

机械设计

· 上册 ·

徐 灏 编著

东北工学院出版社

机 械 设 计

(上 册)

徐 灏 编著

东 北 工 学 院 出 版 社

内 容 简 介

本书从机器的整体出发,考虑结构、造型、工艺性、经济性、强度和摩擦学方面,来阐述机械设计的共性内容。在这基础上,再介绍各种零件和构件的设计原理和方法,而将现代设计中的内容,如动强度、润滑理论、新的设计观点和新技术等,贯穿到各种零件和结构件的设计中去,使本书具有鲜明的时代性。

本书分上、下两册出版,上册包括共性内容和部分基础件设计,如焊接结构、螺旋零件、带、链、齿轮和蜗杆传动。下册包括轮系、轴、轴承、密封、联轴器、离合器、制动器、弹簧、凸轮、飞轮和机架零件。

本书为工厂和设计院的机械设计人员编写,也可供高等院校机械系师生参考。

机 械 设 计

(上)

徐 灏 编著

*

东北工学院出版社出版

(沈阳 南湖)

辽宁省新华书店发行

沈阳七二二工厂印刷

*

787×1092毫米, 1/16 印张: 29 字数700千字

1987年3月第一版 1987年3月第一次印刷

印数: 1—5000册

统一书号: 15476·3 定价: 4.80元

ISBN 7-81006-000-7

TH·1

前 言

根据对机械产品提出的任务,应用当代各种先进的科学技术成果,求得一个在技术上尽可能完善、经济上合算、外观上满足美学要求,并能集中地反映先进生产力的研制机械产品的方案和手段称为机械设计,据此,机械设计要体现时代性和创造性。任何先进产品,只有通过设计才能变为现实,才能形成巨大的生产力。据统计,机械产品生产成本的75~80%是在设计阶段决定的,而制造和管理则是先进设计方案得以实现的保证。而且制造中的问题,一般具有局部性和偶然性,通常可以采取一定措施来加以补救,但如设计本身有问题,常是根本性的,将造成灾难性的失误。因此,机械行业要走自行设计的道路,掌握现代机械设计的理论和方法是十分重要的。

作者多年从事机械设计基础理论和基础件设计的研究和教学工作,深感这些基础性内容,是机械设计的精髓。从五十年代初期起就注意这方面资料的积累和整理。因时代在前进,知识不断更新,为了在当前四化建设中,贡献出自己的力量,我认为有必要把那些经得起时间考验的内容,特别是近十多年以来在工作和学术活动中形成的思想和积累的素材,整理成书。先从机器的整体出发,考虑结构、造型、工艺性、经济性、强度和摩擦学等方面,来阐述机械设计的共性内容。在这基础上,再介绍各种零件和结构件的设计原理和方法,而将现代设计中的内容,如动强度、润滑理论、新的设计观点和新技术等,贯穿到各种零件和结构件的设计中去,使本书具有鲜明的时代性。

本书的另一特点是理论联系实际,可能有些章节理论分析较多,其目的是使读者了解其设计原理,在这基础上给出设计方法。作者认为,这样处理可使读者既能掌握设计方法,又了解设计的道理,使设计建筑在可靠的理论基础之上。

本书脱稿后,请蔡春源同志担任主审工作,对全书进行了审核。王超和崔广椿同志参加了部分审稿,提出了很多宝贵意见。书中参考了中外文献书刊等资料以及厂矿的数据,在此一并致谢。

徐 灏

1985年



作者简介

徐 源 东北工学院教授、博士生导师, 1919年生, 江苏江阴人, 1943年毕业于西南联合大学机械系。建国后, 历任东北工学院机械系主任、机械工程研究所所长、中国机械设计与传动学会第一届副理事长、辽宁省机械设计学会第一、二届理事长、《机械设计》期刊第一届编委会主任委员、《中国大百科全书》机械工程基础编写组主编、国务院学位委员会第一、二届学科评议组成员、中国科学院技术科学部机械学科组成员。长期从事机械设计理论研究, 专长结构疲劳强度理论, 先后出版十余本著作。八十年代出版的专著有: 《安全系数和许用应力》、《疲劳强度设计》、《机械强度的可靠性设计》等。

目 录

(上册)

采用符号

前言

目录

第一章 绪 论

第一节	机械设计在机械工业中的地位	1
第二节	机械设计基础理论的发展史	4
第三节	机械设计方法	8
第四节	机械产品设计的价值工程	13
第五节	造型设计	27
第六节	安全设计	47
第七节	机械设计中的标准化、系列化和通用化	51

第二章 机械零件承载能力计算基础

第一节	载荷	55
第二节	强度理论	57
第三节	机械零件的静强度	63
第四节	机械零件的疲劳强度	65
第五节	机械零件的接触强度	76
第六节	机械振动	78
第七节	冲击	91
第八节	零件设计中的断裂力学分析	96
第九节	蠕变设计基础	99
第十节	可靠性设计	102
第十一节	压杆的计算	107
第十二节	防腐设计	111

第三章 机械设计中的摩擦、磨损和润滑基础

第一节	表面形貌	116
第二节	干摩擦	120
第三节	边界润滑	123
第四节	润滑材料	127
第五节	流体动压润滑	131
第六节	弹性流体动压润滑	138
第七节	流体静压润滑	146
第八节	磨损	148

第四章 机械零件常用材料的选择

第一节 金属材料的机械性能	160
第二节 机械零件的常用材料	164
第三节 材料的选用原则	170
第四节 代用材料	174

第五章 机械零件的设计工艺性

第一节 机械设计对工艺性的要求	176
第二节 铸件设计工艺性	179
第三节 锻件设计工艺性	182
第四节 热处理件设计工艺性	184
第五节 切削加工件设计工艺性	187
第六节 零部件的装配工艺性	192
第七节 零部件的维修工艺性	196

第六章 焊接件

第一节 焊接件中的金相变化和影响	199
第二节 焊接件的特点和设计工艺性	202
第三节 焊接结构中的应力集中	206
第四节 焊接接头的静强度计算	211
第五节 焊接件的无限寿命疲劳强度计算	217
第六节 焊接件的有限寿命疲劳强度计算	227
第七节 影响焊接件疲劳强度的因素	231
第八节 胶接	235

第七章 螺旋零件

第一节 螺纹	240
第二节 螺纹联接的类型和联接件	244
第三节 螺纹联接的拧紧	248
第四节 螺纹联接的防松	251
第五节 螺栓组联接的结构设计和受力分析	254
第六节 单个螺栓联接的强度计算	259
第七节 提高螺栓联接强度的措施	272
第八节 螺栓联接的高温松弛	275
第九节 普通螺旋传动	276
第十节 滚珠螺旋传动	282
第十一节 静压螺旋传动	290

第八章 带传动

第一节 带传动的类型	296
第二节 带传动的理论基础	299
第三节 三角胶带传动的设计	305
第四节 同步齿形带传动	313

第九章 链传动

第一节	传动链的结构	319
第二节	链传动的运动特性	322
第三节	链传动的失效形式和功率曲线图	324
第四节	链传动的设计计算	327
第五节	链轮和链传动的润滑	330
第十章 齿轮传动		
第一节	概述	334
第二节	渐开线啮合的基本概念	337
第三节	变位齿轮	341
第四节	直齿圆柱齿轮传动的几何计算	347
第五节	斜齿圆柱齿轮传动的几何计算	355
第六节	齿轮传动的失效形式和齿轮材料	359
第七节	直齿圆柱齿轮传动的强度计算	368
第八节	斜齿圆柱齿轮传动的强度计算	385
第九节	直齿圆锥齿轮传动	394
第十节	曲齿圆锥齿轮传动	404
第十一节	圆弧齿轮传动	418
第十二节	非圆齿轮传动	424
第十三节	齿轮结构	428
第十一章 蜗杆传动		
第一节	普通圆柱蜗杆传动的类型	433
第二节	普通圆柱蜗杆传动及其主要参数	435
第三节	蜗杆传动的载荷	440
第四节	蜗轮齿面的接触疲劳强度计算	441
第五节	蜗轮轮齿的弯曲疲劳强度计算	443
第六节	蜗杆传动的效率及发热计算	444
第七节	圆弧齿圆柱蜗杆传动	449
第八节	环面蜗杆传动	452

第一章 绪 论

第一节 机械设计在机械工业中的地位

一、机械的定义

要研究机械设计,首先应了解什么叫机械。给机械下定义,最早的见于《庄子》外篇天地第十二:“子贡南游于楚,反于晋,过汉阴,见一丈人,方将为圃畦。凿隧而入井,抱甕而出灌。搢搢然用力甚多而见功寡。子贡曰,有械于此,一日浸百畦,用力甚寡而见功多,夫子不欲乎?有圃者仰而视之曰:奈何?曰:凿木为机,后重前轻,挈水若抽,数如洸汤,其名曰橰。”就是说中国在公元前五世纪,子贡就给机械下一个定义:“能使人用力少而见功多的器械。”后来韩非子卷第十五:“舟车机械之利,用力少,致功大,则入多。”对机械定义的说法是相同的。

在欧洲最先给机械提出定义的是公元前一世纪意大利的一位建筑工程家维特鲁维斯(Vitruvius),他的定义是:“机械是由木材制造且具有相关联系的几部份所组成的一个系统,它具有强大的推动物体的力量。”到公元1724年德国的利奥波尔特(Leopold)把机械和工具合起来给了个定义:“机械或工具是一种人造的设备,用它来产生有利的运动,同时在不能用其它方法节省时间和力量的地方,它能作到节省。”在这个定义中提出了机械的目的和运动、时间和力量的概念。

中国机械学的先驱者刘仙洲教授在1937年给机械下了定义:“机械者,两个以上具有抵抗力的机件的组合体,动其一件,则其余各件除固定的机架以外,各发生一定的相对运动或限制运动,吾人得利用之使一种天然能力或机械能力发生一定之效果或工作者也。”

从以上这些机械的定义可以看出,什么是机械是不大容易回答的,在这里总结前人的工作,给机器下个定义:“机器是由两个或两个以上的作为单元体的抗力物体,通过活动联结,使其能互作预期的确定的相对运动和传递动力的一种组合体,其目的在于用来代替、扩大或发挥人力、畜力或自然能源的作用,完成有用的机械功”。简单的如螺旋千斤顶,复杂的如1700轧钢机等都是机器。由于机器的种类型号繁多,完成同一种工作的各种机器,或扩大到所有的各类机器,通称为机械。例如在矿山中工作的各种机器,称为矿山机械;炼铁厂中所用的机器称为炼铁机械,炼钢厂的称炼钢机械,二者统称为冶炼机械;轧钢厂的称轧钢机械,它与冶炼机械都属于冶金厂的机械设备,称为冶金机械。因此,机械是各种机器的通称,其范围可大可小。

机械的发明和发展,都是先由几种简单工具开始的。石器时代用石刀、石斧,只是为了能省力或便于用力,人直接用手做不到的工作,利用这些工具就能做到。后来发展到利用杠杆原理制作灌溉或扬水用的桔槔;利用滑轮原理制作重物提升用的辘轳等简单机械。这些机械所需的原动力是直接出自人的本身。为了要省力和扩大人力,开始时利用牲畜力,后来利用风力和火力。待到十八世纪六十年代英国人J·瓦特(James Watt)发明了蒸汽机,带来了蒸汽时代的技术革命,把工场手工业变成了大工业。蒸汽

机带动了纺织机、磨粉机、鼓风机和工作母机，促进了冶金、轮船和火车等工业的发展。到十九世纪六十年代，德国人西门子制成第一台直流发电机，到十九世纪八十年代，研制成功了交流发电机和交流电动机。工农业生产进入了电气化的时代。电气技术的应用，使机械工业的面貌发生了划时代的改变。向着半自动化和自动化的方向发展。

二、机械设计的内容

任何一个机械产品，都有它的寿命曲线，或者说，产品从研制、生产到最后被淘汰，都有一个兴旺和衰亡的过程。从产品的寿命曲线可以看出产品是否落后了，它的使用价值是否降低了，如果是这样，售价就要降低。到了一定的时期，就要停止生产，不然会因产品落后卖不出去而赔本。要想不赔本，就必须改革老产品或研制新机器。无论是改革老产品或是研制新机器，首先遇到的是机械设计问题。

机械设计是“根据对机械产品提出的任务，应用当代各种先进的技术成果，求得一个在技术上尽可能完善、经济上合算、外观上满足美学要求，并能集中反映先进生产力的研制机械产品的方案和手段”。因此，机械设计要体现时代性和创造性，或者说，一个好的机械产品，应该是技术性能指标高，经济效果好，造型美观大方。还应指出，设计问题与分析问题不同，其解不可能是唯一的。可以依其主要的目标寻求其最佳设计方案，而且由于知识的更新，理论的发展和主要目标的改变等，现在最佳设计方案也将会不断发展更新。

1. 技术性能指标高，包括以下内容：

(1) 能充分满足机械产品设计任务的要求。在任务中又可分为：固定要求，最低要求和尽可能考虑的愿望。例如有一项设计小轿车的任务，规定的固定要求有：座位数目，驱动前轮，驱动功率，当转速为 50秒^{-1} 时的最大转矩，换挡和制动的形式等。最低要求有：某一行驶时速下的最高耗油量，最小的行李箱空间，低温下安全启动的能力。希望考虑的项目有：要配合公路条件，上车舒适方便，噪声低，防锈性能好等。其中固定要求是各种设计方案都需满足的。而对于最低要求和希望考虑的项目越是很好地满足，则这一方案就越有价值。

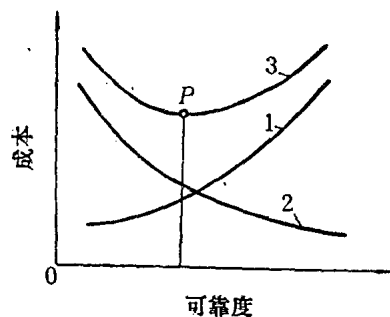
(2) 操作安全和舒适。有保障人身安全和设备安全的措施；起动和停车操作简便，操控部件的重量不能太重，操控部件布局合理；有良好的操作环境等。

(3) 产品的耐用性好。运动中不发生意外的停车或设备事故，易损件数目少且寿命长，大修周期长等。

(4) 易于维护。日常的设备清洁工作方便，零件更换方便，维修时期短。

2. 经济效果好，包括以下内容：

(1) 根据技术性能指标，确定合理的经济效益。图1-1表示机械产品的可靠度与设计制造费用、运行维修费用和总成本的关系曲线。设计制造费用虽然随可靠度的提高而增加，但维修费用则随可靠度的提高而降低。两种费用之和为总成本。只有降低总成本，才能获得较好的经济效益。总成本曲线有个极小点P。但在具体的机械设计中，对可靠度有一定的要求，因此，确定的设计点位置往往不在总成本的极小点上。



1—设计制造费用 2—运行维修费用
3—总成本

图1-1 机械产品的可靠度与成本的关系

(2) 研究降低成本提高经济效益的措施。研究各方面的措施,使图 1-1 所示的各条曲线有所改变,从而达到降低总成本的目的。分析设计、生产设备加工和装配的各个环节,挖掘现有技术和组织方面的潜力,从能够最大程度节省时间和费用之处着眼,研究改进措施。措施有:缩短任务完成的周期;采用过去已生产的零部件;研究机床-刀具-工件系统的相互协调,挖掘设备生产潜力;采用预装工艺,以缩短装配工序的周期;采用合理的生产组织形式等。此外,在设计上研究改变产品尺寸,以降低包装和运输费用;选用能提高经济效益的材料;研究产品的造型设计以扩大产品销售量。

3. 造型美观大方,包括以下内容:

(1) 式样符合时尚。机器的式样是随着生产的发展而改变的。例如,机床的外形设计,过去多用铸件。所以曾一度采用曲线线条,普遍用圆角及曲面结构,当时认为很美,后来机床多采用了焊接结构,改为方角和平面的外形结构,现在看起来比旧式机床更为美观大方,这是时代的不同对审美观点的改变。此外,美的观点,还随民族和地区不同而异。在研究机械造型时,必须考虑使用者对美的要求,即应研究市场心理学。

(2) 提高机械产品的表面质量和包装质量。

(3) 色彩调和悦目。

三、机械设计的重要性

在阐述机械设计的重要性之前,先研究一个现代的机械新产品研制过程(图1-2)。在设计任务书中,规定了固定要求,最低要求和尽可能考虑的愿望,除了从使用方面考虑的上述要求和愿望外,还应考虑制造方面的条件,如车间内使用的机床、刀具、夹具、采用的原材料、库存的半成品与标准件等,应有一个全面分析。

在分析的基础上,把总功能分成几个部分功能,以便逐项研究解决。对各个部分功能,逐项进行计算和试验,探索实现各个部分功能的方案,称为功能分析。在功能分析的基础上,对各个部分功能的方案加以综合,在实现总功能的前提下,选定合适的综合设计方案,称为功能综合。为综合设计原则作出设计原理方案,画出示意图。对各个设计原理方案进行技术经济评价,来确定这个设想的适用性和改进的可能性,同时从许多设计方案中,选出能满足设计任务要求的最优方案,进行决策。然后向前反馈,修改方案设计。

根据设计原理方案,按比例画出初步设计总图。对初步设计总图进行技术经济评价,找出薄弱环节,采取措施,消除薄弱环节,确定结构总体设计图,进行决策。然后向前反馈,修改前面的设计。

根据结构总体设计图进行施工设计。先进行零件设计并优化。绘出零件图,编出零件清单和说明书等各种技术文件。按设计进行样机试制并对样机进行测试。对各项费用进行成本核算。向前反馈改进设计,最后审批投产。

从图 1-2 所示的机械新产品的研制中,可以看出,设计的思想始终贯彻于新产品研制的整个过程。如把设计与制造分开来谈,设计周期比制造周期要长得得多。而且,大约有 75~80% 的生产费用是在设计阶段被确定下来的。如采用

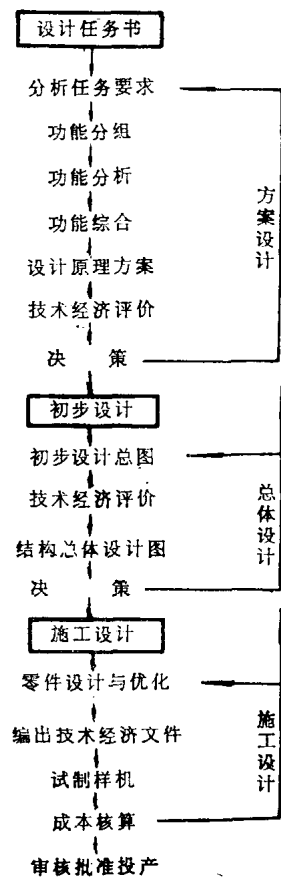


图 1-2 机械新产品研制流程图

已生产过的零件和标准件、选用材料、确定加工流程,以及技术经济指标是否先进等,在设计阶段已基本确定了,而工艺只是实现设计图所采用的保证措施。由此可见,机械设计是研制新产品的重要环节,在机械工业进行产品“更新换代”中占有突出的地位。

第二节 机械设计基础理论的发展史

机械设计基础理论,包括力学、强度、摩擦学、机械制图、机械原理、机械零件以及机械设计方法等有关内容。

人类从使用杠杆等简单机械发展到制造汽车、飞机等复杂机械,从无所谓机械设计发展到现代设计,经历了很多个发展阶段。机械设计基础理论是怎么发展起来的,那些杰出的科学家发明家起了什么作用等,这是每个机械设计工作者十分关心的问题。根据机械工程历史上的几个重大事件,将机械设计基础理论的发展,分成下面四个时代:从古代到1686年为“机械设计萌芽时代”;从1686年至1764年为“古典力学时代”;从1764年到1946年为“常规设计时代”;1946年至今为“现代设计时代”。

一、机械设计萌芽时代

中国关于船和车的记载,据说在公元前2600年就有了。以船为例,《易系辞》:“黄帝氏作,剡木为舟,剡木为楫”。即黄帝时已经有了独木船。《汉书》:“武帝作昆明池,欲伐昆明夷,教习水战,作豫章船,一艘载一千人”。即到公元前105年已能制作载一千人的船了。到公元1405年郑和下西洋,已能制作远洋船了。从独木船发展到远洋船,古书记载中没有给出设计方法,完全是能工巧匠,师付传徒弟,继承和发扬,凭经验制作出来的。在《古史考》上也有“黄帝作车”记载。车有车轮,车轮在地面上滚动,车的重要功用是当移动重物时,把重物对地面的滑动摩擦改为车轮对地面的滚动摩擦和车轴在轮毂孔内的滑动摩擦。结果大大节省了所需要的原动力。

机械制图历来有“工程师的语言”的美称,而设计思想最后必须落实到图面上。中国古籍上记载最早的机械图是《左传·宣公三年》,约公元前2000年载有“图物贡金,铸鼎象物”的说法。在公元十一世纪苏颂等的《新仪象法要》中,载有天文计时仪器的图样。这些只能说明中国在很早时期就有人设法用投影图形来描绘物体。要求相互配合的零件有互换性,虽然是机器大工业阶段的产物,但根据出土文物考证,中国早在公元前二世纪所制造的弩机中的铜销和销孔,铜俑头部与身躯的联结部分,便具有互换性。这是弩机和铜俑数量很多的必然结果。这种萌芽状态的制图与公差的采用,是与当时的机械设计制造的水平相适应的。其它如船的建造中提出了液体静压力,杠杆中提出了反作用力,这些在实践中提出的大量的力学问题,促使人们进行思考,进行各种力学问题的试验研究。

二、古典力学时代

中国从古代的桔槔、辘轳等简单机械,发展到水车、记里鼓车和天文仪器等较复杂的机械,提出了很多需要回答的问题。到十七世纪,欧洲的航海业、纺织业、磨坊和钟表制造的兴起,提出了很多力学上的新事实。在这种形势下,1644年,英国的十名科学家组成了进行实验和讨论理论问题的“哲学学院”。意大利成立了齐曼托实验学社。德国成立了实验研究会和柏林学会。1666年,法国成立了巴黎科学院。伽里略、虎克、牛顿、伯努利等著名科学家都是这些社团的成员。

古典力学是逐步发展起来的。十七世纪意大利人伽里略 (Galileo)(1564~1642) 用实验的方法, 发现落体定律、惯性定理和抛射体的飞行轨迹。他还进行过梁的弯曲实验。英国人I.牛顿 (Isaac Newton) 研究了开普勒在1609年发现的行星运动三定律, 并总结了前人的成就, 把天体力学和地球上的物体力学统一起来, 正确地反映了宏观世界低速运动的规律。他在1686年完成的《自然哲学的数学原理》, 是古典力学中有划时代意义的巨著。在流体力学中, 他在1668年首先提出了计算流体粘性阻力公式, 在轴承发展史上占有重要的地位。由于牛顿在古典力学中的重大贡献, 人们把宏观世界低速运动的力学体系称为牛顿力学。

此后, 其他一些著名科学家, 也在力学上作出了重要的发现。1678年英国人R. 虎克 (Robert Hook) (1635~1703) 用弹簧做实验, 建立了弹性体的应变在一定范围内与应力成正比的著名的虎克定律。1705年J. 伯努利 (J. Bernoulli) 提出了梁弯曲中的平面截面的假设, 并列出了梁轴弹性曲线的微分方程式。1717年伯努利第一次叙述了虚位移原理, 并由此导出虚功方法。十八世纪中叶, 瑞士人L. 欧拉 (Leonhard Euler) 用与现代有限单元法相似的方法计算过杆在轴力作用下的平衡问题。这些古典力学上的成就和其他科学技术的发展, 为十八世纪后期的产业革命尊定了基础。

三、常规的机械设计时代

1764年英国人J. 瓦特 (James Watt) 发明了蒸汽机, 以后经过改进, 于1784年取得了蒸汽机的专利。瓦特的蒸汽机首先在英国纺织、采矿、炼铁、面粉和啤酒业中作为动力。后来成为大工业普遍应用的动力机。蒸汽机的发明和应用, 推动了机械加工、轮船、铁路、冶金、纺织、化工和电工等工业的发展, 进入了产业革命时代。各个工业部门都需要机械设备来武装自己, 要求机械工业部门设计制造各种用途的机械, 对机械提出了多种要求, 促进了机械工程基础理论研究和机械零件制造工艺的发展。进入了以常规设计理论为基础的常规设计时代。

在机械强度的研究方面, 从提出虎克定律后, 1766年, J. L. 拉格郎日 (J. L. Lagrange) 在其著作《力学分析》中, 用达朗贝尔原理和虚位移原理引出了广义坐标和广义力的新概念。1776年, C. A. 库仑 (C. A. Coulomb) 提出了材料力学中所用的梁的弯曲理论, 并于1784年研究了圆轴的扭转问题。1807年, T. 扬 (T. Young) 确定了关于拉伸弹性模量的概念。这样, 到十九世纪初叶, 就奠定了材料力学的基础。

1814年, 英国人G. 斯蒂芬森 (George Stephenson) 试制了一台蒸汽机车, 它能拉30多吨货物。随着铁路的兴建, 需要计算桁架和连续梁的计算理论。1851年, J. W. 施韦尔德 (J. W. Schwelder) 第一个介绍从结构中分离出一段以确定其杆内力的概念。1864年, J. C. 马克斯威尔 (J. C. Maxwell) 取多余约束的多余未知力当作基本未知量, 提出了超静定结构的分析方法。十年后由O. 莫尔 (O. Mohr) 进一步论述, 这就是今天所谓的力法或柔度法。1927年苏联人A. A. 格沃兹捷夫 (A. A. Гвоздев) 将力法和位移法混合应用于同一钢架的计算, 创立了混合法。这些方法奠定了结构力学的基础。

由于材料力学只研究长度远大于宽度和厚度的构体, 结构力学是在材料力学的基础上研究杆状构件所组成的结构, 对于机械零件的实体结构及板和壳等, 必须发展弹性力学。1821年法国人L. M. H. 纳维叶 (L. M. H. Navier) 首先提出了弹性体的一般平衡方程式。1822年到1827年间, A. L. 柯西 (A. L. Cauchy) 建立了“物体内一点的应力状态”这个概念, 建立了应变与位移之间的微分关系, 并导出了弹性体

的运动和平衡方程式。稍后，G. 拉美 (G. Lamé) 利用应力和应变之间的线性关系和位移与应变之间的微分关系，用以求解位移，从而求得变形和应力。1833年 B. P. E. 克拉贝隆 (B. P. E. Clapeyron) 首先阐述了弹性结构变位时外力所作的功等于该结构中所储存的内应变能。1858年 L. F. 米纳布里雅 (L. F. Menabrea) 提出了最小功原理。1864年圣维南 (St. Venant) 导出了变形所应当满足的微分方程，即变形协调方程。这些研究，为弹性力学奠定了理论基础。在弹性力学解决工程问题上创造了条件。1850年 C. 克希霍夫 (C. Kirchhoff) 解决了薄板问题。1852年拉美解决了圆筒和空心圆球的问题。1854年圣维南解决了柱形杆扭转和弯曲问题。1862年 G. C. 艾雷 (G. C. Airy) 解决了平面应力问题。1874年 O. C. L. 瑞利 (O. C. L. Rayleigh) 提出并证明了反力的互等定理以及反力和位移的互等定理。1878年 J. 波希涅斯克 (J. Boussinesq) 解决了半无限大弹性体在边界上受力的问题。1882年 H. 赫芝 (H. Hertz) 解决了接触问题。1889年 F. 恩吉塞 (F. Engesser) 提出了余能的概念。由于很多工程实际问题的边界条件非常复杂，很难从弹性力学的微分方程组求得精确解答，为了工程计算的需要，又发展了近似计算方法。1908年 W. 李滋 (W. Ritz) 提出的能量法。1915年 B. Г. 伽辽金 (B. Г. Галёркин) 提出伽辽金法。1932年 H. 马库斯 (H. Marcus) 提出有限差分法。1943年 R. 库兰特 (R. Courant) 曾应用“单元”法则，假设翘曲函数在一个集合体的三角形单元中呈线性分布而得到了圣维南扭转问题的近似解。W. 普拉格 (W. Prager) 和 J. L. 辛格 (J. L. Synge) 等人也分别提出过类似的分片插值思想，但当时并未引起注意。这种思想，成为以后有限单元法的先声。

弹性力学方法虽然也发展了一些近似解法，但是对于像某些复杂形状的机械零件，也是无能为力的。由此发展了实验应力分析法。十九世纪中叶，德国 F. E. 纽曼 (F. E. Neumann) 和英国 C. 马克思韦耳 (C. Maxwell) 等人提出了光弹性的应力-光学定律。英国 W. 汤姆森 (W. Thomson) 发现了金属丝的应变引起它的电阻发生变化，其电阻率变化与应变之间有一定的函数关系。这些发现是现代光弹性和电阻应变计测量技术的基础。二十世纪初，英国 E. G. 柯克尔 (E. G. Coker)、L. N. G. 斐隆 (L. N. G. Filon) 和法国 A. 麦纳热 (A. Mesnager) 等人用光弹性模型实验，先后研究了车轮、齿轮、滚动轴承和桥梁等应力，揭开了现代实验应力分析的序幕。二十世纪三十年代，美国 M. M. 弗罗赫特 (M. M. Frocht)，德国 A. 柯斯克 (A. Kuske)，G. 阿佩尔 (G. Opel) 等人确立了光弹性应力冻结法，将光弹性从平面模型实验发展到立体模型实验。二十世纪五十年代，法国 F. 赞德曼 (F. Zandman) 完善了光弹性贴片法的实验分析技术，使光弹性从模型实验扩展到实物的测量。二十世纪三十年代后期，美国 F. 西蒙斯 (F. Simmons) 和 A. 鲁奇 (A. Ruge) 等人研制出粘贴式电阻应变计，加速了实验应力分析这门学科的发展。1943年，美国成立了实验应力分析学会 (SESA)，开展了多项学术活动，出版各种学术刊物，标志这门学科的建立。

在制图方面，1795年法国人 G. 蒙日 (Gaspard Monge) 发表了第一本工程投影原理著作《画法几何学》，书中论述了用二维的图纸，确切地表达三维空间的点、线、面、物体的投影方法和图解三维几何问题的方法，即多面正投影法，从而为画法几何和机械制图奠定了理论基础。中国介绍西方机械制图最早的一本书，是1871年徐建寅等所译英国人著作《器像显真》。1884年，法国的道侃 (Docagne) 发明了诺漠图 (nomograph)，

它是由一组根据数学原理将一方程各变量之间的函数关系绘制成的，又名计算图。从蒙日以后，各国学者陆续在投影变换、轴测图、透视图以及其它方面不断提出新的理论和方法，在机械制图上创造了各种规定画法和符号，使画法几何和机械制图日趋完善。

公差与配合是使机械工业能广泛组织专业化生产和协作，实现互换生产的一个基本条件。机械制造由初期的单件生产发展到成批生产，大量生产；零件的加工由效率很低的选择装配方式发展到高效率的“互换性”生产，导致了标准量规和极限量规的出现。这样，对零件精度就有了一个合理的要求。在十九世纪后期极限量规的出现，互换性生产便由军工扩大到一般机械制造业，要求在企业内部制订统一的公差与配合标准。1902年英国伦敦的纽沃尔（Newall）公司，编辑出版了纽沃尔标准：“极限表”，这是最早的公差制。作为国家标准，最早的是1906年发表的英国标准BS27，这是初期的公差制，只有基孔制，配合数很少，比较简单。二十世纪二十年代，德国标准DIN总结了初期公差制，同时规定了基孔制和基轴制，但优先采用基孔制，明确提出公差单位概念，以及精度与配合的标准化。1929年苏联参考了DIN制后，颁布了一个公差与配合方案，成为以后苏联公差制OCT和ГOCT的基础。这些旧的公差制，虽然比初期公差制优点多，但在公差制的概念与规律上还存在着混乱，而且DIN制在德国并未普遍采用，在德国优先采用的是后来的国际公差ISA制。ISA公差制由国际标准化协会第三技术委员会负责制订，秘书国为德国。ISA制1~180mm的提案于1932年公布，后来尺寸范围扩大到500mm，1935年以草案形式公布，1940年正式公布。第二次世界大战后，国际标准化组织重建，改名ISO，秘书国为法国，在ISA制的基础上重新制订ISO制，并从1962年陆续公布ISO公差制。

机械工业的发展，促使人们研究机械系统的动态问题。从1673年C. 惠更斯（C. Huygens）首先提出物理摆后，在1914年以前，人们关心的机械振动问题主要集中在避免共振上。因此，研究的重点是机械结构的固有频率和振型的确定。1921年H. 霍尔哲（H. Holzer）提出解决轴系扭转振动问题的方法。到二十世纪三十年代，机械振动的研究开始由线性系统发展到非线性系统。机械振动的结果，必然产生机械疲劳破坏，由此发展了常规疲劳设计。

综上所述，从产业革命到电子计算机出现这段一百多年时期中，在机械设计所需的基础理论方面，完成了理论力学与材料力学的内容。弹性力学只能解一些简单的特殊的工程问题，能解几个自由度的规则的振动，能进行几种零件（例如轴、齿轮）的常规疲劳强度设计。中国在二十世纪五十年代的机械设计，基本上属于这种类型的设计。到六十年代初期，中国机械工业的九大产品中，应用了实验应力分析方法，包括三相光弹，有机玻璃模型、金属模型和实物电阻应变计测量技术等，保证了设计质量。中国的常规设计时代比世界先进国家晚了二十年。

四、现代设计时代

从第二次世界大战起，由于新工艺、新材料及其在新环境中的大量使用，工程结构的低应力脆断事故频频发生。1938~1942年欧洲计有40座焊接铁桥均未见异常而突然折断倒塌。1942~1948年美国焊接的“自由轮”和油船发生了一千多次低应力脆断事故。1950年美国“北极星”导弹的固体燃料发动机壳体发生意外爆炸。1954~1956年美国有多起大型电站转子发生断裂事故和压力容器爆炸。由于事故大量和持续地发生，引

起了人们的重视，想起了二十世纪二十年代初，英国A.格里菲斯(A.A.Griffith)在研究玻璃的实际强度为什么比理论强度低几千倍的结论，是由于玻璃内部存在宏观裂纹的缘故。1957年美国G.R.欧文(G.R.Irwin)研究了裂纹尖端附近的线弹性力学应力分布关系式，提出一个新的力学参量——应力强度因子 K ，当应力强度因子达到材料的某个临界值时，裂纹将失稳扩展。材料的这个临界值叫做材料的断裂韧性 K_{Ic} ，为材料的一种性能。

1946年世界上第一台电子数字计算机在美国诞生。经历了电子管、半导体、集成电路和大型集成电路的发展，电子计算机已广泛应用于各个领域，对机械设计引起了划时代的变革，进入了现代设计的时代。1941年A·雷尼柯夫(A.Hrenikoff)，D.麦克亨利(D.Mc Henry)和1943年R.库兰特(R.Courant)曾分别提出了有限单元法的基本思想，但当时缺乏计算工具，电子计算机出现后，首先用矩阵分析方法分析杆系结构的是B.蓝格福(B.Langefors)。1956年M.J.特纳(M.J.Turner)和R.W.克拉夫(R.W.Clough)等人，首先把结构分成有限个三角形和矩形单元，对飞机结构进行分析。有限单元法这一名称，是克拉夫于1960年引用的。由于在机械设计中应用了有限单元法，使过去对几何形状复杂的零部件不能进行应力分析成为可能。到二十世纪七十年代，有限单元法的发展达到了高潮，能够解决航空、土建、机械等许多工业部门构件的分析问题，由线性问题发展到非线性，由静力问题发展到瞬态响应、模态分析等动力问题，由结构问题发展到非结构问题，并出现了一批大规模高效的通用程序。电子计算机的应用，出现了计算机绘图。二十世纪五十年代后期，美国制成第一台计算机控制的台式自动绘图机，和卷筒式自动绘图机。这种把电子计算机的数字输出变成图形输出的自动绘图机，得到了迅速的发展，二十世纪七十年代出现了超高速、高精密的平面自动绘图机。计算机绘图与结构分析相结合，引起了机械设计方面革命性的变化。

由于电子计算机的出现和日益广泛应用，在机械设计方法上也有了很大的发展。主要的现代设计有疲劳强度设计、优化设计、可靠性设计和计算机辅助设计等。

第三节 机械设计方法

一、机械设计方法的发展

1. 类比设计

类比设计是从现有类似产品为蓝本，新产品是按老产品进行比例放大。类比设计沿用的时间很长，在二十世纪三十年代出版过一本经验设计(Empirical Design)的书，讲的就是类比设计方法。

2. 简化设计

机械零件的结构是很复杂的，为了便于计算，常将它简化成一维受力构件，如将轴简化成梁，可以用材料力学公式求解。将动压液体润滑滑动轴承的设计，简化为核验轴颈投影面积的单位压力 p 值；发热设计简化为核验 pv 值。对于机架等复杂结构，采取加大尺寸的办法，不再进行计算。这种设计称为简化设计，是半经验性的设计方法，目前在一般机械设计中还广泛应用。

3. 静态设计

确定作用于机器上的额定载荷，用实验应力分析法或有限元法得到在该额定载荷下

受力件中的应力分布,用静强度判据和相应的安全系数进行静强度验算。最突出的例子是我国六十年代初期第一机械工业部的九大产品中,将光弹法和电阻应变计测量技术等实验应力分析法用来确定受力件的应力分布,并进行静强度验算,保证了九大产品的设计质量。

4. 现代设计

现代设计是在电子计算机、材料科学、计算力学和摩擦学等发展的基础上发展起来的。其特点,可归结为下列诸方面:

(1) 从静态设计到动态设计

万吨水压机或五吨桥式起重机,如以万吨或五吨作为额定载荷,将载荷以静态处理,仅在安全系数的取值上考虑载荷的性质的设计称为静强度设计。如果考虑到载荷变化,循环载荷作用下的疲劳破坏,以及在动载下可能产生的冲击和振动,这种设计则称为动强度设计。由于动强度设计更接近机器的实际工况,符合失效类型,所以重要的机械设备,都逐渐改用动强度设计。

典型的动强度设计的步骤如下:

实测机械运行中的典型工况载荷谱,用计算或试验进行整机或运动系统的动态分析;用有限元法或实验应力分析法得出机器的重要零部件的应力分布;根据应力分布的不均匀性改进结构得到较合理的应力分布;确定危险点及危险点在典型工况下的应力谱;作零件的疲劳寿命估算;确定该机器的大修周期,大修中更换的零件表和预估机器的寿命。

(2) 从单项设计指标到综合设计指标

一个好的机械设计要从技术性能指标、经济效果和造型设计多方面来考虑。在技术性能指标中,强度指标仅仅是一个方面,需要考虑综合设计指标。例如,齿轮传动的设计中,一般是从啮合、强度和工艺来考虑。而近年来由于摩擦学的发展,提出了弹性流体动压润滑理论在齿轮传动中的应用。齿轮传动设计中考虑润滑将得到巨大的经济效益,是今后重要的研究方向之一。

(3) 从常规设计到精确设计

常规设计中采用的安全系数,将设计中遇到的不确定因素都包括在内,安全系数的取值在很大程度上取决于设计者的经验,所以常规设计是带有半经验性的。假使考虑到载荷和强度的变化规律,在此基础上发展起来的可靠性设计,能用概率统计理论求得所设计的机器的可靠度,这是精确的设计。可靠性设计是现代设计的重要组成部分。

(4) 从手算设计到广泛应用计算机的设计

从资料检索、应用计算机通用程序和专用程序,到优化设计、计算机辅助设计,计算机在设计中的应用越来越广,应用计算机成为现代设计的一个重要指标。其中优化设计和计算机辅助设计随着计算机的广泛应用而蓬勃地发展起来。

二、优化设计

在优化设计方面,1904年A.G.M.米歇尔(A.G.M. Michell)第一次发表了结构优化设计文章。1956年G.杰勒德(G. Gerard)发表了结构各部分同时破坏假定下的结构优化的文章,成为后来“满应力设计法”的基础。1969年J.泰勒(J. Taylor)和1971年W.普拉格(W. Prager)等发表了以最佳准则概念作为选取最小体积结构的结构优化文章。1965年F.I.尼奥德森(F.I. Niordson)处理了一个简支梁当给定总重