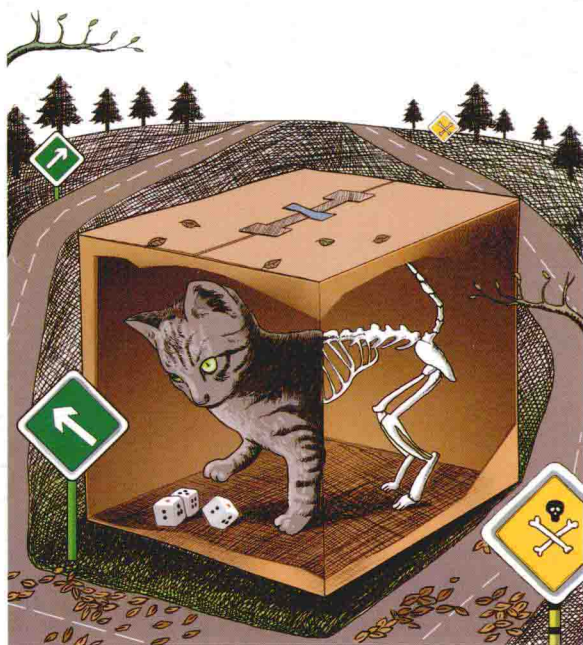


理工科大学生素质教育“教科书”

一本值得伴随大学四年的手边书，因为批判性思维是高等教育的精髓，
不时品味它，你将感悟科学的真谛并发现自己的短板，
实现从感性思维向理性思维的跃升。



格物致理

批判性科学思维

THE CRITICAL THINKING IN SCIENCE

包景东 编著



科学出版社

格物致理

批判性科学思维

THE CRITICAL THINKING IN SCIENCE

包景东 编著

科学出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

格物致理·批判性科学思维/包景东编著. —北京: 科学出版社, 2014.6
ISBN 978-7-03-040967-6

I. ①格… II. ①包… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 121960 号

责任编辑: 王胡权 昌盛/责任校对: 韩 杨

责任印制: 阎 磊/封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2014 年 6 月第一次印刷 印张: 18

字数: 241 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

“(但)理论思维仅仅是一种天赋能力。这种能力必须加以发展和锻炼，而为了进行这种锻炼，除了学习以往的哲学，直到现在还没有别的手段。……一个民族想要站在科学的最高峰，就一刻也不能没有理论思维。”

——恩格斯^①

教育部高等学校物理学本科指导性专业规范对人才培养提出了“素质、能力和知识”三个基本要求，其中在创新能力方面，首次强调了培养学生应具备“批判性思维能力”。通常的本科教学流程是：教师在课堂上讲授“正确的知识”，学生在课后做“正确的练习”，但缺乏批判性思维能力的训练。批判性思维指的是能抓住要领，善于质疑辨析，基于严格推断，富于机智灵气、清晰敏捷的思维。在现代社会，批判性思维被普遍确立为教育特别是高等教育的目标之一。

^① 《马克思恩格斯选集》第3卷，第465-467页，人民出版社，1972年。



对于理工科课程来说，它们信息丰富、逻辑严谨、难度较大，包含了批判性思维的几个核心要素：解读、分析、评价、推理等。批判性思维首先要借助“解读”来澄清观点，祛除表述的模糊性，对问题的歧义进行澄清；然后是对理由和论断的“分析”，在语境中找出潜在的理由，在论断中发现隐含的观点；“评价”是批判性思维能力至关重要的一个环节，因为人们常常接触大量无理由的论断或者不可能要求对方作出说明的事情。毫无疑问，在理工科教学中加强本科生的批判性思维能力的训练，尤其是新生一踏入大学校门，就让他们接触这种思维模式，这对提高教学质量、培养创新型人才大有裨益。

旷世天才理查德·费曼 (Richard Phillips Feynman, 1918—1988) 以其特有的风格纵横捭阖，他身上所散发的人格魅力依然有其现实意义，这就是：科学的怀疑精神、做事的求实态度和区分真善的能力。无独有偶，美国物理学家卡尔·韦曼 (Carl Edwin Wieman, 1951—) 由于玻色-爱因斯坦凝聚的研究成果获得2001年诺贝尔物理学奖后，把研究领域转向理科教育。他将理科教育比喻成运动竞技教练员的工作：“如果想让谁成为一个伟大的足球选手，就应该多积累在足球场上的实际经验。但同时，教练员必须要经常到场，了解运动员正在做什么，要指导运动员应该怎样做才能做得更好，怎样才能使选手进行更好地训练。在知识领域道理也是一样，为了实现更好的理科教育必须要这样做。”他将理想的理科教育归结为三点：第一，使学生建立明确的学习动机；第二，必须让学生对所学的问题进行深入的思考，为学生提供他们能够坚持不懈地深入思考的有价值的科学问题；第三，不能期望他们自己解决所有的问题，要定期检查他们在考虑什么，为他们提供一种能够支持和引导他们进步的反馈意见。

秉承纠正错误比灌输真理更使人深刻的理念，采取将知识融于问题之中，剖析错误产生原因的方法，希望藉此来回答“学生到底学到了什么？”之问，把他们的兴趣引向所学的课程及科学之中。

让我们仰望科学的天空，处处闪烁着智慧的光芒！那些物理学大师的名字铭记在心：牛顿、麦克斯韦、玻尔兹曼、拉普拉斯、爱因斯坦、玻尔、费曼、温伯格、杨振宁……

学习自然科学，不仅仅需要方法论，还需要有一点世界观；不仅仅需要数学，还需要一点哲学。正如王安石在《读史》中所写的那样：“糟粕所传非粹美，丹青难写是精神。”

本书名的前缀为格物致理，其中“格物”意思是探究事物的道理，“致理”意思是达到明白事理并加以运用。合并起来就是：探究事物的原理法则，而总结为理性知识并加以运用。这里，“格致”还和“物理学”有一段渊源故事呢。现在我们所采用“物理学”作为 physics 的汉译名，其始于 1900 年出版的藤田丰八从日文翻译的《物理学》。他采用汉字“物理学”作为 physics 的译名。藤田丰八原拟用“格致”作为中文版的名称，参与翻译的王季烈认为原书名很好，未改。自此物理学这一名称通行全国。1898 年的京师大学堂章程中使用的还是“格致”，在 1902 年的新章程中即改为“物理学”。^①

在理工科教学中引入批判性思维能力训练是一个新生事物，作者虽然努力工作，但难免有叙述和取材不当之处，希请广大读者批评指正。

本书得到北京市教育委员会“高等学校教学名师”共建项目的资助，谨致谢忱。

包景东

2014 年 4 月

于北京师范大学

^① 赵凯华. 百年北大物理前五十年回溯 [J]. 物理, 42(9): 613-630, 2013

目 录

前言

第1章 批判性思维//1

- 1.1 思维的种类//2
- 1.2 逻辑学的基本概念//13
- 1.3 客观、美学和想象力//25
- 1.4 认识批判性思维//34
- 1.5 基本技能和态度//36
- 1.6 学术范畴的批判性思维//39
- 1.7 运用批判性思维的障碍//41
- 1.8 批判性阅读、做笔记及写作//43

第2章 论辩、悖论和博弈//48

- 2.1 什么是论辩？//49
- 2.2 论辩的特征和识别//54
- 2.3 认识悖论//56
- 2.4 从经典到量子悖论//61
- 2.5 博弈论//65

第3章 科学家如何运用批判性思维//72

- 3.1 科学发现始于问题//73
- 3.2 物理定律的本性//76



- 3.3 牛顿的批判性思维之路// 78
- 3.4 爱因斯坦的突破性// 80
- 3.5 费曼风格// 84
- 3.6 霍金喜欢打赌// 88
- 3.7 杨振宁“兴趣—准备—突破”三部曲// 90
- 3.8 科学方法贴近教育// 91

第4章 批判性思维在科学事件中的作用// 95

- 4.1 自然法则胜过基本假设// 96
- 4.2 模型在于解释自然而不是赋予自然// 102
- 4.3 物理学中的意外实验// 105
- 4.4 不存在与图像或理论无关的实在// 106
- 4.5 科学的诡辩：电子双缝实验// 108
- 4.6 实在问题：EPR 佯谬和贝尔不等式// 115
- 4.7 量子力学给人类社会带来巨大影响// 120
- 4.8 共振：粒子是如何探测出来的？// 126

第5章 让逻辑纠正错觉// 130

- 5.1 力学和它的黄金律则// 131
- 5.2 混沌破灭了拉普拉斯梦想// 134
- 5.3 质量是什么？// 137
- 5.4 大尺度力学效应// 140
- 5.5 和谐的力学世界// 148

第6章 “不可能性”体现正面价值// 153

- 6.1 能量转换与守恒// 154
- 6.2 可逆与不可逆过程// 159
- 6.3 猜测与推理并举// 166
- 6.4 热力学时间之箭// 170
- 6.5 无处不在的熵变// 175

第 7 章 连接微观和宏观世界的桥梁// 181

- 7.1 从“砸蛋中奖”谈起// 182
- 7.2 用微观状态解释宏观现象// 188
- 7.3 经典和量子的分界线// 196
- 7.4 当代科学方法论// 198

第 8 章 思维能力训练// 209

- 8.1 需关注的问题// 210
- 8.2 力学// 214
- 8.3 热学与热力学// 238
- 8.4* 统计物理学// 259

最后的话// 277



第1章 批判性思维

两位中世纪思想家如是说：“我疑故我知”（安塞姆）；
“我思故我在”（笛卡儿）。

一位旅居北美的华裔学者比较了他在国内念本科生、国外读研究生的经历，写下了如下一段文字^①：

在国内做学生时，我经常看到书里说，认识、实践和继承前人的经验传统的过程，就是“去伪存真、去粗取精、由此及彼”的过程。但是，到底怎么去进行这些工作呢？直到在英国和加拿大的研究生课堂上，我才不断地、而且是痛苦地体会到自己缺乏的东西：对思想和论证的合理分辨、解释、挖掘和扩展的能力。在聆听西方同学们的分析发言时，我坐在那里，不知怎么提出合适的问题、有新意的推断、有根据的反驳，……多半时间里我只是一个讨论班上的听众，对讨论的主题没有贡献。

① [加]董毓. 批判性思维原理和方法——走向新的认识和实践. 北京：高等教育出版社，2012.



这个故事表明，缺乏认知发展和批判性思维基本功训练的学生们，在开放、求真和反思的面前会显得无力和迷茫。那么，什么是批判性思维？我们如何养成批判性思维能力？让我们就此在科学的世界里开始充满奇趣和挑战的批判性思维之旅吧！

1.1 思维的种类

现在你正在思考。想一想，准确地说，你现在正做什么？当你思考之时你大脑中正在发生什么？与我们的的大脑比较起来，我们对于宇宙基本规律、原子核以及我们身体的认知要多得多。牛顿给出了连接地球和星体的万有引力定律，爱因斯坦给出了质能公式，沃森和克里克破解了基因遗传密码，但是大脑的模型至今还没有真正建立起来。

如果未来的十年里我们没有获取新思想，生活会怎样呢？我们对于夸克和纳米技术作何感想呢？我们如何与他人谈话呢？当然了，思想是积累的，我们伴随着思考成长，并因此而改变我们将来之思考能力。

简言之，思维就是思考。思维的重要性、核心性是通过思维活动将听、看、读的输入信息转换成说、做、写的输出结果。

一、批判性思维

“批判的”(critical) 源于希腊文 kriticos(提问、理解某物的意义和有能力分析，即“辩明或判断的能力”) 和 kriterion(标准)。从语源上说，该词意味着发展“基于标准的有辨识力的判断”。人们常以赞美的态度使用“批判性思维”一语，因为这个命名要求我们坚持不懈地聚焦于重要问题，客观地遵循引导我们走向答案的理由和证据。批判性思维的渊源可追溯到古希腊苏格拉底所倡导的一种探究性质疑，即“助产术”：

在关于某种道德品质的本性或美德本质的会话中，一个问题出现了。苏格拉底表露对这个问题的迷惑或无知，而他的朋友用一个说明来帮助他。这个说明变成一个论题。面对苏格拉底的诘问审查，这位朋友不得不对该论题

加以辩护。在回应者进行某种初步的说明之后，苏格拉底提出一连串的问题，初看起来这些问题似乎并不直接对那个说明有什么影响，而回应者几乎总是要对这些问题给予“是”或“否”的回答。这种盘问是苏格拉底反驳的核心。最终，苏格拉底归纳出他的朋友在回答这些问题的过程中所承认的东西，而这一归纳的结果与他的朋友先前所提出的那个说明是矛盾的。结果，那个说明现在要被修改或放弃。然后，更多这样的说明做类似的尝试，最终被修改或抛弃。

可以看出，苏格拉底方法的实质是：通过质疑通常的信念和解释，辨析它们中的哪些缺乏证据或理性基础，强调思维的清晰性和一致性。这一事例体现了批判性思维的精神，因此苏格拉底被尊为批判性思维的化身。

对于批判性思维，我们或多或少都有所接触。大多数的日常活动都会用到批判性思维的一些基本技巧，比如：判断我们的所见所闻是否可信；采取措施去探究某一个事物是真是假；当有人不相信我们时，为自己辩护。因此，“批判性思维是智力的训练过程”。

虽然我们具有批判性思维，却未必一直都在使用，也未必用得很好。不过这很正常，因为我们不需要用同等的批判性思维来处理每一件事情。但是，想在大多数的职业中取得成功，良好的批判性思维是必不可少的。每一阶段的学习也需要更深层次的批判性分析，以便分析所见、所闻、所为，拥有更加清晰的思路，更好地进行论辩，解读新的情况和事件。

二、创造性思维

说到创新，就不可避免地考虑创造性思维，进而思考创造性思维和批判性思维的密切关系。创造性思维是能引发新的和加以改进的解决问题的方法的思维方式。创造性思维引发新观点的产生，批判性思维是对所提供问题的解决方法进行检测，以保证其有效性的思维方式。这两种思维方式对有效解决问题都是必要的。

但是，人们对批判性思维存在以下几种误解。一种误解是，有人认为批判性思维是否定的，即本质上是发现缺陷。然而，一个批判性思维者不仅仅是



质疑判断，这是因为质疑、判断是为了寻求理由或确保正当性，为我们的信念和行为进行理性奠基。故批判性思维也是建设性的。批判性思维使人们意识到自己所在的世界中的价值、行为和社会结构的多样性。人们还以为，批判性思维作为一种控制的手段在起作用，是有害的、应避免的东西。其实，批判性思维是个人自治的基础。还有一种误解是，批判性思维并不包括或鼓励创造性。这可能源于一个错误观念：创造性本质上是打破规则，但是，恰恰相反，创造性常常包括大量对规则的遵循。一个原创的洞察力恰恰需要知道如何在给定的情景中解释和应用规则。现在科学工作者将取得原始创新性成果作为重要期盼。人的生活要求创造性思维和批判性思维的平衡发展。

举例1.1 水的浮力

阿基米德在洗澡时，见到水从浴盆溢出的情景而突发灵感，兴奋不已，以至于裸体跑到街上大呼“找到了！”但是，当身体浸入水中时，上升水位部分的水与排出的水重量一样，之所以使阿基米德或其他人深信不疑，原因是它可以通过实验加以检验。批判性思维需要一些标准来判断想法的实用性。

三、科学思维

科学与其说是一种知识体系，不如说是一种思维方式。很少有哪天我们听不到在医学、信息、航天、物理学等领域又有了新的发现。科学方法成为我们理解物质世界和社会心理世界的工具，而知识爆炸日益加剧了对这种方法的依赖。科学方法往往是通过四个主要阶段向前运行的一种归纳思维类型：

- ① 观察；② 构思假说；③ 实验法；④ 确证。



举例1.2 地球引力对落体的影响

伽利略在研究地球引力对落体的影响时就采用过这四个阶段。首先,伽利略观察物体下落的时间越久,速度就越快;随后,他构想了一个假说:落体的速度以一个常量的加速度增加;再后,他的实验(图1.1)就是让一些球沿着一个斜面滑下,测量球不同点的速度大小;最后,他试图通过分析实验结果确证他的假设,而实验结果也恰恰表明这些球的速度以重力加速度增加,和他原来的假设是一致的。为了进一步确证他的结果,伽利略和其他人多次进行了实验。

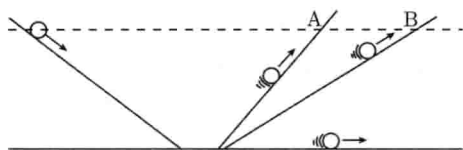


图 1.1 导致伽利略产生惯性概念的滚动小球沿斜面运动的实验

科学的世界是经验的世界、观察的世界。为了应用科学方法,科学家必须能够做好观察和测量。因此,科学研究中的所有变量必须由可观察、可测量的术语界定。通过给变量以这种操作型定义,我们就能够向他人清楚地表明这些变量是什么。以及观察或测量如何显示它们的存在。物理学家必须确定从一个原子核裂变中产生的物理踪迹表明了什么或者定义某些原子微粒。宇航员必须以能够识别的方式界定一个黑色洞口(当它出现在他们对深层空间的观察时)。同样,心理学家也必须以可测量和观察的方式界定这些变量,如爱、沮丧和压力。总之,没有一个操作型定义,就无法应用科学方法。

下面举几个最基本的物理量的操作型定义。

(1) 时间的计量:以铯-133原子基态的两个超精细能级间跃迁相对应的辐射的9192631770个周期的持续时间作为1秒。这种定义的好处是:原子从一个能级跃迁至另一个能级发出或吸收的电磁波的频率很稳定,利用其振荡次数可计量时间。当人们感慨“时间哪儿去了?”就是希望对时间给以某种操作型定义。



(2) 长度的计量: 1983 年, 第 17 届国际计量大会规定米的新定义: 1 米等于光在真空中传播 $1/299\,792\,458$ 秒时间间隔内所经路径的长度。这样规定有几点好处: 激光的频率和波长非常稳定, 激光的测量技术满足米定义的精度要求; 为保持真空中光速不变, 1975 年第 15 届国际计量大会推荐的光速为: $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$, 米的定义恰好与此推荐协调一致。

(3) 原子质量单位: 符号“u”, 它为碳的同位素 ^{12}C 原子质量的 $1/12$,

$$1\text{ u} = 1.660\,565 \times 10^{-27}\text{ kg} \approx 1.66 \times 10^{-27}\text{ kg}.$$

巴黎国际计量局中的铂铱合金千克原器为标准物体, 规定其质量为 $m_0 = 1\text{ kg}$ (千克)。

(4) 惯性质量: 质量本质上是物体惯性的量度, 下面利用气桌动量守恒实验来定义质量。

图 1.2 左边表示气桌, 它包括平台和滑块, 在平台上铺上白纸, 两滑块置于其上, 滑块内装有电池。它一方面驱动薄膜泵向下喷气形成气垫使得滑块浮于台面上以避免干摩擦; 另一方面则等时间间隔地利用高压放电在滑块下面中心处打火花, 在纸上形成斑点, 见图 1.2 右图。当滑块沿水平方向运动时, 可通过处于一直线上相邻斑点距离相等, 证明滑块做匀速直线运动; 测量相邻斑点的距离以确定滑块速率, 斑点排列方位给出运动方向。令滑块 1 和滑块 2 以某初速度运动并碰撞, 测出两滑块速度改变量 Δv_1 和 Δv_2 。改变滑块初速度反复实验多次, 发现各次 Δv_1 和 Δv_2 虽然不同, 但总有

$$\Delta v_2 = -\alpha \Delta v_1, \quad \alpha = |\Delta v_2|/|\Delta v_1|,$$

其中 α 为常数。取其他滑块反复实验多次, 仍有上式成立, 只是 α 取值不同, α 与两滑块有关。

取一个已知质量 m_0 的标准物体与待测质量为 m 的物体相碰撞, 用 Δv_0 和 Δv 分别表示标准物体与某物体速度的改变量, 将两物体的 α 记作 m/m_0 , 有

$$m = m_0 |\Delta v_0|/|\Delta v| \text{ kg}.$$

这就是某物体质量的操作型定义，它把定义质量单位后经实验测出的 m 叫做质量。

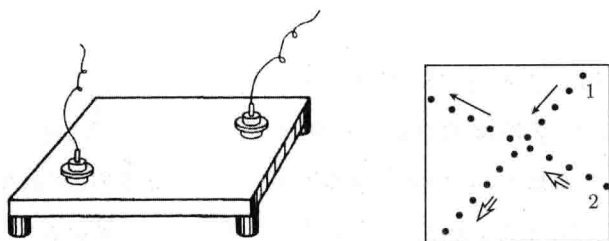


图 1.2 左：气桌实验的喷气滑块在平台上；右：电火花在平台纸面上留下斑点

现在，物质的多少用物质的量来说明，在国际单位制 (SI) 中，物质的量的单位为 mol(摩尔)。可见物质多少和惯性质量已不是同种概念。表 1.1 列出了七个 SI 基本单位，它们是相互独立最重要的基本物理量的单位，是所有单位的基础。

表 1.1 SI 基本单位制

量的名称	单位名称	单位符号	定义
长度	米	m	米是光在真空中 $(1/299\,792\,458)\text{s}$ 时间间隔内所经过路程的长度
质量	千克	kg	千克等于国际千克原器的质量
时间	秒	s	秒是铯 -133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间
电流	安培	A	安培是在真空中，截面积可忽略的两根相距 1 米的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时，若导线间相互作用力在每米长度上为 $2 \times 10^{-7}\text{N}$ ，则每根导线中的电流为 1A
热力学温度	开尔文	K	开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$
物质的量	摩尔	mol	摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的是基本单元数与 0.012kg 碳 -12 的原子数目相等。在使用摩尔时，基本单元应予指明，可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子，或是这些粒子的特定组合
发光强度	坎德拉	cd	坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $1/688\text{W/sr}$



四、逻辑思维

什么是逻辑？逻辑是研究推理的学科，通俗地说，逻辑可以说是思想的计算。

推理的理论和方法本身，是逻辑之术。逻辑学的价值不限于其术，逻辑体现分析理性，这是科学精神的基础。批判性思维不限于逻辑思维，但其核心部分是逻辑思维。作为批判性思维的逻辑思维，或作为逻辑思维的批判性思维，就是人们的日常逻辑思维。这方面的能力，就是逻辑思维素养。

有一种趣题，国外人称为 puzzle(智力趣题)；另有一种趣题，国内人称为“脑筋急转弯”。这是两种不同类型的趣题。前者训练与测试批判性思维能力，而“脑筋急转弯”从某种角度看也许有利于启发思维的灵活性与想象力，但它本质上不诉诸或测试逻辑思维能力。有些“脑筋急转弯”的趣味效应，恰恰建立在思考者的逻辑含混与疏漏之上。

“脑筋急转弯”所转的那道弯儿，与批判性思维无关！

以下是一个歧义问题，是一道典型的“脑筋急转弯”题。

脑筋急转弯：1+1 $\neq$ 2

提问：在什么情况下，1 加 1 不等于 2？

回答 1：1 加 1 在任何情况下都等于 2。

回答 2：1 加 1 在算错的情况下不等于 2。

回答 3：在矢量合成情况下，两个不在同一方向上的单位矢量之和等于长度不大于 2 的矢量。

回答 4：1 加 1 可以大于 2。

第一个人固执己见，他的脑筋未转弯；第二个回答人是投机主义者，他可以对类似问题都给出无错的答案，将被出题者判为优胜，但这样的回答无任何信息量；第三个回答者运用了批判性思维，建立了一个比出题者的思维还深入