

☆ 国家精品课程配套物理系列丛书

JIEXI SHENSUI SIXIANG LINGHUI WULI JINGSHEN DAXUE WULI JIAOCHENG

解析深邃思想 领会物理精神

——大学物理教程(上)

刘艳磊 张建中 等编著
赵言诚 孙秋华 主审



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国家精品课程配套物理系列丛书

解析深邃思想 领会物理精神

——大学物理教程（上）

刘艳磊	张建中	王雷	编 著
刘永军	苏丽萍	姜海丽	
赵言诚	孙秋华		主 审

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

大学物理课程是以物理学基础为内容,所包含的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分。本书是根据教育部 2008 年《理工科类大学物理课程教学基本要求》,吸收了多部国内外著名物理教程精髓,充实了大量物理学史和最新科技进展后编写而成的。本书分为上下两册,共 7 篇。上册包括第 1 篇力学,第 2 篇振动与波动,第 3 篇热学和第 4 篇电学;下册包括第 5 篇磁学,第 6 篇光学和第 7 篇量子物理。

本书图文并茂,结合实际,适合作为工科学生的大学物理课程的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

解析深邃思想 领会物理精神:大学物理教程. 上 / 刘艳磊
等编著. —北京:国防工业出版社, 2010.1

(国家精品课程配套物理系列丛书)

ISBN 978-7-118-06460-5

I. 解… II. 刘… III. 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 116990 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15 字数 398 千字

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 总定价 57.60 元

上册 28.80 元

下册 28.80 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前言

正如奥尔特加·加塞特在他的《大学的使命》(Mission of The University)中所指出的那样:“人类从事和热衷于教育是基于一个简单明了、毫无浪漫色彩的原因:人类为了能够满怀信心、自由自在和卓有成效地生活必须知道很多事情,但儿童和青年的学习能力都非常有限,这就是原因所在。假如童年期和青年期的时间分别都持续 100 年,或者儿童和青少年都具有无限的智慧和注意力,那么就不会有教学活动的存在。然而,童年和青年的时光非常短暂,儿童和青年的学习能力都非常有限,因此,需要教育的存在。”

“在原始时期,几乎没有什么教育存在。那时候知识内容严重不足,任何人都不必特别费力就能学会和掌握,几乎没有教育的必要。当需要获得的知识与学习能力不成比例时,教育就出现了。”中国教育在先秦时期由于十分丰富的诸子百家思想,形成了我国古代文化教育的繁荣期。“而欧洲,教育在接近 18 世纪中期时蓬勃兴起,持续发展到现在并影响了全球,理由很简单:正是那个时期近代文化首次走向繁荣,短时间内人类的知识宝库得以扩展。人类此时迫切需要学习远远超越其学习能力的大量知识,教育学也因此得以迅速发展。”

“缺乏学习能力是教育的基本原理。由于学习者不会学习,就必须要为教学作好恰如其分的准备。”物理学是一门实验科学,是理论和实验高度结合的精确科学。它研究物质、能量和它们之间的相互作用。物理学探索着自然,驱动着技术发展,是自然科学、人类文明、技术进步的基础。因而对于物理学的学习是培养理工科大学生基本实验技能和科学素质、形成主动探索精神的重要手段。

理论教学和实验教学是教育实践的两个重要方面。依据我国现阶段经济社会发展对人才培养的需要,为了实现培养具备综合的科学素质和创新精神的高级人才的目标,我们在物理理论和实验教学过程中,通过以下三个分阶段目标来达成“培养适应 21 世纪国民经济和社会发展的高素质人才”的目标,并以此搭建了三个功能目标清晰的教学平台。根据教学阶段功能,这三个教学平台被称为好奇心的唤醒平台、科学素质的养成平台和创新精神的激发教学平台。好奇心的唤醒教学平台的功能是,激发学生对物理学的好奇心和兴趣,催生获取知识的原动力,深化理解物理思想,为后续物理理论课打下良好的基础。科学素质的养成教学平台的功能是:在大学物理理论课程方面,通过给出清晰的图像的方法,建立物理概念,解析物理学的深邃思想,让学生深入领会物理精神;在实验方面,通过培养学生掌握物理实验基本知识、基本方法和基本技能,提高分析和解决问题的能力;作为科学素质的养成环节,采取开放式的教学模式,为学生提供一个自由、自主、自觉学习的环境。创新精神的激发教学平台的功能是:开阔眼界和思路,提高学

生对实验方法和技术的综合运用能力；通过实践过程，培养学生的创新意识、创新精神和创新能力；同时也培养了学生们的竞争意识、合作与协作能力以及团队精神，为学生创新能力的培养提供强有力的支撑。

要实现上述的教学目标，就要在教学实践中，针对我国目前高中教育的现状，面对高考应试教育的事实，来设计一系列切实有效的教学方案，以达成这一教育目标，我们具体搭建这些教学平台的尝试如下：

(1) 好奇心的唤醒——实验体验教学平台：对于绝大多数高校而言，物理实验是本科生入学后最先开始的实践课程，对于刚刚入学的大学生，他们经历了10多年的应试教育，尤其是中考和高考应试的激烈竞争，对于认识自然、探索未知的好奇心已经基本消磨殆尽。如何重新唤醒学生沉睡日久的好奇心，重新点燃他们探索未知的欲望，开启他们尘封多年的那些人类与生俱来的征服自然的本能，成为我们物理实验教学的首要任务和重要的教学目标。为此，我们结合物理学原理演示实验的内容，编写了物理原理展示的学习教材《触摸科学 体验发现》，再辅之以“诺贝尔物理学奖系列讲座”、系列“新生研讨课”、“科技发现影像展播”等多种课程形式，建设了好奇心唤醒实践平台，旨在唤醒学生沉睡日久的好奇心，重新点燃他们探索未知的欲望。

(2) 科学素质的养成——大学物理的理论与实验教学平台：我们知道，科学研究与探索仅靠热情与好奇心是不能完成的，因此，需要一系列具体的理论和实验培训环节来培养学生物理基础理论知识和基本的实验技能，教育并养成学生科学研究的能力和态度。针对这一教学目标，我们分别编写了大学物理教程（上、下）——《解析深邃思想 领会物理精神》和物理实验教程（上、下）——《操纵物理仪器 获取实验方法》。在理论上，不仅对于物理基本概念、定理和定律进行清晰的阐述，而且特别注重从物理本质上做出深刻的叙述与分析。在实验方面，建立了一系列逻辑上严密、操作过程严谨、结果要求准确严格的技能培训物理实验项目，透过“基础性”、“综合性”和“设计性”这三个层次系列实验项目，达到初步养成其科学素质的目的。

(3) 创新精神的激发——实践探索教学平台：当学生对于各种科技活动充满好奇的时候，当他们具备了一定的科学实验能力的时候，创造的冲动将会在其心中涌动。而创新是一个民族进步的灵魂，是国家兴旺发达的不竭动力。当今社会发展趋势要求高等学校能够培养出真正为社会所用的创新人才，为达此目的，我们创建了旨在激发学生创造与探索精神的创新实践教学平台，开设了具有创新特色的实验项目，为开展科学探究活动和参加丰富多彩的科技竞赛提供实践环境与条件。

在上述教学理念的指导下，我们试图通过对教学内容和训练方法等方面进行改革，探索一种旨在唤醒学生的好奇心、全面提高学生的科学素质和创新精神的物理理论与实验教学的新的教材与教法组织实施体系，并进一步尝试了这种人才培养的途径与模式。

该系列物理教材就是我们进行上述教学实践过程中所凝练的一项成果。《解析深邃思想 领会物理精神》是该系列教材中的一种。本教材是根据教育部2008年《理工科类大学物理课程教学基本要求》，吸收了多部国内外著名物理教程精髓，充实了大量物理学史和最新科技进展后编写而成的。

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学，是其他自然科学和工程技术的基础。大学物理课程是以物理学基础为内容，所包含的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分。大学物理课程的教

学,不能局限于讲解物理的定理或解题的方法,更重要的是帮助学生将物理原理与它所描绘的真实的世界以及与真实的世界所面对的实际问题联系起来。物理学不仅是课堂上的知识传递、黑板与作业本上的物理习题、以及试卷上问题的分析与求解,而更应该与生活实际联系起来,与生产实践联系起来,并应用于解决所面对的实际科学与技术问题。从而使学生真正体会物理理论的基础性作用,体会这门课程对后期专业知识的支撑作用。

本书共分7篇,分别介绍了力学、振动与波动、热学、电学、磁学、光学、量子物理。相应的内容选择主要按照2008版《理工科类大学物理课程教学基本要求》中的A类要求,适当补充了部分B类要求。

参加本教材编写工作的有:刘艳磊(第1篇中的第1章、第2章),刘永军(第1篇中的第3章和第7篇中的第1章),张建中(第2篇),王雷(第3篇和第4篇部分图的绘制),姜海丽(第4篇中的第1章,第5篇中的第1章),苏丽萍(第4篇中的第2章,第5篇中的第2章),程丽(第5篇中的第3章、第4章),孙伟民(第6篇),张军海(第7篇中的第2章、第3章)。苏景辉、赵言诚、孙秋华对本书进行了初审,苑立波、孙伟民负责全书结构的组织和最终的定稿。

本教材特点:

(1)本系列教材的命名是从教学目的出发,每本教材都将其教学目标进行凝练,作为教材书名。为了避免混淆,增加了副标题。这样做的目的是时时提醒教师和学生,不仅“教”要明确教的目标,而且“学”的目标更要明确。本书致力于将著名物理学家的深邃思想介绍给学生,使学生真正体会物理学的精神实质。

(2)为了使教材具有更好的可读性,本书采用了与国际接轨的彩版印刷,在编排方面注重版面设计、图文并茂,给人以赏心悦目的感觉。在内容的叙述上,力求做到生动形象、通俗易懂,强调物理图像和物理思想,使学生在欣赏的过程中体验并学习物理学知识。

(3)本书每篇以物理学史开篇,辅以丰富的实际生活、生产实例,补充了大量的最新科研成果,准备了很多具有实际背景的例题和习题。这种撰写方法的目的在于消除学生对物理的恐惧和排斥心理,明了物理学不是公式堆积的学说,而是反映客观世界的基础科学。引导学生在物理学习过程中要联系实际,体会物理学在解决实际问题、支撑专业知识方面的作用,找到每一个物理原理的生活原型或应用实例,真正理解物理学思想的精髓。

(4)本书从体例上采用了分篇撰写,各篇之间既相互联系又各成体系。教师和学生可以根据需要,灵活地选择讲授、学习的内容及次序。

本系列丛书在编写过程中,参考了国内外大量的文献资料,并在每个专题后面逐一标注。此外,也从网络上搜集了大量的有关资料和图片,并分别加注。对于部分网络上转引的资料,由于难于确定原作者,在此向原作者表示感谢,并请原作者与我们联络。正是由于如此广泛丰富的参考资料,才能为学生呈献出这样一本内容充实、生动的教材。仅此,我们向所有对本书做出贡献的同仁,致以深切的谢意。

限于编者的学术水平,书中难免存在错误和不妥之处,望老师和同学们在使用过程中多提宝贵意见,我们将会在今后的再版中加以纠正,使教材不断完善。

苑立波

2009年4月于哈尔滨

目 录

第1篇 力 学

第1章 质点力学	4
第1节 运动的描述	4
第2节 位置矢量与位移矢量	5
第3节 速度与加速度	7
第4节 运动举例	9
第5节 相对运动	13
第6节 牛顿运动定律	15
第7节 非惯性系与惯性力	23
第8节 质点与质点系的动量定理	26
第9节 质点系的动量守恒定律	28
第10节 质心和质心运动定理	29
第11节 变力的功和动能定理	32
第12节 保守力的功、势能	34
第13节 机械能守恒	39
第14节 碰撞	42
第15节 对称性与守恒定律	44
第16节 理想流体的性质和伯努利方程	46
习题	48
第2章 刚体定轴转动	51
第1节 刚体的运动	51
第2节 刚体定轴转动定律	54
第3节 刚体转动中的功和能	62
第4节 质点和刚体的角动量	63

第 5 节 角动量守恒	65
第 6 节 进动	66
习题	67

第 3 章 狭义相对论力学基础

第 1 节 力学相对性原理	69
第 2 节 狭义相对论基本原理与洛伦兹坐标变换式	71
第 3 节 狭义相对论的时空观	76
第 4 节 狭义相对论动力学基础	79
习题	82

第 2 篇 振动与波动

第 1 章 振动

第 1 节 谐振子运动	84
第 2 节 受迫振动与阻尼振动	87
第 3 节 线性与非线性系统	91
第 4 节 振动的合成	93

第 2 章 波动

第 1 节 机械波的产生与传播	98
第 2 节 波的衍射与干涉	105
第 3 节 多普勒效应及各种各样的波	112
习题	117

第 3 篇 热 学

第 1 章 气体动理论

第 1 节 平衡态、温度、状态方程	120
第 2 节 理想气体的压强与温度	123
第 3 节 能量按自由度均分定理	128
第 4 节 麦克斯韦速率分布律	130
第 5 节 气体分子的平均碰撞频率和平均自由程	134
习题	137

第2章 热力学第一定律	138
第1节 准静态过程的功	138
第2节 热量、热力学第一定律	140
第3节 等体过程、等压过程、热容	142
第4节 等温过程、绝热过程	146
第5节 循环过程、卡诺循环	149
习题	154
第3章 热力学第二定律	155
第1节 热力学第二定律的两种表述	155
第2节 可逆过程、卡诺定理	157
第3节 熵	159
第4节 熵增加原理	162
第5节 玻耳兹曼熵关系式	164
习题	166

第4篇 电 学

第1章 静电学	169
第1节 电荷	170
第2节 库仑定律	171
第3节 电场、电场强度	172
第4节 高斯定理	177
第5节 高斯定理的应用	182
第6节 电势	185
第7节 等势面及电势梯度	191
第8节 静电起电机	195
习题	196
第2章 静电场中的导体和电介质	198
第1节 静电场中的导体	198
第2节 电容	208
第3节 静电场中的电介质	215
第4节 静电场的能量	224
习题	226
参考文献	228

第1篇 力学

力学是最古老的科学之一，它的发展过程是人类对于机械运动的认识过程。

古代人类在掌握农事、辨别方向时，通常要对日月星辰进行观察。这些天体相对于地球的运动就是人类时刻碰到的机械运动。在研究机械运动时，不得不提及与之密切相关的天文学的发展。

现代天文学应该首先提及哥白尼创建的日心说。科学巨著《天体运行论》，在当时彻底动摇了中世纪宗教世界观的基础，把科学从神学和经院哲学中解放出来，导致了自然科学的变革。继哥白尼之后，丹麦著名的天文学家、天文观测大师第谷·布拉赫经过对星体 20 多年的精密观测，积累了有关行星运行的大量珍贵资料，并为开普勒发现行星运动定律作了准备。开普勒利用第谷多年积累的观测资料，研究火星的运行，发现了行星沿椭圆轨道运行。1609 年他在《新天文学》中首先提出了“开普勒第一定律和第二定律”。第一定律又称椭圆轨道定律，定律指出：“所有行星分别沿不同大小的椭圆轨道绕太阳运动，太阳处于椭圆的一个焦点上。”第二定律又称等面积定律，定律指出：“在行星运动时，联结行星和太阳的线，在相等的时间内，永远扫过同样大小的面积。”1619 年，开普勒又在《宇宙的和諧》一文中，提出了第三定律，即周期定律，行星公转周期的平方与它们轨道半长轴的立方成正比。这几个定律也为牛顿发现万有引力定律提供了理论基础。

经典力学开始于伟大的近代实验科学的奠基者、科学之父伽利略。伽利略（公元 1564 年—公元 1642 年）是意大利天文学家、哲学家、数学家和物理学家。17 岁时，他进入比萨大学学医，同时钻研数学。伽利略从小就善于观察和思考。18 岁时，一次他看到教堂的油灯加油后在来回摆动，注意到油灯振动幅度越来越小，但振动周期却是相等的。后来经过他的进一步研究，发现了摆的等时性。伽利略爱独立思考，对权威的结论他也要用自己的观察和实验来检验一番。他特别对当时被学术界认为绝对权威的亚里士多德的学说提出异议。最终亚里士多德的一些错误观点被伽利略用实验否定。

他创建了一整套科学研究方法，这种科学方法把实验、物理思维和数学演绎三者巧妙结合起来，开辟了自然科学发展的新途径。是他首先把实验引进物理学并赋予重要的地位，革除了以往只靠思辨下结论的恶习。他同时也很注意严格的推理和数学的运用，例如他用消除摩擦极限情况来说明惯性运动，用大石头和小石块绑在一起下落应具有的速度来使亚里士多德陷于自相矛盾的困境，从而否定重物比轻物下落快的结论。这样的推理就能消除直觉的错误，从而更深入地理解现象的本质。

伽利略论证了惯性运动，指出维持运动并不需要外力。经验使人相信，要使一个物体运动得更快，必须用更大的力推它。“凡运动的物体必定有推动者推动。”这是古希腊哲学家亚里士多德的观点。伽利略在实验和观察的基础上，靠科学推理得出了正确的结论。他注意到，当一个球沿斜面向下滚动时会越来越快，向上滚动时会越来越慢，当球沿水平方向滚动时，速度应保持不变。但实际上，球在水平面上滚动一段路程后会停下来，伽利略认为这是由于物体和地面之间有摩擦的缘故。伽利略观察到，表面越光滑，摩擦作用越小，小球在水平面上滚得越远。设想有一个理想的光滑表面，没有摩擦，小球将作如何运动？伽利略的推论是：小球将永远滚下去。伽利略的

正确结论，由牛顿总结为动力学的一条基本定律，称为牛顿第一定律，这就否定了亚里士多德的“运动必须推动”的教条。

伽利略还论证了所有物体都以同一加速度下落，用实验研究了匀加速运动，并提出了相对性原理的思想。他还亲手制造和改进几具望远镜，并用来巡视星空。他发现所见恒星的数目随着望远镜倍率的增大而增加；银河是由无数单个的恒星组成的；月面上有崎岖不平的现象；金星也有圆缺的变化；木星有四个卫星。他还发现太阳黑子，并且认为黑子是日面上的现象，由黑子在日面上的位移，他得出太阳的自转周期为28天（实际上是27.35天）。伽利略在介绍他这些新发现的两本书《星际使者》（1610年）和《关于太阳黑子的书信》（1613年）中，都宣扬哥白尼的日心说。

伽利略的《关于力学和局部运动两门新科学的谈话和数学证明》一书，奠定了经典力学中运动学与动力学的基础。

此后，伽利略的科学研究方法广为流传，涌现了一批科学家（牛顿称他们为巨人），他们有：笛卡儿、惠更斯、莱布尼兹、波义耳、费马、帕斯卡、马略特、胡克、哈雷、格里凯等，他们对惯性、动量守恒、向心力、碰撞、钟摆等的研究为牛顿的综合研究打下了基础。

1661年，18岁的牛顿从中学毕业后考上了剑桥大学“三一学院”。在大学的头两年里，他除了学习算术、代数、三角以外，还认真学习了欧几里得《几何原本》，他又钻研笛卡儿的《几何学》，熟练地掌握了坐标法。这些数学知识，都为牛顿后来的科学研究打下了坚实的基础。由于学习踏实认真，3年后被选为优等生，1665年毕业后留校。同年6月剑桥因瘟疫的威胁而停课，他回家乡一连住了20个月，这20个月的清静生活使他对在校所研究的问题有了充分的思考时间，因而成了他一生中创造力最旺盛的时期。在这一时期微积分、万有引力定律、光的色散等都已基本上孕育成熟，这些是他一生中最重要的科学发现。在以后的岁月里他的工作都是对这一时期研究工作的发展和完善。

牛顿在剑桥工作的25年中写下了许多论文和著作，其中包括《自然哲学的数学原理》，但牛顿把很多论文锁在抽屉里，并没拿出去发表，有些发表的文章，是被他的朋友们发现，在朋友们的催促下才发表的。标志经典力学理论体系建立的巨著《自然哲学的数学原理》于1687年仲夏出版，当时受到学术界的赞颂，很快销售一空。

在《自然哲学的数学原理》这部著作中，牛顿把伽利略提出的惯性定律写下来作为第一运动定律；他定义了质量、力和动量，提出了动量改变与外力的关系，并把它作为第二运动定律；他写下了作用和反作用的关系作为第三运动定律。第三运动定律是在研究碰撞规律的基础上建立的；而在他之前华里士、雷恩和惠更斯等人都仔细地研究过碰撞现象，实际上已发现了这一定律。他还写下了力的独立作用原理、伽利略的相对性原理、动量守恒定律。写下了他对空间和时间的理解，即绝对空间和绝对时间的概念。

尽管牛顿取得如此巨大的成就，但在他评价自己的科学成就时却说：我好像是站在海滨上玩耍的孩子，时而拾到几块莹洁的石子，时而拾到几片美丽的贝壳并为之欢欣。那浩瀚的真理海洋仍然在我的前面未被发现。牛顿认为他所以能登上科学的高峰，“那是由于我站在巨人们的肩上的缘故。”

牛顿三大运动定律总结提炼了当时已发现的地面上所有力学现象的规律。它们形成了经典力学的基础，在以后的200多年里几乎统治了物理学各个领域。对于热、光、电现象人们都企图用牛顿定律加以解释，而且在有些方面，如热的动力论，居然取得了惊人的成功。牛顿定律至今仍是许多工程技术，例如航空航天、机械、土建等的理论基础。至此可以说，经典力学取得了辉煌的成果，经典力学理论体系的大厦已巍然耸立。

第1章 质点力学

宇宙的所有物体都在随时间发生各种变化，而为了找出这些变化所遵循的规律，必须描述这些变化，并用某种方式记录下来。在物体中要观察的最简单的变化是物体的位置随时间的明显改变，称为运动。而描述物体运动的内容叫做运动学，为力学的一部分，总的来说力学是研究物体机械运动规律的，包括运动学和动力学。

本章主要讲述经典力学的基础——质点力学部分，并着重阐明动量、角动量和动能诸多概念及相应的守恒定律。

第1节 运动的描述

运动的研究对所有物理领域是一件基本的事，它所讨论的问题是：何处？何时？研究运动要从点的运动开始研究，原因在于所有复杂的运动都可以看作是若干个简单运动的合成。例如：在研究一辆汽车行驶的路程和快慢时，可将其大小、形状和内部结构忽略而视为有质量的点；在研究一朵缓慢漂移但迅速蒸发的云的漂移速度时，可以用云的许多分子的运动来描述，或者在原则上能够通过描述云中所有个别分子的运动来描述云的运动。不论是描述汽车的运动，还是云的运动，描述的共同特征是将其视为（或是分解为）某一小物体，就是通常说的质点。

在初次研究质点运动时，首先不考虑世界的三维性，将集中注意在一个方向上的运动，就像在一条公路上行驶的货车那样，当知道了如何描写一维运动后，就将回到三维中去。那么怎样来描述像运动的货车一样的一维运动呢？有许多可能的方式，方式之一，测量它与起点的距离，并记下所有的观测，如表 1-1-1 所列。

表 1-1-1 中， s 表示货车离起点的距离，单位为 m ， t 表示时间，单位为 min 。表中的第一行表示零距离和零时间，即货车尚未出发， $1min$ 后，出发并开过了 $1250m$ 。在 $3min$ 内，它开得更远，货车在加速前进；但在第 $4min$ 一直到第 $5min$ 之间发生了什么事情？也许是遇到红灯停下来了，然后再次加速，在第 $6min$ 末开过 $14050m$ ，在第 $7min$ 末开过 $18050m$ ，在第 $8min$ 末开过 $24500m$ ，在第 $9min$ 它只前进到 $25000m$ ，因为在最后 $1min$ 它被警察拦住了。

表 1-1-1 货车运动的时间与距离

t/min	s/m	t/min	s/m
0	0	5	12500
1	1250	6	14050
2	4050	7	18050
3	9050	8	24500
4	12000	9	25000

这是一种描述运动的方式，直观地给出货车在各个时间段内所走的位移。另一种描述运动的方式是利用曲线图。以横轴表示时间，纵轴表示距离，就得到如图 1-1-1 所示的曲线。当时间增加时，距离也增加，开始很慢，然后较快，在 5min 前后又很慢，以后几分钟又加快，最后在第 9min 时停止增加。曲线图可以给出来的前提是在所有时刻货车都具有某个位置，同时，为了描述完整，还必须知道，在那些半分钟的标记处，货车开到了哪里。另外，还可以抽象地将曲线写成这样一个公式，即 $s = f(t)$ ，它表示 s 是依赖于 t 的量，用数学术语来说， s 是 t 的函数。由于不知道这个函数是什么，因此无法以确定的代数形式写下来。

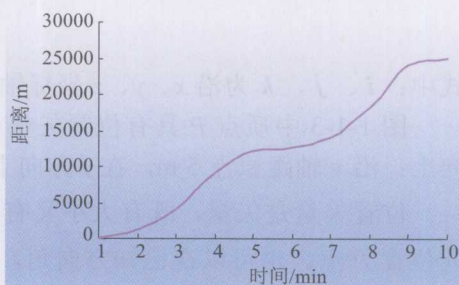


图 1-1-1 货车的距离-时间曲线

物理学上为了细致而精确地对质点或物体的运动进行描述，给出了 4 个基本的物理量，下面对其作具体的描述。

第2节 位置矢量与位移矢量

2.1 位置矢量

对某一物体的运动进行描述，也就是对此物体进行定位，定位的本意是找出它相对某一参考点的位置。此参考点常是一坐标轴的原点（或零点），如图 1-1-2 中 x 、 y 、 z 轴的原点，即坐标系的原点。轴的正方向为坐标值增大的方向，反方向为负方向。也就是说，在描述质点运动时，要选择一个标准物，此标准物为参考系。

某一时刻质点相对坐标原点的位置用 3 个轴上的坐标值来描述。例如，某一时刻质点位于 P 点，可以用 P 点的坐标，即 x 、 y 、 z 的值描述其位置。或直接用由原点 O 指向质点所在空间位置 P 点的有向线段 $\mathbf{r}$ 描述其位置，此时的 $\mathbf{r}$ 称为位置矢量，简称位矢，如图 1-1-3 所示。

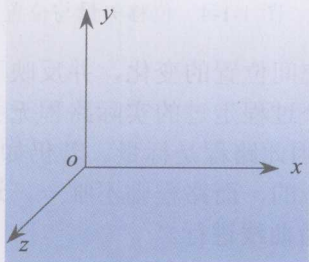


图 1-1-2 确定物体位置的坐标轴

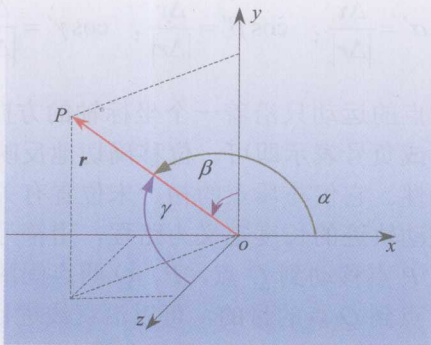


图 1-1-3 位置矢量示意图

在三维直角坐标系中, 位置矢量可表示为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (1.1.1)$$

式中: $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 为沿 x 、 y 、 z 坐标轴正方向的单位矢量。

图 1-1-3 中质点 P 具有位置矢量 $\mathbf{r} = -2\mathbf{i} + 5\mathbf{j} + 3\mathbf{k}$ (m), 说明质点沿 x 轴距原点 2m, 在 $-\mathbf{i}$ 方向上; 沿 y 轴距原点 5m, 在 $\mathbf{j}$ 方向上; 沿 z 轴距原点 3m, 在 $\mathbf{k}$ 方向上。

位置矢量是矢量, 既有大小又有方向, 大小为 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, 方向为从原点 o 指向空间位置 P 点。也可以在已知方向角, 即位置矢量 $\mathbf{r}$ 与三个坐标轴夹角分别为 α 、 β 、 γ 的情况下, 由其方向余弦来确定, 即

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}; \quad \cos \beta = \frac{y}{r}; \quad \cos \gamma = \frac{z}{r}$$

同时方向角满足关系式 $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$ 。

2.2 位移矢量

若质点在 P 点对应的位置矢量为 $\mathbf{r}_P$, 如图 1-1-4 所示, 其位置从 P 点移动到 Q 点, Q 点对应的位置矢量为 $\mathbf{r}_Q$, 此过程中位置矢量的改变量称为位移, 用 $\Delta \mathbf{r}$ 表示, 并且在空间三维直角坐标系中, 可表示为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_Q - \mathbf{r}_P = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1.1.2)$$

式中: 符号 Δ 为希腊文 delta 的大写, 它代表该物理量的变化或增量, 即相应物理量的末值减去初值。

位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是矢量, 既有大小又有方向, 大小为起点到终点位置之间的距离, 即线段 PQ 的长度, 为 $|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$, 方向则从始点 P 指向终点 Q 。也可类似于位置矢量用其方向余弦来确定, 即已知位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向角 α' 、 β' 、 γ' , 有

$$\cos \alpha' = \frac{\Delta x}{|\Delta \mathbf{r}|}; \quad \cos \beta' = \frac{\Delta y}{|\Delta \mathbf{r}|}; \quad \cos \gamma' = \frac{\Delta z}{|\Delta \mathbf{r}|}$$

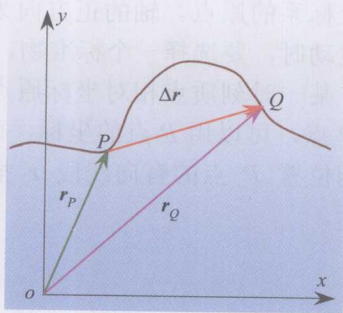


图 1-1-4 位移矢量与位置矢量的关系

如果质点的运动只沿着一个坐标轴的方向进行, 其方向由正号或负号表示即可。位移确切地反映了物体在空间位置的变化, 并反映了运动的矢量性和叠加性。它仅与质点的初、末位置有关, 而与整个过程走过的实际路程无关, 我们将质点实际运动轨迹的长度定义为路程, 用符号 Δs 表示, 因此路程是标量。若仍如图 1-1-4 所示, 质点从 P 点移动到 Q 点, P 、 Q 两点间的位移是唯一的, 而路程则不唯一, 这表明质点要达到从 P 点到 Q 点的目的, 可以沿直线进行, 也可以沿曲线进行。

在国际单位制 (SI) 中, 位置矢量与位移矢量的单位均为米, 用符号 m 表示。

第3节 速度与加速度

3.1 速度

当我们利用曲线图给出了运动质点在空间所经过的路径（即轨迹，或称为轨道），像图 1-1-1 所示的货车的距离—时间曲线，虽然看起来有些抽象，但它所包含的信息却更丰富，同时还揭示了货车运动快慢的程度。实际上，与“快慢程度”相联系的物理量不止一个，其中之一是平均速度 $\bar{v}$ ，它是位移 $\Delta \mathbf{r}$ 对经过时间 Δt 的比值，数学表达形式为

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.1.3)$$

像位移一样， $\bar{\mathbf{v}}$ 既有大小，又有方向，是一个矢量。大小为此矢量的模，方向和位移的方向一致。另一种描述质点运动“快慢程度”的物理量是平均速率 $\bar{v}$ ，它是路程 Δs 对经过时间 Δt 的比值，数学表达形式为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1.1.4)$$

平均速率 $\bar{v}$ 是标量，与质点移动过的总路程相关，而平均速度与质点的位移有关。二者有一共同点，它们的描述都是质点在一段时间间隔 Δt 中的情况。然而，“快慢”这个词一般更多地用在描述质点在给定时刻运动的快慢程度，即它的瞬时速度（简称速度） $\mathbf{v}$ 。

某一时刻的速度，可以令式 (1.1.3) 中的时间间隔 Δt 趋近于 0 求得，即计算平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 在 Δt 趋近于 0 时的极限，就为该时刻的速度

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.1.5)$$

式 (1.1.5) 表明， $\mathbf{v}$ 是给定时刻质点的位置矢量 $\mathbf{r}$ 随时间 t 的变化率，即 $\mathbf{v}$ 是 $\mathbf{r}$ 对 t 的导数，并且速度具有瞬时性，也是一个矢量。速度的大小称为速率，用 v 表示，为一标量。而速度的方向从其定义上来看，是位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向，同时从其物理意义上来看，当时间逐渐减小并趋于 0 时，图 1-1-4 中的 Q 点逐渐趋于 P 点，直线 PQ 逐渐趋于 P 点切线，所以可以用运动轨迹上质点所在的指向前进方向的切线来描述速度的方向。

在直角坐标系中，将速度分解为 3 个正交分量的数值

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt}$$

此时物体的速度和速率分别为

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k}$$

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

在国际单位制 (SI) 中，速度的单位为米每秒，用符号 m/s 表示。

3.2 加速度

当我们成功地用速度描述了一个质点的运动时,就要提出疑问:“速度是如何变化的?”当一个质点速度的大小或方向中任一改变或二者均变时,此质点就一定具有加速度。对一个空间运动的质点,在某一时间间隔 Δt 内速度的平均变化率即为平均加速度。如图 1-1-5 所示,若质点在 t_1 时刻位于 P 点,速度为 v_1 ,在 t_2 时刻位于 Q 点,速度为 v_2 ,速度的增量与经历时间的比值为质点在该时间内的平均加速度,为

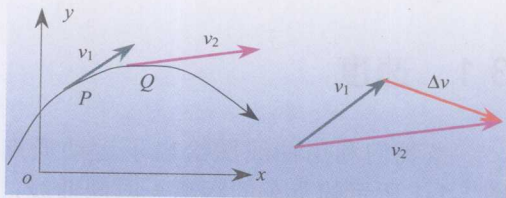


图 1-1-5 平均加速度示意图

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1.1.6)$$

平均加速度为矢量,其方向为质点速度变化的方向。当某辆小汽车能在 10s 内由静止达到 18m/h,从数据中我们可以得到速率变化多快的信息,但这只是平均的情况,即可以得到其平均加速度。现在我们想知道更为精确的速度变化快慢信息,即每秒速度变化多少米,就需要用到瞬时加速度。瞬时加速度(简称加速度)为时间间隔 Δt 趋近于 0 时平均加速度的极限,是速度对时间的导数,即

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (1.1.7)$$

即质点在任意时刻的加速度可以表述为质点位置矢量对时间的二阶导数。

在直角坐标系中,将加速度分解为 3 个正交分量的数值,即

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2}$$

此时物体的加速度为

$$a = a_x i + a_y j + a_z k$$

加速度是矢量,大小为 $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$,方向是当 Δt 趋近于零时速度增量的极限方向。

在国际单位制(SI)中,加速度的单位为米每秒平方,用符号 m/s^2 表示。

例 1 一只哈巴狗奔跑过一个广场,广场的上面正巧画着一套坐标系,哈巴狗的位置坐标对时间的函数由下式给出: $x = -0.31t^2 + 7.2t + 28$, $y = 0.22t^2 - 9.1t + 30$ 。式中, t 的单位为 s, x 与 y 的单位为 m。分别用单位矢量表示哈巴狗在 $t=15s$ 时刻的位矢、速度和加速度,并求出大小和方向。

解: (1) 位矢: $r(t) = x(t)i + y(t)j$

在 $t=15s$ 时,标量分量为

$$x = (-0.31)(15)^2 + (7.2)(15) + 28 = 66(m)$$

$$y = (0.22)(15)^2 - (9.1)(15) + 28 = -57(m)$$

因此,在 $t=15s$ 时,有

$$r = 66i - 57j(m)$$

$$\text{大小: } r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(66)^2 + (-57)^2} = 87(m)。$$

$$\text{方向: 与 } x \text{ 轴夹角 } \theta = \arctan \frac{y}{x} = \arctan \frac{-57}{66} = -41(^{\circ})。$$