

第二章 经典力学的建立和发展

牛顿在“原理”一书中一开始便说:

我把这部著作叫做《自然哲学的数学原理》，因为哲学的全部任务看来就在于从各种运动现象来研究各种自然之力，而后再用这些力去论证其他的现象。

本章主要四方面内容:

- 1.近代科学诞生是从天文学的突破开始 —— 哥白尼日心说。
- 2.经典力学是从伽利略和开普勒时代开始的，到牛顿时代到达成熟阶段。
- 3.牛顿的哲学思想、科学研究方法和力学机械观。
- 4.具体知识 —— 着重几个守恒定律。

§ 2.1 坐标系、位置矢量、速度

先介绍在力学中的基本物理量:

1. 力学是定量的科学，为了描写物体运动，必须引入基本量位置、时间、速度。
2. 在牛顿力学中，坐标和时间是独立的，且测量长度的尺在不同参考系中“长度是不变的”和所用的钟测得的是“绝对时间”（即不同参考系中钟的快慢一样）。
3. 速度是矢量，速度合成用平行四边形法则。
4. 在数学和物理中，作图法很重要，可帮助我们理解。希望同学们在学习中重视图形的用处，体会用图形来分析说明问题的重要性和必要性。

§ 2.2 从哥白尼到开普勒

一、向地心说挑战——哥白尼创立日心说

1. 为什么近代科学诞生是从天文学的突破开始的？

早在公元前4世纪，古希腊哲学家亚里士多德就已提出了“地心说”，即认为地球位于宇宙的中心。公元140年，古希腊天文学家托勒密发表了他的13卷巨著《天文学大成》，在总结前人工作的基础上系统地确立了地心说。根据这一学说，地为球形，且居于宇宙中心，静止不动，其他天体都绕着地球转动。

这一学说从表观上解释了日月星辰每天东升西落、周而复始的现象，又符合上帝创造人类、地球必然在宇宙中居有至高无上地位的宗教教义，因而流传时间长达1300余年。

2. 日心说提出的科学根源、哲学根源和历史根源是什么？

(1) **科学根源**: 随着天文学观察数据越来越多，为了给予解释，托勒密的地心说不断修补，越来越复杂，难以使人信服。

(2) **哲学根源**: 他接受毕达哥拉斯学派提出的“宇宙是和谐的，可用简单的数学关系来表达宇宙规律”的基本思想。他也赞同柏拉图哲学，同柏拉图一样，高度赞美太阳，给予太阳“宇宙正中”的位置。

(3) **历史根源**: 在意大利留学10年，受到文艺复兴运动影响，思想解放，投身科学革命。

3. 哥白尼仅是几何模型，待进一步发展。

二、开普勒行星三定律

1. 为什么开普勒能发现行星运动三定律?

(1) 哥白尼和毕达哥拉斯的哲学思想强烈吸引**开普勒**。

(2) 1600年与**第谷**合作，使他从第谷处获得了大量精确的天文学数据。于1609和1619年，共化了19年，才先后提出了行星运动三定律。

(3) 利用哥白尼的模型，开普勒发现火星的轨道数据与第谷观测的数据有8'偏差，促使他改进理论模型。他曾说：“**这8弧分是不允许忽略的，它使我走上改革整个天文学的道路。**”

2. 开普勒行星运动三定律

① **椭圆定律**：每个行星的轨道是一个椭圆，太阳位于一个焦点上。

② **等面积定律**：在行星与太阳间作一条直线，则此直线在行星运动时于相同时间内扫过相等的面积。

③ **和谐定律**：行星运动周期 T 的平方正比于行星与太阳平均距离 R 的三次方，记为：

开普勒已经认识到：他的定律强烈地暗示了太阳对行星有一种吸引力，这个力随距离之增大而减弱。这样才能理解例如为什么水星（离太阳最近）的运动速度比金星的快，因而周期最短的事实。但这是什么样的力呢？开普勒还想不出来，揭示这一自然奥秘的任务是后来牛顿完成的，但开普勒的理论为牛顿经典力学的建立提供了重要基础。

从开普勒起，天文学真正成为一门**精确科学**，成为近代科学的**开路先锋**。

§ 2.3 伽利略和近代力学的诞生

一、伽利略在天文学方面的贡献：

1. 自制望远镜（1609年）：为纪念他首先用望远镜观察星空这一壮举，**2009年为国际天文年**。

2. 发现木星的4颗卫星

3. 发现太阳黑子

4. 定出太阳自转周期

二、在力学方面的贡献：提出落体定律和惯性运动概念

1. 勇敢地否定了亚里士多德把运动划分为“自然运动”和“强迫运动”，而是抓住了运动基本特征量——速度和加速度，把运动分为“匀速”和“变速”。

2. 用思想实验和斜面实验驳斥了亚里士多德的“重物下落快”的错误观点。发现自由落体定律。（斜塔实验仅是“传说”）

三、对科学方法的贡献

斜面实验在2002年被评为**历史上“最美丽”的十大物理实验之一**。从斜面实验看伽利略的研究方法：

对现象的观察 → 提出假设（匀加速运动假设） → 进行数学和逻辑的推理 → 实验验证（ $s \sim t^2$ ） → 形成理论

(1) 开创了科学实验方法，并将实验、观察和理论思维相结合。

(2) 提出了思想实验。

爱因斯坦评价他说：“**伽利略的发现以及他所用的科学推理方法是人类思想史上最伟大的**

成就之一，而且标志着物理学真正的开端。”

上述三方面贡献使伽利略被后人称为“现代物理之父”。

四、晚年伽利略

晚年伽利略在被软禁期间，直到逝世前，一直未中断过与教会斗争和研究工作。

他以对话形式写的著作：《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》作为经典名著流传至今。

§ 2.4 牛顿和经典力学的成熟

英国著名诗人Pope写道：

自然界和自然界的规律隐藏在黑暗中，
上帝说：“让牛顿去吧！”
于是一切成为光明。

一、牛顿简历

伟大的英国物理学家，1642年12月25日生于林肯郡伍尔索普村的一个农民家庭。1669年，年仅27岁，就担任了剑桥的数学教授。1672年当选为英国皇家学会会员。

1685~1687年，在天文学家哈雷的鼓励和赞助下，牛顿发表了著名的《自然哲学的数学原理》，完成了具有历史意义的发现——运动定律和万有引力定律，对近代自然科学的发展，作出了重大贡献。1703年，当选为英国皇家学会会长。

二、牛顿力学三定律

牛顿创建了力学模型，把物体视为质点（理想模型），将模型与数学相结合研究了物体运动规律，使物理学成为定量的学科。模型方法不仅是物理学，而且已成为现代科学研究的基本方法之一。

(1) 第一定律：**惯性定律** —— 一个不受外力作用的物体将保持它的静止或匀速直线运动状态。这定律首先归功于伽利略和笛卡儿的贡献，牛顿将它作为力学定律提出，并引入“质点”来描写物体惯性的大小。

(2) 第二定律：**运动定律** —— $\vec{F} = m\vec{a}$ ，是动力学的最基本定律。

(3) **牛顿第三定律**：作用和反作用定律 —— 物体对另一物体的作用力同时引起另一物体对该物体的大小相等、方向相反的反作用力，作用力和反作用力在同一条直线上。

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

三、万有引力定律的创立过程

1. 科学问题的提出(思想突破)

月亮为什么不掉到地球上来？ 别人只看到了天上和地上的运动不同，牛顿看到了它们的相似性，把它们统一起来。

这是牛顿在他的**哲学思想** —— “**统一性原理**”指导下提出来的。

2. 万有引力公式的建立

牛顿将第二、第三定律和开普勒定律相结合，建立了万有引力公式：

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

其中引力常数G的测定是100多年以后由卡文迪许利用扭秤实验测得。此实验也被评为历史上“最美丽”的十大物理实验之一。

卡文迪许测得： $G = 6.754 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$

目前的国际公认值为： $G = 6.6726 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$

3. 理论预言的实践检验——哈雷彗星和海王星的发现

四、牛顿在科学研究方法上的贡献

“我把这部著作叫做《自然哲学的数学原理》，因为哲学的全部任务看来就在于从各种运动现象来研究各种自然之力，而后用这些力去论证其他的现象。”

值得思考：牛顿在这里不仅讲了研究的目的，还讲了科学研究方法。即从特殊（现象）到一般（规律），再从一般回到特殊。

前者是英国哲学家培根强调的“归纳法”，它以实验为基础；后者是被数学家兼哲学家的笛卡儿所强调的“演绎法”，它要用数学工具。

牛顿的研究方法：归纳——演绎法

归纳法：从实验出发，由特殊到一般

演绎法：以理论为主，由一般到特殊

在牛顿之前，两种方法被认为是互相排斥的。牛顿在科学方法上的重大贡献就是他把两种方法结合起来了。

从牛顿万有引力公式的建立到被世界公认的过程，就可以看到牛顿是将两种科学方法结合起来，说明这两种方法是相辅相成的。

五、牛顿的自然哲学思想

牛顿在《自然哲学的数学原理》中，提出了4条《哲学中的推理法则》：

(1) **简单性原理：**除那些真实而已足够说明其现象者外，不必再去寻求自然界事物的其他原因。

(2) **因果性原理：**对于自然界中同一类结果，必须尽可能归之于同一种原因。

(3) **统一性原理：**物体的属性，凡是既不能增强也不能减弱者，又为我们实验所能及的范围的一切物体所具有者，就应视为所有物理的普遍属性。（在此法则中，牛顿明确提出了万有引力思想：“我们必须普遍承认，无论哪种物体都只赋有一个原则，即他们能够互相吸引。”）

(4) **真理性原理：**在实验哲学中，我们必须把那些从各种现象中运用一般归纳而导出的命题看作是完全正确的或很接近于真实的，虽然可以想象出任何相反的假说，但是在没有出现其他现象足以使之更为正确或者出现例外之前，仍然应当给予如此的对待。

牛顿的自然哲学思想以及归纳法和演绎法相结合，模型和数学相结合的科学研究方法，不仅使他成功地建立了经典力学体系，实现了物理学史上第一次大综合，而且推动了近代科学

的大发展。

恩格斯：“不管自然科学家采取什么样的态度，他们还是得受哲学的支配。”

玻恩：“真正的科学是富于哲学理性的，尤其是物理学，它不仅是走向技术的第一步，而且还是通向人类思想的最深层的途径。”

六、站在巨人肩膀上的牛顿

“如果说我比其他人看得远一点的话，那是因为我站在巨人的肩上。”

“我不知世人将如何看待我，但是在我看来，我不过像一个在海滨玩耍的孩子，为时而发现一块比平常光滑的石子或美丽的贝壳而感到高兴；但那浩瀚的真理之海洋，却还在我的面前未曾发现呢。”

七、牛顿物理学的局限性

当物体运动速率很高时（接近光速），当所描写的体系很小时（微观体系），当所描述的物质系统很大，或引力很强时，牛顿的万有引力、运动定律和牛顿的时空观就不完全正确了，将由新的理论来代替。

在牛顿力学取得巨大成功的基础上兴起的力学机械观(自然界所有现象都可以用牛顿力学来解释),也将在对电磁现象的描述中遭到失败。

§ 2.5 动量守恒定律 机械能守恒定律

动量守恒定律和机械能守恒定律以及下一节要讲的角动量守恒定律，揭示了在物体运动变化过程中保持不变的东西。这些守恒定律常被人们用作处理动力学问题的出发点，使问题的处理简单、方便，而不必知道物理过程的细节，就可以由初始条件推演出过程结束时的运动情况。

一、动量、力的冲量 动量守恒定律

1. 什么是动量和冲量？

动量： $\vec{p} = m\vec{v}$

冲量($F\Delta t$)引起动量的变化，即动量定理： $\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p} = \vec{p}_f - \vec{p}_i = m\Delta\vec{v}$

2. 动量守恒定律：在一个封闭（不受外力）的体系内，在内力作用下总动量保持守恒。

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \text{常量}$$

动量守恒定律应用例子：火箭升天，枪体反冲，……。

二、描述机械运动的两个量——动量和动能

这两个量互不相同，有本质区别，都很重要。

动量是**矢量**，它的变化与冲量有关。

动能是**标量**，它的变化与力做功有关，而且它可以转化为其他不同形式的能量。

三、重力势能、功、机械能守恒

举重物体，要先克服地球引力做功： $W = mgh$

物体下落，势能转化为动能： $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

在保守场中，机械能（动能和势能之和）保持不变： $E_p + E_k = \text{常量}$

功是力与位移的标积： $W = \vec{F} \cdot \vec{s} = Fs \cos \theta$

§ 2.6 弹性和振动

（本节简述，主要以自学了解，不做考试要求）

下面讨论另一种保守力——弹性力作用下物体运动的描述。
以弹簧振子为例，设弹簧振子质量为 m ，弹簧的劲度系数为 k 。

弹簧施加在物体上的力： $F = -k(x - x_0) = -ku$

振子动能与势能之和为常量，即机械能守恒： $E_k + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}ku^2 = E = \frac{1}{2}kA^2$

振子位移随时间的变化，遵从余弦（正弦）规律：

$$u(t) = A \cos(\omega t) = A \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right)$$

其中： $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

振子速度随时间的变化： $v(t) = -\omega A \sin \omega t = \omega A \cos\left(2\pi \frac{t}{T} + \frac{\pi}{2}\right)$

将 $v(t)$ 和 $u(t)$ 的表达式作比较，可见变化周期 T 相同，但 $v(t)$ 的相位超前 90° （亦即 $\pi/2$ ）。

§ 2.7 角动量、角动量守恒定律

一、什么是角动量？（由开普勒第二定律引进角动量概念）

开普勒第二定律指出：由太阳到行星的矢径，在相等的时间内扫过相等的面积。所谓矢径即是太阳到行星的连线，其方向指向行星。

定义角动量矢量： $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$

其大小： $L = |\vec{L}| = pr \sin \theta = mvr \sin \theta$

角动量矢量合成举例：陀螺进动。

思考：为什么枪筒中有螺线？

二、角动量守恒定律及其应用

角动量守恒定律（**有条件**）：如果物体在运动过程中，受到外力相对于固定点（或固定轴）的**力矩为零**，则物体相对该固定点（或固定轴）的角动量保持不变。

$$M = |\vec{M}| = rF\sin\theta$$

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

请举例说明：角动量矢量合成以及角动量守恒的实际应用？