

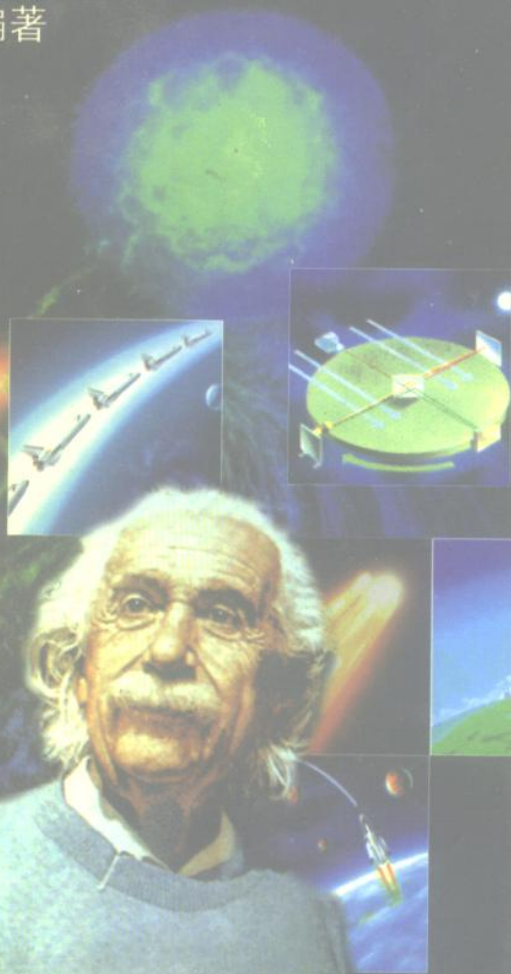
LILUNWULIGAILUN

东北师范大学

文库

# 理论物理概论

王锡绂 王志兴 编著



东北师范大学出版社

(吉)新登字 12 号

DW27/17

东北师范大学文库  
**理论物理概论**  
LILUN WULI GAILUN  
王锡绂 王志兴 编著

---

责任编辑:杨明宝 封面设计:李冰彬 责任校对:贾玉江 王宗田

东北师范大学出版社出版 东北师范大学出版社发行  
(长春市人民大街 138 号) 东北师范大学出版社激光照排中心制版  
(邮政编码:130024) 吉新月历公司印刷分公司印装

---

开本:850×1168 毫米 1/32

1996 年 6 月第 1 版

印张:21

1996 年 6 月第 1 次印刷

字数:570 千

印数:001—500 册

---

ISBN 7 - 5602 - 1907 - 1/O · 94

定价:25.00 元

本书系东北师范大学  
图书出版基金项目

# 序 言

物理学是一门建立在定量实验基础之上的实验的、精密的科学。理论物理根据基本的实验结果，建立恰当而精确的概念，借助逻辑推理和数学演算构成对客观规律的理性认识。正确的理论一旦建立，不但可以将已有的实验资料加以系统化，而且可能预见新的结果、新的效应，随之被实验加以验证。

理论物理赋予复杂、纷纭的自然现象以广泛的、简明的和精确的描述。它的高度概括性，在其适用的范围内可以包容任何特例；它的足够精确性，可以保证由其推演出结论的正确性。当今一切物理实验的设计都需要理论物理的指导。一切与物理有关的科学工作者、工程技术人员以及物理教师都应了解、掌握和使用基础理论物理。

理论物理是一个发展快、内容多、庞大的学科体系。为了给非理论物理专业的其他学科领域的人员提供最低限度的知识内容，我们特编写了这本《理论物理概论》，其中包括力学、狭义相对论、电动力学、量子力学和统计物理几个部分。内容上既保持了各自的独立系统，给学生以较完整的知识，又考虑到它们之间的联系，减少过于专门的课题，用较短的时间(140~160学时)给学生打下较坚实的基础。

本书不但讲述理论物理各主要部分的内容，而且十分重视理论物理学方法的培养。为此，我们力图使概念简明扼要，内容深入浅出。为了帮助学生理解，将理论的应用和延伸放到各节的例题中。在教学中，注意例题和习题的训练，以提高学生解决实际问题的兴趣和能力。

本书的编写曾受到许多教师同仁的帮助和支持，特别是薛康、

阮俪、董和风、彭建华、惠萍、孙迎春，在形成本书的教学实践中作出了贡献，在此一并深表谢意。

鉴于编者水平所限，书中错误及不当之处在所难免，敬请读者不吝赐教。

编者

1995年7月于长春

# 目 录

## 序 言

<b>第一章 惯性参考系及其基本属性</b> .....	(1)
§ 1 惯性参考系与伽利略相对性原理 .....	(1)
§ 2 封闭力学系统的运动积分与时间、空间的 对称性 .....	(3)
<b>第二章 动力学基本定理与守恒定律</b> .....	(5)
§ 3 质点动力学方程 .....	(5)
§ 4 动量定理与动量守恒定律.....	(21)
§ 5 角动量定理与角动量守恒定律.....	(28)
§ 6 动能定理与机械能守恒定律.....	(36)
§ 7 动力学基本定理与守恒定律的应用.....	(46)
<b>第三章 刚体的运动与非惯性系内的运动</b> .....	(61)
§ 8 刚体运动学.....	(61)
§ 9 刚体动力学.....	(67)
§ 10 非惯性系内的运动与惯性力 .....	(77)
<b>第四章 拉格朗日方程</b> .....	(84)
§ 11 虚功原理 .....	(84)
§ 12 达朗贝尔原理 .....	(99)
§ 13 拉格朗日方程.....	(102)
§ 14 拉格朗日方程的应用.....	(115)

---

<b>第五章 哈密顿原理</b> .....	(128)
§ 15 正则方程.....	(128)
§ 16 正则方程的首次积分.....	(133)
§ 17 哈密顿原理.....	(140)
<b>第六章 爱因斯坦相对性原理与相对论力学</b> .....	(148)
§ 18 相对论的实验基础.....	(148)
§ 19 爱因斯坦相对性原理和光速不变原理.....	(150)
§ 20 洛伦兹变换 速度变换 多普勒效应.....	(159)
§ 21 动量和能量.....	(171)
§ 22 粒子裂变和弹性碰撞.....	(177)
<b>第七章 电磁现象的实验规律与基本场量</b> .....	(182)
§ 23 电荷守恒定律.....	(182)
§ 24 库仑定律和欧姆定律.....	(184)
§ 25 毕奥—萨伐尔定律.....	(187)
<b>第八章 静电场</b> .....	(191)
§ 26 真空静电场基本假设.....	(191)
§ 27 静电场的电势.....	(196)
§ 28 静电场中的导体.....	(200)
§ 29 静电场中的介质.....	(205)
§ 30 静电场的能量与它对荷电体的作用力.....	(216)
§ 31 静电问题解法.....	(224)
<b>第九章 稳磁场</b> .....	(258)
§ 32 真空稳磁场基本假设.....	(258)
§ 33 稳磁场的矢势.....	(262)

---

§ 34	稳磁场中的介质·····	(266)
§ 35	稳磁场的能量与它对载流系统的作用力·····	(278)
<b>第十章</b>	<b>时变电磁场·····</b>	<b>(287)</b>
§ 36	法拉第电磁感应实验定律·····	(287)
§ 37	时变电磁场基本假设·····	(289)
§ 38	介质中的电磁场·····	(291)
§ 39	电磁场的能量和能流·····	(296)
§ 40	时谐电磁场·····	(304)
<b>第十一章</b>	<b>电磁波的传播与辐射·····</b>	<b>(310)</b>
§ 41	电磁场的波动方程·····	(310)
§ 42	均匀绝缘介质中的平面波·····	(313)
§ 43	均匀导电介质中的平面波·····	(320)
§ 44	不同介质中的平面电磁波·····	(327)
§ 45	导行电磁波·····	(337)
§ 46	电磁场的矢势和标势·····	(351)
§ 47	电磁场的辐射·····	(355)
<b>第十二章</b>	<b>四维形式电动力学·····</b>	<b>(364)</b>
§ 48	闵可夫斯基空间中的张量运算·····	(364)
§ 49	麦克斯韦方程组的四维形式与电磁场的 洛伦兹变换·····	(368)
§ 50	电磁势四维运动方程和电荷在电磁场内的 四维运动方程·····	(373)
<b>第十三章</b>	<b>量子力学的基本概念·····</b>	<b>(376)</b>
§ 51	德布罗意波·····	(377)
§ 52	波函数及其统计解释·····	(381)



§ 53	态叠加原理	(385)
§ 54	自由粒子的波函数	(387)
§ 55	动量空间的波函数和动量分布概率	(391)
§ 56	不确定关系	(395)
<b>第十四章</b>	<b>薛定谔方程</b>	<b>(399)</b>
§ 57	薛定谔方程的建立	(399)
§ 58	概率流密度及其连续性方程	(403)
§ 59	粒子在一维无限深方势阱内的运动	(404)
§ 60	粒子在三维无限深势阱内的运动	(408)
§ 61	量子力学的谐振子	(410)
§ 62	粒子在势垒的反射和透射	(416)
§ 63	有限宽度的势垒	(419)
<b>第十五章</b>	<b>量子力学的数学工具</b>	<b>(423)</b>
§ 64	力学量的算符表示	(423)
§ 65	算符的本征值与本征函数	(431)
§ 66	线性厄米算符本征函数的正交性、 归一性和完全性	(438)
§ 67	算符对时间的微商、运动积分	(442)
§ 68	量子力学的矩阵形式	(445)
§ 69	角动量的一般理论	(457)
<b>第十六章</b>	<b>量子力学的应用</b>	<b>(470)</b>
§ 70	氢原子	(470)
§ 71	与时间无关的微扰·斯塔克效应	(482)
§ 72	与时间有关的微扰·跃迁概率	(492)
§ 73	光的发射和吸收	(496)
§ 74	在中心场中电子电偶矩跃迁的选择定则	(503)

---

§ 75	在均匀磁场中运动的粒子·····	(507)
§ 76	塞曼效应与帕邢—巴克效应·····	(511)
§ 77	弹性散射·····	(517)
<b>第十七章</b>	<b>多粒子体系·····</b>	<b>(528)</b>
§ 78	粒子的全同性·····	(528)
§ 79	氦原子、氢分子·····	(536)
<b>第十八章</b>	<b>体系状态的唯象描述·····</b>	<b>(545)</b>
§ 80	体系的分类·····	(545)
§ 81	体系的宏观状态·····	(548)
§ 82	热力学基本方程·····	(562)
§ 83	热平衡与相平衡·····	(576)
<b>第十九章</b>	<b>体系状态的微观描述·····</b>	<b>(585)</b>
§ 84	粒子状态的描述·····	(585)
§ 85	体系的微观态·····	(592)
<b>第二十章</b>	<b>独立粒子系统统计法及其应用·····</b>	<b>(598)</b>
§ 86	平衡态统计法·····	(598)
§ 87	麦克斯韦—玻耳兹曼统计及其应用·····	(604)
§ 88	玻色—爱因斯坦统计及其应用·····	(612)
§ 89	费米—狄拉克统计及其应用·····	(620)
<b>第二十一章</b>	<b>系综理论·····</b>	<b>(628)</b>
§ 90	系综的基本概念与分类·····	(628)
§ 91	系综的统计分布·····	(630)

---

<b>第二十二章 涨落与非平衡态热力学</b> .....	(639)
§ 92 涨落基础理论.....	(639)
§ 93 布朗运动.....	(643)
§ 94 非平衡态热力学.....	(645)
<b>参考文献</b> .....	(653)

# 第一章 惯性参考系及其基本属性

力学是研究物体机械运动以及机械运动中物体之间相互作用的一门学问,而动力学研究的是物体在力的作用下的运动.探讨物体机械运动所遵守的基本规律和原理以及由之导出的一般性的定理和方程就是理论力学的内容.

力学与物理学的许多部分都有密切联系.力学概括出的概念、方法在光学、统计力学、量子力学、电动力学、相对论等方面有着广泛的应用(如作用量、力学正则方程、拉格朗日函数、拉格朗日方程、最小作用量原理等)..

机械运动是物体在空间的位置随时间的变化.

## § 1 惯性参考系与伽利略相对性原理

### 一、惯性参考系

一切物体恒在运动.在力学上,物体运动总是相对于某一参照物而言的.在参照物上建立起来的描述力学运动的时空框架称为**参考系**.如果参考系中各质点的加速度可以仅用各质点间的相互作用来加以说明,这样的参考系就是**惯性系**.在此系中一个不受任何其他物体作用的自由质点将作匀速直线运动.任何一个相对某惯性系作匀速直线运动的参考系同样是一个惯性系,因此有无限

个惯性系.如果在某一参考系中牛顿第一定律不被满足,就可断定这个参考系不是惯性系.

例如,从几百米高的塔上垂直下抛一块石头,它将离开引力方向而往东偏斜.石头具有一个不是由地球引力所引起的水平加速度.可见,与地球相联的参考系不是惯性系.因为这里除引力之外还有地球自转.但是,如果石头垂直下落的高度只有 10 米.水平的偏斜便可忽略不计,与地球相联的参考系就可认为是惯性系了.

在自然界中,并不能指出一个严格的惯性系.如果在一段足够长的时间内在参考系中观察物体的运动,任何参考系都是一个非惯性系.作为近似情形,惯性系对于力学来说是一个很有效的理想化的参考系.

在牛顿力学中,承认物体间的任何作用力可以立刻传递到任意的距离.因此,任一物体的移动,将立刻给予其他物体以某一动量,不论这个其他物体在什么地方.由于这个缘故,彼此相对运动的惯性系中的钟表都可相互校准.可见,牛顿力学中的时间是普通的.关于时间的这个直观的概念,只有当相对速度远小于光速时,才近似地正确(见狭义相对论).

## 二、伽利略相对性原理

在各惯性系中,时、空的性质完全一样,全部力学规律也一样.这就是牛顿力学最基本的原理——伽利略相对性原理.

无限多惯性系中,牛顿力学规律完全等效;这表明不存在任何一个比其他系统更“优越”的绝对参考系.

设有两个惯性参考系  $K$  和  $K'$ ,其中  $K'$  以速度  $v$  相对于  $K$  运动.同一个质点在  $K$  和  $K'$  中的坐标  $r$  和  $r'$  有如下的关系

$$r = r' + vt \quad (1-1)$$

在这里,牛顿力学认为  $K$  和  $K'$  有共同的时间,即

$$t = t' \quad (1-2)$$

(1-1)、(1-2)这两个公式称为伽利略变换.力学方程对伽利

略变换是不变的.

## § 2 封闭力学系统的运动积分 与时间、空间的对称性

构成力学系统的物体既能彼此相互作用(所谓内力),也能与不属于该系统的物体相互作用(所谓外力).在无外力情况下,系统称为**封闭系统**.

### 一、封闭力学系统的运动积分

对于封闭力学系统,存在这么一些函数,它们是构成系统的质点的坐标和速度的函数.这些函数在运动中保持不变,称为**运动积分**.

由  $N$  个相互无刚性连结的质点所组成的系统,可以证明有  $6N-1$  个运动积分.人们感兴趣的只是那些具有可加性的运动积分.所谓**可加性**:对于一个由相互作用可忽略的若干部分所组成的系统,运动积分之值等于系统每一部分的值之和.在力学中有几个可加的运动积分,即能量、动量和角动量.它们在封闭系统中的不变性与时、空的基本性质有密切关系.

### 二、时间、空间的对称性

对于封闭系统相应地有三个守恒定律:能量守恒定律、动量守恒定律和角动量守恒定律.

时间均匀性表示所有时刻的等价性.若用时刻  $t_2$  代替时刻  $t_1$ ,质点的位置和速度不会改变,势能和动能也不变,因此封闭系统的能量不变.能量守恒定律不仅对于封闭系统,而且对于处在不变的(即与时间无关的)外场之中的系统也是正确的.

空间均匀性是动量守恒的基础.由于空间所有地点的性质的

等同性,封闭系统作为一个整体在空间平移时,其中质点间的相对位置和速度不会改变.从而系统的总动量  $\boldsymbol{p} = \sum_a^N m_a \boldsymbol{v}_a$  不会改变.

与能量不同,系统总动量总是可加的,与质点间的相互作用是否可以忽略无关.值得强调指出,对于只有内力的任意系统,即使由于摩擦力而使总机械能不守恒,总动量也还是守恒的.

在笛卡儿坐标系中,动量所有三个分量的守恒定律仅在没有外场的情况下才成立.当外场存在时,若质点在外场的势能不依赖于某个笛卡儿坐标,动量的这个分量仍然是守恒的.例如沿  $z$  轴有均匀外场,动量的  $x$  分量和  $y$  分量都守恒.

空间各向同性意味着:封闭系统整体在空间旋转不影响其力学性质.可以证明,此时的运动积分是封闭系统的角动量.

虽然角动量对任取坐标原点的所有三个分量的守恒定律只对封闭体系才成立,但有外场时,角动量守恒定律可以在有限的形式下成立.例如在轴对称的外场中,角动量在此对称轴上的投影总是守恒的.当然此时用来定义角动量的坐标原点应该是对称轴上的某一点.如果沿  $z$  轴的是均匀场,则在此场中不但角动量  $z$  分量守恒,而且坐标原点在  $z$  轴上可以任意选择.

中心对称场是一个重要情况,系统在此场中的势能只与到空间某一定点(场心)的距离有关.显然,当在此场中运动时,角动量在通过中心的任意轴上的投影都是守恒的.换言之,对场心的角动量矢量是守恒的.

总之,一个封闭系统具有七个有用的运动积分:能量、动量〔矢量〕和角动量〔矢量〕的各三个分量.动量和角动量总是可加的,而能量只对系统内各部分不存在相互作用时才是可加的.

## 第二章 动力学基本定理 与守恒定律

在物理学中,动力学基本定理——动量定理、角动量定理和动能定理,为描述外力作用系统的运动规律提供了基础.在某些经典力学不适用的物理领域,虽然牛顿运动定律不成立,但是动量守恒、角动量守恒和能量守恒都可在一定条件下成立,因而这三条守恒定律是自然界中普适的规律.

本章在研究质点动力学方程的基础上,着重研究动力学基本定理及其相应的守恒定律,并将研究对象从质点扩大到质点系(刚体是一特殊的质点系).

### § 3 质点动力学方程

#### 一、质点动力学方程

如不计物体的大小、形状与质量而研究其运动时,可将物体抽象为点.如不计物体大小、形状,但不可忽略其质量,研究物体在力作用下运动时,可将其抽象为质点.

质点动力学方程为

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F} \quad (3-1)$$



上式左边是位〔置〕矢〔量〕\* 对  $t$  的二次微商(质量一定时), 右边是作用在质点上的合力. (3-1)式还可以写成分量形式. 例如, 在笛卡儿坐标中有

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_y \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_z \end{cases} \quad (3-2)$$

应用(3-1)式研究力学问题, 通常会遇到三种情况:

1. 已知运动方程  $\mathbf{r}=\mathbf{r}(t)$ , 求作用力  $\mathbf{F}$  (称为第一类问题);
2. 已知作用力  $\mathbf{F}$ , 求运动方程  $\mathbf{r}=\mathbf{r}(t)$  (称为第二类问题);
3. 已知一部分运动和受力情况, 求另一部分未知运动和作用力(称为混合问题).

作为第一类问题, 将已知的运动方程  $\mathbf{r}=\mathbf{r}(t)$  对时间求二次微商, 则可得加速度  $\mathbf{a}=\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}$ , 从而由(3-1)式可求出作用力  $\mathbf{F}$ . 显然, 这类问题易于解决.

**【例 3-1】** 一点由  $M$  向  $M'$  运动, 如图 3-1 所示, 试求出其速度的表示式.

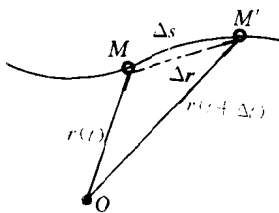


图 3-1 切向单位矢量

解: (1) 由弧长方程  $s(t)$ , 可将速度表示成

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d\mathbf{r}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt}$$

由图 3-1 可知, 其中

$$\left| \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right| = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta s} \right| = 1$$

而  $\frac{d\mathbf{r}}{ds}$  的方向为  $M$  点处曲线的切线方向, 故  $\frac{d\mathbf{r}}{ds} \equiv \boldsymbol{\tau}$  称为切向单位矢量. 这样, 速度在自然坐标系中可写成

系中可写成

\* 本书中〔 〕内的字去掉, 则为相应量的简称. 如位〔置〕矢〔量〕——位矢.