

力学

LI XUE DE LI LIANG
HE SHI MING

的



使命

和

力量

— 兼作技术科学类专业理想教育简明教材

崔京浩 编著



中国建筑工业出版社

力学的力量和使命

——兼作技术科学类专业理想教育简明教材

崔京浩 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

力学的力量和使命——兼作技术科学类专业理想教育简明教材 / 崔京浩编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011.4
ISBN 978-7-112-13070-2

I. ①力… II. ①崔… III. ①力学—普及读物
IV. ①03-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第049944号

本书介绍力学在基础学科和工程技术发展中的重大作用, 内容包括力学引领物理学和基础学科的发展; 力学在中国及其与国民经济关系; 中华民族的伟大复兴离不开力学; 力学是保持二次反击力量的重要学科; 结论; 附录(宇宙、银河系、恒星、太阳系、地球; 粒子、电子、等离子; 引力、场、引力场及黑洞; 绝对时空观的否定; 原子、原子核、核裂变、核聚变、核电站)。

* * *

责任编辑: 常燕

力学的力量和使命 ——兼作技术科学类专业理想教育简明教材

崔京浩 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京方舟正佳图文设计有限公司制版
北京京丰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 7 3/8 字数: 179千字
2011年9月第一版 2011年9月第一次印刷
定价: 26.00元
ISBN 978-7-112-13070-2
(20480)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

序

清华大学土木工程系崔京浩教授编著的《力学的力量和使命》，较全面地讨论了力学在物理学和基础学科发展中的引领作用、力学在我国的发展及其与国民经济的关系、力学在中华民族伟大复兴进程中的支撑作用、力学是保持二次反击力量的重要学科，在这些方面均做了详尽地阐述。

崔京浩先生于 1964 年清华大学结构力学专业研究生毕业获副博士学位，毕业后留校任教。曾任清华土木系副主任、学术委员会副主任以及中国力学学会理事、中国消防协会常务理事、《工程力学》主编等社会兼职。崔先生长期从事结构力学、岩土力学、地下工程、防灾减灾等方面的教学和科研工作，承担多项国家科委和国家自然科学基金委重点科研项目，取得了丰硕的科研成果。

作为清华大学土木工程系的学术前辈，崔先生学术功底尤其是力学功底深厚，专业知识宽广，学术视野开阔，学术思想活跃，工程意识强劲，长期致力于力学与工程的完美结合并取得了显著的成果。早在 20 世纪 70 年代初我国第一个水封油库开始设计时，崔先生就用当时尚采用黑色纸带穿孔的较原始的方法对该库进行了围岩应力有限元分析，为油库的设计提供了重要依据。改革开放后又以挪威皇家科学院博士后的身份赴挪威参加一个大型海底气库的力学分析。他还从事过骨骼生物力学的研究并多次应邀为卫生部举办的骨科学术进修班讲学。他的广泛的研究成果在他发表的 200 多篇学术论文和出版的著作中得到了充分体现。

技术学科是一个很大的门类，除力学外还有土木、机械、电力、航空航天、船舶、车辆等。力学在技术学科中起主导作用早已是人们的共识，现代快速发展中的大型复杂工程结构对力学分析计算的依赖程度也越来越高。而崔先生在具体分析计算的同时又十分强调技术工作者要在宏观上把握基本力学概念，用行业术语表述就是设计方案阶段要对整体结构进行全面认真地力学定性分析。以土木工程为例，宏观力学概念的正确应用将直接影响结构的安全性、适用性、经济性、耐久性以及结构的全寿命。

该书从章节的编排到内容的组织和论述以及工程实例的列举都思路清晰，旁征博引，资料翔实，深入浅出，还有一个内容丰富而新颖的附录，有利于扩大读者的知识面及对近代物理（力）学的了解。全书具有较强的启发性、可读性和可参考性。该书的出版，不仅会激发读者对力学的爱好和兴趣，而且会增强读者正确灵活运用力学原理解决工程技术问题的自觉性，使人们进一步感觉到力学在科学技术发展和国民经济建设中的重大作用，对认识力学、理解力学、运用力学以及在力学与工程技术的完美结合等方面会有所裨益。

该书不仅可作为技术科学类专业理想教育的教材，而且也是一本了解力学和技术学科良好的科普读物。

清华大学土木工程系学术委员会

前言

力学是无时无处不在的，一个人从呱呱坠地的那一刻就开始承受地球引力和大气压力且终生都离不开它，离开它甚至会有生命危险。

力学与人类生产乃至生活密不可分，从原始人的筑巢穴居、钻木取火、狩猎抛掷石块的抛物线运动以及工具的发明与运用无一不与力学有关，从这些远古的力学行为可以看出力学对促进人类的成长与进步起着巨大的推动作用，可以毫不夸张地说力学是人类认识世界和改造世界发展最早的一个物理学分支。

随着社会的发展与进步，蒸汽机的发明开启了人们对力学认识上和实践上的深化，一个崭新的工业化与科技进步的时代开始了。受磁铁在磁场中的力学运动产生电磁效应的启迪导致了电的发明，如果说转子在围绕定子旋转这个力学行为就能发电称之为发电机，那么电动机就是这个力学行为的逆运动。

19 世纪经典（牛顿）力学在物理学中率先成熟和完善，它几乎可以解释所有宏观（相对于粒子）和低速（相对于光速）的物理现象，经典力学进入了它的全盛时代，然而随着人们对宇宙认识上的深化，特别是电磁现象以及基本粒子裂变，接近光速的高速运动，使经典力学陷入了困惑，于是一门崭新的物理（力）学——相对论诞生了，它不仅是科技发展的巨大成果，也是人们思维和认识论上的巨大进步，爱因斯坦在创立相对论之后曾说“世界上可能只有 12 个人能够读懂相对论，但世界上却有几十亿人借此明白没有什么什么是绝对的”。

中国 20 世纪 50 年代在钱学森的倡导下把力学归入技术科学的范畴，至今我国的学科划分技术科学中包括：力学、土木、机械、发电、信息等众多的一级学科，其中力学居技术科学之首，这种划分促进了力学对工程技术的指导和主导作用。在刚刚获得解放百业待举、百废待兴的形势下我们能独立自主地较好地实现了“两弹一星”的创举很可能与这种高度重视力学有关。

力学是促进国民经济发展的一门重要且专业覆盖面极广的一级学科，不辱使命，改革开放后充分展示了它的力量，我们可以毫不夸张地说：

- 中华民族的伟大复兴离不开力学
- 中国工业化进程中所有与工程技术有关的建设和发展离不开力学
- 国家的强大和民族的富足离不开力学

力学的力量是强大的，它承载着厚重的使命。



于北京清华园

目 录

前言

1 力学引领物理学和基础学科的发展	001
1.1 经典力学的强势和早熟.....	001
1.1.1 经典力学的发展简史.....	001
1.1.2 经典力学的主要成就.....	002
1.1.3 经典力学适用的范围及其局限性.....	004
1.2 经典力学的飞跃——相对论的诞生.....	005
1.2.1 相对性原理.....	006
1.2.2 狭义相对论.....	009
1.2.3 广义相对论.....	012
1.2.4 三种物理力学的异同列表.....	016
1.3 力学推动基础学科的发展.....	018
 2 力学在中国及其与国民经济关系	023
2.1 近代力学在中国的兴起.....	023
2.1.1 早期微弱的渗入.....	023
2.1.2 洋务运动起了一定的促进作用.....	023
2.1.3 辛亥革命和五四运动推进了中国近代力学的兴起.....	024
2.2 力学在中国的大发展.....	024
2.2.1 社会主义建设需要力学和力学人才.....	025
2.2.2 技术科学促进了力学面向国民经济主战场.....	027
2.3 力学与国民经济的紧密联系.....	027
 3 中华民族的伟大复兴离不开力学	030
3.1 航天、卫星发射和信息技术.....	030
3.1.1 航天与探月.....	030
3.1.2 卫星全球导航系统.....	031
3.1.3 网络化.....	032
3.2 新能源的开发和利用.....	033
3.2.1 核能利用——核电站.....	033
3.2.2 风能和太阳能.....	037
3.3 具有战略意义的重大项目和举措.....	039
3.3.1 南极考察.....	039

3.3.2 青藏铁路.....040

3.3.3 西气东输..... 042

3.3.4 海上采油..... 043

3.3.5 舰船制造业.....045

3.3.6 南水北调.....049

3.3.7 三峡工程..... 051

3.3.8 小浪底水库.....053

3.3.9 大型场馆建筑.....055

3.3.10 高层与超高层建筑.....059

3.3.11 交通运输工程.....065

4 力学是保持二次反击力量的重要学科.....074

4.1 什么是“二次反击力量”074

4.2 近代战争的教训.....074

4.3 加强地下人防工程建设.....076

4.4 大规模三线建设.....078

4.5 战略贮油.....078

4.5.1 战略贮油的重要性.....078

4.5.2 国际石油形势.....079

4.5.3 中国采取的措施.....080

4.5.4 水封油库——一个廉价的贮油方式.....080

5 结论.....083

附录 1 宇宙、银河系、恒星、太阳系、地球.....084

附录 2 粒子、电子、等离子.....095

附录 3 引力、场、引力场及黑洞.....097

附录 4 绝对时空观的否定.....102

附录 5 原子、原子核、核裂变、核聚变、核电站.....106

参考文献.....111

1 力学引领物理学和基础学科的发展^[1~10]

1.1 经典力学的强势和早熟^[1~2]

1.1.1 经典力学的发展简史

经典力学又称牛顿力学，是物理学中发展最早的一个分支，它以牛顿三大运动定律为基础，研究宏观世界和低速状态下物体机械运动规律的科学。这里“宏观”是相对于原子微观粒子而言，“低速”是相对于光速而言的。

机械运动是物质运动最基本的形式。机械运动亦即力学运动，是物质在时间空间中的位置变化，包括移动、转动、流动、变形、振动、波动、扩散等，而平衡或静止则是其中的特殊情况。物质运动还有一些其他运动形式，如热运动、电磁运动、原子及其内部的运动以及化学运动等。

力是物质间的一种相互作用，机械运动静止或运动状态的变化是由这种相互作用引起的。静止和运动状态不变，则意味着各作用力在某种意义上的平衡，因此力学又常被说成是力和运动的科学。

古代人们在生产劳动中就应用了杠杆、螺旋、滑轮、斜面等简单机械，从而促进了静力学的发展。

古希腊，就已形成比重和重心的概念，进而总结出杠杆原理。阿基米德（约公元前287—212）的浮力原理提出于公元前200多年。这些知识尚属力学科学的萌芽，但在力学发展史中占有重要的地位。

16世纪以后，由于航海、战争和工业生产的需要，力学的研究得到了真正的发展。钟表工业促进了匀速运动的理论，水磨机械促进了摩擦和齿轮传动的研究，火炮的运用推动了抛射体的研究。天体运行的观测提供了力学运动最单纯、最直接、最精确的数据资料，使得人们有可能排除空气阻力的干扰得到规律运动的认识。天文学的发展为力学找到了一个最理想的“实验室”——天体。

16世纪，资本主义生产方式开始兴起，海外贸易和对外扩张刺激了航海的发展，引发了对天体进行系统观测的迫切要求。第谷（1546—1601）顺应了这一要求，以毕生精力收集了大量观测数据，为克卜勒（1571—1630）的研究作了准备。克卜勒于1609年和1619年先后提出了行星运动的三条规律，即克卜勒三大行星运动定律。

与此同时，以伽利略（1564—1642）为代表的物理学家对力学开展了广泛研究，得到了自由落体定律。伽利略的两部著作《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》（1632）

和《关于力学和运动两种新科学的对话》(1638)(简称《两种新科学的对话》)为力学的发展奠定了思想基础。

随后,牛顿(1642–1727)把天体的运动规律和地面上的实验研究成果加以综合,建立了牛顿三大运动定律和万有引力定律,形成比较完整的经典力学体系。以后经过伯努利(1700–1782)、拉格朗日(1736–1813)、达朗贝尔(1717–1783)等人的推广和完善,取得了广泛的应用并发展出了流体力学、弹性力学和分析力学等分支。

到了18世纪,经典力学已经相当成熟,成了自然科学特别是物理学的主导和领先学科。

1.1.2 经典力学的主要成就

经典力学的主要成就也就是牛顿运动定律和万有引力定律。

1. 牛顿第一定律

(1) **内容** 物体将保持静止或作匀速直线运动,直到其他物体对它的作用力迫使其改变这种状态为止。牛顿第一定律阐明了物体运动的如下本质规律。

(2) **物体运动的惯性** 由牛顿第一定律可知物体之所以静止或作匀速直线运动是由于物体的本性造成的。这种本性叫做物体运动的惯性。

(3) 惯性的大小可以用“质量”来表示,因而质量也称为物体的惯性质量。在国际单位制中,质量的单位是千克(kg)。物体质量越大,保持原有运动状态的本领越强。

(4) 牛顿第一定律阐明了力是改变运动状态的原因,而不是维持物体运动状态的因素,这是牛顿的一个重大发现。在牛顿之前人们一直认为力是起维持物体运动状态的作用。

2. 牛顿第二定律

(1) **内容** 物体在外力作用下将产生加速度,加速度的大小与合外力的大小成正比,与物体自身的质量成反比,加速度的方向在合外力的方向上。

(2) 第二定律是第一定律在逻辑上的延伸,它进一步定量阐明了物体受到外力作用时运动状态是如何变化的(使物体产生一个加速度)。牛顿第二定律的数学表达式为:

$$F=ma$$

在国际单位制下,力是以牛(N)为单位,加速度以“ m/s^2 ”为单位,质量以“kg”为单位。

上式叫做牛顿运动方程。在牛顿定律的应用中特别要注意的是第二定律中的F是物体所受的合力。

(3) **加速度与力的对应性** 在某些情况下,物体所受的力为恒力,物体具有的加速度

为匀加速度,例如自由落体运动,这时力与加速度都不随时间 t 变化。但是更普遍的情况表现为物体所受的力为变力,力的大小方向都可能发生变化,相应物体的加速度也是变化的,这时物体的加速度与力在时间上应表现为一一对应的关系。

(4) 加速度是描述速度快慢和方向的物理量。速度的变化与这一变化所用时间的比值称为这段时间的“平均加速度”,如果这一时间极短(趋于零),这一比值的极限称为物体在该时刻的加速度或“瞬时加速度”。加速度是矢量,它的方向就是速度变化的极限方向,由于加速度是矢量,牛顿第二定律的运动方程是一个矢量方程。

3. 牛顿第三定律

(1) 内容 物体之间的作用力与反作用力大小相等,方向相反,作用在不同的物体上。

牛顿第三定律在逻辑上是牛顿第一、第二定律的延伸。在第一、第二定律中都使用了力的概念,但什么是力,力有什么特点都没有具体介绍。牛顿第三定律就是来补充力的特点和规律的定律。

(2) 特点 根据牛顿第三定律,我们可以将力定义为:力就是物体间的相互作用。这种相互作用分别叫做作用力与反作用力。从牛顿第三定律我们知道作用力与反作用力之间有如下的特点:

- ① 作用力与反作用力大小相等,方向相反。力线是在同一直线上的。
- ② 作用力与反作用力不能抵消,因为它们是作用在不同物体上的。
- ③ 作用力与反作用力是同时出现同时消失的;作用力与反作用力的类型也是相同的,如果作用力是万有引力,则反作用力也是万有引力。

4. 牛顿万有引力定律

物体间由于质量而引起的相互吸引力,这种力存在于地球万物之间。地面上的物体所受到的地球对它的吸引力就是万有引力。牛顿在开普勒定律和自由落体定律的基础上首先肯定了这样一种吸引力的存在,并确定了质量分别为 m_1 和 m_2 相距为 r 的两质点间引力的大小为:

$$F = Gm_1m_2 / r^2$$

其中 $G = \frac{6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$,称之为引力常数。地面上两物体间的万有引力一般很小,但对质量大的天体这个力就很大。例如地球和太阳之间的引力大约为 $3.56 \times 10^{22} \text{ N}$,这样大的力如果作用在直径9000m的钢柱两端,可以把钢柱拉断。

万有引力定律的发现奠定了天体力学的基础,揭示了天体运行的基本规律,从而解释了极多的地面现象和天体现象,例如哈雷慧星,地球的扁形,……,为20世纪开创的

航天科学和航天事业奠定了基础(详见附录 1)。

5. 归纳

力学或“牛顿力学”，是研究通常尺寸的物体在受力情况下的形变以及速度远低于光速的运动过程的物理学分支。力学是物理学、天文学以及许多工程科学的基础。机械、建筑结构、航天器和船舰等设计都必须以经典力学为基本依据。力学知识最早起源于对自然现象的观察和生产劳动中的经验。牛顿运动定律的建立标志着力学开始成为一门科学。力学可粗分为静力学、运动学和动力学三部分，静力学研究力或物体的静止问题，运动学只考虑物体怎样运动，动力学讨论物体运动和所受力的关系。

1.1.3 经典力学适用的范围及其局限性

1. 牛顿运动定律适用于质点

牛顿运动定律中的“物体”是指质点，或者说它只有针对质点才成立。如果一个物体的大小形状在讨论问题时不能够忽略不计，可以将该物体处理为由许许多多质点构成的质点系统(简称为“质点系”)。且质点系中每一个质点的运动规律都应当遵从牛顿运动定律。

2. 牛顿力学适用于宏观物体的低速运动情况

在牛顿于 1687 年提出著名的牛顿三大定律之前，人们对物质及其运动的认识还仅仅局限于宏观物体的低速运动。低速运动是指物体的运动速度远远小于光在真空中的传播速度。牛顿力学在宏观物体低速运动的范围内描述物体的运动规律是极为成功的。但是到了 19 世纪末期，随着物理学在理论上和实验技术上的不断发展，人类观察的领域不断扩大，实验中相继观察到了微观领域和高速运动领域中的许多现象，例如电子、放射性射线等等(详见附录 2)。人们发现用牛顿力学解释这些现象是不成功的。直到 20 世纪初，相对论和量子力学诞生，它们才得到了合理的解释。

3. 只适用于伽利略相对性原理及伽利略坐标变换

伽利略在对时间作进一步考察后，提出了相对性原理，即一个相对于惯性系作匀速直线运动的系统其内部所发生的一切力学过程都不受系统作为整体的匀速直线运动的影响。设两个惯性参照系 S 与 S' ，令 S' 沿 x 轴方向以速度 v 作匀速直线运动，则两参照系中的坐标变换为：

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad (1)$$

这就是所谓的伽利略坐标变换。从上述变换式中可知，在作相对运动的不同的坐标系中测定的时间是相同的，即 $t' = t$ 。因此在伽利略看来时间是绝对的、普适的。由 $x' = x - vt$ 式中包含了空间不变性，认为在两个惯性系中测量同一尺度或物体的长度是相同的，即绝对空间的观点。

4. 错误的绝对时空观

时间和空间是物质固有的存在形式。时间是物质运动的延续性、间断性和顺序性，其特点是一维性即不可逆性；空间是物质的广延性和伸张性，是一切物质系统中各个要素共存和相互作用的标志。时间、空间与运动着的物质不可分离。

绝对时空的概念早于牛顿之前伽利略就作了阐述，后来在牛顿力学理论框架中，牛顿以注释的方式阐明了他对时间、空间和运动的观点：

时间——“绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性均匀地与任何其他外界事物无关地流逝着。它又可称为“期间”，是时间相对的表观的可感觉的外部的变化着的量度，人们通常使用这种量度如小时、日、月、年来表示真正的时间。”

空间——“绝对空间，就其本性而言，它与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的。相对空间是绝对空间的某一可动部分或其量度，它通过对其他物体的位置的存在而为我们的感觉所指示出来并且把它们当做不动空间。”

运动——“绝对运动是一个物体从某一绝对的处所向另一绝对处所的移动。”

牛顿的绝对时空观以及绝对运动观与他所处的时代及科学发展水平是联系在一起的，他不可能做到爱因斯坦后来发现的弯曲空间和相对时间的更进步的物理认识（详见附录4）。

1.2 经典力学的飞跃——相对论的诞生^[1~6]

相对论是现代物理学的基础之一，是关于物质运动与时间空间关系的理论，它由爱因斯坦 (Albert Einstein 1879—1955) 于20世纪初在总结实验事实的基础上建立和发展起来。在此以前，人们根据经典时空观解释光的传播等问题时发生了一系列尖锐的矛盾，相对论根据这些问题，建立了物理学中新的时空观和调整物体的运动规律，对物理学的发展

具有重大作用。相对论分为两个部分：狭义相对论和广义相对论。

1.2.1 相对性原理

1. 相对性原理源于生活

伽利略最早提出了“惯性定律”，认为一个物体具有某一速度只要没有加速或减速的原因这个速度将保持不变。还是最早提出了“相对性原理”的人，他形象地表述：把你和你的朋友关在一条大船甲板下面的大房间里，同时随身带上一些苍蝇、蝴蝶和其他小飞虫。再找一个大桶，装满水，在里边放几条鱼。找一个盛了水的瓶子挂起来，让它把水一滴一滴地滴进下面的一个细颈瓶里。船静止不动的时候，你可以观察到这些小飞虫以相同的速度飞往房内各个方向，鱼正常游动，水也准确地滴落进下面的瓶子里。你把任何东西扔给你的朋友，只要距离相等，朝不同方向扔出所需的力量均相等。你立定跳远，无论跳往哪个方向，距离都是一样。当你仔细观察了上述现象之后，你将船开动但要保持匀速直线运动，这时你再观察上述各种现象你会发现它们没有任何变化，你也不能通过它们中的任何一个现象来确定船是运动的还是停止不动的。伽利略用这个实际生活中的事例生动地说明了运动的相对性原理，船在匀速直线运动时仓内的上述各种现象与船静止时完全一样，这就是为什么匀速直线运动是一种相对静止的状态。设想如果把平静的海面当做一个参照系，船和仓内的生物和物体一起跟随船体都在做着同一个匀速直线运动，也就是说都处于一个相对静止的状态，在这个相对静止的框架（参照系）内，所有仓内的运动现象应该与船体静止时完全一样。思考这个问题的焦点是要牢记仓体内的所有物体包括生物都与船体一样获得了同一个匀速直线运动，它们被封闭在一个相对静止的“笼子”里，物体和生物的任何再运动都是在这个相对静止的状态下发生和表现的。

近代宇航技术，当航天器进入运动轨道后（注意一定要在进入运行轨道之后）航天员可以出仓活动而不会被仓体甩在后面，其道理也是相对性原理。在轨道运行的过程，仓体和航天员都在同一个匀速“直线”运动的状态下（“直线”加了引号是因为运行轨迹是一个直径很大的接近圆形的曲线，但在每一个瞬时运行曲率都不大，可以视为直线），两者是相对静止的，如果把仓体视为一个参考系那么航天员在仓体内的一切活动和在一个静止的仓体内毫无二致。出仓的技术关键不在被甩下而在航天员离开仓体就失去了仓体内人类赖以生存的保障，如大气压、温度等指标，这些问题就靠航天服的设计来解决了。再如你在匀速行驶的火车上，车厢内的苍蝇和杯中不慎滴落的水，并没有出现有的人想象的苍蝇会撞向车厢后壁或滴水会落在火车前进方向的后边一点，因为乘客、苍蝇、瓶子和瓶子内的水都和车厢一样作着同一个匀速运动，它们在一个相对静止的匀速运动的

惯性系之内，就象我们每一个地球上的人和物时刻都同地球一样作着“公转”和“自转”，而不自觉罢了。任何一个生物从他的祖先到他降生以后，都和地球上的一切物质一样在宇宙内这个“永恒”的惯性系内运动着，这里“永恒”加了引号是我们不知道什么时候开始的又会在什么时候发生天体的大变动。

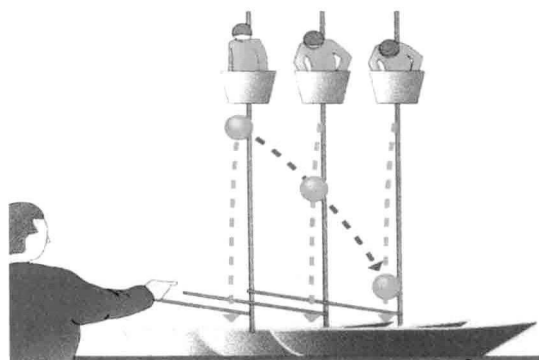


图 1 相对论原理的论证示意图

什么是参考系呢？参考系又称坐标系。

举例来说，一辆匀速行驶的车厢内，一乘客站在车厢窗口松手丢下而非用力投掷一块石头到路基上，如果撇开空气阻力影响不谈，车厢窗口的乘客看见石头沿直线落下，而人行道上的行人则看到石头沿抛物线落下。现在有一问题，从车厢丢下的作匀速运动的石子所经过的各个“位置”是“的确”在一条直线上，还是在一条抛物线上呢？如果引入“坐标系”来代替“参考物体”，对石块位置的描述我们就可以说：石块相对于与车厢连接在一起的坐标系走过的是一条直线，但相对于与路基连接在一起的坐标系是一条抛物线。借助此例，我们清楚地知道客观独立的轨迹不会存在，存在的是相对于特定参考物体的运动轨迹。可见没有绝对的运动轨迹只有相对于参考系的运动轨迹。

如图 1 所示从行进中的帆船桅杆顶落下一石头，石头会垂直地掉到桅杆底部，还是会往后掉？一般人不经思索就会回答往后掉。事实上，根据相对性原理，不论帆船是在行进中还是停泊在岸边，实验的结果石头都会掉在桅杆底部。尽管有人会想当然地认为帆船在行进过程中，石头会沿抛物线运动往后掉，但实际结果两个观察者都看到了石头确实是掉在桅杆底部的。原因是两个观察者所用的参考系都是行进中的船体，如果参考系是岸边静止的物体如树木或一幢建筑那么石头的运行轨迹就是抛物线了。这又一次说明了同样一个物理现象不同的参考系其运动轨迹是不一样的，一切都是“相对”于参考系而言的。

爱因斯坦常用车厢和路基来阐述相对性原理，一辆匀速行驶中的火车车厢，该车厢是一种均衡平移运动（“均衡”是因为速度和方向是恒定的、“平移”是因为虽然车厢相对于路基不断改变位置，但在这样的运动中没有转动）。我们可以用抽象的方式表述说：如果一个质量 M 相对于一坐标系 K 作匀速直线运动，只要第二个坐标系 K_1 相对于 K 是在作匀速平移运动，则该质量相对于第二个坐标系 K_1 亦作匀速直线运动。因此，若 K 为一伽利略坐标系，则对每一相对于 K 作匀速平移运动的坐标系 K_1 亦为一伽利略坐标系。

相对于 K_1 来说，正如相对于 K 一样，伽利略—牛顿力学定律均是成立的。于是问题可以表述为：“ K_1 是相对于 K 作匀速运动而无转动的坐标系，一切自然现象的运行相对于坐标系 K_1 与相对于坐标系 K 一样都依据同样的普遍定律。”这就是“相对论原理”或“狭义相对性原理”。

“相对”的情况在日常生活中很常见。如从飞机内部看机上的乘客，他是坐在那儿不动的；从地面来观察，乘客却随飞机一起飞行。空间是静止的还是运动的，由观察者所参照的标准来决定。物理学上把这种参照标准称作“参考系”，并把相对于观察者是静止的或在作匀速直线运动的参考系称之为“惯性系”。

2. 相对性原理进一步阐述

相对性原理是力学的基本原理。

给定一个运动的物体，为了行文方便权且简称它“运动体”，它相对于一些物体运动，标出这些物体并用数列对应这些距离，于是这些物体就成为参照物，而给定的运动体到这些物体的距离的全体就成为参照空间。对应于距离的所有数就组成成为一个有序系统。这个有序系统就是同参照物联系在一起的坐标系。在此，所谓相对性原理，就是从一个坐标系转换到另一个坐标系的可能性及其表述物理定律的平等性以及给出坐标变换时刚体内部的特性与其各质点的距离及其结构的不变性。

力学的全部发展过程一直同参照系统变更时扩大物理客体不变性概念的范围联系在一起。在 17 世纪人们已经判明物体的结构与坐标系的选择无关，同时也明确了从一个坐标系过渡到另一个相对它作匀速直线运动的坐标系时，力和加速度之间关系是不变的，亦称之为是“协变”的。

牛顿根据运动三定律得到的结论包含了相对性原理。但是牛顿力学不能没有绝对运动的概念。

牛顿认为，绝对运动并不是相对于一些个别的物体，而是相对于空间。这种绝对静止的“空”的空间可以看成充满整个宇宙的数目不定的离散存在的物质和“宇宙气”的总代表。所谓物体相对于空间运动，本身就意味着把一个被个体化的物体同个不可分割的背景加以对照。他认为，加速度就是相对这一没有被明确的背景而言的。然而在每一个具体的动力学的课题中他必须应用和具体的物体联系在一起的某个计算系统。因而在给出动力学课题的范围后，必须把相对静止的物体和与具体物体无关的作为空间出现的被赋予特权的计算系统加以区分。

对物理学而言，力的概念是个必须加以分析的概念。物理学确定了力的数值，在个别情况下，当质点无摩擦地运动时，力可以是坐标的函数。这种函数的形式应由引力论、

弹性理论、电动力学理论中对引力、弹性力、电力、磁力的研究给出，并且这种研究与力学不同，完全按另一种方式进行，这些力已不再是终极概念。

3. 相对性原理的延伸与扩展

爱因斯坦认为对所有自由运动的观察者而言自然定律都是相同的，进一步他说相对性原理是指物理定律在一切参考系中都具有相同的形式。它是物理学最基本的原理之一。爱因斯坦指出，不存在“绝对参考系”。在一个参考系中建立起来的物理规律，通过适当的坐标变换，可以适用于任何参考系。

爱因斯坦使力学的基本原理——相对性原理改变了形式。将相对性原理推广到非力学的过程并且使古典物理获得了最终的形式。为此，古典物理学须放弃不变的空间距离和时间间隔，而代之以不变的四维间隔。这种认识不仅使相对性原理仍旧是统一宏观物理学和力学的普遍原理，而且大大发展了人们对自然的认识。

我们把全部历史的变更都归拢在一起来讨论相对性原理或者说讨论适用于伽利略—牛顿的古典原理和爱因斯坦的狭义、广义相对论的普遍的相对性概念：伽利略—牛顿原理适用于缓慢的惯性运动；狭义相对论适用于可以和电磁振荡传播的速度相比拟的惯性运动；广义相对论适用于引力场中质点或质点系的加速运动。上述情况中，坐标以这样或那样的方式随时间而变化即某时刻定域于空间中的物理客体在保持自身不变的同时从空间的一个点转移到另一个点，这个客体能够以任意速度（古典的相对性原理）或以被某个恒定的（狭义相对论）或以引力场所决定的（时空弯曲、广义相对论）速度通过这些处所。无论取哪一种观念，只要指明自身同一客体相对它做运动的那个物体，则自身同一客体运动的概念就是有意义的。至于这个论题适用哪种坐标，如果是经典力学问题则使用前述的式(1)表述的伽利略坐标变换，如果是电动力学问题则使用1.2.2节中的洛伦兹变换，见式(6)。

1.2.2 狭义相对论

1. 经典力学碰到了困难

到19世纪末，经典力学已相当完善，但涉及高速运动的物理现象显示了与经典理论的冲突，而且整个经典物理理论显得很和谐：① 电磁理论按照经典的伽利略变换不满足相对性原理，一定要有一个绝对静止的参考系，而探测绝对静止的参考系的种种努力均告失败；② 似乎存在着经典力学无法说明的极限速度；③ 电子的质量依赖于它的速度而不是经典力学中所认为的物质的质量是恒定的与运动无关的。于是传统的相对性原理在这里失效了，然而对相对性原理的正确性一开始就有强有力的论据来支持这个普遍事

实。在那个年代物理学的发展有一个人们必须承认的事实，包括早期的爱因斯坦本人都自觉不自觉地认为经典力学在相当大的程度上是“真理”。因为在对天体的实际运动的描述中，经典力学所达到的精确度简直令人惊奇。因此，一旦在力学领域中应用相对性原理，必然将会达到很高的准确度。一个在物理领域（力学）内具有广泛的普遍性和极高准确度的相对性原理居然在另一领域中无效，从推理的观点来看是不大可能的。

2. 狭义相对论应运而生

在这种形势下，有见地的物理学家预感到物理学中正孕育着一场深刻的革命。在经过短期的困惑之后，爱因斯坦开始醒悟要立足于物理概念以观察到的事实为依据而不能以先验的概念强加于客观事实。他考察了一些普遍的物理事实和经典物理学中如运动、时间、空间等基本概念，得出以下两点具有根本意义的作为建立新理论的基本原理：① 无论力学实验还是电磁学实验都无法确定自身惯性系的运动状态。也就是说，在一切惯性系中的物理定律都有相同的形式；② 光速不变原理即真空中的光速对不同惯性系的观察者来说都是 c 。承认这两条原理，牛顿的绝对时间、绝对空间观念必须修改，异地同时概念只具有相对意义。在此基础上，爱因斯坦建立了狭义相对论。

1905 年 5 月，爱因斯坦完成了科学史上的不朽篇章《论动体的电动力学》，宣告了狭义相对论的诞生。以光速不变原理和狭义相对性原理作为两条基本公设：一是光速不变原理，即在任何惯性系中，真空中的光速 c 都相同；二是狭义相对性原理，即在任何惯性参考系中，自然规律都相同。这两条原理表面上看是不相容的，但只要放弃绝对时间的概念，那么这种表面上的不相容性就会消除。由此得出时间和空间等物理量从一个惯性系变换到另一个惯性系时，应该满足洛伦兹 (H. A. Lorentz 1853–1928) 变换，而不是伽利略变换，并可由此得出结论：

(1) 两事件发生的先后或是否“同时”，在不同参考系看来是不同的（但因果关系仍然成立）；

(2) 量度物体长度 l 时，将测到运动物体在其运动方向上的长度要比静止时缩短，即：

$$l = l' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2)$$

与此相似，量度时间 Δt 进程时，将看到运动的时钟要比静止的时钟慢一些，即：

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3)$$

(3) 物体质量 m 随速度 v 的增加而变大，即：