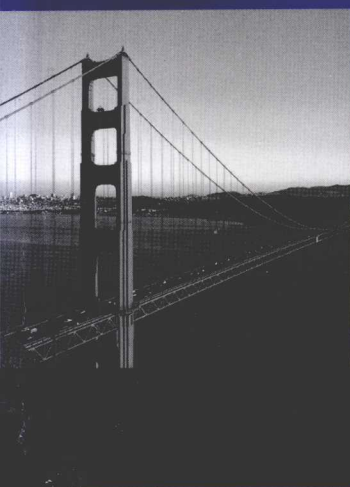




世纪高等教育规划教材



Theoretical Mechanics

理论力学

主编 ◎ 范钦珊 王立峰

编著 ◎ 刘荣梅 孙 伟 王立峰 范钦珊



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

013046941

031-43
83

21 世纪高等教育规划教材

理 论 力 学

范钦珊 王立峰 主编
刘荣梅 孙 伟 编著
王立峰 范钦珊



机械工业出版社



北航

C1652616

031-43
83

150330810

本书是在调研的基础上,根据新的培养计划和教育部高等学校非力学专业力学基础课程教学指导分委员会最新制定的《理论力学课程教学基本要求(A类)》,从一般院校的实际情况出发,删去大部分院校不需要的教学内容编写而成。在面向21世纪课程教学内容与体系改革的基础上,本书对传统内容进一步加以精选,大大压缩教材篇幅,以满足60学时左右“理论力学”或“工程力学”课程理论力学部分的教学要求。

从力学素质教育的要求出发,本书更注重基本概念,而不追求烦琐的理论推导与数学运算。本书与以往的同类教材相比,工程概念有所加强,引入了大量涉及广泛领域的工程实例以及与工程有关的例题和习题。

全书除绪论外,共分11章,第1~3章为静力学;第4~6章为运动学;第7~10章为动力学;第11章为虚位移原理。

本书可作为高等学校工科各专业的基础力学课程教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/范钦珊,王立峰主编. —北京:机械工业出版社,2013.3

21世纪高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-41415-5

I. ①理… II. ①范… ②王… III. ①理论力学-高等学校-教材
IV. ①O31

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第025260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:姜凤 责任编辑:姜凤 李乐

版式设计:张薇 责任校对:丁丽丽

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京双青印刷厂印刷

2013年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·17.75印张·364千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41415-5

定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是应机械工业出版社之约而编写的，主要是为了适应一般高等学校力学课程教学改革、提高教学质量的要求。

全国普通高等学校新一轮培养计划中，课程的教学总学时数大幅度减少。基础力学课程的教学时数也要相应压缩。怎样在有限的教学时数内，使学生既能掌握基础力学的基本知识，又能了解一些基础力学的最新进展；既能培养学生的力学素质，又能加强工程概念。这是很多力学教育工作者关心的事情。

编写本书之前，著者对我国高等学校“基础力学”的教学状况以及对“基础力学”教材的需求进行了调研，与从事基础力学第一线教学的老师以及已经学习和正在学习力学课程的同学交换了关于基础力学教材的意见。

本书是在上述调研的基础上，根据新的培养计划和教育部高等学校非力学专业力学基础课程教学指导分委员会最新制定的《理论力学课程教学基本要求（A类）》，从一般院校的实际情况出发，删去大部分院校不需要的教学内容编写而成。在面向 21 世纪课程教学内容与体系改革的基础上，本书对传统内容进一步加以精选，大大压缩教材篇幅，以满足 60 学时左右“理论力学”或“工程力学”课程理论力学部分的教学要求。

从力学素质教育的要求出发，本书更注重基本概念，而不追求烦琐的理论推导与数学运算。

工科院校的“基础力学”教学内容与很多工程领域密切相关。基础力学教学不仅可以培养学生的力学素质，而且可以加强学生的工程概念。这对于他们向其他学科或其他工程领域扩展是很有利的。基于此，本书与以往的同类教材相比，工程概念有所加强，引入了大量涉及广泛领域的工程实例以及与工程有关的例题和习题。

全书除绪论外，共分 11 章，第 1~3 章为静力学；第 4~6 章为运动学；第 7~10 章为动力学；第 11 章为虚位移原理。

本书可作为高等学校工科各专业的基础力学课程教材，也可供有关工程技术人员参考。

本书由清华大学范钦珊教授和南京航空航天大学王立峰教授主编，南京航空航天大学刘荣梅副教授和孙伟副教授编写。本书于 2010 年至 2012 年初形成初稿，于 2012 年 6~7 月统稿。范钦珊教授的统稿工作是在美国加州休息期间完成的，统稿期间承蒙清华大学校友吴擎虹、范心洋提供了良好的工作条件与生活环境，借本书出版之际谨对两位清华校友表示诚挚谢意。

范钦珊

2013 年 3 月

目 录

前言

绪论	1
0.1 工程与力学	1
0.2 理论力学的研究对象和研究内容	4
0.3 理论力学的研究方法	5
0.4 学习理论力学的目的	6
第1章 静力学概念与物体受力分析	7
1.1 静力学模型概述	7
1.1.1 力的两种效应	7
1.1.2 物体受力的抽象与简化	7
1.1.3 物体的抽象与简化	8
1.1.4 接触与连接方式的抽象与简化 约束	9
1.2 静力学基本原理	9
1.2.1 二力平衡原理	9
1.2.2 加减平衡力系原理	9
1.2.3 力的平行四边形法则	10
1.2.4 作用和反作用定律	11
1.2.5 刚化原理	11
1.3 工程常见约束与约束力	12
1.3.1 柔性约束	12
1.3.2 刚性约束	12
1.4 受力分析初步	16
1.5 本章小结与讨论	19
1.5.1 本章小结	19
1.5.2 整体平衡与局部平衡	19
1.5.3 关于二力构件	20

1.5.4 静力学基本原理的适用性	20
1.5.5 关于约束	21
习题	21
第2章 力系的等效与简化	25
2.1 力矩的概念和计算	25
2.1.1 力对点之矩	25
2.1.2 力对轴之矩	26
2.1.3 合力矩定理	27
2.2 力偶及其性质	27
2.2.1 力偶的定义	27
2.2.2 力偶的基本性质	28
2.2.3 力偶系及其合成	29
2.3 力系的简化	31
2.3.1 力系的基本特征量——力系的主矢与主矩	31
2.3.2 力向一点平移定理	33
2.3.3 一般力系的简化	34
2.3.4 力系简化在固定端约束力分析中的应用	35
2.4 本章小结与讨论	36
2.4.1 本章小结	36
2.4.2 关于力系简化的最后结果	37
2.4.3 关于力偶性质推论的适用性	38
习题	39
第3章 力系的平衡	45
3.1 力系的平衡条件	45
3.2 一般力系的平衡方程	45
3.2.1 平衡方程的一般形式	45
3.2.2 平面一般力系的平衡方程	46
3.2.3 平面力系平衡方程的其他形式	46
3.3 单个刚体的平衡问题	47
3.4 简单多刚体系统的平衡问题	50
3.4.1 静定和超静定的概念	50
3.4.2 刚体系统平衡问题的求解	51
3.5 考虑摩擦的平衡问题	56
3.5.1 滑动摩擦力 库仑定律	56
3.5.2 摩擦角与自锁现象	57
3.5.3 摩擦平衡条件与平衡方程	60
3.6 本章小结与讨论	64

3.6.1 本章小结	64
3.6.2 受力分析的重要性	65
3.6.3 关于简单刚体系统平衡问题的讨论	65
3.6.4 正确的直观判断	66
3.6.5 关于桁架分析的讨论	67
3.6.6 考虑摩擦时平衡问题的几个重要概念	70
习题	71
第4章 点的一般运动与刚体的基本运动	79
4.1 点的一般运动	79
4.1.1 描述点运动的矢量法	79
4.1.2 描述点运动的直角坐标法	80
4.1.3 描述点运动的弧坐标法	82
4.2 刚体的基本运动	87
4.2.1 平移	87
4.2.2 定轴转动	88
4.3 本章小结与讨论	91
4.3.1 本章小结	91
4.3.2 建立点的运动方程与研究点的运动几何性质	92
4.3.3 点的运动学的两类应用问题	92
4.3.4 描述点的运动的极坐标形式	92
习题	93
第5章 点的复合运动	96
5.1 绝对运动、相对运动与牵连运动	96
5.1.1 两种参考系	96
5.1.2 三种运动	96
5.1.3 三种速度和三种加速度	97
5.2 速度合成定理	97
5.3 牵连运动为平移时点的加速度合成定理	101
5.4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理 科氏加速度	102
5.4.1 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	103
5.4.2 科氏加速度	104
5.5 本章小结与讨论	108
5.5.1 本章小结	108
5.5.2 正确选择动点和动系,是应用点的复合运动理论的重要基础	109
5.5.3 牵连运动与牵连速度的概念	109
5.5.4 科氏加速度概念与正确应用加速度合成定理的投影式	110
习题	110

第 6 章 刚体平面运动	115
6.1 刚体平面运动方程	115
6.1.1 刚体平面运动力学模型的简化	115
6.1.2 刚体平面运动的运动方程	116
6.2 平面运动分解为平移和转动	118
6.3 平面图形上各点的速度分析	119
6.3.1 基点法	119
6.3.2 速度投影法	120
6.3.3 瞬时速度中心法	121
6.4 平面图形上各点的加速度分析	125
6.5 本章小结与讨论	129
6.5.1 本章小结	129
6.5.2 运动分析方法的评价与选用	130
6.5.3 刚体复合运动	130
6.5.4 通过平面图形上点的速度与加速度分析, 进一步巩固速度与加速度的概念	130
6.5.5 平面图形上点的加速度分布也能看成是绕速度瞬心 C^* 旋转吗	131
6.5.6 平面图形的角速度 ω 与相对角速度 ω_r	131
习题	132
第 7 章 质点动力学	137
7.1 质点在惯性参考系中的动力学	137
7.1.1 质点在惯性参考系中的运动微分方程	137
7.1.2 质点运动微分方程的应用及示例	138
7.2 机械振动基础	142
7.2.1 单自由度系统的振动	142
7.2.2 单自由度系统振动模型 等效质量和等效刚度系数	145
7.3 本章小结与讨论	149
7.3.1 本章小结	149
7.3.2 确定物体运动时初始条件的重要性	149
7.3.3 关于机械振动的讨论	150
习题	151
第 8 章 动量定理和动量矩定理	156
8.1 动量定理	156
8.1.1 质点系整体运动的基本特征量之一: 动量的主矢	156
8.1.2 动量定理	158
8.1.3 质心运动定理	158
8.1.4 动量定理与质心运动定理的投影式与守恒式	159

8.1.5 动量定理应用于简单刚体系统	159
8.2 动量矩定理	163
8.2.1 质点系对定点的动量矩定理	163
8.2.2 刚体定轴转动微分方程	166
8.2.3 质点系对质心的动量矩定理	170
8.3 碰撞	175
8.3.1 碰撞与碰撞冲量	175
8.3.2 碰撞的恢复因数	176
8.3.3 碰撞的基本定理	177
8.4 本章小结与讨论	178
8.4.1 本章小结	178
8.4.2 几个有意义的实例	179
8.4.3 质点系矢量动力学的两个矢量系（外力系与动量系）及其关系	181
8.4.4 突然解除约束问题	182
习题	182
第9章 动能定理	192
9.1 力的功	192
9.1.1 功的定义	192
9.1.2 作用在刚体上力的功、力偶的功	193
9.1.3 理想约束力的功	195
9.2 质点系的动能与刚体的动能	196
9.2.1 质点系的动能	196
9.2.2 刚体的动能	197
9.3 动能定理	198
9.3.1 质点和质点系的动能定理	198
9.3.2 动能定理的应用举例	199
9.4 势能的概念与机械能守恒定律	202
9.4.1 有势力和势能	202
9.4.2 机械能守恒定律	203
9.5 动力学普遍定理的综合应用	204
9.6 本章小结与讨论	215
9.6.1 本章小结	215
9.6.2 功率方程的概念	216
9.6.3 应用动力学普遍定理过程中的运动分析	217
习题	218
第10章 达朗贝尔原理	223
10.1 惯性力与达朗贝尔原理	223

10.1.1 惯性力	223
10.1.2 质点的达朗贝尔原理	224
10.1.3 质点系的达朗贝尔原理	226
10.2 刚体惯性力系的简化	227
10.2.1 惯性力系的主矢与主矩	227
10.2.2 刚体平移时惯性力系的简化	227
10.2.3 刚体作定轴转动时惯性力系的简化	228
10.2.4 刚体作平面运动时惯性力系的简化	229
10.2.5 达朗贝尔原理的应用示例	230
10.3 本章小结与讨论	234
10.3.1 本章小结	234
10.3.2 正确施加与简化惯性力系是应用达朗贝尔原理的关键	234
10.3.3 惯性力系的主矢与主矩的物理意义	235
10.3.4 动能定理与达朗贝尔原理的综合应用	235
习题	236
第 11 章 虚位移原理	240
11.1 分析力学的基本概念	240
11.1.1 约束的解析表达	240
11.1.2 广义坐标与自由度	243
11.1.3 虚位移与虚功	244
11.1.4 理想约束	245
11.2 虚位移原理	245
11.2.1 虚位移原理	245
11.2.2 虚位移原理应用概述	246
11.3 本章小结与讨论	250
11.3.1 本章小结	250
11.3.2 确定给定系统的自由度与广义坐标	250
11.3.3 确定虚位移之间的关系	251
11.3.4 虚位移和虚功是分析力学的核心概念	252
习题	252
附录	257
附录 A 习题答案	257
附录 B 索引	268
参考文献	273

绪 论

0.1 工程与力学

20 世纪以前,推动近代科学技术与社会进步的蒸汽机、内燃机、铁路、桥梁、船舶、兵器等,都是在力学知识的积累、应用和完善的基础上逐渐形成和发展起来的。

20 世纪以后产生的诸多高新技术,如高层建筑(图 0-1a)、大跨度斜拉桥(图 0-1b)、海洋平台(图 0-2)、航空航天器(图 0-3 和图 0-4)、机器人(图 0-5)、高速列车(图 0-6)以及大型水利工程(图 0-7)等许多重要工程更是在理论力学指导下得以实现,并不断发展完善的。

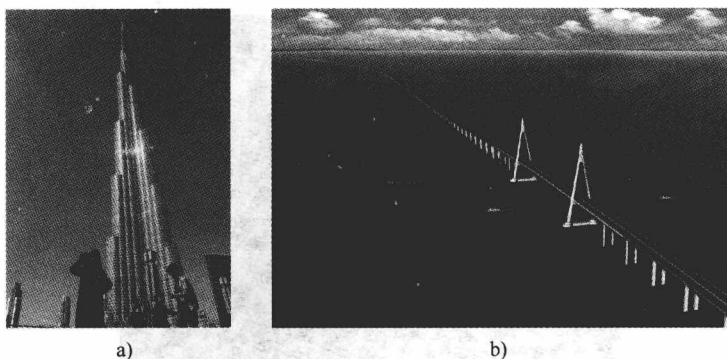


图 0-1 高层建筑与大跨度斜拉桥

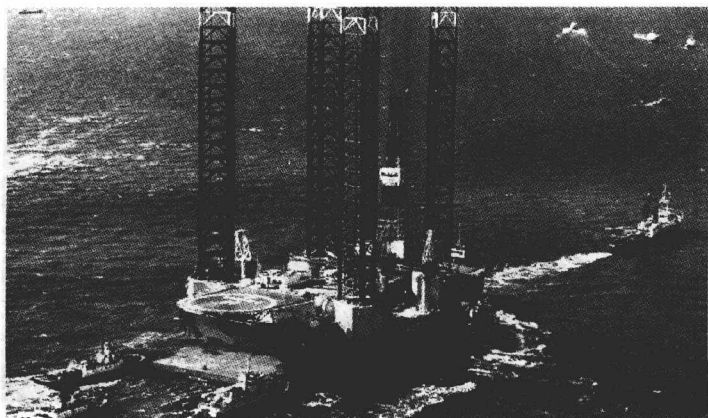


图 0-2 海洋石油钻井平台

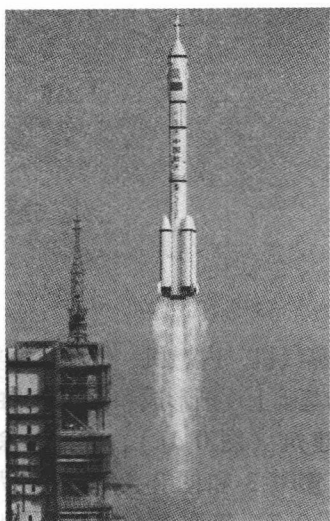


图 0-3 我国的长征火箭



图 0-4 新型航天器

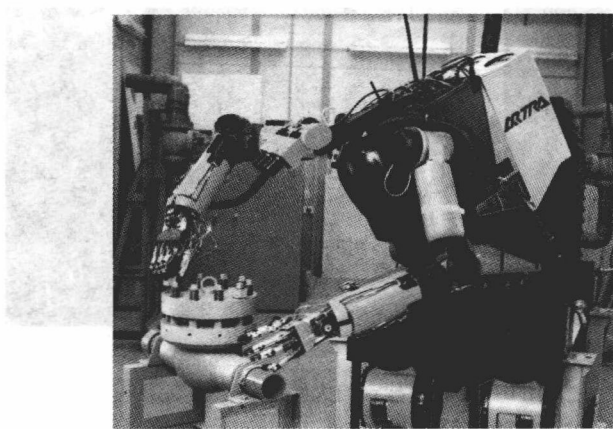


图 0-5 特殊工作环境中的机器人

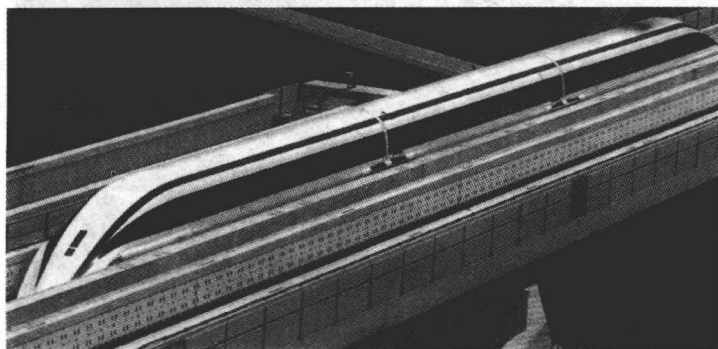


图 0-6 高速列车

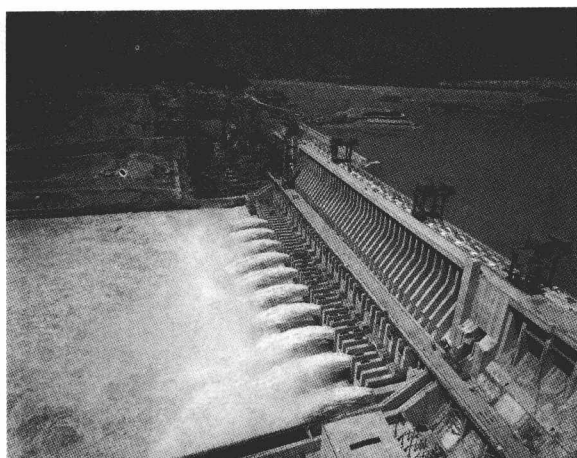


图 0-7 我国的三峡大坝水力枢纽工程

20 世纪以后产生的另一些高新技术，如电子工程、计算机工程等，虽然是在其他基础学科指导下产生和发展起来的，但都对力学提出了各式各样的、大大小小的问题。

例如：计算机硬盘驱动器（图 0-8），若给定不变的角加速度，如何确定从启动到正常运行所需的时间以及转数；已知硬盘转台的质量及其分布，当驱动器达到正常运行所需角速度时，驱动电动机的功率如何确定；等等，都与理论力学有关。

再如，跟踪目标的雷达（图 0-9），怎样在不同的时间间隔内，通过测量目标与雷达之间的距离和雷达的方位角，准确地测定目标的速度和加速度。这也是理论力学中最基础的内容之一。

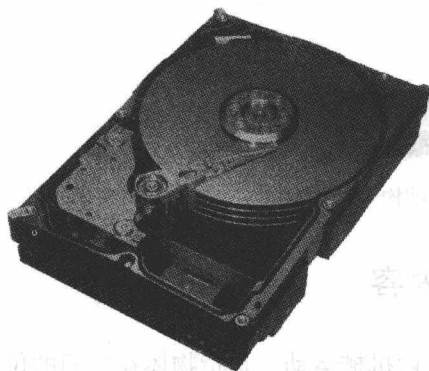


图 0-8 计算机硬盘驱动器

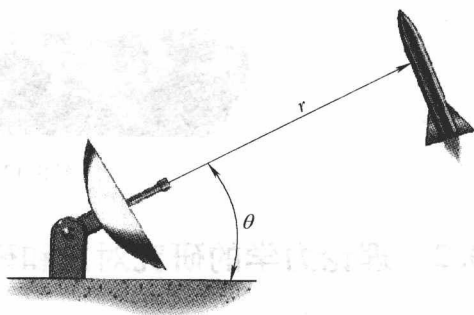


图 0-9 雷达确定目标的方位

舰载飞机（图 0-10）在飞机发动机和弹射器推力作用下从甲板上起飞，于是就有下列与理论力学有关的问题：若已知推力和跑道的可能长度，则需要多大的初始速度和时间间隔才能达到飞离甲板时的速度；反之，如果已知初始速度、一定时

间间隔后飞离甲板时的速度,那么需要飞机发动机和弹射器施加多大的推力,或者需要多长的跑道。



图 0-10 舰载飞机从甲板上起飞

需要指出的是,除了工业部门的工程外,还有一些非工业工程也都与理论力学密切相关,体育运动工程就是一例。图 0-11 所示的棒球运动员用球棒击球后,棒球的速度大小和方向都发生了变化,如果已知这种变化即可确定棒球受力;反之,如果已知击球前棒球的速度,根据被击后球的速度,就可确定球棒对球所需施加的力。赛车结构(图 0-12)为什么前细后粗,为什么车轮是前小后大?这些都与理论力学的基础知识有关。

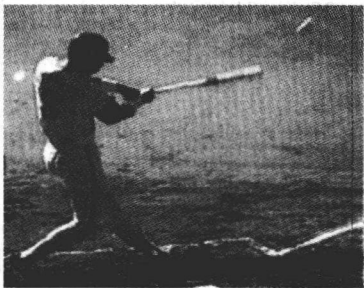


图 0-11 击球力与球的速度

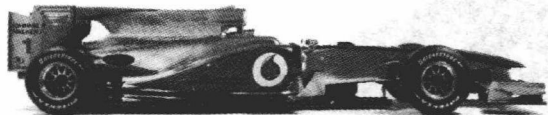


图 0-12 赛车结构

0.2 理论力学的研究对象和研究内容

力学是研究物体机械运动规律的科学。所谓机械运动,是指物体在空间的位置和形状随时间的变化。作为力学的一个非常重要的分支,理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门学科,它不仅是其他各门力学学科的基础,也是各门与机械运动密切相关的工程技术学科的基础。

理论力学属于经典力学的范畴。近代物理学的发展指出了经典力学的局限性:经典力学仅适用于运动速度远小于光速的宏观物体的运动。当物体运动的速度接近

光速时,其运动应当用相对论力学来研究;当物体的大小接近微观粒子时,其运动应当用量子力学来研究。那么,人类社会进入21世纪后,是否还需要经典力学呢?回答是肯定的。事实上,在绝大多数工程实际问题中,所处理的对象都是宏观物体,而且其速度也远低于光速,因此其力学问题仍然属于经典力学研究的范围。同时,计算机的广泛应用和计算技术的不断发展也大大促进了经典力学的发展和应用。

根据循序渐进的认识规律及科学体系,理论力学的内容通常分为静力学、运动学和动力学三个部分。

1. 静力学

研究物体的平衡规律,同时也研究物体受力的分析方法,以及力系简化的方法等。

2. 运动学

研究物体运动的几何性质(如轨迹、速度和加速度等),而不考虑物体运动的物理原因。

3. 动力学

研究物体运动变化与其所受的力之间的关系,是理论力学最主要的组成部分。

0.3 理论力学的研究方法

理论力学的研究方法是从实践出发,经过抽象化、综合、归纳,建立公理,再应用数学演绎和逻辑推理而得到定理和结论,形成理论体系,然后再通过实践来证实理论的正确性。根据这样的步骤,现代理论力学的研究方法有三种,即理论分析方法、实验分析方法和计算机分析方法。

1. 理论分析方法

主要采用建立在归纳基础上的演绎法——在建立研究对象力学模型的基础上,根据物体机械运动的基本概念与基本原理,应用数学演绎的方法,确定物体的运动规律以及运动与力之间关系的定理与方程。

2. 实验分析方法

理论力学的实验分析方法大致可以分为以下几种类型:

- 基本力学量的测定实验,包括摩擦因数、位移、速度、加速度、角速度、角加速度、频率等的测定。
- 综合性与创新型实验,一方面应用理论力学的基本理论解决工程中的实际问题,另一方面研究一些基本理论难以解决的实际问题,通过实验建立合适的简化模型,为理论分析提供必要的基础。

3. 计算机分析方法

对于大多数的工程技术问题,由于物体的几何形状较复杂或者问题的某些特征

是非线性的, 因此很少有理论解析解。现代计算机的发展和普及, 为计算技术在工程技术问题中的应用开辟了广阔的道路, 大大促进了数学在力学研究中的应用。它不仅能完成力学问题中大量的数值计算, 而且在逻辑推理、公式推导等方面也是极为有效的工具。计算机凭借自身高速与高精度的数值运算能力、极强的数据存储空间, 以及逻辑判断和过程控制等能力, 已经成功地解决了国际工程等领域众多的大型科学和工程计算难题, 如飞机的设计 (图 0-13) 汽车的碰撞分析 (图 0-14) 等。



图 0-13 飞机模型

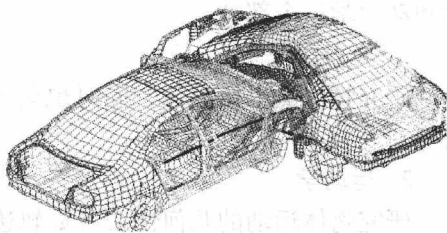


图 0-14 汽车碰撞模型

应当指出的是, 计算工具的运用不能脱离具体研究的对象, 只有数字运算与力学现象的物理本质紧密地结合起来, 才能得出符合实际的正确结论。

0.4 学习理论力学的目的

理论力学是航空航天、机械、车辆、土木等工程科学与技术的一门重要的基础课程。理论力学的基本概念和解决问题的方法均可以直接为解决工程对象的力学问题服务, 如各种飞行器、机器人等机构和结构的设计与控制, 都必须以理论力学为基础。同时, 对于日常生活和工程实际中出现的许多力学现象, 也需要利用理论力学的知识去认识和解释, 从而加以利用或消除。因此, 理论力学是工程技术人员必须掌握的一门学科。

通过本课程的学习, 要求掌握物体机械运动的基本规律, 初步学会应用这些规律分析和解决工程实际中的力学问题, 为学习后续的有关课程, 如材料力学、结构力学、流体力学、空气动力学、飞行力学、机械振动、机械设计等做好准备。

此外, 理论力学课程具有内容丰富、问题灵活多变、应用领域广阔等特点, 因此理论力学课程的学习还有助于加强学生的工程概念、激发学生的创新意识、训练学生的创新思维、培养学生的创新能力, 为今后从事工程技术和科学研究工作奠定良好的基础。

第 1 章 静力学概念与物体受力分析

本章主要介绍静力学的基础知识：静力学模型——载荷与力的模型、物体的模型、接触与连接方式的模型；静力学基本原理；受力分析的基本方法。关于受力分析，大多数读者在物理学中都有所接触，但处理的问题比较简单，与一些复杂问题、特别是工程问题还有一定的距离。读者学习本章内容时应特别注意工程问题中物体受力分析的基本方法。

1.1 静力学模型概述

所谓模型是指实际物体与实际问题的合理抽象与理想化。静力学模型包括三个方面：

- (1) 受力的理想化。
- (2) 物体的理想化。
- (3) 接触与连接方式的理想化。

1.1.1 力的两种效应

力是物体间的相互作用。这种作用对物体产生两种效应：

- (1) 运动效应 (effect of motion) ——力使物体的运动状态发生变化的效应。
- (2) 变形效应 (effect of deformation) ——力使物体发生变形的效应。

物体的平衡是一种特殊的运动状态——相对于惯性参考系静止或作匀速直线平移的状态。

1.1.2 物体受力的抽象与简化

物体受到的力大都是通过物体间直接或间接接触而产生的。接触处多数情形下并不是一个点，而是具有一定面积的一个面。因此，无论是施力或是受力的物体，其接触处所受的力都是作用在接触面上的分布力 (distributed force)，而且在很多情形下，分布的情况是比较复杂的。

当分布力作用的面积很小时，为了分析计算方便起见，可以将分布力理想化为作用于一点的合力，称为集中力 (concentrated force)。

例如，静止的汽车通过轮胎作用在桥面上的力，当轮胎与桥面接触面积较小时，即可视为集中力 (图 1-1a)；而桥面施加在桥梁上的力则为分布力 (图 1-1b)。

作用在物体上的所有力的集合称为力系。空集的力系称为零力系。若两个力系