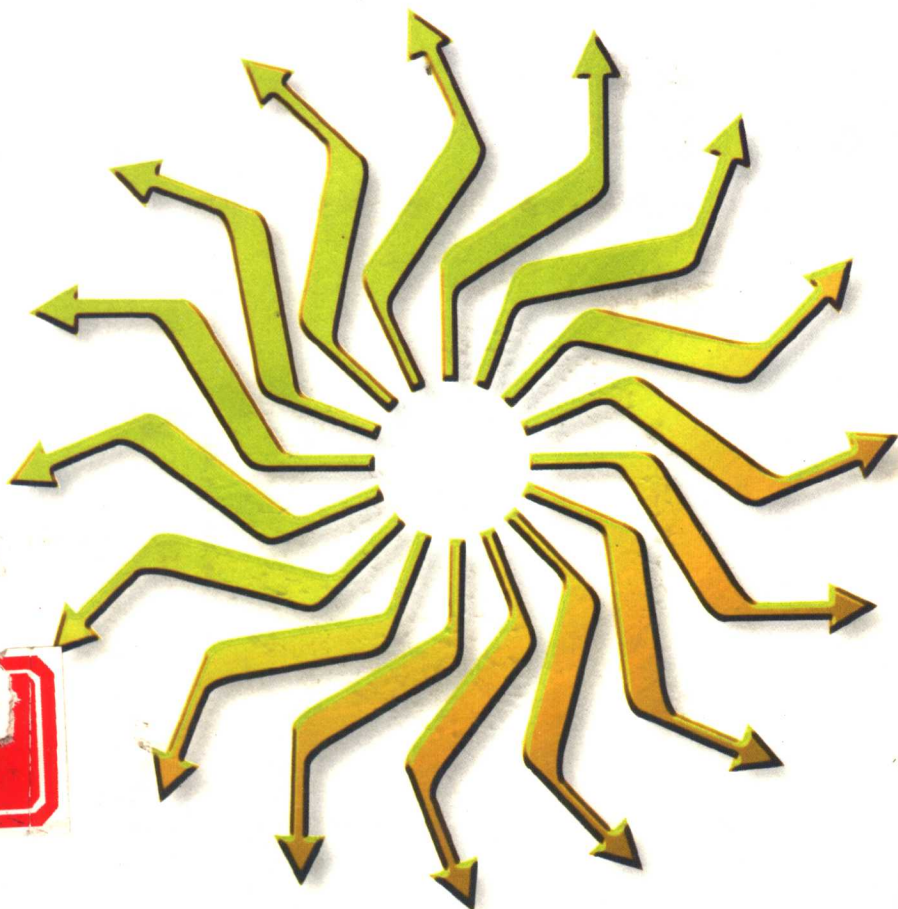


测量不确定度的非统计理论

——王中宇 夏新涛 朱坚民 著——



国防工业出版社

测量不确定度的 非统计理论

王中宇 夏新涛 朱坚民 著

国防工业出版社

·北京·

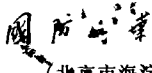
图书在版编目(CIP)数据

测量不确定度的非统计理论/王中宇等著. —北京:
国防工业出版社, 2000 (2001.5 重印)

ISBN 7-118-02347-7

I. 测... II. 王... III. 测量误差-不确定度-评价
IV. P207

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 35783 号

 国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)
(邮政编码 100044)
腾飞胶印厂印刷
新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/32 印张 5 107 千字
2000 年 8 月第 1 版 2001 年 5 月北京第 2 次印刷
印数: 1501 - 2500 册 定价: 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

作者简介



王中宇, 1963 年生, 1997 年于华中理工大学机械学院获博士学位, 现任洛阳工学院机电工程系副教授, 兼任中国计量测试学会高级会员, 河南省机械工程学会理事等职。近 10 年来, 主要从事精密测量基础理论和测试技术方面的教学与科研工作, 目前主持国家自然科学基金项目 1 项, 参加完成省部级科研项目多项, 发表学术论文 30 余篇。



夏新涛, 1957 年生, 洛阳工学院机电工程系副教授, 中国机械工程学会高级会员, 河南省机械工程学会理事, 《轴承》杂志特邀编委。主要从事滚动轴承、精密测量和计算机应用等方面的教学与科研工作, 主持和参与完成省部级科研项目 5 项, 发表学术论文 60 余篇, 出版教材和专著共 2 部。



朱坚民, 1968 年生, 洛阳工学院机电工程系讲师。主要从事机电系统测量与控制的教學与科研工作, 主持和参与完成省部级科研项目 5 项, 发表论文 20 余篇。

DAQ 7/1/06

序

测量不确定度是计量学领域中的一个重要概念,自国际计量局(BIPM)正式提出不确定度表示建议书 INC-1(1980)以来,测量不确定度的概念已引起国内外学术和工程领域的广泛关注。随着科学技术的发展,一些新学科、新理论和新概念的不断涌现,为测量不确定度理论的研究开辟了新的天地。《测量不确定度的非统计理论》一书的出版,是近年来测量不确定度理论研究的一项重要成果,具有深远的现实意义。

经典的误差理论和数据处理方法以概率论和数理统计为基础,主要研究现有的若干种典型概率分布,如正态分布、均匀分布或三角分布等大样本量下,测量数据分布特征参数的估计问题。《测量不确定度的非统计理论》一书以灰色系统理论、模糊集合理论、信息熵理论、贝叶斯理论和神经网络理论为基础,以全新的视野,深入而系统地研究了测量不确定度的非统计评定、粗大误差的判别、系统误差的发现、测量模型的建立、最佳测量方案的选择以及测量误差预报等问题,较好地解决了小样本量、概率分布未知时的测量数据分布特征参数的估计问题。大量的应用实例和计算机仿真结果,验证了该书提出的新理论、新方法的适用性和可行性。本书的理论在不确定度评定中具有广泛的应用前景。

该书的论述逻辑性强、思路清晰、分析透彻,具有较高的学术价值。它的出版对于从事测量不确定度评定的科技工作

者是大有裨益的,希望本书的出版能对国内外测量不确定度评定方法研究的发展,起到一定的促进作用,愿读者与作者共同努力,将测量不确定度评定方法的研究推向前进。

作为一本学术专著,该书的读者对象为从事计量检定、测试与仪器仪表等专业的科研人员,也可为高等院校相关专业的教师和研究生。另外,从事数学、应用数学、系统控制、社会学以及经济分析等工作的研究人员读了这本书,也将获得极大的益处。

国际不确定度工作组成员
中国计量科学研究院研究员

刘智敏

2000年6月

前 言

本书是我们承担的国家自然科学基金资助项目“动态测量中非统计不确定度理论的研究(59805007)”中的主要研究成果,基本内容包括:测量不确定度的灰评定、测量不确定度的模糊评定、基于信息熵理论的不确定度评定、测量不确定度的贝叶斯评定理论和基于神经网络建模的间接测量不确定度评定。

本书的部分内容已经在国际学术期刊 Measurement Science & Technology、The Journal of Grey System 和国内学术期刊《中国学术期刊文摘(科技快报)》、《农业机械学报》、《光学精密工程》、《华中理工大学学报》、《轴承》等公开发表。

本书由王中宇撰写第一章和第二章,夏新涛撰写第三章,朱坚民撰写第四章、第五章和第六章,全书由夏新涛统稿。

国际不确定度工作组成员、中国计量科学研究院刘智敏研究员审阅了全书并为本书作序。在本书的研究与写作过程中还得到了合肥工业大学费业泰教授、北京理工大学林洪桦教授的指导,在此向他们表示深深的谢意!

感谢我们各自的家人在我们的学术研究和著作写作过程中所给予的理解与支持!

应当指出的是,测量不确定度的评定是一门正在迅速发展中的新兴学科,书中的缺点和错误在所难免,恳请大家批评指正。希望通过我们共同的努力,使本书更加完善。

作者于 2000 年 6 月 5 日

目 录

第一章 绪论	1
第一节 测量不确定度简介.....	1
第二节 现代不确定度理论及其发展.....	2
第三节 本书主要内容及研究方法.....	3
参考文献.....	4
第二章 测量不确定度的灰色系统理论	5
第一节 概述.....	5
第二节 测量不确定度的评定.....	7
第三节 粗大误差的判别	18
第四节 系统误差的发现	23
第五节 测试数据相关性的灰分析	25
第六节 不等精度测量的灰处理	31
第七节 最佳测量方案的选择	36
第八节 测量误差的灰预报	41
参考文献	48
第三章 测量不确定度的模糊集合理论	49
第一节 不确定度评定的模糊理论	49
第二节 粗大误差的模糊判别	63
第三节 动态测量数据中系统误差的模糊发现	68
第四节 最佳测量方案选择的模糊集合理论	88
参考文献	96

第四章 熵在测量不确定度评定中的应用	100
第一节 引言.....	100
第二节 基于样本信息熵的不确定度评定.....	101
第三节 基于样本概率分布的不确定度评定.....	109
第四节 小结.....	119
参考文献.....	119
第五章 测量不确定度的贝叶斯评定	120
第一节 引言.....	120
第二节 经典统计与贝叶斯统计.....	121
第三节 贝叶斯统计推断与测量不确定度理论.....	122
第四节 测量不确定度评定的贝叶斯方法.....	123
第五节 贝叶斯统计与常规统计方法的一致性.....	128
第六节 无测量数据的不确定度的评定.....	131
第七节 测量不确定度的合成.....	134
第八节 小结.....	135
参考文献.....	135
第六章 间接测量的不确定度评定	137
第一节 引言.....	137
第二节 基于神经网络的测量模型的建立与检验.....	138
第三节 测量结果的估计及其不确定度的评定.....	150
第四节 小结.....	151
参考文献.....	151

第一章 绪 论

第一节 测量不确定度简介

测量不确定度是测量结果带有的一个参数,用以表征合理地赋予被测量结果的分散性。不确定度是说明测量水平的主要指标,是表示测量质量的重要依据。目前,不确定度主要是用概率统计的方法进行处理。1980 年国际测量不确定度工作组正式提出不确定度表示建议书 INC-1 (1980),并于 1981 年得到国际计量委员会批准^[1];1993 年国际标准化组织等七个组织,共同制定了测量不确定度表示指南^[2]。测量不确定度不仅全面地考虑了测量精度的各种误差因素,在计算时又考虑到不确定度的分类、自由度、包含因子和相关系数等,因此,从整体上看,建议书和指南是不确定度理论的一大进步。但该指南主要适用于静态测量,不考虑各个不确定度分量分布性质的不同,一律采用标准差合成的不确定度,更重要的是,对动态测量尚缺少科学的估计理论,常用“以静代动”或采用随机过程特征量参数,来估计动态测量结果,因此只是一种近似方法,与科学的不确定度原理和实际情况尚有一定的差距^[3,4]。

测量不确定度一般包含若干分量,按其数值评估方法的不同,分为统计不确定度(A 类不确定度)与非统计不确定度

(B类不确定度)两种。关于统计不确定度的估计,主要是通过一定的实验,对测量列进行统计分析,以标准差的形式表征其量值。其可靠性不仅与重复测量的次数有关,而且还与测量数据概率分布的类型有关。A类估计的可靠性取决于测量数据的自由度。在建立标准或研制新仪器的过程中,如果积累了较多的测量数据,一般可以考虑采用A类估计方法。非统计不确定度的估计是很重要的,因为并非所有的不确定度都能够用统计的方法来估计,但是其情况却比统计不确定度复杂得多,尤其是在动态测量中非统计不确定度的估计问题。对于非统计不确定度的估计,主要是按照国际不确定度工作组制定的《测量不确定度表示指南》建议,通过对测量过程中各种有关信息的分析,以先验概率分布为基础,根据经验参照统计不确定度的方法,以等价标准差的形式进行估计,所有与被测量有关的参量尽可能按照实际情况变化。其难点在于准确判断先验概率的分布类型以及包含因子的估计,要求估计者具有深入的专业知识和工作经验。由于缺乏一定的方式可以遵循,加之受到评估者主观因素的限制,对其可靠性的估计非常困难。

不确定度理论是现代测试技术、仪器仪表及工程实验等领域不可缺少的重要理论基础,它在科学与生产实践中起着重要的作用,因此受到普遍重视并得到迅速发展。

第二节 现代不确定度理论及其发展

70年代和80年代是现代不确定度理论形成与迅速发展的时期。随着现代化、自动化和高精度测量技术的不断出现,数据处理的理论和方法研究,也逐渐向高水平方向发展,而动态

测量中的不确定度理论,则是其研究的主题和热点。在动态测量中,经常会遇到一些复杂的、不符合统计规律的情况,用已有的统计学方法很难进行处理。因此,动态测量不确定度的估计与应用问题,已经成为现代不确定度理论的核心^[5,6]。

现代不确定度理论经过近 30 年的研究与发展,已形成较为完整的理论体系。它是集静态测量不确定度与动态测量不确定度、随机误差与系统误差、测量数据与测量方法、多种不同误差分布于一体的误差分析与数据处理理论。在理论上突破以统计学为基础的传统研究,在实践上力求统一、实用、可靠的估计准则与方法,实现不确定度理论与计算机应用技术、计量实践、标准化等紧密结合,从而达到现代化、科学化、实用化和高精度的目标。近年来,新理论和新方法的不断涌现,给不确定度理论的研究注入了新的活力,在理论上突破了以统计学理论为基础的传统方法。例如最佳测量方案的选择问题,当目标与各因子之间没有确定的函数关系和分布规律时,借助于模糊数学寻求最佳测量方案^[7],可以得到较好的结果;用灰色理论研究动态测试数据的相关性分析问题^[8],与统计理论的分析结果相吻合;应用信息论中的熵分析法规,用误差熵来估计动态测量不确定度^[9],可以得到不确定度的熵表示法。对于输入输出关系复杂的间接测量,由于常规建模方法精度低,故采用神经网络建模,利用神经网络的训练模型来对间接测量量进行估计及不确定度评定。

第三节 本书主要内容及研究方法

本书以灰色系统理论、模糊集合理论、信息熵和神经网络理论以及贝叶斯理论为基础,深入而系统地论述了测量不确

定度的非统计评定方法,并给出了大量的计算机仿真和应用实例。

本书是作者承担的国家自然科学基金资助项目“动态测量中非统计不确定度理论的研究(编号:59805007)”中的主要研究成果,基本内容包括:测量不确定度的灰评定;测量不确定度的模糊评定;测量不确定度的信息熵评定理论及贝叶斯评定理论;基于神经网络建模的间接测量不确定度评定。

参 考 文 献

- 1 BIPM. Expression of Experimental Uncertainties. Recommendation. INC-1, 1980
- 2 ISO1993(E). Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO/TAG4/WG3. Switzerland, 1993
- 3 Liu Zhimin. Uncertainty and Reliability Analysis. Proceedings of Quality Standardization Metrology, 1995
- 4 刘智敏. 不确定度原理. 北京:中国计量出版社, 1993. 6
- 5 刘智敏. 测量不确定度的应用. 宇航计测技术, 1997(增刊): 2~5
- 6 费业泰. 误差理论与数据处理. 北京:机械工业出版社, 1987
- 7 林洪桦. 现代测量误差分析及数据处理. 计量技术, 1997, (7): 38~41
- 8 费业泰. 现代误差理论及其基本问题. 宇航计测技术, 1996, 16(4, 5): 2~5
- 9 钱博森. 利用模糊性理论寻求最佳测量方法. 电测与仪表, 1995, 32(9): 23~24
- 10 Wang Z et al. Grey Relational Analysis on Correlation of Errors in Measurement. The Journal of Grey System, 1996. 8(1): 73~78
- 11 陈淑杰. 信息论在测量结果不确定度中的应用. 宇航计测技术, 1997(增刊): 13~15
- 12 林洪桦. 测量不确定度评定的熵方法. 宇航计测技术, 1997(增刊): 20~27
- 13 沙定国. 测量不确定度应用中的几个问题. 宇航计测技术, 1996, 16(4, 5): 25~29

第二章 测量不确定度的 灰色系统理论

第一节 概 述

一、灰色不确定度简介

灰色系统理论^[1]于 80 年代中期由华中理工大学邓聚龙教授提出,主要内容包括系统分析与建模、灰色预测与决策和灰色控制等。经过十多年的时间,这一理论得到了迅速的发展与广泛的应用。它不仅成功地应用于工程控制、社会经济和生态系统等领域,而且在一些复杂多变的农业系统,如气象、水利等方面取得了显著的成绩。灰色系统理论最大的特点是对样本量没有严格的要求,不要求服从任何分布,并且运算简捷方便。

灰色系统理论是研究“小样本不确定性”问题的,主要是利用已知信息来确定系统的未知信息,而使系统由“灰”变为“白”的过程,又称为系统的白化过程。它与“大样本不确定性问题”的概率统计方法具有明显的区别。当系统的参数及其内部的结构和与外部联系的关系已知时,系统的输入与输出关系已经确定,这种系统可以称为“白色系统”。当系统的参数和内部结构及特征无法获知时,只能从系统的外部表象来研究,这类系统称为“黑色系统”或“黑箱”。而介于白与黑之间,或者说对系统的参数、结构和特征部分已知,部分未知时,

这就是“灰色系统”。区别白色系统与灰色系统的重要标志是系统各因素之间是否具有确定的关系。

灰色系统理论^[2]认为,尽管客观系统表象复杂,数据离乱,但从整体上看总是有序的。因此,它必然隐藏着某种内在规律。通过对原始数据的适当处理,就有可能发现数据的规律性,从而对变化的过程作出描述与评价。

灰色不确定度理论是将灰色系统理论运用于测量不确定度原理中,并且使用灰色系统的有关方法,解决测量不确定度的非统计评定、分析、判别和预报等问题。

本章将灰色系统在理论上和应用研究中取得的成果,应用于测量不确定度的理论研究和数据处理之中,并且用典型的测量仪器和具体的生产加工过程进行了验证,在此基础上,提出了灰色测量不确定度的理论体系。

二、灰色误差的定义^[3]

标准量具有相对高的确定程度,可以看作为一个白色量,而由于测量结果的不确定性,被测量则表现为在一定范围内的灰色量。从灰色系统理论的观点来看,测量过程可认为是用一定完善程度(或精度等级)的器具作为标准量,对相对不完善的被测量进行比较的过程。由于作为标准量的测量仪器本身具有一定的误差,加之测量环境的不完善等因素,致使测量系统的特性不能全部得到,测量结果在一定程度内也是不能确定的,测量误差亦是如此。因此测量系统可以看作为一个灰色系统,具有不确定性的测量结果就看作为灰色量。这里将测量误差称为灰色误差。其定义为

$$\otimes(\text{误差}) = \otimes(\text{测得值}) - \text{真实值} \quad (2-1)$$

式中 $\otimes$ ——灰色量。

为了使用上的需要,在实际测量中,常用被测量的实际值来代替真实值,而实际值则是满足一定精度要求的真实值的近似值,即是在一定条件下的相对白化值。测量的目的就是寻求在一定条件下,得到更接近于真值的测量值,消除或减小误差,也就是寻求最接近于被测量真实值的相对白化值。

因此,可以将灰色误差的定义写为更一般的形式

$$\otimes(\text{误差}) = \otimes(\text{测得值}) - \otimes(\text{真实值}) \quad (2-2)$$

式中 $\otimes$ ——相对白化值。

第二节 测量不确定度的评定

一、几何意义

对于一个理想的测量过程,假定不存在测量误差,则每次测量结果都是被测量的真值(如图2-1曲线1)。设有 n 个测量数据组成测量数列

$$y^{(0)} = \{d, d, \dots, d\}$$

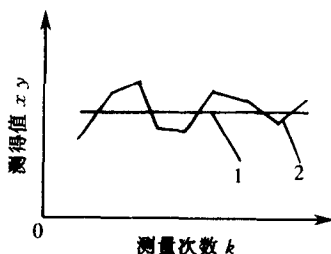


图 2-1 原始测量序列

曲线 1: 理想测量过程(y);

曲线 2: 实际测量过程(x)。

式中 d ——被测量的真实值。

对 $y^{(0)}$ 作一次累加生成,即

$$y^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k y^{(0)}(i) \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2-3)$$

由此得到生成数列 $y^{(1)}$

$$y^{(1)} = \{d, 2d, \dots, nd\}$$

图 2-2 曲线 1 为真值累加曲线,由于没有测量误差,数据累加生成后为一条直线。其方程为

$$y^{(1)}k = dk \quad (2-4)$$

式中 k ——测量次数, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

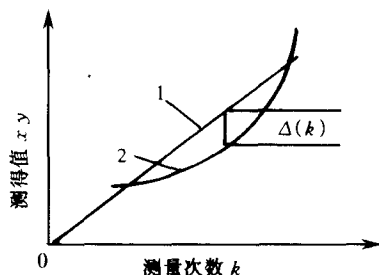


图 2-2 累加测量序列

曲线 1: 理想测量过程(y);

曲线 2: 实际测量过程(x).

对于一个实际测量过程,由于存在测量误差,使每个测得值都接近于但不等于被测量的真实值,并且围绕着该真实值有一定的分散(如图 2-1 曲线 2)。此时,测量数列为

$$x^{(0)} = \{d + \delta_1, d + \delta_2, \dots, d + \delta_k, \dots, d + \delta_n\}$$

式中 δ_k ——测量列中的随机误差, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

对 $x^{(0)}$ 作累加生成,得到测得值累加数列 $x^{(1)}$ 和累加曲