



世纪普通高等教育基础课规划教材

普通物理学

PUTONG WULIXUE

梁 斌 等编著



Physics



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育基础课规划教材

普通物理学

梁 斌 董会宁 庾有康 编著
王应宗 主审



机械工业出版社

本书是参照教育部最新《理工科类大学物理课程教学基本要求》，在凝结编者多年教学实践经验的基础上几经修改编写而成的。

本书内容依次是：力学（含刚体转动）、机械振动和机械波、热力学和统计物理学、波动光学、电磁学和近代物理学基础等，共 17 章。本书除第 17 章外，各章每节后均有思考题，每章后有习题，书后有习题参考答案。除带 * 号的选学内容和第 17 章的阅读材料外，讲授本书约需 120 ~ 140 学时。阅读本书需要微积分和矢量运算的基本知识。

本书在编写中坚持了“四统一”的原则：在材料的取舍上注意了学科体系与一般教学需要的统一；在概念、思想的阐述上注意了逻辑顺序与历史顺序的统一；在行文叙述上注意了严谨性与可读性的统一，尤其注意了数学与物理的统一，目的是为读者奉献一部既有继承又有发展，比较系统又不庞杂，篇幅适度，便于教学和自学的新教材，以期有利于培养和提高学生的综合素质和数理分析能力。

本书为普通高等学校理工科类大学物理基础课程教材，也可作为高校物理教师、学生和相关技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

普通物理学/梁斌, 董会宁, 庾有康编著. —北京: 机械工业出版社, 2009.8

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

ISBN 978-7-111-27527-5

I. 普… II. ①梁…②董…③庾… III. 普通物理学 - 高等学校 - 教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 114408 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: 陈中心 版式设计: 霍永明

责任校对: 李秋荣 封面设计: 马精明 责任印制: 乔宇

北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 24.25 印张 · 602 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-27527-5

定价: 41.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

编者的话

众所周知,教材是教学之本.没有合适的教材,教学质量难以保障,教学水平难以提高.新中国成立以来,先后引进过一些国外出版的普通物理学教材,国内也出版了一些代表当时普通物理学教材建设成就的好教材.可以说,经过 50 多年的努力,一个有中国特色的普通物理学教材模式已基本形成.这些成就来之不易,应该予以认真的分析继承和改革发展,以期在此基础上编写出适应物理学教学发展需要的、反映学术进步和创新成果的新教材.同时,必须看到,在已有的国内外出版的普通物理学教材中也存在着不少需要改进之处.本书就是在这样的背景下,在编者多年从事物理学教学和研究的基礎上,参考国内外教材,按照我国理工类专业大学物理学教学大纲的一般要求,增删修改数遍后编写而成的.

本书的内容依次是:力学(含刚体转动)、机械振动和机械波、热力学和统计物理学、波动光学、电磁学、近代物理学基础等,共 17 章.除第 17 章外,每节后有思考题,每章后有习题,书后有习题参考答案.除带 * 号的选学内容和第 17 章的阅读材料外,讲授本书约需要 120~140 课时.阅读本书需要微积分和矢量运算的基本知识.

本书在编写中坚持了“四统一”的原则:在材料的取舍上注意了学科体系与一般教学需要的统一;在概念、思想的阐述上注意了逻辑顺序与历史顺序的统一;在行文叙述上注意了严谨性与可读性的统一,尤其注意了数学与物理的统一,目的是为读者奉献一部既有继承又有发展、比较系统又不庞杂、篇幅适度、便于教学和自学的新教材.所谓“数学与物理的统一”,意指在阐述物理概念、物理命题时坚持定性与定量分析并重,既不刻意追求数学的严谨,也不回避数学的应用,而是把数学表示当作准确理解物理概念、物理命题的不可或缺的语言和有力的工具.简而言之,就是物理讲到什么程度,数学就讲到什么程度,以期有利于培养和提高读者的数理分析能力,为今后的学习和工作打下坚实的基础.

本书不同于一般物理学教材的突出特点是,除了直接概括来源于实践的那些基本原理(如牛顿定律)外,书中所有重要的定理、定律都给出了论证或推导,其中一些论证或推导是编者的研究成果.编者以为,教学的基本要求就是讲清楚要讲的论题,特别是基本概念、基本思想和基本方法.要实现这个教学目标,认真讲述定理、定律的论证或推导是不可缺少的教学环节,因为定理、定律的论证或推导不仅有利于加深对概念的理解,其中还包含着许多有用的方法和技巧.否则,培养和提高学生分析问题、解决问题的能力就会沦为一句空话,也就谈不上创新能力的培养.

本书由陕西师范大学王应宗教授主审,北京大学赵凯华教授非常关心和支持本书的编写与出版,梁春田先生为本书的编写提供了许多宝贵的经验和意见.本书的编写和出版得到了重庆邮电大学数理学院和物理教学部的关心支持,使用过本书讲义的重庆邮电大学光电工程学院、自动化学院和通信学院部分班级的师生提出了不少宝贵的意见,编

者在此一并致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限，本书的缺点在所难免，诚恳希望各位读者和专家提出宝贵意见，使本书的质量得到进一步提高。

编 者

2008 年 10 月于重庆邮电大学

目 录

(注:带*号的是选学内容)

编者的话

绪论	1
----------	---

第 1 部分 力 学

第 1 章 质点运动学	4
-------------------	---

1.1 位移和路程	4
1.2 速度和速率	7
1.3 加速度	10
1.4 切向加速度和法向加速度	12
1.5 运动叠加原理 相对运动	15
1.6 用积分法求速度和位矢	17
习题 1	19

第 2 章 质点动力学	21
-------------------	----

2.1 牛顿运动定律	21
2.2 常见力和物体的受力分析	25
2.3 牛顿运动定律的应用	28
习题 2	30

第 3 章 功和能	34
-----------------	----

3.1 功	34
3.2 动能定理	36
3.3 势能定理	38
3.4 机械能守恒定律	41
习题 3	46

第 4 章 冲量和动量	48
-------------------	----

4.1 冲量和动量 动量守恒定律	48
4.2 碰撞	51
4.3* 经典力学的适用范围和火箭飞行 原理	53
习题 4	54

第 5 章 刚体的定轴转动	56
---------------------	----

5.1 刚体运动的基本形式和定轴转动	56
5.2 转动定律	57
5.3* 质心 平行轴定理	61
5.4 转动能定理	62
5.5 角动量	64
5.6* 开普勒定律	67
习题 5	71

第 2 部分 机械振动和机械波

第 6 章 机械振动	73
------------------	----

6.1 简谐振动	73
6.2 相位和旋转矢量	77
6.3* 阻尼振动	79
6.4 谐振动的叠加	81
习题 6	86

第 7 章 机械波	88
-----------------	----

7.1 谐波函数	88
7.2 谐波能量	91
7.3 平面波和球面波 惠更斯原理	94
7.4 波的叠加与干涉	97
7.5 驻波	99
7.6 声波 多普勒效应	102
习题 7	104

第 3 部分 热力学与统计物理学

第 8 章 热力学基本原理	107
---------------------	-----

8.1 理想气体状态方程	107
8.2 系统压力的功	110
8.3 热力学能 热力学第一定律	112
8.4 理想气体的摩尔热容	113
8.5 绝热过程	114
8.6 卡诺循环	116
8.7 热力学第二定律	119
8.8 卡诺定理	120
8.9 熵增原理	121
8.10* 物态方程和热力学系数	124
习题 8	126

第 9 章 统计物理学基本原理	128
-----------------------	-----

9.1 玻尔兹曼分布	128
9.2 正则系综	131
9.3 近独立粒子系统	134
9.4 理想气体的热力学函数	135
9.5 麦克斯韦气体分子速率分布律	136
9.6 温度公式和压强公式	140
9.7 能量均分定理	141

9.8* 气体的内迁移	143	14.1 法拉第电磁感应定律	244
习题9	145	14.2 动生电动势	245
第4部分 波动光学		14.3 感生电动势	248
第10章 波动光学	147	14.4 自感和互感	250
10.1 光波干涉的基本概念	147	14.5* 自感电路	252
10.2 劈尖 牛顿环和薄膜	150	14.6 磁场能量	253
10.3 单缝衍射	153	14.7 麦克斯韦方程组	255
10.4* 光学仪器的分辨率	157	14.8 电磁波	257
10.5 双缝干涉	158	习题14	260
10.6 光栅	160	第6部分 近代物理学基础	
10.7 光的偏振	163	第15章 狭义相对论	263
习题10	165	15.1 经典力学的内在矛盾	263
第5部分 电 磁 学		15.2 狭义相对论的基本原理	267
第11章 静电场	168	15.3 相对论的时空观	270
11.1 电现象的基本概念	168	15.4 相对论速度变换式	274
11.2 库仑定律	169	15.5 相对论力学的基本公式	276
11.3 静电场	172	习题15	279
11.4 静电场高斯定理	177	第16章 量子力学基本原理	280
11.5 电势	181	16.1 黑体辐射	280
11.6 电场强度与电势的微分关系	185	16.2 光电效应	283
11.7 静电场中的金属导体	187	16.3 康普顿效应	285
11.8* 逸出电势 接触电势差	192	16.4 玻尔的氢原子理论	287
11.9 电容	194	16.5 德布罗意波	292
11.10 电介质	196	16.6 薛定谔方程	297
11.11 电场能量	200	16.7 一维定态问题	300
习题11	201	16.8* 态矢量和力学量算符	306
第12章 稳恒电流	204	16.9 不确定原理	314
12.1 电流和电阻	204	16.10* 角动量算符	319
12.2 焦耳定律	206	16.11* 电子在原子核库仑场中的运动	322
12.3 电动势	207	16.12 氢原子	324
12.4 电容器的充放电	210	16.13* 表象及其变换	327
12.5* 温差电动势	212	16.14 电子的自旋	330
12.6* 经典金属电子论	215	习题16	335
习题12	217	第17章 蓬勃发展的物理学	337
第13章 稳恒磁场	219	17.1 半导体物理学	337
13.1 磁感应强度	219	17.2 超导物理学	343
13.2 毕奥-萨伐尔定律	221	17.3 纳米技术	352
13.3 磁场高斯定理	226	17.4 非线性光学	357
13.4 安培环路定理	227	17.5 广义相对论	363
13.5 安培力和磁力矩	230	附录	369
13.6* 霍尔效应	234	附录A 参考答案	369
13.7 磁介质	235	附录B 物理学常数	378
习题13	241	附录C 矢量分析	379
第14章 电磁感应和电磁波	244	参考文献	382

绪 论

“物理”这个词在中文里可以追溯到西汉时淮南王刘安主持编写的《淮南子》一书：“耳目之察不足以辨是非，心意之伦不足以明物理”。这两句话与列宁说的“感觉到的东西不一定认识它，认识到的东西才能更深刻地感觉它”是一致的，强调的都是观察与分析在认识客观事物过程中的辩证关系。现代人认为，物理学是系统阐述物质运动的基本形式和普遍规律的一门自然科学。物理学和数学一起构成了其他一切科学（包括自然科学和社会科学）和工程技术的基础。物理学之所以具有这种地位，是因为人类生存的世界首先是一个物质的世界。在开始学习普通物理学的时候，有必要明确以下几个问题。

1. 为什么要开设普通物理学课？

普通物理学的理论体系由物理学各主要分支的基础理论组成，一般包括：力学，振动和波，热学，波动光学，电磁学，近代物理学基础等。世界各国的高等院校的理工科专业之所以把普通物理学作为一门普遍通用的基础课（这正是“普通物理学”一词的涵义），既是为了给后续课程准备必要和足够的教学基础，更是因为普通物理学讲授的包括机械运动、热运动、电磁运动在内的物质运动的基本形式和普遍规律都是理工科大学学生必需掌握的知识。只有当这些学生系统地而不是支离破碎地、充分地而不是肤浅地受到运用这些普遍规律分析问题的训练之后，他们才能具备现代科技人才必须具备的科学素质。所谓科学素质，其基本含义应当包涵：以大量系统的物质运动知识为基础树立起来的牢固的唯物主义意识；独立思考、勇于探索、百折不挠追求真理的坚强意志；诚实认真、慎密细致的学习和工作作风。这种素质的培养不论对于研究生、本科生还是大专生，不论对于他们今后的学习还是工作，都是不可缺少的。我们知道，现代科技发展的一个显著特征是：研究课题的提出，众多的发现发明，愈来愈少地出于偶然，愈来愈多地成为大规模有意识探索的结果。今天，理论日益显示出对实践的巨大指导作用，鼓舞着人们去发现新的事实，提出新的观点，渴望着在实践中检验这些观点。因此，把物质运动的普遍规律与具体实践相结合来分析问题、解决问题已成为现代科技人才必须具备的基本素质。物理学作为一门系统完整地讲授人类在探索物质运动普遍规律方面的成就和方法的基础课，它的作用是其他课程不能代替的。国情和国际环境要求我们对基础科学的研究和教学必须长期予以足够的重视，否则，就会贻误后人，贻误国家。

2. 普通物理学的特点

物理学既是一门有较长历史的自然科学，也是蓬勃发展、多次酝酿和引起科学技术革命，在生产力发展中起着火车头作用的自然科学。就普通物理学来说，它既是比较成熟的也是继续发展着的理论体系。普通物理学有以下主要特点。

首先，和整个物理学一样，普通物理学有其系统性。若从 17 世纪伽利略在帕多瓦大学执教的时候算起，物理学作为一门独立的自然科学学科至今已有三百多年的历史。在这三百多年中，物理学经历了三次大的突破，形成了经典物理学和近代物理学两大部分。这三次大

的突破是：17~18 世纪牛顿力学和热力学的形成；19 世纪麦克斯韦电磁理论的提出；20 世纪初狭义相对论和量子力学的诞生。纵观这三百多年的历史，可以说，经典物理学的发展史就是人们交替地从物质运动的粒子性和波动性两方面研究从低速运动到高速运动的历史。当人们认识到物质运动具有波粒二象性、物质运动速度不能大于光速时，近代物理的大门就被打开了。普通物理学在教材编写和教学实践中应该展示的就是这样一条历史的和逻辑的主线，这就是普通物理学的系统性。

第二，普通物理学还必须具有针对性。这主要体现在对于不同的专业和不同的学生，在课程内容和深度上应有所侧重、有所区别；在教学实践中对一些问题进行针对性的深入讲解和学习；对一些比较困难的问题加强辅导和练习，等等。

普通物理学的教学之所以必须具备系统性和针对性，主要目的并非出于美学上的考虑和教学上的便利，而是由普通物理学的学科性质和课程开设的目的决定的。由前述可知，物理学的系统性是物质运动统一性的反映。今天，人们一般认为，万千复杂的物质运动可以归纳为四种相互作用，即引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。而且，人们正在不懈地探索这四种相互作用的关系，希望能用一个统一的理论来描述这些作用。这种努力会导致什么结果，今天还难以预料。在这永无止境的对物质运动规律的探索中，人类不仅积累了大量的知识，更形成了具有丰富内容的从特殊到一般、从具体到抽象、从现象到本质、从实验到理论、从假设到推论再到实验验证等一系列科学研究的方法。没有哪一门学科像物理学这样包含如此丰富的内容，把物质运动展现得如此多姿多彩、淋漓尽致。没有哪一门学科像物理学这样在循序渐进中自然而然、具体细致地培养着人们的唯物主义世界观、辩证思维的方法论。物理学是反对一切唯心主义和形而上学的有力武器，同时自身也在斗争中不断发展。遗憾的是，物理学的这种天然优势有时被忽视了，没有很好地发挥。

第三，与中学物理相比，大学物理由于广泛应用了微积分和矢量运算而发展成了一个严谨系统的理论体系。这就要求我们在学习中必须克服畏难情绪，坚持数学和物理的统一。理解、掌握物理概念和物理规律，既要注意把握它的定性特征，也要注意把握它的定量特征，二者不可偏废。论证问题（包括做练习）必须明确条件，既不能违背数学运算规则，也不能违背已被实验证明是正确的物理规律，否则就不可能得到正确的结果。当然，即使是符合数学运算规则和物理规律的论证结果，其正确与否最终还要靠实验来检验。

总之，只有经过刻苦系统的学习，才能掌握科学的思维方法，具备基本的科学素质，实现普通物理学的教学目标。

3. 注意总结和改进学习方法，提倡研究式学习

学好物理学并非难事，一要刻苦，二要注意经常总结、改进学习方法。学习方法是因人而异的，但也有普遍规律，这可以概括为“四个字一句话”。四个字是：准、全、基、通。所谓“准”，就是要准确领会每一个概念。列宁说过，人们总是在事物的比较中认识事物的。我们应当通过反复阅读、思考和做练习去体会每一个概念、定理的含义，准确地把握它。所谓“全”，就是要全面理解和掌握教学计划规定的内容，用自己的辛勤努力争取好成绩。所谓“基”和“通”，就是要通过反复练习，熟练掌握基本概念、基本公式和基本方法，努力做到熟能生巧，融会贯通。一句话是：提倡研究式学习，就是不能满足于会做一般的习题，而是要经常想一想，课堂上书本里讲的对不对，什么问题讲清楚了，什么问题没讲清楚，应

当怎样讲. 对于前人的成就和现有的理论体系, 要尊重, 但不能迷信, 不能被它束缚了思想. 作为未来的科学技术人才, 一定要有实事求是、独立思考的意识, 养成独立思考的习惯和能力, 否则, 是难有作为的.

“世上无难事, 只要肯登攀”. 让我们以饱满的热情和实事求是的精神投入到大学物理的学习中去, 培养、提高我们的科学素质, 为攀登科学高峰打好科学知识的基础.

第1部分 力学

当我们将眼光投向丰富多彩的客观物质世界时，最直观、最常见的物质运动形式就是机械运动（mechanical motion）。所谓机械运动，就是物体在空间的移动。研究机械运动的物理学分支叫做力学（mechanics）。普通物理学中的力学是整个力学学科的基础部分。

第1章 质点运动学

如同研究其他事物一样，研究机械运动先要描述机械运动。这一章描述的就是可以被看作质点（particle）的那些物体的机械运动，也就是说，质点运动学（particle kinematics）中的所有概念和方法都是为了描述质点的运动而引入的。

那么，什么是质点？什么物体可以被看作质点？所谓质点，就是具有一定质量的几何点。我们知道，几何点是没有形状、没有大小的，因此，如果我们在研究物体的运动时可以不考虑物体的形状和大小，我们就把这个物体看作质点。例如，线膛炮发射的炮弹飞行时以其纵中心线为轴自转。人们在研究炮弹飞行时，若不考虑炮弹的自转，就可以把炮弹看作质点。至于什么是质量，将在下一章中介绍，本章中的质点可以简单地看作几何点。

1.1 位移和路程

1. 位矢

实践证明，即使是一个没有学过物理学的人，当他说明一个物体的位置时，也总是相对于另一个被选定的物体而言的。这个被用来说明其他物体位置的物体叫做参考物（reference object）或参考系（reference frame）。当需要准确地确定物体的位置时，实际上总是相对于参考物上的某个点来说明物体的位置，这个点叫做参考点（reference point）。当我们观察物体时，我们的视线是一条从眼睛指向物体的有向直线段。随着物体的运动，这条有向直线段的方向和长短也随之变化。设想视线从参考点指向被观察物体，于是，我们有下面的定义：

由参考点指向质点位置的有向直线段叫做质点的位置矢量（position vector），简称位矢，记作 $\mathbf{r}$ 。矢量 $\mathbf{r}$ 的手写体为 $\vec{r}$ ，其他矢量亦仿此。

如图 1-1-1 所示， O 点是参考点， P 点是质点位置，由 O 点指向 P 点的有向直线段 $\vec{OP}$ 就是位矢 $\mathbf{r}$ 。

当质点相对于参考点运动时，位矢随时间变化，是时刻 t 的函数，记作



$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$$

(1-1-1) 图 1-1-1

式 (1-1-1) 叫做质点的运动函数 (motion function) 或运动方程 (motion equation).

2. 位移

如图 1-1-2 所示, 设运动质点 P 于 t_1 时刻过 A 点, 于 t_2 时刻过 B 点.

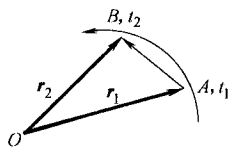


图 1-1-2

定义: 由质点初位置指向质点末位置的有向直线段叫做质点的位移 (displacement).

在图 1-1-2 中, 质点在时间 $\Delta t = t_2 - t_1$ 的位移就是由初位置 A 指向末位置 B 的有向直线段 $\overrightarrow{AB}$. 按照矢量加法, 有

$$\overrightarrow{AB} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$$

而矢量

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-1-2)$$

叫做位矢的增量 (increment of position vector). 以后凡是说到某个物理量的增量, 指的都是该物理量的末态值减去初态值的差. 由以上两式可知

$$\overrightarrow{AB} = \Delta \mathbf{r} \quad (1-1-3)$$

这表示位移等于位矢的增量. 以后, 我们就常用 $\Delta \mathbf{r}$ 表示位移.

3. 路程

图 1-1-2 中的弧线表示质点运动的轨迹 (locus). 选质点轨迹上一点作为测量轨迹弧长的原点, 则称质点在任意后续时刻 t 的位置对应的轨迹弧长 $S(t)$ 为质点的轨迹弧函数. 轨迹弧函数 $S(t) \geq 0$.

定义: 质点初、末位置之间的轨迹叫做质点的路程 (path), 记作 Δs .

因此, 路程 Δs 等于轨迹弧函数的增量, 即

$$\Delta s = s_2 - s_1 \geq 0 \quad (1-1-4)$$

上式中, $s_1 = s(t_1)$ 和 $s_2 = s(t_2)$ 分别是质点初、末位置的轨迹弧函数值.

注意:

(1) 位移是矢量, 路程是非负的标量 (scalar). 质点经过一段时间的运动回到初位置时其位移为零, 路程不为零.

(2) 位矢 $\mathbf{r}$ 的模写成 $r = |\mathbf{r}|$, 位移的模只能写成 $|\Delta \mathbf{r}|$, 而 $\Delta r = r_2 - r_1$ 是位矢模 r 的增量. 由图 1-1-2 可知, 因为三角形两边之差小于第三边, 故 $\Delta r \leq |\Delta \mathbf{r}|$. 推而广之, 任意矢量模的增量不大于矢量增量的模.

4. 位矢和位移的平面直角坐标表示

若要具体地计算位矢和位移, 需要根据质点运动情况选择建立适当的坐标系 (coordinate system). 现设质点 P 在参考点 O 所在的某个平面上运动, 以参考点 O 为坐标原点建立平面直角坐标系 Oxy , 如图 1-1-3 所示. 由图可见, 位矢 $\mathbf{r}$ 在平面直角坐标系中的表示式是

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} \quad (1-1-5)$$

上式中的 $\mathbf{i}$ 和 $\mathbf{j}$ 分别是 x 轴和 y 轴的单位矢量, $x = r\cos\theta$, $y = r\sin\theta$. 位矢 $\mathbf{r}$ 的模

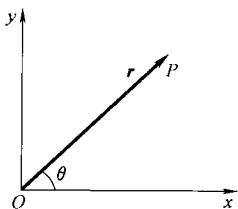


图 1-1-3

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1-1-6)$$

位矢 $\mathbf{r}$ 与 x 轴正方向的夹角叫做质点的角位置或方向角, 记作

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (1-1-7)$$

在国际单位制中, 长度单位是米 (m), 时间单位是秒 (s), 角度单位是弧度 (rad).

将式 (1-1-5) 代入式 (1-1-2), 得位移 $\Delta\mathbf{r}$ 的平面直角坐标表示式:

$$\Delta\mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} \quad (1-1-8)$$

如图 1-1-4 所示. 位移的模

$$|\Delta\mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (1-1-9)$$

位移的方向角

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (1-1-10)$$

与位移相对应, 把角位置的增量 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 叫做角位移.

例题 1-1-1 一名探险队员开始时位于队部东面 2km 处, 北行 4km, 又东行 3km. 求: (1) 队员行走的路程和位移; (2) 队员末位矢的大小和方向.

解: 以队部为原点 O 建立平面直角坐标系, 东向为 x 轴正方向, 北向为 y 轴正方向, 如图 1-1-5 所示. 由图可见:

(1) 路程 $\Delta s = 7\text{km}$

位移 $\Delta\mathbf{r} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} = 3\text{km}\mathbf{i} + 4\text{km}\mathbf{j}$

位移的模 $|\Delta\mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = 5\text{km}$

位移的方向角 $\varphi = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) = \arctan\left(\frac{4}{3}\right) = 53.1^\circ$

(2) 初位矢 $\mathbf{r}_A = 2\text{km}\mathbf{i}$

末位矢 $\mathbf{r}_B = \mathbf{r}_A + \Delta\mathbf{r} = 5\text{km}\mathbf{i} + 4\text{km}\mathbf{j}$

末位矢的模 $r_B = \sqrt{x_B^2 + y_B^2} = 6.4\text{km}$

末位矢的方向角 $\theta = \arctan\left(\frac{y_B}{x_B}\right) = 38.7^\circ$

例题 1-1-2 已知在平面直角坐标系中, 质点初位矢 $\mathbf{r}_p = -2\text{m}\mathbf{i} + 6\text{m}\mathbf{j}$, 质点末位置为 Q 点, 位移为 $\Delta\mathbf{r} = 4\text{m}\mathbf{i} - 2\text{m}\mathbf{j}$. 求质点末位矢并作图.

解: 因为 $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_Q - \mathbf{r}_p$

所以 $\mathbf{r}_Q = \mathbf{r}_p + \Delta\mathbf{r} = 2\text{m}\mathbf{i} + 4\text{m}\mathbf{j}$

如图 1-1-6 所示.

例题 1-1-3 已知质点运动参数方程 $x = 3t$, $y = 9t^2 - 1$, 求质点的位矢函数和轨迹方程.

解: 位矢 $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} = 3t\mathbf{i} + (9t^2 - 1)\mathbf{j}$

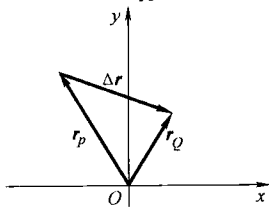


图 1-1-6

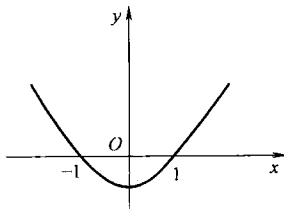


图 1-1-7

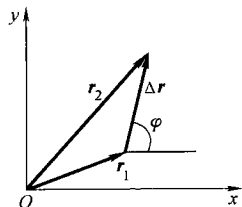


图 1-1-4

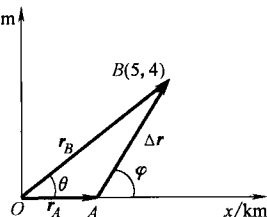


图 1-1-5

由参数方程组 $x=3t$, $y=9t^2-1$ 中消去参数 t , 得轨迹方程

$$y = x^2 - 1$$

轨迹曲线为抛物线, 如图 1-1-7 所示.

思考题 1.1

1. 坐在船舱里看报纸的旅客想知道船开了没有, 往往向船外看看. 为什么?
2. 两列客车并排停在火车站内. 一会儿, 坐在车里的一个小孩说: “我们的车开了!” 坐在旁边的另一个小孩说: “我们的车没开.” 如何评判谁正确?
3. 同一物体在同一段时间相对于两个相互运动的参考物的位移是否相等?
4. 质点的运动路程是否一定非负? 为什么?

1.2 速度和速率

1. 平均速度和瞬时速度

如前所说, 位矢是表示质点位置的物理量, 位移是表示质点位置变化的物理量. 为了描述质点运动的方向和快慢, 需要引入新的物理量.

定义: 质点位移与经历时间的比叫做质点在这段时间的平均速度 (average velocity), 记作

$$\bar{v} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-2-1)$$

其中 $\Delta t = t' - t$, t 、 t' 分别是质点过初、末位置的时刻, 如图 1-2-1 所示. (1-2-1) 式说明, 平均速度是与位移同方向的矢量. 平均速度的模 (大小) 是

$$|\bar{v}| = \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} \quad (1-2-2)$$

不难看出, 平均速度只是粗略地描述了质点运动的方向和快慢. 要精确地描述质点在某时刻的运动方向和快慢, 必须使观测的时间 $\Delta t = t' - t$ 趋于零. 于是我们有下面的定义:

质点在时刻 t 附近 Δt 时间段的平均速度当 Δt 趋于零时的极限叫做质点在时刻 t 的瞬时速度 (instantaneous velocity), 简称速度 (velocity), 记作

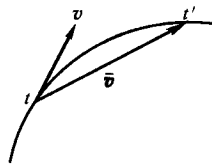


图 1-2-1

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-2-3)$$

上式说明, 速度等于位矢函数对时间的一阶导数. 速度是矢量, 方向沿轨迹曲线的切线方向. 当速度随时间变化时, 称之为速度函数. 平均速度和速度的单位都是米/秒 (m/s).

注意: 不能说平均速度是速度的平均值. 因为, 从逻辑关系上说, 先有平均速度的概念, 后有速度的概念. 从理论与实验的关系上说, 实际测得的总是平均速度而非速度, 速度不能测准. 一般地说, 在物理学中, 只有当一个物理量可以测准 (至少原则上可以测准) 时, 才能说这个物理量有确定值. 因此, 速度没有确定值. 但在经典力学中, 正如狄拉克所指出的, 假设速度及其他物理量都有确定值.

将式 (1-1-5) 代入式 (1-2-3), 得速度的平面直角坐标表示式

$$\mathbf{v} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} \quad (1-2-4)$$

其中的 $v_x = \frac{dx}{dt}$ 、 $v_y = \frac{dy}{dt}$ 分别是速度在 x 轴和 y 轴上的分量. 速度的模

$$|\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

速度的方向角

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right)$$

由于

$$v_x = |\mathbf{v}| \cos\theta, v_y = |\mathbf{v}| \sin\theta$$

速度的平面直角坐标表示式可以写为

$$\mathbf{v} = |\mathbf{v}| (\cos\theta\mathbf{i} + \sin\theta\mathbf{j}) \quad (1-2-5)$$

2. 平均速率和瞬时速率

质点运动的路程与经历时间的比叫做质点在此时间段的平均速率 (average speed), 记作

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-2-6)$$

定义: 质点在时刻 t 附近 Δt 时间段的平均速率当 Δt 趋于零时的极限叫做质点在时刻 t 的瞬时速率 (instantaneous speed), 简称速率 (speed), 记作

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-2-7)$$

这表明, 速率是质点的轨迹弧函数 $s(t)$ 对时间的一阶导数. 由于路程随时间增加, 即轨迹弧函数 $s(t)$ 随时间增加, 故总有 $v \geq 0$. 平均速率和速率的单位与速度的单位相同.

注意:

(1) 如图 1-2-2 所示, 设质点由 a 点运动到 b 点, 路程为 Δs , 位移为 $\Delta \mathbf{r}$. 由于一般地有 $\Delta s \neq |\Delta \mathbf{r}|$, 故平均速率一般不等于平均速度的模, 即 $\bar{v} \neq |\bar{\mathbf{v}}|$. 只有当质点作方向不变的直线运动时才有 $\Delta s = |\Delta \mathbf{r}|$ 、 $\bar{v} = |\bar{\mathbf{v}}|$.

(2) 当 b 无限趋近于 a 时, 即当 Δt 趋于零时, 由于

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \mathbf{r}|$$

速率才等于速度的模, 即 $v = |\mathbf{v}|$.

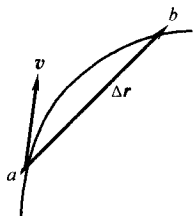


图 1-2-2

3. 线速率和角速率

设 Δs 为一段圆弧, 其所张的圆心角为 $\Delta\theta$, 则有

$$\Delta s = R\Delta\theta \quad (1-2-8)$$

其中 R 是圆半径. 将上式代入式 (1-2-7), 得

$$v = R \frac{d\theta}{dt} = R\omega \quad (1-2-9)$$

式中, $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ 叫做角速率 (angular speed), 单位是弧度/秒 (rad/s). 与角速率对应, v 叫做线速率 (linear speed).

例题 1-2-1 如图 1-2-3 所示, 两个带轮的半径分别是 $R_A = 0.40\text{m}$ 、 $R_B = 0.20\text{m}$, A 轮每分钟转 180 圈, 问: B 轮每分钟转多少圈? 带与轮子之间无滑动.

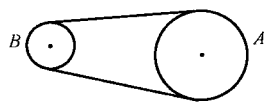


图 1-2-3

解：由于轮子与带之间无滑动，两个轮子边缘的线速率相等，即

$$v_B = v_A$$

$$R_B \omega_B = R_A \omega_A$$

所以

$$\omega_B = \frac{R_A \omega_A}{R_B} = 360 \text{ r/min (圈/分钟)}$$

例题 1-2-2 已知质点运动方程是

$$\mathbf{r} = R \cos \omega t \mathbf{i} + R \sin \omega t \mathbf{j}$$

其中 R 、 ω 均为常数。试判断质点作什么运动？

解：由题可知，质点轨迹方程是

$$x^2 + y^2 = R^2$$

这是一个半径为 R 的圆。质点的速度

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = -R\omega \sin \omega t \mathbf{i} + R\omega \cos \omega t \mathbf{j}$$

速率

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = R\omega$$

可见，质点速率是不变的常数，质点作匀速圆周运动 (uniform circular motion)，角速率为 ω 。

例题 1-2-3 质点作半径 $R = 3\text{m}$ 的匀速圆运动，周期 $T = 6\text{s}$ 。问：

(1) 质点的平均速度和速度各沿什么方向？(2) 质点在任意一时刻的平均速率和平均速度的大小是否相等？

解：(1) 平均速度沿弦线由初位置指向末位置，速度沿切线方向，如图 1-2-4 所示。(2) 质点在任意一秒的角位移

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi}{3}$$

位移的模

$$|\Delta\mathbf{r}| = R = 3\text{m}$$

平均速度的大小

$$|\bar{\mathbf{v}}| = \left| \frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t} \right| = 3\text{m/s}$$

平均速率

$$\bar{v} = \frac{2\pi R}{T} = \pi\text{m/s}$$

可见，平均速度与平均速率大小不相等。

例题 1-2-4 路灯灯泡 M 高于地面 H ，身高 h 的人在平路上背对路灯前行。当人行速率为 v_0 时，人头在地面的影子的移动速率多大？

解：如图 1-2-5 所示， M 为路灯灯泡， A 点为人头的位置， C 点为人头影的位置。设 t 时刻人离开路灯杆距离为 $x_0 = OB$ ，人头影距灯杆距离为 $x = OC$ 。因为 $\triangle MDA \sim \triangle MOC$ ，有

$$x = \frac{H}{H-h} x_0$$

人头影运动速度

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{H}{H-h} v_0$$

由于 $v > v_0$ ，人影随人行进变长，与实际相符。

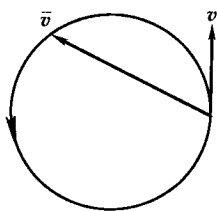


图 1-2-4

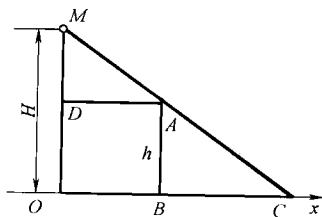


图 1-2-5

思考题 1.2

1. 判断下面的说法正确与否, 并说出理由:

(1) 平均速度是速度的平均值. (2) 速率就是速度的模 (大小).

2. 判断下列各式正确与否:

(1) $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$; (2) $v = \frac{dr}{dt}$; (3) $v = \frac{ds}{dt}$; (4) $v = \sqrt{(dx/dt)^2 + (dy/dt)^2}$.

3. 质点在 A、B 两点之间完成一次往返直线运动. 从 A 点出发时速度为 v_1 , 到 B 点时速度为零, 接着返回 A 点, 到 A 点时速度为 v_2 , $v_2 = -v_1$. 若往返时间为 Δt 、两点相距为 a , 判断下列各式正确与否:

(1) 平均速度 $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) = 0$; (2) 平均速度 $\bar{v} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = 0$;

(3) 平均速率 $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_1 - v_2) = 0$; (4) 平均速率 $\bar{v} = \frac{2a}{\Delta t} = 0$.

1.3 加速度

一般地说, 质点运动的速度是随时间而变的. 如图 1-3-1 所示, 质点于 t_1 时刻过 A 点, 速度为 $\mathbf{v}_1$; 于 t_2 时刻过 B 点, 速度为 $\mathbf{v}_2$. 在此过程中, 速度的增量为

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$$

图 1-3-1

$\Delta \mathbf{v}$ 的方向由 $\mathbf{v}_1$ 的末端指向 $\mathbf{v}_2$ 的末端. 为描述质点速度的变化, 我们把质点速度的增量与所经历的时间的比叫做质点在此时间段的平均加速度 (average acceleration), 记作

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-3-1)$$

可见, 平均加速度就是单位时间速度的平均增加量, 其方向就是速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的方向, 模 $\bar{a} = |\bar{\mathbf{a}}| = |\Delta \mathbf{v} / \Delta t|$, 单位是米/秒² (m/s²).

容易看出, 平均加速度只是粗略地描述了质点速度的变化. 要精确地描述速度的变化, 须令时间 Δt 趋于零.

定义: 质点在时刻 t 附近 Δt 时间段的平均加速度当 Δt 趋于零时的极限叫做质点在时刻 t 的瞬时加速度 (instantaneous acceleration), 简称加速度 (acceleration), 记作

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-3-2)$$

上式表明, 加速度就是速度函数对时间的一阶导数, 单位与平均加速度相同.

一般地说, 加速度随时间变化. 加速度不变的运动叫做匀变速运动 (uniform variable motion). 所谓加速度不变, 是指其大小和方向都不变.

将式 (1-2-4) 代入式 (1-3-2), 得加速度在平面直角坐标系中的表示式

$$\mathbf{a} = \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} \quad (1-3-3)$$

加速度的模

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

加速度的方向角

$$\gamma = \arctan (a_y / a_x)$$

