

教育部高等学校
化工类专业教学指导委员会推荐教材

化工机械基础

(第三版)

陈国桓 陈刚 主编



化学工业出版社



教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材

化工机械基础

(第三版)

陈国桓 陈 刚 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

全书共分五篇。第一篇工程力学，包括物体的受力分析及其平衡条件、直杆的拉伸和压缩、直梁的弯曲、剪切、圆轴的扭转、基本变形小结；第二篇材料与焊接，包括化工设备材料、焊接；第三篇容器设计，包括容器设计基础、容器零部件设计、容器设计举例；第四篇典型化工设备，包括塔设备、管壳式换热器；第五篇机械传动，包括带传动、齿轮传动。书后有附录等相关内容。

本书可作为高等学校化学工程与工艺专业及相近专业（石化、生化、制药、冶金、环保、能源等）的本科生教材，也可供相关部门的科研、设计和生产单位的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工机械基础/陈国桓, 陈刚主编. —3 版. —北京:
化学工业出版社, 2015. 7
教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材
ISBN 978-7-122-24031-6

I. ①化… II. ①陈…②陈… III. ①化工机械-高等
学校-教材 IV. ①TQ05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 106296 号

责任编辑: 何 丽 徐雅妮
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 丁建华
装帧设计: 关 飞

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: 北京永鑫印刷有限公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 18½ 字数 472 千字 2015 年 9 月北京第 3 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 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: 39.00 元

版权所有 违者必究

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会 推荐教材编审委员会

主任委员 王静康 冯亚青

副主任委员 张凤宝 高占先 张泽廷 于建国 曲景平 陈建峰

李伯耿 山红红 梁 斌 高维平 郝长江

委 员 (按姓氏笔画排序)

马晓迅 王存文 王光辉 王延吉 王承学 王海彦

王源升 韦一良 乐清华 刘有智 汤吉彦 李小年

李文秀 李文翠 李清彪 李瑞丰 杨亚江 杨运泉

杨祖荣 杨朝合 吴元欣 余立新 沈一丁 宋永吉

张玉苍 张正国 张志炳 张青山 陈 砾 陈大胜

陈卫航 陈丰秋 陈明清 陈波水 武文良 武玉民

赵志平 赵劲松 胡永琪 胡迁林 胡仰栋 钟 宏

钟 秦 姜兆华 费德君 姚克俭 夏淑倩 徐春明

高金森 崔 鹏 梁 红 梁志武 程 原 傅忠君

童张法 谢在库 管国锋

序

化学工业是国民经济的基础和支柱性产业，主要包括无机化工、有机化工、精细化工、生物化工、能源化工、化工新材料等，遍及国民经济建设与发展的重要领域。化学工业在世界各国国民经济中占据重要位置，自 2010 年起，我国化学工业经济总量居全球第一。

高等教育是推动社会发展的重要力量。当前我国正处在加快转变经济发展方式、推动产业转型升级的关键时期。化学工业要以加快转变发展方式为主线，加快产业转型升级，增强科技创新能力，进一步加大节能减排、联合重组、技术改造、安全生产、两化融合力度，提高资源能源综合利用效率，大力发展循环经济，实现化学工业集约发展、清洁发展、低碳发展、安全发展和可持续发展。化学工业转型迫切需要大批高素质创新人才，培养适应经济社会发展需要的高层次人才正是大学最重要的历史使命和战略任务。

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会（简称“化工教指委”）是教育部聘请并领导的专家组织，其主要职责是以人才培养为本，开展高等学校本科化工类专业教学的研究、咨询、指导、评估、服务等工作。高等学校本科化工类专业包括化学工程与工艺、资源循环科学与工程、能源化学工程、化学工程与工业生物工程等，培养化工、能源、信息、材料、环保、生物工程、轻工、制药、食品、冶金和军工等领域从事工程设计、技术开发、生产技术管理和科学研究等方面工作的工程技术人才，对国民经济的发展具有重要的支撑作用。

为了适应新形势下教育观念和教育模式的变革，2008 年“化工教指委”与化学工业出版社组织编写和出版了 10 种适合应用型本科教育、突出工程特色的“教育部高等学校化学工程与工艺专业教学指导分委员会推荐教材”（简称“教指委推荐教材”），部分品种为国家级精品课程、省级精品课程的配套教材。本套“教指委推荐教材”出版后被 100 多所高校选用，并获得中国石油和化学工业优秀教材等奖项，其中《化工工艺学》还被评选为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

党的十八大报告明确提出要着力提高教育质量，培养学生社会责任感、创新精神和实践能力。高等教育的改革要以更加适应经济社会发展需要为着力点，以培养多规格、多样化的应用型、复合型人才为重点，积极稳步推进卓越工程师教育培养计划实施。为提高化工类专业本科生的创新能力和工程实践能力，满足化工学科知识与技术不断更新以及人才培养多样化的需求，2014 年 6 月“化工教指委”和化学工业出版社共同在太原召开了“教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材编审会”，在组织修订第一批 10 种推荐教材的同时，增补专业必修课、专业选修课与实验实践课配套教材品种，以期为我国化工类专业人才培养提供更丰富的教学支持。

本套“教指委推荐教材”反映了化工类学科的新理论、新技术、新应用，强化

安全环保意识；以“实例—原理—模型—应用”的方式进行教材内容的组织，便于学生学以致用；加强教育界与产业界的联系，联合行业专家参与教材内容的设计，增加培养学生实践能力的内容；讲述方式更多地采用实景式、案例式、讨论式，激发学生的学习兴趣，培养学生的创新能力；强调现代信息技术在化工中的应用，增加计算机辅助化工计算、模拟、设计与优化等内容；提供配套的数字化教学资源，如电子课件、课程知识要点、习题解答等，方便师生使用。

希望“教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材”的出版能够为培养理论基础扎实、工程意识完备、综合素质高、创新能力强的化工类人才提供系统的、优质的、新颖的教学内容。

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会

2015年1月

前言

科学在发展，技术在进步，教材也要不断更新。

本书第二版自 2006 年出版发行以来，深受高校师生及工程技术人员的欢迎。我们觉得更应该负责地将教材内容修订好。

本次修订内容主要如下：

① 按国家或部委颁布的最新标准、规范进行更新。如对压力容器及其零部件（包括容器法兰、管法兰）、各种钢材牌号等进行了标准更新。

② 增补典型化工设备篇，包括塔设备和管壳式换热器。结合实际工业应用与新技术的发展，对新型规整填料及塔内件等内容进行了重点介绍。

③ 由于篇幅所限，删去了力学篇章的组合变形分析与压杆稳定性，以及第四篇机械传动的蜗杆传动、轴系和轮系、减速器等章节。

④ 在工程力学的篇章中，经典的力学概念基本不变，增加了实例例题。此外，统一了力学部分的强度符号，如用 R_m 、 R_{el} 分别代替 σ_b 、 σ_s 。

⑤ 对于各种钢材品种类别及性能的描述，用表格化代替平铺直叙的写法，便于读者理解与记忆。

本次全面修订工作由陈国桓、陈刚共同完成，增补的典型化工设备篇由陈刚完成。

本次修订出版与化学工业出版社的积极支持分不开，并得到本校化工学院及过程装备与控制工程系领导的积极支持。崔云老师，朱美娥高级工程师，在读研究生张勇、史丽婷、张旭、王一哲、崔仕博、吴昊、徐程，陈相宜等为本书的修订做了大量的具体工作，在此一并致谢！

由于编者的水平有限，不妥之处难免，恳请读者批评指正。

编者
2015 年 4 月

第一版前言

为了适应培养跨世纪高级化工专业人才的需要，以“面向 21 世纪的教学内容和课程体系改革”为主导思想，以“面向 21 世纪对化工类专门人才的知识、能力、综合素质培养目标”为宗旨，贯彻“加强基础，拓宽专业知识，联系实际，提高能力，便于自学”的原则，在原有《化工设备机械基础》课程教材的基础上，删去了与《化工原理》有重复的，如塔设备结构、换热器结构及搅拌反应器结构等典型化工设备内容，增加了机械传动和焊接技术的介绍，这些都是工程技术人员应具备的机械基础知识。

本教材内容的组成方面，始终贯穿这样的思路：对于某一设备或零部件，分析它的载荷及受力情况，计算它的应力，然后进行强度、刚度或稳定性校核，同时解决安全与经济的矛盾。

教材中尽量引用国家或部委颁布的最新标准、规范的数据，以此引导学生了解标准、规范，遵循规范。在使用标准规范中，往往可以获得事半功倍的效果。

在编写中力求做到理论联系实际，由浅入深。概念的引出、例题、习题，尽量针对化工装置及其零部件，期望增加学生学习兴趣，把理论学得更扎实。

本书可作为高等院校化学工程与工艺专业以及相关专业的教材（如石油、生物工程、制药、材料、冶金、环保、核能等），也可供有关部门的科研、设计和生产单位的科技人员参考。

本教材的编写人员：第一篇陈旭；第二篇的第八章谭蔚，第九章陈国桓；第三篇陈国桓；第四篇谭蔚。主编陈国桓。

作者十分感谢涂善东教授和贾春厚教授为本书审阅并提出了许多宝贵意见。

中国科学院院士余国琮教授自始至终都在关心和指导本书的编写工作，并为本书作序。朱宏吉、许莉、高红为本书的编写提供了许多资料，安柯、高翔、赵翠伶、于欣为本书的出版做了大量的具体工作。天津大学化工学院为本书的出版给予大力支持，特在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中不完善甚至缺点错误在所难免，敬请同行及读者指正，对此不胜感激。

编者

2000 年 11 月

第二版前言

《机械基础》自 2001 年 8 月出版以来，深受高校师生及工程技术人员欢迎。本教材内容侧重化工类专业，为了便于化工类及相关专业师生选用，本次改版更名为《化工机械基础》。

本次修订内容主要如下。

① 按国家或部委颁布的最新标准、规范进行更新。

② 对体系与内容进行了重构。根据现有本科生教学大纲及学时的要求，调整了部分章节的体系和内容，如将原第四篇“容器设计”改为第三篇；而将原第三篇“机械传动与减速器”改为第四篇，删去了“链传动”一章，增设了“轴系”；删去部分附录内容。

③ 增加了应用实例，便于学生理解，加强知识向能力的转化。还增加了部分有一定难度或灵活性的习题，引导学生用所掌握的基本理论和基本方法实际问题，从而增加学习兴趣，把理论学得更扎实。

本次全面修订与增补工作主要由这些年来从事该课程教学的教师许莉完成，第一版编者也做了部分修订工作，新增的第 17 章由朱宏吉编写。

本次修订本的出版与化学工业出版社的支持分不开，兄弟院校的授课教师提供了一些宝贵意见，王晓静副教授、高红博士、王泽军教授级高级工程师为本书的修订提供了许多资料，王士勇、蔡永益、何璟为本书的修订做了大量的具体工作，在此一并致谢。

由于编者的水平，不妥之处难免，恳请读者批评指正。

编者

2005 年 11 月

目录

第一篇 工程力学 / 1

第 1 章 物体的受力分析及其平衡条件 / 2

| | |
|-----------------------|----|
| 1.1 力的概念和基本性质 | 2 |
| 1.2 力矩与力偶 | 5 |
| 1.3 物体的受力分析及受力图 | 8 |
| 1.4 平面力系的平衡方程 | 13 |
| 思考题 | 17 |

第 2 章 直杆的拉伸和压缩 / 18

| | |
|-------------------------|----|
| 2.1 直杆的拉伸和压缩 | 19 |
| 2.2 拉伸和压缩时材料的力学性能 | 22 |
| 2.3 拉伸和压缩的强度条件 | 29 |
| 思考题 | 32 |

第 3 章 直梁的弯曲 / 33

| | |
|-----------------------------|----|
| 3.1 梁的弯曲实例与概念 | 33 |
| 3.2 梁横截面上的内力——剪力与弯矩 | 34 |
| 3.3 弯矩方程与弯矩图 | 36 |
| 3.4 弯曲时横截面上的正应力及其分布规律 | 42 |
| 3.5 梁弯曲时的强度条件 | 45 |
| 3.6 梁截面合理形状的选择 | 47 |
| 3.7 梁的弯曲变形 | 49 |
| 思考题 | 52 |

第 4 章 剪切 / 53

| | |
|-------------------------|----|
| 4.1 剪切变形的概念 | 53 |
| 4.2 剪力、切应力与剪切强度条件 | 53 |
| 4.3 挤压的概念和强度条件 | 55 |
| 4.4 剪切变形和剪切虎克定律 | 55 |
| 思考题 | 56 |

第 5 章 圆轴的扭转 / 57

| | |
|----------------------|----|
| 5.1 圆轴扭转的实例与概念 | 57 |
|----------------------|----|

| | |
|-----------------------|----|
| 5.2 扭转时的外力和内力····· | 58 |
| 5.3 扭转时横截面上的应力····· | 60 |
| 5.4 扭转的强度条件····· | 64 |
| 5.5 圆轴的扭转变形与刚度条件····· | 65 |
| 思考题····· | 67 |

第 6 章 基本变形小结 / 68

| | |
|-------------|----|
| 第一篇 习题····· | 70 |
| 参考文献····· | 76 |

第二篇 材料与焊接 / 77

第 7 章 化工设备材料 / 78

| | |
|-----------------------|-----|
| 7.1 概述····· | 78 |
| 7.2 材料的性能····· | 78 |
| 7.3 铁碳合金····· | 81 |
| 7.4 钢的分类····· | 86 |
| 7.5 有色金属材料····· | 95 |
| 7.6 非金属材料····· | 97 |
| 7.7 化工设备的腐蚀及防腐措施····· | 99 |
| 7.8 化工设备的材料选择····· | 104 |
| 思考题····· | 105 |

第 8 章 焊接 / 107

| | |
|----------------------|-----|
| 8.1 电弧焊····· | 107 |
| 8.2 焊接材料····· | 109 |
| 8.3 焊接接头和坡口形式····· | 112 |
| 8.4 焊接缺陷与焊接质量检验····· | 114 |
| 思考题····· | 116 |
| 参考文献····· | 116 |

第三篇 容器设计 / 119

第 9 章 容器设计基础 / 120

| | |
|-------------------|-----|
| 9.1 概述····· | 120 |
| 9.2 内压薄壁容器设计····· | 125 |
| 9.3 外压圆筒设计····· | 134 |
| 9.4 封头的设计····· | 144 |
| 思考题····· | 153 |

第 10 章 容器零部件设计 / 154

| | |
|---------------|-----|
| 10.1 法兰连接 | 154 |
| 10.2 容器支座 | 163 |
| 10.3 容器的开孔与附件 | 169 |
| 思考题 | 173 |

第 11 章 容器设计举例 / 174

| | |
|-------------|-----|
| 11.1 罐体壁厚设计 | 174 |
| 11.2 封头壁厚设计 | 174 |
| 11.3 鞍座设计 | 175 |
| 11.4 人孔设计 | 175 |
| 11.5 人孔补强确定 | 176 |
| 11.6 接口管设计 | 176 |
| 11.7 设备总装配图 | 176 |
| 第三篇 习题 | 178 |
| 参考文献 | 180 |

第四篇 典型化工设备 / 181

第 12 章 塔设备 / 182

| | |
|--------------|-----|
| 12.1 概述 | 182 |
| 12.2 板式塔结构 | 182 |
| 12.3 填料塔 | 188 |
| 12.4 塔体强度计算 | 198 |
| 12.5 裙座的强度计算 | 205 |
| 思考题 | 210 |

第 13 章 管壳式换热器 / 211

| | |
|------------------|-----|
| 13.1 概述 | 211 |
| 13.2 管壳式换热器的结构形式 | 212 |
| 13.3 管壳式换热器构件 | 213 |
| 13.4 管壳式换热器的强度计算 | 225 |
| 13.5 管壳式换热器标准简介 | 230 |
| 参考文献 | 231 |

第五篇 机械传动 / 233

第 14 章 带传动 / 234

| | |
|---------|-----|
| 14.1 概述 | 234 |
|---------|-----|

| | | |
|------|-----------------|-----|
| 14.2 | 带传动的工作原理及工作情况分析 | 235 |
| 14.3 | V形带传动的设计计算 | 237 |
| 14.4 | V形带轮 | 241 |
| 14.5 | V形带的布置、使用和维修 | 243 |
| 14.6 | 同步齿形带传动简介 | 244 |
| | 思考题 | 246 |

第15章 齿轮传动 / 247

| | | |
|-------|-----------------------|-----|
| 15.1 | 概述 | 247 |
| 15.2 | 齿廓啮合的基本定律 | 247 |
| 15.3 | 渐开线和渐开线齿廓的啮合特性 | 248 |
| 15.4 | 渐开线标准直齿圆柱齿轮各部分名称和基本尺寸 | 250 |
| 15.5 | 一对渐开线齿轮的啮合传动 | 252 |
| 15.6 | 齿轮的加工方法及变位齿轮 | 253 |
| 15.7 | 齿轮轮齿的失效形式 | 256 |
| 15.8 | 直齿圆柱齿轮传动的强度计算 | 257 |
| 15.9 | 齿轮材料与许用应力 | 261 |
| 15.10 | 齿轮的构造 | 262 |
| | 思考题 | 265 |
| | 第五篇 习题 | 266 |
| | 参考文献 | 266 |

附录 / 267

| | | |
|------|---|-----|
| 附录1 | 我国不锈钢与美国不锈钢牌号近似对照 (摘自 GB 150—2011) | 267 |
| 附录2 | 钢材弹性模量 (摘自 GB 150—2011) | 268 |
| 附录3 | 钢材平均线膨胀系数 (摘自 GB 150—2011) | 268 |
| 附录4 | 钢材许用应力 (包括碳素结构钢钢板、压力容器用钢板、低温 压力容器用钢板、高合金钢板, 摘自 GB 150—2011 及 GB 150—1998) | 269 |
| 附录5 | 碳素钢和低合金钢钢管许用应力 (摘自 GB 150—2011) | 272 |
| 附录6 | 热轧工字钢规格及截面特性参数 (摘自 GB 706—2008) | 273 |
| 附录7 | 钢制压力容器用甲型平焊法兰的结构形式和系列尺寸 (摘自 NB/T 47021—2012) | 274 |
| 附录8 | 管法兰中, 突面、凹凸面、榫槽面的密封面尺寸 (摘自 HG/T 20592—2009) | 276 |
| 附录9 | 板式平焊钢制管法兰参数 (摘自 HG/T 20592—2009) | 277 |
| 附录10 | 有关筒体和封头的参数 | 280 |

第一篇

工程力学

生产中使用的任何机器或设备的构件，应该满足适用、安全和经济三个基本要求。任何机器或设备在工作时，都要受到各种各样外力的作用，而机器或设备的构件在外力作用下都要产生一定程度的变形。如果构件材料选择不当或尺寸设计不合理，则在外力的作用下是不安全的。构件可能产生过大的变形，使设备不能正常工作；也可能使构件发生破坏，从而使整个设备毁坏；有的构件当外力达到某一定值时，也可能突然失去原来的形状，而使设备毁坏。因此，为了使机器或设备能安全而正常地工作，在设计时必须使构件满足下述要求。

- ① 要有足够的强度，以保证构件在外力作用下不致破坏。
- ② 要有足够的刚度，以保证在外力作用下构件的变形在工程允许的范围以内。
- ③ 要有足够的稳定性，以保证构件在外力作用下不至于突然失去原来的形状。

工程力学的任务就是研究构件在外力作用下变形和破坏的规律，为设计构件选择适当材料和尺寸，以保证能够达到强度、刚度和稳定性的要求。本篇的主要内容，可以归纳为两个方面：一是研究构件受力的情况，进行受力大小的计算；二是研究材料的力学性能和构件受力变形与破坏的规律，进行构件强度、刚度或稳定性的计算。

在强度计算上，化工机械设备构件的几何形状，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，它是分析平板与回转壳体的基础，所以作为力学问题中的基础内容，在本篇中将介绍等截面直杆的应力分析、强度计算与变形计算问题，以便为平板、回转壳体及传动零件的强度计算准备必需的理论基础。

第1章

物体的受力分析及其平衡条件

1.1 力的概念和基本性质

1.1.1 力的概念

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，其程度都与物体间相互作用的强弱有关。为了度量物体间相互作用所产生的效果，把这种物体间的相互作用称为力。

力是通过物体间相互作用所产生的效果体现出来的。因此，分析和研究力都应该着眼于力的作用效果。力使物体运动状态发生改变，称为是力的外效应，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。

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，当考虑物体为刚体时，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。

对力的概念的理解应注意两点：力是物体之间的相互作用，离开了物体，力是不能存在的；力既然是物体之间的相互作用，因此，力总是成对地出现于物体之间。相互作用的方式可以是直接接触，如人推小车；也可以是不直接接触而相互吸引或排斥，如地球对物体的引力（即重力）。因此，在分析力时，必须明确以哪一个物体为研究对象，分析其他物体对该物体的作用。

实践证明，对物体作用的效果取决于以下三个要素：力的大小；力的方向；力的作用点。其中任何一个有了改变，力的作用效果也必然改变。力的大小表明物体间机械作用的强烈程度。

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²”（N/m²）或牛顿/米（N/m）。

力是具有大小和方向的物理量，这种量叫做矢量，与常见的仅用数量大小就可以表达的

物理量如体积、温度、时间等不同，只有大小而无方向的量叫做标量。力是矢量，用黑体字表示，例如 \mathbf{F} 。在图示中通常用带箭头的线段来表示力，线段的长度表示力的大小，箭头所指的方向表示力的方向，线段的起点或终点画在力的作用点上，如图 1-1 中作用在小车上的重力 \mathbf{P} 与拉力 \mathbf{T} 。

1.1.2 力的基本性质

(1) 作用与反作用定律 物体间的作用是相互的。作用与反作用定律反映了两个物体之间相互作用力的客观规律。如图 1-2 所示，起吊重物时，重物对钢丝绳的作用力 \mathbf{T} 与绳对重物的反作用力 \mathbf{T}' 是同时产生的，并且大小相等、方向相反、作用在同一条直线上。力既然是两个物体之间的相互机械作用，所以就两个物体来看，作用力与反作用力必然永远是同时产生，同时消失，而且一旦产生，它们的大小必相等，方向必相反，而作用线必相同。这就是力的作用与反作用定律。成对出现的这两个力分别作用在两个物体上，因而它们对各自物体的作用效应不能相互抵消。

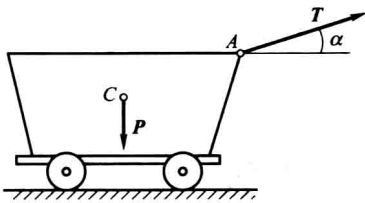


图 1-1 小车受力图

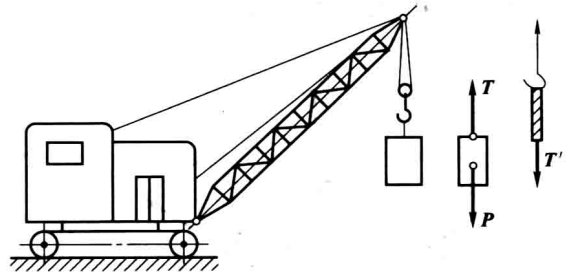


图 1-2 起吊重物受力图

(2) 二力平衡定律 任何事物的运动是绝对的，静止是相对的、暂时的、有条件的。在力学分析中，把物体相对于地球表面处于静止或匀速直线运动状态称为平衡状态。当物体上只作用有两个外力而处于平衡时，这两个外力一定是大小相等，方向相反，并且作用在同一直线上。

仍以起吊重物为例，重物受两个力作用，向下的重力 \mathbf{P} 和向上的拉力 \mathbf{T} ，它们的方向相反，沿同一直线，如图 1-3 所示。当物体停止在半空中或作匀速直线运动时，这时物体处于平衡，即 \mathbf{T} 和 \mathbf{P} 的大小相等、方向相反、作用在同一直线上。由此可以知道，作用于同一物体上的两个力处于平衡时，这两个力总是大小相等、方向相反并且作用在同一直线上。这就是二力平衡定律。

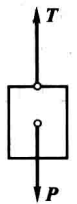


图 1-3 起吊重物受力分析

应当注意，在分析物体受力时，不要把二力平衡与作用反作用混淆起来，前者是同一物体上的两个力的作用，后者是分别作用在两个物体上的两个力，它们的效果不能互相抵消。

(3) 力的平行四边形法则 此法则反映了同一物体上力的合成与分解的基本规则。作用在同一物体上的相交的两个力，可以合成为一个合力，合力的大小和方向由以这两个力的大小为边长所构成的平行四边形的对角线确定，即

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-1)$$

这个规则叫做力的平行四边形法则，如图 1-4 所示。

从力的平行四边形法则中不难看出，一般情况下，合力的大小不等于两个分力大小的代数和。它的大小可以大于分力，也可以小于分力，有时还可以等于零。

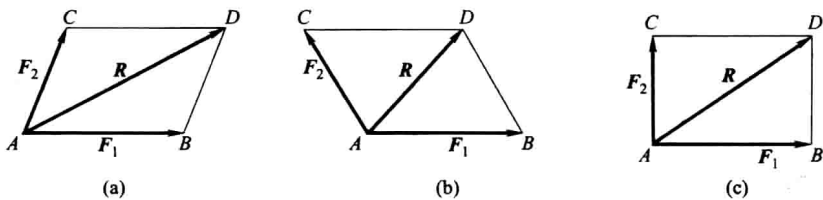


图 1-4 力的平行四边形法则

作用于同一物体上的若干个力叫做力系。力系中各个力的作用线汇交于一点叫做汇交力系。对于汇交力系求合力，平行四边形法则依然能够适用，只要依次两两合成就可以求得最后的合力 R 。现假设作用于某物体 A 点上有三个力 F_1 、 F_2 与 F_3 ，可以先求得 F_1 与 F_2 的合力 R_1 ，然后再将 R_1 与 F_3 合成为合力 R ，如图 1-5 所示。

力不但可以合成，根据实际问题的需要还可以把一个力分解为两个分力。分解的方法仍是应用力的平行四边形法则。例如搁置在斜面上的重物，它的重力 P 就可以分解为与斜面平行的下滑力 P_x 与垂直于斜面的正压力 P_y ，如图 1-6 所示。正是这个下滑力 P_x 使得物体有向下滑动的趋势。

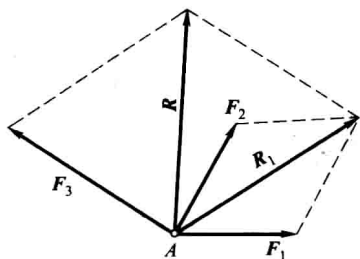


图 1-5 力的合成

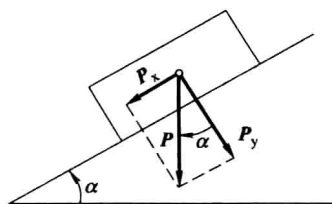


图 1-6 力的分解

对于多个力的合成，用矢量加法作图求解不太方便，如果应用力在直角坐标轴上投影的方法，将矢量运算转化为代数运算，则可较方便地求出合成的结果。下面介绍力在直角坐标轴上的投影，即解析法。

图 1-7 表示物体上 A 点受 F 力的作用， xOy 是任意选取的直角坐标系。设力 F 与 x 轴的正向夹角为 α 。由图可以看出，力 F 在 x 轴与 y 轴上的投影分别为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos\alpha \\ F_y &= F \sin\alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

力在 x 坐标轴上的投影等于力的大小乘以力与投影轴所夹锐角的余弦，如果投影的方向与坐标轴的正向相同，投影为正；反之为负。力的投影是代数量。显然，当 $\alpha=0^\circ$ 或 180° 时，力 F 与 x 轴平行，则力 F 在 x 轴上的投影 $F_x=F$ 或 $F_x=-F$ ；当 $\alpha=90^\circ$ 时，力 F 与 x 轴垂直， $F_x=0$ 。

设物体上某点 A 受两个力 F_1 、 F_2 作用，如图 1-8 所示。为了求它的合力，可以先分别求出它们在某一坐标轴上的投影，然后代数相加，就可以得到合力在坐标轴上的投影。

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \sum F_x = F_{1x} + F_{2x} = F_1 \cos\alpha_1 + F_2 \cos\alpha_2 \\ R_y &= \sum F_y = F_{1y} + F_{2y} = F_1 \sin\alpha_1 + F_2 \sin\alpha_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

合力在某一坐标轴上的投影等于所有分力在同一坐标轴上投影的代数和。这个规律称为合力的投影定理，对于多个力的合成仍然是适用的。有了合力在坐标轴上的投影，就不难求出力的大小和方向。