



21世纪高等学校公共基础课规划教材
教育部世行贷款国家重大教改项目

大学物理学

(第二卷 近代工程物理)

王建邦 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





世纪高等学校公共基础课规划教材
教育部世行贷款国家重大教改项目

大学物理学

(第二卷 近代工程物理)

主编 王建邦
参编 张旭峰 杨军 刘兴来



B1289846



机械工业出版社

本书是根据教育部国家教学改革项目的要求编写的教材，其特点是将经典物理（即工程基础物理）和近代物理（即近代工程物理）分为第一卷和第二卷，分别安排在两个学期开设。在内容上有深有浅、有简有繁，既适用于不同层次的学生，也便于教师在教学上有相当的回旋余地。本卷为第二卷，内容包括相对论、量子物理、激光、固体物理和核物理。本教材在叙述上尽量采用一种与读者进行广义对话的方式，并用黑体字来突出各种问题，吸引读者的注意力，引导读者思考。

本教材适用于高等院校理工科非物理专业学生和教师。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理学 第二卷，近代工程物理/王建邦主编. —北京：机械工业出版社，2003.7

21世纪高等学校公共基础课规划教材

ISBN 7-111-12459-6

I 大… II. 王… III. ①物理学-高等学校-教材②工程物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2003）第 049387 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：李永联

责任编辑：李永联 版式设计：张世琴 责任校对：刘志文

封面设计：张静 责任印制：路琳

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·12.375 印张·479 千字

定价：28.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页；由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

封面防伪标均为盗版

前 言

据不完全统计, 目前全国工科类大学物理课本有一百多种, 其中不乏许多精品。为何还要编写本教材? 主要是因为我们从 1997 年开始, 介入了工科物理教学改革, 曾承担过原山西省教委教学改革重点课题“工科大学物理教学内容改革的探索与实践”(1997.1~1999.12) 以及正在承担教育部世行贷款资助课题“物理课程与相关课程交叉、渗透的研究与实践”(2000.8~2003.6)。在多年的教学改革实践中, 我们不断地从全国各兄弟院校借鉴了许多宝贵的经验, 不断地从许多大学的优秀教材中吸取了丰富的营养, 为了延伸、拓展与加大大学物理教学改革的力度, 为了在高校扩招的新形势下, 探讨如何提高地方性工科院校大学物理教学质量的新途径, 我们感到有必要依据多年教学改革实践与探索的点滴收获与经验, 为地方性工科院校的学生编写一本新的大学物理教材。既然如此, 这本教材又具有哪些特点呢? 第一, “雅俗共赏”。这里提出的“雅”与“俗”, 指的是不同层次的读者, “共赏”是期望他(她)们都能喜欢。因此, 本书涉及的基础物理内容及例题与习题, 有深有浅, 有简有繁, 任读者自行选择; 针对不同层次的学生, 教师也有相当的回旋余地。第二, “师生对话”。因为本书是针对地方性工科院校学生撰写的, 由于读者的知识基础与认识能力有限, 因此在撰稿过程中, 我们尽量采用一种与读者进行广义对话的方式, 展开全书的内容, 不时地提出问题, 并且在本书中用黑体字来突出各种问题, 以期吸引读者的注意力, 激发读者的兴趣, 引导读者思考, 这也是我们编写本书的一种新的思路, 能不能达到预期的效果, 还要在实践中检验。第三, “工程基础”。目前, 我国高校有 21 个工科大类, 69 个专业(本书第一卷前言中统计为 24 个工科大类, 68 个专业), 在各种专业教学计划中, 学时数均不到总学时的 5% 的大学物理课程作为工程技术人材的近代物理基础知识究竟是个什么? 应当选哪一些? 这也许还是目前一个没有定论的问题。为此, 我们在编写过程中, 基本上仍然遵循传统教材框架, 但尝试着将相关内容进行了拓展与延伸, 有些内容比授课时的要求高一些, 有些论点比教学基本要求深一点。这个高和深的“度”以满足本科不同层次读者的需求为宜。本卷内容结构为: 相对论、量子物理、激光、固体物理和原子核。第四, “一分为二”。为了加强近代物理学内容的教学, 为了突出基础物理教学在工科大学素质教育中的核心作用, 我们从 1997 年开始教改试点时, 就将大学物理课程中的经典物理(我们称工程基础物理)与近代物理(我们称近代工程物理)分别在两个学期开设, 即第二学期开经典物理和第三学期开近代物理。从 99 级以后,

我们进而将近代工程物理安排在第五学期开出，而第三学期和第四学期开物理实验。因此，本卷自成体系，又与第一卷互相呼应。第五，“时数匹配”。教学内容与教学时数是一对矛盾，在处理这一对矛盾时，我们注意了既要解放思想又要实事求是，在本卷的教学组织中，教学内容与教学时数安排如下：相对论 8 学时，量子物理 24 学时，激光原理 6 学时，固体物理基础 18 学时，原子核 4 学时。

参加本卷编写的教师有：张旭峰（第五部分）、王建邦（第六部分与第七部分）、杨军（第八部分）、刘兴来（第九部分）。

中国科学技术大学张永德教授、太原理工大学冷叔模教授分别阅读了第五部分与第六部分，并提出了宝贵意见，使我们受益匪浅，在此特向张永德教授与冷叔模教授表示衷心感谢。

编 者

2003 年 3 月

目 录

前 言

第五部分 相对论基础 1

第十八章 狭义相对论 2

第一节 伽利略相对性原理 2

一、伽利略相对性原理的内容 2

二、伽利略变换 3

三、经典力学的绝对时空观（伽利略-牛顿时空观） 7

第二节 狭义相对论的基本

原理 8

一、电磁学向伽利略-牛顿相对性原理提出的挑战 8

二、狭义相对论基本原理的内容 15

第三节 洛伦兹变换 17

一、洛伦兹变换的内容 17

二、洛伦兹坐标变换的推导 19

三、相对论速度变换公式 23

第四节 狭义相对论的

时空观 26

一、同时的相对性 26

二、时间延缓效应 29

三、长度的相对性 33

第五节 相对论的质量、动量和

能量 37

一、相对论质量 37

二、相对论力学动力学方程 42

三、相对论动能 43

四、相对论质量和能量的关系 45

五、动量与能量的关系 49

习题 50

第十九章 广义相对论简介 52

第一节 惯性质量与引力

质量 53

第二节 广义相对论的基本

假设 55

一、爱因斯坦升降机的理想

实验 55

二、直线加速参考系中的

惯性力 55

三、等效原理 57

四、局域惯性系 58

五、广义相对性原理 59

第三节 广义相对论的

检验 60

一、行星近日点的进动 60

二、光线在引力场中偏折 61

三、雷达回波延迟 61

第四节 有引力场的空间与

时间 62

习题 63

第六部分 量子物理 64

第二十章 光（辐射）的波粒

二象性 66

第一节 热辐射 普朗克的量子

假设 66

一、热辐射的基本概念 67

二、基尔霍夫辐射定律 69

三、绝对黑体 70

四、绝对黑体的热辐射实验定律 71

五、经典理论的困难和普朗克的 量子假设	74	习题	120
第二节 光电效应	77	第二十二章 薛定谔方程	121
一、光电效应的实验规律	77	第一节 自由粒子的薛定谔 方程	121
二、光电效应与光的波动学的 剧烈冲突	81	一、方程的形式	121
三、爱因斯坦的光量子论及其对光 电效应的解释	82	二、方程的讨论	122
四、多光子光电效应	86	第二节 力场中粒子的薛定谔 方程	124
五、内光电效应	86	一、方程的形式	124
第三节 康普顿效应	87	二、算符与方程	125
一、实验规律	87	第三节 定态薛定谔方程	126
二、X 射线实验结果的解释	88	一、分离变量法	126
三、简短的历史回顾	91	二、定态的基本特征	128
第四节 光的波粒二象性	92	第四节 一维无限深势阱中 的粒子	129
一、爱因斯坦光子关系式	93	一、一维无限深势阱模型	129
二、单光子双缝干涉实验 分析	94	二、薛定谔方程及其解	130
三、光子的不确定性原理	96	三、结果讨论——解的物理 意义	132
习题	97	第五节 势垒与隧道效应	134
第二十一章 电子的波粒 二象性	99	一、薛定谔方程	135
第一节 德布罗意假设	99	二、讨论	136
第二节 德布罗意波的 实验证明	101	三、隧道效应的应用	138
一、戴维孙 - 革末电子衍射 实验	101	习题	139
二、电子显微镜	105	第二十三章 氢原子中的 电子	141
第三节 不确定性关系	106	第一节 氢原子的玻尔 理论	141
一、电子单缝衍射实验	106	一、玻尔理论的历史背景	141
二、不确定性关系的讨论	108	二、玻尔氢原子理论要点	143
第四节 波函数及其统计 诠释	110	第二节 用薛定谔方程解氢 原子问题	146
一、德布罗意平面波	111	一、玻尔理论的缺陷	146
二、波函数的统计诠释	112	二、氢原子的薛定谔方程	147
三、统计诠释对波函数提出 的要求	118	第三节 量子数的物理 解释	153
		一、主量子数和能量	

量子化	154	第六节 激光器的工作	
二、角量子数和角动量		原理	183
量子化	154	一、激活介质粒子数反转	
三、磁量子数和角动量空间		的实现	183
量子化	156	二、谐振腔的振荡阈值	
第四节 氢原子的波函数与		条件	184
概率密度	157	三、谐振腔的选频	186
一、低量子数的氢原子波		第七节 氦氖激光器	187
函数	157	一、氦氖激光器的结构图	187
二、电子概率的径向分布	159	二、氦氖激光器的工作	
三、电子概率的角度分布	162	原理	188
习题	164	习题	190
第七部分 激 光	165	第八部分 固体物理基础	192
第二十四章 激光原理	166	第二十五章 晶体结构与结	
第一节 激光概述	166	合力	193
一、激光的诞生	166	第一节 晶体结构及其	
二、激光器的分类	167	描述	193
第二节 原子的能级、分布和		一、晶体的性质	193
跃迁	168	二、晶体结构的实验研究	197
一、原子在能级上的分布	169	三、空间点阵	201
二、原子能级跃迁	170	第二节 布喇菲格子	204
第三节 光的吸收与辐射	172	一、7个晶系	205
一、自发辐射	172	二、14种布喇菲空间点阵(空	
二、受激吸收	173	间格子)	205
三、受激辐射	173	第三节 晶体的结合力	207
第四节 爱因斯坦辐射		一、影响晶体结合力的若干	
理论	174	因素	207
一、自发辐射系数 A	174	二、晶体中粒子的结合力	211
二、受激吸收系数 B_{12}	176	第四节 晶体的结合能	214
三、受激辐射系数 B_{21}	176	一、定义	214
四、爱因斯坦系数 A_{21} , B_{12} 和 B_{21}		二、经验原子对势	216
之间的关系	177	第五节 离子晶体的	
第五节 产生激光的基本物理		结合能	218
条件	180	一、离子晶体的点阵结构	218
一、两个基本矛盾	180	二、离子晶体的内能	219
二、解决矛盾的方法	181	三、整个点阵离子对势能的	

计算	219	二、求解周期场中定态薛定谔方	
习题	222	程的基本思路	257
第二十六章 晶格振动	224	三、数学处理与结果讨论	258
第一节 晶体的热学性质	224	习题	267
一、晶体中粒子的热运动	224	第二十八章 半导体	268
二、晶体的摩尔热容	225	第一节 本征半导体	268
三、固体的热传导	227	一、元素半导体	268
四、热膨胀	227	二、化合物半导体	271
第二节 一维晶格振动	229	第二节 掺杂半导体	273
一、一维无限长弹簧振子链		一、施主型杂质与 N 型	
模型	229	半导体	273
二、粒子振动的运动学		二、受主型杂质与 P 型	
描述	230	半导体	275
三、粒子振动的动力学		第三节 杂质能级的计算	277
描述	230	一、类氢模型	277
四、耦合振动方程的解	232	二、类氢施主杂质能级的	
第三节 格波	235	计算	277
一、格波的物理意义	235	三、晶体中电子有效质量的物理	
二、玻恩 - 冯卡门边界条件	236	意义	278
三、 k 的取值数目	236	第四节 PN 结	280
四、格波与原子振动	238	一、PN 结的空间电荷区	280
习题	238	二、内建电场 (自建电场)	281
第二十七章 能带论基础	240	三、接触势垒	282
第一节 固体能带的形成	241	四、PN 结的整流效应	282
一、固体是原子的组合	241	习题	285
二、晶体中电子能带的形成	241	第二十九章 物质的电磁性质	286
第二节 固体中电子的波		第一节 电介质及其极化	286
函数	243	一、外电场中分子 (原子) 电	
一、近似处理方法	243	结构的变化	286
二、晶体中电子的波函数 - 布洛赫		二、电介质极化的微观机理	289
函数	245	三、极化面电荷	290
第三节 晶体的能带结构	248	四、极化强度矢量	291
一、满带、导带和空带	248	第二节 电介质的特殊效应	296
二、导体、绝缘体及半导体的		一、压电效应	296
能带论	254	二、铁电体	299
第四节 固体能带理论基础	256	第三节 磁介质及其磁化	301
一、克朗尼格 - 朋奈模型	256	一、物质磁性的起源	302

二、磁介质的磁化机理	305	放射性	339
三、磁化电流	308	一、 α 衰变	340
四、磁化强度矢量	309	二、 β 衰变	342
五、磁场强度矢量	312	三、 γ 衰变	346
六、磁介质的磁化规律	314	第四节 放射性衰变的一般	
第四节 磁性材料	316	规律	347
一、磁性材料的分类	317	一、指数衰变规律	347
二、铁磁性材料的磁化规律	318	二、放射性衰变中的几个重要	
三、铁磁性材料的磁化机理	320	物理量	349
习题	322	第五节 原子核反应	353
第九部分 原子核物理	323	一、实验	354
第三十章 原子核	324	二、核反应的一般表示式	354
第一节 原子核的基本特征		三、核反应的类型	355
及其组成	324	四、核反应过程的守恒定律	356
一、原子核的电荷和		第六节 重核的裂变及应用	357
电荷数	324	一、获取原子能的物理基础	357
二、原子核的质量和		二、原子核裂变	359
质量数	324	三、链式反应和反应堆	363
三、原子核形状、大小与		第七节 轻核聚变	364
密度	331	一、基本的聚变反应过程	365
四、核力的基本性质	333	二、受控热核反应	366
第二节 原子核的结合能	335	习题	367
一、质量亏损	335	习题答案	369
二、核结合能	336	索引	372
三、比结合能	338	参考文献	383
第三节 原子核的衰变与			

第五部分

相对论基础

本书把大学物理分为工程基础物理（经典物理）和近代工程物理（近代物理）两卷。

经典物理学是何时诞生的呢？爱因斯坦曾认为：“伽利略的发现以及他所应用的科学推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，标志着物理学的开端。”杨振宁则选择了牛顿发表他的《自然哲学的数学原理》的1687年。诗人蒲柏在“拟牛顿墓志铭”中写道：

大自然及其法则在黑夜中隐藏；

上帝说：“派牛顿去吧！”

于是，一切豁然开朗。

实际上，20世纪以前的200余年间，物理学在两大领域取得了巨大成功：一是由牛顿建立的经典力学（1687年），包括热力学与经典统计力学；一是由麦克斯韦建立的经典电磁学（1864年），包括光学。它们能够解释宏观的力学和电磁学现象，并在历史上分别诱发了18世纪以蒸汽机、内燃机的应用为中心的“工业革命”、19世纪以电和电磁波应用为中心的“电气革命”。

20世纪初，物理学发生了两次革命，深刻地改变了人们对物理世界的理解。爱因斯坦创建的相对论以及始于普朗克的能量子假设的量子力学，已成为近代物理学的两大支柱。当物体在高速运动时，其中牛顿力学的成功（如蒲柏诗句），用英国诗人斯夸尔爵士的诗来说：

但这并不久长。

魔鬼大喝一声：“派爱因斯坦去！”

于是，一切恢复原样。

第十八章 狭义相对论

狭义相对论是爱因斯坦于1905年创建的。这个理论涉及力学、热学、电磁学、原子和原子核物理学以及粒子物理学等乃至整个物理学领域。在狭义相对论中，爱因斯坦以“相对性原理”和“光速不变原理”为基础，提出了新的时空观和物质观，并从两个原理出发，进一步派生出它所有的主要原理。读者也许会感到相对论有些难懂，原因是它不合常理，它的结论似乎违背常识。因为作为人们直觉基础的日常经验，局限于对低速运动的通常大小物体的观察。其中遇到的速率比光速小得多，如地球卫星的轨道速率不到 10^4 m/s，就比光速 $c = 3 \times 10^8$ m/s小得多。若物体以与光速相比拟的速率运动，人们对此并没有任何经验。因此，在学习狭义相对论时，读者的经验将受到挑战，大多数基本物理概念必须修改。建议读者学习本章时，作好这样的思想准备，始终要抓住狭义相对论的两个基本论据，无论这些论据把你引向何方，你也不能有任何怀疑。

第一节 伽利略相对性原理

读者从中学物理中已知，从某种意义上讲，一切运动都是相对的，或者确切地说，运动的描述是相对的。在月球上的人认为，地球是运动的；而地球上的人看到月球在运动。当你在窗前看到窗外雨丝如帘，在你的面前垂下，孰知若你在行驶的汽车中，又会见到雨丝的帘幕似乎迎风飘起，真所谓“横看成岭侧成峰、远近高低各不同”。所以，人们看到的现象，或者对事物的描述往往随观测的角度而异；考察或描述任何一个物体的运动都是相对于观察者所选择的特定参考系而言的。

一、伽利略相对性原理的内容

如上所述，为了描述物体的机械运动，我们需要选择适当的参考系。在运动学中，相对于任何参考系的运动都可以描述，对于实验观测来说，希望选择一个最容易取得数据和进行分析的参考系，这样一来，不同观测者所选择的不同参考系对同一物体运动的观测结果之间有什么关系呢？会不会有人只承认自己看到的是真的，根本否认还有其他可能性呢？会不会“公说公有理、婆说婆有理”，没有是非标准呢？例如，人造地球卫星的运动，若以地球为参考系，运动轨道是圆或椭圆；若以太阳为参考系，运动轨道却是以地球公转轨道为轴线的螺旋线。但

是，读者可进一步考虑这样一个问题，即物理规律（定律）应当是自然界中与观测者无关的客观规律。早在 1632 年，伽利略在匀速运动的封闭船舱里仔细地观察了力学现象，他发现在船舱中察觉不到物体的运动规律和地面上有任何的不同。

这里要强调的是伽利略作实验的船舱是作匀速直线运动的船舱，即惯性参考系，在这样的参考系中，牛顿运动定律是适用的。这样，伽利略当时所观察的船舱中的力学现象，可以进一步表述为：

(1) 一切彼此作匀速直线运动的惯性系，对于描述机械运动的力学规律来说是完全等价的。

(2) 在一个惯性系的内部所作的任何力学实验都不能确定这一惯性系本身是在静止状态，还是在作匀速直线运动。也就是说，这个系统的运动状态必须由别的参考系来确定。

读者注意：在 (1) 中所说的“等价”不是指不同惯性系看到的力学现象都相同，而是指力学现象服从的力学规律相同。因此，读者要把力学现象的描述和力学规律本身区别开来。

以上两点，就是伽利略相对性原理的不同表述。简而言之，伽利略相对性原理就是：对于所有的惯性系，经典力学定律（牛顿定律、运动定理、守恒定律等）都一样。

相对性原理可以说是人类对于自然界的一种信念，是自伽利略、牛顿和爱因斯坦以来的许多物理学家长期探索、反复思考、仔细实践所得到的一个基本结论。现在，相对性原理已是物理学家用作探索自然、构造物理量、建立新理论的依据和基本出发点之一，因此它能使人们超越从个别角度（即参考系）认识问题的局限性，寻求不同参考系之间各观测量之间的变换关系，以及变换过程中的那些不变量。从这个角度讲，什么是相对论？相对论包含两方面的内容：

(1) 物理定律的“相对性原理”。

(2) 不同惯性系的物理量之间的“变换关系”。

所以，伽利略相对性原理及伽利略变换，可以称之为伽利略-牛顿相对论。

二、伽利略变换

一个参考系可以简单地抽象成一套坐标系，在质点运动学的范畴内，描述物体运动状态主要是靠在参考系中测量物体的空间位置（矢量）和速度（矢量）。既然说力学规律在所有惯性系都是等价的，而运动的描述又是相对的，我们如何把这两者统一起来呢？伽利略变换就是既描述不同惯性参考系中物理量（位矢、速度、加速度等）之间的变换关系，又描述不同惯性参考系之间力学规律相互变换关系的一种数学表述。

什么是伽利略变换？它有以下几个要点：

1. 研究两个作相对运动的不同惯性系中的观察者描述同一事件的时空坐标间的相互关系

如图 18-1 所示，在相对地面作匀速直线运动的车箱中，一乘客向着车头方向掷小球，此时，地面上乘客的朋友看着火车在他面前开过，假定他俩都测量小球的速度，读者依据中学物理知道，他们观测的结果是不相同的，这是因为同一个问题涉及两个参考系。为进一步讨论这个问题，如图 18-2 所示，设两个惯性参考系分别以直角坐标系 $S(Oxyz)$ 和 $S'(O'x'y'z')$ 表示，它们的对应坐标轴相互平行，且 S' 系相对 S 系以速度 u 沿 ox 轴的正方向运动。以 r 表示在 S 系中观测到某质点 P 的位置矢量， r' 描述质点相对于 S' 系的位置。在相对论中，把物体在某一时刻处于某一位置 P 称作一事件。描述一事件需要三个空间坐标和一个时间坐标，为了测量长度和时间，我们设想测量长度的尺和测量时间的钟均已在同一惯性参考系中校准。由于时间、空间的均匀性，参考系的原点和时间的起点都可任意选择。为了简单而又不失普遍性，我们选择坐标原点 O 与 O' 重合时作为计时起点，并用 t 和 t' 分别表示自 S 系和 S' 系观测同一事件发生的时刻，则起始时刻 $t = t' = 0$ 。显然，同一事件在不同参考系有不同的时空坐标 (x, y, z, t) 和 (x', y', z', t') ，它们之间有什么关系呢？这就是伽利略变换所要解决的问题。

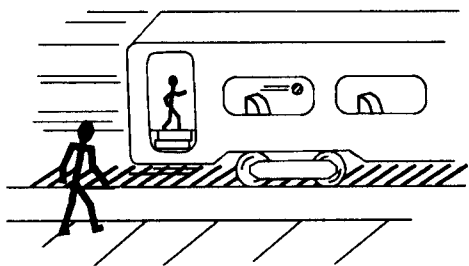


图 18-1

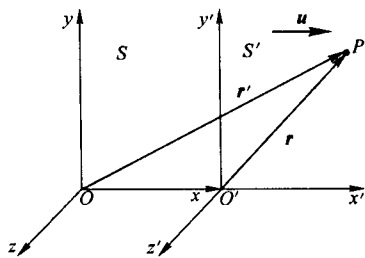


图 18-2

由经典力学可知，可以用统一的尺子测量空间距离，因此，在时刻 t ，点 P 在由图 18-2 所示的两个惯性参考系中的空间坐标有如下关系

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \right\} \quad (18-1)$$

此外，在爱因斯坦提出狭义相对论之前，人们认为时间的量度也是绝对的，与参考系的选择无关，即 $t' = t$ 。从以上关于时、空测量的两个前提出发，式 (18-1) 改写成如下形式

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \right\} \quad (18-2)$$

或

$$\left. \begin{aligned} x &= x' + ut \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= t' \end{aligned} \right\} \quad (18-3)$$

式(18-2)与式(18-3)就称为伽利略时空变换,它们给出了同一事件(或同一时空点 P)在惯性系 S' 和 S 中时空坐标之间的变换关系式。

2. 利用速度的定义,由坐标变换求速度变换(速度合成定理)

因为点 P 在 S' 系中的速度分量可表为

$$v_x' = \frac{dx'}{dt'}, v_y' = \frac{dy'}{dt'}, v_z' = \frac{dz'}{dt'} \quad (18-4)$$

点 P 在 S 系中的速度分量可表为

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt} \quad (18-5)$$

我们将式(18-2)、式(18-3)分别对时间求导得速度的变换式

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_x' + u \\ v_y &= v_y' \\ v_z &= v_z' \end{aligned} \right\} \quad (18-6)$$

将式(18-6)写成矢量形式

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{u} \text{ 或 } \mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{u} \quad (18-7)$$

【例 18-1】 在静止于实验室的放射性物质样品中,有两个电子从放射性核中沿相反的方向射出。由实验室观察者量得每一个电子的速度为 $0.67c$ (真空中光速)。根据经典速度相加定理,从一个电子测量另一个电子的速度是多少?

【解】 这里,我们可以将一个电子看成是 S 系,把实验室看成是 S' 系,而把另一个电子看成是我们求取它在 S 系中的速度的物体(见图18-3)。在 S' 系中,另一个电子的速度是 $0.67c$,例如说沿着 x' 正方向运动,而 S 系(一个电子)的速度是 $0.67c$,沿着 x' 负方向运动。这样, $u = +0.67c$ 和 $v_x' = +0.67c$,所以按照经典速度相加定理,另一个电子相对于 S 系的速度是

$$v_x = v_x' + u = +0.67c + 0.67c = +1.34c$$

3. 由加速度定义求加速度变换关系式

把式(18-6)对时间求导数,就得到经典力学中的加速度变换公式

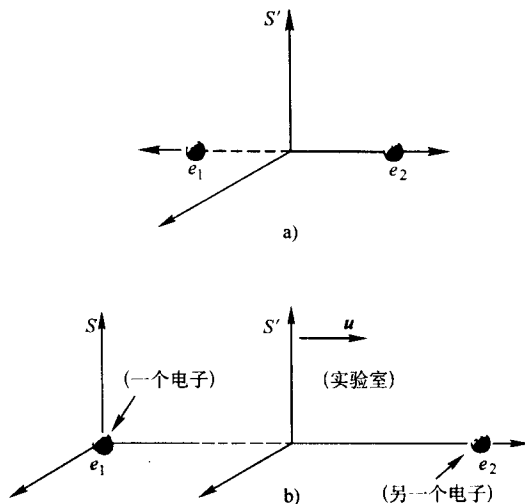


图 18-3

$$\left. \begin{aligned} a'_x &= a_x \\ a'_y &= a_y \\ a'_z &= a_z \end{aligned} \right\} \quad (18-8)$$

其矢量形式为

$$\mathbf{a}' = \mathbf{a} \quad (18-9)$$

上式表明，在 S 系和 S' 系中观察到同一质点的加速度是相同的。即在伽利略变换里，对不同的惯性系而言，加速度是个不变量，同时，经典力学认为物体质量 m 也是与参考系无关的常量，因此，牛顿第二定律在 S 系和 S' 系中的形式，分别是 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{F}' = m\mathbf{a}'$ 。可见，牛顿运动定律在伽利略变换下保持其形式不变，这正是伽利略相对性原理所要求的。可以证明，力学中的其他基本规律经伽利略变换后，其形式也保持不变。

这里附带给读者提一下，式 (18-9) 表示加速度对伽利略变换保持不变，或者说，加速度对伽利略变换为一不变量。现今物理学将经某种操作（变换）后物理量或规律保持不变的性质，称为变换不变性。不变性的本质是什么？是自然界中与观测者无关的客观规律，实质上这就是相对性原理。因为相对性原理要求一个正确的自然定律不能以任何方式涉及某个特殊的或具体的参考系。

以动量守恒定律为例，在一个参考系中算出的动量 \mathbf{P} 也许不同于在另一个参考系中算出的动量 \mathbf{P}' ，但动量守恒定律必定在每个参考系中都有相同的形式。读者把握这一物理思想非常重要，这样我们就不致于拘泥于观察或描述问题的某一特定角度，而是会自觉地去探索变换关系及变换中的不变量（或不变性），从而把我们的认识推进到宇观世界和微观世界。因为不论人造卫星的运动，还是月

球、地球的运动，它们都应遵守同一运动规律。

【例 18-2】 有两个质点 A 和 B ，它们在 Oxy 坐标系中均以匀角速率 ω 作半径为 R 的圆周运动，且在 $t=0$ 的时刻都从原点 O 出发，但二者的转动方向相反，如图 18-4 所示，试问质点 B 相对于质点 A 的运动规律如何？

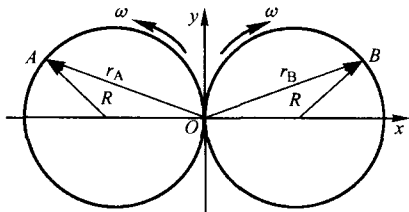


图 18-4

【解】 由图可以看出，在坐标系 Oxy 中，质点 A 和 B 的运动方程分别为

$$\begin{cases} x_A = -R + R\cos\omega t \\ y_A = R\sin\omega t \end{cases} \quad \begin{cases} x_B = R - R\cos\omega t \\ y_B = R\sin\omega t \end{cases}$$

可得在 Oxy 坐标系中质点 B 相对 A 的坐标分量为

$$\begin{cases} x_{BA} = x_B - x_A = 2R(1 - \cos\omega t) \\ y_{BA} = y_B - y_A = 0 \end{cases}$$

位矢为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{BA} &= \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = [(R - R\cos\omega t)\mathbf{i} + R\sin\omega t\mathbf{j}] - \\ & \quad [(-R + R\cos\omega t)\mathbf{i} + R\sin\omega t\mathbf{j}] = 2R(1 - \cos\omega t)\mathbf{i} \end{aligned}$$

直接对上式求导数得

$$\mathbf{v}_{BA} = 2R\omega\sin\omega t\mathbf{i}$$

同理

$$\mathbf{a}_{BA} = \frac{d\mathbf{v}_{BA}}{dt} = 2R\omega^2\cos\omega t\mathbf{i}$$

计算结果表明，质点 B 相对质点 A 是作一种往返的直线运动（简谐振动）。

三、经典力学的绝对时空观（伽利略-牛顿时空观）

读者注意到了没有，导出式 (18-2) 和式 (18-3) 有两个前提，一是可以用统一的尺子测量空间距离，无论在车上也好家里也好，度量长度彼此都一样，换句话说，长度的量度和参考系无关，简称这种空间为绝对空间，用牛顿的话说：“绝对空间，就其本性而言，与外界任何事物无关，而永远是相同的和不动的”；另一是在所有参考系中的时间流逝完全相同，即同样的事件无论在哪个惯性系中观测，经过的时间都一样。牛顿认为：“绝对的、真正的和数学的时间自己流逝着，并由于它的本性而均匀地与任何外界对象无关地流逝着。”总之，我