



机器精度 分析与设计

● 桂定一 陈育荣 罗宁 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机器精度分析与设计

桂定一 陈育荣 罗宁 编著



机械工业出版社

本书介绍机器精度的基本概念，机器精度分析的基本方法，机构功能单元和功能结合精度分析，整机精度分析，在机器设计利用工艺手段提高机器精度的解析法及其他分析方法，机器精度设计中标准化成果の利用，以及反求设计中的公差反求。

本书用实例体现概念和方法，贴近实际，易读并实用。适合于机器设计制造技术人员和机械类专业师生阅读，并可作为机械类专业教学用书。

图书在版编目（CIP）数据

机器精度分析与设计/桂定一等编著. —北京：机械工业出版社，
2004.9

ISBN 7-111-14931-9

I.机... II.桂... III.①机械—精度—分析 ②机械—精度—设计... IV.TH115

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 070394 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：李万宇 责任编辑：蒋有彩

责任印制：石冉

保定市印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·5.875 印张·215 千字

0 001 —4 000 册

定价：18.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

一些资料提出，机器（械）精度设计是一门综合性应用技术基础学科，它关联着机械原理与设计、质量管理与控制、材料学、制造工艺学等许多学科，并以信息技术、实验技术为支撑。诚然，随着社会的进步和科技水平的提高，机器，作为人类活动的重要物质资料，被赋予越来越高的功能要求、可靠性要求、经济性要求、环境要求，许多情况下还有寿命要求。对机器的高要求必然推动机器设计理论和方法的完善和发展。机器精度设计作为机器设计的重要内容（领域）之一，必须完善和发展。作为学科，基础概念体系和基础理论体系是必须的；作为实践技术，基本方法学体系是必须的。我们当然希望，方法学体系能够牢固地建立在相应基础概念体系和基础理论体系上；我们还应该看到，总是在一定“方法”下的实践的进步必然促进概念体系和理论体系的完善。本书描述的是机器精度设计的实践技术层面，没有试图建立关于机器精度设计的概念和理论“体系”。如果这一点不符合您的需要，您应该放下这本书。

实践技术是方法学体系的基础，方法学体系是实践技术的升华。虽然本书在描述机器精度设计的实践技术时力图体现这一升华，但实际上在方法学体系上仍然是粗线条和不完善的。如果这一点不符合您的需要，希望您继续看下去并参与构建这一体系。

实际上，迄今为止，机械类专业教学内容中，机器精度设计没有应有的份量，机械类专业学生没有受到该方面的足够训练，机器精度设计是教学和生产实践中的薄弱环节。与影随形的是机器精度设计理论和方法的不完善。现实需要是理论建设的最有意义的推动力。本书希望为此做一点基础工作，并希望以实例说明来体现：用实例体现概念，体现方法；用较多的实例体现较多的概念，较多的方法。量的增多必然带来质的飞跃。相信许多已做过和正在做同类工作的人有着类似的想法。本书的内容构架是：机构功能单元和结构功能单元精度分析和设计解析法实例，整机精度分析和设计解析法实例；在机器设计阶段利用工艺手段提高机器精度的解析法实例；对以上对象和阶段的其他分析方法实例。概言之，本书是以实例为基本内容的（虽然偶有“总结归纳”）。对读者来说，有意义的“体现”是您自己的体会，请您在阅读时重在实例，不要把书中的“总结归纳”当回事。

IV

本书除自撰部分内容外，一些内容是对书末所列参考资料内容的修改整合，一些内容为国家标准内容的整合。对于所使用资料的作者和标准发布者，表示衷心感谢。

对于书中谬误，恳请关注和指正；还希望得到完善机器精度设计方法学体系的指导意见。

希望本书能对机器设计制造的新从业者和机械类专业学生有所裨益。

桂定一
于 2004 年春

目 录

前言

第 1 章 机器精度与机器精度设计	1
1.1 机器精度的含义	1
1.2 机器精度设计	2
1.2.1 机器精度设计的基本内容	2
1.2.2 机器精度设计的基本类型	3
1.2.3 机器精度设计原则	6
1.2.4 精度储备	8
1.3 机械加工成本与加工公差	10
1.3.1 加工成本与加工公差关系的实验曲线	10
1.3.2 基于初等函数的加工成本与加工公差模型	12
1.3.3 加工成本与加工公差关系的定性图、表	13
1.4 机器精度设计的一般步骤	14
1.4.1 明确设计任务和技术要求	14
1.4.2 调查研究	15
1.4.3 总体精度设计	15
1.4.4 具体结构精度设计计算	15
第 2 章 机器精度分析的基本方法	16
2.1 尺寸链	16
2.1.1 尺寸链的基本概念	16
2.1.2 尺寸误差的主要分布特征	21
2.1.3 装配尺寸链的解算	24
2.2 微分法与广义尺寸链	33
2.3 现实机构法	35
2.3.1 现实机构法的含义	35
2.3.2 现实机构法分析体系建立及分析举例	36
2.3.3 用现实机构法分析齿轮参数误差	37
2.4 机器精度试验分析与动态分析	39
2.4.1 机器试验的一般应用	40

2.4.2	变速器噪声试验.....	40
2.4.3	高速凸轮机构的动态分析.....	41
2.4.4	高速凸轮机构的振动.....	43
第3章	机构精度分析.....	45
3.1	微分法分析机构精度.....	45
3.2	数值微分法分析机构精度.....	48
3.3	机构精度概率统计特性.....	50
3.4	机构精度分配方法.....	53
3.4.1	精度分配常用算法.....	53
3.4.2	精度合理调整.....	56
3.5	现实机构法分析机构精度.....	57
3.5.1	几何偏心引起的啮合线增量.....	57
3.5.2	几何偏心与齿圈径向圆跳动.....	58
3.5.3	几何偏心与公法线长度偏差、公法线长度变动.....	59
3.6	机构运动副的间隙问题.....	59
3.6.1	考虑运动副间隙的机构位置误差分析.....	59
3.6.2	平行四杆机构运动副间隙与杆长误差的关系.....	60
第4章	功能结合精度设计.....	62
4.1	相对运动结合精度设计.....	62
4.1.1	相对运动结合的分类.....	62
4.1.2	设计计算基本公式.....	63
4.1.3	干摩擦、半液体摩擦轴承及直线运动导轨的极限功能 间隙的计算.....	73
4.1.4	计算与选择实例.....	74
4.2	固定结合精度设计.....	78
4.2.1	形成固定结合的常用材料.....	79
4.2.2	形成固定结合的工艺方法.....	79
4.2.3	极限过盈的计算.....	82
4.2.4	计算与选择实例.....	88
4.3	定位结合精度设计.....	96
4.3.1	结合的主要形式.....	97
4.3.2	定位结合的主要考虑因素.....	99
4.3.3	定位结合常用配合的特性.....	101
第5章	整机精度分析与设计.....	103
5.1	机器设计任务书和机器精度分析设计的经济性原则.....	103

5.1.1	机器设计任务书.....	103
5.1.2	机器精度分析设计的经济性原则.....	103
5.2	机器精度分析的基本依据.....	104
5.2.1	从设计任务书的各项要求出发分析机器的几何精度.....	104
5.2.2	以结合功能要求和工艺条件为前提的精度设计.....	106
5.3	Z512 台钻精度分析与设计.....	108
5.3.1	Z512 台钻结构.....	108
5.3.2	源于台钻技术要求的精度分析与设计.....	108
5.3.3	结构功能要求和工艺条件下的精度设计.....	116
第 6 章	不完全互换和不互换下的精度设计.....	119
6.1	选择装配法.....	119
6.1.1	选择装配的形式.....	119
6.1.2	分组装配法.....	120
6.1.3	关于分组互换中考虑形位误差的分析方法.....	123
6.2	修配法.....	124
6.2.1	修配法中直线尺寸链的极值解法.....	124
6.2.2	修配的三种方法.....	132
6.2.3	修配环的选择.....	133
6.3	调节法.....	136
6.3.1	动调节法.....	136
6.3.2	固定调节法.....	137
6.3.3	误差抵消调节法.....	142
6.4	提高机器精度的结构和技术措施.....	146
6.4.1	传动齿轮齿侧间隙消除方法.....	146
6.4.2	四齿轮间隙消除机构调整原理分析.....	148
第 7 章	机器精度设计中标准化成果の利用.....	150
7.1	应用标准技术方法做精度分析与设计.....	150
7.1.1	齿厚极限偏差计算.....	150
7.1.2	最小实体要求的应用.....	154
7.1.3	孔组位置度公差计算.....	155
7.2	标准的关联应用.....	157
7.2.1	齿轮坯的精度.....	157
7.2.2	中心距和轴线的平行度(箱体公差).....	161
7.2.3	轴承与轴和外壳配合的选择.....	163
7.3	标准的直接应用.....	168

第 8 章 反求设计中的公差反求	170
8.1 反求工程与反求设计	170
8.1.1 反求工程的意义	170
8.1.2 反求设计	171
8.1.3 反求设计的共性问题	171
8.2 已知机械设备的反求设计	172
8.2.1 机械设备反求设计的特点	172
8.2.2 机械设备反求设计的一般过程	173
8.2.3 功能分析与分解	173
8.3 设备及其零部件的测绘分析	174
8.3.1 设备功能分析与设备机构简图绘制	174
8.3.2 重要功能元分析	174
8.3.3 零件测绘的一般方法	176
8.4 公差的反求	176
8.4.1 实测尺寸数据的处理基础	176
8.4.2 基本尺寸的反求	177
8.4.3 配合基准制的判别	177
8.4.4 配合尺寸中极限偏差（公差）的反求	178
8.4.5 形位公差的反求设计	178
8.4.6 表面粗糙度的确定	179
参考文献	180

第 1 章 机器精度与机器精度设计

1.1 机器精度的含义

精度是机器及其机构、部件、零件最重要的评价指标之一。机器精度定义为实际机器与理想机器的性能或运动规律的偏差。

首先讨论单个机器的精度描述。如图 1-1, $y_0(x)$ 表示机器的理想性能或运动规律 (以下简称理想状态)。 $y_1(x)$ 、 $y_2(x)$ 表示对机器性能做重复实验时, 实际状态的波动界限, 用其均值 $y(x)$ 表示机器的实际性能或运动规律 (以下简称实际状态)。把机器实际状态对理想状态的偏离称作机器的正确性精度, 即

$$\Delta y(x) = y(x) - y_0(x) \quad (1-1)$$

而在参数 x_j 处, 其正确性精度为:

$$\Delta y_j(x_j) = y(x_j) - y_0(x_j)$$

把实际状态波动范围的大小称作机器的重复性精度, 用统计量 (一般指基于标准偏差的不确定度) 描述。

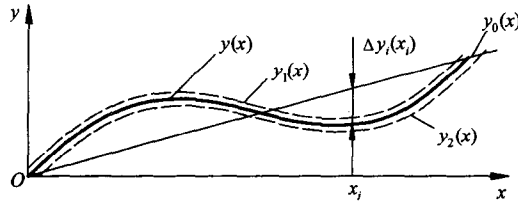


图 1-1 单个机器精度示意图

当评价对象为同类机器群 (以下称为机器) 时, 它们的实际状态会在某一范围内, 例如, 在图 1-2 所示 $y_1(x)$ 和 $y_2(x)$ 之间。而在 x_j 处, 这个范围的大小为 $\delta_j(x_j)$ 。同时, 还可以得到 $y_1(x)$ 和 $y_2(x)$ 的平均状态 $y(x)$, 同样把它定义为机器的实际状态。在 x_j 处, 实际状态对理想状态 ($y_0(x)$) 的偏差为 $\Delta y_j(x_j)$ 。 $\delta_j(x_j)$ 和 $\Delta y_j(x_j)$ 同为表征机器精度的指标, 前者为重复性指标, 后者为正确性指标。 $\delta_j(x_j)$ 由两部分组成, 一是单一机器的重复性精度 (上下虚线到各自相邻实线部分之和, 等于图 1-1 中的 $y_1(x)$ 和 $y_2(x)$ 之间的距离); 二是机器间实际状态的波动 (上述两条实线之间的距离)。它们都是机器结构

参数波动的结果, 简单地说, 机器精度设计的任务是使它们处于最合理(不是最小)的水平, 以此获得最佳的综合效益。而 $\Delta y_i(x_i)$, 则主要取决于机器原理和结构设计 correctness, 与制造水平关系不大; 并且, 单一机器和同类机器群的 $\Delta y_i(x_i)$ 之间, 不会有显著差异。

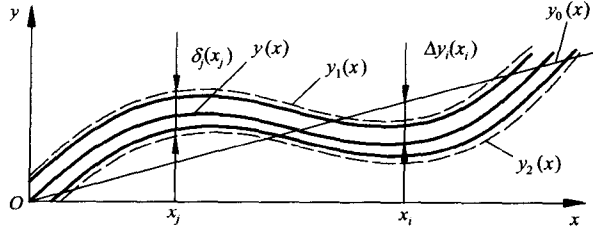


图 1-2 机器精度示意图

1.2 机器精度设计

机器精度设计是以实际参数对设计参数的变动以及实际参数自身的变动对机器功能和机器制造使用成本的影响为研究对象, 以保证机器约定功能实现、保持机器约定功能稳定性, 并获取最大综合效益为目的的工作过程。

1.2.1 机器精度设计的基本内容

机器是以结构为物质基础的, 机器设计最终以机器机构设计为其表达形式。机器结构必然会体现一定的功能, 而这些功能必须与机器约定功能及寿命、机器约定成本一致。机器结构的功能基本可归入运动功能和动力功能两方面, 服务于这两方面的设计称为运动设计和动力设计。反过来, 这些功能又要通过结构来实现, 结构的准确程度在很大程度上决定了运动和动力的准确程度。简言之, 机器结构设计是基本设计, 机器精度设计是针对机器结构中需要注意结构参数微小变化的部分。这个“微小变化”有三个基本点: ①“微小变化”的量是在制造误差数量级; ②“微小变化”可能造成机器功能参数不可容忍的改变; ③“微小变化”密切关联着制造成本。由此特征, 可以大致归纳出机器精度设计的基本内容:

- 1) 机器构件位置(位移)、角位置(角位移)变化与相关结构参数变化的关系。
- 2) 机器输出功率及某时刻输出功率的变化, 与相关结构参数变化的关系。
- 3) 机器原理的近似设计对机器功能的影响。
- 4) 由运动构件的质量所产生的运动危害。
- 5) 机器的可装配性(避免装配干涉)和装配准确性所需要的结构参数之

间的协调。

- 6) 避免机器运动干涉所需要的结构参数之间的协调。
- 7) 保持相对运动和运动件位置准确性所需要的结构参数之间的协调。
- 8) 保证联接强度和结构强度所需要的结构参数之间的协调。
- 9) 结构参数限制(几何参数精度)的标准化。

要做好以上工作, 需要许多基本理论和方法的支持。除运动设计、动力设计、强度设计等设计领域的理论和方法外, 还需要机械制造成本理论(机器几何参数波动限制与相应实现成本之间关系), 机械制造误差理论, 完全互换与不完全互换、不互换下的生产成本和使用成本比较方法等, 才能在机器精度设计过程中, 更好地把握功能参数波动——结构参数波动——结构参数实现成本之间的关系。

1.2.2 机器精度设计的基本类型

1. 按研究对象的设定状态分

这可以分为静态精度设计和动态精度设计。

(1) 静态精度设计 以机器的装配状态作为分析的设定状态, 只考虑结构几何参数波动对机器精度的影响。

静态精度设计的主要方法有: 微分法(也称解析法, 包括数值微分法)、转换机构法(也称作用线增量法、作图法)、尺寸链法等, 它们常被统称为计算法。各种方法之间有内在联系, 其表达形式之间可以互相转换。其中尺寸链法最为直观, 应用最为普遍。

(2) 动态精度设计 以机器的运动(工作)状态作为分析的设定状态, 考虑机器在运动过程中可能产生的各种附加误差, 如运动质量的危害, 阻尼、摩擦、非力学量(光、电)的改变对机器功能的扰动等。

与静态精度分析相比, 动态精度分析在理论上和方法上都不完善, 离形成理论体系和方法学体系更远。随着科学技术的进步, 现代机械产品越来越要求具有高效率、高速度、高精度特征。这些特征要在机器工作中体现, 因此, 动态精度分析对这类机器尤为重要和必须。动态精度分析理论和方法在需要的推动下将会加快发展。

但静态精度分析仍然是机器精度分析的基础。良好的静态精度分析可以减少各类动态误差对机器工作精度的影响。本书以静态精度分析为主, 对于动态精度分析只能举个别例子作为补充。

2. 按是否有精度反馈和补偿分

这可以分为开环精度设计和闭环精度设计。

(1) 开环精度设计 仅研究机器结构参数波动对机器精度的影响, 而机

器本身不带有精度反馈和补偿功能。这样的机器称作“机构机器”。开环精度设计是机器基本结构上的精度设计。

(2) 闭环精度设计 在开环精度设计基础上研究精度反馈和补偿。带有精度反馈和补偿装置的机器称作“系统机器”。按照控制论的方法，“系统机器”的动力学方程为：

$$\begin{cases} X(t) = F(X(t), u(t), f(t)) & X \in R^m \\ Y(t) = H(X(t), u(t), f(t)) & Y \in R^n \end{cases} \quad (1-2)$$

式中 $X(t)$ ——系统的状态变量。比如位移、速度、加速度、切削用量及刀具的状态参数等；

$u(t)$ ——系统输入变量；

$Y(t)$ ——系统的输出变量，与 $X(t)$ 可能代表的含义一样。 $u(t)$ 和 $Y(t)$ 既可能表示几何量、力学量，也可能表示各种非几何量及非力学量，如电学量或化学量等；

$f(t)$ ——机器系统可能承受的一些外来扰动，如电压的波动，机器基座的振动等。

图 1-3 中的虚线部分表示系统机器具有的反馈环节，其作用是检测输出信号或状态信号，与输入信号 $u(t)$ 作比较，再输入到系统中去。对机器设备而言，这样可提高加工的效率和有效地降低废品率。

图 1-3 表明，要使机器系统总的精度高，必须进行以下 3 方面的工作：

1) 分析由零件、结构或部件所组成的机器中，各种尺寸误差、形位误差及表面粗糙度对机器精度的影响。

2) 分析机器在运行过程中，外来扰动及机器本身参数的改变对机器精度的影响。

3) 分析机器在有检测反馈环节，如传感器系统时，传感器系统的精度对机器精度的影响。

由此可见，闭环精度设计包含了静态精度设计和动态精度设计的主要内容。这不奇怪，系统机器是结构更完备、功能更齐全的机器。可以设想，更

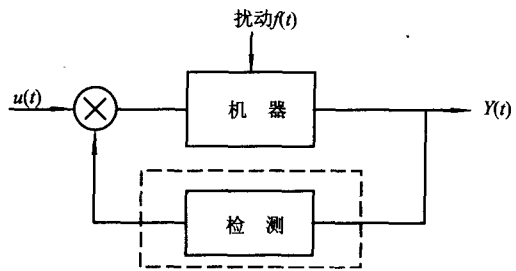


图 1-3 系统机器示意图

为精妙的机器是智能机器。

3. 按机器的机构层次分

这可以分为机器精度保证设计、机构精度保证设计、结合功能保证设计。

(1) 机器精度保证设计 从机器功能出发的精度设计，其主要工作是将机器功能的允许波动分解到机器的各组成单元（机构）以形成各组成单元参数的允许波动，又可称为工作功能保证设计。

(2) 机构精度保证设计 机构是具有独立结构和特定功能的结构单元。机构精度保证设计是将机构参数（结构参数和功能参数）允许波动，分解为更小的结构单元直至个体（零件）的相关参数允许波动。

(3) 结合功能保证设计 结合是指不同个体（零件）的相互关系，个体（零件）通过结合而形成整体（机构、机器）。结合本身不具有独立结构，但可以表现出特定功能，例如相对运动功能、固定功能、定位功能、联结功能等。结合功能保证设计是实现这类特定功能的精度设计。这种精度设计通常不从机器功能参数的允许波动出发，即它通常不在机器功能参数波动的分析链中，但它又是机器得以存在的基础。它的设计依据是相关理论，如流体润滑理论、强度理论等，故又可称作基于一般理论的精度设计。换句话说，在不同功能参数允许波动的机器中，存在有基于同样理论和方法的参数精度设计——结合功能的保证设计。

4. 按精度设计涉及的参数性质分

这可以分为几何精度设计和物理精度设计。

(1) 几何精度设计 在一个完整的机器精度分析设计过程中，如果只涉及几何参数，这样的分析设计过程称为几何精度设计。解决几何精度设计问题用计算法可得到理想结果，通常不需试验分析。显然，1.2.1 中的 1)、5)、6)、7) 属于几何精度设计。机器精度保证设计和机构精度保证设计多数属于几何精度设计。

(2) 物理精度设计 在精度分析过程中，如果涉及物理参数，这样的分析设计过程称为物理精度设计。这时的机器功能或零、部件功能（不是功能变动）的存在，总要基于这样或那样的物理原理，而这些物理原理的实现也需要结构参数的协调。解决物理精度设计问题时，计算法是基本方法，但有时需要试验分析的帮助。显然，1.2.1 中的 2)、4)、8) 属于物理精度设计。结合功能的保证设计在多数应用场合下属于物理精度设计。各类磁致、电致伸缩换能器的精度设计也属物理精度设计。

对机器精度设计的类型做较多的陈述，是希望系统和层次分明地说明机器精度设计的外延，以更好地说明机器精度设计的意义。

1.2.3 机器精度设计原则

机器种类繁多多样，但在做设计时总会遵循一些基本原则，作为机器设计的一部分的机器精度设计也不例外。

1. 功能保证原则

从前面的陈述中已经可以看出其含义，它是机器精度设计的出发点和归宿。

2. 互换性原则

互换性是指某一产品（包括零件、部件等）与另一产品在功能上能够彼此互相替换的性能。要使产品能够满足互换性的要求，就要使产品的几何参数（包括尺寸、宏观几何形状、微观几何形状）和物理参数（机械性能、理化性能等）充分相似。

机械零件几何参数的互换性，是指同种零件在几何参数方面能够彼此互相替换的性能。机械零件的形体千差万别，仅从一些典型零件来看，就有圆柱形、圆锥形、单键、花键、螺纹、齿轮等。虽然其形体各异，但它们都是由一些点、线、面等几何要素组成。实际零件在制造中由于“机床一刀具一夹具一工件”工艺系统有误差存在，致使其尺寸、几何要素之间的相互位置，线与面的宏观几何形状，表面的微观几何形状或多或少地出现误差，这些误差被称为尺寸误差、位置误差、形状误差和表面粗糙度。为了实现机械零件几何参数的互换性，就必须按照一定的要求，把这些几何参数的误差限制在相应的尺寸公差、位置公差、形状公差和表面粗糙度要求的范围内。

从设计看，可以选用具有互换性的标准化零、部件，从而使设计简化。从制造看，可以使零、部件分别制造、集中制造，批量的扩大有利于降低成本和保证质量；可以使装配采用高效、先进的方法，提高装配效率，保证装配质量。从使用看，互换性可使用户更换零、部件或修理方便，从而提高机器的使用效率。

互换性是现代生产所应遵循的一项基本原则，当然也是做精度设计时优先遵循的原则。具体到某一产品生产过程，出于其批量、规格、精度要求等因素，并不一定适宜于采用该原则。可以有互换性程度的不同，甚至不互换。

按照生产和使用过程中的互换性程度，可把互换性分为完全互换与不完全互换两类。

(1) 完全互换 是指零、部件加工好以后，不需经过任何挑选、修配等辅助处理，便能进入装配，且装配中也不需调整，就能满足约定功能要求的互换性。完全互换还包括概率互换（大数互换），这种互换是以一定置信水平为依据（例如置信水平为 95%，99%等），使同种的绝大多数零、部件加工好

以后，不需经过任何挑选、修配等辅助处理，在功能上即可彼此互相替换。

(2) 不完全互换 这是指同种零、部件加工好以后，在装配前需经过挑选或修配等辅助处理才能进入装配，或者在装配中需要调整，才能满足约定功能要求的互换性。

在不完全互换中，按实现方法的不同又可分为以下几种：

1) 分组互换。是指同种零、部件加工好以后，在装配前先进行检测分组，然后按组进行装配，仅仅同组的零、部件可以互换。例如滚动轴承内、外圈滚道与滚动体的结合，活塞销与活塞销孔、连杆小头孔的结合，都是分组互换的。

2) 调整互换。是指加工好的零、部件在装配时，要用调整的方法改变其中一个在部件或机构中的尺寸或位置，方能满足部件或机构的功能要求。例如燕尾导轨中的调整镶条，在装配时要沿导轨移动方向调整它的位置，方能满足间隙的要求。

3) 修配互换。是指某种零、部件加工好以后，在装配时要用去除材料的方法，改变它的某一实际尺寸的大小，方能满足其所在整体的功能要求。例如普通车床尾座部件中的垫板，在装配时对其厚度进行修磨，以满足车床头、尾顶尖中心的等高要求。

从装配和使用方便出发，人们总希望零件都能完全互换，实际上大部分零件能做到。但有些情形，受限于加工零件的设备精度、经济效益等因素，要做到完全互换就显得比较困难，或不够经济，这时就只有采用不完全互换甚至不互换方法了。

对于标准化的部件，如滚动轴承，由于其精度要求较高，按完全互换的办法进行生产不尽合适，所以轴承内部零件的组合（内、外圈滚道与滚动体的结合）采用分组互换。而轴承内圈与轴，外圈与壳体孔等轴承与外部零件的结合，采用完全互换。前者通常称为内互换，后者通常称为外互换。所有标准化的部件，当其内部结合不宜采用完全互换时，可以采用不完全互换的办法，但其与外部的结合尽可能采用完全互换，以利用户使用。

3. 经济性原则

经济性原则是一切设计工作都要遵循的一条基本原则，机器精度设计时主要应注意：

1) 达到精度要求的加工工艺性较好，易于组织生产，节省工时，降低管理费用。人们对于结构工艺性通常都比较重视，对精度设计工艺性则往往注意不够。

2) 合理的精度要求，避免多余功能和不必要的机器功能波动限制。

3) 合理确定互换性程度以降低对零件的加工精度要求, 达到降低机器成本的目的。

4) 注意精度储备, 以保证机器的使用寿命。

4. 匹配性原则

在对整机(或机构、结构)进行精度分析时, 若机器中各部分、各环节对机器约定功能影响程度不同, 应分别提出不同的精度要求, 即做恰当的精度分配; 若影响程度相同或基本相同, 精度分配时, 应使达到各部分各环节精度的工艺难易程度大体相当, 即做到工艺等价; 某一重要零部件或重要表面精度确定后, 与其关联的零部件或表面的精度, 以不致对其精度发挥有影响为限, 即做到精度协调。这就是精度匹配原则。例如, 一般机械中, 运动链中各环节要求精度高, 应当设法使这些环节保持足够的精度。对于其他环节, 则应根据不同的要求分配不同的精度。再如, 对于一台机器的机、电、光等各个部分的精度分配要恰当, 要互相照顾和适应。

以上四原则中, 功能保证原则是从机器存在意义角度提出的; 互换性原则是从社会生产经济性提出的; 经济性原则是从具体生产对象的经济性提出的; 匹配性原则既是生产对象设计过程的经济性原则, 又是生产对象设计过程中所应遵循的技术思想。

1.2.4 精度储备

在做机器零件的强度计算时, 通常要引入“安全系数”。因为计算方法往往不够精确, 原始数据会有误差, 机器在工作时也可能有超负荷等。引入安全系数后, 就使机器零件增加了强度储备, 可以保证机器工作的可靠性和寿命。但是, 在许多情况下, 整机(特别是精密机器与仪器)及其零、部件工作能力的丧失, 不是由于强度意义上的损坏, 而是由于其工作部分精度降低。“精度储备”概念从这个意义上引出。

精度储备可用精度储备系数 K_T 表示:

$$K_T = \frac{T_F}{T_k} \quad (1-3)$$

式中 T_F ——功能公差(functional tolerance), 即由功能要求确定, 在使用期限内某个性能参数的最大允许变动量;

T_k ——制造公差。

显然, K_T 应大于 1。国外一些公司多取 $K_T = 2$ 。按精度储备的含义, 即由功能要求确定的公差 T_F 不能全部用作制造公差, 还必须保留一部分作为“使用公差”。制造公差用于补偿加工、测量、装配等各种制造中的误差。使用公差则用于补偿磨损、变形等各种使用中的误差。这样有利于使用中较好