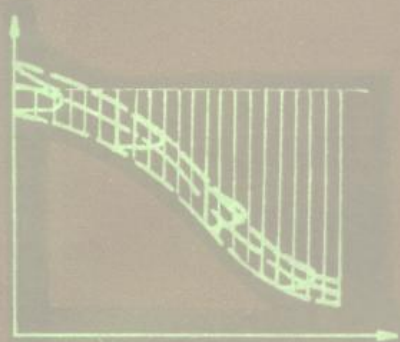


潘 锋 编 著

机 械 工 业 出 版 社



自动量仪 动态精度

79.8

811

自动量仪动态精度

潘 锋 编著



机械工业出版社

1110967

DL68/06

本书介绍了自动量仪的设计原则,可靠性计算,机构精度理论,以及静态特性、静态灵敏度、静态误差等静态精度理论;系统地阐述了自动量仪的动态精度理论基础,动态精度特性和计算,以及减少动态误差的方法,并结合接触式和非接触式自动量仪进行了分析和计算。

本书主要涉及尺寸精密量仪及自动量仪,但对其它类型的仪器、精密机械和精密机床的精度及动态精度分析,也具有一定的参考价值。

本书对象为从事研究、设计、制造和使用精密量仪、自动量仪的科技人员,亦可供大专院校精密仪器、精密机械、精密测量及机械制造与工艺专业的师生参考。

自动量仪动态精度

潘 锋 编著

*

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証出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $10 \frac{1}{4}$ · 字数 224 千字

1983年7月北京第一版·1988年7月北京第一次印刷

印数 0,001—7,700 · 定价 1.30 元

*

统一书号: 15033·5481

前 言

目前,我国测量技术及仪器设备的状况大大落后于生产发展的需要,手工检测仍占很大比重,测量精度低,效率差,劳动强度大。改变这种状况的主要途径是实现测量和检验的自动化和半自动化。

在设计精密测量仪器、自动测量仪器及精密机械时,常常发生盲目确定精度要求的事例:在应该规定高精度的地方,没有规定应有的要求,使整个仪器的质量下降;在不必要要求高精度的地方,规定过高的要求,无益地提高了产品的成本。这主要是由于对确定精度的原则和方法缺乏了解,对精度理论不够熟悉,而对什么情况下应采用哪些精度指标,功能与精度有什么关系,以及计算原理和测试方法等精度理论又缺乏系统的概括和总结。特别是由于自动测量采用了多种现代化技术和测量过程处于动态之中,传统的静态精度指标已经不能反映自动测量精度的实质,必须引入动态精度的新概念,随之而来的一系列问题,如设计自动测量仪器时如何确定精度要求,采用何种动态精度指标,理论上如何计算,实验中如何测量,如何消除和减少动态误差等等,都是需要研究解决的新课题。

浏览我国出版的书籍,至今还没有一本较系统、较全面地介绍仪器精度理论及动态精度理论的著作。苏、美、日等国发表的少数与此问题有关的著作也只限于某些局部问题。

作者在国内外从事仪器精度理论的学习和研究二十余

年,曾试图对这些问题进行系统的概括,作者与杜布里宁教授合著的《尺寸自动检验仪器动态精度问题》^[1]一书(1963年在苏联出版)就是此意图的初步尝试。为适应技术的发展和现代化建设的需要,根据近年的研究成果和应用效果,作者编写了本书作为引玉之砖,供读者参考。

本书第一部分介绍了现有仪器精度理论的概况,包括设计的指导思想,泰勒原则、基面统一原则、阿贝原则、最小变形原则、最短测量链原则等仪器设计中应遵循的原则,仪器可靠性的计算方法,以及机构精度的求法和不同学派的特点。

计算仪器精度时,首先要计算静态精度,然后再根据工作条件计算动态精度。静态精度为动态精度的一个特例,即当尺寸变化速度为零时,动态精度便转变为静态精度。

本书第二部分对静态精度理论作了系统介绍,包括仪器静态精度特性,静态灵敏度,静态误差等计算方法,以及线性和非线性系统、反馈和无反馈系统等。

本书第三部分从介绍计算动态精度常用的数学知识、通用电路动态精度算法、仪器的动力学方程等一些基础知识入手,详细地阐述了仪器的动态精度理论。即作者主要研究的内容,包括仪器的动态精度特性,在不同情况下应采用的动态精度指标及其算法,减少动态误差的方法和措施,以及计算动态精度的实例。

尺寸自动测量仪器动态精度问题是仪器精度理论的新领域和新发展,在国内外仍然是一个新的课题。由于它所涉及的知识面较广,对具体研究对象的内在规律要求了解得较深,还有很多内容值得深入探讨和研究。作者限于知识水平和精力,所作概括难免有错误和不当之处,衷心希望专家和读者批评指正。

目 录

第一章 概论	1
一、仪器设计的指导思想	1
二、仪器设计应遵循的原则	4
三、仪器的可靠性	28
四、现有机构精度理论	33
五、对现有精度理论的分析	62
第二章 仪器的静态特性	65
一、无反馈线性系统仪器的静态特性	65
二、无反馈系统仪器的非线性静态特性	70
三、带反馈系统仪器的静态特性	74
四、带反馈系统仪器的非线性静态特性	77
第三章 仪器的静态灵敏度	79
一、无反馈线性系统仪器的静态灵敏度	79
二、无反馈系统仪器的非线性静态灵敏度	80
三、带反馈系统仪器的静态灵敏度	82
第四章 仪器的静态误差	84
一、绝对误差	84
二、相对误差	84
三、系统误差	85
四、反馈闭环仪器的系统误差	90
五、偶然误差	96
六、极限偶然误差的计算	111
第五章 动态精度理论基础	125
一、自动测量系统按动态精度特性的分类	125
二、自动测量系统的动态精度指标	127
三、自动测量系统的动力学方程式	144

四、用拉普拉斯变换解常系数线性微分方程式	145
五、自动测量系统的传递函数	151
六、自动测量系统电路的动态误差	158
七、自动量仪电路动态精度特性	223
八、减少动态误差的一般方法	224
第六章 接触式自动量仪的动态精度	241
一、无杠杆式界限电触传感器的动态精度	241
二、杠杆式界限电触传感器的动态精度	252
三、幅值式电触传感器的动态精度	257
第七章 非接触式自动量仪的动态精度	261
一、波纹管气动传感器的动态精度	261
二、带波纹管传感器的自动测量装置动态精度	270
三、减少气动测量装置动态误差的措施	276
四、气动测量装置的实验研究	277
五、膜片式气动传感器的动态精度	281
第八章 动态精度理论在总体设计中的应用	285
一、薄板动态测厚仪原理	285
二、提高动态精度的措施	287
三、电路工作原理	294
第九章 光栅式齿轮单面啮合测量仪动态精度的研究	295
一、机械系统的动态精度	297
二、电路系统的动态精度	300
三、记录表头的动态精度	303
四、转位精度的分析	305
五、带动器的传动误差与新型结构	308
六、实践效果	316
参考文献	317

第一章 概 论

现代自动化测量包括动态测量, 主动测量 (或称积极测量), 自动检验分选及适应控制等。所谓动态测量, 是指测量过程中被测件与测头处于相对运动状态的测量; 所谓主动测量, 是指在加工过程中由测量系统控制机床, 驱动执行装置以控制某些质量参数的精度; 所谓自动检验分选, 是指对零件或产品按某一参数或几个参数和性能进行自动分选或分类; 所谓适应控制, 是五十年代发展起来的一种更高级的测量和控制系统, 它在外界条件发生各种变化时, 随时按测得的结果调整和控制机床, 使被加工件始终满足规定的指标, 为此要建立数学模型, 以反映系统中各个参数与评价指标之间的关系, 并输入到计算机进行控制。为了实现自动化测量, 往往要应用光、机、电、气、磁、同位素等各种转换原理, 开环和闭环、反馈和跟踪等控制系统, 以及数显、数控、电子计算机技术等, 使自动测量技术向高效率、高精度、多功能的方向不断发展。

在设计和研制精密测量仪器及自动测量仪器时, 首先要有一个正确的指导思想, 并且要了解已有的静态精度理论, 先进行静态精度计算, 然后再进行动态精度计算。本章介绍仪器设计的指导思想和现有的仪器设计应遵循的原则和理论。

一、仪器设计的指导思想

仪器设计的指导思想简要地表达如下: 设计仪器时, 要

1110967

分析研究国内外有关资料,结合使用条件,拟定最经济的方案,最大限度地满足生产实际对该仪器所提出的静态精度、动态精度、可靠性、效率、寿命、操作方式等功能方面的要求。

根据以上指导思想,拟定仪器设计方案时,应满足下列要求。

(1) 经济性要求 设计仪器时,不应盲目地追求复杂高级的方案,如能采用某种最简单的方案便能满足所提出的功能要求,则此方案便是最经济的设计方案。因为采用最简单的方案意味着零件少、元件少、可靠性高、成本低等,一般说来,简单方案比较经济。但也不能一概而论,还必须和被测件批量的大小、要求的效率、测量误差所造成的损失、零件公差带及尺寸分布情况等综合考虑。如大批生产时,往往自动测量比手工测量更为经济;在精度或效率要求较高时,简单方案便不能满足要求,必须由简到繁选用相应的方案。在技术设计阶段中,还应注意提高“三化”程度和工艺性,使零件制造也符合经济性的要求。

在考虑仪器经济性时,不应仅限于仪器的制造成本,而且还应考虑仪器的使用成本,即除仪器原价外,还有使用期间的保养费、工时费、备件费、运转费(动力及辅料费)、停工损失、管理费、培训费等。必须综合考虑后才能看出真正的经济效益,从而做出选用方案的正确决策。

(2) 精度要求 根据不同的仪器及不同的测量条件,选用相应的静态或动态精度特性指标。各种指标及其计算方法将在本书以后章节中详细介绍,此处需要说明的一点是仪器精度取值的合理性。不分对象地要求仪器精度愈高愈好,实际上是不必要的。仪器的精度应该根据生产实际中被测对

象的精度要求来确定，一般仪器的测量误差取被测件公差的 $1/3$ ，有时取被测件公差的 $1/5$ 或 $1/10$ 。也就是说，某仪器可测几级精度的零件，即该仪器的误差值不得大于被测零件该级公差的 $1/3$ 、 $1/5$ 或 $1/10$ 。仪器误差过大时应尽量避免使用，因为测量误差所造成的损失可能超过购置更高精度仪器的费用。对仪器零件精度的要求也应合理，不对仪器所有零件都要求高精度，而只应对仪器测量链中的关键零件规定严格的精度要求。

(3) 效率要求 一般情况下，测量或检验效率应与生产制造效率相适应。实际上，测量效率通常比生产效率低，如搓丝机的螺纹生产效率大大高于螺纹测量的效率。在这种情况下，则应尽量考虑采用自动化或半自动化测量方案。若工艺稳定，则可采用统计检验方案。在自动生产线上，整个过程是按严格的节拍进行的。此时测量速度必须与生产节拍相吻合。

提高测量速度不仅提高了生产率，有时也可以起到提高精度的作用。因为测量时间愈长，温度变化愈大，对于高精度测量，即使在恒温室内，由于体温对仪器的影响也会使测量精度降低。对封闭尺寸的测量，有时因测量时间过长而使测量结果不能封闭，也往往是温度变化所造成。提高测量效率，缩短测量时间，减少了温度变化的影响，测量精度便提高了，原来不封闭的测量结果可能封闭起来。

采用自动化测量不仅可以缩短测量时间，提高生产率，而且可以提高精度，节省人力，消除人为误差，避免重复单调的操作，减少费用，还便于远距离显示及反馈，避免辐射影响等，是测量技术发展的主要方向之一。

(4) 可靠性要求 所谓可靠性是指一种产品在一定时

间内，一定条件下，不出故障地发挥其规定功能的概率。

可靠性指标除了用完成规定功能的成功概率表示外，还可以用平均故障间隔时间，故障率，失效率，有效性，平均保养间隔时间，或平均寿命等来表示。

一台仪器或一套自动测量系统，无论在原理上如何先进，在功能上如何全面，在精度上如何高级，假若可靠性差，故障频繁，不能长时期地稳定工作，则该仪器或系统就没有使用价值，更谈不上生产中的经济效益。因此，随着现代化仪器及测量系统的发展，可靠性要求愈来愈提到重要的位置上来。与此相应，可靠性的评价便不能象过去那样仅停留在定性的概念性分析上，而是应该科学地进行定量计算。如何进行计算，本章第三节中将作一简要介绍。

(5) 寿命要求 除了与可靠性有关的部分外，在设计中还应考虑其它提高寿命的方法，如结构中尽量减少磨损件，用分子内摩擦元件代替外摩擦元件，选用适当的材料及热处理、化学处理方法，规定合理的使用操作规程、维护保养方法、包装搬运要求及使用环境条件等等。

此外，仪器的外观设计亦极为重要。总体结构的安排，部件间的造型关系，细部的美化等都必须认真考虑。最好经过美工人员的专门设计，使产品造型优美，色泽柔和，美观大方，外廓整齐，细部精致。总之要使人们感到是一台精密仪器，必须小心维护，细致操作，从而提高了仪器的精度保持性和仪器的使用寿命。

二、仪器设计应遵循的原则

上节所述的经济原则应贯彻于仪器设计的始终，不再重复。本节所述的仪器设计应遵循的原则主要是指设计（或使

用) 仪器时能减少仪器误差(或测量误差)的原则。这些原则主要涉及的是静态精度范畴,但在设计自动量仪系统时也应遵守。

1. 泰勒原则

1905年泰勒(William Taylor)提出的泰勒原则是设计量规时或设计量规原理的自动分选机时应该遵守的规则,其内容为:用极限量规检验工件时,通端量规必须具有与配合件相应的完整形式,对工件具有最多金属状态的所有要素同时进行检验;用以检验最少金属状态的止端量规,必须分开检验工件的单个尺寸和要素。

根据这个原则通端量规必须具有与被检孔相应的完整表面及全长,这样即保证了任何圆度和直线度误差都不会超过最多金属状态;另一方面,孔的止端量规则必须很短,理论上应该是一个针状量规与被测直径相接触。同样,对轴的理想通端量规应该是一个全长的环规,而止端量规应该是一个卡尺或卡规。在实践中只能近似地满足这些条件,通常测孔的通端塞规做得比全长要短,测轴的通端环规用卡规。这样的量规在实际使用中已经能够满足要求。只要制造条件处于正确控制之下,用局部尺寸可以表示该尺寸全貌时,便可采用。

复杂形状的零件(如螺纹),遵守泰勒原则十分重要。通端量规应尽量具有相配件的全长,而止端则要分别测量单项要素。

2. 基面统一原则

基面选择不当便会产生测量误差,正确选择基面的原则称为“基面统一原则”。

所谓基面统一原则,是指被测件的各种基面,包括设计

基面，工艺基面，装配基面和测量基面，都应是同一基面。这样就不会因定位误差而引起测量误差。

在加工过程中，有时因工序关系无法保证工艺基面与设计基面一致时，则序间测量的测量基面应与工艺基面一致。而在装配前的最后检验中必须保证测量基面与设计基面一致。

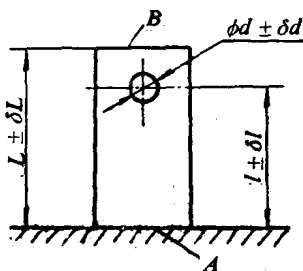


图1-1 定位误差示例图

不遵守此原则时，将产生测量误差。示例如图 1-1 所示，

从设计基面 A 至孔 ϕd 的尺寸及公差为 $l \pm \delta l$ 。若不用设计基面 A 为测量基面，而用 B 面为测量基面，则带来附加误差。因为 B 面至 ϕd 的距离为 $L - l$ ，而 L 具有公差 $\pm \delta L$ ，这就带来了定位误差，其大小为 $\pm \delta L$ 。

此原则不仅用于选择测量基面，而且对设计新仪器也有重要意义。如设计座式齿轮测量仪器时，通常都是以齿轮中心孔定位，这就满足了基面统一原则。而设计上置式齿轮量仪时，一般不以中心孔为基准，这样就破坏了基面统一原则。以图 1-2 所示三种周节仪为例，图 1-2 a 用支承杆 1、2 支承在心轴上，符合基面统一原则，结构复杂。图 1-2 b 以齿根圆为测量基面，图 1-2 c 以齿顶圆为测量基面。齿顶圆对传动无明显作用，公差较大，很难保证测头恒定在分度圆上进行测量，因而带来的测量误差较大。以齿根圆为测量基面，由于齿根圆与齿形一次加工完成，在基圆半径误差相同的情况下，误差较前者小。二者都不符合基面统一原则，以选择齿根圆为辅助基面比较好。

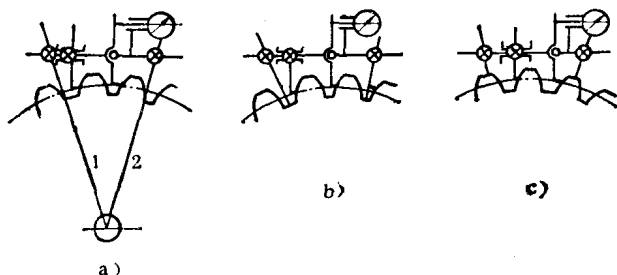


图1-2 不同测量基面的周节仪

3. 阿贝原则

阿贝原则又称比较仪原则，是由德国蔡司厂创始人阿贝 (E. Abbe) 于 1890 年提出的，它既是测量原则，又是仪器设计原则。在精密测量及仪器设计中得到广泛应用。

阿贝原则内容为：被测尺寸与标准尺寸必须处在测量方向的同一直线上，或者说，被测尺寸与标准尺寸彼此处在对方的延长线上。

采用阿贝原则，便能避免一次误差，得到较高的测量精度。

图 1-3 所示为游标卡尺在测量中所产生的一次误差，被测件尺寸与主尺上的读数刻尺不在同一直线上，不符合阿贝原则。活动量爪与主尺间存在间隙，测量时产生倾斜角 φ ，便产生了测量误差。被测件实际尺寸为 L ，读取数值为 L' ，误差为 f ，则

$$f = L - L'$$

$$f = s \operatorname{tg} \varphi \approx s \varphi$$

f 与 φ 构成一次误差的关系。

图 1-4 所示为千分尺，被测件尺寸与读数刻尺彼此处在对方的延长线上，是符合阿贝原则的。设千分螺杆在移动过

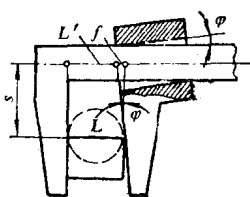


图1-3 游标卡尺在测量中所产生的一次误差

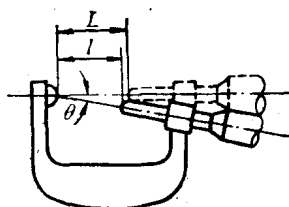


图1-4 千分尺在测量中所产生的二次误差

程中发生 θ 角的倾斜，在相同的示值下，实际测得的倾斜长度 l 与正确长度 L 之间产生误差 ε 为：

$$\begin{aligned}\varepsilon &= L - l = L(1 - \cos \theta) \\ &= 2L \sin^2 \frac{\theta}{2} \approx 2L \left(\frac{\theta}{2} \right)^2 = \frac{L}{2} \theta^2\end{aligned}$$

ε 与 θ 之间形成二次误差的关系。

下面作一具体数值的比较。已知游标卡尺测点至主尺距离 s 为 50mm，倾斜角 φ 为 $1'$ (0.0003rad)；另有一千分尺，测一直径为 50mm 的零件，倾斜角 θ 也是 $1'$ ，它们的测量误差分别为：

$$\begin{aligned}f &= s\varphi = 50 \times 0.0003 = 0.015 \text{ mm} \\ \varepsilon &= \frac{L}{2} \theta^2 = \frac{50}{2} \times 0.0003^2 = 0.0000225 \text{ mm}\end{aligned}$$

由此可见，前者一次误差对精度影响较大，后者二次误差的影响较小，可忽略不计。

再以两种线纹尺比长仪为例，一种是纵向线纹尺比长仪，另一种是阿贝线纹尺比长仪。图 1-5 所示为纵向线纹尺比长仪，1 为被检线纹尺，2 为标准尺，3 为导轨，4 为读数显微镜的支臂。被检线纹尺与标准尺的位置是平行的，不

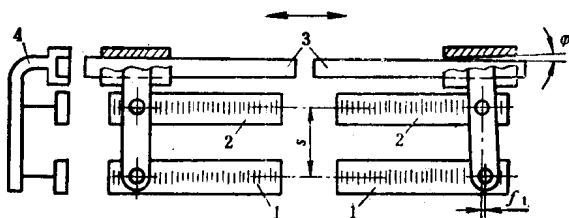


图1-5 纵向线纹尺比长仪的一次误差

符合阿贝原则，当导轨 3 具有直线度误差时，支臂 4 便产生倾斜角 φ ，两线纹尺之间的距离为 s ，所造成的误差 f_1 为：

$$f_1 = s \operatorname{tg} \varphi \approx s \varphi$$

倾斜角 φ 与 f_1 形成一次误差关系。

图 1-6 所示为阿贝线纹尺比长仪，或称阿贝比长仪。1 为被检线纹尺，2 为标准尺，两尺彼此处在对方的延长线上，符合阿贝原则。

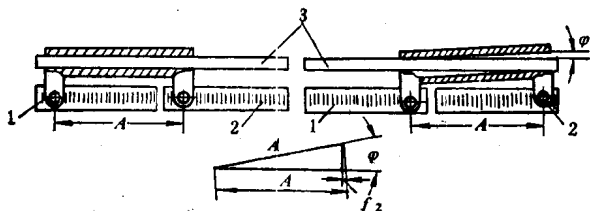


图1-6 阿贝比长仪的二次误差

在两端不同的读数位置，由于导轨 3 直线度有误差，使支臂产生倾斜角 φ ，两显微镜之间距离为 A ，此时所产生的误差 f_2 为：

$$f_2 = A (1 - \cos \varphi) \approx \frac{1}{2} A \varphi^2$$

φ 与 f_2 的关系为二次误差关系。

用实际数值比较：设 $s = 150\text{mm}$ ， $\varphi = 10''$ $A = 1000\text{mm}$ ，

则

$$f_1 = 0.007 \text{ mm} = 7 \mu\text{m}$$

$$f_2 = 0.000001 \text{ mm} = 0.001 \mu\text{m}$$

前者误差较大，后者误差可忽略不计。由上述两例可见阿贝原则的重要性。

阿贝原则虽然简而易懂，但遇到复杂的情况时仍须仔细分析，否则将产生误断。下面分三种情况加以说明。

情况一：视差。

总体结构或测量方法虽然符合阿贝原则，但视差存在时仍为一次误差。当指示刻线与主刻线不在同一平面内，并且通过指示线的观察线又与主刻线面不垂直时，便产生视差。

当游标尺或指针与主刻尺不在一个平面内，相距 a 值时所产生的视差为：

$$f = a \operatorname{tg} \varphi \approx a \varphi$$

式中 φ ——观测时的倾斜角。

此误差为一次误差。为了避免此项误差产生，应尽量减少 a 值，如采用无视差游标，或在主刻度面下装一反射平面镜，观察时使指针与其反射象重合，便能保证视差为零，也可以用光斑指示线投影到主刻尺上的方法消除视差。

情况二：乍看似乎符合阿贝原则，实际存在一次误差。

图 1-7 所示的比长仪中，1 为标准件，4 为被测件， P 为被测长度，标准件上相应长度为 N ， F 为导轨 2 长度， a 与 b 分别为导轨两端至被测长度终点及标准件上相应点的距离。乍看 1 和 4 好象处在测量方向的同一直线上。但仔细分析，便会发现它没有完全符合阿贝原则。由于标准件和被测件在垂直方向相错了一段距离 s ，这样就不符合彼此处在对方的延长线上的要求。观测线 V_1 和标准件一起按方向 3 移