

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

新工科大学物理

上册 力学与热学

李翠莲 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

新工科大学物理

李翠莲 主编

上册 力学与热学



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书分为上下两册,上册包括力学和热学,下册包括电磁学、光学和量子力学。上册有 32 个知识点精讲,下册有 34 个知识点精讲。对每个知识点,本书皆以专题的形式来阐述其内涵和外延,包括从其初期到发展成熟的历程、它的数学描述和物理解析、在现代生产和生活中的应用,以及可能的拓展前景等方面。目的是让读者不仅知其然,而且知其所以然,培养读者的逻辑思维能力,提高工科学生利用物理理论指导实践的能力。

本书可作为理工科院校非物理类本科生的物理教材,也可作为读者期末、考研复习时强化物理知识点和熟悉大学物理解题方法的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新工科大学物理.上册,力学与热学/李翠莲主编
—上海:上海交通大学出版社,2020
ISBN 978-7-313-21699-1

I. ①新… II. ①李… III. ①物理学—高等学校—教材②力学—高等学校—教材③热学—高等学校—教材
IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 158194 号

新工科大学物理(上册 力学与热学)

XIN GONGKE DAXUE WULI (SHANG CE LIXUE YU REXUE)

主 编:李翠莲

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:常熟市文化印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:323 千字

版 次:2020 年 1 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-21699-1

定 价:48.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:15.75

印 次:2020 年 1 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-52219025

前言

为了响应教育部“推进新工科建设与发展,开展新工科研究和实践”的号召,发挥综合性大学的优势,适应面向未来新技术和新产业发展的需要,推动理工科向工科延伸,我们编写了这套能向新技术和新产业各领域不断渗透、有助于提高未来社会接班人科学素养和创新能力的《新工科大学物理》教材。下面从三个方面介绍本套教材期待解决的问题、特色和创新点。

首先,目前国内使用的大学物理教材版本众多:有上海交通大学基础物理教研室编的《大学物理教程》、朱峰主编由清华大学出版社出版的《大学物理》、北京大学出版社出版的《简明大学物理》等。关于大学物理的习题集就更多了,这里不一一列举。这些教材为物理理论在工科学生中的普及和推广起到了重要的作用。然而,这些物理教材一般只强调物理公式的推导和习题应用,物理学丰富的发展史、物理学在现代工业、国防、科研中的应用却被忽略了,造成学生普遍感到物理学枯燥无趣,且深奥难懂。因此,《新工科大学物理》的第一个要解决的问题就是掀开物理学神秘的面纱,让学习者明白物理是有故事的,是有趣的。

其次,当代学生生活在知识爆炸、信息畅通的时代,纯粹的知识灌输远远不能满足学生的需要,培养学生的学习能力、创新能力比任何时代都更加迫切。正如爱因斯坦指出的“发展独立思考和独立创新的一般能力,应该始终放在首位”。著名物理学家杨振宁也在清华大学上了一学期《大学物理》后感慨地说,“如今中国学生学习认真、严谨,但缺乏创新意识和创新能力”。因此,配合国家开发新技术和新产业的战略需求,切实加强培养学生的创新意识和创新能力是《新工科大学物理》教材要解决的第二个问题。

怎样才能培养学生的创新意识、提高学生的创新能力呢?我们知道爱因斯坦在他 26 岁时就完成论文《论动体的电动力学》,独立而完整地提出狭义相对性原理,开创物理学的新纪元,他的创新能力是毋庸置疑的。那么,他的创新能力从哪里来的呢?读过爱因斯坦传记的读者都知道,早在中学时代,爱因斯坦就从伯恩斯坦所著的多卷本《自然科学通俗读本》中了解了整个自然科学领域里主要的成果和方法。这套书的第一卷的开始部分就论述了有关光速以及光和距离的内容,以至于当时 16 岁的爱因斯坦在无意中想到了一个奇特的“追光悖论”。从此,开始了长达 10 年的关于光速相对性以及关于光的传播介质“以太”存在问题的探索。这样,在他 26 岁那年发表

了《论动体的电动力学》，成功地解释他的“追光悖论”，创立狭义相对论也就是水到渠成的事了。从这个事例我们明白了创新是需要源头、需要传承、需要视野的。再举一个例子，谈谈什么是物理，物理与工程的联系又是怎样的。1824年，卡诺著写的建立热力学理论的第一篇法文文章中最基本的一句话，“任何不以做功为目的的热传导都是浪费”，就是热力学最根本的原理。它是不是与网上某句关于结婚和恋爱关系的流行语很像呀。卡诺的热力学原理问世10年以后，克拉珀龙在1834年才读懂了它，并画出了卡诺的理想热机的循环图。克拉珀龙在自己文章的最后还随手甩了一句话，说“如果对于任何一部热机，不以做功为目的的热传导都是在浪费的话，那么灶上面那个正烧开水的壶，它最大的浪费的地方不在壶里面，而在炉子和水壶的交界处。”而这样一句话等了约50年以后才终于被一位工程师R.狄塞尔(R. Diesel)读懂。他说，如果最大的浪费是在炉子和灶台的交界面上，那么好的热机就不应该把炉子架在灶上，而应该是把灶建到炉子里面，从此，世界上有了内燃机。卡诺、克拉珀龙、狄塞尔这些人是不是真正的有大学问的人？从这些人的故事中我们是否对什么是物理学、物理学与工程技术又有怎样的联系有所感悟？

最后，谈谈物理学与工程专业的联系。我国的高中教师、学生及学生家长往往不管物理学在生产工程和生活中有什么用，只要学生能举一反三做得出物理练习，高考获得较高分，学生、家长、中学教师都满意。到了大学，大学生已步入成年人的门槛，他们不得不思索自己在未来职业生涯中究竟干什么，什么是最适合自己的，什么是值得他们终身追求的目标等等。而物理学作为自然科学的基础学科，几乎物理学的每个知识点开发出去都是一个工程应用领域。比如，大家爱不释手的手机，就是量子力学基础上的能带理论开发的半导体器件与麦克斯韦方程组预言的电磁波理论完美结合的产物；又比如现代高大上的虚拟现实技术就是半导体技术结合光的偏振、光的干涉和衍射知识点的应用。所以，在每一个知识点的理论讲授结束后，除了讲解一些例题让学生熟悉、掌握该知识点以外，增加该知识点在生产工程和生活中的应用实例是必要的，这有助于工科学生在以后的专业选择中有的放矢，也为学生找到适合自己的专业进行有益的尝试。这是《新工科大学物理》教材要解决的第三个问题。

为了培养学生科学思维能力和创新能力，有效解决上面三个问题，本套教材贯彻落实新工科教育的三个新元素。

第一是新理念，本套教材把科学研究的启蒙教育融入本科学生大学物理教学中，这个新理念贯穿于整套教材的每一个知识点的阐述中。时间跨入21世纪，中华民族要实现复兴，要引领世界，只是紧跟欧美的工作是远远不够的，需要在中国大地上涌现出一批原创性的工作。要实现这个目标，首先需要全面提高中华民族的科学素养，因为只有整个民族科学素质高了，才会有人才不断涌流出原创性的工作。因此，在事关民族未来的大学物理教育中还原物理学本来丰满的面目，让物理学中涉及的每个知识点都以“它从哪里来”的故事开始，以解决“它可能到哪里去”的问题结束；用一个生动具体化的故事来阐述被高度抽象的物理学原理，还原大学物理学本来具有的

故事性、趣味性、启发性特点,这有助于培养学生的好奇心和发现意识,让每个正常智力的人都可以掌握物理学研究方法,成为敢于突破、敢于创新但又不盲目乱动、有物理学原理底蕴的人。正如 SpaceX 创始人马斯克那样,每当工程师们觉得某些技术是痴心妄想,马斯克就盯着对方,问:这个技术违反哪一条物理学原理?对方答不出来,就只能去不断尝试,最后获得了巨大的成功。这正是科学研究启蒙教育融入本科教育中的目的。

第二是新架构。本套教材不像以前的大学物理教材以力学、热学、电磁学、光学和量子力学作为大块,在其下再分章节的内容安排模式来编排所有大学物理知识点,而是在深入研究和贯彻教育部“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”,保证 A 类知识点不减少的基础上,对大学物理的知识点架构做了大幅度改变。新的架构是在力学、热学、电磁学、光学、量子力学五大物理学体系中精选出 66 个重要的知识点(涵盖教育部“基本要求”中的 74 个 A 类知识点全部和 52 个 B 类知识点的一部分)分上册 32 章、下册 34 章来组织学习。这种架构划分与上海交通大学工科本科生每学期大学物理 32~34 次课(每次课 2 小时)相适应。更重要的是,这种架构编排的教材给每个知识点以平等的地位、同样的重要性,让工科类本科学生对大学物理教育中的每个知识点保持新鲜感,在整个一个学年的大学物理学习中保持旺盛的求知欲望;也给对某一知识点有特别兴趣的学生以拓展学习的空间。

第三是新内容。

(1) 本套教材与已出版的其他《大学物理》教材相比增添了每个知识点的发展史内容。这部分内容包括当时遇到了怎样的难题需要建立该知识点,建立该知识点的过程中经历了哪些困难,走过哪些弯路,最后怎样统一到目前这个认识的等等。《新唐书·魏徵传》云:“以铜为鉴,可正衣冠;以古为鉴,可知兴替;以人为鉴,可明得失。”每个学习物理的学习者了解一些知识点的发展史才能明白该知识点在人类认识自然的历史长河中所起的作用、所处的位置,才有尊敬和发自内心的赞赏和敬畏。这是培养学生敬畏自然,形成按照自然规律办事的行为习惯不可缺少的环节。本套教材加上发展史内容,希望能改变每个知识点、每个公式在学生心中的较为枯燥的形象,让它们不再显得过于刻板、无趣,而是丰满的、美丽的。

(2) 本套教材与已出版的其他《大学物理》教材相比增添了每个知识点的新研究方法,尽量用两种或者两种以上的科学研究方法获得该知识点。让学生从前辈物理学家那里学习遇到问题时思考解决问题的方法,在阅读、查找、讨论、推理、归纳等实践中完成一个个小目标。整个学年下来读懂物理学的大目标就完成了。例如,在“单摆”知识点中,本套教材分别用量纲分析和逻辑推演法分析单摆振动周期与摆长、摆球质量、重力加速度的关系。其中量纲分析法用简单而有效的方法初步探讨决定单摆振动周期的要素,逻辑推演法用牛顿第二定律和数学推理探寻单摆振动规律背后的原因。

(3) 本套教材与已出版的其他《大学物理》教材相比增添了每个知识点的新应用

以及可能的拓展内容。这里的应用不仅仅指用知识点所涉及的物理原理解题,而是实实在在地在工业、国防和日常生活中的应用。如在“光的偏振”知识点中,本套教材分析了偏振片在三维影视中的应用和偏振片在现代高科技“虚拟现实”中的重要应用。将基础的物理知识、物理原理与现代高科技结合在一起,大大提高了学生学习的愿望,也使我们摆脱了知识与生活脱节、原理与现实脱节的局面,回答了百姓关心的“学这个知识有什么用”的问题。本套教材还为每个知识点预估了今后可能拓展的方向。学习者通过这套教材学习,能从物理这棵大树的根和杆去接枝,他们在工作中涌现出原创性的、重大的成果将是水到渠成的事。

(4) 本教材增加了用 Python 求解物理问题、把物理问题形象化、生活化的内容。目前,计算物理已成为除实验物理和理论物理外的第三种研究物理的方法,研究生已大量使用各种计算机语言、计算机程序研究物理学、化学、药学等,但是,计算物理还没有引入大学物理教学中。本教材增添这部分内容,一方面可以弥补以前大学物理教材的不足,更重要的是可以拓展学生用物理原理处理实际问题的范围。目前的教材能处理的问题是基于一一些具有高度对称性、忽略了许多次要因素的理想情形下得到的结论。现实问题要复杂得多,用 Python 语言编程处理物理问题,把忽略的次要因素加进去后会得到一些新的结论,发现一些新的现象,这也是一种创新。而且,这样处理的结果与生活中的实践结果更接近,使物理理论指导工科实践的意义得到彰显,有助于激发学习者学习物理理论的兴趣。目前这版教材这方面内容仅开始试点,再版时会增加 Python 编程解决物理问题的数量和质量,增加表征物理过程的二维码动画、游戏等内容。

最后,本书每个知识点后配设 3~7 道练习与思考题,其中一道题具有现代应用典型代表意义,且有一定难度。这样安排的目的是既兼顾普通学生熟悉、掌握知识的需要,又考虑个别学有余力的学生拓展知识面,多往深处理解和拓展知识的需要。本书可作为非物理类本科生的物理教材,也可作为读者期末、考研复习准备考试强化物理知识点和熟悉大学物理解题方法的参考书。

由于编者水平有限,书中存在的错误和不足之处,欢迎读者批评指正。

目 录

第一章 质点运动学	001
一、位矢、位移、速度、加速度概念建立背景	001
二、位矢、位移、速度、加速度的一般数学描述和物理解析	002
三、位矢、位移、速度、加速度的其他表示形式	004
四、质点运动学的科学意义及其在国防工业中的应用	006
五、应用举例	006
六、练习与思考	011
第二章 牛顿运动定律	013
一、牛顿运动定律提出的背景	013
二、牛顿三大定律的数学表述及物理解析	015
三、牛顿第二定律在具体坐标中的表示	015
四、力学中常见的几种力	016
五、牛顿三大定律的科学意义及其在工业和国防中的应用	017
六、应用举例	018
七、练习与思考	024
第三章 万有引力·潮汐现象	025
一、万有引力定律的发现背景	025
二、万有引力定律的数学表述和物理解析	025
三、万有引力定律的应用——潮汐现象的物理解析	026
四、万有引力遇到的挑战及发展	029
五、练习与思考	030
第四章 伽利略变换与相对性原理	031
一、遇到的问题	031
二、伽利略变换建立背景	031

三、伽利略变换的数学推导	032
四、伽利略变换的两个推论	034
五、伽利略变换的局限性	035
六、应用举例	036
七、练习与思考	036
第五章 惯性力	038
一、惯性力概念建立背景	038
二、惯性力的数学描述及物理解析	039
三、惯性力的意义及影响	044
四、应用举例	044
五、练习与思考	045
第六章 狭义相对论	047
一、建立背景	047
二、建立该知识点所经历的困难及曲折	048
三、狭义相对论的数学描述及物理解析	048
四、狭义相对论的科学意义及对人类生活的影响	053
五、练习与思考	054
第七章 动量与冲量	055
一、动量与冲量概念建立背景	055
二、动量和冲量的数学表述及物理解析	055
三、动量定理推论——动量守恒定律	057
四、动量概念在现代物理学中的拓展	061
五、练习与思考	062
第八章 火箭的运动	064
一、火箭运动研究背景	064
二、火箭运动的数学描述	064
三、火箭运动方程的意义	065
四、练习与思考	067
第九章 功与动能	068
一、功和动能概念建立背景	068
二、功和动能的数学描述和物理解析	069

三、动能概念的拓展	071
四、应用举例	071
五、练习与思考	073
第十章 保守力与势能	075
一、保守力与势能概念提出的背景	075
二、保守力的数学描述及物理解析	076
三、势能的数学描述及物理解析	076
四、保守力、势能概念在自然科学中的意义及在国防、工业中的应用	077
五、应用举例	078
六、练习与思考	081
第十一章 功能原理和机械能守恒定律	082
一、功能原理的建立背景	082
二、功能原理和机械能守恒定律的数学表述及物理解析	082
三、应用举例	083
四、练习与思考	085
第十二章 碰撞	087
一、碰撞问题研究背景	087
二、碰撞问题的数学解析	088
三、碰撞问题拓展	093
四、狭义相对论动力学	094
五、碰撞问题的意义和影响	096
六、目前研究碰撞问题还存在的困难	096
七、练习与思考	097
第十三章 角动量与角动量守恒定律	098
一、角动量及角动量守恒定律的建立背景	098
二、角动量及角动量守恒定律的矢量数学描述及物理解析	098
三、角动量及角动量定理在直角坐标系中的数学表示	100
四、角动量及角动量定理在自然坐标系中的数学表示	101
五、角动量守恒定理在国防、工业、日常生活中的应用	102
六、应用举例	103
七、练习与思考	105

第十四章 刚体的定轴转动	107
一、刚体定轴转动研究背景	107
二、刚体定轴转动的数学描述及物理解析	107
三、实验测量刚体惯性系数	112
四、刚体定轴转动的功和机械能	113
五、关于转动惯量概念的拓展	115
六、应用举例	116
七、练习与思考	118
第十五章 陀螺运动——进动	120
一、陀螺运动研究背景	120
二、陀螺运动的近似理论	121
三、陀螺运动问题的拓展及启示	123
四、存在问题	123
五、陀螺研究意义及其影响	124
六、应用举例	125
七、练习与思考	126
第十六章 对称性与守恒定律	128
一、对称性与守恒定律关系的提出背景	128
二、能量的空间平移对称性与动量守恒定律	129
三、能量的时间平移对称性与能量守恒定律	130
四、现代物理中的对称性与守恒定律	131
第十七章 简谐振动	133
一、简谐振动的研究背景	133
二、简谐振动的数学描述及物理解析	134
三、简谐振动的旋转矢量描述	136
四、振动的能量	137
五、新的疑惑	138
六、小结	138
七、练习与思考	139
第十八章 单摆与复摆	141
一、单摆、复摆运动研究背景	141

二、经历的困难	141
三、摆运动的数学描述	142
四、摆运动方程的物理解析	149
五、存在的问题	149
六、意义及影响	149
七、练习与思考	150
第十九章 阻尼振动	151
一、阻尼振动的原因	151
二、阻尼振动的数学描述及物理解析	151
三、对阻尼振动是否具有“周期性”和“等时性”的分析	153
四、阻尼振动的应用——灵敏电流计	153
五、练习与思考	154
第二十章 振动的叠加	155
一、振动叠加研究背景	155
二、振动叠加的数学描述及物理解析	155
三、振动叠加的其他表示形式及优缺点	158
四、振动叠加理论的意义及影响	159
五、练习与思考	159
第二十一章 机械波	161
一、机械波的研究背景	161
二、机械波的数学描述和物理解析	162
三、练习与思考	175
第二十二章 多普勒效应	177
一、多普勒效应的发现	177
二、多普勒效应的验证	177
三、多普勒效应的数学描述及物理解析	177
四、多普勒效应的拓展	178
五、意义及影响	180
六、应用举例	180
七、练习与思考	181
第二十三章 热力学·温标	182
一、热力学系统的基本特性——温标	182
二、温标的数学描述及物理解析	184

三、温标概念的拓展——理想气体状态方程	185
四、范德瓦尔斯方程——实际气体的状态方程	186
五、温标的科学意义及对人类生活的影响	187
六、应用举例	188
七、练习与思考	189
第二十四章 麦克斯韦速度、速率分布律	190
一、建立背景	190
二、麦克斯韦速度、速率分布律的数学表述及物理解析	190
三、应用举例	193
四、练习与思考	194
第二十五章 玻耳兹曼能量分布	196
一、玻耳兹曼分布律的建立背景	196
二、玻耳兹曼分布的数学描述及物理解析	196
三、玻耳兹曼分布在重力场中的应用	197
四、能量均分定理	198
五、玻耳兹曼分布律的意义及发展简况	199
六、练习与思考	200
第二十六章 能量守恒定律	201
一、能量守恒和转化定律的提出和发展	201
二、能量守恒定律的数学描述及物理解析	202
三、练习与思考	203
第二十七章 热力学第一定律	205
一、建立背景	205
二、热力学第一定律的数学描述和物理解析	206
三、热力学第一定律的应用	206
四、应用举例	210
五、练习与思考	211
第二十八章 卡诺循环	213
一、建立背景	213
二、卡诺循环的数学描述及物理解析	214
三、卡诺循环的科学意义	215
四、应用举例	216
五、练习与思考	217

第二十九章 内燃机的理想循环及其效率	218
一、内燃机的发展历史	218
二、研究内燃机过程中遇到的困难	218
三、内燃机理想循环的数学描述和物理解析	219
四、实际循环与理论循环的区别	220
五、内燃机的未来发展趋势	221
第三十章 热力学第二定律	222
一、热力学第二定律建立背景	222
二、热力学第二定律的热力学表述	223
三、热力学第二定律拓展	224
四、练习与思考	224
第三十一章 卡诺定理	225
一、卡诺定理的提出背景	225
二、卡诺定理的引入——可逆和不可逆过程	226
三、卡诺定理的数学表述及证明	226
四、卡诺定理推论——克劳修斯等式和克劳修斯不等式	228
五、卡诺定理的科学意义和启示	229
六、练习与思考	230
第三十二章 熵及熵增加原理	231
一、熵概念建立背景	231
二、熵的数学表述及物理解析	232
三、统计物理中熵的定义及熵增加原理	233
四、应用举例	235
五、练习与思考	235

第一章 质点运动学

质点运动学重在考察质点在某个时刻到达某个位置,具有怎样的速度和加速度等问题。其中,位置矢量(简称位矢)是描述质点在观察者所选坐标系中位置的物理量,一般用 $\boldsymbol{r}$ 表示,它的大小是从坐标原点到质点所在位置的直线长度,方向从坐标原点指向质点。位移是描述位矢变化的矢量,从第一个位矢的末端指向第二个位矢的末端,用 $\Delta \boldsymbol{r}$ 表示;速度是单位时间位矢的变化,即位矢随时间的变化率,用 $\boldsymbol{v}$ 表示;加速度是单位时间内速度的变化,即速度随时间的变化率,用 $\boldsymbol{a}$ 表示。下面我们从六个方面来阐述运动学的内容。

一、位矢、位移、速度、加速度概念建立背景

对于运动和静止的认识,我国墨家的考察很细致,并且给出了定义:“动,域徙也”“止,已久也”。其意思是,运动指的是空间(域)的改变;静止,即某物体在某一时间内处于空间某一位置。而描述空间位置,通常用某树、某桥、某柱子处等表示;对速度的描述通常用飞矢(箭)来形容,如“无久之不止,当牛非马,若矢过楹”。现代意义上的关于位矢、位移、速度和加速度这些概念的建立要归于伽利略的运动理论。伽利略首先定义了匀速运动:“我们称运动是匀速的,是指在任何相同的时间内通过的距离相等。”他进一步给出了瞬时速度的概念:物体在给定时刻的速度,就是该物体从该时刻起做匀速运动所具有的速度。关于加速度的定义,伽利略是从落体运动的观察和研究入手的。在比萨大学任教时期,伽利略已经开始研究自由落体问题。他曾经以为落体的速度正比于所通过的距离,但很快他就领略到这个假设的逻辑错误。因为根据这个定义,物体通过某段距离的两倍所用的时间将和通过原来那段距离所用的时间相等,因为在两倍距离的情况下,其速度也是原来的两倍;另外,这个定义也不能描述落体从静止到运动的过渡。于是,伽利略转向由速度的增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 和相应时间的增量 Δt 的比例来定义匀加速运动。他提出“若一物体从静止出发,并且在相等的时间间隔内获得相同的速度增量,则称该物体的运动为匀加速运动”。而当 Δt 趋于 0 时, $\Delta \boldsymbol{v}/\Delta t$ 的极限就是瞬时加速度。由于我们所处的空间是三维空间,要表征一个距离需要 x, y, z 三个方向的长度,可按照 $s = \int ds = \int \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2}$ 的关系计算出距离。如果我们还想知道物体运动到哪里去,就需要用方向角指明运动的方向

向。为了让这类烦琐问题的分析简单化,数学家设计了一种非常重要的工具——矢量分析。于是,位矢、位移、速度和加速度都建立在矢量分析基础上。

简单地说,速度描述了物体位置是如何变化的,而加速度描述了速度是如何变化的。比如,水平向前扔出一个物体,起初它的速度沿正前方向,然而由于引力的作用使它在向前的同时向下坠落,即其速度改变了,我们说这个物体做加速运动。这里改变物体速度使物体获得加速度的力是地球的引力。另外,物体有大有小,如果我们忽略物体的尺寸,把它视为具有质量的几何点,这个代表物体、具有质量的点称为质点。质点是物理学研究的第一个理想模型,下面所述的运动学理论就是建立在质点模型的基础上的。

二、位矢、位移、速度、加速度的一般数学描述和物理解析

位置矢量:在选定的坐标系中从坐标原点出发指向物体(质点)所在位置的带有箭头的直线称为位置矢量,简称位矢。它的大小是线段的长度,方向从原点指向质点,如图 1-1 中用 $\mathbf{r}$ 表示的有向线段。在直角坐标系中,也可表示为

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

其中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别是 x, y, z 方向的单位矢量,它们之间满足:

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = 1 \quad (1-2)$$

和

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = 0 \quad (1-3)$$

式(1-2)称为归一化条件,式(1-3)称为正交化条件,即这三个单位矢量的大小各自为一个标准单位,方向相互之间垂直,代表三维空间的三个方向。

如果质点处于运动状态,质点的位置是随时间变化的。我们称质点的位置矢量随着时间的变化关系方程

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-4)$$

为质点的运动学方程。

设质点 P 在三维空间运动(见图 1-1), t 时刻处于位矢 $\mathbf{r}(t)$ 处,经过 Δt 时间后位于 $\mathbf{r}(t+\Delta t)$ 处,则定义质点 P 在 t 时刻的瞬时速度(简称速度)为

$$\mathbf{v}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{r}(t+\Delta t) - \mathbf{r}(t)}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-5)$$

其中 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t+\Delta t) - \mathbf{r}(t)$ 是位移的数学表达式, $\frac{d\mathbf{r}}{dt}$ 表示位置矢量对时间的一阶导

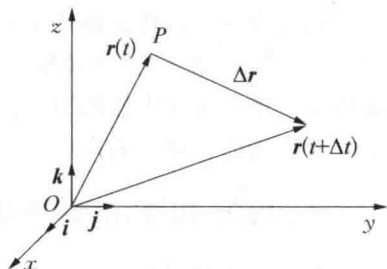


图 1-1

数,在时间-位移图上表现为求斜率。有人可能会问为什么我们这里要用极限来表示速度(或者速率)呢?下面的故事也许可以解开你的疑虑。大家知道,进入市区车辆是限速的。一次一位警察拦住一辆快速行驶的车,对车内的女士说:“女士,你刚才的车速是72千米每小时,而这个区段最高限速是36千米每小时,你超速了。”女士不服,说:“我刚进这个区5分钟,开车还没有1小时呢,怎么会行驶72千米呢?”如果你是一位警察,你怎么公正、理智地回答她的问题,解决她的疑惑呢?你可以说:“72千米每小时相当于20米每秒,你看那是离你20米的墙,如果按照这个速度行驶下一秒你就要撞墙了。”女士若有所思,似乎她不必继续开一个小时,主要在于某一瞬间她正在以这个速率开车。而某一瞬间的速率怎么定义呢?我们定义一个物体在很短的一段时间走过的距离除以这段时间。显然,这个时间越短越精确。到底多短呢?对于汽车行驶,这个时间间隔取1秒是合适的,但对于自由落体运动,可能要取1/100秒,并且用这段时间内通过的距离除以1/100秒的时间得到每秒的距离,也就是所谓的速率。实验上,需要根据物体运行速率范围的不同而选取不同的时间间隔,但理论上可以让这个时间间隔趋于无穷小,然后用这个无穷小时间内通过的距离除以这个无穷小时间间隔,得到瞬时速率。这就是我们需要引进“极限”概念的原因。有了极限、导数的概念,就可以把速度值精确到每个时刻、每一点上。今后,还要引进“微分”概念,它使获得的物理量值可以精确到某个时刻、某个空间点对应的值。当然,也要引进“积分”的概念,因为需要把这无穷多个、无穷小时间间隔对应的物理量的值求和而得到某段时间内这个物理量的值。

类似地,定义时刻 t 到 $t+\Delta t$ 时刻之间的平均加速度为

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

平均加速度粗略地表示了在该段时间内物体速度的变化情况。如果 Δt 越小,该段时间内速度的波动就越小,描述的速度变化情况也就越精细,从而定义质点 P 在 t 时刻的瞬时加速度为

$$a(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v(t+\Delta t) - v(t)}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (1-7)$$

瞬时加速度简称加速度。反过来有

$$\begin{cases} v(t) = v(0) + \int_0^t a(t) dt \\ r(t) = r(0) + \int_0^t v(t) dt \end{cases} \quad (1-8)$$

其中,式(1-8)称为运动方程。

注意: (1) 物体的速度方向改变,但加速度的方向不一定改变,如抛物运动。

(2) 物体的速度方向不变,但加速度方向不一定不变,如弹簧振子的运动。