

旋转抛物曲面测量中的测球半径补偿

陈赐常 李晓星 王卫军 方 程

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)



摘要: 利用激光跟踪仪进行曲面的三维测量时, 需要进行反射球的半径补偿。本文针对某高精度旋转抛物曲面检测, 分别利用点距法和等距面法进行了半径补偿。结果显示, 两种办法均能有效地实现半径补偿, 提高了检测精度。

关键词: 旋转抛物曲面; 激光跟踪仪; 曲面测量; 半径补偿

Reflector Radius Compensation of Rotating Parabolic Surface

Chen Cichang Li Xiaoxing Wang Weijun Fang Cheng

(School of Mechanical Engineering and Automation, BeiHang University, Beijing 100191)

Abstract: The reflector radius compensation is necessary when measuring 3D surface by laser tracker. Against the detection of a high-precision rotating parabolic surface, this paper has researched two compensation methods——distance of points to surface method, and the offset curve method. The results showed that the radius of compensation will obviously increase the accuracy of detection.

Key words: rotating parabolic surface; Laser Tracker; surface measurement; radius compensation

1 引言

激光跟踪仪是近几年发展起来的一种先进的空间三坐标测量装置, 具有测量精度高、测量距离大、便携方便等优点。与传统的三坐标测量仪相似, 激光跟踪仪进行曲面测量时, 得到的数据并不是测球所触及的表面点的坐标, 而是测球球心的坐标, 需要进行测球半径补偿。

但是, 在利用三坐标测量仪进行测量时, 可以精确地定位曲面上某点的 X 、 Y 坐标, 之后对测出的 Z 坐标进行半径补偿即可; 而利用激光跟踪仪进行曲面测量时, 测得的 X 、 Y 、 Z 坐标值都是偏移一个半径以后的表面上的点, 测球的 X 、 Y 坐标也不能和偏移前对应点的 X 、 Y 重合, 因此半径补偿变得更加复杂。

根据曲面测量的目的, 曲面测量的模式可以分为检测模式和重构模式两种。前者是在已知被测曲面的理论模型的情况下, 通过测量分布在表面上的

一系列点或者线, 将之与理论值进行对比, 以此评定曲面的质量; 后者是被测曲面既没有理论数据也没有数字模型, 测量的目的是为了重构该曲面, 进而加工出该曲面^[1]。为了保证测量精度, 无论用哪种模式测量都必须对测量半径进行补偿。

2 半径补偿方法

激光跟踪仪靶标半径的补偿可以分两种方式进行: 一是在测量前设定半径补偿的方向和补偿量, 测量过程中直接记录待测的接触点坐标。在跟踪仪的控制软件中, 半径补偿方向包括 X 、 Y 、 Z 三个坐标轴方向和已知曲面的法向, 这适合于测量前已知补偿方向的测量任务, 比如测某一水平面时, 其补偿方向为竖直方向, 即 $\pm Z$ 方向, 或者测量某一曲面时, 待测点在测量坐标系中的位置已知, 根据靶标与所测曲面的相对位置, 可以确定补偿方向。二是

作者简介: 陈赐常(1982), 硕士, 航空宇航制造工程专业; 研究方向: 测量技术的应用。

收稿日期: 2010-08-09

测量后进行补偿,这种补偿方式更为常见,因为测量之前一般不易找出被测面上的待测点在测量坐标系中的位置,补偿的方向也不容易确定,所以需要测量之后对数据分析后进行半径补偿。

测量后数据半径补偿的关键,是确定曲面在接触点处的法矢。如图1所示,反射球沿曲面A或曲面B运动,其中心轨迹为图中虚线所示。若能求得虚线中各点的法矢,向内或向外偏置一个半径距离即可得到数字化的待测曲面。如果是检测模式,即可将其与设计的CAD模型比较,得到各点误差。

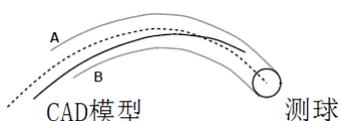


图1 测量数据半径补偿示意图

各类曲面的测头半径三维补偿的常用方法有微平面法、四点共球法、点距法和等距面法等。

微平面法是在被测点周围等距离 a 取三个点,在 a 足够小的情况下,三点构成的平面法向量可以认为是被测点的法向量,此时测头只要沿着该向量方向去测该点,被认为就会得到正确的测头半径补偿^[2]。

四点共球法,可以证明任何足够小的曲面都可以近似为球面,任何四个不共面点可以唯一确定一个球。又因为球面上任何点的法线方向均为该点与球心连线的方向,所以曲面上四个不共面点便可以近似确定该曲面片在测量点处的近似法矢。当所取四个点趋于一个点时,近似法矢便无限趋近于真实法矢^[3]。

点距法的基本思想是求出测头中心到理论曲面轮廓的距离,将该距离减去测头半径即为实际曲面相对理论曲面的偏差。求点到曲面的距离在计算几何中已有几种成熟的算法,其关键问题是测量坐标系与设计坐标系的找正或理论曲面与实际曲面的最佳匹配。

等距面法的基本思想来源于古典几何学。由于测头球面具有法矢自适应性——球面上任意一点的法矢与球心共线,因而一个球面体可以包络出任意一个小于自身曲率的曲面。在包络过程中,球心的运动轨迹即为该曲面的等距面。将这一原理应用于复杂曲面的测头补偿中,即为等距面法^[2]。

微平面法和四点共球法不需要知道理论曲面的方程,在两种曲面测量模式下均可应用,但其需要在带测点的周围再进行一些补充点的测量,因为补充点越近,计算出来的法矢越接近于真实值,因此工作量很大。点距法和等距面法需要知道理论曲面的方程,但对所测的点的位具体位置要求不高,适合在曲面检测模式下应用。

3 曲面检测中半径补偿的算法推导

对曲面检测模式中的半径补偿,在已知理论曲面方程的情况下,可以方便地使用点距法和等距面法进行半径补偿。

以旋转抛物曲面 $G(x,y,z)=x^2+y^2-4fz$ 为例进行研究。

3.1 点距法

对空间曲面:

$$G(x,y,z)=x^2+y^2-4fz \quad (1)$$

设曲面上距离空间一点 $Q(a,b,c)$ 最近的一点为 $M(x_0,y_0,z_0)$,则有 QM 应与 M 点的法向量 NM 平行,即

$$QM \times NM = 0 \quad (2)$$

其中:

$$QM = (a-x_0, b-y_0, c-z_0), NM = (x_0, y_0, -2f)$$

在已知点 $Q(a,b,c)$ 的坐标的情况下,联立方程(1)、(2)可以求解出点 $M(x_0,y_0,z_0)$,从而可以得到点 Q 与曲面的距离。

3.2 等距面法

对空间曲面:

$$G(x,y,z)=x^2+y^2-4fz \quad (1)$$

曲面进行偏移之后,可以得到新的曲面方程: $P(x,y,z)$ 。设曲面偏移的距离为 R ,曲面上任一点 $M(x_0,y_0,z_0)$,对应在偏移曲面上的点为 $M'(x_1,y_1,z_1)$;由方程(1)得:

$$G'_x = 2x$$

$$G'_y = 2y$$

$$G'_z = -4f$$

$$F'(x,y,z) = (2x, 2y, -4f) = (x, y, -2f)$$

$$m = \sqrt{x^2 + y^2 + 4f^2}$$

曲面偏移的距离为 R 时,有:

$$x_1 = x_0 - \frac{Rx_0}{m} = x_0(1 - \frac{R}{m})$$

$$y_1 = y_0 - \frac{Ry_0}{m} = y_0(1 - \frac{R}{m})$$

$$z_1 = z_0 + \frac{2Rf}{m}$$

对点 $M'(x_1, y_1, z_1)$, 有

$$x_0 = \frac{x_1}{(1 - \frac{R}{m})}$$

$$y_0 = \frac{y_1}{(1 - \frac{R}{m})}$$

$$z_0 = z_1 - \frac{2Rf}{m}$$

其中 $m = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + 4f^2}$, 则有

$$m^2 = x_0^2 + y_0^2 + 4f^2 = \frac{x_1^2 + y_1^2}{(1 - \frac{R}{m})^2} + 4f^2 \quad (3)$$

根据式 (3), 在已知点 $M'(x_1, y_1, z_1)$ 的 x 、 y 坐标的情况下, 可以解出 m 值, 从而得到其 z 坐标, 并可以找到对应的 $M(x_0, y_0, z_0)$ 。

4 实际应用

4.1 型面精度评估指标

型面精度的评估指标采用型面误差 Δ 分布及其均方根 RMS (Root Mean Square)。型面原始偏差 Δ^0 的表达式为:

$$\Delta^0 = w - f(x, y) \quad (4)$$

w 为型面的模拟计算值或测量值, $z=f(x, y)$ 为理论型面方程。我们用偏离理论点的程度来描述型面偏差的分散程度, 则得到偏差均方根 RMS 的表达式:

$$RMS(\Delta) = \sqrt{E(\Delta^2)} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_i^2 / m} \quad (5)$$

其中 m 为计算的待处理点或测量点数, m 越大越能体现型面的真实情况。

利用点距法进行计算时, 以 $Q(a, b, c)$ 到理论型面的实际距离值与理论距离值 (小球半径) 的误差作为原始偏差 Δ^0 , 计算 RMS ; 利用等距面法进行计算时, 以偏移以后的理论型面方程 $P(x, y, z)$ 作为目标理论型面方程, 计算各点的 z 向偏差 Δ^0 , 计算 RMS 。

4.2 理论数据仿真结果

对抛物曲面 $G(x, y, z) = x^2 + y^2 - 4fz$, 取其中一块区域作为研究对象:

$$x \in [0.00, 2448.68]; y \in [9777.88, 11006.00]$$

将其划分为 90×90 的网格, 取这些网格的节点为点集 $M_{i,j}$ 。按实际情况, 测头半径设置为 $R=19.05\text{mm}$, 用解析法使抛物曲面上点集 $M_{i,j}$ 的每一点都沿曲面的径向偏移一个半径值, 得到一组新的点集 $M'_{i,j}$ 。点集 $M'_{i,j}$ 可以看作是模拟测量结果对完全标准的抛物曲面进行测量后得到的测量结果。

如图 2 所示, 我们将模拟出来的点集 $M'_{i,j}$ 称为模拟测量结果 data0 。对 data0 整体进行任意旋转和平移都可以得到一组新的模拟测量结果。为充分说明半径补偿的效果, 选取 4 组数据进行试验。对 data0 进行适当的旋转和平移, 得到 3 组新的模拟测量结果 data1 、 data2 、 data3 。

在处理测量结果时, 对整体结果进行坐标转换, 逐步搜索出使整体 RMS 最小的最优位置。理论上, 用直接匹配法 (无半径补偿) 计算时, 最优位置处整体 RMS 值会有非零的恒定值 (方法误差); 用点距法和等距面法进行半径补偿后, 最优位置可以使整体 $RMS=0$ 。

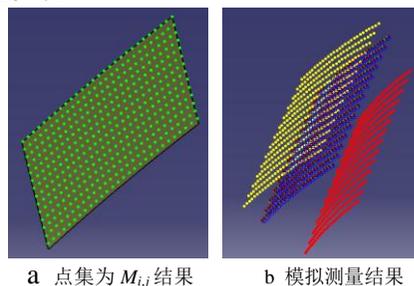


图 2 网格的节点为点集 $M_{i,j}$ 和模拟测量结果 data0 、 data1 、 data2 、 data3

表 1 模拟测量数据仿真计算结果

处理数据	直接匹配法 $RMS/\mu\text{m}$	点距法 $RMS/\mu\text{m}$	等距面法 $RMS/\mu\text{m}$
Data0	4.64	0.030	0.030
Data1	4.64	0.050	0.047
Data2	4.64	0.048	0.051
Data3	4.64	0.054	0.057

实际计算结果 (见表 1) 表明, 在不进行半径补偿时, 即忽略小球半径时, 最终对 RMS 结果的影响为 $4.64\mu\text{m}$, 此即为方法误差。如果采用半径补偿,

分别用点距法和等距面法进行补偿后，得到的 *RMS* 值均接近理论上的 0 值。

理论数据仿真结果与预测的一致，说明了无半径补偿时会引入方法误差；采用点距法和等距面法进行半径补偿都可以减小这一误差，明显提高测量精度。

4.3 实测数据计算结果

实际应用中，利用激光跟踪仪对某旋转抛物曲面面板进行测量后，得到测量数据。先对数据整体利用坐标转换，将之由测量坐标系转换到设计坐标系下，之后逐步搜索出使整体 *RMS* 最小的最优位置，计算此时的 *RMS* 值，并以此对其型面的精度进行评判。

以某两块面板为例：对其分别进行 3 次型面测量，得到的动态数据分别为数组 1、数组 2、数组 3。分别对之采用 3 种不同的半径补偿方法进行计算，得到各自的 *RMS* 值。

实际数据的计算结果（见表 2、表 3）显示加入半径补偿后，*RMS* 的最终计算值会受到影响，说明补偿产生了明显的效果，补偿后的值应更接近真实值。

表 2 面板一的计算结果

处理数据	直接匹配法 <i>RMS</i> /μm	点距法 <i>RMS</i> /μm	等距面法 <i>RMS</i> /μm
数组 1	38.7	36.6	38.9
数组 2	36.2	35.2	37.4
数组 3	37.4	34.3	36.5

(上接第 15 页)

根据航天飞行器热控系统技术发展的需要，环路热管已经逐渐成为航天器热控制系统中一种先进的具有广阔发展前景的技术，现有的铝合金与不锈钢连接技术制约了环路热管的热传输效率，而钎焊方法成为环路热管结构制造的有效方法。

针对环路热管结构设计要求，对变形铝合金与奥氏体不锈钢环路热管结构进行了软钎焊制造技术研究，采用锡基钎料配合酸性活性钎剂，铝合金待焊表面镀镍 10μm，钎焊间隙 0.5mm，钎焊温度 220℃的条件下，获得了质量和传热性能满足要求的环路热管钎焊结构。

表 3 面板二的计算结果

处理数据	直接匹配法 <i>RMS</i> /μm	点距法 <i>RMS</i> /μm	等距面法 <i>RMS</i> /μm
数组 1	28.3	28.5	29.6
数组 2	25.8	25.2	26.2
数组 3	27.4	27.2	28.2

5 结束语

利用激光跟踪仪对旋转抛物曲面进行曲面检测中，针对其半径补偿问题，本文分别推导了点距法和等距面法的半径补偿的计算公式，并结合实际要求进行了运用。

实际工程应用中，缺少半径补偿会带入误差，该值可以利用理论模型通过仿真分析计算出其具体值。仿真和实际应用的结果都显示，采用点距法和等距面法进行半径补偿都可以减小这一误差，明显地提高测量精度。

参考文献

- 1 王增强, 蔺小军, 任军学. CMM测量曲面测头半径补偿与路径规划研究[J]. 机床与液压, 2006 (3): 75~77
- 2 石照耀, 费业泰. 复杂曲面测量模式与关键技术[J]. 工具技术, 2000, 34: 31~34
- 3 颜赤鹰, 陈少克. 三坐标测量机测头半径补偿的新方法[J]. 控制与检测, 2006(1): 50~52

X 射线探伤结果表明：环路热管钎焊接头钎着率大于 90%。对环路热管结构件进行的热测试结果表明：集热座与不锈钢热管的钎焊工艺造成温差为 0.94℃/150W、1.66℃/150W、0.44℃/150W，钎焊过程对不锈钢管内毛细芯性能和环路热管的工作性能均无影响。

参考文献

- 1 徐福祥. 卫星工程概论[M]. 北京：中国宇航出版社，2004
- 2 牟其峥. 可展开式热辐射器技术[D]. 杭州：浙江大学，2002
- 3 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京：机械工业出版社，1998

