

第 1 篇 基础理论篇



机械设计基础是工科大学的一门重要的技术基础课。本篇在简要介绍关于整台机器设计的基本知识的基础上,重点介绍常用机构(连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等)、机械传动(齿轮传动、蜗杆传动、带传动、链传动、螺旋传动等)、连接(螺纹连接、键连接、花键连接、销连接等)、轴系零部件(滑动轴承、滚动轴承、轴、联轴器和离合器等)的工作原理、结构特点、基本设计理论和计算方法,以及有关技术资料的应用。

本篇内容可为学生学习机械专业课程提供必要的理论基础,通过本篇内容的学习,学生可以具有一定的机械设计能力,具体包括以下几个方面:

(1) 使学生掌握常用机构和通用零件的工作原理和结构特点,使其具有设计机械传动装置和简单机械的能力;

(2) 具有运用标准、手册、规范、图册和查阅有关技术资料的能力;

(3) 了解典型机械的实验方法,受到实验技术的基本训练。

学习这些内容需要综合应用很多先修课程的知识,如工程制图、金属工艺学、工程力学等,而且本课程涉及很多工程应用,因此,在学习时应重视理论联系实际,注意学习分析和解决问题的方法,能灵活运用本课程所学的知识解决一些简单机械和机构的设计问题。

绪 论

1.1 机械的组成

机械是机器和机构的总称。对机器来说,我们主要研究机器做功或能量转换及其运转的过程;当利用机构来做功或转化能量时,机构也就成了机器。

人类为了满足生产和生活的需要,设计和制造了种类繁多、功能各异的机器。机器是执行机械运动的装置,用来变换或传递能量、物料、信息,实现功能转换,如内燃机、电动机、洗衣机、机床、汽车、起重机等。各种机器的用途、性能、构造、工作原理都不尽相同,但是,一台完整的机器通常由以下三个基本部分组成。



MOOC

(1) 原动部分:是驱动整部机器完成预定功能的动力源,其功能是将其他形式的能量变换为机械能(如内燃机和电动机分别将热能和电能变换为机械能)。

(2) 工作部分(也称执行部分):是用来完成机器预定功能的组成部分,其功能是利用机械能去变换或传递能量、物料、信息,如发电机把机械能变换成电能,轧钢机变换物料的外形等。

(3) 传动部分:介于原动部分和工作部分之间,其功能是把原动机的运动形式、运动和动力参数转变为工作部分所需的运动形式、运动和动力参数,如把旋转运动变为直线运动,高转速变为低转速等。

为了使机器以上三个基本部分协调工作,并准确、可靠地完成整体功能,还会不同程度地增加其他部分,如控制部分和辅助部分。

机器的传动部分大多数使用机械传动系统,也可使用液压或电力传动系统。

机器的基本组成要素就是机械零件。机械零件可分为两大类:一类是在各种机器中经常能用到的零件,称为通用零件,如齿轮、带轮、链轮、螺栓、螺母等;另一类则是在特定类型的机器中才能用到的零件,称为专用零件,如曲轴、叶片、枪栓等。另外,还把由一组实现同一功能的零件组合体称为部件,如滚动轴承、联轴器、离合器等。

任何机器都是由许多零件组合而成,在这些零件中,有的零件是作为一个独立的运动单元体而运动的;有的则根据结构和工艺上的要求,把一些零件刚性地连接在一起作为一个整体而运动,例如图 1.1 所示的内燃机的连杆由连杆体、螺栓、螺母和连杆盖 4 个零件刚性地连接在一起作为一个整体而运动,成为机器中独立运动的单元,通常称为构件。构件与零件的区别在于:构件是运动单元,而零件是制造单元。

从运动的观点来研究机器,机器由机构组成,机构由若干构件组成,各构件之间具有确定的相对运动。一部机器可以包含一个机构(如电动机),也可以包含几个机构。如图 1.2 所示的单缸四冲程内燃机包含了 3 个机构:①曲柄滑块机构由曲轴 2、连杆 3、活塞 4 组成;②凸轮机构由进气阀及排气阀 5 和 6、从动杆 7、凸轮 8 组成;③齿轮机构由齿轮 9 和 9'、齿轮 10 组成。

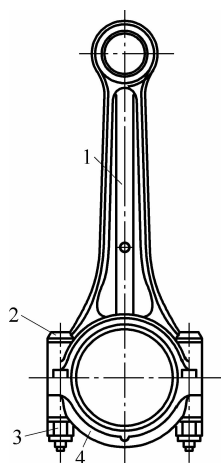


图 1.1 内燃机的连杆

1—连杆体; 2—螺栓; 3—螺母; 4—连杆盖

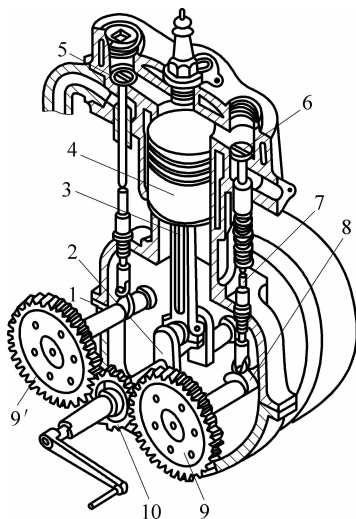


图 1.2 单缸内燃机

1—机罩; 2—曲轴; 3—连杆; 4—活塞; 5、6—进、排气阀;
7—从动杆; 8—凸轮; 9、9'、10—齿轮

1.2 机械零件常用材料及其选用

机械零件常用的材料是钢和铸铁,其次是有色金属。非金属材料如塑料、橡胶等,也可作机械零件的材料。

1.2.1 机械零件常用材料

1. 金属材料

金属材料主要指铸铁和钢,都是铁碳合金材料。铁和钢的区别主要在于含碳量的不同:含碳量(指质量分数,下同)小于 2% 的铁碳合金称为钢;含碳量大于 2% 的铁碳合金称为铁。

1) 钢

钢的强度较高,塑性较好,可通过轧制、锻造、冲压、焊接和铸造方法加工各种机械零件,并且可以用热处理和表面处理方法提高机械性能,因此其应用极为广泛。

钢的类型很多,按用途可分为结构钢、工具钢和特殊用途钢。结构钢可用于加工机械零



MOOC

件和各种工程结构；工具钢可用于制造各种刀具、模具等；特殊用途钢（不锈钢、耐热钢、耐腐蚀钢）主要用于特殊的工况条件。按化学成分可分为碳素钢和合金钢。碳素钢的性能主要取决于含碳量，含碳量越多，其强度越高，但塑性越低。碳素钢包括普通碳素结构钢和优质碳素结构钢。

普通碳素结构钢（如 Q215、Q235）一般只保证机械强度而不保证化学成分，不宜进行热处理，通常用于不太重要的零件和机械结构中。低碳钢的含碳量低于 0.25%，其强度极限和屈服极限较低，塑性很高，可焊性好，通常用于制作螺钉、螺母、垫圈和焊接件等零件。含碳量为 0.1%~0.2% 的低碳钢零件可通过渗碳淬火使其表面硬而芯部韧，一般用于制造齿轮、链轮等要求表面耐磨而且耐冲击的零件。中碳钢的含碳量为 0.3%~0.5%，其综合力学性能较好，因此可用于制造受力较大的螺栓、螺母、键、齿轮和轴等零件。含碳量为 0.55%~0.7% 的高碳钢具有高的强度和刚性，通常用于制作普通的板弹簧、螺旋弹簧和钢丝绳。

合金结构钢是在碳钢中加入某些合金元素冶炼而成。每一种合金元素低于 2% 或合金元素总量低于 5% 的称为低合金钢；每一种合金元素含量为 2%~5% 或合金元素总含量为 5%~10% 的称为中合金钢；每一种合金元素含量高于 5% 或合金元素总含量高于 10% 的称为高合金钢。加入不同的合金元素可改变钢的机械性能并使其具有各种特殊性质，如铬能提高钢的硬度，并在高温时防锈耐酸；镍使钢具有良好的淬透性和耐磨性。但合金钢零件一般都需经过热处理才能提高其机械性能，此外合金钢较碳素钢价格高，对应力集中亦较敏感，因此只有当碳素钢难以胜任工作时才考虑采用。

用碳素钢和合金钢浇铸而成的铸件称为铸钢，通常用于制造结构复杂、体积较大的零件，但铸钢的液态流动性比铸铁差，且其收缩率比铸铁件大，故铸钢的壁厚常大于 10 mm，其圆角和不同壁厚的过渡部分应比铸铁件大。

2) 铸铁

常用的铸铁有灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁、合金铸铁等。其中灰铸铁和球墨铸铁属脆性材料，不能碾压和锻造，不易焊接，但具有适当的易熔性和良好的液态流动性，因而可铸成形状复杂的零件。灰铸铁的抗压强度高，耐磨性、减振性好，对应力集中的敏感性小，价格便宜，但其抗拉强度与钢相比较差。灰铸铁常用作机架或机座。球墨铸铁的强度较灰铸铁高且具有一定的塑性，可代替铸钢和锻钢用来制造曲轴、凸轮轴、阀体等。

3) 有色金属

除钢铁以外的金属材料均称为有色金属。有色金属具有良好的减摩性、耐腐蚀性、抗磁性、导电性等性能，在工业中应用最广的是铜合金、轴承合金和铝合金，但有色金属比黑色金属价格贵。

2. 非金属材料

非金属材料是现代工业和高技术领域中不可缺少和占有重要地位的材料，它包括除金属材料以外几乎所有的材料。机械制造中应用的非金属材料种类很多，有塑料、橡胶、陶瓷、木料、毛毡、皮革、棉丝等。

1) 橡胶

橡胶富有弹性，有较好的缓冲、减振、耐热、绝缘等性能，常用来制作联轴器和减振器的

弹性装置、橡胶带及绝缘零件等。

2) 塑料

塑料是合成高分子材料工业中生产最早、发展最快、应用最广的材料。塑料密度小,易制成形状复杂的零件,而且各种不同塑料具有不同的特点,如耐蚀性、减摩耐磨性、绝热性、抗振性等。常用塑料包括聚氯乙烯、聚烯烃、聚苯乙烯、酚醛和氨基塑料等。工程塑料包括聚甲醛、聚四氟乙烯、聚酰胺、聚碳酸酯、ABS、尼龙、MC 尼龙、氯化聚醚等。目前某些齿轮、蜗轮、滚动轴承的保持架和滑动轴承的轴承衬就是使用塑料制造的。一般工程塑料耐热性能较差,而且易老化使性能逐渐变差。

3) 陶瓷

陶瓷材料具有高的熔点,在高温下有较好的化学稳定性,适宜用作高温材料。一般超耐热合金使用的温度界限为 $950\sim 1100^{\circ}\text{C}$,而陶瓷材料的使用温度界限为 $1200\sim 1600^{\circ}\text{C}$,因此现代机械装置特别是高温机械部分,使用陶瓷材料将是一个重要的研究方向。此外,高硬度的陶瓷材料,具有摩擦因数小、耐磨、耐化学腐蚀、密度小、线膨胀系数小等特性,因此可应用于高温、中温、低温领域及精密加工的机械零件,也可以做电机零件。以机械装置为代表使用的陶瓷材料叫工程陶瓷。

4) 复合材料

复合材料是将两种或两种以上不同性质的材料通过不同的工艺方法人工合成多相的复合材料,其既可以保持组成材料各自原有的一些最佳特性,又可具有组合后的新特性,这样就可根据零件对于材料性能的要求进行材料配方的优化组合。复合材料主要由增强材料和基体材料组成。还有一类是加入各种短纤维等的功能复合材料,如导电性塑料、光导纤维、绝缘材料等。近年来从材料的功能复合目的出发,应用于光、热、电、阻尼、润滑、生物等方面的复合材料不断问世,复合材料的应用范围正得到不断扩大。

1.2.2 机械零件材料的选用原则

从各种各样的材料中选择出合用的材料是一项受到多方面因素制约的工作,通常应考虑下面的原则。

1. 载荷的大小和性质,应力的大小、性质及其分布状况

承受拉伸载荷为主的零件宜选用钢材,承受压缩载荷的零件应选铸铁。脆性材料原则上只适用于制造承受静载荷的零件,承受冲击载荷时应选择塑性材料。

2. 零件的工作条件

在腐蚀介质中工作的零件应选用耐腐蚀材料;在高温下工作的零件应选耐热材料;在湿热环境下工作的零件应选防锈能力好的材料,如不锈钢、铜合金等。零件在工作中有可能发生磨损之处,应提高其表面硬度,以增强耐磨性,要选择适于进行表面处理的淬火钢、渗碳钢及氮化钢。金属材料的性能可通过热处理和表面强化(如喷丸、滚压等)来提高和改善,因此要充分利用热处理和表面处理的手段来发挥材料的潜力。

3. 零件的尺寸及质量

零件尺寸的大小及质量的好坏与材料的品种及毛坯制取方法有关,对外形复杂、尺寸较大的零件,若考虑用铸造毛坯,则应选用适合铸造的材料;若考虑用焊接毛坯,则应选用焊接性能较好的材料;尺寸小、外形简单、批量大的零件,适宜冲压和模锻,所选材料应具有较好的塑性。

4. 经济性

选择零件材料时,如用价格低的材料能满足使用要求,就不应该选择价格高的材料,这对于大批量制造的零件尤为重要。此外还应考虑加工成本及维修费用。为了简化供应和储存的材料品种,对于小批制造的零件,应尽可能减少同一部设备上使用材料的品种和规格,使综合经济效益最高。

1.3 机械零件的失效形式及设计准则

机械零件在预定的时间内和规定的条件下,不能完成正常的功能,称为失效。机械零件的失效形式主要有整体断裂、过大的残余变形、零件的表面破坏(磨损、腐蚀和接触疲劳)等。磨损、腐蚀和疲劳是引起零件失效的主要原因。



MOOC

机械零件的失效形式与许多因素有关,具体取决于该零件的工作条件、材质、受载情况及其所产生的应力性质等多种因素。即使是同一种零件,由于材质及工作情况不同,也可能出现各种不同的失效形式。例如,轴在工作时,由于受载情况不同,可能出现断裂、过大的塑性变形、磨损等失效形式。

为了使机械零件能在预定的时间内和规定的条件下正常工作,设计机械零件时应满足下面的设计准则。

1. 强度

强度是保证零件正常工作的基本要求,零件中的应力不得超过允许的强度。对于断裂来讲,应力不得超过材料的强度极限;对于残余变形来讲,应力不得超过材料的屈服极限;对于疲劳破坏来讲,应力不得超过零件的疲劳极限。为了使零件具有足够的强度,设计时必须满足下面的强度设计准则:

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1.1)$$

或

$$\tau \leq [\tau] \quad (1.2)$$

式中, σ 、 τ 分别为零件工作时的正应力和切应力; $[\sigma]$ 和 $[\tau]$ 分别为零件材料的许用正应力和许用切应力。

为了提高机械零件的强度,设计时可采取下列措施:①用强度高的材料;②使零件具有足够的截面尺寸;③合理设计机械零件的截面形状,以增大截面的惯性矩;④采用各种

热处理和化学处理方法来提高材料的机械强度特性；⑤合理进行结构设计，以降低作用于零件上的载荷等。

2. 刚度

刚度是指零件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力。若零件刚度不够，将产生过大的挠度或转角而影响机器正常工作，例如，若车床主轴的弹性变形过大，会影响加工精度。为了使零件具有足够的刚度，设计时必须满足下面的设计准则：

$$y \leq [y] \quad (1.3)$$

$$\theta \leq [\theta] \quad (1.4)$$

$$\varphi \leq [\varphi] \quad (1.5)$$

式中， y 、 θ 和 φ 分别为零件工作时的挠度、偏转角和扭转角； $[y]$ 、 $[\theta]$ 和 $[\varphi]$ 分别为零件的许用挠度、许用偏转角和许用扭转角。

3. 寿命

机械零件应有足够的寿命。影响零件寿命的主要因素有腐蚀、磨损和疲劳。至今还没有提出实用且有效的有关腐蚀寿命的计算方法，因而也无法列出腐蚀寿命的计算准则。关于磨损的计算方法，目前也没有简单、可靠的定量计算方法，因而只能采用条件性的计算。至于疲劳寿命，通常是求出使用寿命时的疲劳极限或额定载荷作为计算的依据。

4. 可靠性

满足强度和刚度要求的一批相同的零件，由于零件的工作应力是随机变量，故在规定的工作条件下和规定的使用期限内，并非所有的零件都能完成规定的功能，零件在规定的工作条件下和规定的使用时间内完成预定功能的概率称为该零件的可靠度。可靠度是衡量零件工作可靠性的一个特征量，不同零件的可靠度要求是不同的。设计时应根据具体零件的重要程度选择适当的可靠度。

1.4 机械设计的基本要求及程序

1.4.1 机械设计的基本要求

虽然不同的机械其功能和外形都不相同，但设计的基本要求大体是相同的。机械应满足的基本要求可以归纳为以下几个方面。

1. 功能要求

满足机器预定的工作要求，如机器工作部分的运动形式、速度、运动精度和平稳性、需要传递的功率，以及某些使用上的特殊要求（如高温、防潮等）。

2. 安全可靠性要求

（1）使机器和零件在规定的载荷作用下和规定的工作时间内，能正常工作而不发生断

裂、过度变形、过度磨损,不丧失稳定性。

(2) 能实现对操作人员的防护,保证人身安全和身体健康。

(3) 对于机器的周围环境和人不会造成危害和污染,同时要保证机器对环境的适应性。

3. 经济性要求

在产品整个设计周期中,必须把产品设计、销售及制造三方面作为一个系统工程来考虑,用价值工程理论指导产品设计,正确使用材料,采用合理的结构尺寸和工艺,以降低产品的成本。设计机械系统和零部件时,应尽可能使零件标准化、通用化、系列化,以提高设计质量、降低制造成本。

4. 其他要求

应使机器外形美观,便于操作和维修。此外,还必须考虑有些机器由于工作环境和要求不同,而对设计提出某些特殊要求,如食品卫生条件、耐腐蚀、高精度要求等。

1.4.2 机械设计的一般程序

机械设计就是建立满足机器功能要求的技术系统的创造过程。机械设计的一般过程是:明确任务→调查研究→可行性论证→总体设计→技术设计→样机试制→修改图纸及工艺→批量正式生产。

1. 明确设计任务

产品设计是一项为实现预定目标而进行的活动,因此正确地决定设计目标(任务)是设计成功的基础。明确设计任务包括定出技术系统的总体目标和各项具体的技术要求,这是设计、优化、评价、决策的依据。

明确设计任务包括分析所设计机械系统的用途、功能,各种技术经济性能指标和参数范围,预期的成本范围等,并对同类或相近产品的技术经济指标、同类产品的不完善性、用户的意见和要求、目前的技术水平以及发展趋势认真进行调查研究、收集材料,以进一步明确设计任务。

2. 总体设计

机械系统总体设计根据机器要求进行功能设计研究。总体设计包括确定工作部分的运动和阻力,选择原动机的种类和功率,选择传动系统、机械系统的运动和动力计算,确定各级传动比和每根轴的转速、转矩和功率。总体设计时要考虑到机械的操作、维修、安装、外廓尺寸等要求,确定机械系统各主要部件之间的相对位置关系及相对运动关系,人-机-环境之间的合理关系。总体设计对机械系统的制造和使用都有很大的影响,为此,常需做出几个方案加以分析、比较,通过优化求解得出最佳方案。

3. 技术设计

技术设计又称结构设计。其任务是根据总体设计的要求,确定机械系统各零部件的材料、形状、数量、空间相互位置、尺寸、加工和装配,并进行必要的强度、刚度、可靠性设计,若

有几种方案时,需进行评价决策,最后选择最优方案。技术设计时还要考虑加工条件、现有材料、各种标准零部件、相近机器的通用件等。技术设计是保证质量、提高可靠性、降低成本的重要工作。技术设计的目标是产生总装配图、部件装配图、零件的工作图、编制设计说明书等。技术设计是从定性到定量、从抽象到具体、从粗略到详细的设计过程。

4. 样机试制

样机试制阶段是通过样机制造、样机试验,检查机械系统的功能及整机与零部件的强度、刚度、运转精度、振动稳定性、噪声等方面的性能,随时检查及修正设计图纸,以更好地满足设计要求。

5. 批量正式生产

批量正式生产阶段是根据样机试验、使用、测试、鉴定所暴露的问题,进一步修正设计,以保证完成系统功能,同时验证各工艺的正确性,以提高生产率、降低成本,提高经济效益。

机械设计是“设计—评价—再设计”的不断创优过程,设计过程中应注意以下几点。

(1) 设计过程要有全局观点,不能只考虑设计对象本身的问题,而要把设计对象看作一个系统,处理人-机-环境之间的关系。

(2) 善于运用创造性思维和方法,注意考虑多方案解,避免解答的局限性。

(3) 设计的各阶段应有明确的目标,注意各阶段的评价和优选,以求出既满足功能要求又有最大实现可能的方案。

(4) 要注意反馈及必要的工作循环。解决问题要由抽象到具体,由局部到全面,由不确定到确定。

1.5 机械传动系统的传动方案设计

通常机器原动部分(原动机)的输出转速、转矩以及运动形式不能直接满足执行部分(工作机)的要求,因此需要在它们之间采用机械传动装置。由于传动装置的选用、布局及其设计质量对整个机器的工作性能、质量和成本等影响很大,因此合理地拟定机械传动系统方案具有重要的意义。

机械传动系统的设计是一项比较复杂的工作。在机械传动系统设计之前必须首先确定好机械系统传动方案。为了能设计出较好的传动方案,需要在对各种传动形式的性能、工作特点和适用场合等进行深入、全面了解的基础上,多借鉴、参考前人成功设计的案例。

机械传动系统设计的内容为:确定传动方案,选定电动机型号,计算总传动比和合理分配各级传动比,计算各传动装置的运动和动力参数。



MOOC

1.5.1 传动方案的确定

为了满足同一工作机的性能要求,可采用不同的传动机构、不同的组合和布局。在总传