

《高等物理精编》卷一

经典力学 电磁学 电动力学

程稼夫 胡友秋 尤峻汉 编著

中国科学技术大学出版社

1990·合肥

·
《高等物理精编》卷一

经典力学 电磁学 电动力学

程稼夫 胡友秋 尤峻汉 编著

责任编辑：育 之 封面设计：王瑞荣

·
中国科学技术大学出版社出版

（安徽省合肥市金寨路96号）

中国科学院开封印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

·
开本：850×1168/32 印张：15 字数：397千

1990年7月第1版 1990年7月第1次印刷

印数：1—5000册

ISBN 7-312-00147-5/O·64 定价：4.90元

内 容 简 介

《高等物理精编》丛书共分五卷,内容涉及大学物理基础教学的各个方面。本丛书是在中国科学技术大学物理辅导班讲义的基础上进一步加工选编而成的,是教师们综合国内外先进教学经验并结合自己的教学、科研成果而撰写的。它力图从更高、更新、更综合的角度来阐述基础物理内容,并强调实际动手能力。多年的实际检验表明它是一套行之有效的教材。

本卷内容包括:经典力学、电磁学和电动力学。

511/240/27
前言

从1979年到1988年，由诺贝尔奖金获得者、著名物理学家李政道教授倡导，国家教委举办了中国-美国联合报考物理研究生项目(China-United States Physics Examination and Application Program)，简称CUSPEA。这是一个在全国范围内挑选赴美攻读物理博士学位研究生的竞赛活动，它也是我们的高等教育从某一个侧面显示力量走向世界的一个机会。国内各主要高等院校均曾积极投入。10年来，通过这种选拔，我国共派出赴美留学生915人。这些学生在美国几十所著名的大学里，在与美国的以及来自世界各地的大学学生的角逐中，勤奋好学，谦恭聪慧，成绩突出，表现非凡，引起了美国教授们和各界人士的惊讶和赞叹。

和国内其他兄弟院校一样，中国科技大学也把CUSPEA看作是立足国内、走向世界的渠道之一，是总结自己经验，吸取外国长处，提高物理教学水平，培养有国际竞争能力的高水平大学生的一个契机。几年来，结合我校教育改革，我们搜集了大量美国及其他西方国家教育方面的资料，研究了他们的教学计划、教学方法、课程设置、教材教学法、试题安排等。在此基础上，我们一方面重点地剖解了美国主要院校的研究生入学试题，其结果便是我校出版的7卷《美国物理试题与解答》，另一方面，我们集中钻研了美国及其他西方国家的流行教材，参考了近代的有关文献和试题，结合自己的实际经验和我校学生的特点，编写了一套讲义，在我校的物理辅导班上付诸实践。10年来，中国科技大学共考取CUSPEA留学生219名，占全国总录取人数的23.9%，学校的物理教学水平普遍大为提高，其他学科也相应取得效益。

中国科技大学物理辅导班是教育改革的试验，它的目的是使

有了一定大学物理基础的同学，经过强化培训，物理水平得到大范围、大幅度的提高。因此这套讲义不同于一般的教材，它是在稍高层次上的一个精深循环。我们力求使它能新一些，融合进世界科技的最新发展，把物理前沿的课题或发现经适当加工或简化后作为基础物理的例题；宽一些，尽量打破物理各学科之间的界限而着重交叉衔接，综合地采用物理中的内容和手段；高一些，从更高的观点来统一地分析以前学过的种种物理规律和问题；实一些，强调灵活应用物理基本原理去分析解决具体的问题，注重实际动手能力。总之，这套讲义力图使我们的物理教学更物理化，更近代化，因而也就更国际化了。

这套丛书《高等物理精编》就是从我校物理辅导班的讲义中选出来的一部分。它对一般理科大学的学生特别是打算深化自己物理知识的同学们是很好的参考资料，对志愿报考研究生或准备出国留学的同学是一本难得的复习精要，对物理教师和其他领域的物理工作者也会起到有益的借鉴作用。

本丛书是我国“改革、开放”政策的产物，是我国高等教育面向世界、面向未来、面向现代化的大潮中的一朵浪花。抛砖引玉，我们希望它能在促进我国物理教学的改革，提高物理教学水平，推动物理教材的更新和建设作出一定的贡献。当然，限于水平和时间，错误或不当之处在所难免，我们随时准备听取读者诸君的宝贵意见。

本丛书共分5卷，各卷内容和作者分别为：第一卷，经典力学、电磁学、电动力学（程稼夫、胡友秋、尤峻汉）；第二卷，相对论物理、热力学、统计物理（张家铝、曹烈光、陈兆甲）；第三卷，光学、原子物理（郭光灿、金怀诚、谢建平）；第四卷，量子力学、核物理、粒子物理（朱栋培、张永德、徐克尊、范扬眉、许咨宗）；第五卷，天体物理、电路分析、脉冲分析（周又元、全茂达、马善贤）。

《高等物理精编》丛书编委会

1989年6月

目 录

第一篇 经典力学

1 基本原理	(3)
1.1 牛顿定律	(3)
1.2 质点系	(13)
2 加速坐标系	(30)
2.1 匀加速平动坐标系	(30)
2.2 转动坐标系	(35)
3 有心力	(46)
3.1 有心力运动的动力学方程	(46)
3.2 轨道方程	(47)
3.3 离心能与有效势	(48)
3.4 有心势中的二体问题	(50)
3.5 行星运动	(55)
3.6 弹性散射	(58)
4 拉格朗日与哈密顿动力学	(69)
4.1 基本理论	(69)
4.2 哈密顿原理	(74)
4.3 哈密顿正则方程	(76)
4.4 约束力	(87)
4.5 撞击问题	(92)
4.6 绝热不变量	(97)
5 小 振 动	(104)
5.1 单自由度系统的小振动	(104)
5.2 多自由度系统的小振动	(112)
5.3 分子振动	(121)
5.4 两个 N 体问题	(124)
5.5 从分立系统到连续系统的过渡	(132)
5.6 快速交变场中质点的运动	(150)
5.7 参数共振	(154)

刚体动力学	(159)
6.1 一般理论	(159)
6.2 欧拉方程	(166)
6.3 应用	(166)
6.4 欧拉角	(181)
6.5 对称陀螺的自由运动——惯性系观察者	(183)
6.6 在重力场中的对称陀螺	(186)
习 题	(194)
习题答案	(203)
例题目录	

1.1 圆锥摆	(6)
1.2 半径变化的圆运动	(7)
1.3 质点在竖直圆轨道中运动	(9)
1.4 重复碰撞	(11)
1.5 弹性碰撞	(21)
1.6 玩具跷板的稳定性	(22)
1.7 动量传递	(24)
1.8 有质量弹簧的弹性系统	(25)
1.9 潮汐效应	(27)
2.1 地球上的潮汐	(32)
2.2 物体在地球表面上的运动方程	(38)
2.3 落体偏东	(39)
2.4 傅科摆	(41)
2.5 大气环流	(43)
3.1 稳定圆轨道下的径向小振动	(52)
3.2 卢瑟福散射	(63)
3.3 刚球散射	(65)
3.4 两粒子散射	(66)
4.1 在电磁场中的带电粒子	(79)
4.2 雅可比积分	(81)
4.3 转动圆环上质点的运动	(84)
4.4 可缠绕于圆盘上的摆	(86)

4.5	单摆	(89)
4.6	动圆柱在定圆柱上的滚动	(90)
4.7	刚性杆落地碰撞	(93)
4.8	刚性滚子爬台阶	(94)
4.9	一维振子的绝热不变量	(99)
4.10	摆长缓慢缩短的单摆	(99)
4.11	昆虫在摆动杆上爬行	(101)
4.12	一维相对论粒子在相空间中的运动曲线	(102)
5.1	二体摆	(105)
5.2	质点在旋轮线上的振动	(106)
5.3	耦合二维振动系统	(116)
5.4	耦合摆	(118)
5.5	对称线性三原子分子	(122)
5.6	分立质点的一个初值问题	(140)
5.7	弦振动的一个初值问题	(142)
5.8	绕一端旋转的绳子	(143)
5.9	附有作强迫振动质点的弦	(145)
5.10	悬点作竖直振动的刚性摆	(152)
5.11	悬点作水平振动的刚性摆	(153)
5.12	快速振动电场中的电子	(153)
5.13	悬点竖直振动的平面摆共振	(158)
6.1	角速度与角动量方向的几何联系	(164)
6.2	角动量在转轴 ω 方向的投影	(165)
6.3	主惯量矩间的简单关系	(165)
6.4	附有点质量的圆盘的定轴转动	(167)
6.5	滑动和滚动的球	(170)
6.6	回转仪的进动	(172)
6.7	回转罗盘	(173)
6.8	硬币的滚动	(175)
6.9	转动的套索	(176)
6.10	受约束正立方体的转动	(178)
6.11	对称陀螺的自由运动	(179)
6.12	不对称陀螺的自由运动	(180)

6.13 p_e, p_s, p_r 与 $\vec{E}$ 的关系	(184)
6.14 定陀螺	(190)
6.15 动球在静球上的转动	(190)

第二篇 电磁学

1 电磁场的基本规律	(211)
1.1 场源的守恒性	(211)
1.2 静场的基本属性	(211)
1.3 静场和物质的相互作用	(212)
1.4 电磁场的相互作用	(214)
1.5 麦克斯韦方程	(215)
1.6 边界衔接条件	(216)
2 静电学	(218)
2.1 给定电荷分布的电场	(218)
2.2 电介质中的静电场	(219)
2.3 电像法	(229)
2.4 电场中的物体受力问题	(234)
2.5 稳恒电流和稳恒电场	(239)
2.6 电力线的性质和应用	(243)
3 静磁学	(245)
3.1 给定电流分布的磁场	(245)
3.2 磁介质中的静磁场	(245)
3.3 磁像法	(252)
3.4 磁场中的物体受力问题	(257)
3.5 磁荷法	(261)
4 电磁感应	(266)
4.1 电磁感应定律	(266)
4.2 似稳电路方程	(270)
5 传输线电路	(268)
5.1 电报方程的通解	(273)
5.2 定解条件	(279)
5.3 求解步骤	(281)

6 等离子体中的电磁波	(285)
6.1 电磁性能方程.....	(285)
6.2 均匀等离子体中的高频简谐电磁波.....	(289)
6.3 色散现象.....	(290)
6.4 各向异性.....	(293)
6.5 法拉第旋转效应.....	(298)
7 缓慢运动介质中的电磁场	(301)
7.1 电磁场量的坐标变换.....	(301)
7.2 电磁性能方程.....	(304)
7.3 稳恒电磁场.....	(305)
7.4 平面电磁波.....	(311)
8 超导体的电磁特性	(314)
8.1 超导体的电磁特性.....	(314)
8.2 电磁性能方程.....	(315)
9 电磁学单位制	(319)
9.1 单位制的基本知识.....	(319)
9.2 电磁学单位制的复杂性.....	(321)
9.3 单位制的比较分析.....	(323)
习题	(338)
习题答案	(343)

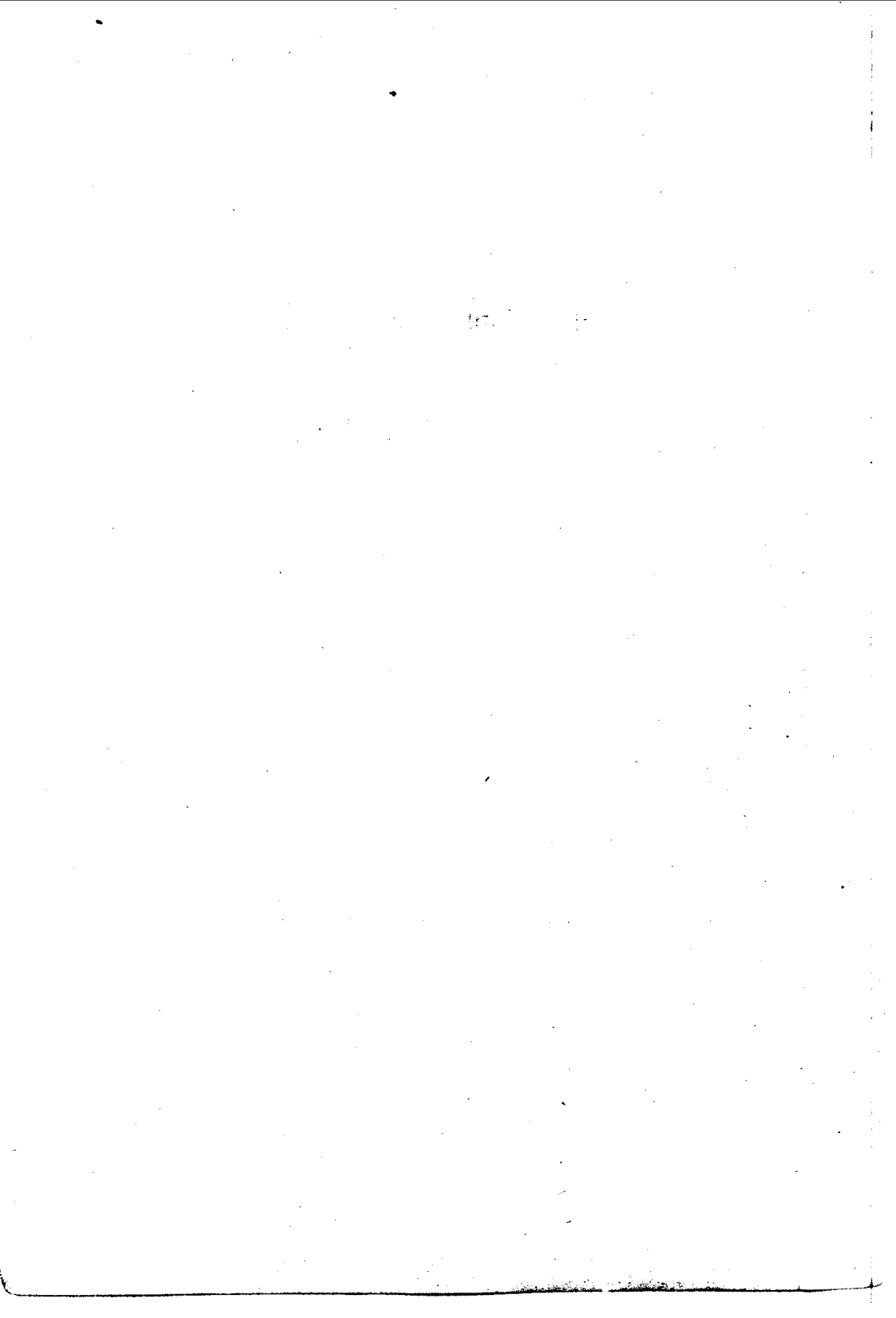
第三篇 电动力学

1 电动力学的基本理论框架及线索	(349)
1.1 电动力学的基本假定.....	(349)
1.2 三个基本假定的引出.....	(350)
1.3 电磁场的波动性和物质性.....	(359)
2 静电学	(363)
2.1 直接积分法.....	(365)
2.2 分离变量法.....	(367)
2.3 镜像法.....	(375)
2.4 多极矩展开法.....	(381)
2.5 格林函数法.....	(389)

2.6 杂题	(389)
3 静磁学	(398)
3.1 矢势法 (“ A 法”)	(398)
3.2 磁标势法 (φ_m 法)	(399)
4 迅变场, 电磁波传播和辐射, 带电粒子在电磁场中的运动	(413)
4.1 电磁波的激发和传播	(415)
4.2 电磁波的辐射	(435)
4.3 带电粒子在外场中的运动——洛伦兹力公式的应用	(460)

第一篇 经典力学

程稼夫 编著



1 基 本 原 理

本章介绍牛顿运动定律及其基本推论。由于它是后面论述各种问题的基础,简单地对经典力学的理论框架有一个概括的了解,还是十分必要的。

1.1 牛 顿 定 律

牛顿定律叙述简单,又不涉及高深的数学,给人以简单易懂的感觉。其实不然。牛顿定律既是定律,又是定义,还包含有假设。特别是在对空间、时间的未经证实的假设,后来发现了问题,从而认识到牛顿力学适用范围的局限性。事实上,牛顿本人当时对运动定律的叙述,存在着含糊不清。直到二百年以后,马赫完成了对古典力学基础的仔细审查,才算搞清。马赫的思想对爱因斯坦狭义相对论的发展起了举足轻重的作用。我们今天对牛顿定律的理解在许多地方仍然包含着马赫的精神。

1) 牛顿定律的叙述

牛顿第一定律表述为:不受外力作用的物体必将作匀速直线运动或保持静止。

这条定律部分是实验事实,部分是定义。因为物体在不同的参照系中往往有不同的加速度,在一个参照系中作匀速运动的物体,在另一个参照系中可能是有加速度的。牛顿第一定律断言存在着一个惯性参照系,在这个参照系中,物体的运动遵循牛顿第一定律。第一定律又称惯性定律。

牛顿第二定律表述为:在惯性参照系中,外力的作用改变物体的动量,并满足关系

$$F = dP/dt = \dot{P}. \quad (1.1)$$

在质量不随时间变化的情况下, 写为

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (1.2)$$

这条定律引进了力 $\mathbf{F}$ 和质量 m 这两个重要的物理量. 因此, 可以说上式既是物体运动的实验定律, 又是力和质量的定义, 还包含质量可加性的假设等.

牛顿第三定律表明, 力总是成对出现, 如果物体 a 施于物体 b 一个力 $\mathbf{F}_{a \rightarrow b}$, 则必须有一个来自物体 b 施于物体 a 的力 $\mathbf{F}_{b \rightarrow a}$, 使得 $\mathbf{F}_{a \rightarrow b} = -\mathbf{F}_{b \rightarrow a}$. 这两个力沿着质点连线方向.

这条定律告诉我们, 力必定是两个系统之间的相互作用, 它可以直接导致强有力的动量守恒定律. 牛顿第三定律不仅是一个必不可少的重要的动力学工具, 而且还是理解前两条定律的一个十分重要的逻辑要素. 因为, 当一个物体受到作用而找不到外界某个物体经受到大小相等、方向相反的力, 将会使我们陷入严重的困境.

这条定律的成立, 与力的规律无关, 它既适用于两质点之间的引力, 也适用于两荷电粒子间的库仑力, 或者其它别的力.

惯性定律定义了惯性参照系. 任何相对于惯性系作匀速运动的一切参照系都是惯性系. 伽里略相对性原理告诉我们, 在任何惯性系中的力学规律都相同.

2) 守恒定律

我们可以直接研究牛顿定律, 但是引入象线动量、角动量和能量那样的特殊导出量, 存在着概念上的优点. 这些量各自满足某种物理意义明确的简单关系式.

i) 线动量

由方程 $\mathbf{F} = d\mathbf{P}/dt$, 可以解释为外力确定 $\mathbf{P}$ 的时间变化率. 特别是, 只要 $\mathbf{F} = 0$, 则动量 $\mathbf{P}$ 为常矢量. 而且, 这个关系对于每个分量同样满足.

ii) 角动量

角动量的定义为

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{P}. \quad (1.3)$$

设质量 m 为常量, 则写为

$$\mathbf{L} = m\mathbf{r} \times \mathbf{v}.$$

角动量的时间变化率为

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{L}} &= m\dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{v} + m\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{v}} \\ &= m\mathbf{r} \times \mathbf{v} \\ &= \mathbf{r} \times \mathbf{F} \\ &\equiv \mathbf{M}.\end{aligned}\tag{1.4}$$

其中 $\mathbf{M}$ 是力矩. 当 $\mathbf{M} = 0$, 或某个分量为零时, 得到相应的角动量 $\mathbf{L}$ 或某个角动量分量为一常量. 然而, 与线动量 $\mathbf{P}$ 相比, 角动量 $\mathbf{L}$ 决定于坐标系原点的选择, 因为若把原点移到原坐标系中的 $-\mathbf{r}_0$ 处, $\mathbf{r}$ 就变为 $\mathbf{r} + \mathbf{r}_0$, 相应的 $\mathbf{L}$ 变为 $\mathbf{r} \times \mathbf{P} + \mathbf{r}_0 \times \mathbf{P}$. 至于两个相对运动的坐标系之间线动量和角动量的变化规律更是不同.

iii) 功和能

考虑在某个空间区域定义的一个静力场 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$. 如果一个质点被放在 $\mathbf{r}$ 处, 并移动一个小位移 $d\mathbf{S}$, 力场 $\mathbf{F}$ 对质点做的功为

$$dW = \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S}.\tag{1.5}$$

因此, 质点沿某个特定的路径从点 1 到点 2 的一个有限路径, $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ 做的功为

$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S}.\tag{1.6}$$

在此, 质点按动力学轨道 $1 \rightarrow 2$, 有

$$d\mathbf{S} = \mathbf{v} dt,$$

于是允许直接积分

$$\begin{aligned}W_{1 \rightarrow 2} &= \int_1^2 \left(m \frac{d\mathbf{v}}{dt}\right) \cdot \mathbf{v} dt \\ &= \frac{m}{2} \int_1^2 d(v^2) \\ &= \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2.\end{aligned}\tag{1.7}$$

这个积分与路径无关.

令 $T \equiv \frac{1}{2}mv^2$ 标记动能, 则

$$W_{1 \rightarrow 2} = T_2 - T_1.$$

此式称为动能定理.

如果力有势, 即

$$\mathbf{F} = -\nabla U(\mathbf{r}). \quad (1.8)$$

则此力称为保守力, U 称为势, 或势能. 对于保守力场, 力空间可用标量函数描述, 而一个通常的矢量场需用矢量函数描述.

对于保守力场, 方程(1.6)写为

$$\begin{aligned} W_{1 \rightarrow 2} &= - \int_1^2 \nabla U(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} \\ &= - \int_1^2 dU \\ &= -U_2 + U_1. \end{aligned}$$

与方程(1.8)联立, 得

$$T_1 + U_1 = T_2 + U_2. \quad (1.9)$$

机械能守恒.

保守力的另两个等价的判据为

$$\nabla \times \mathbf{F}(\mathbf{r}) = 0, \quad (\text{对整个力场成立}) \quad (1.10)$$

$$\oint \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} = 0. \quad (\text{对一切封闭路径}) \quad (1.11)$$

这里对动能定理(1.7)的应用说明如下:

应用动能定理必须计算积分(1.6), 而计算这个积分又必须知道实际遵循的路径, 甚至似乎必须知道有关运动的情况, 这就很难看出这个定理有什么实际用途. 因为在解决问题之前, 我们并不知道路径. 幸而, 有两种特殊情况, 那里不存在这种困难. 其一, 对于保守力, 功的积分并不依赖于特别的路径; 其二, 受约束的运动路径已知, 约束力的效果常常是使速度方向始终沿着预定路径的切线方向(此时约束力往往只改变速度方向而不做功).

下面举几个质点动力学的例子.

例题 1.1 圆锥摆

在一根长度为 l 的绳子下端悬挂一个质量为 M 的重锤, 上端固