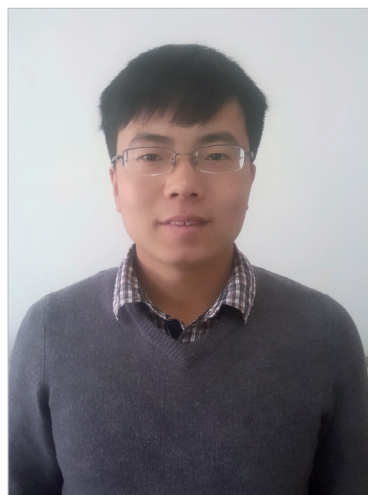


一种叶片在机测量数据重构建模技术研究*

Blade Reconstruction Method in on-Machine Inspection

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 卢万崎 杨海成 常智勇 孙博洋



卢万崎

西北工业大学大学机电学院航空宇航制造工程系在读研究生,主要的研究方向是机器视觉和计算机辅助设计与制造。

在机检测^[1-2]是零件在加工完成后定位装夹状态不变,在数控机床上直接进行零件的尺寸和形位公差测量,实现“加工即可测可知”的功能。通过在机检测技术不仅能够节约定位、找正、周转等加工辅助时间,提高生产效率,而且能随时掌握零件的加工误差状态,便于及时调整加工方

航空发动机叶片作为飞机的重要部件之一,传统的叶片加工采用三维数字化模型设计,利用数控机床加工,使用坐标测量机检测加工精度。在加工过程中需要经常在数控机床和计量测试单位间进行零件周转,导致零件需要重复装夹定位和对刀,容易产生定位误差和叶片变形,造成超差和报废,使叶片的制造周期变长,采用在机检测技术,可以有效地避免这些问题。

案,保证最终的加工符合精度要求。

航空发动机叶片作为飞机的重要部件之一,传统的叶片加工采用三维数字化模型设计,利用数控机床加工,使用坐标测量机检测加工精度。在加工过程中需要经常在数控机床和计量测试单位间进行零件周转,导致零件需要重复装夹定位和对刀,容易产生定位误差和叶片变形,造成超差和报废,使叶片的制造周期变长^[3],采用在机检测技术,可以有效地避免这些问题。在机测量中叶片真实数字化模型重构的好坏直接影响叶片的加工精度,本文根据叶片零件特点采用等高扫描线测量叶片,采用插值法拟合出各截面线,然后拟合出叶片的真实数字化模型,便于后续的数模配准和数控加工。

叶片数字化测量

在机测量中,数据采集是叶片重构建模的第一环节,为了得到精度更高的叶片CAD模型,采用三坐标测量机对叶片型面进行精密测量。

1 等高测量法

叶片型面测量通常采用等半径法、等高测量法等^[4],等高测量法又称等Z测量法,因其测量路径易规划、测量点有序并能准确反映叶片实际形状、建模方便,因此本课题在此基础上采用等高法测量叶片型面并构建数字化模型。在测量时固定Z坐标值,测头在XOY平面内测量叶片型面,测完固定Z值所在的截面后将测头在Z轴方向移动一个增量,继续上述方式的测量,依次扫描完整个

* 陕西省工业公关计划项目(2013K07-10),西北工业大学基础研究基金(JC20110215)资助。

叶片型面,如图 1 所示。

在测量时应遵循以下原则:测量点按曲率分布,叶盆和叶背部分曲

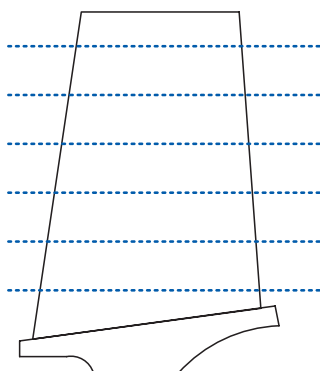


图1 等高测量法

率变化缓慢,测量点数目应相对稀疏;叶型截面线的进排气边位置曲率变化大且法矢方向变化剧烈,测量点数目应分布较密集。

2 测量点预处理

叶片的前后缘半径较小、曲率变化剧烈,导致测得的数据可能不可信,有噪声点的存在,影响叶形截面线的构造和光滑。测量点预处理的目的在于提出这些测量数据中的噪声点,减少这些点对后续截面线构造和光滑的影响。贾晓飞等^[5]给出了剔除等高测量数据中噪声点的方法,这里就不再对该方法进行过多讨论。

叶片型面测量点是按照等高线进行测量的,将一条测量路径控制在叶片的一个截平面的公差范围内,又因为测量误差的不可避免性,实际测量点与规划的测量点不重合,同时由于受测头半径的影响,得到的数据并不是真实接触点的坐标,而是测头球心的坐标,这些因素导致“同一截面线”上的数据点并不真正在同一截面内,这就需要将截平面内的数据点投影在同一平面内,即 XOY 平面的一个平行平面。经过投影后将三维空间点造型转化成了二维平面内的造型^[6]。

构造截面线

三坐标测量机进行曲面测量时,

只能精确地获得测头球心的坐标值,需要通过测头半径补偿得到。本文没有对测量点进行补偿,而是根据测头的球心点坐标计算出理论截面线控制顶点的修正量,从而得到实际叶片的截面线,然后在平面内将其向内偏置一个测头半径的距离,从而得到该 Z 下的叶片的截面线。

1 获取测量数据信息

通过等高测量法得到某固定高度 Z 下的测量点(经过预处理)以及 CAD 模型的理论截面线,如图 2 所示。

将测量点 P_i 投影到理论截面线上,如图 3 所示,共 53 个测量点,获得在截面线上的投影点 Q_i 的三维坐标以及对应的节点参数 u_i ;同时得到理论截面线的控制顶点、节点次数(3次)、控制顶点数(184)、节点数(188)、起始参数(0)和结束参数(1)。

2 修正曲线的控制顶点

图 2 中的理论截面线是 3 次 B 样条曲线,其方程为^[6]:

$$r(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,3}(t)V_i \quad (1)$$

式中, $r(t)$ 是节点 t 的 3 次分段多项式, n 是控制顶点数量, V_i 是控制顶点, $N_{i,3}(u)$ 是 B 样条基函数。

理论曲线外围的测量点构建的曲线是通过修正理论截面线的控制顶点而获得的。设测量点为 P_i , 个数为 m , 投影到曲线上的点为 Q_i , 如图 4 所示, 投影点对应的节点参数为 t_{p_i} , 则有 $r(t_{p_i})=Q_i, i=0, 1, 2, \dots, m$ 。

对理论截面线进行修正, 引入控制顶点的修正量使其通过测量点 P_i 。

即 $r'(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,3}(t) \cdot (V_i + \Delta V_i)$ 满足

$r'(t_{p_i})=P_i$ 。进一步分解为^[7]:

$$r'(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,3}(t) \cdot V_i + \sum_{i=0}^n N_{i,3}(t) \cdot \Delta V_i = r(t) + \Delta r(t) \quad (2)$$

上式中的 $\Delta r(t) = \sum_{i=0}^n N_{i,3}(t) \cdot \Delta V_i$ 满足

$\Delta r(t_{p_i})=P_i-Q_i=S_i, i=0, 1, 2, m$ 。将该式子转化为矩阵表达式:

$$N \cdot \Delta V = S \quad (3)$$

进一步转化为:

$$\begin{bmatrix} N_{0,3}(t_{p_0}) & N_{1,3}(t_{p_0}) & \dots & N_{n,3}(t_{p_0}) \\ N_{0,3}(t_{p_1}) & N_{1,3}(t_{p_1}) & \dots & N_{n,3}(t_{p_1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{0,3}(t_{p_m}) & N_{1,3}(t_{p_m}) & \dots & N_{n,3}(t_{p_m}) \end{bmatrix}_{m \times (n+1)} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_0 \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_{(n+1) \times 3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ \vdots \\ S_{m \times 3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

即可求解出曲线的所有控制顶点变

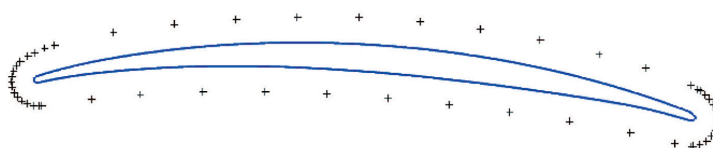


图2 高度Z上的测量点和截面线

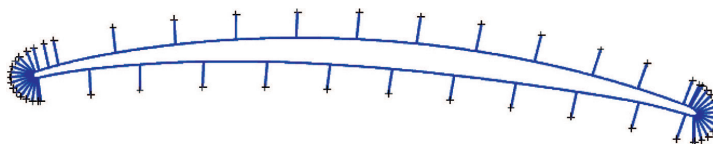


图3 投影测量点

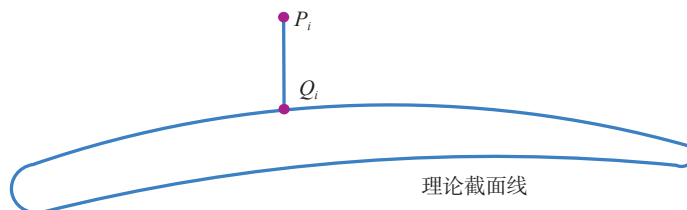


图4 投影点示意图

化量:

$$\Delta V (N^T) = (N^T \cdot N)^{-1} \cdot N^T \cdot S, \quad (5)$$

此时,求解的 ΔV 就可调整曲线使其通过所有的测量点。

需要指出的是, ΔV 求解的好坏(测量点拟合曲线的好坏)受两个因素制约: 矩阵 N 的秩 $rank(N)$ 和曲线是否封闭。下面对实际存在的情况分类讨论:

(1) 当曲线不封闭且 N 是满秩矩阵时,通过式子 $N \cdot \Delta V = S$ 可求得唯一的精确解,构造出的曲线通过所有测量点且精确较高;

(2) 当曲线封闭且 N 是满秩矩阵时,曲线首尾有重合的控制顶点,设重合的控制顶点个数为 k ,此时需要对 $N \cdot \Delta V = S$ 中的矩阵 N 和 ΔV 做适当调整: 将矩阵 N 的最后 k 列与 N 的前 k 列相加,然后删除 N 的后 k 列得到新的矩阵 N' ,同样对删除 ΔV 的最后 k 行,得到新的矩阵 $\Delta V'$,此时式(3)就化为 $N' \cdot \Delta V' = S$,将求解的 $\Delta V'$ 的前 k 行复制到 $\Delta V'$ 的最后,从而得到所求解的 ΔV 。

(3) 当曲线封闭或者若曲线不封闭,且 N 是非满秩矩阵时, $N \cdot \Delta V = S$ 为欠约束方程,不能求得精确地解,此时造出的曲线不能通过所有测量点且精确较低,需要通过线性插值得到虚拟测量点,使 N 成为满秩矩阵,下面结合叶片实际截面线(封闭)的构造进行详细讨论。

曲线构造的好坏判断标准是测量点到曲面的距离的误差大小以及曲线是否光滑。测量点到构造曲线的误差为:

$$D = N \cdot \Delta V - S \quad (6)$$

3 线性插值得虚拟测量点

出现上述分类讨论中的第三种情况的原因在于,测量点个数 m 少于所投影的理论曲线的控制顶点的个数 n 的个数,从而使得构造的 N 不是满秩矩阵。采用线性插值的方法,在任意相邻的两个测量点间线性插值出若干虚拟的测量点,使得构造

出的矩阵 N 为满秩矩阵,然后采用分类讨论中的第二种情况提出的方法求解出 ΔV 。

通过“获取测量数据信息”小节的投影得到了所有 53 个测量点的三维坐标、对应的投影点的三维坐标以及投影点在理论截面线上的 u 参数,其中 $\{u_i\} (i=1,2,3 \dots, 53)$,也得到了理论截面线的节点矢量 $\{t_k\} (i=1,2,3 \dots, 188)$,节点矢量已按照从小到大的顺序排列。将所有测量点按照其对应的投影点的 u 参数从小到大排列,并将测量点的坐标 $P_i (x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i})$ 与其对应投影点的坐标 $Q_i (x_{q_i}, y_{q_i}, z_{q_i})$ 相减,得到差值 $S_i (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$,每个 S_i 与 u_i 相对应。如果区间 $[u_i, u_{i+1}]$ 内有多于两个的理论曲线节点 t_j ,则对临近的两个节点间进行线性插值,得到虚拟的测量点,如图 5 所示,将区间 $[t_j, t_{j+1}]$ 四等分,得到分段 u 参数值 t_{j1}, t_{j2} 和 t_{j3} ,线性插值分别得到 $S_{j1} (\Delta x_{j1}, \Delta y_{j2},$

$\Delta z_{j3})$, $S_{j2} (\Delta x_{j2}, \Delta y_{j2}, \Delta z_{j3})$ 和 $S_{j3} (\Delta x_{j3}, \Delta y_{j3}, \Delta z_{j3})$;通过理论截面线上的 u 参数 t_{j1}, t_{j2} 和 t_{j3} 得到截面线上的对应点 Q_{j1}, Q_{j2} 和 Q_{j3} ,将其分别与 S_{j1}, S_{j2} 和 S_{j3} 的坐标相加,即可得到插值测量点 IP_{j1}, IP_{j2} 和 IP_{j3} 。

由于叶片的理论截面线是封闭的,为了构造出封闭的叶片截面线,需要区间 $[0, u_{\min}]$ 和区间 $[u_{\min}, 1]$ 内存在的节点进行线性插值。实际上,叶片理论截面线上的 u 参数有小于 0 的值和大于 1 的值,为了进行插值,将区间 $[0, u_{\min}]$ 内的节点都加 1,然后与区间 $[u_{\min}, 1]$ 内的节点合并,然后对新的区间内的任意两邻近节点按照上述方法线性插值。最后的插值结果用插值点向理论截面线的投影线直观表示,如图 6 所示。

4 调整矩阵方程

根据插值出的测量点和原有的测量点及对应的投影点参数和公式(3)构建出矩阵方程。叶片截面线

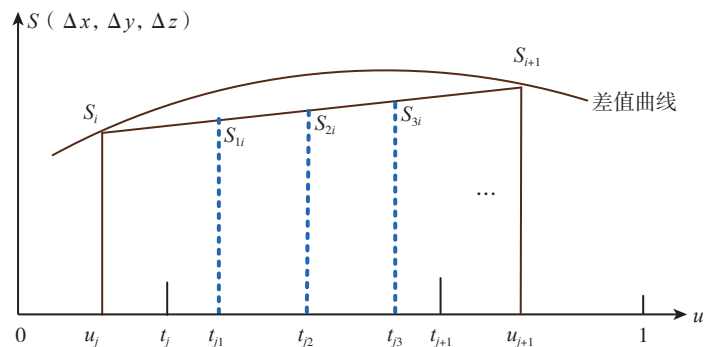


图5 相邻测量点间的线性插值

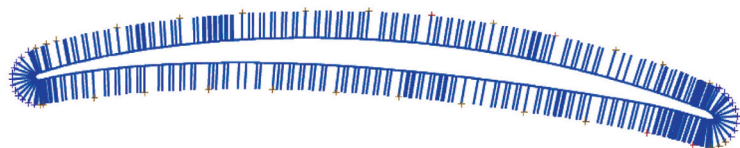


图6 线性插值结果

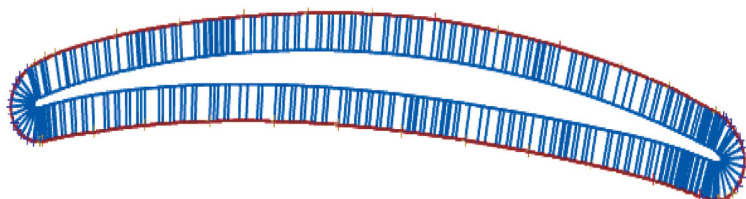


图7 构造出的截面线

是封闭的3次B样条曲线,且截面线的首尾有3个控制顶点,因此需要对矩阵方程做出调整。其中矩阵N的调整方法如下:

$$N' = \begin{bmatrix} N_{03}(t_{p0}) + N_{n-23}(t_{p0}) & N_{13}(t_{p0}) + N_{n-13}(t_{p0}) & N_{23}(t_{p0}) + N_{n3}(t_{p0}) & \cdots & N_{n-33}(t_{p0}) \\ N_{03}(t_{p1}) + N_{n-23}(t_{p1}) & N_{13}(t_{p1}) + N_{n-13}(t_{p1}) & N_{23}(t_{p1}) + N_{n3}(t_{p1}) & \cdots & N_{n-33}(t_{p1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{03}(t_{pm}) + N_{n-23}(t_{pm}) & N_{13}(t_{pm}) + N_{n-13}(t_{pm}) & N_{23}(t_{pm}) + N_{n3}(t_{pm}) & \cdots & N_{n-33}(t_{pm}) \end{bmatrix}, (7)$$

删除S的最后3行得到S';同样对删除ΔV的最后3行,得到新的矩阵ΔV',此时式(3)就化为N'·ΔV'=S',将求解的ΔV'的前3行复制并添加到矩阵ΔV'的最后一行的后面,从而得到所求解的ΔV,由此便可求出真实截面线的控制顶点。从而构造出未经测头半径补偿的叶片截面线,如图7所示。

5 误差分析

重构的曲线的精度取决于测量点与重构曲线的贴近程度,在文中以测量点到重构曲线/曲面的距离作为衡量误差的指标^[8-9]。

具体做法是:将测量点沿法向投影至重构出的叶片截面线上,得到测量点到曲面的最小距离Dis_i,得到集合{Dis_i} ,在该集合中定义Dis_{max}为最大贴合误差,定义最小距离的标准公差σ作为测量点与重构曲面的贴合度。所得的测量点到重构截面线的误差如图8所示,计算出的最

大误差,Dis_{max}=2.6×10⁻³mm,标准差δ=9.322×10⁻⁴,满足精锻叶片的精精要求,说明该方法构造出的叶片的截面线精度高,有很强的实用性。

测量过程中由于实际测量的坐标是测头的球心坐标,通过插值获得的虚拟测量点的坐标也是球心位置的坐标,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,即将测量点沿其投影法向偏置测头半径r。

叶片的数字化模型

本课题基于UG7.5平台,采用C#编译环境开发,通过第“构造截面线”中的方法,得到每个固定高度Z上的叶片的实际叶身截面线,建立起叶片型面的空间样条曲线模型。利用UG中的自由曲面成型中的通过曲线(Through Curve)功能将叶身截面线拟合成叶片的叶身型面^[10]。

以某航空发动机的叶片为例,依据本文的叶片测量技术、叶身截面线构造技术和叶身型面生成技术重构出叶片实际的CAD模型,如图9所示。对实测点和插值出的虚拟测量

点与叶片模型比较,误差能够控制在0.001mm~0.005mm之间,满足后续叶片加工要求,可以看出本课题所提出的叶片重建建模方法是可行的。

结 论

文中所述的叶片在机测量数据重建建模方法是以等高测量法为基础,根据实际测量点和插值出的虚拟测量点求解出理论叶片截面线的控制顶点的变化量,用于调整理论叶片截面线,得到叶片实际的截面线,使其通过所有测量点,然后重构出叶片的型面CAD模型,其误差和精度满足后续的数控加工要求。此类方法简单方便快捷,能够用于叶片的在机测量,为后续的数控加工和误差分析提供精确的CAD模型。

参 考 文 献

- [1] 朴殿伟,李伟民. 在机测量新方法在数控加工中工件自动设置中的应用分析. 数控技术,2013(4):32.
- [2] 李铁钢. 结构件在机检测技术研究. 组合机床与自动化加工技术,2013(5):64-66.
- [3] 杨自科,卞光耀,单英吉. 在机测量在叶片、叶轮加工过程中的应用. 航空制造技术,2011(21):103-105.
- [4] 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.
- [5] 贾晓飞,蔺小军,单晨伟,等. 基于等高测量数据点的叶片型面建模关键技术. 航空制造技术,2011(10):81-85.
- [6] 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.
- [7] 莫蓉,常智勇. 计算机辅助几何造型技术. 北京:科学出版社,2009.
- [8] Xu L, Lin M, Li J, et al. Three-dimensional geometrical modelling of wild boar head by reverse engineering technology. Journal of Bionic Engineering, 2008, 5(1): 85-90.
- [9] Jarrah A S, Laubenbacher R, Stigler B, et al. Reverse-engineering of polynomial dynamical systems. Advances in Applied Mathematics, 2007, 39(4): 477-489.
- [10] 田庆,莫蓉,夏禹,等. 航空发动机叶片CAD造型方法. 航空制造技术,2007(2):78-81.

(责编 亿霖)

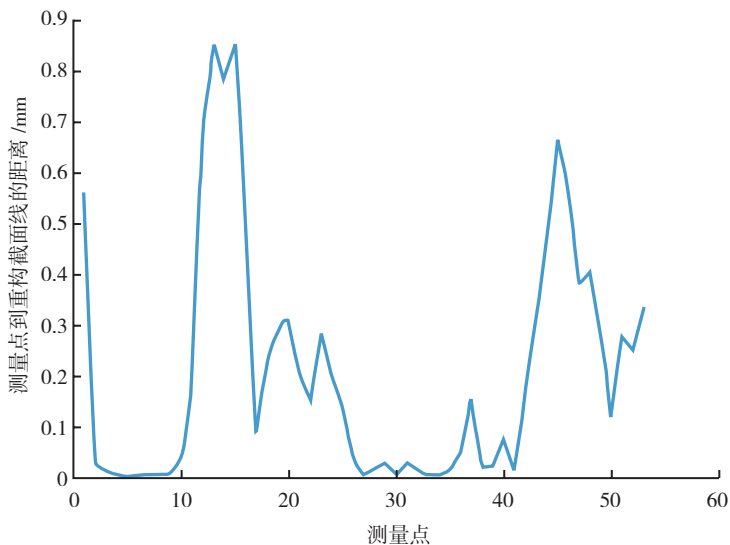


图8 测量点到重构截面线的误差图