

精密机床

於貽琛 郭大津 编著



同济大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了精密机床设计和计算的基本原则和方法。全书包括：总论、主轴组件的精度、静动态特性及设计、微量进给机构、定位检测装置、圆分度机构、校正机构、导轨、精密设备的隔振等八章。书中还扼要地介绍了精密机床最新发展的动态。

本书可作为高等工科院校机械制造专业和精密机械专业的教材或研究生参考书，还可供有关工程技术人员参考。

责任编辑 过馨葆

封面设计 陈益平

精 密 机 床

於貽琛 郭大津 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 14.4 字数：336 千字

1989 年 11 月 第 1 版 1989 年 11 月 第 1 次印刷

印数：1—2,000

定价：2.90 元

ISBN 7-5608-0445-4/TH·8

B

前 言

精密机械加工的研究和应用,不但反映在许多重要的科技领域,而且已与人们的工作与生活息息相关,其研究对象十分广泛。随着科学技术的飞速发展,精密零件的加工精度和几何精度的要求也在不断地提高。目前,国内外的精密加工水平已从能稳定地掌握在1微米级、0.1微米级,甚至于正向0.01微米及0.001微米级方向发展(如对空间技术中的火箭、人造卫星、宇宙飞船、陀螺仪的轴承、机器人、计算机外围设备、电子工业中的超大规模集成电路、精密机床、仪器仪表等的加工),也即机械加工已从一般的机械加工向精密加工或超精加工方向发展。

而精密机床是保证精密加工零件达到所要求精度和表面粗糙度的最关键手段。

目前,精密机床是精密加工研究的主攻课题,所以,在国外一些工业发达的先进国家(如西德、日本、瑞士、苏联等)的高等工科院校中都设置有精密机械工程系或专业;在国内,不但中国科学院有从事研究精密机械加工和设备的研究所,而且很多高等院校也相继成立类似专业。但到目前为止,国内只有用于一般机床与专用机床的《金属切削机床设计》教材,而无专门介绍精密机床及其设计内容的教材。

由于科研和研究生教学的急需,编者尝试为本校机械制造专业研究生开设、编写讲义并讲授《精密机床》课程。几年来,在教学实践和科研的基础上,加以修改、充实、整顿和完善,从而形成了本书。

从分析精密零件加工工艺中,可以发现机床的静、动态性能、进给运动的平稳性,误差的补偿及分度等问题是解决精密零件的精度和表面粗糙度的关键。而上述问题在一般的机床设计书籍中没有专门介绍。为此,本书尝试把以上关键分解为精密机床在解决加工精度和表面粗糙度方面的几个关键部分——即总体设计、主轴组件的精度及其静动态特性、微量进给、定位检测、分度、误差的补偿、导轨及机床的隔振等,分别列成八章作为本书的体系,并进行较系统而详细的阐述。

本书由於貽琛和郭大津共同编写,并经胡志容同志审阅。

本书可作为高等工科院校机械制造专业或精密机械专业的教材,还可供有关工程技术人员阅读参考。

本书在同济大学机械学院院长侯镇冰教授指导下编写的。在编写过程中,上海交通大学林益耀教授提了很多宝贵意见,并得到了许多科研、设计、工厂和兄弟院校的专家学者的支持和帮助。特此表示衷心的感谢。

由于本书所涉及的内容和范围较为广泛,编者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免有错误和缺点,敬请读者批评指正。

编者

1986年4月

目 录

第一章 总论	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 精密设备总体设计的主要原理与原则	3
一、阿贝误差原理	3
二、运动学设计原理	5
三、平均效应原理	7
四、变形最小原则	9
五、材料尺寸稳定性原则	13
六、机床造型	14
第二章 主轴组件的精度、静动态特性及设计	16
§ 2-1 概述	16
一、主轴组件的功能、组成与类型	16
二、基本要求	16
§ 2-2 影响主轴组件旋转精度因素的分析及改进措施	17
一、滚动摩擦型主轴组件的旋转精度分析	17
二、滑动摩擦型主轴组件的旋转精度分析	20
三、提高主轴组件旋转精度的措施	24
§ 2-3 影响主轴组件静、动刚度的因素分析及其提高措施	25
一、影响主轴组件静刚度的因素	25
二、影响主轴组件动态性能的因素	27
三、提高主轴组件静、动刚度的措施	30
§ 2-4 主轴组件设计	31
一、主轴	31
二、主轴轴承	31
第三章 微量进给机构	63
§ 3-1 微量进给机构的功用与要求	63
§ 3-2 微量运动的方案	63
§ 3-3 常用微量进给机构	65
一、机械式微量进给机构	65
二、电气机械式微量进给机构	68
§ 3-4 特殊的微量进给机构	69

一、弹性变形式的微量进给机构	69
二、热变形式微量进给机构	70
三、静压轴承微量进给机构	72
四、采用斜面或正弦尺原理的微量进给机构	78
§ 3-5 发展中的微量进给机构	78
一、磁致伸缩式微量进给机构	78
二、气动断线进给机构	81
三、压电式微量进给机构	82
第四章 定位检测装置	84
§ 4-1 概述	84
一、位移检测装置的分类	84
二、基准部件的比较	84
三、基本要求	85
§ 4-2 位移检测装置的基准部件	85
一、机械式基准部件——精密定位丝杠副	85
二、光学式检测装置	91
三、电磁感应式检测装置	103
四、激光检测装置	122
第五章 圆分度机构	127
§ 5-1 概述	127
一、功用	127
二、组成	127
三、分类	127
四、基本要求	127
§ 5-2 圆分度机构及其主要特点	127
一、机械式分度机构	123
二、电磁分度	147
三、圆光栅	150
四、激光干涉式精密分度	151
第六章 校正机构	155
§ 6-1 概述	155
一、校正机构的工作原理	155
二、补偿运动的要求	157
三、校正机构的类型	157
§ 6-2 提高移动精度的校正机构	157
一、机械校正机构	157

二、光学校正机构	160
三、感应同步器的校正装置	162
四、激光——光栅反馈校正装置	164
五、数控校正法	166
§ 6-3 提高分度精度的校正机构	167
一、大周期误差校正机构	167
二、小周期误差校正机构	171
三、传动链累积误差和周期误差同时校正的校正装置	173
四、伺服电机校正机构	175
五、液压伺服校正机构	176
第七章 导轨	177
§ 7-1 概述	177
一、导轨的作用及特点	177
二、导轨的分类	177
三、导轨的基本要求	178
§ 7-2 滚动导轨	179
一、滚动导轨的特点	179
二、滚动导轨的结构形式	180
三、滚动导轨结构尺寸的确定	184
§ 7-3 静压导轨	190
一、液体静压导轨	190
二、气体静压导轨	196
第八章 精密设备的隔振	201
§ 8-1 概述	201
一、隔振的目的与任务	201
二、隔振设计的原始资料和步骤	201
三、环境振动	202
四、常用精密机床的允许振动	202
§ 8-2 隔振原理	203
一、单自由度隔振系统	204
二、多自由度隔振系统	206
§ 8-3 隔振系统设计要点及隔振措施	209
一、隔振系统设计要点	209
二、主要隔振措施	210
三、其它隔振措施	212
§ 8-4 降低隔振系统固有频率的措施	215
参考文献	216

第一章 总 论

§ 1-1 概 述

精密机械加工的研究和应用,不但应用在许多重要的科技领域,而且已与人们的工作与生活息息相关,其研究对象十分广泛。例如在空间技术中的火箭、人造卫星和宇宙飞船;自动化技术中的机器人、机械手、计算机的外围设备;电子工业中的超大规模集成电路;精密机床和仪器、仪表;钟表、照相机等领域。既使一些现代化的办公室和生活用的设备,也日益向精密化方向发展。

从技术发展的历史来看,精密机械加工的研究和发展在很大程度上取决于不断提高的零件加工精度和相应的精密机床设备。在 50 年代,最高加工精度只能达到微米级及亚微米级($1\sim 0.1\mu\text{m}$)——当时采用在原有习惯设备的基础上,以缩短传动链、加强润滑冷却、提高传动链各环节精度等措施,解决了当时的精度问题;到60年代,由于人造金刚石等高级刀具、磨具材料的大量应用,特别是激光干涉仪的出现,使最高机械加工精度达到了超微米级($0.1\sim 0.01\mu\text{m}$);进入 70、80 年代的目标则是毫微米级($0.01\sim 0.001\mu\text{m}$),如航天技术用的陀螺仪的轴承、电子工业上的超大规模集成电路和光学工业的集成光路等,都希望加工精度达到毫微米级,以减小产品体积,提高产品功能和效率并降低成本。

机械产品在不断地提出更高精度的要求,那么必定会出现更精密的机械加工设备来满足和适应这种要求。就精密机械加工设备的目前水平而言,其加工精度已达到了 $0.1\mu\text{m}$ 以内的水平,如美国 Y-12 工厂研制的 Moore 车床,日本丰田精机的 AHP50-32 超精车床,其主轴旋转精度为 $0.025\mu\text{m}$,加工有色金属零件的粗糙度达到 $Ra0.01\mu\text{m}$;西德 Heidenhain 公司的 DS200/400 型转台,主轴旋转精度为 $0.02\mu\text{m}$;英国 Talycentric 转台达 $\pm 0.013\mu\text{m}$;我国也先后制造了不少精密机床产品,如主轴旋转精度为 $0.2\mu\text{m}$ 以内的 ST-186 型及 ST-222 型高精度磁盘车床、磨削相当于 5 级精度齿轮的 Y7431 型齿轮磨床;分度精度为 $\pm 0.1(^{\circ})$ 的多齿分度台;主轴晃动在 $0.07\mu\text{m}$ 以内的 QGG4C5 型光电圆刻机;为了赶超世界先进水平,国内不少单位正在研制加工工件圆度在 $0.2\mu\text{m}$ 以内的外圆磨床、定位精度为 $2\mu\text{m}$ 的坐标镗床、2—3 级的蜗轮母机、4 级精度的丝杆磨床、 $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ 的激光定位长刻机、 $0.1(^{\circ})$ 的圆光栅等等。

精密机床是根据精密加工的要求而设计制造的。就精密机械加工而言,主要的不外乎有下列几个典型方面:

箱体孔精密加工;主轴的精密加工;丝杠的精密加工;齿轮的精密加工;精密刻线……以及螺旋伞齿轮的特殊加工等等。

上述不同类型的精密零件均由各自相应的精密机床采取不同的措施和特殊关键装置来保证达到所要求的精度和粗糙度的。所以精密加工与精密机床间是相辅相成、有机地紧密联系着的,是同一体系中两个重要的环节。图 1-1 所示为其相互关系的方框图。从中可见精密机床为解决典型零件的精密加工中的精度和粗糙度所采取的关键措施为:

一、为保证被加工零件的尺寸精度和粗糙度，必须提高精密机床主轴旋转精度、进给的直线平稳性和机床主轴运转的平稳性，……，也即提高机床主轴部件的静、动态精度；

二、为保证被加工零件的尺寸精度和形位公差要求，必须提高机床主轴旋转精度、微量进给和低速进给的平稳性；

三、为了保证提高丝杠的螺距精度，除需提高传动链精度、主轴旋转精度、机床工作台

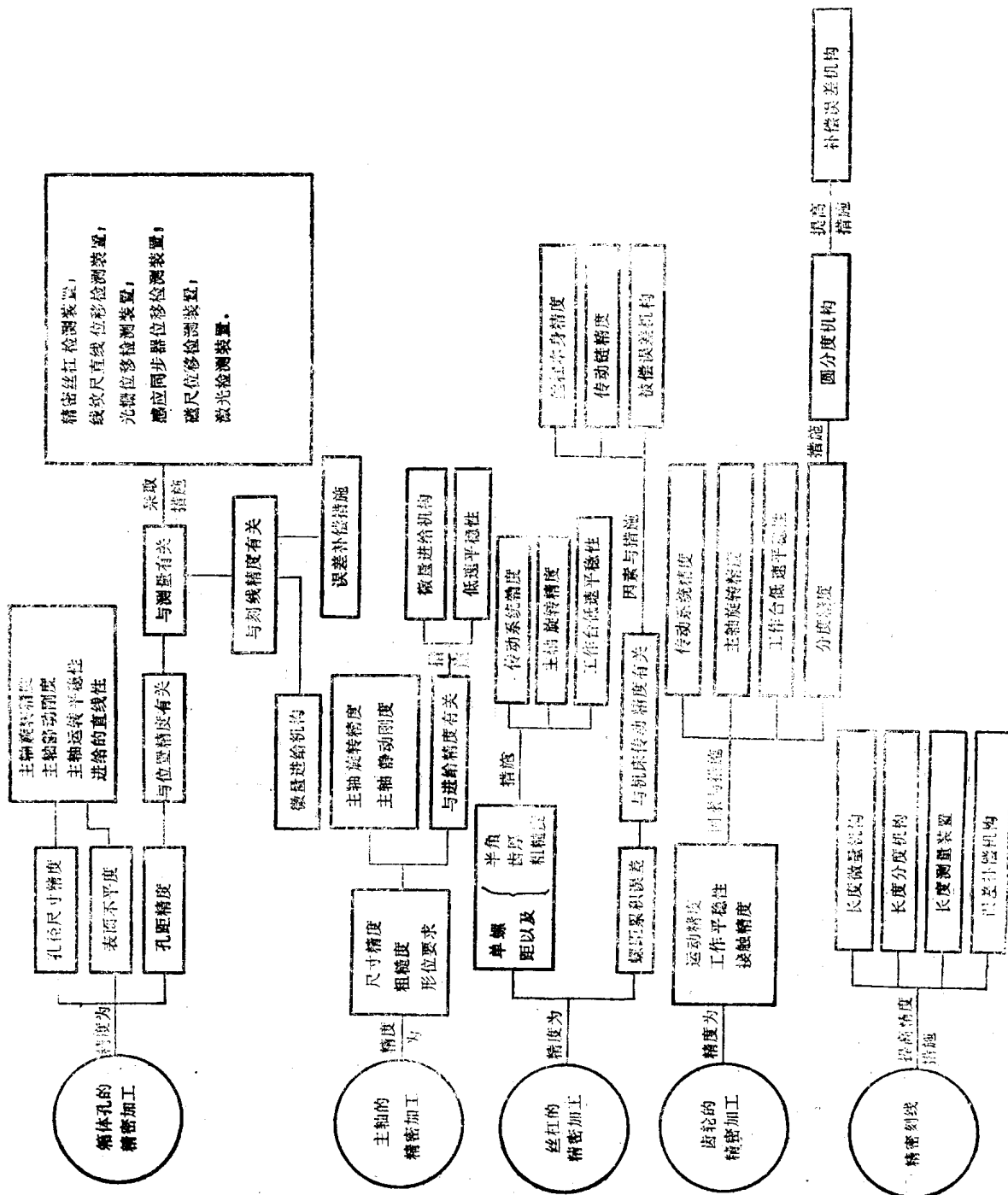


图 1-1 精密机床精度影响因素及提高措施

母丝杠精度以及工作台低速平稳性外，还须增设补偿误差机构——校正机构；

四、为提高每毫米内刻线数和刻线精度，除必须提高微量进给的精度和平稳性、长度分度精度外，更必须提高测量精度和增设误差补偿机构；

五、为保证齿轮加工精度，除必须提高刀具精度和传动链精度外，还必须提高圆分度精度以及增设误差补偿机构。

综上所述，典型零件的精密机械加工所采用的精密机床，在解决加工精度和粗糙度以及提高精度和粗糙度方面所采取的方法、措施，在装置上有很多共同之处——共性问题，即

- (一) 总体设计；
- (二) 主轴组件的精度及其静、动态特性；
- (三) 微量进给机构；
- (四) 位移定位检测装置；
- (五) 圆分度机构；
- (六) 校正机构；
- (七) 导轨；
- (八) 精密设备的隔振。

等八项，这些也就是精密机床在解决加工精度、粗糙度以及提高加工精度的关键技术问题。

因此，“精密机床”课程的内容就不采用习惯的方法和思路对各种不同精密机床进行全面的分别介绍；而是把精密机床在解决加工精度粗糙度方面的关键技术——共性问题——即上述八项精髓部分作为本课程的内容，并列成八章作较详细的阐述。

本章除上述对精密机床的概念、分类、国内外现状以及目前发展情况作了简要介绍外，还将在下面阐述一下精密机床的总体设计概念。

精密机床设备的总体设计，是设计的第一步，它指的是在具体设计之前，从总体角度出发，对所要设计的精密设备的各方面进行全面的考虑、分析和估算，形成总体方案。它的主要内容：设计任务分析、主要参数及技术指标的确定、方案制定、确定总体布局和精度分配等。在总体设计过程中，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、液压、气动原理图等；6. 总体设计报告（包括方案比较、设计原则的考虑、总体布局等）。

总体设计的上述内容，在其它“机床设计”书籍中也有阐述，而这些阐述均是针对普通机床的总体设计的。为此，本书在叙述总体设计时，不再重复与普通机床总体设计的相似部分，而只对精密机床本身所特有的部分——精密机床总体设计的主要原理与原则加以简要叙述。

§ 1-2 精密设备总体设计的主要原理与原则

一、阿贝误差原理

阿贝(Abbe)在1890年对设计精密仪器提出了一个重要原则，其要点是：长度测量时，标准件应安置在被测件测量中心线的延长线上，做到这一点就可避免一阶误差。运用这一原理对三坐标测量机、坐标镗床等总体布局有重要的指导意义。

采用图1-2(a)是符合阿贝原理的。设标准尺和待测工件串联布置在工作台上，测量支

架上安放两只读数显微镜 M_1 和 M_2 。如若导轨有制造误差和间隙, 图 1-3(a) 是反映工作台偏转 θ 角, 这时测量误差或加工误差

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= L - L \cos \theta = L(1 - \cos \theta) \\ &= L \left[1 - \left(1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \dots \right) \right] \approx \frac{1}{2} L \theta^2\end{aligned}$$

采用图 1-2(b) 形式, 则不符合阿贝原理, 如图 1-3(b) 所示, 其误差为

$$\begin{aligned}\Delta_2 &= H \cdot \operatorname{tg} \theta = H \left(\theta + \frac{1}{3} \theta^3 + \frac{2}{15} \theta^5 + \dots \right) \\ &\approx H \theta\end{aligned}$$

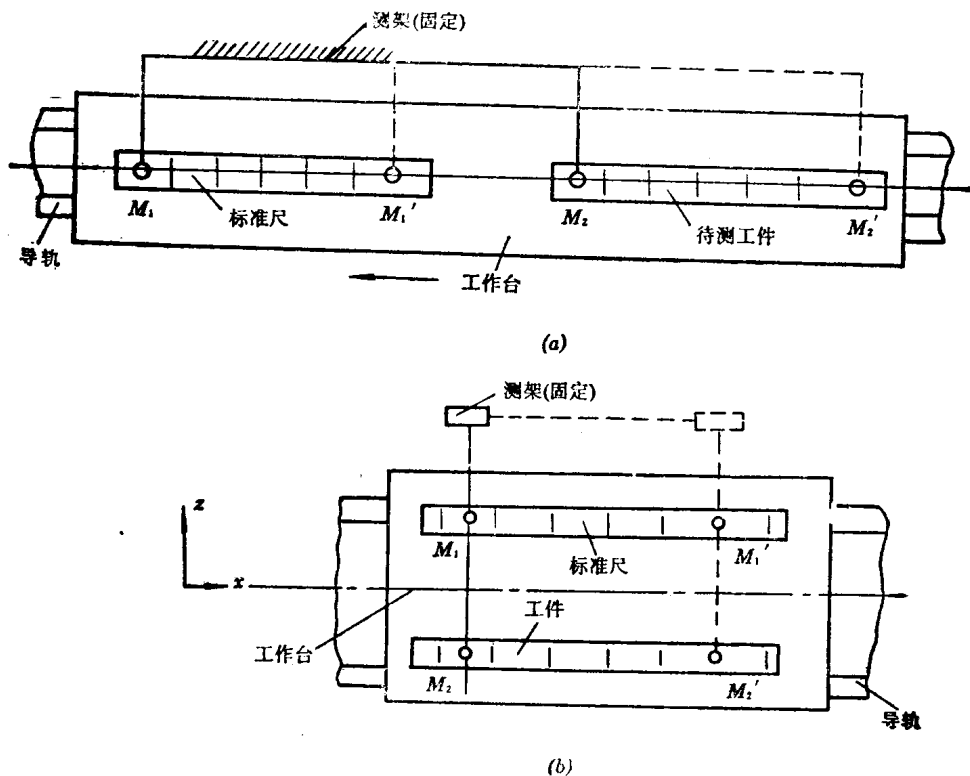


图 1-2 根据阿贝原理设计的例子

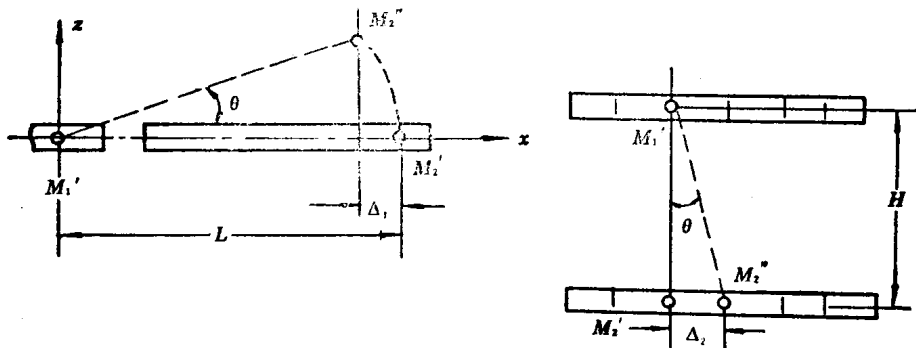


图 1-3 误差简图

显然, 当 $H = L$ 时, $\Delta_1 < \Delta_2$ 。通常 Δ_2 总是大于 Δ_1 的, θ 小时更明显。因 θ 总是微量的, 所以 Δ_1 就是二阶误差。而 Δ_2 是一阶误差。布局时希望尽量采用图 1-2(a) 的方案。但是在设计

时往往不能遵守,这是因为结构上难以实现或是结构过于庞大,这时应采取必要措施,尽可能减小阿贝原理误差。

如在坐标镗床和三坐标测量机中(见图1-4),由于横梁的变形或是导轨的变形都将由阿贝误差影响定位精度。其误差 $\Delta = \pm H \tan \theta$, 为了减少误差,采用下列改善措施: 尽可能缩小 H 值; 利用阿贝误差的方向性,采取工艺措施(因导轨曲线凸时,误差为正值;导轨曲线凹时,误差为负值); 利用两层拖板,使垂直阿贝误差和水平阿贝误差相互抵消;也可采用辅助横梁防止变形或采用修正补偿误差机构等措施。

二、运动学设计原理

一个空间物体具有六个独立的自由度,要使物体固定,必须用六个适当配置的约束加以限制,如果要求其物体只在某个方向运动,则需限制五个自由度。所谓运动学设计就是根据物体要求的运动方式,确定应施加的约束数。约束数不是任意确定的,一般一个平面上至多安置三个约束数,一条直线上至多安置二个约束数,约束应是点接触。并且在同一平面(或线)上的约束应尽量离开得远些。约束面应垂直于欲限制的自由度方向。

满足运动学设计有以下优点:

(一) 每个元件是用最少的接触点来约束的,每个接触点位置不变,这样其上的作用力可以预先进行计算,因而能加以控制。可避免由于过大的力引起材料变形,干扰机构的正常性能,且定位精确可靠。

(二) 工作表面的磨损及尺寸加工精度对约束的影响很小,用大公差可以达到高精度,

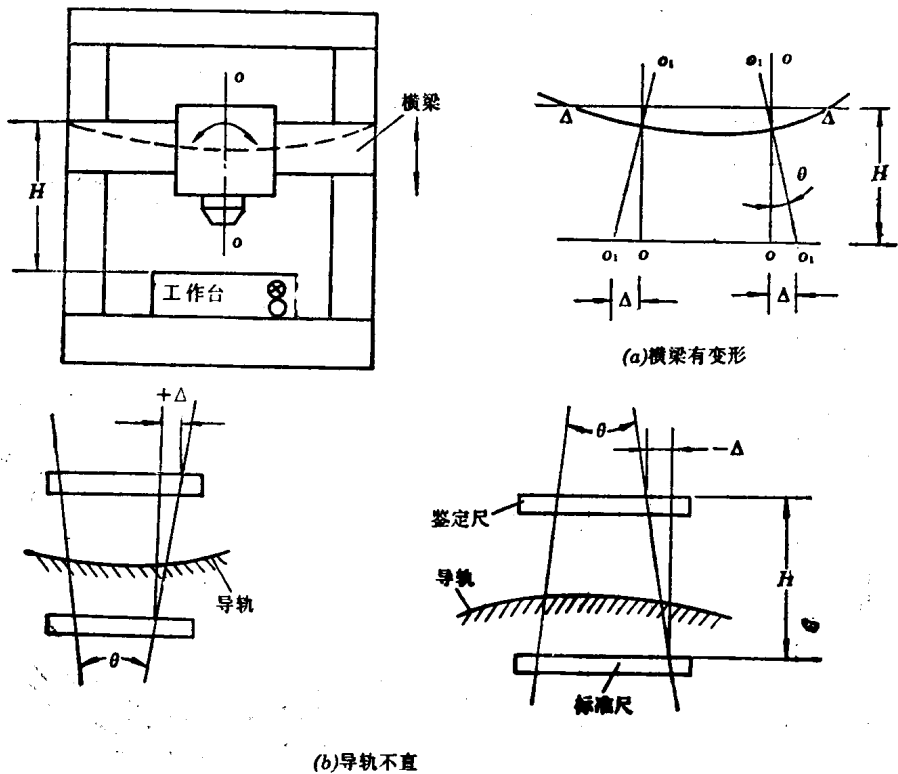


图 1-4 坐标镗床的横梁与导轨变形而引起的误差简图

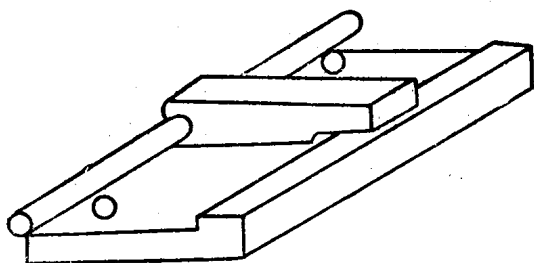


图 1-5 符合运动学设计的滑动导轨之一

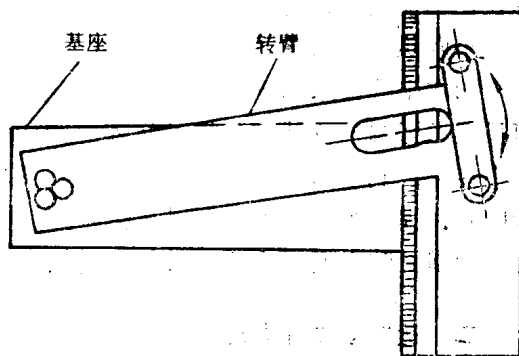


图 1-6 符合运动学设计的轴系之一

因而降低了对加工精度的要求。即使接触面磨损了，稍加调整就可以补偿磨损造成的位移。

(三) 若结构上要求能拆卸，则拆卸后能方便而精确地复位。

图 1-5 和图 1-7 是符合运动学设计的滑动导轨，具有一个移动的自由度和五个约束。图 1-6 和图 1-8 是具有一个转动自由度的轴系。在图 1-6 中，基座的左端固定了由三个钢球组成的球座。在转臂底面的左端固定了一个钢球，它支承在球座内旋转（形成三个约束）；而转臂底面的右端固定了两个钢球（形成两个约束），转臂旋转时这两个球就在基座平面上滑动。同样在图 1-8 中五只钢球形成的五个约束也是很明显的。

按照运动学设计，要求以“点”接触来加以约束。理想的点在实际中是不存在的。当零件较重，载荷较大时，接触处的应力很大，材料发生形变，而容易造成磨损，使原始精度丧失。因此按照运动学设计只能适用于负荷较小、相对运动速度低、工作精度要求高的场合。如精密设备中的光学测量部分。为了克服上述缺点就出现了半运动设计。

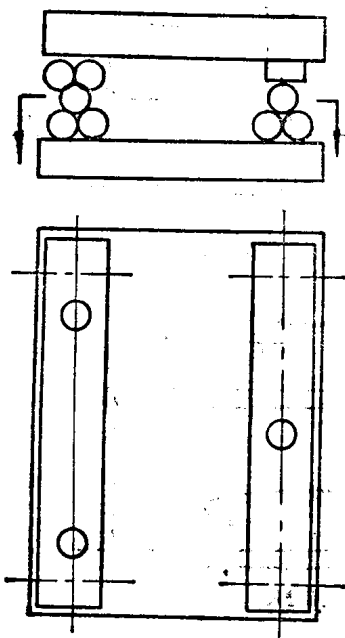


图 1-7 符合运动学设计的滑动导轨之二

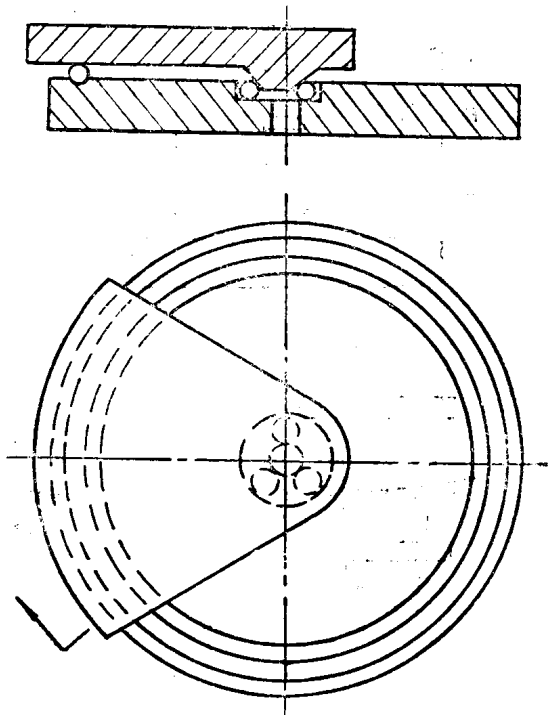


图 1-8 符合运动学设计的轴系之二

所谓“半运动设计”就是以小面积（宏观的）接触或短线接触代替点接触来约束运动，运动学设计六点定位原理仍保持不变，按这种方法设计的机械结构称为半机械运动学结构，如图 1-9 及图 1-10 所示。

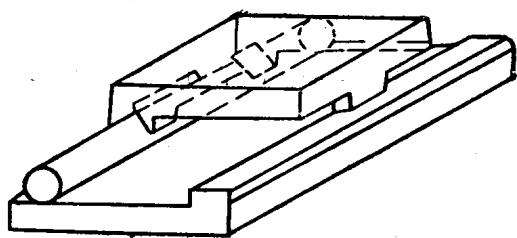


图 1-9 半运动学设计的导轨

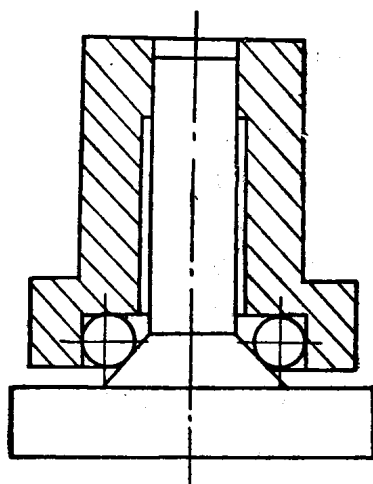


图 1-10 半运动学设计的轴系

三、平均效应原理

在精密设备设计中，运用六点定位原理可以避免静不定，减少干涉。这样，某一方向的精度决定于定位点或单线条精度，虽然较容易制造，但对单个定位点误差，不能起改善作用，系统精度始终低于单个定位点精度。而单位接触压力又较大，接触变形较大，随着时间增长，磨损增加，精度越来越低。为了克服这一缺点，发展了多个定位原理，应用平均效应的作用，使误差得到均化，提高部件精度。

（一）误差平均效应的机理

它是把单个定位误差起作用发展成为几个定位误差同时工作的系统。由于每个定位点的加工精度较高，可把系统误差全部消除。余下的将是随机误差，接近正态分布曲线分布在各实际尺寸的真值处，概率密度最大，误差大的（正值或负值）将是少数，愈大则愈少。两定位元件啮合时，将是一件尺寸累积误差最大处和另一件尺寸累积误差最小处接触。最少不低于两点接触。设其两定位件各为 m 、 n 点，则其啮合后的误差为：

$$\Delta\delta = \frac{1}{2}(\delta\varphi t \sum n - \delta\varphi' t \sum n) + \frac{1}{2}(\delta\varphi t \sum m - \delta\varphi' t \sum m)$$

式中： φ ——两定位件理论啮合角；

φ' ——两定位件实际啮合角；

t ——两定位件啮合齿距。

两个定位件接触后，由于应力集中，引起结构的弹性变形和磨损，使上述误差逐步接近，工作点迅速扩大，使其中 k 个误差同时对系统起作用，这时的系统误差将为 k 个误差的平均值。这就是通常说的平均效应。如图 1-11 所示，可见：

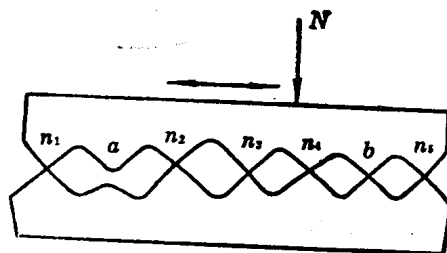


图 1-11

1. 个别误差较大的点(n_1, n_2, n_3)接触后, 在载荷作用下发生弹性变形和磨损, 尺寸减小, 使其它接近的点(n_2, n_3)也参加工作, 直到总面积满足 $\frac{N}{\sum(A_1 + A_2 + \dots + A_k)} < \sigma_{\text{临界}}$ 时工作稳定。

式中: N ——载荷;

$\sum(A_1 + A_2 + \dots + A_k)$ ——各接触点接触面积总和;

$\sigma_{\text{临界}}$ ——接触弹性变形所需的临界应力。

2. 误差较小的点(a, b)开始时接触不到, 对系统无影响。

3. 随着时间增长, 磨损增加, 使各点的尺寸形状逐步趋向均匀一致, 精度愈来愈高, 直到 n 个点共同参加工作为止。

4. 参加工作的点数愈多, 制造精度愈高, 结构愈易弹性变形, 即平均效应愈显著, 误差愈小。

(二) 结构设计应用误差平均效应原理应具备的条件:

1. 负荷力能自动消除间隙

要使 n 个误差同时参加工作, 达到弹性均分误差的目的, 两啮合件要求紧密接触, 负荷力能自动消除间隙。这样负荷力的大小要适当, 应小于或等于 $1/3$ 表面所允许的承载力, 否则磨损增大甚至咬死; 又应大于或等于每个点弹性变形的临界力, 以免不能实现弹性均分、减弱平均效应。

2. 要满足易于弹性变形条件

为了提高平均效应的效果, 应合理选择啮合件的单齿或中间件的尺寸形状, 常见的多齿盘齿形如图 1-12 所示, 其中的图 1-12(a) 是直线齿形, 图 1-12(b) 为曲线齿, 齿距 $t \leq 3 \text{ mm}$, 牙型 $\alpha = 60^\circ$, 齿部有沉割槽以增大弹性, 也可设计成弹性齿, 如图 1-12(c) 所示。图 1-12(c) 的齿厚 b 与槽深 t 之比为 $1:4$ 到 $1:8$, 这样, 每一齿都似一根悬臂梁, 在外力作用下, 齿就会产生一定的弹性变形。如要设计中间件, 必须是易变形的滚珠或滚柱才行。啮合件力学性能应符合虎克定律。作传动件用时 (如丝杠副、球面蜗杆副) 主动件为硬度高的淬硬钢, 从动件为较软的磷青铜。作分度件用时 (如多齿分度等) 宜用相同的材料, 一般用钢或淬硬钢。

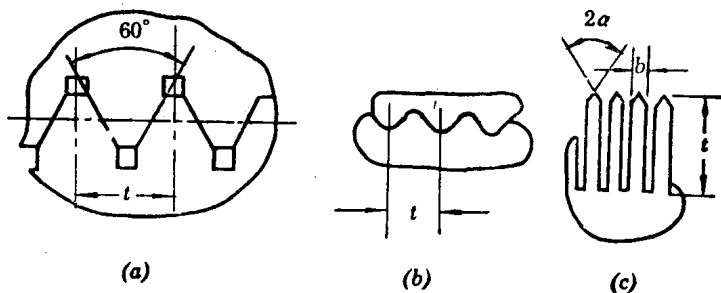


图 1-12 多齿盘齿形

3. 制造误差 $\leq$ 弹性变形误差

啮合件的加工精度决定其工作精度, 二者近似成线性关系, 由于可采用易位研磨法进行最后加工, 它的加工精度可提得很高。但研磨前的加工精度也不宜过低, 以免啮合不进, 难

以研磨，或大大增加研磨时间。一般研磨前的加工误差可比工作误差大 $10\sim 20$ 倍，由啮合件齿形弹性变形状况及研磨技术水平而定。如要求工作误差为 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ ，则加工零件误差可放大到 $5\sim 10\mu\text{m}$ ，经研磨跑合，接触面提高到 70% 以上时，才能获得较好效果。

(三) 平均效应原理的应用

在精密设备中，应用平均效应原理较多，按使用目的不同，分为导轨系统和分度系统二种。例如密珠回转轴系、光栅尺和同步感应器等都是应用平均效应原理而取得高精度的。

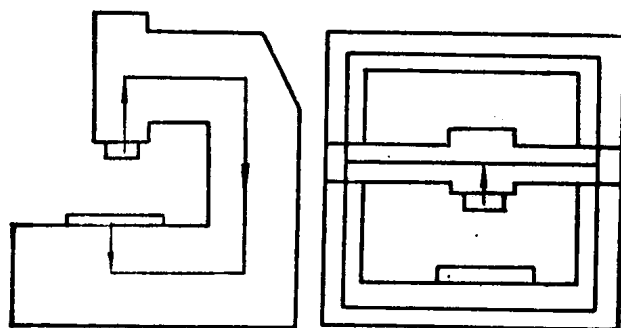
四、变形最小原则

精密设备各部件受到自重和外载荷的作用，必然会产生变形，为了保证精密机床的加工精度，其总体设计就应保证有足够的刚度和抗振性，即变形尽可能地小。

为此在总体布局时力求做到：

(一) 减少切削力引起的变形对定位精度和加工精度的影响

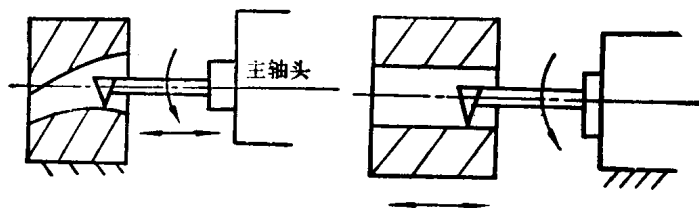
尽量应用封闭式结构（即框架式），如图 1-13(b) 所示的双柱坐标镗床，受力后在垂直面的作用力的流线是封闭的。图 1-13(a) 是开式结构的单柱坐标镗床，其作用力线是不封闭的，因而抵抗弹性变形的能力就低得多。



(a) 开式

(b) 闭式

图 1-13 不同总体布局的受力变形



(a)

(b)

图 1-14 不同运动方式的受力变形情况

(二) 减少运动部件由于运动而引起的变形

如在数控镗床上，主轴从主轴套筒中伸出时所产生的变形，是影响工作精度的重要因素。主轴伸出时由于自重下垂，又随着主轴伸出长度的增大，由切削负荷引起的弹性变形增大，它们都与伸出量的三次方成正比。如图 1-14(a) 比图 1-14(b) 的布局差。

又如工作台拖板移动到左右极限位置时,往往有一定的悬伸量,它会引起变形或歪斜,若是测量或加工孔距,误差影响较大,且其影响程度随加工高度的增加而增大。设工作台运动到前后两极限位置的倾斜度分别为 δ_{SEF} 和 $\delta_{SEB}(^\circ)$,则中心距在垂直面内离工作台高度为 $H(\text{mm})$ 处的孔距变化量必须满足下式(如图1-15所示):

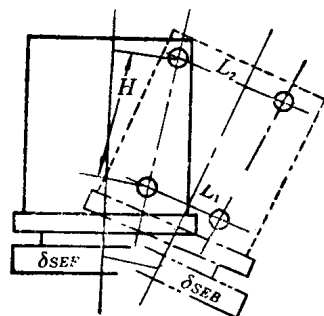


图 1-15

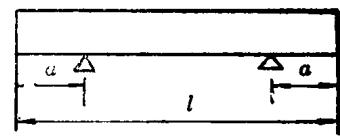


图 1-16 构件支承点位置

$$(\delta_{SEF} - \delta_{SEB}) \cdot \frac{H}{100} \leq \text{“孔中心距允差”} (10^{-2}\text{mm}), \text{结构上可加宽床身,或增加辅助导}$$

轨。不得已时才限制工作行程。如一矩形截面的构件(床身或基座),若两支承位置符合式 $a = 0.2232l \approx 2l/9$ 时(图1-16),中间和两端的挠度最小且相等。若 $a = 0.2386l \approx 6l/25$,则中间挠度为零,这是基本要求。但若有外载荷的作用(包括各部件的重量)及其作用位置的改变,都会使物件发生微小的变形。曾做过这样的试验,在2米刻线机床身中间固定一个龙门架,架上装上一个反射镜,床身端头安放一个光波干涉仪,然后将工作台慢慢移动后,光波干涉仪移动了三个干涉条纹,这时求得床身变形量为 $\Delta\delta = \frac{\lambda}{2} \times 3 = \frac{0.1582}{2} \times 3 = 0.9492\mu\text{m}$ 。

这项机械变形对于高精度的装备是不允许的,因为它不仅直接影响工件的加工或测量精度,而且它还会传递到与床身相连的部件如立柱上去,甚至放大,使立柱上的刀具或测量装

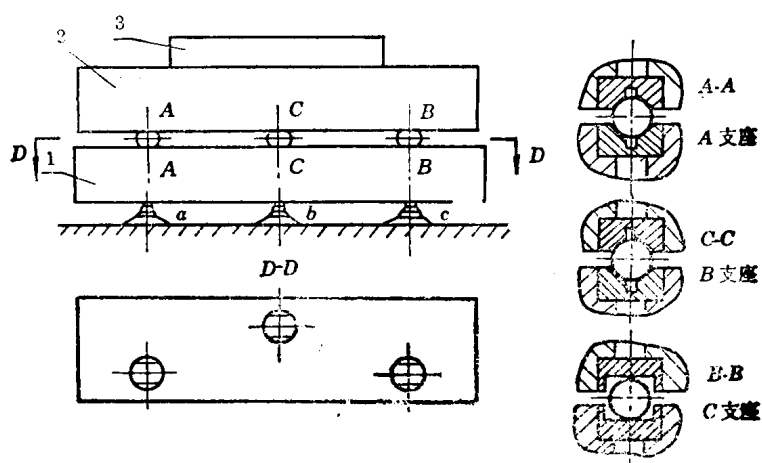


图 1-17 工作台、床身、基座三层结构形式

置相对工件发生变化,这一变化所造成的加工或测量误差将可能超过规定的技术要求。为此,精密设备的设计人员曾作了不少的研究工作,成功地采取工作台、床身、基座三层结构的形式,可以避免由于床身变形对其它部件的影响。如图 1-17 所示,床身 2 和基座 1 间是 3 个钢球支承 $A、B、C$,基座则用三个支点 $a、b、c$ 支承在地基上,钢球支承和基座支点在铅垂方向上是对应重合的。三个钢球的支承结构各不相同: C 是平面支承、 B 是圆锥形球窝支承、 A 是 V 形槽支承。这种结构,无论工作台 3 怎样移动,工作台、床身等重量始终通过三个球支承作用在基座上,并通过基座底下的三个相对应支点而直接作用在地基上,使固定在基座 1 上的立柱和其它部件将不受到床身变形的影响。这种结构已在激光干涉仪(精密机床上应用)、激光定位动态投影光电光栅刻线机等高精度测量仪器及装备上应用,对于设计相同类型的精密机床设备很有参考价值。

(三) 减少温度影响,使热变形最小

由于温度升高造成精密设备产生热变形的现象已成为测量和加工产生误差的一个重要因素。一台精密设备中的主要热源有下列几种:

1. 主轴变速箱中各传动件摩擦产生的热量,以及传动件与润滑油搅拌产生的热量,一方面经传动件直接传导给箱壁,另一方面经油池传导给箱壁。

2. 设备中液压系统产生的热量。

3. 由于切削过程产生的热量。

4. 照明、日光以及外界的辐射热等。

由于设备中的热源不是单一的,因此温度场往往表现为复杂的曲线。

热变形后对精度的影响大致分成以下三类:

1. 线位移变化。如主轴轴线在空间座标 x, y, z 方向上移动,从而破坏了测量头或刀具相对于工件的位置精度,影响了工件尺寸精度。

2. 角位移变化。如床身、工作台对主轴轴线等的平行度误差或垂直度误差,影响工作面对基面或基线的平行度和垂直度。这一影响往往不仅改变位置精度,而且还改变几何精度。

3. 移动部件几何精度变化。如工作台和溜板在运动方向的直线度误差和扭曲,同时又使各部件间相对移动角度的变化,导致工件尺寸和形位的偏差。

此外,热变形还改变滑动摩擦副内滑动面间的间隙,降低油膜承载能力,使工作条件恶化。

又如床身导轨的直线度误差对于全长来讲是高次微量,设导轨变形曲线为抛物线,如图

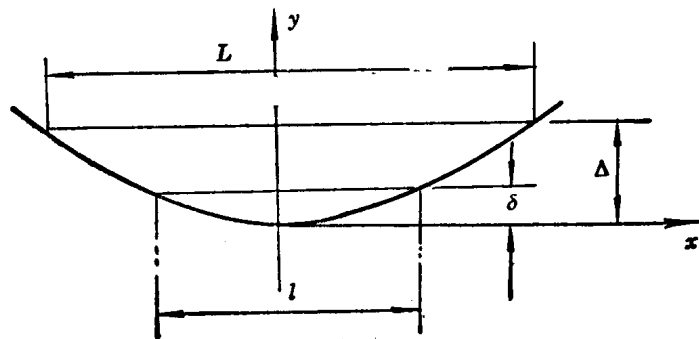


图 1-18 导轨变形曲线