

精密机械设计总论

1.1 精密机械在现代科学技术中的地位

精密机械是现代科学技术的基础,是仪器仪表工业的一个重要支柱。随着生产和科学技术的不断发展,精密机械的应用范围越来越广泛。国防、工业、农业、科技等国民经济部门乃至人们的日常生活都离不开它。特别是 20 世纪 80 年代以后,由于微电子技术、信息科学、能源科学、材料科学、海洋工程、生物工程、宇航工业和智能机器人等新的科学技术的兴起,对机械的精度、质量和可靠性等提出了愈来愈高的要求,精密机械作为机械领域的一个分支被突现出来。

现代精密仪器属于技术高度密集型的产品,集自动化、智能化、机械于一体,是机电一体化技术发展最为迅速的领域。精密机械是精密仪器的重要组成部分,事实上它已不再是纯机械类的精密机械元件或零部件的组装,而是精密机械技术、电子技术(包括计算机控制技术)和检测技术(包括光电检测)的结合体,也就是通常所说的机、电、光相结合。

20 世纪 80 年代,日本提出了“精密工程”,前联邦德国提出了“精密技术”的概念,有些国家还设立了“微细技术”专业。这都表明,为了适应现代科学技术发展的需要,对于从事精密机械领域工作的工程技术人员,不仅要具备精密机械技术方面的知识,而且还要掌握电子技术和其他领域的技术,并把这些技术结合起来。现代精密机械技术已经成为多学科的综合技术,只有这样才能推动现代科学技术的进步。例如,目前微电子技术已由大规模向超大规模发展,而且随着集成度的不断提高,图形线条的宽度也越来越细,其性能每过 18 个月提高 1 倍,其加工图形的特征尺寸每 3 年更新一代,体积不断地缩小。目前在深亚微米超精细微加工工艺的支持下,硅片上制作 CMOS 的图形特征尺寸已达到 $0.18\sim 0.13\mu\text{m}$,正逼近 100nm 的水平,并向 100nm 以下发展,今后的目标是 35nm。制造这样的微细线条,必须要有整套高精度的微细加工和精密测试设备。这些设备的数量,一般要占整个生产线上设备总数的 1/3 以上。集成电路超精细微加工包括光刻、刻蚀、氧

化、扩散、掺杂、溅射、CMP 等工艺,涉及近百道工序,工艺复杂,设备精度要求极高。其中实现超微图形成像的光刻技术一直是推动 IC 工艺技术水平发展的关键。这些精密设备把激光定位技术、计算机控制技术和精密机械技术结合起来,组成一个精密机械系统,其中满足上述要求的精密机械技术是基础。

我国精密机械的发展速度很快,但与国际先进水平相比,还存在着不小的差距。由于精密机械的零部件是精密机械的基础,因此在很大程度上零部件的水平决定着整机的水平,零部件的质量决定着整机的质量。为了振兴我国的仪器仪表工业,赶超世界先进水平,首先要打好基础,要把精密机械的研究与应用迅速搞上去,这是学好本课程的最终目的。

1.2 精密机械设计的研究对象、性质和特点

1.2.1 研究对象

图 1-1 所示为用于光盘母盘刻制的刻录机系统。该系统由光学系统、精密机械和机电驱动控制 3 部分组成,包括:激光器光盘刻录光学系统;周向气浮主轴旋转及精密机械工作台以保证刻写光学头的定位、微进给;闭环伺服驱动系统、光栅检测定位系统以及总体控制系统。图 1-2 概括说明了刻录机系统的原理。

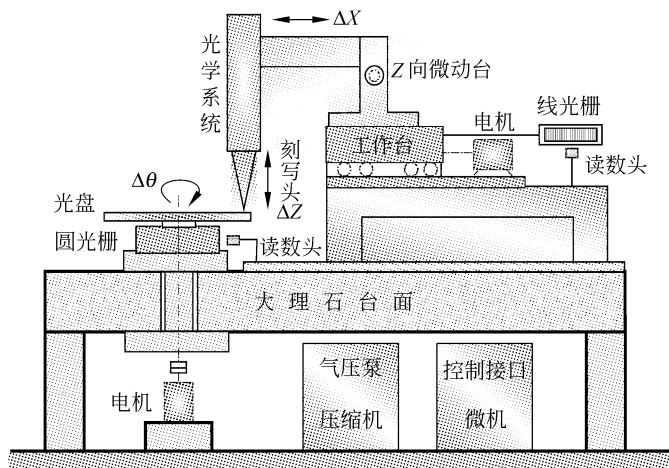


图 1-1 刻录机系统图

由图 1-1 和图 1-2 可知,该设备是一个自动跟踪控制的精密机械系统。图中光盘通过法兰盘或定位锁紧装置固定在气浮主轴上,保证周向旋转运动的精度;刻写光学头安装于精密工作台上,采用高精度滚珠-V 槽导轨结构,减速比 $i=60$ 的蜗轮蜗杆减速和螺距

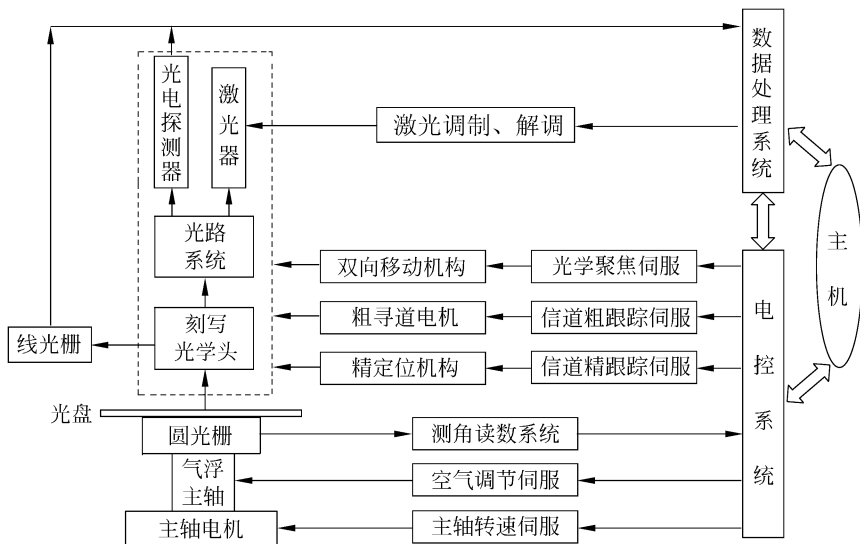


图 1-2 刻录机系统原理说明图

为 $t=0.6\text{mm}$ 的小螺距精密丝杠传动机构,分辨率 $=\frac{0.6}{360^\circ i}=0.028\mu\text{m}/(^{\circ})$,可保证较高的驱动、定位以及径向的进给精度。 Z 向微动台,采用摩擦轮传动原理,通过蜗轮蜗杆、齿轮齿条传动机构获得优于 $0.1\mu\text{m}$ 的微动灵敏度。

图 1-3 示出精密工作台的传动原理,图 1-4 示出 Z 向微动台的结构。

以上实例表明,在光盘刻录机系统或其他精密机械系统中,机械部分所起的作用是极为重要的。任何精密机械系统的质量,首先取决于机械部分。

本课程的研究对象是精密机械中常用机械类零件和部件的工作原理和设计计算方法,涉及精密机械设计的基本要求、原理、程序和方法。其中设计计算包括结构设计、理论计算、精度分析、误差计算等。

常用的机械类零件和部件主要是以下 3 类。

- (1) 机械传动:包括摩擦轮传动、挠性传动、精密齿轮传动、螺旋传动和杠杆传动;
- (2) 轴系和导轨:包括轴与精密轴系,轴的支承——滑动轴承、滚动轴承、仪表特种支承,轴的联接——联轴器和离合器,精密仪器导轨、微位移技术;
- (3) 其他常用零部件:包括弹性元件、零件的联接,示数、记录、锁紧装置和隔振器等。

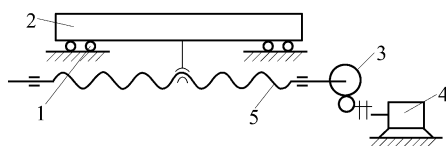


图 1-3 精密工作台的传动原理

1—滚珠导轨; 2—工作台; 3—蜗轮;

4—电机; 5—丝杠

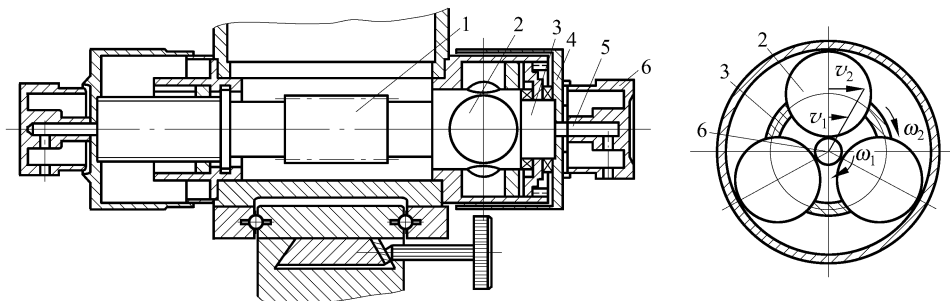


图 1-4 Z 向微动台的结构图

1—蜗杆；2—摩擦钢球；3—空心轴；4—联蜗杆轴套；5—手轮轴；6—手轮

1.2.2 本课程的性质

课程的性质由研究的对象决定,因此本课程的性质是:

(1) 它是仪器科学与技术学科各专业的一门技术基础课,介于普通技术基础课与专业课之间,为专业课服务,并称为专业技术基础课。同时它也是仪器仪表类各专业如电子技术、材料科学、自动控制等融合在一起的一门主干课程,具有承上启下的重要作用。

(2) 它是一门工程设计性质的课程。

1.2.3 本课程的特点

由于工程设计本身就是解决生产实际中的问题,而生产实际中的问题又较为复杂,因而本课程的特点是:

(1) 综合性强。在设计中要综合运用以前已学过的机械制图、工程力学、机械原理、互换性与技术测量、金属材料、精密仪器工艺等所有知识以及本课程中将要研究的知识,必要时还需自行拓宽有关的知识。

(2) 实践性强。在设计中必须从工程实际出发。零部件的好坏会在整机上体现,为此在设计中一定要坚持“以整体为出发点和归宿”的思想。此外,设计中还需运用各种设计手册、图表资料,运用优化设计、计算机仿真以及相应的实验等手段,科学地解决实际工程问题。

1.3 精密机械设计的基本要求、程序和方法

1.3.1 基本要求

在生产实际中,对精密机械设计所提出的基本要求主要有使用和经济两大类。

1. 使用要求

使用要求又称技术要求,是指使用者对设计所提出的必须满足的技术指标,一般因精密机械的用途及使用条件而提出,大体上可分为以下几个方面。

(1) 基本功能与性能:基本功能主要由用途决定,基本性能主要是指性能要求。性能要求通常用性能指标表示,例如在设计某精密 X-Y 工作台时,由使用者提出了如下要求:①工作台移动范围 $(x,y):130\text{mm}\times 130\text{mm}$;②工作台定位精度 $(x,y):\pm 0.6\mu\text{m}$;③工作台重复定位精度 $(x,y):\pm 0.25\mu\text{m}$;④工作台移动速度 $(x,y):2.5\text{mm/s}\cdots\cdots$ 在这些指标中,最核心的是精度指标,这是由精密机械本身的任务所决定的。为此,在设计时一般要进行精度分析和误差计算。

(2) 可靠性与稳定性:指在一定的使用条件下和规定的使用期限内,工作要可靠、稳定,要能按规定要求完成预定的功能和实现基本性能指标。要做到这一点,精密机械的零部件应该具有足够的强度、刚度和耐磨性等。为此,在设计时应根据具体情况进行相应的强度、刚度和耐磨性等方面的计算,其中最核心的计算是刚度计算。

(3) 精度要求:精度是精密机械的一项重要指标,设计时必须保证精密机械正常工作时所要求的精度。例如轴的回转精度、导轨的导向和移动定位精度等。

(4) 其他特殊要求:指根据使用条件不同,对精密机械提出的附加设计要求。例如,产品的外形要求美观大方、色泽柔和;仪表板上的仪表要排列紧凑、合理;航空和航天仪表要求重量轻、体积小;恶劣环境中的仪表,如用于海洋船舶上的仪表,要求耐高温和低温、防腐蚀、密封性能好等。此外还要求维修简单、使用操作方便等。

2. 经济要求

这是在满足使用要求的前提下必须满足的又一基本要求。经济性好即成本低。成本包括设计成本、制造成本和使用成本。成本的高低主要取决于结构设计的好坏。任何一个设计最终都必须以完善的结构来体现。所以在设计精密机械时,结构设计(包括结构工艺性)是一个极为重要并必须妥善解决的问题。同时要求机械零部件的机构简单,材料选择合理,工艺性好,在可能的情况下,尽量采用标准设计尺寸和标准零件。

在正确处理结构、精度和强度设计时,还应充分注意产品的先进性、可行性和经济性三者之间的关系,即设计的产品首先应该是满足科学发展的时代特点,具有先进性,然后是满足生产实际的技术性能和使用要求,最后是经济性能好。

1.3.2 设计程序

明确了基本要求以后,必须按一定的程序,才能一步一步地完成设计任务。产品的设计大体上有 3 种类型:开发性设计,即利用新原理、新技术设计新产品;适应性设计,即保留原有产品的原理及方案不变,为适应市场的需要,只对个别零件或部件进行重新设计;

变参数设计,即保留原有产品的功能、原理方案和结构,仅改变零、部件的尺寸或结构的布局,形成系列产品。

对于一个新产品的的设计程序分以下几个方面:

(1) 明确设计任务和技术要求,深入了解设计任务的全部技术内容。

(2) 进行可行性分析和研究,即要从技术和经济两方面对实际设计任务进行论证,并论证是否可行。要求设计者进行必要的市场调查,收集有关的技术资料和新技术、新工艺、新材料的供应情况,拟定新产品开发计划书。在此设计阶段应充分发挥创造性,构思方案要多样性,以便经过反复分析比较后做出决策,从中选出最佳方案。决策是非常重要的设计环节,关系到设计的好坏和成败。

(3) 总体方案设计。

(4) 具体技术设计,包括总体结构或总装配图设计、部件设计、零件设计、精度分析和误差计算、编写设计计算说明书等。

(5) 制造样机,样机鉴定,判断是否满足设计技术指标要求。

(6) 商品化设计,使产品在市场上具有竞争力。

以上各部分内容常需互相配合,设计工作也需要多次修改,逐步趋于完善。样机制造出来以后,对样机进行全面的性能试验,作出技术经济性能评价,在此基础上进行合理的修改和包装,以便设计出技术先进可靠、经济合理、造型美观的新产品。

1.3.3 目前常用的设计方法

在当前精密机械设计中,通常采用的方法有3种。

(1) 理论设计。就是根据理论计算的方法来进行设计。在材料力学中是根据强度理论来进行设计的;在精度分析和误差计算中是根据精度理论来进行设计的;结构设计的基本原则,也是根据理论设计进行研究的。所以常用的设计方法主要是理论设计方法。

(2) 经验设计。经验设计又称为类比法设计。有些零件,例如壳体、基座等,由于结构和受力均较复杂,故无法采用理论计算的方法进行设计。在这种情况下,只能参照在实际使用中已被证明设计正确和使用可靠的产品进行类比,或根据使用经验归纳出来的经验公式或关系式来进行设计,这种方法叫作经验设计或类比法设计。经验设计的理论根据是实践。

(3) 模拟实验设计。在理论设计和经验设计都难以解决问题时,可采用模拟实验设计方法。就是根据使用要求,将所需要设计的零部件,初步定出形状和尺寸并做出模型,然后再通过实验手段对模型进行实验,根据实验结果来判断初步定出的形状和尺寸是否正确,并根据实验结果进行修正,以求逐步完善。这种方法的缺点是实验费用较高,一般只用在特别重要的设计中。

1.3.4 设计计算的新发展

随着科学技术和基本理论的发展,出现了新的设计方法,对产品的功能、可靠性、效益提出了更为严格的要求。现代产品工程设计广泛采用现代技术,如可靠性设计、优化设计、计算机辅助设计等,适应和加速了新产品的开发,使精密机械产品在功能上实现大的跨越。但是由于这些方法涉及到的理论较多,所以需要另外作专门讨论,这里只作简单介绍。

1. 可靠性设计

1) 可靠性概念

按传统的强度设计方法($\sigma \leq [\sigma]$ 或 $n \geq [n]$)设计的零件,由于材料强度、外载荷和加工尺寸等都存在着离散性,有可能出现达不到预定工作时间而失效的情况。因此,希望将出现这种失效情况的概率限制在一定范围之内,即对零件提出可靠性要求。采用可靠性设计能定量给出零件可靠性的概率值,排除主要的不可靠因素和预防危险事故的发生,但也有可能出现大大超过预定工作时间而失效的情况,这意味着浪费和增加了生产成本。

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。

可靠度是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率,常用 R_t 表示。

累积失效概率是指产品在规定的条件下和规定的时间内失效的概率,常用 F_t 表示,有时也用 P 表示。

设有 N 个同样零件,在规定时间 t 内有 N_t 个零件失效,剩下 N_t 个零件仍能继续工作,则可靠度为

$$R_t = \frac{N_t}{N} = \frac{N - N_t}{N} = 1 - \frac{N_t}{N}$$

累积失效概率为

$$F_t = \frac{N_t}{N} = 1 - R_t$$

可靠度与累积失效概率之和等于 1,即

$$R_t + F_t = 1 \quad (1-1)$$

将 F_t 对时间 t 求导,得

$$f(t) = \frac{dF_t}{dt} = \frac{dN_t}{Nd t}$$

式中, $f(t)$ 称为失效分布密度。

失效分布密度 $f(t)$ 与时间 t 的关系曲线为失效(寿命)分布曲线,常见的有正态分布、威布尔分布、指数分布等多种。零件寿命、应力和工艺误差,材料寿命和极限应力等一般可认为按正态分布(见图1-5)。

2) 零件的可靠性设计

图 1-6 为零件工作应力和材料极限应力的随机变量统计分布曲线,横坐标代表零件工作应力和材料极限应力,纵坐标代表分布密度。从图中看出,材料的平均极限应力 $\bar{\sigma}_{\text{lim}}$ 大于零件平均工作应力 $\bar{\sigma}_w$,平均安全系数大于 1,零件工作是可靠的。但从极限应力和工作应力的分布来看,在曲线相交的阴影区内有可能出现工作应力大于极限应力的情况,实际安全系数小于 1,零件工作是不可靠的。

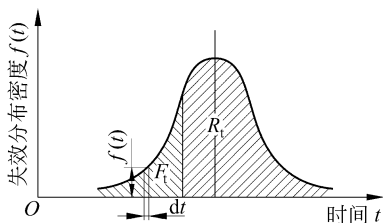
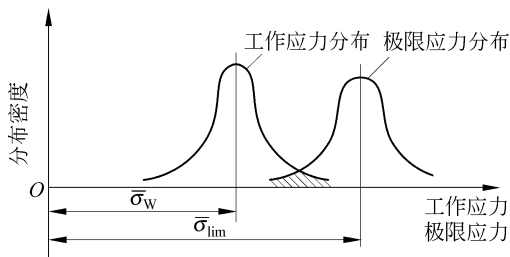
图 1-5 $f(t)-t$ 关系曲线

图 1-6 工作应力和极限应力分布曲线

零件的可靠性计算是将工作应力和极限应力等参数看作随机变量,根据它们的失效分布规律,运用概率论和数理统计的方法得出可靠性的定量指标。和强度、刚度等零件的固有属性一样,可靠性也是零件的一个固有属性,其水平是随着设计、材料和制造方法的确 定而确定的,这些因素若没有改善,就不能提高零件的固有可靠性水平。

设零件的工作应力 σ_w 为正态分布,其均值为 $\bar{\sigma}_w$,标准离差为 S_w ,材料极限应力 σ_{lim} 亦为正态分布,其均值为 $\bar{\sigma}_{\text{lim}}$,标准离差为 S_{lim} 。因 σ_w 和 σ_{lim} 均为服从正态分布的随机变量,根据数理统计理论可知,由 $\sigma_{\text{lim}} - \sigma_w = \sigma_z$ 构成的随机变量将服从一新的正态分布,其均值 $\bar{\sigma}_z$ 和标准离差 S_z 分别为 $\bar{\sigma}_z = \bar{\sigma}_{\text{lim}} - \bar{\sigma}_w$, $S_z = \sqrt{S_{\text{lim}}^2 + S_w^2}$ 。

当 $\sigma_z = \sigma_{\text{lim}} - \sigma_w < 0$ 时,认为零件发生失效。

为了便于计算,应将新构成的正态分布转化为标准正态分布,因此,需对 $\bar{\sigma}_z$ 和 S_z 进行变量置换,化为以 S_z 为单位的变量,即

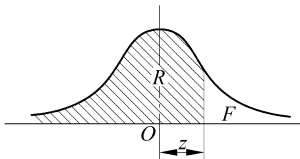
$$z = \frac{\bar{\sigma}_z}{S_z} = \frac{\bar{\sigma}_{\text{lim}} - \bar{\sigma}_w}{\sqrt{S_{\text{lim}}^2 + S_w^2}} \quad (1-2)$$

式中, z 为标准正态分布的随机变量。标准正态分布的标准离差等于 1。

式(1-2)称为联接方程,它将材料极限应力和零件工作应力之间的随机关系联接起来,根据计算得出的 z 值,可从标准正态分布表(表 1-1)中查得可靠度 R 。

应当指出,尽管疲劳强度更符合威布尔分布,但由于按正态分布得到的连接方程简单可行,所以它在零件疲劳强度可靠性计算中得到广泛采用。

表 1-1 标准正态分布表



z	R	z	R	z	R	z	R
0.0	0.5000	0.9	0.8159	1.8	0.9641	2.7	0.9965
0.1	0.5398	1.0	0.8413	1.9	0.9713	2.8	0.9974
0.2	0.5793	1.1	0.8643	2.0	0.9773	2.9	0.9981
0.3	0.6179	1.2	0.8849	2.1	0.9821	3.0	0.9986
0.4	0.6554	1.3	0.9032	2.2	0.9861	3.5	0.9998
0.5	0.6915	1.4	0.9192	2.3	0.9893	4.0	0.99997
0.6	0.7257	1.5	0.9332	2.4	0.9918	4.5	0.99999
0.7	0.7580	1.6	0.9452	2.5	0.9938	5.0	1.0000
0.8	0.7881	1.7	0.9554	2.6	0.9953		

2. 机械优化设计

机械优化设计是利用现代数学、物理、力学的新技术及电子计算机技术对各种机械设计问题如方案选择、参数匹配、机构设计、结构及系统设计等寻求最佳设计的一种理论和方法。

优化设计的基本思想是优选一组设计变量,在满足给定的约束条件下,达到目标函数的最优值(极大或极小)。其数学表达式为

要确定的设计变量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^T$

需满足的约束条件 $g_u(\mathbf{X}) \geq 0$, 其中 $u = 1, 2, \cdots, m$

要达到的设计目标 $W = F(\mathbf{X}) \rightarrow \min$

在设计精密机械时,设计变量可以是构件尺寸、运动参数或节点位置坐标等。约束条件是对某些外形尺寸、位置或强度、刚度等的限制。设计目标是根据精密机械的使用要求确定的,例如最小体积、最轻重量、最长寿命、最低成本等。

3. 计算机辅助设计

计算机辅助设计(computer aided design,CAD)是将计算机具有运算快速准确、存储量大和逻辑判断功能强等特点与图形显示、自动绘图机等设备相结合,在人机交互作用下进行设计,它快速、直观,目前已广泛运用在精密机械设计中。

CAD将人和计算机各自最好的特点结合起来,构成一个工作组合,这个组合比人或计算机单独工作时能力更强,工作得更好。属于创造性的构思活动主要由人承担,而有关

资料检索、计算、优化、绘图和制表等由计算机完成。利用计算机的 3D 绘图功能,设计复杂的曲面机械外形、装配机械零件,用计算机仿真机构设计的合理性、运动特性和热效应,可以在机械的设计阶段了解设计机构的基本性能。

掌握与 CAD 设计相关的机械设计工程工具,如 AUTOCAD,Pro/E 等,是精密机械设计工程师应具备的基本技能,它们有专门的教材讲述,这里不再赘述。

1.4 精密机械设计中的精度分析和误差计算

精度问题在精密机械设计中是头等重要的问题。

1.4.1 精度的概念

精度又称精确度,是指准确的程度。精度的高低是用误差的大小来衡量的,误差小则精度高,误差大则精度低。

误差的大小按实际值与理论值之差来进行计算,即误差值=实际值-理论值。实际值是指零件的实际数值,理论值一般是指零件的名义值或公称值。由于实际值与理论值相比可大可小,便出现了误差,误差值有“正”、“负”,误差等于零的几率是不存在的。

在设计时,进行精度分析和误差计算的目的是要找出产生误差的原因,研究误差传递的规律,计算出总误差,并在此基础上合理地选择设计方案,确定结构参数和技术条件。

1.4.2 误差的来源

影响精密机械精度的因素,主要来自 3 个方面。

1. 原理误差

原理误差又称理论、方法或设计误差。这类误差主要产生在设计过程中,是由于在设计过程中对某些环节采用了一些近似假定,或在制定总体方案时采用了近似机构来代替理论上正确的机构而产生的误差。

原理误差属于系统误差,在计算总误差时应按代数和相加。在设计时,通常采用增加调整或补偿环节的办法来减小或消除原理误差。

2. 制造误差

制造误差是指由于加工和装配不准确而引起的尺寸误差、形位误差、表面粗糙度等。制造误差属于随机误差,计算总误差时常假定制造误差分布规律为正态分布,故可按几何和相加。

3. 使用误差

使用误差是指在使用过程中,由于力变形、热变形、零件磨损和材料性质变化等引起