

制造工程中的精密技术

李济顺 王中宇 林敏 著



机械工业出版社
China Machine Press

制造工程中的精密技术

李济顺 王中宇 林 敏 著

机械工业出版社

本书以圆度、直线度、圆柱度及深孔形状误差的测量为例,通过对各种误差分离方法的对比和分析,全面地论述了制造工程中有关圆度、直线度、圆柱度及深孔形貌的分离与重构技术。除系统地论述了各种测量方法外,着重阐述了误差分离技术的统一理论和方法,并在理论分析的同时给出实际应用的例证。本书可作为机械制造或测控技术及仪器专业研究生和本科生的教学参考书,也可供从事精密加工和精密测量工作的技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

制造工程中的精密技术/李济顺等著. —北京:机械工业出版社, 2001. 4
ISBN 7-111-08710-0

I. 制… II. 李… III. 机械—加工精度 IV. TH161

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第01465号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:余茂祚 封面设计:方芬 责任印制:郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年4月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{32}$ ·6印张·131千字

0 001-3 500册

定价:12.00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、68326677-2527

前 言

精密和超精密加工技术是机械制造业中最重要的组成部分之一。这是因为精密和超精密加工技术不仅直接影响尖端技术和国防工业的发展，而且还影响机械产品的精度和表面质量，影响产品的国际竞争力。世界各国都非常重视发展精密和超精密加工技术，把它作为先进制造技术中的优先发展内容。近年来计算机技术、自动控制技术等精密加工中得到了广泛的应用，使精密和超精密加工技术得到了极大的发展，大大地改变了精密和超精密加工及测量技术的面貌。

精密测量技术是精密和超精密加工技术中的关键一环，也是精密和超精密加工技术中备受国内外重视的热点和难点。特别是基于误差分离技术的形状误差测量和评定，一直是国内外研究的重点。

本书以圆度、直线度、圆柱度及深孔的形状误差测量为例，系统全面地论述了制造工程中的圆度、直线度、圆柱度及深孔形貌的分离与重构技术。书中除系统地论述了各种测量方法外，着重阐述了误差分离技术的统一理论和方法，并在理论分析的同时给出实际应用的例证。本书可作为机械制造或测控专业研究生和本科生的教学参考书，也可供从事精密加工和精密测量工作的技术人员阅读。

本书得到了国家自然科学基金项目“高精密表面形貌自律型空间反滤波及重构技术(59775085)”、国家自然科学基金项目“动态测量中非统计不确定度理论的研究

(59805007)”、河南省杰出青年基金项目“基于误差分离技术的圆柱度测量技术(9922)”以及河南省自然科学基金项目“深孔研磨工艺和表面形貌关系及高效研磨方法研究(994041700)”的资助，同时本书得到了洛阳工学院出版基金的资助。

在撰写过程中，王笑一、杨镛鸣、邱明、武充沛、郭爱芳、夏新涛等作了大量的工作，在此表示感谢！

由于作者水平有限和撰写时间仓促，书中难免有错误和不足之处，恳请读者给予批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 精密测量的基础理论 1

1.1.1 测量的定义与分类 1

1.1.2 测量数据的处理 2

1.2 精密测量中误差分离的统一理论 5

1.2.1 误差分离的一般方程 5

1.2.2 传感器个数的确定 8

1.2.3 误差分离的不完全性 10

1.2.4 误差分离的时、频域统一 12

1.3 研究现状及进展 13

1.3.1 研究现状 13

1.3.2 进展及存在的问题 16

参考文献 19

第 2 章 圆度误差分离技术 21

2.1 引言 21

2.2 圆度误差分离的基本原理 22

2.2.1 多步法圆度误差分离 23

2.2.2 多点法圆度误差分离 29

2.2.3 三点法圆度误差分离技术的近似实现 33

2.3 圆度误差分离的结果失真 37

2.3.1 影响圆度误差分离精度的因素	37
2.3.2 测量参数选择及谐波抑制的消除	38
2.3.3 圆度误差分离的幅值传递	42
2.3.4 圆度误差分离的灵敏度分析	45
2.4 圆度误差分离的时域方法	52
2.4.1 时域法圆度误差分离原理	52
2.4.2 时域圆度误差分离技术的递推稳定性	53
2.4.3 时域和频域三点法圆度误差分离技术的比较	55
2.5 本章小结	59
参考文献	59
第3章 直线度误差分离技术	61
3.1 引言	61
3.2 直线度误差分离的基本理论	62
3.2.1 三点法直线度误差分离	62
3.2.2 混合二点法直线度误差分离	68
3.2.3 差分二点法直线度误差分离	71
3.3 直线度误差分离方法的相互关系	74
3.4 直线度误差分离结果的失真及改善	76
3.4.1 零阶量抑制	76
3.4.2 直线度误差分离的采样方式和趋势项	76
3.4.3 直线度误差分离的边缘效应和对称延拓	78
3.4.4 测量参数的选择及误差传递	81
3.5 本章小结	83
参考文献	84
第4章 圆柱度误差的分离与重构	86
4.1 引言	86
4.2 回转轴回转运动理论	87

4.2.1 回转轴的回转中心	87
4.2.2 回转体的运动学描述	89
4.2.3 平均回转中心在测量坐标系中的位置	92
4.3 三点法圆柱度误差分离技术	93
4.3.1 三点法圆柱度误差分离	98
4.3.2 三点法圆度误差分离的直流量	102
4.3.3 截面最小二乘圆心及其提纯	104
4.3.4 一阶谐波分量的可分离性	111
4.4 圆柱度形状误差的重构与评定	113
4.4.1 圆柱度形状误差的重构技术	113
4.4.2 圆柱度形状误差的最小二乘评定	117
4.4.3 圆柱度形状误差补偿数据生成	121
4.5 误差分离结果及其对比	123
4.5.1 圆柱度形状误差重构的稳定性	125
4.5.2 工作台直行误差运动的比较	128
4.5.3 母线直线度形状误差的比较	129
4.6 本章小结	131
参考文献	132
第 5 章 深孔表面综合形貌的测量	135
5.1 引言	135
5.2 测量装置的总体设计	136
5.2.1 测量原理	136
5.2.2 计算方法	141
5.3 测量装置的硬件设计	145
5.3.1 传感器的结构	145
5.3.2 测量电路设计	152
5.3.3 驱动与控制电路	153

5.4 软件设计	155
5.4.1 用户界面	155
5.4.2 零位调整	156
5.4.3 标定模块	157
5.4.4 测量模块	157
5.4.5 评定模块	158
5.4.6 输出模块	158
5.5 误差分析	159
5.5.1 影响测量精度的主要因素	159
5.5.2 测量误差的计算	161
5.5.3 测试结果	163
5.6 本章小结	163
参考文献	163
第 6 章 形状误差测量系统及提高精度的措施	166
6.1 形状误差测量的实现	166
6.1.1 测量系统的一般构成	166
6.1.2 形状误差测量的采样逻辑	167
6.1.3 数据存储结构	168
6.1.4 采样程序的设备无关性	170
6.2 提高误差分离精度的措施	172
6.2.1 集合平均	172
6.2.2 数字滤波	175
6.2.3 窗函数问题	180
参考文献	181

第 1 章 绪 论

1.1 精密测量的基础理论

1.1.1 测量的定义与分类

测量是为了确定被测量的值而进行实验的过程。其实质是将被测量与作为测量单位的标准量进行比较,从而获得两者的比值。

任何测量都包括测量对象、测量单位、测量方法和测量精度四个基本要素。

测量对象是多种多样的,尤其是在几何量测量中,包括长度、角度、形位误差和表面粗糙度等。

测量单位是表示被测量大小的标准量。

测量方法是完成测量任务所需器具、方案以及测量条件的总称。通常由被测对象的特点确定。

测量精度是测得值与真值一致的程度,通常以测量误差的形式表示。测量误差越小,测量精度越高,说明测得值与真值越接近。在给出测量结果时,必须给出相应的测量精度。

测量方法可分为:

1. 绝对测量与相对测量 绝对测量指计量器具上显示的数值即被测量的实际值。

相对测量指计量器具显示的数值是被测量相对于标准量的偏差,该偏差加上标准量的数值才是被测量的实际值。

2. 直接测量与间接测量 直接测量是从计量器具上直接读出被测量值的大小,或被测量相对于标准量的偏差。

间接测量是通过测量被测值有关的量,然后通过函数关系求出被测量的值。

3. 主动测量与被动测量 主动测量是在加工的同时对被测量进行测量,并以测量结果反馈和控制加工过程。

被动测量是在加工后进行测量,其结果仅限于判断被测量是否合格。

4. 静态测量与动态测量 静态测量是测头与被测件在相对静止的条件下进行的测量,测得值是不随时间变化的恒定量。

动态测量是测头与被测件在相对运动中进行的测量,或者是被测量在变化过程中进行的测量,其测量结果随时间而变化。

5. 单项测量与综合测量 单项测量是对被测件的各个参数分别进行测量。

综合测量是测量被测件各个参数综合作用的结果,综合测量效率较高。

6. 接触测量与非接触测量 接触测量指测量时测头与被测件相接触,并有机机械作用的测量力。

非接触测量指测量时测头不与被测件相接触。

1.1.2 测量数据的处理

1.1.2.1 测量不确定度的评定

测量不确定度是测量结果所具有的参数,用于表征合理地赋予被测量之测得值的分散性。一般而言,测量不确定度就是指测量结果中用以说明测得值所处范围的一个参数,其大小只与测量条件有关,而与测得值本身无关。

测量不确定度一般有多个分量，按其数值评定方法的不同，分为 A 类评定和 B 类评定。A 类是用统计的方法评定的不确定度分量，并以标准差表示；B 类是用不同于 A 类的其它方法评定的不确定度分量，可根据经验资料及各种可靠信息获得，仍以标准偏差表示。A 类和 B 类合成后称为合成标准不确定度。

按照《ISO1993 (E) 测量不确定度表示指南》的建议，按 A 类评定时，测得值可用修正后的算术平均值表示，即

$$x = \bar{x} + b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + b \quad (1-1)$$

式中 b —— 修正值；

n —— 测量次数；

x —— 测得值。

测量结果的不确定度可由贝塞尔公式求出。

B 类评定不应与 A 类评定重复，必须认真分析哪些因素没有引起 A 类评定中的数据产生随机变动，然后再针对这些因素，查找以往有关的测试数据或资料，根据专业知识和经验，分析其分布特征，将其定量折算为标准差。

在认真分析不确定度的各个分量的 A 类和 B 类评定之后，可按随机误差合成方法合成为标准合成不确定度。如果各分量之间是相互独立的随机变量，可按方和根形式合成，即

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^m u_{Ai}^2 + \sum_{i=1}^n u_{Bi}^2 \quad (1-2)$$

式中 u_c —— 合成不确定度；

u_A —— A 类不确定度；

u_B —— B 类不确定度。

求出合成不确定度之后，再确定包含因子 k ，即可求出扩

展不确定度。

1.1.2.2 测量误差的稳健估计

在实际测量中,往往存在不止一个粗大误差,或因外界干扰使分布模式变化,甚至为非正态分布,这时的平均值和标准偏差将丧失其最佳性。虽然经过粗大误差判别可剔除异常数据,但由于判别粗大误差规定的界限主要依赖于正态性及显著性水平的主观判断,且在判断粗大误差时,标准偏差本身可能已受到粗大误差的影响,因此这种数据处理方法未必可靠。现代采用测量结果及其误差的稳健估计,就是针对这一问题提出的。

所谓稳健估计,就是用来计算测量结果及其误差估计量的数据,受到少量的粗大误差或一些较小的系统误差的影响后,使其分布稍微偏离原定假设,仅使该估计量有相应小的偏差,基本上仍具有原来良好的统计特性而不致失效。且当这些系统误差和粗大误差增大时不会背离估计的真实性。但在没有这种粗大误差时,这种估计将会损失一定的效率。

下面介绍两种常用的估计方法,即中位值和截尾均值。

中位值 m_e 是将测得数据 $\{x(i)\}$ 按大小排序:

$$x_{min}=x(1)\leq x(2)\leq \cdots \leq x(n)=x_{max}$$

取其中位的数值

$$m_e = med(x_i) = \begin{cases} x_{r+1} & n = 2r + 1 \\ (x_r + x_{r+1})/2 & n = 2r \end{cases} \quad (1-3)$$

式中 m_e —— 中位值。

当采用中位值作为测量结果估计值时,其误差用中位绝对差 MAD 表示。即将各测得值减去中位值后取绝对值,再将其从小到大排队,取其中位值作为测量误差的估计,即

$$MAD = \text{med}|x_i - m_e| \quad (1-4)$$

截尾均值是将数据从小到大排序后，截去大端和小端各 k 个最大数和最小数，对余下的 $(n-2k)$ 个数取均值

$$\bar{x}_{T\alpha} = \frac{1}{n-2k} \sum_{i=k+1}^{n-k} x_i \quad (1-5)$$

式中 $\bar{x}_{T\alpha}$ —— 截尾均值。

$k=[\alpha, n]$ $0 \leq \alpha \leq 0.5$ ，一般取 $\alpha = 0.1$ 较合适。

当采用 $\bar{x}_{T\alpha}$ 估计测量结果时，其误差用截尾标准差 $S_{T\alpha}$ 表示：

$$S_{T\alpha} = \left[\sum_{i=k+1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_{T\alpha})^2 / (n-2k) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-6)$$

式中 $S_{T\alpha}$ —— 截尾标准差。

1.2 精密测量中误差分离的统一理论^[1, 2]

1.2.1 误差分离的一般方程

假设 1 在布置传感器时均需使某一或一些被测误差量，在传感器中的反映可以借助于测量系统配置的几何特征，表述为该被测误差量在测量空间中的“时延”。同时该被测误差量本身是或者人为使之是周期性的、时不变的，以使得该误差量在所有测量传感器中的反映，仅为测量空间的“时延”或者“相位”的不同，也就是说该误差量在所有传感器中的反映是完全相关的。

假设 2 根据几何量测量的 Abbe 原理，传感器的测量方向应在被测误差量的延长线上，因此该误差量在传感器中的传递是 1:1 的。

假设 3 其它诸项误差量则通过处理测量系统的几何关

系,使之加权后反映到不同位置的测量传感器中。一般这些误差量在诸传感器中的反映,不能表述为误差量在测量空间的时延或相移。这些误差量可以是确定性的,也可以是随机性的。

总之,所有被测量或将被分离的误差量,都将通过测量系统的几何关系映射为传感器的输出信号。这种由测量系统几何参数决定的映射关系,在此称之为误差映射关系或误差映射矩阵。

设在线误差测量和分离系统中的某一被测误差量 $r(i)$, 在诸传感器中的输出满足假设 1、2 描述的特性,其余的有限个被测误差量 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_h, \dots, \delta_k$ 满足假设 3 描述的特性。

设测量系统中安装一个或 m 个测量传感器,且其在测量空间的位置分别为

$$p_1, p_2, \dots, p_q, \dots, p_m$$

则应用一个传感器进行 m 次移位测量后,或应用 m 个传感器进行一次测量后可得传感器的输出矩阵方程

$$y = A_e e + A_\delta \delta \quad (1-7)$$

式中 A_e —— 被测误差量 $r(i)$ 的误差映射矩阵,为 $m \times m$ 阶单位矩阵,见式(1-8);

e —— 满足假设 1、2 的被测误差量经系列时延后的序列构成的列向量,见式(1-9);

δ —— 满足假设 3 的 k 个被测误差量构成的列向量,见式(1-10);

A_δ —— 由测量机构几何参数决定的 k 个误差量的 $m \times k$ 阶误差映射矩阵,见式(1-11)。

式(1-11)中元素 a_{qh} 表示被测误差量 $\delta_h(i)$ 对测量传感器 q 输出的映射系数,其取值和测量系统的配置及传感器的安装位置

有关。

$$A_e = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{bmatrix}_{m \times m} = [1]_{m \times m} \quad (1-8)$$

$$e = (r(i-p_1), r(i-p_2), \dots, r(i-p_q), \dots, r(i-p_m))^T \quad (1-9)$$

$$\delta = (\delta_1(i), \delta_2(i), \dots, \delta_h(i), \dots, \delta_k(i))^T \quad (1-10)$$

$$A_\delta = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2k} \\ \cdots & \cdots & a_{qh} & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mk} \end{bmatrix}_{m \times k} \quad (1-11)$$

设有不为零的行向量

$$C = (c_1, c_2, \dots, c_q, \dots, c_m) \quad (1-12)$$

左乘矩阵方程(1-7)有

$$y_n(i) = Cy = CA_e e + CA_\delta \delta = Ce + CA_\delta \delta \quad (1-13)$$

考察式(1-13)，若有这样的 m 阶行向量 C 使得

$$CA_\delta = 0 \quad (1-14)$$

代入式(1-13)并展开得

$$y_n(i) = Cy = \sum_{q=1}^m c_q y_q(i) = Ce = \sum_{q=1}^m c_q r(i-p_q) \quad (1-15)$$

式(1-15)为误差分离的一般方程。

对式(1-15)做傅氏变换，并应用傅氏变换的时延相移性

质得

$$Y_n(l) = R(l) \sum_{q=1}^m c_q e^{jlp_q} = R(l)C\Omega = R(l)G(l) \quad (1-16)$$

式中 Ω —— 由测量系统几何参数决定的相移旋转因子，
见式(1-17)；

$G(l)$ —— 测量和分离系统的误差分离权函数，见式
(1-18)。

$$\Omega = (e^{jlp_1}, e^{jlp_2}, \dots, e^{jlp_q}, \dots, e^{jlp_m})^T \quad (1-17)$$

如果对于任意的 l 有 $G(l) \neq 0$ ，由式(1-16)可得误差量 $r(i)$ 的
频域表示为

$$G(l) = C\Omega \quad (1-18)$$

$$R(l) = Y_n(l) / G(l) \quad (1-19)$$

这就是误差分离一般方程的频域形式。

对式(1-19)求逆傅氏变换，则可得出误差量 $r(i)$ 在测量空
间的取值如式(1-20)。

$$r(i) = F^{-1}[Y_n(l) / G(l)] \quad (1-20)$$

式中 $r(i)$ —— 误差量。

1.2.2 传感器个数的确定

上节给出了误差分离的一般方程，本节讨论权值系数的求
取及确定测量传感器个数的一般方法。考察误差分离的时域表
达式(1-15)和频域表达式(1-19)，若能求出权值系数向量 C ，
那么由式(1-19)和式(1-20)即可解出被测误差量 $r(i)$ 。

从误差分离一般方程的导出过程知，权值系数向量的取值
应满足式(1-14)。由矩阵理论知，方程(1-14)等价如下方程

$$A_b^T C^T = 0 \quad (1-21)$$

式中 C^T —— m 阶列向量。