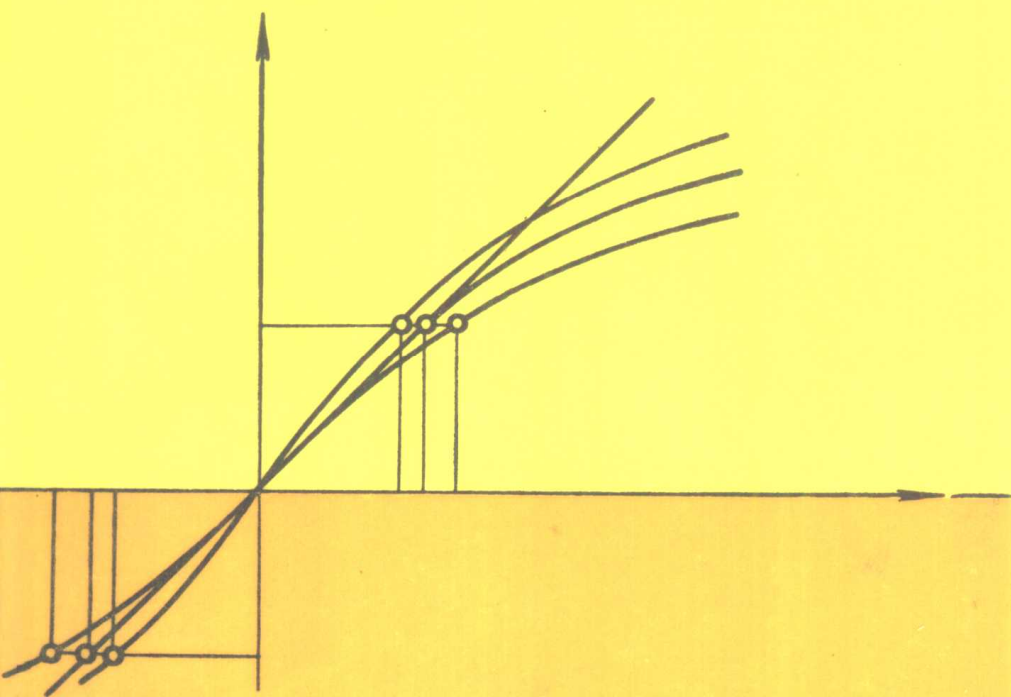


宋俊峰 编著



怎样减少

机械式量仪误差

—机构精确度理论及其应用

机械工业出版社

怎样减少机械式量仪误差

——机构精确度理论及其应用

宋俊峰 编著

机械工业出版社

本书分八章。前六章介绍了机构误差的基本概念，机械式量仪调修中减少机构误差的基本原则和主要方法，以及示值误差曲线的性质和应用。后两章介绍了机构精确度理论及其在量仪误差分析和机构精确度设计中的应用。

本书可供从事量仪设计制造，检定调修以及计量测试的人员使用，亦可供精密机械与仪器专业的科技人员和大专院校师生参考。

怎样减少机械式量仪误差 ——机构精确度理论及其应用

宋俊峰 编著

责任编辑 贺麓壘

封面设计 郭景云

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 · 印张107/8 · 字数 237 千字

1987年5月重庆第一版 · 1987年5月重庆第一次印刷

印数 0.001—3.850 · 定价：2.50 元

统一书号：15033·6529

前 言

继国家标准《公差与配合》(GB1800~1804—79)和《光滑极限量规》(GB1979—81)颁布之后,我国在1982年又颁布了与其配套的国标《光滑工件尺寸的检验》(GB 3177—82)。该标准中关于光滑工件的检验原则以及计量器具的选择方法,与我国过去所采用的原则和方法有根本区别。这使计量器具的允许测量精度一般都降低了1~2级,因而对计量器具的精度提出了较高的要求,以保证原有的测量精度。这一方面要求设计、制造新型高精度的计量器具,另一方面则要求减少目前在生产中使用的计量器具的误差,提高其测量精度。

在机械制造业中广泛使用着各种量具和量仪,二者之间一般以是否具有放大作用来区分。但工厂中习惯于把构造比较简单、精度比较低的称为量具,把构造比较复杂、精度比较高的称为量仪,因此百分表一类的机械式量仪,常被划入万能量具之列。这些具有机械放大作用的机械式量仪的误差,主要是由传动机构的机构误差引起的。本书系统介绍了在量仪设计制造和检定调修中,如何应用机构精确度理论来减少机械式量仪的机构误差,以提高其测量精度。

自1965年始,作者曾在刊物上发表过一些文章,探讨了机构精确度理论及其在量仪调修和设计中的应用,在此基础上编写了本书。考虑到读者的不同需要,本书前六章重点介绍了机构误差的基本概念,机械式量仪调修工作中减少机构误差的基本原则和主要方法,以及示值误差曲线的性质和应

用，主要供从事计量测试和量仪调修的人员使用。为便于具有中等文化程度和一定实践经验的同志阅读和应用，在叙述上力求深入浅出，并注意结合实例。对于必须引用的公式，主要介绍结论，并举例说明其应用方法。对于量仪调修工作中的一般性问题，本书不再赘述，请查阅书末所列参考文献。

第七、八两章比较系统地介绍了机构精确度理论及其在量仪误差分析和机构精确度设计中的应用，除可供从事量仪设计制造、检定调修的人员使用外，亦可供精密机械与仪器专业的科技人员和大专院校师生参考。

本书的部分内容曾得到天津大学蔡其恕、吴又芝教授的认真审阅，并曾推荐给《计量技术与仪器制造》等学术刊物发表，原稿承蒙河北工学院何贡副教授审阅，提出许多宝贵意见，在此一并致谢。

机构精确度理论是一门新兴学科，涉及数学、力学、机构学、误差理论等多学科的知识。机构精确度理论最早用于精密仪器设计，目前在其它机械设计中应用也很广泛。应用机构精确度理论来指导机械式量仪的设计和调修工作，可以减少工作中的盲目性，增强自觉性，从而提高量仪的测量精度，延长使用寿命。本书在这方面虽然作了一些尝试，但由于作者理论水平和实践经验所限，难免有错误和不当之处，敬请读者指正。

目 录

前言

第一章 机构误差的基本概念	1
§ 1.1 机构	1
一、机构、构件和运动副	1
二、机构的自由度	4
三、机构运动简图和机构示意图	8
四、机构放大比	13
§ 1.2 机构误差	18
一、理想机构和实际机构	18
二、原始误差和机构误差	20
三、由原始误差求机构误差	24
四、机构总误差	26
§ 1.3 机构误差与机械式量仪精确度	28
一、机械式量仪的精确度	28
二、机构误差与量仪示值误差的关系	35
三、机构误差的理论分析和实验测定	38
§ 1.4 机构精确度理论的应用	40
一、机构精确度理论在量仪设计制造中的应用	40
二、机构精确度理论在量仪调修中的应用	42
第二章 杠杆机构的误差与调整	45
§ 2.1 杠杆机构的分类	45
一、杠杆机构的分类和传动方式	45
二、杠杆机构的简化	52
§ 2.2 杠杆机构的机构误差	53

一、正弦机构的原理误差	53
二、正弦机构的零位置	55
三、正弦机构的线性误差、非线性误差及其调整	56
四、正弦机构调整量的计算公式	61
五、正弦机构的最佳调整	69
六、正切机构的机构误差	75
§ 2.3 量仪杠杆机构的误差分析与调修	79
一、杠杆比较仪的误差分析与调修	79
二、内径百分表杠杆机构的误差分析与调修	96
第三章 齿轮机构的误差与调整	117
§ 3.1 齿轮传动的机构误差	117
一、切向综合误差与周节累积误差	120
二、周节累积误差与齿轮偏心的关系	124
§ 3.2 百分表机构谐波误差的分析及其在调修中的 应用	128
一、百分表机构谐波误差的分析	130
二、百分表示值误差超差的调修	141
三、0~10mm百分表的误差补偿	151
四、补偿百分表轴齿轮偏心的调修	155
第四章 杠杆-齿轮机构的误差与调整	159
§ 4.1 杠杆-齿轮机构的分类	159
一、一级杠杆-齿轮机构	159
二、二级杠杆-齿轮机构	161
§ 4.2 量仪杠杆-齿轮机构的误差分析与调修	163
一、杠杆-齿轮式千分表的误差分析与调修	163
二、杠杆-齿轮式比较仪的误差分析与调修	168
三、其他量仪杠杆-齿轮机构的误差分析与调修	178
§ 4.3 杠杆机构与齿轮机构的误差补偿	187
第五章 其他传动机构的误差与调整	190

§ 5.1 斜面机构	190
一、弹簧式内径表的误差分析与调修	190
二、V形砧座千分尺的误差分析与调修	197
§ 5.2 扭簧比较仪的误差分析与调修	209
一、扭簧特性曲线	213
二、扭簧比较仪的线性误差与调修	213
三、扭簧比较仪的非线性误差与调修	216
第六章 误差曲线与量仪调修	219
§ 6.1 误差曲线及其性质	219
§ 6.2 误差曲线在量仪调修中的应用	233
第七章 机构精确度理论简介	236
§ 7.1 计算机构误差的基本原理与方法	236
一、机构位置误差和机构位移误差	236
二、机构位置误差的计算公式	238
三、原始误差独立作用原理	241
四、原始位置误差的分析计算方法	242
五、机构位置误差的传递	249
§ 7.2 基本机构原始位置误差的分析	251
一、连杆机构的原始位置误差	251
二、凸轮机构的原始位置误差	255
三、齿轮机构的原始位置误差	256
§ 7.3 机械传动系统位置误差的分析	257
一、一个自由度机构的位置误差	257
二、多自由度机构的位置误差	259
三、封闭式机构的位置误差	260
四、轮系的位置误差	262
§ 7.4 机构精确度设计	265
一、机构精确度设计方法	265
二、提高机构传动精度的原则和方法	273

§ 7.5 百分表的机构精度计算	277
第八章 机构精确度理论的应用	288
§ 8.1 误差曲线与量仪理论误差的方程式	288
一、误差曲线	288
二、量仪理论误差的方程式	293
三、一级和二级杠杆（杠杆-齿轮）机构的理论误差	299
§ 8.2 谐波分析法在量仪机构误差分析中的应用	308
一、周期函数与谐波分析	308
二、12点坐标法的计算原理和应用	312
§ 8.3 最佳近似函数理论及其在量仪机构误差分析 中的应用	318
一、最佳近似函数理论简介	318
二、最佳近似函数理论在量仪机构误差分析中的应用	323
参考文献	335

第一章 机构误差的基本概念

计量器具误差包括计量器具本身的内在误差和外部条件（基准、温度、测力等）带来的误差。前者主要指设计中存在的原理误差，以及由于元件的制造误差，装配误差和使用中的磨损所产生的误差。对于机械式量仪，这些误差都属于机构误差。本章首先介绍机构误差的基本概念，以及机构精确度理论的初步知识，以便在第二章至第六章中运用这些知识解决机械式量仪调修中的实际问题，减少机械式量仪的机构误差。对于机构精确度理论的系统性介绍，及其在量仪误差分析和机构精确度设计中的应用，将在第七、八章中讨论。

§ 1.1 机 构

一、机构、构件和运动副

1. 机构

机械式量仪是机械制造业中应用最广泛的计量器具。其基本原理是利用各种机械传动装置，对被测值进行机械放大或细分，然后读取被测值的量值。

在机械式量仪中采用了各种不同的机械传动装置，例如杠杆、齿轮、螺旋副等，这些机械传动装置统称为机构。所谓机构是由若干构件按照一定的联接方式组合而成的，用来传递预先确定的运动。例如百分表的机构由齿条、齿轮、指针等零件组成（图1-1），用来实现预先确定的运动：当齿条移动0.01mm时，指针转动一格，当齿条移动1mm时，指针转动一周。

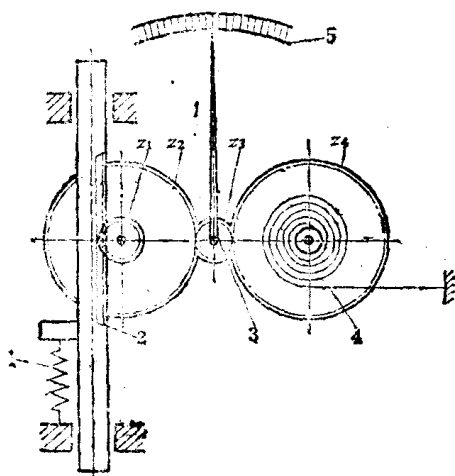


图1-1 百分表的传动机构

1—弹簧 2—齿条 3—指针 4—游丝 5—刻度盘
 z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_4 —齿轮

2. 构件

机构中的构件是机构的运动单元，它可能由一个零件组成，例如百分表的齿轮、指针；也可能是两个或两个以上的零件联结在一起的组合件，例如在百分表的齿条（测杆）上还联结着测头、限位螺钉等零件。

机构中有一个固定的构件，用来支承其他构件，并作为研究运动的参考坐标，这个构件称为机架，例如百分表的表体。机构中由外界赋予确定的独立运动的构件称为主动构件，简称主动件，例如百分表的齿条（测杆），由于主动件的运动而被迫作确定运动的构件称为从动构件，简称从动件，例如百分表的指针。

组成机构的所有构件都在相互平行的平面内运动，这样的机构称为平面机构，否则称为空间机构。常用机械式量仪

的机构多属平面机构。平面机构的运动可以简化为平面运动来研究。

3. 运动副

为了使机构传递预先确定的运动，两个构件之间的联接，既要保持相互接触，又要保持一定的相对运动关系，这样相互联接的两个构件组成了一个运动副。其作用是限制或约束构件的自由运动，去除不必要的运动，保留必要的运动。

以点或线接触的运动副称为高副，例如杠杆机构中平面与球面的接触——点接触（图1-2a），两个齿轮齿面之间的接触——线接触（图1-2b）；以面接触的运动副称为低副，例如螺旋副、滑动副等（图1-3）。

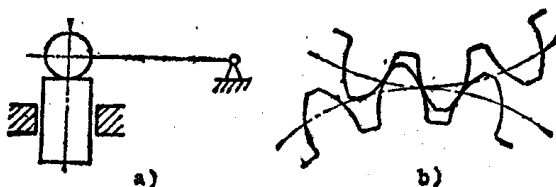


图1-2 高副
a)点接触 b)线接触

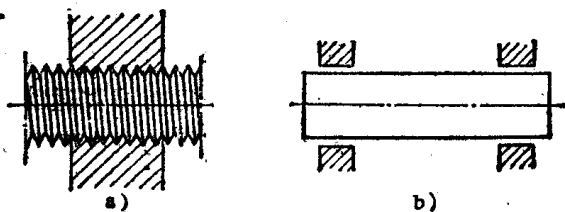


图1-3 低副
a)螺旋副 b)滑动副

二、机构的自由度

1. 运动副的自由度

一个构件在未与其他构件组成运动副之前，在空间可以产生6个独立运动，即沿 X 、 Y 和 Z 轴的3个移动和绕 X 、 Y 和 Z 轴的3个转动。因此任何尚未组成运动副的构件，都具有6个自由度。这就是说，要确定这个构件的空间位置，需要给定6个独立的运动参数。例如图1-4所示构件的空间位置，可以用 A 点的三个坐标 x_A 、 y_A 、 z_A 和轴线 AB 与三个坐标轴中任意两个坐标轴的夹角 α 、 β ，以及构件由某一起始位置算起，绕轴线 AB 转动的转角 γ 共6个参数来表示。

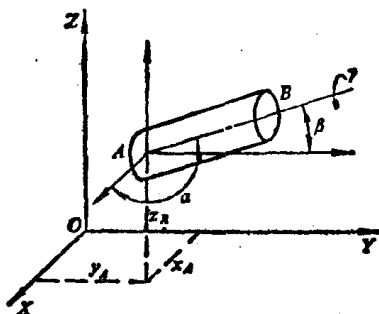


图1-4 未组成运动副的构件具有6个自由度

构件与其他构件组成运动副以后，由于两构件互相接触，构件的某些独立运动受到运动副的约束而消失，因此其自由度将减少，减少的数目等于约束的数目。又因为两个构件组成运动副以后，仍然要保证产生一定的相对运动，故运动副引入约束的数目最多为5个，而剩下的自由度最少为1个。

根据运动副引入的约束数目，可以把运动副分为5级。引入1个约束的运动副称为I级副，其运动自由度数为6—

$1=5$ ，引入两个约束的运动副称为Ⅰ级副，其运动自由度数为 $6-2=4$ ，依次类推。例如图1-5a所示球面-平面接触的运动副为Ⅰ级运动副，它具有一个约束，限制了构件沿 Y 方向移动的自由度，而保留了其余5个自由度；图1-5b所示圆柱-平面接触的运动副称为Ⅰ级运动副，它具有两个约束，分别限制了构件沿 Y 轴的移动和绕 Z 轴的转动，而保留了其余4个自由度。

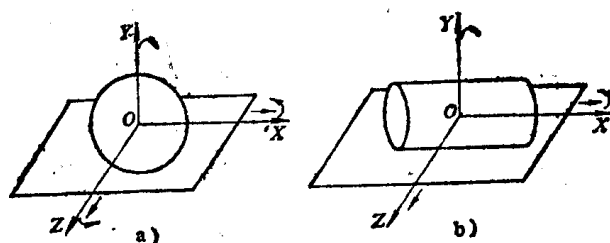


图1-5 Ⅰ级运动副和Ⅰ级运动副

a) Ⅰ级运动副 b) Ⅰ级运动副

图1-6a所示百分表的测杆与上、下导套组成的运动副属于Ⅱ级运动副，分别限制了构件沿 X 、 Z 轴方向的移动和绕 X 、 Z 轴的转动。如果在测杆上加上一个导向键（图1-6b），

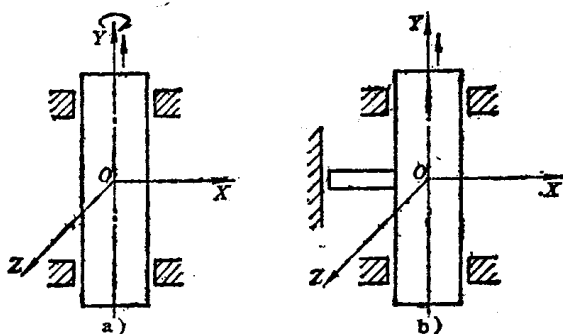


图1-6 百分表测杆与导套组成的运动副

a) 未加导向键为Ⅱ级副 b) 加上导向键后为Ⅱ级副

限制测杆绕 Y 轴的转动，就变成了 V 级副：构件只能沿 Y 轴移动。

常用构件运动副的简图符号和约束条件列于表1.1.应当说明的是，螺旋副构件虽然又能转动又能移动，但由于两种运动互相联系，只可能有一个是独立运动，故约束条件仍为5，亦为 V 类副。

2. 机构的自由度

机构能产生的独立运动的数目，称为机构的自由度。图1-7所示的四杆机构，只要使其中一个构件按照给定的规律运动，机构的运动便完全确定了。也就是说，要使机构具有完全确定的运动，只要有一个主动件即可，因此属于一自由度机构。

常用机械式量仪的传动机构都属于一自由度机构。在这类机构中，只要主动件（例如测杆）的位置确定下来，其余构件的位置也就都确定了。其他传动机构绝大多数也只有一个自由度。

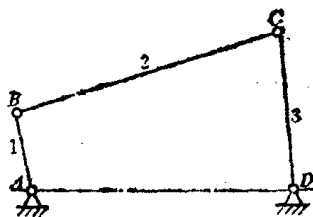


图1-7 四杆机构（一自由度机构）

1、2、3—杆

图1-8所示的五杆机构为两自由度机构。在这种机构中，仅仅使其中一个构件按照确定的规律运动，其余构件的运动仍不能完全确定。例如杆1在图示位置不动，杆2、3、4可能

表1-1 常用构件运动副的简图符号
(GB4460—84)

序号	名 称	基本符号	可用符号
1	具有一个自由度的运动副		
1.1	回转副 a) 平面机构 b) 空间机构		
1.2	棱柱副 (移动副)		 III ID
1.3	螺旋副		
2	具有两个自由度的运动副		
2.1	圆柱副		
2.2	球铰副		
3	具有三个自由度的运动副		
3.1	球面副		
3.2	平面副		

序号	名 称	基 本 符 号	可 用 符 号
4	具有四个自由度的运动副		
4.1	球与圆柱副		
5	具有五个自由度的运动副		
5.1	球与平面副		

位于图中实线的位置,也可能位于虚线或其他位置。为了使两自由度机构具有完全确定的运动,必须同时给机构以两个独立运动,即一般需要两个主动件。例如图1-8所示的五杆机构,如果杆1和杆4都是主动件,则机构将具有完全确定的运动。

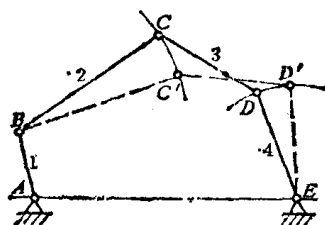


图1-8 五杆机构
(两自由度机构)

由此可见,为保证机构具有确定的运动,应使机构的主动力数等于机构的自由度数。

三、机构运动简图和机构示意图

对已有的传动机构进行分析研究,或者设计新型传动机构时,都要首先画出能表明其运动情况的机构运动简图。从传动的观点看,各种机构都是构件通过运动副联接而构成的,因此只要按照各构件的实际尺寸,以一定的比例尺定出