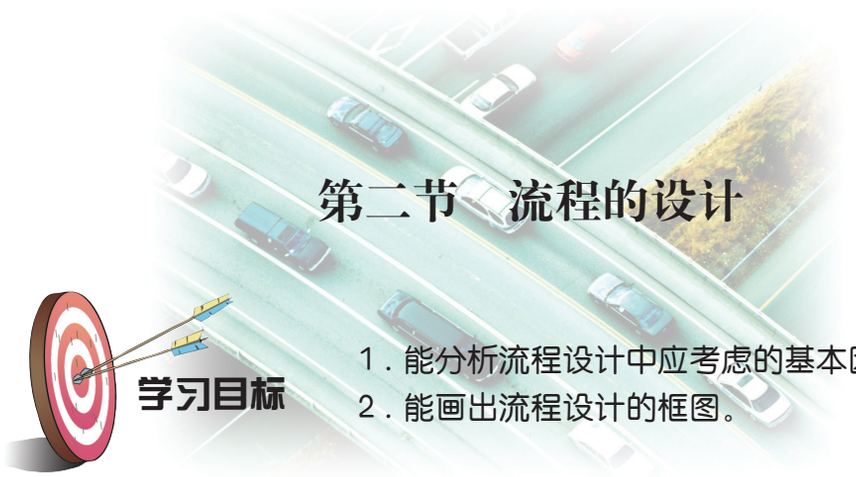
阅读材料

流程要有明确的目标或任务，实现它必须有正确的路径。爱因斯坦的质能关系式 $E = mc^2$ 为人们所熟知，但他还有一个著名的成功公式：$A = X + Y + Z$。在这个公式里，A 代表成功，X 代表艰苦的劳动，Y 代表正确的路径和方法，Z 代表不说空话。决定成功 A 的三个因素 X，Y，Z 中，Y 是最关键的因素。如果没有正确的路径，艰苦的劳动也不会有效果。

微信公众号：电子课本大全

《战国策·魏策四》记载了一个“南辕北辙”的寓言故事。魏王想要攻打邯郸，季梁听说后紧急拜见魏王说：“臣下今天回来的时候，在大路上看见一个人，正朝北面赶着他的车，告诉臣下说：‘我要到楚国去。’臣下说：‘您要到楚国去，为什么往北走？’他说：‘我的马好。’臣下说：‘马虽好，可这根本不是去楚国的路啊！’他说：‘我的路费多。’臣下说：‘路费虽多，这毕竟不是去楚国的路啊。’他又说：‘我的车夫驾车技术好。’臣下说：‘这几样越好，离楚国就越远了。’现在大王的行动是想成就霸主的事业，想取信天下，然而大王依仗国家的强大、军队的精锐却去攻打邯郸以扩展土地，使名分尊贵，却不知道大王这样的行动越多，离大王的事业就越远，犹如想去楚国却往北走一样。”

南辕北辙的故事告诉我们，做事情的路径是非常关键的。要实现目标，首先要设计好实现目标的路径。



第二节　流程的设计

学习目标

1．能分析流程设计中应考虑的基本因素。
2．能画出流程设计的框图。

一、流程设计的步骤

（一）流程设计的顺序

流程设计一般可按以下顺序进行：

(1) 确定设计对象和功能目标。

(2) 针对设定的目标及关键参数，收集资料和有关数据。

(3) 进行流程设计分析，分析事物的内在性质、规律和相关因素，划分流程的环节，编排流程的时序。

(4) 画出流程草图。

(5) 随着流程的实施过程，通过检验、精简使流程更加合理，最后画出正式的流程图。

（二）流程设计中应注意的问题

(1) 流程设计应关注执行者，而不是关注流程设计者。

(2) 在流程设计初期，先建立相对简单且有条件实施的流程，充分保证流程执行的效率。在初步巩固流程执行的成果后，根据流程执行的情况及时调整。

微信公众号：电子课本大全

（3）减少流程步骤。在设计流程时，可以先将获得输出结果所必须经历的活动列出来，然后考虑流程正常运转需要哪些活动支持，把它们添加到流程中，避免流程中堆砌过多的执行活动。

（4）提高活动效率。流程是一系列活动，提高单个活动的效率（主要指时间方面），将有利于提高流程的整体效率。

（5）流程模板化。将流程中例行性的工作模板化、表格化，一是使流程易读懂好使用；二是流程有模板支撑，能更好地确保流程结果的实现。

二、流程设计分析

流程设计分析首先要分析事物的内在性质、规律和相关因素。生活、生产中流程的设计有两种情况：一种是流程的若干环节是显性的，也就是事物发展的规律较容易描述，如邮局邮件的分拣流程设计、快餐配送中心的工作流程等；另一种流程的设计要依据事物的内在属性和规律，需要进行大量的试验和漫长的探究才能得出。以合成氨的工艺流程为例。在 20 世纪初，经过若干位化学家上万次的试验，最终才得出在 600℃、200Pa 下合成出氨，但转换率仅有 2%～ 8%的结论。后来又经过不断试验，才得到现在工业生产上使用的、较为成熟的合成氨的工艺流程。

流程设计是对一个系统（或产品生产）的信息处理过程进行自上而下有层次的控制流或者控制结构的分解。最高层次是实际系统的整体功能，也是实际系统的最高目标。从最高层次开始，依次逐层分解，一直分解到基本功能为止。

下面，我们以某远途配送公司的配送业务流程设计为例，说明流程设计的内在性质、规律和相关因素，以及如何对流程设计的时序和环节进行把握。图 2.11 为该配送公司的配送业务流程图。配送的货物来自工厂（输入），配送的对象为用户（输出），配送的目的为获取服务效益。

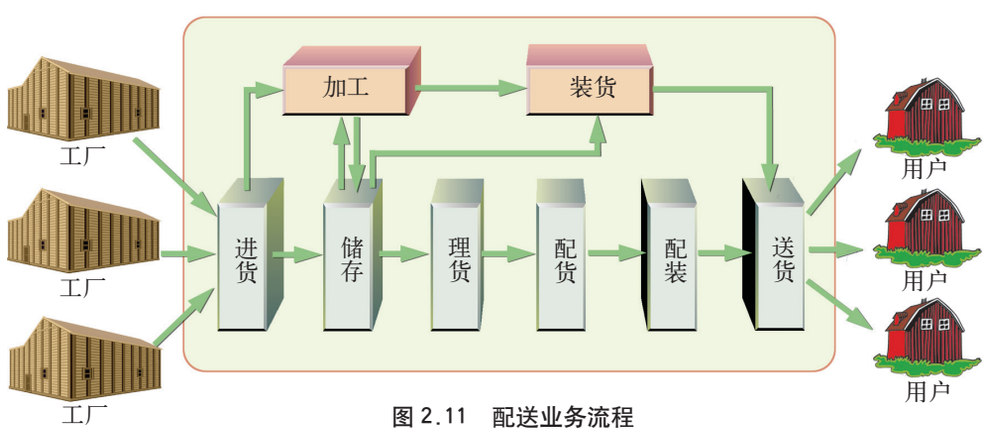


图 2.11　配送业务流程

1．远途配送公司配送业务的性质功能分析

供应链管理中的物资（产品）配送，是根据顾客的需要，把所需物料配齐，按时、按质、按量送达指定地点。

对配送的认识：配送是接近用户的资源配置的全过程；配送的本质是送货；配送是一种“中转”形式的物流运动；配送是配与送的有机结合形式；配送是以用户要求为出发点的活动。

依据配送对象品种、数量的多少，可分为单品种大批量配送、多品种小批量配送、配套配送等几种形式。

配送网络是由一定人员、物流设备与设施、资金等要素组成的，具有集货、储存、分货、配货、

微信公众号：电子课本大全

配装、运输等功能的物流据点，也称配送中心。它是一个物资的集散场所，是一个物资服务型供应系统。物流中心的基本目标是高服务水平和低物流成本，两者是统一的整体。

高服务水平要求物流中心主动、全方位、全过程地为用户服务，按质、按量、按时实施供应；低物流成本要求配送本身所需的各种费用最低，以减少物流的成本。

配送网点布局合理，既要具备一定的覆盖面，又要有一定的辐射能力。

仓储设备：用于保管和存储货物的仓库、场地和设施，如平房仓库、楼房设备、货架、装卸设备等。

分拣设备：自动拣选设备由输送设备、重力货架和电脑监控系统组成。

配送加工功能：为满足用户对物质不同形态的需求，充分利用资源，提高物流中心的经济效益，需要设立加工厂。

贸易功能：配送中心可以使物流和商流紧密结合，成为既能进行期货交易，又能承办物流的物贸中心。

2．划分环节和编排时序

根据以上分析的配送性质和功能，将配送业务流程设计为六个环节：进货、储存、理货、配货、配装、送货。

进货是配送系统的输入，是从各生产企业或物资流通企业按用户需求品种大批量进货，以备齐所需物资。这是配送的起始工作。

储存是为保障配送活动的连续进行，防止缺货所进行的物资储备。

理货与配货是按用户的需要将存储物资分拣出来，将货物配齐，送到发货场所，进行必要的包装，做好装配。

配装是对多用户、多品种、小批物资的配送装车作业。

送货属于运输问题，配送系统必须具备一定的运输能力，及时将配送物资安全地送到用户手中。配送物资送达后，主要的配送活动也就结束了。

以上六个环节必须按照规定的时序进行。确定环节的主要依据是性质，确定时序的主要依据是规律，起于进货，终于送达，就是配送业务的规律。时序对效率有着直接的影响。

三、流程的表达

（一）流程的表达形式

流程的表达有多种形式，有图形、符号、表格、动画演示、框图等，其中最常用的是框图形式。

1．流程图

流程图是将一个过程（如生产过程、试验过程、质量改进过程等）的步骤用图的形式表示出来的一种图示技术。通过对过程实际情况的详细了解，以及对一个过程中各步骤之间关系的研究，通常能发现故障的潜在原因，从而知道哪些环节需要改进。流程图既可用来描述一个现有的过程，也可用来设计一个新的过程。



新视窗·思维外延

在知识经济社会里，知识是最基本的资源。在具有划时代意义的创新中，以新知识（不论是科学的、技术的或社会的）为基础的创新占了第一位。知识创新和知识资源是流程设计质量的基本保证。

微信公众号：电子课本大全



人们在生活和工作中，经常有需要读懂流程图的场合，简单的有公共汽车或地铁线路的上行、下行流程图，复杂一些的有发电厂或化工厂的生产工艺流程图，以及军营里的作战流程图，要了解生产情况或作战部署，就要读懂这些图。

图 2.12 所示的网络购物流程，是一种图形表达的形式，这种形式具有形象活泼的优点，缺点是绘图过程比较复杂。

有的部门把流程中经常出现的一些活动规定为符号，保持了图形表达的优点，又使绘图变得比较简单。图 2.13 提供了一组绘制流程图的常用符号。

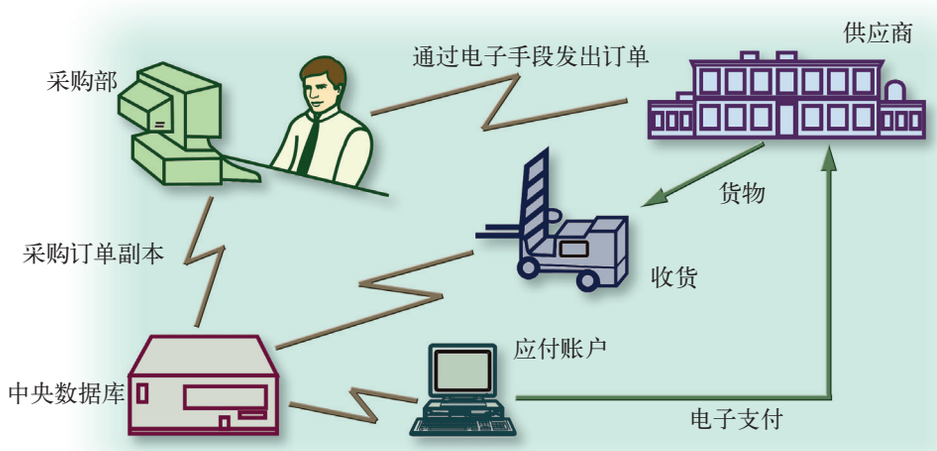


图 2.12　网络购物流程

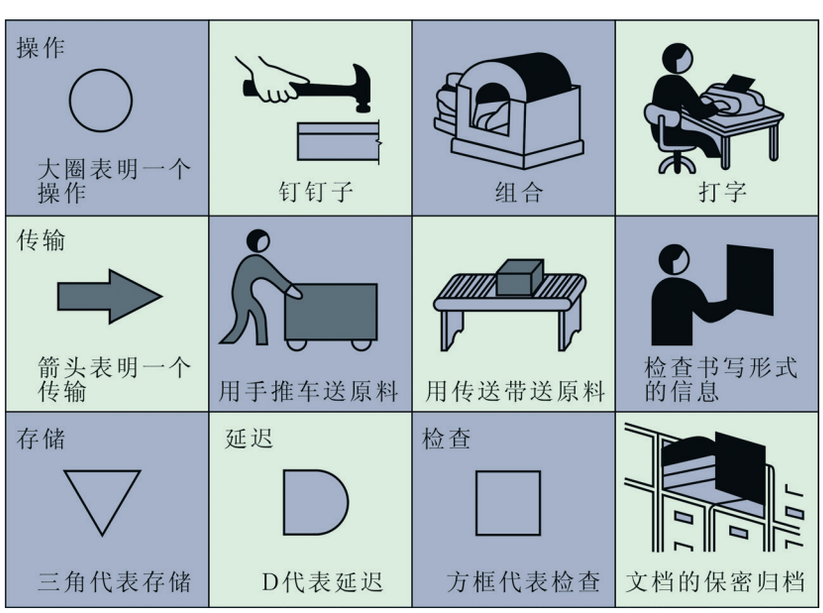


图 2.13　绘制流程图的常用符号

新视窗 · 背景外延

有一种大宗货物交易的方法称为“期货交易”，即在商品还没有生产（或没有完成生产）的情况下，预先按照一定的规则进行交易。

新视窗 · 思维外延

配送系统的运输能力以多大为宜？（提示：目前已经出现了专业性的运输公司。）

微信公众号：电子课本大全

流程图中最常用的形式是框图，因为这种形式既简单又明确。图 2.14 是绘制框图的常用符号，利用这些符号，可以方便地绘出流程图。图 2.15 就是用框图形式表达的以产品为中心的企业业务流程图。

2．表格

表格是说明零件加工或机器装配步骤的常用形式，它的主要特点是过程严谨明确。为使图 2.9 所示的阶梯轴的加工流程更加严谨明确，可以使用表 2.1 的形式来表达。

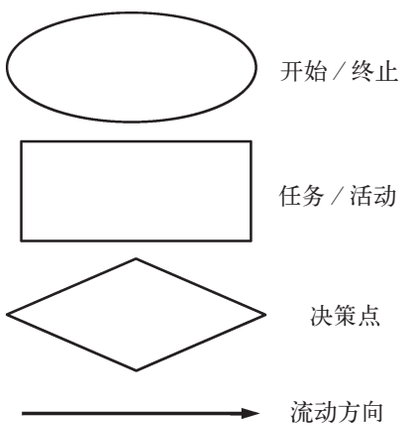


图 2.14　绘制框图的常用符号

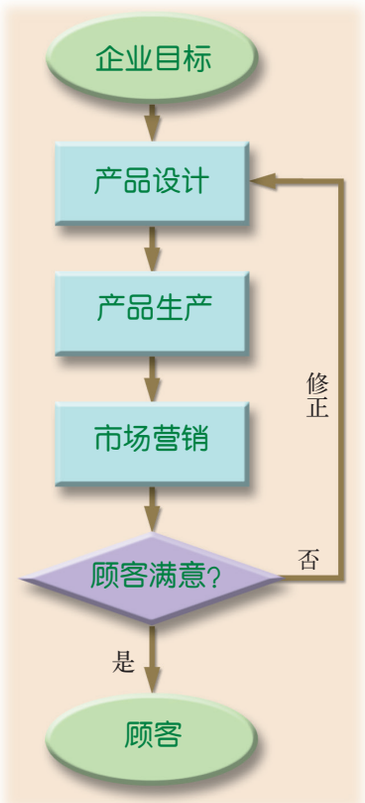


图 2.15　以产品为中心的企业业务流程图

表 2.1　阶梯轴的加工工艺流程

工序	工种	工序内容	工作地点
0	车	车端面，钻顶尖孔	卧式车床
5	车	粗车各外圆，半精车各外圆，倒角	卧式车床
10	钳	钳工划键槽线	钳工工作台
15	铣	铣键槽	立铣或键槽铣床
20	磨	磨各外圆	外圆磨床
25	钳	去毛刺	钳工工作台
30	检	检验	检验台

3．文字

有时根据需要，也可以完全用文字来表达流程。好的文字表达也同样可以做到严谨明确。

制材工业是木材加工工业中最大的部门，制材是把原木锯解成板材、方材、枕木等锯材的工艺过程。请看下面一段说明“制材”流程的文字：

原木贮存在露天仓库、水上作业场（水运）及原木楞场（即原木存放场，陆运），在那里完成验收、出河（陆运为卸车）、造材（原条到材时有此作业）、选材、归楞，以及进车间前的工艺准备作业，

微信公众号：电子课本大全

包括原木预先区分（指按锯材的用途、规格挑选一定尺寸、等级的原木）、调头（把原木调整到小头进锯，以保证看材对线下锯）、截断（长原木一般在锯解前不截短，但对尖削度大或弯曲的原木要考虑截断）以及剥皮、整形、冲洗及金属探测等。然后用运输链把原木送进车间，按原木锯剖、半成品再剖分、毛边板裁边、材头截齐等工序完成全部工艺流程。



实践与体验

工艺流程的表达

1. 采用表格形式，表示一个齿轮的加工工艺流程。

2. 如果当地有制陶的工厂或作坊，请调研一下，用表格表示一件陶器的制作工艺流程。

3. 在流程的设计中，“时序”是十分重要的。许多生产加工的工艺流程的环节是不能颠倒的。同学们学习了流程的表达形式，可采用框图形式自己画出图 2.9 所示的阶梯轴的工艺流程。并且考虑一下：可以调换流程六个环节中的任意两个环节的时序吗？

（二）流程图的绘制

1．一般流程图的绘制

环节和时序是流程设计的基本要素，环节取决于流程设计项目的性质和目的，而时序则影响流程的效率，建立流程的根本目的在于固化经验，提高业务运作效率。了解了流程设计的特点，就可以练习设计流程和绘制流程图。可以先找一些简单、熟悉的活动进行练习。医院几乎人人都去过，去医院找大夫看病是一个比较熟悉的活动。同学们能否画出去医院看病的流程图，给第一次来看病的患者增加点方便。

根据经验，去医院看病的大略过程是这样的：患者步行或乘车来到医院，进门后先要挂号，然后到候诊室等候；等到分号护士叫到你的号时，你便走进指定的诊室看病；医生对你进行详细的询问和检查（诊病），找到了你的病因，根据病情对症开药；你走出诊室拿着处方先去划价，然后去收费处交费，最后取药；取药后步行或乘车离开医院。

首先考虑目标性，显然，到医院是为了看病；然后回忆一下看病的过程，看看都有哪些与看病有关的活动，哪些可以确定为环节。显然，进医院门以前和出医院门以后的活动都不必作为环节，候诊时间可能长，也可能短，也不必作为环节。那么，可以确定的环节为：挂号、诊病、划价、交费、取药五个环节。这五个环节是互相联系的，特别是后三个联系更加密切。能否通过时序安排提高一下效率呢？如果确定为以上五个环节，顺序是不能改变的，不交费怎么会叫你拿药呢？只好按照这五个环节和活动的时序画出去医院看病的流程图，用简洁明确的框图形式（图 2.16）。



图 2.16　患者看病的流程

微信公众号：电子课本大全

通过患者看病的流程图的绘制，可以总结出绘制流程图的步骤：

（1）根据流程的设计目标，确定该流程图的起点和终点；

（2）明确流程的环节（活动）、各环节之间的关系和时序；

（3）正确选择绘制流程图的符号；

（4）绘制并审核流程图。

流程图可以采用图 2.16 所示的横向排列形式，也可以采用图 2.15 所示的纵向排列形式。

2．时间表流程图

如果希望明确表示出流程中各环节的时序、层次和每个环节所需要的时间，也可以将流程中的各环节按照时序和层次绘制于表格之中，形成矩阵式时间表流程图。患者看病的时间表流程图如图 2.17 所示。“周期时间”包括了该环节的处理时间和辅助时间（如路程时间、等待时间等）。

部门名称	医院	流程名称	看病流程		
业　　务			作业时间		
挂号处 收费处	诊疗室	药房	作业	处理时间 (min)	周期时间 (min)
A	B	C			
开始					
挂号			1	5	5
	诊病开药		2	10	20
		划价	3	2	10
交费			4	3	16
		取药	5	5	20
		结束	总计	25	71

图 2.17　患者看病时间表流程图

3．地理位置流程图

如果希望明确表示出流程中各环节所涉及的部门（或设备）之间的位置关系，以了解流程中各项活动的路线与布局的合理性，也可以绘制该流程的地理流程图。在地理流程图中，用“方框”表示部门（或设备），各部门之间用带箭头的虚线相连接。如果通往某部门的线条很密集，则说明与该部门相关的环节设计可能存在问题。

微信公众号：电子课本大全

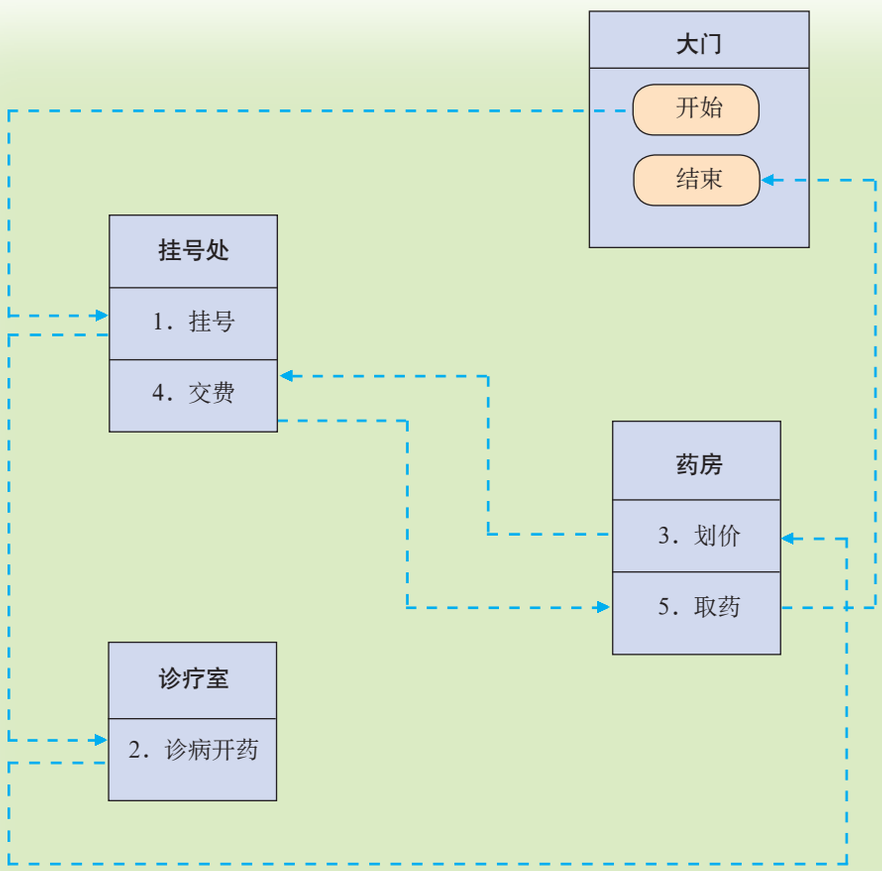


图 2.18　患者看病地理位置流程图

4．生产流程图

在工业产品的生产、加工中，为了清晰地说明其原理和过程，也大量采用流程图的方式。图 2.19 是一个说明数控机床加工过程的流程图。操作者首先按照加工零件图纸的要求编制加工程序，用规定的代码和程序格式把人的意图转变为数控机床能接受的信息，把这种信息用键盘输入或是制穿孔带的方式记录在信息载体（例如磁带、磁盘、穿孔带）上，输送给数控装置；数控装置对输入的信息进行处理之后，向机床各坐标的伺服系统发出数字信息，驱动机床相应地运动部件（如刀架、工作台等）并控制其他的动作（如变速、换刀、冷却液开关等），检测装置随时把检测结果反馈给数控装置（关于反馈，详见第四章第二节），数控装置据此随时调整工艺参数，自动地加工出符合图样要求的工件。

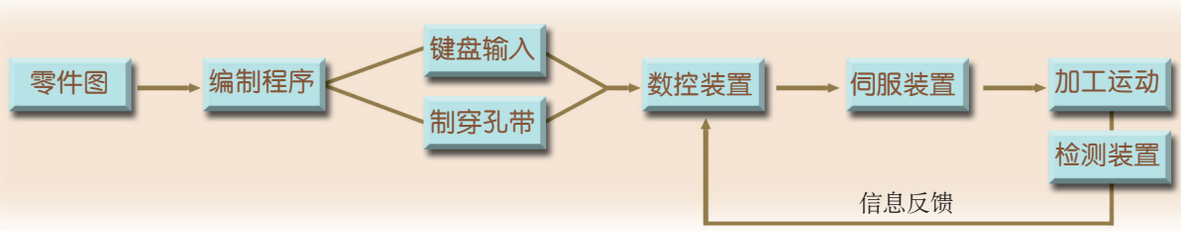


图 2.19　数控机床的加工流程图

微信公众号：电子课本大全



实践与体验

画出沼气生产过程的流程图

近年来，国内外利用各种有机废弃物经嫌气性微生物消化产生沼气，不仅为工农业生产和人民生活提供了新的能源，而且也是处理废物、防止环境污染的有效措施。城市中每天排放的大量有机废弃物（如粪便、有机工业废水、废渣、垃圾等）和农村中的秸秆、野草、水草、树叶、牲畜粪便等都是生产沼气的原料。沼气是一种优质的气体燃料，可以用来煮饭、照明。1m^3 沼气能使一盏沼气灯（亮度相当于60W 电灯泡）照明 6 ～ 7h，能使 735W 的内燃机工作 2h，相当于 0.6 ～ 0.7kg 汽油，能发电约 1.25kW · h。沼气中的主要成分甲烷是重要的化工原料，用它可以制造许多化工产品。

生产沼气首先要修建一个密闭的沼气池，并应有适宜的温度，为甲烷菌与多种嫌气性细菌提供适宜的生活环境；然后将按一定比例配制的、经过堆沤的沼气原料倒入池内（堆沤的目的是为了加快原料的发酵速度，增加沼气产量）；在沼气池内放入一定量的水后，将沼气池密封。原料在嫌气性细菌的作用下分解发酵，这是一个复杂的生物化学过程，大致经过以下两个阶段：第一阶段，细菌将复杂的有机物分解成简单有机物及二氧化碳等无机物；第二阶段，细菌将第一阶段分解出来的简单有机物及二氧化碳氧化或还原成甲烷。产生的沼气上升到池子的上部，进入贮气箱；箱内的沼气可通过固定在沼气池盖板上的导气管引至沼气炉或其他需要沼气的地方。沼气池一般半个月左右添加一次新料，更换部分旧料。沼气生产过程中，还要注意经常搅动，以提高产气效率。

请同学们根据以上介绍，并结合自己对沼气生产的调查了解，画出沼气生产过程的流程图。



活动延伸

1．设计海水淡化的工艺流程（框图形式）。
2．设计 ATM 自动取款机的工艺流程（图形形式）。
3．设计汽车模型制作的工艺流程（表格形式）。
4．设计联合收割机的工作流程（文字形式）。

微信公众号：电子课本大全

数控机床与柔性制造技术



阅读材料

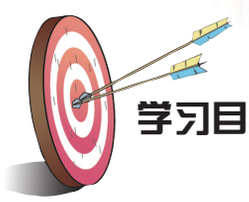
早期的机械制造行业以手工制作为主，是劳动密集型的落后的生产方式。随着大工业的发展，产生了以流水线生产为主的设备密集型生产方式。它的生产率较高，产品的一致性较好；但设备的投入大，对产品变化的适应性较差。

1952 年美国麻省理工学院（MIT）研制成功了世界上第一台数控机床。目前，数控机床已经历了电子管控制、晶体管控制、集成电路控制、计算机数控，直到今天的微机数控五个阶段。数控机床也称数字程序控制机床，是一种由数字量作为指令信息形式，通过电子计算机或专用电子计算装置控制的机床。

数控加工不需人直接操纵机床运动，但能实现人的工作意图。数控装置是数控机床的中枢，由它接收和处理来自信息载体（如磁带、磁盘、穿孔带等）的指令信息并将其输送到伺服系统去执行。这种工作如果由专用计算机实现，称为普通数控（NC）；发展为使用小型通用计算机后，称为计算机数控（CNC）；现在已普遍采用微型计算机控制，称为微机数控（MNC）。

柔性制造技术是集数控技术、计算机技术、机器人技术以及现代生产管理技术为一体的现代制造技术。自 20 世纪 60 年代以来，为多品种、小批量生产的需要而兴起的柔性自动化制造技术得到了迅速的发展，作为这种技术具体应用的柔性制造单元（FMC）、柔性制造系统（FMS）等应运而生。

第三节　流程的优化



学习目标

1．能解释流程的改进与设备、材料等之间的关系。
2．能概括简单生产流程优化过程中应考虑的主要问题。
3．能对生活、生产中的简单对象进行流程设计及改进，并能说明流程设计方案的特点。

一、流程优化的目的与途径

（一）流程优化的目的与过程

流程优化指的是对现有的工作流程进行梳理、完善和改进。流程优化通常以提高工作质量、

微信公众号：电子课本大全

提高工作效率、降低成本、节约能源或减少污染等为目的。

流程优化要围绕优化对象所要达到的目标进行；在流程现有状态的基础上，提出改进后的实施方案，并对其做出评价；针对评价中发现的问题，再次进行改进……直至满意后开始试行，正式实施，如图 2.20 所示。

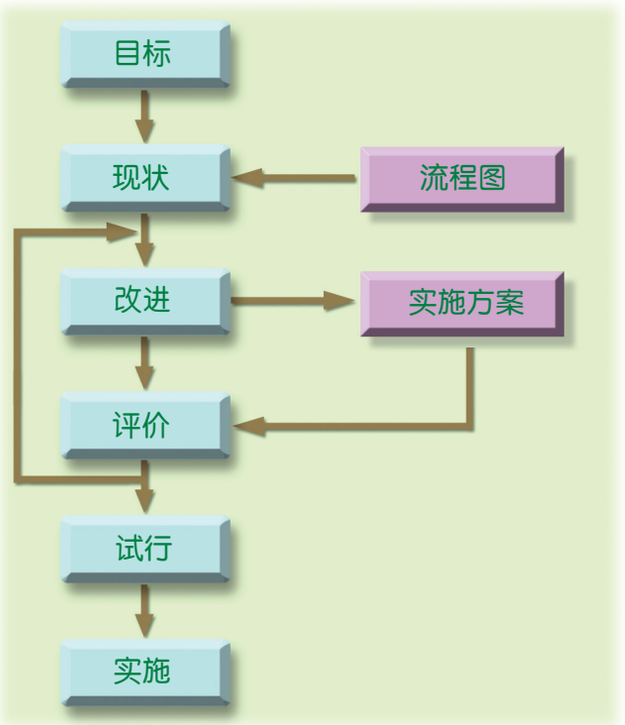


图 2.20　流程优化的过程

（二）流程优化的途径

流程优化的主要途径是设备更新、材料替代、环节简化和时序调整。大部分流程可以通过流程改造的方法完成优化过程。对于某些效率低下的流程，也可以完全推翻原有流程，运用重新设计的方法获得流程的优化。

1．流程改造

在难以采用设备更新和材料替代优化流程时，往往采取以下措施：

(1) 取消所有不必要的工作环节和内容。有必要取消的工作，自然不必再花时间研究如何改进。某个处理、某道手续，首先要研究是否可以取消，这是改善工作程序、提高工作效率的最高原则。

(2) 合并必要的工作。如工作环节不能取消，可进而研究能否合并。为了做好一项工作，自然要有分工和合作。分工的目的，或是由于专业需要，为了提高工作效率；或是因工作量超过某些人员所能承受的负担。如果不是这样，就需要合并。有时为了提高效率、简化工作甚至不必过多地考虑专业分工，而且特别需要考虑保持满负荷工作。

(3) 取消和合并以后，还要将所有程序按照合理的逻辑重排顺序，或者在改变其他要素顺序后，重新安排工作顺序和步骤。在这一过程中还可进一步发现可以取消和合并的内容，使作业更有条理，工作效率更高。

(4) 简化所必需的工作环节。对程序的改进，除去可取消和合并之外，余下的还可进行必要的简化，这种简化是对工作内容和处理环节本身的简化。

2．重新设计新流程

如果决定采用重新设计的方法优化流程，可按以下步骤进行：

(1) 首先要充分理解现有流程，以避免新设计中出现类似的问题。

(2) 集思广益，提出新思路。

(3) 思路转变成流程设计。对新提出来的流程思路的细节进行探讨。不以现有流程设计为基础，坚持“全新设计”的立场。反复迭代，多次检讨，深入到一定细节地考虑，瞄准目标设计出新的流程。

(4) 新流程设计出来之后，应该通过模拟它在现实中的运行对设计进行检验。流程图是一个描述新流程的理想手段，检验前应画出流程图。

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 思维外延

无论是改造旧流程还是重新设计新流程，学习新观念、新思想、新技术和新的组织形式都是很重要的。学习为改造和新设计提供新的思路、新的内容和新的方法。

二、流程优化实例分析



实践与体验

设计使用互联网发送信件的工作流程（流程设计与优化）

首先依据互联网发送信件的过程确定流程的环节，如上网、打开自己的电子邮箱、写信、输入对方的电子邮箱地址、发送信件；然后确定流程的时序，如上网—打开自己的电子邮箱—写信—输入对方的电子邮箱地址—发送信件；第三步就是用框图或图形的形式将上述设计准确地表达出来。

如果所使用的上网卡是计时收费的，为了节省时间和费用，可进一步对发送信件的流程进行优化。例如，当写信的内容较多、信件较长时，可调整流程的时序：先写信再上网，然后粘贴写信的内容，就可达到减少上网时间的目的。还可以充分利用电子邮箱的功能，预先存储对方电子邮箱的地址，发信前直接调出，也可以节省一些时间。

（一）桌面邮局（采用先进技术与设备优化流程）

在第一节我们曾讨论过信件的邮寄工作，由于人工收发和分拣效率低、易出错，后来中国邮政开办了一种“混合信函”业务，称作“桌面邮局”，即发信方以电子邮件方式发信，收信方以实物信函方式收信。其工作流程如图 2.21 所示。用桌面邮局，用户可以要求在网上发送“混合信函”。通过一个电脑寄信专用软件，可以在“桌面邮局”写出图文并茂、尽显个性的信函，一点鼠标，就可以将信件寄出。该软件可以用 Word 写信，用 Excel 制表，用 Photoshop 画图，用手写板书写亲笔信和签名，然后，直接在因特网上向邮局投递信件。邮局通过全自动的同步设备将电子信件还

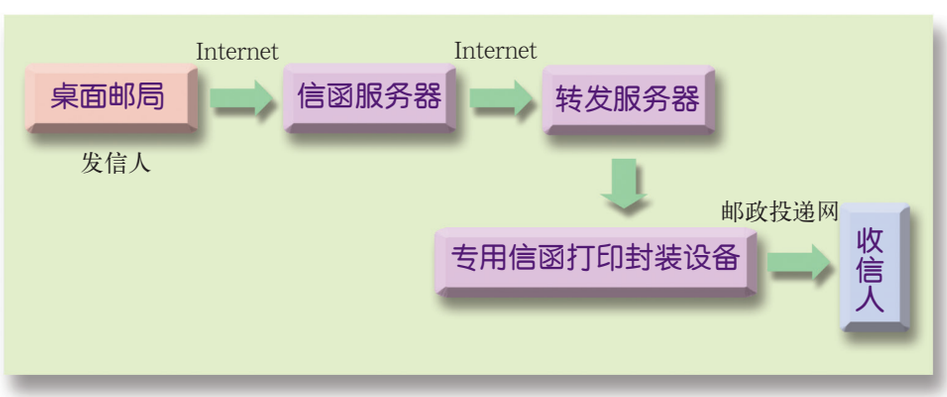


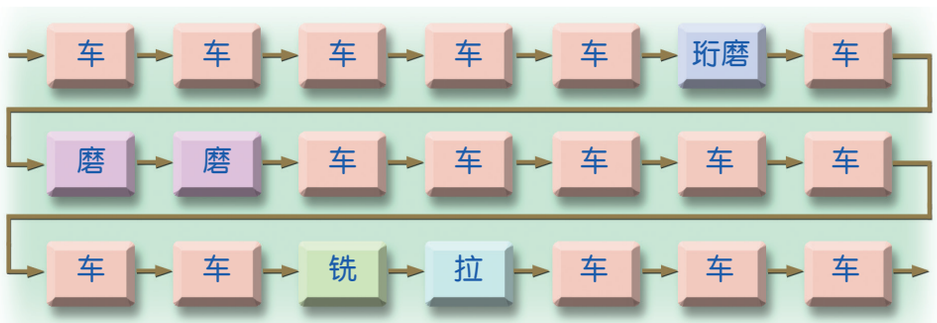
图 2.21　桌面邮局工作流程

微信公众号：电子课本大全

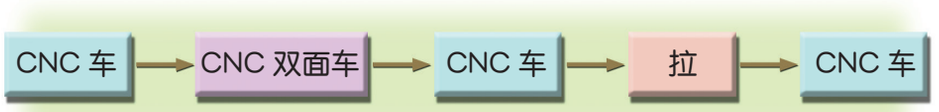
原成普通信件。该业务的收费标准为：单页信纸的信函每封收费 2 元。利用电子和因特网技术的桌面邮局，省略了人工邮寄中的人工收集和分拣工作，简化了流程，用超高速的电子传输代替了火车（或飞机）运输信件，从而大大提高了流程的工作效率。这种信件邮寄方式，受到了广大用户的欢迎。

（二）航空发动机轮盘加工工艺的优化（采用先进技术与设备优化流程）

航空发动机的轮盘是发动机的重要零件，要求精度高，制造难度大，生产周期长，传统的加工工艺需要 21 道工序［图 2.22(a)］。特别是轮盘的幅板，厚度很薄（有的仅 0.2mm），加工时很容易产生变形，造成很高的废品率。为解决这一问题，英国的罗罗公司改进了工艺流程，采用了数控技术和双面车的加工方法，使工艺流程的工序数由原来的 21 个减少为 5 个［图 2.22(b)，CNC 为“计算机数字控制”的英文缩写］，机床数量由原来的 62 台减少为 31 台，制造周期由原来的 22.5 周下降到 8 周，废品



(a) 传统的加工工艺流程 (21 道工序)



(b) 改进后的工艺流程 (5 道工序)

图 2.22　发动机轮盘加工工艺流程

率也下降了 40%。新的工艺流程不但保证了轮盘的加工质量，还提高了轮盘的加工效率。

（三）发票处理程序的优化（取消不必要的环节优化流程）

某公司研究的结果，发现他们对采购供应商提送的发票，原需经过一道核查手续［图 2.23(a)］。而这一手续后来发现并无必要。事实上，如果只对 300 元以上的发票进行核查，则至少有 82% 的发票处理程序能大为简化。而由此项简化可能造成的损失，估计全年只不过 400 元左右而已。图 2.23(b) 中的简化省下了一位作业员，即图中的核查环节可减少 82% 的工作量。

（四）日报表编制过程的优化（重排顺序优化流程）

某机械厂有一零件库，保管员凭入库单收件和出库单发件后，将出库



新视窗·思维外延

从这两个例子我们可以看出，电子技术的应用以及工业化进步使流程获得优化并使生产效率大大提高。我们可以认识到流程的变动与技术进步、环境变化等密切相关。

新视窗·知识外延

工业生产中，可以用计算机进行辅助工艺过程设计。首先向计算机输入被加工零件的原始数据、加工条件和加工要求，由计算机自动地进行编码、编程直至最后输出经过优化的工艺规程卡片。其基本功能包括工艺路线设计、每道工序的详细设计和时间定额的制定等。

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 知识外延

以往工艺流程设计主要依靠工艺师多年的工作经验来进行，工艺流程的设计质量完全依赖于工艺人员的技术水平和经验，一致性差，不可能得到最佳方案，更不利于把工艺人员的技术传授给年轻工艺人员。因此需要运用计算机辅助工艺流程设计。工艺流程设计既要结合本单位的技术条件，又要考虑到新技术可能带来的工艺变化。

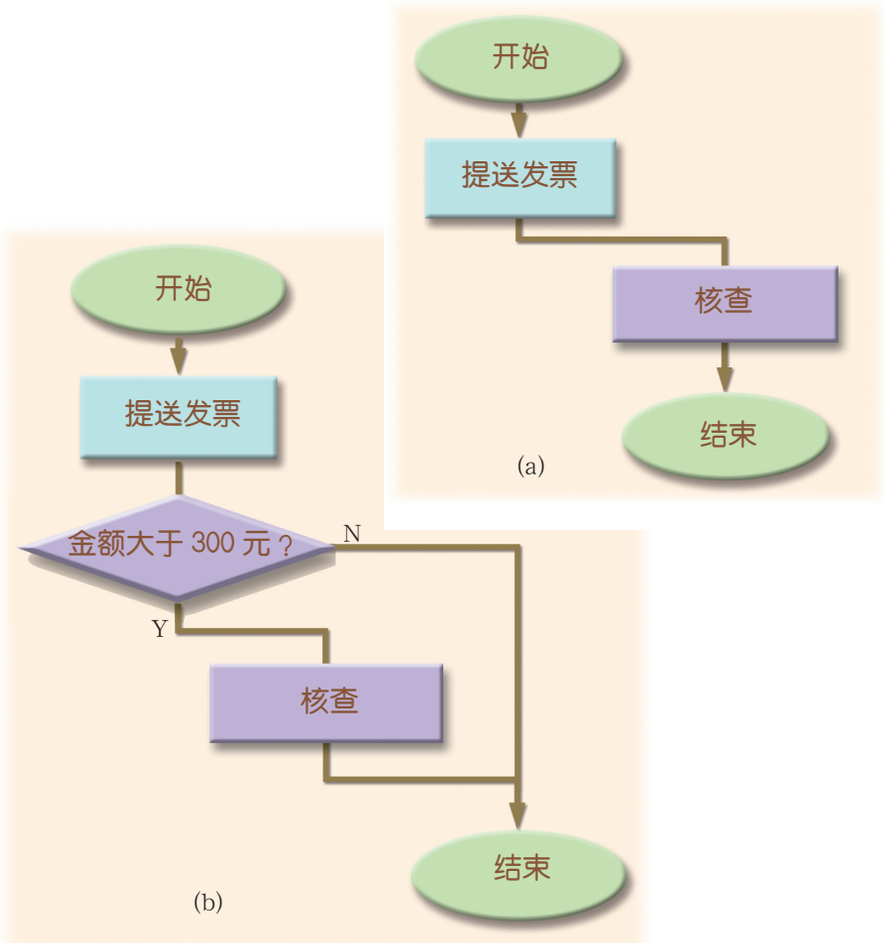


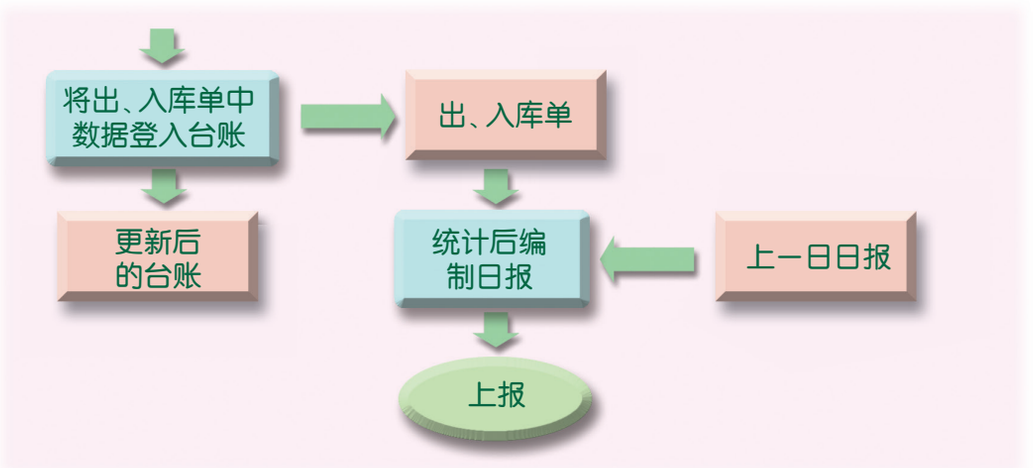
图 2.23　发票处理流程的优化

单和入库单的第一联取下并借此记入零件台账（成为更新后的台账，以备第二天用）。每日工作结束时再根据出、入库单以及上一日日报表来统计当日增、减数，编制出当日日报表上报［图 2.24(a)］。后来经过分析，将日报表的编制过程改为图 2.24(b)。由图可见，新、旧日报表编制流程的区别是在没有减少环节的情况下对编制顺序进行了重排，新流程不再利用出、入库单编制日报表，而是利用已经更新后的台账编制日报表。实践证明，利用更新后的台账编制日报表的新流程可以减少统计工作量一半以上，效率随之大为提高。

（五）中国银行存取款流程的改进（简化工作环节优化流程）

原流程是由顾客填写存款或取款单，签字后，将单据和银行卡一起交给银行员工；银行员工将单据和银行卡的一些数据输入计算机（若是取款，顾客还须输入密码），经验证核算处理后，银行员工将银行卡（若是取款，连同款一起）交还给顾客。现流程是由顾客向银行员工提交银行卡并报存款或取款数额；银行员工将存取款数额输入计算机（若是取款，顾客还须输入密码），计算机打印出单据，交顾客签字，与此同时，计算机验证核算；计算机处理后，银行员工将银行卡（若是取款，连同款一起）交还顾客。

微信公众号：电子课本大全

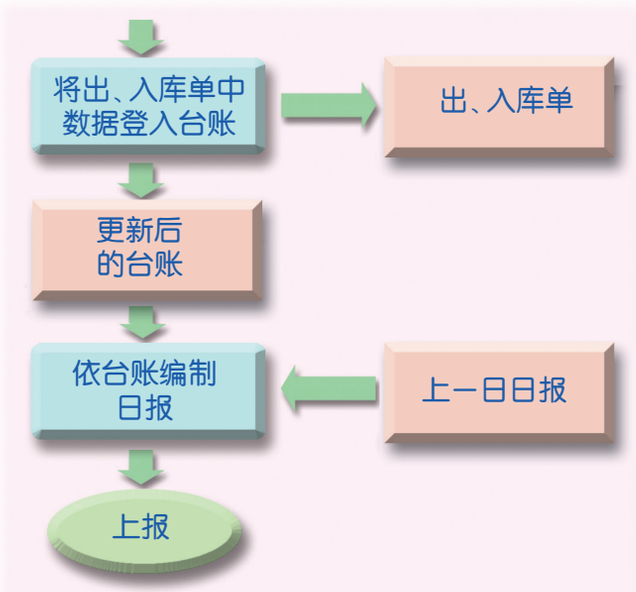


(a) 原日报表流程

流程的改进在于将顾客填写存款或取款单环节改由银行员工计算机输入，方便了顾客，特别是某些填写单据有困难的顾客。对于银行来说，则节省了因顾客填写单据错误造成的单据浪费。这是一种双赢的流程优化效果。

（六）美国 GTE 公司电话维修流程的修改（取消与合并工作环节优化流程）

美国最大的国内电话服务公司 GTE 公司运用“一人承包”的思路，对电话维修流程进行改进，大大提高了流程效率。该公司原来的维修流程如图 2.25(a) 所示，改进后的维修流程如图 2.25(b) 所示。



(b) 优化后的日报表流程

图 2.24　工厂日报表流程的优化

通过新、旧流程对比可以看出，原来的程序需要多道转手，大量时间耗费在交接上，占用人力多，对用户也不方便。而新流程不考虑部门设置，直接依靠具备综合知识的用户维护员，在计算机网络支持和专业知识指导下就可以完成原来前四道工序的大部分工作，只有在用户维护员无法马上解决问题的情况下，才求助于服务技术员，这样便大大减少了交接时间。在原流程中可以立即解决的问题占 0.5%，启用新流程后上升到 40%。原来需要几个小时才能解决的问题，现在只需几分钟就够了。

生活流程的优化或生产中的技术改进、革新，多数出自对已有生产流程的整体改进或者是对其中某一环节的改进，其目的不外乎提高工作效率、降低生产成本、减少能耗、保护环境等。

企业生产流程改进的条件，从外部条件来讲，是建立在设备和工艺水平提高的基础上；从内部条件来说，是建立在对流程内在机制的进一步研究的基础上。流程的改进过程就是优化的过程。

微信公众号：电子课本大全

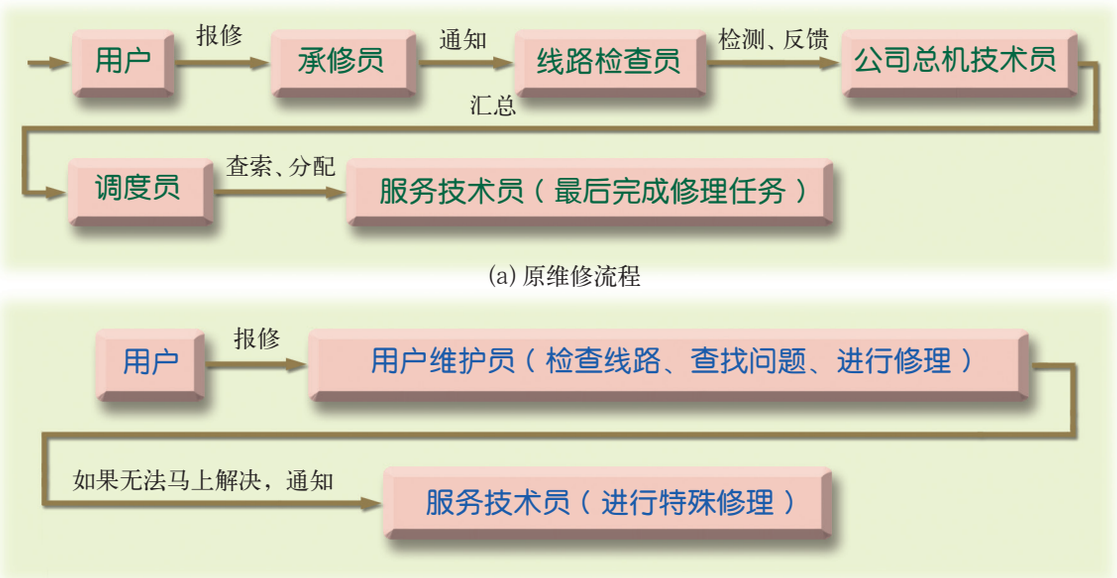


图 2.25　电话维修流程的优化



探究与交流　应该优化核心流程

在一个企业、单位内，可能同时存在着多个流程，首先应该优化核心流程。核心流程是对组织价值创造有着关键作用的流程。抓住了核心流程也就抓住了主要矛盾。因为一个人或一个企业不可能什么事情都做好，不可能每个流程都是最优，但只要能抓住一两个重要的流程，只要这个流程做好了，这个企业就不致出现大的问题。

随着计算机技术的发展，流程的建立已经不仅仅靠人工了，近年来开发出不少的流程设计软件或管理软件，它们可以帮助人们更规范、更高效地建立流程。

上面介绍的流程主要是串行工程。我们知道，目前汽车工业在我国发展非常迅速，每过几分钟，就可以从汽车总装配车间的流水线上开出一辆合格的新车。为什么非常复杂的汽车能以如此高的效率高质量地生产出来呢？这主要是采用了并行工程。这是一种更为复杂的流程，需要我们在以后的学习和实践中慢慢体会。



活动延伸

1．墙面涂刷的施工工艺流程的改进设计。
2．服装制作工艺流程的改进设计。
3．某种家具（如桌子、立柜）制作工艺流程的改进设计（可考虑材料替代）。
4．某工业品装配工艺流程的改进设计（可考虑采用某些先进技术）。

微信公众号：电子课本大全

“神舟”5号飞船飞天的程序



阅读材料

飞船到底是如何上天和运行的呢？首先，飞船和运载火箭完成技术准备工作后，整体垂直运输到脐带塔，并进行最后的功能检查。一切准备就绪后，火箭点火升空，开始程序转弯，继续飞行后，抛掉逃逸塔，船箭分离，飞船入轨。入轨后，飞船“捕获”地球，建立轨道运行姿态。飞船入轨一段时间后，地面测控系统通过测控站和测控船对飞船监控。飞行一周约90min后，当飞船进入海陆测控区时，飞船上的设备开机工作，发射遥测信息，接收遥控信息。飞船在环绕地球飞行规定的圈数和完成科学实验任务后返回。飞船进入返回轨道后，返回舱降低至140km的高度时，推进舱与返回舱分离。飞船降至约80km时，返回舱进入稠密大气层，着陆场的地面雷达站和测量站跟踪捕获目标，测量返回轨道，预报返回舱着陆点。返回舱着陆过程中，空中搜索直升机和地面搜索车辆发现目标后迅速赶往着陆地点，回收返回舱。“神舟”5号飞船飞天的程序可简单地表示为：

火箭发射→程序转弯→船箭分离→按预定轨道飞行→进入黑障区→拉出引导伞→缓冲发动机工作→现场回收。

图2.26和图2.27分别为电脑演示的火箭发射图和现场回收图。

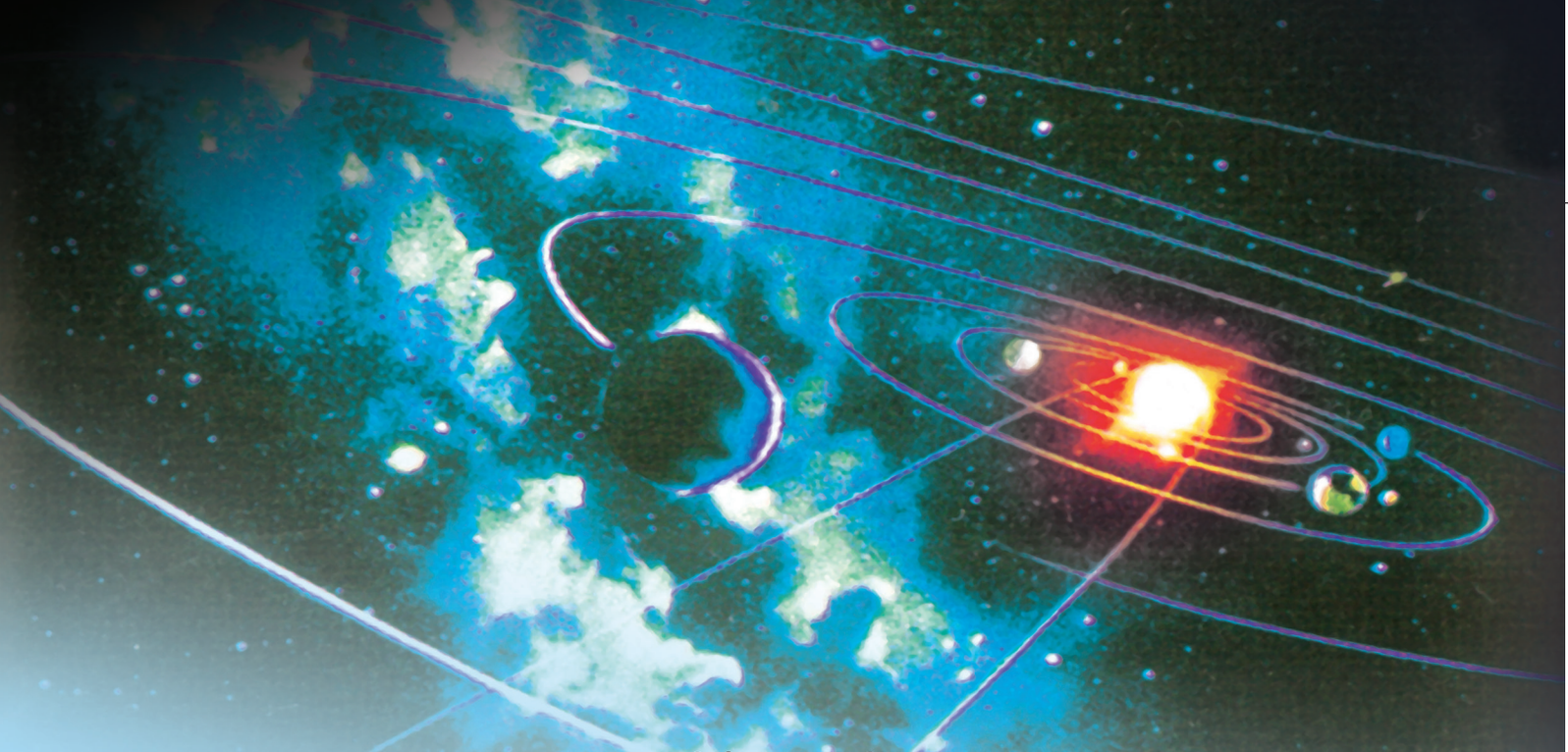


图2.26　火箭发射图



图2.27　现场回收图

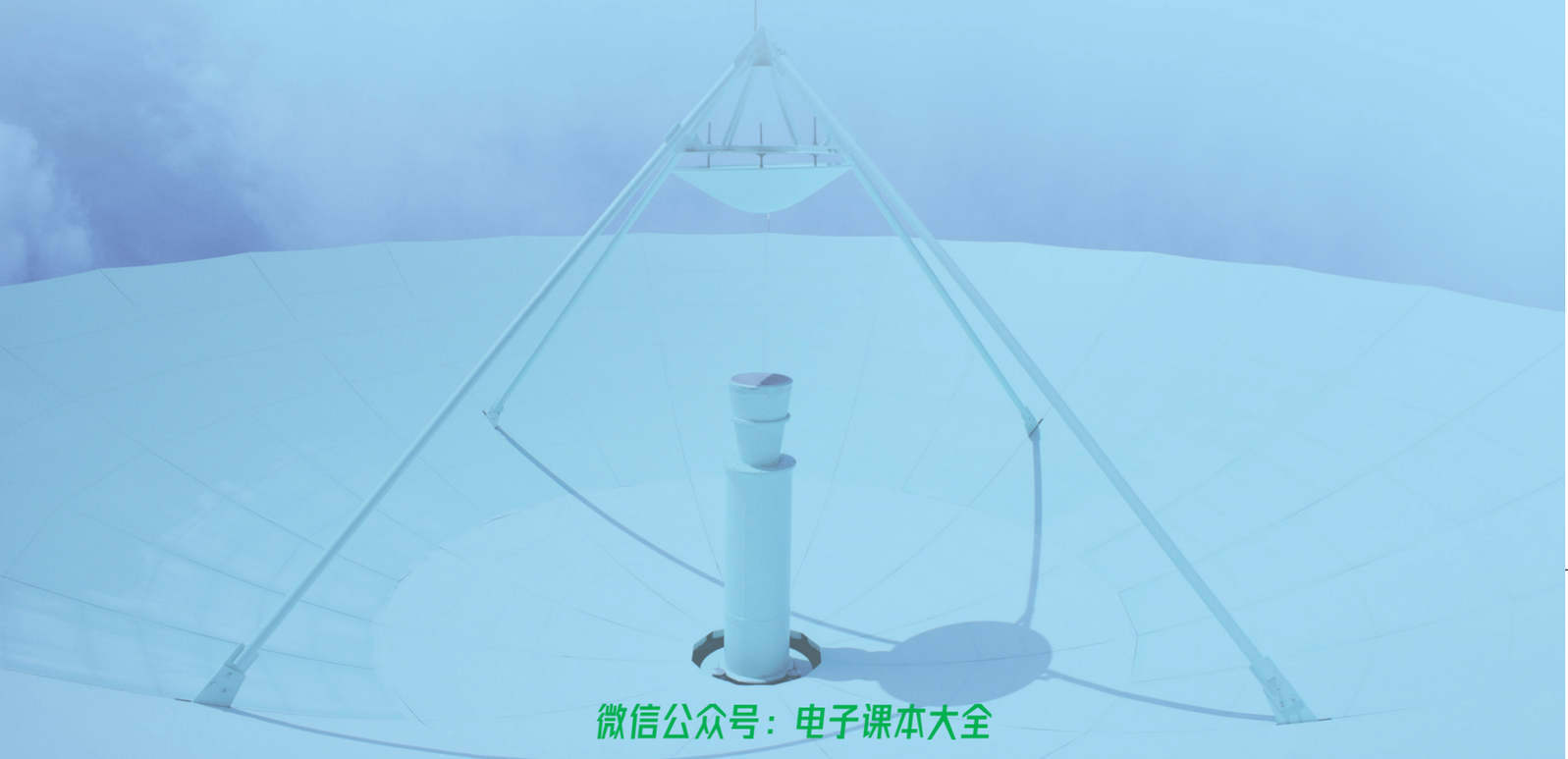
微信公众号：电子课本大全



第三章
系统及其设计

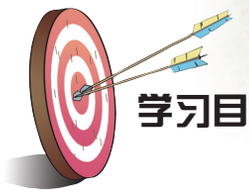
如果你是住校的学生，早晨起来你到盥洗室去洗漱使用的是供水系统，到食堂就餐接触到的是食堂系统，它们又都是学校后勤系统中的子系统，除此而外还有教学系统、办公系统等。“系统”这一术语广泛使用着，如人体中的血液循环系统、神经系统，城市交通系统、供水系统、供电系统，自然界的生态系统等。系统直接影响着我们的生活、学习和工作。

什么是系统？它有什么特点？怎样进行系统分析和设计？学完这一章就基本明白了。



微信公众号：电子课本大全

第一节　系统的概念



学习目标

1．理解系统的含义。
2．了解系统的基本特性。
3．初步掌握系统分析的基本方法。

一、系统的含义

系统在我们的学习和生活中广泛存在。学校的一间多媒体教室可以看作一个系统，家庭的一台电冰箱可以看作一个系统，我们学习的数学、物理课程也分别是数学系统和物理系统，就连我们人体本身也是一个十分复杂而精密的系统。

（一）什么是系统

系统的概念来源于人类的长期社会实践，中华民族的祖先在了解和改造自然的辛勤实践和大量社会活动中，很早便产生了一些朴素的系统概念并有许多应用实例。在军事方面，早在公元前500年的春秋时期，就有著名的军事家孙武写出了《孙子兵法》十三篇，指出战争中的战略和策略问题。战国时期，著名军事家孙膑继承和发展了孙武的学说，著有《孙膑兵法》，在齐王与田忌赛马中，孙膑从总体出发制定对抗策略，使处于劣势的田忌战胜齐王。在水利建设方面，战国时期，秦国蜀郡守李冰父子主持修建了举世闻名的都江堰水利工程。在建筑施工、医学、农业等方面，我国古代也有许多著名学者用朴素的系统思想和方法取得了伟大成就。

现实存在的系统都是具体的，如一个动物、一台机器、一篇文章、一家公司、一个国家。每个系统元素都有自己的属性，例如一个车间（系统）具有许多机械设备（元素），每台设备（元素）又有属性：性能、型号、生产效率、价格、寿命、可靠性等。元素的属性千变万化，但归纳起来不外是物质、能量、信息三种类型。抛开它们各自的特质，可以发现它们都是由两个或两个以上的元素相互作用而形成的统一整体。换句话说，系统是由相互制约和相互关联的各部分组成的具有一定功能的整体。即系统由互相依赖的若干部分组成，各部分之间存在着有机的联系，形成一个整体，以实现一定的功能。例如，图3.1表示一个简单的单灯照明系统，该系统由电源、开关、

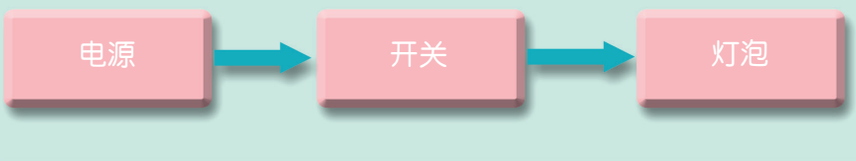


图3.1　单灯照明系统

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 思维外延

请在自己的学习或生活中独立找出几个可观察到的系统，并分析其组成。

灯泡几个部分组成，它们互相联系，具有照明的功能；它们又互相制约，只要其中一个组成部分出了问题，整个系统就不能发挥作用。

一个系统不是任意组合的一组元素，而是由一些为共同的意图、目的或目标而结合在一起的基本组成部分所构成。实际系统更不仅仅是概念的结构，它们还显示出活动或行为。

一个系统可用图 3.2 所示的通用图形表示。

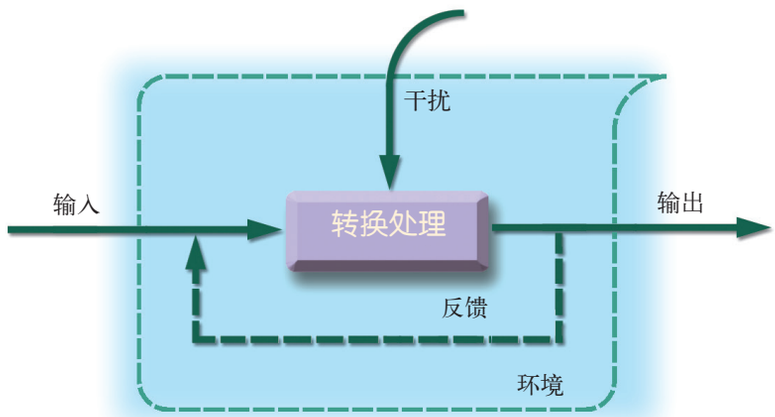


图 3.2　一般系统示意图



探究与交流　我们身边的实际系统

血液循环系统是指把血液送到人或动物全身的血管系统和心脏；

运输系统是指运送货物的人员、机器、组织机构以及公路、铁路、水路和航空线路；

武器系统是指武器和相关设备、武器和设备的使用方法与使用武器及设备的人员；

学校系统是指校舍、教师、管理人员和各种管理制度、教学设备和图书资料以及教育对象——学生。

（二）元素和子系统

1．元素

元素是构成系统的最小部分或基本单元，即不可再划分的单元。机器作为系统，元素是不能再用机械方法分解的零件。句子作为系统，元素是单词。所谓元素的不可分性，是相对于它所属的系统而言的；离开这种系统，元素本身又可以成为由更小单元构成的系统。单词或单字可以划分为若干字母或笔画，是一种符号系统。但字母和笔画没有语义，不是构成句子的元素。相对于句子系统，单词是不可再分的基本单元。机器零件由分

微信公众号：电子课本大全

子组成，但设计和使用机器只需考虑零件之间力学的或电磁的相互作用，无须把机器当作以分子为元素的系统。

最小的系统由两个元素组成，称为二元素系统。一般系统均由多个元素组成，称为多元素系统。



实践与体验

分析组成系统的元素

系统中的“元素”并不一定都是物质实体。同学们可用系统的概念分析一下曾经学习过的力学中的“质点”。它是以质量、速度、位置等为元素的系统，叫作质点系统。如果把我们的班级看作一个系统，把高中一年级的所有课程看作一个系统，或是把某门课程（例如数学）看作一个系统，请分析一下组成这些系统的元素。

2．子系统

在元素众多、结构复杂的系统中，元素之间有一种成团现象，一部分元素按某种方式更紧密地联系在一起，具有相对独立性，有自己的整体特性。不同集团的元素之间往往不是直接相互联系，而是通过所属集团联系在一起的。这类集团被称为子系统或分系统。系统与子系统的结构关系的一个例子如图 3.3 所示。我们通常所谈的教育是一个系统，它下面又可以分为几个子系统，中学教育就属于普教系统。

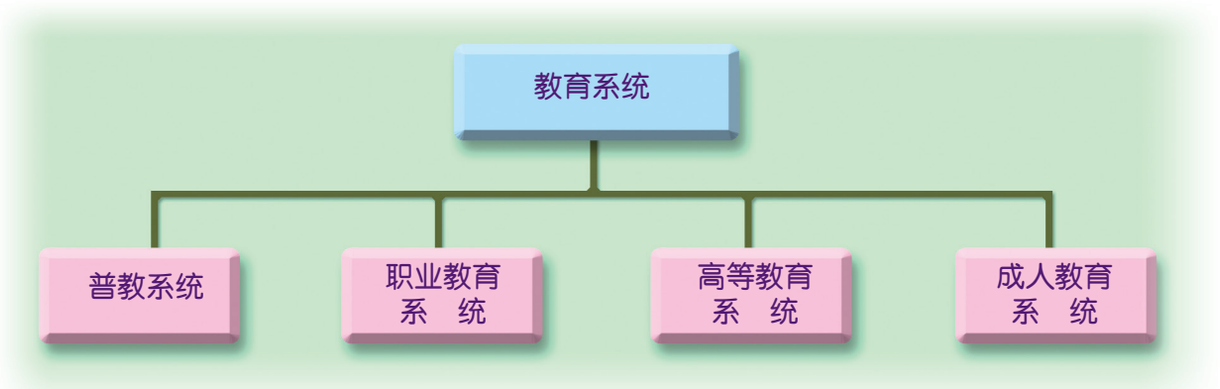


图 3.3　教育系统及其子系统

系统和子系统的概念是相对的。任何一个系统作为一个独立的部分来看，它是一个完整的系统。但从更大范围或更高一级来看，又必是另一个它所从属的系统的子系统。这就是子系统概念的两重性。例如，我国成功发射的“神舟”5 号宇宙飞船，共有七大系统：航天员系统、有效载荷系统、飞船系统、运载火箭系统、发射场系统、测控通信系统和着陆场系统。它们都是宇宙飞船系统的一部分，相对于宇宙飞船总系统，它们都是子系统，但它们各自又可分解为若干子系统。基于子系统概念的这种两重性，我们在研究或叙述系统时，常根据具体情况，把一个系统的一部分或称为元素或称为子系统。

（三）系统的基本特性

1．相关性

指系统内各要素之间存在着某种相互依赖和相互制约的特定关系，某一要素的变化会影响另

微信公众号：电子课本大全

一些要素的变化。正是由于这些特定关系把各种要素有机地结合在一起，形成一定的结构，才使系统显示出整体功能和综合行为。以一所中学学生的学习成绩系统为例，这个系统由语文、历史、地理、数学、物理、化学、生物、外语、体育等学科成绩组成。显然，数学成绩下降常会影响物理、化学等科成绩下降；而外语成绩上升往往会同时带动语文等其他学科成绩上升。又如导弹系统，以其总质量、速度、火箭推力、雷达功率等因素作为要素，这些要素也是互相依赖和互相制约的，譬如导弹的总质量会影响火箭推力，因为总质量决定了火箭燃料的装载量；反过来，火箭推力又影响着导弹的总质量。再如一个农业区的生态系统由有益鸟类、农业害虫和农作物组成。害虫种类、数量的变化会影响农作物的收成；有益鸟类又能控制害虫的生长。如果在一个农业区把麻雀打光，就可能引起虫害，甚至造成大面积的农作物歉收。

2．目的性

任何一个系统的存在都具有其特定的目的，因而具有一定的功能。这正是系统间区别的标志。研究、设计、组建、管理系统都是为了实现特定的功能目标。例如，我们设计一个机床系统，目的是要高效、优质地加工出工件。

系统的目的（或目标）既有单一的也有多样的，现代化系统多半是多目标的系统。例如高等学校就是一个多目标系统，它要培养人才（包括大学生、研究生、进修生等）；要进行科学研究，取得研究成果；要为社会提供服务；等等。

3．环境适应性

一个系统之外的一切事物或系统的总和，称为该系统的环境。系统不能脱离环境而独立存在。系统和包围它的环境之间通常总有物质、能量和信息的交换。外界环境特性的变化往往会引起系统特性的变化，即系统的形式和发展要受到环境的制约。因此系统必须适应外部环境的变化，否则系统就不能继续存在下去。例如，一架正在飞行的飞机，周围的空气、温度、山水、其他飞行器等是它的环境（图 3.4）。飞机常会因为环境的变化而改变速度、姿态、飞行路线或停飞。总之，一个系统必须是动态的，它经常改变着自己以适应外部环境的变化，同时在适应的过程中又能动地改造着外部环境。



图 3.4　飞机与环境

4．整体性

系统虽然是由两个或两个以上的元素所构成的整体，而且各元素具有不同的性能，但系统绝不是这些元素简单拼凑的一个集合，而是这些元素按一定的结构、为实现系统目标所构成的一个整体。当各个元素构成一个整体之后，系统就产生出一种整体的功能，即系统的功能。这种整体功能不是各元素所单独具有的，相对于各元素而言，是一种质变。也就是说，系统之所以成为系统，不仅在于它是各元素的集合，更在于它具备了一种高于各元素功能的整体功能。例如收录机是收音机和录音机结合而构成的一个系统。收录机不仅具备收音机和录音机所单独具备的收音功能和录音功能，而且它还具备一种新的系统整体功能，即在收音的同时能自动地通过电路进行内录。这种内录功能就不是收音机和录音机功能的简单相加。

对于上述系统的四个特性，我们可以通过一个火力发电厂系统进一步加以理解。火力发电厂系统框图如图 3.5 所示。这是一个由锅炉、汽轮机组、变电站、输电网络所组成的系统。

微信公众号：电子课本大全

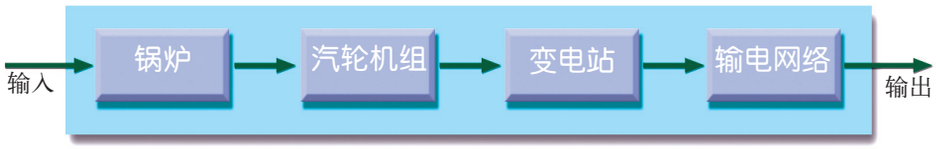


图 3.5　火力发电厂系统

它的相关性：输入燃料经过锅炉产生动力，动力再推动汽轮发电机组发电，电流送到变电站处理后再通过输电网络输出给用户。

它的目的性：先变热能为电能，又将电能转化为光能、声能、微波能、机械能和热能等，为用户提供服务。

它的适应性：利用各种燃料都能发出足够的电，以满足用户的供电要求。

它的整体性：以发电量多、成本低、供电质量高为标准，来设计和建立火力发电厂系统；同时注意此发电厂系统又是整个电力系统的一个子系统，它的设计和建造还应促进整个电力系统的功能优化。



小资料　　计算机集成制造系统

在自动化技术、信息技术和制造技术的基础上，将计算机辅助设计、计算机辅助工艺设计、计算机辅助制造、计算机质量保证系统、生产信息管理系统、制造自动化系统等制造工厂全部生产活动所需的分散系统有机地集成起来，就是计算机集成制造系统。它是在网络、数据库支持下，由以计算机辅助设计为核心的工程信息处理系统，以计算机辅助制造为中心的加工、装配、检测、储运、监控自动化工艺系统和经营管理系统组成的综合体。

（四）系统的分类

为了更方便地讨论和研究系统问题，人们用不同的方法对系统进行了分类。

(1) 依据系统的形成来源，系统可分为自然系统与人造系统。自然系统即由“自然物”（物质或客观规律）所形成的系统。如地球的岩石圈、生物圈和大气层等。人造系统是人类为达到某种目的而建造的，例如钟表、自行车、机床、计算机集成制造系统、工厂、学校、城市等。

(2) 依据系统存在的形式，系统可分为实体系统与抽象（概念）系统。实体系统是以诸如矿物、生物、机械、能量和人等实体为元素所构成的系统。例如工厂、军队、学校等。抽象（概念）系统是以诸如概念、原理、原则、方法、制度、程序等理性的元素所构成的系统。例如一本书、一场演讲、知识体系、社会道德、宗教体系等。实际系统往往是实体系统和概念系统的复合系统。



新视窗·方法外延

仿效火力发电厂的系统框图画出水力发电厂的系统框图。

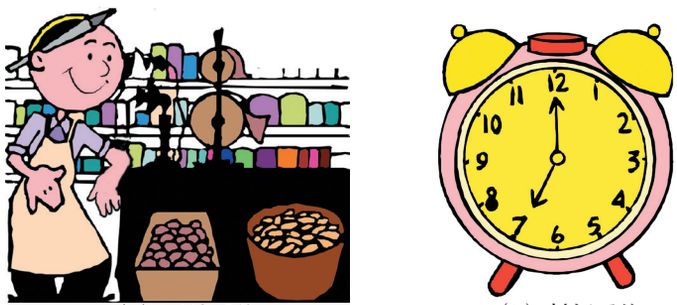
微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 思维外延

试调研、分析和归纳出医疗系统的各个环节，并指出如果其中一至两个环节出了问题会产生什么后果？（最好以小组讨论的方式进行。）

（3）依据系统与环境的关系，系统可分为开放系统与封闭系统（图 3.6）。开放系统即系统与外部环境有交换的系统。例如一个商业系统就与社会有物质、能量、信息的交换。从理论上说，封闭系统是与外部环境无任何形式交换的系统。但由于事物总是运动变化的，实际上没有不与外部环境发生任何联系的系统，即严格的封闭系统是不存在的。不过，在一定的时间内不依赖于外部而且具有稳定运行能力的系统，即可近似地看作一个封闭系统。例如在较长时间内不需要人的干预而能按程序完成其功能的自动机（一只上紧了发条自行运转的钟表、一台计算机控制的自动机床等）。



（a）开放系统　　（b）封闭系统

图 3.6　开放系统与封闭系统

（4）依据组成系统的元素和元素种类的多少以及它们之间关联的复杂程度，系统可分为简单系统与巨系统两大类。简单系统是指组成系统的元素比较少，它们之间的关系又比较单纯，如某些非生命系统；巨系统是指组成系统的元素的数目非常庞大的系统，例如人体系统和生态系统。在人体系统和生态系统中，元素之间关系虽然复杂，但还是有确定规律的。

系统还有一些其他的分类方法，如动态系统与静态系统等。

二、系统的功能

系统在内部联系和外部联系中表现出来的特性和能力，称为系统的性能。系统行为所引起的环境中某些事物的有益变化，称为系统的功能。被改变了的外部事物，叫作系统的功能对象。性能一般不是功能，功能是特殊的性能。例如，可以流动是水的重要性能，利用它输送木材是河水的功能。又如图 3.7 所示的四冲程发动机，燃烧效率是它的重要性能而不是功能，提供推力才是它的功能。性能是功能的基础，提供了发挥功能的可能性。功能只能在系统行为过程中呈现出来，通过它所引起的功能对象的变化来衡量。凡系统都有自己的功能。

一般系统都有多种功能。系统性能有多样性，每种性能都可能被用来发挥相应的功能，或综合几种性能发挥某种功能。环境中的功能对象往往不止一种，同一系统对不同对象有不同功能。图书的首要功能是积累和传播知识，但它也有装饰居所的功能，对作者有获得名利和交友的功能，甚至被用于其他无文化含义的方面。功能分本征的与非本征的两类。车辆的

微信公众号：电子课本大全

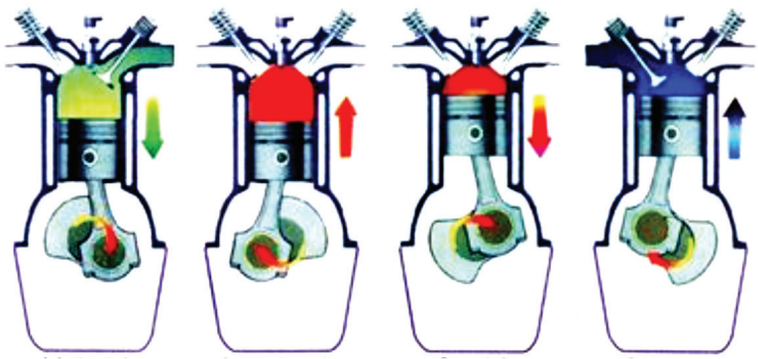


图 3.7　四冲程发动机

本征功能是运输；有时也被当作储存室或路障，甚至在防洪抢险时用于应急断流，这些就是非本征功能。



小资料　　四冲程发动机的工作循环

四冲程发动机几乎应用于所有车用发动机（包括汽油机和柴油机），也应用于很多两轮摩托车。

内燃机将燃料热能转化为机械能的过程是按一定规律进行的。进气、压缩、做功、排气四个连续过程组成四冲程发动机的工作循环（又称奥托循环），每个工作过程依次循环不断地进行。

四冲程发动机的每个工作循环是在活塞上下两次运动，即四个行程中完成的，如图 3.7 所示。

(1) 进气冲程：燃油与空气混合后的气体进入汽缸，这时活塞向下运动。

(2) 压缩冲程：随着进气门和排气门关闭，活塞向上运动，可燃混合气被压缩。

(3) 做功冲程：可燃混合气点火燃烧，推动活塞向下运动而做功。

(4) 排气冲程：向上运动的活塞把燃烧后的废气从排气门排出。

四冲程发动机的四个冲程作为一个工作循环，在 1min 内重复数千次。四冲程发动机又称为四循环系统。

三、整体突现性

一堆自行车零件对行人没有用处，组装成自行车就具有交通工具的功能（图 3.8）。H 原子和 O 原子化合为水分子（H_2O），再聚集起来，就具有水的不可压缩性、溶解性等新性质。无生命的原子和分子组成细胞，就具有生命这种全新的性质。系统整体与其元素或部分的总和之间的这种差别，是普遍存在且具有重大意义的现象。由此可得出一个基本结论：若干事物按某种方式相互联系而形成一个系统，就会产生出它的组分和组分的总和所没有的新性质，叫作系统质或整体质。这种性质只能在系统整体中表现出来，一旦把系统分解为它的组成部分，便不复存在。这就是系统的整体突现性。

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 背景外延

中华民族是一个富有系统思想的伟大民族。从《易经》《老子》《孙子兵法》《黄帝内经》等传统文化经典，到秦国蜀郡守李冰父子主持修建的四川都江堰工程，都强调用整体的、有机联系的、协调有序的、动态的观点去观察和处理问题。西方著名系统理论家普利高津、哈肯、托姆等，都对中国古代文明中的系统思想赞赏有加。这些朴素的系统思想一经与现代系统研究相结合，定将升华出更高水平的系统思想。

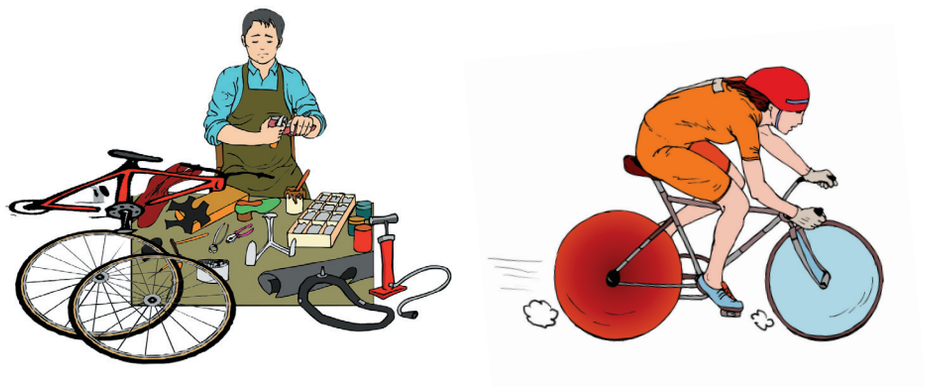


图 3.8　自行车的整体突现性

系统是有组织的群体，组织性表现为元素或部分之间存在一定的相互联系。整体突现性是系统的组分之间相互作用、相互激发而产生的整体效应，即结构效应或结构增值。单个组分或组分的总和不能产生这种效应。

四、系统分析

（一）系统意识

在日常生活与工作中，人们很早就使用系统这个名词，现在，它已是当代科学、技术、政治、经济、军事、教育、文化、交通等各个社会活动领域应用得最广泛的几个名词之一。而对研究对象采用系统观点，已构成现代科学认识的基本特点之一。学习和掌握系统的思想并运用系统的方法观察、分析和解决生活和工作中的问题，有助于减少处理问题过程中的盲目性，学会对事件进行理性分析和科学决策。

我们在工作、学习和生活中经常遇到的成功与失败，其促成条件应从链—环关系的系统观点来看。这有两个方面的因素：一是是否认识到所要处理的这一事物的全部组成环节，忽视或没有看到其中的一个环节就会碰钉子；二是是否认识到这些环节相连的部分的形式和特点，这在不同系统中是有区别的，不认识到这些，也照样会碰钉子。比如烧柴—森林—土地沙漠化的关系，除麻雀—虫害—果树产量的关系等，都是分析这种成功—失败链与环的实际例子。因此，从系统观点看，要想把事情办得好一些，多一些成功而少一些失败，就必须培养人的系统意识。所谓系统意识，就是在思考、研究、探索和处理一个事物时，要有意识地把它看成一个系统。它不是一个简单的存在，而是一个系统的存在。明确链—环关系，并从系统内相关的角度去分析它、认识它。这样一种思考问题的方法如能形成，那将是收益甚大的。

（二）系统分析的实质与内容

系统分析的方法就是运用系统的思想和定性定量相结合的方法分析处理问题的基本思路，整个过程可归纳为阐明问题、分析研究、评价比较三

微信公众号：电子课本大全

个阶段。

1．系统分析的实质

(1) 系统分析作为一种决策工具，其主要目的是为决策者提供直接判断和决定较优方案的信息和资料。

(2) 系统分析把任何研究对象均视为系统，以系统的整体最优化为工作目标，并力求建立数量化的目标函数。

(3) 系统分析强调科学的推理步骤，使所研究系统中各种问题的分析均能符合逻辑的原则和事物的发展规律，而不是凭主观臆断和单纯经验。

(4) 应用数学的基本知识和优化理论，从而使各种替代方案的比较不仅有定性的描述，而且基本上都能以数字显示其差异。

(5) 通过系统分析，使得待开发系统在一定的条件下充分挖掘潜力，做到人尽其才，物尽其用。

2．系统分析的内容

(1) 明确期望达到的目的或目标。目的是决策的出发点，为了正确获得决定最优化系统方案所需的各种有关信息，系统分析人员的首要任务就是要充分了解建立系统的目的和要求，同时还应确定系统的构成和范围。

(2) 确定达到预期目的或目标所需要的设备、技术条件和相应的资源条件。

(3) 计算和估计达到各种可行方案所需要的资源、费用和最终的效益。费用和效益是分析、比较和选择方案的重要标志。用于方案实施的实际支出就是费用，达到目的所取得的成果就是效益。如果能把费用和效益都折合成货币形式来比较，一般说来效益大于费用的设计方案是可取的，反之则不可取。

(4) 建立各种替代方案所需要的模型，模型须标明目的、环境条件、资源条件、时间、费用、元素间的关系。模型是对实体系统抽象的描述，它可以将复杂的问题化为易于处理的形式。一般情况下，为实现某一目的，总会有几种可采取的方案或手段，它们彼此之间可以替换，但总是各有利弊。究竟选择哪一种方案最合理，这就是系统分析研究和解决的问题。

(5) 为选择最优化方案，建立一定的评价准则，进行评价比较。评价基准是系统分析中确定各种替代方案优先顺序的标准。通过评价标准对各方案进行综合评价，确定各方案的优先顺序。评价基准一般根据系统的具体情况而定，费用与效益的比较是评价各方案的基本手段。

在上述论点的基础上，人们总结出系统分析的五个基本要素：目的、可行性方案、模型、费用和效益、评价基准。

系统分析的适用范围很广，它研究的主要问题是如何使系统的整体效益达到最优化。



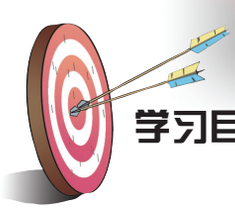
活动延伸

1．对学校植物园几种作物合理套种进行系统设计，确定系统设计的目的和组成系统的元素。

2．对教室的照明系统进行设计，确定组成系统的元素并做出系统设计的技术框图。

微信公众号：电子课本大全

第二节　系统的结构与层序



学习目标

1．理解系统结构的含义及其在系统优化中的作用。
2．了解系统的层次、秩序的概念。

水星、金星、地球等八大行星都沿着一定的轨道围绕太阳运行（图 3.9），是因为它们在万有引力的作用下，形成一个合乎规律的、相对稳定的结构。有些系统的整体性能明显大于各部分性能之和，而有些系统尽管各部分性能都好，但整体性能却不好。为什么会出现这种现象呢？这涉及系统的结构是否合理的问题。

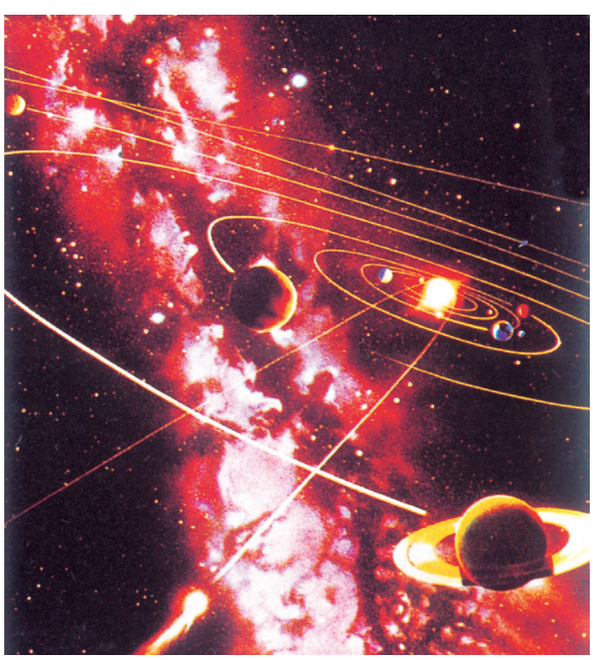


图 3.9　太阳系的结构

一、系统的结构

（一）什么是结构

在本书第一章，我们曾以力学的观点介绍过结构；这里，我们以系统论的观点，在更抽象和一般的意义上来谈谈结构。任何系统都有一定的结构。宏观客体，如太阳系的八大行星都沿着一定的轨道围绕太阳运行，形成一个相对稳定的结构。在有机界中，从生物大分子、细胞、组织、器官、系统直至生物个体、生物群体和生态系统等，都存在着不同水平的结构。在社会生活中，有经济结构、产业结构、经营管理结构、产品结构，还有上层建筑的结构，等等。总之，结构是无所不在的。所谓结构，就是系统内部各元素之间相对稳定的、有一定规则的联系方式。元素和结构是构成系统的两个缺一不可的方面，系统是元素与结构的统一。给定元素和结构两方面，才算给定一个系统。只有通过结构，各构成元素才能形成系统整体，实现系统的整体性能。

（二）结构的作用

一般地说，系统的性能主要取决于系统的结构。系统整体性能之所以不同于各部分的性能，不可归结为部分性能的简单相加，其原因就在于系统的各个元素按一定的结构组成了系统整体。但是，作为系统整体及其结构的基础的元素，特别是主要的元素即要素的情况如何，对于系统整体性能也具有不可忽视的影响。

微信公众号：电子课本大全

了解系统的结构性特征，对于人们的认识和实践活动具有重要定义。要把握和控制系统的整体性能，主要是靠正确认识和调整系统的结构。在工程技术的各种学科中，都要研究系统的结构，以便深入了解和发挥系统整体的最优性能。例如，在建筑学中要研究建筑结构；在冶金学中要研究金相；在机械学中要研究各类机器的整体结构及其性能；在电子学中要研究电路结构，即组成电流路径的各种装置、连接方式和电源的整体构造，如此等等。可以说，不研究各系统的结构和性能的关系，就没有各类工程技术。

（三）结构的分类

从系统意义看，结构是千差万别的，有多种分类方法。以下是常见的两种分类方法：

1．空间结构与时间结构

元素在空间中的排列分布方式（代表元素间一定的相互作用方式），称为空间结构。如晶体的点阵结构（图 3.10）、建筑物的立体结构等。系统运行过程中呈现出来的内在时间节律，如地球—月球系统的周期运动、生物钟等，称为时间结构。还有一些系统可能会呈现出时空混合结构。

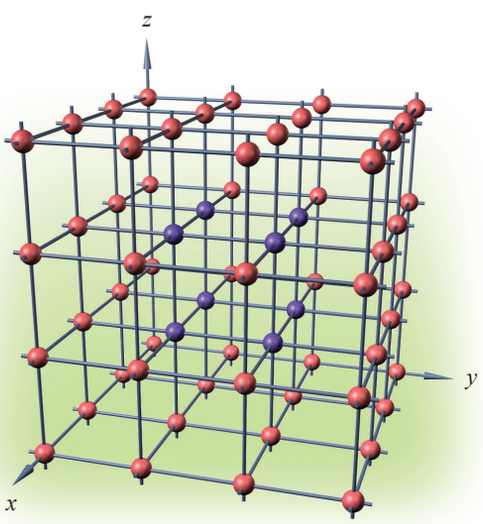


图 3.10　晶体的点阵结构

2．深层结构与表层结构

系统的结构有深、浅之分。如把社会视为一个系统，根本制度是深层结构，具体运作体制是表层结构。一般来说，深层结构决定表层结构，表层结构反映并反作用于深层结构。深层结构比较稳定，表层结构容易改变。

（四）结构调整优化系统功能的实例

系统的结构直接影响着系统的功能效益。例如，有一个人，他只有一个炉子，他的任务是准备好一顿饭菜，目标是耗费时间要少。把这件事作为一个系统来研究，它的要素是：淘米、洗菜、切菜、烧水、蒸饭、炒菜。请看图 3.11，按照图（a）六个要素串联组成的结构工作，完成任务需

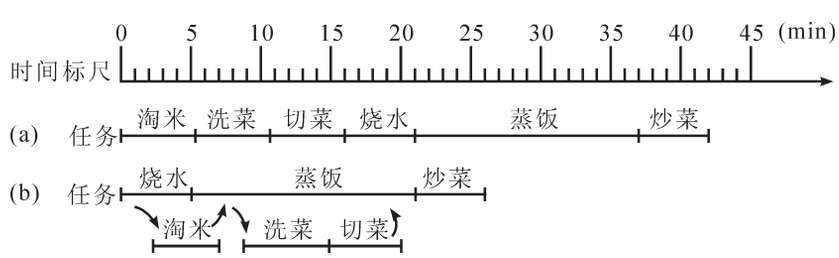


图 3.11　系统的不同结构



新视窗·知识外延

没有按一定结构框架组织起来的多元集是一种非系统。

结构也可以划分为对称结构与非对称结构。例如，中国古建筑具有明显的对称结构，某些西洋建筑的非对称结构比较明显。

结构还可以划分为硬结构与软结构。如计算机系统的硬件即硬结构，软件即软结构。

新视窗·知识外延

晶体中原子（或离子）在空间呈规则排列，规则排列的方式即称为晶体的结构。几乎所有的金属都具有晶体结构。

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 知识外延

根据本案例，你能否设计出一个工作或学习中提高效率的具有并行结构的系统。

要 42min；但改用图 3.11(b) 的并行结构工作，则只需 26min。

由此可见，尽管上述两个系统的要素完全相同，要素的功能也完全相同，但因为二者结构不同，后一个系统的整体功能显然优于前一个系统的整体功能，完成同样任务节省了 38%的时间。只要动脑子，生活和学习中有很多像这样可以提高效率的情况。

二、系统的层次与秩序

系统结构的设计与建立，除了合理地划分元素（子系统）外，还要充分认识和合理安排、设计系统的层次与秩序。

（一）系统的层次

系统的层次是指系统和元素（子系统）的地位、等级之间的相互关系。系统的元素是作为系统整体的构成部分而存在的，它们都依存、从属于系统整体。但是，系统的元素又具有相对的独立性，它们自身也都是整体和部分的统一体、结构和元素的统一体，可以自成系统（子系统）。所以，任何系统都具有层次性（可以是单一层次），都是由若干不同层次的子系统组成的复合体。

现代科学证明，物质世界是一个具有无数层次的无限系统。在无机界，有基本粒子层次、原子层次、分子层次……直至星系、总星系等层次。目前，人们能够观测到的星系大约有 500 亿个以上，但还是无边无际，真是“天外有天”。在有机界，则有生物大分子、细胞、组织、器官、系统、生物个体、生物群体、生物群落、生态系统和生物圈等层次。而每一个层次都可以相对独立地自成系统，都是整体和部分、结构和元素的统一体。



探究与交流

复杂的人类社会

人类社会也是一个多层次的复杂系统。从整个社会来看，就有由劳动者、生产工具和劳动对象等要素所构成的生产力，为适应一定生产力状况而结成一定的生产关系，以及建立在一定生产关系的总和即经济基础之上的上层建筑等不同的层次，而生产力、生产关系和上层建筑又都各自成为一个多层次的复杂系统。

作为一个具体企业的生产系统，也常常划分为不同的层次。图 3.12 是某企业的生产系统图。

系统之所以有不同的层次，是由于系统和元素具有相对性。在一定时空范围内是系统，在更大的时空范围内则是元素。反之，在一定时空范围内是元素，在更小的时空范围内却是系统。每一个具体物质系统都隶属于更大

微信公众号：电子课本大全

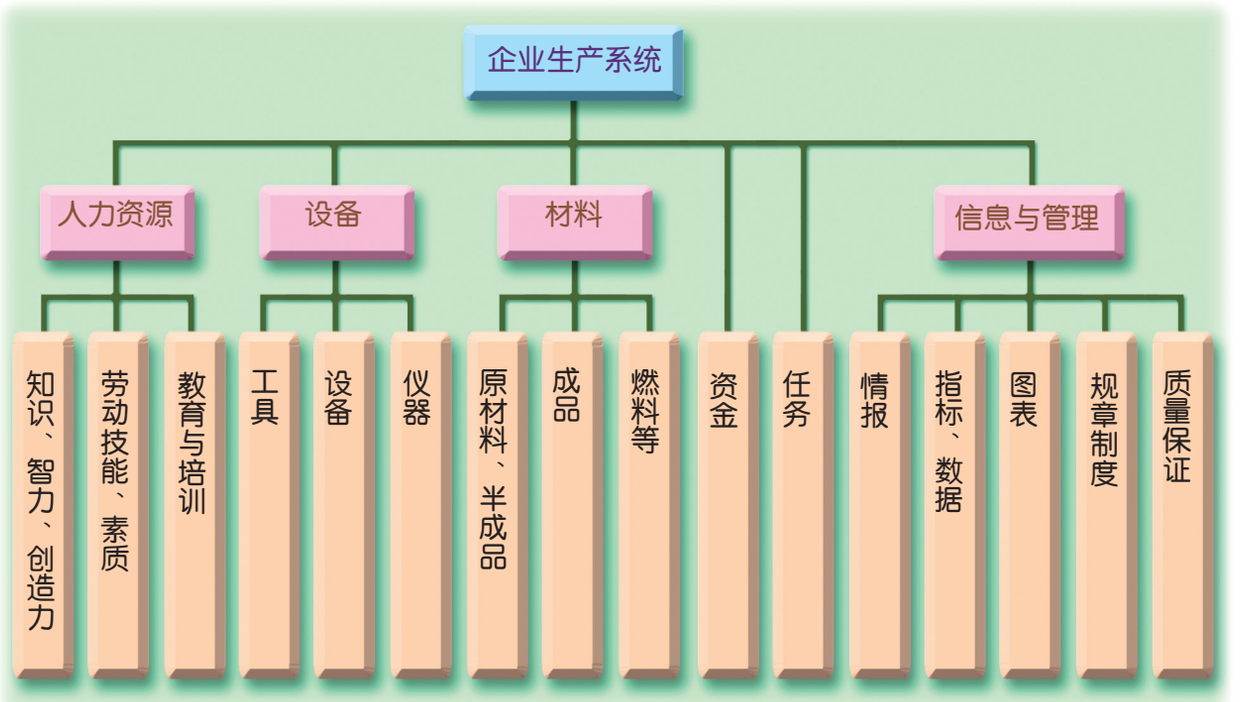


图 3.12　某企业的生产系统图

的系统，是高一层次系统的一个构成元素，同时又是低一层次系统（即元素或子系统）所构成的系统。

系统的整体质是由元素相互作用而产生的质的飞跃，这种飞跃在简单系统中可以一次完成。但在复杂系统中，从元素质到系统质的根本飞跃不能够一次完成，需要经过一系列部分质变来实现，每发生一次部分质变，就形成一个中间层次。即每出现一个新的层次，就有一次质的提升，一直到完成根本质变，形成系统的整体层次。因此，层次是从元素质到系统整体质的根本质变过程中呈现出来的部分质变序列中的各个阶梯，是一定的部分质变所对应的组织形态。如宇宙中的不同层次之间有高低、上下、深浅、内外、里表的区别。高层次包含低层次，低层次隶属于高层次；或者高层次支配低层次，低层次服从、支撑高层次。

在自然物质系统中，层次是物质长期发展的结果。系统具有一定的层次，是自然物质存在和发展的必要条件。人们不能违背自然规律和系统本身固有的规律，任意增加或减少自然物质系统的层次，破坏系统整体的结构，否则就会遭到自然界的惩罚。

在思维系统或人工技术系统中，层次也是系统发展的历史产物。但是，人们可以根据社会实践的需要和系统固有的规律，增加或者减少系统的层次。例如，一个企业的管理系统、一个工厂的工艺流程等，都可以根据需要进行增减。但是，应当注意，这种增减也不可带任何主观随意性，而只能根据系统本身固有的规律性来进行。

（二）系统的秩序

秩序可以具体地理解为组成系统的诸要素在时间、空间中的相对位置。例如，它可以反映为时间的先后、空间的分布、比例的大小等。

讨论秩序问题时，可以把有序理解为事物之间规则的相互联系，把无序理解为不规则的相互联系。没有相互联系的事物群体是非系统，不存在秩序问题。组分（元素、子系统）之间的联系方式可能是规则的、确定的，也可能是不规则的、不确定的。组分在空间分布上规则排列的，就

微信公众号：电子课本大全



新视窗 · 思维外延

讨论过度开垦与退耕还林在人类整个生态系统中的作用。

称之为有序，如晶体点阵；在时间延续中呈现规则变化的，也称之为有序，如周期运动；组分在空间分布上的无规则堆积则称之为无序，如垃圾堆；在时间延续中呈现任意变化的也称之为无序，如随机运动。

系统的有序性还表现为行为的有序和功能的有序。系统的行为与功能是作为过程而展开的，包括多个阶段、步骤、程序等，需要有序地协调安排，以求行为和功能的优化。例如，在计划工作、技术与工艺设计中，常常需要决定哪道工序先做，哪道工序后做，各工序之间应如何衔接。汽车的装配，就是在生产流水线上按照一定的工序进行的（图 3.13）。





图 3.13　汽车生产的装配流水线



实践与体验

分析供电系统的结构与层次

供电系统的线路有两种结构可以选择：并联结构与串联结构。由于串联线路电压会不断衰减，所以大都采用并联线路供电。电线自当地变压器引出后，供电线路又分为主线、支线和入户线，这就是供电线路系统的层次。



活动延伸

1. 对自行车装配进行系统设计（合理划分自行车装配的层次并确定装配秩序）。
2. 对铁路部门列车时刻表进行系统分析，并写出定性的分析报告（注意层次与秩序）。
3. 对给出平面图的特定居室的室内装修进行系统设计。

微信公众号：电子课本大全

系统科学



阅读材料

系统科学是以系统思想为中心、以系统的理论与方法来认识和解决问题的一类新型的学科群。它包括系统论、信息论、控制论、耗散结构论、突变论、协同论，以及运筹学、系统工程、信息传播技术和控制管理技术、计算机科学、灰色系统论、知识工程、人工智能学等许多学科。这些学科本来都是独立形成的科学理论，但它们相互间紧密联系、相互渗透，在发展中趋向综合、统一。国内外许多学者认为，把以系统为中心的这一大类新兴科学联系起来，可以形成一门具有严密理论体系的系统科学。我国著名科学家钱学森提出了关于系统科学的内容和体系结构框架。他把系统科学的体系结构分成四个层次：(1) 系统工程、自动化技术、通信技术等，这是直接改造自然界的工程技术层次；(2) 运筹学、大系统理论、控制论、信息论等，是系统工程技术的直接理论，属技术科学层次；(3) 系统学，是系统科学的基本理论；(4) 最高一层则是系统观，是关于系统的哲学和方法论的观点，是系统科学通向马克思主义哲学的桥梁和中介。他把系统科学看成是与自然科学、社会科学及数学等具有同等地位的一类科学。

系统科学的发展和成熟，对人类的思维观念和思想方法产生了根本性的影响，使之发生了根本性的变革。系统科学的理论和方法已经广泛地渗透到自然科学和社会科学的各个领域。

（摘自“御虎——国防科普知识网”）

第三节　系统的设计



学习目标

1．初步学会简单系统设计的基本方法。
2．能根据要求完成简单对象的系统方案设计。
3．理解系统优化的意义，能结合实例分析影响系统优化的因素。

一、系统设计的原则与步骤

大千世界，物质系统千变万化，虽有一定的规律可循，却难说有一成不变的模式可供套用。

微信公众号：电子课本大全

系统的分析和设计是建立在对该事物的内部规律、外部环境（条件）、实现功能等的充分研究的基础之上的，它是一个不断完善、不断改进、不断优化的过程。优化是系统设计所追求的永恒目标。

（一）系统设计的原则

1．基本功能的实现

功能实现是达到系统目标的保障，所以任何系统的设计首先必须保证实现基本功能。

2．子系统间关联、冲突问题的合理解决

系统的多元性特征决定了系统由两个以上元素（或子系统）组成。系统设计的过程，也就是这些差异物整合的过程。

3．效益的最大化

这是系统追求的目标。

4．动态调整的实现

这是为了达到系统追求的目标所采取的手段，而这种手段又是在过程中实施的。



探究与交流

在系统设计时要注意系统的人性化，因为人造系统是为人服务的，要让人感到好用、爱用，并符合人机工程学原理；设计建立一个系统，还要有长远的战略眼光，只有兼顾当前和长远利益才是好的系统。系统设计要考虑系统应用的长期性、稳定性等。对未来的考虑，取决于系统的范围和系统的寿命。



小资料

人机工程学

人机工程学是运用生理学、心理学和医学等有关科学知识，研究组成人机系统的机器与人的相互关系，以提高整个系统工效的新兴边缘科学。人机工程学虽然还是一门年轻的科学，但它已经越来越多地应用于我们的周围了。

（二）系统设计的步骤

1．分析系统设计要求

系统设计分析中，选定系统的总目标是分析的起点。表述目标要与客观实际相一致。目标要尽可能明确，因此要对涉及系统的各种因素进行具体的调查与测定，如系统的环境，包括技术、经济、社会等外部条件构成对系统的约束。又如系统的资源，这是系统内部用来进行工作的手段，

微信公众号：电子课本大全

包括物质与人力资源。

2．确定系统的设计方案（部分、层次的构成和协调）

系统是由很多要素组成的，要研究各要素的特点和作用以及它们之间的作用方式，真正把握住系统的结构，即要素的组织程序。还要把各要素的工作成果与系统整体的成果联系起来。

具体进行方案设计时的思路有两种。一种是“从外向里”，这是从系统的外部关系出发找出其组成部分和层次构成的方法。采用这种方法的好处是能保证方案与环境协调，设计方案达到要求的成功率较高；缺点是如果内部组成部分发生了难以协调的问题，则可能导致费用增加，甚至会迫使寻求方案的工作停止。当已经比较清楚地知道，主要变化来自外部环境时，“从外向里”的优越性就体现出来了。另一种思路是“从里向外”，这是在划分完元素和部分以后，首先从组成部分的组合开始，形成层次构成，逐步向总体目标逼近，并使方案适合于环境的方法。采用这种方法的好处是能保证系统内部的各组成部分之间的协调，缺点是可能发生与环境的适应性问题。在对现有类似方案比较熟悉的情况下，环境变化不大，采用这种方法可以迅速建立系统方案。

在方案设计过程中和初步完成后要进行综合与分析。综合与分析是合理协调目标—功能—结构—效果的技术。综合是一种高度的创造性行为。分析是综合的反行为，又是提高综合水平的必要手段。分析是分解与剖析，对综合后的方案（包括已经制定的基本目标、各种功能、结构完整性以及实施条件和效果等）提出质疑、论证和改革。综合与分析是不可分割的整体，不能把它们截然分开。

在实际工作时，往往需要设计出几种方案，经过方案的评价，从中选择最优的方案加以确定。

3．系统方案的表达

方案表达形式多样，如表格、图形、符号、框图等，还可附加设计说明书（说明重点元素与它们之间的关系）。

二、系统设计实例

（一）家庭电路系统的设计

某家庭有如下一些日用电器，试设计其电路系统。

照明电灯	4 盏	共 160W
电视机	1 台	70W
电冰箱	1 台	110W
空调器	1 台	400W
洗衣机	1 台	200W
电熨斗	1 台	300W
抽油烟机	1 台	60W

1．分析系统设计要求

共有七类日用电器，总电功率为 1 300W，要求各电器能够安全正常工作。一般家用电器的电源电压为 220V。

2．确定系统的设计方案

电表和总开关各作为一个元素，七类日用电器也各作为一个元素。

(1) 若该家庭的电表为 10A，它允许的最大电功率 $P=U\times I=220\times 10=2\,200$(W)。总电功率为

微信公众号：电子课本大全

1 300W 的日用电器完全能够安全使用。

可采取图 3.14 的电路系统设计。

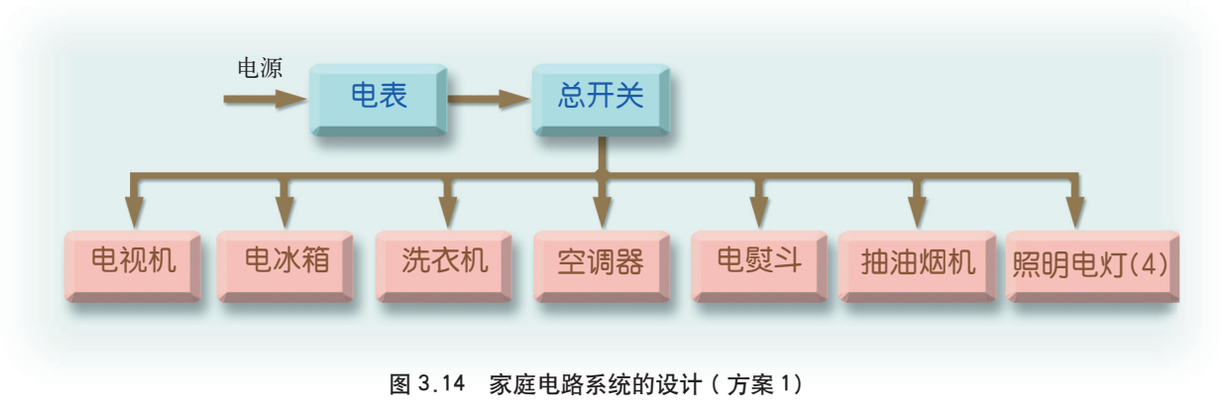


图 3.14　家庭电路系统的设计（方案 1）

(2) 若该家庭的电表为 5A，它允许的最大电功率为 $P=U\times I=220\times 5=1\,100$(W)。总电功率为 1 300W 的用电器超出了允许的最大电功率，如果仍按照以上设计，用电器将无法工作。换句话说，发生了矛盾冲突，需要加以解决。研究一下各用电器的功率，不难发现其中有两个用电器功率较大，分别是空调器 (400W) 和电熨斗 (300W)。家用电熨斗并不需要随时使用，家用空调器主要是在夏季工作，如果将这两个用电器的使用时间错开，则用电器的总电功率低于允许的最大电功率 (1 100W)。为实现这一功能，电路系统中需增加一个双向开关进行控制。改进后的电路系统的设计方案如图 3.15 所示。

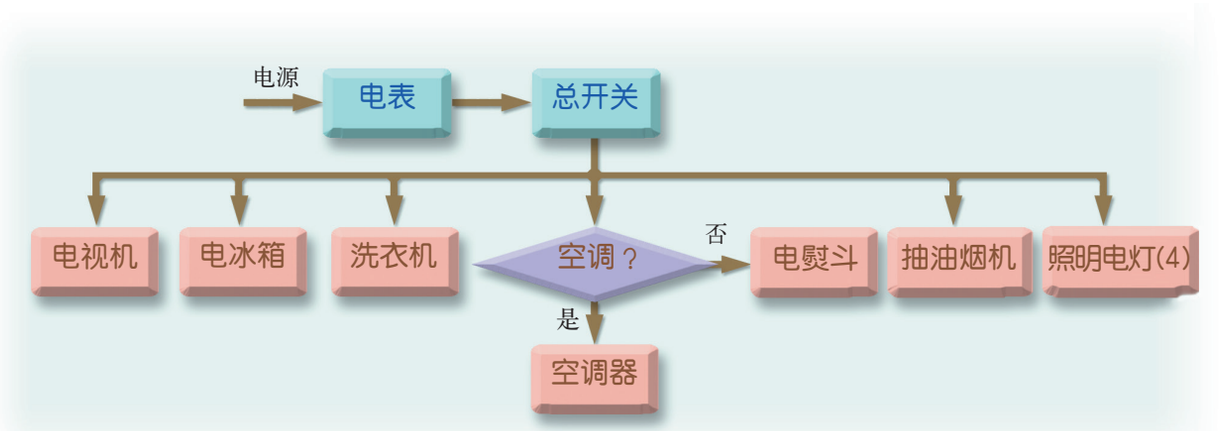


图 3.15　家庭电路系统的设计（方案 2）

（二）某校二年级课表的设计

该年级共两个班；教学科目为语文、数学、英语、生物、地理、化学、体育共 7 门；每个科目只有一位任课老师；每周 5 天，上午讲课，每科连上两节（每节 45min），下午自习。

1．分析系统设计要求

学校规模较小，教师不多，1、2 班教学科目在时间上不能重复。

2．确定系统的设计方案

依据设计要求，初步确定课表设计方案如表 3.1 所示。

微信公众号：电子课本大全

表 3.1　某校二年级课表

	周一	周二	周三	周四	周五
1 班	语文	英语	体育	语文	数学
	数学	生物	地理	化学	英语
2 班	数学	生物	地理	化学	英语
	语文	英语	体育	语文	数学

这个课表采取两班科目当日对应调换的方式排课，思路清晰且比较简单。实践一周后，地理老师提意见说，1 班体育课后上地理课，同学身体疲惫，注意力不易集中，影响教学效果，要求对课表进行改进。学校认为地理老师的意见有道理，决定自第二周起，采用表 3.2 所示的优化课表。

表 3.2　某校二年级优化课表

	周一	周二	周三	周四	周五
1 班	语文	英语	化学	语文	数学
	数学	生物	体育	地理	英语
2 班	数学	生物	地理	化学	英语
	语文	英语	语文	体育	数学

优化后的课表实践后，各位教师都表示满意。通过以上课表优化，提高了该教学系统的整体运行效果。



活动延伸

1. 对一个县级城市的交通系统进行系统设计，做出系统设计的技术框图和技术设计报告（综合考虑道路布局、城市建设规划、交通流量、路线简捷等）。
2. 对山区筑路工程方案进行系统设计（施工队选择—投标，综合考虑资金分配、人员调配、路向选择、材料购置、施工进度等）。



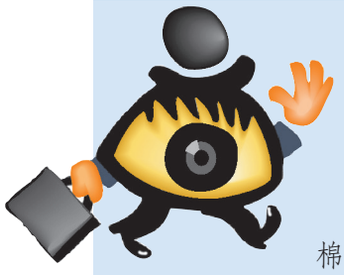
小资料

人造卫星惯性导航系统

人造卫星惯性导航系统是一种利用全球卫星定位／惯性导航(GPS ／ INS)组合制导技术的制导方式，用于飞行器的导航。这种系统由飞行器上的导航卫星信号接收装置接收多颗卫星的信号，经解算得到飞行器实时导航参数，再利用卫星导航参数修正惯性导航状态量的积累误差，从而使制导系统获得精确的速度和位置信息，提高制导精度。

微信公众号：电子课本大全

生态平衡与生态破坏



阅读材料

生态平衡是指生态系统在一定时间内物质和能量的输入和输出接近相等，结构和功能维持相对稳定的状态。一般自然生态系统中由于生物种类多样，反馈机制强，容易自我维持平衡；而农业生态系统则较为脆弱，有时要靠人为调控来维持平衡。例如，棉蚜在自然条件下，由于受到瓢虫、草蛉、蚜寄蜂等天敌的控制，其种群数量可控制在低水平，如果农业生产中长期不恰当地使用杀虫剂，使棉蚜产生了抗药性，而其天敌却被大量杀灭，破坏了棉蚜和其天敌之间的生态平衡，引起棉蚜猖獗，就会造成棉花减产。为控制棉蚜，必须进行综合防治。生态平衡是动态的，生态系统在人为有益影响下可以建立新的平衡，达到更合理的结构、更高效的功能和更好的生态效益。

生态破坏是指人类活动直接作用于自然生态系统，造成生态系统的生产能力显著减少和结构显著改变，从而引起的环境问题，如过度放牧引起草原退化，滥采滥捕使珍稀物种灭绝和生态系统的生产能力下降等。环境污染则指人类活动的副产品和废弃物进入物理环境后，对生态系统产生的一系列扰乱和侵害，特别是当由此引起的环境质量的恶化反过来又影响人类自己的生活质量。环境污染不仅包括物质造成的直接污染，如工业“三废”和生活“三废”；也包括由物质的物理性质和运动性质引起的污染，如热污染、噪声污染、电磁污染和放射性污染。由环境污染还会衍生出许多环境效应，例如二氧化硫造成的大气污染，除了使大气环境质量下降，甚至还会造成酸雨。

防止生态破坏、保护生态环境，是我们这个星球上每一个人的责任。

（摘自“御虎——国防科普知识网”）

三、系统的优化

系统优化是系统设计的必要步骤。所谓系统优化，就是为了实现系统的目的，通过组织和调节活动，使系统在一定环境下形成最佳结构并发挥最好功能。深水中的鱼类，身体呈扁平状，从而能更好地承受海水的压力；许多动物的颜色和花纹都与植物相似，被称为保护色，有利于躲避天敌。这些都是自然选择达到的优化。在经济系统中，优化通常是指在一定的人力、物力和财力的资源条件下，使经济效果（如产值、利润等）达到最大，并使投入的人力和物力达到最小的方法。

其实，我们考虑要做每一件事情时，头脑中都存在着优化的过程。例如，最近要进行期末考试，应该先复习哪一门课程？要去商场购物，走哪一条路更近？有多种同样功能的产品，购买哪一种更合适？当然，许多工作系统的优化，比这要复杂得多，需要按照一定的规律、步骤去进行。

（一）决定功能的要素

系统优化的首要问题是改善、提高系统的功能。元素、结构、环境三者共同决定系统的功能。设计或优化具有特定功能的系统，须选择具有必要性能的元素，选择最佳的结构方案，还要选择或创造适当的环境条件。

1．结构优化

系统作为差异性与多样性的统一，首先要存在有差异的多种事物，彼此吸引、排斥、交往、互动，才可能出现整合过程。系统优化过程即差异整合的过程。结构良好，不同元素、不同子系

微信公众号：电子课本大全

统之间相互支持，“合作共事”，能使系统整体长期保持正常运转。结构不合理，组分之间相互掣肘、冲突，必然导致系统整体运行混乱，故障不断。结构往往是决定系统优劣的关键因素。系统结构优化的方式为：①从现存的多个系统中选择元素并按一定结构组成新系统；②从原有系统中分裂出较小的新系统；③若干系统联合成为一个新系统；④某个系统经过结构（整合方式）质变转化为另一新系统等。

2．元素优化

元素在系统优化中也起着重要作用，元素性能太差，不论结构如何优化，也造不出高效可靠的机器。任意挑选 6 个球员，再高明的教练也无法训练出一支世界级排球队。必须有具备必要素质或性能的元素，才能构成具有一定功能的系统，这是元素对功能的决定作用。元素优化的方式为：①从现存系统中选择高质量元素；②提升现有元素的质量（如人员培训、机械零件精密加工等）；③在环境允许的范围内重新选择确定元素等。

3．环境优化

系统内部元素之间、子系统之间、层次之间的相互作用，包括吸引与排斥、合作与竞争等，这是系统演化的内部动因。系统与环境之间的相互作用是演化的外部动因。系统对环境的适应是相对的。系统自身时时在变化，环境也在不断变化，导致系统对环境不可能完全适应。变化了的系统要生存和发展，就必须改变外部的环境。

设计或优化具有特定功能的系统，须选择具有必要性能的元素，选择最佳的结构方案，还要选择或创造适当的环境条件。从工程实际活动看，往往是元件（元素）条件已定，在一定时期无法获得更高性能的元件（元素）或无法提高成员的素质；环境条件也已规定；人们可以努力的主要是在优化结构上下功夫。在元素和环境给定的情况下，结构决定功能。



实践与体验

如何组建一支排球队

年级要组织各班进行排球联赛，本班如何组建一支排球队呢？都选扣球好的主攻手是不行的，都选发球狠的发球手也是不行的，6 个人中一定要各方面的人都有。球队组建好后还要进行训练，提高配合、协调的能力，以达到全队（系统）竞赛能力的整体优化。如果有不顾大局，喜欢个人出风头者，则可考虑换下。

（二）系统优化的步骤

系统优化问题一般可分为以下几个步骤：

(1) 提出需要进行最优化的问题，收集有关资料和数据；

(2) 建立求解最优化问题的有关数学模型，确定变量，列出有关约束



新视窗·思维外延

要素的局部优化是否等于系统的整体优化？试从分析局部优化与整体优化的关系入手，得出自己的结论。

微信公众号：电子课本大全

条件，分析模型；

(3) 选择合适的最优化方法；

(4) 求解方程；

(5) 最优解的验证和实施。

在实际工作中，系统优化是一个比较复杂的问题，数学是不可缺少的重要工具。系统优化是同建立数学模型、确定系统的目标函数和约束条件分不开的。优化的问题决定后，系统优化的主要工作就是寻求系统目标函数在给定约束条件下的最优值。换句话说，就是通过数学模型求解，来达到系统最优化的目的。因此，研究系统最优化，要从分析目标函数和约束条件着手。限于同学们目前所学的数学知识，对于上述优化步骤只要了解即可。通过下面的案例，大家可以了解系统优化的主要思路。

因为系统的优化离不开一定的现实环境，所以优化不是一次就能够完成的。每次“优化”只是相对的优化，它随着人的认识的深化和环境条件的变化而逐步提高，这就是所谓“多级优化”。例如美国著名发明家爱迪生在发明电灯的过程中，试验了 6 000 多种纤维材料做灯丝，结果都不理想，后来发现用竹丝很好，可持续 1 000 多个小时，电灯就这样诞生了。但是爱迪生仍然锲而不舍地进行试验，以求得更理想的灯丝材料。后来由于钨的发现，钨丝成为最理想的灯丝材料，直到现在。可见，任何产品的优化都不是一次完成的。

（三）系统优化案例

案例 1：这是一个众所周知的故事。齐王常与大臣们赛马，三马对三马，三场比赛胜两场即为胜者，每一次输者付给赢者千金。有一次，齐王与大臣田忌赛马，各出上（一等）、中（二等）、下（三等）三匹马，齐王的三匹马比田忌的三匹马好一些，但是差异也不是很大。第一次比赛田忌输了千金。第二次比赛，孙膑给田忌出了主意，用三等、一等、二等马对齐王的一等、二等、三等马，结果一负两胜，赢了齐王。实际上远远不止这两种方案，六匹马可以组成 36 种方案。

齐王的三匹马有 6 种组合：

A_1(1，2，3)、A_2(1，3，2)、A_3(2，1，3)、A_4(2，3，1)、A_5(3，2，1)、A_6(3，1，2)。

田忌的三匹马也有 6 种组合：

B_1(1，2，3)、B_2(1，3，2)、B_3(2，1，3)、B_4(2，3，1)、B_5(3，2，1)、B_6(3，1，2)。

齐王的三匹马每种组合与田忌的三匹马每种组合相比，齐王获胜次数见表 3.3。

表 3.3　齐王赛马获胜次数

齐王 \ 田忌	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
A_1	3	2	2	2	2	1
A_2	2	3	2	2	1	2
A_3	2	1	3	2	2	2
A_4	1	2	2	3	2	2
A_5	2	2	1	2	3	2
A_6	2	2	2	1	2	3

微信公众号：电子课本大全

这个例子可以体现出，在元素不变的情况下系统元素组合的可变性和艺术性。而这种特性就决定了决策的必要性和重要性。决策好了，一般要素能实现整体最优；决策错了，优良的要素也会造成整体失败。

案例 2：若从一块边长为 6cm 的正方形铁皮的四个角上截去相等的方块，将各边折成一个无盖的盒子。问怎样截取可得最大容量？

设截去方块的边长为 x，此时有

目标函数：$\max f(x) = x(6-2x)^2$，

约束条件：$0 < x < 3$。

此例表明，目标函数是非线性的，约束条件是线性的，且以不等式形式出现。目标函数要求最大值。

这是运用系统的思想对某一对象（盒子）通过建立并求解数学模型的方法进行优化设计的例子，这也是系统优化中最常用的方法。限于同学们目前所学的数学知识，不再继续讨论下去。

案例 3：在某市内分布的生产工厂和用户共 100 家。现需建造一座仓库。问如何选择仓库的地址，才能使付出的总运费最小？

设第 j 个工厂或用户的位置是 (a_j, b_j)，$j = 1, 2, \cdots, 100$。

已知：A_j 为 第 j 个工厂对货物的需求量；

B_j 为由仓库向第 j 个工厂运货时，每吨公里货物的运费。

设仓库位置为 $P(x,y)$，则有

目标函数：$\min f(x) = \sum A_j B_j \sqrt{(x-a_j)^2+(y-b_j)^2}$。

这是运用系统的思想和方法对某一规划进行设计的例子。学生只需领会优化的思想，而不必掌握列式及计算。

当然最优化问题的表述方式绝不只限于此。如解决多级决策过程的动态规划问题也有目标函数，它要求多级决策后的总收益最大或总消耗最小。网络问题中的最短路径或最大流量问题，则是以网络图和表格形式表达的。



实践与体验

课表系统的二次优化设计

表 3.2 所示的优化后的课表，基本达到了各科教师的满意。如果数学老师提出来：1 班的数学课在本周五和下周一上，时间相隔太近影响教学效果。你能够通过对表 3.2 的进一步优化来解决数学老师的问题吗？



活动延伸

1．对学校运动会赛事进行系统设计，并考虑如何优化。

2．对蔬菜生产与市场销售进行系统设计并进行优化。

微信公众号：电子课本大全



阅读材料

系统工程

系统工程是运用系统科学的观点和方法，研究、设计、实现、运转复杂系统的一门综合性工程技术。其特点是强调系统的整体性和综合性。系统工程的研究内容包括：系统的调研、系统的探索计划、系统的研究计划、系统的开发、系统的跟踪等。它应用自然科学和社会科学中有关的思想、理论，采用定性分析和定量研究相结合的方法，对系统结构进行分析，以达到最优规划、最优设计、最优管理、最优控制的目的。第二次世界大战期间，运筹学的诞生为人们提供了定量分析复杂系统的有效方法。1945 年，美国兰德公司把研究复杂系统的系统分析数学方法广泛应用于军事方面。1957 年，美国密执安大学教授古德 (H.H.Goode) 和麦克霍尔 (R.E.Machol) 合著的《系统工程》一书，正式提出“系统工程”这一名称。目前，系统工程已在不同领域得到广泛应用，形成了军事系统工程、工业系统工程、农业系统工程、工程系统工程等分支。我国自 20 世纪 50 年代起就注意系统工程的研究和应用。著名科学家钱学森发表了《论系统工程》等著作，全国成立了系统工程研究会。系统工程已在军事、工业、农业、经济等各个领域得到广泛应用。

（摘自“御虎——国防科普知识网”）

微信公众号：电子课本大全

第四章

控制及其设计

“控制”一词，如今已获得相当广泛的应用，如温度控制、压力控制、质量控制、人口控制等。“控制”一词含有“调节、调整”“管理、监督”“运用、操作”等意思。温度控制、压力控制是对某一个物理量进行调节；人口控制是对人口的总量进行管理；而质量控制是对影响质量的各种因素进行调节、管理、操作。我们下面将要学习的主要是利用机电原理进行的各种控制。

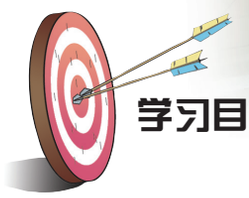
日常生活中许多事情都是由人工去做的，这其中包含了“做”与“控制”。我们常说“人有两件宝，双手和大脑”，“双手”是用来做事情的，而“大脑”就是用于控制的。随着技术的发展，许多原来靠人完成的事情，现在由各种机器来完成，有许多机器的能力超过了人。比如各种工具就是人手的延伸，替代了手的工作，并完成了许多手所不能完成的工作。蒸汽机、内燃机、电动机所产生的力量和速度更是人力所难以企及的。

随着计算机的广泛应用，人们又给机器安装了“电脑”。机器可以按照人们的安排自动完成各种工作。比如洗衣服，过去是由人工完成的，要经过“浸泡”“搓洗”“漂洗”“拧干”“晾干”等步骤。早期的洗衣机替代了人的体力劳动，可以完成“浸泡—洗涤（搓洗）—甩干”的过程。全自动洗衣机可以根据设定的程序，自动完成洗衣服的全过程。人们只需把洗好的衣服晾干就行了。先进的智能洗衣机还能根据衣物的多少、脏的程度自动控制进水量和洗涤剂用量，调整洗涤时间。这都是由于有了控制，特别是有了计算机帮助人进行的控制才得以实现的。

微信公众号：电子课本大全



第一节　控制的概念



学习目标

1．理解控制的含义。
2．能举例说明控制在生产和生活中的应用。

一、生产、生活中的控制问题



实践与体验

闭眼睛拿硬币

把一个硬币放在距你 3m 远的地方，看准硬币的位置，然后闭上眼睛走过去拿硬币。

分析：拿硬币的过程实际上是一个复杂的控制过程。首先观察、判断硬币的位置，然后把手伸向硬币。在手接近硬币的同时，不断观察和判断手与硬币之间的距离，并不断调整手的位置，直到拿到硬币。一旦闭上眼睛，就无法持续观察和判断手与硬币之间的距离并进行调整。这样，一件平常很容易做到的事情就变得困难了。

在生产、生活中控制无处不在，与人有关的所有活动几乎都包含控制。从拿起一个球到进行一场足球比赛，从车削一颗螺丝钉到制造一台精密机床，再到载人宇宙飞船的发射与回收，无不包含了控制。



小资料

可回收式宇宙飞船的发射和回收

宇宙飞船是由多级火箭发射到太空的，发射升空后火箭与飞船脱离。进入运行轨道后飞船主要依靠惯性以 8km/s 的速度飞行。飞船要返回地面时，点燃制动火箭降低速度，进入返回轨道。在地球引力作用下飞船的高度逐渐下降。当飞船进入大气层下降到约 15km 高度后降落伞打开，使飞船的速度下降。接近地面时，飞船的速度约为 10m/s。在距离地面 1.5m 左右时缓冲火箭点火，使飞船平稳降落。在发射和回收的整个过程中都要对飞船进行控制。

微信公众号：电子课本大全

大家公认的近代控制技术是从瓦特发明的蒸汽机速度调节装置开始的，而在两千多年前的古代中国，就已经出现了控制江河水量的都江堰水利工程。下面我们就来看几个这类生产、生活中的控制问题的例子。

（一）蒸汽机速度调节装置

大家都知道瓦特（James Watt）发明了蒸汽机。但实际上，在瓦特之前就已经有人发明并使用了蒸汽机。瓦特对蒸汽机进行了改进，使它的效率更高、工作更可靠，大量采用后引发了工业革命。瓦特对蒸汽机进行的一项重要改进就是发明了“飞球调节器”。飞球调节器用于调节蒸汽机的转速，它的原理见图 4.1，调节器有一对与蒸汽机轴相连的重球，当蒸汽机轴转动时带动重球旋转。如果蒸汽机的负荷减小使转速变快，重球在离心力作用下远离旋转轴，带动汽控阀的把手向下移动，关小进汽阀门减小转速；当蒸汽机的转速变慢时，重球离心力减小，在重力作用下接近旋转轴，带动汽控阀的把手向上移动，开大进汽阀门增加转速。这样就可以使蒸汽机的转速控制在一个固定的范围内。解决了蒸汽机转速不稳定、忽快忽慢的问题。

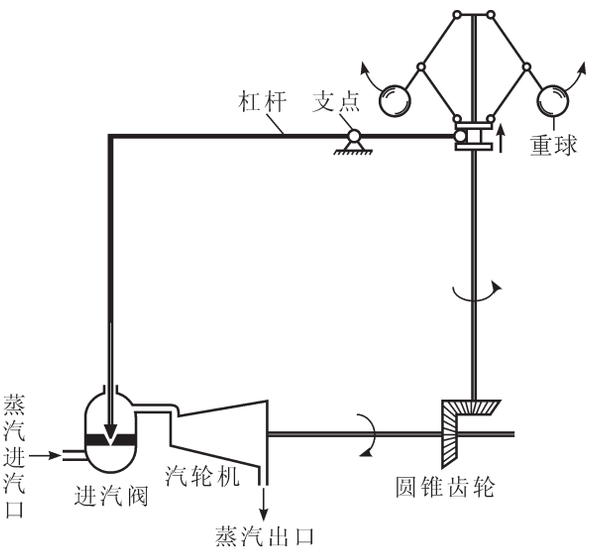


图 4.1　飞球调节器原理图

（二）都江堰水利工程

都江堰水利工程是我国古代人造控制工程的典范。历经两千多年，现在依然发挥着控制进入成都平原水量的作用。

大家知道，水既可为利，也可为害。干旱缺水，会造成粮食减产甚至绝收；洪水泛滥，又会给人民生命财产造成巨大损失。控制江河水的常用方法是修建水库，利用水库闸门的启闭控制下游的水量。雨季关闸蓄水，旱季开闸放水。水库的蓄水、放水需要人工控制。而都江堰水利工程可以自动控制进入成都平原的水量，不需要其他的人工控制。

都江堰水利工程由鱼嘴分水堤、飞沙堰溢洪道和宝瓶口三部分组成（图 4.2）。它的作用是把岷江的一部分水引入成都平原。岷江的水量较大，而且不同的季节水量变化很大。如果把岷江水全部引入，必然造成雨季洪水泛滥。鱼嘴分水堤的作用是把岷江一分为二，分成外江和内江。只让一部分江水进入内江，其余的江水从外江流走。

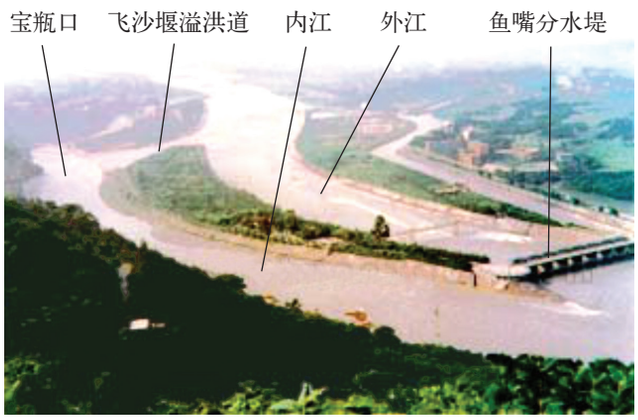


图 4.2　都江堰水利工程

设计鱼嘴分水堤保证了在枯水期所分流到内江的水量能够满足农业灌溉和人民生活所需。但在洪水期，其分流的水量就会大于需要。这时，后面的宝瓶口和飞沙堰溢洪道就发挥了作用。宝瓶口的宽度是一定的，两面是陡峭的山崖。当来水量增大时水位上涨。当水位上涨超过飞沙堰溢洪道高度时，一部分江水就会从飞沙堰溢洪道溢出。这样就控

微信公众号：电子课本大全

制了进入宝瓶口的水量，不致引发洪水。

（三）电烤箱、微波炉、恒温箱的温度控制

通常的燃气烤箱在烘烤食品时需要人来控制烘烤时间，温度不易控制。烘烤时间短食品不熟，时间长了又会烤煳。



图 4.3　电烤箱

电烤箱和微波炉是靠定时器自动控制加热时间的。需要温度高，可以设定较长时间；需要温度低，设定时间较短。达到设定时间，电烤箱和微波炉会自动停止加热。如果时间设定不合适，电烤箱和微波炉的温度也会出现偏差。比如时间设定过长，或加热食品较少，也可能把食品烤煳。


图 4.4　恒温箱

恒温箱不是通过时间设定而是通过温度设定来直接控制温度的。恒温箱像电烤箱一样，是靠电来加热的，但它比电烤箱多了温度测量装置和自动控制装置。温度测量装置可以测出电炉内的温度。自动控制装置把测出的温度与所设定的温度比较，在电炉内温度比设定温度低时通电继续加热；当电炉内温度达到设定温度时自动断电停止加热；当由于散热等原因使电炉内温度下降时再次通电重新加热。

（四）鹰捉兔

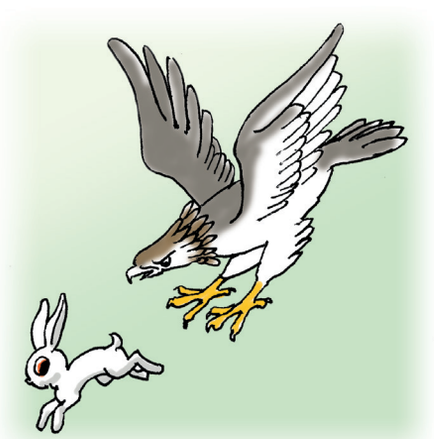


图 4.5　鹰捉兔

老鹰捉兔子的过程实际上就是一个精确而有效的控制过程，它突出表现了鹰的控制能力。鹰以眼睛为敏感器官，脑和神经为控制器官，翅膀、尾巴、爪等为操作执行器官，构成了一个具有高度控制能力的系统，从而能够顺利地完成捉兔子的过程。

鹰用眼睛观测兔子的位置，并用脑子比较判断，从而感觉到爪位置与兔子位置之间的偏差的大小和方向。这个偏差信号送到鹰脑后，它就根据偏差量的大小和方向而发出指令，控制自己的翅膀、尾巴和爪的动作，接近兔子的位置，并通过连续的调整指令使偏差逐渐减小，最终抓到兔子。

二、控制的含义

我们所说的控制就是对事物的发展、变化进行干预，使其遵从人（或行为者）的意愿的行为。

以电烤箱为例。我们用它烹制食物，要对电烤箱内部的温度进行控制。我们知道，烤箱通电后，随着时间的延长温度逐渐升高；通电时间越长，温度越高。这样，我们就可以通过调节通电加热时间的长短控制电烤箱内部的温度，达到将食品烤熟而又不烤煳的目的。

微信公众号：电子课本大全

在这里，电烤箱称为控制对象（又称被控对象）；电烤箱内部的温度称为被控量；电烤箱的温度是靠时间长短来控制的，时间称为控制量；进行时间控制是靠计时器，计时器称为控制器；达到设定时间停止加热是靠开关切断电源的，开关称为执行器。这些构成了电烤箱的控制系统。这个控制系统的作用就是使电烤箱内部的温度按照人们的要求变化。

电烤箱的温度控制是靠调节时间间接进行控制的，温度不是很准确。电压波动、环境温度、食物的多少都会对电烤箱的温度产生影响。如果直接对温度进行控制，那么控制的精度就会大大提高。恒温箱就是直接对温度进行控制的。

在恒温箱中有温度测量装置和温度自动控制装置。温度测量装置可以感知电炉内的温度，称为传感器；温度自动控制装置是恒温箱的控制器，当温度达到预定温度时，控制装置自动切断电源停止加热。

控制器、控制对象、执行器等组成了一个控制系统。

都江堰水利工程的被控量是水，控制量是鱼嘴分水堤的分水位置、宝瓶口的宽度和飞沙堰的高度；鱼嘴分水堤、宝瓶口和飞沙堰既是控制器又是执行器。

老鹰捉兔子的被控量是老鹰与兔子之间的距离，控制量是老鹰的位置，控制器是老鹰的大脑，执行器是老鹰的翅膀、尾巴和一对利爪，传感器是老鹰的眼睛。



活动延伸

找出生活中的控制现象和控制装置，如：骑自行车、电冰箱、空调器、抽水马桶、交通信号灯等。对这些控制现象和控制装置进行分析，找出其中的控制器、控制对象、执行器、传感器、控制量和被控量，并对其控制原理进行分析。

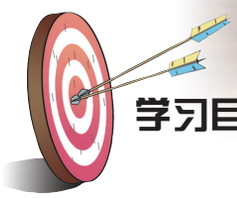


新视窗·背景外延

人体是一个典型的控制系统。大脑是控制器，五官是传感器，四肢是执行器。

微信公众号：电子课本大全

第二节　控制技术的分类



学习目标

1．了解控制技术的分类和常用的控制方法。
2．能够对实际控制问题进行分类。

按照控制方式可以把控制分为手动控制与自动控制；按照反馈方式可以分为开环控制与闭环控制；按照被控量又可分为温度控制、压力控制、时间控制、流量控制和位移控制等。

很多家用电器可以用遥控器控制，这实际上是属于手动控制，只不过不是直接用手去控制，而是用遥控器通过无线电波、声音、红外线等间接进行控制。我们还经常听到“数控”一词，数控是把连续的模拟量（温度、压力、位移、电压、电流等）转换成数字量，用计算机进行的控制。

一、按照控制方式分类

（一）手动控制

按照控制方式的不同，控制可分为手动控制与自动控制。由人本身通过判断和操作进行的控制称为手动控制。例如驾驶汽车，司机为到达目的地，需要根据路况和车况不断地操纵方向盘，刹车、踩油门，启动、停车。这些都属于手动控制，尽管许多动作是由脚完成的。又如人的开灯、关灯等行为也都为手动控制。

手动控制时手的动作与控制量和被控量同步变化。比如打开开关，电灯就亮了；踩下油门，汽车就加速前进。按下电视机遥控器按钮就可以立刻改变电视机的声音大小或改变频道，就像直接按动电视机上的按钮换台、调音量一样，所以也属于手动控制。

（二）自动控制

所谓自动控制，是指不需要人工操作，使机器、设备自动地按照预定的规律工作。如声控电灯、自动门、全自动洗衣机、无人驾驶飞机等。

自动控制按照控制量又分为：声控、光控、电控、程控等。

声控、电控、光控是利用声、电、光等信号使机器、设备工作的控制方式。如声控电灯就是在听到声音后开灯的。宾馆的自动门是通过接收到人接近大门时的红外信号才开启的。

程控是让机器、设备按照事先编制好的程序进行工作的控制方式。如洗衣机可以根据设定的程序进行洗涤→漂洗→甩干等操作，这是因为在洗衣服之前洗衣机已经被事先设定了洗衣服的程序。如：①先洗涤 10min，脱水、甩干；②漂洗 5min，排水、脱水；③第二次漂洗 5min，排水；④甩干 5min。把衣物放入洗衣机，加入洗涤剂后开动洗衣机，洗衣机就会按照程序进行洗涤，在这中间不需要人为干预。

微信公众号：电子课本大全

二、按照反馈方式分类

（一）开环控制

在许多控制过程中控制器发出了控制信号，但被控量是否发生了变化，是否达到了控制目的，控制装置并不知道，也不去管它。例如，交叉路口的红绿灯一般是按照固定的时间间隔交替接通或断开红、绿灯的，它并不考虑各个方向车流量的大小。另外，如果灯泡坏了，或者通向灯泡的电线断了，红绿灯控制装置照旧工作，而这实际上已经达不到控制交通的效果了。这种控制方式称为开环控制。洗衣机、电风扇、电烤箱、微波炉等都是开环控制。



图 4.6　开环控制

（二）闭环控制

在恒温箱的控制过程中，被控量的实际情况（温度值）由温度测量装置（温度传感器）测量后转换成电信号，电信号又被送到自动控制装置中与所设定的温度值进行比较。如果实际温度低于设定温度，控制器接通电路继续加热；如果实际温度达到设定温度，控制器断开电路停止加热。这种控制方式引入了被控量的反馈信息，整个控制过程成为闭合的，故称为闭环控制。通常，我们把取出的输出量送回到输入端，并与输入信号相比较产生偏差信号的过程，称为反馈。反馈控制的特点是不论什么原因使被控量偏离期望值而出现偏差时，必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差，使被控量与期望值趋于一致。

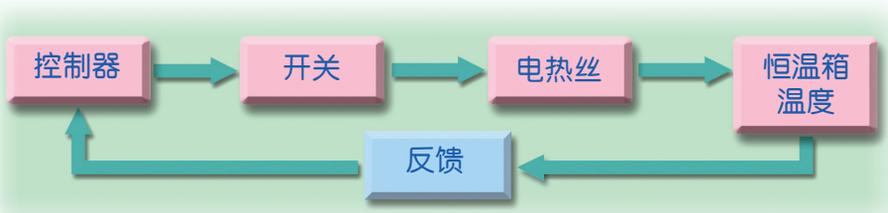


图 4.7　闭环控制

（三）开环控制与闭环控制的比较

开环控制简单、成本低，但控制精度低；闭环控制增加了反馈环节，因此控制精度高于开环控制。当然，闭环控制复杂、成本高。开环控制用于控制精度要求不高、成本要求低的控制；高精度的控制应采用闭环控制。

数控机床（图 4.8）的控制精度要求高，采用闭环控制。在进行零件加



新视窗·知识外延

声控电灯

楼道里的声控电灯不仅受声音的控制，还受光和时间的控制。只有在天黑时听到声音才开灯，这样可以避免白天开灯浪费电。而且亮灯的时间也是由程序控制的，达到设定时间后电灯自动关闭。

无人驾驶飞机

普通飞机是由驾驶员操纵的，无人驾驶飞机上面没有驾驶员。它可以按照事先编制好的飞行程序来飞行。比如飞机起飞后上升到3km，飞行50km后右转弯90°，再飞行10km，转180°，飞行10km，左转弯90°，飞行50km后降落。

微信公众号：电子课本大全

工时，要求数控机床精确地控制切削刀具与零件之间的相对位置。在数控机床上切削刀具和零件是靠伺服电机驱动的。早期数控机床的控制器在向伺服电机发出指令后不再对其实际运动进行检测，即开环控制。由于切削负载的变化会影响伺服电机的转动角度，从而影响切削刀具和零件相对位置的精度，加工出的零件精度不高。现在的数控机床大都安装了反馈系统（图 4.9）。用测量装置直接检测切削刀具和零件的位置，并把检测出的误差反馈到控制器。控制器再向伺服电机发出调整指令，把切削刀具和零件调整到准确的位置，从而使零件的加工精度大大提高。

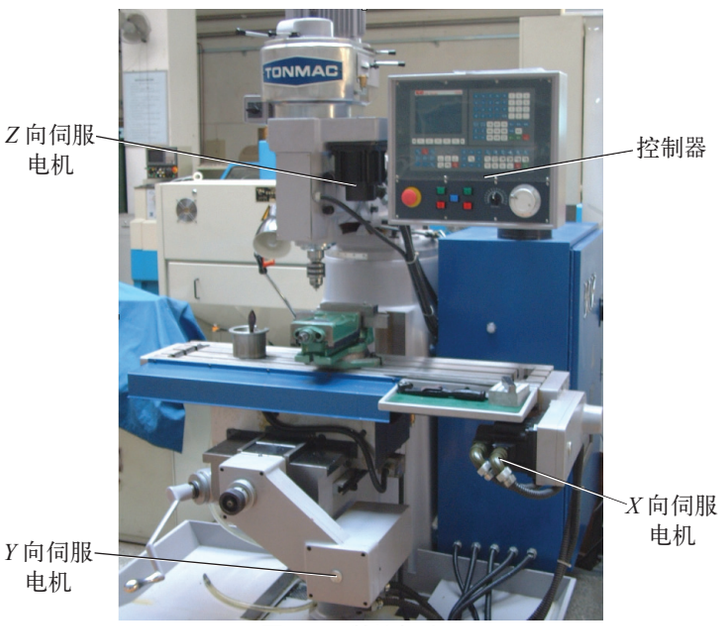


图 4.8　数控机床

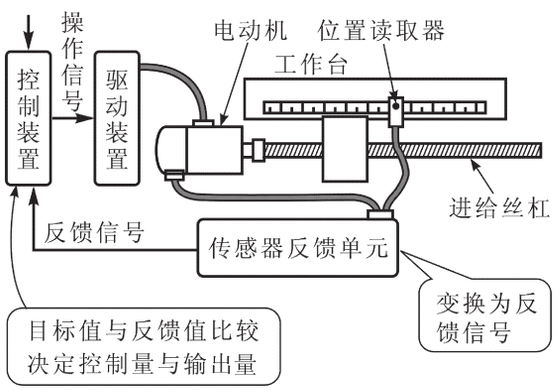


图 4.9　用闭环控制的工作台



实践与体验

开环控制与闭环控制的比较实验

做一个开环控制与闭环控制的比较实验，比较开环控制与闭环控制的控制精度、速度，并对开环控制与闭环控制装置的复杂程度做比较。例如，厕所水箱水位控制装置（闭环控制）与通过注水时间或通过注水量（用量杯）控制水位（开环控制）的比较。

通过注水时间控制水位：测量一下水龙头的流量和水箱的容积，计算一下注满水箱需要多少时间。然后按照计算出的开启水龙头的时间向水池注水。测量并记录水箱的水位，与通过水箱水位控制装置控制的水位进行比较。看看哪种控制方法对水位控制的精确度高。

三、按照被控量分类

控制按照被控量可分为温度控制、时间控制、压力控制、液位控制、流量控制和位移控制等。

（一）温度控制

在日常生活中我们经常需要对温度进行控制。比如电饭锅、电熨斗、电冰箱等的温度控制，利用空调器、电暖器对房间温度进行控制。

图4.10是电熨斗的加热电路原理图。它的主要控制元件是一个双金属片。双金属片的一端固定，另一端上安装电触点。常温下双金属片是伸直的，触点把电路连通以加热电熨斗。当温度升

微信公众号：电子课本大全

高到一定程度，双金属片向下弯曲，就会把电路断开，停止加热。散热使熨斗降温。待冷却到一定程度，双金属片伸直，又会把触点接通而再次加热。这样，电路时通时断，熨斗的温度就能维持在适当的范围内。调节双金属片上方的螺钉就能改变触点接通的时间早晚，也就改变了熨斗温度。

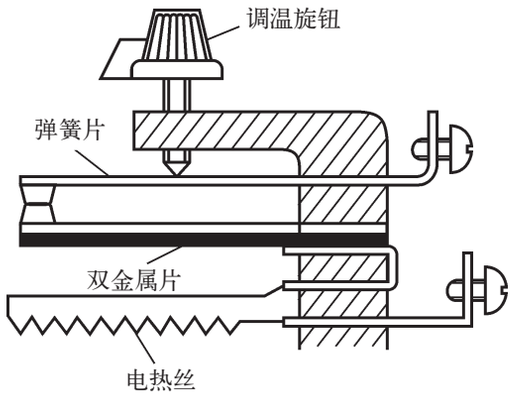


图 4.10　电熨斗加热电路原理图

电熨斗是靠触点的通断控制温度的，触点相当于开关，所以这种控制又叫开关控制。用这种方式控制温度，实际温度是在一个范围内波动的。当开关接通时，要经过一段时间加热电熨斗的温度才能达到设定值；当开关断开后，电热丝温度仍然很高，电熨斗的温度还要经过一段时间才会停止上升。

这种控制方式对于要求较高的情况是不允许的，需要用更精确的方法控制温度。比如普通空调器是开关控制的，在空调器运转时感觉很舒适；但当空调器停止运转时，就会感觉有点热。而变频空调器就没有给人忽冷忽热的感觉。这是由于变频空调器采用的是可以改变转速的变频压缩机。当压缩机转速改变时，产生的制冷量也随之改变。当室内温度较高时，压缩机全速工作，以最大的制冷量使温度下降；随着室内温度逐渐接近设定温度，压缩机速度逐渐下降，制冷量减小；当室内温度达到设定温度后，压缩机速度进一步下降，制冷量减小到与散热量平衡。这时，室内温度就维持在设定温度附近很小的变化范围内。

图 4.11 是普通空调器与变频空调器压缩机工作状况和室内温度变化曲线的比较。

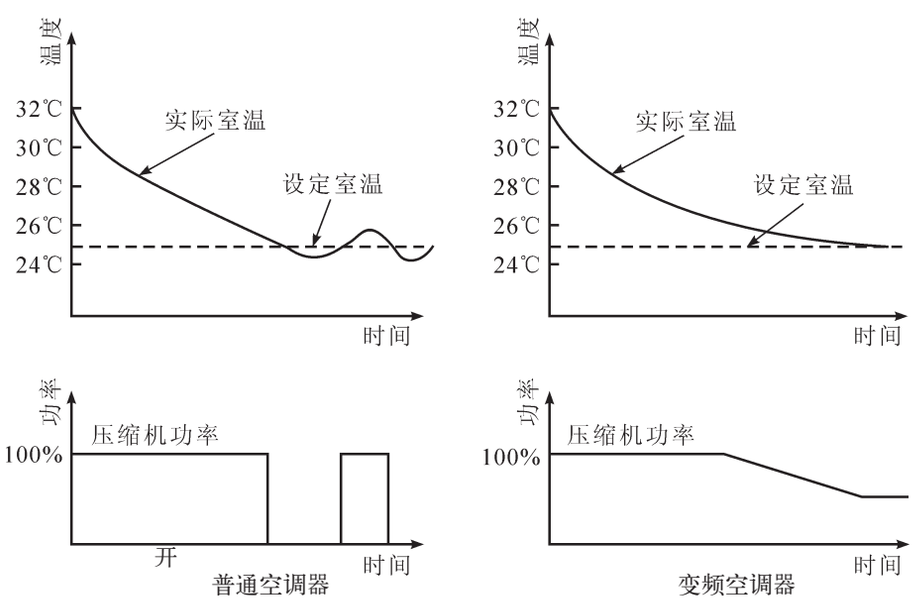


图 4.11　两种空调压缩机工作状况与室温曲线的对比

（二）时间控制

1．机械定时器

说到时间控制，大家首先想到的是闹钟。闹钟可以在到达设定时间时通过振铃提醒人们做某件事情。可以利用闹钟的定时功能控制电路或开关，从而达到控制时间的目的。有些洗衣机、电

微信公众号：电子课本大全

风扇就是用这种简单办法定时的。

2．电子定时器

利用电容充放电原理可以做成电子定时器。它完全不用机械运动部件，而由电子元件组成。

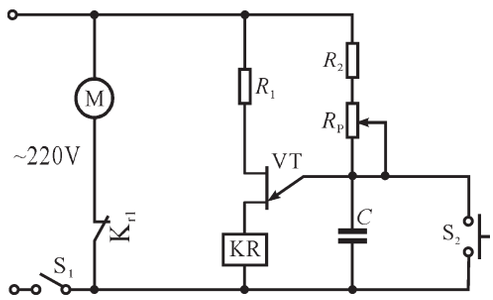


图 4.12　电子定时器原理图

图 4.12 是一个自动定时关闭电扇的电路。图中 M 代表电扇。电扇 M 是经过继电器的电接点 K_{r1} 接到电源上的。电接点 K_{r1} 平时是闭合的（动断接点），因此只要电源开关 S_1 闭合，电扇就会转起来。同时电流经 R_2、R_P 给电容 C 充电。VT 是一个单结晶体管，当它基极上的电压达到某个值时，其他两个极导通；低于此值时其他两极不导通。当电容 C 充电时，单结晶体管基极上的电压逐渐升高，直至导通。VT 导通时，继电器线圈 KR 通电吸合，动断接点 K_{r1} 打开，电扇 M 的电源被切断，就停了下来。按下开关 S_2，电容 C 放电，基极电压下降，单结晶体管截止，继电器释放，继电器的电接点 K_{r1} 重新接通，电扇又开始运转。继电器的原理见第三节。

上述切断电源的动作什么时候发生，完全由电容 C 上的电压决定。而这个电压什么时候达到使 VT 导通的要求，就看对 C 充电的快慢，因此调整电位器 R_P 的值就可以改变定时的长短。

（三）压力控制

1．压力锅安全阀

家用压力锅上有个重锤式安全阀（图 4.13），平时重锤压在锅盖的排汽口上把排汽口堵住。当锅内压力升高到一定程度时，重锤被托起，蒸汽从锅里泄漏出来，压力不再继续升高。有了这个装置可使压力的最大值总维持在安全范围内，因此叫“安全阀”。

2．压气机压力开关

在自行车电动打气装置中，当空气压力不足时，电动压气机会自行启动往储气罐里补充空气，使它的压力总维持在一定的范围内。压力开关（图 4.14）是靠弹性元件在压力作用下产生变形，从而带动触点使电路发生通断变化的。波纹管里接被测压力，压力越高波纹管的长度就越大。波纹管的下端固定，上端与电触点相连。压力不高时，触点 A 与 C 闭合。若把压气机的电源接在

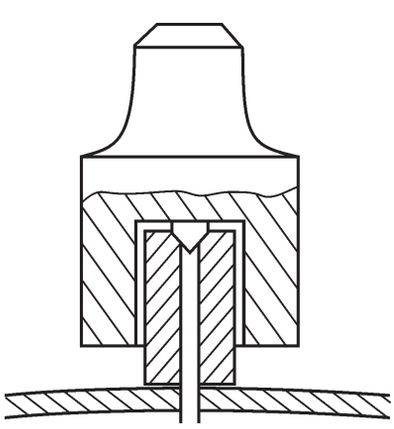


图 4.13　压力锅安全阀

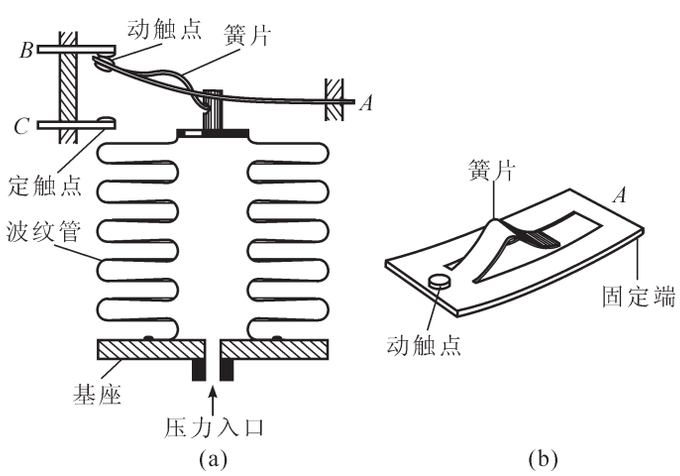


图 4.14　压力开关示意图

微信公众号：电子课本大全

AC 电路里，压力不高时电路导通，压气机转动，往储气罐里打气。当压力达到某个值时，波纹管伸长，触点 *A* 与 *C* 断开，电路切断，压气机停止充气。

（四）液位控制

抽水马桶的水箱里面装浮子是用来控制水位的。浮子通过长柄带动进水阀门，水位低时阀门开大，当水位到达足够使用的高度时，浮子就把进水阀门关闭了。其结构如图 4.15 所示。

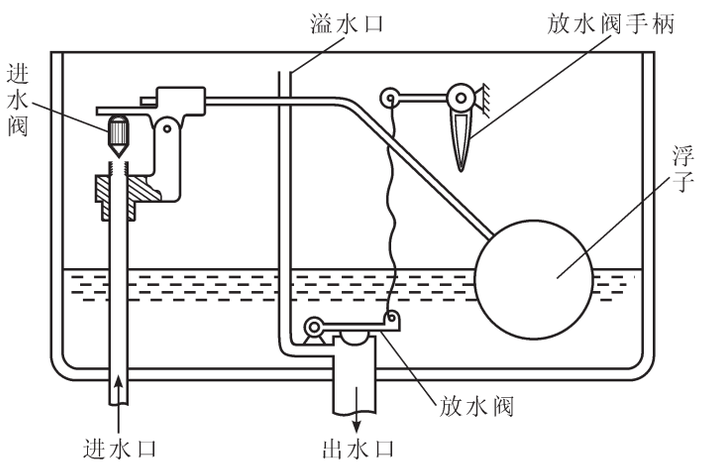


图 4.15　抽水马桶水箱的水位控制

四、遥控与数控

人们观察问题的角度不同，对事物便可以有不同的分类方式。与前述三种分类方式不同，控制技术还可以按照控制距离分为直接控制与遥控，或按照控制信号的性质分为模拟控制与数字控制（简称数控）。下面我们就来介绍一下遥控与数控。

（一）遥控

遥控就是远距离控制。这个距离可以是几米，如遥控玩具、遥控电视；也可以是几百几千米，甚至更远的距离，如导弹、宇宙飞船等。可以用可见光、红外线、无线电波、声音或通过导线等进行遥控。

1．无线电遥控

很多玩具都是用无线电遥控的，如遥控汽车、航模飞机等。

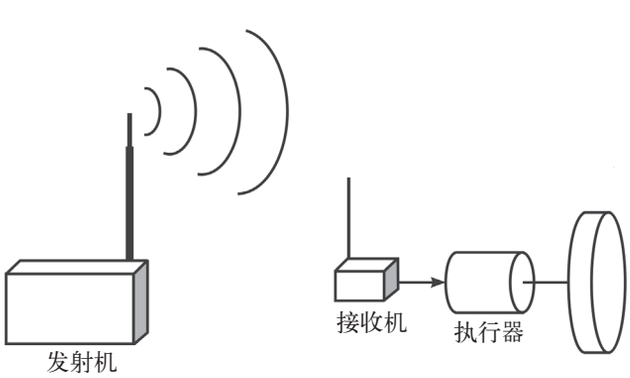


图 4.16　无线电遥控系统

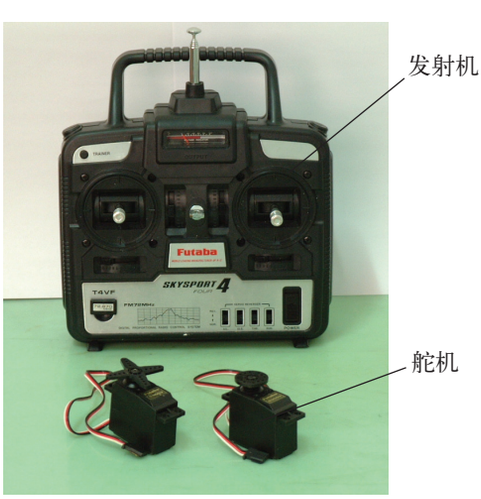


图 4.17　无线电遥控发射机与舵机

微信公众号：电子课本大全



图 4.18　红外线遥控电视机

无线电遥控由发射机和接收机组成。发射机发出无线电信号，接收机收到信号后传给执行器产生相应的动作。

无线电遥控装置的发射机有单通道、双通道和多通道的。发射机的一个通道连接一个接收机，控制一个动作。比如双通道遥控汽车，一个通道控制汽车前进、后退，另一个通道控制汽车转弯。而航模飞机的无线电遥控装置一般至少有四个通道。它要控制飞机的油门、方向舵、俯仰等。航模飞机的舵机既是接收器，也是执行器。

无线电的发射距离很远，可以进行远距离遥控。无人飞船、人造卫星等都可以通过无线电进行遥控。

2．红外线遥控

电视机、录像机、空调器等很多家用电器都是用红外线进行遥控的。与无线电遥控相似，红外线遥控也有发射器和接收器。电视机、录像机、空调器的遥控器就是发射器。

在遥控器的顶端有一个透明的红塑料窗口，那就是发射红外线的地方。而接收器安装在电视机、录像机、空调器的里面，在它们的前面有一个接收红外线的窗口。

（二）数控

数控是指用计算机或单片机利用数字信号进行的控制。我们前面所提到的数控机床，就是一种典型的数控方式。

很多被控量是连续变化的，例如，距离、速度、加速度、温度、时间等，我们把这种量称为模拟量。有些被控量不是连续变化的，如声音的有、无，电灯的亮、灭，电路的通、断等，我们把这种量称为开关量或数字量。

计算机只能识别数字信号 (0，1)，比如通电用“1”代表，断电用“0”代表。因此要用计算机控制的各种量都要转换成数字信号。比如电动机的转动是连续的，但我们可以利用一种模拟量—数字量转换装置（图 4.19）把它变为数字信号：我们在电动机的轴上安装一个圆盘，在圆盘的圆周上钻有 360 个孔。在圆盘的一侧安装一个光源，另一侧安装一个光接收器。当电动机转过 1° 时，

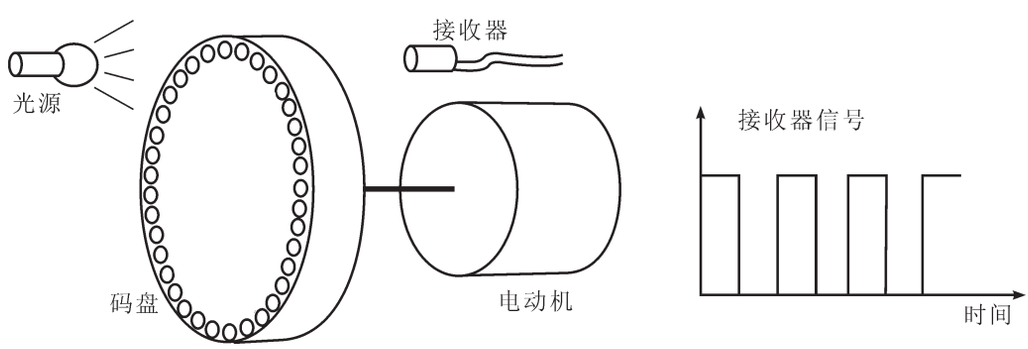


图 4.19　码盘模拟量—数字量转换原理图

微信公众号：电子课本大全

光接收器就收到一个信号。电动机转过一圈，光接收器就收到 360 个信号。把电动机转动 1min 光接收器收到的信号数除以 360，就得到电动机每分钟的转速。这样，电动机的转速就转变成数字信号。

由于计算机功能强大，运算速度极快，而且现在许多信号都可以转换成数字信号。因此数控的应用越来越广，已经遍及生产、生活的各个领域，并且以极快的速度向前发展。



活动延伸

1．分析洗衣机、电冰箱、录像机、水塔供水系统等控制系统，试对其控制方式进行分类。指出哪些属于手动控制，哪些属于自动控制；哪些属于开环控制，哪些属于闭环控制。

2．开水器也是用浮子控制液位的。但如果也像抽水马桶的水箱那样，当液位下降一些就补充一些冷水，那么，开水中就混进了冷水。实际开水器的液位控制器要等到开水基本用完才补充冷水，以避免开水和冷水混合。它是什么结构？又是如何工作的？

3．找出生活中遥控和数控的事例，并分析其控制原理。

第三节　控制系统



学习目标

1．了解控制系统的组成及各部分的作用。

2．会画简单控制系统的框图。



探究与交流

开汽车的控制过程

分析司机在开汽车时的动作，设想一下，一部无人驾驶汽车应该包括哪些功能和组成部分。

司机在开汽车时双眼要时刻注意观察路面情况，两耳注意倾听周围有没有异常声音。眼睛和耳朵把接收到的信息传递给大脑，大脑经过思考决定采取什么措施。如果要转弯，大脑就把转弯的指令传达给手，手根据大脑的指令转动方向盘让汽车转弯；如果遇到紧急情况要紧急刹车，大脑立刻发出指令让脚踩下刹车踏板。

无人驾驶汽车应该有观察路面和周围情况的“眼睛”和“耳朵”，如光传感器、声音传感器、

微信公众号：电子课本大全

雷达等各种传感器。这些传感器接收的各种信息要传送到“大脑”——控制器中进行分析判断。判断后发出的指令传送给“手”和“脚”（即执行器）去执行，如转弯、刹车。

无人驾驶汽车的控制系统包括了收集信息的传感器、进行分析判断的控制器和执行命令的执行器。

一、 控制系统的组成

简单的控制系统包括控制器、执行器、被控对象等。其中的控制器、执行器和被控对象的原理不同，结构各异。在对系统整体功能进行分析时，可以把它们看作一个个“黑箱”。当被控量通过“黑箱”后，发生了相应的改变，我们可以不管各组成部分的原理、结构，以及它是如何使被控量发生变化的，而只关注被控量通过“黑箱”后所发生的变化。

我们把这些“黑箱”用方框表示，依照被控量通过它们的顺序依次排列，就构成了控制系统框图，用这种框图分析控制系统，简单明了。

图 4.20 是电烤箱控制系统的框图。

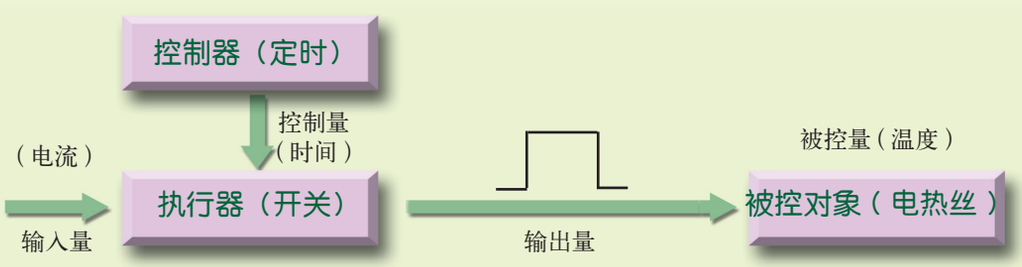


图 4.20　电烤箱控制系统框图



探究与交流

解剖分析电烤箱的控制系统

1. 定时器：用来设定加热时间，是电烤箱控制系统的控制器。

2. 开关：它与定时器相连。当设定好加热时间，定时器触发开关接通电路，电热丝通电开始加热；到达设定时间后定时器释放开关，电路断开，停止加热。开关执行定时器的指令接通或断开电路，开关是电烤箱控制系统的执行器。

3. 电热丝：这是电烤箱的主要元件，在电烤箱的控制系统中是被控制的对象。

电烤箱控制系统要控制的是烤箱的温度，因此温度是被控量；电烤箱的温度是靠调节加热时间来控制的，时间就是控制量。

微信公众号：电子课本大全



实践与体验

按照上面的方法对交通灯的控制系统进行分析，并画出交通灯的控制系统框图。



新视窗·背景外延

你见过哪些传感器？它们的作用是什么？分别属于哪种类型？

二、传感器

（一）传感器的作用

传感器是检测被控量并把检测结果转换成控制器可以识别的信号的转换装置（故在控制系统中又称为“检测器”）。例如，温度传感器可以把温度转换成电信号，力传感器可以把力的大小、方向转换为电势、电阻等信号。许多传感器都把所需要检测的信号转换成电信号，这样便于识别和传输。

有时，检测信号可以直接驱动被控量，如水箱中的浮子通过杠杆作用直接控制进水阀；还有一些直接控制开关的传感器，如行程开关、压力开关、温度开关等。

（二）常用传感器

常用的传感器有温度、压力、声、光、电和位移传感器等。

1．温度传感器

温度传感器可以检测温度，并能把温度转换成相应的电信号。热电阻、热电偶就是温度传感器。热电偶是把两根成分不同的金属丝（如镍铬丝和镍铝丝）的一端焊接在一起，将未焊接的另外两端与电位差计连接。当焊接端温度变化时，电位差计的示值会发生相应的变化，因而可以检测温度（图4.21）。热电阻是利用温度改变时电阻阻值的变化来检测温度的。

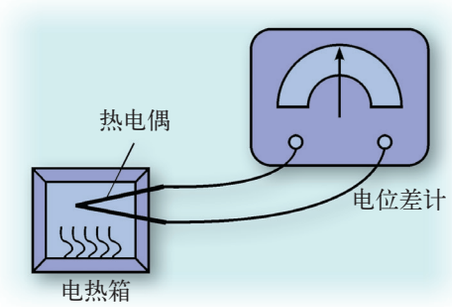


图 4.21　热电偶测温原理图

双金属片也是温度传感器，它利用金属的热膨胀原理检测温度。双金属片也可以直接接通、断开电路，例如电熨斗中的双金属片开关。

2．位移传感器

许多传感器可以测量位移，如电容位移传感器就是利用电容量与极板距离成反比的性质通过电容量的大小测量位移的。当电容极板面积不变时，电容量大小与极板距离成反比（图4.22）。距离加大，电容量减小；距离减小，电容量增大。只要

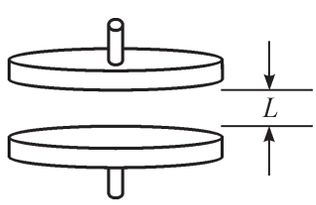


图 4.22　电容量与极板距离成反比

微信公众号：电子课本大全

检测出电容量的改变量，就能知道电容极板间距离的变化量。

此外还有电感式、电压式、电阻式等位移传感器。

将测得的位移量除以时间就可得到速度和加速度，这样就可以制成速度传感器和加速度传感器。

3．力传感器

根据胡克定律，弹簧弹力的大小与弹簧的形变成正比：$f=kx$。因此，只要测出材料的变形就能确定其所受的力。弹簧秤就是一种力传感器。

4．其他传感器

有能检测光的传感器，如光敏电阻、光敏二极管等；有检测声音的传感器，如声控开关；还有能检测红外光的传感器，常用于宾馆的自动门以及防盗报警器等；另外还有各种气敏传感器。

图 4.23 是一个带检测器的传送带，上面有两组光检测器。右边的是遮光式检测器，它有一个光发射端和一个光接收端。如果它们之间没有物体遮挡，由发射端发出的光可以被接收端收到；如果有物体进入光发射端与光接收端之间，光线被遮挡，接收端的信号就会改变（图 4.24）。图 4.23 的左面是反光式检测器。它的光发射端和光接收端都在同一侧。没有物体时，发射端发出的光不能被接收端收到；当有物体接近时发射端发出的光会被物体反射回来，被接收端收到后产生信号（图 4.25）。

这种光检测器常用于计数和防盗。

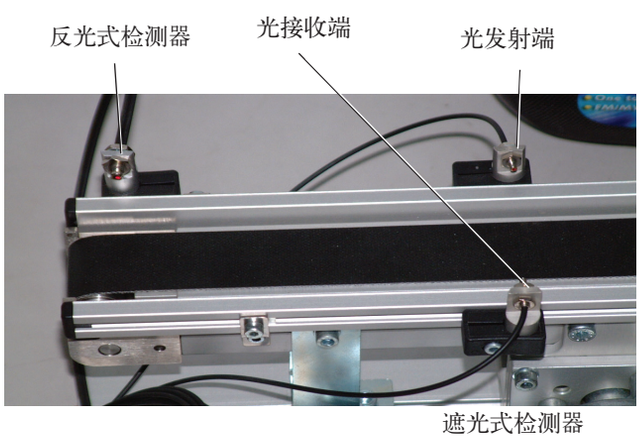


图 4.23　传送带上的光检测器

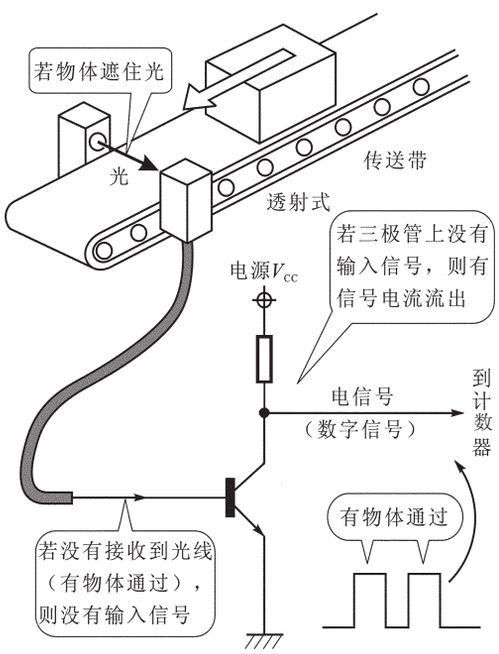


图 4.24　遮光式检测器原理图

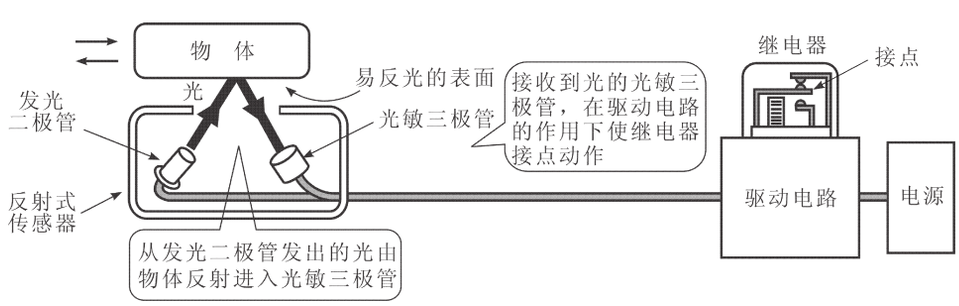


图 4.25　反光式检测器原理图

微信公众号：电子课本大全

三、控制器

控制器是控制系统的核心，它接收传感器发来的信号并与预先设定的参数比较、判断，向执行器发出动作指令，调节被控量达到控制要求。控制器有很多种，包括定时控制器、机械控制器、继电器、可编程控制器、计算机（包括单片机）、气动和液压控制器等。

（一）定时控制器

定时控制器是以时间作为控制量进行控制的。控制器的核心是计时器，通过开关控制被控对象或执行器。

（二）机械控制器

抽水马桶水箱液面控制系统中的控制器是连接浮子和阀门的杠杆，水箱液面是靠杠杆的比例和浮子在杠杆上的位置控制的。这种控制器属于机械式控制器。

（三）继电器

继电器是控制系统中常用的一种电器装置，可以对许多电器进行控制。

继电器的结构如图 4.26 所示。用软铁制成的圆柱形铁芯上绕有线圈。当控制电流通过线圈时，衔铁被吸向铁芯，此时动接点脱离上边的静接点，并与下边的静接点接触，完成电路转换作用。

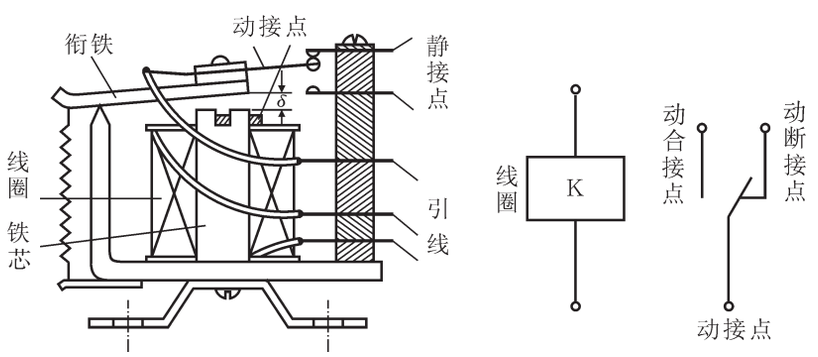


图 4.26　继电器原理图和继电器符号

上边的静接点和动接点在线圈不通电时处于接通状态，当线圈通电衔铁动作时断开，称作“动断接点”；下边的静接点和动接点在线圈不通电时断开，通电时接通，称作“动合接点”。一个继电器上有时不止一组接点，各组之间互相绝缘，用起来更为方便。

控制电流的接通可以是手动控制，也可以是用其他控制器控制；可以进行远距离控制，也可以用较小的电信号控制较大的电流。所以继电器在自动控制系统中应用广泛。电冰箱、空调器、洗衣机等电器的控制系统中都有继电器（图 4.27）。

（四）时间继电器

有些控制系统中需要执行器在接到信号后过一定时间再动作。例如，电冰箱和空调器的压缩机停机后不能马上启动，否则，电动机会由于过载而烧毁。这时就可以利用时间继电器进行控制，通电后经过一定时间再启动压缩机，以防止电动机烧毁。

时间继电器可以利用钟表机构延时，也可以用电子时间继电器。图 4.28 是较简单的电子时间继电器电路原理图。开关 S 闭合后晶体管 T 截止，继电器 K 的线圈中没有电流，继电器处于

微信公众号：电子课本大全

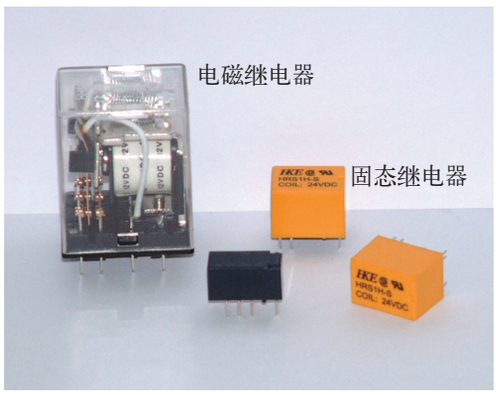


图 4.27　几种继电器

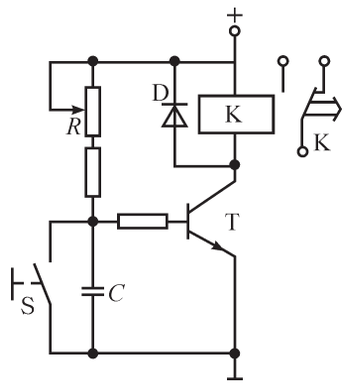


图 4.28　电子时间继电器电路

释放状态。S 断开时，电容 *C* 经电阻 *R* 充电，晶体管基极电压按指数曲线规律上升，经过一定时间就可使 T 导通，继电器 K 吸合。调节电阻 *R*，可以改变电容 *C* 的充电速度，从而改变继电器的延迟时间（从几秒到几分钟）。

（五）可编程控制器

可编程控制器（图 4.29）的全称是可编程逻辑控制器 (programmable logic controller)，也称为 PLC。

可编程控制器可以看作是用微型计算机控制的由很多个电子继电器组成的控制器，但它的功能大大超过了传统的继电器。可编程控制器可以输入多种控制信号（控制量），包括直流信号、交流信号、数字信号、模拟信号；输出接点可多达几十个、上百个；各个接点的通断可以通过编程控制。用可编程控制器控制电梯非常方便可靠，可以控制十几层、几十层的大楼电梯。工厂的生产线、加工机床等都可以用可编程控制器控制。

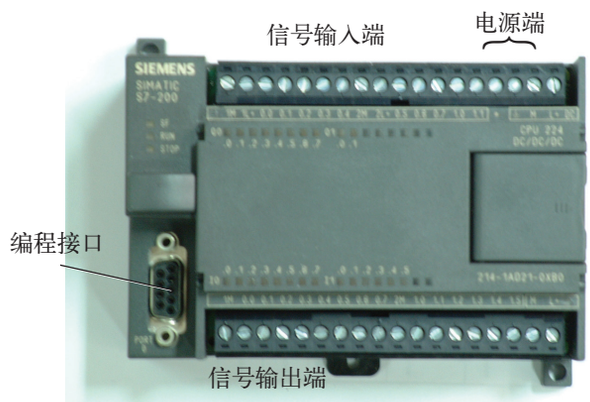


图 4.29　可编程控制器

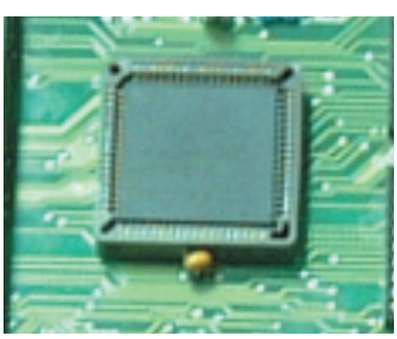


图 4.30　单片机

（六）单片机

单片机（图 4.30）实际上是一种微型化的计算机，它是把计算机的基本单元制作在一个硅片（芯片）上。单片机具有运算、控制功能，许多电器产品以单片机为核心组成控制系统。这时单片机又常常被称作微电脑，如微电脑洗衣机、微电脑电冰箱等。

单片机包含了微处理器 (CPU)、数据存储器 (RAM)、定时器和输入输出接口等。可以对电器进行时间控制、程序控制。连接各种传感器后，可以进行温度控制、压力控制、声音控制等。

微信公众号：电子课本大全

四、执行器

通常控制器只是发出指令，由执行器去完成动作。执行器是对被控量直接进行控制、调节、驱动的元件，如电动机、电磁铁、汽缸、液压缸、阀门等。

电动机、电磁铁都是常用的执行器。电磁铁产生直线运动，电动机产生旋转运动。电动机所产生的旋转运动可以通过传动装置转换成直线运动、摆动等其他运动。电动机功率不同、转速各异，是应用广泛的执行器，如水泵、冰箱压缩机、洗衣机等都是由电动机驱动的，电梯的自动门也是由控制器发出信号控制电动机来开关的。

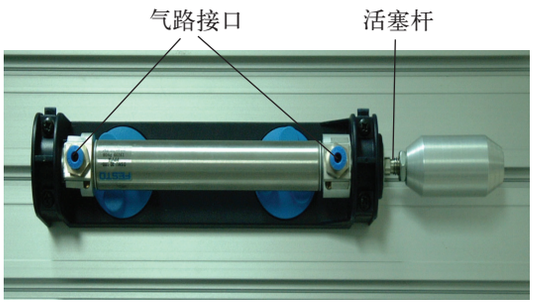


图 4.31　汽缸

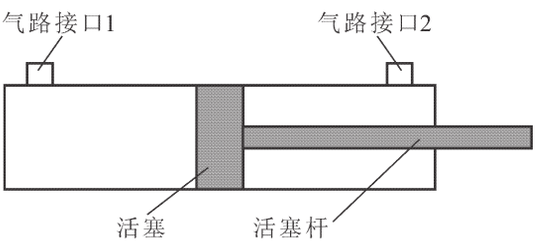


图 4.32　汽缸原理

汽缸和液压缸工作原理是相同的，只是使用的工作介质不同。汽缸用的是压缩空气，而液压缸用的是液压油。图 4.31 是一种常用的汽缸。如图 4.32 所示，当气路接口 1 通入压缩空气时，压缩空气推动活塞右移；当气路接口 2 通入压缩空气时，压缩空气推动活塞左移。如公共汽车车门的开启和关闭是由司机按动控制按钮，通过电磁阀打开汽缸的进气门或排气门来完成的，汽缸就是开关车门的执行器。

阀门是对气体、液体等被控量进行调节的执行器。如水龙头就是对水进行调节的手动阀门。洗衣机的进水阀和排水阀是用电磁铁开关的电磁阀。

五、反馈环节

在开大会的时候，我们经常可以遇到这种现象：当大会主持人调节话筒时，大喇叭里传来刺耳的啸叫声。这是由于话筒接收的声音，经扩音机放大而由大喇叭放出来后又被话筒接收到，经过扩音机再次放大后又由大喇叭放出……这样，形成循环放大，直至产生啸叫（图 4.33）。这就是一种反馈。当然，这种反馈是我们不希望产生的。

但在很多控制系统中，人们利用反馈可以大大提高控制的精度和控制的可靠性。如前所述，这种带有反馈环节的控制系统就称为闭环控制系统。

闭环控制系统对经过控制系统调节后的被控量进行检测，如果测得结果与设定值有偏差，系

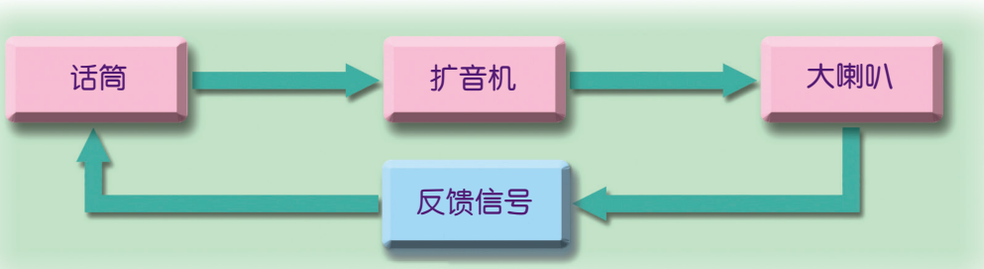


图 4.33　反馈引起啸叫

微信公众号：电子课本大全

统再次调节被控量，直至达到设定值，这样就构成了闭环控制系统。对输出量进行检测并将检测结果传回控制器输入端的环节叫反馈环节。

由于有了反馈和再调节，闭环控制系统的控制精度高于开环控制系统。下面介绍几个闭环控制系统的实例。

（一）恒温箱

恒温箱控制系统（图 4.34）比电烤箱多了一个反馈环节。首先由传感器对被控量进行检测，然后再把检测信号输入控制器，在输入端与设定值进行比较，如果检测温度低于设定温度继续加热，检测温度达到设定温度则停止加热。反馈环节的检测工作由温度传感器（热电偶、热电阻等）完成。

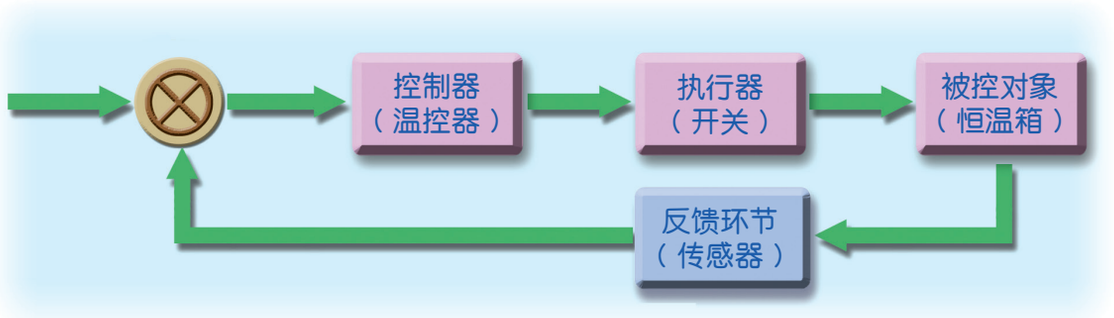


图 4.34　恒温箱控制系统框图

（二）导弹控制

导弹控制系统（图 4.35）控制的是导弹与目标之间的距离，目的是要击中目标（距离为零）。对目标的测定在远距离时用方向、距离控制或全球定位系统（GPS），近距离时靠激光或图像跟踪装置。检测到的距离方位误差值输入控制器（计算机）进行分析计算，然后向执行器（动力装置和飞行姿态调整装置）发出指令，修正导弹飞行姿态，直至击中目标。这也是一个闭环控制系统。

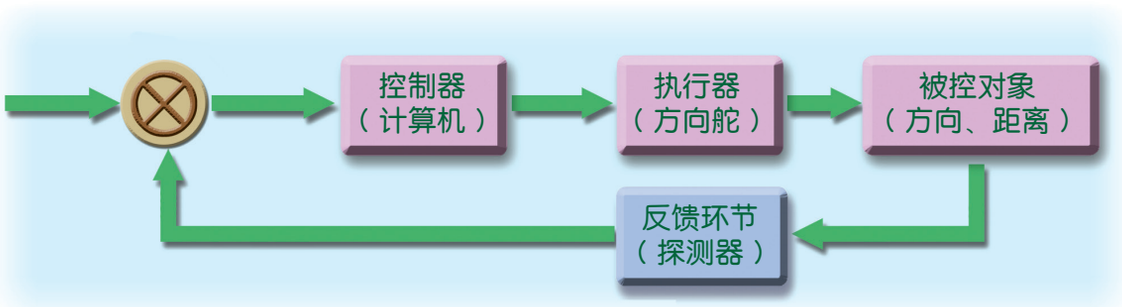


图 4.35　导弹控制系统框图

（三）水箱水位控制

水箱水位控制系统（图 4.15）是一个闭环控制系统。它的传感器是浮子，反馈信号是实际水位，被控对象是水位，控制量是进入水箱的水量，与浮子联动的阀门是执行器，控制器是杠杆。

六、干扰因素

控制系统往往受外界各种因素的干扰使被控制量偏离设定值。如导弹受风的影响偏离目标；冰箱受环境温度影响使内部温度升高；老鹰在捉兔子时，兔子跑动造成老鹰与目标（兔子）间距离的改变等。对于开环系统干扰会造成被控量的偏离，使控制不准确；对于闭环系统，由于总有

微信公众号：电子课本大全

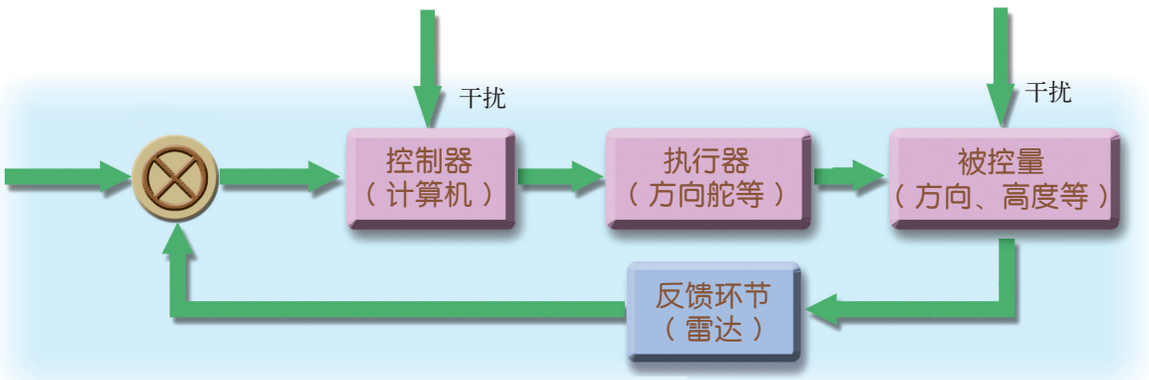


图 4.36　飞机控制系统及干扰因素框图

反馈环节，能够进行再调节，因此可以自动调整由于干扰引起的偏离。但当干扰严重超出了系统的调节范围时，被控量也可能最终偏离预定值。

另外有时外界的某些因素会对控制系统本身产生干扰，影响系统正常工作，如在飞机上使用手机、笔记本电脑就会影响飞机控制系统的正常工作（图 4.36），严重的可能造成飞机失事，尤其是在起飞和降落阶段。因此飞机上严禁使用手机等电器。

环境温度对控制系统也有影响，如在高温环境或严寒中，电子元器件的参数会发生变化，导致控制系统工作不正常，甚至无法工作。

对于电磁干扰可采取屏蔽的办法或设计抗干扰电路来解决。对于温度影响可选用适合工作温度的元器件，或设计温度补偿电路。如温度升高使电流增大，在电路中设计补偿电路使电流适当减小，以抵消温度的影响。

战争中的双方会采用干扰和反干扰技术。防御方会对导弹施放干扰不让它击中目标；进攻方会采取反干扰措施，如采用多种制导技术，当一种制导遇到干扰时改用另一种制导方式。



活动延伸

分析一个控制系统（如电冰箱、洗衣机、恒温箱等），找出其中的控制器、执行器、传感器，分析系统中的被控量和控制量是什么，画出控制系统的框图。



阅读材料

电梯的控制

当乘客进入轿厢后，乘客或电梯司机按下相应楼层的按钮，便完成了运行指令的预先登记，再按关门按钮或等待若干秒后电梯自动关门。当门完全关闭后，触发行程开关，使继电器吸合，电梯开始运行。

当电梯到达欲停靠的目的层前方某一距离位置时，自动减速。传感器动作，发出信号控制轿厢准确停靠，并自动开门。如果继续同向运行，只需按下启动按钮，电梯便按预先登记的楼层，按序逐一自动停靠，自动开门。

在完成同向全部登记指令以后，如有反向召唤信号，则电梯自动换向运行。在电梯运行

微信公众号：电子课本大全

过程中，如果厅外有人按下厅门召唤按钮，只要申请乘梯方向与电梯运行方向相同，则电梯能被顺向截停。如果没有召唤信号时，电梯便自动关门停机。如果某一楼层再有召唤信号，电梯就自动启动前往应召。

如果电梯在关门时，有人或物触碰了门安全触板，或被非接触式的光电式、电子式传感器检测到关门障碍时，电梯便停止关门并立即转为开门。如果乘客在电梯门完全关闭之前，按下与电梯运行方向相同的召唤按钮，电梯便立即开门。

如果由于乘客过多而超载，则电梯超载检测装置发出超载信号，在声光提示的同时，阻止电梯启动并开门，直到满足限载要求，电梯方能恢复正常运行。

电梯的顺序控制可以由可编程控制器来完成（复杂的电梯系统是由计算机控制的）。执行器是电动机，如曳引电机、门电机。采用了多种传感器，如检测电梯门是否关闭和电梯是否准确到达指定楼层的位置传感器（行程开关）、称重传感器等。

第四节　控制系统的设计与制作



学习目标

1．了解控制系统的设计流程。
2．会设计简单的控制装置。

一、 控制系统设计流程

在设计控制系统时，我们首先要确定控制的目的和要求，确定被控对象是什么，被控量是什么，以及被控量的控制范围、精度等。然后，根据这些目的和要求进行方案设计。确定用什么控制方式，开环还是闭环。用什么控制量进行控制，并进行必要的计算。根据设计方案绘制出控制系统框图。还要决定采用什么做控制器、执行器、传感器等，还要考虑这些元件的安装、连接等。概括起来就是：

确定控制要求→方案设计（分析、计算）→选择元器件→安装及调试。

（一）确定控制目的和要求

首先确定被控对象和被控量。如温度控制系统中被控量是温度（如冰箱温度、房间温度、烤箱温度、蔬菜大棚温度等），而被控对象应确定是发热体（烤箱电热丝、电暖器）还是制冷装置，还要确定控制方式是开环还是闭环。

对被控量以及控制要求应具体分析，例如楼道灯控制的设计需要考虑：听到声音接通电路，保持一定时间后断开。还要考虑白天听到声音不能开灯，否则浪费电。

（二）方案设计

根据控制要求设计出能够满足要求的控制方案。

微信公众号：电子课本大全

1．被控对象及被控量分析

在设计控制系统时，首先要解决被控对象及控制量的特点和控制方式。现以电烤箱的温度控制为例分析如下：电烤箱是通过电炉丝加热的，电炉丝产生的热量与加热功率和加热时间有关：

$Q=0.24\,I^2Rt$，或 $Q=0.24\,(U^2/R)\,t$。

加热功率越大、通电时间越长，电烤箱温度越高。所以可以通过调整加热功率和通电时间来控制电烤箱的温度。

加热功率可以通过调压器改变电压来调整。电压升高，功率增大，电烤箱的温度升高；电压降低，功率减小，电烤箱的温度降低。也可以用改变电炉丝电阻的方法调整温度。减小电炉丝电阻，功率增大，电烤箱的温度升高；加大电炉丝电阻，功率减小，电烤箱的温度降低。还可以用可控硅或晶闸管改变电流，调整加热功率。通电时间可以用定时开关直接控制。

实际上电烤箱的温度控制是两种控制方法的结合。电烤箱上有火力选择旋钮，分别是“大火力”“中火力”“小火力”，实际上就是加热功率调节。而定时器就是控制加热时间的定时开关。有些电烤箱有断续加热的功能，即在整个加热时间内电炉丝时而通电时而断电。这样就可以通过调整通断电的时间比例控制加热功率。比如，通电时间与断电时间之比为 1∶1 时，加热功率降到原来的 50%。这样就不需要功率调节装置。当然，这种时间控制装置就要复杂些。

2．控制量分析

控制量分析是要确定控制的方法，即确定如何对被控对象或被控量进行控制。能对被控量进行控制的控制量有哪些？对被控量的影响规律如何？哪些控制量能够有效控制被控量？

有时影响被控量的因素单一，就可以直接加以控制。如打开开关电灯就会亮，拧开水龙头水就流出来。而有些时候影响被控量的因素较多，这就要进行选择。

例如开水器的控制，有些开水器以温度作为控制器，当温度达到 100℃时断电。而实际上这是很困难的，温度从 99℃到 100℃变化非常小，需要精确的方法才可能测出。如果测量精度不够，要么水没烧开就断电，要么水已经沸腾了还在继续加热。而且在不同海拔高度上水的沸点也不相同，温度控制就更加困难。实际上开水器的温度通常控制在 95 ～ 100℃的范围。

但如果利用水烧开时的沸腾现象控制开水器，那么控制的可靠性就大大提高了。因为水沸腾是个非常明显的现象。

（三）元件选择

控制系统的元件包括：传感器、执行器、控制器等。

1．传感器的选择

传感器是根据被控量来选择的。被控量是温度，则要用温度传感器；被控量是湿度，则要用湿敏传感器；被控量是位移，则要用位移传感器。

2．执行器的选择

执行器也是根据被控量来选择的。它要能够直接改变和调整被控量。若被控量是温度，执行器可以是电热丝（加热）或压缩机（制冷）；若被控量是气体或液体的流量，执行器就是阀门；对于运动通常采用电动机、舵机（旋转运动）、汽缸、电磁铁（直线运动）等。

还有很多能用各种信号直接控制的开关。这些开关结构简单，使用方便，既是传感器，也可以直接控制电流、电压等被控量。

（1）行程开关：要想控制物体的移动位置，可以用“行程开关”取得通断信号。它是靠物体

微信公众号：电子课本大全

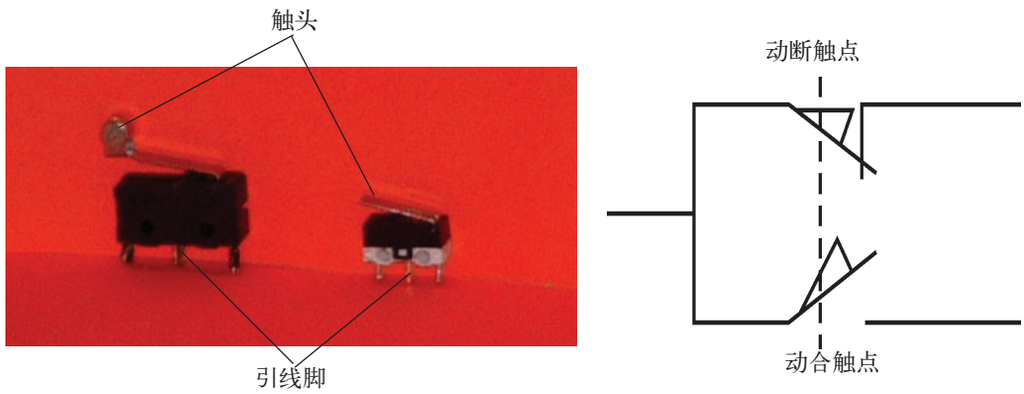


图 4.37　行程开关及其符号

接触时的压力引起电路通断的。也有光电式、高频电感式和超声式等非接触行程开关。当物体接近或到达某一位置时，开关动作。图 4.37 为行程开关及其代表符号。行程开关有动合触点和动断触点。触动行程开关的触头，动合触点闭合，动断触点断开。

(2) 液位开关：最简单的液位开关是靠导电液体与固定在某一高度的电极接触，发出开关信号的。也可以利用浮子触动行程开关，起到控制液位的作用。

(3) 光敏开关：是利用光线的明暗控制的开关。无人管理的路灯、航标灯，常用这种开关控制。

(4) 声控开关：楼道灯是用声音控制开启，并且经过延时自动熄灭的，这就是声控开关的应用实例。

3．控制器的选择

控制器的选择与控制量、被控量、执行器、传感器都有关系。常用的控制器有定时器、各种开关、继电器、可编程控制器、单片机等。

定时控制器。定时控制应用非常广泛，如上下课打铃、电烤箱、洗衣机、电风扇都是由时间控制的。许多其他被控量也可用时间控制，如温度与加热时间有关，加热时间越长温度越高；位移也与时间有关，对于单向直线运动，运动时间越长，移动距离越大。定时控制的控制器有机械定时器和电子定时器。我们在选择定时控制器时，可以利用闹钟、旧式洗衣机、电风扇、电烤箱上的定时器。

温度控制器。最简单的温度控制器是由双金属元件带动电接点的温度开关。常用在电熨斗、烘箱等家用电器上，特点是简单价廉但不十分精确。冰箱里常用的压力式温度开关，是靠液体或气体膨胀产生的力使开关动作的。以热电偶、热电阻为传感器的温度控制器都比较复杂。

（四）安装及调试

控制系统的所有元器件以及被控对象和一些辅助装置（如电源）等要安装到一起，并且按照其工作要求连接起来。在设计时应当考虑它们的安装及连接方法，并画出安装连接图。安装后还要进行调试，确保其实现特定功能。

二、温度控制装置的设计

我们以电热箱为例，设计一个温度控制装置。

（一）控制要求

电热箱温度可以自动控制，有一个显示电热箱温度的温度计和一个显示电热箱通电状态的小灯泡。

微信公众号：电子课本大全

（二）方案设计

(1) 加热方式：电阻丝加热。

(2) 控制器：双金属片温度开关（45℃热开关）。

(3) 通电状态显示：用与电阻丝串联的小灯泡显示。

(4) 电路原理图见图 4.38。

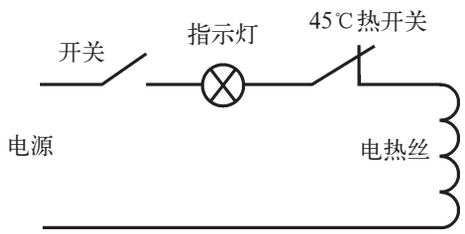


图 4.38　电热箱电路原理图

（三）元器件选择

(1) 加热器：电阻丝 (12V、15W)。

(2) 控制器：自制双金属片温度开关，可以利用日光灯启辉器中的双金属片制作温度开关 。把日光灯启辉器的玻璃外壳打碎，调整两个触点的距离，使得启辉器放入 45℃的热水中时两个触点正好互相接触。

(3) 其他元器件、器材：开关 (12V、2A)、电源 (12V、2A)、小灯泡 (3V)、导线、绝缘板若干。

（四）安装及连接

电阻丝、双金属片温度开关安装在电热箱内，开关、小灯泡安装在电热箱外。按电路原理图连接。

三、温度控制装置的制作和调试

以恒温箱为例介绍实际控制系统的制作和调试。

先用绝缘材料做一个 40cm × 20cm × 20cm 的恒温箱，在底板偏左方立一个支架，支架右边安上双金属片和触头。触头下面安装定触点，定触点的左端连接导线接指示灯，通过装于箱外的开关引到箱外，接电源的一极。用耐热材料做一个绕线架，绕上电热丝作为电热器（电热丝的欧姆数根据所要求恒定的温度来定）。用合适的铜丝弯两个⌐形，将它们插入电热器内，插入上边的横头短些，插入下边的横头长些，它们在电热器内互不接触，电热丝的两端线头分别焊接在它们上面，如图 4.39 所示。下面铜丝的左端固定在支架上，再通过导线引出箱外，接电源的另一极，上面铜丝的左端与定触点相平。

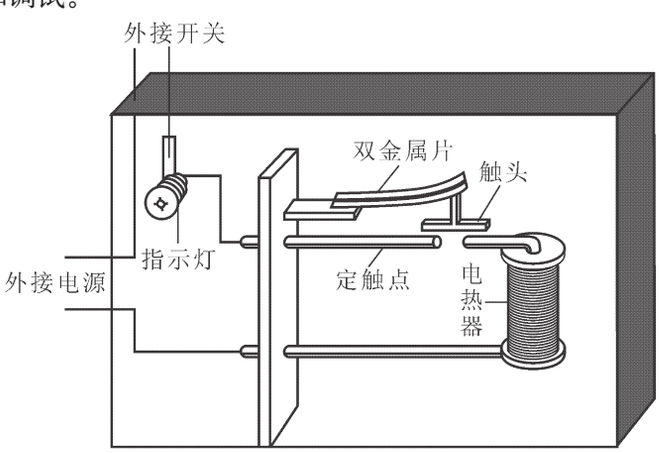


图 4.39　恒温箱内部电路示意图

恒温箱的外形如图 4.40 所示。前盖板右下方的长方形玻璃窗口内面装有温度计，左上方是指示灯，将恒温箱左边引出的导线接入电源插头。

使用方法：将电源插头接入 9V 电源，闭合开关，左边指示灯亮，从右边玻璃窗

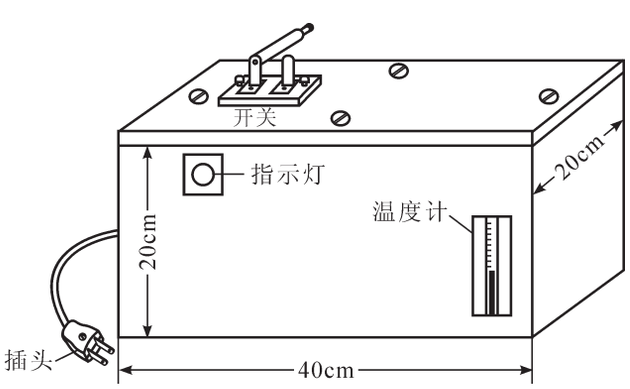


图 4.40　恒温箱外观图

微信公众号：电子课本大全

口观察温度计的示数。

当恒温箱内的温度超过所要求的数值时，双金属片向上弯曲，触头分开，电路切断，指示灯熄灭，电阻线圈不发热，恒温箱内温度随之下降；当温度降到低于所要求的数值时，双金属片平直的触头将接触到定触点，电路被接通，箱内温度随之升高。这样，使恒温箱内的温度保持恒定。

四、时间控制装置的设计与制作

以升国旗的定时装置为例，设计一个定时控制系统。

（一）定时升旗装置设计

1．控制要求

每天早上 7：00 准时启动将国旗升上旗杆，国旗升到旗杆顶部自动停止。

2．方案设计

用定时器作为控制器，执行器为电动机，用行程开关控制电动机停止工作。电路原理图见图 4.41。定时开关在早上指定时间闭合，接通电路，电动机转动使国旗上升。当国旗升到旗杆顶端时行程开关被触动，开关断开，电动机停止转动。晚上收国旗时，拨动换向开关，电动机反向转动，降下旗子。

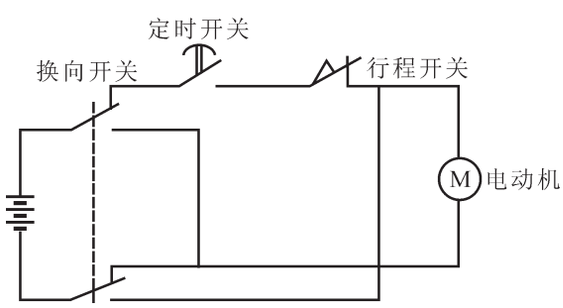


图 4.41　定时升旗装置电路原理图

3．元器件选择

(1) 用改装的闹钟（或电子计时器）作为控制器。

(2) 执行器：电动机（12V、10W，或根据情况选择）。

(3) 行程开关：12V、1A（常闭触点）。

(4) 滑轮 2 个（滑轮的孔径应该与电动机的轴径相同，配合良好）；皮带（或绳子）1 条；触发行程开关用的触发块（可用铁丝、夹子等）1 个。

（二）制作及调试

1．制作前的准备

检查一下元器件、零配件。准备工具：台钻（或手电钻）、钻头、螺丝刀、电烙铁。准备其他物品：胶水、螺丝钉等。

2．制作安装

在绝缘板上用铅笔画出各元器件的安装位置和穿线孔等的钻孔位置，按照画出的孔位和所需要的大小钻出各个孔。钻滑轮安装孔、电动机固定螺钉孔。

安装各个构件及元器件，安装位置见图 4.42。注意，滑轮的孔位置要准确，要让皮带能够装上，而且有一定的张紧力，滑轮转动时应该能带动皮带一起运动。

把各元器件、零件安装到各自的位置上，用螺丝钉固定。把旗子和触发块固定到皮带上。

用导线把各元器件连接起来。检查接线无误后就可以通电试验了。

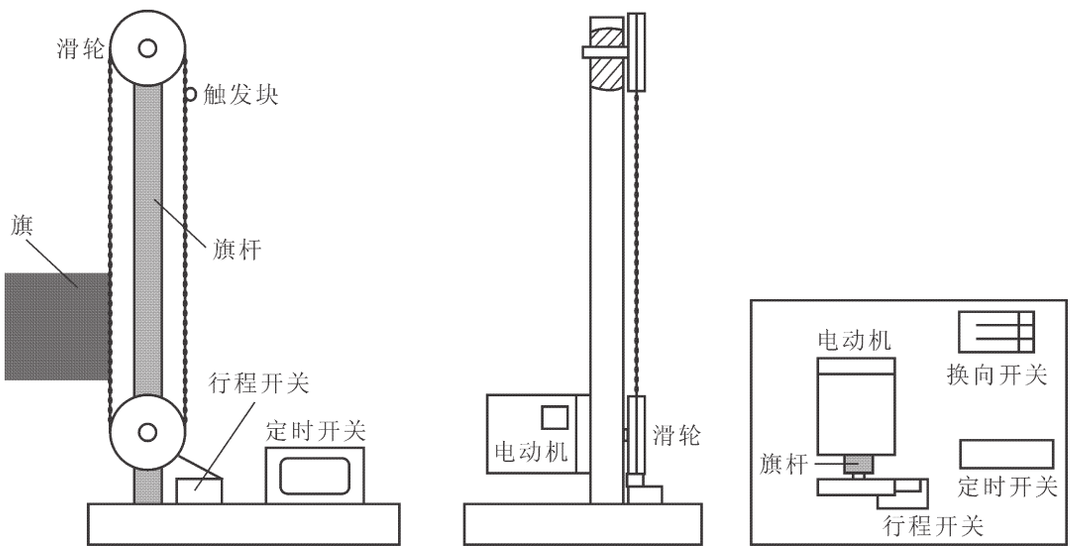
3．调试

调整皮带松紧，使其有一定的张紧力；但注意不要让张紧力过大，影响电动机转动。

调整触发块的位置，使得旗子升上顶端时正好触动行程开关。

微信公众号：电子课本大全

设定定时开关时间（先用较短的时间调试），试一下定时升旗装置的工作全过程。



(a)正视图　　(b)侧视图　　(c)俯视图

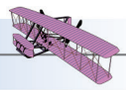
图 4.42　定时升旗装置安装图



活动延伸

设计一两个简单的控制系统，列出对应的元器件清单，画出电路原理图，说明其工作原理和连接方法。例如，自动计时装置、宾馆自动门、沼气池系统压力控制装置、蔬菜大棚恒温控制装置、随车流量变化的交通红绿灯设计、声光控制灯等。

微信公众号：电子课本大全



附录　部分中英文词汇对照表

结构	structure
设计	design
技术	technology
强度	strength
刚度	rigidity
载荷	load
力学	mechanics
稳定性	stability
对称	symmetry
圆拱	arch
壳体	shell
桁架	purlin
应力	stress
静力	static force
动力	dynamic force
弯曲	bending
拉伸	tension
压缩	compress
铸造	casting
焊接	welding
金属	metal
木材	wood
塑料	plastics
接头	joint
模型	model
原型	prototype
绘图	draft
性能	performance, property
铆钉	rivet
螺钉	screw
决策	strategy
评价	evaluation
美学	aesthetics
流程	process, flow
目标	aim, goal

微信公众号：电子课本大全

环节	tache, link
时序	scheduling
无序	out-of-order
有序	order
流程图	flow chart
柔性制造单元	flexible manufacturing cell
柔性制造系统	flexible manufacturing system
计算机数字控制	computer numerical control
计算机辅助工艺设计	computer-aided process planning
计算机集成制造系统	computer integrated manufacturing system
优化	optimize
电子邮件	e-mail
编码	coding
编程	programme
飞船	airship，space aircraft
火箭	missile，rocket
发动机	engine
系统	system
子系统	subsystem
元素	element
整体	whole
功能	function
无限	immensity
质点	particle
环境	circumstance，environment
特性	characteristic
飞机	airplane
飞行器	aerocraft
自然	nature
人造的	synthetic, man-made, artificial
实体	substantiality
抽象	abstract
实质	essential
层次	level, layer
系统科学	system science
系统工程	system engineering
人性化	humanistic
人造卫星	satellite

微信公众号：电子课本大全

全球定位系统	globe positioning system
惯性导航	inertial navigation
生态平衡	ecological balance
控制	control
控制器	controller
执行器	executive device
传感器	sensor, transducer
开环控制	open loop control
闭环控制	closed loop control
遥控	remote control
数控	numerical control
继电器	relay
可编程控制器	programmable logic controller
中央处理器	central processing unit
随机存取存储器	random access memory
反馈	feedback
干扰	interference, disturb

微信公众号：电子课本大全