

大学物理

(上)

主 编 杨宏春
副主编 雷 雨 孙云卿

PHYSICS



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

大学物理

(上)

主 编 杨宏春

副主编 雷 雨 孙云卿

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是根据“教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会”2004年制定的基本要求编写的,并在此基础上做了适当的拓展和提高。全书分两册,上册包括力学和热力学,下册包括电磁学、光学和量子物理基础。全书在编写上采取了较新的体系,既保持了传统教材基础知识扎实的特点,又突出了内容现代化的时代特征。

本书可作为高等院校理工科非物理专业教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 上/杨宏春主编. —北京:电子工业出版社,2005.8

ISBN 7-121-01432-7

I. 大... II. 杨... III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 064886 号

责任编辑:章海涛 特约编辑:杨晓红

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:19.75 字数:478 千字

印 次:2005 年 8 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:26.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dlbqq@phei.com.cn。

总 序

“大学物理”立体化系列教材建设项目是电子科技大学“十五”精品教材立项项目,该系列包括《大学物理》(上、下)、《大学物理学习指导》以及《大学物理实验》三个分册。

一套精品教材,应系统体现“授人以渔”的教学思想。“授人以渔”,首先要选择那些能够承载“渔”之方法的知识体系。这些知识体系应具有清晰、简捷、严密、完整的逻辑结构,并反映在研究目标前提下的开放和动态发展过程中。其次,结合知识的结构体系,教材应系统地归纳该学科的普遍研究方法,将知识体系的学习作为这些方法成功应用的典型事例,阐述研究方法在建立学科知识结构体系过程中的重要作用,使学生形成研究该学科的方法体系。第三,强调学习与探索过程的相互渗透。学习过程与探索过程在本质上是一致的,在教材中留出一定空间,让学生感知、体验人类认知的真实过程,是使学生形成其“学科意识”最有效的途径之一。第四,强调教材与科技发展的前沿相结合。用科技发展的最新观念与成果去阐释、佐证、更新传统教学内容之内涵,引领学生逐步进入学科前沿,明了所学之所用,激发他们求知与探索的兴趣,体现教材与时俱进的特色。

与同类教材相比,这套教材有以下特点。

(1) 立体化教材建设的特色。整套教材由电子科技大学物理电子学院组织有丰富教学经验的教师编写,并坚持开展了经常性的教材编写交流活动,全套教材具有统一的编写风格,并配备了辅导教材、选修课程教材和教学资源库(光盘),建设了网上教学平台等。

(2) 教学内容的结构化组织特色。在教材内容选择与组织方面,编写者注重在学科研究目的的指引下逻辑而简捷地开展各部分教学内容,强调各教学内容之间内在的逻辑联系及它们在各学科理论体系中的地位和作用,并对各教学内容做了相应整合,删除了部分与高中相重复或部分过于定性的后续专业课程的教学内容,简化了相关教学内容的递进环节,适当加深了教材的数理基础。这些措施使教材既体现了较为完整的知识结构体系,同时又加强了学生的数理基础。

(3) 强调方法结构特色。逻辑地展开各教学内容及各教学内容相关背景知识介绍,本身就体现了人类认知自然的方法论进步。同时,教材还在相应章节重点介绍相应的物理学研究方法,如实验方法、模型化方法、定量与半定量方法、类比方法和简单性与对称性原理等。在一定程度上,教材力图以物理学知识体系为典型范例,介绍人类在探索自然过程中认知方法的进步过程。

(4) 教与学相互渗透特色。通过在教材中引入课程设计、小课题研究、数字化电子作业、文献阅读、读书笔记、创新实验设计等系列措施,本教材力图使学生在“做”中“学”和在“学”中“做”,加强学生的科研体验。在体验过程中,使学生形成动态的知识结构与方法结构体系,破除对科学的神秘与敬畏感。

(5) 与时俱进特色。从教材内容到例题、习题,教材都尽可能地用最新科技成果去组织传统教学内容,并在教材各章节,列出了大量相关的最新科技文献,力图使学生在基础课程的学

习过程中了解物理学及相关科技发展的前沿动态。

令人欣慰的是,近年来,国内许多高校先后实施了院系调整、学科建设与精品课程建设等系列改革,这标志着高等教育改革进入了一个实质性改革的新阶段。编者在大学物理、大学物理实验、大学物理相关的选修课程等方面进行了大量的教改尝试,取得了一些教学成果,也获得了许多教学经验,这些教材融入了他们这些年来的教学经验和成果,希望能为学习和教授该课的读者提供一些帮助。

刘盛纲
2005年6月

前 言

《大学物理》是为理工科大学生编写的物理课程教材,内容覆盖了“教育部高等学校非数理专业物理基础课程教学指导分委员会”制定的基本要求,并以此为基本内容。为满足不同层次教学的需要,教材也包含了一些提高和扩展性内容(用“*”标记),教学过程中舍去它们不影响内容的连续性与系统性。

在教材编写指导思想上,力求用基本的知识点为载体,展现人类认知物理世界的动态与发展过程,希望学生在学习过程中,掌握课程的知识与方法结构,逐步形成自己的“学科意识”。在力学部分,将物体的机械运动分为质点运动、刚体转动、振动与波动四种基本运动形式,而每种基本运动形式的研究分为运动学与动力学两个部分;教材将四种基本运动的运动学部分集中在一章里讲述,希望学生掌握物理模型抽象、参量引入、特殊运动规律研究、运动的合成与分解、运动的变换规律等运动学基本内容结构及研究方法;在每种运动的动力学部分,教材从瞬时效应、时间累积和空间累积三个侧面展开教学内容,目的是让学生掌握动力学研究的基本模式。在电磁学部分,补充了麦克斯韦方程组的微分形式,以便使学生掌握用梯度、散度和旋度研究“场”的基本方法。热学按热力学与统计物理初步编排,重点放在统计物理的基本概念与统计规律上。通过相位差与光程差关系的讲解,得到波动光学关于干涉、衍射明、暗条纹的计算公式,使课时得以一定幅度缩减。近代物理侧重介绍基本观念、概念的发生发展,也适当加深了数学要求,尽可能使学生形成比较完整和动态的近代物理知识与方法结构,也能够解决一些典型的基本问题,为后续相关课程的深入学习奠定基础。

很多现代高新技术或自然学科理论,都以物理学为基础,因此,大学物理与现代前沿科技有广泛而紧密的联系。为拓展学生视野,使学生形成动态、发展的自然观和科学观,教材在每章后面,都安排了前沿“窗口”性质的阅读材料。在一些章节中,还插入了一些文献或安排了小课题研究,希望对激发学生兴趣,培养学生的科学素质有所帮助。

教材分上、下两册:上册包含力学、热力学与统计物理初步,下册包含电磁学、光学和量子论。与教材配套的还有《大学物理学习指导》和电子教案(请登录 <http://www.hxedu.com.cn> 下载或发邮件至 unicode@phei.com.cn 索取)。

参与教材编写的编者有杨宏春(第1~5章)、孙云卿(第10~12章)、张涛(第13~15章)、雷雨(第6章、第16~19章)、许春青(第7~9章)、李华(软物质教材简介)。

本教材是“电子科技大学精品教材”建设项目之一,在编写过程中,得到了电子科技大学教务处、物理电子学院和大学物理教研室的大力支持,也得到了兄弟院校一些同事的帮助,刘盛刚院士很关心教材编写的指导思想,并给予了热情指导,在此我们一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免有些疏漏甚至错误之处,恳请广大师生指正。

编 者
2005年5月

目 录

第 1 篇 力 学

第 1 章 运动学	3
1.1 参考系和坐标系	3
1.1.1 绝对运动与相对静止相统一	3
1.1.2 参考系和坐标系	4
1.2 几种典型机械运动及其理想模型	6
1.2.1 典型的机械运动形式	6
1.2.2 机械运动的典型理想模型	6
1.3 描述一般曲线运动的线参量与角参量	8
1.3.1 时间参量	9
1.3.2 描述一般曲线运动的线参量	11
1.3.3 描述刚体转动的角参量	18
1.3.4 对一般曲线运动描述的应用举例	19
1.4 振动与波动的描述	20
1.4.1 描述简谐振动的物理参量	21
1.4.2 描述机械波的物理参量	24
1.5 运动的合成与分解	30
1.5.1 运动叠加原理	30
1.5.2 简谐振动的合成	31
1.5.3 振动的频谱分析	35
1.5.4 波的干涉	39
1.5.5 驻波	41
1.6 相对运动	46
1.6.1 相对运动问题与对称性原理	46
1.6.2 伽利略变换	47
1.6.3 多普勒效应	50
阅读材料 A	54
思考题	59
习题 1	60
第 2 章 质点动力学	61
2.1 力对质点的瞬时效应——牛顿定律	61
2.1.1 牛顿三定律	61

2.1.2 几种常见的力	64
2.1.3 牛顿定律的应用	66
2.1.4 惯性系和非惯性参照系	69
2.2 力对物体的时间积累效应——动量守恒定律	76
2.2.1 单质点的动量定理	76
2.2.2 质点系的动量定理	78
2.2.3 动量定理的应用	79
2.2.4 质心、质心定理和质心坐标系	85
2.2.5 火箭飞行问题	88
2.3 力对物体的空间效应——能量守恒定律	91
2.3.1 质点的功与能	91
2.3.2 质点系的功能原理	99
阅读材料 B	106
思考题	109
习题 2	113
第 3 章 刚体力学	117
3.1 力矩的瞬时效应——刚体的转动定理	117
3.1.1 绕固定转轴的刚体转动定理	117
3.1.2 刚体转动惯量的计算	119
3.1.3 刚体转动定理的应用	122
3.2 力矩的时间累积效应——刚体的角动量定理	124
3.2.1 冲量矩	124
3.2.2 角动量与角动量定理	125
3.2.3 刚体的角动量守恒定律	126
3.2.4 角动量定理、角动量守恒定律的应用	127
3.3 力矩的空间累积效应——刚体的机械能守恒定律	132
3.3.1 力矩的功	133
3.3.2 刚体的功能原理	133
3.3.3 刚体功能原理的应用	135
阅读材料 C	138
思考题	143
习题 3	144
第 4 章 振动学基础	147
4.1 简谐振动的动力学方程	147
4.1.1 简谐振动的动力学方程	147
4.1.2 三种典型简谐振动的动力学方程	148
4.2 简谐振动的能量及与动力学方程的关系	150
4.2.1 简谐振动的能量	150

4.2.2 振动能量与动力学方程的关系	151
4.3 阻尼振动、受迫振动、共振	153
4.3.1 阻尼振动	153
4.3.2 受迫振动	155
4.3.3 共振	156
阅读材料 D	159
思考题	161
习题 4	162
第 5 章 波动学基础	165
5.1 波动的动力学方程	165
5.1.1 波动方程的建立	165
5.1.2 波速	169
5.2 波动的能量和能流	172
5.2.1 简谐波的能量	172
5.2.2 简谐波的能量密度与能流密度(波的强度)	173
阅读材料 E	176
思考题	178
习题 5	181
第 6 章 狭义相对论	184
6.1 相对论产生的历史背景	184
6.1.1 经典力学的基本原理	184
6.1.2 经典电磁理论的基本原理	187
6.1.3 经典力学与经典电磁学的冲突——关于光速的困难	187
6.1.4 相对论的产生	188
6.2 狭义相对论的基本假设	189
6.3 洛伦兹变换	189
6.4 相对论时空观	193
6.4.1 运动时钟变慢(时钟延缓效应)	194
6.4.2 运动直尺收缩	195
6.4.3 同时的相对性	195
6.5 相对论的速度合成	198
6.6 相对论动力学基础	199
6.6.1 相对论中的质量和动量	199
6.6.2 相对论的动力学方程	201
6.6.3 相对论中的能量	201
6.6.4 相对论的能量—动量关系	202
6.7 广义相对论简介	203

6.7.1 惯性参考系问题	203
6.7.2 引力问题	203
6.7.3 等效原理	203
6.7.4 广义相对性原理	204
6.7.5 爱因斯坦引力场方程	204
6.7.6 广义相对论中质点的运动规律	205
6.7.7 广义相对论效应及实验验证	206
阅读材料 F	208
思考题	209
习题 6	210

第 2 篇 热力学与统计物理初步

第 7 章 统计物理初步	213
7.1 热力学系统与平衡态	213
7.1.1 热力学系统	213
7.1.2 平衡态	213
7.1.3 状态参量	214
7.2 理想气体的微观模型、压强和温度的统计意义	214
7.2.1 理想气体	214
7.2.2 理想气体的微观模型	214
7.2.3 理想气体的压强公式	216
7.2.4 温度的统计意义	217
7.3 能量按自由度均分定理	218
7.3.1 分子运动的自由度	218
7.3.2 能量按自由度均分定理	219
7.3.3 理想气体的内能	220
7.4 麦克斯韦气体分子速率分布	222
7.4.1 分子速率分布函数	222
7.4.2 麦克斯韦速率分布	223
7.4.3 分子速率分布的实验测量	224
7.5 玻耳兹曼分布定律	225
7.5.1 玻耳兹曼分布律	226
7.5.2 重力场中粒子按高度的分布	227
* 7.6 量子统计分布简介	228
阅读材料 G	229
思考题	235
习题 7	236
第 8 章 热力学	238

8.1 热力学第一定律与常见的热力学过程	238
8.1.1 热力学第一定律	238
8.1.2 热容量	241
8.1.3 热力学第一定律应用于理想气体	244
8.2 循环过程和卡诺循环	251
8.2.1 循环过程	251
8.2.2 卡诺循环	253
8.3 热力学第二定律与不可逆过程	257
8.3.1 开尔文表述	257
8.3.2 克劳修斯表述	257
8.3.3 两种表述的等价性	258
8.3.4 可逆过程和不可逆过程	259
8.3.5 卡诺定理	260
8.4 熵与熵增加原理	262
8.4.1 态函数——熵	262
8.4.2 熵增加原理	263
8.5 热力学第二定律的统计意义	266
8.5.1 相空间、宏观态与微观态	266
8.5.2 等几率假设和热力学几率	268
8.5.3 玻耳兹曼公式	268
8.5.4 热力学第二定律的适用范围	268
阅读材料 H	269
思考题	275
习题 8	277
第 9 章 气体和凝聚态	279
9.1 范德瓦耳斯方程	279
9.1.1 分子固有体积修正	279
9.1.2 分子吸引力修正	280
9.1.3 范德瓦耳斯方程	280
9.1.4 实际气体的内能	280
9.2 气体内的输运过程	282
9.2.1 气体分子的平均自由程	282
9.2.2 热传导现象	283
9.2.3 内摩擦现象	284
9.2.4 扩散现象	285
9.3 固体和液体的热性质	285
9.3.1 固体热容量	286
9.3.2 固体的膨胀	287

9.3.3 热传导和扩散	287
9.3.4 液体分子的热运动	288
9.4 热学的计算模拟举例	289
9.4.1 精确计算分子数及分子概率	289
9.4.2 绘制准确的卡诺循环的 P - V 图	290
9.4.3 求解范德瓦耳斯方程	291
阅读材料 I	293
思考题	300
习题 9	301

第1篇

力学

PHYSICS

The background features a large, faint sphere with a grid of lines. In the foreground, there are several 3D cubes of varying sizes. A vertical dashed line runs through the center of the largest cube on the right. The word 'PHYSICS' is printed in a simple, sans-serif font below the cubes.

第1章讨论力学中的运动学部分,运动学研究目标是描述质点的运动状态,而不去寻求物体为什么具有这种运动状态的原因。从第2章开始,我们研究力学中的动力学部分,动力学的研究目标是寻求物体具有某种运动状态及这种运动状态发生改变的原因。

与运动学的研究方案类似,人们首先将物体的机械运动形式分为质点运动、刚体转动、振动和波动四种基本形式,并对每种基本运动形式进行动力学研究,而对更为一般的复杂运动的动力学问题则用基本运动的动力学合成的办法来实现。为使动力学部分的内容在结构上更为清晰,我们对每一种基本运动的动力学问题都用单独一章来讲述,即从第2章到第5章分别为质点动力学、刚体动力学、振动动力学和波动动力学。

本书对每种基本运动形式的动力学问题研究,都从三个不同的侧面或角度展开,即研究每种基本运动的瞬时效应、时间累积效应和空间累积效应。瞬时效应的基本思路是:跟踪物体的运动过程,对运动过程中的任意瞬时进行动力学分析,建立动力学微分方程。时间累积效应的基本思路是:考察改变物体运动状态的内因与外因对物体作用一段时间之后,对物体运动状态的改变状况,建立物体运动状态在不同时间状态间的变化规律。空间累积效应的基本思路是:考察改变物体运动状态的内因与外因对物体作用一段空间距离之后,对物体运动状态的改变状况,建立物体运动状态在不同空间状态间的变化规律。原则上,动力学研究的三个侧面或角度都可以得到物体运动的规律,但是在不同情况下,用不同效应解决实际问题的繁简程度是不一样的。瞬时效应以研究物体中间运动过程为基础来研究物体运动规律,因此中间过程的复杂程度决定了它解决实际问题的繁简程度;时间累积效应和空间累积效应避开对物体中间过程的跟踪研究,转而通过研究始、末两个状态间的变化状况来获得物体运动规律,因此两个状态的运动参量是否容易确定决定了累积效应解决实际问题的难易程度。更一般的情况是将三种效应结合起来实际问题,往往最为方便。

从逻辑上讲,研究动力学问题的每一个侧面都需要解决3个基本问题:①保持或改变物体运动状态的原因是什么,包括保持、改变物体运动状态的内因和外因;②外因与内因改变了物体的什么运动状态,例如,力是物体获得加速度的原因,力矩是刚体获得角加速度的原因,冲量是物体动量改变的原因,冲量矩是刚体角动量改变的原因,功是物体动能和势能改变的原因……③如何建立改变物体运动状态的原因与被改变的运动状态参量之间的数量关系,即动力学规律,包括普遍情况下的动力学规律与特殊情况下的守恒定律等。

第 1 章 运 动 学

运动学的研究任务是描述物体的运动状态,它不讨论物体为什么具有某种运动状态及这种运动状态发生改变的原因。

根据运动学的研究目标可知,要建立运动学的理论体系,需要解决以下 4 个基本问题:①运动是可以描述的吗?②如何描述物体的运动?③运动学理论的实际应用;④不同观察者对同一物体运动描述所得结果之间的关系。

运动学理论的建立过程就是上述 4 个基本问题的解决过程,这 4 个基本问题的研究成果构成了运动学的理论体系。本章围绕这 4 个基本问题的研究展开运动学的基本内容。

考虑到普遍的教材都以独立章节分别讨论平动、转动、振动和波动 4 种基本机械运动形式的描述,本书在运动学理论部分尝试将这 4 种基本机械运动形式的描述集中到一章当中,希望能更系统地展现运动学的研究方法 with 理论体系的逻辑构架。

1.1 参考系和坐标系

1.1.1 绝对运动与相对静止相统一

辩证唯物主义认为,绝对运动与相对静止是辩证统一的关系,只有承认事物的相对静止,才能认识事物的绝对运动;只有认识了相对静止,才能理解事物的多样性;只有承认相对静止,才能认识和利用不同事物。虽然在哲学中,“运动”被理解为物质的固有属性和物质存在的方式,包括了宇宙中发生的一切变化和过程,是一个非常基本的哲学范畴,但它也包含了物理学研究的机械运动形式。也就是说,在研究物体的机械运动时,必须承认机械运动的相对静止,否则就无法认识机械运动,无法认识机械运动的多样性,更达不到利用机械运动规律为人类服务的目的。

古希腊哲学家赫拉克利特说过:“人不能两次踏进同一条河流。”其含义是:一方面,河流的运动是绝对的,永恒的;另一方面,河流的运动也存在相对静止,即人在每次踏进的河流是同一条河流。只有承认人每次踏进的河流是同一条河流,人们才可能去描述该时刻河流的运动状态,才可能通过研究河流两次运动状态之间的区别,去认识河流的运动。如果夸大运动的绝对性,否认相对静止的存在,如克拉底鲁所说:“人不能同一次踏进同一条河流。”那么物体的机械运动将变成瞬息万变、不可捉摸,人们就不可能去描述河流的运动状态。

可见,只有承认物体的机械运动存在相对静止这个基本自然观念,人们才可能去认识物体的机械运动,而且是通过相对静止去认识物体的运动状态。

1.1.2 参考系和坐标系

1. 参考系与坐标系的基本概念

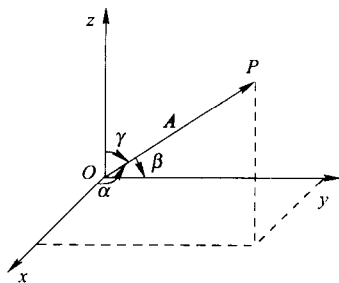
为描述一个物体的运动而被选作参考的另一物体或保持相对静止的物体系统,称为参考系。被选作参考系的物体必须能够用来描述物体的运动,包括物体的空间位置和方位。通常,以实物形式存在的物体和场都可以被选为参考系。为了研究问题的方便,参考系可以任意选择,选择不同的参考系可以得到物体运动参量的不同数值,但不同参考系下得到的物体运动规律必须是相同的,这称为物理规律的对称性。按是否满足牛顿运动定律,参考系分为惯性参考系和非惯性参考系,满足牛顿三大定律的参考系称为惯性参考系,反之称为非惯性参考系。

固定于参考系之上的数学坐标系,称为坐标系。坐标系是参考系的数学抽象,引入坐标系的目的是为了更方便对物体运动的定量化描述。常见的坐标系有直角坐标系(即笛卡儿坐标系)、极坐标系、自然坐标系、球坐标系与柱坐标系等,根据物体不同的运动特点,通常需要选择不同类型的坐标系。

2. 几种典型的坐标系

(1) 直角坐标系

直角坐标系也称为笛卡儿坐标系,它由三条共点且互相垂直的射线组成(如图 1.1.1 所示);



三条射线的交点 O 称为坐标系的原点,每条射线分别称为坐标系的 x 、 y 、 z 坐标轴;三个坐标轴的方向分别由三个单位常矢量 i 、 j 、 k 表示,它们按顺序满足右手螺旋关系。如果物体的运动局限在一个平面内运动,通常用二维直角坐标系(只有两个独立坐标或独立参量)来定量描述其运动情况。

在直角坐标系中,任意矢量 A 可以表示为

$$A = A_x i + A_y j + A_z k \quad (1.1.1)$$

矢量的大小或模表示为

$$|A| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (1.1.2)$$

矢量的方向也可以由它与三个坐标轴之间的夹角(α 、 β 、 γ)来表示,因此这三个夹角的余弦也称为矢量的方向余弦。在直角坐标系中,方向余弦满足关系

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (1.1.3)$$

在方向余弦中,只有两个参量是独立的。

在直角坐标系中,坐标轴的单位矢量是常矢量,满足

$$\frac{di}{dt} = 0, \frac{dj}{dt} = 0, \frac{dk}{dt} = 0 \quad (1.1.4)$$

(2) 自然坐标系

如图 1.1.2 所示,当质点运动轨迹为已知时,在运动轨迹上任取一点 O 为坐标原点,用质点距离原点的轨道长度 s 来确定质点任意时刻的位置,以轨迹切向和法向的单位矢量(τ 、 n)

作为其独立的坐标方向,这样的坐标系称为自然坐标系。 s 称为自然坐标。以后将会看到,用自然坐标来描述一般曲线运动是比较方便的。

自然坐标系将矢量分解到法向和切向进行研究,法向分量与轨道的曲率有关。设轨道上点 P_1 和邻近点 P_2 切线之间的夹角为 $\Delta\theta$,两点间的路程为 Δs ,则 P_1 点处的曲率为

$$k = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta s} = \frac{d\theta}{ds} \quad (1.1.5)$$

P_1 点处的曲率半径为

$$\rho \equiv \frac{1}{k} = \frac{ds}{d\theta} \quad (1.1.6)$$

过轨道上一点 P_1 ,可以作很多与轨道相切的圆,如果圆的曲率与 P_1 的曲率半径相等,称这个圆为 P_1 点处的曲率圆。曲率和曲率半径反映了曲线的弯曲程度。

在自然坐标系中,任意矢量 $\mathbf{A}$ 可以表示为

$$\mathbf{A} = A_n \mathbf{n} + A_\tau \boldsymbol{\tau} \quad (1.1.7)$$

随着物体的运动,单位矢量 $\mathbf{n}$ 和 $\boldsymbol{\tau}$ 的方向不断地发生变化:法向单位矢量 $\mathbf{n}$ 始终指向曲率圆的圆心,切向单位矢量 $\boldsymbol{\tau}$ 在无限小时间范围内的变化率可以表示为(如图 1.1.3 所示)

$$\frac{d\boldsymbol{\tau}}{dt} = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{\Delta\boldsymbol{\tau}}{\Delta t} \mathbf{n} = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \mathbf{n} = \frac{d\theta}{dt} \mathbf{n} \quad (1.1.8)$$

图 1.1.3 切向单位矢量的变化

(3) 极坐标系

在一固定直线上选取一点 O 作为坐标原点,以 O 点为端点作射线,则由射线、原点和固定直线构成的坐标系称为极坐标系(如图 1.1.4 所示),通常称射线为极轴。在极坐标系中,用 (ρ, θ) 来确定一点的位置, ρ 表示点距原点的距离, θ 表示极轴与固定直线间的夹角。任意矢量通常分解为沿极轴(径向)和与极轴垂直(切向)的两个分矢量,这两个方向的单位矢量通常用 $\mathbf{r}_0$ 和 $\boldsymbol{\tau}$ 表示,即

$$\mathbf{A} = A_r \mathbf{r}_0 + A_\tau \boldsymbol{\tau} \quad (1.1.9)$$

径向单位矢量始终在极轴上,方向由原点指向待描述点,切向单位矢量 $\boldsymbol{\tau}$ 始终与径向单位矢量垂直,方向与物体运动方向一致。在无限小时间范围内,矢量 $\mathbf{A}$ 的变化率可表示为(如图 1.1.5 所示)

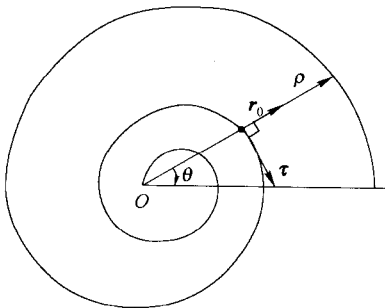


图 1.1.4 极坐标系

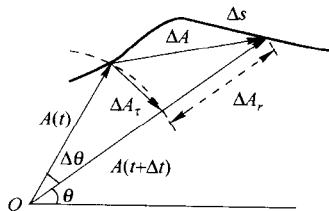


图 1.1.5 矢量变化率