

自由曲面 CMM 测量测头半径补偿方法*

Method of Probe Radius Compensation for Free Surface Measurement by CMM

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 蔺小军 王增强 单晨伟

[摘要] 测量机测量曲线和曲面时获取的数据是测头中心坐标值,因此必须对测头半径进行补偿。在总结目前测头补偿方法的基础上,提出以达到测量目的为宗旨,将自由曲面测量分为检测模式和重构模式,根据测量模式采取不同方法对测头半径进行补偿。检测模式下通过比较测头半径与测点到被测曲面的距离大小来判断曲面是否合格,重构模式下通过求取测头球心面的等距面来获得被测曲面,从而实现测头半径补偿。对于点到曲面距离的算法、等距面计算进行了研究。

关键词: 测量机 测头半径补偿 点到曲面距离 等距面

[ABSTRACT] The output data is coordinates of the probe sphere center when the curve or surface is measured by CMM (coordinate measuring machine), so the radius compensation for the probe must be done. On the basis of summarizing the methods of the radius compensation for the probe at present, measurement of the free surface is classified into two modes as inspection and reconstruction according to the measurement purpose. The compensation is finished in different ways on measurement modes. In the inspection mode, it is done by comparing the distance from the measured points to the theoretical surface with the radius of the probe to judge the measured surface is qualified or not. In the reconstruction mode, it is done by fitting the surface of the probe radius center first, followed by searching for the equidistance surface to gain measured surface. The methods for calculating the minimum distance from point to surface and equidistance surface are introduced.

Keywords: CMM (coordinate measuring machine) Radius compensation for probe Distance from point to surface Equidistance surface

曲面测量在机械制造、汽车、航空航天等工业中具有广泛应用,如汽轮机叶片、发动机叶片、飞机机翼、各种模具等都是由各种复杂曲面构成。在工程应用中,

曲面误差测量常用仿形法、截面样板法和三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)进行测量。目前最常用也是最精确的方法是用三坐标测量机进行测量。

测量机是通过测头触碰被测要素进行测量的,而测头是一个标准球,因此测量机有两种测量模式。一种是测量时对测头半径进行补偿,测量数据是被测轮廓的坐标,这种方法适合于直线轮廓或平面;另一种是测量时对测头半径不进行补偿,测量数据是测头中心坐标,这种方法适合于曲线轮廓或曲面。

当对曲线或曲面采用测头半径补偿模式进行测量时就会造成误差。以测量曲线为例,如图1所示,当测头沿Y方向欲测量实际轮廓上 Q_j 点时,此时测头与实际轮廓接触点为 Q_k ,而测量机输出的坐标则为 Q_j' 点的坐标,所以造成的测量误差为:

$$\begin{aligned}\Delta y &= Q_j' Q_j = Q_j' Q_j - r \approx \frac{r}{\cos \theta} - r \\ &= r \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)\end{aligned}$$

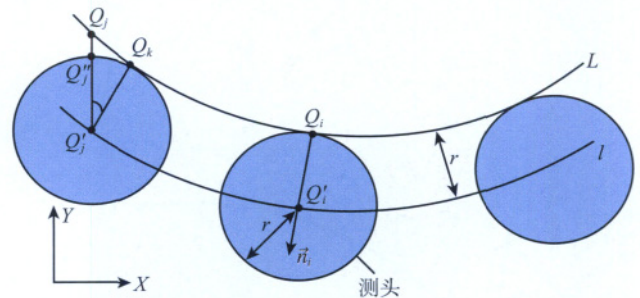


图1 测量机测量自由曲面

Fig.1 Measuring free surface by CMM

因此,对于曲面或曲线测量,宜采用测头半径不进行补偿的模式,即测量数据是测头中心坐标。但是测量的最终目的是得到被测要素,所以要对测头半径进行补偿。

1 CMM 测头半径补偿方法

如果被测曲面的形状已知,并可以用一定的解析函数表示,那么就可以用解析的方法求出曲面各点的法线

* 国家科技支撑计划(2008BAF32B10)。

方向,按照求得的法线方向确定被测球心轨迹上与之对应的点,对它进行测头半径补偿。

自由曲面难以用解析函数表示,因此也难以用解析方法求其包罗面。许多学者对自由曲面 CMM 测量测头半径补偿进行了研究^[1-9]。为了求球心轨迹的包罗面,必须知道曲面的法线方向。由测得的球心沿曲面的法线方向向曲面移动距离 r ,即可得测头与被测曲面的接触点,这就是测头半径补偿。曲面测量测头半径补偿需按三维曲面法向进行,而不是在被测截面沿该截面上切得的轮廓法线的法向。

确定曲面法线方向的方法如下所示:

1.1 微平面法

为了确定被测曲面的法向,可以在 p 点附近测若干个点,例如测量 p_1 、 p_2 、 p_3 三个点,然后通过这 3 点做一个平面,这个平面的法线即可视作曲面的法线。也可取更多的点,例如 4 点,作出这 4 点的最小二乘平面,以此平面的法线作为曲面法线。实际测量中,往往采用网格法,如图 2 所示。为了确定 p 点的法向,不是在 p 附近再去测量 4 个点,而是利用与它相邻近的网格点上的 4 个点 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 ,然后用最小二乘法确定它的最佳拟合平面及其法线的法向。

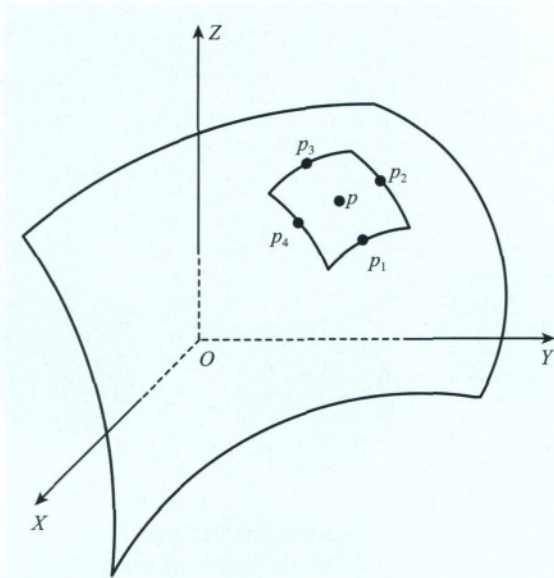


图2 微平面法求曲面法向

Fig.2 Computing surface vector on method of microplane

需要说明的是,在实际测量中得到的不是 p 与 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 的坐标,而是测头中心 o 与 o_1 、 o_2 、 o_3 、 o_4 的坐标,其中 o_i 是测量 p_i 点时测头球心的坐标。然后利用 o_1 、 o_2 、 o_3 、 o_4 四点构造平面,再根据这些平面的法向进行测头半径补偿。

$p_1 \sim p_4$ 等点不能相距太远,如果相距太远,求得的平面就会偏离被测曲面的切面,不能引入准确的测头半径补偿; $p_1 \sim p_4$ 等点不能相距太近,因为每一点的测量都伴随着误差,在相同的测量误差情况下,点与点之间的距离越小,求出的法线方向误差越大。相邻点的位置需要根据被测曲面的曲率半径、测量误差的大小选择。

1.2 微球面法

微球面法的基本思想与微平面法十分相似。对点 $p_{i,j}$ 及其相邻的 4 个网格节点 $p_{i,j+1}$ 、 $p_{i,j-1}$ 、 $p_{i+1,j}$ 、 $p_{i-1,j}$ 用最小二乘法拟合最佳微球面。设其中心为 $a_{i,j}$,半径为 $R_{i,j}$,则在 $a_{i,j}p_{i,j}$ 连线上,与 $a_{i,j}$ 相距 $R_{i,j}-r$ (其中 r 为测头半径),即为经测头半径补偿后求得的被测曲面上的点。用微球面法进行半径补偿,同样存在各个 P 点不能相距太远或太近,测量不确定度影响求得法线方向等问题。

1.3 曲面拟合法

如果在测得大量测头中心轨迹的数据后,能用建模的方法用一个近似的解析表达式逼近它、代表它,也就可以根据这一解析表达式求出测头中心轨迹面各点的法线法向,从而进行测头半径补偿。曲面拟合法可以避免微平面法的一些不足。但曲面拟合法自身也有两个不足:一是建模的数学运算十分复杂,在测头半径补偿前后,需对测头中心轨迹和曲面轮廓进行两次建模;二是建模本身带近似性,按拟合的曲面求取法线方向及进行测头半径补偿也必然会带来一些误差。

1.4 多次细化测量点法^[7-8]

首先沿测量路径方向进行测量点的插值细化;再对插值细化后整个被测表面上的细化点进行两次插值求导,从而求得每个细化点在 X 和 Y 方向的切向量。在此基础上,对两个方向的切向量进行叉积,求得被测表面上各细化点的法向量。

1.5 Delaunay 三角剖分法^[9]

Delaunay 三角剖分是将空间数据点投影到平面来实现的二维剖分方法。测量数据 Delaunay 三角划分后,根据测量点临近的点采用最小二乘法构造一个平面,以此平面的法线作为测量点处的法矢量。

目前所有测头半径补偿方法都是以得到被测要素的坐标值为目的,作者提出一种新思路,即以达到测量目的为宗旨,根据测量模式对测头半径进行补偿。曲面测量根据测量目的归纳为两种模式,第一种模式叫检测误差模式,简称检测模式。第二种模式叫重构模式,也叫逆向制造。

2 检测模式测头半径补偿

检测模式的目的是判断被测曲面误差是否符合设计要求。测量机测量时测量点应该覆盖所有曲面区域。

2.1 测头半径补偿原理

这种模式有理论数据或数字模型,通过计算得到测头球心点到理论曲面的距离 d ,比较 d 与测头半径 r 来判断曲面是否合格,从而达到测头半径补偿的目的。

曲面误差 E 的计算如下:

当 $d_i > r$ 时, $E = +\max\{|d_i - r|\}$

当 $d_i < r$ 时, $E = -\max\{|d_i - r|\}$

其中 $i=0, 1, 2, \dots, n$, n 为测量总点数。

假设被测曲面允许误差是 δ ,当 $|d-r| < \delta$ 时,该曲面合格,否则被测曲面的误差超出设计要求。另外,当 $d > r$ 时,说明被测曲面相对理论曲面偏厚,从加工的角度来说,该被测曲面还有加工余量;当 $d < r$ 时,说明被测曲面相对理论曲面偏薄,从加工的角度来说,该被测曲面已出现过切现象。

2.2 点到曲面的距离计算

点到曲面的距离按网格划分法计算。算法如下所示:

(1) 初次设定点到曲面距离 l_0 为极大值;

(2) 把曲面片 $q=q(u, v)$ ($u_1 \leq u \leq u_2$, $v_1 \leq v \leq v_2$)按参数 u, v 网格化,如图3所示,使节点

$$q_{ij} = q(u_i, v_j)$$

其中:

$$u_i = u_1 + \Delta u_i / n \quad i=1, 2, \dots, n;$$

$$v_j = v_1 + \Delta v_j / n \quad j=1, 2, \dots, n;$$

n 为自然数。

(3) 计算空间点 P 到网格节点的距离 $|pq_{ij}|$,并选出距离最短者 $l_k = \min |pq_{ij}|$ ($k=0, 1, 2, \dots$),作为 P 点至曲面上最近的点,记为 q_u ,如图3所示;

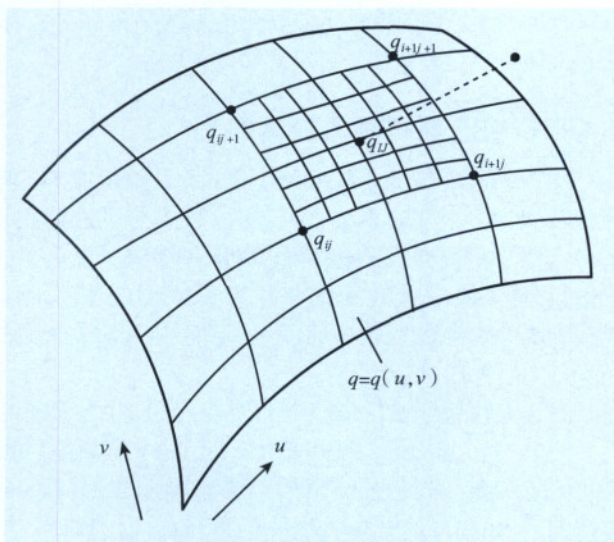


图3 点到曲面的距离

Fig.3 Distance from point to surface

(4) 若 $|l_k - l_{k-1}| > \varepsilon$ (ε 为给定的误差限定值),取 $u_1 = u_{j-1}$, $v_1 = v_{j-1}$, $u_2 = u_{j+1}$, $v_2 = v_{j+1}$ 返回步骤(2)继续搜索;反之,结束搜索,则点 P 到曲面的距离为 l_k 。

3 重构模式测头半径补偿

重构模式曲面测量是为了得到被测曲面。为了曲面拟合方便,测量时测量路径规划应该成线,如图4所示。



图4 重构模式下测量机测量数据点

Fig.4 CMM measurement points in reconstruction mode

3.1 测头半径补偿原理

测头补偿以达到测量目的为宗旨,即得到被测曲面。分为两个步骤,首先用三坐标测量机测量数据拟合测头球心点曲面;然后求该曲面距离为测头半径的等距面,该等距面就是被测曲面。通过这样的过程实现重构模式下对三坐标测量机测头半径的补偿。

3.2 等距面计算

设拟合的测头球心点曲面为 $p=(u, v)$ 距离为测头半径 r 的等距面为:

$$p_r(u, v) = p(u, v) \pm r \cdot \vec{n}(u, v) \quad (1)$$

其中, $\vec{n}(u, v)$ 为曲面 p 的法线。

求取等距面步骤:

(1) 先将曲面 p 离散成 $(m+1) \times (n+1)$ 个数据点 $p=(u_i, v_j)$,其中 $i=0, 1, 2, \dots, m; j=0, 1, 2, \dots, n$;

(2) 计算离散点 $p=(u_i, v_j)$ 处的法线 $\vec{n}(u, v)$;

(3) 根据公式(1)求出 $(m+1) \times (n+1)$ 个等距点 $p_r=(u_i, v_j)$,其中 $i=0, 1, 2, \dots, m; j=0, 1, 2, \dots, n$;

(4) 将等距点 $p_r=(u_i, v_j)$ 拟合成NURBS曲线,从而得到被测曲面。

4 结论

以达到测量目的为宗旨,根据测量模式采取不同方法对测头半径进行补偿,检测模式下通过比较测头半径与测点到被测曲面的距离大小来判断曲面是否合格,重构模式下通过求取测头球心面的等距面获得被测曲面。

(下转第85页)

4 实例

以某航空发动机涡轮转子叶片为例,依据本文的叶片测量建模技术,生成的叶片模型,如图7所示。对测量数据点和叶片模型比较,误差控制在 $0.01\text{mm}\sim 0.04\text{mm}$ 之间,满足误差要求。因此可以看出,本课题的所提出的叶片测量建模方法是可行的。



图7 叶片实体模型
Fig.7 Solid model of blade

5 结论

本课题以等高测量法为基础,根据测量数据点,采用一系列切实可行的方法最后生成叶片型面实体模型。实例证明:实体模型在光顺度和误差方面均已满足其结构设计要求。因此,此类方法简单方便,具有较强的实用价值,可以为后续数控加工和误差分析提供精准的几何模型。

参考文献

- [1] 白瑀,张定华,任军学,等. 叶片高质量造型方法研究. 机械科学与技术,2003 (3):447-449.
- [2] 单晨伟,张定华,刘维伟,等. 叶片测量造型方法研究. 机床与液压,2006 (2):183-185.
- [3] 屈健康,蔺小军,肖德智. 逆向制造CMM测量关键技术研究. 机械制造,2009 (12):44-46.
- [4] 艾玲,王亮. 三坐标测量叶片型面半径补偿技术的应用与分析. 计量技术,2002 (12):22-24.
- [5] 王省富. 样条函数及其应用. 西安:西北工业大学出版社,1989.
- [6] 梁佳洪,刘会霞,王霄. 基于NURBS曲线的快速生成产品特征线的方法研究. 组合机床与自动化加工技术,2004 (2):43-46.
- [7] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条. 北京:高等教育出版社,2001.
- [8] Poliakov J F, Wong Y K, Thomas P D. An automated curve fairing algorithm for cubic B-spline curves. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1999, 102 (1):73-85. (责编 岭雾)

(上接第71页)

ANSYS的优化分析功能进行结构的优化分析是可行的,为结构特别是复杂结构的优化分析提供了新的方法。优化设计已成为现代机械设计理论和方法中的一个重要领域,并且愈来愈受到从事机械设计的科学工作者和工程技术人员的重视。而将ANSYS软件作为优化设计的一个平台,进行虚拟仿真的设计,是进行优化设计全新的尝试,它能使设计者从繁杂的手工设计中解放出来,显著地缩短产品的研发周期。

参考文献

- [1] 黄海. 二级多点近似结构优化方法研究. 航空学报,1991, 12 (10):35-42.
- [2] 顾元宪. 结构优化设计的研究与应用,国际学术动态,1991 (6):81-83.
- [3] 博弈创作室. APDL参数化有限元分析技术及其应用实例,北京:中国水利水电出版社,2004.
- [4] 商跃进. 有限元原理与ANSYS应用指南,北京:清华大学出版社,2005.
- [5] 邵蕴秋. ANSYS8.0有限元分析实例导航,北京:中国铁道出版社,2004. 54-83.
- [6] 钱俊梅,江晓红,仲小冬,等. 浅谈基于ANSYS软件的接触分析问题. 煤矿机械,2006 (7):62-64. (责编 侧卫)

(上接第77页)

文中所述方法已在测量机测量航空发动机整体叶盘、叶片、叶轮型面以及汽轮机整体喷嘴环叶片型面中使用,结果表明此方法确实可行、方便、可靠,且具有较高的精度和较好的实用性。

参考文献

- [1] 鲍莉,王俊峰. 测头半径误差补偿原理及其应用. 轴承,2009 (7):38-40.
- [2] 卢红,张仲甫. 测头半径补偿的方法. 组合机床与自动化加工技术,2001 (9):39-41.
- [3] 王红敏,孙殿柱,张志成. 基于CMM的曲面检测技术与测头半径补偿. 工具技术,2006 (10):77-80.
- [4] 徐丽丽,白万民,接触式测头测量中测头半径补偿的研究. 机械工程与自动化,2006 (12):61-62,66.
- [5] 陈晓晖,周钢,李中伟,钟凯. 柔性测量臂测头半径补偿算法研究. 新技术新工艺2009 (6):10-14.
- [6] 顾亦鹰,陈少克. 三坐标测量机测头半径补偿的新方法. 组合机床与自动化加工技术,2006 (1):50-52.
- [7] 孙科,田怀文. 三坐标测量机测头半径补偿实用算法[J]. 机械,2009, (2):6-8.
- [8] 孙科,贾美薇,田怀文. 三坐标测量机测头半径实用补偿算法. 制造业自动化,2009 (4):67-80.
- [9] 陈惠贤,王胜玉,徐晓栋. 逆向工程中基于Delaunay三角剖分的测头半径补偿. 工具技术,2007 (9):87-89.

(责编 泰山)