

基于非均匀余量的整体叶轮加工工艺优化策略^{*}

吴雁¹, 吕博鑫¹, 吕仕强², 郑刚¹, 张杰人¹

(1. 上海应用技术大学机械工程学院, 上海 201418;
2. 中航工业贵州省永红航空机械有限责任公司, 贵阳 550009)

[摘要] 针对超薄结构叶片整体叶轮在制造过程中叶片产生较大的变形和切削振动, 使用非均匀余量加工工艺方案, 减小叶片变形提高加工质量。分析了集中载荷对薄壁结构和加厚结构变形的影响, 对生产中的叶轮叶片进行非均匀余量加工工艺设计, 依据优化后的工艺对叶轮进行刀具轨迹规划并进行加工试验, 结果显示该工艺优化策略能有效减小超薄叶片的铣削振动和铣削变形, 最大误差优化率为 54.47%, 平均误差优化率为 52.57%, 对类似高度与平均厚度比值较大且叶片扭转曲率较大的复杂零件的实际加工有一定的指导意义。

关键词: 非均匀余量; 工艺优化策略; 超薄叶片; 整体叶轮; 切削振动

Machining Process Optimization Strategy of Integral Impeller Based on Non-Uniform Machining Allowance

WU Yan¹, LÜ Boxin¹, LÜ Shiqiang², ZHENG Gang¹, ZHANG Jieren¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;
2. AVIC Yonghong Aviation Machine Co., Ltd., Guiyang 550009, China)

[ABSTRACT] Large deformation and cutting vibration are important problems in the process of manufacturing ultra-thin blade of integral impeller, thus a non-uniform allowance process is used in this paper, which can reduce blade deformation and improve processing quality. Firstly, the influence of concentrated load both on the deformation of thin-walled structure and thickening structure was analyzed. Then non-uniform allowance machining process of impeller blade was designed. Lastly, tool path was planned and processing experiment was done on the impeller. Results show that the process optimization strategy can effectively reduce milling vibration and milling deformation of ultra-thin blade, the max error optimization rate is 54.47% and the average error optimization rate is 52.57%, which is of significance to the actual production.

Keywords: Non-uniform machining allowance; Process optimization strategy; Ultra-thin blade; Integral impeller; Cutting vibration

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.05.072

整体叶轮作为透平(Turbine)机械中动力推进器及环控系统的核心零部件, 广泛应用于航空航天、能源、船舶、军事、尖端医疗设备及高精尖机械装备领域, 对机械性能的保障起着重要作用。提高复杂曲面整体叶轮制造精度有利于整体叶轮制造完成后的动平衡试验、超转试验及装配产品后转速的提升和设备的安全性, 另外, 较高的加工质量对气流损失与零件数量减少、质量减轻极为有利, 最终可保证较高的气动效率^[1]。在结构技术、材料技术及计算机集成制造技术等一批先进制造技术的支持下, 整体叶轮系零件的设计呈叶身扭曲弯度趋

大、叶弦趋宽、叶身趋薄、前掠加大等特点。一些航空航天领域的叶片最薄处甚至 $\leq 0.5\text{mm}$, 叶片高度与厚度比值很大。对于这类拥有复杂曲面造型且在整个制造工艺过程中材料去除率达 85%~95% 的弱刚性零件而言, 直径 180~400mm。叶片高度和叶冠与叶根最厚处平均厚度之比 ≥ 15 的整体叶轮, 技术文件要求其面轮廓精度 $\leq \pm 0.15\text{mm}$, 近乎苛刻。在制造过程中, 切削力、夹持力、切削振动、金属纤维变形及残余应力的综合影响下, 叶轮叶片极易产生过切、欠切等制造缺陷, 较薄的叶片前缘甚至会起叶片断裂, 导致叶轮报废。目前, 对于弱刚度零件铣削刚度的研究主要是进行理论分析和数值仿真分析。西北工业大学的单晨伟^[2]、刘维伟^[3]等

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51405304); 上海市教育委员会科研创新项目(14YZ143)。

发明了一种基于非均匀余量增强薄壁叶片工艺刚度的工艺方法。通过大量分析叶片各点的变形量,从预留粗加工余量控制叶片工艺刚度的角度出发,有效控制薄壁叶片加工的变形,从而减小加工误差,解决了薄壁叶片数控铣削精加工过程中因为零件刚度不足而引起的变形问题。山东大学的宋戈博士^[4]对钛合金薄壁零件的让刀变形进行了预测研究,提出并定义了薄壁零件铣削过程中刀具及工件接触副的概念,概念中包括了根据刀具-工件的接触线方程、接触区域切削中心角范围及切削层厚度建模等关键技术,该概念的提出有助于建立薄壁零件铣削层厚度的精确模型。李昊^[5]和贾立伟^[6]利用软件对航空发动机叶片在加工过程中的变形情况进行了有限元模拟,并在程序中进行了变形量补偿,实现发动机叶片加工误差的离线补偿。南京航空航天大学的车现发^[7]利用有限元分析软件 ABAQUS 模拟三维铣削过程,总结了切削参数对切削力的影响。乐成明等^[8]提出了一种铝合金薄壁零件冷热加工方案。董久虎等^[9]基于镜像对称补偿方法提出了一种重构叶片模型补偿加工,通过模拟加工验证重构的叶片模型加工误差为原叶片的 1/8。王增强等^[10]也对复杂薄壁零件数控加工变形误差控制补偿技术进行了研究。Habibi 等^[11]运用力学模型对零件的几何误差和刀具在切削过程中的变形量进行预测,运用三次补偿方法对刀具/几何误差进行代码修正。秦国华等^[12]提出了一种优先选择夹紧力大小、作用点及作用顺序的方法,并用有限元法分析了作用点和作用顺序对工件加工变形的影响。钱丽丽等^[13-14]对钛合金联动环进行了研究,将内孔铣削变形预测、切断加工变形预测、刀具变形预测和残余应力场分析等功能集成到有限元仿真平台上,实现了典型钛合金薄壁联动环的快速仿真分析。目前叶轮专业制造厂商主要通过刀具选型、夹具选用等方式提高叶轮制造过程中的系统刚性^[15],但通过利用整体叶轮制造过程中自身的变刚性来优化现场工艺提高其制造精度的研究还很缺乏。

本文通过对超薄叶片结构施加力载荷对变形规律进行分析,提出在叶片高度方向及横截面方向上非均匀余量的预留设计,提高超薄叶片弱刚性结构的抗弯强度,优化工艺参数,有效减小叶片的铣削振动,提高整体叶轮的制造精度。选用生产实际中的某型航空环控系统内置复杂曲面超薄叶片整体叶轮零件进行试验验证,

较好地还原其设计理念,满足技术文件的要求。

1 叶片变形有限元分析

1.1 材料本构方程

整体叶轮零件在五轴联动制造过程中,叶片的弱刚性结构易发生较大变形,在对整体叶轮零件进行模拟时,零件的本构模型会对其产生重大影响。本文使用 Johnson-Cook 本构方程^[16]进行分析,其方程如下:

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C\ln\dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中, $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变速率; $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0}$, $\dot{\epsilon}_0 = 0.001s^{-1}$ 为参考塑性应变速率, $\dot{\epsilon}^p$ 为有效塑性应变速率; T^* 为无量纲温度, $T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$; σ 为流动应力; A 为屈服应力; B 为应变硬化系数; n 为应变硬化指数; C 是应变率相关系数; m 为温度相关系数。本文叶轮基体材料为 6061 航空铝,其材料部分性能参数如表 1 所示^[17]。

1.2 叶片变形有限元模拟

定义一个高 × 宽为 60mm × 45mm 的薄板进行近似的静力学变形趋势分析,板的顶端厚度为 0.8mm,根部厚度 1.8mm。将其命名为 YP_1,材料定义为与基体材料相同的 Aluminum_6061。以薄壁板模型 YP_1 的结构特点为基础,另定义一个薄壁板件 YP_2,其材料及尺寸大小均与 YP_1 相当。将薄壁板模型 YP_2 高度的 20% 和 50% 处定义为分界线。其中 0~20% 线处双侧加厚 0mm, 20%~50% 内双侧加厚 0.2mm, 50% 以下双侧加厚 0.5mm。采用 NX NASTRAN 在图 1 所示 A 处施加力载荷,分别对 YP_1 和 YP_2 进行集中力载荷作用下变形的仿真分析。

NX 进入高级仿真模块,输入 6061 铝合金材料的各项参数进行材料指派,在图 1 所示处施加固定约束,并输入合适的参数对叶片进行 3D 四面体网格划分,在 A 点处施加值为 5N 且方向向下的集中力载荷,得到 YP_1 和 YP_2 两种不同结构下有限元分析的应力和位移图,如图 2 所示。将集中力载荷的数值由 5N 逐次提升至 35N,得到如表 2 所示的叶片最大位移及最大应力。

2 叶片变形分析

通过以上对比分析能够看出,超薄叶片的两类结构

表1 6061航空铝合金材料部分性能参数

时效	A	B	C	n	密度 / (g · cm ⁻³)	泊松比	拉伸强度 /MPa	屈服强度 /MPa
自然时效	69.52	106.99	0.0906	0.373	2.7	0.33	310	276
人工时效	205.78	130.59	0.015	0.357				

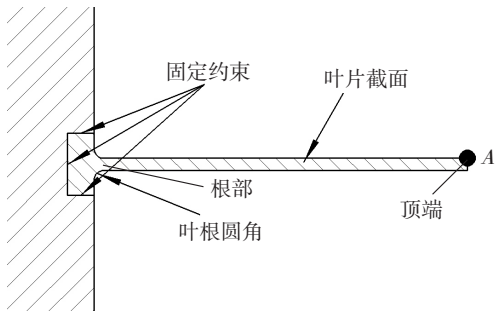


图1 薄壁件在A点处施加载荷
Fig.1 Loading on point A of thin-walled workpiece

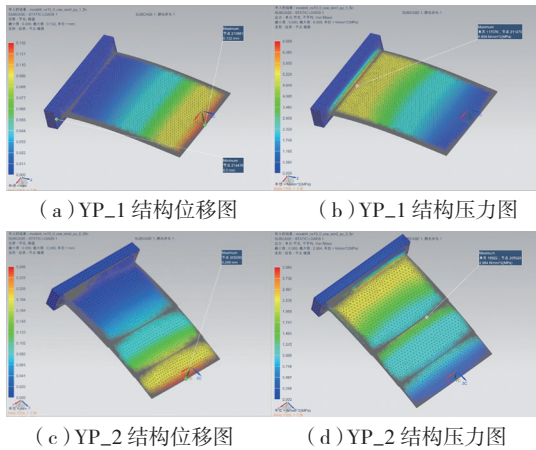


图2 两种不同结构有限元分析的应力和位移图
Fig.2 Diagram of the stress and displacement of two different structures

表2 两种不同结构最大位移及最大应力结果

集中力 载荷 F/N	YP_1		YP_2	
	位移 /mm	应力 / ($N \cdot mm^{-2}$)	位移 /mm	应力 / ($N \cdot mm^{-2}$)
5	0.132	6.959	0.0351	2.984
10	0.263	13.92	0.0703	5.968
15	0.394	20.72	0.1054	8.953
20	0.526	27.63	0.1410	11.937
25	0.657	34.54	0.1760	14.920
30	0.789	41.45	0.2110	17.905
35	0.920	48.36	0.2460	20.890

在受到相同大小集中力载荷的作用的情况之下,在叶片高度方向上分为3级且在叶片横截面方向上逐级加厚的薄壁结构板,其最大位移量比YP_1结构薄壁件减小约73.4%,最大应力减小约57.1%。由此可见,薄壁件逐级非均匀加厚的特殊结构能够起到非常明显的抗弯作用。

传统的整体叶轮五轴联动编程制造,依靠市面上现行的CAX软件进行叶轮零件的刀具轨迹规划时,对叶轮叶片或流道的粗/精加工余量都为均匀预留,但在进

行整体叶轮超薄叶片的制造时,由于其叶片厚度较薄且较高,叶片的高度与最厚处的平均厚度之比较大,在切削力、夹持力、切削热及金属纤维断裂的综合影响之下,均匀余量工艺容易引起较大的变形和叶片切削振动,导致叶片在加工时尺寸超差甚至报废。

3 非均匀余量铣削工艺设计

3.1 一种非均匀余量铣削工艺设计

轴流式整体叶轮轮毂与叶根以恒圆角或变圆角进行过渡,叶冠一端悬空,从结构上类似于悬臂板结构^[2]。由以上分析可知,通过对薄壁叶片进行横截面加厚,另外将薄壁叶片在高度上进行层划分,每层进行非均匀余量预留,改变传统整体叶轮叶片的五坐标加工工艺,可有效减小叶片在制造过程中的铣削振动及叶片变形。余量预留如图3所示。

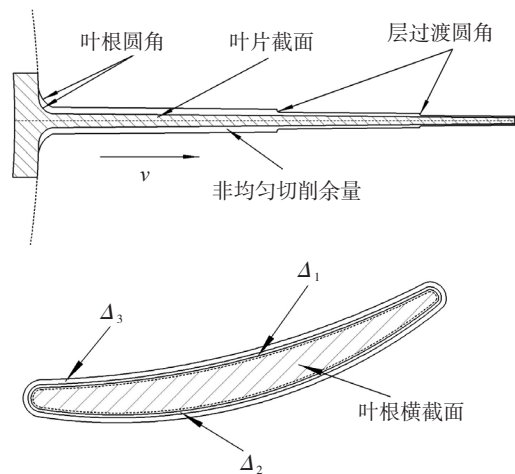


图3 非均匀余量预留方案
Fig.3 Scheme of non-uniform stock

设叶片曲面的参数方程表示为 $S(u, v)$, 叶片的横截面线方向为 u 向, 叶片高度方向为 v 向。

(1) 对叶片进行 v 方向分层。设叶片高度为 H 。将叶片由叶冠向叶根分为等长的10段, 设 C_x 为叶片第 x 层所占叶片总高度的百分比, L_x 为分段后叶片第 x 层的长度。第1层为叶冠朝向叶根的前两段, 即 $L_1=C_1H=20\%H$, 依此类推, 第2层占叶片中的3段, 即 $L_2=C_2H=30\%H$, 则 $L_3=50\%H$ 。

(2) 对叶片进行 u 方向的余量设置。设 Δ_x 为叶片在第 x 层其在横截面 u 方向上加厚的值, 则:

$$\begin{cases} \Delta_x = \frac{C_x \varepsilon}{H} + \Delta_{x-1} \\ \varepsilon = \frac{H}{\bar{\delta}} \\ x = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε 为叶片高度与叶冠和叶根最厚处平均厚度的比值; $\bar{\delta}$ 为叶冠与叶根最厚处的平均厚度; H 是叶片的总

表3 刀具配置及整体叶轮加工工艺参数表

刀具类型	加工内容	主轴转速 / (mm·min ⁻¹)	首刀进给量 / (mm·min ⁻¹)	切削进给量 / (mm·min ⁻¹)	切削深度 /mm
φ6 锥度 8° 球头铣刀	流道粗加工	16000	1000	4500	2.5
φ3 锥度 6° 球头铣刀	叶片精加工	20000	1000	6500	0.3
φ3 锥度 6° 球头铣刀	流道精加工	20000	1000	6500	0.2

高度; Δ₀=0。

当叶片的预留余量(即叶片 u 方向的加厚值)为 Δ_x ≤ 0.4mm 时,走刀次数设置为 1 次即可;当 Δ_x > 0.4mm 时,根据不同的刀具,走刀次数可作适当增加,以保证超薄叶片的表面质量达到技术文件要求。

3.2 基于NX的非均匀余量刀具轨迹规划

使用 NX_CAM 模块中的 mill_multi_blade 进行非均匀余量的五坐标刀具轨迹规划。选用刚性较好的硬质合金无涂层锥度球头立铣刀,采用大切深大进给量进行余量去除,指定合理的“Specify hub”、“Shroud”、“Blade”、“Blade blend”和“Splitters”等部件后调整合适的“Radial extension”、“Tool axis”、“Cutting parameters”、“Non cutting moves”等相关参数,分 3 层进行轴流式整体叶轮流道的粗加工并分别预留不同的加工余量。精加工刀具轨迹规划时为满足技术文件中叶片曲面精加工的特殊技术要求,“Max angle change”、“Cut max step”、“Intol/ Outtol tolerance”等参数可选择小一些,提高“Path smoothing”和“Axis smoothing”的数值设置,合理设置“Tilt clearance angle”、“Leading to trailing edge”等控制刀轴摆角的参数。在叶片曲面精加工程序编制中,为提高叶轮零件叶片曲面的铣削加工精度,保证加工质量,可以靠切削步数来控制。

4 实例验证

本文基于生产实际所加工的某型航空环控系统复杂曲面整体叶轮零件,其直径约 φ239.8mm,叶片高度 45.3mm,叶片最厚处为 2.35mm,最薄处仅 0.22mm,叶片的高度和叶冠与叶根最厚处平均厚度之比为 24.16。使用上述工艺技术方法,采用表 3 中所示刀具配置及整体叶轮加工工艺参数,依据表 4 中优化的加工余量及走刀次数进行整体叶轮零件的加工。

基于 NX_CAM 模块进行刀具轨迹规划,叶片粗/精加工刀具轨迹规划如图 4 所示。

将所规划的刀具轨迹进行处理后,在 FIDIA HS664RT 高速五轴联动加工中心上进行切削试验,部分程序代码截图及加工过程如图 5 所示。

使用上述非均匀余量加工工艺进行实际加工,经 3D 扫描检测后使用 Geomagic 软件重建整体叶轮模型,

表4 叶轮余量预留及走刀次数方案

序号	层高度 /mm	余量 /mm	走刀次数
1	L ₁ =12	0.16	1
2	L ₂ =18	0.4	2
3	L ₃ =30	0.8	3

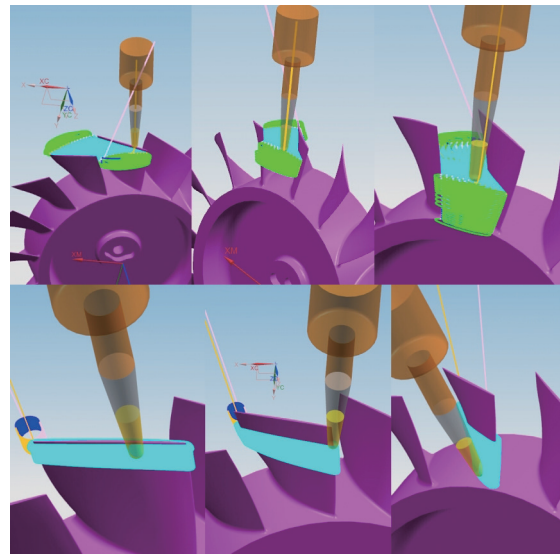


图4 叶轮叶片粗加工/精加工刀具轨迹规划图
Fig.4 Tool path planning scheme of rough machining and finishing machining of impeller blade



图5 程序代码截图及加工过程
Fig.5 Program code and machining process

将其与 NX 中用于刀具轨迹规划的模型进行重合度对比,获得面轮廓度检测数据。计算得到其最大误差比未优化前的最大误差减小 40% 以上,取得了非常明显的效果,从而证明了该整体叶轮数控加工方案的可行性。表 5 所示为叶片正反面部分采样点偏差,表 6 为工艺

表5 叶片部分检测数据

压力面点序号	压力面偏差 /mm	吸力面点序号	吸力面偏差 /mm
001	0.015	001	-0.065
002	-0.082	002	-0.111
003	0.008	003	-0.006
004	0.025	004	-0.032
005	-0.098	005	-0.086
006	-0.011	006	-0.103
007	0.010	007	-0.015
008	-0.122	008	-0.096
009	-0.034	009	-0.062
010	-0.006	010	0.022

表6 优化前后工艺最大误差及平均误差对比

名称	数值
优化前最大误差 /mm	0.268
优化前平均误差 /mm	0.0913
优化后最大误差 /mm	0.122
优化后平均误差 /mm	0.0433
最大误差优化率 /%	54.47
平均误差优化率 /%	52.57

工艺最大误差及平均误差对比。

5 结论

(1) 本文对薄壁结构叶片和分层加厚优化后的薄壁叶片分别进行了有限元分析,得到了两种结构在载荷作用下薄壁叶片的变形规律;

(2) 采用在高度上进行不均匀分层配合在叶片横截面方向上非均匀余量预留的设计对整体叶轮的五轴制造工艺进行了优化;

(3) 以实际生产中的超薄叶片整体叶轮为例,用优化后的工艺进行粗/精加工刀具轨迹规划后生成数控程序并进行实际加工。对比优化前的零件制造结果,平均误差优化率达到 52.57%,显示该工艺的优化策略能有效提高叶片的刚度,减小超薄叶片的加工误差和铣削变形,满足技术文件要求。

(4) 该工艺优化策略对类似高度与平均厚度比值较大且叶片扭转曲率较大的复杂零件的实际加工有一定的指导意义。

参考文献

[1] 赵鹏飞. 闭式叶轮数控加工关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔

滨工业大学, 2013.

ZHAO Pengfei. Research on key technologies of the CNC machining for closed impeller[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[2] 单晨伟, 赵颖, 刘维伟, 等. 一种薄壁悬臂叶片数控加工非均匀余量刚度补偿方法 [J]. 航空学报, 2013, 34(3): 686-693.

SHAN Chenwei, ZHAO Ying, LIU Weiwei, et al. A nonuniform offset surface rigidity compensation strategy in numerical controlled machining of thin-walled cantilever blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 686-693.

[3] 刘维伟, 单晨伟, 李晓燕, 等. 一种基于非均匀余量的增强薄壁叶片工艺刚度的方法: 201310021412.9[P]. 2013-01-21.

LIU Weiwei, SHAN Chenwei, LI Xiaoyan, et al. A method of technology optimization strategy to enhance the rigidity of ultrathin blade based on nonuniform machining allowance: 201310021412.9[P]. 2013-01-21

[4] 宋戈. 基于切削力精确建模的钛合金薄壁件让刀变形预测研究 [D]. 济南: 山东大学, 2012.

SONG Ge. Prediction of the deformation of the titanium alloy thin-walled parts based on the accurate modeling of cutting force[D]. Jinan: Shandong University, 2012.

[5] 李昊. 航空发动机叶片铣削过程变形控制研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.

LI Hao. Aero-engine blade deformation control of milling process[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.

[6] 贾立伟. 航空叶片数控加工变形分析与控制方法研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2014.

JIA Liwei. Aviation blade NC machining deformation analysis and control method[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014.

[7] 车现发. 高强度铝合金航空薄壁件铣削加工变形控制的工艺研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

CHE Xianfa. Research on deformation control of high strength aluminum alloy thin-walled parts [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[8] 乐成明, 宋广华, 李真楷, 等. 冷热加工技术在铝合金薄壁零件中的应用 [J]. 航空制造技术, 2004 (11): 84-86.

LE Chengming, SONG Guanghua, LI Zhenkai, et al. Application of metal cutting and hot working in aluminum alloy thin-wall components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004 (11): 84-86.

[9] 董久虎, 湛永祥, 李双跃, 等. 薄壁叶片加工变形误差补偿 [J]. 机械设计与研究, 2013, 29(4): 81-85.

DONG Jiuhu, CHEN Yongxiang, LI Shuangyue, et al. The error compensation for machining deformation of the thin blade[J]. Machine Design and Research, 2013, 29(4): 81-85.

[10] 王增强, 孟晓娟, 任军学, 等. 复杂薄壁零件数控加工变形误差控制补偿技术研究 [J]. 机床与液压, 2006 (4): 61-63.

WANG Zhengqiang, MENG Xiaoxian, REN Junxue, et al. A scheme for the compensation of deformation error in NC machining of thin-walled complex parts[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006 (4): 61-63.

[11] HABIBI M, AREZOO B, VAHEBI N M. Tool deflection and geometrical error compensation by tool path modification[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(6): 439-449.

[12] 秦国华, 吴竹溪, 张卫红. 薄壁件的装夹变形机理分析与控制技术 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(4): 211-216.

(下转第81页)