二次曲面拟合与拟合参数不确定度分析

张 曦 胡春华 陈五一

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 由离散点进行二次曲面拟合问题可归结为存在约束条件的非线性优化问题,在总结了拟合参数初值计算和优化算法的基础上,研究了点位的坐标测量误差对拟合参数和曲面轮廓度评价的影响. 给出了评价二者不确定度的解析方法和 Monte-Carlo 模拟方法,并指出,对于实际的测量数据,只有采用 Monte-Carlo 模拟方法进行拟合参数和轮廓度的不确定度评价才是可靠的. 仿真实验和实物测量实验表明,给出的二次曲面拟合方法和不确定度估计方法是正确的.

关 键 词: 二次曲面; 拟合算法; 不确定度分析

中图分类号: TB 92

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1091-05

Quadratic surface fitting and uncertainty analysis of fitting parameters

Zhang Xi Hu Chunhua Chen Wuyi

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The quadric surface fitting through cloud points was described as the constrained nonlinear optimization. The calculation of initial fitting parameters and optimization algorithm were summarized, and then the influence of point coordinate measurement error on fitting parameters and evaluation of surface contour was researched. The methods to assess their uncertainty through analysis and Monte-Carlo simulation were discussed. It was found that the uncertainty of fitting parameters and surface contour could be evaluated reliably only through Monte-Carlo simulation for measurement data from actual surfaces. The simulation and actual measurement experiments were conducted, which suggested that the methods of quadric surface fitting and uncertainty assessment presented be correct.

Key words: quadratic surfaces; fitting algorithm; uncertainty analysis

二次曲面是指由三元二次方程所表示的曲面,在工程中会经常遇到根据某种坐标测量设备获得的离散点进行二次曲面拟合的问题. 如反射面天线的面型多采用旋转抛物面等二次曲面,其型面精度会影响天线的性能,因此需要测量实际反射面,并进行二次曲面拟合以评价天线的型面质量.

对一般二次曲面方程的化简和分类问题,空间解析几何已经给出了完整解答,其核心思想是利用正交变换求出一般位置二次曲面的姿态,再利用二次曲面标准方程求解其位置和曲面特征参数(如焦距或长短轴等). 该方法用于拟合无误差的理想数据可以得到精确解,但实际的离散点既包括型面偏差又包括测量误差,直接使用该方法拟合得到的结果误差较大,原因在于误差的干扰使得某些约束条件(如对于理想旋转双曲面,系数矩阵的特征值为一个零根和两个重的实根)不能严格满足,因此有必要在此基础上,根据某种准则进行进一步参数优化,几何上的对应过程就是同时调整二次曲面的位姿和形状使之与离散点尽量贴合. 文献[1]采用正交变换方法推导了拟合椭球面参数及位姿的方法,但没有进行进一步的参数优化. 文献[2]给出了抛物面天线测量数据的处理方法以及法向偏差的计算,使用的优化准

收稿日期: 2005-10-20

作者简介: 张 曦(1977-), 男, 江苏徐州人,博士生, zhangxi _ buaa@163. com.

则没有明确的几何意义,文中没有提及获得天线位姿初值的方法. 文献[3]针对双曲面和抛物面的拟合问题,比较了最小二乘算法和参数优化方法. 文献[4]总结了3种计算曲面位姿的方法:曲面自由拟合法、公共点转换法和CAD面型转换法,对于存在设计模型的曲面,利用三维软件直接进行点云位姿的调整具有实用性.

现有的文献多侧重于二次曲面参数和位姿的计算,但很少涉及到这些参数的测量不确定度,这对于一个测量结果来说是不完整的,影响了测量结果的可信度. 本文在系统总结了二次曲面拟合方法的基础上,进一步讨论了如何利用解析方法和Monte-Carlo模拟方法来确定拟合参数和轮廓度评价的不确定度,并指出对于实际测量数据,采用模拟方法得到的不确定度才是可靠的.

1 二次曲面拟合问题的一般描述

二次曲面的参数如椭球面的长短轴等描述了二次曲面的性质,记为 p,把二次曲面标准方程所对应的坐标系称为标准坐标系,该坐标系下的点记为 $\boldsymbol{X}=(x,y,z)^{\mathrm{T}}$.

把测量坐标系中的点记为 $\boldsymbol{X}'=(x',y',z')^{\mathrm{T}}$,一般情况下测量坐标系与标准坐标系不一致,二者之间的坐标变换关系可用(1)式描述,其中的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和平移向量 $\boldsymbol{T}$ 共有6个自由度,描述了实际二次曲面的位姿(如旋转抛物面的旋转轴方向和顶点位置),一般位置二次曲面方程为(2)式:

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{X}'+\boldsymbol{T} \tag{1}$$

$$a_1x'^2+a_2y'^2+a_3z'^2+2a_4x'y'+2a_5x'z'+2a_6y'z'+2a_7x'+2a_8y'+2a_9z'+a_{10}=0 \tag{2}$$

令 $\boldsymbol{P}=[\boldsymbol{p},\boldsymbol{R},\boldsymbol{T}]^{\mathrm{T}}$,则参数向量 $\boldsymbol{P}$ 完整描述了二次曲面的形状和位姿,一个具体的二次曲面与参数向量空间中的点是一一对应的.

二次曲面拟合问题的实质是根据测量坐标下的离散点 $\{\boldsymbol{X}_i'\mid\boldsymbol{X}_i'=(x_i',y_i',z_i'),i=1,2,\cdots,m\}$,在一定约束条件下对参数向量 $\boldsymbol{P}$ 进行最优估计,约束条件是希望拟合的面型,这与先验知识有关. 具体算法如下:①测量数据的预处理,如坐标变换和数据滤波,以避免可能产生的数值计算问题;②根据测量数据 $\boldsymbol{X}'$ 求解一般位置的二次曲面方程式(2)的系数;③计算参数向量 $\boldsymbol{P}$ 的初值 $\boldsymbol{P}_0$;④以 $\boldsymbol{P}_0$ 为初值,进行非线性优化得到参数向量的最优估计 $\hat{\boldsymbol{P}}=[\hat{\boldsymbol{p}},\hat{\boldsymbol{R}},\hat{\boldsymbol{T}}]^{\mathrm{T}}$;⑤评定实际曲面质量并对拟合参数的不确定度进行估计.

2 拟合参数初值的计算

二次曲面的一般方程式(2)可化为矩阵方程:

$$\boldsymbol{X}'^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}'+2\boldsymbol{b}\boldsymbol{X}'=1 \tag{3}$$

其中

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}d_1 & d_4 & d_5\\ d_4 & d_2 & d_6\\ d_5 & d_6 & d_3\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{b}=[d_7 \quad d_8 \quad d_9]$$

因为 $\boldsymbol{A}$ 为实对称矩阵,所以存在正交矩阵 $\boldsymbol{R}_0$ 使 $\boldsymbol{A}$ 对角化,即 $\boldsymbol{R}_0^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{R}_0=\boldsymbol{\Lambda}$. 令 $\boldsymbol{X}'=\boldsymbol{R}_0\boldsymbol{Y}$,则旋转矩阵 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_0^{\mathrm{T}}$,把 $\boldsymbol{X}'$ 代入(3)式可得

$$\boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{Y}+2\boldsymbol{c}\boldsymbol{Y}=1$$

其中

$$\boldsymbol{c}=[a_7 \quad a_8 \quad a_9]\boldsymbol{R} \tag{4}$$

通过正交变换,消除了坐标分量之间的交叉项,即把测量坐标系与标准坐标系方向对齐,并保持曲面的形状不变. 系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征向量表示了二次曲面的3个主方向,主方向的取法由特征根的情况决定. 例如,如果 $\boldsymbol{A}$ 有两个相同的特征根和一个单根,则取单根对应的特征向量为一个新坐标轴的方向,再从与之垂直的平面上任取两个正交的方向作为其它两轴的方向,构成右手坐标系,主方向的个数为无穷多个,典型二次曲面是旋转抛物面.

求得旋转矩阵后,再根据二次曲面标准方程和矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征根的情况,求解平移向量和曲面特征参数(如焦距或长短轴等).

3 拟合参数的优化

3.1 优化准则与偏差函数

令 $\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{P})=[\varepsilon_1(\boldsymbol{P}),\varepsilon_2(\boldsymbol{P}),\cdots,\varepsilon_m(\boldsymbol{P})]^{\mathrm{T}}$ 为测量数据与拟合曲面的偏差向量,对参数向量 $\boldsymbol{P}$ 进行最优估计最常用的准则是使偏差向量的2-范数最小,即优化准则为

$$\min g(\boldsymbol{P})=\|\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{P})\|_2=\sum_{i=1}^{m}[\varepsilon_i(\boldsymbol{P})]^2 \tag{5}$$

偏差函数 $\varepsilon_i(\boldsymbol{P})$ 的选择对优化结果和计算效率都有影响,文献[5]总结了抛物面拟合时采用的4种偏差函数:轴向偏差、径向偏差、法向偏差和焦距偏差. 本文从更一般的情况,把偏差函数分为代数偏差和几何偏差.

参数空间中的参数向量 $\boldsymbol{P}$ 与二次曲面族相对应,其中的二次曲面类型相同,但形状和位姿不同. 令 $F=F(\boldsymbol{X},\boldsymbol{P})$,对于某个一般位置理想二次

曲面上点 $\boldsymbol{X}'=(x',y',z')^{\mathrm{T}}$,其对应的理想参数向量 $\boldsymbol{P}^*=[\boldsymbol{p}^*,\boldsymbol{R}^*,\boldsymbol{T}^*]^{\mathrm{T}}$ 正是 F 的零点,即

$$F(\boldsymbol{X},\boldsymbol{P}^*)\mid_{\boldsymbol{X}=\boldsymbol{X}'}=0 \tag{6}$$

3.1.1　代数偏差

设 $\boldsymbol{P}_0$ 是参数向量最优估计值 $\hat{\boldsymbol{P}}$ 附近一点,希望对 $\boldsymbol{P}_0$ 进行调整得到 $\hat{\boldsymbol{P}}=\boldsymbol{P}_0+\boldsymbol{\Delta}$ 满足(6)式,由于测量 $\boldsymbol{X}'$数据并非来自理想二次曲面,并且存在测量误差,因此不可能完全满足(6)式,存在偏差:

$$\varepsilon_i(\boldsymbol{P})=F(\boldsymbol{P}_0+\boldsymbol{\Delta})\mid_{\boldsymbol{X}=\boldsymbol{X}_i'} \tag{7}$$

最优估计 $\hat{\boldsymbol{P}}$ 满足使式(7)的平方和最小,式(7)就是代数偏差,特点是计算方便,但参数最优值不是变换不变量,与测量坐标系的选择有关.

3.1.2　几何偏差

从另一个角度,在调整 $\boldsymbol{P}_0$ 的过程中,对每个测量点 $\boldsymbol{X}'=(x',y',z')^{\mathrm{T}}$ 加上一个偏差 $\Delta\boldsymbol{X}$,使其成为理想曲面上的点,满足:

$$F(\boldsymbol{P}_0+\boldsymbol{\Delta})\mid_{\boldsymbol{X}=\boldsymbol{X}'+\Delta\boldsymbol{X}}=0 \tag{8}$$

令

$$\varepsilon_i(\boldsymbol{P})=\mid\Delta\boldsymbol{X}_i\mid=\sqrt{\Delta x_i^2+\Delta y_i^2+\Delta z_i^2} \tag{9}$$

最优估计 $\hat{\boldsymbol{P}}$ 满足使式(9)的平方和最小,式(9)就是几何偏差,$\varepsilon_i(\boldsymbol{P})$ 为测量点 $\boldsymbol{X}'$到拟合曲面的法向投影距离. 法向偏差的优点是变换不变量,但计算复杂. 如果令 $\Delta x=\Delta y=0$,只考虑 Δz,则对于旋转抛物面,式(9)即为文献[5]提到的轴向偏差.

3.2　旋转矩阵的参数化

旋转矩阵表示了二次曲面的姿态,独立参数只有 3 个,如果直接使用旋转矩阵 9 个元素参与优化迭代,则无法保证其仍为正交矩阵,因此在进行非线性优化之前,必须将其参数化,表达成用独立参数表示的形式. 旋转矩阵的参数化通常有 4 种形式:①用 3 个绕轴的旋转表示,如欧拉角;②采用单位四元数表示;③采用旋转向量的形式表示 $\boldsymbol{R}=R(\boldsymbol{v})$,$\boldsymbol{v}$ 的方向表示旋转轴,$\boldsymbol{v}$ 的模等于旋转角;④把新的旋转矩阵看成在原来姿态的基础上施加微小扰动后得到 $\boldsymbol{R}\cdot\Delta\boldsymbol{R}$,其中

$$\Delta\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}1 & -\theta_z & \theta_y\\ \theta_z & 1 & -\theta_x\\ -\theta_y & \theta_x & 1\end{bmatrix} \tag{10}$$

虽然这 4 种形式在数学上是等价的,但不同的参数化形式,计算的稳定性有所不同,选择何种参数化形式最重要的考虑是保证当参数有微小变化时,曲面的姿态也只产生微小变化. 这 4 种形式中,欧拉角参数化形式的数值稳定性最差,第④种形式最好,第②种和第③种表示在大多数情况下也具有较好的数值稳定性.

4　曲面质量评定

4.1　评定指标

二次曲面拟合的目的通常是为了评价曲面的质量,评价的指标主要为两个方面:①曲面的特征参数与设计参数之间的偏差;②实际测量数据和拟合曲面的平均偏差,即轮廓度,可用离散点与设计曲面之间偏差的均方根值(σ_{RMS})表示,即

$$\sigma_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\varepsilon_i^2} \tag{11}$$

其中,m 为测量点的个数;ε_i 为测量点 $\boldsymbol{X}'$到设计曲面的偏差,因为轮廓度是一个与测量坐标系选择无关的量,因此 ε_i 是测量点到拟合曲面的法向投影距离. 另外,还可考虑峰峰值综合评价曲面的型面质量.

4.2　拟合结果的不确定度分析

根据文献[6],对于一个测量结果,在给出被测对象最佳估计的同时,还必须给出相应的测量不确定度,否则是不完整的,会影响到测量结果的可信度. 因此作为二次曲面拟合的结果,参数向量的最优估计 $\hat{\boldsymbol{P}}$ 以及表征曲面轮廓度的均方根值的不确定度也必须给出. 拟合参数的不确定度源于离散点的不确定度,但和具体的测量任务密切相关,因此拟合参数的不确定度被称为面向任务的测量不确定度[7]. 除采用直接的比对测量外,评定拟合结果不确定度常用的方法是解析法和 Monte-Carlo 模拟法.

4.2.1　不确定度评价的解析方法

设测量数据 $\boldsymbol{X}'$是从理想曲面上获得的,只存在测量误差,测量值为真实值的无偏估计. 设测量点到拟合曲面的法向距离为随机变量 $\varepsilon_i=d(\boldsymbol{X}_i,\boldsymbol{P})$,且服从高斯分布,由于 ε_i 之间相互独立,则 ε 的协方差矩阵为

$$\boldsymbol{\Sigma}=[\sigma_{ij}^2]_{m\times m}=\sigma_0^2 I$$

σ_0^2 可以根据优化结果(优化准则采用法向偏差)的残差进行估计,称为后验标准差 $\hat{\sigma}_0$.

$$\hat{\sigma}_0^2=\frac{\boldsymbol{\varepsilon}(\hat{\boldsymbol{P}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varepsilon}(\hat{\boldsymbol{P}})}{m-n} \tag{12}$$

其中 n 为参数向量的维数.

参数向量的最优估计 $\hat{\boldsymbol{P}}$ 的协方差矩阵为式(13),可见尽管坐标测量数据之间是不相关的,但拟合参数之间仍可能是相关的,参数向量 $\boldsymbol{P}$ 仍服从多维正态分布 $\boldsymbol{P}\sim N(\hat{\boldsymbol{P}},\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{P}})$.

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{P}}=\sigma_0^2\left[J(\hat{\boldsymbol{P}})^{\mathrm{T}}J(\hat{\boldsymbol{P}})\right]^{-1} \tag{13}$$

4.2.2 不确定度评价的 Monte-Carlo 模拟方法

Monte-Carlo 模拟法更适合确定轮廓度(采用均方根值衡量)的不确定度,这种方法也称为虚拟坐标测量机(Virtual CMM),最初概念由德国国家计量院提出[8]. 其基本思想是,由于存在各种测量不确定度影响因素,坐标测量值总是分布在真实值附近,误差可用概率密度函数 PDF 描述,为了评价坐标测量不确定度对轮廓度评价的影响,在实际坐标测量数据 X' 的基础上,利用计算机产生符合测量误差的 PDF 的随机数,加到 $\boldsymbol{X}'$ 上得到一组新的坐标值 X'_j,代表一组可能的测量数据,根据 $\boldsymbol{X}'_j$ 进行二次曲面拟合得到均方根值 σ_{RMS_j},相同的过程重复 N 次,得到轮廓度的 N 个可能的值,对 $\sigma_{\mathrm{RMS}}=\{\sigma_{\mathrm{RMS}_j}|j=1,\cdots,N\}$,进行统计学分析,可以得到轮廓度的不确定度.

需要指出,实际的测量数据既包括型面偏差又包括测量误差,而拟合参数的不确定度是由测量的不确定性引起的,采用解析方法计算时无法区分二者的影响,而 Monte-Carlo 模拟方法则可以仅考虑测量误差的影响,采用解析方法的估计值必然大于模拟方法的结果. 因此只有采用 Monte-Carlo 模拟方法对拟合参数和轮廓度的不确定度做出的评价才是可靠的,在只有测量误差的情况下,二者的结果才是相同的.

5 实验研究

5.1 仿真实验

设标准位置的转抛物面方程为 $x^2+y^2=4fz$,焦距 $f=283.7835$ mm,从上面均匀采集 625 个点,记为

$$\boldsymbol{X}=(x,y,z)^{\mathrm{T}}$$

其中 $x\in[-78.3784,\ 78.3784]$

$y\in[75.6757,\ 224.3243]$

$z\in[5.0451,\ 49.7426]$

通过绕轴旋转和顶点平移得到一般位置的采样点 $\boldsymbol{Y}$.

对上述的每个采样点增加服从三维高斯分布的扰动($\sigma=0.005$ mm),得到非理想旋转抛物面的采样数据,由于是小扰动,拟合得到的参数应该在理论参数附近. 使用第 2 节的方法得到旋转抛物面参数和轮廓度的初值见表 1,其中旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 采用旋转向量 $\boldsymbol{v}$ 的形式参数化. 可以看到,由于扰动的存在,采用解析几何的方法得到的不是最优解,分别采用代数偏差和几何偏差进行非线性优化,几何偏差包括轴向和法向偏差,优化结果见表 1(采用的计算机配置:Intel Celeron 1.7 GHz,224 MByte内存).

表 1 非理想旋转抛物面参数拟合结果 mm

参数	拟合初值	优化准则		
		代数偏差	几何偏差	
			轴向	法向
$\boldsymbol{v}$	0.2102	0.1487	0.1484	0.1484
	0.1535	0.2015	0.2017	0.2017
	0.1580	0.6623	0.66431	0.6645
$\boldsymbol{T}$	5.3837	2.4176	2.4131	2.4140
	15.3144	6.7885	6.7756	6.7776
	−4.8296	−5.0003	−5.0005	−5.0005
f	282.5300	283.7698	283.7764	283.7759
轮廓度	0.1261	0.0051	0.0051	0.0051

由表 1 可以看到,3 种优化准则对轮廓度的评价是一致的,对焦距的拟合结果也很接近. 从实际计算过程看,采用代数偏差的计算时间为 40.125 s,法向偏差与轴向偏差的计算时间分别为 57.407 s 和 38.110 s,从计算效率和复杂性来考虑,推荐使用轴向偏差作为优化准则.

表 1 中从非理想旋转抛物面采样的数据也可以看作从理想抛物面上获得的包含测量误差的数据,分别采用第 4 节中的解析方法和 Monte-Carlo 模拟方法计算二者的标准不确定度(见表 2),其中 Monte-Carlo 模拟中采用的优化准则为几何准则,采样曲面为理想旋转抛物面,坐标测量误差服从三维正态分布($\sigma=0.005$ mm),模拟次数为 1 400次,对焦距和轮廓度的直方图进行假设检验,均服从正态分布.

表 2 焦距与轮廓度的标准不确定度 μm

参数	解析方法	Monte-Carlo 模拟方法	
	标准不确定度	均值−实际值	标准不确定度
f	52.915	0.9287	52.382
轮廓度		4.9772	0.1390

可以得到以下结论:①坐标测量不确定度对焦距的影响要远大于对轮廓度的影响;②焦距为近似无偏估计,近似服从正态分布,标准不确定度大;③轮廓度不是无偏估计,近似服从正态分布,对曲面轮廓度的评价大于实际值,但标准不确定度小. 对于实际的测量数据,实际轮廓度未知,可采用测量值作为实际曲面的最佳估计,进行 Monte-Carlo 模拟;④在只有测量误差的情况下,解析方法得到的标准不确定度与 Monte-Carlo 模拟的值大致相同,验证了解析方法的正确性.

5.2 实物测量实验

根据仿真实验中的旋转抛物面的参数,铣削出实物(见图 1),材料为铝,手工抛光后,采用三座标测量机测量 795 个点,点位测量的标准不确

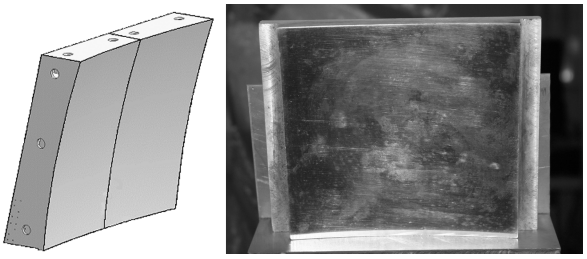


图 1　旋转抛物面 CAD 模型与加工实物

定度为 3 μm. 分别采用代数偏差和几何偏差(包括轴向和法向)为优化准则进行参数拟合. 为了验证拟合结果的正确性,使用 Leica 公司的商用测量软件 Axyz 作为对比进行拟合,结果见表 3.

表 3　实物测量数据的拟合结果　　mm

参数	代数偏差	几何偏差		Axyz 软件
		轴向	法向	
f	279.178 1	279.184 8	279.192 4	279.188
轮廓度	0.003 7	0.003 7	0.003 7	0.004

从表 3 中可以看出,与仿真实验的结果相似,不同优化准则对轮廓度的评价是一致的,拟合的焦距值也很接近,但计算效率不同. 此外,本文方法得到的结果与商业软件的结果是很接近的,这验证了方法的正确性. 但目前的测量商业软件不能给出拟合参数和轮廓度的不确定度,分别采用第 4 节中的解析方法和 Monte-Carlo 模拟方法计算二者的标准不确定度(结果见表 4),其中 Monte-Carlo 模拟中采用的优化准则为几何准则,采样曲面为根据实测数据拟合的旋转抛物面,坐标测量误差服从三维正态分布($\sigma = 0.003$ mm),模拟次数为 3 000 次. 对焦距和轮廓度的直方图进行假设检验,前者服从正态分布,后者近似服从正态分布. 从表 4 可以得到以下结论:①焦距近似为无偏估计,轮廓度不是无偏估计,轮廓度应修正为 $\sigma_{RMS} = 2.6$ μm. 使用该三坐标测量机进行测量,根据测量数据进行拟合,轮廓度经修正后不确定度很小,可信度很高,而焦距值的不确定度较大;②解析方法计算的焦距的标准不确定度大于模拟的结果,这验证了前面的结论,即在型面偏差和测量误差同时存在的情况下,解析方法得到的标准不确定度大于 Monte-Carlo 模拟的值,因此采用 Monte-Carlo 模拟的结果才是可信的.

表 4　焦距与轮廓度的标准不确定度　　μm

参数	解析方法	Monte-Carlo 模拟方法	
	标准不确定度	均值-实际值	标准不确定度
f	48.6	−0.296 58	35.597
轮廓度		1.1	0.094

6　结 束 语

1) 测量坐标系的选择和数据噪声(包括曲面的型面偏差和测量误差)对二次曲面拟合的效率和精度有重要影响. 计算过程表明,不同测量坐标系下的数据计算时间是不同的. 同时大的数据噪声使得计算的初值与最优值的偏差较大,而可能收敛到其它值. 因此对测量数据的预处理是很必要的,如进行坐标变换和数据滤波等.

2) 拟合参数的测量不确定度和轮廓度的不确定度都是和具体测量任务相关的. 由于实际的测量数据既包括型面偏差又包括测量误差,解析方法无法区分二者的影响,只有采用 Mente-Carlo 模拟对测量不确定度做出的评价才是可靠的.

参考文献 (References)

[1] 王解先,陈俊平,张春艳. 椭球曲面的拟合[J]. 同济大学学报,2004,32(1):82-85
Wang Jiexian, Chen Junping, Zhang Chunyan. Fitting of ellipsoidal surface[J]. Journal of Tongji University, 2004,32(1): 82-85(in Chinese)

[2] 于来发,付子傲. 大型抛物面天线精密校准测量自动化和精度[J]. 测绘学报,1992,21(4):284-290
Yu Laifa, Fu Ziao. Automation and accuracy of precise calibration survey for large paraboloid antenna[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1992, 21(4): 284-290(in Chinese)

[3] Dai M, Newman T S. Hyperbolic and parabolic quadric surface fitting algorithms-comparison between the least squares approach and the parameter optimization approach[EB/OL]. 1998-02[2005-09]http://www.cs.uah.edu/tech-reports/TR-UAH-CS-pdf

[4] 李宗春,李广云,金超. 面天线检测数据处理方法的探讨[J]. 宇航计测技术,2003,23(2):12-19
Li Zongchun, Li Guangyun, Jin Chao. On the data processing methods of surface antenna's calibration[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2003,23(2):12-19(in Chinese)

[5] 陈继华,李广云. 离散点抛物面拟合的算法研究[J]. 无线电工程,2005,35(4):32-34,43
Chen Jihua, Li Guangyun. On the algorithm of paraboloid-fitting[J]. Radio Engineering, 2005, 35(4): 32-34,43(in Chinese)

[6] ISO. Guide to the expression of uncertainty in measurement[M]. Geneva: ISO, 1993

[7] Wilhelm R G, Hocken R, Schwenke H. Task specific uncertainty in coordinate measurement[J]. Annals of the CIRP, 2001,50(2):553-563

[8] Trapet E, Wäldele F. The virtual CMM concept[C]//Advanced Mathematical Tools in Metrology Ⅱ. Singapore: World Scientific, 1996:238-247

(责任编辑:赵海容)