

高 等 学 校 教 材

理论力学

第2版

Theoretical Mechanics

黄安基 主编

高淑英 沈火明 葛玉梅 修订

高 等 学 校 教 材

理论力学

第2版

Lilun Lixue

Theoretical Mechanics

黄安基 主编

高淑英 沈火明 葛玉梅 修订



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书第1版于1981年出版。本次修订是根据教育部力学基础课程教学指导分委员会最新制订的“理论力学课程教学基本要求(A类)”进行的。本书保持了第1版的特色,有较强的工程背景,注重理论联系实际,并从不同的角度提出问题、揭示矛盾,培养读者发现问题、分析问题和解决问题的能力;注意力学基本概念的阐述和力学建模能力的培养;例题、习题、思考题丰富,能达到熟练掌握基本理论、基本方法和计算技能的教学要求;增加了一些加深和扩展内容,作为本课程与现代科技的接口。

全书共分为四部分,分别为静力学、运动学、动力学和专题。内容主要包括:静力学的基本概念与物体的受力分析,平面力系的简化和平衡,物体系的平衡,空间力系的简化和平衡,运动学基础,点的运动合成,刚体的平面运动,刚体的定点运动与一般运动,动力学基本定律,动量定理,动量矩定理,动能定理,动静法,分析力学基础,碰撞,线性振动理论基础。

本书可作为高等学校工科土建、水利、机械、材料、力学等专业理论力学课程的教材,亦可作为成教、自考等相关专业的自学和函授教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学 / 黄安基主编. —2版. —北京:高等教育出版社, 2011.8

ISBN 978-7-04-032207-1

I. ①理… II. ①黄… 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(2011)第141024号

策划编辑 赵湘慧

责任编辑 赵湘慧

封面设计 赵阳

版式设计 马敬茹

插图绘制 尹莉

责任校对 刘莉

责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 中国农业出版社印刷厂
开本 787mm×960mm 1/16
印张 39.75
字数 740千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版次 1981年1月第1版
2011年8月第2版
印次 2011年8月第1次印刷
定价 53.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 32207-00

第2版序言

本版参照教育部力学基础课程教学指导分委员会最新制订的“理论力学课程教学基本要求(A类)”,在1981年黄安基主编的《理论力学》的基础上,按照黄安基教授生前的授权决定,为适应当前的教学要求进行了修订、补充。

经过多年来的教学实践,各兄弟院校的使用,一致认为本教材是合理的,在教学上起到了积极作用。本版修订保留了原有教材的体系和特点。主要做了以下工作:

(1) 静力学部分由7章合并为4章。删去了原教材中第3章平面力系的图解法,把原教材中第2章静定和静不定问题的概念和第5章摩擦合并到本版第3章物体系统的平衡中,将原教材中第7章重心合并入本版第4章空间力系的简化和平衡中。

(2) 运动学部分由5章合并为4章。将原教材中第8章点的运动学和第9章刚体平动和定轴转动合并为本版第5章运动学基础。

(3) 动力学部分删去了原教材中变质量质点的运动、质点在有心力作用下的运动、回转仪近似理论等内容,删去了两个自由度系统的自由振动和振动实验等内容。

(4) 保留了必要的例题及原有分析问题的方法与应用型例题。对例题做了30%的删减。

本次修订由黄安基、高淑英、沈火明和葛玉梅负责,第1、2、3、4、13、15、16章由高淑英执笔,第5、6、7、8、14章由沈火明执笔,第9、10、11、12章由葛玉梅执笔。全书由高淑英和沈火明统稿、定稿。修订过程中,葛玉梅还做了校核修改国标符号等繁琐工作,研究生孙浩和邓莎莎做了部分稿件打印和图例整理工作。

本书适应于高等学校工科土建、水利、机械、材料、力学等专业的教学要求,并便于学生自学及教师因材施教。

本书的修订工作得到了西南交通大学理论力学国家精品课程建设项目、工程力学国家级教学团队建设项目和西南交通大学教材建设基金的资助,在此表示衷心的感谢。

本书承蒙北京航空航天大学王琪教授详细审阅,提出了许多宝贵意见和建议,编者深表谢意。

在本书修订过程中,黄安基教授因病离开人世,故不能亲自指导到本书修订

II 第2版序言

结束。又限于我们的水平和条件,不足之处在所难免,衷心希望读者提出批评和指正,使本书得以不断提高和完善。

编者

2010年8月

第 1 版序言

本书是根据一九七七年十二月国家教委委托召开的高等学校工科基础课力学教材会议讨论的《理论力学》编写大纲编写的,适用于铁道、公路、桥隧、建筑、水利类专业,作为 120 ~ 150 学时理论力学课程的试用教材,也可供其他专业和有关工程技术人员参考。

本书静力学部分按质点静力学、刚体静力学分章,与运动学、动力学部分在体系上协调一致。约束的各种类型分在三章内叙述,力的性质和有关定理也相应地分在几章内讲授,适当地分散了概念与难点,以利于学生理解和掌握。运动学部分只讲述了最基本的内容,点的空间曲线运动以及刚体的定点转动和一般运动未作详细介绍。动力学部分除基本内容外,在碰撞部分还讨论了两物体的中心斜碰撞和偏心碰撞。

书中标有“*”号的内容为非基本内容,可根据需要决定取舍。

本书采用国际单位制(SI)。考虑到目前工程规范仍沿用工程单位制,在静力学的有些例题和习题中,采用工程单位制。

本书的公式推导除用矢量运算外,还注意用几何的直观方法,以加强物理概念。为适应不同专业的要求,全书共选用了例题 207 个、习题 676 个,书末附有习题答案。为了便于自学,各章首列有本章重点,章末有小结,有些节的后面附有思考题。

本书由同济大学王兴和余文铎,兰州铁道学院宋华樾和华健清同志主审,清华大学、天津大学、大连工学院、哈尔滨建筑工程学院、重庆建筑工程学院、华东水利学院、武汉水利电力学院、西安公路学院、北方交通大学、上海铁道学院和中国人民解放军后勤工程学院等院校的同志参加了审稿。

全书由黄安基同志负责主编并执笔,参加讨论并(或)担任制图和习题工作的有张宝珍、方景阳、吕绍棣、季景兰、高淑英、江晓仑、张茂修等同志。徐昭鑫、舒仲周同志看阅了初稿。李怀安同志担任描图工作。

本书在编写中,得到了许多院校和单位的大力帮助,在此一并致谢。

限于编者水平,本书一定还存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者

一九八〇年四月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 静 力 学

第 1 章 静力学的基本概念与物体的受力分析	11
1.1 静力学的基本概念	11
1.2 静力学公理	13
1.3 约束和约束力	17
1.4 受力分析简图与受力图	25
思考题	29
习题	29
第 2 章 平面力系的简化和平衡	33
2.1 平面汇交力系的合成和平衡	33
2.2 平面力偶系的合成与平衡	38
2.3 平面任意力系的简化与平衡	46
思考题	61
习题	62
第 3 章 物体系的平衡	70
3.1 物体系的平衡问题	70
3.2 平面简单桁架	81
3.3 柔索	90
3.4 具有摩擦约束的物体系平衡问题	101
思考题	119
习题	121
第 4 章 空间力系的简化和平衡	136
4.1 空间汇交力系的合成与平衡	136
4.2 力对点的矩与力对轴的矩	142
4.3 空间力偶系的合成与平衡	147
4.4 空间任意力系的合成和平衡	151
4.5 重心	169

II 目录

思考题	180
习题	181

第二篇 运 动 学

第 5 章 运动学基础	197
5.1 运动学基本概念	197
5.2 点的运动学	198
5.3 刚体的基本运动	209
思考题	218
习题	218
第 6 章 点的运动合成	226
6.1 绝对运动、相对运动与牵连运动	226
6.2 点的速度合成定理	228
6.3 牵连运动为平移时点的加速度合成定理	232
6.4 牵连运动为定轴转动时点的加速度合成定理	236
思考题	245
习题	246
第 7 章 刚体的平面运动	254
7.1 刚体的平面运动分解为平移和转动	254
7.2 平面运动刚体上点的速度	259
7.3 平面运动刚体上点的加速度	267
思考题	273
习题	275
第 8 章 刚体的定点运动与一般运动	282
8.1 定点运动刚体在空间位置的表示法	282
8.2 刚体定点运动的位移定理	283
8.3 刚体转动的合成	284
8.4 定点运动刚体的角速度矢与角加速度矢	292
8.5 定点运动刚体上点的速度和加速度	294
8.6 刚体的一般运动	298
思考题	300
习题	300

第三篇 动 力 学

第 9 章 动力学基本定律	307
---------------------	-----

9.1	动力学基本定律	307
9.2	质点运动微分方程	311
9.3	质点在非惯性系中的运动	322
	思考题	329
	习题	330
第 10 章	动量定理	336
10.1	动力学普遍定理概述	336
10.2	质点与质点系动量定理	337
10.3	质心运动定理	344
	思考题	350
	习题	351
第 11 章	动量矩定理	355
11.1	质点与质点系的动量矩	355
11.2	质点与质点系动量矩定理	357
11.3	刚体的转动惯量	364
11.4	相对于动矩心的动量矩定理	374
	思考题	380
	习题	381
第 12 章	动能定理	388
12.1	力的功	388
12.2	质点与质点系的动能定理	397
12.3	刚体的动能	405
12.4	势力场与势能	409
12.5	动力学普遍定理的综合应用	412
	思考题	417
	习题	419
第 13 章	动静法	427
13.1	质点动静法	427
13.2	质点系动静法	430
13.3	刚体定轴转动时轴承的附加动反力	442
13.4	转子的静平衡与动平衡	448
	思考题	452
	习题	453

第四篇 专 题

第 14 章	分析力学基础	461
14.1	质点系的自由度	461
14.2	虚位移原理	464
14.3	保守系统平衡的稳定性	482
14.4	达朗贝尔原理与动力学普遍方程	486
14.5	第二类拉格朗日方程	495
	思考题	508
	习题	508
第 15 章	碰撞	519
15.1	碰撞基本特征	519
15.2	碰撞时的动力学普遍定理	522
15.3	两物体的对心碰撞	529
15.4	撞击中心	537
* 15.5	两物体的偏心碰撞	539
	思考题	544
	习题	545
第 16 章	线性振动理论基础	550
16.1	振动现象	550
16.2	单自由度系统的自由振动	553
16.3	单自由度系统的受迫振动	574
16.4	减振与隔振的概念	587
	思考题	593
	习题	593
	附录	600
	参考文献	607
	习题答案	608
	作者简介	622

绪 论

一、学习理论力学的目的

在我国的经济建设进程中,需要大量兴建铁路、公路、桥梁、隧道、房屋建筑及水工建筑,要制造先进的机器设备和各类交通运输工具,要研究和发射运载火箭及人造卫星、宇宙飞船等。而在这些设计、施工和制造中,就要掌握本专业所需的基础理论和基本技能,用来解决实际问题。这些问题的解决,有的可以直接应用理论力学的基本理论,而有的则需要用到理论力学和以它为基础的其他学科以及有关的专门知识。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。它为一系列后继课程如材料力学、结构力学、弹性力学、流体力学、机械原理、飞行力学、振动理论等提供了重要的理论基础。

理论力学是科技人员从事专业工作、进行科学研究所必需的基础知识。

二、理论力学的基本内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

自然界中存在的各种各样的物质,都处在永恒不停的运动中。物质运动的形式是多种多样、极其复杂的。物体的机械运动,就是指物体在空间所作的位置变动。本书中所说的运动,只是指机械运动。物质的其他运动形式,则是其他学科研究的对象。

机械运动是物质运动形式中最简单的一种。任何较高级较复杂的物质运动形式也可伴随有位置的变动,即与机械运动有一定的联系。但是,它们与机械运动又有本质的不同,不能用机械运动来概括所有的运动形式。

为了便于解决工程实际问题及根据循序渐进的认识规律,本书分为四部分,即静力学、运动学、动力学、动力学专题。

在静力学中,将研究力的基本性质、物体受力分析的基本方法以及物体在力的作用下处于平衡的条件。

在结构的设计与施工中,经常要用到静力学的知识。例如,在设计一个厂房时,就要先分析屋架、吊车梁、柱、基础等构件受到哪些力的作用(图1),对它们分别进行受力分析。这些力中的某些力可能是未知的,但这些构件是在所有这

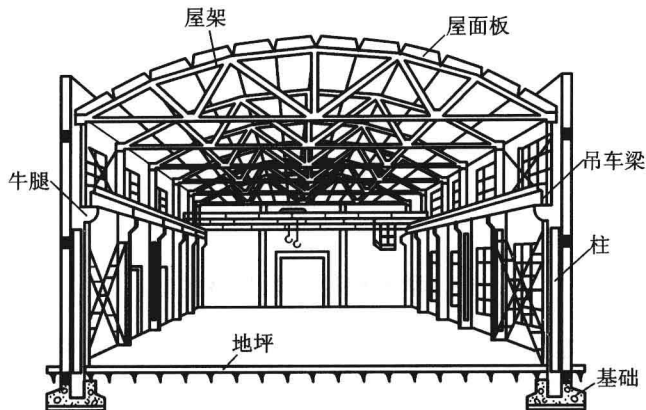


图 1

些力的作用下处于平衡的,应用力系的平衡条件,就可求出这一部分未知力。而要知道力系的平衡条件,就要研究力的基本性质,研究力系的合成规律。只有应用静力学原理对构件进行受力分析并算出这些力,才能进一步设计这些构件的断面尺寸及钢筋配置情况等。

无论什么事物的运动都可以有两种状态:相对静止的状态或显著变动的状态。在力学中,通常把物体运动状态不变的情况称为平衡。例如,桥梁相对于地面静止不动,火车在直线轨道上匀速行驶,物体被起重机匀速吊起等,都属于平衡状态。

运动或不平衡是绝对的,而静止或平衡是相对的、有条件的。例如,桥梁只是相对于地球处于静止状态,即处于平衡。而实际上,桥梁随着地球自转,并同时以约 30 km/s 的速度绕太阳公转,而整个太阳系相对于附近的恒星又以大约 20 km/s 的速度向某一方向疾驶。宇宙间不存在绝对静止的物体。本书中若不特加说明,“平衡”或“静止”则是相对于地球而言的。

在运动学中,将从几何学的观点来研究物体的运动规律,而不考虑影响物体运动的物理因素如力和质量等。

在设计传动机构或操作机器时,要分析各部分之间运动的传递与转变,研究某些点的轨迹、速度和加速度是否符合要求。例如,在卷扬机作业时(图2),电机启动后,通过减速机构使卷筒转动,钢丝绳便将重物提升,已知电机的转速,求重物的提升速度,这就是属于运动学的问题。这里不需要考虑电机的功率及重物的质量。

运动学和静力学是研究动力学的基础。另一方面,应用运动学原理对物体进行运动分析,在工程中还有其独特的意义。

在动力学中,将研究物体的运动变化与它所受的力及它的质量等因素之间

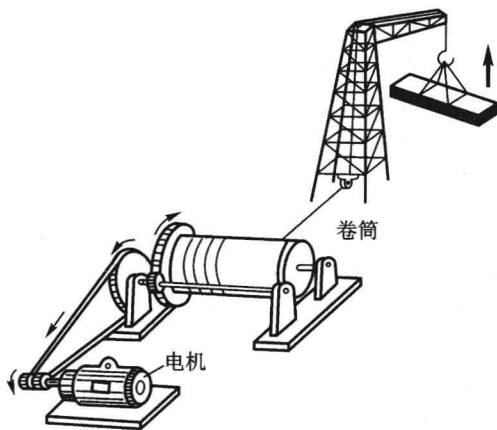


图 2

的关系。

在图 2 的卷扬机中,若已知重物的质量及提升速度,考虑选用多大功率的电机,这就是属于动力学的问题。工程实际中还有很多动力学问题,例如,当起重机开始起吊或重物下降时突然刹车所发生的超载现象,在公路转弯处的超高坡度(或铁路弯道上的外轨超高),混凝土振动捣固器及振动打桩机的工作原理,建筑物的抗震问题,高速转动的转子偏心时所引起的剧烈振动和轴承磨损现象,机车车辆的振动问题等。

综上所述,静力学无需考虑物体运动状态的变化,只侧重于研究力;运动学不考虑力,只研究物体的运动;动力学则把物体所受的力与它的运动结合起来研究。

三、古典力学的发展过程及我国的成就

理论力学以伽利略(1564—1642)和牛顿(1643—1727)所总结的关于机械运动的基本定律为基础,称为古典力学。它的科学体系主要是在 15 至 17 世纪中逐步形成,后来又不断得到完善并有所发展。在 20 世纪初,由于物理学的重大发展,产生了相对论力学和量子力学,证明古典力学的规律不适用于物体运动速度接近于光速的情况,也不适用于微观粒子的运动。但在一般工程实际问题中,即使是一些尖端科学技术如火箭、宇宙航行等,我们研究的也还是宏观物体的低速(与光速比较)运动,古典力学仍然是既方便又足够准确,一直未失去其应用价值。

古典力学原理是社会生产和科学实践长期发展的产物。远古时代的人类已应用了尖劈的原理。随着古代建筑技术的发展,斜面和杠杆也被应用了。在实践的基础上,我国的墨翟(约公元前 468—前 376)初步提出了力矩的概念;在欧洲,古希腊的阿基米德(公元前 287—前 212)提出了杠杆平衡的条件。完善地

提出力矩概念及有关的计算公式,则是在生产力得到较充分发展的 17 世纪。静力学就是从一些最简单的起重运输机械的应用发展完善起来的。

由于当时生产力水平的限制,缺乏力学研究的物质技术条件,在古代,人类对于运动学和动力学的知识是极为贫乏的,而且有很多错误的认识。例如,古希腊人亚里士多德(公元前 384—前 322)认为落体速度与其重量成正比,他又以存在一个不变的向前推动力来解释物体的自由运动。直到 17 世纪,意大利人伽利略通过实践才推翻了这些错误的认识。又如,地球中心学说曾经在很长时间内被认为是正确的。随着商业和航海事业的发达,时间量度和天文观测仪器设备条件的具备,直到 16 世纪波兰人哥白尼(1473—1543)的太阳中心说才得到确认。后来德国人开普勒(1571—1630)经过长期观测研究,又进一步修正了哥白尼认为行星轨道是圆形而且运行速度为均匀的学说。

伽利略在前人的研究基础上创立了惯性定律,首先提出了加速度的概念。牛顿全面总结并发展了前人的研究成果,在《自然哲学之数学原理》(1687)一书中,明确地总结了机械运动的基本定律,奠定了古典力学的基础。并且牛顿从这些规律出发,研究了开普勒的行星运动三定律,得出了普遍的万有引力定律,对行星运动作出了定量的、动力学的解释。

古典力学在 17 世纪奠定基础,由于数学分析工具的不断完善,18 世纪末产生了分析力学。从 19 世纪到 21 世纪,工程技术问题日趋复杂,以理论力学为基础的一些力学也随之诞生,并且生长出介于两门不同学科之间的边缘学科,如飞行力学、多刚体系统动力学、陀螺系统动力学、地质力学、电磁流体力学、生物力学、爆炸力学、物理力学等。古典力学本身并没有失去其生命力,仍在不断地发展。

我国历史悠久,很早就发明了杠杆、斜面和滑轮等简单机械,据考证分析,后两者以我国为最早。春秋战国时期(公元前 722—前 221),在墨家的著作《墨经》中关于力学的论述就有力的定义,重心和力矩的概念,柔索不能抵抗弯曲等。这些都是世界上最早的资料记载。公元前 250 年,在秦国蜀郡守李冰领导下建成了至今仍闻名中外的都江堰。这一十分艰巨的工程,说明那时我国的力学水平已经相当高。公元前 104 年,西汉的落下闳(公元前 156—前 87)等编造了《太初历》,落下闳比古希腊的托勒密(约 90—168)早 200 多年就制定出了精密完整的天文历法系统,并创立了浑天说。公元 31 年,东汉的杜诗创造了水排,这是世界上最早的水力机械。公元 132 年,东汉的张衡(78—139)发明了精密度很高的候风地动仪(图 3),这是世界上最早的地震仪。当某一方向地动时,仪器内的都柱将倾倒如图

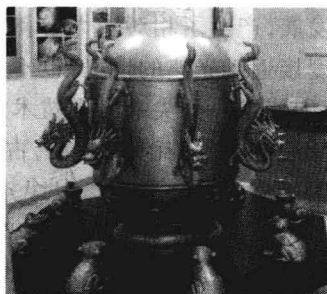


图 3

4 中虚线所示,带动八道、牙机等机构,使龙头口中含的铜丸落入下面蟾蜍口中,这是符合相对运动的动力学原理的。公元 138 年,曾在洛阳用它测到了陇西(今甘肃南部)的地震。此外,在汉代已利用齿轮传动系统制造了记理鼓车和指

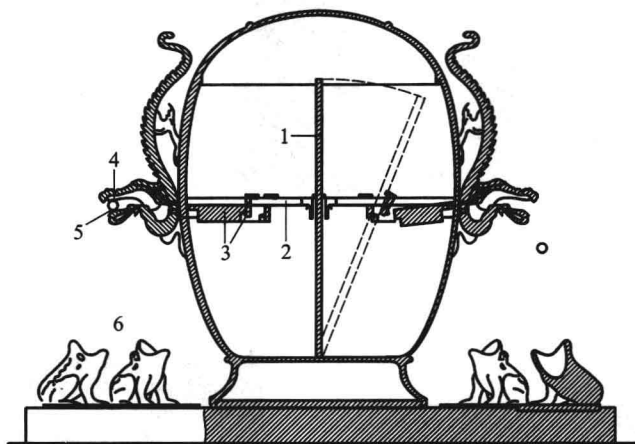


图 4

1—都柱; 2—八道; 3—牙机; 4—龙头; 5—铜丸; 6—蟾蜍

南车。在建筑方面,隋代工匠李春建造的赵州桥(河北赵县,图 5),拱券净跨度达 37.4 m,券高只有 7 m,拱极平缓。桥两端还做了小券拱,既节省材料,减轻自重,增加美观,还可宣泄洪水,增强桥的安全性。桥宽从两端向中间逐渐减小,使两旁各券拱向内倾斜,大大加强了桥的稳定性。经过 1 300 多年的考验,至今仍然屹立在洺河上,证明李春的设计完全符合力学原理。最晚到公元 3 世纪,我国即出现了铁索桥。大渡河上的泸定铁索桥,建于 17 世纪末,净长百米,至今完好无损。建筑技术方面的重要著作有北宋初年木工喻皓的《木经》(已失传)以及李诫于 1110 年编纂完成的《营造法式》,是世界上最早最完备的建筑学专著,它总结了结构的力学分析和计算,统一了建筑规范。有些古代木结构一直保存到现在,如山西应县的木塔(图 6),高 67 m,建于 1056 年,塔中有 50 多种形式的斗拱。斗拱(图 7)是我国木工创造的,它可以增大支点接触面积,并减小木梁的跨度。

历史表明,我国的力学水平在 14 世纪以前一直处于世界最前列。但由于封建制度的长期统治以及近百年来帝国主义的侵略压迫,我国科学技术(包括力学)的发展遭到了严重阻碍。中华人民共和国成立后,各项建设与力学相互促进,特别是 20 世纪后期和 21 世纪取得了显著的发展。著名的公铁两用南京长江大桥和全球最长的行车铁路双用悬索式吊桥——香港青马大桥(图 8),兰新铁路的乌鞘岭特长隧道、西康铁路的秦岭特长隧道,以及青藏铁路(图 9)、京津

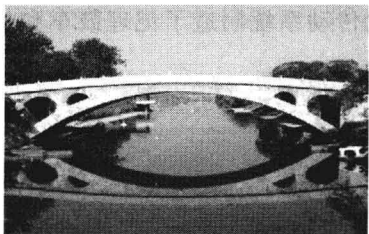


图 5

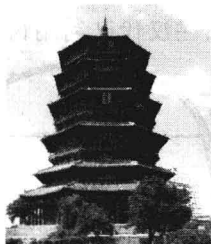


图 6

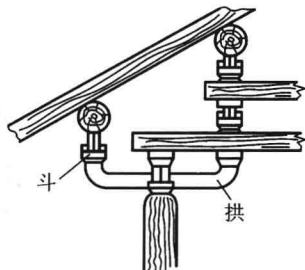


图 7



图 8



图 9

高铁(图 10)、武广高铁及京沪高铁等,说明我国铁路工程技术已达到相当高的水平。在公路建设方面,建成了川藏、青藏、新藏公路,著名的上海杨浦大桥(主跨 602 m,图 11)及江阴长江公路大桥(主跨 1 385 m)等。高层建筑的建设成就也十分显著,如上海金茂大厦(图 12)等。在水利水电建设方面,有荆江分洪工程以及遍布在新安江、大渡河及黄河、长江等大小河流上的水电站,例如长江葛洲坝水电站、长江三峡水电站(图 13)等。此外,我国的现代机械机电工业、汽车工业、造船工业、航空工业等也都从无到有地逐步发展起来。

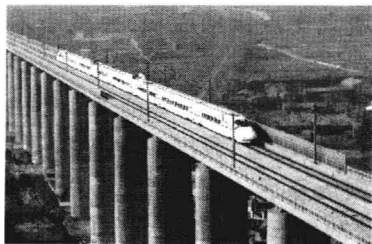


图 10

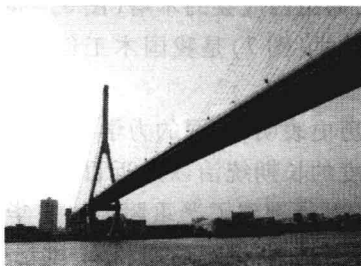


图 11



图 12



图 13

随着各种新型结构的出现,地震、冲击波、风压力、水压力和机器振动等对结构的动力作用也越来越复杂,这些都对力学工作者提出了许多新的研究课题。1970年4月,我国成功地发射了第一颗人造地球卫星,2003年10月15日我国第一次成功发射了“神舟”五号载人飞船(图14),2007年10月24日发射了“嫦娥”一号月球探测卫星(图15)。许多力学课题的攻克,表明了我国力学科学水平的提高。在实现国家现代化进程中,还会有更多的力学课题期待我们去解决。同时应看到,同世界先进水平相比我们还有一些差距,应该坚持不懈地促进我国力学的更大发展。

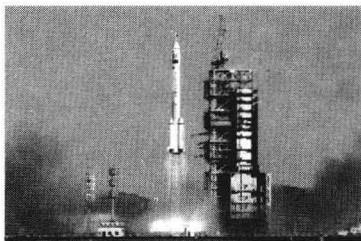


图 14

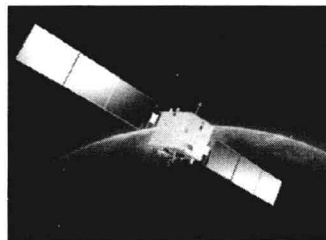


图 15

四、理论力学的研究方法和学习方法

由于客观事物总是错综复杂的,在科学研究中必须根据所研究问题的性质,抓住主要的、起决定性作用的因素,舍去次要的因素,这就是**抽象化的方法**。从生动的直观材料,运用抽象化的方法,建立概念,归纳总结成为定律或原理,这就是从特殊到一般的归纳法。

反之,从已经建立的基本概念和定律或原理出发,考虑所研究问题的具体条件,运用数学工具进行演绎推理,得到一些定理或公式,这就是**演绎法**。当然,数学演绎不能脱离具体事物,如果数学运算中没有考虑到主要的、起决定性作用的