

文章编号 1004-924X(2008)11-2239-05

# 面向对象的大尺寸测量不确定度分析

张福民, 曲兴华, 叶声华

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 常规尺寸的不确定度评价方法不适用于大尺寸测量, 尤其是特定拟合任务中的不确定度评价。针对大尺寸测量的特殊性, 研究了基于蒙特卡罗法的不确定度评价方法。通过随机仿真各项测量误差源, 得到测量结果的仿真样本, 并用计算机可视化直观表示该样本, 形成离散不确定度点云, 从而评价大尺寸特定测量对象的不确定度。以激光跟踪仪测量大型圆形截面工件为例, 给出测点对称、均匀分布和半径约束等优化测量思想, 减小测量不确定度。最后, 将该方法应用于激光跟踪仪测量隧道构件的实例中, 结果表明, 常规圆心拟合不确定度为 2.552 5 mm, 加入半径约束优化测量方案后, 不确定度减小至 0.032 6 mm。仿真和实际实验表明, 蒙特卡罗评价和离散点云表示法可准确、直观地评价特定大尺寸测量对象的不确定度, 制定的最优测量方案可提高测量精度。

**关键词:** 大尺寸测量; 不确定度; 蒙特卡罗法; 面向对象; 激光跟踪仪

**中图分类号:** TB92      **文献标识码:** A

## Uncertainty estimation of large-scale measurement for special fitting task

ZHANG Fu-min, QU Xing-hua, YE Sheng-hua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A new uncertainty estimation method was researched based on Monte Carlo evaluation, for some uncertainties of large-scale measurement could not be analyzed by conventional methods, especially for special fitting task. In proposed estimation, the simulated sample was obtained by simulating each measuring error source randomly and denoted as discrete point-clouds by computer vision, so as the uncertainty of given measuring object could be evaluated. By taking analyzing large-scale circular section part by laser tracker for example, the optimized measurement concepts including point symmetry, equal distribution and radius constraint were given. Finally, the optimized evaluation method was used in measuring practical tunnel components by laser tracker, results show that the uncertainty is decreased to 0.032 6 mm after radius constraint optimization, which is priority to average fitting uncertainty of circle center of 2.5525 mm by traditional method. It is proved that Monte Carlo evaluation and discrete point-cloud representation can evaluate accurately and intuitively the uncertainty for large-scale object and the optimum sampling strategy can improve the measuring precision.

**Key words:** large-scale measurement; uncertainty; Monte-Carlo method; special fitting task; laser tracker

收稿日期: 2008-01-21; 修订日期: 2008-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50575158; No. 60723004); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20060056015)

## 1 引言

几何量测量在制造业扮演着重要的角色,常规尺寸的研究已日趋完善<sup>[1-2]</sup>,但大型尺寸测量体系还不健全,例如缺乏精度评价体系。ISO 发布的 GUM 指出,测量结果必须说明其测量不确定度,否则无法说明其结果的可靠程度,也无法溯源至国际标准。常规尺寸不确定度评价主要有解析法和标准比对法<sup>[3]</sup>。解析法需要求导运算求出每一项误差源的灵敏系数,而大尺寸测量仪器大多基于非正交坐标系,测量模型多为复杂的非线性传感模型,难以求取灵敏系数;而且测量结果受温度等环境因素影响极大,误差源较多,传播到测量点坐标的规律复杂,还要考虑不确定度传递到最终拟合任务的传播规律<sup>[4]</sup>,即测量点集拟合后的不确定度;此外大尺寸测量经常涉及坐标系的转换,因此,还要考虑不确定度在转换中的传播规律;所以,应用解析法解决测量不确定度问题是困难的事情。标准比对法是采用孔板、球板、步距规、标准尺或高一级精度的标准仪器,与待评价仪器比对<sup>[5]</sup>,这种方法如果应用于大尺寸测量仪器,则需要相应的大尺寸标准实物,难以制作、携带和维护高精度。

NPL 开展了面向对象的不确定度分析,研究了激光跟踪仪和摄影测量系统的精度评价方法<sup>[6]</sup>。PTB 和 IMG 等都在研究虚拟测量机,但多注重常规尺寸。张曦研究了激光跟踪仪测量曲面的不确定度<sup>[7]</sup>。这些正在进行中的研究工作表明,探索有效的适合大尺寸测量用的不确定度评价体系很有意义。蒙特卡罗方法是一种仿真技术,已在多个领域获得成功运用<sup>[8-9]</sup>。本文研究了基于蒙特卡罗法的面向对象大尺寸测量不确定度的评价方法,并用该方法指导最优测量策略。

## 2 面向对象的不确定度分析

蒙特卡罗法是一种概率事件仿真技术,其核心是以变量的伪随机抽样获得服从特定概率分布的随机数,并以此模拟测量过程中的各种随机误差,产生可能的结果分布。这种评价方法通过大量简单重复的抽样来实现复杂函数的计算,容易求解,不受函数关系是否线性的限制,避免用户增

加过多的投入成本,特别适合于大尺寸测量的不确定度准确评价。面向对象的不确定度求取步骤如下:

(1)建立大尺寸测量仪器中各个传感器的测量模型,以及拟合任务模型。

(2)确定影响精度的所有误差分量,以及各自的分布类型及其特征量,包括各传感器和环境影响等误差源的误差模型建模,给每个误差源一个合适的概率分布函数。

(3)按照各误差源的概率密度函数分布随机抽样,模拟测量误差,求出各传感器的输出结果。

(4)根据(1)中建立的拟合模型计算最终拟合结果。

(5)重复(3)和(4),进行  $n$  次仿真,得到描述最终拟合任务概率密度函数的  $n$  个样本结果。计算该样本的标准差,用于评价最终面向对象的不确定度。

另外,数值表达方式是枯燥的,而本方法将样本利用计算机可视化技术展现出来,形成离散点云提供给用户直观的观察。本文以工业上常见的激光跟踪仪测量圆形截面为例,介绍测量圆心和半径的不确定度。激光跟踪仪是较理想的大尺寸测量仪器,测量范围可达到 35 m。首先建立测量模型。激光跟踪仪内部共 3 个传感器,为一个激光干涉测距单元和两个测角单元,分别为水平角  $\alpha$  和垂直角  $\beta$ 。利用球坐标得到三坐标。

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cos \alpha \sin \beta \\ l \sin \alpha \sin \beta \\ l \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

暂不考虑周围环境等的误差源,建模 3 个传感器的误差源:

$$\begin{cases} l^* = l + \varepsilon_l \\ \alpha^* = \alpha + \varepsilon_\alpha \\ \beta^* = \beta + \varepsilon_\beta \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_l \sim N(0, 10 \mu\text{m} + 0.8 \mu\text{m}/L)$ ,

$$\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta \sim N(0, 1'')$$

拟合圆的公式为:

$$\min f(a, b, r) = \sum (\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2} - r)^2, \quad (3)$$

仿真表明,样本数过少不能得到足够的统计来表达真实不确定度,样本数过多会增加不必要的计算负担。本文取样本数为  $n = 500$ 。对每个

样本中的点分别拟合,得到一组参数  $a, b, r$ 。对这组参数统计得到最终面向任务的不确定度,即拟合圆心的不确定度  $U = \sqrt{U_a^2 + U_b^2}$  和拟合半径不确定度  $U_r$ 。

仿真假设激光跟踪仪放在圆心处,测量直径为 15 m 的圆形截面工件。设圆截面已投影在  $xy$  平面,共测量如图 1 中的 4 个测量点,其相对  $x$  轴对称分布。

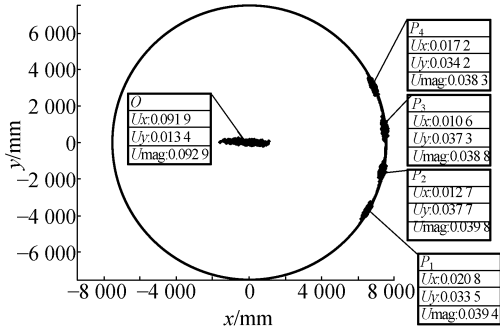


图 1 圆心拟合不确定度

Fig. 1 Uncertainty of circle center

图 1 为拟合不确定度。为了方便,将其中可视化点云放大了 5 000 倍。例如图中的  $P_1$  到  $P_4$  为测量点的不确定度,可明显看出激光跟踪仪测量的不确定度特性,在径向距离上的不确定度较低,而横向测量不确定度较高。这是因为激光跟踪仪测距单元为干涉仪,精度高,而测角精度稍低。圆心的不确定度特性也一目了然,拟合  $x$  轴的不确定度较大,是因为测点相对  $x$  轴不对称;而  $y$  轴不确定度较小,是由于测点相对  $y$  轴对称。

### 3 最优测量方案

基于蒙特卡罗的不确定度表达方法不仅可以在线应用,实时计算测量不确定度,还可以离线应用,事先仿真测量不确定度,从而指导用户选择最优测量方案,将关心量的不确定度降至最低。

仍以第 2 节的仿真数据为例。额外测量几个相对  $y$  轴对称分布的测点后,测量结果不确定度如图 2 所示。

可见,测点分布对称后,测量结果的不确定度明显减少。实际测量时可将最感兴趣的方向不确定度通过均布测量点的采样策略降低到最小。

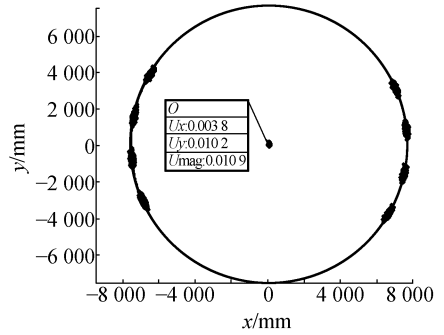


图 2 加入对称测量点后的圆心不确定度

Fig. 2 Uncertainty of circle center with point symmetry

观察测量点均布和密集分布情况对不确定度的影响时,可观察 3 个点拟合的圆心不确定度的变化情况,测量分布情况如图 3 所示,仿真过程同上。

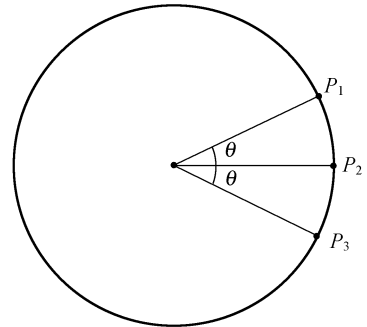


图 3 三个测点分布

Fig. 3 Distributions of three measurement points

令  $\theta$  在 0 到  $\pi$  之间变化,理论上可知最均匀的时候,  $\theta = 2\pi/3 \approx 2.1$ ,此时应是最佳采样策略。图 4 为仿真结果,可以看到  $\theta$  在 2.1 左右时不确定度是最小的,符合理论情况。

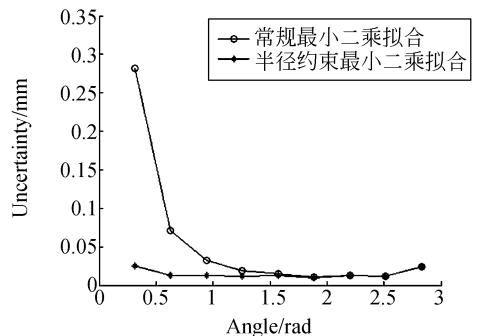


图 4 测点分布对不确定度的影响

Fig. 4 Effect of distributions of measurement points on uncertainties

该结果也说明大尺寸工件,尤其是分段产品,难以采集完整周长上的点,只能采到部分弧长,因此是制约大尺寸测量精度的重要因素。本文采用加入半径约束的方法提高鲁棒性。实验表明,拟合圆心与拟合半径之间存在强烈的线性依赖关系,而一般产品设计尺寸已知,即半径设计值已知,因此多数情况下,可以利用半径约束提高圆心定位精度。

加入半径约束的公式是:

$$\min f(a,b,r) = \sum (\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2} - r)^2$$

$$s. t. r = r_0, \quad (4)$$

式中: $r_0$  为理论半径。

在上述仿真过程中加入半径约束,仿真结果同样在图 4 中。可见,加入半径约束后,无论测点分布情况如何,拟合精度与鲁棒性都较高。

## 4 实例分析

以盾构隧道构件为实验对象进行实际测量实验。大型隧道构件有着严格要求,几何尺寸和形状误差的质量检验是制造厂家的质量管理程序中重要的一环。随着山洞、地铁、越海等隧道的大力发展,隧道的长度越来越长,经常达到十几公里,相应要求隧道直径和构件外形尺寸越来越大,制造和配合精度越来越高,因此对测量的准确度要求更高。

实验用到的隧道构件弧长约 5 m,宽约 2 m。以 FARO 激光跟踪仪作为实验设备进行坐标测量。利用点云拟合物面,通过分析运算得到尺寸信息。

测量点需要配准到 CAD 坐标系下。将 CAD 坐标系定义在  $xy$  平面, $z$  平面为圆柱体轴线,仍将圆投影在  $xy$  平面上。点分布及最终不确定度如图 5 所示,可以看出半径的不确定度极大,这是影响大型圆截面的精度的最大因素。因为 4 个平面是较好恢复的,而大型圆截面由于只能采集到部分弧长上的坐标信息,根据第 2.2 节的结论,不确定度将显著增加。另外, $x$  向的不确定度显著小于  $y$  轴。在用户只关心一个方向的测量结果

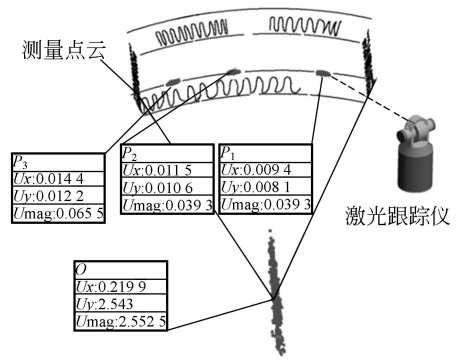


图 5 隧道构件圆心拟合不确定度

Fig. 5 Uncertainty of tunnel structure circle center

时,可利用该方法将关心方向的不确定度减少到最低。在最小二乘法中加入了半径约束,加入半径约束后的圆心不确定度如图 6 所示。

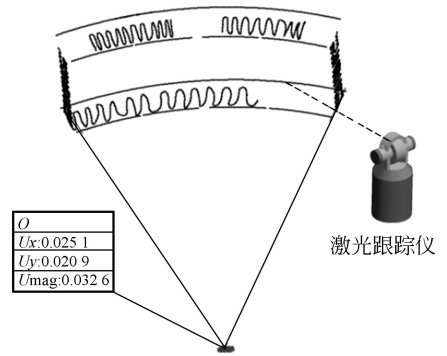


图 6 加入半径约束后的圆心拟合不确定度

Fig. 6 Uncertainty of circle center with radius constraint

图 6 表明,加入半径约束后的最终圆心不确定度减少,极大提高了测量精度和鲁棒性。通过点云表示法可有效帮助用户理解测量结果。

## 5 结论

基于蒙特卡罗的不确定度评价方法克服了非线性公式及标准实物等评价方法应用于大尺寸测量的困难。离散点云表示法可直观提供采样策略最优评价标准,用于设计最佳测量方案,对布站方式、采样密度、选取硬件等进行优化布局,得到可靠的不确定度,并溯源至国家标准。跟踪仪测量隧道构件时,加入半径约束最优测量方案后,圆心

拟合不确定度由 2.552 5 mm 减小至 0.032 6 mm,可满足隧道构件的测量公差要求。

### 参考文献:

- [1] 陈刚, 陈华, 车仁生. 空间点的立体视觉传感器标定方法[J]. 光学精密工程, 2007,15(9):1439-1444.  
CHEN G, CHEN H, CHE R SH. Calibration method for stereo vision sensor based on spatial points. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1439-1444. (in Chinese)
- [2] 刘国忠, 王伯雄, 史辉, 等. 足部三维测量系统中 CCD 传感器的全局标定[J]. 光学精密工程, 2007,15(7):1124-1129.  
LIU G ZH, WANG B X, SHI H, *et al.*. Global calibration of CCD cameras in measurement system for 3-D foot shapes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(7):1124-1129. (in Chinese)
- [3] WILHELM R G, HOCKEN R, SCHWENKE H. Task specific uncertainty in coordinate measurement[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2001,50(2):553-563.
- [4] COX M G, SIEBERT B R L. The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty [J]. *Metrologia*, 2006,43(4):S178-S188.
- [5] ZHANG D F, MAROPOULOSA P G, HILL M. Random uncertainty propagation in estimates of sphere parameters from coordinate measurements[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006,46(12-13):1362-1368.
- [6] CALKINS J M. *Quantifying coordinate uncertainty fields in coupled spatial measurement systems*[D]. Virginia Polytechnic Institute, Doctor of Philosophy, 2002.
- [7] 张曦, 陈五一. 激光跟踪仪测量曲面不确定度研究[J]. 计量学报, 2006,27(2):107-112.  
ZHANG X, CHEN W Y. The contour measurement uncertainty in the measurement of curve surfaces with a laser tracker[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006,27(2):107-112. (in Chinese)
- [8] 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. 光学精密工程, 2006,14(5):822-828.  
LI Y P, YU B X, WANG Y P, *et al.*. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging sepectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):822-828. (in Chinese)
- [9] 贾红辉, 常胜利, 杨建坤, 等. 单次散射近似研究非视线光传输中的误差[J]. 光学精密工程, 2007,15(1):40-44.  
JIA H H, CHANG SH L, YANG J K, *et al.*. Study on error of non-line-of-sight light propagation by single-scattering model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(1):40-44. (in Chinese)

作者简介:张福民(1982—),男,博士研究生,主要从事测试计量技术及仪器方面的研究。E-mail:zhangfumin@tju.edu.cn

曲兴华(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事测试计量技术及仪器方面的研究。E-mail:xinghuaq@sina.com