

精密机械设计



15 46 47 48 49

精密机械设计

史习敏 黎永明 主编

上海科学技术出版社

内 容 提 要

航天技术、微电子技术、人工智能技术的出现,对机械加工和测量已提出了 $0.01\sim 0.001\mu\text{m}$ 、 $0.1\sim 0.01''$ 的超高精度要求,许多精密机械(仪器)已是机、电、光、液、气多种技术的综合。本书正是为了使教学内容适应新的形势而编写的。

本书共分十章,叙述了精密机械设备的总体设计、精度分析与计算、精密位移检测装置、传动系统、主轴系统、导轨、支承件、微量进给装置、误差校正装置以及隔振装置等设计,最后叙述了总体设计的实例——衍射光栅刻划机的总体设计。

本书体例清晰、结构紧凑、内容新颖、资料丰富,适用于高等院校机械设计、电子精密机械、光学精密机械、精密仪器、机械制造等专业的教学和有关工程技术人员参考。

精 密 机 械 设 计

史习敏 黎永明 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海发行所发行 上海东方印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张15 字数354,000

1981年7月第1版 1981年7月第1次印刷

印数:1-5,000

统一书号:15119·2495 定价:2.95元

前 言

精密机械设备应用广泛,诸如火箭、人造卫星和宇宙飞船上的陀螺仪;机械手和机器人;计算机的外围设备;集成电路的光刻机;精密机床;仪器和仪表(钟表及照相机)等。在联邦德国、瑞士、日本、苏联和我国的研究部门、高等院校中都已设置了精密机械工程方面的系和研究机构。但至今国内还没有一本介绍精密机械设备总体设计及部件设计的专著。鉴于各方面的需要,我们决定根据自己从事专业教学和科研工作的经验体会,编写了本书,以求抛砖引玉。本书为专业课,适宜于在学完《精密机械零件设计》及《精密机械概论》或相应课程之后进行教学。主要是对精密机械设备的总体设计、系统设计、部件设计以及精确度计算等方面进行深入的论述,着重于在分析基础上的综合。本书中大部分素材和实例取自精密机床和计量仪器方面。这是因为精密机床和计量仪器是制造任何精密机械设备所必不可少的,有关它们的知识是一个从事精密机械工作的专业人员必需具备的;而本书内容的取舍则是着眼于将来容易适应各种精密机械设计,有利于培养学生举一反三的能力。

从技术发展的历史来看,精密机械的研究和发展主要取决于设计理论、方法、测试和工艺技术的不断更新与提高。在五十年代,最高加工精度和测量精度只能达到 $1\sim 0.1\mu\text{m}$ 。六十年代以来,由于金刚石刀具和磨具的应用,特别是激光和微机技术的发展,使最高加工精度和测量精度达到了 $0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 。例如,美国 Y-12 工厂研制成功的 Moore 车床、日本丰田工机的 APH50-32 超精车床,主轴回转精度均为 $0.025\mu\text{m}$,被加工有色金属零件的表面粗糙度为 $Ra0.01\mu\text{m}$,联邦德国 Heidenhain 的 DS 200/400 型转台和日本东京圆度仪的主轴回转精度为 $0.01\mu\text{m}$,示值误差为 $0.1''$;英国 Taylor Hobson 公司的 Talyrond 73 型圆度仪主轴回转精度为 $0.025\mu\text{m}$,Talycentric 转台为 $0.013\mu\text{m}$ 。我国也先后制造了不少精密机械产品,如 ST-186 型、SL-222 型高精度磁盘车床主轴回转精度为 $0.2\mu\text{m}$;多齿分度台分度精度为 $0.1''$;HJY015 型高精度圆光栅检测仪的主轴回转精度为 $0.03\mu\text{m}$;1 米激光比长仪的测量精度为 $0.1\mu\text{m}$ 等。今后精密机械设备的发展目标则更高,将达到 $0.01\sim 0.001\mu\text{m}$ 。

本书各章编者如下:第一章——庄夔,第二章——庄夔、史习敏,第三章——庄三元、史习敏,第四章——史习敏,第五、六、七章——黎永明,第八章——庄三元,第九章——史习敏,第十章——庄夔,还有邱毓强编写了 §7-4。

本书由上海科技大学史习敏、上海机械学院黎永明主编(以姓氏笔为划序)。上海科技出版社责任编辑作了仔细的审阅和修改,提高了本书质量。在编写中还得到了其他许多单位和同志们的关心支持和帮助,並提供了许多很有价值的资料,谨在此一并致以深切的谢意。

本书原稿自 1982 年以来曾经过几个院校的使用,在此基础上虽已经多次修改,但限于编者水平,难免还会有欠妥和错误之处,敬请读者指正。

编 者 1985.12.

目 录

第一章 总体设计	1
§ 1-1 设计任务分析	1
§ 1-2 主要技术参数和技术指标的确定	2
一、主要技术参数和技术指标的内容	2
二、确定主要技术参数和技术指标的方法	3
§ 1-3 总体方案的制定	3
一、设计原则	3
二、设计原理	6
三、原理性设计	7
第二章 精度分析与计算	9
§ 2-1 概述	9
一、精度分析的方法	9
二、各种精度的含义	9
§ 2-2 精度评定和分析	11
一、精度指标和标准	11
二、总体精度分析	13
§ 2-3 误差的综合	18
一、误差独立作用原理	18
二、随机误差的合成	18
三、系统误差的合成	19
四、系统误差和随机误差的合成	19
§ 2-4 精度分配和计算	20
一、步骤和依据	20
二、精度分配的方法	21
三、几何精度计算	25
四、传动精度计算	25
五、动态精度计算	29
第三章 精密位移检测装置	32
§ 3-1 机械类位移检测装置	33
一、丝杠螺母副位移检测装置	33
二、多齿分度盘角位移检测装置	35
三、钢球分度盘角位移检测装置	39
四、蜗杆蜗轮副角位移检测装置	40
§ 3-2 光电类位移检测装置	41
一、线纹尺位移检测装置	41
二、度盘角位移检测装置	44

三、光栅位移检测装置	45
四、码盘、码尺位移检测装置	52
五、感应同步器位移检测装置	53
六、磁栅位移检测装置	59
七、激光干涉测长定位装置	63
第四章 传动系统	67
§ 4-1 变速传动系统	67
一、分级变速传动系统	67
二、无级变速传动系统	74
§ 4-2 内联系传动系统	76
一、齿轮传动的精度计算	77
二、提高传动精度的措施	81
三、精密机床内联系传动系统	82
四、测量装置中的传动系统	83
§ 4-3 伺服机械传动系统	87
一、概述	87
二、总转速比和伺服电动机的选择	88
三、传动链的级数和级比选择	93
四、伺服传动的传动精度	98
五、刚度、位置变动度与固有频率的计算	98
第五章 主轴系统	102
§ 5-1 主轴系统设计的基本要求	102
一、主轴回转精度	102
二、主轴系统刚度	104
三、主轴系统的振动	107
四、主轴系统的热变形	108
五、轴承的耐磨性	109
§ 5-2 滚动摩擦轴系	109
一、标准滚动轴承的轴系	110
二、非标准滚动轴承的轴系	111
§ 5-3 滑动摩擦轴系	115
一、普通滑动轴系	116
二、液体动压轴系	117
三、液体静压轴系	121
四、空气静压轴系	134
五、分析比较	141
§ 5-4 主轴设计	142
一、主轴锥孔锥度和轴颈尺寸的确定	142
二、技术条件的确定	142
第六章 导轨	144
§ 6-1 导轨的作用、特点和分类	144
一、导轨的作用和特点	144
二、导轨的分类	144

§ 6-2 导轨设计的基本要求	145
一、导向精度	145
二、刚度	146
三、耐磨性	147
§ 6-3 导向设计	149
一、按运动学原理设计	150
二、按误差平均原理设计	151
§ 6-4 普通滑动导轨副的结构设计	151
一、截面形状	151
二、组合形式及特点	152
三、主要尺寸的确定	153
§ 6-5 液体静压导轨副的设计计算	154
一、结构型式	154
二、工作原理	154
三、导轨结构参数的确定	155
四、节流器参数的确定	155
五、结构举例	157
§ 6-6 气体静压导轨副的设计	158
一、工作原理	158
二、结构型式	159
三、流量计算	159
§ 6-7 卸荷导轨	161
一、卸荷导轨的特点和应用	161
二、设计要点	161
三、机械卸荷导轨	161
四、液压卸荷导轨	161
§ 6-8 滚动导轨	163
一、结构特点	163
二、导轨副的计算	165
第七章 支承件	168
§ 7-1 支承件结构设计的要点	168
一、刚度	168
二、热变形	173
三、抗振性	174
四、结构工艺性	174
五、使用性能	176
§ 7-2 支承件的材料选择	176
一、铸铁	176
二、钢板	176
三、花岗石	177
§ 7-3 相似理论在支承件设计中的应用	177
一、相似理论	177
二、相似准则的确定方法	179

三、支承件的类比设计法	181
四、支承件的模型试验法	182
第八章 微量进给装置和误差校正装置	184
§8-1 微量进给装置	184
一、机械传动式微量进给装置	184
二、热变形传动式微量进给装置	187
三、磁致伸缩式微量进给装置	188
四、弹性变形传动式微量进给装置	191
五、压电式微量进给装置	192
§8-2 误差校正装置	194
一、丝杠螺母副误差校正装置	195
二、蜗杆蜗轮副误差校正装置	196
三、导轨副误差校正装置	199
四、线纹尺位移检测误差校正装置	199
五、感应同步器误差校正装置	201
第九章 隔振装置	203
§9-1 概述	203
一、隔振设计的任务和步骤	203
二、环境振动	203
三、允许振动	204
§9-2 消极隔振原理	204
一、消极隔振系统的振动特性	205
二、振幅隔振的效果	206
§9-3 隔振措施	208
一、与振源保持一定的距离	208
二、开设隔振沟	209
三、安装在地下室	209
四、设置隔振台	209
§9-4 隔振器和隔振材料	210
一、概述	210
二、金属弹簧隔振器	210
三、橡胶隔振器	212
四、空气弹簧隔振器	215
§9-5 消极隔振的设计计算	217
一、计算假设	217
二、计算步骤与方法	218
第十章 衍射光栅刻划机的总体设计	221
一、设计任务分析	221
二、主要参数和技术指标的确定	222
三、方案论证	223
四、总体布局	225
五、误差分配	226
附 录	228

第一章 总体设计

精密机械设备不仅是指纯机械的,而且也是指结合光、电、气、液原理设计的“精密加工设备”、“精密测量仪器”等。

精密机械设备的总体设计,是设计的第一步,它是指在具体设计之前,对所要设计的精密机械设备的各方面,本着简单、实用、经济、安全、美观等基本原则所进行的综合性的设计。它的主要内容有:设计任务分析、主要参数及技术指标的确定、以及方案制定。

在总体设计过程中,应逐渐形成下列文件和图纸:

(1) 设计任务书(或称技术任务书);(2) 机构运动简图(或称系统简图);(3) 总装配图;(4) 部件装配图;(5) 电气、光学、气动、液压原理图等;(6) 总体设计报告。

一项新产品通常需要经过模拟试验装置的设计和试制、样机的设计和试制、定型设计和试制等三个阶段(有时也可酌情减少),以求各项性能达到设计要求。

总体设计是一个很重要的环节,它的优劣,直接影响精密机械设备的全部性能和使用。在总体设计中要充分运用设计原理,重视科学实验,做到理论和实践紧密结合,尽力使总体设计在原理上正确,实践上可行、技术上先进、经济上合理。

目前一些精密机械设备的设计,包括机、光、电、气、液技术综合的总体设计,还处于半经验状态,如何使总体设计科学化,是一个带有方向性的重要课题。本章论述的一些问题,只是给这方面提供一些线索,今后还需花费大气力,不断总结经验,不断丰富设计原理宝库,以使设计时少走弯路。

总体设计给具体设计规定了总的原则和布局,指导具体设计的进行,而具体设计则是在总体设计基础上的具体化,不断丰富和修改总体设计。两者相辅相成,有机结合,不能断然分开,常交错进行。

§ 1-1 设计任务分析

在总体设计时,要先详细了解设计任务中的各种要求,根据总体设计的基本原则,逐一地进行分析研究,并将研究结果摘要写入设计任务书。

然后尽可能多地搜集经验总结及理论计算的资料,分清问题主次,抓住影响全局的关键问题,进行深入了解研究,拟定几种方案,确定出最佳设计方案。

设计任务分析的内容包括下列几项:

1. 工作对象

例如要求磨削轴、套类零件的外圆和内孔,则磨床上得设计出磨外圆和磨内孔的相应部件。又例如要求测量二维长度,则测量仪器没有必要设计成同时能作三维长度测量。测量维数不同,仪器在结构上的要求也不相同。

2. 工作精度

精密机械设备的精度应根据实际需要来定。一般可分三类:

中等精度——直线位置误差 $1\sim 10\mu\text{m}$ 、主轴回转误差 $1\sim 10\mu\text{m}$ 、圆分度误差 $1\sim 10''$ 。

高精度——直线位置误差 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 、主轴回转误差 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 、圆分度误差 $0.2\sim 1''$ 。

超高精度——直线位置误差 $0.1\mu\text{m}$ 以内、主轴回转误差 $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ 、圆分度误差 $0.2''$ 以内。

精密机械设备的精度应当是稳定的,并在一定期限内保持不变。

精度要求与精密机械设备的结构形式和价格相关,必须综合考虑。

3. 生产批量

精密机械设备的生产批量是由有关部门决定的,不同的生产批量有不同的结构设计。因此,对大量生产的设备的结构设计,需考虑便于在生产流水线上加工,零件结构应尽量简单,采用系列化、通用化、标准化。对单件小批量生产的设备的结构设计,只要考虑便于在通用机床上加工即可,零件结构可以复杂些,这些精密设备的性能需尽量优良。

4. 生产效率

精密机械加工设备的生产效率通常是指在单位时间内它所能加工的工件数量。对计量仪器来说则是其检验效率。在设计时应根据具体要求进行考虑。

5. 自动化程度

自动化程度的高低,取决于使用部门的要求,对用于大批量生产的精密机械设备,一般要求半自动化或自动化;而对用于小批量生产的设备,则仅要求机动以至手动。

6. 工作环境

工作环境如振动、温度、湿度、空气净化程度等对精密机械设备的使用有很大影响。因此一方面要求设备的设计能适应一定的工作环境,例如在一般车间环境中,在精密机械设备上增设校正装置以减少温度变化对精度的影响;增设密封装置以防尘、防油、防水、防潮。另一方面则要求创造良好的工作环境来配合精密机械设备的工作要求,建造具有隔振、恒温恒湿、净化设备的车间和实验室。

7. 劳动保护

若精密机械设备内有放射性物质、有毒气体、X射线等,则需特种防护装备,使操作者的人身安全得到保障;要使精密机械设备本身得到保护,则需有防过载装置,互锁保险装置及行程限制自动停车装置等。

§ 1-2 主要技术参数和技术指标的确定

一、主要技术参数和技术指标的内容

精密机械设备的主要技术参数是能够基本反映出该设备的概貌和特点的一些项目,对于精密机床来说,这些参数是指规格参数、运动参数、动力参数和结构参数等。具体地说,精密机床规格参数,就是机床所能加工或安装工件的最大尺寸;运动参数就是设备每分钟双行程数或最高最低转速等;而动力参数则是电动机功率、液压缸牵引力以及伺服电动机的额定扭矩等;结构参数是表明零部件的主要结构尺寸参数。对于精密计量仪器来说,技术参数是指测量范围、示值范围、工作距离、放大率、数值孔径、视场、焦距等。

精密机械设备的技术指标,则是指精密机械设备的精度、表面粗糙度等,因此它既是设计的基本依据,又是检验成品质量的基本依据。

精密机械设备的技术指标与设备的用途、功能、特点等有关,不同类型的设备,有不同的指标。确定出恰当的技术指标,将是设备获得优良性能的前提。

二、确定主要技术参数和技术指标的方法

1. 根据设备的用途

使用单位在提出设备要求时,往往只提出设备的使用要求,设计者必须将使用要求转换成设计工作所需要的技术指标,这一工作有时很复杂,需要进行大量的实验、统计和研究工作。通用设备,要考虑适应加工或测量多种类型的工件,它的加工或测量范围要尽可能广一些。对于专用设备,因是为某一特定工序或某一特定工件设计的,它的加工或测量范围就比较小。

2. 根据加工(测量)对象的材料和主要尺寸

如对于主运动为回转运动的机床,主轴转速 n 与由材料决定的切削速度 v 、被加工零件的直径 D 大小有关,即 $n = 1000v/\pi D$ (r/min)。

根据切削速度和被加工零件的最大、最小直径便可确定机床的最高、最低转速,并得出转速范围 $R_n = n_{\max}/n_{\min}$ 。

3. 根据加工(测量)精度的要求

精密机械设备的主要特点是高精度甚至超高精度,为了保证该设备能加工(或测量)合格的零件,在总体设计时,必须以它的加工(或测量)对象及其要达到的精度,作为确定主要技术参数和技术指标的依据。例如,设计高精度外圆磨床时,以加工出圆度为 $2\mu\text{m}$,圆柱度为 $3\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a > 0.4 \sim 0.8\mu\text{m}$ 的圆柱工件等为依据,定出头架主轴中心线径向跳动、轴向窜动,头架和尾座导向面对工作台移动的平行度等技术指标,这些技术指标分别为, $3\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}/1000\text{mm}$ 。

4. 根据精密机械设备中的薄弱环节

精密机械设备通常精度要求较高,所受载荷较小,有时工作速度也较低,因此只有很少场合需要进行强度核算,而着重刚度、接触变形、振动、精度等的计算。高精度与低速度给设计增加了很多困难,弹性变形、摩擦、爬行、振动等变成了突出的问题,成为某些技术指标的制定依据。

§1-3 总体方案的制定

方案的制定是在设计任务分析、确定主要技术参数及技术指标的基础上进行的,它包括:工作原理设计、方案比较、系统简图(或运动简图)绘制、总体布局、总精度分配、总装配图绘制、造型与装饰设计、总体设计报告的编写等。

在比较总体方案和确定主要结构的方案时,要注意结合实际情况,善于应用以下一些设计原理,以制定出一个最佳的总体方案。

一、设计原则

在精密机械设备的总体设计中,考虑各设计原则在设计中的应用是很重要的。

1. 阿贝原则

阿贝原则是指被测量的方向必须与基准量的方向一致,且同在一一直线上。

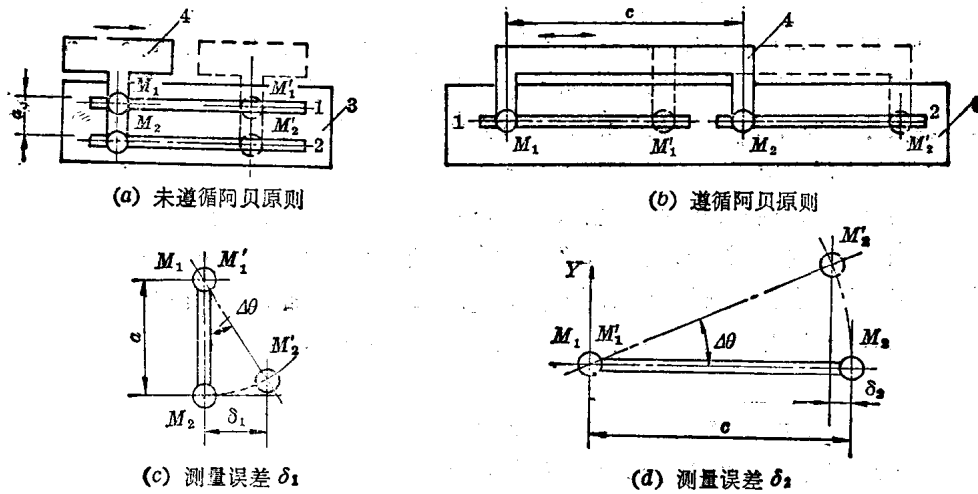


图 1-1 测长仪的两种布局型式及其测量误差

1—基准件; 2—被测件; 3—工作台; 4—悬臂支架; M_1, M_2 —读数显微镜原始位置;
 M'_1, M'_2 —悬臂支架位移后读数显微镜位置

图 1-1 a、b 所示为测长仪的两种布局型式。由于工作台的偏摆可看作是悬臂支架 4 相对于工作台 3 偏摆,因而由此偏摆所造成的误差就是测量误差。

当测量不符合阿贝原则时(图 1-1 a、c), 测量误差 $\delta_1 = a \cdot \sin \Delta\theta \approx a \cdot \Delta\theta$ 。

当测量符合阿贝原则时(图 1-1 b、d), 测量误差 $\delta_2 = c - c \cdot \cos \Delta\theta = c(1 - \cos \Delta\theta) \approx c \cdot (\Delta\theta)^2 / 2$ 。因 $\Delta\theta^2$ 非常小, 故当 $c = a$ 时工作台偏摆所造成的测量误差比不符合阿贝原则的小。

同理, 设计制造其他精密机械设备时, 也应考虑遵守阿贝原则。如刻线机应尽可能设计成图 1-2a 所示的型式, 避免采用图 1-2b 所示的型式。

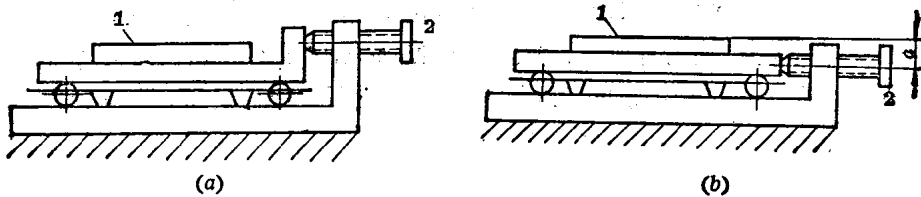


图 1-2 阿贝原则在刻线机中的应用

1—工件; 2—螺杆

但如按阿贝原则设计, 设备的外廓尺寸较大、结构复杂、温度对精度的影响较大时, 也可不按阿贝原则而用误差补偿的方式进行设计。

2. 变形影响最小原则

精密设备虽然制造装配得很精确, 但受其自重和工作过程中载荷的作用, 测量误差或加工误差还可能较大, 为了减小变形的影响, 除提高系统的静刚度外, 还可采用避开变形环节的措施。

例如长春光机所用阿贝比较仪改装成 200 mm 刻尺装置。刀架 4(图 1-3 a) 装在支座 3 上, 由于工作台 7 移动时产生的支座 3 变形而使刻划件 6 产生误差。如果刀架 4 单独固

结在镜筒1上(图1-3b), 因镜筒1、2之间不经过变形环节(显微镜2对准基准尺5), 且支座3只传递刻线和抬落刀运动, 其变形误差对刻划件6的影响就大大减小。

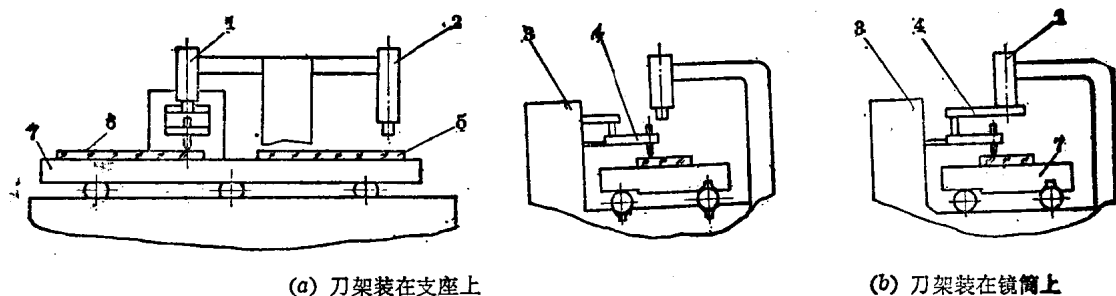


图 1-3 刻尺装置的合理布局

3. 基面合一原则

总体设计时, 应尽量使零部件的设计基准与装配基准和加工基准相一致, 以减小由于基准不一致所带来的误差。

例如设计刻划阿基米德螺旋线分划板的专用刻划机时(图1-4a), 考虑到分划板1在使用时是以其中心的球窝2作安装基准, 因此也取分划板中心的球窝作加工时的定位基准。刻制分划板时, 与钢球配对放入该机, 此时由球窝中心线与主轴7中心线不同心所引起的误差较小。如果分划板直接安装在主轴上刻划, 用分划板外圆为基准调偏心, 则球窝与中心线的不同心引起的误差就较大(图1-4b)。主轴的径向支承为V形轴承。

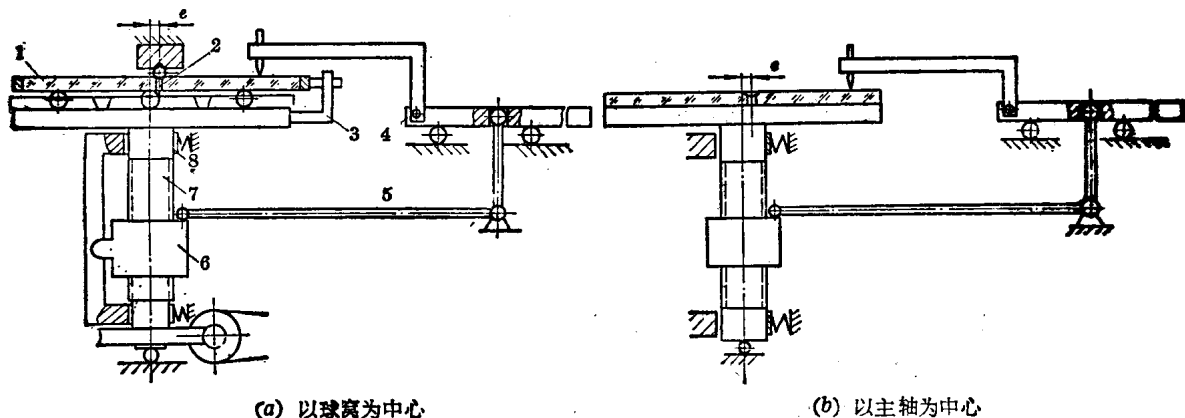


图 1-4 刻划基准的不同方案

1—分划板; 2—球窝; 3—拨杆; 4—工作台; 5—杠杆; 6—螺母; 7—主轴(带有螺纹); 8—弹簧轴瓦

4. 造型与装饰宜人、工作可靠安全原则

设备外型应直挺光滑, 变化有致, 结构配置匀称, 大方稳重, 色彩新颖和谐, 与环境相协调, 以利操作者心情舒畅, 减少心理错觉, 提高工作效率。且造型与装饰应使操作方便、省力、安全、可靠。例如: 右手操作的手柄手轮应布置在设备的右边, 操作方向与工件的运动方向相一致。操作范围应在手臂能伸到的位置, 显示屏应倾斜, 并在明视距离上等。

造型和装饰与设备的品种规格、结构特点、使用场合以及人们的不同爱好和习惯有关, 不能千篇一律、一成不变。

5. 价值系数最优原则

产品功能 F 与产品成本 C 之比,反映了社会产品价值的高低,称为价值系数 V ,三者的关系式为 $V = F/C$ 。

要提高产品的价值系数,在很大程度上决定于设计,为此在设计每个阶段都要进行价值分析,采取多种方案进行技术经济性比较,以取得最佳方案,向用户提供成本低、功能好的产品。

二、设计原理

总体设计时,灵活运用各种设计原理,是获得最佳方案的重要方法之一。

1. 误差平均原理

误差平均原理是指采用多次重复测量(或多个测量头测量),多次重复分度,多次重复曝光,多个滚动体支承等方式以取得平均误差,提高精度的方法。

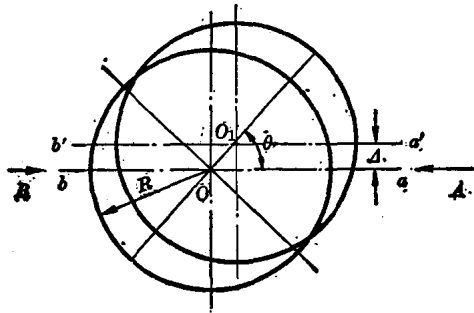


图 1-5 主轴晃动对双读数头系统读数值的影响

如图 1-5 所示的双读数头系统,设在开始测量前分度盘中心与主轴中心 O 重合,当主轴转过一任意 θ 角后,由于主轴晃动,度盘中心移至 O_1 , 此时度盘刻线从 $a-b$ 位置移至 $a'-b'$, 由于偏心引起的读数头 A 与 B 的读数值误差 Δ 的大小相等,方向相反。当取两读数头读数的平均值时,轴系引入的读数值误差便可消除。因此,双读数头系统可以消除主轴的单周晃动奇次谐波分量引起的读数值误差。

双读数头系统还可以消除度盘偏心引起的读数值误差。

度盘(或光栅盘)的刻划误差,一般来说,是一个由多次谐波合成的周期误差。当取两个读数头读数的平均值作为读数值时,其角度读数值误差为:

$$\Delta\theta = \sum_{m=1}^k \frac{e_m}{R} [\sin m\theta + \sin m(180^\circ + \theta)]$$

式中; $m=1, 2, 3, \dots, k$ 表示谐波的阶次; e_m 为谐波的幅值; R 为刻划半径。由于

$$\sin m\theta + \sin m(180^\circ + \theta) = \sin m\theta + \sin(m \cdot 180^\circ) \cos(m\theta) + \sin(m\theta) \cos(m \cdot 180^\circ)$$

因此,当 $m=1, 3, 5, \dots$ 等奇数时 $\Delta\theta_m = 0$, 即所有奇次谐波的读数误差可全部消除。

在一些高精度的光栅式分度装置中,还广泛采用沿圆周均布多个读数头的结构。用多个读数头读数的平均值作为读数值,能消除多阶次谐波误差的影响,从而提高分度精度。

当采用 n 个读数头时,第 m 次谐波的角度读数值误差为:

$$\Delta\theta_m = \left\{ \sin m\theta + \sin m\left(\frac{2\pi}{n} + \theta\right) + \sin m\left(\frac{2 \cdot 2\pi}{n} + \theta\right) + \dots + \sin m\left[\frac{(n-1) \cdot 2\pi}{n} + \theta\right] \right\} e_m/R$$

由上式可以证明,除了 $m=k \cdot n$ ($k=1, 2, 3, \dots$) 次谐波的误差之外,所有其他各次谐波的误差对读数值误差的影响,可全部消除。在测定所采用圆分度基准件各次谐波分量 e_m 大小的基础上,选取读数头的个数以消除 e_m 较大的那些谐波,可获得较理想的效果。

2. 位移量同步比较原理

精密机械中常要求各运动件的位移(线位移或角位移)有一定的数量关系。传统的

方法是用精密机构实现的,但这种方法所要求的精密机构传动链长、结构复杂、工艺难度大。近年来的方法是用激光、光栅、磁栅以及电子技术将作同步运动的部件建立位移间的特定关系,进行直接比较,即所谓位移量同步比较原理实现的。

例如, YA7232B 型齿轮磨床蜗杆砂轮与被磨齿轮间的范成运动不是采用机械传动链,而是分别用电动机带动的。运动关系是采用图 1-6 所示的位移量同步比较系统控制的。三相交流异步电动机 1 带动光栅盘 2 及蜗杆砂轮 3 旋转。蜗杆砂轮的角位移由光栅读数头 7 检出,经齿轮选择控制器 8、整流控制器 9 及逆变控制器 10 送入变频器 11。变频器 11 输出不同频率的电压可改变同步电动机 6 的转速,再经变速箱 5 使工件 4 的转速 n_w 与蜗杆砂轮转速 n_g 、蜗杆砂轮头数 k 、工件齿数 z 符合如下关系:

$$n_w : n_g = k : z$$

采用位移量同步比较原理设计的还有丝杠动态精度检查仪、光栅式齿轮单面啮合综合检查仪、渐开线齿形测量仪等。

3. 误差补偿原理

精密机械设备的各个零部件,都存在加工误差和装配误差,这些系统误差,可以通过校正机构加以校正,使得设备的总精度提高;也可以在设备的终端,设置检测装置,将设备的总误差实时地测量出来,立即将误差量反馈,使设备终端经常处于理论位置,即得到了实时补偿。校正和实时补偿等误差补偿原理,应用范围非常广泛。例如应用于精密滚齿机、精密螺纹磨床、精密导轨磨床中的误差校正;精密计量光栅检刻仪、三坐标测量仪中误差的实时补偿等。

三、原理性设计

原理性设计是总体设计的关键之一,是为了满足设计任务提出的各项要求而进行的初步设计。

1. 工作原理的选择

现以磨齿加工为例讨论齿轮磨床的原理性设计。磨齿加工可以采用成形法或范成法。用范成法磨齿时范成运动可用钢带基圆盘、渐开线样板、齿轮传动、同步电动机传动等多种方案实现。各种方案的运动精度、调节范围、附件数量、系统复杂程度、适用范围各不相同。各种磨齿法应用的砂轮有成形砂轮、锥形砂轮、碟形砂轮、蜗杆形砂轮等,而各种砂轮的制造、修正难易不一,各种磨齿法的精度和生产率也有差别。因此必须根据设计任务和实际情况进行原理性设计,定出总体方案的初步轮廓。

2. 基准器件的选择

传统的长度基准器件,有以精密丝杠作为长度基准的,用于工具显微镜、长刻划机、螺纹磨床、机械式衍射光栅刻划机中;圆分度基准器件常为精密分度蜗轮,用于分度头、精密圆刻度机、高精度滚齿机中。近年来用光学分划元件(计量光栅尺和光栅盘)产生莫尔条纹来作基准,应用已逐渐广泛,适用于中、高精度的设备,诸如用于数控机床、三坐标测量仪等。

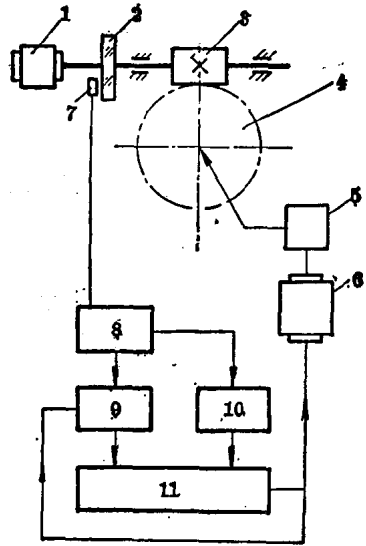


图 1-6 YA7232B 型齿轮磨床范成运动传动链同步原理

3. 运动方式的选取

运动方式的选取,是原理性设计的进一步具体化。

精密分度一般分为间歇运动与连续运动两种。传统的都用间歇运动,实现它的机构较简单,但它受动、静摩擦系数之差、局部形变和惯性等因素的影响,限制了精度的提高。所以在超高精度和重型精密机械中,已采用连续运动方式。运动方式需多方比较,结合实际条件进行选取。

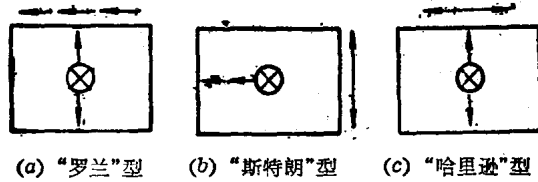


图 1-7 光栅刻划机的运动方式

例如,在“罗兰”型物理光栅刻线机上光栅毛坯作间歇分度运动,刻刀作往复重复运动(图 1-7 a),这种刻线机结构较简单,只是其工作台的运动直线性误差会引起光栅刻线的平行度误差。而在“斯特朗”型物理光栅刻线机上光栅毛坯作往复重复运动,刻刀作间歇分度运动(图 1-7 b),它的刀桥导轨的直线性误差不引起光栅刻线的平行度误差。“哈里逊”型则是光栅毛坯作等速连续运动,刻刀作等速往复重复运动(图 1-7 c),它的精度很高,一般用于大型天文光栅的刻制。

4. 定位原理和总体结构方案的选择

机械结构类型很多(一般有卧式、立式、龙门式、悬臂式、积木式等),选择精密机械设备的总体结构方案和关键部件(包括传动、微动、校正、基准、主轴、导轨等部件)必须保证所要求的总体精度,工作稳定可靠,制造装配调整方便,并根据具体情况考虑设计的定位原理符合运动学原理或弹性平均原理。

按运动学原理考虑结构设计时,不允许有过多的约束。例如激光比长仪基座与床身之间采用三球支承,有五个约束,一个自由度,可减小床身与基座之间因温度不同而产生的热变形对精度的影响;当工作台移动时,床身与基座之间力的传递点不变,基座的变形几乎不变,安装在基座上的测量装置相对位置变动极微,保证了测量精度。

按弹性平均原理设计结构时,允许有过多的约束,此时利用材料的弹性变形使微小的零件误差相互得到平均。特别当零件较重、载荷较大时,如按运动学原理设计,则会产生点接触而变形大易磨损的问题,为了保证精度,宜采用多点、线或面接触。

第二章 精度分析与计算

精度是精确度的简称,是评价精密机械产品质量的主要技术参数,总体精度分析就是对决定产品总精度的各种误差进行定性和定量分析,其目的在于用最经济的手段达到产品的精度要求。

§ 2-1 概 述

一、精度分析的方法

在总体设计拟定方案阶段,应根据总体精度合理地确定产品各组成部分的精度,即所谓进行误差分配。在设计完成后,再按照已经确定的具体结构方案、结构参数、零部件的公差与技术要求等,计算总体精度,即所谓进行误差的综合。如果结果符合设计任务书规定的要求,便可按设计图纸进行试制,否则必须更改或重新设计图纸直至满足总体精度要求。采用的精度计算方法是否合理,计算的精度能否达到,最终要通过试制及检定来验证。如达不到预期精度,则要进一步研究分析其原因,并采取有效措施予以解决。

进行总体精度分析与计算可以采用理论分析计算法或实验分析统计法。对高精度机、电相结合的产品,则经常采用两种方法互相配合地进行,以取得满意的结果。

1. 理论分析计算法

根据已初步确定的产品设计方案或试验方案,逐项分析影响总体精度的误差来源,初步确定各单元的原始误差值,算出各单元的误差传递系数。然后确定部分误差的数值,把部分误差按其误差性质综合成总误差。这种方法称为精度的理论分析计算法。

初次合成的总误差往往超过规定的允许总误差,为此需要进行误差的调整和平衡,从原理、结构、制造和装配工艺等方面采取措施减小总误差,提高总体精度。

2. 实验分析统计法

实验分析统计法是对同类型成熟产品的精度,或几个初步拟定的新产品总体方案的模型精度,或已研制成功的产品精度进行多次重复测量,将所得数据用数理统计方法进行分析与处理,判断出影响产品精度的主要因素、主要误差的性质及其分布规律以及产品的总体精度是否满足规定要求。这种方法称为实验分析统计法。

上述两种方法各有优缺点。理论分析计算法的优点是对各种误差的计算比较详细,便于进行误差调整、平衡和再分配;缺点是计算所得的总误差往往与实际不符,这与误差合成式的本身是近似式、分析误差源可能有遗漏,或对某些误差只能给出估计值等原因有关。实验分析统计法则恰好相反。一般情况下,理论分析计算法多用于新产品设计,而实验分析统计法则多用于新研制产品的精度检定和老产品的精度复测。

二、各种精度的含义

在讨论精密机械设备的精度问题时,经常要用到一些有关精度方面的专门名词,今概要