



高等院校物理教材
Textbook in Physics for Higher Education

大学物理 (上)

陈治 陈祖刚 刘志刚 编著

清华大学出版社



高等院校物理教材
Textbook in Physics for Higher Education

大学物理 (上)

陈治 陈祖刚 刘志刚 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书上册包括“牛顿力学与狭义相对论力学基础”、“热学”、“电磁学”3篇,下册包括“振动与波动”、“波动光学”和“量子物理学基础”3篇,总共26章。将理工学科大学物理课程教学基本要求的全部A类内容和绝大多数B类内容,按认知规律有序整合,构建了基础物理的知识网络。本书对物理学的基本概念、基本理论作了比较系统全面的讲述;特别注重将科学方法(模型、演绎、归纳、系统、类比)渗透全书,成为统率所有素材的灵魂;主动链接高等数学,正面解决学习物理的困难;取材联系实际应用,开拓视野;正文中提供了丰富的例题,有助自学。

本书可作为理工学科大学物理教材,也可以作为中学物理教师的教学参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.上/陈治,陈祖刚,刘志刚编著. —北京:清华大学出版社,2007.6
(高等院校物理教材)

ISBN 978-7-302-14925-5

I. 大… II. ①陈… ②陈… ③刘… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第040397号

责任编辑:朱红莲

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

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

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:34.75

字 数:797千字

版 次:2007年6月第1版

印 次:2007年6月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:42.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:009692-01



学生是通过物理教材与前辈和当代物理学家展开对话的,教材编写者当是坐在学生一边,尽可能索取物理学的精华,认真重组。教材不等同于授课,其系统性、完整性与条理性是方便读者阅读与自学的前提。作者希望赋予教材的功能是:带领读者由浅入深系统地学习大学物理最基本的内容和科学方法。为此,理清思路,构建合理的知识架构,让读者学懂,而不是含糊其辞似是而非,自然成为编写者追求的目标。全书采用了正面揭示问题,深入探讨概念,扣紧主线前后呼应的编写方法。在物理学科内部,理顺脉络不绕弯;概念和规律,交待清楚不含糊;遇到难点,铺路搭桥不回避。在与其他学科重叠区域,互补链接不推卸不悬空。描述物理图像、使用物理模型力求明确,不生歧义。展开课程内容尽量贴近现实生活,抓住常识与科学概念之间的冲突作为深化认识、拓展视野的契机,保持基础科学并不高深莫测的本来形象。

学生理解物理概念,掌握物理规律不可能一步到位,发疑和释疑必将充满学习之路。这里需要提醒初学大学物理的学生,对高中建立的概念和方法要有“升级换代”的精神准备。首当其冲的力学,从一个较高的起点出发,就带来较宽的视角,学生可以感觉到,并不陌生的物理概念背后有很多问题需要再思考。一时出现理解不透、抓不住要领的状态其实是学习物理过程的正常心理体验。

诚如李政道教授所说:“真正物理学家其研究的目的,就是要把所有形形色色,似乎不相关的自然现象都归纳成同一组基础原理,都能融会贯通。这就是物理之精华。”物理学逻辑结构的特点是具有统一性,其各分支学科之间有着内在的联系,有着共同的理论基础。表面看来无关的事物在物理学中可以找到内在关联,不同领域发生的现象可能有完全相同的数学表述。物理课程的深刻内涵与深远意义就源于物理学的普遍性和统一性,如匀速圆周运动和简谐振动的关系,热机效率与热源温度的关系,无序性与态函数熵的关系,时间空间对称性与守恒定律的关系,质量与能量的关系,电与磁的关系,波与粒子的关系,牛顿力学与相对论的关系或量子力学的关系,以致臭氧层破坏与氟利昂使用的关系等。发现这些关联的科学方法与过程,带领着人类“思维向客体永恒地、无止境地接近”。的确如萨根所言:“理解世界是一种享受,没有被鼓励着去积极思考的人是不幸的。”物理学给学习者不仅提供了无限的想象空间,也提供了无数可深入研究的发展方向。激发学生对物理学的浓厚兴趣,就有益于他们投入到科学工作中来。基础知识一旦与学生的潜能和悟性相结合,必然内化为学生的科学文化素养,各种能力也将产生于这片沃土,为进入新的更深入的领域学习和工作奠定了厚实的基础。

物理科学有着震撼心灵的强大的知识资源,物理课程可以有选择地把它艺术地展现出来。大学物理教材应当是选材共性与结构个性的统一,不同作者针对心目中的不同读者群可能产生的问题,对物理学基础内容构造不尽相同的简化模型。这个模型应当体现物理科学统一性的基本特点,具有与物理科学一致的逻辑结构,使读者得到更多的启迪。本书提供一些与主线有松散联系的阅读材料,力图拉近物理学与工程技术的距离,展示物理学对人类文明、社会进步产生的巨大推动作用。

物理学的定量本质,决定了它曾经是很多数学问题和方法产生的根源。这个紧密结合过程在大学基础课阶段,通过“微积分”和“大学物理”两门课程得以再现。整合这两门基础课,凸显呼应加强链接,对于降低课程难度,提升课程水平,实现物理与数学双向受惠是必要的并且是可能的,对教与学都大有裨益。本书力图成为工科数学物理平台的组成部分,在教学内容本质上重叠的区域拆除人为的藩篱,友好沟通,努力将科学方法的共同点及其相互关联加以阐明,克服分离趋向,在大基础上修建跨学科绿色通道。

本书由“牛顿力学与狭义相对论力学基础”、“热学”、“电磁学”、“振动与波动”、“波动光学”和“量子物理学基础”6篇内容组成。在力学中,参照系问题实际是绵延很长的“暗礁”,把它搞清楚,理解相对论就不困难了。守恒定律面对的是质点系统,所以质点系动力学是力学的重点,刚体作为一个特殊的质点组可以顺理成章地解决。在热学篇,微观的统计方法和唯象的热力学方法是交织阐述的,充分利用理想气体这个物理模型,展示了热现象的本质及一般规律。其重点与难点是统计规律性与热力学第二定律以及熵的概念。电磁学篇中既有实验规律描述又有提炼概念、提出假说、场方程归纳的理论过程,所以对电磁场运动规律的认识是在一个视点不断上升的过程中进行的。形成场的观念,理解场和实物的相互作用,理解场方程,理解场与路的关系,对初学者是难点,然而,有电学和磁学两个可类比的循环,一旦突破对电磁运动规律的认识就能上升到麦克斯韦方程组的高度。振动与波动的核心是研究周期性过程,振动讲时间的周期性,波动涉及时间空间双重周期性。这部分的概念与规律都从力学模型引出,然后利用类比的方法推向电磁与光。在学过电磁学以后讲波动,应当立足于波场,但需要明确使用直观的物理模型,本书抓住张紧弦线这一模型贯穿始终,从无限长、半无限长到有限长,把行波、驻波的运动学与动力学特征顺序引出。作为麦克斯韦方程组应用和光电磁本性的铺垫,本书有一章专门讨论电磁波。波动光学以同时介绍惠更斯原理和费马原理开篇,在此基础上给出光的折射定律,使几何光学的成像理论成为波动光学的一个组成部分,而后光的偏振与电磁波的横波性质相呼应。干涉概念在本书中是在波动光学中才出现的,因为掌握了光学干涉,机械波的干涉就易如反掌。衍射也如此。而干涉、衍射紧连着量子物理学中粒子的波动性,它们是近代物理与经典物理之间的一个重要的结合点,通过电子衍射实验把读者带入全新的量子世界。本书仅介绍了量子力学最基本的概念,但是文字叙述得比较详细,使读者能够初步领略微观世界物理图像的描述方法及其规律。

解答一定数量例题和习题是学好物理基础理论的条件之一。本书将一部分与基本概念、基本方法有较强关联的习题转化为例题置入相关的章节,为自学和深入理解提供较多的范例。部分习题增加了多层设问和提示,使其具有启发性,适当降低了习题难度,起到举一反三的作用。

阅读材料选自于多种科学文献与专家学者的报告,改编后与广大读者分享,以培养学生了解科技前沿的习惯和兴趣。由于多方取材,只能在此一并向原作者表示衷心的感谢与敬意。

书中标有“*”号的部分章节为选学内容,教师可以选择课上讲解,要求学生自学或者跳过,不影响后续内容的学习。

本书作者有融会百家之长的初衷,有把物理学讲得比较明白的夙愿。二十余年从名师名著中汲取营养,消化吸收,屡修屡改,并不间断地实践于讲台,逐渐形成一个比较紧凑的体系和独特的风格。然而,受作者学识能力限制,偏颇不当之处在所难免,希望得到同行批评指正!

作者特别感激清华大学出版社的各位编辑,他们以锐利的目光指出了原稿中存在的诸多问题与纰漏,帮助作者纠正,使作者获益匪浅。

作者衷心感谢张三慧、吴思诚、李申生、陆果诸位教授的指导与鼓励,衷心感谢张丹海、张国忠两位教授的帮助。作者深深怀念已经去世的梁铁铮教授,他生前与作者进行过大量有益的讨论。

陈 治

2006年2月



CONTENTS

第 1 篇 牛顿力学与狭义相对论力学基础

第 1 章 质点运动学	3
1.1 空间 时间 模型与质点 参考系	3
1.2 质点运动学的基本概念	7
1.3 运动学问题举例	10
1.4 自然坐标 加速度的本性方程	16
1.5 平动参考系变换	18
习题	21
第 2 章 牛顿运动定律	25
2.1 牛顿运动定律	25
2.2 力学中常见的力	28
2.3 牛顿定律应用举例	37
2.4 非惯性参考系 惯性力	46
习题	50
第 3 章 运动定理与守恒定律	56
3.1 功的概念 动能定理	56
3.2 保守力 系统的势能	64
3.3 质点系的功能定理 机械能守恒	70
3.4 质点和质点系的动量定理 * 变质量质点动力学	78
3.5 质心运动定理 动量守恒定律 * 质心参考系	91
3.6 碰撞	102
3.7 角动量 力矩 角动量定理	113
3.8 质点系的角动量定理 角动量守恒定律 物体的平衡条件	116
习题	127

第 4 章 刚体的转动	131
4.1 刚体定轴转动运动学 自由度	131
4.2 刚体定轴转动动力学 转动惯量	134
4.3 刚体的平面运动——刚体平动与转动的结合	149
习题	162
第 5 章 狭义相对论力学基础	168
5.1 对牛顿力学的偏离	169
5.2 狭义相对论的两个基本原理	172
5.3 时间延缓与长度收缩	173
5.4 时钟整步与同时性的相对性	178
5.5 洛伦兹变换	181
5.6 相对论速度变换法则	186
5.7 狭义相对论基本原理的再认识	187
5.8 相对论动力学	189
5.9 狭义相对论的意义	198
习题	199

第 2 篇 热 学

第 6 章 温度 内能 热量与功	205
6.1 热力学系统的描述	205
6.2 热力学第零定律 温度	207
6.3 热量与功	210
6.4 内能 热力学第一定律	212
6.5 体积变化的功	215
习题	217
第 7 章 气体动理论	218
7.1 理想气体的宏观描述与微观描述	218
7.2 统计规律性	222
7.3 理想气体压强和温度的统计意义	226
7.4 能量均分定理 理想气体的内能 摩尔热容	230
7.5 气体分子的速度和速率分布	237
7.6 玻尔兹曼密度分布律	249
7.7 气体分子的相互碰撞 平均自由程	251

习题	256
第 8 章 循环 热力学第二定律与熵	259
8.1 理想气体的准静态过程	259
8.2 热量与功的相互转换 循环过程的效率	265
8.3 可逆卡诺循环	267
8.4 制冷循环 热泵	270
8.5 技术上的循环	272
8.6 热力学第二定律的经典表述 自然过程的不可逆性	276
8.7 卡诺定理	279
8.8 熵 热力学第二定律的数学表述	282
8.9 热力学第二定律的统计意义 熵与无序性	288
习题	298

第 3 篇 电 磁 学

第 9 章 真空中的静电场	305
9.1 电荷 电荷守恒定律 库仑定律	305
9.2 电场 电场强度矢量 场强叠加原理	308
9.3 数学补充	317
9.4 电通量 高斯定理	322
9.5 环路定理 电势	330
9.6 电场的形象描述	337
习题	342
第 10 章 静电场中的导体与电介质	346
10.1 静电场中的导体	346
10.2 电容与电容器	357
10.3 电场的能量	363
10.4 静电场中的电介质	369
习题	384
第 11 章 电流与电场	390
11.1 金属导电的经典微观图像	390
11.2 恒定电流与恒定电场	391
11.3 欧姆定律 焦耳定律	394
11.4 电源及其电动势	401

11.5	恒定电路 基尔霍夫方程组	405
11.6	RC 电路的暂态过程	410
11.7	温差电动势	414
	习题	420
第 12 章	恒定磁场	424
12.1	磁感应强度矢量 洛伦兹力 霍耳效应	424
12.2	磁场对载流导线的作用 载流线圈的磁矩	432
12.3	真空中恒定磁场的场方程	438
12.4	电流的磁场 毕奥-萨伐尔定律	445
	习题	451
第 13 章	电磁感应	457
13.1	统一“电”和“磁”的道路	457
13.2	电磁感应定律	459
13.3	涡旋电场	469
13.4	互感与自感	475
13.5	LR 电路的暂态过程 磁场的能量	479
	习题	486
第 14 章	物质的磁性	491
14.1	介质磁化的基本理论	491
14.2	物质的磁性	496
14.3	铁磁性	508
14.4	磁路与磁路定理	514
	习题	517
第 15 章	麦克斯韦方程组	519
15.1	位移电流	519
15.2	麦克斯韦方程组的积分形式	522
	习题	524
	习题答案	526

第 1 篇 牛顿力学与狭义 相对论力学基础

最常见、最明显的自然现象就是机械运动。一切可以想象的过程都能追溯到某些物体的位置变化。而无论是天体还是电子,物体的运动离不开它与周围环境的相互作用。从本质上讲,物理学家和工程师所做的事就是利用相互作用,让物体或粒子产生某种安排好的运动。例如,显像管中的电子束,必须按某种方式扫描荧光屏,才能产生需要的图像。只不过物理学家和工程师的任务不同,前者是发现运动所服从的规律,后者是按规律做出设计,产生有用的运动。研究机械运动及其规律的学科是力学。牛顿(Newton)力学是以牛顿运动定律为核心的关于力与运动的理论。

1.1 空间 时间 模型与质点 参考系

运动总是在时间和空间中进行的。人类的“时空观念”，即人类对时空的认识，理当然是力学的第一课题。但是，空间和时间的本质是个“一言难尽”的深刻问题。空间和时间的概念既是“最重要和最富有成果的”，也是很难“给予确切意义的”。人类对时空的认识，是科学技术发展阶段的产物。从牛顿的绝对时空观^①，到爱因斯坦(Einstein)的相对论时空观^②，到正在发展起来的新宇宙学的宇宙时空观，大体经历了三个不同的历史发展阶段。人类时空观念的发展是一个无限的认识过程，每进入一个新的物质层次，就会发现新的时空特征，必然会有新的时空观念产生。

那么，在学习牛顿力学时我们应当如何认识空间和时间呢？

1.1.1 关于空间

空间表征了物质运动的广延。在物理事件的相互关系中，空间反映了事件发生的位置上的秩序。

空间具有对称性^③。按照现代观点，一种对称性必然联系着一条守恒定律。

空间的对称性是指：

① 牛顿力学从事物的外部联系上研究机械运动，不仅没有把物质、运动、时间、空间作为一个不可分割的整体来考虑，而且把它们从不可分割的联系中抽象地分析出来，显示各自的独立性。牛顿把空间看作能够脱离物质而独立存在的虚空，是空洞的容器，无广延之物的广延。物体占据空间并在其中运动，空间起物理事件舞台的作用。时间被看作绝对均匀持续的流逝，本身独立存在，不与外界任何现象有关系。牛顿时空观肯定了时空的客观实在性，揭示了空间和时间相互独立的一个侧面。这种分化，从认识过程来讲，是必经之途，否则无以表述机械运动的规律。牛顿时空观的建立，促使力学形成了公理化的演绎体系，并从逻辑上消除了自身的矛盾。牛顿时空观的根本不足在于，它分别赋予了空间和时间以绝对的性质。牛顿的绝对时空作为一种思维抽象，在一定局域范围内具有其合理性，超越这个范围将导致谬误。这个局域范围就是宏观低速的机械运动。在这个范围内，牛顿观念是机械运动规律最简明的表述。无论微观力学现象还是宇观力学现象，一旦它们接近宏观力学条件时，都会导致牛顿力学的经典结论。

② 相对论时空观的产生，是人类时空观上一次伟大的革命。爱因斯坦指出：“空间—时间未必能看作是可以脱离物质世界的真实客体而独立存在的东西，并不是物体存在于空间中，而是这些物体具有空间广延性。”“空间和时间融合成为一个均匀的四维连续区。”相对论在与物质、运动不可分割的联系中认识时空，这就把牛顿的绝对时空还复到运动着的物质世界。空间、时间是物质存在的形式，没有脱离运动物质的时空。狭义相对论把时空的测量和一种基本的物质运动——光的传播联系在一起，时空的绝对性被规律的绝对性和光速的绝对性所取代。尽管有一系列科学实验可以成为相对论时空观的证据，但它仍然只反映了一定物质层次的时空特征。

③ 对称：指事物或者运动以一定的中介进行某种变换时，某些特性仍然保持不变。

空间的均匀性——平移的不变性——导致动量守恒。把图形从一个位置平移到另一个位置,它的大小、几何形状不变。当物体只发生空间位置的平移时,它的所有物理性质,如惯性质量、固有频率、原子光谱或生物的固有节律都不发生变化。就物理规律而言,空间均匀性要求它具有坐标平移变换的不变性。

空间的各向同性——转动的不变性——导致角动量守恒。改变一个物体的空间取向,它的几何性质和物理性质都不发生变化。空间所有方向都是等价的。在空间任何方向发生的同一物理现象都服从相同的物理规律。如果空间各向异性,首先就可以设想光速在不同方向会有差别,然而这没有被观察到。就物理规律而言,空间各向同性要求它具有坐标旋转变换的不变性。

描述平直空间属性的几何学是欧几里得(Euclid)几何学。

空间是三维的。经过空间一点,能够作出也只能作出三条相互正交的直线。描述点的空间位置,需要三个独立的参数。

1.1.2 关于时间

时间表征了物质运动过程的绵延,即持续性。在物理事件的相互关系中,时间反映了物理事件发生的先后次序。

时间的对称性表现在时间的均匀性上,即时间具有平移的不变性,它导致了能量守恒。只有在时间均匀流逝的前提下,才能确立时间的量度^①。时间的均匀性使得物理规律不因计时起点的移动而改变。物理实验的可重复性正是时间均匀性的表现。不具有可重复性的实验结果不能成为科学的论据。

时间是一维的。时间箭头从过去指向现在,从现在指向未来,一去不复返。时间 t 是连续变量。

1.1.3 模型与质点

物理学理论的普适性与运动客体的多样性,要求我们将研究对象理想化。模型是理性思维的产物,数学是理性思维的基本形式,建立物理模型是运用数学的前提。

人们对大量物理过程进行清理与概括,寻找过程的基本物理特征。再经过对原型信息的简化压缩,构造出原型的替代物即模型。理想模型有意突出现象中起主要作用的因素,忽略一切非本质的细节,以形成简明的物理图像。一个好的模型具有简单性、概括性和与实验的一致性等特点。

模型(model)取代原型(prototype),有助于概念的形成和运用,有助于问题的分析,也有助于启发进一步的实验。建立模型是物理学的基本研究方法。模型的提出有利于概念的建立和规律的表述。诸如刚体、理想弹簧、理想气体、理想流体、点电荷、线电流、

^① 重复出现的周期性变化过程作为广义的“时钟”,是时间量度的基础。这种过程受外界影响越小,自身变化的一致性越好,越能提高时间计量的精确度。从人的脉搏,单摆、音叉的振动,地球自转(平均太阳日),到石英晶体振荡器,氦分子钟、铯原子钟。计时所选用的自身重复现象随着技术的进步越来越稳定。1967年,国际计量大会决定:采用铯原子钟作为时间计量基准,定义1s等于¹³³Cs(铯的一种同位素)原子基态两个超精细能级之间跃迁相对应辐射周期的9 192 631 770倍。

光线等,都是物理规律赖以表达的基本模型。

质点是最简单的物理模型,它从两个方面反映运动物体的主要特征,点——位置,质量——惯性。

一个物体如果作平动^①,它的各部分有完全相同的运动状态,可以用一个点的运动(它的位置、轨道、速度、加速度等)作为整个物体运动的代表。平动物体可取质点模型。

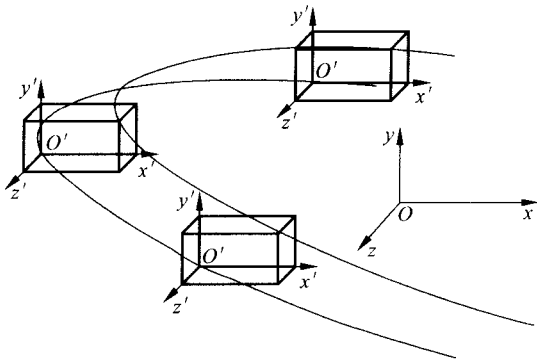


图 1.1.1 物体平动

一个物体自身的线度与它的运动范围的线度相比微不足道,或者在所研究的问题中允许忽略物体各部分运动状态的差异,这样的物体可以按质点模型处理。

普遍说来,某个物体能否采用质点模型,并不在于它的大小,而是由研究问题的性质以及对精度的要求来决定。如果研究目的允许忽略物体各部分运动状态的差异,就可以将它看作质点,否则必须按其实际形状讨论。

1.1.4 参考系与坐标系

一个物体的位置以及运动状态都需要相对其他物体才能描述和确定。离开了它的相对物,物体的位置、运动状态势必成为不可理解的东西。我们将用以描述其他物体运动状态的物理实体称为参考系(reference system)。任何物体或彼此相对静止的物体群都可被选作参考系。观察者对运动的描述基于:(1)参考系是静止的;(2)物体相对参考系运动。

为了定量描述物体位置和运动状态,需要在参考系上建立坐标系(coordinate system)。

坐标系是参考系的数学抽象。它由一个原点,若干相互正交的坐标轴组成。当然,还要包括校准的“直尺”和“时钟”,作为测量空间和时间的标准。

在一个参考系中,根据对象运动的特点,可建立不同类型的坐标系。同一参考系的若干坐标系可以有不同的坐标原点、不同方向的坐标轴,但它们彼此之间相对静止。不

^① 平动:若 $Oxyz$ 为一固定在静止物体上的坐标系, $O'x'y'z'$ 为固定在运动物体上且对应轴与 $Oxyz$ 三轴分别平行的坐标系。如果物体运动时对应轴始终保持平行,则称该物体作平动,如图 1.1.1 所示。平动排除了物体自身的转动,但其轨道不限于直线。

同坐标之间的联系要通过坐标变换来实现。

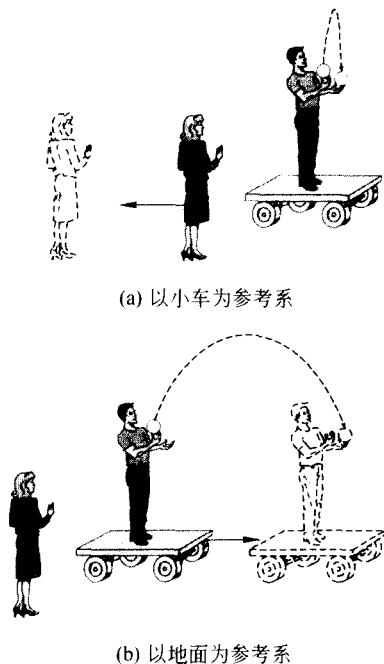


图 1.1.2 分别以小车和地面为参考系观察抛球的运动

然而,固定在不同参考系上的坐标系,彼此之间存在着相对运动。这样两个坐标之间的联系要通过带有时间因子的参考系变换来实现。不同参考系中的观察者对同一物体运动状态做出的描述不一样,虽然他们的描述同样有效。这正是运动描述的相对性。以图 1.1.2 为例,(a)以小车为参考系,小车静止,小球竖直上抛,女士向左运动;(b)以地面为参考系,小车向右运动,小球斜上抛,女士静止。

有些人固守局部环境形成的感觉经验,不理解运动的相对性,对地球静止这种直觉很强烈。以致乘汽车时坚持认为自己运动,地面静止。如果认为自己静止(以汽车为参考系),判断地面相对汽车运动,他就缺乏信心。其实这同样是正确的描述。

在一个具体问题中,恰当选择参考系及合理设置坐标系对于运动的表述和研究是至关重要的。

地球同步卫星^①,相对于地球上的观察者是高悬于赤道上空静止不动的。若以太阳为参考系,卫星不仅随地球以椭圆轨道绕太阳公转,还要附加上随地球自转的运动。

〔阅读〕 全球卫星定位系统

全球卫星定位系统(global positioning system,GPS)是美国 1973 年开始研制的第二代卫星导航系统,是继阿波罗登月飞船和航天飞机之后的第三大航天工程。GPS 是一个全球性、全天候、全天时、高精度的导航定位和时间传递系统。它向全球用户提供连续、实时、高精度的三维位置、三维速度和时间信息。这个高精度卫星定位导航系统由多个卫星、地面监控网、大量用户接收机三部分组成。空间部分由 24 颗卫星(目前在轨卫星已达 28 颗)组成导航卫星星座,其中 18 颗卫星均匀分布在 6 个近似圆形的轨道面上运转,轨道倾角为 55° 。每个轨道面布设 3 颗卫星,彼此间隔 120° ,从一个轨道面的卫星到相邻轨道面的卫星错动 40° ,另外每个轨道面有一颗热备份卫星。轨道离地高度约 20 182 km,运转一周 12 小时。卫星发射单向测距信号,能保证全球任何地区、任何时间都能收到至少 4 颗卫星的信号,以获取迄今为止最高精度的经纬度坐标、速度、高度、方

① 地球静止卫星轨道是一条特殊的轨道,位于赤道平面,是轨道倾角为零的圆形地球同步轨道。航天器沿此轨道运行的角速度大小和方向都与地球自转角速度相同,地面上的人看来,航天器高悬于赤道上空,静止不动。静止航天器距地面高度 35 786 km,运行速度 3.07 km/s。静止卫星覆盖地表范围大,地面站易于对其进行跟踪。通信、广播电视、气象等卫星选用这种轨道十分有利。

位角等定位和导航信息。其三维定位精度达十几米(军用),二维粗定位精度一百米左右(民用),测速精度优于 0.1 m/s ,授时精度优于 $1 \mu\text{s}$ 。

GPS 是以三角测量定位原理(见图 1.1.3 和图 1.1.4)来进行定位的。它采用多星高轨测距体制,以接收机至 GPS 卫星之间的距离作为基本观测量。当地面用户同时接收到 3 颗以上卫星的信号后,通过使用伪距测量或载波相位测量,测算出卫星与接收机的距离,再结合各卫星的位置信息,将卫星至用户的多个等距球面相交,即可确定用户位置的三维(经度、纬度、高度)坐标以及速度、时间等相关参数。

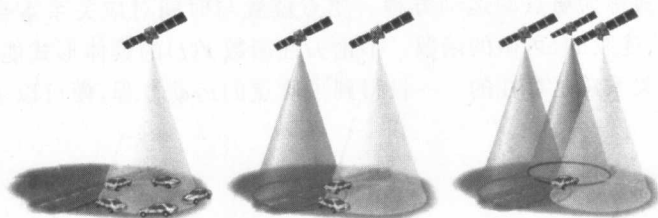


图 1.1.3 三角测量定位原理

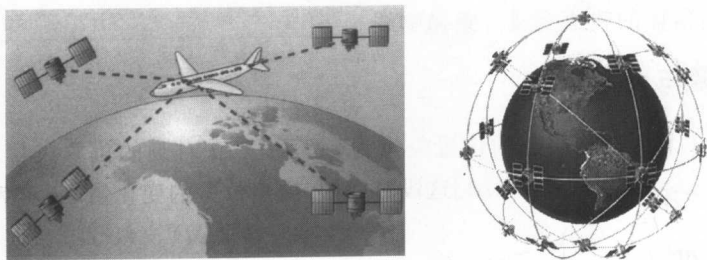


图 1.1.4 一组由 24 颗卫星组成的系统在 20 182 km 的高空绕着地球旋转并不断发送编码信号,每个卫星里都有 4 个原子钟确保时间准确

1.2 质点运动学的基本概念

1.2.1 位置矢量

坐标系确定以后,质点的空间位置 P 可以由三个独立的参数,例如 (x, y, z) 确定。空间一点对应一个有序数组;反之,一个有序数组对应空间一点。这是一一对应的关系。

质点的空间位置也可采用位置矢量,即从原点 O 到 P 点的矢量确定,如图 1.2.1 所示,记为 $\mathbf{r}$ 。位置矢量的模 $|\mathbf{r}| = r$,即 P 点到原点 O 的距离;用 $\hat{\mathbf{r}}$ 表示 $\mathbf{r}$ 的单位矢量,则

$$\mathbf{r} = r\hat{\mathbf{r}}$$

显然,点和它的位置矢量也存在一一对应的关系。用位置矢量

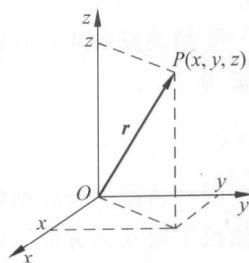


图 1.2.1 位置矢量