

DOI: 10.3901/JME.2020.17.209

# 一种减小“S”形试件理论切削误差的方法\*

陶浩浩 范晋伟 王培桐

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

**摘要:** “S”形试件用于综合检测多轴机床的加工精度,但是由于“S”形试件理论切削误差的存在,导致多轴机床的精度检测产生偏差,因此,提出了一种有效减小理论切削误差的方法。基于双三次均匀B样条曲面模型建立了“S”形试件模型,获得了扭曲角在所选择的三条测量线上的分布规律,同时分析了扭曲角对“S”形试件理论切削误差的影响。此外,通过分析传统单点偏置方法的不足,提出了一种优化的单点偏置方法。基于此方法和CAD/CAM软件生成了“S”形试件的刀具轨迹。最后,通过试验验证了该方法的可行性。试验结果表明,基于优化的单点偏置方法产生的“S”形试件平均理论切削误差比传统的单点偏置方法降低了50.1%。此外,基于优化的单点偏置方法产生的理论切削误差近似小于0.005 mm,可以忽略不计。因此,所提出的方法可以有效地避免理论切削误差对多轴机床精度检测结果的干扰。该方法的核心思想可以直接应用到其他类型的检测试件。

**关键词:** 多轴机床; “S”形试件; 理论切削误差; 扭曲角; 优化的单点偏置方法

**中图分类号:** TH161

## A Method for Reducing Theoretical Cutting Error of “S” Shaped Test Piece

TAO Haohao FAN Jinwei WANG Peitong

(College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124)

**Abstract:** The “S” shaped test piece is used to comprehensively detect the machining accuracy of multi-axis machine tools. However, the existence of theoretical cutting error of “S” shaped test piece leads to the deviation of accuracy detection for multi-axis machine tools. Therefore, an effective method to reduce the theoretical cutting error is proposed. Firstly, the uniform double cubic B-splines surface model is applied to establish the “S” shaped test piece model. Furthermore, the distribution of twist angle at the selected three section lines is obtained. Meanwhile, the influence of twist angle on theoretical cutting error of “S” shaped test pieces is analyzed. Then, the optimized single-point offset (OSPO) method is proposed based on the single-point offset (SPO) method. Moreover, the tool path of “S” shaped test piece is generated by CAD/CAM software based on the OSPO method. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by the experiment. Experiment results show that the average theoretical cutting error of “S” shaped test pieces based on the OSPO method is reduced about 50.1% than the SPO method. In addition, the vast majority of theoretical cutting errors based on the OSPO method are approximately less than 0.005 mm, which can be negligible. It is therefore reasonable to conclude that the proposed method here can avoid the influence of theoretical cutting error on the accuracy detection of multi-axis machine tools efficiently. And its basic idea can be applied to other type of test pieces.

**Keywords:** multi-axis machine tools; “S” shaped test piece; theoretical cutting error; twist angle; optimized single-point offset method

## 0 前言

多轴机床具有材料去除率高、安装步骤少、加

工效率高等优点,广泛应用于加工各种复杂曲面零部件<sup>[1-2]</sup>。机床的加工精度直接决定了被加工工件的精度和质量,目前对于多轴机床的验收和精度检测,国内外学者进行了广泛且深入的研究。机床的精度检测方法大体分为两类:①利用精密仪器直接对机床精度进行检测,如激光干涉仪、球杆仪、R-Test以及水平仪等仪器,但是这种检测方法仅在机床静

\* 国家自然科学基金(51775010, 51705011)和国家科技重大专项(2019ZX04006001)资助项目。20191102 收到初稿,20200319 收到修改稿

止状态或低速无载荷下进行,无法真实反映机床实际加工工况,具有一定的局限性;②利用待测机床加工具有特定几何特性的标准检测试件,通过测量检测试件的轮廓误差从而间接反映机床的加工精度。这种检测方法可以真实有效地评估机床在实际切削工况下的加工性能,更好地检验机床的精度。学者们先后发明了多种检测试件,如 NAS979 检测试件<sup>[3]</sup>、德国 NCG2005 试件<sup>[4]</sup>、四角锥台试件<sup>[5]</sup>。由于复杂曲面具有开闭角转换、变曲率、扭曲角、薄壁等特征与上述检测试件的特征不同,所以,尽管多轴机床通过了上述试件的检测验收,但在实际加工复杂零部件时仍会出现加工精度差、轮廓不光滑等问题,因此上述试件不能精确、有效地评估多轴数控机床的加工性能。

为了解决上述问题,中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司发明了“S”形试件。该试件集扭转角、开闭角转换加工区、变曲率等复杂曲面的各种特征于一体,可以很好地表征飞机薄壁结构件的主要特征<sup>[6]</sup>。相比以往的机床检验试件,“S”形试件更加适用于多轴数控机床的加工精度检验与验收,能够较为全面地反映数控机床多轴联动加工中的综合加工精度,着重考核机床曲面加工性能<sup>[7]</sup>。但由于扭曲角的存在导致直纹面上沿母线方向法矢不断变化,机床加工过程中,只能保证刀具曲面在某一点处与 S 形曲面有相同的法矢,因此刀位计算时会产生理论切削误差。此外,非可展直纹面是直线扫掠形成的曲面,不能用半径大于零的圆柱滚动包络形成,因此非可展直纹面的侧铣加工必然存在理论切削误差。机床制造商使用“S”形试件评估多轴机床的加工性能时,由于理论切削误差的存在,无法对多轴机床的加工性能进行全面、准确地评估。因此,如何精确有效地减小“S”形试件理论切削误差是一个非常具有理论意义和实用价值的研究课题。

在以往的研究中,很多学者提出了各种不同的方法用于减小“S”形试件理论切削误差。MARCINIAKD 等<sup>[8]</sup>提出了单点偏置算法,该方法可以有效地减小可展直纹面侧铣加工时产生的理论切削误差。随后,对比单点偏置算法,REDONNET 等<sup>[9-10]</sup>提出了三点切线法,并利用 CAD/CAM 软件获得刀具轨迹。但是,理论加工误差并没有得到显著降低。BEDI 等<sup>[11]</sup>提出了双点切线法,利用圆柱刀具进行曲面的侧铣加工。PECHARD 等<sup>[12]</sup>开发了数控加工路径生成算法用于减少设计表面和实际加工表面之间的几何偏差。GUAN 等<sup>[13]</sup>采用单点偏置算法计算“S”形试件的理论切削误差,并提出了预补偿和后补偿方法,以

减少理论切削误差对多轴机床加工性能验收的影响。GUAN 等<sup>[14]</sup>提出了新的三点切线算法用于减小“S”形试件侧铣加工时产生的理论切削误差,通过试验验证了该方法对不同的表面具有广泛的适应性。虽然上述方法在减小理论切削误差方面取得了一些积极的效果,但理论切削误差仍然不可避免地影响多轴数控机床的精度检测,并且上述方法计算复杂,无法有效地应用到生产实践中。因此,提出一种可行、有效地减小理论切削误差的方法具有非常重要的实际应用意义。

针对上述局限性,本文提出了一种优化的单点偏置算法。首先采用均匀双三次 B 样条曲面表征“S”形试件曲面,在此基础上建立了“S”形试件的三维模型。然后,计算了“S”形试件扭曲角和理论切削误差,得到了扭转角对理论切削误差的影响规律。最后,基于传统单点偏置算法,提出了一种优化刀具路径偏置算法,即优化的单点偏置算法。基于此算法,利用 CAD/CAM 软件生成优化后的刀具轨迹。该方法可以显著地减小“S”形试件的理论切削误差,进而使多轴机床的加工性能可得到全面、准确地评估。

## 1 “S”形试件建模和扭曲角分析

由于篇幅有限,“S”形试件具体建模过程参考文献[15],本文只显示建模结果,如图 1 所示。“S”形试件的尺寸参数如表 1 所示。

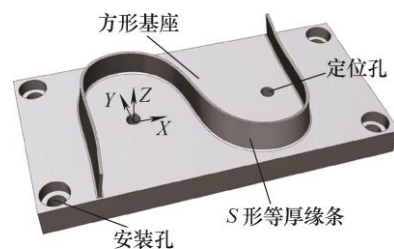


图 1 “S”形试件

表 1 “S”形试件的尺寸参数

参数类型	参数值
整体外部尺寸	
长 × 宽 mm × mm	400×200
S 形试件外形尺寸	
长 × 宽 mm × mm	250×180
方形基座高/mm	30
S 形缘条高/mm	40

由于扭曲角的存在导致直纹面上沿母线方向法矢不断变化,机床加工过程中,只能保证刀具曲面

在某一点处与“S”形曲面有相同的法矢, 因此非可展直纹面的侧铣加工必然存在理论加工误差。直纹面的扭曲角是直纹面两条准线的单位法矢在母线法平面上的投影夹角。设“S”形直纹面上、下准线分别为  $Q_1(u) = (x_1(u), y_1(u))$ 、 $Q_2(u) = (x_2(u), y_2(u))$ , 其单位外法矢分别为

$$n_1 = \left( \frac{y_1'(u)}{\sqrt{(x_1'(u))^2 + (y_1'(u))^2}}, -\frac{x_1'(u)}{\sqrt{(x_1'(u))^2 + (y_1'(u))^2}} \right) \quad (1)$$

$$n_2 = \left( \frac{y_2'(u)}{\sqrt{(x_2'(u))^2 + (y_2'(u))^2}}, -\frac{x_2'(u)}{\sqrt{(x_2'(u))^2 + (y_2'(u))^2}} \right) \quad (2)$$

由式(1)和(2)可求出直纹面上各点相对于计算基准点的扭曲角

$$\varphi = \arccos \left( \frac{x_1'(u)x_2'(u) + y_1'(u)y_2'(u)}{\sqrt{(x_1'(u))^2 + (y_1'(u))^2} + \sqrt{(x_2'(u))^2 + (y_2'(u))^2}} \right) \quad (3)$$

基于等式(3)计算了不同高度准线与底部准线形成的扭曲角, 如图 2 所示。该直纹面的最大扭曲角出现在  $z=35 \text{ mm}$  准线上, 最大扭曲角约为  $6.65^\circ$ 。扭曲角描述了直纹面的扭曲程度, 扭曲角越大说明曲面扭曲越严重, 最大的扭曲角可作为该直纹面的扭曲度<sup>[16]</sup>。图 3 标注了“S”形曲面上扭曲角较大的部位。

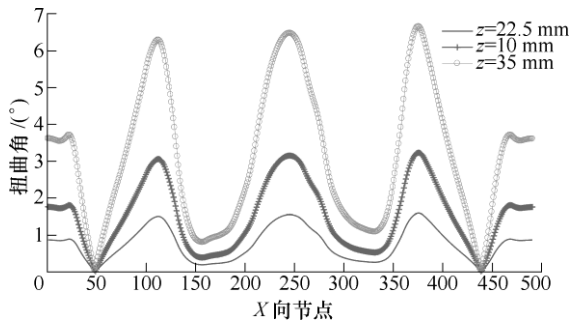


图 2 “S”形直纹面扭曲角

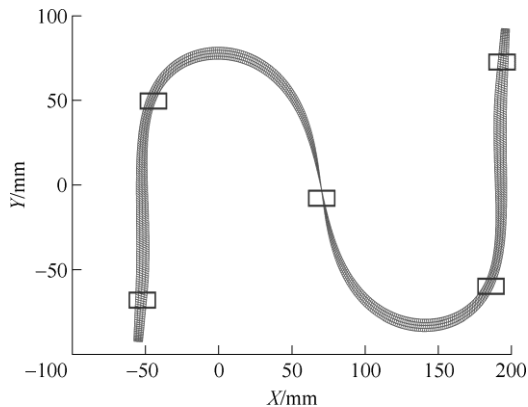


图 3 “S”形直纹面上扭曲角较大部位

## 2 传统的单点偏置算法

图 4 为沿刀具轴线方向投影的理论切削误差图,  $c_1$  为计算刀位时刀具偏置点所在准线,  $c_2$  为“S”形曲面的另一条准线,  $n_1$ 、 $n_2$  分别为两条准线单位外法矢, 在刀具偏置点  $O_f$  处, 准线  $c_2$  与  $c_1$  形成的扭曲角为  $\varphi$ , 图 4 中阴影部分即为理论切削误差。

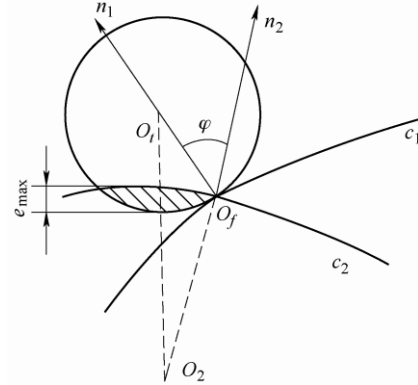


图 4 沿刀具轴投影的理论切削误差

因此在刀具偏置点  $i$  处的理论加工误差表示为

$$e_i = r_t + r_{si} - \sqrt{r_{si}^2 + r_t^2 + 2r_{si}r_t \cos \varphi_i} \quad (4)$$

式中,  $r_t$  为刀具半径;  $r_{si}$  为过刀具偏置点  $i$  处曲面的曲率半径;  $\varphi_i$  为刀具偏置点  $i$  处的扭曲角。

当刀具半径为  $10 \text{ mm}$  时, 以底部准线为基准, 采用单点偏置法获得刀具路线, 根据式(4)计算试件不同高度处的理论切削误差, 如图 5 所示, 在曲面顶部的理论切削误差最大, 最大值约为  $0.075 \text{ mm}$ , 超出了机床的精度要求  $0.05 \text{ mm}$ , 所以不合理的刀具偏置方法会导致试件加工超差, 进而导致多轴机床加工性能的评估不准确。因此, 提出一种有效地减小理论切削误差的新方法具有重要意义。

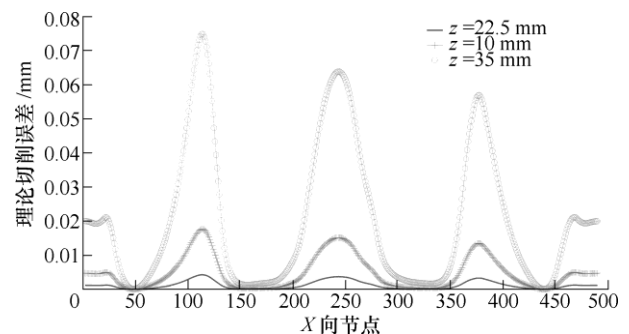


图 5 扭曲角导致的理论切削误差

## 3 优化的单点偏置算法

由前文所述, 当刀具半径一定时, 理论切削误

差由切削点与刀具偏置点间的扭曲角决定,扭曲角越大,理论切削误差越大。本文所提出的优化的单点偏置算法的核心思想是将切削点在母线中部某一点处偏置,使得母线两端点处与偏置点处形成的扭曲角相等,如图6所示,其中 $c_0$ 为刀具偏置点处的准线; $c_1$ 为下准线; $c_2$ 为上准线。

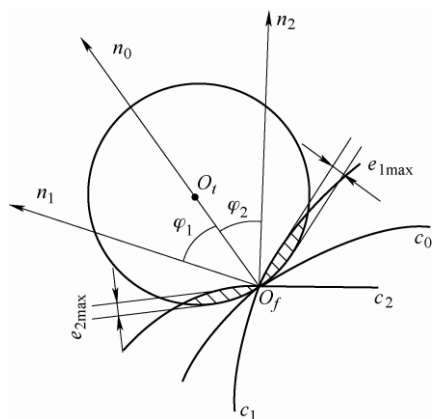


图6 优化的单点偏置法

因此在刀具偏置点 $i$ 处的理论加工误差表示为

$$e_{1i} = r_t + r_{s1i} - \sqrt{r_{s1i}^2 + r_t^2 + 2r_{s1i}r_t \cos \varphi_{1i}} \quad (5)$$

$$e_{2i} = r_t + r_{s2i} - \sqrt{r_{s2i}^2 + r_t^2 + 2r_{s2i}r_t \cos \varphi_{2i}} \quad (6)$$

$$e_i = \max(e_{1i}, e_{2i}) \quad (7)$$

式中,  $e_{1i}$ 、 $e_{2i}$  分别表示扭曲角 $\varphi_{1i}$ 、 $\varphi_{2i}$ 对应的理论切削误差。

基于优化的单点偏置算法,可求得扭曲角和理论切削误差,如图7所示。根据文献[13]可知,如果理论切削误差近似小于0.005 mm则可以忽略不计。从图7b中可以看出基于优化的单点偏置算法获得的理论切削误差绝大多数小于0.005 mm。通过对比图7b和图5并结合表2可知基于优化的单点偏置算法获得的理论切削误差远小于基于传统的单点偏置算法获得的理论切削误差,表明了优化的单点偏置算法可以精确、有效地减小扭曲角和理论切削误差。

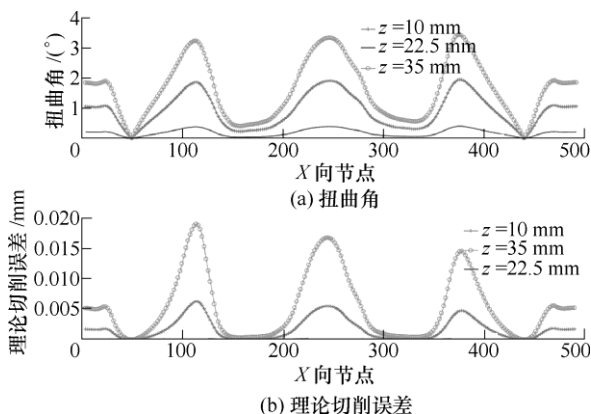


图7 基于优化的单点偏置法获得的扭曲角和理论切削误差

表2 对比基于两种方法获得的扭曲角和理论切削误差

	扭曲角/(°)		理论切削误差/mm	
	传统的单点偏置算法	优化的单点偏置算法	传统的单点偏置算法	优化的单点偏置算法
L1	1.591 2	0.413 3	0.004 3	0.000 28
L2	3.230 5	1.952 0	0.017 5	0.006 34
L3	6.650 9	3.432 2	0.074 8	0.019 1

## 4 试验验证

为了验证所提出的优化的单点偏置算法的准确性、可行性和有效性,以龙门式五轴铣床(型号XKAS2525)为研究对象,以“S”形试件为检测加工对象(如图1所示),利用三坐标测量机检测“S”形试件的轮廓误差。试验验证的流程图如图8所示。

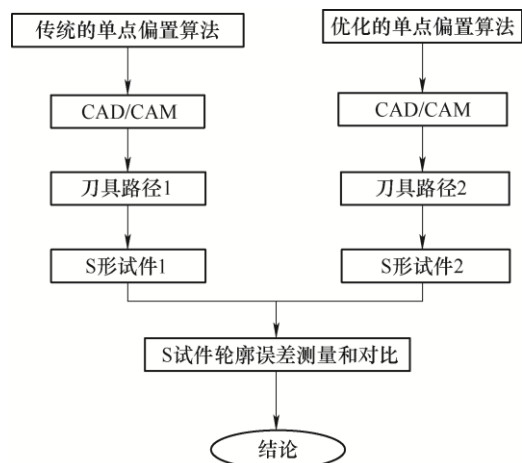


图8 试验验证流程图

“S”形试件的材料类型为2A12高强铝合金,尺寸参数如表1所示,铣削加工采用 $\phi 20$ 棒铣刀。在实际加工过程中,首先基于优化的单点偏置算法并结合CAD/CAM软件进行刀具轨迹规划,随后,采用Pro/E软件的后处理模块生成刀具位置文件。最后,采用文献[17]中迭代补偿方法获取补偿后的数控加工代码,通过后置处理程序将数控加工代码传入机床中进行加工。加工现场如图9所示。

“S”形试件轮廓误差检测试验主要在德国蔡斯公司生产的PRISMO 125751三坐标测量机上开展,分别对基于优化的单点偏置算法和传统的单点偏置算法获得的“S”形试件的轮廓误差进行检测,如图10所示,总共测量三个高度的轮廓误差,分别为 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ (即表2和图7所示的三条准线 $L_1$ :  $Z=10$  mm,  $L_2$ :  $Z=22.5$  mm,  $L_3$ :  $Z=35$  mm),每个高度等距选择30个测量点。如图11所示为测量现场。此外为了提高测量结果的稳定性,先后进行五次测量,最终的误差值取五次测量结果的平均值。





图 9 现场加工图

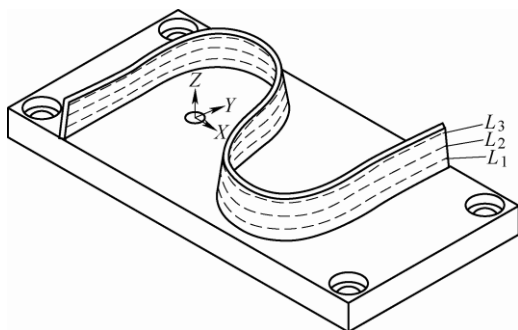


图 10 误差检测点位置



图 11 测量现场图

测量结果如图 12 所示, 负值表示过切误差, 正值表示欠切误差。在三个不同测量高度  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  处的最大轮廓误差值分别从 0.264 mm 减小到 0.135 mm, 从 0.322 mm 减小到 0.138 mm, 从 0.171 mm 减小到 0.086 mm。残余误差是通过利用传统的单点偏置算法和优化的单点偏置算法获得

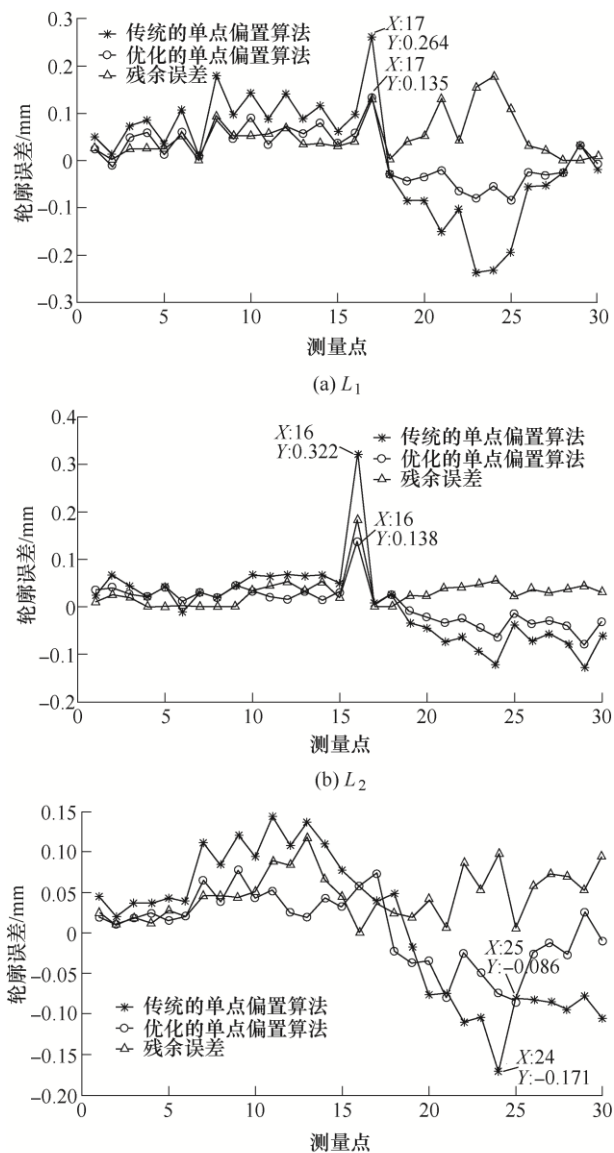


图 12 基于两种算法获得的“S”形试件轮廓误差

的“S”形试件的轮廓误差相减得到。残余误差越大说明优化的单点偏置算法对减小“S”形试件的理论切削误差的效果越显著。在三个不同测量高度  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  处的平均残余误差值分别为 0.05 mm, 0.03 mm, 0.047 mm。此外, 为了更直观地反映优化的单点偏置算法的优越性, 对比了基于两种方法获得的“S”形试件平均轮廓误差, 如表 3 所示。由表 3 可以看出在  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  处的平均轮廓误差分别从 0.098 mm 减小到 0.048 mm, 从 0.063 mm 减小到 0.032 mm, 从 0.081 mm 减小到 0.038 mm, 即基于优化的单点偏置算法获得的“S”形试件的轮廓误差在  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  处分别降低了 51.1%、46.04% 和 53.1%, 平均降低率约为 50.1%。因此, 本文提出的优化的单点偏置算法可以有效地减小“S”形试件的理论切削误差, 使得多轴数控机床的综合加工性能得到精确地评估。

表 3 “S”形试件平均轮廓误差对比

	平均轮廓误差/mm		降低率(%)
	传统的单点偏置算法	优化的单点偏置算法	
$L_1$	0.098	0.048	51.10
$L_2$	0.063	0.034	46.04
$L_3$	0.081	0.038	53.10

## 5 结论

(1) 采用均匀双三次 B 样条曲面模型表征“S”形试件曲面,在此基础上建立了“S”形试件的三维模型。计算了“S”形试件在所选择的三条测量线上的扭曲角和理论切削误差,同时分析了扭曲角对理论切削误差的影响规律。

(2) 根据传统单点偏置算法,提出了一种优化的单点偏置算法,基于此算法,利用 CAD/CAM 软件生成优化后的刀具轨迹。

(3) 对“S”形试件进行加工和检测试验,通过对比基于两种算法产生的“S”形试件平均理论切削误差,发现基于优化的单点偏置算法产生的平均理论切削误差降低了 50.1%,并且该算法产生的理论切削误差小于 0.005 mm,可以忽略不计,所以,避免了理论切削误差对多轴数控机床加工精度检测结果的干扰,因此通过加工“S”形试件可以全面、准确地检测多轴机床的加工性能。

## 参 考 文 献

- [1] WU C J, FAN J W, WANG Q H, et al. Prediction and compensation of geometric error for translational axes in multi-axis machine tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95: 3413-3435.
- [2] PEZESHKI M, AREZOO B. Kinematic errors identification of three-axis machine tools based on machined work pieces[J]. Precis. Eng., 2016, 43: 493-504.
- [3] NAS 979: Uniform cutting test, NAS series, metal cutting equipment specifications[S]. Washington: 1969: 34-37.
- [4] LAMIKIZ A, LOPEZ L, CELAYA A. Machine tools for high performance machining[M]. London: Springer London Ltd., 2019.
- [5] TSUTSUMI M, YUMIZA D, UTSUMI K. Evaluation of synchronous motion in five-axis machining centers with a tilting rotary table [J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2007, 1(1): 24-35.
- [6] SONG Z Y, CUI Y. WS-shape detection test piece and a detection method for detection the precision of the numerical control milling machine. United States, Invention Patent, US8061052B2[P]. 2011-11-22.
- [7] 王伟, 陶文坚, 李晴朝. 五轴数控机床动态精度检验试件特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 53(1): 101-109.
- [8] WANG Wei, TAO Wenjian, LI Qingchao. Research on characteristic of test specimen for five-axis CNC machine tools [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 53(1): 101-109.
- [9] MARCINIAK K. Geometric modelling for numerically controlled machining[M]. New York: Oxford University Press, 1991.
- [10] REDONNET J M, RUBIO W, DESSEIN G. Side milling of ruled surfaces: Optimum positioning of the milling cutter and calculation of interference[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, 14(7): 459-465.
- [11] MONIES F, FELICES J N, RUBIO W, et al. Five-axis NC milling of ruled surfaces: Optimal geometry of a conical tool[J]. Int. J. Prod. Res., 2002, 40(12): 2901-2922.
- [12] BEDI S, MANN S, MENZEL C. Flank milling with flat end milling cutters[J]. Computer Aided Design, 2003, 35(3): 293-300.
- [13] PECHARD P Y, TOURNIER C, LARTIGUE C, et al. Geometrical deviations versus smoothness in 5-axis high-speed flank milling[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf., 2009, 49: 454-461.
- [14] GUAN L, JIAO MO J, FU M, et al. Theoretical error compensation when measuring an S-shaped test piece[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93: 2975-2984.
- [15] GUAN LW, MO J, FU M, et al. An improved positioning method for flank milling of s-shaped test piece[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(1-4): 1349-1364.
- [16] WANG W, JIANG Z, LI Q, et al. A new test part to identify performance of five-axis machine tool-part I: Geometrical and kinematic characteristics of S part[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5): 729-738.
- [17] 杜丽, 张信, 王伟, 等. “S”形试件的五轴数控机床综合动态精度检测特性研究[J]. 电子科技大学学报,

2014, 4(43): 629-635.

DU Li, ZHANG Xin, WANG Wei, et al. Research on properties of “S” shaped test piece on synthesis dynamic accuracy detection of five-axis CNC machine tools[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 4(43): 629-635.

- [17] WU C, FAN J, WANG Q, et al. Machining accuracy improvement of non-orthogonal five-axis machine tools

by a new iterative compensation methodology based on the relative motion constraint equation[J]. Int. J. Mach. Tools. Manuf., 2018, 124(1): 80-98.

---

作者简介: 范晋伟, 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密加工与自动化装备及测试技术。

E-mail: jwfan@bjut.edu.cn

陶浩浩(通信作者), 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为精密加工与自动化装备及测试技术。

E-mail: Taohao\_hao@163.com