

大学物理中的逻辑与方法 ——以落绳问题为例

李祖斌¹ 赵欣² 宋峰¹

(¹ 南开大学物理科学学院, 天津 300071; ² 天津工业大学物理科学与技术学院, 天津 300387)

摘要 大学物理的教学,除了讲授知识点,也应讲清物理的逻辑与方法。本文以柔绳下落问题为例,分析了题目的多种解法,从而展示了质点系统动力学中的物理逻辑,即数理逻辑。这是一种沿着“物理现象的数学表达→数学推演→新结论→数学表达的物理图像”的脉络构建物理体系、推演新结论的方法。从物理的逻辑与方法讲解课程,也是课程思政的一个切入点,可以让学生学会物理的逻辑与思路、把握到物理和科学的基本思想。

关键词 数理逻辑;落绳问题;质点系动力学

LOGIC AND METHOD IN COLLEGE PHYSICS —TAKING ROPE-FALLING PROBLEM AS AN EXAMPLE

LI Zubin¹ ZHAO Xin² SONG Feng¹

(¹ School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071;

² School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin 300387)

Abstract In college physics teaching, in addition to teaching knowledge points, we should also clarify the logic and methods of physics. Taking the falling problem of a soft rope as an example, this paper analyzes a variety of solutions to the problem to show that the physical logic in particle system dynamics, namely mathematical logic. It is the method of constructing physical theories and deducing new conclusions along the vein which starts from the mathematical expression of physical phenomena to mathematical deduction, then to new conclusion, and finally to physical image of mathematical expression. Teaching courses by the logic and methods of physics is also an entry point of ideological and political education. Students can learn the logic and route of physics and grasp the basic ideas of physics and science.

Key words mathematical logic; rope-falling problem; particle system dynamics

大学物理课程是国内理工院校面向非物理专业开设的通识类基础课程,其目的是教授学生基础的物理理论,培养学生的基本科学素养。这类课程,不仅要教会学生大学物理中的知识点,还要让学生能把握到物理学发展的脉络和逻辑,从中学到物理学如何将知识链接起来、如何从已知导向新知的方法。

知识在被发现时大多是离散的而非系统化的,物理的定律定理也是如此,它们经历了一个从独立发现到形成完整体系的过程。从伽利略的实验到牛顿三大定律,从库仑定律、安培定律到麦克斯韦方程,都是经过了几代物理学家们的不懈努力,包含了他们的智慧,从散碎的知识点归纳总结成系统理论。现在呈现在我们面前的基础物理学

收稿日期: 2021-11-23; 修回日期: 2022-02-27

基金项目: 教育部第二批新工科研究与实践项目(E-SXWLHXLX20202605)。

作者简介: 李祖斌,男,教授,主要从事基础物理教学和微纳光学研究工作, zbli@nankai.edu.cn。

引文格式: 李祖斌,赵欣,宋峰. 大学物理中的逻辑与方法——以落绳问题为例[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 15-18.

Cite this article: LI Z B, ZHAO X, SONG F. Logic and method in college physics—Taking rope-falling problem as an example[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 15-18. (in Chinese)

是非常完备的体系,无论是力学还是其他。而这样一个系统化的过程,最关键的就是其中的逻辑脉络,对于力学来说这个脉络就是数理逻辑,可以看出数理逻辑对于物理的重要性。而如今的物理学,还在不断经历这种知识的离散化发现、再慢慢系统化的过程,系统化所需要的是一个串联的逻辑,可能不像力学里那么简单,但基本思想是一致的。所以在教授系统化知识的同时,也应讲出其内在的逻辑脉络,让学生注意到物理中深层的逻辑,学习通过逻辑脉络连接、整合知识的方法。

同时,学习科学知识中的逻辑和方法也可以是大学物理课程思政的切入点,符合《高等学校课程思政建设指导纲要》中对理工类课程的要求。大学物理的思政通常以培养学生科学的世界观为切入点。除此之外,课程思政也可以从方法论的角度出发^[1],让学生们学会物理中的基本科学方法,进而应用到自己的学科中甚至生活中。这其中的关键就是物理学发生、发展的脉络和逻辑。

物理学是逻辑性非常强的学科,特别是力学,其内在的逻辑线路就是数理逻辑。以数学方式描述运动,再以数学方法推演运动的方程,得到的新结论就成为了力学的新定理,而这些新定理的数学形式再经过物理图像的解释,就扩展了力学的内容。以质点动力学为例,从牛顿第二定律出发仅仅通过数学的推演就可以得到质心运动定理、动量定理及动量守恒定理、动能定理及动能守恒定理、角动量定理及角动量守恒定律。可以说质点动力学都是建立在同样的基础上的。

在讲授力学的时候,我们可以将其中的数理逻辑展现给学生,让学生理解到物理之中的这种逻辑和方法,了解到力学中质点和质点系统动力学是如何构建的。与此同时,可以结合适当的例题具体解释分析质点和质点系动力学中的逻辑脉络。下面我们以落绳问题的多种解法为例,讨论其中的内在数理逻辑,探讨其中的关键。

1 落绳问题

大学物理的授课中,柔软细绳(或柔软链条)的下落问题经常作为例题讲解质点系统的动量定理,在多种教材中都有使用。例如在我校大学物理课程使用的教材《大学物理学基础教程(上册)》^[2]中就有采用,题目如下:

一条线密度为 ρ 的柔软细绳竖直悬挂着,开始时,绳的下端刚好接触桌面并处于静止状态。放开绳上端,让它自由地落到桌子上,求下落过程中桌面支撑力的大小。

“柔软”是本题中的简化假设,它说明绳的微元间不是弹性张力,下落时整体加速度为 g ,各微元具有相同的加速度 g ,微元间张力为零。

除了书中给出的用质点系统的动量定理的解法,这道题目其实可以有多种解法,在多篇文献中也有讨论^[3-5]。下面我们分别用质心运动定理、质点的动量定理、质点系统的动量定理、质点系统动能定理分别求解这道题目。如图 1 所示构建坐标,设柔绳长 l ,质量 m ,在某一时刻 t ,柔绳下落了距离 x ,下落速度为 v 。

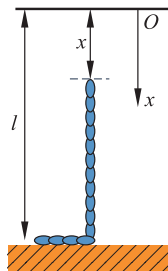


图 1 柔软细绳的下落问题

1.1 质心运动定理

将柔绳整体看作质点系统,系统的运动满足质心运动定理。柔绳受到的外力包括重力和桌面的支撑力。列出质心的动力学方程

$$mg + N = ma_c \quad (1)$$

由质心定义可知质心坐标

$$x_c = \frac{\rho x l + \rho(l-x)\left(\frac{l-x}{2} + x\right)}{m} = x + \frac{l^2 - x^2}{2l} \quad (2)$$

因为柔绳做自由落体运动,所以 $x = gt^2/2$,则

$$x_c = \frac{1}{2}gt^2 + \frac{l}{2} - \frac{g^2 t^4}{8l} \quad (3)$$

进一步

$$a_c = \frac{d^2 x_c}{dt^2} = g - \frac{3g^2 t^2}{2l} = g - \frac{3xg}{l} \quad (4)$$

桌面支撑力为

$$\begin{aligned} N &= -mg + ma_c \\ &= -mg + mg - \frac{3mxg}{l} = -3\rho xg \end{aligned} \quad (5)$$

1.2 质点的动量定理

设 t 时刻已有 x 长的柔绳落至桌面,随后的

dt 时间内将有质量 ρdx 的柔绳微元以速率 v 碰到桌面而停止,此微元动量的变化率为

$$\frac{dp}{dt} = \frac{0 - \rho dx \cdot v}{dt} \quad (6)$$

根据质点的动量定理

$$N' = \frac{dp}{dt} = -\rho v^2 \quad (7)$$

其中, N' 为桌面对柔绳微元的冲力,因自由落体有 $v^2 = 2gx$, 则

$$\begin{aligned} N &= N' - \rho xg = -\rho v^2 - \rho xg \\ &= -\rho 2gx - \rho xg = -3\rho xg \end{aligned} \quad (8)$$

1.3 质点系统的动量定理

将整个柔绳看作质点系统,系统所受外力为重力和桌面的支撑力,通过系统的动量定理来求解决问题。考虑到自由落体中, $x = gt^2/2$, $v = gt$, 系统总动量为

$$p = \rho(l-x)v = \rho\left(l - \frac{1}{2}gt^2\right)gt \quad (9)$$

根据质点系统的动量定理

$$N + mg = \frac{dp}{dt} = \rho lg - \frac{3}{2}\rho g^2 t^2 = mg - 3\rho xg \quad (10)$$

$$N = -3\rho xg \quad (11)$$

也可以将未落下的柔绳看作质点系统,系统所受外力为重力和桌面的冲力 N' (不包括对已落到桌面部分绳的支撑力),此时系统质量发生变化。系统总动量时间变化率为

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{dm}{dt}v + m \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

由于损失质量损失的动量

$$\frac{dm}{dt}v = \frac{\rho d(l-x)}{dt}v = \frac{-\rho dx}{dt}v = -\rho v^2 \quad (13)$$

由于整体向下运动增加的动量

$$m \frac{dv}{dt} = mg = \rho(l-x)g \quad (14)$$

由质点系统动量定理

$$N' + \rho(l-x)g = \frac{dp}{dt} = -\rho v^2 + \rho(l-x)g \quad (15)$$

$$N' = -\rho v^2 = -2\rho xg \quad (16)$$

$$N = N' - \rho xg = -3\rho xg \quad (17)$$

1.4 质点系统的动能定理

将柔绳看作质点系统,系统所受外力为重力和桌面的支撑力,因为绳中微元间无相对位移,内

力做功为零。可运用系统的动能定理求解。

dt 时间后速度变为 $(v + dv)$, 系统总动能的变化为

$$dE_k = \frac{1}{2}(m_{l-x} - dm)(v + dv)^2 - \frac{1}{2}m_{l-x}v^2 \quad (18)$$

展开略去二阶小量

$$\begin{aligned} dE_k &= m_{l-x}v dv - \frac{1}{2}v^2 dm \\ &= \rho(l-x)v g dt - \frac{1}{2}v^2 \rho dx \end{aligned} \quad (19)$$

根据动能定理 $dW = dE_k$

$$(mg + N')dx = \rho(l-x)v g dt - \frac{1}{2}v^2 \rho dx \quad (20)$$

$$mg + N' = \rho(l-x)g - \frac{1}{2}v^2 \rho \quad (21)$$

$$N' = -2\rho xg \quad (22)$$

$$N = N' - \rho xg = -3\rho xg \quad (23)$$

2 落绳问题中的物理逻辑

这道题目的多种解法,针对不同的对象(质点或质点系统),采用了不同的定理,都能给出答案。其实殊途同归,多种解法的本质在于所运用的定理都是来自于牛顿第二定律。无论质心运动定理、动量定理还是动能定理,都是从牛顿第二定律出发,以数学推导得到,所以它们本质上都是一样的。只不过运用推导后的定理,相当于省略了中间的步骤,从不同的状态量出发解题,让题目变得简化了。而这里面就蕴含了物理的最基本的逻辑与方法,即演绎法。也就是通过数学推演的方法,从已知的定理定律(这里是牛顿第二定律)推演得到新的定理的方法。

在授课中,不应仅仅针对不同的定理,给出题目的解法,更应该阐述其中的数理逻辑,说明物理是一门实验结果与数学描述相结合的科学,其中的逻辑线就是数理逻辑。而这正是构建物理学理论体系的最基本的逻辑脉络,是沿着“物理现象的数学表达→数学推演→新结论→数学表达的物理图像”的路线构建的。

大学物理中,力学的逻辑线路是非常清晰的,从基本的运动要素(位矢、速度、加速度等)的数学定义,到牛顿三定律。然后以牛顿定律为基础,运

用数学推演,以力的时间积累给出冲量概念,得到动量定理;以力的空间积累定义功,得到动能定理;以力矩的作用,得到角动量定理;再由质点扩展到质点系统。其内在的逻辑脉络非常清晰,而落绳问题的多种解法正体现了这种内在的逻辑,是非常适合作为例子讲授给学生的。

3 课程思政的融入

在《高等学校课程思政建设指导纲要》中,在第五条“结合专业特点分类推进课程思政建设”中提出“理学、工学类专业课程要在课程教学中把马克思主义立场观点方法的教育与科学精神的培养结合起来,提高学生正确认识问题、分析问题和解决问题的能力。理学类专业课程,要注重科学思维方法的训练和科学伦理的教育,培养学生探索未知、追求真理、勇攀科学高峰的责任感和使命感。”所以,大学物理的课程思政不仅要从树立学生科学的世界观入手,同时也应该从培养学生物理思维、提高学生分析问题解决问题入手,这里物理的逻辑与方法就应该是关键。

在大学物理的授课中,增加关于物理逻辑与方法的讲解,可以让学生逐步理解和掌握物理的逻辑和思想,这不仅有利于学生掌握所学的知识,也可以让学生学习到物理的最基本的演绎方法,了解物理和科学在构建过程中数学起到的关键作用,更进一步可以将这种逻辑和方法运用到其他学科的学习和将来的工作中,逐步建立起自己的科学的世界观。

我们认为,学习的过程也有其自身的脉络,是沿着“知识点→逻辑→方法论→世界观”的路线进行的。我们这里想讨论的就是从知识到逻辑和方法的这一步骤。这一步,是非常关键的连接步骤,是通过学习知识掌握科学的逻辑和方法的重要阶段。但这一部分往往是大学教学中很少直接展现的。这是专业课教师应该重视的教学内容,是当代大学生应该学习和掌握的一种能力。

4 讨论

大学物理中除了力学,其他的课程也有其内在的逻辑脉络,可以结合自身的特色,引导学生发现其中的逻辑脉络,串联知识点,学会其中的逻辑

方法。比如电磁学,就是一种从实验总结规律、从场的角度出发推演出麦克斯韦方程,电、磁相互类比构建的逻辑线路。再如狭义相对论,是从基本假设出发,用数学推演出结论,再由实验验证理论的逻辑线路。在物理学中,不同的逻辑脉络代表了不同的物理方法,也有着各自的特点和适用范围。在授课中可以结合物理学不同部分的特色,讲授其中的逻辑和方法,让学生们有更深入的学习和体会。

除了授课之外,如何运用所学的物理的逻辑与方法分析和解决具体的问题,可以针对具体问题给学生布置针对性的锻炼。这是我们下一步要尝试的内容,还需要更多的实践。

当今社会是一个信息的社会,人们每天接触到的知识、信息都是海量的数据。但这些知识却是离散的,如何将知识串联起来,形成新的理念,产生有益的创新,其中的内在逻辑脉络就是最为重要的。抛砖引玉,希望我们的想法也能给其他课程、其他学科的授课以启发。

参 考 文 献

- [1] 吕斌,陈乃波,高凡,等. 大学物理方法论教学的思政探索[J]. 物理与工程, 2021, 31(Z1): 121-124.
LV B, CHEN N B, GAO F, et al. Exploration of ideological and political in college physics courses by methodology education[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(Z1): 121-124. (in Chinese)
- [2] 张小兵,宋峰,吴雪. 大学物理学基础教程(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 54-55.
- [3] 杨春艳,吉恒,何永进. 对一道柔绳下落问题的探讨[J]. 物理教师, 2013, 34(10): 62.
YANG C Y, JI H, HE Y J. A discussion about a soft rope dropping problem[J]. Physics Teacher, 2013, 34(10): 62. (in Chinese)
- [4] 赵坚,李力. 质心运动定理与柔绳问题[J]. 物理教师, 2010, 31(6): 64-65.
ZHAO J, LI L. Centroid motion theorem and soft rope problem[J]. Physics Teacher, 2010, 31(6): 64-65. (in Chinese)
- [5] 路峻岭,秦联华,任乃敬. 关于柔软细绳运动问题中加速度奇点的讨论[J]. 大学物理, 2016, 35(12): 7-12.
LU J L, QIN L H, REN N J. A discussion about the acceleration strange point in some questions of soft and thin cords' movement[J]. College Physics, 2016, 35(12): 7-12. (in Chinese)