

基于桥接线的涡轮叶片尾缘劈缝建模方法研究^{*}

Research on Modeling Method Based on Bridge Curve for Trailing Edge of Turbine Blade

西北工业大学 余 旻 杨海成

[摘要] 航空发动机涡轮叶片尾缘劈缝是一个复杂的曲面,设计过程繁琐,造型过程中易出现与叶身连接不光顺的问题。针对尾缘劈缝的几何结构特征,提出一种基于桥接线的涡轮叶片尾缘劈缝的建模方法,以尾缘劈缝截面线和叶身内形曲面为边界条件,采用模拟退火算法创建桥接线,以此为基础完成尾缘劈缝的建模。开发了尾缘劈缝参数化建模块,提高了叶片设计效率,并为航空发动机复杂曲面参数化建模提供了参考。

关键词: 尾缘劈缝 涡轮叶片 桥接线 模拟退火算法

[ABSTRACT] Trailing edge of turbine blade in aeroengine is a kind of complex surface, of which the design process is complicated, and the non-fairness of continuity between trailing edge and blade shape easily occurs in modeling process. According to geometric and structural characteristics of trailing edge, a modeling method based on bridge curve is provided, which initially generates bridge curve by utilizing simulated annealing algorithm, with boundary conditions of the section curves of trailing edge and the surface of inner blade shape, then modeling of trailing edge based on bridge curve is conducted. The parametric design module of trailing edge is developed. Therefore, the method improves the efficiency of turbine blade design, and contributes references for parametric modeling of the complicated surface of aeroengine.

Keywords: Trailing edge Turbine blade Bridge curve Simulated annealing algorithm

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.03.030

航空发动机涡轮叶片的设计、制造技术水平对提高航空发动机性能、缩短研制周期和降低制造费用起着重要的作用^[1]。涡轮是发动机中热负荷和动力负荷最大的部件,为了确保发动机安全可靠地工作,降低高温材料的成本,涡轮叶片必须采取有效的冷却措施。如图1所示,涡轮叶片的主要冷却结构有纵向肋、横向肋、扰流柱、尾缘劈缝以及气膜孔。

^{*} 课题编号: 国家科技支撑计划 2012\BAF10B09; 课题名称: 重型军用车企业多项目协同管控平台应用示范。

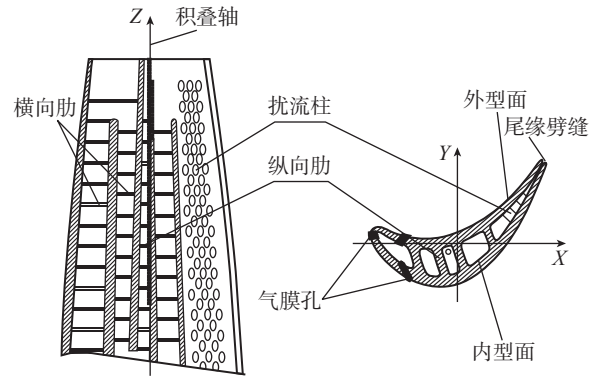


图1 涡轮叶片气冷结构

Fig.1 Air cooling structure of turbine blade

尾缘劈缝的作用是排出热交换后的气体,同时对叶片尾缘部分进行冷却。尾缘劈缝的结构对叶片冷却效果有很大影响,如果尾缘劈缝与叶身内形连接处出现不光顺问题,在实际工作中会增加内冷气体流阻。从几何建模角度,尾缘劈缝是在叶身尾缘处沿积叠轴方向的分段槽,各分段槽与叶身内形曲面光滑连接;以“反阴为阳”的特点体现在叶身内形上是一个与叶身内形光滑连接的长条状实体。在这里将该长条实体称为劈缝实体。所以,尾缘劈缝建模的关键是如何生成劈缝实体,并与叶身内形光滑连接。

尾缘劈缝的设计是设计人员根据经验多次反复迭代、协调和折衷的过程。设计繁琐且工作量大,直接影响整个涡轮叶片的设计周期。利用参数化建模方法进行尾缘劈缝的设计,可有效提高设计效率和设计质量。

文献[2]首先创建一系列矩形截面线,然后沿积叠轴方向通过蒙皮法生成劈缝实体,最后与叶身内外形进行布尔操作形成尾缘劈缝。该方法虽然实现了参数化设计,但是尾缘劈缝与叶身内形在连接处出现凸台,并不满足光滑连接的要求。文献[3]在叶身内形截面线高度保证了尾缘劈缝截面线与叶身内形截面线的叶盆曲线G1连续;但是两者形成的曲面并没有达到G1连续。因此,本文提出基于桥接线的方法完成尾缘劈缝的建模:采用模拟退火算法以尾缘劈缝截面线和叶身内形为边界条件创建桥接线,使用蒙皮法创建尾缘劈缝曲面片并将其缝合劈缝实体。这种方法既保证了尾缘劈缝

曲面的光顺性,又保证了尾缘劈缝与叶身内形 $G1$ 连续。

1 尾缘劈缝曲面的特征分析

由于尾缘劈缝曲面与叶身内形需要保持 $G1$ 连续,首先对叶身曲面的构造方法进行简单介绍。叶身外形由多个叶身截面线利用蒙皮法生成,截面线由前缘、后缘、叶背和叶盆四段曲线组成。其中前缘、后缘部分为圆弧,曲率相对较大,叶背、叶盆部分为样条曲线,曲率相对较小。叶身内形可由叶身外形截面线向内不等距偏置所得的截面线放样生成,其几何特征与叶身外形相似,如图 2 所示。

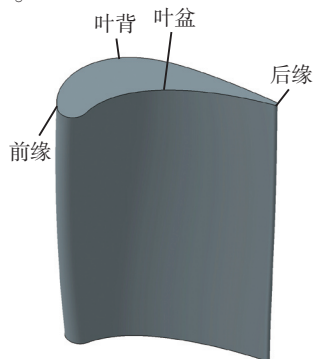


图2 叶身内外形示意图
Fig.2 Blade shape

根据叶身的曲面特点和尾缘劈缝的功能,尾缘劈缝的特征和建模要求归纳如下:(1)如图 3 所示,对于每一层叶身截面线,首先找到叶身内形叶背曲线和叶盆曲线尾缘圆的切点,并将两切点与尾缘圆心连成直线,分别为 a 和 b 。(2)如图 4 所示,分别做直线 a 和 b 的垂线 c 和 d ,其中 c 为叶盆侧, d 为叶背侧,将 d 延长至叶身外, c 延长的长度由设计人员确定; c 的末端做 c 的垂线 e 并延长至叶身外,最后做直线 f 和 g 成封闭曲线,封闭曲线即为尾缘劈缝截面线。(3)利用蒙皮法通过尾缘劈缝截面线生成劈缝实体。(4)保证曲线 c 和 d 所在的径向曲面与叶身内形曲线 $G1$ 连续;劈缝实体各曲面没有扭曲和褶皱。

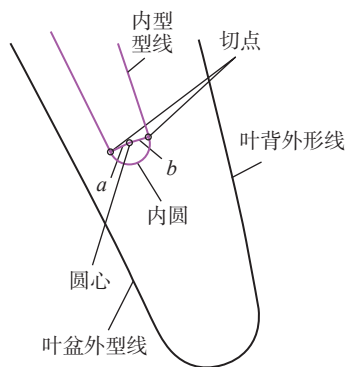


图3 叶身内外形截面线
Fig.3 Section curves of blade shape

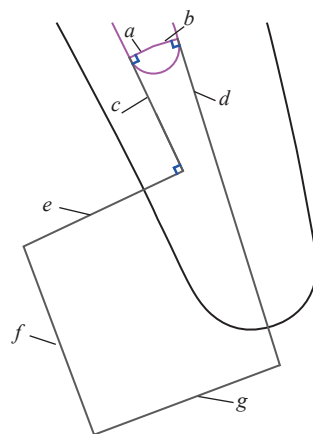


图4 尾缘劈缝截面线
Fig.4 Section curves of trailing edge

2 基于桥接线的尾缘劈缝建模方法

2.1 基本方法

如图 4 所示,直线 c (d) 在截面高度上与叶身内形叶背曲线 $G1$ 连续,但是直线 c (d) 并没有在三维空间上与叶身内形曲面 $G1$ 连续,因此,无法创建精确通过直线 c (d) 并且与叶身 $G1$ 连续的曲面。

根据尾缘劈缝曲面特征,提出了基于桥接线的尾缘劈缝建模方法:(1)如图 5 所示,将直线 c 重构为曲线 c_0 和直线 c_1 两段。 c_1 为与 c 重合的曲线,并且 c_1 的长度为 c 的 97%; c_0 为直线 a 和直线 c 交点附近的某点(且点在叶身内形曲面上)与直线 c_1 的桥接线,桥接线与叶身内形曲面和直线 c_1 均 $G1$ 连续。因为 c_0 的长度要远小于 c_1 ,因此 c_0 与 c_1 的组合曲线与原先的直线 c 基本上是重合的,只在很小程度上改变了直线 c 的形状,不会对最终曲面造成大的影响。(2)通过每层叶身内形截面线上的叶盆曲线和尾缘曲线的交点,在叶身内形曲面上创建径向曲线 s_1 。如图 6 所示。(3)直线 d 做与直线 c 同样的处理,生成桥接线 d_0 、直线 d_1 和径向曲线 s_6 。(4)创建其他径向曲线 s_2 、 s_3 、 s_4 、 s_5 和 s_7 。(5)以 s_1 和 s_2 为主曲线,每层截面线上的桥接线 c_0 和直线 c_1 为交叉曲线,采用放样法创建曲面片 C ,并设置曲面片 C 在主曲线 s_1 处与叶身内形相切,如图 7 所示。(6)同样方法创建曲面片 D 。(7)采用放样法创建其他曲面片 A 、 B 、 E 、

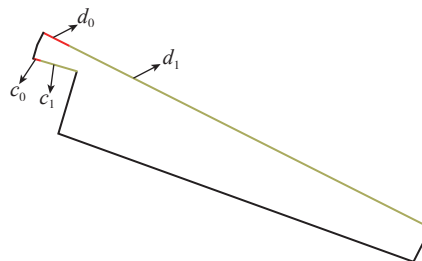


图5 桥接线示意图
Fig.5 Bridge curves

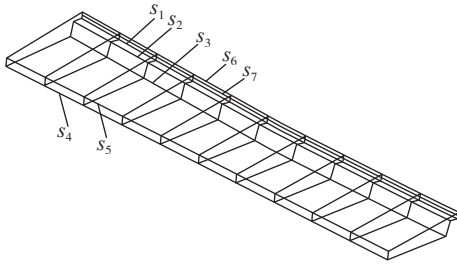


图6 尾缘劈缝线框图

Fig.6 Wireframe of trailing edge

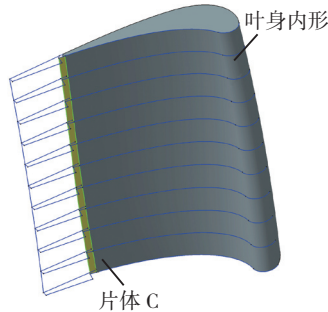


图7 曲面片C示意图

Fig.7 Sheet C

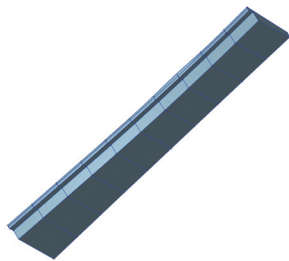


图8 劈缝实体示意图

Fig.8 Body of trailing edge

F 和 G , 采用放样法创建上下两个曲面片。将所有片体缝合成立体, 即劈缝实体, 如图 8 所示。(8) 创建基准面, 将劈缝实体切成多段。叶身外形分别与叶身内形和劈缝实体做布尔差, 最终生成尾缘劈缝结构, 如图 9 所示。

采用此建模方法可确保尾缘劈缝与叶身内形的一阶几何连续过渡, 并在一定的精度要求下满足尾缘劈缝的建模要求。此方法的关键在于创建光顺的桥接线 c_0 和 d_0 , 桥接线的光顺程度直接影响着尾缘劈缝曲面的光



图9 尾缘劈缝结构示意图

Fig.9 Structure of trailing edge

顺性。创建桥接线的关键技术, 包括确定桥接线的边界条件, 以及求解桥接线在叶身内形曲面上的桥接点。

2.2 确定桥接线的边界条件

设桥接线为 3 次样条曲线 $Q(t), t \in (t_0, t_1)$, 桥接线两端点的坐标矢量为 P_0, P_1 , 切矢为 V_0, V_1 , 即 $P_0 = Q(t_0), P_1 = Q(t_1), V_0 = Q'(t_0), V_1 = Q'(t_1)$ 。本文中, P_0 为叶身内形曲面上的桥接点, P_1 为该桥接点在叶身内形曲面的跨界导矢; V_0 为直线 c_1 靠近桥接线 c_0 的端点, V_1 为该端点在 c_1 上的切矢。根据文献 [4], 光顺程度最高的桥接线, 是满足以 $\{P_0, P_1, aV_0, bV_1\}$ 为边界条件的三次样条曲线, 其中

$$\begin{cases} a = \frac{6((P_1 - P_0)V_0)(V_1^2) - 3((P_1 - P_0)V_1)(V_0V_1)}{(4V_0^2(V_1^2) - (V_0V_1)^2)(t_1 - t_0)} \\ b = \frac{3((P_1 - P_0)V_0)(V_0V_1) - 6((P_1 - P_0)V_1)(V_0^2)}{(V_0V_1)^2 - 4V_0^2(V_1^2)}(t_1 - t_0) \end{cases}$$

2.3 模拟退火算法求解最优桥接点

求解出最优桥接点, 使所创建桥接线最光顺, 是尾缘劈缝建模的关键技术之一。

模拟退火算法是基于金属退火的机理而建立起来的一种全局优化方法, 它能够以随机搜索技术从概率的意义上找出使目标函数取得最小的全局最优解, 具有高效、健壮、通用、灵活的实验性能 [5]。因此, 本文采用模拟退火算法求解最优桥接点。

2.3.1 模拟退火算法的构成要素

(1) 搜索空间 Ω 。搜索空间也称为状态空间, 它是可行解的集合, 其中一个状态就代表一个可行解。

叶身内形曲面为双三次 B 样条曲面, 其数学表达式为

$$r(u, w) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 N_{i3}(u)N_{j3}(w)V_{ij} \quad (1)$$

式中, V_{ij} 为控制顶点; $N_{i3}(u)$ 和 $N_{j3}(w)$ 为三次 B 样条的基函数, $0 \leq u, w \leq 1$ 。

最优桥接点的搜索空间为叶身内形曲面上的所有点, 即 $\Omega = r(u, w), 0 \leq u, w \leq 1$ 。

(2) 能量函数 $E(u, v)$ 。能量函数是需要进行优化计算的目标函数, 其取最小值的点为所求的最优解。

最优桥接点是满足桥接线边界条件、创建最光顺桥接线且在叶身内形曲面上的点。

当曲线的能量最小时, 其光顺程度最高 [6]。根据能量法的概念, 每条曲线都能由公式定义出所包含的能量。本文使用曲线的曲率表示曲线的能量模型: 设以叶身内形曲面某点 $r(u, w)$ 为端点的桥接线的方程可表示为 $Q(u, w, t)$, 其中 $t \in [t_0, t_1]$, 则曲线的能量为

$$E(u, v) = \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} Q(u, w, t) \right) dt \quad (2)$$

桥接线能量 $E(u, v)$ 取最小值时的桥接点 $r(u, w)$ 为所求最优桥接点,故 $E(u, v)$ 亦可作为模拟退火算法的能量函数。

(3) 状态转移规则 $P(dE)$ 。状态转移规则是指从一个状态向另一个状态转移的概率,它与当前的温度参数 T 有关。模拟退火算法以一定的概率来接收一个比当前解要差的解,因此,会跳出局部的最优解,达到全局的最优解。

根据热力学的原理,在温度为 T 时,出现能量差为 dE 的降温的概率为

$$P(dE) = \begin{cases} \exp(-dE/T), & dE > 0 \\ 1, & dE \leq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中, \exp 表示自然指数。

(4) 冷却进度表 $T(t)$ 。冷却进度表是指从某一高温状态 T_0 向低温状态冷却时的降温管理表。假设时刻 t 的温度用 $T(t)$ 来表示,则快速模拟退火算法的降温方式为 $T(t) = \frac{T_0}{1+t}$,这种方式能够使模拟退火算法收敛于全局最小值。

2.3.2 模拟退火算法的描述

(1) 产生一个初始最优点,以它作为当前最优点,并计算能量函数值。本文选择的初始最优点是叶身内形尾缘曲线与叶背(叶盆)曲线的交点。(2) 设置初始温度: $\theta \leftarrow T_0 = 50$; 终止步数: $L \leftarrow 20$; 冷却状态: $T(t) \leq 10$ 。(3) 设置循环计数器初值: $t \leftarrow 1$ 。(4) 对当前最优点作一随机扰动,即 $u_{\text{new}} = \text{rand}(0, 1)$ 和 $w_{\text{new}} = \text{rand}(0, 1)$,随机产生一新的桥接点 $r(u_{\text{new}}, w_{\text{new}})$,计算新的能量函数值,并计算能量函数值的增量 dE 。(5) 如果 $dE < 0$,则接受该新产生的桥接点为当前最优桥接点;如果 $dE \geq 0$,则以概率 $P(dE) = \exp(-dE/\theta)$ 接受该新桥接点为当前最优桥接点。(6) 如果 $t < \text{终止步数} L$,则 $t \leftarrow t + 1$,转向(4)。(7) 如果未达到冷却状态,则 $\theta \leftarrow T(t)$,转向(3);如果已到达冷却状态,则输出当前最优桥接点,计算结束。

3 尾缘劈缝参数化建模的实现

根据以上方法,本文以 Visual Studio 2010 为开发工具,在 UG NX7.5 平台上利用 NXOpen API 开发完成涡轮叶片尾缘劈缝参数化设计系统,实现了尾缘劈缝的参数化建模。

尾缘劈缝的设计流程,如图 10 所示,最终效果,如图 11 所示。

4 结论

本文针对涡轮叶片尾缘劈缝的结构特点,提出了尾

缘劈缝的建模方法,实现了尾缘劈缝的参数化建模。此项功能的开发增强了设计过程的连续性和自动化,避免了大量的重复性工作,提高了设计质量和设计效率,并为航空发动机其他复杂曲面参数化提供了参考。

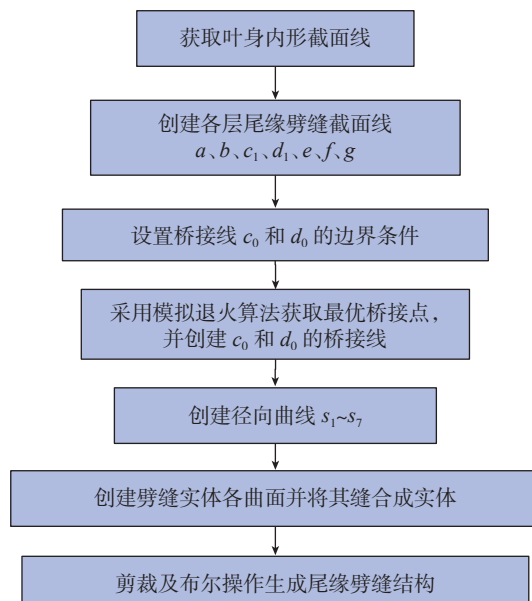


图10 尾缘劈缝设计流程图

Fig.10 Design chart of trailing edge

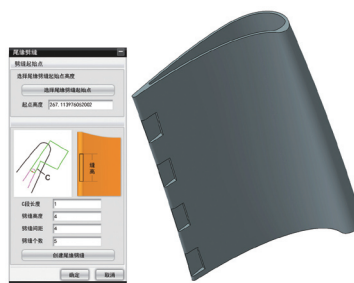


图11 最终效果图

Fig.11 Final result

参考文献

- [1] 陈光. 航空发动机发展综述. 航空宇航制造技术, 2000(6):24-27,34.
- [2] 党松. 涡轮动叶参数化建模方法及系统实现[D]. 西安: 西北工业大学, 2008.
- [3] 李卉蓉, 万学明. 涡轮叶片尾缘劈缝冷却结构及具有该冷却结构的涡轮叶片. 中国, 实用新型专利, 201120545516.6.2012-09-05.
- [4] Yong J H, Chen F H. Geometric hermite curves with minimum strain energy. Computer Aided Geometric Design, 2004, 21(3): 281-301.
- [5] Leonilde Rocha Varela, Rita Almeida Ribeiro. Evaluation of simulated annealing to solve fuzzy optimization problems. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2003, 14(2):59-71.
- [6] Zhang C M, Zhang P F. Fairing curves and surfaces by minimizing energy. Computer Aided Design, 2001, 33: 913-923.

(责编 叶枫)