

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005586

# 基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准

李明

(开封市质量技术监督检验检测中心 开封 475000)

**摘要:**传统方法在距离测量点 247~256 mm 的范围内,存在示值误差较大的问题,因此提出基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准方法。将外径千分尺做成 UGS 模型,将其导入 CAE 软件中进行处理,构建外径千分尺的有限元分析模型。采用蒙特卡洛法构建测量力变化时的振动误差模型,通过该模型对外径千分尺测量误差进行分析。通过两规校准补偿方法对外径千分尺测量误差进行补偿,从而实现误差校准。实验结果表明,在距离测量点 247~256 mm 的范围内该方法的示值误差小于其他方法,能够有效提升误差校准效果。

**关键词:**蒙特卡洛法;外径千分尺;测量误差校准;CAE 软件;有限元分析

**中图分类号:** TP23    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 420.4020

## Measurement error calibration of micrometer based on Monte Carlo method

Li Ming

(Kaifeng Quality and Technology Supervision, Inspection and Test Center, Kaifeng 475000, China)

**Abstract:** The traditional method has the problem of large indication error in the range of 247~256 mm from the measuring point. Therefore, a calibration method of measuring error of outer diameter micrometer based on Monte Carlo method is proposed. The UGS model of the outside micrometer is made and imported into the CAE software for processing, and the finite element analysis model of the outside micrometer is constructed. The vibration error model of measuring force change is constructed by Monte Carlo method, and the measurement error of external micrometer is analyzed by this model. Through the two gauge calibration compensation method, the measurement error of the external micrometer is compensated, so as to realize the error calibration. The experimental results show that the indication error of this method is smaller than other methods in the range of 247~256 mm from the measuring point, which can effectively improve the error calibration effect.

**Keywords:** Monte Carlo method; outside micrometer; measurement error calibration; CAE software; finite element analysis

## 0 引言

计量学是在人类的交换、生产、生活活动中产生的<sup>[1]</sup>,其中长度测量是最早的测量方法之一,在中国有着悠久的历史,早在商代就已经用象牙制成尺。随着生产力的不断提升,特别是制造业的不断发展,使长度测量发展速度大幅度提升,人们对长度测量的要求也越来越高<sup>[2]</sup>。例如,在工程和生产等过程中,有必要测量输电导线与关键部件长度,这类型的测量有着很高的精度要求,远远超过了普通测量工具所能满足的精度需求。另外在生物技术、微电子学领域的研究中,人们需要测量物质的微观世界,测量级别甚至达到了纳米级、微米级。因此,数字化、大范围、高精度已成为位置检测装置与位移测量的发展趋势,在此情况下研发了许多新的测量工具与方法。其中外径千分尺就是一种新

兴的高精度测量工具,能够实现精密的大距离测量,具备测量长度不限、速度快、精度高、非接触式测量等多种优势,更适用于高精度、大尺寸的测量场合。为使外径千分尺能够实现更加精确的测量,需要对其测量误差校准问题进行研究。

对于外径千分尺测量误差校准的研究,国内外都表现出了非常积极的态度。其中国外对于外径千分尺测量误差校准的研究起步较早,利用已经比较完备的校准仪器进行误差校准,而国内对于外径千分尺测量误差校准的研究则相对起步较晚,主要是以国外的先进经验为基础进行测量误差校准。到目前为止,对于外径千分尺测量误差校准方法的研究已经取得了一定的进展,例如文献[3]提出了一种外径千分尺测量误差校准方法,该方法主要介绍了外径千

收稿日期:2020-12-22

• 24 •

分尺示值误差校准结果的测量不确定度评定过程,从测量依据、方法与模型、方差和灵敏系数、输入量标准等方面进行外径千分尺测量不确定度评定,根据评定结果实现外径千分尺测量误差校准。文献[4]提出了一种外径千分尺测量误差分析及消除方法,该方法主要分析了测微螺杆螺距、零位调整、两测量面平行度和测量面平面度以及测力变化、视差所造成的外径千分尺测量误差,在此基础上设计了一种外径千分尺测量误差消除方法,从而实现其测量误差校正。

由于在利用以上方法进行外径千分尺测量误差校准时,在距离测量点 247~256 mm 的范围内,存在校准中示值误差较大的问题,因此将蒙特卡洛法应用于外径千分尺测量误差校准中,提出一种新的外径千分尺测量误差校准方法。将外径千分尺做成 UGS 模型,将其导入 CAE 软件中进行处理,构建外径千分尺的有限元分析模型。采用蒙特卡洛法构建测量力变化时的振动误差模型,通过该模型对外径千分尺测量误差进行分析。通过两规校准补偿方法对外径千分尺测量误差进行补偿,以期达到外径千分尺测量误差精准校准的目标。在此基础上并通过实验比较了在距离测量点 247~256 mm 的范围内的示值误差,以期外径千分尺能够实现更加精确的测量,促进工程以及其他测量工作的顺利开展。

## 1 外径千分尺测量误差校准方法设计

### 1.1 外径千分尺有限元模型

外径千分尺材料数据如表 1 所示。

表 1 外径千分尺材料数据

序号	属性名称	单位	数值
1	尺架材料	—	7078 铝合金
2	比热容	J/(kg·K)	960
3	热导率	W/(m·K)	120
4	热膨胀系数	Kelvin	$2.4 \times 10^{-5}$
5	屈服强度	N/m <sup>2</sup>	$5.2 \times 10^9$
6	质量密度	kg/m <sup>3</sup>	2 700
7	抗剪模量	N/m <sup>2</sup>	$2.6 \times 10^{10}$
8	普阿松比率	NA	0.33
9	弹性模量	N/m <sup>2</sup>	$7.1 \times 10^{10}$

根据表 1 数据将外径千分尺做成 UGS 模型,并将模型数据导入 CAE 软件中,对外径千分尺的有限元分析模型进行构建<sup>[5-6]</sup>。在有限元模型构建过程中需要对模型进行网格化处理,该过程可以分为 3 个阶段。第 1 个阶段是实施自由网格划分,其单元数与节数如表 2 所示<sup>[7]</sup>。

第 2 个阶段是利用网格生成器在模型边界上放置节点<sup>[8]</sup>。第 3 个阶段是通过网格生成器生成零件内部的节点,并利用四面体元素对模型进行填充并生成单元中间节点<sup>[9]</sup>。

表 2 实施自由网格划分的单元数与节数

序号	网格类型	数据
1	节数	134.7
2	要素数	7 098
3	品质	高
4	公差/mm	0.537 25
5	要素大小/mm	10.675
6	要点检查/Points	4
7	光滑表面	打开
8	自动过渡	关闭
9	所用网格器	标准

构建的外径千分尺的有限元分析模型具体如图 1 所示。

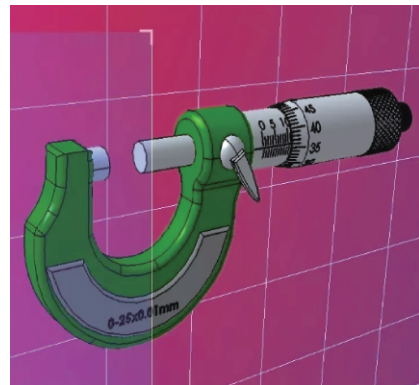


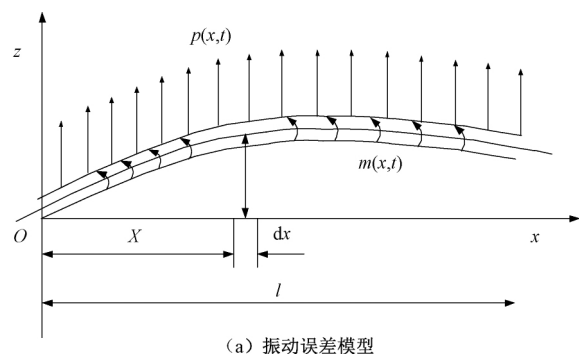
图 1 外径千分尺的有限元分析模型

### 1.2 测量误差分析

根据上文所构建的外径千分尺的有限元分析模型,采用蒙特卡洛法构建测量力变化时的振动误差模型,通过该模型进行外径千分尺测量误差分析<sup>[10]</sup>。假设测量时外径千分尺外载荷与中心主惯性轴处于同一平面内,忽略转动惯量与剪切变形的微小影响,通过随机抽样构建测量力变化时的振动误差模型<sup>[11]</sup>。

构建的测量力变化时的振动误差模型具体如图 2 所示。

利用该模型实施外径千分尺测量误差分析<sup>[12]</sup>。图 1 中  $x, z$  代表坐标轴;  $O$  代表坐标轴原点;  $dx$  代表振动误差



(a) 振动误差模型

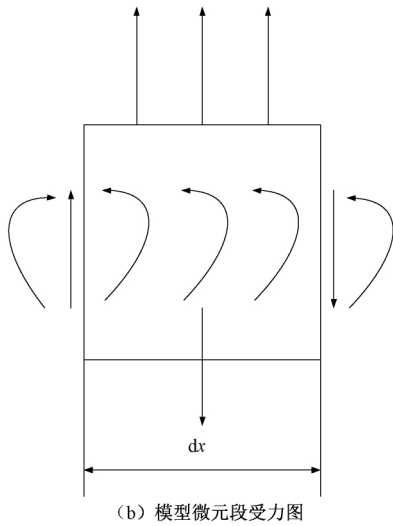


图 2 测量力变化时振动误差模型

微元段;  $m(x, t)$  代表测量时单位长度梁上外力矩的分布;  $p(x, t)$  代表测量时单位长度梁上外力的分布;  $X$  代表振动误差微元段的长度;  $l$  代表外径千分尺长度<sup>[13]</sup>。

1.3 测量误差校准

利用两规校准补偿对外径千分尺测量误差进行补偿, 从而实现外径千分尺测量误差校准的目的<sup>[14]</sup>。首先测量两个不同直径的标准外径千分尺, 其直径分别用  $D_{r1}$ 、 $D_{r2}$  来表示, 而有效长度则分别用  $L_1$ 、 $L_2$  来表示, 并获取二者的测量中径, 用  $D_{m1}$ 、 $D_{m2}$  来表示。根据单规校准补偿公式获取两规校准联立方程组<sup>[15]</sup>。其中单规校准补偿公式具体如下所示:

$$D_m = \sqrt{D_r^2 - 4 \left( \frac{b - s\gamma L}{c\gamma} \right)^2} \quad (1)$$

式中:  $D_r$  代表实际中径值;  $b$ 、 $\gamma$  代表定位误差参数;  $s$  代表全局灵敏度因子;  $c$  代表相对位置偏移;  $L$  代表有效螺纹长度<sup>[16]</sup>。

两规校准联立方程组具体如下所示:

$$\begin{cases} D_{m1} = \left[ \sqrt{D_{r1}^2 - 4 \left( \frac{b - s\gamma L_1}{c\gamma} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ D_{m2} = \left[ \sqrt{D_{r2}^2 - 4 \left( \frac{b - s\gamma L_2}{c\gamma} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2)$$

令:

$$\begin{cases} \lambda = \frac{2b}{c\gamma} \\ k = \tan\gamma = \frac{s\gamma}{cL} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$ 、 $k$  分别代表不同的不确定度参数<sup>[17]</sup>, 通过上式将式(2)等价如下式:

$$\begin{cases} D_{r1}^2 - D_{m1}^2 = (\lambda - kL_1)^2 \\ D_{r2}^2 - D_{m2}^2 = (\lambda - kL_2)^2 \end{cases} \quad (4)$$

对方程组进行求解, 可以获取共 4 组解, 具体如下所示:

$$\begin{cases} \lambda = \frac{L_1\xi_2 - L_2\xi_1}{L_1 - L_2} \\ k = \frac{\xi_1 - \xi_2}{L_1 - L_2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \lambda = -\frac{L_1\xi_2 - L_2\xi_1}{L_1 - L_2} \\ k = -\frac{\xi_1 - \xi_2}{L_1 - L_2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \lambda = \frac{L_1\xi_2 + L_2\xi_1}{L_1 - L_2} \\ k = \frac{\xi_1 + \xi_2}{L_1 - L_2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \lambda = -\frac{L_1\xi_2 + L_2\xi_1}{L_1 - L_2} \\ k = -\frac{\xi_1 + \xi_2}{L_1 - L_2} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\xi_1$  代表第 1 个标准外径千分尺量规直径与测量中径的平方根;  $\xi_2$  代表第 2 个标准外径千分尺量规直径与测量中径的平方根<sup>[18]</sup>。具体计算公式如下所示:

$$\begin{cases} \xi_1 = \sqrt{D_{r1}^2 - D_{m1}^2} \\ \xi_2 = \sqrt{D_{r2}^2 - D_{m2}^2} \end{cases} \quad (9)$$

由于  $b$ 、 $\gamma$  这两个定位误差参数均为微小量, 以装配经验为依据可知二者通常取值如下:

$$\begin{cases} \gamma \in [-5^\circ, 5^\circ] \\ b \in [-2, 2] \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $b$  的单位为 mm。

因此舍去前两组绝对值偏大的解, 又由于第二组值为负值, 所以选择第一组解。

接着测量待测外径千分尺, 当其有效长度为  $L_T$ , 则实际中径的具体补偿公式如下:

$${}^T D_r = \sqrt{{}^T D_m^2 + (\lambda - kL_T)^2} \quad (11)$$

式中:  ${}^T D_r$  代表外径千分尺的测量误差补偿值;  ${}^T D_m$  代表补偿前的外径千分尺量中径值。

2 测量误差校准实验

2.1 实验方法

为验证本文所设计的基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准方法的综合性能, 对其进行实验验证。实验中采用的外径千分尺由固定测头、测微螺杆、锁紧装置、固定套管、微分筒、测力装置构成, 结构具体如图 3 所示。

该外径千分尺的具体参数如表 3 所示。

获取距离测量点 247~256 mm 范围内校准中的示值误差数据作为实验数据。为避免本次实验结果过于单一,

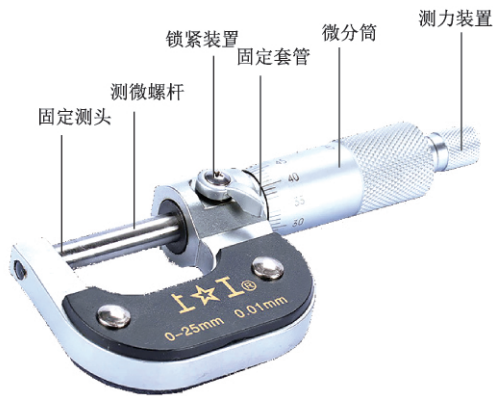


图 3 实验外径千分尺结构

表 3 该外径千分尺的具体参数

序号	项目	数据
1	型号	QK332051244
2	测量范围/mm	0~25
3	允许误差/mm	0.004
4	分度值/mm	0.01
5	表面工艺	镀铬面
6	分辨率/ $\mu\text{m}$	10
7	平面度/ $\mu\text{m}$	0.6
8	附件	量杆:1 个 扳手:2 个
9	平行度	2.25
10	精度/mm	$\pm 1.33$

缺乏对比性,将传统方法作为实验对比方法,进行对比实验,包括文献[3]方法、文献[4]方法。

## 2.2 实验结果

在测量误差较小的情况下,在距离测量点为 247~256 mm 的范围内,基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准方法与文献[3]方法、文献[4]方法校准中的示值误差对比实验数据具体如表 4 所示。

表 4 测量误差较小情况下的示值误差对比实验数据

测量点 距离/mm	校准中的示值误差/mm		
	基于蒙特卡 洛法的方法	文献[3] 方法	文献[4] 方法
247	-0.1	-0.4	-0.4
248	0.0	-0.3	-0.5
249	0.0	-0.2	-0.5
250	-0.1	-0.3	-0.4
251	-0.1	-0.2	-0.4
252	-0.1	-0.3	-0.4
253	-0.1	-0.4	-0.4
254	0.0	-0.3	-0.4
255	0.0	-0.4	-0.5
256	0.0	-0.4	-0.5

根据表 4 的示值误差对比实验数据可知,在测量误差较小的情况下,基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准方法校准中的示值误差小于其他两种传统方法。

在测量误差为中等的情况下,在距离测量点 247~256 mm 的范围内,基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准方法与文献[3]方法、文献[4]方法校准中的示值误差对比实验数据具体如表 5 所示。

表 5 测量误差中等情况下的示值误差对比实验数据

测量点 距离/mm	校准中的示值误差/mm		
	基于蒙特卡 洛法的方法	文献[3] 方法	文献[4] 方法
247	-0.1	-0.5	-0.6
248	-0.3	-0.4	-0.5
249	-0.2	-0.4	-0.5
250	-0.3	-0.4	-0.6
251	-0.3	-0.4	-0.6
252	-0.2	-0.4	-0.5
253	-0.1	-0.5	-0.6
254	-0.3	-0.5	-0.6
255	-0.2	-0.5	-0.6
256	-0.3	-0.4	-0.5

根据表 5 校准中的示值误差对比实验数据可知,在测量误差为中等的情况下,基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准方法校准中的示值误差小于其他两种传统方法。

在测量误差较大的情况下,在距离测量点 247~256 mm 的范围内,基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准方法与文献[3]方法、文献[4]方法校准中的示值误差对比实验数据具体如表 6 所示。

表 6 测量误差较大情况下的示值误差对比实验数据

测量点 距离/mm	示值误差/mm		
	基于蒙特卡 洛法的方法	文献[3] 方法	文献[4] 方法
247	-0.3	-0.5	-0.6
248	-0.4	-0.6	-0.7
249	-0.2	-0.6	-0.6
250	-0.3	-0.6	-0.7
251	-0.4	-0.5	-0.6
252	-0.3	-0.4	-0.7
253	-0.2	-0.5	-0.7
254	-0.3	-0.5	-0.6
255	-0.4	-0.6	-0.6
256	-0.3	-0.6	-0.7

根据表 6 校准中的示值误差对比实验数据可知,在测量误差较大的情况下,基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准方法校准中的示值误差小于其他两种传统方法。

### 3 结 论

为降低外径千分尺测量误差,提升测量精度,本文提出基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准方法,实验结果表明,无论是在测量误差较小、中等还是较大情况下,本文方法的示值误差均较低,验证了该方法可以有效实现外径千分尺测量误差补偿,但该方法构建的外径千分尺有限元分析模型精度上仍然有提升空间,日后将会继续研究和改进。

#### 参考文献

- [1] 占栋,景德炎,吴命利,等.基于极坐标等角度分布的钢轨廓形测量误差校准[J].北京交通大学学报,2018,42(3):112-119.
- [2] 王欣,吴根勇,潘东浩,等.基于历史运行数据的风电机组风向标测量误差校准方法[J].太阳能学报,2020,41(3):52-58.
- [3] 宿文娟.大尺寸外径千分尺示值误差的不确定度评定[J].山东工业技术,2017(21):226,175.
- [4] 杨尧.关于影响外径千分尺测量精度的主要误差分析及消除方法[J].轻工科技,2017(5):109-110.
- [5] 陈旺达,徐志玲,厉志飞.基于机器视觉的外径千分尺示值检定装置设计[J].机床与液压,2019,47(17):115-119.
- [6] 杨练根,杨光明,王选择.多波长表面形貌测量系统中波长校准方法[J].光学技术,2018,44(3):300-304.
- [7] 张文颖,朱浩然,李美萱,等.基于自准直仪的测角传感器实时在位校准方法[J].中国激光,2019,46(4):166-172.
- [8] 董云龙,黄高东,李保珠,等.基于 AIS 的雷达高精度误差校准方法[J].电子技术应用,2019,45(6):75-79.
- [9] 杨志成,严胜刚,李斌.三分量磁通门梯度仪校准算法研究[J].仪器仪表学报,2017,38(8):2055-2061.
- [10] 赵鸿铎,谷松原,马鲁宽.基于数字图像关联技术的沥青应变计测量准确度比对方方法[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(9):1211-1217.
- [11] 崔健,董晓睿,商凯,等.一种新的基于多重液相色谱-质谱实验肽信号峰形相似性的校准算法[J].分析测试学报,2018,37(12):64-69.
- [12] 董云龙,黄高东,李保珠.一种非均匀系统误差的雷达分区校准方法[J].电光与控制,2020,27(3):69-74.
- [13] 黄明,刘品宽,夏仰球,等.自研角度计量转台在圆分度器件校准中的应用[J].光学精密工程,2019,27(1):110-120.
- [14] 甘凌浩,尹勇生,孙康康,等.一种适用于多频输入的 TIADC 时间失配误差校准方法[J].电子测量与仪器学报,2019,33(10):134-141.
- [15] 丁峰元.浊度法抗生素效价测定仪的校准技术及其应用[J].中国抗生素杂志,2018,43(1):69-72.
- [16] 周胜,韩艳玲,李斌成.基于光腔衰荡光谱技术的压力计校准方法[J].光谱学与光谱分析,2018,38(4):1031-1035.
- [17] 刘军.一种多端口矢量网络分析仪误差校准简化方法[J].国外电子测量技术,2016,35(9):29-33.
- [18] 邓红辉,闫辉,肖瑞,等.一种全数字前馈式时间交织模数转换器时间误差后台校准算法[J].电子与信息学报,2020,42(2):410-417.

#### 作者简介

李明,本科,高级工程师,主要研究方向为计量。

E-mail:songliaolao26h@163.com