

基于改进粒子群的汽轮机高精度叶片控制算法研究

郭旭敏, 张月琴, 冯珊珊

(太原理工大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 为了提高汽轮机叶片的加工精度和加工效率, 提出了基于改进粒子群的汽轮机高精度叶片控制算法研究. 在该控制算法中, 首先利用 NURBS 曲线拟合汽轮机叶片截面型线的不同弧度, 进而对汽轮机叶片的几何模型进行构造; 然后利用改进的粒子群算法对冗余误差插补算法的输出参数进行调节, 进而对汽轮机叶片高精度加工的控制参数输入进行迭代寻优; 最后通过 NURBS 曲线构建的实体汽轮机叶片模型进行了实验仿真. 仿真结果表明, 该算法能够使汽轮机叶片的加工质量更均匀, 并且能够灵活地调节进给速度, 从而提高加工效率.

关键词: 汽轮机; 叶片; 控制算法; 粒子群算法

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)05-0145-04

Research on Turbine High Precision Blade Control Based on Improved Particle Swarm Algorithm

GUO Xu-min, ZHANG Yue-qin, FENG Shan-shan

(College of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to improve the machining precision and efficiency of the turbine blades, the proposed control algorithm based on improved particle swarm Turbine high precision blades. In the control algorithm, the first to take advantage of different curvature of NURBS curve fitting of the turbine blade section line, and then be constructed geometric model of the turbine blades; then take advantage of the improved particle swarm algorithm to adjust the output parameters of the the redundant error of interpolation algorithm turn on the input of the control parameters of the high-precision machining of steam turbine blades iterative optimization; Finally NURBS curves constructed entity turbine blade model experimental simulation. Simulation results show that the algorithm enables the processing quality of the steam turbine blade is more uniform, and the flexibility to adjust the feed speed, thereby improving processing efficiency.

Key words: turbine; leaves; control algorithm; particle swarm optimization

1 引言

汽轮机叶片作为汽轮机重要的组成部分, 对其数控加工的质量和效率有很高的要求. 同时汽轮机叶片是一种典型的具有复杂曲面的零件, 在进行加工时, 要求其建模准确可靠, 造型曲面光滑连续、易于修改^[1-2]. 近年, 在汽轮机叶片的数学建模中, 引入非均匀有理 B 样条理论代替了传统的数学建模方法, 得到了很好的造型曲面. 但是对汽轮机叶片的插补算法仍然是传统的线性和圆弧插补, CAD/CAM 系统不得不按照要求的精度将参数曲线离散

成大量的微小线段后传达到 CNC 中进行加工^[3-4]. 这样处理会生成大量的数控代码数据, 降低加工的质量和效率. 可以利用 NURBS 曲线实现汽轮机叶片的参数化建模型, 选择改进粒子群算法对实际使用中的汽轮机叶片进行重构, 从而能够迅速地构成实际应用中的叶片模型, 为高精度叶片加工提供有利的理论依据^[6-7].

2 汽轮机叶片的造型模型

利用 NURBS 曲线对汽轮机叶片截面型线进行拟合, k 次 NURBS 曲线的数学模型如下所示:

$$p(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{ik}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{ik}(u)} \quad (1)$$

式中, ω_i 表示权值系数, $i = 1, 2, \dots, n$, ω_0 和 ω_n 均为正值, 其余的权值均非负, 顺序 k 个权值不能同时为零, 可以避免分母等于零的情况、凸包性的存在以及曲线退化于一点等的情况, d_i 表示控制点, $i = 1, 2, \dots, n$, ω_i 和 d_i 分别联系, $d_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 可以顺序连接为多边形. $N_{ik}(u)$ 表示沿 u 向的 k 次 B 样条曲线, 相应的数学模型可以表示为如下的形式:

$$N_{i0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{ik}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i, k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u_i}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1, k-1}(u), \quad k \geq 1 \quad (3)$$

u 向的节点矢量为 $U = [u_0, u_1, \dots, u_{m+k+1}]$. 欲确保曲线能够通过多边形的起始点和终止点, 同时能够和首边以及末边相切, k 次 B 样条基函数节点矢量的起始端以及终止端分别有 $k+1$ 个重节点.

根据汽轮机叶片特点, 可以利用 3 次 NURBS 曲线拟合叶片截面造型, 为了能够利用矩阵表示 NURBS 曲线, 利用分段的方式定义 NURBS 曲线, 第 i 段 NURBS 曲线的数学模型如下所示:

$$p_i(u) = \frac{\sum_{j=i}^{i+2} \omega_j D_j N_{j2}(u)}{\sum_{j=0}^{i+2} \omega_j N_{j2}(u)}, \quad u = [u_i, u_{i+1}] \quad (4)$$

利用德布尔算法可以获得如下的数学模型:

$$p(u) = \sum_{j=i-k+1}^i d_j N_{j, k-1} = \dots = d_i^k, \quad u_i \leq u \leq u_{i+1} \quad (5)$$

$$d_j = d_j^l, \quad l = 0 \quad (6)$$

$$d_j = (1 - \beta_j) d_{j-1}^{l-1} + \beta_j d_j^{l-1} - 1, \quad l = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

$$\beta_j = \frac{u - u_j}{u_{j+k+1-l} - u_j} \quad (8)$$

最终可以获得二次 NURBS 曲线的矩阵表达式:

$$p(u) = \frac{UN_i (D_i^e)^T}{UN_i (W)^T} \quad (9)$$

$$\text{式中, } N_i = \begin{bmatrix} \frac{\Delta_{i+2}}{\Delta_{i+1}^2} & \frac{\Delta_{i+1}}{\Delta_{i+1}^2} & 0 \\ -2n_{11} & 1 + n_{11} - n_{12} & 0 \\ n_{11} & -(n_{11} + n_{33}) & \frac{\Delta_{i+2}}{\Delta_{i+2}^2} \end{bmatrix},$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, n-2, \quad U = [1, u, u^2], \quad D_i^e = [\omega_i d_i, \omega_{i+1} d_{i+1}, \omega_{i+2} d_{i+2}], \quad W_i = [\omega_i, \omega_{i+1}, \omega_{i+2}].$$

根据上述数学模型, 确定出恰当的节点矢量和权值系数, 就可以应用 NURBS 曲线拟合出汽轮机叶片截面型线的不同弧.

3 基于改进粒子群的汽轮机高精度叶片控制算法

3.1 传统粒子群算法的基本理论

粒子群算法在结构的优化领域中应用非常广泛, 同时取得了非常好的应用效果. 粒子群算法包括粒子初始化、迭代求最优解、粒子约束目标函数的解搜索三部分. 在每次迭代运算中, 粒子的速度和位置都可以按照个体极值和全局极值的实时跟踪得到调节.

优化搜索空间的维数取为 m , 粒子群的规模取为 n , 粒子群中第 i 个粒子的位置向量定义为如下的形式:

$$X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ie}, \dots, X_{im}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

粒子群中第 i 个粒子的速度向量定义为如下的形式:

$$V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{ie}, \dots, V_{im}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

粒子群的个体极值向量定义为如下的形式:

$$P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ie}, \dots, P_{im}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

在迭代计算的过程中, 粒子的速度和位置更新规则可以表示为如下的形式:

$$V_{ie}^{t+1} = \omega V_{ie}^t + C_1 R_1 (P_{ie} - X_{ie}^t) + C_2 R_2 (P_{ge} - X_{ie}^t) \quad (13)$$

$$X_{ie}^{t+1} = X_{ie}^t + V_{ie}^{t+1} \quad (14)$$

式中, $e = 1, 2, \dots, m$; j 表示迭代的次数; ω 表示权重; C_1 和 C_2 分别表示学习算子; R_1 和 R_2 表示随机数, 取值范围为 $[0, 1]$.

3.2 改进粒子群和冗余误差插补的汽轮机高精度叶片控制算法

为了避免传统粒子群算法的早熟问题, 把均匀设计和粒子群算法结合起来, 从而能够有效地调节算法的参数. 均匀设计可以通过少量的点捕获较多的信息, 可以构造出均匀设计表 $W_k(l)$, 其中, k 表示均匀实验的数量; r 表示变量的数目; l 表示不同因素的状态.

改进粒子群算法的基本思想如下: 第一步, 通过

k 个均匀的区域划分粒子群的优化搜索空间,按照使用表可以得到合适列的区域,将合适列的区域定义为目前最优解的变异区域.同时把粒子群的目标函数值等效为均匀设计的效应值,求出不同区域对应点的效应值,接着,行回归分析,权重正比于均匀设计的效应值,在变异的过程中,权重提高,当前最优解归到该区域的可能性提高.

在变异以前,权重的线性递减模型为:

$$\omega = \omega_{\max} + \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{t} s \quad (15)$$

式中, s 表示目前迭代的序列号, T 表示总迭代次数.

在变异之后,对式(13)进行修正,可以确保粒子群算法具有较好的能力,修正后的权重计算模型如下:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{t - l} s \quad (16)$$

式中, $T-l$ 表示总变异后的迭代次数,其中 l 表示全局最优位置变异时迭代次数.

加工汽轮机叶片时,采用冗余误差的插补算法,该控制算法可以在确保加工精度的前提下,极大地提高叶片的加工效率.如果曲率半径比较大,曲线就平缓一些,并且增加插补的步长,从而能够提高插补速度.汽轮机叶片加工的进给速度可以利用如下的数学模型进行调节:

$$v(u_i) = \begin{cases} \left(1 + \kappa \frac{u_{i1} - u_{i2}}{u_{i1} + u_{i2}}\right) F, & u_{i1} \geq u_{i2} \\ \frac{2}{T_s} \sqrt{r_i^2 - (r_i - ER)^2}, & u_{i1} < u_{i2} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $v(u_i)$ 表示在曲率不同的情况下半径自动调节进给速度; r_i 表示在 u_i 处的曲率半径, $r_i = 1/k_i$, k_i 表示 u_i 处的曲率, u_{i1} 表示等弓高误差插补增量, u_{i2} 表示进给速度恒定条件下插补增量; T_s 表示 NURBS 曲线的插补周期; F 表示进给速度; ER 表示最大弓高误差; κ 表示倍率系数,其值处于 0 和 0.5 的范围内.

针对实际的汽轮机叶片的实体模型,利用粒子群算法对冗余误差的插补算法进行调节,从而能够提高叶片的加工精度.具体算法步骤如下:

Step1: 粒子初始化

将冗余误差插补算法的取值方案映射为粒子群的粒子,针对当前加工条件,求其具有最优加工条件的取值参数.因此将汽轮机叶片加工的进给速度作为粒子的适应度评价函数,初始化粒子的速度和位置.

置.

Step2: 粒子权系数赋值

根据改进的粒子群惯性系数调整策略进行粒子权系数映射计算.

Step3: 粒子权系数修正

根据变异前后粒子权重的变化进行粒子权系数修正.

Step4: 粒子适应度值

利用式(17)计算粒子的适应度值 $f(x_i)$.

Step5: 粒子个体极值更新

若 $f(x_i) < P_{best1}$, 则 $P_{best1} = f(x_i)$, 将该适应度值赋值给个体极值.

Step6: 粒子全局极值更新

若 $P_{best1} < P_{bestg}$, 则 $P_{bestg} = P_{best1}$, 将该最优极值赋值给全局极值.

Step7: 粒子更新

依据粒子速度和位置更新策略进行更新.

Step8: 迭代计算

依据迭代计算条件判定是否终止计算,输出全局极值点的位置和极值,将该参数值作为冗余误差插补算法的调节参数输出值.

4 实例分析

利用基于 NURBS 曲线的汽轮机叶片模型建立出相应的实体模型,如图 1 所示.



图1 汽轮机叶片的三维实体模型

根据图 1 所示的汽轮机叶片的三维实体模型,选择如下的插补参数: $T_s = 1\text{ms}$, 进给速度 $F = 100\text{mm/s}$, $ER = 10^{-3}\text{mm}$. 粒子群算法的参数设置如下: $n = 50$, $C_1 = C_2 = 2.0$, $t = 60$, $\omega_{\max} = 0.85$, $\omega_{\min} = 0.25$. 加工仿真算法利用 MATLAB 软件编制,相应的仿真结果如图 2 和图 3 所示.

从图 2 和图 3 的仿真结果可以看出,利用基于改进粒子群算法的冗余误差控制算法能够提高叶片的加工精度,使汽轮机叶片的加工质量更均匀,进给

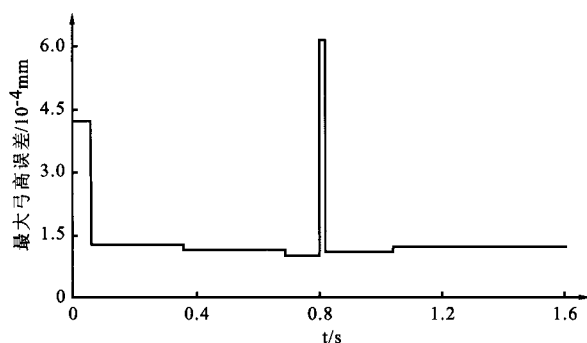


图2 最大弓高误差的仿真曲线

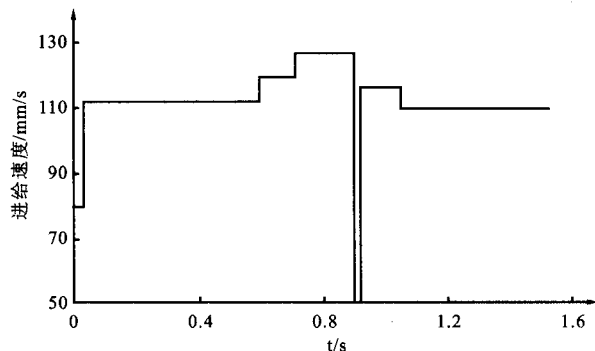


图3 汽轮机叶片加工进给速度的仿真曲线

速度可以根据叶片曲线不同位置的曲率变化加以调节,同时进给速度的变化幅度也能够给有效地提高,从而使加工效率得到了极大的提高。

5 结束语

将粒子群算法引入到了 NURBS 曲线的插补控制算法中,使汽轮机叶片的加工精度得到了极大的

提高,该控制算法不仅能够保证叶片的加工精度要求,而且能够灵活地调节进给速度,从而使叶片的加工效率得到提高。进而降低了加工机床的振动,对于汽轮机叶片高精度加工具有较好的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 韩庆瑶,唐月夏,乐英. 汽轮机叶片数控加工的直接插补算法研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(9):26-29.
- [2] 乐英. 提高汽轮机叶片加工效率的方法[J]. 汽轮机技术, 2012, 54(3):234-238.
- [3] 隋永枫,孙义冈,叶钟,等. 汽轮机叶片改型及三维气动优化设计[J]. 热力透平, 2011, 40(1):28-32.
- [4] 隋永枫,孙义冈,丁旭东,等. 不调频叶片设计改型研究[J]. 热力透平. 2010, 39(1):19-21.
- [5] 杨敏超,孙苏亚. 涡轮榫头榫槽的结构优化设计[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8):1876-1882.
- [6] 李静,高正红,黄江涛,等. 基于分布式粒子群算法的翼型优化设计[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(4): 464-469.
- [7] 侯磊. 基于多目标粒子群算法的船舶主尺度优化设计研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(7):784-790.

作者简介:

郭旭敏 男,(1987—),硕士研究生,讲师. 研究方向为数据挖掘.

张月琴 女,(1963—),硕士研究生,教授. 研究方向为数据挖掘.

冯珊珊 女,(1986—),硕士研究生. 研究方向为数据挖掘.

(上接第 144 页)

- [8] 饶华一,陈铭,张茹,等. 信息隐藏和隐写分析综述[C]//2007 北京地区高校研究生学术交流会通信与信息技术会议论文集(上册),中国电子学会信息论分会,北京:2008: 138-141.
- [9] 金晨辉,杨阳,祁传达. 对混沌序列密码的相关密钥

攻击[J]. 电子与信息学报, 2006(3): 410-414.

作者简介:

赵家弘 男,(1986—),硕士,助理工程师. 研究方向为嵌入式系统研究与应用.