

基于等高测量数据点的叶片型面建模关键技术*

Key Technology in Modeling of Blade Surface Based on Data Point of Contour Measurement

西北工业大学现代设计与集成制造教育部重点实验室

贾晓飞 蔺小军 单晨伟 郝 炜

[摘要] 叶片类零件被广泛应用于航空航天领域,其测量建模是逆向制造的关键。根据叶片类零件的几何结构特征,采用等高法测量叶片型面,对其建模过程中的关键技术进行研究。研究了叶片型面测量建模过程中的测头半径补偿方法,测量坏点的剔除,利用单圆弧法构造缘头截面线以及利用 NURBS 曲线方法构造叶盆、叶背截面线,并实现叶盆(背)截面线与缘头的搭接和等距线的构造。最后通过实例测量生成实体模型,叶片型面质量和精度良好。结果表明,该方法简单实用、使用方便。

关键词: 测量 建模 测头半径补偿 NURBS 曲线 等距线

[ABSTRACT] Thin-walled blades are widely used in aviation and aerospace industry, the measurement and modeling are the key process of reverse manufacturing. According to geometric features of blade, contour measurement method is used to measure blade surface. The key technology of modeling process is studied. The works on measurement and modeling of blade surface are carried out, including the method of the probe radius compensation, eliminating of bad points, creating the leading and trailing edge by single-arc method, creating the section curves of the suction side and the pressure side by NURBS curve method, jointing section curves of suction(pressure) side and the leading(trailing) edge, and creating of the equidistant curves. Finally, a solid model is generated through a measurement example, and the quality and precision of blade surface are excellent. This method is proved simple and easy to apply.

Keywords: Measurement Modeling Probe radius compensation NURBS curve Equidistant curve

叶片类零件是航空航天领域广泛使用的重要部件之一,是“发动机的心脏”,同时也是汽轮机和燃气轮机中的关键部件。由于叶片型面及截面线是一种复杂的自由型曲面和曲线,其模型的精度和表面光顺程度直接

影响到后续数控加工程序的编制和加工质量的评定,所以它的建模方法一直是人们研究的热点。

近年来国内外关于测量建模技术的研究越来越多,但由于叶片类零件型面是复杂的三维弯扭曲面,精度要求较高,因此其建模相对困难,关于这方面的研究还是比较少的。一般而言,叶片型面建模过程是先构造出叶型的各截平面曲线外形(截面线拟合),然后将各个截面线再径向拉伸得出实体模型^[1]。在逆向制造中,叶片型面建模的依据是叶片型面测量数据点,数据点的好坏直接影响到建模的质量和精度,因此叶片型面的测量过程也极为重要。

目前测量方法主要分为接触式测量和非接触式测量两大类^[2]。激光法等非接触式测量方法在国内应用较少,其点云数据量大、处理麻烦且精度低,传统的方法是采用接触式的三坐标测量机(CMM)进行叶片型面测量。通常叶片型面的测量方法有等半径测量法、等高测量法等^[3],其中等高测量法是使用较多的方法之一。本课题在此基础上,主要探讨了采用等高法测量叶片型面并构建实体模型过程中涉及到的测头半径补偿、测量点的预处理、叶身截面线的构造、叶盆(背)截面线与缘头搭接和等距线的生成 5 个方面的关键技术问题。最后通过实例获得叶片型面三维实体,证明此类方法简单实用,同时为叶片生产工艺的制定、数控加工精度的测量和加工误差的采集奠定了良好的基础。

1 叶片测量

数据采集是叶片型面建模的第一环节,三坐标测量机作为一种高精度的三维空间检测设备,具有检测精度高、检测重复性好、自动化程度高的优点,适合叶片类复杂曲面的精密测量,是目前数据采集的主要方法之一。

1.1 等高测量法

等高测量法,又称等 Z 测量法,其优点是测量路径容易规划,测量点井然有序并能准确地反映叶片的实际形状,建模方便。测量时固定 Z 坐标值,测头在 XOY 平面内测量叶片型面,然后测头在 Z 轴方向上移动一个增量,继续以上述方式测量,依次扫描完整个叶片型面,如图 1 所示。

采用等高测量法进行叶片型面测量时应遵循以下

* 国家科技支撑计划(2008BAF32B10)资助。

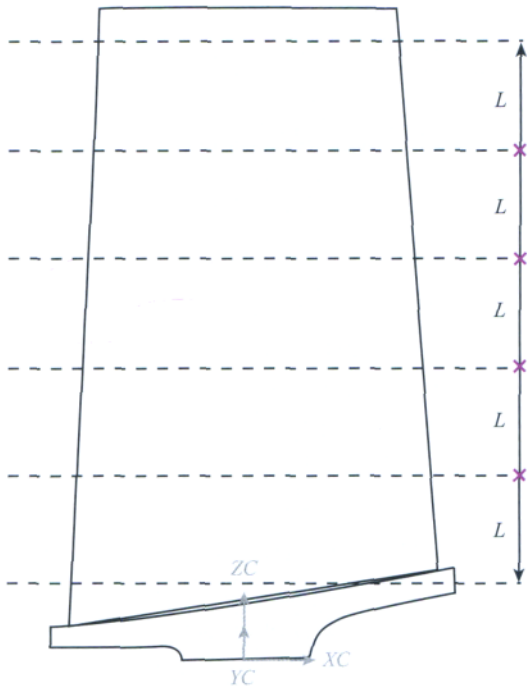


图1 等高测量法
Fig.1 Contour measurement method

原则:

在叶盆、叶背位置,由于曲线较为平缓,测点数目选取应相对稀疏;

前后缘位置曲线曲率大且法矢方向变化剧烈,测点数目应该比较密集。

1.2 测头半径补偿

三坐标测量机进行曲面测量时,只能精确地获得测头中心的坐标值,如何进行测头半径补偿从而得到测头与曲面接触点的坐标成为目前叶片型面测量建模的研究热点之一^[4]。

测头半径补偿的方法主要有:微平面法、平均矢量法、二次补偿采点法、三点共圆求法线法、点距法和等距面法。

等距面法是目前采用较多的测头补偿方法。由测量过程可知,测量数据点都应该在叶型曲面的等距面上,且距离为测头半径 R 。反过来叶型曲面也是由测量点构成曲面的等距面。那么叶型上的点可这样确定:首先由测量截面线构造测头球心曲面—“外型面”,取出该曲面上测量数据点 C_0 及对应的单位法矢 N ,可确定叶型表面上的点 P : $P=C_0+R \cdot N$ 。由此得到一个近似的真实叶片型面—“内型面”,最后对叶身“内型面”重新参数化消除局部凹凸现象。本课题不再对此方法作过多讨论,而采用根据测头球心点构建的截面线,在平面内将其向内偏置一个测头半径距离,即等距线法,这将在下文详细介绍。

2 数据预处理

采用等高测量法,测量点有一定的规律,避免了通过散乱点造型的困难。但在实际数据测量中由于受测量杆的触碰、操作者误操作和被测实物表面质量等诸多因素的影响,有可能存在测量坏点,尤其在叶型截面线进排气边等曲率变化剧烈的部位,得到的测量数据可能不可靠。通常将这类误差点称为噪声点,数据预处理的目的是剔除这些测量数据中的噪声点,减少这些点对后续截面线的构造和光顺等步骤的干扰和影响。

判断某点是否为噪声点的方法如下:

设截面数据点集为 $c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$, 判断其中的某点 c_i 是否为噪声点,取点 $c_{i-2}, c_{i-1}, c_{i+1}, c_{i+2}$, 利用三次样条插值^[5]构造1条样条曲线,然后计算此点到样条曲线的距离,如果 $\|e\| \geq [\epsilon]$ ($[\epsilon]$ 为给定的允许误差),则认为 c_i 是坏点,应予以剔除,否则保留,如图2所示。

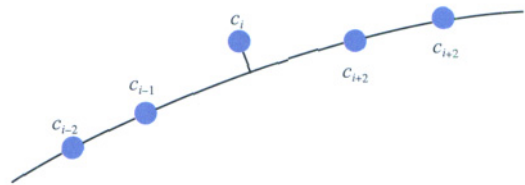


图2 剔除噪声点
Fig.2 Eliminating noise points

3 建模

因为叶片型面缘头部分曲率变化大,叶背(盆)部分曲率变化较小,一般将缘头和叶背(盆)分开处理。

3.1 缘头截面线的构造

缘头截面线一般采用单圆弧、椭圆弧、双圆弧、二次抛物线构造,上述方法各有其优缺点,本课题采用单圆弧法。由于实际测量所得的数据点集并不是在某条圆弧曲线上,而是随机分布在一条虚拟圆弧曲线的两侧,如图3所示。本课题采用最小二乘法对缘头数据点进行

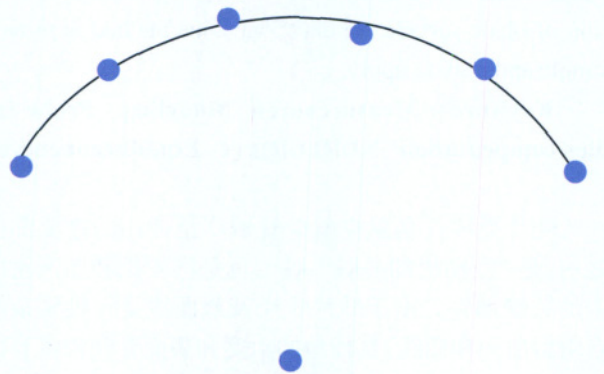


图3 缘头拟合
Fig.3 Fitting of leading and trailing edge

行拟合,求出圆弧曲线。

假设缘头与叶盆过渡点到缘头与叶背过渡点的一系列数据点为 $c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$, 所求的圆心位置坐标 $p(a, b)$, 半径为 r , 构造一条近似符合这些数据点分布特征的圆弧。

圆的一般方程为:

$$x^2 + y^2 + Ax + By + D = 0 \quad (1)$$

圆心坐标:

$$\begin{cases} a = -A/2 \\ b = -B/2 \end{cases} \quad (2)$$

圆半径为:

$$r = \sqrt{a^2 + b^2 - D} \quad (3)$$

由这些点拟合圆弧,即要求差值 ε_i ,

$$\varepsilon_i = x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i - D, \quad i=0, 1, \dots, n \quad (4)$$

的平方和最小,即:

$$S_{\min} = \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2 \quad (5)$$

即可确定 A, B, D 的值,得出函数方程,最后得到最佳拟合圆弧。

3.2 叶盆(背)截面线的构造

随着 CAD/CAM 技术的发展,各种自由曲线理论得到了充分地应用,如 Bezier 曲线、B-Spline 曲线、NURBS 曲线等。而 NURBS 在形状定义方面具有强大的功能,因此在通用 CAD/CAM 系统中被广泛使用^[6-7]。NURBS 曲线为一段的矢值有理多项式函数,其表达式为:

$$Q(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)} \quad (6)$$

式中: d_i 为控制顶点, ω_i 为权因子, n 为控制顶点数, $N_{i,k}(u)$ 为 k 次 B 样条基函数,其定义为:

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{(u - u_i) N_{i,k-1}(u)}{u_{i+k} - u_i} + \frac{(u_{i+k+1} - u) N_{i+1,k-1}(u)}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} \end{cases} \quad (7)$$

本课题的叶盆(背)截面线用三次 NURBS 曲线来构造。叶盆(背)上的一系列数据点 q_1, q_2, \dots, q_n , 依次与三次 NURBS 曲线定义域 $[u_3, u_4, \dots, u_{n+2}]$ 内节点一一对应。具有 n 个数据点 q_i 的三次 NURBS 曲线将由 $n+2$ 个控制顶点 $d_i (i=0, 1, \dots, n+1)$ 及其权因子 $\omega_i (i=0, 1, \dots, n+1)$ 定义。为确定与数据点 q_{i+1} 相对应的参数 $u_{i+3} (i=0, 1, \dots, n-1)$, 需对数据点进行参数化处理。本课题采用积累弦长参数化法:

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0 \\ u_{i+3} = u_{i+2} + \frac{|q_{i+1} - q_i|}{\sum_{j=1}^n |q_{j+1} - q_j|} \quad (i=1, 2, \dots, n-2) \\ u_{n+2} = u_{n+3} = u_{n+4} = u_{n+5} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

一般认为所测数据点的作用是相同的,所以设数据点权因子 $\bar{\omega}_i = 1$, 控制点的权因子与数据点的权因子有如下关系:

$$\bar{\omega}_{i+1} = \bar{\omega}(u_{i+3}) = \sum \omega_j N_{j,3}(u_{i+3}) \quad (i=1, 2, \dots, n-2) \quad (9)$$

根据上式可以列出 n 个方程,再补充两切矢边界条件:

$$\frac{3(\omega_1 - \omega_0)}{u_4 - u_3} = \bar{\omega}'_1 = \bar{\omega}'_0 \quad (10)$$

$$\frac{3(\omega_{n+1} - \omega_n)}{u_{n+2} - u_{n+1}} = \bar{\omega}'_n = \bar{\omega}'_{n+1} \quad (11)$$

可求得权因子 ω_i 。

求得控制点权因子后,由插值条件得到插值方程:

$$\begin{cases} q_{i+1} = q(u_{i+3}) = \frac{\sum_{j=i}^{i+3} \omega_j d_j N_{j,3}(u_{i+3})}{\sum_{j=i}^{i+3} \omega_j N_{j,3}(u_{i+3})} \\ q_n = q(u_{n+2}) = \frac{\sum_{j=n-2}^{n+1} \omega_j d_j N_{j,3}(u_{n+2})}{\sum_{j=n-2}^{n+1} \omega_j N_{j,3}(u_{n+2})} \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n-2) \quad (12)$$

共有 n 个矢量方程,但是有 $n+2$ 个未知参数。所以再加上 2 个边界条件,以切矢为例:

$$[q(u_3)]' = \frac{3\omega_1(d_4 - d_3)}{\omega_0(u_4 - u_3)} \quad (13)$$

$$[q(u_{n+1})]' = \frac{3\omega_n(d_{n+1} - d_n)}{\omega_{n+1}(u_{n+2} - u_{n+1})} \quad (14)$$

这样求出所有控制点,进而得到叶背和叶盆的 NURBS 曲线。

由以上各式可知,相对于 Bezier 曲线、B-Spline 曲线而言, NURBS 曲线除保有它们的优点外,由于控制顶点与权因子的加入,对曲线有更好的控制性。因而,对其形状的调整与修改也主要通过操纵控制顶点及修改权因子来实现。

为了改善叶身曲面的光滑程度,对叶盆(背)截面线进行光顺也显得非常重要。目前较为成熟的曲线光顺方法有能量法、圆率法、局部回弹法等,以及针对这些方法的改进算法,例如 Poliakoff J F^[8] 等提出的自动光顺法。叶盆、叶背截面线的光顺可以采用上述任意一种方法。本课题采用 Poliakoff J F 的自动光顺方法并达到了预期的效果。

3.3 缘头搭接

在实际情况下,叶片缘头部分和叶盆(背)的连接

一般并不是一种相切关系,而是会存在间隙或相交的现象。下面就以前缘圆弧和叶背曲线的拼接为例,介绍一种缘头拼接的方法与步骤。

过前缘圆弧的圆心作叶背曲线的法矢,与前缘圆弧相交于A点,过点A作圆弧的切线与叶背曲线交于B点;

在切线上和靠近点B的叶背曲线上各插入等距适量点(一般3~4个),然后裁减掉切线和点C右侧的叶背曲线,如图4(a)所示;

过这些点利用三次样条插值构造1条样条曲线,将新生成的样条曲线和叶背曲线合并为1条曲线作为新的叶背截面线。在合并过程中,需要将叶背曲线重新参数化以保证C₂连续,搭接后的叶片截面线,如图4(b)所示。

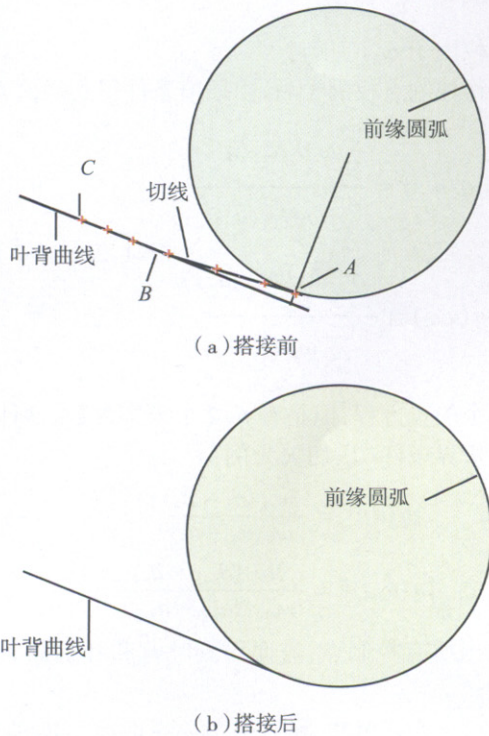


图4 缘头的搭接

Fig.4 Jointing of pressure side and leading edge

3.4 等距线

测量过程中由于实际测得的坐标是测头的球心坐标,所以要将所得的叶身截面线向内偏置一个测头半径距离,就是实际的叶身截面线,即将所测曲线上的1点C,沿着其法矢方向偏置测头半径r,如图5所示。

假设偏置前叶片截面曲线为: $c(t)=(x(t),y(t))$, $t \in [a, b]$, $n(t)$ 为曲线在 $c(t)$ 处的单位法矢,则它距离为r的等距曲线方程为:

$$c_0(t) = c(t) - r \cdot n(t) \quad (15)$$

由上式可知,只要求出原始曲线上各点处的单位法

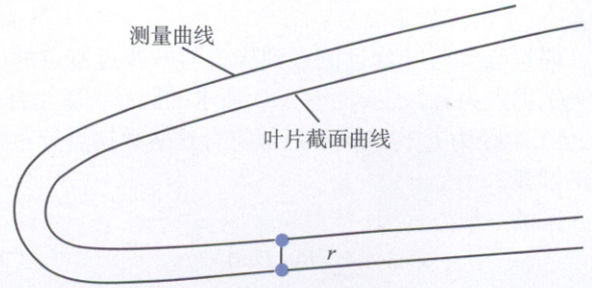


图5 等距曲线

Fig.5 Equidistant curve

量,即可求出原始曲线 $c(t)$ 的等距曲线 $c_0(t)$ 。而对于平面曲线,曲线上每一点处的切矢 $\Gamma(u)$ 与 $n(t)$ 有如下关系:

$$n(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\Gamma(t)}{|\Gamma(t)|} \quad (16)$$

由以上二式可得出偏置后叶片实际曲线的等距曲线方程:

$$c_0(t) = c(t) - r \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\Gamma(t)}{|\Gamma(t)|} \quad (17)$$

采用上述等距线法构造的叶身截面线虽然可以满足精度要求,但在实际中,由于截面线上点C的法矢不一定就是其在叶身表面上的法矢,所以采用这种方法就会存在一定的误差,如图6所示(所在平面为理论偏置点 c'_0 、实际偏置点 c_0 和测头球心点 c 构成的平面)。其中 α 为 c'_0 处叶片表面与Z轴夹角。由于 c_0 和 c'_0 只间隔很微小的距离,所以可以将 c_0 到理论叶身型面的距离由 c_0 和过 c'_0 的切线来计算。现将误差表达如下:

$$\varepsilon = r \cdot \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \quad (18)$$

由式中可以看出, α 越大,即叶片型面在Z轴方向扭转越厉害,误差 ε 越大。另外,这种误差总是正值,即实测叶片型面总是变厚。

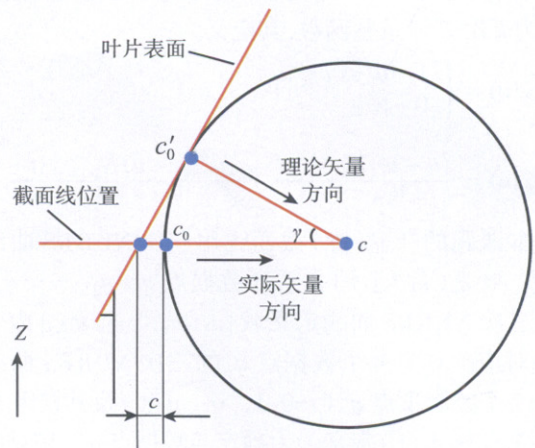


图6 等距线法的误差

Fig.6 Error of equidistant curve method

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,张志诚. 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)