

## 绪 论

## 1.1 机械设计科学的发展及其在现代化建设中的作用

## 1.1.1 机械设计科学在实践、创新中不断发展

常用的机械样式繁多、层出不穷。人们在各种机械的差异中寻找共同点,为新机械的诞生寻求设计原理和方法,一直没有停止脚步。例如,“带有减速功能机械”的设计就存在一个不断涌现并逐步发展、优化的过程,直至出现减速器的标准化、系列化产品。最早出现的是图 1-1~图 1-3 所示的单级或串联传动形式,之后发展成为可实现传动转向、各种分流传动的形式(见图 1-4~图 1-9)。

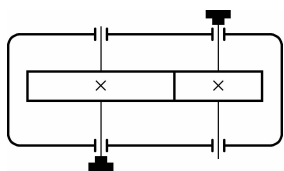


图 1-1 单级圆柱齿轮型

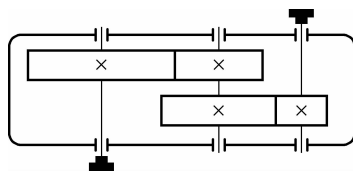


图 1-2 展开式双级圆柱齿轮型

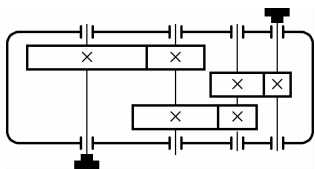


图 1-3 三级圆柱齿轮型

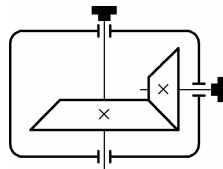


图 1-4 圆锥齿轮型

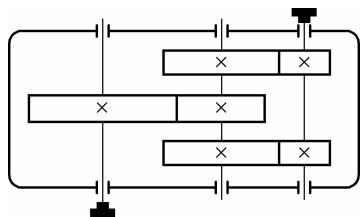


图 1-5 分流式双级圆柱齿轮型

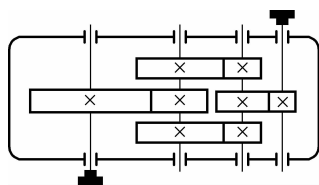


图 1-6 分流式三级圆柱齿轮型

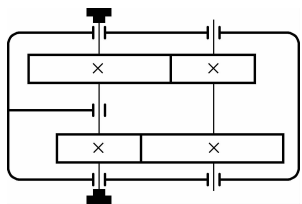


图 1-7 同轴双级圆柱齿轮型

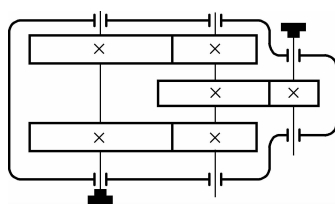


图 1-8 分流双级圆柱齿轮型

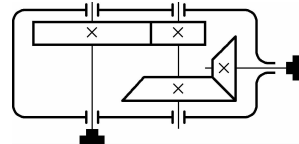


图 1-9 圆锥-圆柱齿轮型

由于生产的发展,简单的“减速装置”并不能满足不断增长的生产需要,随着加工制造水平的提高,各类新的装置、机构不断出现,构成了各种减速装置的新品种,如蜗杆减速装置(见图 1-10),这种结构具有结构紧凑、传动比大、工作平稳、噪声较小等特点,具有特定的用途。

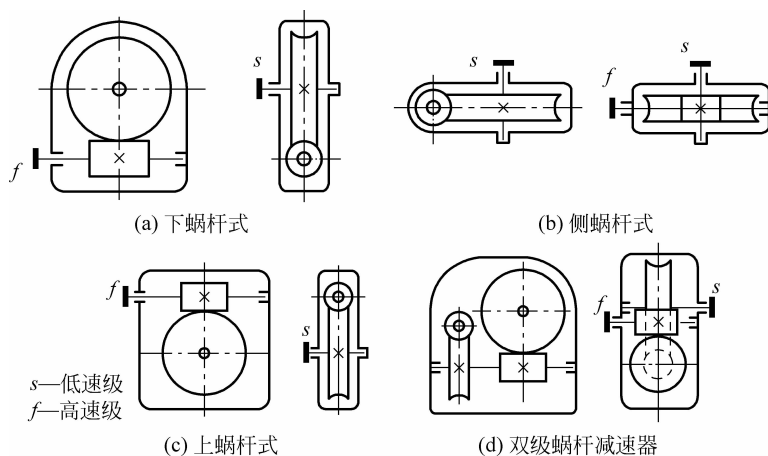


图 1-10 蜗杆减速装置

进一步将蜗杆、齿轮传动结合起来,形成如图 1-11 所示的蜗杆-齿轮减速装置。

上述“减速”功能可以实现传动比的特定变化和传动方向的特定改变,但是单一的减速功能难以解决“任意变速”问题。变速器作为一种能随时改变传动比的传动机构就在实际制作中被研发、完善出来,不仅出现了系统的、可靠的有级变速器,即传动按既定的设计要求通过操纵机构分级进行变速(见图 1-12),而且出现了无级变速器,即传动比在设计预定的范围内无级地进行改变(见图 1-13)。

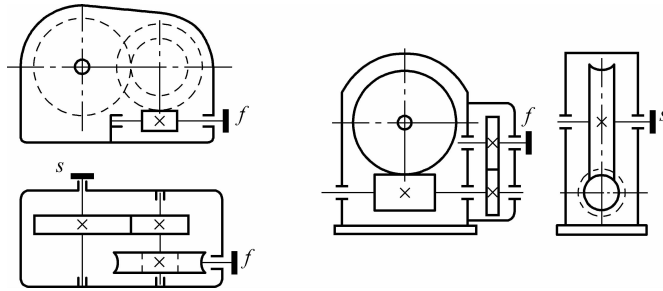


图 1-11 蜗杆-齿轮减速装置

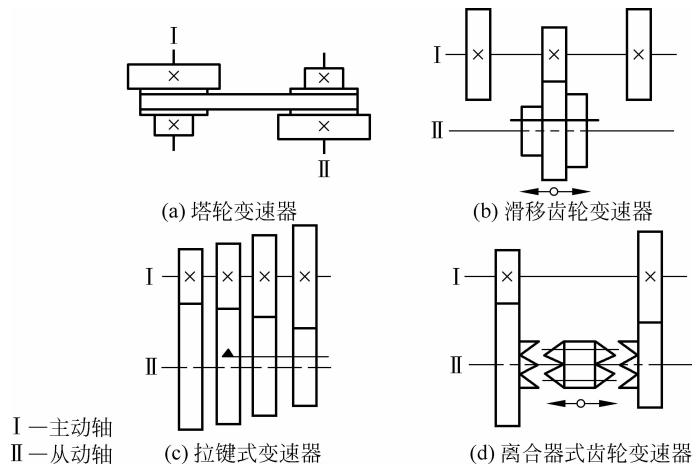


图 1-12 有级变速器

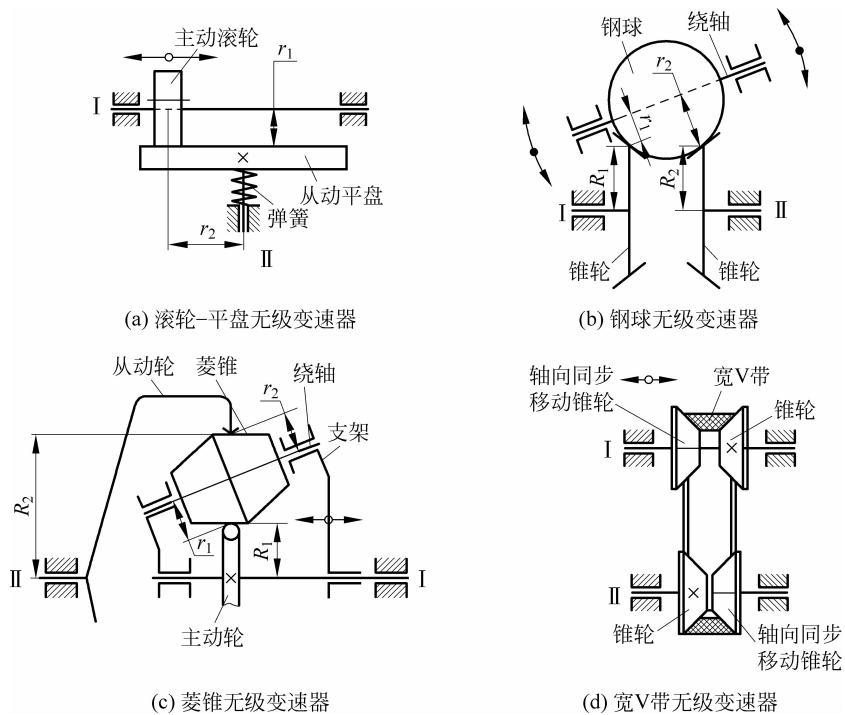


图 1-13 无级变速器

在图 1-13 中,传动的实时改变是依靠摩擦副的位置改变,这种摩擦轮传动的主要失效形式是接触疲劳、过度磨损或打滑。这就对摩擦轮材料有一定的要求,如接触疲劳强度高、耐磨性好、有长的工作寿命,且弹性模量大并减小弹性滑动和功率损耗,在传动中要求摩擦系数大,以便在满足所需要摩擦力的前提下,降低压紧力。这些都要求机构的详细结构等有不断的优化、改进,但是结构的改进是一个漫长而又较为复杂的过程,不仅涉及支承设计、装配关系、零件加工工艺等,在做结构分析优化时需要绘制清晰的多种方案来对比分析。

工业生产的应用,推动功能的不断开发和设计方法的改进,使得一些简单机械通过组合、综合,实现重要装备的功能,直接用于工业生产或农业现代化。如减速装置在大型工程机械中的应用,图 1-14 为拖动机件的减速装置。这种机械在港口、矿山、建筑、制造业等领域发挥了重要的作用。

图 1-15 为重物提升装置。该装置的动力源为电动机 1,通过传动带 2 和齿轮减速器 3,驱动提升卷筒 4 旋转,进而提升重物。

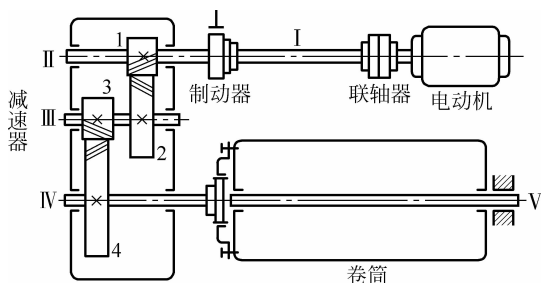


图 1-14 拖动机件的减速装置

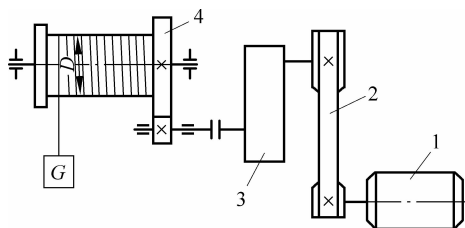


图 1-15 重物提升装置

### 1.1.2 发展历程

人类社会发展的历史是一部不断创新和创造的历史,机械科学在实践中不断发展,经历了长久的发展历程。

燧人氏发明“钻木取火”,使人类摆脱了茹毛饮血的原始人生活,从此吃上烧熟烤香的食物。钻木取火的装置实际上就是一种简单的机械。

五千年前我国已开始使用简单的纺织机械;晋朝时在连机椎和水碾中应用了凸轮原理;西汉时应用轮系传动原理制成了指南车和记里鼓车;东汉张衡发明的候风地动仪是世界上第一台地震仪。目前许多机械中仍在采用的青铜轴瓦和金属人字圆柱齿轮,在我国东汉年代的文物中都可以找到它们的原始形态。汉代记里鼓车,它的工作原理包含一套减速齿轮组,齿轮组连着车轮。

原始或较简单的机械工具发展经历了漫长而缓慢的发展期,既出现了滚子、撬棒、轮车等日用工具,也有成就了金字塔等伟大奇迹的斜面、滑轮的发明。原始机械的特点是基于经验获得的务实性发明,且多为简单辅助工具,系统的设计方法和理论尚未出现。

直到公元前 600 年,古希腊和古罗马诞生了一批著名的哲学家和科学家,如学者希罗著书阐明关于杠杆、滑轮、轮与轴、螺纹等推动重物的机械的结构和作用,机械相关的理论探索开始出现,相关的著述也被认为是已知最早的机械理论书籍。

公元前后中国的铸、锻、冶技术领先于世界,代表性的曾侯乙编钟、青铜秦剑等皆出现于

此时期；其后指南车、水转大纺车、浑天仪等机械也相继出现。

欧洲的车床于公元前5世纪出现。之后，机械在注重逻辑思维与实证主义的欧洲发展更为迅速，如帕斯卡基本定律的发现、齿轮啮合基本定律的提出等。此时机械的特点是利用自然能源作为动力实现基本的动力和运动功能，并开始对机械的工作原理、设计方法进行系统的研究。

近现代机械是以蒸汽机和纺纱机的发明与改良为标志的。18世纪末，织布机、缝纫机、蒸汽船、水压机、造纸机、蒸汽机车不断出现和改进，加工机床中的龙门刨床、卧式铣床、滚齿机等为现代工业的飞速发展打下了坚实基础。机械相关理论如画法几何、傅里叶定律、摩擦理论等相继提出，创立了机械学科的基本体系。至1875年，德国等国的学者逐步建立构件、运动副、运动链和机构运动简图等概念，奠定了机构学的基础。19世纪末20世纪初，现代机械已建立起完善的学科分支和理论体系。

现代机械设计与制造，广泛使用代数学、力学、几何学、拓扑学、生物学、材料学、电气与电子学等，结合计算机技术，逐步实现自动化、信息化、智能化的设计、制造、控制系统的集成。现代机械设计理论与方法不断得到发展，并将进一步拓展、更新、完善。

### 1.1.3 机械工业及其设计理论在现代化建设中的作用

机械工业在现代化建设中起着重要的关键作用，主要体现在：机械工业肩负着为国民经济各个部门提供装备和促进技术改造的重任，机械工业生产水平和设计手段现代化是国家现代化水平的主要标志之一，高速发展的科技依赖机械工业的推动。

机械设计与机械工业的作用表现在：

(1) “信息化、智能化装备必须联接机械系统完成具体动作”。

(2) 机械设计是根据使用要求对机械的工作原理、结构、运动方式、力和能量的传递系统、各个零件的材料和形状尺寸、润滑方法进行构思、分析和计算并将之转化为具体的描述，以作为制造依据的创造性工作过程。研究机械设计过程、理论方法及实现手段等对工业、农业、国防、科技各个领域的理论探索及实践均具有重要意义。

(3) 机械设计是科学技术转化为生产力的过程。现代技术主要通过设计的途径在机电产品中得到体现。“设计的新机器成为代替人们体力和部分脑力劳动的工具，能够大大提高劳动生产率和改善劳动条件”。

(4) 机械设计是联接需求到满足需求这一链条上的最基本环节。

(5) 机电产品的质量、性能和成本，在很大程度上是由设计阶段的工作决定的（设计的技术意义）。设计实现产品标准化、系列化和通用化，能加速实现我国生产活动的高度机械化、电气化和自动化。

(6) 设计水平与工业发展水平是相互影响的。创新设计先进的机器，可大大加速现代化建设的进程。

(7) 机械设计过程在本质上是一个创新过程。创新设计综合实践能力，是尖端人才培养的“灵魂、动力”。

## 1.2 机器、机构、零件要素

### 1.2.1 机器

机器是人类进行生产以减轻体力劳动和提高劳动效率的主要工具,也是完成人类难以承担的各种复杂和危险劳动的重要工具。机器是一个较为复杂、完整的机械系统。

一个机械系统一般包含机械结构系统、驱动动力系统、检测与控制系统。机器在现代社会中的应用随处可见,如起重机、汽车、车床、洗衣机、电动机、内燃机等。

如图 1-16 所示,工业机器人的组成有:(1)示教板,用于输入控制命令或控制程序;(2)控制系统,用于控制操作各关节内伺服电机的运动;(3)操作机,在控制系统的控制下,实现各种复杂运动。每个关节内有电动机和减速器。

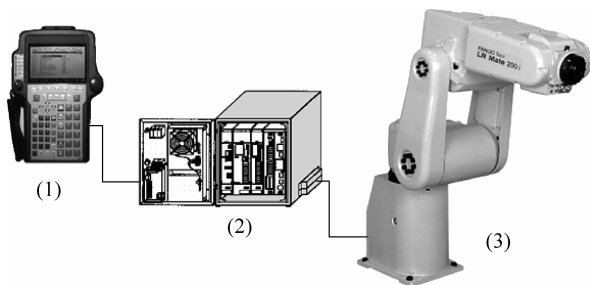


图 1-16 工业机器人的组成

同样,自动洗衣机组成有:(1)动力系统,包括动力源、电动机;(2)机械结构,包括传动系统(带传动、齿轮传动)、盛水桶、脱水桶、箱体、支承;(3)测控系统,包括机械控制、电控、水位传感器、布量传感器、水况传感器等。图 1-17 为自动洗衣机桶体及传动系统简图。

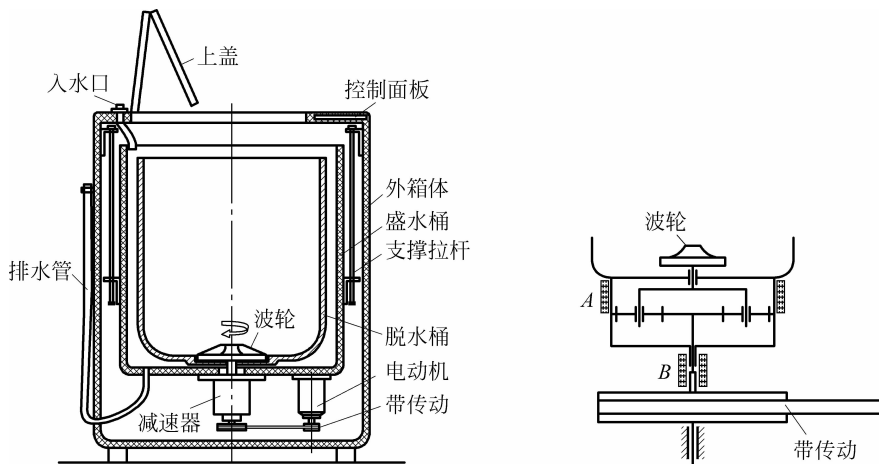


图 1-17 自动洗衣机桶体及传动系统

现代机械系统是一个典型的“机、电、控、计算机、检测与反馈控制”的一体化系统。随着科学技术发展,机械概念得到进一步扩展,某些情况下,机件不再是刚体,加入柔性构件,气体、液体等也可参与实现预期的机械运动。利用光电、电磁物理效应,实现能量传递或运动

转换或实现动作的一类机构,应用也十分广泛。例如,采用继电器机构实现电路的闭合与断开;电话机采用磁开关机构,提起受话器时,接通线路进行通话,当受话器放到原位时断路。机器内部包含了大量的控制系统和信息处理、传递系统。机器不仅能代替人的体力劳动,还可代替人的脑力劳动。除了工业生产中广泛使用的工业机器人,还有应用在航空航天、水下作业、清洁、医疗以及家庭服务等领域的服务型机器人。

虽然一台现代化的机器包含有机械、电器、液压、气动、润滑、控制、监测等系统的部分或全部,但是其主体仍然是机械系统,这些机械系统都由一个或一些机构组成,而机构是由相应的零件组成,所以机器的基本组成要素就是机器的零件。

## 1.2.2 机构

### 1. 机构的内涵

一个实用机构定义是:按预定形式传递运动的构件组合系统。一个机构如果是缓慢加载并在低速下运行,则可以严格地把它看作是一个运动装置,这就是说,对它只需要进行运动学分析。另一方面,机器(和高速运行中的机构)必须首先被看作是机构,进行速度和加速度的运动学分析,然后确定作用在机器上的静力和由加速度产生的动态力。因此,机构设计需要结合机械动力学分析与动态控制。

解决任何机器设计问题的一项首要任务是确定运动过程及图示表达,描画机构组成、运动循环图,以保证机器能达到所要求的运动。力和应力分析一般在运动学问题未解决之前是不可能进行的。典型的机构,诸如连杆机构、凸轮机构和齿轮机构这类运动装置的设计,其运动学的应用实例很多,但是还有待于进一步研究和开发。任何一种机器其实都含有一个或多个运动构件,如连杆、凸轮、齿轮、传动带、链等。自行车是运动装置的一个最简单的例子,它通过链条传动将转矩放大,并采用钢索操纵的连杆机构用于制动(见图 1-18)。



图 1-18 自行车结构

车辆中包含很多运动装置的例子,如操纵系统、车轮悬挂系统和活塞发动机都含有连杆机构。发动机的阀门是靠凸轮开启的,变速箱装有许多齿轮,挡风玻璃的雨刷是由连杆机构传动的。用于控制现代车辆颠簸行驶时的后轮悬挂装置也是一种空间连杆机构。

离合器的操纵方法有机械的、电磁的、气压的和液压的等数种,多数离合器(包括嵌合式离合器)采用机械操纵机构,最简单的就是由杠杆、拨叉和滑环所组成的杠杆操纵机构。图 1-19(a)、(b)分别为单圆锥式、双圆锥式摩擦离合器的构造简图。图中主动轴 1 与具有内锥面的飞轮 2 相互固接,从动轴 3 则与具有外圆锥面的鼓轮 4 用花键相连接。在双圆锥摩擦离合器中,有两个内鼓轮。在弹簧 5 的作用下,飞轮的内锥面与鼓轮的外圆锥面经常处于结合状态。当踩下踏板 6 时,两个圆锥面分离,离合器就处于分离状态。

如图 1-20 所示,单缸四冲程内燃机是由一系列机构组成的,包括汽缸体 1、活塞 2、连杆 3 和曲轴 4 组成的连杆机构;汽缸体 1、凸轮 7 和气阀杆 8 组成的凸轮机构;汽缸体 1、齿轮 5、6 组成的齿轮机构。有些机器还可能用到其他类型的机构,如间歇运动机构、万向联轴

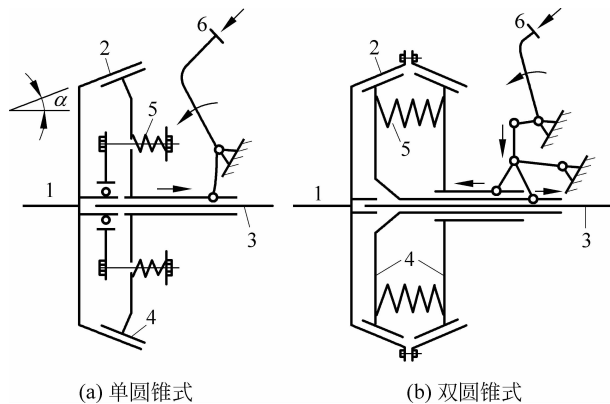


图 1-19 圆锥摩擦离合器

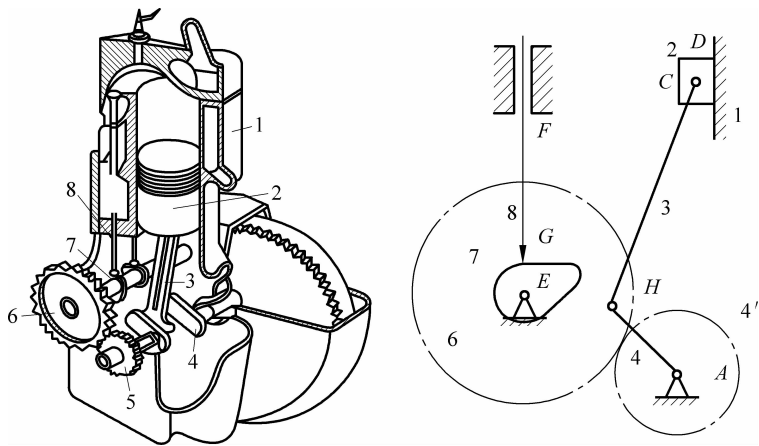


图 1-20 内燃机

节、螺旋机构,以及各种形式的组合机构等。

## 2. 执行机构基本组成要素的选择

把机械的整个工艺过程所需的动作或功能分解成一系列简单动作或功能,并确定完成这些简单动作所需的执行构件数目和各执行构件的运动规律,然后根据各简单动作或功能的要求,依据现有各种机构的运动特性或动作功能进行搜索、选择、比较,选出合适的执行机构,这一过程称为执行机构的选型设计,又称为机构的选型综合。执行机构选型设计的好坏将直接影响到机械系统的工作质量、使用效果和结构的繁简度,是机械系统运动方案设计中举足轻重的一环,也是一项极具创造性的工作。执行机构选型设计需要按照如下原则:

(1) 满足机械系统的性能需求。包括运动性能、动力性能、结构工艺性能需求,这是执行机构形式设计时首先要考虑的最基本因素。

常用原动件的输出运动形式主要有两种:连续转动与往复移动,这两种运动形式可以通过不同机构转换为其他各种运动。常见运动变换及所对应的机构实例如下。

- 连续转动→往复直线运动:曲柄滑块机构、正弦机构、移动导杆机构、齿轮齿条机构、凸轮机构、螺旋机构;

- 连续转动→间歇往复直线移动：凸轮机构、不完全齿轮齿条机构、六杆机构；
- 连续转动→往复摆动：曲柄摇杆机构、摆动导杆机构、曲柄摇块机构、凸轮机构；
- 连续转动→间歇往复摆动：凸轮机构、六杆机构、特殊形式的连杆机构；
- 连续转动→连续转动：双曲柄机构、齿轮机构、蜗杆机构；
- 连续转动→间歇转动：槽轮机构、不完全齿轮机构、凸轮式间歇机构；
- 连续转动→预定轨迹：平面连杆机构、组合机构。

(2) 尽量简化和缩短运动链,选择较简单的机构。机械系统的构件数和运动副数需要满足一定的关系,如自由度计算公式。在给定了所设计机构的自由度的前提下,构件数和运动副数的多种组合都可以满足这个公式,这就为选择和设计机构留下了比较大的选择余地。但是,虚约束可在特定的几何条件或结构条件下出现,如这些条件不满足,则虚约束将变为有效约束,使机构不能运动。在机械设计中,虚约束的引入都是有一定目的的,是因某种需要而增加的。这时,必须严格保证设计、加工、装配精度,以满足虚约束所必需的特定条件。机构自由度的计算要十分慎重。以图 1-21 的大筛机构为例说明。

滚子 8 为局部自由度。E 和 E' 为两构件组成导路平行的两个移动副,其中之一为虚约束。弹簧 9 对运动不起限制作用,可以略去不计。复合铰链 C 包含两个转动副。将局部自由度消去,虚约束 E' 除去,弹簧 9 拆除后,得到图 1-22 大筛机构的自由度计算公式。

$$F = 3(n - 1) - 2P_L - P_H = 3 \times 7 - 2 \times 9 - 1 = 2$$

式中  $F$ ——平面机构的自由度;  $n$ ——该机构的总构件数(包含机架);  $P_L$ ——该机构的低副数;  $P_H$ ——该机构的高副数。

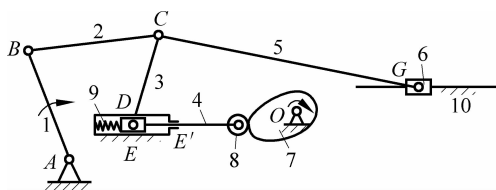


图 1-21 大筛机构

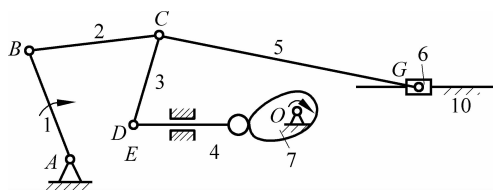


图 1-22 大筛机构的自由度计算

该机构需有两个原动件,如图所示将构件 1 和 7 作为原动件,此时机构有确定运动。

表 1-1 为两零件的连接形式和相对自由度。

表 1-1 两零件的连接形式和相对自由度

序号	连接形式简图	连接情况	零件 1 自由度简图	简单说明
1		一点连接		零件 1 与零件 2 在一点相切,零件 1 有 $2+0.5$ 个移动自由度, 3 个转动自由度

续表

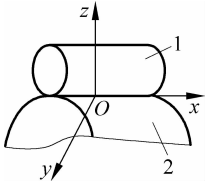
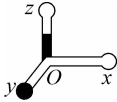
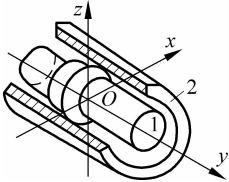
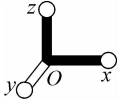
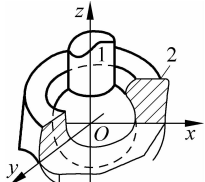
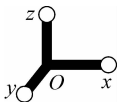
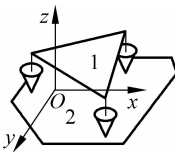
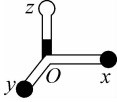
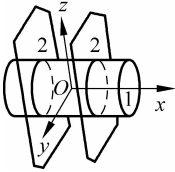
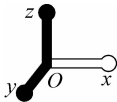
序号	连接形式简图	连接情况	零件 1 自由度简图	简单说明
2		线连接		零件 1 与零件 2 沿一条直线接触,零件 1 有 $2+0.5$ 个移动自由度,2 个转动自由度
3		环形线连接		零件 1 与零件 2 沿一个环形线接触,零件 1 有 1 个移动自由度,3 个转动自由度
4		球窝连接		零件 1 与零件 2 有一个球形表面连接,零件 1 有 3 个转动自由度
5		三点支承连接		零件 1 与零件 2 有 3 个点接触,零件 1 有 $2+0.5$ 个移动自由度,1 个转动自由度
6		双面连接		零件 1 与零件 2 有 2 个环形线相接触,零件 1 有 1 个移动自由度,1 个转动自由度

图 1-23 为轴的自由度分析。

(3) 尽量减小机构的尺寸。在满足机械系统性能需求的前提下,机械结构要紧凑、尺寸小、重量轻。而不同的选型,整体结构的形式是有很大差别的。同时,要选择合适的运动副形式,运动副在机械传递运动和动力的过程中起着重要作用,它直接影响到机械的结构形式、传动效率、寿命和灵敏度等。

(4) 要使执行系统具有良好的传力条件和动力特性。在进行选型设计时,应注意选用