



交通类成人高等教育系列教材

工程力学

主 编 胡庆泉
副主编 翟琪



山东大学出版社

Jiaotonglei
Chengren Gaodeng
Jiaoyu Xilie Jiaocai

交通类成人高等教育系列教材

工 程 力 学

主 编 胡庆泉
副主编 翟 琪

山东大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/胡庆泉主编. —济南:山东大学出版社, 2008. 8
ISBN 978-7-5607-3615-0

I. 工...

II. 胡...

III. 工程力学—高等学校—教材

IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 114796 号

山东大学出版社出版发行

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码:250100)

山东省新华书店经销

济南铁路印刷厂印刷

787×1092 毫米 1/16 23.5 印张 540 千字

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

版权所有,盗印必究

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社营销部负责调换

前言

工程力学是工科类相关专业一门重要的技术基础课,具有理论性强、内容丰富、题量大、题型多的特点。本书论述的工程力学涵盖了理论力学和材料力学两门课的主要内容。

本书贯彻《全国成人高等教育工科主要课程教学基本要求》,并结合多年的教学实践,在保证课程的基本要求下,力求成为具有成人教育特色及适合学员自学的力学课程体系。

本书由胡庆泉任主编,翟琪任副主编。全书共分三篇,第一篇第一、二、三、四章及第二篇第五章由山东送变电工程公司翟琪编写,第二篇第六、七、八章及第三篇第十六、十七、十八章由山东交通学院胡庆泉编写,第二篇第九、十、十一、十二章由山东交通学院高曦光编写,第三篇第十三、十四、十五章由山东交通学院倪正银编写,第三篇第十九、二十章由山东交通学院杨尚阳编写,附录由倪正银编写。

为了便于成人高等教育、高等教育自学考试人员业余学习,本书各章均给出考核目标,章后附有练习题及答案。可供学生学习时参考。

本书参考了很多专家、学者的专著和学术文章,书中未能一一列出,在此向文献、资料的原作者表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,加之时间仓促,本书在内容和结构编排上难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2008年3月

目 录

绪 论	(1)
-----	-----

第一篇 刚体静力学

第一章 静力学基础	(5)
第一节 静力学基本概念和公理	(5)
第二节 约束和约束反力	(7)
第三节 物体的受力分析和受力图	(10)
第二章 汇交力系与力偶系	(15)
第一节 力在坐标轴上的投影与合力投影定理	(15)
第二节 汇交力系的合成及平衡条件	(17)
第三节 力 矩	(19)
第四节 力偶及其性质	(23)
第五节 力偶系的合成与平衡	(26)
第六节 力的平移定理	(27)
第三章 力系的简化和平衡方程	(32)
第一节 平面任意力系向作用面内一点简化	(32)
第二节 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	(34)
第三节 物体系的平衡·静定和静不定问题	(38)
第四节 平面简单桁架内力计算	(40)
第五节 空间任意力系的简化	(43)
第六节 空间任意力系的平衡方程	(47)

第七节 平行力系中心·重心	(50)
第四章 摩 擦	(63)
第一节 滑动摩擦	(63)
第二节 摩擦角与自锁	(65)
第三节 考虑摩擦时物体的平衡问题	(66)
第四节 滚动摩阻	(68)

第二篇 变形体静力学

第五章 轴向拉伸和压缩	(77)
第一节 变形体静力学概述	(77)
第二节 轴向拉伸和压缩的概念	(79)
第三节 拉(压)杆的内力计算	(79)
第四节 横截面及斜截面上的应力	(82)
第五节 材料在拉伸压缩时的力学性能	(86)
第六节 轴向拉伸压缩杆件的强度计算	(91)
第七节 拉伸或压缩时的变形	(94)
第八节 拉压超静定问题	(96)
第九节 连接件的实用计算	(101)
第六章 扭 转	(111)
第一节 扭转的概念和实例	(111)
第二节 外力偶矩的计算·扭矩和扭矩图	(112)
第三节 薄壁圆筒的扭转	(113)
第四节 圆轴的扭转应力及强度条件	(115)
第五节 圆轴扭转变形及刚度条件	(118)
第七章 弯曲内力	(124)
第一节 概 述	(124)
第二节 剪力和弯矩	(125)
第三节 剪力方程和弯矩方程·剪力图和弯矩图	(126)
第四节 载荷集度·剪力和弯矩间的关系	(129)
第八章 弯曲应力	(135)
第一节 纯弯曲时的正应力	(135)
第二节 横力弯曲时的正应力	(139)

第三节 弯曲切应力·····	(141)
第四节 提高弯曲强度的措施·····	(145)
第九章 弯曲变形·····	(151)
第一节 概 述·····	(151)
第二节 梁的挠曲线近似微分方程·····	(152)
第三节 积分法求梁的位移·····	(153)
第四节 叠加法求梁的位移·····	(155)
第五节 提高弯曲刚度的措施·····	(158)
第六节 简单超静定问题·····	(160)
第十章 应力状态分析与强度理论·····	(166)
第一节 应力状态的概念·····	(166)
第二节 平面应力状态分析——解析法·····	(168)
第三节 平面应力状态分析——图解法·····	(171)
第四节 梁的主应力与主应力迹线·····	(173)
第五节 三向应力状态·····	(175)
第六节 复杂应力状态下的应力—应变关系·····	(176)
第七节 强度理论概述·····	(178)
第八节 四种常用强度理论·····	(180)
第九节 莫尔强度理论·····	(183)
第十一章 组合变形·····	(187)
第一节 组合变形的概念·····	(187)
第二节 拉伸(压缩)与弯曲的组合·····	(188)
第三节 偏心压缩·····	(190)
第四节 弯曲与扭转的组合·····	(192)
第十二章 压杆稳定·····	(198)
第一节 压杆稳定的概念·····	(198)
第二节 细长压杆的临界压力·····	(200)
第三节 欧拉公式适用范围与经验公式·····	(202)
第四节 压杆的稳定计算及合理设计·····	(204)

第三篇 刚体动力分析

第十三章	点的运动	(211)
第一节	动力学概述	(211)
第二节	点的运动方程	(212)
第三节	点的速度和加速度	(213)
第十四章	刚体的基本运动	(225)
第一节	刚体的平动	(225)
第二节	刚体的定轴转动	(226)
第三节	定轴轮系的传动比	(230)
第四节	角速度和角加速度矢量·以矢积表示点的速度和加速度	(233)
第十五章	点的合成运动	(237)
第一节	绝对运动、相对运动和牵连运动	(237)
第二节	速度合成定理	(239)
第三节	牵连运动为平动时的加速度合成定理	(242)
第四节	牵连运动为转动时的加速度合成定理·科氏加速度	(246)
第十六章	刚体的平面运动	(255)
第一节	平面运动分解为平动和转动	(255)
第二节	用基点法、速度投影定理求平面图形上各点的速度	(257)
第三节	用瞬心法求平面图形上各点的速度	(260)
第四节	用基点法求平面图形上各点的加速度	(263)
第十七章	质点运动的微分方程	(274)
第一节	动力学的基本定律	(274)
第二节	质点运动的微分方程	(275)
第三节	质点动力学的两类基本问题	(277)
第十八章	动量定理	(283)
第一节	动力学普遍定理概述	(283)
第二节	动量和力的冲量	(284)
第三节	动量定理	(286)
第四节	质心运动定理	(291)

第十九章 动量矩定理	(298)
第一节 动量矩	(298)
第二节 动量矩定理	(300)
第三节 刚体绕定轴转动的微分方程	(305)
第四节 刚体对轴的转动惯量	(307)
第五节 刚体平面运动微分方程	(312)
第二十章 动能定理	(321)
第一节 力的功	(321)
第二节 动 能	(325)
第三节 动能定理	(327)
第四节 功率与功率方程	(333)
第五节 势力场、势能和机械能守恒定律	(334)
第六节 普遍定理的综合应用	(336)
附录 平面图形的几何性质	(344)
习题答案	(354)
主要参考文献	(365)

绪 论

一、工程力学的研究内容

工程力学是一门研究物体机械运动以及构件强度、刚度和稳定性的科学,涵盖了理论力学与材料力学两门课程的主要内容。

工程力学所研究的机械运动主要有两大类:一类是研究物体的运动及研究作用在物体上的力和运动之间的关系;另一类是研究物体的变形,即研究作用在物体上的力与变形之间的关系。本书将这两类问题归纳为刚体力学与变形体力学两大部分。这两类问题既有区别,又不是完全孤立的,在许多方面都有一些交叉问题。

刚体力学的内容包括以下三部分:

静力学——主要研究受力物体平衡时作用力所满足的条件;同时也研究物体受力的分析方法,以及力系简化的方法等。

运动学——只从几何的角度来研究物体的运动(如轨迹、速度、加速度等),而不研究引起物体运动的物理原因。

动力学——研究受力物体的运动与作用力之间的关系。

变形体力学(即材料力学)是研究工程构件承载能力的一门科学。任何设备、机器、建筑物都是由零件或构件组成的,为了保证机器正常运行,建筑物的正常使用,必须保证每一个零件或构件在外力作用下正常工作,为此必须满足以下四个方面的要求:足够的强度、足够的刚度、足够的稳定性和足够的耐久性。

构件抵抗载荷破坏的能力称为强度。如果构件的强度不够,在载荷作用下会发生断裂或产生较大的塑性变形,使得机器无法正常运行,这种现象称为强度破坏或强度失效。如果轧钢机的轧辊断裂,生产会发生停顿;如果车床变速箱内齿轮上轮齿出现过大的塑性变形,车床则不能正常运转;如果缆车或电梯上钢绳断开,后果将不堪设想。因此,要保证机器正常地工作,首先要保证受力构件在外力作用下具有足够的强度。

构件抵抗载荷产生弹性变形的能力称为刚度。如果构件的刚度较小,在外力作用下会产生较大的弹性变形,这会影响到构件正常的工作,这种现象称为刚度破坏或刚度失效。如果车床主轴的弹性变形过大,会影响待加工工件的加工精度;如果齿轮传动轴变形

过大,则会影响齿轮间的正常啮合,这不仅会产生较大的噪音,而且会增大轴和轴承之间的磨损,还会缩短齿轮的正常寿命。因此在设计和制造时,需要保证构件具有足够的刚度,以保证其变形量不超过正常工作所允许的范围。

细长杆构件在受压力作用后保持原有平衡形式的能力称为稳定性。对于细长压杆在满足强度条件下,当载荷增大超过一定的数值后,杆件便会从直线平衡状态突然变弯,这就是失稳现象,又称稳定失效。杆件失稳后会导致杆件折断或发生较大的塑性变形。如千斤顶螺杆、车床的丝杠等,都必须保证有足够的稳定性。

有的构件经受周期性载荷或内力周期性变化时,其工作寿命必须满足某个使用期限即所谓的耐久性。如火车轮轴、汽车轮轴就属于上述情况,如果寿命很低,这是不允许的。因此,构件必须具备足够的耐久性。

工程设计的任务之一就是保证构件在确定的外力作用下正常工作而不破坏,即保证构件具有足够的强度、刚度和稳定性。为此需要:

- (1)分析并确定构件所受各种外力的大小和方向;
- (2)研究在外力作用下构件的内力、变形和破坏的规律;
- (3)提出保证构件具有足够的强度、刚度和稳定性的设计准则和方法。

随着科学技术的飞速发展,21 世纪的工程力学将继续向个专业渗透,不断地开拓新的研究领域。实验力学、断裂力学、生物化学、复合材料力学的进展又丰富和充实了工程力学的内容,对构件在高温、高压、高速、强磁场、高负荷下的承载能力的研究将会出现更多的研究成果。计算机在工程力学中将得到更为广泛的应用,同时也促进了工程力学的进一步发展。

二、工程力学的研究对象

根据几何形状和尺寸的不同,构件可以大致分为杆、板、壳、块体。

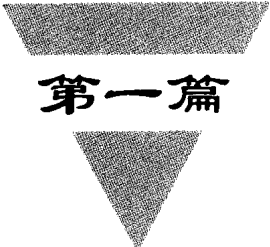
若杆件在某一方向上的尺寸比其余两个方向上的尺寸大得多,则称为杆。梁、轴、柱等都属于杆类构件。若构件在某一方向上的尺寸比其余两个方向上的尺寸小得多,为平面形状的叫板,为曲面形状的叫壳。像薄壁容器、穹形屋顶等都属于这类构件。若构件在三个方向上具有同一量级的尺寸,则称为块体。如机器设备底座、水坝、建筑结构物的基础等都属这类构件。

工程力学仅以等截面直杆(简称等直杆)作为研究对象。板壳及块体的研究属于“弹性力学”、“板壳理论”的范畴。

三、工程力学在工科专业中的作用

对机械、化工、土木、建筑、轻工、水工建筑和航空航天等工科专业来说,工程力学是一门技术基础课,是由学习基础理论课过渡到专业课、设计课程之间的桥梁,可为机械零件、机械原理和专业课程的学习提供必要的基础知识。通过这门课程的学习,还可以培养学生熟练的计算能力和初步的实验分析能力。

掌握了这门科学,就能为机器、设备和建筑机构的设计、制造、安装、使用 and 维修以及汽车、飞机、卫星发射的操纵和控制提供理论分析和解决问题的方法。



第一篇

刚体静力学

第一章

静力学基础

考核要求

1. 掌握力和刚体的概念和静力学公理。
2. 明确和掌握约束的基本类型的特点及约束反力的个数和方向。
3. 熟练而正确地画出研究对象的受力图。

静力学是研究物体在力系的作用下的平衡条件的科学。所谓力系,是指作用于物体上的一群力。平衡指的是物体相对于地球保持静止或者作匀速直线运动的状态。

静力学主要研究以下三个问题:

(1)物体的受力分析。即分析某个物体共受几个力以及每个力作用线的位置、大小和方向。

(2)力系的简化。作用在物体上的力往往是复杂的。若一个力系可以用另一个力系代替而不改变物体的原有状态,则称这两个力系等效。力系的简化就是将作用在物体上的力系代换为另一个与之等效且较为简单的力系。如果一个某力系和一个力等效,则称此力为此力系的合力。

(3)研究力系的平衡条件。即物体平衡时,作用在物体上的力系所应满足的条件。满足平衡条件的力系称为平衡力系。

静力学的基本概念是研究力系的简化和平衡的基础。本章将研究静力学的基本概念和静力学公理,介绍工程中常见的约束和约束反力的分析及物体的受力图。

第一节 静力学基本概念和公理

一、静力学基本概念

1. 力的概念

力是物体之间的相互机械作用。这种作用可使物体的运动状态发生改变,也可使物体的形状发生改变,前者称为力的运动效应(外效应),后者称为力的变形效应(内效应)。刚体力学主要研究力的外效应,而内效应是变形体力学研究的内容。

力的作用效果取决于三个要素:力的大小、力的方向和力的作用点。因此力是一个矢量,用 $\boldsymbol{F}$ 表示。

在国际单位制中,力的单位是牛顿(N)或千牛(kN)。

2. 刚体

在力的作用下,其内部任意两点间的距离始终保持不变,这样的物体称为刚体。它是一个抽象的、理想的力学模型。实际上,物体在力的作用下都会产生程度不同的变形,因此绝对的刚体是不存在的。但一个物体在力的作用下变形很小,不影响研究物体的实质,就可将其看成刚体。静力学研究的物体只限于刚体,故称为刚体静力学,它是研究变形体力学的基础。

二、静力学公理

静力学公理概括力的一些基本性质,是经过实践反复检验,被确认为符合客观实际的最一般的规律,是静力学全部理论的基础。

1. 力的平行四边形规则

作用在物体上的同一个点的两个力可以合成为一个力。合力也作用在该点;合力的大小和方向则由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定,如图 1-1 所示。或者说合力等于两个力的矢量和,即:

$$\boldsymbol{F}_R = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2$$

2. 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力,使刚体保持平衡的必要与充分条件是:这两个力大小相等,方向相反,作用在一条直线上,如图 1-2 所示。

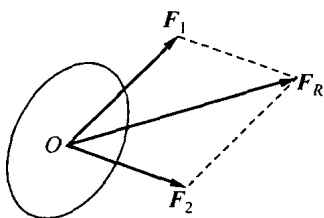


图 1-1

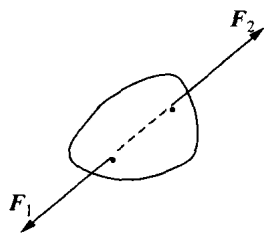


图 1-2

必须指出,对于刚体,这个条件既是必要的又是充分的;但对于非刚体,这个条件是不充分的。例如:软绳受两个等值反向的拉力作用可以平衡,而受两等值反向的压力作用就不能平衡。工程中把只受两个力作用而处于平衡状态的构件称为二力构件(或二力杆)。二力构件上的两个力必须满足二力平衡条件。

3. 加减平衡力系公理

在已知力系上加上或减去一个平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效果。这个

公理也只适用于刚体,这是力系简化的重要依据。

根据上述公理可以导出下列推论:

推论 1 力的可传性

作用于刚体上某点的力,可以沿着它的作用线移到刚体内任意一点,并不改变该力对刚体的作用。此推论可由二力平衡公理和加减平衡力系公理导出,读者可以自己证明。

因此,对于刚体来说,力的作用点不再是力的三要素之一,而是被作用线代替。因此作用于刚体上的力的三要素是:力的大小、方向、作用线。作用在刚体上的力矢可沿作用线移动,这种矢量称为滑动矢量。

推论 2 三力平衡汇交定理

若一刚体上受三个力作用且处于平衡状态,其中两个力的作用线相交于一点,则此三力必在同一平面内,且第三个力的作用线必通过汇交点。

证明 如图 1-3 所示,在刚体的 A_1 、 A_2 、 A_3 三点上,分别作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 和 F_3 。根据力的可传性,将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形规则,得合力 F_R ,则力 F_3 应与 F_R 平衡。由于两力平衡必须共线,所以力 F_3 必与 F_1 和 F_2 共面,且通过其汇交点。

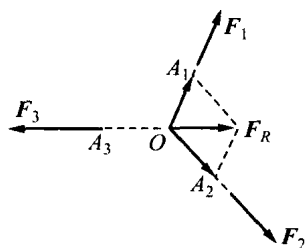


图 1-3

4. 作用与反作用定律

两个物体之间的作用力与反作用力总是大小相等,方向相反,作用在同一条直线上。

在应用这个公理时,必须注意:作用力与反作用力同时存在,同时消失;分别作用在两个相互作用的物体上。

第二节 约束和约束反力

力学中通常把物体分为两类:一类是自由体,它们的位移不受任何限制,例如飞机在天空中飞行;另一类称为非自由体,它们的位移受到限制,例如机车的运动受到铁轨的限制,放在桌子上的书的位移受到桌面的限制,吊在电线上的灯泡的位移受到电线的限制。在工程结构中,每一构件都根据工作的要求以一定的方式和周围其他构件相联系。

对非自由体,限制其位移的物体称为约束。或者说对某一构件的运动起限制作用的其他构件,就称为这一构件的约束,例如:前面提到的铁轨、桌面、电线、等就分别是机车、书、灯泡的约束。约束既然限制某一构件的运动,也就是说约束能够起到改变物体运动状态的作用,所以约束就必须承受物体对它的作用力,与此同时,它也给被约束物体以反作用力,这种力称为约束反力(或简称反力)。

约束反力是由于阻碍物体运动而引起的,所以属于被动力、未知力。静力学分析的重要任务之一就是确定未知的约束反力,例如轴承给轴的力,轨道给机车车轮的力等。约束反力的作用点在约束与被约束物体的接触点,它的方向总是与约束所能阻止物体的位移方向相反。根据约束的性质,有的约束反力方向可以直接定出,有的约束反力的方向则不能直接定出,要根据物体的平衡条件才能确定。至于约束反力的大小,一般是未知的,要

由力系的平衡条件求出。

约束反力以外的其他力,能主动改变物体的运动状态的力称为主动力。如重力、气体压力等。

下面介绍几种常见的约束类型和确定约束反力方向的方法。

1. 柔性约束

柔性约束由绳索、胶带或链条等柔软体构成,它们只能承受拉力而不能抵抗压力和弯曲(忽略其自重和伸长),这种类型的约束称为柔性约束,所以柔性约束的约束反力只能承受拉力,其方向一定沿着柔性体的轴线背离物体,例如图 1-4 所示的用铁链吊起重物,带轮所受的皮带拉力。

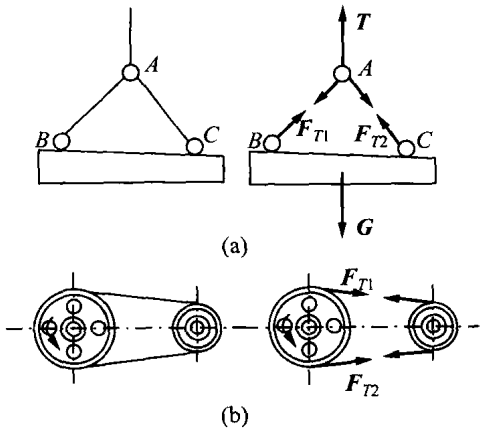


图 1-4

2. 光滑面约束

两物体接触表面的摩擦忽略不计,接触面是光滑的。这类约束的特点是不论平面或曲面都不能阻碍物体沿接触面的公切线方向运动,只能限制物体沿接触面公法线方向运动,也就是说物体可沿接触面滑动或沿接触面在接触点的公法线方向脱离接触。但不能沿公法线方向压入接触面,所以光滑接触面给被约束物体的约束反力的作用线沿接触面在接触点的公法线上,其方向指向被约束物体。

如物体受到光滑面的约束图 1-5(a),约束反力就沿接触面的公法线方向指向被约束的物体,接触点就是约束反力的作用点。又如图 1-5(b)所示的凸轮机构,若将凸轮看成是顶杆的约束,当接触面光滑时约束反力亦在接触处指向上。在齿轮传动时相啮合的一对轮齿以它们的齿廓相接触,如不计摩擦可以认为是光滑接触[图 1-5(c)],约束反力沿两轮齿廓接触点的公法线。

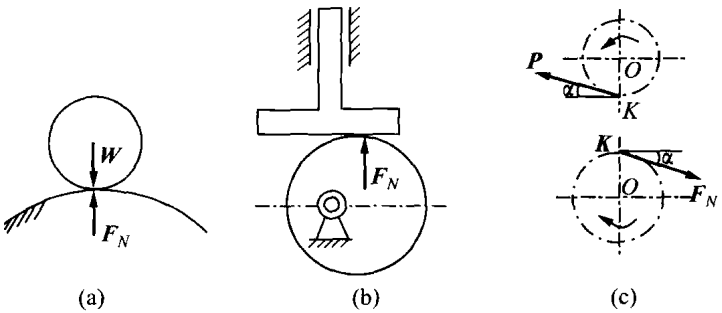


图 1-5

3. 光滑铰链约束

通常由一个圆孔套在一个圆轴外面构成光滑铰链约束,在工程中有多具体形式。现将其中主要的几种分述如下:

(1) 圆柱形销钉连接

两个零件的连接处用销钉连接起来,或用一个销钉将两个或更多个零件连接在一起,