

· 电子机械工程 ·

# “S”形试件的五轴数控机床综合动态精度检测特性研究

杜丽<sup>1</sup>, 张信<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 付振华<sup>1</sup>, 石荣波<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学机械电子工程学院 成都 611731; 2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂 成都 610092)

**【摘要】**以ISO国际标准试件、NAS979系列试件、NCG试件等为例,比较了目前国内外常用机床精度检测试件的检测性能与特点,计算了“S”形检测试件的开闭角、扭曲角、曲线曲率以及曲面法曲率等特征,研究了“S”形检测试件在几何造型方面的特性,证明了“S”形试件能基本体现和覆盖机床的各种复杂姿态,以及在机床多轴联动精度检测和机床动态刚度特性检测等方面更具全面性。为基于“S”形检测试件的五轴数控机床动态精度检测提供相应的科学依据,为五轴数控机床精度检测试件的型面构造研究提供理论参考,有助于“S”形试件国际标准草案的制定与推广。

**关键词** 法曲率; 开闭角; 反向间隙; “S”形检测试件; 扭曲角

中图分类号 TH161

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.04.028

## Research on Properties of “S” Shaped Test Piece on Synthesis Dynamic Accuracy Detection of Five-Axis CNC Machine Tools

DU Li<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, FU Zhen-hua<sup>1</sup>, and SHI Rong-bo<sup>2</sup>

(1.School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. CNC Machining Factory of Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co.Ltd Chengdu 610092)

**Abstract** Dynamic accuracy detection of CNC machine tools have been a difficult problem in machine precision detection. The precision detection test specimens of machine tools such as ISO international standard test piece, series of NAS979 test part and NCG specimen were studied. Also the detection performance and properties of common test pieces were compared. Furthermore, the open-close angle, the twist angle, the curvature of curve and the normal curvature of surface of “S” shaped detection test piece were calculated. The paper focuses on the superiority of the “S” shaped detection test piece in geometric modeling and proves that it can fully embody and cover complicated posture of machine and it has comprehensiveness in multi-axis linkage-precision and stiffness of machine tools. The results proposed in this paper could be a usable reference in dynamic detection precision of machine tools, precision test specimen in profile structure, and promotion of international standard of “S” shaped detection test piece.

**Key words** normal curvature; open-close angle; reverse gap; “S” shaped detection test piece; twist angle

精度是数控机床最重要的技术指标,直接决定了加工产品的质量。机床精度从表现形式上可以分为两大类<sup>[1]</sup>: 1) 受机床几何误差和热变形影响,与进给率无关的准静态误差; 2) 源于伺服系统加减速响应性能、零件受力变形、刀具振动,且随主轴转速、机床进给率大小的不同而变化的动态精度。文献[2]分析了机床转动轴进给系统动态精度与轮廓误差的关系。文献[3]研究了机床伺服系统参数对机床动态精度的影响。对于机床动态精度,国内外学者做了大量研究,目前仍缺乏系统的机理分析和权威

的评价标准<sup>[4]</sup>。

机床精度检测方法有很多,大体可以分为两类: 1) 利用仪器直接测量机床误差; 2) 让待测机床加工标准试件,通过试件的加工精度来间接反映机床精度。常用的机床精度检测仪器除了精密水平仪、千分表、直角尺、准直仪等传统检测工具<sup>[5]</sup>,国外研发出了高精度的激光干涉仪、球杆仪、R-test测试仪、RTCP测试仪等新型仪器<sup>[6-7]</sup>。基于仪器的精度检测方法,能在一定程度上检测机床的几何精度、位置精度等机床准静态精度及部分动态精度,但该方法

收稿日期: 2013-05-09; 修回日期: 2013-11-06

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX04001-021)

作者简介: 杜丽(1970-),女,博士,教授,主要从事先进制造技术、精密机床精度检测等方面的研究。

多是在机床静止状态下或是低速无负载的情况下进行,无法真实表现机床实际加工过程中伺服系统误差、多轴联动误差、热变形误差及振动误差,具有一定局限性。因此,实际操作中技术人员更倾向于选用直接加工标准试件的检测方法。通过加工标准试件,能真实客观地评价机床在实际切削条件下的加工性能,能更好地检测机床的动态精度。

目前各国对标准试件的定义、检测指标的测量等都有所不同。这些试件造型简单,无法满足现代高档精密机床动态精度检测要求。为此,文献[8]发明了一种能正确反映多轴联动加工综合动态精度的“S”形检测试件,文献[9]提出了基于“S”试件的数控机床动态精度辨识方法,但都缺少对“S”形试件曲面结构参数的精度检测特性分析,在几何构型参数与机床联动性能、动态刚度检测的相关性上缺少理论研究。

本文研究了“S”形检测试件的开闭角、扭曲角等几何特征以及同机床性能的相关性,既为基于“S”试件机床动态精度检测提供科学依据,又为新型五轴机床精度检测试件的型面构造提供理论参考。

## 1 常用机床精度检测试件

在众多检测试件中应用最广的是ISO国际标准试件。该标准测试件多用于三轴机床精度检测,能较好地检验机床平动轴的动态精度,但是无法评价多轴机床转动轴的动态精度。因此,各国的技术人员纷纷提出了新的检测试件,在一定程度上弥补了该标准试件的不足,在多轴机床动态精度检测方面各有特点。

### 1.1 国际标准试件

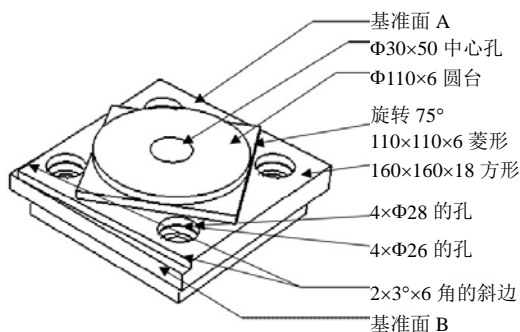


图1 ISO 10791-7轮廓加工试件

ISO/TC 39机床技术委员会于1988年制定了针对加工中心的国际标准草案ISO 10791,其中第7部分为精加工试件精度检验标准,用于评定机床的切削精度。ISO 10791-7提供端铣试件和轮廓加工试件两种试件<sup>[10]</sup>,其中端铣试件是用于检验精铣端面时所铣表面的平面度,没有定义具体的试件外形。轮

廓加工试件有大小两种不同尺寸,如图1所示为小尺寸轮廓加工试件,该试件由圆台、菱形、方形、中心孔、和3°斜边组成,可利用坐标测量机、圆度测量仪等工具,通过测量试件中心孔圆柱度、方形平行度等指标,能较好地检测三轴机床的加工精度。

### 1.2 NAS979系列试件

美国国家航空航天局(NASA)于1969年制定了“通用切削测试——NAS系列金属切削装备规范”,该规范共包含了两个试件,如图2所示<sup>[11]</sup>。其中,图2a中的试件主要用于检测三轴机床平动轴的几何精度和位置精度;图2b中的试件又名NAS979圆锥台试件,主要用于多轴联动机床转动轴精度检测。该试件由一个圆锥台和方形基座组成,圆锥台与水平面成15°夹角。NAS979圆锥台试件是目前应用最广泛的五轴数控机床动态精度检测试件,但是该试件无法检测机床加工复杂曲面的能力,反映不出机床摆角能力以及动态加减速性能,而且也无法判断机床RTCP(刀具旋转中心编程)功能是否符合要求<sup>[12]</sup>。

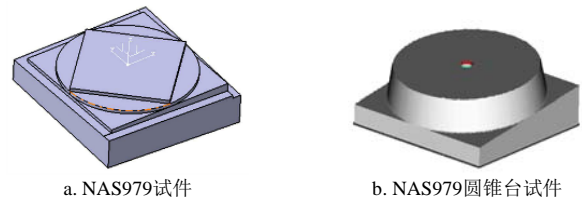


图2 NAS979系列试件

### 1.3 其他试件

文献[13-14]提出了四角锥台试件,如图3a所示,该试件由一个半顶角15°的四角锥台和一个方形基座组成,其中,四角锥台与水平面成20°倾角,可以直接检测直线度、垂直度、平行度等指标,但无法评价机床曲面加工能力及机床圆弧插补能力。

德国戴姆勒-奔驰公司提出了梅赛德斯(奔驰)试件,又名NCG试件,如图3b所示,该试件在圆形、菱形、方形的基础上,增加了圆锥面、圆柱凸台、U形曲面、半球面和可展直纹面。西班牙巴斯克地方大学与Fatronik公司共同提出了一款试件,如图3c所示。这两个试件都是从用户的角度出发,集成了加工过程中常见的几何型面,能较好地检验机床的加工精度,但是其建模复杂,加工时间长,加工程序繁琐,不便于推广和普及<sup>[15]</sup>。

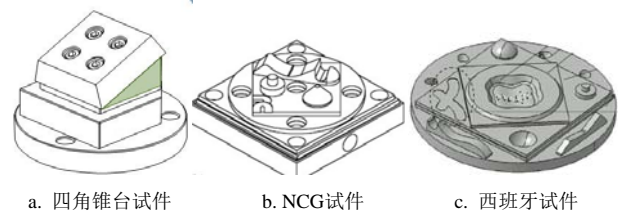


图3 常用机床精度检测试件

## 2 “S”形检测试件特性研究

传统的机床精度检测试件由于提出的年代过于久远,在现代高档机床动态精度检测方面存在不足。在实际中常发现通过NAS979圆锥台试件检验合格的机床,在加工大型航空薄壁件等复杂曲面类零件时,常出现过切、欠切、振纹、表面质量超差的情况。原因在于复杂曲面类零件本身构型复杂,曲面不连续,曲率易跳变且存在反向点,开闭角非均匀变化且转换,加工时要求机床具有较强的摆角能力,对转动轴的精度及多轴联动能力要求较高,而现有的试件因不具备复杂曲面类零件的几何特点,通过加工现有试件无法测评机床的相关精度和性能。

针对ISO轮廓加工试件、NAS979系列试件等在多轴机床综合动静态精度检测上的不足,成都飞机工业集团公司发明了“S”形检测试件,如图4所示,得到了行业的认可。2012年,在ISO第74次会议上,该试件申请纳入ISO 10791-7标准组作为附加测试件,即将成为新的国际标准检测试件。

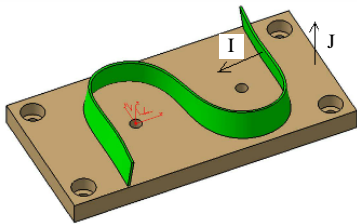


图4 “S”形检测试件

### 2.1 “S”形检测试件简介

“S”形试件建模较为简单,首先在上下两个平面经过给定的50个标准点分别构建一条“S”形三阶样条曲线,通过上下两条样条曲线构造直纹面,将直纹面拉厚3 mm,即为“S”形缘条,再加上矩形基座,即为“S”形试件。

“S”形试件在构型上具有很大优势:上下两条“S”形样条曲线在基座平面的投影并不重合,而是互相交叉形成扭曲角,缘条与基座平面夹角沿“S”线运动轨迹呈非均匀变化。侧铣加工时,刀轴矢量必须连续变化,空间姿态变化剧烈,能充分检测摆动轴的联动能力及加工精度。通过测评“S”形试件加工质量能够集中反映机床的几何精度、定位精度、反向间隙、五轴插补精度、多轴联动精度等特性。“S”形试件来源于典型航空零件,具有薄壁特征,其加工状况还能反映机床的刚度振动等特性。

### 2.2 开闭角分析

为了更能准确地描述复杂曲面零件的加工特征,文献[12]提出曲面开闭角的非严格定义:设待加

工曲面的法向向量和底座平面的法向向量之间的夹角为 $\alpha$ ,当夹角大于 $90^\circ$ ,定义为开角;小于 $90^\circ$ ,定义为闭角。如图4所示, $I$ 为“S”形试件缘条曲面某一点的法向向量, $J$ 为底座平面的法向向量,二者的夹角 $\alpha$ 即为开闭角。从图上可以大致看出,“S”形试件开闭角 $\alpha$ 随着“S”形走向不断变化。

对于开闭角为恒定值的零件,侧铣加工时,刀具的空间姿态无需变化,只要旋转工作台即可完成加工。而对于开闭角非均匀变化且转向的复杂零件加工时,刀具的空间姿态变化剧烈,刀轴矢量必须随着开闭角的变化而实时改变,这就要求机床必须具有较高的多轴联动精度和性能。

设曲线 $L: u = u(t), v = v(t)$ 是空间曲面 $E: r = r(u, v)$ 上经过点 $P_0(u_0, v_0)$ 的任意曲线,并且 $u_0 = u(t_0), v_0 = v(t_0)$ 代入空间曲线参数方程,可得曲线 $L$ 的参数方程:

$$r = r(u(t), v(t)) \tag{1}$$

继而可以求得曲线 $L$ 在 $P_0$ 点的切线方向上的矢量为:

$$\left( \frac{dr}{dt} \right)_{t_0} = r_u(u_0, v_0) \left( \frac{du}{dt} \right)_{t_0} + r_v(u_0, v_0) \left( \frac{dv}{dt} \right)_{t_0} \tag{2}$$

由 $r_u$ 、 $r_v$ 和 $P_0$ 一起确定了一个平面 $A$ ,该平面即为曲面在 $P_0$ 点的切平面。切平面 $A$ 的法线即为空间曲面在 $P_0$ 点的法线,法线上任意非零矢量称为法矢。该法线上的单位法向量为:

$$I(u_0, v_0) = \frac{r_u(u_0, v_0) \times r_v(u_0, v_0)}{|r_u(u_0, v_0) \times r_v(u_0, v_0)|} \tag{3}$$

设底座平面的单位法向量为: $J = (a, b, c)$ ,其中 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 。所以,可以求得向量 $I$ 、 $J$ 间的夹角为:

$$\cos \alpha = \frac{I \cdot J}{|I| \times |J|} = I \cdot J \tag{4}$$

通过计算,NAS979圆锥台试件的圆锥面法矢量与底座法矢量间的夹角为定值 $75^\circ$ ,属于闭角,如图5a所示。在侧铣NAS979圆锥台试件圆锥面时,开闭角为定值,刀具始终处在闭角区,因此无法检测机床加工开角区零件时的性能和精度。“S”形试件的开闭角连续变化且在中间位置出现开闭角转换,如图5b所示。“S”形试件的开闭角特性,能充分检测机床转动轴的连续性与稳定性,能深入检测机床平动轴与转动轴的联动精度以及伺服系统跟随误差。“S”形试件开闭角转换区域是加工的难点,加工时要求机床具有较强的摆角能力以及较高的多轴联动精度,对机床伺服系统响应性能提出了考验,这也

是“S”形试件不同于其他试件的主要特征之一。

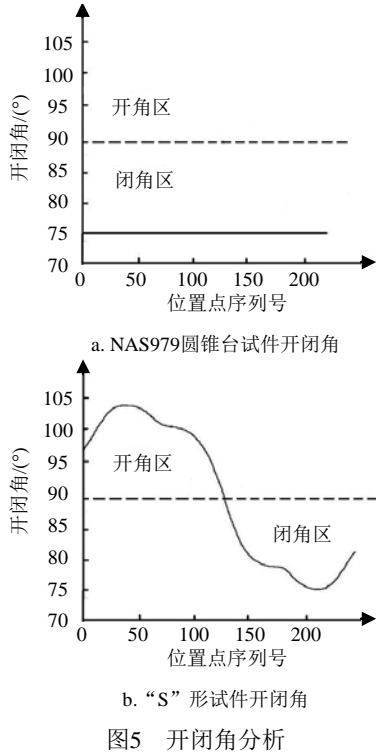


图5 开闭角分析

### 2.3 扭曲角分析

作为复杂曲面的一种，直纹面因其具有良好的性能被广泛应用于零件造型中。直纹面是由一条(族)单参数直线沿着两条基线扫掠而成。如图6a所示， $Q$ 、 $W$ 为直纹面的两条基线(导线)， $P$ 为其中一条母线。“S”形试件上下两条样条曲线之间的曲面为直纹面。

扭曲角是直纹面的主要特征之一，可以评价直纹面的扭曲程度。扭曲角是指直纹面两条基线的切线方向的矢量在母线法平面上投影的夹角。如图6b所示， $Q_t$ 、 $W_t$ 为直纹面的两条基线， $t_Q$ 、 $t_W$ 分别为切线上的方向向量，二者的夹角 $\gamma$ 即为扭曲角。扭曲角刻画了直纹面的扭曲度，扭曲角越大，说明曲面扭曲得越厉害。每一条直母线上都对应着一个扭曲角，取最大扭曲角来定义直纹面的扭曲度。根据扭曲度是否为零，可将直纹面分为可展直纹面和非可展直纹面。“S”形试件缘条曲面为非可展直纹面。

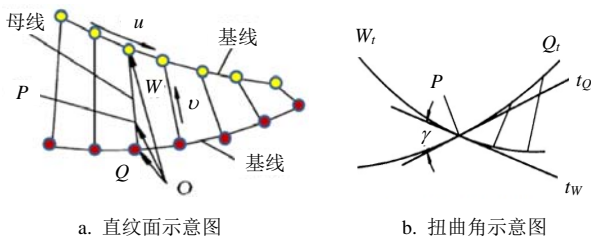


图6 扭曲角定义

NAS979圆锥台试件的侧面为圆锥面，其每一条母线的扭曲角都为0，所以扭曲度也为0，在侧铣加

工时，刀具能完全贴合圆锥面，不存在加工原理误差。经计算，“S”形试件的扭曲角如图7所示。由图可知，“S”形试件的扭曲角基本呈对称分布，最大扭曲角即扭曲度为 $5.8^\circ$ 。由于扭曲角的存在，严重影响加工刀具与被加工面的贴合程度。机床转动轴联动精度不够和刀具摆动不平稳，都会直接导致零件表面出现明显接刀痕，甚至过切导致零件报废，这种现象在扭曲角较大处表现更为明显，由此说明“S”形试件更能真实表现复杂曲面的实际加工状况。

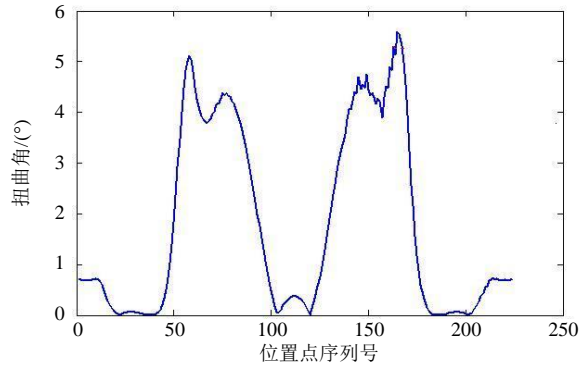


图7 “S”形试件扭曲角

### 2.4 曲线曲面连续性分析

随着人们对力学性能、外观美学要求的提升，复杂曲面的应用变得越来越广泛。五轴联动数控机床多用于复杂曲面类零件的加工，因此，检测机床加工复杂曲面精度的重要性不言而喻。相比于规则几何面，复杂曲面由于其曲面曲率不连续，加工过程中会引起铣削力的不规则变化，容易使得刀具和薄壁类零件振动变形，导致加工零件轮廓误差的产生。传统的检测试件由于其固定的曲率而无法检测机床曲面加工的相关性能，存在局限性，“S”形试件的曲面变化更吻合实际加工的复杂曲面。

#### 1) 曲线曲率分析

曲率是曲线的主要几何特性之一，表示曲线在某一点的弯曲程度。曲线在一点的曲率等于切线方向角对于弧长的转动率，转动越快曲率越大。曲率表明曲线偏离直线的程度，曲率越大，表示曲线的弯曲程度越大。曲率的倒数就是曲率半径。

根据曲率计算公式，分别求得NAS979圆锥台试件及“S”形试件上下两条曲线的曲率值，如图8所示。由图可知，NAS979圆锥台试件的曲率值为定值。“S”形试件上下两条样条曲线的曲率分布并不重合，曲率变化率不连续，存在多个极值点(图中三角形标注)及曲率转向点。

复杂零件曲率的非均匀变化直接影响加工过程中铣削力的大小。当机床以恒定进给率加工复杂曲



面时, 曲率的非均匀变化会使刀具在单位时间内的切削量时大时小, 激发刀具和零件的振动, 破坏机床的稳定性。相比与恒定曲率试件, “S”形试件的复杂曲率特性, 可较好地检测机床的动态刚度特性。

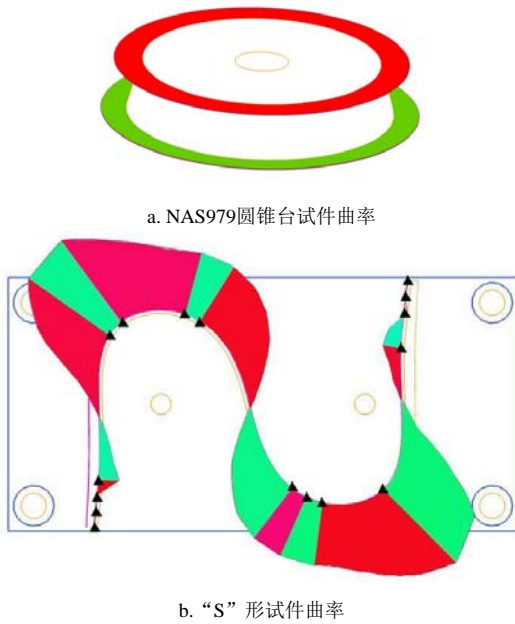


图8 曲线曲率分析

2) 曲面法曲率分析

已知直纹面的矢量方程为:

$$\mathbf{r}(u, v) = \mathbf{a}(u) + v\mathbf{b}(u) \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{a}(u)$  为基线上的单位方向向量;  $\mathbf{b}(u)$  为直母线上的单位方向向量。直纹面上任意点的主曲率为:

$$\begin{aligned} (EG - F^2)k_n^2 - (EN - 2FM + GL)k_n + \\ (LN - M^2) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} E = \mathbf{r}_u^2 = (\mathbf{a}' + v\mathbf{b}')^2 \\ F = \mathbf{r}_u \mathbf{r}_v = (\mathbf{a}' + v\mathbf{b}') \mathbf{b} \\ G = \mathbf{r}_v^2 = \mathbf{b}^2 \\ L = n \mathbf{r}_{uu} = \frac{\mathbf{a}' \mathbf{b} + v \mathbf{b}' \mathbf{b}}{\sqrt{EG - F^2}} [\mathbf{a}'' + v \mathbf{b}'''] \\ M = n \mathbf{r}_{uv} = \frac{(\mathbf{a}' \mathbf{b}) \cdot \mathbf{b}'}{\sqrt{EG - F^2}} = \frac{(\mathbf{a}', \mathbf{b}, \mathbf{b}')}{\sqrt{EG - F^2}} \\ N = \mathbf{r}_{vv} \mathbf{n} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

“S”形试件直纹面在加工的过程中, 刀路轨迹与直纹面曲面并没有完全重合, 存在一个夹角  $\varphi$ 。该夹角方向直纹面的法曲率为:

$$k_{n\varphi} = k_1 \cos^2(\varphi - \varphi_u - \varphi_{u1}) + k_2 \sin^2(\varphi - \varphi_u - \varphi_{u1}) \quad (8)$$

式中,  $k_1$ 、 $k_2$  分别为曲面的第一主曲率和第二主曲率;  $\varphi_u$ 、 $\varphi_{u1}$  可计算得到:

$$\cos \varphi_u = \mathbf{g}_u \mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{r}_u}{|\mathbf{r}_u|} (\mathbf{r}_u \frac{u_t}{ds} + \mathbf{r}_v \frac{v_t}{ds}) = \frac{Eu'_t + Fv'_t}{\sqrt{E^2(u'_t)^2 + 2EFu'_t v'_t + EG(v'_t)^2}} \quad (9)$$

$$\cos \varphi_{u1} = \frac{FL - EM}{\sqrt{Z}} \quad (10)$$

$$Z = (k_1 EF - EM)^2 + EG(L - k_1 E)^2 + 2EF(k_1 F - M)(L - k_1 E) \quad (11)$$

根据以上步骤分别计算出NAS979圆锥台试件、“S”形试件曲面法曲率, 采用反射线法对其进行曲面连续性分析, 结果如图9所示。与NAS件曲率连续不同, “S”形试件曲率出现明显跳变。图9b中标出的部分是曲率不连续的区域, 在这些区域容易引起机床加工速度和加速度的波动, 从而引起刀具的振动, 同时也是“S”形试件加工误差较大的区域。

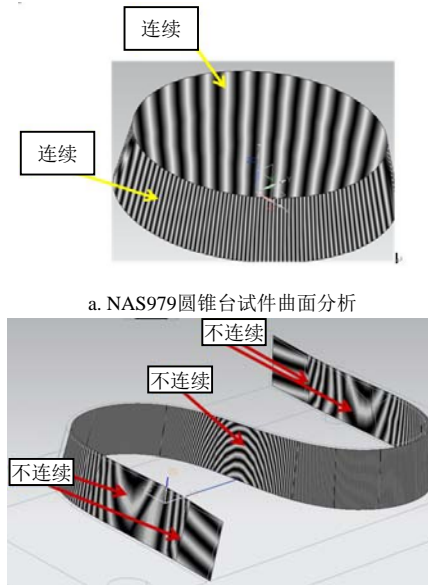


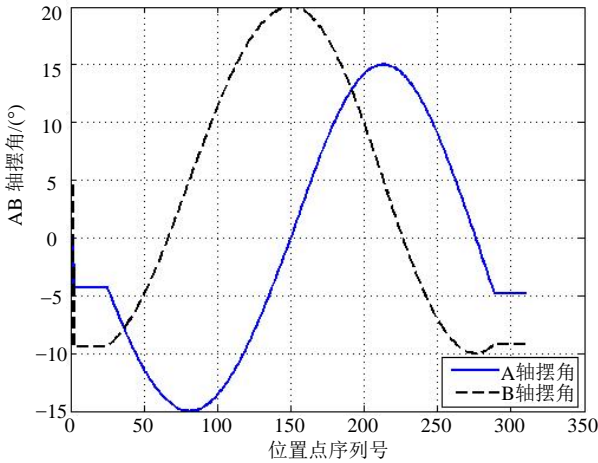
图9 曲面连续性分析

2.5 转动轴反向间隙分析

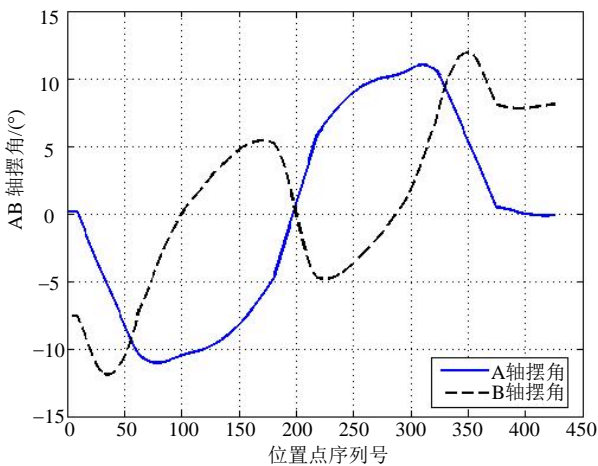
在机床制造安装调试及验收的过程中, 都要严格检定机床各运动轴的反向间隙。反向间隙的测量, 多采用激光干涉仪和千分表, 该方法多适用于X、Y、Z平动轴反向间隙的检测, 不能较好地检测多轴机床转动轴的间隙误差。

“S”形试件很好地解决了多轴数控机床摆动轴反向间隙检测问题。图10所示为NAS979圆锥台试件和“S”形试件在分层侧铣加工过程中, 第三层精加工时机床A、B轴摆角变化趋势。图11所示为“S”形试件加工过程中AB轴6次反向运动时的位置。通过测量该6个区域“S”形试件的法向误差, 即可判定AB轴的反向间隙误差。通过对比, 可以发现“S”

形试件加工过程中, 机床A轴出现两次反向运动, B轴出现4次反向运动, 摆角转向次数多于NAS件, 能更充分地反映摆动轴间隙误差。此外, “S”形试件加工时摆角变化不连续, 有波动, 对摆动轴机械环节提出了更高的要求, 能更好地检测摆动轴伺服控制系统的快速响应能力。



a. NAS979圆锥台试件AB轴摆角变化趋势



b. “S”形试件AB轴摆角变化趋势

图10 试件AB轴摆角分析

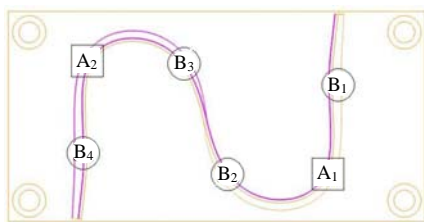


图11 “S”形试件AB轴反向位置

### 3 结束语

1) 对比分析了国内外常用机床精度检测试件的检测性能和特点, 指出现有试件的不足。

2) 研究了“S”形试件的开闭角变化机理, 证明了其能全面体现和覆盖机床实际加工时, 各种复

杂姿态。

3) “S”形试件的扭曲角的急剧变化要求刀轴能实时贴合加工曲面, 对数控机床多轴联动精度提出了考验, 能更好地检测机床多轴联动性能。

4) 分析了“S”形试件复杂的曲率曲面特性, 说明其可以较好地暴露机床的动态刚度缺陷。

5) 通过研究“S”件加工后置指令, 证明了其更能充分检测机床摆动轴反向间隙误差。

“S”形检测试件的发明是机床动态精度检测方法的有效补充, 提高了机床精度检测的全面性与准确性。对机床制造企业提高机床制造质量、机床用户降低零件废品率具有较大的实用价值。通过这些曲面结构参数的精度检测特性的分析, 为“S”形试件在五轴数控机床综合动态精度检测提供了科学依据, 为五轴数控机床精度检测试件的型面构造研究提供理论参考。

### 参 考 文 献

- [1] ANDOLFATTO L, LAVEMNHE S, MAYER J R R. Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five-axis high-speed machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(10-11): 787-796.
- [2] 谢东, 丁杰雄, 霍彦波, 等. 数控机床转动轴进给系统轮廓误差分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(12): 1387-1392.  
XIE Dong, DING Jie-xiong, HUO Yan-bo, et al. Contour error analysis for rotation feed axis in CNC machines[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(12): 1387-1392.
- [3] 霍彦波, 丁杰雄, 谢东, 等. 五轴数控机床转动轴与平动轴联动的轮廓误差仿真分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(3): 21-25.  
HUO Yan-bo, DING Jie-xiong, XIE Dong, et al. Simulation analysis for the contour errors from synchronous motion of rotational axis and translational axis in five-axis CNC machine tool[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(3): 21-25.
- [4] 赵万华, 张俊, 刘辉, 等. 数控机床精度评价新方法[J]. 中国工程科学, 2013, 15(1): 93-98.  
ZHAO Wan-hua, ZHANG Jun, LIU Hui, et al. New evaluation method on the precision of NC machine tools[J]. Engineering Science, 2013, 15(1): 93-98.
- [5] KNAPP W, WIRTZ A. Accuracy of length measurement and positioning: statical measurement and contouring mode[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1988, 37(1): 511-514.
- [6] WEIKERT S. R-test, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2004, 53(1): 429-432.
- [7] IBARAKI S, OYAMA C, OTSUBO H. Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2011, 51(3): 190-200.

- [8] 宋智勇, 崔雅文. 综合检测数控铣床精度的“S”形检测试件及其检测方法: 中国, CN101000285A[P]. 2007-07-18.  
SONG Zhi-yong, CUI Ya-wen. S-shape detection test piece and a detection method for detecting the precision of the numerical control milling machine: China, CN 101000285A[P]. 2007-07-18.
- [9] 杜丽, 崔浪浪, 赵波, 等. 基于S型检验试件的数控机床动态性能辨识新方法[J]. 制造技术与机床, 2012(12): 152-156.  
DU Li, CUI Lang-lang, ZHAO Bo, et al. New method of identification on the dynamic performance factors of CNC machine tool based on the S specimen[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(12): 152-156.
- [10] Test conditions for machining centers-part 7: Accuracy of a finished test piece[S]. Switzerland: ISO, 1998.
- [11] NAS979. Uniform cutting test-NAS series, metal cutting equipment[R]. Washington, USA: NASA, 1969.
- [12] SONG Zhi-yong, CUI Ya-wen. S-shape detection test piece and a detection method for detecting the precision of the numerical control milling machine: USA, US8061052B2 [P]. 2010-01-07.
- [13] 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.
- [14] UTSUMI K, KOSUGI T, SAITO A, et al. Measurement method of geometric accuracy of five-axis controlled machining centers[J]. Japan Society of Mechanical Engineering, 2006, 73(719): 2293-2298.
- [15] LAMIKIZ A, LOPEZ L N, CELAYA A. Machine tools for high performance machining[M]. London: Springer London Ltd, 2009: 219-260.

编辑 黄 莘