生活与物理

基于“问题链”培养关键能力的物理竞赛教学

——以乒乓球回旋问题的教学为例

熊明东 （重庆市酉阳第一中学校 重庆 409812）

摘 要 针对当前高中物理竞赛教学的难点，提出用问题链教学法促进学生关键能力的培养，整合物理学术期刊论文的研究设计中具有趣味性和科学性的核心问题。以一道原创的乒乓球回旋问题为例，探索“主问题链+引导性问题链”的竞赛培训教学方式，通过精心设计环环相扣的问题链，引导学生深入研究乒乓球撞击拍面时的动力学规律及回旋速度的影响因素。

关键词 问题链 关键能力 斜碰撞 刚体动力学 回旋速度

文章编号 1002-0748(2025)9-0077 **中图分类号** G633·7 **文献标识码** B

高中物理竞赛承担着筛选拔尖创新人才的重要使命，其试题情境跟科技前沿和生活实践密切相关。高等数学微积分的融入和有着大量文字的试题情境，使得考生们望而却步。笔者认为通过设计层进式问题链，能够提高竞赛培训教学的实效。问题链教学是指利用关联性问题将学习者引入具有思考性的学习活动中，在问题解决中建构新知识和习得新技能的教学方式[1]。将核心问题拆解成环环相扣的子问题和引导性问题链，是问题链教学设计的重要环节。考虑到竞赛培训教学的特殊性，笔者认为问题链设计要注重学生的关键能力培养，重视问题设计的趣味性、科学性和逻辑性。结合物理学科核心素养和创新人才选拔要求，笔者认为关键能力包括知识整合、模型建构、推理论证、科学解释和数学计算等方面[2]。

通过阅读物理学科学术期刊中的论文，筛选其中适合竞赛生研究的问题，据此命制具有“科技感”和“生活味”的探索性试题，能够增强问题设计的趣味性和科学性。围绕设定的主题，在整合现有研究和学情的基础上拆解核心问题，进而设计环环相扣的问题链，能够增强问题链设计的科学性和逻辑性，让学生在问题解决中感悟物理学科的魅力。

1 问题缘起与试题命制

笔者在英文期刊 Physical Review E 上浏览到一篇“用高速摄像机研究乒乓球碰撞而致回旋”的文章[3]。基于该研究的趣味性和逻辑性，笔者围绕乒乓球撞击拍面，以考查学生的三维斜碰撞和刚体力学知识为落脚点，编制了如下一道原创试题。

例题 乒乓球是一项广受大众喜爱的体育运动，旋转技术是吸引观众目光的关键要素，也是多数爱好者需要突破的技术门槛。张继科曾说：“旋转才是乒乓球里最内核的东西，因为有了旋转，就能相对保障弧线的稳定——上台率高。”因此，研究乒乓球与球拍碰撞过程中的旋转特性，对提升技术水平具有重要意义。一个乒乓球以某一初速度跟拍面发生碰撞，初速度与拍面法线的夹角为 θ_i，试着讨论反射角 θ_r 与入射角 θ_i 的关系，并分析旋转速度跟哪些物理量有关。已知乒乓球可视为匀质球壳且与拍面间的动摩擦因数为 μ，碰撞恢复系数为 e，最大静摩擦力等于滑动摩擦力。

2 融入问题链的教学实施

笔者用 PPT 呈现运动员打出回旋球的短视频，提问：“运动员是怎么打出回旋球的？又如何提高打回旋球的本领呢？”该问题从体育运动情境出发，激发学生兴趣并引发思考。考虑到学生的知识储备和思维习惯，教师将核心问题“乒乓球如何实现回旋”拆解成3个子问题，并在 PPT 上呈现子问题对应的引导性问题链。教学的全过程，笔者以物理建模和刚体力学为基石，让学生以小组为单位进行讨论与展示，引导学生逐步理解乒乓球回旋的动力学过程并分析其影响因素。

问题1：如何对乒乓球撞击拍面的过程进行物

中国知网 https://www.cnki.net

理建模?

引导性问题链:(1)要定量分析三维的斜碰撞过程需建立哪种坐标系?(2)需定义哪些速度和角度?能否类比光的反射现象?(3)碰撞过程中球壳受力方向确定吗?该如何处理其产生的效果?

学生经过讨论,以沿拍面水平向右的方向为 y 轴和垂直拍面向下的方向为 z 轴,建立如图1所示的直角坐标系,其中 v_i、v_r 分别代表碰撞前和碰撞后的速度。根据图1,碰撞过程中乒乓球以 x 轴为转轴且角速度设为 ω,设乒乓球表面受到的作用力为 F,乒乓球质量为 m、半径为 R。因为碰撞瞬间内力远大于乒乓球自重,所以忽略乒乓球自重的影响。

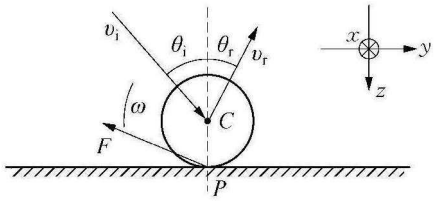

图1　乒乓球撞击拍面的物理建模分析

设乒乓球与拍面的作用时间为 τ。对 y 方向分别运用角动量定理和动量定理,可得

$$I\omega = -R\int_0^\tau F_y \mathrm{d}t \qquad ①$$

$$mv_{r,y} - mv_{i,y} = \int_0^\tau F_y \mathrm{d}t \qquad ②$$

乒乓球可视为匀质球壳,则其转动惯量为 $I = \frac{2}{3}mR^2$,将其代入①式可得

$$\int_0^\tau F_y \mathrm{d}t = -\frac{2}{3}m\omega R \qquad ③$$

将③式代入②式可得

$$v_{r,y} - v_{i,y} = -\frac{2}{3}\omega R \qquad ④$$

④式表明,跟碰撞前相比,碰撞后乒乓球沿拍面方向的速度被削弱。

设计意图:该环节的设计,一方面引导学生对实际问题情境进行模型建构,针对碰撞前、后的动量和角动量变化进行定量分析,培养学生抓住主要因素进行建模分析的实践能力;另一方面,促进学生整合运用刚体力学、动量定理等知识,将三维碰撞问题转化成一维碰撞问题进行定量分析,提升学生知识整合与迁移运用能力,为后续深入研究旋转特性、相对滑动临界角等问题做铺垫。

问题2:乒乓球在拍面上是否发生相对滑动?此时反射角和入射角间有着什么关系?

引导性问题链:(1)如何研究乒乓球与拍面发生相对滑动的现象?(2)能否分成几个阶段研究,又能分成哪几个阶段?(3)每个阶段有着什么特别的规律呢?(4)各阶段之间有着什么关联与区别?

(A) 当乒乓球与拍面无相对滑动时,由纯滚动规律可得

$$v_{r,y} = \omega R \qquad ⑤$$

将⑤式代入④式可得

$$\omega R = v_{r,y} = \frac{3}{5}v_{i,y} \qquad ⑥$$

在 z 方向上,根据恢复系数定义有

$$e = -\frac{v_{r,z}}{v_{i,z}} \qquad ⑦$$

将碰撞前后的速度按照图1进行正交分解,可得

$$\tan\theta_r = -\frac{v_{r,y}}{v_{r,z}},\ \tan\theta_i = \frac{v_{i,y}}{v_{i,z}} \qquad ⑧$$

将⑥、⑦式代入⑧式,可得

$$\frac{3}{5e}\tan\theta_i = \tan\theta_r \qquad ⑨$$

(B) 当乒乓球与拍面达到最大静摩擦力时,有

$$F_y = \mu F_z \qquad ⑩$$

在 z 方向上,由动量定理可得

$$mv_{r,z} - mv_{i,z} = \int_0^\tau F_z \mathrm{d}t \qquad ⑪$$

将⑩式代入⑪式可得

$$\mu(mv_{r,z} - mv_{i,z}) = \int_0^\tau F_y \mathrm{d}t \qquad ⑫$$

联立②式和⑫式可得

$$\mu(v_{r,z} - v_{i,z}) = v_{r,y} - v_{i,y} \qquad ⑬$$

将⑥～⑧式代入⑬式,即有 $\mu(1+e) = \frac{2}{5}\frac{v_{i,y}}{v_{i,z}} = \frac{2}{5}\tan\theta_C$,故

$$\tan\theta_C = \frac{5}{2}(1+e)\mu \qquad ⑭$$

上式中的 θ_C 是达到最大静摩擦时的临界入射角。

(C) 当球与拍面发生相对滑动时,不满足纯滚

中国知网　https://www.cnki.net

动条件即⑥式不成立，但此时⑬式依然成立，于是将⑦和⑧式代入⑬式，可得 $-\mu(e+1)v_{i,z}=-ev_{i,z}\tan\theta_r-v_{i,y}$，化简即有

$$\tan\theta_r=\frac{1}{e}\tan\theta_i-\mu\frac{1+e}{e} \qquad ⑮$$

将上述定量推导的结果总结如下：

(1) 当球与球拍间达到最大静摩擦力时，入射角满足 $\tan\theta_C=\frac{5}{2}(1+e)\mu$；(2)当入射角 $\theta_i<\theta_C$ 时，满足纯滚动条件，此时球与拍面间无相对滑动，反射角与入射角的关系为 $\tan\theta_r=\frac{3}{5e}\tan\theta_i$；(3)当入射角 $\theta_i>\theta_C$ 时，乒乓球与拍面间发生相对滑动，此时反射角与入射角的关系为 $\tan\theta_r=\frac{1}{e}\tan\theta_i-\mu\frac{1+e}{e}$。

由于相对滑动的临界入射角满足⑭式，分别取 $\theta_C=30°$、$45°$、$53°$、$60°$，运用数学软件绘制 θ_C 在 e、μ 平面内的相图(见图2)。当我们固定拍面的恢复系数 e 时，不难发现 μ 跟相对滑动的临界入射角 θ_C 呈正相关。究其原因，是因为 μ 越大导致滑动摩擦力越大，因而乒乓球不容易发生相对滑动的入射角范围更大。当我们固定 μ 值时，相对滑动的临界入射角 θ_C 跟恢复系数 e 呈正相关，此时对于更大范围内的入射角，乒乓球都能够做纯滚动而不发生相对滑动。

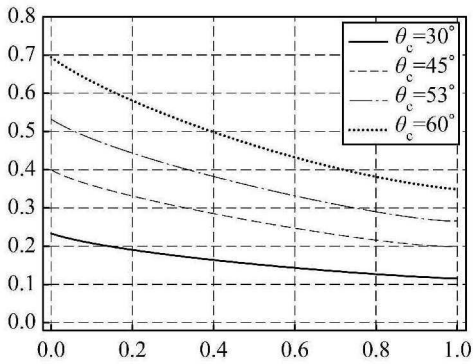

图2　θ_C 取不同值时的 $e-\mu$ 相图

设计意图：该环节以乒乓球滑动的临界条件为讨论焦点，围绕是否发生相对滑动和发生相对滑动的临界条件进行分类讨论，要求学生准确理解滑动摩擦力、纯滚动特点以及碰撞恢复系数，能够准确运用数学公式表征其中的物理规律，注重培养学生的推理论证和数学计算的能力。

问题3：乒乓球回旋速度与哪些物理量有关？又有什么具体关系？

接下来重点分析乒乓球旋转速度跟恢复系数 e 和动摩擦因数 μ 的关系。设乒乓球离开球拍的瞬间，旋转速度 ωR 与入射速度 v_i 的比值为 η。

当入射角 θ_i 小于相对滑动的临界入射角 θ_C 时，根据⑥式有 $\omega R=\frac{3}{5}v_{i,y}=\frac{3}{5}v_i\sin\theta_i$，可得

$$\eta=\frac{\omega R}{v_i}=\frac{3}{5}\sin\theta_i \qquad ⑯$$

当入射角 $\theta_i>\theta_C$ 时，联立④式和⑬式可得

$$\mu(v_{r,z}-v_{i,z})=-\frac{2}{3}\omega R \qquad ⑰$$

将⑦式代入⑰式可得：$\mu(1+e)v_{i,z}=\mu(1+e)v_i\cos\theta_i=\frac{2}{3}\omega R$，整理即有

$$\eta=\frac{\omega R}{v_i}=\frac{3}{2}\mu(1+e)\cos\theta_i \qquad ⑱$$

由此可见，η 只跟 $\mu(1+e)$ 和入射角 θ_i 有关，而且在 $\theta_i=\theta_C$ 处取得最大值，其最大值为

$$\eta_{max}=\frac{3\alpha}{\sqrt{25\alpha^2+4}} \qquad ⑲$$

其中，$\alpha=\mu(1+e)$。根据⑲式可知，乒乓球的最大回旋速度只取决于 $\alpha=\mu(1+e)$。根据⑭式，α 越大，乒乓球不发生相对滑动的入射角范围越大。基于此，将 α 称为品质因子，用来表征乒乓球球拍对回旋的影响。

笔者根据⑯、⑱和⑭式，将 α 分别取为0.5、1.2和2.0，绘制 η 与 θ_i 的关系图线(见图3)，并引导学生对图3蕴含的物理意义进行解释。首先，解释整体图象：品质因子取不同值时，回旋速度与入射速度的比值 η 均随着入射角 θ_i 而先增大后减小。其次，解释特殊点：当入射角增加到相对滑动的临界入射角 θ_C 时，η 开始逐渐减小，这是因为此时乒乓球与拍面达到最大静摩擦力，即乒乓球受到的摩擦力矩最大，导致产生的回旋速度最大；当入射角为零时，回旋速度也为零，因为此时乒乓球与球拍发生正碰，即乒乓球沿拍面方向的速度为零，于是摩擦力矩为零，故回旋速度为零。最后，解释极限趋势：随着品质因子的不断提高，若使入射角尽量接近90°，则乒乓球的回旋速度最大且接近 $0.6v_i$。

笔者在PPT上呈现乒乓球与拍面碰撞的实际测量统计图(见图4)，引导学生归纳测量值和理论值的吻合效果并分析原因。参照图3，图4中的竖直虚线代表乒乓球产生相对滑动时的临界入射角，竖直虚线左侧用⑯式拟合，竖直虚线右侧则用⑱式

中国知网　https://www.cnki.net

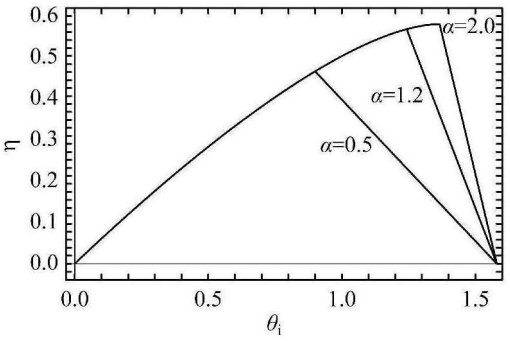

图 3　不同品质因子 α 下的 $\eta-\theta_i$ 关系图

拟合。当入射速度小于和等于 6.7 m/s 时，乒乓球的回旋角速度与理论推导的结果吻合较好，而当入射速度大于 6.7 m/s 时，理论与实验间的偏差逐渐变大。究其原因，当乒乓球旋转速度较大时，还需考虑空气阻力和空气密度对其的影响，而且回旋速度越大空气阻力的作用效果越明显。

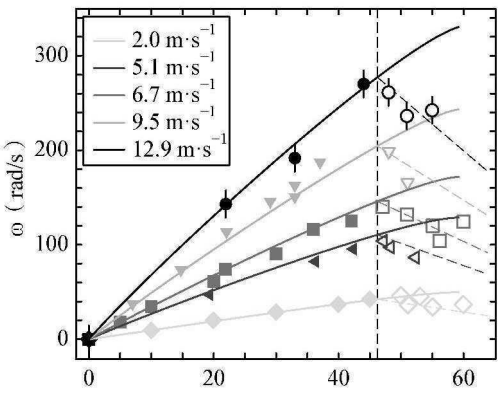

图 4　改变入射速度和角度时的实验测量图

设计意图：科学推理方面，该环节引导学生在系统性理论推导的基础上，分析不同条件下乒乓球回旋速度的影响因素。科学解释方面，笔者通过呈现 η 与 θ_i 的理论图象，引导学生阐述图象中的转折点、整体变化趋势并分析其背后蕴含的原因；通过观察学生的表达结果，评估学生对力与运动关系、品质因子概念等的理解深度。知识整合方面，笔者呈现实验测量与理论拟合的结果图，启发学生思考产生偏差的原因，起到引导学生进行整合与推理的作用。

3　小　结

（1）强化趣味性与操作性，激发深度探究的动机。

问题情境重视选择具有趣味性的科技前沿或者生活场景，以此缓解竞赛培优课堂的枯燥与单调。对于情境选择，笔者建议适当阅读物理学术期刊如 Physical Review E、The Physics Teacher 等，筛选符合竞赛生认知水平的研究论文，根据教学需要既可用于教学主题介绍，又能用于设计问题链。此举能提升问题链的趣味性与操作性，进而在问题解决中激发学生的求知欲和思维火花，达成深度探究。

（2）克服机械化与片面化，彰显过程评价与反馈。

传统的竞赛培训教学多是纯理论推导与纸笔测验，不仅增加学习内容的抽象性，还缺乏学生积极反馈的环节。融入问题链的物理竞赛培训教学，注重培养学生的关键能力，通过自主思考、组内讨论、小组展示等形式，开展过程性评价，让学生在互评中进行自我纠错与实时反馈。教学的全过程，教师扮演辅助者与引导者的角色，适时调节课堂进度与补充必要的学习内容。

参考文献

[1] 胡成，何迪倩，石美玲. 课前学习诊断支持下的物理问题链教学设计　以“波长、频率和波速”教学为例[J]. 物理教学，2024(1)：7　11.

[2] 刘智勇，李刚. 析物理竞赛试题，谈“关键能力”培养[J]. 物理教师，2024(12)：93　94，96.

[3] RÉMOND T，DOLIQUE V，RINALDI R G. Oblique impact of a buckling table-tennis ball on a rigid surface [J]. Physical Review. E，2023，107(5)：055007.

（上接第 65 页）

3　总　结

有心力问题在高中物理竞赛中占据着重要的地位。它不仅涉及基础的力学概念，如牛顿定律、能量守恒以及角动量守恒，还结合了几何和数学知识的应用，能够锻炼学生的综合思维能力。本文从多个视角剖析 2024 年第 41 届全国中学生物理竞赛复赛第 6 题的解法，通过一题多解的方式研究有心力问题，训练学生举一反三、分析问题和解决问题的能力，帮助学生掌握处理这类问题的方法。

参考文献

[1] 管靖，刘文彪. 理论力学简明教程[M]. 北京：科学出版社，2008：34　36.

[2] 周国全. 龙格-楞次矢量的张量积形式及其应用[J]. 大学物理，2015(1)：12　15，29.

[3] 李力. 在普物教学中用守恒量研究开普勒运动的一点补记[J]. 物理与工程，2013(1)：15.

[4] 於罗英. 高中物理竞赛中“天体的运动”解法探究[J]. 物理教学，2019(8)：64　68.

中国知网　https://www.cnki.net