基于离散数据点的变壁厚叶身参数化设计

余伟巍 宋玉旺 席 平

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 在原始截面离散数据点的基础上, 给出了面向工程实际的中弧线几何造型方法和基于离散数据点的内形曲线参数化方法; 深入分析了 UG (Unigraphic) 系统参数化造型的实质; 给出了可行的参数化方案; 结合面向对象的思想和创成式的建模方式, 实现了变壁厚叶身参数化设计. 该模块基于 UG /OpenAPI 接口, 采用即时记录数据点和标记回溯点的方式, 在交互中可以实时动态修改, 达到"所见即所得"的效果, 并在实际应用中得到有效验证.

关 键 词: 计算机应用; 变壁厚; 中弧线; 参数化设计

中图分类号: V 232 4

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2008) 11-1319-04

Parametric design of variational-wall-thickness blade body based on discrete data

Yu Weiwei Song Yuwang Xi Ping

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract A new method about parametric design of variational-wall-thickness blade body was provided, which could effectively solve the problem that how to modify the blade cross shape. It is convenient and effective to adjust the blade wall thickness, then to improve the blade performance. An effective method that how to acquire the mean curves was given and proved step by step, which could gain the real mean curves by using the geometric modeling function based on unigraphics (UG). It provides a technology route that realizes the parametric design of inner curves, and introduces a feasible plan to complete the work about parametric design of blade based on UG /OpenAPI, this route contains the thought of orient-object and the generative modeling style, and adopts undo-marks and the style of immediately recording the position of inner points. This developed module system can help users to dynamically modify the blade shape in real time.

Key words computer application; variational wall thickness; mean curve; parametric design

传统气冷叶片设计采用的是等壁厚叶片, 而目前世界上先进的气冷叶片采用的都是变壁厚叶片, 原因在于气冷涡轮叶片的壁厚设计不仅要能承受热负荷、气动负荷和离心负荷, 还要能承受内压力作用下的蠕变和抗撞击能力. 空心气冷叶片因其壁面承受叶片内外压差作用, 使壁面有向外膨胀的变形倾向. 由于从前缘到后缘沿叶背和叶盆表面的气流速度、压力分布各不相同, 造成内外压差沿壁面的不同. 一般来说, 叶背壁面承受的压力大于叶盆壁面, 而叶背靠近后缘的壁面承受的压力最大, 并随着时间的推移, 变形加大, 从而引起叶片气动性能变坏, 因此, 气冷叶片的设计要正确选择叶片的壁厚及其结构. 此外, 对于气冷涡轮转子叶片, 考虑抗离心负载的需求, 要设计成背厚盆薄的弦向变壁厚叶片, 其沿展向也要采用变壁厚设计.

目前, 在涡轮气冷叶片叶身的结构设计过程中, 前期提供的仅是符合气动布局要求的离散数据点, 并且需要反复修改横截面的关键几何尺寸, 不断调整壁厚结构, 来满足气动、冷却性能和应力

收稿日期: 2007-11-14

基金项目: 国家 863计划资助项目 (2007AA04Z125)

作者简介: 余伟巍 (1981 -), 男, 江西永修人, 博士生, yww929@ sina com.

应变的要求. 基于 UG 平台的大量交互建模的设计方式虽可以构造叶身模型, 却难以满足设计过程中大量反复修改的设计要求, 这也是变壁厚涡轮叶片参数化设计系统要解决的瓶颈问题. 工程应用中迫切需要建立变壁厚涡轮叶片的参数化模型, 本文即从这一角度出发, 结合笔者对 UG 造型功能及其开发的深入了解, 面向工程实际应用, 给出了中弧线可靠的创建方法, 通过 UG 平台实现了基于离散数据点的叶身参数化设计, 为后续变壁厚叶片的参数化设计奠定基础[1].

1 叶片截面的几何描述

叶片叶身的创建过程中, 需用以下关键参数描述和定义变壁厚叶片截面的几何外形和内形.

1) 中弧线. 中弧线即叶片截面内切圆的圆心构成的连续曲线, 如图 1所示. 它是叶片设计的重要基准之一, 也是截面线离散的依据, 对叶片造型的质量具有十分重要的影响, 中弧线的微小误差都可能导致最后的叶片型面不光顺, 影响发动机叶片的气动性能.

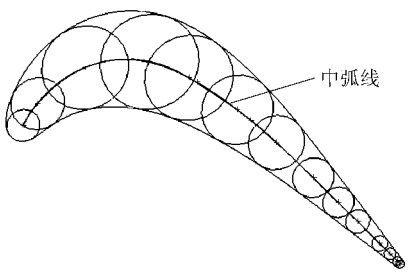

图 1 中弧线示意图

2) 壁厚分布曲线. 记前缘壁厚为 T_Q, 最大壁厚为 T_{max}, 后缘壁厚为 T_H, 壁厚沿叶片横截面等弧长分布为 $T(u)$, 则需满足:

$$T(0) = T_Q \qquad T(1) = T_H \qquad T(u_{max}) = T_{max}$$

按照不同的设计要求给出壁厚的变化曲线即可, 面向实际工程应用本文采用如下线性变化方式:

$$T(u) = \begin{cases} T_Q + (T_{max} - T_Q) \times u / u_{max} & 0 \leqslant u \leqslant u_{max} \\ [(u - u_{max}) \times T_H + (1 - u) \times T_{max}] / (1 - u_{max}) & u_{max} \leqslant u \leqslant 1 \end{cases} \tag{1}$$

其中, 若 $T(u) = C$, 即壁厚为常数, 则该叶片为等壁厚叶片.

3) 前缘点、后缘点和最大壁厚点. 叶盆和叶背曲线各 3个共 6个关键点, 如图 2所示, 其中前缘点和后缘点是为给定离散数据点的首末端点, 叶盆和叶背曲线的前后缘用圆弧过渡; 最大壁厚点是截面内接圆半径最大时对应的叶背型值点和叶盆型值点, 表示最大壁厚的截面位置, 上述 6个关键点是几何造型中保证造型质量的关键点.

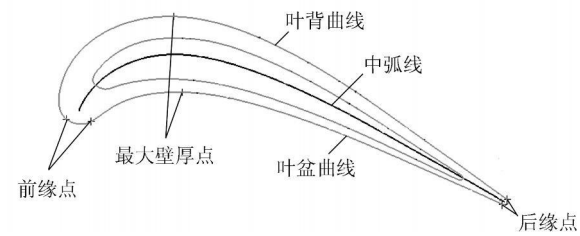

图 2 前缘点、后缘点和最大壁厚点示意图

2 中弧线的创建

2 1 目前已有的创建方法

由于设计手段的限制, 传统设计中通常采用圆弧、双圆弧及简化的抛物线计算公式来构造中弧线, 但此种方法的中弧线曲线表达过于简单, 已不能满足复杂叶片要求; 文献 [2] 通过不断逼近内接圆心的方法达到一定的精度从而得到中弧线, 但该方法从效率和精度方面还存在一定的不足; 此外, 文献 [3 – 4] 通过向内侧等距偏置叶背和叶盆曲线, 求其交点, 然后插值得到中弧线, 但该方法得到的还不是真正意义上的中弧线.

上述方法获得的都是中弧线的近似曲线, 试图构造中弧线的数学表示或插值得到中弧线本身, 本质上都是逆向求解的过程, 必然存在精度和效率问题. 本文从中弧线定义出发, 基于 UG 平台, 利用几何造型求解中弧线.

2 2 中弧线的几何造型求解步骤及原理

步骤 **1** 导入离散数据点文件并构造 3次 B 样条曲线, 完成叶盆和叶背曲线的建模, 如图 3



图 3 由离散数据点构造叶形曲线

步骤 **2** 分别在两曲线前缘端点处构造 2个同样大小的圆, 位于垂直于曲线切矢所在的平面上; 分别沿叶盆、叶背曲线创建两扫掠实体, 并获得其外侧交线, 过程如图 4所示, 其中圆的半径只

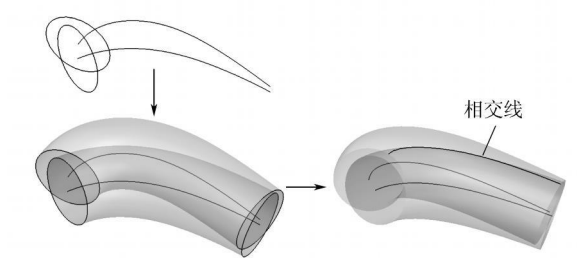

图 4 获得外侧相交线

要能保证两扫掠体有一条连续交线即可.

步骤 **3**　利用该交线向叶形曲线所在的平面法线方向投影, 即可得到所需的中弧线, 如图 5

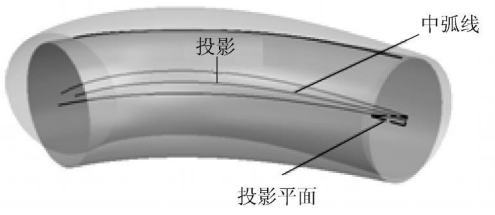

图 5　投影获得中弧线

证明　在待证明的中弧线上任取一点 O, 见图 6, 只需证明 O 点为内切圆的圆心即可. 按中弧线的定义, 其上任一点到两曲线 (叶背和叶盆曲线)的距离最短、相等且该点唯一, 故只需证明 O 点到两曲线的距离最短且相等即可. ①O 点为 A 点的投影点, 过 A 得到其与叶盆叶背曲线最短距离点 P 和 B, 易知 ΔAOP 所在平面即为沿叶盆曲线扫掠成形实体的横截面, PA 即为其截面半径; 同理, BA 为另一横截面半径, 且 $PA = BA$. ②因为 $L_1 = L_2$ 且 AO 为公共边, ΔABO 与 ΔAPO 均为直角三角形, 所以 $\Delta ABO \cong \Delta APO$, 所以 $D_1 = D_2$. ③因为 L_1 和 L_2 均为最短距离, 并且 H 为公共边, 所以易知 D_1 和 D_2 均为最短距离. 所以 O 点到两曲线的距离最短且相等, 即 O 点为内切圆圆心.　　证毕

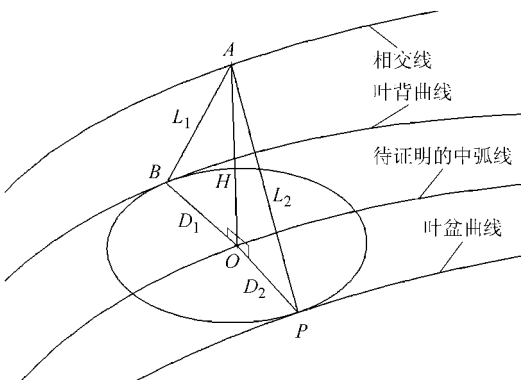

图 6　中弧线的几何证明

3　叶身参数化实现

3 1　内形截面曲线的构造

变壁厚叶片与传统等壁厚叶片的主要差别在于其内形截面曲线的构造方式不同, 等壁厚叶片内形曲线是由其外形等距偏置获得, 而变壁厚的内形曲线是以外形曲线为基础, 结合壁厚分布曲线得到. 本文给出一种基于关联数据点的插值方法构建内形截面曲线.

步骤 **1**　如图 7所示, 在中弧线基础上获得上述 6个关键数据点, 记为 B_Q, B_H, B_M和 P_Q, P_H, P_M, 即叶背和叶盆的前缘、后缘点和最大壁厚点. 其中当 H 值最小时 (该最小值可由系统提供的曲线间最小距离函数得到), 因 L_1 和 L_2 大小固定, 此时的 B 和 P 即为最大壁厚点.

步骤 **2**　以上述 6个关键点为基础, 结合壁厚分布曲线, 在外形线上布点. 以叶背曲线为例, 在 B_Q和 B_M间按等弧长取点 N_i, 在 B_M和 B_H间按等弧长取点 K_j, 其中点的个数 (即 i和 j的值)可根据实际需要调整. 因 N_i和 K_j在整个参数化过程中起到承上启下的关联作用, 故可称之为“关联数据点”.

步骤 **3**　以 N_i和 K_j为基础, 沿外形曲线主法矢, 向内侧偏置不同的壁厚距离, 该距离值由壁厚分布曲线函数决定, 最后得到内形曲线型值点集, 插值为 3次 B样条即得到内形截面曲线, 见图 7.

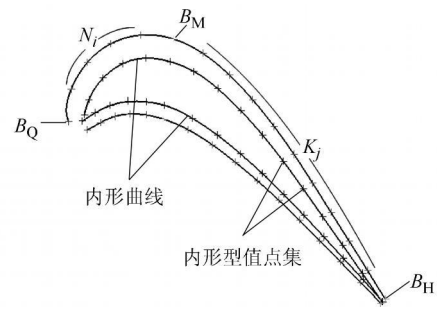

图 7　内形截面曲线的构造

3 2　面向对象的离散数据点参数化实现

UG 平台提供的参数化方法可归纳为基于系统特征、基于用户特征和基于用户参数的方法, 其本质上都是通过参数表达式来实现, 其约束主参数都是直接或间接建立在特征对象的几何参数基础上, 用户通过交互界面调整约束主参数, 进而修改参数表达式来驱动实体模型.

本文叶片造型过程中, 离散数据点是构造内形曲线的关键, 系统没有产生任何的表达式可供内形曲线实现参数化, 而对这些点试图为每个点构造参数表达式 $P(x_i, y_i)$来驱动其位置的改变, 则交互参数太多, 不合适.

本文采用面向对象的思想和创成式的建模方式, 突破 UG基于表达式实现参数化的思路限制, 将壁厚分布曲线作为约束主参数, 结合离散数据点 N_i和 K_j等及最终的内形曲线作为一个对象来处理, 该对象向外部仅提供属性参数, 即壁厚变化参数. 在开发过程中采用链表记录数据点和回溯标定方式完成参数的反复修改. 整体思路见图 8

3 3　叶身参数化方案的实现

从造型的角度来说, 利用 UG 的自身功能构造变壁厚叶身有两种方案, 即基于草图特征和从

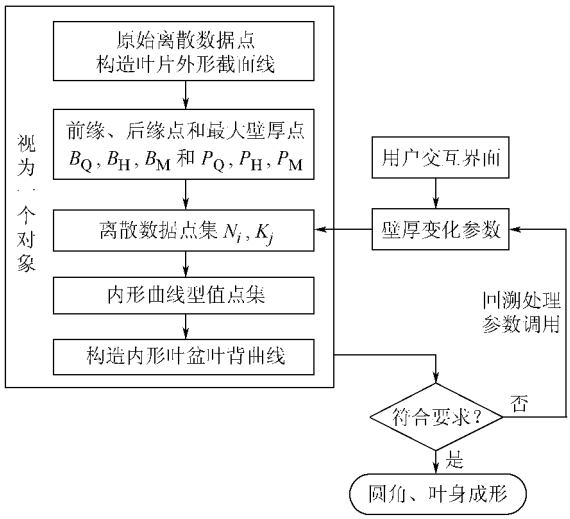

图 8 面向对象的离散数据点参数化思路

无到有的创成式构建. 一般的机械产品和标准件都采用前者, 因其可以很方便的利用系统提供的表达式来实现参数化; 对于复杂零件特别是较多的由曲线曲面构成的零件采用后者来实现其参数化, 但开发工作量大, 难度大, 专用性强, 工作效率高. 然而, 对于叶片零件, 在基于草图的造型过程中存在如下问题: ①存在裁剪等操作, 破坏了数据的关联性, 参数驱动无法进行下去; ②对于数据点需要创建的参数表达式太多, 导致前期工作繁重. 基于上述原因使其对于不同类型的叶片扩展性能较差.

本文利用三维 CAD 系统本身提供的开发接口, 编程实现叶身参数化设计. 结合面向对象的思想, 对于不同类型叶片相同的核心部分进行封装, 提供不同的接口在一定程度上满足其扩展性需求. 图 9为该方案的叶身参数化流程.

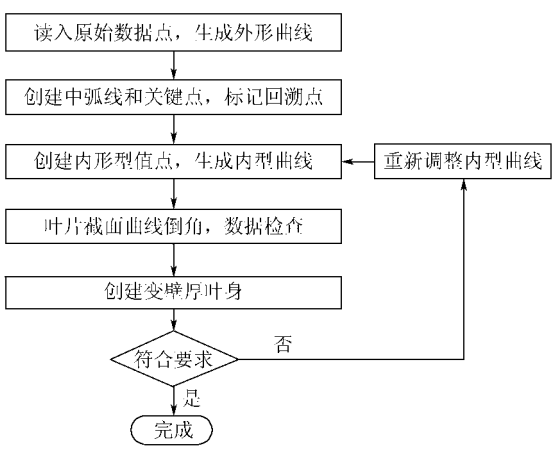

图 9 叶身参数化流程图

图 10为最终叶身参数化示意图, 用户可以在交互界面中通过滑块调整壁厚参数即T_Q, T_{max}和T_H, 来实时动态控制变壁厚叶片的壁厚曲线, 反复修正, 快速完成各种壁厚叶身的实体造型.

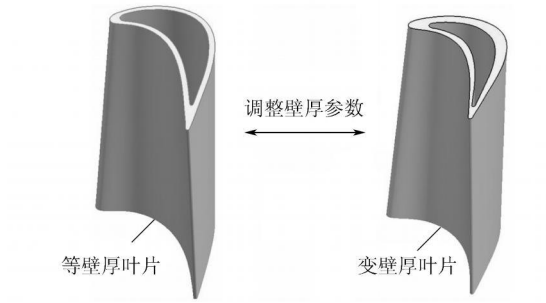

图 10 叶身参数化实现

4 结束语

本文系统地给出了基于离散数据点的变壁厚叶片叶身参数化设计方法, 面向工程实际给出了行之有效的中弧线几何造型方法; 基于面向对象的思想和创成式的建模方式, 突破了 UG 基于表达式实现参数化的思路限制, 采用标记回溯点的方式, 并可以实时刷新、动态修改, 完成了内形曲线的参数化设计; 最后, 给出了叶身参数化方案的实现流程图和最终效果图.

实践证明, 同等硬件设施条件下, 在 UG 平台上利用 UG 自身功能仅完成一次叶身模型的修改, 需要花费近 3 h, 而在开发出来的模块中耗时 1 min不到, 其反复修改更是便捷, 为后续的有限元分析工作提供了极大方便.

参考文献 (References)

[1] 宋玉旺, 余伟巍, 朱剑, 等. 变壁厚涡轮叶片参数设计 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(3): 304-309
Song Yuwang, Yu Weiwei, Zhu Jian, et al. Parametric design of turbo-jet blades with unequal thickness[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(3): 304-309(in Chinese)

[2] 白瑀, 张定华, 任军学, 等. 叶片高质量造型方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2003, 22(3): 447-449
Bai Yu, Zhang Dinghua, Ren Junxue, et al. High quality geometric modeling of blade[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(3): 447-449(in Chinese)

[3] 张力宁, 张定华, 陈志强. 基于等距线的叶片截面中弧线计算方法 [J]. 机械设计, 2006, 23(5): 39-41
Zhang Lining, Zhang Dinghua, Chen Zhiqiang. Compute method of vane section mean curve based on offset curve[J]. Mechanical Design, 2006, 23(5): 39-41(in Chinese)

[4] Choi B K, Park S C. A pair-wise offset algorithm for 2D point-sequence curve [J]. Computer Aided Design, 1999, 31(12): 735-745

(责任编辑: 文丽芳)