

高等学校教材

# 化工设备 机械基础

第5版

董俊华 高炳军 编



化学工业出版社

高等学校教材

# 化工设备 机械基础

第5版

董俊华 高炳军 编



化学工业出版社

北京

本书为第5版,根据最新的国家标准,对本书第4版进行了修订。内容分为力学基础、压力容器、典型化工设备三篇。主要介绍构件与板壳力学基础理论,金属材料的基本知识,中、低压力容器和典型化工设备的强度计算方法、结构设计、有关的标准和规范等。配有习题、例题、内容实用,配有部分二维码,讲述深入浅出,便于自学。

本书为化工工艺专业及环保、制药等相关专业使用的综合性机械基础课程教材,也可供相关专业技术人员参考。

#### 图书在版编目(CIP)数据

化工设备机械基础/董俊华,高炳军编. —5版.

—北京:化学工业出版社,2018.10

高等学校教材

ISBN 978-7-122-32865-6

I. 化… II. ①董…②高… III. ①化工设备-高等学校-教材②化工机械-高等学校-教材 IV. TQ05

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第192391号

责任编辑:程树珍 丁文璇

装帧设计:张 辉

责任校对:边 涛

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:三河市航远印刷有限公司

装 订:三河市瞰发装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张30 $\frac{3}{4}$  字数803千字 2019年1月北京第5版第1次印刷

购书咨询:010-64518888 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00元

版权所有 违者必究

# 前言

《化工设备机械基础》第一版是1985年出版的,后经1993年、2002年、2012年三次修订,已出到第四版。第四版出版后,有很多涉及压力容器和化工设备的标准、法规已有了很大变动,例如2012年颁布了容器法兰标准(NB/T 47020~47027),2015年修订了人孔、手孔标准(HG/T 21515~21535、HG/T 21594~21604),2016年最新的《固定式压力容器安全技术监察规程》(TSG 21—2016)发布使用,2018年容器支座新标准(NB/T 47065.1~7065.5—2018)也正式实施。材料方面,2013年到2017年,相继修订了碳素钢钢板、低合金钢钢板、无缝钢管和锻件标准。设备方面,2014年管壳式换热器(GB/T 151)和塔式容器(NB/T 47041)的标准也进行了修订。这些标准规范的更新,使得本书第二篇压力容器和第三篇典型化工设备中的内容发生了很大改变,特别是一些摘自于标准的图和表,因此需要修订本书,以保持本书的实用性。

本次修订内容主要如下:

1. 按最新标准、规范更新了第2章、第6章、第8章、第10章、第11章、第13章、第14章、第15章、第16章和第17章的相关内容。

2. 采用二维码形式来扩展本书内容。在第二章借助二维码,展示了一些材料力学性能试验的动画。一些教学内容(如第6章中有色金属的性能及应用)只作了简要介绍,详细内容不再放到本书中,而是采用二维码形式给出。另外,有些表格仅在书上给出了部分内容,完整表格可扫二维码进行查看。

3. 删去了各章的检测题和部分习题,删去夹套法兰和部分附录内容,简化了压杆稳定计算等内容。

本次修订工作由董俊华、高炳军完成。修订历时半年,期间得到了董大勤教授的大力支持。虽然董大勤教授因年纪原因,不再担任本书的编者,但是依然投入了很多时间和精力,对我们的修订稿进行反复修改、校对,提出了很多宝贵意见。在此对董大勤教授表达我们最由衷的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有欠妥之处,恳请读者予以指正,谢谢!

编者

2018年7月

# 第一版前言

“化工设备机械基础”是为工科院校化工系工艺类专业开设的一门综合性的机械类课程。本课程的目的是使学习化工工艺专业的学生获得必要的机械基础知识，具有设计常、低压化工设备的初步能力，并能够对通用的传动零件进行简单的选型、核算和正常的维护使用。根据这一要求，教材的内容分为力学基础、化工材料、机械传动和容器设计四部分。对这四部分内容，既要尊重它们原学科的体系，保证相对的独立性，同时又必须在认真分析这几部分内容内在联系的基础上，探讨改变某些传统讲法的可能性，使本课逐步形成自己的课程体系。在这方面我们仅仅是作了一点初步的尝试，更多的探索还要依靠广大任课教师的不断实践，我们希望听到广大读者的意见。

考虑这门课程涉及的内容较广泛，学习本课程的学生先修基础课较少，并且各学校对这门课的教学要求差异还比较大这三个特点，我们在编写时有针对性地考虑了三条原则：

1. 内容的选取着眼于加强基础和学以致用。
2. 讲述的方法要适应化工工艺专业学生的特点，内容要有一定深度，但讲解要深入浅出，并且有相当部分内容应适于自学。
3. 具备一定弹性，使教学时数在 90~130 之间均可使用本教材。

这本教材主要供理论教学使用，考虑课程设计的需要，选编了少量容器设计资料作为附录列于书后。为不使附录占用本书太多篇幅，编者配合本书另册编写了“化工设备机械基础课程设计”（夹套设备、塔设备和换热器）。用该书者可与河北工学院教材科联系。

1978 年原石油化学工业出版社曾出版过《化工设备机械基础》教材，后来不少院校又编写了多种自用教材。本书的编写是根据 1984 年 11 月在西安召开的《化工设备机械基础》教材会议的决定确定的。其中董大勤编写第一、二、四篇，浙江工学院张莉珍编写第二篇九、十章，王孚川编写第二篇十一至十四章。编写中除书末所列文献外，还参阅了大连工学院等院校编写的教材。此外，天津化工设计院的郭昕亚同志、吉林化工学院的王素琴老师、太原工业大学的陈绪老师以及化工部第二设计院的赵修武、王凯同志都热心为本教材提供了图纸、资料，对教材编写提供了支持和帮助，教材的初稿曾请华东化工学院朱思明老师审阅。编者谨向这些同志致以衷心感谢。

由于编者水平有限，错误及不妥之处在所难免，望读者提出意见以便改正。

编者

1985 年 11 月

## 第二版前言

《化工设备机械基础》是为工科院校化工系工艺类专业开设的一门综合性的机械类课程。本课程的教学目的是使学生获得基础力学和金属材料知识,具备设计常、低压化工设备和对再用压力容器进行强度、稳定校核的能力,并了解压力容器监察管理法规,在今后工作中遵守实施。

本门课程的教材《化工设备机械基础》的初版版本是在1987年11月与读者见面的,几年来先后共重印了五万余册。这次修订是在总结近几年教学实践的基础上进行的,修订的指导思想是:

(1) 选材要适合化工、轻工绝大多数非机械类专业的教学要求、要强化针对性,立足于加强基础与学以致用。

(2) 精简理论深度,理论部分以“必须”和“够用”为度。

(3) 密切与生产实际的联系,教材必须在解决设计和生产问题中具有被生产一线工作同志认可的参考和指导价值。

(4) 要考虑教学对象的接受能力,讲授方法要深入浅出、要把传授知识与培养能力结合于讲授之中。

(5) 具有一定的弹性,使教学时数在90~120之间均可使用。

这次修订的主要内容是:

(1) 撤销了初版《化工设备机械基础》中的第三篇“机械传动”,增加了塔设备、管壳式换热器和带夹套与搅拌的反应釜等三种典型化工设备的设计计算与结构分析。目的是使绝大多数工艺专业学员在有限学时内优先学习最常用到的知识。

(2) 增写了一章压力容器安全使用与监察管理方面的内容,目的是增强学员的安全生产及遵纪守法的意识,并了解一些必要的法规。

(3) 按最新标准重新编写了标准所涉及的全部内容,并汇编了较多的资料数据(分别列入有关章节),还专门为化工设备图样的绘制与读图编写了几个有关问题,独立成章,目的是为课程设计准备比较完整的设计资料,也为今后工作参考使用。

(4) 增加了习题类型,调整了习题内容,给出了习题答案。

这次修订中新增加的三章典型化工设备,分别由王俊宝(塔设备)、董伟志(管壳式换热器)、张炳然(反应釜)编写,其余新增与修订的各章仍由董大勤编写,并主编全书。在本书修订的过程中曾得到全国压力容器标准化技术委员会、合肥通用机械研究所、天津市锅炉压力容器检验所,天津化工设计院,化工部第一、第三设计院以及许多工厂的标准制订、技术管理的专家和技术人员的指导和帮助,并得到化工部教育司有关领导的大力支持,编者对所有关心、支持、帮助本书修订工作的上述同志深表谢意。

修订后的本书还存在哪些不妥之处,希望使用本书的师生和读者指出宝贵意见。

编者

1993年6月

## 第三版前言

《化工设备机械基础》是一本综合多门学科、理论与实用并重的机械类教学用书，其理论内容是讲授杆件、板壳力学的基础理论和金属材料的基本知识，介绍中低压压力容器与几种典型化工设备的设计与计算；其实用内容提供的是较完整的教学所需的压力容器与化工设备设计资料。理论内容适合于课堂讲授或自学，实用部分的资料既可供实践性教学环节（如课程设计、毕业设计）使用，也可供从事压力容器设计、制造、管理人员参考。由此，可知本门课程的教学目的是：使学生掌握杆件、平板、回转形壳体的基础力学理论和金属材料的基础知识；熟悉涉及压力容器设计、制造、材料使用和监察管理的有关标准和法规；具备设计、使用和管理中、低压压力容器与化工设备的能力。

早期的《化工设备机械基础》教材是针对化工工艺专业学生的。该教材综合了《理论力学》、《材料力学》、《金属学》、《机械设计》、《化工容器与设备》多门课程的部分内容。经过二十多年教学探索和实践，已初步形成了比较完整的课程体系，其教材也摆脱了早期那种“拼盘”式的结构。由于这门课程有利于对非机械类专业学生综合能力的培养，而又无须设置多门课程，比较符合培养复合型人才的需要，所以继化工工艺专业之后，像轻工、食品、制药、环保、能源等非机械类专业，也在开设或计划开设类似或相同的课程。由于包括中央电大在内的全国许多高等院校都在开设《化工设备机械基础》课，所以以《化工设备机械基础》为书名的教材也就出现了各具特色的多种版本。为了便于读者选用，下面对本书的编写特点做一简单介绍。

编写本书总的指导思想是：好教、易学、实用。

### 一、理论内容的编写遵循讲清、学懂和够用的原则

1. 以初学者的认识水平和接受能力来确定理论讲授的起点、顺序和深度。语言通俗，层次分明，按照学生的逻辑思维去揣摩（结合教学经验）他们在学习过程中会出现什么问题，指出其出现疑难的原因，有的放矢地处理所要讲授的理论。

2. 以“够用”为原则，简化某些理论内容。但简化不是浓缩，浓缩违背初学者的认识规律。简化更不是简单地删除，因为有些概念不能不讲。所以要简化只能从改变讲授方法上入手，尝试采用“易化”处理的办法来达到简化目的。这种尝试效果如何，有待广大师生评议。

3. 有比较才能有鉴别。本书通过正文讲解、章节小结、思考题的设计与自我检查题的引导等多种方式，将过去教学中发现的、学生可能产生的错误概念、模糊认识、似是而非的理解与正确的结论进行对比性的讲解和判别，目的是引导学生在对比中加深理解，培养严谨认真的学风。

4. 根据本课程的教学要求，对于教材中所涉及的理论公式，编者并未一一推导。对于不进行推导的公式，须要讲清公式所揭示的规律及其适用条件，使读者理解、接纳、会用。对于必须推导的公式，比较侧重的是揭示在推导过程中所反映出来的概念与结论，而不是那些符号数字公式的罗列与推演。

5. 在讲授理论性内容为主的章节中，编写了部分习题，并给出了参考答案，以检验学生解决实际问题的能力。

### 二、实用内容编写的几点说明

1. 所提供的资料主要取自涉及压力容器材料、设计、制造、检验、使用和监察管理等方

面的(国家、部颁、行业)标准、法规和规定。同时也编入了少量编者个人的工作成果,即部分内、外压力容器壳体和封头的计算厚度表,以及一些带有拾遗补缺或综合归纳性质的数据和资料。这些资料基本上可以满足  $PN \leq 4\text{MPa}$  的压力容器在设计、制造、使用和管理上的参考需要。

2. 为了提高单页篇幅的信息量,对于大部分标准,在保持信息量完整的条件下,编者均作了重组与改编,与原始资料相比可节省篇幅 50% 以上。

3. 现行压力容器标准,一是数量多,二是经常修订,有一些相关联的标准,由于修订时间不同,往往在一段时间内,在它们之间会出现某些不协调一致之处。对于这类问题,编者除了指出其差别,并给出不同的数据外,有的还提出解决问题的建议。

4. 对《钢制压力容器》(GB 150) 作选择性讲解是本书主要内容之一。作为国家标准,它要考虑可能出现的各种情况,所以涉及的面很广。但是作为教材,其内容应根据教学和使用要求作出取舍和变更。譬如椭圆形封头,在 GB 150 中考虑了各种长短轴的比值,可是常用的只是  $(a/b)=2$  的椭圆形封头,若只讨论这种封头就简单多了。又譬如锥形壳体既要考虑作封头使用,又要考虑用作变径段,所以计算方法较烦琐,但是遇到最多的还是用作封头,如果只考虑作封头用,而且封头的大小端直径之比只要不小于 4,那么计算就可以变得非常简单。可以作类似简化处理的还有诸如真空容器的加强圈设计等。这些计算方法虽与 GB 150 的规定有些不同,但它们是在一定条件下的简化,并不违背 GB 150 的规定(正文中有论证)。

应该提醒读者注意,本书所编写的资料应以动态观点分析和使用,今天它们是现行的和最新的,过几年有些标准可能会修订,所以希望读者在日后的实际工作中随时留意标准的变化。编者也会在标准发生变化时,借本书每次重印之机对有关内容及时修正。

### 三、本书之不足

由于本课程既要综合讲授多门课程的基础理论,又要比较完整地提供实践性教学环节所需资料,以满足所规定的教学要求,所以本书原计划的编写内容较多,但是限于学时的缩减,本书不得不删除一些内容,诸如“复杂应力状态分析”“金属腐蚀与防护”“非金属材料”“球冠形封头”、“压力容器安全泄放装置”、“填料塔”等;对于像“强度理论”、“常用机械零件”这样一些内容也只能作实用性处理,上述这些删除与处理是否合适,有待广大师生与读者评议。

限于编者个人水平导致的不妥与错误,期望广大师生与读者指正。

编者

2002 年 3 月

## 第四版前言

本书是以掌握中、低压压力容器的设计为目的,以一系列技术法规、设计规定、材料和零部件标准为依托,讲解相关的力学、材料、机械、结构方面的基础知识。教材内容中的理论部分,在这次修订中变化不大,但是书中的实用内容则必须随着国家的技术政策、法规和相关标准的变化而不断更新,在这一点上,本书不同于基础课教材,本书第三版于2003年出版后,伴随科技进步和与国际接轨的需要,涉及压力容器标准的更新步伐日渐加快。在零部件方面,继2005年人、手孔新标准的实施,在2007~2009年又相继修订了容器支座和管法兰连接的标准。在材料方面,从2006年GB/T 700 碳素结构钢修订开始,2008年颁布了压力容器专用的炭素钢和低合金钢板标准(GB 713),将原20g、16Mng与20R、16MnR纳入其中。加上低温用(GB 3531)、焊接气瓶用(GB 6653)以及其他低合金高强度用(GB/T 1591)钢板的修订,全面更新了压力容器使用的低合金钢钢板;对于不锈钢(包括耐热钢)2007年更新了六个不锈钢标准;并在2009年从140多种不锈钢中,确定了17种不锈钢(含耐热钢)为压力容器专用钢板(GB 24511)。石油裂化、锅炉、换热器以及流体输送用的无缝和焊接钢管在2006年至2009年也陆续更新了原标准。甚至各种型钢,由于规格、型号的增加及质量要求的提高,也颁布了新标准。这些材料标准的修订以及2009年《固定式压力容器安全技术监察规程》的实施,要求1998版GB 150的修订工作必须加速进行。就在新版GB 150于2011年颁布前的两年中(2010、2011),又有复合钢板、锻件、铸铁、有色金属、压力容器封头与视镜以及焊接等标准做了修订。其中有些原JB、HG标准更改为NB标准。为配合新版GB 150在2012年的实施,HG 20593等标准也出了2011年的更新版本。正是在大量标准更新的背景下,本书才是2009年年初开始了四版的编写,但由于上述标准更新的时间延续数年,导致四版的书稿曾三次往返于编者与出版社之间,编者为此三易其稿,导致四版出版时间过长,编者对此深表歉意。改变这种状况的较好办法是在每年重印本书时,由编者审视一下有无需要对书中涉及少量新修订标准的内容做出修改。有则及时修改,使本书保持常新状态,而无需频繁出新版。

标准修改的原则仍然是对标准进行精选与重编,力求相同数量的资料所占用的篇幅(总量)比原标准减少在50%以上(若按书价计算,相同的信息量所占篇幅的成本不会超过所摘引法规标准总价的10%)。

第四版原计划2007年修订,由于有些院校在此之前已将《化工设备机械基础》课程教学学时数减少到50学时以下(另有课程设计),所以采用本教材的部分教师建议把教材的篇幅做进一步的压缩。编者反复思考了这一建议后认为,一门课程教材的篇幅,虽然要顾及课时的多少,但首先应取决于该课程的设课的目的和要达到的要求;其次要看教材的起点,要考虑学习该课的学生学过哪些先修课程;最后教材的讲述方法要考虑学生的接受能力,教材的编者必须把自己放在初学者的位置上,要以初学者能够理解水平与接受能力作为编写的指导思想。大家都知道,这门课程的特点是由原多门传统机械类课程(按小类型计,总学时为300)综合而成,另外还要增加大量的标准讲解与编辑,要把这些内容改变成数十学时的一门课,对原多门课程的内容进行压缩、精简是必然的。至于如何压缩,怎样精简,不同的编者会有不同的认识,本书编者的思路是:首先要确定本课程的设课目的和要求,然后才能有针对性地精选内容,精选不是对原课程某些内容的简单删除,必须考虑被删除的那些内容对

所选留内容的影响；压缩也不是浓缩，不能采取“三级跳”的办法来压缩篇幅；精简与压缩都不能违背初学者认识规律，要让学生面对基础知识或标准中出现的名词、概念或术语以及所作出结论都能理解，就需要前有铺垫，中有讲解，后有运用，环环相扣，融为一体。不能以回避一些必须交代清楚的讲解为代价，来换取篇幅的压缩。本教材的特点是，它没有先修课程（有些院校单独另设《工程力学》者除外），就机械系统的课程而言，它是从零起点开始学习，而要达到的是要使学生初步具备设计压力小于4MPa压力容器的基本能力。这是一个相当大的跨越，虽然课程的内容都是一些最基础的知识，但在跨越过程中会遇到由于“精简”和“零起点”所带来的许多在原课程中本不会出现的问题，从这个意义上说，这本教材又不能因其内容上的“浅”，而忽视讲解上的“细”。特别是有些难点，必须根据同学的接受能力，改变传统讲法，实现“易于理解”的处理。此外，把多门不同课程合并，还必须处理原各门课程的融合问题，建立本课程自身体系。要让同学从没有工程力学和材料基础知识开始学习，达到初步具备设计一般压力容器的基本能力，既要有起码的力学、材料基础知识，又必须理解和会用相当数量的法规和标准。所有这些都决定了本教材的篇幅不可能跟随课程学时的减少，随心所欲地进行压缩。必须考虑课上听课与课下自学的效果。如果本课程的要求基本保持不变，如果切切实实要让学生把最基本的知识真正学到手，编者认为课内学时越是缩减，教材的讲解越是要细，这是因为必须给同学在课下或在工作中自学创造条件。所以编者没有接受将这本教材篇幅做进一步压缩的建议。同时编者也不具备这种能力。

在强调把学生培养成复合型人才的今天，不是看他们在大学期间的教学计划中安排了多少门课程，而是要检验他们究竟把多少知识或技能真正学到手，知识和能力的积累是一个漫长的过程，本课程只希望给同学一点点扎扎实实的机类知识的入门基础，量在不多，重在真正掌握。编者期望在同学完成校内本课程的学习后，把这本教材保留在身边，以便在日后的工作中继续学习、使用。编者可以告诉同学，编者从1983年开始，在过去的28年中（含退休后），由于在教学的同时，始终没有脱离生产一线的技术工作，在与各种技术、管理人员的接触中，切实感受到这本教材对一线接触压力容器方面工作的人员的帮助。从使用来看，这本教材早已走出学校的课堂，也可以说它不再是仅供跟着教学时数跑的、所谓“讲多少编多少”的教材，当同学走出学校，转变为技术或管理人员以后，那时会感受到学习是没有止境的，后续知识的积累，既需要扎实的基础，更要有永不满足的求知欲望，因为机会总是留给有准备的人。

“化工设备机械基础”课程虽然已经在许多院校开设多年，但与成熟的传统课程相比，它仍然处于探索、实践和逐步完善的过程之中，对于教材应如何编写始终存在一些争论，目前编写出版的同名教材就有多种版本，这既是不同工艺专业对机械类知识要求侧重面不同的需求，同时它也反映不同编者对这门课程教材编写的思路与教学效果的期待有不同认识和要求。

除本书原编者外，参加本版修订或帮助审核的还有高炳军（第13章、第15章），董俊华（第6章、第17章）、袁凤隐（第14章）等老师，书中部分章节的删减或增加有些也是根据一线教师的意见确定的。编者对参与本书四版修订的全体老师深表谢意。

编者真诚期待广大教师、同学和社会读者对本书提出您的意见或建议。譬如是否可以把书名改为《化工容器机械基础》，将第三篇完全删除或另册编写。这次的修订，考虑学时的锐减，暂时撤掉了反应釜一章，其实如果不是书名中的“设备”二字，将换热器与板式塔一并去掉也无不可。总之，编者欢迎读者对本书的各个方面提出任何意见，特别是对尚有争论的问题，发表您的看法，您的意见可通过出版社转给编者。谢谢。

编者

2012年3月

# 目 录

## 第一篇 力学基础

|                              |    |                             |    |
|------------------------------|----|-----------------------------|----|
| <b>1 刚体的受力分析及其平衡规律</b> ..... | 1  | 2.2.5 硬度试验 .....            | 38 |
| 1.1 力的概念及其性质 .....           | 2  | 2.2.6 弯曲试验 .....            | 39 |
| 1.1.1 力的概念 .....             | 2  | 2.3 金属材料拉伸与冲击试验的新标准         |    |
| 1.1.2 力的基本性质 .....           | 2  | 简介 .....                    | 40 |
| 1.2 刚体的受力分析 .....            | 5  | 2.3.1 GB/T 228.1—2010 ..... | 40 |
| 1.2.1 约束和约束反力 .....          | 5  | 2.3.2 GB/T 229—2007 .....   | 42 |
| 1.2.2 刚体受力分析要领 .....         | 8  | 本章小结 .....                  | 42 |
| 1.3 平面汇交力系的简化与平衡 .....       | 8  | 习题 .....                    | 43 |
| 1.3.1 平面汇交力系的简化 .....        | 8  | <b>3 受拉(压)构件的强度计算与受剪切</b>   |    |
| 1.3.2 平面汇交力系的平衡条件 .....      | 10 | <b>构件的实用计算</b> .....        | 45 |
| 1.4 力矩、力偶、力的平移定理 .....       | 12 | 3.1 受拉直杆的强度计算 .....         | 45 |
| 1.4.1 力矩的概念 .....            | 12 | 3.1.1 强度条件的建立与许用应力          |    |
| 1.4.2 力偶 .....               | 12 | 的确定 .....                   | 45 |
| 1.4.3 力的平移定理——力与力偶           |    | 3.1.2 强度条件应用举例 .....        | 46 |
| 的联系 .....                    | 14 | 3.2 拉(压)杆连接部分的剪切和挤压         |    |
| 1.5 平面一般力系的简化与平衡 .....       | 15 | 强度计算 .....                  | 47 |
| 1.5.1 平面一般力系的简化 .....        | 15 | 3.2.1 剪切变形与剪力 .....         | 47 |
| 1.5.2 平面一般力系的平衡条件 .....      | 15 | 3.2.2 连接零件剪切强度的实用计算 .....   | 48 |
| 1.5.3 固定端约束的受力分析 .....       | 18 | 3.2.3 某些连接零件的挤压强度计算 .....   | 49 |
| 1.6 静力学问题求解方法小结 .....        | 20 | 本章小结 .....                  | 50 |
| 1.6.1 如何确定研究对象 .....         | 20 | 习题 .....                    | 51 |
| 1.6.2 如何画分离体受力图 .....        | 20 | <b>4 直梁的弯曲</b> .....        | 52 |
| 1.6.3 如何建立直角坐标系 .....        | 20 | 4.1 弯曲概念与梁的分类 .....         | 52 |
| 1.6.4 如何应用静力平衡方程 .....       | 20 | 4.1.1 弯曲变形的宏观表现与实例 .....    | 52 |
| 1.6.5 静力学能够解决问题的范围 .....     | 21 | 4.1.2 梁的几何形状和名称 .....       | 52 |
| 本章小结 .....                   | 21 | 4.1.3 梁上的外力、梁的支座及分类 .....   | 53 |
| 习题 .....                     | 22 | 4.2 梁的内力分析 .....            | 55 |
| <b>2 金属的力学性能</b> .....       | 25 | 4.2.1 梁横截面内的两种内力 .....      | 55 |
| 2.1 弹性体的变形与内力 .....          | 25 | 4.2.2 剪力与弯矩的计算 .....        | 57 |
| 2.1.1 变形与内力的概念 .....         | 25 | 4.3 纯弯曲时梁的正应力及正应力           |    |
| 2.1.2 变形的度量 .....            | 25 | 强度条件 .....                  | 62 |
| 2.1.3 直杆受拉(压)时的内力 .....      | 26 | 4.3.1 梁横截面内任意指定点处的          |    |
| 2.1.4 受拉(压)直杆内的应力 .....      | 28 | 正应力 .....                   | 63 |
| 2.2 材料的力学性能 .....            | 29 | 4.3.2 正应力的强度条件 .....        | 67 |
| 2.2.1 拉伸试验 .....             | 30 | 4.3.3 梁的合理截面 .....          | 71 |
| 2.2.2 压缩试验 .....             | 34 | 4.4 直梁弯曲时的切应力 .....         | 71 |
| 2.2.3 温度对材料的力学性能的影响 .....    | 35 | 4.4.1 矩形截面梁 .....           | 71 |
| 2.2.4 金属的缺口冲击试验 .....        | 37 | 4.4.2 工字形截面梁 .....          | 72 |

|                             |    |                                           |    |
|-----------------------------|----|-------------------------------------------|----|
| 4.4.3 环形截面梁                 | 72 | 5.2.3 剪切虎克定律                              | 84 |
| 4.4.4 实心圆截面梁                | 73 | 5.3 圆轴在外力偶作用下的变形与内力                       | 85 |
| 4.5 梁的变形——梁弯曲时的位移           | 73 | 5.3.1 变形分析                                | 85 |
| 4.5.1 梁的挠度和转角               | 74 | 5.3.2 扭转切应力及其分布规律                         | 86 |
| 4.5.2 梁的弹性曲线                | 74 | 5.3.3 横截面的内力矩——扭矩                         | 86 |
| 4.5.3 梁的刚度校核                | 75 | 5.3.4 扭矩与扭转变形 $\frac{d\varphi}{dx}$ 之间的关系 | 86 |
| 本章小结                        | 77 | 5.3.5 扭转切应力的计算公式                          | 87 |
| 习题                          | 79 | 5.3.6 扭转角的计算                              | 87 |
| <b>5 圆轴的扭转</b>              | 81 | 5.4 圆轴扭转时的强度条件与刚度条件                       | 88 |
| 5.1 圆轴扭转时所受外力的分析与计算         | 81 | 5.4.1 圆轴扭转时的强度条件                          | 88 |
| 5.1.1 搅拌轴的三项功能              | 81 | 5.4.2 圆轴扭转时的刚度条件                          | 88 |
| 5.1.2 $n$ 、 $P$ 、 $m$ 之间的关系 | 82 | 本章小结                                      | 89 |
| 5.2 纯剪切、角应变、剪切虎克定律          | 82 | 习题                                        | 91 |
| 5.2.1 纯剪切                   | 82 |                                           |    |
| 5.2.2 角应变                   | 84 |                                           |    |

## 第二篇 压力容器

|                            |     |                               |     |
|----------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| <b>6 压力容器与化工设备常用材料</b>     | 93  | 6.7.3 球墨铸铁                    |     |
| 6.1 金属的晶体结构                | 93  | (GB/T 1348—2009)              | 133 |
| 6.1.1 金属原子结构的特点与金属键        | 93  | 6.7.4 蠕墨铸铁                    |     |
| 6.1.2 金属的晶体结构              | 93  | (GB/T 26655—2011)             | 134 |
| 6.2 铁碳合金                   | 95  | 6.7.5 可锻铸铁                    |     |
| 6.2.1 什么是铁碳合金              | 95  | (GB/T 9440—2010)              | 134 |
| 6.2.2 铁碳平衡状态图              | 96  | 6.7.6 高硅耐蚀铸铁                  |     |
| 6.2.3 过冷奥氏体的恒温转变           | 97  | (GB/T 8491—2009)              | 134 |
| 6.2.4 钢的热处理                | 99  | 6.7.7 耐热铸铁                    |     |
| 6.3 钢的分类                   | 101 | (GB/T 9437—2009)              | 135 |
| 6.3.1 碳素钢                  | 101 | 6.7.8 铸铁用于压力容器时的规定            | 135 |
| 6.3.2 低合金钢                 | 103 | 6.8 有色金属                      | 135 |
| 6.3.3 高合金钢                 | 105 | 6.8.1 铜及其合金                   | 136 |
| 6.4 钢板                     | 109 | 6.8.2 铝及铝合金                   | 136 |
| 6.4.1 钢板的尺寸和允许偏差           | 109 | 6.8.3 钛及钛合金                   | 136 |
| 6.4.2 碳素钢与低合金钢钢板           | 110 | 6.9 金属的腐蚀与防护                  | 136 |
| 6.4.3 不锈钢、耐热钢钢板            | 114 | 6.9.1 腐蚀的定义及分类                | 136 |
| 6.5 钢管                     | 118 | 6.9.2 常见的几种腐蚀及其控制方法           | 138 |
| 6.5.1 钢管分类及其标准             | 118 | 习题                            | 142 |
| 6.5.2 钢管的尺寸                | 118 | <b>7 压力容器中的薄膜应力、弯曲应力与二次应力</b> | 143 |
| 6.5.3 钢管的钢号、性能和应用          | 120 | 7.1 回转壳体中的薄膜应力                | 143 |
| 6.5.4 钢管的检验与验收             | 124 | 7.1.1 容器壳体的几何特点               | 143 |
| 6.6 锻件与紧固件                 | 125 | 7.1.2 回转壳体中的拉伸应力              | 144 |
| 6.6.1 锻件                   | 125 | 7.2 圆形平板承受均布载荷时的弯曲应力          | 149 |
| 6.6.2 紧固件                  | 129 | 7.2.1 平板的变形与内力分析              | 149 |
| 6.7 铸铁                     | 132 | 7.2.2 弯曲应力与薄膜应力的比较和结论         | 152 |
| 6.7.1 铸铁的分类与代号             |     |                               |     |
| (GB/T 5612—2008)           | 132 |                               |     |
| 6.7.2 灰铸铁 (GB/T 9439—2010) | 133 |                               |     |

|                                        |     |                                                               |     |
|----------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------|-----|
| 7.3 边界区内的二次应力 .....                    | 152 | 9.2 外压圆筒环向稳定计算 .....                                          | 208 |
| 7.3.1 边界应力产生的原因 .....                  | 152 | 9.2.1 临界压力的计算 .....                                           | 208 |
| 7.3.2 影响边界应力大小的因素 .....                | 153 | 9.2.2 材料的 $\sigma$ - $\epsilon$ 曲线(即R-A曲线)<br>在稳定计算中的应用 ..... | 210 |
| 7.3.3 边界应力的性质 .....                    | 154 | 9.2.3 许用外压的计算 .....                                           | 212 |
| 7.3.4 回转壳体内部的边界应力 .....                | 154 | 9.3 封头的稳定计算 .....                                             | 219 |
| 7.4 强度条件 .....                         | 154 | 9.3.1 外压球壳与凸形封头的<br>稳定计算 .....                                | 219 |
| 7.4.1 对薄膜应力的限制(即薄膜应力<br>强度条件) .....    | 155 | 9.3.2 外压带折边锥形封头的<br>稳定计算 .....                                | 221 |
| 7.4.2 对一次弯曲应力的限制 .....                 | 158 | 9.3.3 防止内压凸形封头失稳的规定 .....                                     | 223 |
| 7.4.3 对二次应力的限制 .....                   | 160 | 9.4 外压容器加强圈的计算 .....                                          | 223 |
| 本章小结 .....                             | 161 | 9.4.1 外压容器加强圈所需最小截面<br>惯性矩的计算 .....                           | 224 |
| 习题 .....                               | 162 | 9.4.2 外压容器加强圈实际提供的<br>截面惯性矩的计算 .....                          | 226 |
| <b>8 内压容器</b> .....                    | 164 | 9.5 圆筒的轴向稳定校核 .....                                           | 229 |
| 8.1 设计参数的确定<br>(GB/T 150.3—2011) ..... | 164 | 9.5.1 什么情况下需要校核圆筒的轴向<br>稳定性 .....                             | 229 |
| 8.1.1 容器直径 .....                       | 164 | 9.5.2 轴向稳定许用应力的确定 .....                                       | 229 |
| 8.1.2 工作压力与设计压力 $p$ .....              | 164 | 9.6 压杆稳定计算简介 .....                                            | 230 |
| 8.1.3 设计温度 $t$ .....                   | 166 | 9.6.1 理想压杆的临界压力 .....                                         | 230 |
| 8.1.4 计算压力 $p_c$ .....                 | 166 | 9.6.2 临界应力欧拉公式的适用范围 .....                                     | 231 |
| 8.1.5 许用应力 $[\sigma]$ .....            | 166 | 9.6.3 柔度 $\lambda < \lambda_p$ 的压杆临界应力<br>的计算 .....           | 231 |
| 8.1.6 焊接接头系数 $\varphi$ .....           | 175 | 9.6.4 压杆稳定的实用计算 .....                                         | 232 |
| 8.2 内压容器筒体与封头厚度的计算 .....               | 176 | 本章小结 .....                                                    | 232 |
| 8.2.1 内压圆筒的五种厚度及其<br>确定方法 .....        | 176 | 习题 .....                                                      | 233 |
| 8.2.2 内压凸形封头厚度计算 .....                 | 179 | <b>10 法兰连接</b> .....                                          | 234 |
| 8.2.3 内压锥形封头厚度计算 .....                 | 183 | 10.1 压力容器法兰连接 .....                                           | 234 |
| 8.2.4 平板形封头 .....                      | 187 | 10.1.1 法兰连接的密封原理 .....                                        | 234 |
| 8.2.5 计算厚度的通用式 .....                   | 189 | 10.1.2 法兰连接受力分析及其<br>实用结论 .....                               | 234 |
| 8.3 在用压力容器的强度校核 .....                  | 189 | 10.1.3 压力容器法兰标准<br>(NB/T 47020~47027—2012) .....              | 236 |
| 8.3.1 在用压力容器强度校核的原则 .....              | 189 | 10.2 管法兰连接 .....                                              | 261 |
| 8.3.2 强度校核的思路、公式和举例 .....              | 189 | 10.2.1 管法兰(HG/T 20592—2009) .....                             | 261 |
| 8.3.3 在用压力容器的许用内压表 .....               | 191 | 10.2.2 管法兰连接用密封垫片 .....                                       | 287 |
| 8.4 容器筒体与封头的尺寸和质量 .....                | 193 | 10.2.3 钢制法兰用紧固件 .....                                         | 299 |
| 8.4.1 圆柱形筒体的容积、内表面积和<br>质量 .....       | 193 | <b>11 人孔、手孔、视镜和液面计</b> .....                                  | 304 |
| 8.4.2 封头的容积、内表面积和质量 .....              | 194 | 11.1 人孔和手孔 .....                                              | 304 |
| 8.5 容器壳体在材料使用上的规定 .....                | 199 | 11.1.1 容器上开设人孔、手孔<br>的规定 .....                                | 304 |
| 8.5.1 钢板用前的验收 .....                    | 199 | 11.1.2 钢制人孔和手孔 .....                                          | 305 |
| 8.5.2 压力容器在选材、用材上<br>的规定 .....         | 200 | 11.1.3 衬不锈钢人孔、手孔<br>(HG/T 21594~21604—2014) .....             | 323 |
| 本章小结 .....                             | 202 |                                                               |     |
| 习题 .....                               | 205 |                                                               |     |
| <b>9 外压容器与压杆的稳定计算</b> .....            | 207 |                                                               |     |
| 9.1 稳定的概念与实例 .....                     | 207 |                                                               |     |
| 9.1.1 稳定的概念 .....                      | 207 |                                                               |     |
| 9.1.2 “稳定”问题实例 .....                   | 207 |                                                               |     |

|                                                  |     |                                    |     |
|--------------------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|
| 11.2 视镜与液面计 .....                                | 327 | 14.2.2 筒体与封头连接的非对接<br>接头 .....     | 383 |
| 11.2.1 视镜 (NB/T 47017—2011) ...                  | 327 | 14.2.3 容器法兰与筒体连接的<br>焊接接头 .....    | 384 |
| 11.2.2 液面计 .....                                 | 332 | 14.2.4 管法兰与接管的焊接接头 .....           | 385 |
| <b>12 开孔补强与设备凸缘</b> .....                        | 334 | 14.2.5 接管与壳体的焊接接头 .....            | 386 |
| 12.1 开孔补强 .....                                  | 334 | 14.2.6 法兰凸缘与壳体的焊接接头 .....          | 389 |
| 12.1.1 问题的提出——容器接管附近的<br>应力集中 .....              | 334 | 14.3 焊接结构 .....                    | 391 |
| 12.1.2 补强结构与计算 .....                             | 336 | 14.3.1 设计原则 .....                  | 391 |
| 12.1.3 容器上开孔及补强的有关<br>规定 .....                   | 346 | 14.3.2 焊缝选择 .....                  | 391 |
| 12.2 设备凸缘 .....                                  | 347 | 14.4 焊接接头的检验 .....                 | 391 |
| 12.2.1 法兰凸缘 .....                                | 347 | 14.4.1 焊接接头缺陷 .....                | 391 |
| 12.2.2 管螺纹凸缘 .....                               | 349 | 14.4.2 焊接检验要点 .....                | 392 |
| <b>13 容器支座</b> .....                             | 350 | 14.5 焊接材料 .....                    | 393 |
| 13.1 卧式容器支座<br>(NB/T 47065.1—2018) .....         | 350 | <b>15 压力容器监察管理</b> .....           | 396 |
| 13.1.1 鞍式支座的结构与类型 .....                          | 350 | 15.1 压力容器监察管理的重要文件 .....           | 396 |
| 13.1.2 鞍座尺寸与质量 .....                             | 351 | 15.2 压力容器划类与分类管理 .....             | 397 |
| 13.1.3 鞍座的选用 .....                               | 355 | 15.2.1 广义压力容器与管辖<br>压力容器 .....     | 397 |
| 13.1.4 鞍座标记 .....                                | 356 | 15.2.2 《大容规》所管辖(适用)的<br>压力容器 ..... | 397 |
| 13.2 立式容器支座 .....                                | 357 | 15.2.3 《大容规》对压力容器范围<br>的界定 .....   | 398 |
| 13.2.1 耳式支座<br>(NB/T 47065.3—2018) .....         | 357 | 15.2.4 《大容规》对压力容器的划类 ...           | 398 |
| 13.2.2 支承式支座<br>(NB/T 47065.4—2018) .....        | 363 | 15.2.5 压力容器的设计管理 .....             | 401 |
| 13.2.3 腿式支座<br>(NB/T 47065.2—2018) .....         | 368 | 15.2.6 压力容器的制造管理 .....             | 402 |
| 13.2.4 刚性环支座<br>(NB/T 47065.5—2018) .....        | 376 | 15.2.7 压力容器的使用管理 .....             | 402 |
| <b>14 容器的焊接结构</b> .....                          | 377 | 15.3 压力容器的定期检验 .....               | 403 |
| 14.1 焊接接头及其分类 .....                              | 377 | 15.3.1 定期检验的目的 .....               | 403 |
| 14.1.1 焊接接头 .....                                | 377 | 15.3.2 金属压力容器定期检验的<br>项目 .....     | 404 |
| 14.1.2 压力容器上的焊接接头分类 .....                        | 379 | 15.3.3 金属压力容器检验周期 .....            | 404 |
| 14.2 压力容器中的焊接接头<br>(GB/T 150.3、HG/T 20583) ..... | 380 | 15.3.4 压力容器的安全状况等级 .....           | 404 |
| 14.2.1 筒体的纵、环向钢板拼接<br>对接接头 .....                 | 380 | 15.3.5 基于风险检测(RBI) .....           | 405 |
|                                                  |     | 15.4 压力容器的压力试验及泄漏试验 .....          | 405 |
|                                                  |     | 15.4.1 耐压试验 .....                  | 405 |
|                                                  |     | 15.4.2 泄漏试验 .....                  | 406 |

## 第三篇 典型化工设备

|                         |     |                                |     |
|-------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| <b>16 管壳式换热器</b> .....  | 408 | 16.2.1 壳体 .....                | 413 |
| 16.1 管壳式换热器的总体结构 .....  | 408 | 16.2.2 管箱 .....                | 418 |
| 16.1.1 固定管板式换热器 .....   | 408 | 16.2.3 管束 .....                | 418 |
| 16.1.2 浮头式换热器 .....     | 408 | 16.2.4 管板 .....                | 423 |
| 16.1.3 U形管式换热器 .....    | 411 | 16.2.5 波形膨胀节 .....             | 427 |
| 16.1.4 填料函式换热器 .....    | 412 | 16.2.6 折流板和支持板及其固定<br>结构 ..... | 429 |
| 16.2 管壳式换热器的主要零部件 ..... | 413 |                                |     |

|                                                     |     |                                    |     |
|-----------------------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|
| 16.2.7 其他结构 .....                                   | 432 | 17.3.4 塔盘、出口堰、降液板、受液盘<br>的固定 ..... | 443 |
| <b>17 板式塔</b> .....                                 | 434 | 17.4 板式塔的其他结构 .....                | 450 |
| 17.1 概述 .....                                       | 434 | 17.4.1 板式塔盘上的进料管 .....             | 450 |
| 17.2 整块式塔盘的板式塔 .....                                | 434 | 17.4.2 塔顶吊柱 .....                  | 451 |
| 17.2.1 定距管支承式塔盘 .....                               | 435 | 17.4.3 裙式支座 .....                  | 453 |
| 17.2.2 重叠式塔盘 .....                                  | 436 | 17.4.4 塔的保温装置 .....                | 456 |
| 17.2.3 塔盘圈与密封结构 .....                               | 439 | 17.5 塔的机械设计 .....                  | 458 |
| 17.2.4 降液管、溢流堰、出口液封盘 ...                            | 441 | 17.5.1 塔体承受的各种载荷计算 .....           | 458 |
| 17.3 分块式塔盘板式塔 .....                                 | 441 | 17.5.2 筒体的强度及稳定性校核 .....           | 459 |
| 17.3.1 组装结构 .....                                   | 441 | 17.5.3 裙座的强度及稳定性校核 .....           | 460 |
| 17.3.2 塔盘板与通道板 .....                                | 442 |                                    |     |
| 17.3.3 分块式塔盘的支持结构 .....                             | 443 |                                    |     |
| <b>附录 A 型钢 (GB/T 706—2016)</b> .....                | 461 | C-9 紧固件 .....                      | 476 |
| <b>附录 B 图 9-7 的曲线数据表</b><br>(GB/T 150.3—2011) ..... | 471 | C-10 力学性能试验 .....                  | 476 |
| <b>附录 C 标准目录</b> .....                              | 474 | C-11 容器法兰 .....                    | 476 |
| C-1 TSG. 特种设备安全技术规范与压力<br>容器设计 .....                | 474 | C-12 管法兰 .....                     | 476 |
| C-2 碳素钢与低合金钢及板材 .....                               | 474 | C-13 人孔、手孔 .....                   | 477 |
| C-3 不锈钢和耐热钢及板材 .....                                | 474 | C-14 支座 .....                      | 477 |
| C-4 无缝钢管与焊接钢管 .....                                 | 474 | C-15 视镜与液面计 .....                  | 477 |
| C-5 复合钢板 .....                                      | 475 | C-16 焊接 .....                      | 477 |
| C-6 铸铁 .....                                        | 475 | C-17 补强圈、补强管 .....                 | 478 |
| C-7 有色金属 .....                                      | 475 | C-18 介质毒性 .....                    | 478 |
| C-8 锻件 .....                                        | 476 | C-19 压力容器封头 .....                  | 478 |
|                                                     |     | C-20 无损检测 .....                    | 478 |

# 第一篇 力学基础

化工厂中使用的机器设备大都是在各种载荷下工作的，为了使它们安全可靠地工作，从力学角度，一般要提出三方面的要求：

- i. 能抵抗载荷对它的破坏，即有一定的强度；
- ii. 不发生超出许可的变形，即有一定的刚度；
- iii. 能维持构件自身的几何形状，即具有充分的稳定性。

因此，强度问题、刚度问题和稳定问题，都属于本课程的力学基础内容。讨论的重点是强度问题。

本课程的研究对象是化工设备。构成化工设备的元件既有杆件也有平板和回转壳体。杆件的变形与应力分析比较简单，它的一些概念和结论可以移植到平板与壳体的变形和应力分析中去，所以须对于杆件做一些必要的公式推导。要注意的是，要重视在公式推导过程中可以得到的某些有用的概念和启示，而不仅仅满足于最后得到的公式本身。依据课程性质与教学要求，对于平板与壳体的计算公式推导，有的是用与杆件类似的比较简单的方法论证，有的则是利用已有的一些力学基础理论的概念，采用定性说明的方法论证。

本篇讨论的对象虽然是杆件，但解题的思路、方法和结论，对于后续章节的学习也是十分重要的。

## 1 刚体的受力分析及其平衡规律

要研究构件的强度或刚度问题，首先要全面搞清楚构件所受外力。图 1-1 (a) 示一矩形水箱放在两个墙垛子上，水箱受重力  $G$ ，水箱在重力  $G$  作用下没有掉下来，显然是因为有墙垛子托住它，墙给水箱的支持力应该是垂直向上的 [图 1-1 (b)]。

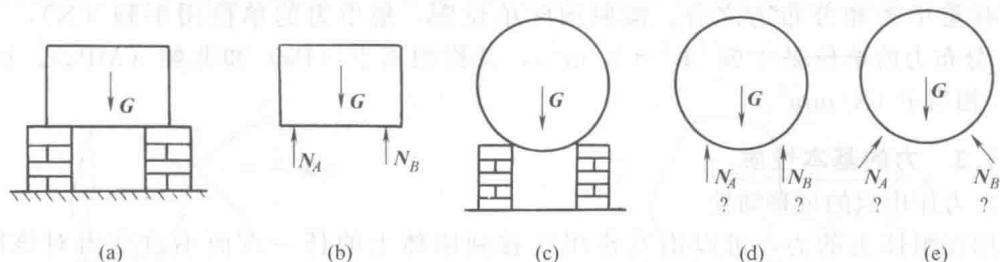


图 1-1 受力分析应解决的问题

如果水箱是圆筒形，也放在两个墙垛上 [图 1-1 (c)]，墙给水箱的支持力是垂直向上 [图 1-1 (d)]，还是倾斜 [图 1-1 (e)] 的呢？如何确定这两个支持力的力线方位，就是受力分析要研究的问题。

支持力的力线方位确定以后，还得解决力的大小问题。譬如说作用在圆筒上的支持力  $N_A$  和  $N_B$  的力线方位已经确定 [图 1-1 (e)]，如何从已知力  $G$  求取未知力  $N_A$  和  $N_B$  的大小呢？要从  $G$  求取  $N_A$  和  $N_B$ ，就得寻找  $G$  和  $N_A$ 、 $N_B$  的内在联系，探讨这个内在联系就

是讨论平衡规律的目的。

这个简单例子是要说明：这一章讨论的核心问题是如何已知外力求取未知外力。解决这个问题分两步：第一步是通过受力分析正确确定未知外力的力线方位；第二步是探索物体受力平衡规律，并利用它求取未知外力。

## 1.1 力的概念及其性质

### 1.1.1 力的概念

力是人们从长期的观察和实践中经过抽象而得出的一个概念。人类在自己的生产和生活过程中发现：物体与物体之间的相互作用会引起物体运动状态改变，也会引起物体变形。进而还发现：无论是运动状态的改变，还是物体的变形，其程度都与物体间相互作用的强弱有关。人们为了度量上述的物体间相互作用所产生的效果，于是就把这种物体间的相互作用称之为力。

由此可见，力是通过物体间相互作用所产生的效果体现出来的。因此认识力、分析力、研究力都应该着眼于力的作用效果。上边谈到的力使物体运动状态发生改变，称它是力的外效应。而力使物体发生变形，则被称为是力的内效应。

单个力作用于物体时，既会引起物体运动状态改变，又会引起物体变形。两个或两个以上的力作用于同一物体时，则有可能不改变物体的运动状态而只引起物体变形。当出现这种情况时，称物体处于平衡。这表明作用于该物体上的几个力的外效应彼此抵消，但不能由此否定单个力的外效应。

力作用于物体时，总会引起物体变形。但在正常情况下，工程用的构件在力的作用下变形都很小。这种微小的变形对力的外效应影响很小，可以忽略。这样一来，在讨论力的外效应时，就可以把实际变了形的物体，看成是不发生变形的刚体。所以，当称物体为刚体时，就意味着不去考虑力对它的内效应。在这一章研究的对象都是刚体，讨论的是力的外效应。

力是矢量，图示时可用一带箭头的有向线段表示，有向线段长度（按比例尺）表示力的大小，箭头所指表示力的方向。用符号表示力时，以黑体字  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{Q}$  或  $\vec{F}$ ,  $\vec{P}$ ,  $\vec{Q}$  等表示矢量，以白体字  $F$ ,  $P$ ,  $Q$  等表示力的大小。

力有集中力和分布力之分。按照国际单位制，集中力的单位用牛顿（N），千牛顿（kN）；分布力的单位是牛顿/米<sup>2</sup>（N/m<sup>2</sup>），又称帕斯卡（Pa）和兆帕（MPa）。1MPa = 10<sup>6</sup>Pa，相当于 1N/mm<sup>2</sup>。

### 1.1.2 力的基本性质

#### （1）力作用点的可移动性

作用在刚体上的力，可以沿其作用线移到刚体上的任一点而不改变力对该刚体的外效应。

例如作用在小车 A 点有一力  $\mathbf{F}$  [图 1-2 (a)]，在沿力  $\mathbf{F}$  的作用线上任取一点 B，设想在 B 点沿力  $\mathbf{F}$  的作用线增加作用一对等值、反向、共线的力  $\mathbf{F}_1$  和  $\mathbf{F}_2$  [图 1-2 (b)]，使  $\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_2 = \mathbf{F}$ 。由于  $\mathbf{F}_1$  与  $\mathbf{F}_2$  对小车的效应互相抵消，所以增加了  $\mathbf{F}_1$  与  $\mathbf{F}_2$  以后，三个力作用的总效应与单个力  $\mathbf{F}$  对小车作用的效应相同。考虑  $\mathbf{F}$  和  $\mathbf{F}_2$  二力等值、反向、共线，它们的外效应相互抵消，所以去掉它们不会对小车的外效应有任何影响 [图 1-2 (c)]，这样一来就相当于把作用在 A 点的力  $\mathbf{F}$  沿其作用线移到了 B 点，而力对小车的效应并没有改变。这就证明了力的作用点可沿其作用线移动到另一点而不改变力对物体作用的外效应的性质。但是不能由此得出“作用在刚体上的弹力是可以通过该刚体传递给另一个物体”的错误