生活与物理

培养高阶思维的初中科学综合学习*

——以自行车“旧车焕新”为例

朱 红 (宁波市海曙区教研室 浙江 315010)
王 迪 (宁波市海曙区古林镇中心初级中学 浙江 315174)

摘 要 综合学习突出以“整合与联结”的思想引领学习内容与学习方式的变革。在整体主义思维影响下,依据知识的结构化与课程综合性的特点,综合学习强调学生的学习要加强知识间的联系、加强与生活经验的联系、加强与生产实践的联系。在“力是改变物体运动状态的原因”单元学习中设计自行车“旧车焕新”的真实生活情境,通过问题解决、联结知识,获取证据、作出决策,批判质疑、作出解释,问题探讨、提出创见等环节的综合学习,培养学生的问题求解能力、决策力、批判性思维、创新思维等高阶思维能力,在此过程中培养学生的核心素养。

关键词 高阶思维 综合学习 自行车
文章编号 1002-0748(2024)8-0074 **中图分类号** G633·7 **文献标识码** B

综合学习是基于现实的主题和内容,突破学科和学校的限制,强调知识结构的整体性和个体与他人、社会的关联性,使学习者能够综合运用所学知识解决现实生活问题的一种学习方式。综合学习的特点主要表现为学习目标的整合性、学习内容的现实性、学习方法的综合性以及学习结果的迁移性[1]。《义务教育课程方案(2022年版)》对综合学习作了明确的规定:要加强课程内容与社会生活和学生经验的联系,强化学科内知识整合,要探索大单元教学,积极开展主题化、项目式学习等综合性教学活动,促进学生举一反三、融会贯通,加强知识间的内在关联,促进知识结构化[2]。综合学习离不开高水平的思维活动,它要求学生学会在真实的生活情境中发现问题、探究问题和解决问题。高阶思维是发生在较高认知水平层次上的心智活动或认知能力,目前学界尚无统一的定义,其最早提出可以追溯到美国布卢姆等学者(1956年)提出的认知领域教育目标分类,高阶思维在教学目标分类中表现为分析、综合、评价和创造。学者钟志贤(2004年)指出,高阶思维主要包括问题求解能力、决策力、批判性思维和创新思维[3]。高阶思维促使学生从浅层次信息的获取与分析转向深层次的知识理解与实际应用,从而转向深层的、更有意义的高阶思维学习方式,有助于深度学习的有效发生。在“运动和力”大单元学习后,笔者设计了自行车“旧车焕新”的综合学习。本文以该案例为例阐述如何在初中科学综合学习中培养学生的高阶思维。

1 学习目标与学习内容分析

“力是改变物体运动状态的原因”是科学课程13个核心概念之一“物体的运动与相互作用”的学习内容,具体包括华东师大版《科学(八年级上册)》第一章“运动和力”中的机械运动、力、常见的力、牛顿第一定律和二力平衡等内容。在单元教学中,笔者以校园中的“无主自行车”为载体,创设“旧车焕新”的真实情境,设置挑战性任务,驱动学生通过小组合作开展综合学习。

1.1 学习目标

物理观念:了解滑动摩擦、静摩擦和滚动摩擦;了解自行车增大和减小摩擦所采取的措施;了解力是改变物体运动状态的原因;理解物体之间力的作用是相互的;理解二力平衡的条件。

科学思维:通过对自行车安全隐患的全面检查及解决,发展学生的问题解决能力;在换轮胎环节,通过实验结合推理论证做出决策,发展学生的决策思维;在

* 基金项目:本文系2023年度浙江省教育科学规划课题“工程思维视域下初中科学项目化学习的设计与实践研究”(课题批准号:2023SC166)和2023年浙江省教研课题“指向高阶思维的初中科学项目化学习的实践研究”(课题批准号:G2023070)的阶段性研究成果。

中国知网 https://www.cnki.net

选刹车片环节，对模拟实验结论提出质疑，并对自行车实际测速结果做出解释，在此基础上进行选择，发展学生的批判性思维；在提高刹车安全性能的环节，突破思维定势，提出点刹的方式，发展学生的创新思维。

科学探究：通过对前后轮受到摩擦力方向、不同材料刹车片制动性能的实验探究，学生经历设计实验方案、获取证据、得出结论的科学探究过程，发展学生的科学探究能力；通过对不同材料刹车片制动性能实验结论的质疑，改进实验方案，实测自行车速度，建立图象模型，通过分析图象模型得出完整的实验结论，进一步发展学生的科学探究能力。

科学态度与责任：通过对自行车安全隐患的全面检查、换轮胎、选刹车片、改进刹车性能等真实情境问题的解决，激发学生对科学的兴趣，体会科学、技术与生活的联系，领悟科学源于生活又服务于生活。

1.2　学习内容

检查自行车存在的安全隐患，哪些部件需要增大摩擦，哪些部件需要减小摩擦，具体如何解决，说出蕴含的科学知识。

自行车后轮的轮胎磨损严重，需要换轮胎，前轮的轮胎仍可使用。研究新、旧轮胎分别应安装在前轮还是后轮更有利于自行车前行。

自行车刹车片的磨损导致刹车制动性能不佳，需要换新。设计实验探究金属材料刹车片还是树脂材料刹车片的制动性能更好。

自行车刹车时容易发生侧滑的现象。研究通过改进刹车方式使自行车既有良好的制动性能又能防止侧滑。

制作一份“无主自行车”整修的小贴士。

2　学习流程的设计

本课以“无主自行车”为载体，把自行车整修后投入校园自助自行车使用点为真实情境。该情境可分解为全面检查、换轮胎、选刹车片、改进刹车及制作整修贴士等子情景。基于真实生活情境，以情境催生问题，以问题诱发任务，综合运用观察、实验、探究、质疑、评价、调查等学习方法，应用运动和力的知识解决真实问题。具体的学习流程见图1。

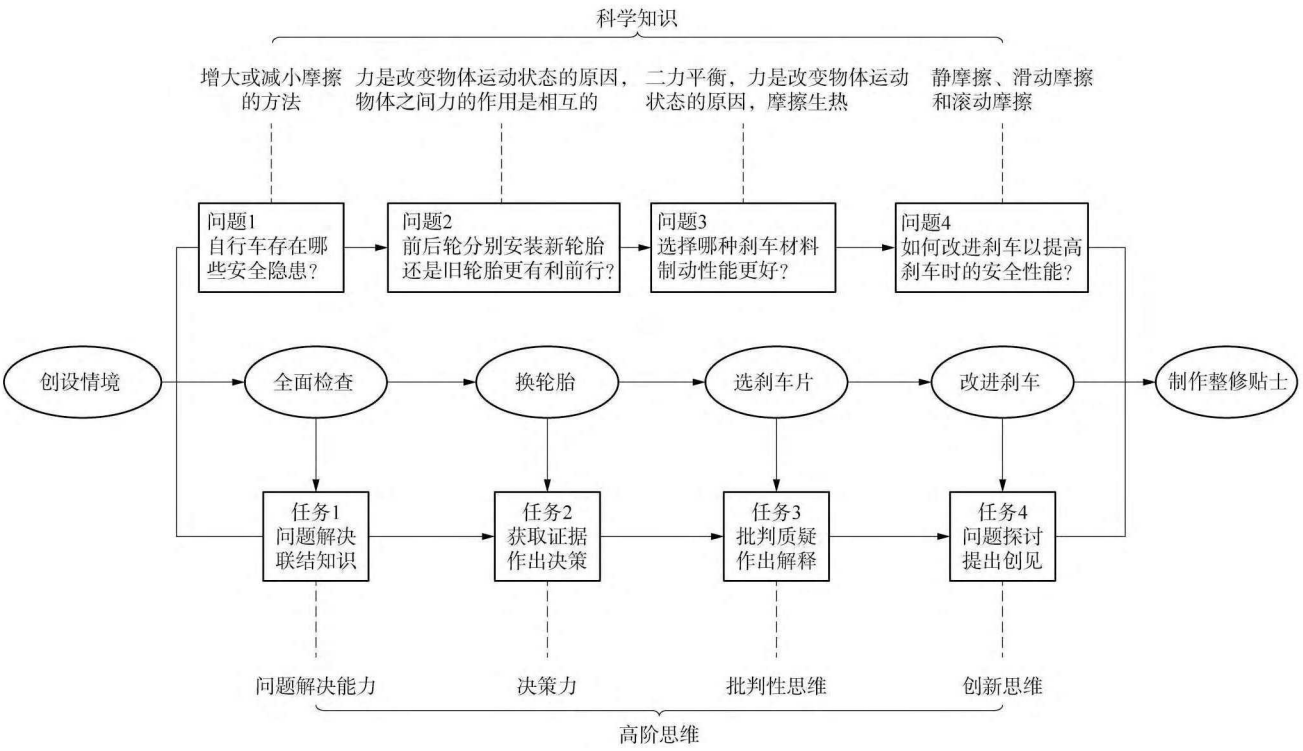

图1　学习流程图

3　学习过程

3.1　创设情境，明确任务

学校角落现存一批“无主自行车”，准备对它们进行检查整修后投入到校园自助自行车使用点供有需要的师生使用。这节课主要对它们进行检查，提出整修建议，并制作整修小贴士。

3.2　解决问题，联结知识

全班分为四个小组，每个小组一辆“无主自行车”。

问题：这些“无主自行车”存在哪些安全隐患？

中国知网　https://www.cnki.net

任务：对照自行车结构图寻找并记录自行车存在的安全隐患，讨论相应的解决方法，并写出解决方法中用到的科学知识。

学生以小组为单位围绕自行车，观察、讨论、合作、探究，填写表格。汇总表见表1。

表1　自行车安全隐患及解决方法

自行车编号	安全隐患	解决方法	科学知识
1	车把套松动	套紧车把套	增大压力可以增大摩擦
	链条齿轮生锈	涂润滑油	使接触面隔开可以减小摩擦
2	后轮轮胎花纹磨损严重	更换新轮胎	增加接触面粗糙程度可以增大摩擦
3	刹车片磨损严重	更换新刹车片	增加接触面粗糙程度可以增大摩擦
4	车头难以转动	更换新滚珠轴承	变滑动摩擦为滚动摩擦
	脚踏板很光滑	更换新脚踏板	增加接触面粗糙程度可以增大摩擦

学生汇报各组自行车的安全隐患，给出相应的解决方法及蕴含的科学知识，教师在黑板上建构关于增大、减小摩擦的科学知识结构图，促进知识的联结。

3.3　获取证据，作出决策

提出问题：自行车后轮轮胎磨损严重，需要换轮胎，前轮胎仍可使用。那么，新、旧轮胎分别应安装在前轮还是后轮更有利于自行车前行？你的依据是什么？

学生：后轮用新轮胎，前轮用旧轮胎，我看修车师傅换轮胎时就是这样做的。

教师：善于观察并能根据生活经验作出判断，很好！

学生：后轮用新轮胎。雨天观察到后轮上的泥水往后方飞溅出去，说明地面对后轮的摩擦向前，所以要装新轮胎。

教师：能从生活现象中获取证据进行推理，作出判断，非常好！为什么要判断摩擦力方向呢？

师生一起反思解决问题的思路：前后轮应分别选新旧哪一个轮胎？我们知道自行车骑行时，轮子与地面存在静摩擦，其他条件相同的情况下，新轮受到的静摩擦力较大，旧轮受到的静摩擦力较小。解决问题的关键是要知道前后轮受到摩擦力的方向，即前、后轮受到的摩擦对自行车前行分别提供动力还是产生阻力。

提出问题：我们能否通过实验来论证前后轮受到的摩擦力的方向呢？

小组讨论后汇报：在后轮下面放一张白纸，转动脚踏板，观察到白纸向后运动，说明地面对后轮的摩擦向前。用同样的方法探究地面对前轮的摩擦力方向，白纸运动现象不明显。

教师：能否改进实验，使前后轮的实验现象更加明显？

学生讨论，改进实验方案：分别在前、后轮下铺木板，木板下垫圆柱体的管子，转动脚踏板的转轴，观察木板运动的方向。

观察现象：后轮下的木板向后运动，前轮下的木板向前运动。

分析：后轮下的木板向后运动，根据力是改变物体运动状态的原因，说明车轮对木板的摩擦力方向向后；根据物体之间力的作用是相互的，得到木板对车轮的摩擦力方向向前，力的示意图见图2。同样的方法可分析得出前轮受到的摩擦力方向向后，力的示意图见图3。



图2　后轮的受力方向



图3　前轮的受力方向

基于以上的证据作出解释：骑行时，前轮选择旧轮胎，适当减小了摩擦；后轮选择新轮胎，适当增大了摩擦。

3.4　批判质疑，作出解释

提出问题：自行车刹车片的磨损导致刹不住车，需要换新，可供选择的刹车片有金属材料的（见图4）和树脂材料的（见图5），选择哪一种材料的刹车片更好呢？你的依据是什么？

中国知网　https://www.cnki.net


图4　金属刹车片


图5　树脂刹车片

有的学生提出金属不容易磨损，选择金属材料的。有的学生提出质疑：作为刹车片应该首先考虑制动性能，树脂材料比较粗糙，相同压力条件下能产生更大的摩擦力，树脂材料刹车片的制动性能更好。

教师：如何论证树脂材料比金属材料的制动性能好呢？

学生：可以通过模拟实验的方法。

探究：相同压力条件下，哪种材料的刹车片产生的滑动摩擦力更大。

设计实验方案：两块相同的木块底面分别粘贴树脂片和金属片（两块木块的总质量相同），用弹簧测力计分别拉着木块在水平金属表面上做匀速直线运动，观察弹簧测力计的示数。

教师提供实验器材；学生小组合作，进行模拟实验（见图6）。

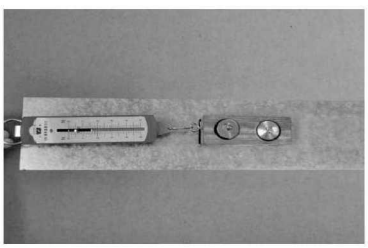
图6　实验装置

学生记录实验数据（见表2）。

表2　实验记录表

实验次数	弹簧测力计示数(N)	
	木块底部粘贴金属片	木块底部粘贴树脂片
1	0.4	0.9
2	0.5	1.0
3	0.4	1.0

分析表格中数据，得出结论：相同条件下，金属材料刹车片产生的摩擦力小，树脂材料刹车片产生的摩擦力大。

做出选择：选用树脂材料的刹车片。

学生质疑：

（1）为什么很多自行车用的是金属刹车片？

（2）相同条件下，树脂刹车片一定比金属刹车片产生的摩擦力大吗？

（3）模拟实验是否存在问题？

户外活动：对树脂和金属材料的刹车片制动性能进行实际测试。

设计实验方案：取相同品牌不同材料的刹车片，用大小相同的力按压刹把，使初速度为50 km/h的自行车从运动到静止，记录该过程中不同时刻自行车的速度。

实验器材：测速码表（感应磁铁、感应器、显示屏）、秒表、自行车、金属刹车片、树脂刹车片，等。

实验过程：

（1）安装测速码表：将感应磁铁安装在车轮辐条上[见图7(a)]；感应器固定在车架前叉处[见图7(b)]，使两者间的空隙不大于1.5 mm[见图7(c)]；把显示屏安装在车把上[见图7(d)]，使显示屏与感应器的距离不大于60 cm。骑行时辐条带动磁铁转动，通过感应器在显示屏上可显示自行车的实时速度。

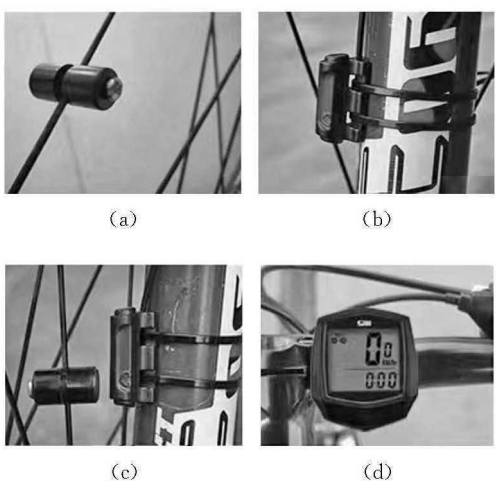
(a)　(b)　(c)　(d)

图7　安装测速码表

（2）当自行车初速度为50 km/h时，用一定大小的力按压刹把，并每隔2～3秒观察一下车把上的显示屏，直至自行车速度为0。

（3）在表格中记录实验数据（见表3）。

表3　自行车刹车时速度与时间的关系

时间(s) / 速度(km/h) / 刹车片种类	0	3	6	9	11
树脂刹车片	50	41	23	0	0
金属刹车片	50	36	21	8	0

（4）更换不同材料的刹车片重复实验步骤（2）、（3），按压刹把的力需保持相同。

中国知网　https://www.cnki.net

根据表格中的数据，学生绘制不同刹车片的自行车刹车时速度随时间的变化图象（见图8）。

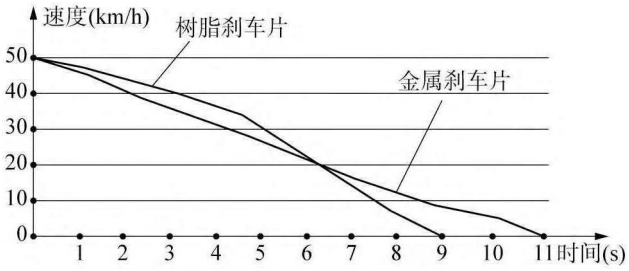

图8　自行车刹车时速度随时间变化图象

学生分析图象，得出结论：相同情况下，低速时树脂刹车片刹车性能好，金属刹车片刹车性能弱一些；高速时金属刹车片刹车性能好，树脂刹车片刹车性能弱一些。

模拟实验得到的结论与低速时材料刹车性能的结论是一致的，但之前的模拟实验存在一定局限性。

对此结果作出解释：高速刹车，摩擦产生热量多，树脂不容易散热，温度升高，动摩擦因数变小，树脂刹车片的刹车性能变弱。反之，金属刹车片的刹车性能基本不随温度变化。

“无主自行车”整修后投入到自助自行车使用点进行使用，统筹考虑自行车速度和成本，作出选择：换用树脂刹车片。

3.5　问题探讨，提出创见

提出问题：低速下树脂刹车片制动性能好，但有时刹车时车会发生侧滑的现象。怎么改进刹车，使自行车既能有良好的制动性能又能防止侧滑呢？

大多数学生提出通过升级刹车系统的方法。比如，选择高效的刹车片和刹车线，它们能够提供更快速、更稳定的制动效果。

有位学生分享观点：无需改变刹车系统，改变刹车的使用方式即用点刹就能实现。按下刹车，车轮刚抱死就松开刹车，按——松——按——松……这样车轮不会持续抱死，防止侧滑且有良好的制动性能。

教师：这是一个很好的创意，只要改变刹车的方式，简单有效！

播放课前视频：自行车赛车手分享点刹方式及优点。

学生骑自行车试验点刹。

总结：用点刹方式可使自行车既有良好的制动性能又提高了安全性能。

问题：为什么点刹既能使自行车有良好的制动性能又能提高自行车的安全性能？

留待学生课后解决。

3.6　维修清单，制作贴士

根据上述综合学习的结果，整理一份整修清单，制作一份小贴士，内容包括要整修的问题及对应的解决方法，以及预计成本，并且备注哪些问题已在课中解决，哪些问题有待课后解决。

4　培养高阶思维的策略

综合学习的目的在于让知识学习与学生的生活世界相联结，让学习关联真实生活，以引发学生主动学习的好奇心，让学生从纯学科世界走向真实的生活世界[4]。综合学习离不开高阶思维，在教育实践中，我们应该注重综合学习和高阶思维的培养，使学生能够在整合知识和技能的同时，提升认知能力和问题解决能力。

4.1　建立思维模型，培养学生的问题求解能力

问题求解能力是指面对问题时，能够运用知识、技能和思维方法，分析问题的本质和原因，提出有效的解决方案，并付诸实践的能力。这种能力需要个体或团队具备扎实的专业知识、良好的逻辑思维和创新能力，同时还需要具备一定的实践经验和问题解决技巧。在问题求解过程中，通常需要经历问题识别、问题分析、方案制定、方案实施和效果评估等阶段，而问题求解能力则贯穿于整个过程的始终。

思维模型是帮助我们理解和解决问题的工具。我们可以学习并应用一些常见的思维模型，如流程图、因果图、思维导图等，这些工具有助于更好地组织和分析信息，形成系统的思维框架。在选轮胎环节，需要解决的问题是新、旧轮胎分别应安装在前轮还是后轮更有利于自行车前行，这个真实情境的问题相对复杂，学生没有解决问题的思路。教师引导学生按照问题解决的逻辑来思考问题，并用如图9所示的思维导图清晰地呈现，这样就把原问题转化为探究前后轮受到地面摩擦力方向的问题。该问题落在学生的最近发展区，具有可操作性，学生运用学过的力学知识和方法就能解决。然后，针对该问题，学生制定计划、开展实验，最终解决了问题。同样，在解决改进刹车方式使自行车既有良好的制动性能又能提高安全性能的问题时，也可以建立简单的思维模型引导学生想到用点刹的方式。思维模型很好地起到了分析综合问题的作用，使人们能更准确、更快速地找到问题解决的突破口和路径，进而制定相应的方案措施。

4.2　采用多方论证，培养学生的决策能力

决策力是指在面临多种选择或不确定性时，个体或团队能够基于现有信息和目标，进行理性分析

中国知网　https://www.cnki.net

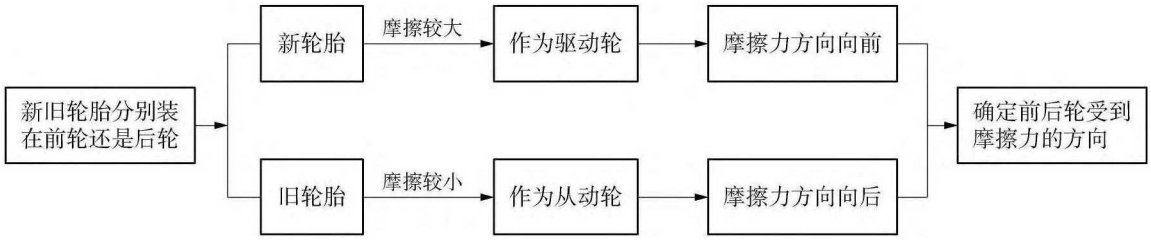

图9　解决问题的思维导图

和判断，从而做出明智且有利决策的能力。决策力不仅要求具备丰富的知识和经验，还需要良好的逻辑思维、风险评估和创新能力。在日常生活和工作中，决策力对于个体和组织的成功至关重要，它能够帮助我们抓住机遇、应对挑战，并实现既定目标。

多方论证是一种比较全面的辩证方法，通过汇集各方观点和证据，以达到更客观、准确的结论。在进行决策时，我们需要进行多方论证，作出正确的判断与决策。如在选择轮胎时，有的学生把生活中修车师傅换轮胎时把旧轮胎换在前轮、新轮胎换在后轮的事实作为证据；有的学生把雨天观察到自行车后轮甩出泥水的方向作为证据；有的学生还进一步探究自行车行驶时轮胎下所垫白纸或者木板的运动方向，并利用“力是改变物体运动状态的原因”和“物体间力的作用是相互的”核心知识，进行推理得出结论。多方论证的结果是一致的，从而作出决策。

在选择刹车片环节，要考虑的因素很多，如刹车片的制动性能好坏、材料的散热性、高温对刹车材料的影响、材料的耐磨损程度、自行车的车速、经济成本等。虽然金属具有耐磨性，高温的影响小，但是考虑到自助自行车的速度要求低，投入成本低，综合考虑各方因素，权衡利弊，作出选择树脂刹车片的决策。

4.3　开展反思性评价，培养学生的批判性思维

批判性思维是指通过判断、推理和评估来分析问题和概念的思维方式，它需要多方面的思维和分析能力，包括逻辑推理、假设检验、数据分析和对信息的评估等。批判性思维不仅有助于更好地理解和解决问题，提高决策的准确性和有效性，还是当今社会重要的学习和职业技能。

在实际应用中，批判性思维有助于我们发现问题，构想多种解决方案，并适时做出改变和调整。在评估信息或观点时，批判性思维可以帮助我们更全面地了解问题背景和相关信息，注意信息的来源和可信度，运用逻辑和推理进行分析和评估，避免偏见和情感的影响，以及学会提问和探究以深入了解相关信息和观点。在选择哪种材料的刹车片环节，学生认为刹车片的制动性能是关键，设计实验方案比较不同材料的动摩擦因数，得出结论。教了不等于学了，学了不等于学会了，而如何让学生真正学会了，评价的作用则是显著的[5]。我们在综合学习中着重开发评价量表（见表4），帮助学生管理自己的学习，反思所学。在运用评价量表进行评价环节，有的学生结合实际情况作出反思：市场上很多自行车使用金属刹车片，为什么不利用成本相对低且制动性能好的树脂刹车片呢？学生从真实现象中对原实验结果产生质疑，树脂刹车片的制动性能一定比金属刹车片好吗？进而到户外进行实际测量，利用现代技术手段——测速码表获取数据，并建立图象模型，分析图象，得出结论。在实践基础上进行理论分析，运用已学的知识作出解释：不同速度下，不同材料的刹车片因温度不同，导致制动性能不同。这样在理论和实际达成一致后，作出了合理的选择。

表4　评价量表

情境	等级			评价
	优秀	合格	待改进	
全面检查	运用知识解决安全隐患问题；能建立知识之间的联系	运用知识解决安全隐患问题；不能建立知识之间的联系	不能运用知识解决安全隐患问题	
换轮胎	能正确安装新、旧轮胎；能获取证据，进行论证，作出决策	能正确安装新、旧轮胎；不能获取证据进行论证	不能正确安装新、旧轮胎	
选刹车片	能通过模拟实验得出初步结论；能综合考虑多种因素作出选择	能通过模拟实验得出初步结论；不能综合考虑多种因素作出选择	不能通过模拟实验得出初步结论	
改进刹车	既有良好的制动性能，又能防止侧滑	有良好的制动性能，不能防止侧滑	没有良好的制动性能	

4.4　突破思维定势，培养学生的创新思维

创新思维体现在从不同角度分析、思考问题，提出新颖而有价值的观点和解决问题的方法[6]。创新思维的发展有助于拓展人们的想象力和创造力，提高竞争力和促进可持续发展。通过不断地思考、研究和

中国知网　https://www.cnki.net

尝试，人们可以激发出自身“大脑”的潜力，以高度创新的思维方式解决问题。创新思维具有多个主要特征，包括突破性、新颖性、独立性、综合性、辩证性和开放性。

运用创新思维能够打破思维定势，怀疑批判已有观点理论；使用新材料、新方法，产生新思路；不迷信、不盲从，不屈服于任何权威，不满足现成的方法和答案，有充分的思维自主性和自由性。在创新思维开展过程中，同时包含多种不同形式的思维，还运用了许多非思维形式，创造性地认识和构建新事物；遵循辩证法原理，联系地、发展地看问题，随事物变化，不断调整思考问题的角度和方式，修正已有观点或结论。在创新活动过程中，不断地吸收外界新信息、新技术，突破原有的思维定势。

在改进刹车环节，教师提出：如何改进刹车，使自行车既有良好的制动性能又能防止侧滑？大多数学生试图通过改进刹车系统来实现目的。好的学生能突破思维定势，打破原有的思维框架，从改进刹车方式进行思考，想到点刹的方式。为什么点刹既有良好的制动性能又能防止侧滑呢？这个问题对初中生有一定的难度，留待课后解决，这样把课内的学习延续到课外。创新思维还有多种方法，包括观察法、联想法、反转思维、多元思考、设想未来、模仿法和挑战常规等。这些方法有助于从不同角度和层面思考问题，从而产生创新的想法和解决方案。

5　结　语

综合学习强调学习内容的整体综合和学习方式的多样综合，这为学生提供了丰富的认知背景和多元的学习体验。综合学习既需要去应对复杂情境中的问题解决，实现知识的学以致用；同时又强调在具体情境中，依赖于学习者的主动探究，生成和发展知识，实现知识的用以致学。高阶思维超越了简单的记忆和理解，更强调对信息的深度加工、应用和创新。综合学习为学生高阶思维的发展提供了重要的场域，让学生在复杂情境中多角度、多方法地思考问题，有机整合并大胆创新，实现学习的高通路迁移和应用，以期解决更综合、更复杂情境中的问题。而高阶思维发展中形成的问题求解能力、决策力、批判性思维和创新思维能力则为今后的学习提供了更强大的思维支持和能力保障，最终在真实学习中发展了学生的科学核心素养！

参考文献

[1] 王鉴，刘静芳. 综合学习的要义阐释[J]. 中国教育学刊，2023(4)：31—35.

[2] 中华人民共和国教育部. 义务教育课程方案(2022年版)[S]. 北京：北京师范大学出版社，2022.

[3] 汪明. 指向高阶思维的物理课堂深度学习模型[J]. 物理教学，2021(1)：20—25.

[4] 陈佑清，贺元萍. 综合学习：内涵、特点与实施[J]. 当代教育科学，2023(2)：27—34.

[5] 郭洪瑞，张紫红，崔允漷. 试论核心素养导向的综合学习[J]. 全球教育展望，2022(5)：36—48.

[6] 中华人民共和国教育部. 义务教育科学课程标准(2022年版)[S]. 北京：北京师范大学出版社，2022.

(上接第73页)

[9] 乔通，邢红军，胡扬洋. 论物理教学中的审美教育[J]. 课程·教材·教法，2015(1)：91—95.

[10] 顾声和. 在高中物理教学中渗透诗一样的物理之美[J]. 物理教学，2018(11)：78—80.

[11] 乔通，胡扬洋. 论科学美及科学美感——基于科学教育的视角[J]. 许昌学院学报，2021(4)：96—101.

[12] 陆有富. 千春犹待发华滋——略论叶嘉莹先生的诗教传承[J]. 文学与文化，2015(4)：23—28.

[13] 李之柔. 毫鏊新事业　东篱归根翁——杨振宁先生说诗[EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/wkPuotCGJJ-sSAJRHCgHsw. 2022-02-15/2023-12-20.

[14] 周雁翎. 倾听科学与诗的对话[J]. 科技导报，2011(28)：80.

[15] 徐琳娜. 用接受学分析柏拉图与亚里士多德对待诗歌价值的异同[J]. 青年文学家，2019(12)：114—115，117.

[16] 高士其. 科学诗[M]. 北京：作家出版社，1959.

[17] 韦承金. 杨振宁译诗赠叶嘉莹[EB/OL]. https://news.nankai.edu.cn/mtnk/system/2022/11/05/030053481.shtml. 2022-11-05/2023-12-20.

[18] 梁羽生. 杨振宁论诗及其他[EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/fCITiFHpgzMoG-zHTStqlw. 2021-06-22/2023-12-20.

[19] 孟红. 愿将一生献宏谋——记共和国勋章获得者于敏[J]. 党史文汇，2023(5)：14—21.

[20] 张俊辉. 让物理教学变得诗情画意[J]. 物理教师，2007(1)：29—31.

[21] 胡成霞. 从图文关系嬗变看教科书插图的价值定位及实现路径[J]. 课程·教材·教法，2023(11)：35—42.

[22] 王文华. “艺术是科学创造的亲密伙伴”——郭沫若与钱学森的友谊[J]. 郭沫若学刊，2013(2)：20—25.

[23] 高士其. 怎样写科学诗[J]. 科学大众，1958(6)：235.

[24] 朱立新. 美物理学家为中国量子计算机写了首诗，中国科学家的翻译绝了！[EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/EEvRYB2QbWZkHoKuKoIhjg. 2021-01-01/2023-12-20.

[25] 迟宝东. 叶嘉莹的弱德之美与诗教人生[J]. 炎黄春秋，2020(12)：81—83.

中国知网　https://www.cnki.net