

基于磁流变液的薄壁零件铣削技术研究

张永亮, 陈向, 徐裕超, 王可意, 张帅帅

(上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对弱刚度、复杂形状的零件在切削夹紧过程中难夹持、易变形的问题, 提出了基于磁流变液(MRF)的变刚度柔性辅助支承方法, 以获得理想的加工质量。利用磁流变效应的快速、可逆及可控等特性, 通过结构设计和磁路仿真, 研制了用于薄壁曲面零件加工的磁流变自适应柔性辅助支承装置; 建立了以加工形变最小为目标函数的优化模型, 对该装置支承单元的数量和位置分布进行优化设计; 搭建了铣削试验平台, 通过对铣削信号进行测试分析, 验证布局优化和励磁电流对加工质量的影响。结果表明, 布局优化后的磁流变辅助支承装置随着电流的增加, 可以有效地提高系统刚度, 减小切削振动响应, 改善加工质量。

关键词: 磁流变效应; 磁场仿真; 布局优化; 铣削试验; 加工精度

中图分类号: TG 54

文献标志码: A

Research on the milling technology of thin-walled parts based on magnetorheological fluids

ZHANG Yongliang, CHEN Xiang, XU Yuchao, WANG Keyi, ZHANG Shuaishuai

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problems that weak stiffness and complex shape parts are difficult to grip and easy to deform during clamping, a flexible auxiliary support method with variable stiffness based on the magnetorheological fluid (MRF) was proposed to obtain ideal machining quality. Based on the controllability, reversibility and fast response of the magnetorheological effect, a magnetorheological adaptive flexible auxiliary support device for machining the thin-walled curved parts was developed through the structural design and magnetic circuit simulation. An optimization model with minimum machining deformation as the objective function was established to optimize the quantity and position distribution of the supporting units of the device. A milling experimental platform was built. Then the effects of layout optimization and excitation current on machining quality were investigated and verified by analyzing the milling signals. The results showed that the stiffness of optimized system increased effectively and the cutting vibration response reduced with the increase of current, and the machining quality was improved.

Keywords: magnetorheological effect; magnetic field simulation; layout optimization; milling test; machining accuracy

收稿日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51205255, 51805328)

第一作者: 张永亮(1973-), 女, 副教授。研究方向: 机床动力学与加工精度、机械产品公差设计与分析。

E-mail: yongliangz7377@163.com

近年来，随着中国制造业的蓬勃发展，航空、航天等高科技领域也得到了快速发展，该类产品中低刚度、形状复杂的薄壁零件由于其刚度差、形状复杂及易形变等特点，采用传统的加工方式难以达到所需要的加工精度。因此，薄壁零件加工精度已成为目前制约产品质量的瓶颈之一。

国内外学者对弱刚度零件加工方法进行了研究^[1-3]。Lee等^[4]提出了基于低熔点合金包裹的工件装夹技术，开发出了产品样机，试验研究表明，其产品定位精度有所提高。宋灿等^[5]设计了相变材料为低熔点合金的柔性夹具，完成了对不同零件的有效定位夹紧。刘璇等^[6]在电磁工作台上铺设磁流变材料作为夹具柔性材料，用于碳钢阀片淬硬后的平磨工序，使阀片成品表面的平面度大大提高。唐泳波^[7]提出了用于加工薄壁工件的模块化磁流变阻尼顶针柔性夹具。刘松等^[8]设计的磁流变柔性夹具系统可以无级调节夹紧力大小，吸纳加工过程中振动能量，减小工件受力。刘海波等^[9]研发了基于磁流变相变特点的柔性支承装置，通过可控磁场实现了对薄壁零件的固化支承，提高了薄壁零件加工质量。然而，对于大型薄壁零件，还需对多个辅助支承构建的系统进行合理布局，才能更有效地提高零件的加工精度。在布局优化方面，空客公司采用多点阵式的布局用以定位支承具有薄壁曲面特征的大型翼板进行加工^[10]。文献^[11-13]提出了装夹布局中最佳支承点的调整规则和定位支承位置的优选方法。Cai等^[14]提出了适用于航空类弱刚度薄壁件定位的“N-2-1”定位原理。但上述文献尚缺乏对磁流变辅助支承进行布局优化的研究报道。

本文首先对基于磁流变效应的柔性辅助支承装置进行了结构设计和磁路分析；进而以工件变形最小为目标函数，对磁流变辅助支承装置的布局进行优化设计；最后进行了相应的铣削试验，探讨了引入合理布局和基于磁流变辅助支承的加工系统对工件加工精度的影响。

1 磁流变辅助支承装置设计

在加工过程中，薄壁工件易受到铣削力、夹紧力以及残余应力的影响，导致该类零件的加工精度达不到要求。本文针对弱刚度零件结构特点，设计基于磁流变液(MRF)的辅助支承装置。

1.1 磁流变辅助支承装置结构设计

针对薄壁曲面零件的结构特点，设计的基于磁流变液的辅助支承装置由若干个磁流变辅助支承单元组成，各单元可根据不同加工状态和零件结构，调节各辅助支承单元空间位置分布及支承高度，为复杂形状的弱刚度工件提供自适应辅助支承。系统的整体布局如图1所示，其中，磁流变辅助支承单元装配结构如图2所示。

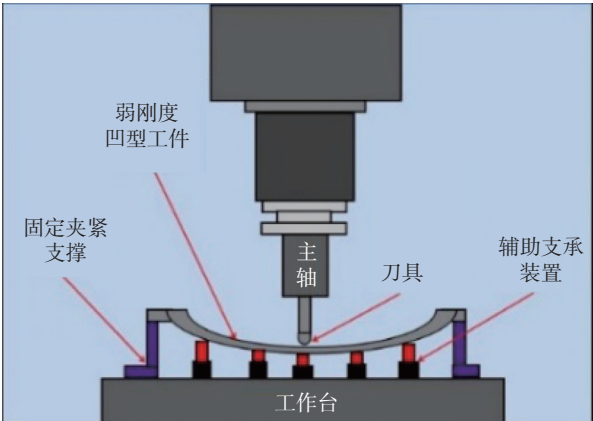
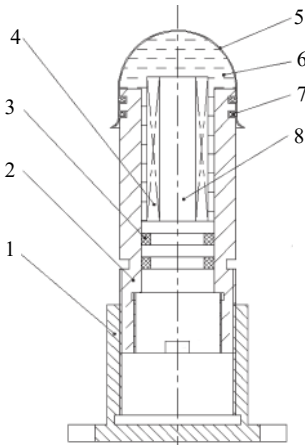


图1 磁流变辅助支承系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the magnetorheological auxiliary support system



1. 底座；2. 升降套杆；3. O型密封圈；4. 励磁线圈；5. 橡胶薄膜；6. 磁流变液；7. 密封胶带；8. 铁芯

图2 磁流变辅助支承单元装配图

Fig.2 Assembly diagram of the magnetorheological auxiliary support unit

由图2可见，铁芯、升降套杆、励磁线圈和橡胶薄膜组成支承单元的主体组件，装配后形成容纳磁流变液的封闭空间；铁芯和升降套杆下部为螺纹连接，通过该连接可以调节铁芯上端与橡胶薄膜形成的磁流变液工作间隙大小，本研究工作间隙取为1.5 mm；励磁线圈缠绕在铁芯的外圆柱面上，通过改变线圈上施加的电流大小即可改变工作间隙处磁感应强度，从而调节单元支承刚

度。整个主体组件通过升降套杆底部的外螺纹与底座连接,根据工件形状和高度对旋入的深度进行调节,达到对任意表面的自适应支承。

1.2 磁流变辅助支承装置磁场仿真

1.2.1 磁场仿真模型

通过三维软件对支承装置进行三维建模,将其导入仿真软件内进行网格划分。网格类型采用自由四面体,网格最大单元尺寸为 15.8 mm,最小单元尺寸为 1.98 mm,最大单元增长率为 1.45,曲率因子和狭窄区域分辨率为 0.6,求解自由度 17226,网格划分结果如图 3 所示。



图 3 MRF 辅助装置的网格划分模型

Fig.3 Grid model of the MRF auxiliary device

仿真时电流的加载方式设置为环形电流的方式,励磁线圈类型采用数值型,线圈电流为 2 A,匝数取 700 匝。励磁线圈材料为铜,磁导率设为 1,励磁铁芯采用电工纯铁,其磁导率以及磁流变液磁导率依据 $B-H$ (磁通密度-磁场强度) 磁化曲线,查阅手册^[15] 输入,其余部件材料为铝,磁导率设为 1。

1.2.2 磁场仿真结果

根据上述参数进行磁场仿真,绘制装置工作间隙处的三维磁感应强度分布图,如图 4 所示,结果表明,铁芯上方工作间隙处磁感应强度最大可达到 1.136 T,可满足加工所需支承刚度需求。

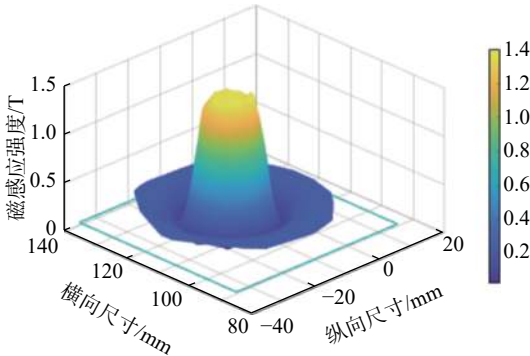


图 4 磁场三维分布图

Fig.4 3D map of the magnetic field

2 薄壁零件铣削辅助支承布局优化

2.1 目标函数

假设夹具系统由 n 个定位元件和 m 个辅助支承单元组成,将铣削力 F_z 视为集中力作用在工件上,工件自重为 G ,各支承单元对工件的支撑力为 $F_1, F_2, \dots, F_m$ 。因此,该布局的优化模型可视为在 $m+n$ 个定位夹紧元件的情况下,通过优化各个辅助支承元件的位置以减少工件的形变值。

若将 m 个辅助支承目标点的形变值记为 $a_m = [a_x^m \ a_y^m \ a_z^m]^T$, 则第 m 个目标点的形变

$$\delta_m = \sqrt{(a_x^m)^2 + (a_y^m)^2 + (a_z^m)^2} \quad (1)$$

基于设计条件,以工件加工变形最小为需求,可得磁流变辅助支承装置布局优化的目标函数为

$$\min[(\max(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_m))] \quad (2)$$

2.2 约束条件

基于静力平衡、辅助支承变形协调、夹紧力及许用应力和辅助支承距离等限制,得到如式(3)所示的约束条件。

$$\begin{cases} R_a F_a + R_f F_f + R_b F_b + M_2 = 0 \\ F_z \sigma_z + F_b \sigma_b = 0 \\ n_i^T \times F_i^n \geq 0, \quad 1 \leq i \leq n \\ F_i^n < \sigma S_i, \quad 1 \leq i \leq n \\ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq 70, \quad 1 \leq i < j \leq m \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_a, R_b, R_f 分别表示定位元件、辅助支承和切削力作用点处的位置矩阵; F_a 为工件与夹紧元件之间的接触力, F_f 为工件与夹紧元件之间的摩擦力, F_b 为磁流变辅助支承装置在接触点 b 处的支撑力; M_2 表示工件自重的力矩矩阵; 铣削力视为集中力 F_z ; σ_z 为工件在切削力影响下发生的位移矢量; σ_b 为工件在磁流变辅助支承装置影响下发生的位移矢量; n_i^T 为夹紧元件处的法向量; F_i^n 为夹紧元件处的法向力; S_i 为夹紧元件与工件的接触面积; σ 为许用应力; (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 为任意 2 个辅助支撑 B_i 和 B_j 的坐标。

2.3 优化结果

基于上述优化模型,利用 Matlab 软件编写优化程序。首先对无支承状态下工件的变形进行计算,搜索变形最大处并考虑各约束条件后选取适当位置添加辅助支承,接着针对添加辅助支承后工件的变形再次进行计算,依据约束条件重新布

置添加辅助支承, 而后循环迭代, 直至无法满足约束条件时, 比较各支承状态下工件的变形, 最终确定变形最小的辅助支承布局。经上述寻优计算后, 得到如图 5 所示的 5 个支承分布状态是满足本文目标函数和约束条件的辅助支承优化布局, 图中符号◆即为各辅助支承的位置。

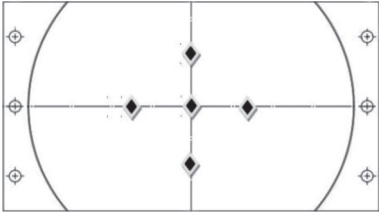


图 5 薄壁零件辅助支承布局图

Fig.5 Layout of auxiliary support for the thin-walled parts

为了验证优化结果, 对在工件中心位置放置 1 个辅助支承单元和图 5 所示优化后 5 个支承单元这 2 种情况分别进行工件的变形仿真, 结果如图 6 所示。

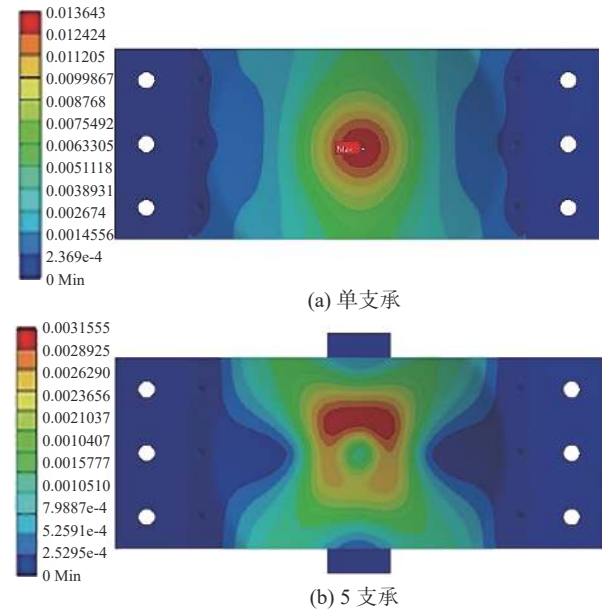


图 6 工件形变仿真云图

Fig.6 Cloud map of workpiece deformation simulation

由图 6(a)可知, 只在中心处放置 1 个辅助支承时, 工件的最大变形量为 1.36×10^{-2} mm。而图 6(b)表明, 在优化后 5 个辅助支承单元的作用下, 工件最大变形区域发生变化, 工件的最大变形量为 3.16×10^{-3} mm。与单支承相比, 变形减小了 76.76%。

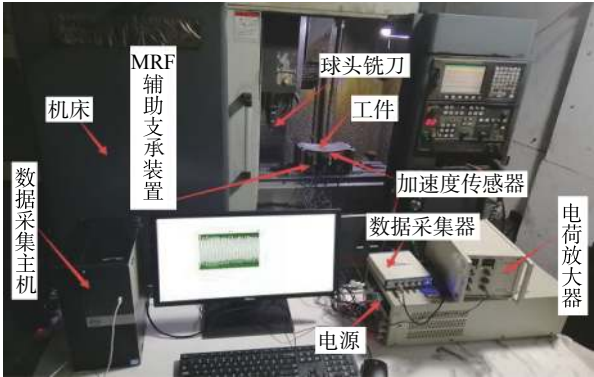
上述仿真结果表明, 使用布局优化得到的 5 个支承的工件加工系统可大幅降低工件变形, 提高加工精度。

3 基于磁流变辅助支承装置的铣削试验研究

3.1 试验方案与试验设备

搭建了利用磁流变辅助支承装置的弱刚度零件铣削加工试验平台, 在不同电流参数、辅助支承布局的条件下对弱刚度工件进行加工, 通过测试分析加工过程中的铣削信号, 研究磁流变辅助支承布局及施加电流大小对弱刚度零件加工质量的影响。

铣削试验在 VMC855 立式加工中心上进行, 励磁电流由 DH1716-4D 型直流稳压电源提供, 铣削信号采集设备为 CT1010Lx 加速度传感器、SD1434 电荷放大器和 NI 动态数据采集卡 USB-4431, 信号采集后输入至计算机内部的数据处理模块进行显示和分析。铣削试验现场照片如图 7 所示。铣削试验分为两组: 第一组的试验目的是考察不同辅助支承布局对加工精度的影响; 第二组的试验目的是考察在 5 个支承优化布局



(a) 铣削试验平台



(b) 磁流变辅助支承系统

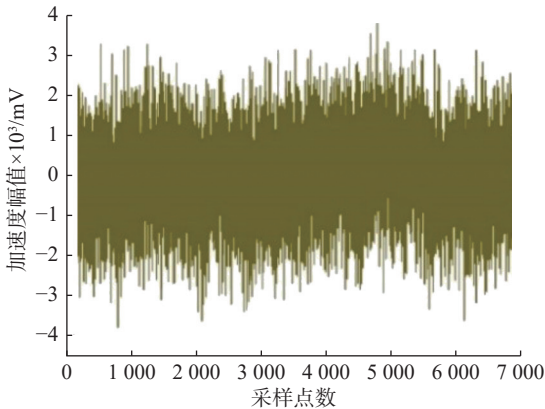
图 7 铣削试验现场照片

Fig.7 Photos of the milling test site

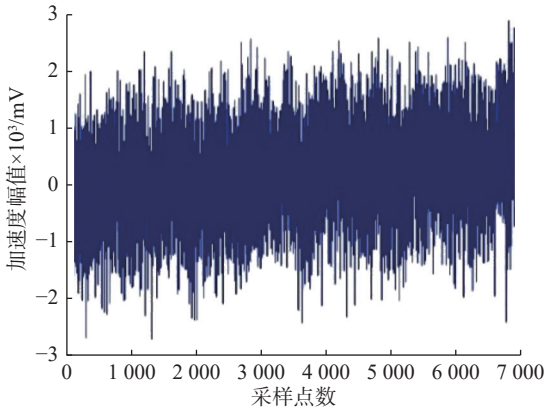
下,不同电流大小对加工精度的影响。

3.2 布局优化对加工精度的影响

对单个辅助支承和优化后 5 个支承布局条件下的铣削响应信号进行采集,时域结果如图 8 所示。



(a) 单支承布局铣削信号



(b) 5 个支承布局铣削信号

图 8 铣削时域信号图

Fig.8 Time domain signal diagram for milling

对图 8 所示结果进行分析可知,在辅助支承布局优化后,工件加速度响应信号较单支承条件下的波动范围明显降低,最大幅值由 4×10^{-3} mV 降至 2×10^{-3} mV。上述结果表明,磁流变辅助支承装置布局优化可以抑制工件的铣削振动,振幅可减小约 50%。

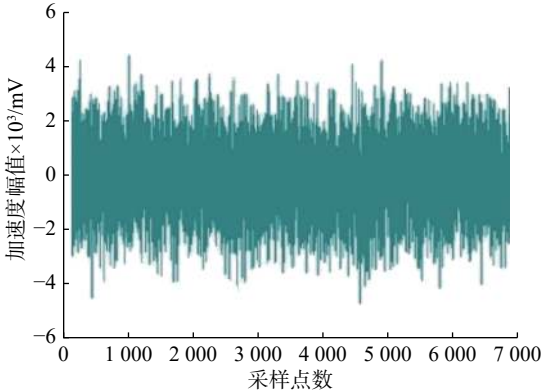
对图 8 中数据进行傅里叶变换,得到单支承和 5 个支承状态下信号的峰值频率分别为 148 Hz 和 182 Hz,系统的峰值频率在优化后明显上升,说明磁流变辅助支承系统的支承刚度得到了提高,增大了系统的加工稳定性。

3.3 磁流变辅助支承对加工精度的影响

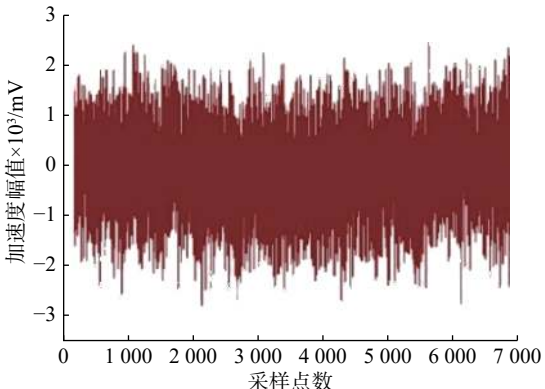
根据上述布局优化仿真与试验结果,在 5 个辅助支承布局条件下,对磁流变辅助支承单元分别施加 0, 2, 3 A 电流,采集到铣削过程中的振

动响应信号,如图 9 所示。

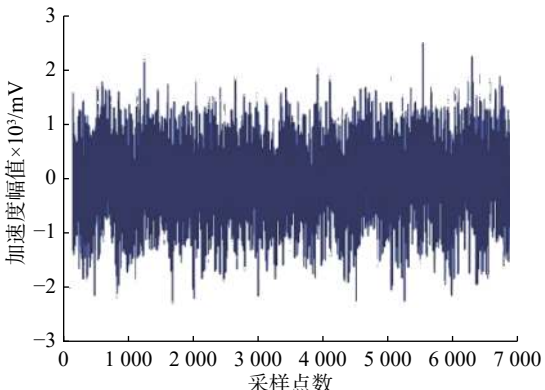
对图 9 所示结果进行分析可知,电流从 0 A 至 3 A 过程中,铣削信号的最大幅值从 4×10^{-3} mV 降至 2×10^{-3} mV,因此,磁流变辅助支承装置可以抑制工件的铣削振动,振幅减小了 50%。



(a) 0 A



(b) 2 A



(c) 3 A

图 9 不同电流下铣削时域信号

Fig.9 Time domain signals of milling under different currents

对图 9 中数据进行傅里叶变换,可得到不同电流下信号的峰值频率,如表 1 所示。由表 1 中的数据可知,系统的峰值频率随着电流的增大不断上升,说明磁流变效应增大了系统刚度,进而

表 1 不同电流下峰值频率
Tab.1 Peak frequency under different currents

电流/A	0	2	3
峰值频率/Hz	107	158	172

改善了加工稳定性。

4 结 论

- a. 基于薄壁零件特性，通过结构设计与磁路分析研制了刚度可变、支承高度可调、布局可调、结构适应性好的磁流变辅助支承装置。
- b. 建立了以工件变形最小为目标函数的磁流变辅助支承布局优化模型，通过优化计算和仿真分析确定了 5 个支承的最优布局方案。
- c. 对布局优化前后的薄壁工件进行铣削加工。结果表明，磁流变辅助支承装置布局优化后可以抑制工件的铣削振动，提高了工件表面质量。
- d. 采用优化后辅助支承布局，施加不同励磁电流进行铣削试验，结果表明，随着电流的增大，磁流变辅助支承单元可以有效地提高支承刚度，改善加工质量和加工精度。

参考文献：

[1] 陈蔚芳, 范炳炎, 谭彪, 等. 柔性夹具设计方法与技术 [J]. 航空精密制造技术, 1998(5): 43–46.

[2] 杨卫卫, 孙景锋, 刘翠娟. 浅谈机床夹具的发展趋势 [J]. 汽车实用技术, 2018(8): 107–108.

[3] 王璐璐, 姜晨, 管华双, 等. 磁性复合流体的深孔抛光工艺试验研究 [J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(2): 127–133.

[4] LEE E, SARMA S E. Reference free part encapsulation: materials, machines and methods[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2007, 26(1): 22–36.

[5] 宋灿, 吕彦明, 李强, 等. 基于相变材料的柔性夹具技术研究 [J]. 工具技术, 2014, 48(4): 37–39.

[6] 刘璇, 王小北. 基于相变材料的柔性夹具 [J]. 机械设计与制造工程, 2000, 29(5): 53–54.

[7] 唐泳波. 磁流变液研究与磁流变柔性夹具结构设计 [D]. 广州: 广东工业大学, 2011.

[8] 刘松, 周瑾, 李思磊, 等. 磁流变柔性夹具系统及夹紧方法. 中国, 201410523746.0[P]. 2015-01-28.

[9] 刘海波, 毋健雄, 罗祺, 等. 一种面向叶盘加工的磁流变支撑方法. 中国, 109940415B[P]. 2020-02-18.

[10] MILLAR A, KIHLMAN H. Reconfigurable flexible tooling for aerospace wing assembly[C]//Proceedings of Aerospace Technology Conference and Exposition. Seattle, USA, 2009.

[11] 李双跃, 刘建波. 自动装夹设计中支承位置与工件变形的几何推理方法 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003(8): 16–19.

[12] 武凯, 何宁, 廖文和, 等. 薄壁腹板加工变形规律及其变形控制方案的研究 [J]. 中国机械工程, 2004, 15(8): 670–674.

[13] 董久虎, 谌永祥, 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.

[14] CAI W, HU S J, YUAN J X. Deformable sheet metal fixturing: principles, algorithms, and simulations[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118(3): 318–324.

[15] 邱立功. 电工材料手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010: 179–181.

(编辑：黄 娟)