

DOI: 10.7652/xjtuxb201309011

汽轮机长叶片型面双刀加工刀位轨迹优化算法

王建录, 成冰, 赵万华, 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为改善汽轮机长叶片型面加工中的变形问题,提出了 2 种优化目标下的叶片型面双铣刀对刀加工刀位轨迹规划算法。首先建立了牛鼻刀的切削力与切削参数、刀具姿态的关系模型,在此基础上分别以最小径向切削合力和最小切削合力矩为优化目标计算了 2 把铣刀的切削刀位点和刀具姿态。采用有限元分析方法对比了传统单铣刀切削加工路径、未优化双刀切削加工路径和 2 种双铣刀切削加工路径下的叶片加工变形情况,结果显示:在一组给定的常用切削参数下,径向切削合力优化轨迹算法和切削合力矩优化轨迹算法可分别将叶片的平均加工变形减小约 31%和 55%;沿优化后的双刀切削加工路径加工能够有效改善叶片整体受力情况,减小叶片的加工变形,提高加工精度和效率。

关键词: 汽轮机叶片;叶片加工;双铣刀加工;刀具轨迹规划

中图分类号: O121.8;G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0065-07

New Planning Algorithm of Tool Path for Long Turbine Blades Machining with Twin-Cutters

WANG Jianlu, CHENG Bing, ZHAO Wanhua, LU Bingheng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the deformation problem during the manufacturing process of the long turbine blades, a tool path planning algorithm of the twin-cutters was proposed based on two optimization strategies, i. e., minimization of the radial cutting resultant force and minimization of the cutting resultant moment. An analytic cutting force model of the bullnose cutter was presented to predict the cutting force value of a single cutter. The cutting locations and cutters' orientation were then calculated in order to satisfy the two optimization strategies. The results show that with certain milling parameters, the tool path planning with the two optimization strategies can help to reduce the blade's process deformation by 31% and 55%, respectively. The optimized tool path can effectively compensate the cutting force and eventually reduce the blades' manufacturing deformation.

Keywords: turbine blades; blade manufacturing; twin-cutters; tool path planning

汽轮机中的长叶片属于典型的细长薄壁零件,叶片长宽比大,叶片型面为空间曲面,结构复杂,叶型扭转近 90°,现国内采用的加工设备主要是五轴联动数控加工中心。传统叶片的加工方法多采用点接触式环切,加工效率和加工质量不高。于源等基于曲面的密切曲率法提出了一种叶片五轴加工的方法^[1],这种方法在叶片加工中产生了变形;针对叶片加工变形,王自建等提出了一种专用的叶片型面加

收稿日期: 2012-12-26。 作者简介: 王建录(1961—),男,博士生,研究员;赵万华(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家高技术研究发展计划重大专项资助项目(2009ZX04014-043)。

$$\kappa_1 = \arcsin\left(\frac{r\cos\alpha - r\sin\alpha}{(D/2) - r}\right) \quad (5)$$

$$\kappa_2 = \arcsin\left(\frac{(r - a_p - \tan\alpha(r^2 - (r - a_p)^2)^{1/2})\cos\alpha}{(D/2) - r}\right) \quad (6)$$

瞬时切屑厚度近似为

$$h = f_r \sin \phi \sin \kappa \quad (7)$$

将式(7)带入式(1),并在上述修正后的轴向和径向范围内积分,带入切削参数值,即可得到在一定切削参数下的切削力动态模型,由此可建立牛鼻刀动态切削力与切削参数、刀具倾角的关系。

计算时叶片刀具几何参数和切削参数为： $D=32\text{ mm}$, $r=5\text{ mm}$, $f_r=0.23\text{ mm}$, 主轴转速 $s=1\ 970\text{ r/min}$, $a_p=0.8\text{ mm}$, $a_e=4\text{ mm}$, 叶片材料为不锈钢合金, 刀具材料为硬质合金。通过切削实验的系数识别可以得出 6 个切削力系数值, 即 $K_{tc}=1\ 205$, $K_{te}=17.5$, $K_{rc}=651$, $K_{re}=33.4$, $K_{ac}=682$, $K_{ae}=7.21$, 再将其带入本文切削力模型, 结合上述仿真参数, 在 Matlab 下得到牛鼻刀动态切削力模型, 如图 4 所示。

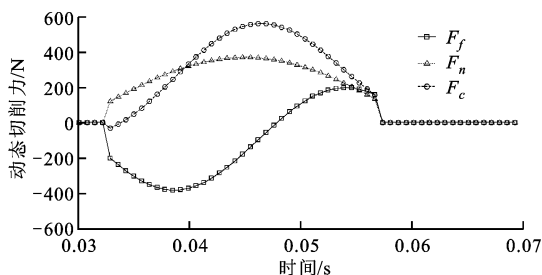


图 4 一个切削周期内牛鼻刀的动态切削力变化

在实际加工过程中,切削力是高频变化的力,计算时切削力为平均值,因此在切削参数不变的条件下,牛鼻刀平均切削力与 α 的关系如图5所示。

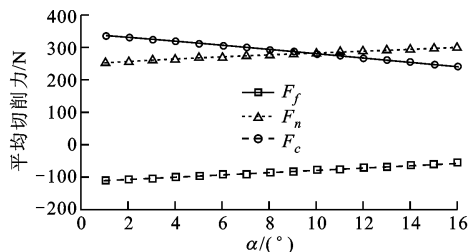


图 5 牛鼻刀平均切削力与 α 的关系

2 切削力、切削力矩抵消数学模型

图 6 为叶片双铣刀对刀加工的空间三维示意图。叶片型面是由多条型线拟合而成的自由曲面,在传统的五轴数控加工过程中,叶片受力包括 F_{ℓ} 、

F_c 、 F_n 。由于叶片的结构特点决定着叶片沿叶高方向的刚度较好,因此叶片受力后变形包括弯曲变形和扭转变形,主要由 F_n 和 F_f 引起。

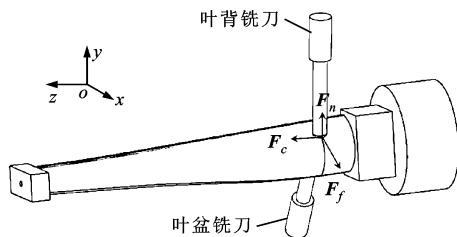


图 6 叶片双铣刀对刀加工的示意图

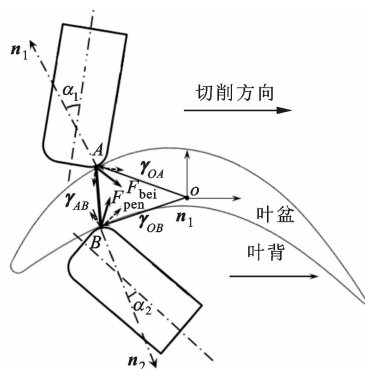
2.1 固定切削点的切削合力及合力矩

按沿叶片截面型线的行切可以得到叶片截面型线数据,叶片截面内双铣刀轨迹规划及受力如图 7 所示。刀具姿态方向上单位向量 d_1 、 d_2 可表示为

$$\mathbf{d}_1 = n_1 \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 \\ -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{d}_2 = \mathbf{n}_2 \begin{bmatrix} \cos\alpha_2 & \sin\alpha_2 \\ -\sin\alpha_2 & \cos\alpha_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

叶盆、叶背受刀具影响在截面内的加工切削合力分别为 F_{pen} 和 F_{bei} , F_{bei} 和 F_{pen} 的方向与叶背叶盆



$\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$: 叶背切削点、叶盆切削点的单位法向量; $\gamma_{AB}, \gamma_{OA}, \gamma_{OB}$ 为点-点的连线矢量; α_1, α_2 : 叶背、叶盆刀具轴线与叶背、叶盆法线的夹角

图 7 叶片截面内的受力分析示意图

切削点法向 $\mathbf{n}_1$ 、 $\mathbf{n}_2$ 及 α_1 、 α_2 有关,大小分别为

$$|\mathbf{F}_{\text{bei}}(\alpha_1)| = (|\mathbf{F}_{f\text{bei}}(\alpha_1)|^2 + |\mathbf{F}_{n\text{bei}}(\alpha_1)|^2)^{1/2} \quad (10)$$

$$|\mathbf{F}_{\text{pen}}(\alpha_2)| = (|\mathbf{F}_{f\text{pen}}(\alpha_2)|^2 + |\mathbf{F}_{n\text{pen}}(\alpha_2)|^2)^{1/2} \quad (11)$$

该切削状态下沿切削点连线矢量方向的切削合力
(简称径向切削合力)为

$$\mathbf{F}_{\text{sum}} = \left(\mathbf{F}_{\text{bei}}(\alpha_1) \cdot \frac{\boldsymbol{\gamma}_{AB}}{|\boldsymbol{\gamma}_{AB}|} + \mathbf{F}_{\text{pen}}(\alpha_2) \cdot \frac{\boldsymbol{\gamma}_{AB}}{|\boldsymbol{\gamma}_{AB}|} \right) \boldsymbol{\gamma}_{AB} \quad (12)$$

以叶片横截面质心 o 点为力矩中心,该切削状态下的切削合力矩为

$$\mathbf{T}_{\text{sum}} = \mathbf{F}_{\text{bei}}(\alpha_1) \times \gamma_{OA} + \mathbf{F}_{\text{pen}}(\alpha_2) \times \gamma_{OB} \quad (13)$$

由以上方程看出,径向切削合力 $\mathbf{F}_{\text{sum}}$ 和切削合力矩 $\mathbf{T}_{\text{sum}}$ 是 α_1 、 α_2 及 γ_{AB} 的函数。在固定点的切削合力、合力矩优化可转化为在自变量范围内 $f = g(\alpha_1, \alpha_2)$ 的二元函数的优化。

2.2 刀具路径上整体切削合力优化

2.2.1 叶片型面加工走刀方式 双铣刀对刀加工有2种走刀方式,沿叶片横截面方向走刀和沿叶高方向走刀,如图8所示。

沿叶高方向加工,由于叶片型线曲率变化不大,可近似直线加工,所以加工步长较大,加工程序短,但残留高度不易控制;沿叶片横截面方向加工符合叶片零件加工方式,加工后便于检验,叶型准确度较高。基于此,本文采用沿叶片横截面方向的走刀方式对双铣刀对刀加工工艺进行论证。

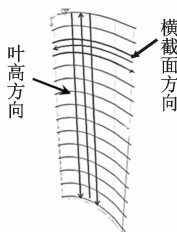


图8 叶片加工中的2种走刀方式示意

2.2.2 沿横截面的整体受力优化及轨迹规划 在三维建模中,按行距截取叶片三维模型,得到叶片截面型线数据。整个叶片截面型线的刀位点和加工步长范围可按误差要求对截面型线进行直线插补,如图9所示。根据式(12)、(13)知,加工步长会影响刀具切削点的位置及法线方向,应合理规划刀具路径使得加工步长在允许的上、下界变化范围($l_{\min}$, $l_{\max}$)和后跟角变化范围($\alpha_{\min}$, $\alpha_{\max}$),即调整叶片型面两侧刀具刀位点之间的相对位置和相对姿态,使得 $|\mathbf{F}_{\text{sum}}|$ 和 $|\mathbf{T}_{\text{sum}}|$ 取值最小。

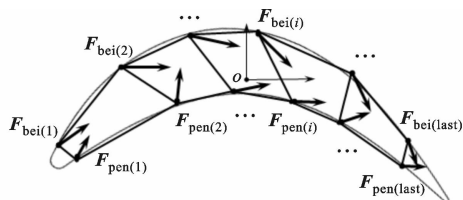


图9 叶片截面内刀位点与加工步长的关系

由于两侧刀具的进给方向相反时,切削力会使叶片的扭转变形增大,因此两侧刀具进给方向应保持一致,即进给方向均由进汽边至出汽边(见图7),

或由出汽边至进汽边。

对叶片截面型线进行线性插补可以得到刀位控制点数据,刀位控制点数与加工步长的大小及刀具的刀轴倾角有关,刀位控制点数越多,切削力抵消效果越好,但刀位控制点数过多,控制程序更为复杂,加工效率降低。因此,在同样的切削力抵消效果下,刀位控制点数越少越好。为了控制切削力的抵消效果,叶背和叶盆线的刀位控制点数应相同。

在较少的刀位控制点数下获得较好的切削力抵消效果,前后两刀位控制点之间的步长需要采用直线插补法修正,如图10所示,即刀位控制点间步长的最大值由最大插补误差决定。设定步长的最小值为 $\lambda L_{\max}$ ($0 < \lambda < 1$),于是有

$$l_{\min} = \lambda L_{\max}; \quad l_{\max} = L_{\max} \quad (14)$$

λ 取值越小,叶片的刀位控制点数越多,切削力的抵消效果越好。刀位控制点数的取值下限为:当进行线性插补且步长取值最大时,由叶盆和叶背曲线分别得到的刀位控制点数的值较大。刀位控制点数的取值上限为:当进行线性插补并且步长取值最小时,由叶盆和叶背曲线分别得到的刀位控制点数的值较小。

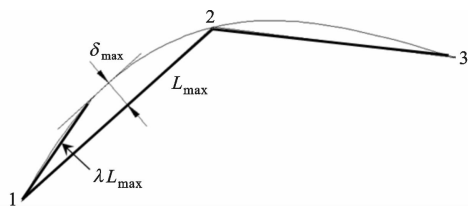


图10 刀位控制点间步长取值范围示意

叶片五轴加工中 α 的设置:满足刀轴和叶片的不干涉条件;保证加工表面的质量。在仿真中,结合叶片实际加工中的刀具倾角范围,将 α 取值范围设置为(0° , 15°)。

利用 Matlab 进行编程计算,在初步确定刀位控制点数及加工步长后确定叶背和叶盆曲线各刀位控制点,按照牛鼻刀切削力模型得到的双刀加工在对应刀位点的切削力、切削力矩的抵消关系为

$$\mathbf{F}_{\text{sum}}(i) = \left(\mathbf{F}_{\text{bei}}(\alpha_{i1}) \cdot \frac{\gamma_{AB}(i)}{|\gamma_{AB}(i)|} + \mathbf{F}_{\text{pen}}(\alpha_{i2}) \cdot \frac{\gamma_{AB}(i)}{|\gamma_{AB}(i)|} \right) \gamma_{AB}(i) \quad (15)$$

$$\mathbf{T}_{\text{sum}}(i) = \mathbf{F}_{\text{bei}}(\alpha_{i1}) \times \gamma_{OA}(i) + \mathbf{F}_{\text{pen}}(\alpha_{i2}) \times \gamma_{OB}(i) \quad (16)$$

式中: $\mathbf{F}_{\text{sum}}(i)$ 为施加在待加工叶片上第 i 对刀位控制点的径向切削合力; $\mathbf{T}_{\text{sum}}(i)$ 为施加在待加工叶片上第 i 对刀位控制点的切削合力矩; $\mathbf{F}_{\text{bei}}(\alpha_{i1})$ 为叶背

第 i 个刀位控制点处同刀具倾角有关的切削合力; $F_{\text{pen}}(\alpha_{i2})$ 为叶盆第 i 个刀位控制点处同刀具倾角有关的切削合力; α_{i1} 、 α_{i2} 分别指叶背、叶盆第 i 对刀位控制点处的刀具倾角, i 为叶背、叶盆刀位控制点编号 $1, 2, 3, \dots$ 。可见,求解受力的问题可转化为刀位控制点数、走刀步长值以及各对应刀位控制点处刀轴后跟角取值范围的边界条件的最优化问题。优化目标为整个截面上径向切削合力、合力矩综合抵消效果的 F_{total} 、 T_{total} 取值最小,即

$$F_{\text{total}} = \sum_1^p F_{\text{sum}}(i) \quad (17)$$

$$T_{\text{total}} = \sum_1^p T_{\text{sum}}(i) \quad (18)$$

式中: F_{total} 为双刀头作用在待加工叶片上横截面轨迹上的径向切削力合力; T_{total} 为双刀头作用在待加工叶片上横截面轨迹上的切削合力矩; p 为刀位控制点数。

通过迭代计算得到的刀位控制点的数据实际上是切触点坐标及刀轴倾角,需要根据具体刀具形状、刀具倾角、切触点坐标、切触点法线方向计算刀具中心点坐标 (x_m, y_m, z_m) , $m=1, 2, 3, \dots$, 根据切触点坐标、切触点法向及计算得到的刀轴倾角通过坐标系变换得到刀轴矢量在工件坐标系下的方向余弦 (i_m, j_m, k_m) , $m=1, 2, 3, \dots$, 由此确定双刀加工刀具轨迹规划的刀位点坐标 $(x_m, y_m, z_m, i_m, j_m, k_m)$ 和 $(x_n, y_n, z_n, i_n, j_n, k_n)$ 。在得到一个截面的刀具轨迹后,重复上述过程即可得到整个叶片型面上的刀具轨迹。结合工艺参数对得到的刀具轨迹进行修正,使得叶片加工时的切削力合力满足实际加工要求,再通过调节叶背和叶盆两侧进给速度得到实际加工中的刀位控制点,最后用后处理程序将刀位控制点坐标转化为数控加工程序。

3 叶片变形有限元计算

3.1 刀具轨迹计算结果及抵消效果论证

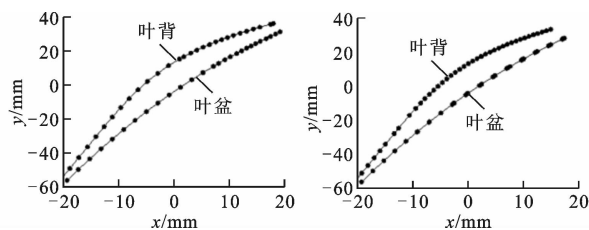
双刀加工时叶片变形的计算方案及切削参数与第1节描述相同,计算时的切削力来自牛鼻铣刀,刀具材料为硬质合金,叶片材料为不锈钢。

刀位轨迹的优化目标包括径向切削合力和切削合力矩。加工步长按照等参数法在允许的几何误差范围内计算获得,最大步长为 7 mm,步长控制系数 $0.4 < k < 1$ 。

按照不同的轨迹优化算得的切削刀位点如图 11 所示。由图 11 看出,采用 2 种变形优化策略加

工时,叶盆和叶背两处的刀位点分布并不十分均匀。在几何精度允许的范围内,后续抛光工序会保证最终加工表面的质量。在实际加工中,为保证两侧加工同时完毕,叶盆、叶背两侧需要进行变进给加工。

为证明双铣刀刀具路径优化的必要性,本文与未优化双铣刀刀具轨迹进行了对比。未优化双铣刀对刀加工采用了固定的切削姿态(垂直于叶片表面法向)和等参数的走刀步长的刀具轨迹规划。叶片加工时单刀、未优化双刀及优化后双刀的刀具轨迹的受力对比如图 12 和图 13 所示,3 种走刀路径采用的切削参数相同。



(a) 优化径向切削合力 (b) 优化切削合力矩

图 11 2 种优化目标下的刀位点规划

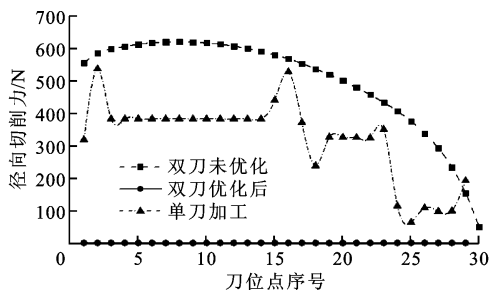


图 12 叶片加工时径向切削合力对比

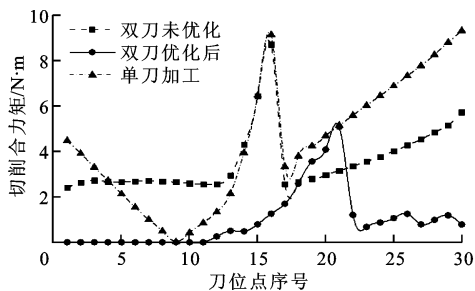


图 13 叶片加工时切削合力矩对比

由图 12、13 看出,未优化的径向切削合力比单刀时更大,未优化的切削合力矩在局部比单刀时更大,可见未优化的双刀加工并不具有全局优化切削力和切削力矩的作用。这是由于叶片曲面复杂,双铣刀加工路径的姿态和步长未经优化设计,很有可能产生更大的切削合力及合力矩,由此增大了叶片变形风险。由图 12、13 还可看出,总体上优化后的

径向切削合力和合力矩大大减小,优化后的双刀切削几乎将径向切削合力抵消。

3.2 叶片加工受力变形的有限元分析

由于叶片型面的复杂性,切削受力与变形的关系不能直接得出,因此切削力和切削力矩是否能够真正有效减小叶片加工变形还需要进一步验证。采用有限元分析方法对叶片在单刀和双刀加工中的变形进行了计算。叶片加工采用行切方式,即刀具沿叶片的各个截面型线走刀,因此在分析叶片受力变形时,切削力可以施加在截面型线上的刀位控制点处,如图14所示。施加在叶片上的切削力按前述牛鼻刀切削力模型计算得到,切削参数设定见第1节。有限元分析时边界条件按照叶片实际加工过程中的夹具装夹状态设定。

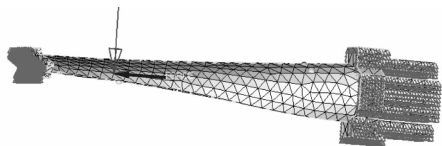


图14 叶片加工时有限元分析模型

叶片加工时受力变形的有限元分析结果如图15所示。由图15看出:优化后的双刀加工方法,叶片加工变形明显减小;优化后的径向切削力使得叶片平均变形降低31%左右,优化后切削力矩使得变形的抵消作用更加明显,叶片变形平均降低了55%左右。

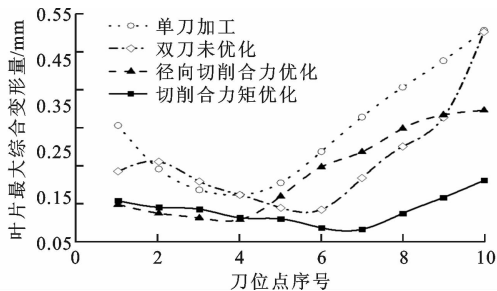


图15 加工时叶片受力变形的有限元分析结果

由图15还看到:单刀加工时叶片受切削力作用产生的变形主要发生在靠近进、出汽边处,文献[5]中提到这主要是由切削力造成的扭矩所引起的扭转变形占主导的缘故;以切削合力矩优化的刀具轨迹比径向切削合力优化的效果更明显。径向切削合力和切削合力矩优化的叶片扭曲变形对比如图16所示。由图16看出,总体上切削合力矩优化的刀具路径产生的扭曲变形更小,这也反映出叶片在切削力作用下主要产生扭转变形。在进一步的双刀轨迹优化中,根据不同的加工部位进行变目标轨迹优化,可

以达到最有效的变形抵消效果。

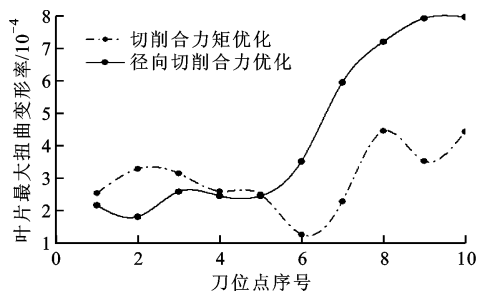


图16 2种优化目标下叶片的最大扭曲变形率

4 结论

(1)经计算验证,刀具选用直径为32 mm、半径为5 mm圆刀片的牛鼻刀,切削参数取 $f_r=0.23$ mm, $s=1\,970$ r/min, $a_p=0.8$ mm, $a_e=4$ mm,采用最小径向切削合力和最小切削合力矩为优化目标的双刀轨迹规划算法,可将叶片的平均加工变形程度分别减小31%和55%。叶片的最大变形集中在进、出汽边处,扭转变形主要来自切削力矩,因此以切削合力矩为优化目标的刀具轨迹算法是更好的改善叶片变形的策略。

(2)未经优化的双刀加工轨迹不能实现叶片加工变形的全局优化,叶片变形在局部出现增大的趋势。双铣刀对刀加工的刀具轨迹优化是通过抵消切削力来改善变形的必要条件。本文提出了在2种优化目标约束下的刀具轨迹规划算法,尤其是以切削合力矩为优化目标的轨迹规划算法,能够改善叶片加工中的受力情况,实现减小叶片整体加工变形的工程目的。

(3)双铣刀对刀加工的刀具规划方法不同于传统数控加工程序中仅仅以几何关系约束生成刀位轨迹的方法,它的特点在于,考虑了加工过程的力学关系,针对叶片在加工中产生的变形问题,采用了以切削力、切削力矩抵消效果为优化目标来生成刀具轨迹的策略,这不仅可以改善叶片加工中的变形情况,同时还可以提高叶片的加工效率。

参考文献:

- [1] 于源, 负敏, 王小椿. 汽轮机叶片五轴数控加工的一种实用方法[J]. 小型微型计算机系统, 2002, 23(10): 1278-1280.
YU Yuan, YUN Ming, WANG Xiaochun. An approach to machine steam turbine blades in 5-axis NC[J]. Mini-Micro Systems, 2002, 23(10): 1278-1280.
- [2] 王自建, 傅蔡安. 一种专用叶片型面的加工方法[J].

- 汽轮机技术, 2006, 48(2): 156-158.
- WANG Zijian, FU Cai'an. A special machining method of the blade surfaces [J]. Turbine Technology, 2006, 48(2): 156-158.
- [3] 王自建. 基于型态表分析法的叶片型面专用加工方法的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2006.
- [4] 白瑀, 张定华, 刘维伟. 叶片螺旋铣弹性变形分析 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24(7): 800-802.
- BAI Yu, ZHANG Dinghua, LIU Weiwei. Elasticity analysis of blade parts in spiral NC programming [J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(7): 800-802.
- [5] 赵明, 刘维伟, 李杰光. 叶片精密加工弹性变形误差分析及规律研究 [J]. 机械设计与制造, 2009(6): 106-108.
- ZHAO Ming, LIU Weiwei, LI Jieguang. Study on machining deformations error and rules analyses of thin-walled blades [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(6): 106-108.
- [6] 谢荣泰. 虚拟多轴铣床导入静态切削力预估之研究 [D]. 台湾: 成功大学机械研究所, 2009: 8-30.
- [7] 翟玉山, 杨旭静. 一种面向进给速度优化的数控编程后置处理开发 [J]. 机械制造, 2007, 4(6): 45-47.
- ZHAI Yushan, YANG Xujing. Feedspeed-oriented NC programming optimized post-processing development [J]. Machinery, 2007, 4(6): 45-47.
- [8] 姜彬, 郑敏利, 李振加, 等. 球头铣刀切削力的预报 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2001, 6(6): 20-24.
- JIANG Bin, ZHENG Minli, LI Zhenjia, et al. The prediction of cutting force of ball-end mill [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2001, 6: 20-24.
- [9] 陈涛, 钟毅芳, 周济, 等. 自由曲面5轴数控加工刀位轨迹的生成算法 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(12): 100-103.
- CHEN Tao, ZHONG Yifang, ZHOU Ji, et al. Algorithm of cutter location path generation for five-axis NC machining of sculptured surfaces [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(12): 100-103.
- [10] LAZOGLU I, LIANG S Y. Modeling of ball-end milling forces with cutter axis inclination [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering,

2000, 122(1): 3-11.

[本刊相关文献链接]

- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统冷却特性研究. 2013, 47(5): 24-30. [doi: 10. 7652/xjtuxb201305005]
- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统流动特性的研究. 2013, 47(3): 42-47. [doi: 10. 7652/xjtuxb201303008]
- 邵帅, 邓清华, 时和双, 等. 不同容积流量下汽轮机低压缸末三级定常流动数值研究. 2013, 47(1): 15-20. [doi: 10. 7652/xjtuxb201301004]
- 潘家成, 徐亮, 高建民, 等. 轴向间距对二次水滴运动特性及沉积规律的影响. 2012, 46(7): 1-6. [doi: 10. 7652/xjtuxb201207001]
- 蔡柳溪, 王顺森, 毛靖儒, 等. 静叶斜置对高参数汽轮机再热后第一级叶栅冲蚀的影响. 2012, 46(7): 12-15. [doi: 10. 7652/xjtuxb201207003]
- 李瑜, 李亮, 钟刚云, 等. 末级透平对低压缸气动和凝结特性的影响. 2012, 46(7): 16-20. [doi: 10. 7652/xjtuxb201207004]
- 陈景龙, 訾艳阳, 何正嘉, 等. 自适应冗余多小波及其在故障诊断中的应用. 2012, 46(7): 44-49. [doi: 10. 7652/xjtuxb201207009]
- 屈焕成, 张荻, 谢永慧, 等. 汽轮机调节级非定常流动的数值模拟及汽流激振力研究. 2011, 45(11): 39-44. [doi: 10. 7652/xjtuxb201111008]
- 霍文浩, 祁明旭, 李军, 等. 超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究. 2011, 45(7): 9-14. [doi: 10. 7652/xjtuxb201107003]
- 文乐, 高林, 戴义平. 透平压缩机组的模糊PID控制与特性研究. 2011, 45(7): 76-81. [doi: 10. 7652/xjtuxb201107015]
- 何伟峰, 戴义平. 环境风速对空冷凝汽器运行性能的影响. 2011, 45(5): 31-35. [doi: 10. 7652/xjtuxb201105006]
- 刘钊, 丰镇平, 宋立明. 实际叶片前缘冲击冷却流动和换热的数值研究. 2011, 45(1): 5-9. [doi: 10. 7652/xjtuxb201101002]
- 钟杰, 郭成, 岳朋, 等. 43"汽轮机叶片材料热变形行为及制坯工艺参数优化. 2011, 45(1): 94-98. [doi: 10. 7652/xjtuxb201101019]

(编辑 苗凌)