

# 机器人雕塑加工中的轨迹生成与优化研究\*

梁志鹏 冯亮友 徐开怀 席文明

(厦门大学 航空航天学院,福建 厦门 361005)

**摘要:**为了实现雕塑的双侧加工,首先对作业空间进行标定,建立CAM空间与作业空间的映射一致性;其次利用最大轮廓法对CAD/CAM生成的轨迹进行优化,使机器人只在雕塑最大轮廓内加工;双侧加工后雕塑沿最大轮廓处与未加工毛坯分离,从而提高雕塑的加工效率、减少刀具的损耗。实验结果表明,最大轮廓法可以完整地加工出雕塑,并且双侧加工轨迹的配准误差小于0.7 mm。

**关键词:**机器人加工;雕塑;最大轮廓;CAD/CAM;轨迹优化

**中图分类号:**TP242.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-4801(2018)04-002-05

**DOI:**10.19508/j.cnki.1672-4801.2018.04.001

机器人广泛应用于各类产品的加工中,特别是易于对大型、复杂产品进行加工<sup>[1-4]</sup>。在采用CAD/CAM编程时,形成两个空间,即产生机器人加工轨迹的CAM空间以及产品加工的作业空间。通常CAM空间中的加工对象模型相对机器人模型的转换矩阵不同于作业空间中的加工对象相对机器人的转换矩阵。标定两个空间中对应对象之间的转换矩阵过程被称为建立两个空间的映射一致性<sup>[5-7]</sup>。如果两个空间没有建立映射一致性,则当CAM空间中产生的加工轨迹向作业空间映射时,将形成轨迹偏差;该轨迹偏差将导致在双侧加工时不同加工侧错开,无法完整地加工出产品。

CAD/CAM产生加工轨迹的策略是切去除产品以外的所有毛坯材料,这种加工方法切削量和刀具损耗大、加工效率低。任何产品投影后都具有最大轮廓,并且在双侧加工方向上,其具有相同的最大轮廓。如果在双侧加工中,只产生最大轮廓内部的轨迹点,并且建立两个空间的映射一致性,则双侧加工后,加工的产品将沿最大轮廓与未加工毛坯分离,从而提高加工效率、减少刀具的损耗。

## 1 CAM空间与作业空间映射一致性的建立

建立两个空间的映射一致性,就是求取两个空间中对应对象之间的转换矩阵,并使其保持一致。在本文中,采用加工装备中的机器人直接测

量作业空间中的加工对象相对机器人的转换矩阵。

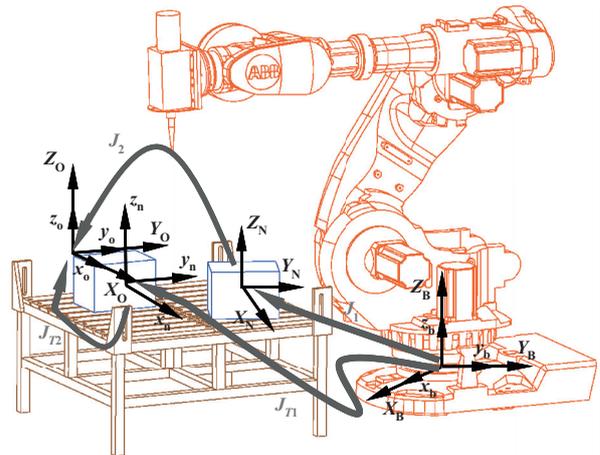


图1 CAM空间与作业空间映射一致性建立原理

图1中, $\sum x_n y_n z_n$ 、 $\sum x_n y_n z_n$ 和 $\sum x_0 y_0 z_0$ 是CAM空间中机器人模型、加工对象模型以及刀轨迹点坐标系; $\sum X_B Y_B Z_B$ 、 $\sum X_N Y_N Z_N$ 和 $\sum X_0 Y_0 Z_0$ 是作业空间中机器人、加工对象以及映射到作业空间的刀轨迹点坐标系。在CAM空间中, $J_{11}$ 表示机器人模型与加工对象模型间的转换矩阵, $J_{12}$ 表示加工对象模型与刀轨迹点间的转换矩阵;在作业空间中, $J_1$ 表示机器人与加工对象间的转换矩阵, $J_2$ 表示加工对象与刀轨迹点间的转换矩阵; $J_{11}$ 、 $J_{12}$ 、 $J_1$ 、 $J_2$ 都为 $4 \times 4$ 的转换矩阵。在CAM空间中,当在加工对象的CAD模型上产生刀轨迹 $\sum x_0 y_0 z_0$ 时,依据加工对象CAD模型的几何参数, $J_{12}$ 是已知的。在对CAD模

\*福建省科技重大专项(2016HZ0001-6)

作者简介:梁志鹏(1992—),男,硕士生,主要从事机器人技术及应用研究。

通讯作者:席文明(1965—),男,教授,主要从事机器人学、机器视觉、机器人技术研究。

型上的刀轨迹进行后置处理时,需要设定加工对象模型相对机器人模型的转换矩阵 $J_{T1}$ 。这样,刀轨迹通过后置处理后形成的机器人轨迹为

$${}^bT = J_{T1} \cdot J_{T2} \quad (1)$$

式中,  ${}^bT$  是CAM空间中轨迹点坐标系 $\Sigma_{x_0, y_0, z_0}$ 相对机器人坐标系 $\Sigma_{x_1, y_1, z_1}$ 的转换矩阵。

然而,机器人的轨迹是在CAM空间中产生,而机器人在作业空间运行加工轨迹。由于机器人与加工对象之间的转换矩阵不同于机器人模型与加工对象模型之间的转换矩阵,即 $J_1$ 与 $J_{T1}$ 不同;而 $J_{T1} \cdot J_{T2} = J_1 \cdot J_2$ ,从而导致 $J_{T2}$ 与 $J_2$ 不同;这样,当CAM空间的轨迹点映射到作业空间时,轨迹点不会映射到加工对象上的正确位置,而是产生轨迹的映射偏差。在采用双侧加工方法加工产品时,轨迹点的映射偏差将导致不同加工侧错开,无法完整地加工出与CAD模型一致的产品。

建立两个空间映射一致性的关键是确定 $J_1$ ,使得 $J_{T1} = J_1$ ,从而使得 $J_2 = J_{T2}$ 。这样,当CAM空间产生的轨迹映射到作业空间时,加工对象上的轨迹点不会产生偏差。

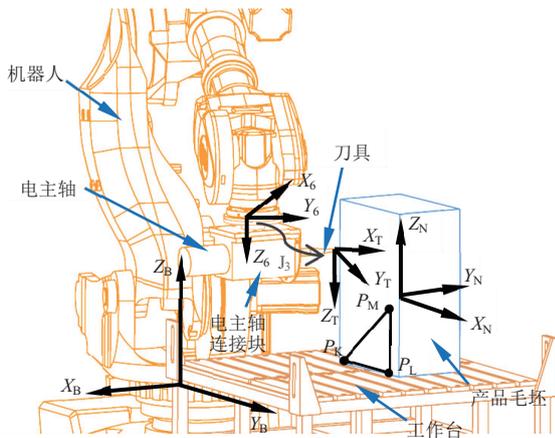


图2 机器人加工装备及映射一致性建立

图2是由机器人、电主轴、电主轴连接块、刀具、工作台以及工作台上的加工对象(雕塑毛坯)组成的机器人加工系统。依据电主轴连接块的设计模型以及刀具的尺寸,可以确定机器人第六轴坐标系 $\Sigma_{X_6, Y_6, Z_6}$ 到末端刀具坐标系 $\Sigma_{X_T, Y_T, Z_T}$ 的4×4转换矩阵 $J_3$ 。利用机器人测量空间点的坐标为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0T \cdot J_3 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ${}^0T$ 是机器人基坐标系到第六轴坐标系的4×4转换矩阵,(X、Y、Z)是作业空间中点的坐标。

为了便于建立两个空间的映射一致性,将加工对象的姿态和位置分开进行求解。在加工对象(雕塑毛坯)上,沿长方形边取3个点 $p_K$ 、 $p_L$ 、 $p_M$ ,并且这3个点组成一直角三角形(见图2),则可以依据这3个点求得3点所在平面的姿态:

$$n = \frac{p_L - p_K}{|p_L - p_K|} \quad (3)$$

$$a = \frac{(p_L - p_K) \times (p_M - p_K)}{|(p_L - p_K) \times (p_M - p_K)|} \quad (4)$$

$$o = n \times a \quad (5)$$

可以得到

$${}^B_cR = [n \ o \ a]^T \quad (6)$$

式中: ${}^B_cR$ 为3×3的旋转矩阵,是加工对象上3点组成的平面相对机器人基坐标系的姿态。

3点组成的平面坐标系相对机器人基坐标系的4×4转换矩阵为

$${}^B_cT = \begin{bmatrix} {}^B_cR & p_L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据加工对象坐标系与雕塑坐标系重合的约束关系,以及加工对象几何参数已知的条件,可以得到雕塑坐标系相对平面坐标系的转换矩阵 ${}^C_NT$ ,这样,就可以得到雕塑坐标系相对机器人基坐标系的转换矩阵

$$J_1 = {}^B_cT \cdot {}^C_NT \quad (8)$$

令 $J_{T1} = J_1$ ,根据式(1)可得

$${}^bT = J_1 \cdot J_{T2} \quad (9)$$

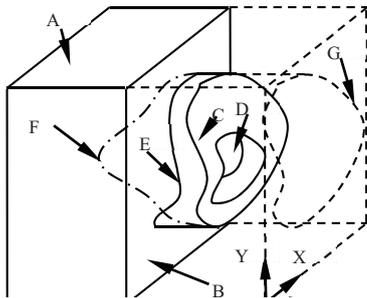
这样,就可以利用求得的 $J_1$ 和式(9)对刀轨迹进行后置处理,将其转换成机器人的加工轨迹,同时建立CAM空间和作业空间的映射一致性。

## 2 CAD/CAM产生的刀轨迹优化

在CAD/CAM软件产生加工刀轨迹后,刀轨迹后置处理前,利用最大轮廓法对刀轨迹进行优化处理。最大轮廓法加工类似于在山体上加工石窟。图3是最大轮廓法示意图,该图模拟的是ArtCAM(英国,Delcam公司)软件产生的粗加工刀轨迹的过程。

在图3中,雕塑被包容在毛坯A内,从A右侧进行加工。在软件中基面B可自由设置,但应保证雕塑右侧部分能被完整地加工出来,通常将B设置在毛坯左端面。ArtCAM软件采用层切法生成加工轨迹,即逐层将多余毛坯全部切削掉。而

最大轮廓法只对C和G之间柱体中除雕塑部分的毛坯进行加工,从而获得最大轮廓右侧的雕塑形状。由于最大轮廓在毛坯左右端面投影形状相同,所以可以对左侧进行相同的处理加工。



A—待加工毛坯;B—刀轨迹点基面;C—雕塑外侧最大轮廓;D—封闭孔最大轮廓;E—外侧最大轮廓在基面的投影;F—左侧未加工雕塑;G—外侧最大轮廓在毛坯右端面的投影

图3 最大轮廓法示意图

最大轮廓法以最大轮廓为基准,对刀轨迹进行优化,主要包括对最大轮廓外部轨迹的优化和对封闭孔轨迹的优化。实现最大轮廓法的关键是求取雕塑外侧最大轮廓和封闭孔最大轮廓。根据ArtCAM软件生成粗加工轨迹的特点,当加工轨迹的Z坐标小于对应最大轮廓C上的轨迹点Z坐标时,加工轨迹点只加工毛坯边界到外侧最大轮廓投影之间的毛坯以及封闭孔最大轮廓投影内部的毛坯。根据这一特性,取轨迹最后一层即B面上的轨迹点(包括毛坯边界上的点、外侧最大轮廓投影点及封闭孔最大轮廓投影点,其中外侧最大轮廓投影点的相邻点为边界点)为基准,首先分离出外侧最大轮廓投影点,再除去边界点,剩余的点即为封闭孔的最大轮廓投影点。获得最大轮廓投影点后,将所有粗加工轨迹点与最大轮廓投影点比较,在X、Y坐标相同的条件下,取Z值最大的轨迹点即为外侧最大轮廓点或封闭孔最大轮廓点。

轨迹优化过程见图4所示,外部轨迹点分为4种,即在雕塑上方(1—4点)、切削到雕塑(5—8点)、切削到最大轮廓(9—12点)及切削到最大轮廓下方(13—16点)。对于前3种情况,需将边界点平移至与最大轮廓对齐(如1点平移至1'点),使其不加工最大轮廓外部毛坯;对于第4种情况,需要将轨迹点删除,最大轮廓下方将由另一侧刀轨迹点加工。为保证加工安全性,需在删除点的前后位置添加抬刀点,避免刀具对雕塑的横切。

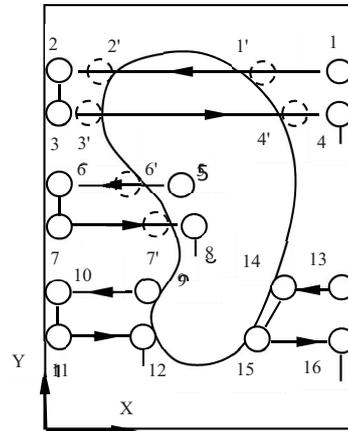


图4 最大轮廓外部轨迹示意图

对于封闭孔,若相邻两孔轮廓对齐点均低于对应孔最大轮廓,删除点并在前后位置添加抬刀点,孔最大轮廓下方由另一侧刀轨迹加工;若相邻两孔轮廓对齐点均高于对应孔最大轮廓,即点在C、G面之间,则保留;若两孔轮廓对齐点分别高于或低于对应孔最大轮廓,说明两孔的最大轮廓具有高度差,为保证双侧加工贯通,需要保留该两点;保留其他孔最大轮廓对齐点。

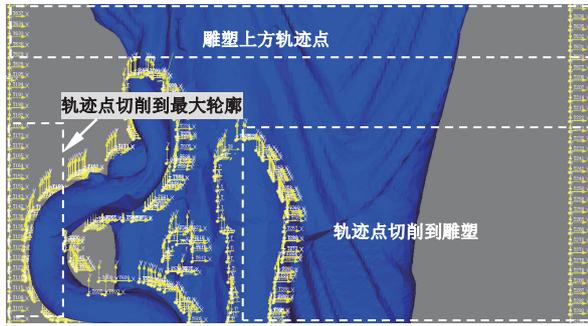
对于雕塑的精加工,参照图3,其产生的轨迹点为毛坯边界点、E上的点、C上的点、封闭孔最大轮廓点、封闭孔最大轮廓在B面上的投影点以及雕塑表面的加工点。而边界点、E上的点、封闭孔最大轮廓投影在B面上的点的Z坐标相同且最小,删除这些点,就可得到C右侧的轨迹点,从而对C、G之间的雕塑表面进行精加工。

### 3 仿真与实验结果

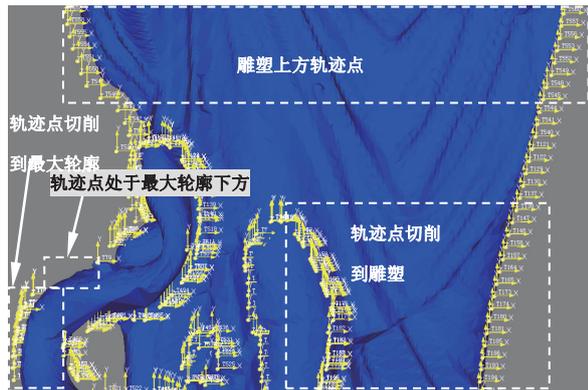
图5a是ArtCAM产生的没有优化过的轨迹点,对照图4,处于雕塑上方的轨迹点从毛坯的一侧边界运动到另一侧边界;切削到雕塑的轨迹点从毛坯的边界切削到雕塑;切削到最大轮廓或处于最大轮廓下方的轨迹点,从毛坯的边界运动到最大轮廓投影。对于封闭孔,一种情况为雕塑表面上的轨迹点运动到最大轮廓上,另一种情况是轨迹点在封闭孔最大轮廓之间运动。图5b所示是对ArtCAM产生的轨迹点进行了优化的结果。

加工系统中采用的机器人型号为安川MH250(日本,YASKAMA公司),抓取重量250 kg。采用韩国艾彦125TD15Z7.5B电主轴,最高转速为18 000 r/min,电主轴由连接块通过法兰与机器人末端法兰连接。工作台为自主设计,雕塑毛坯由

石膏制作,由夹板固定在工作台上。



(a) 轨迹优化前



(b) 轨迹优化后

图5 轨迹优化前后的比较

在雕塑加工前,利用机器人测量雕塑毛坯上的3个点,计算 $J_1$ 。然后利用公式(9)对优化后的ArtCAM产生的刀轨迹进行后置处理,生成机器人加工轨迹。在采用双侧加工时,其两侧刀轨迹的生成方法相同。

如图6是雕塑最大轮廓加工结果。图6a中,通过最大轮廓法轨迹优化,其只对最大轮廓内的雕塑进行加工;通过双侧加工后,其未加工毛坯可以沿最大轮廓与雕塑分离,见图6b右边部分所示。未建立映射一致性时,雕塑前后侧加工面严重错开,最大错开误差达到20 mm左右。图6b是在建立了映射一致性后的加工效果图,可以清晰地看到双侧加工后最大轮廓两侧的对应该迹点加

工偏移量,其平均误差小于0.7 mm。图6c和图6d是精加工效果图。

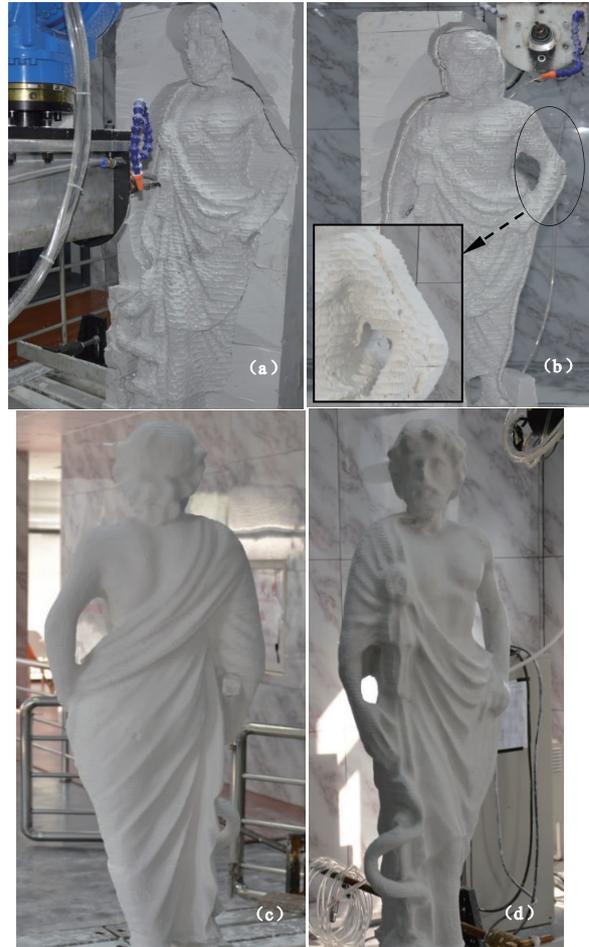


图6 雕塑最大轮廓加工实验

#### 4 结论

针对机器人雕塑品双侧加工,首先建立CAM空间与作业空间的映射一致性;在此基础上,对CAM软件产生的刀轨迹进行优化,采用最大轮廓法对雕塑进行加工,从而提高加工效率、减小刀具损耗。实验证明,建立CAM空间和工作空间映射一致性能有效提高双侧加工对准精度,其加工精度小于0.7 mm。

#### 参考文献:

- [1] SCHNEIDER U, ANSALONI M, DRUST M, et al. Experimental Investigation of Sources of Error in Robot Machining[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2013, 371(6): 14-26.
- [2] LEALI F, PELLICCIARI M, PINI F, et al. A Calibration Method for the Integrated Design of Finishing Robotic Workcells in the Aerospace Industry[J]. Communications in Computer & Information Science, 2013, 371: 37-48.
- [3] SONG Y, LIANG W, YANG Y. A Method for Grinding Removal Control of a Robot Belt Grinding System[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(5), 1903-1913.
- [4] WANG G, DONG H, GUO Y, et al. Dynamic cutting force modeling and experimental study of industrial robotic boring, Int. Adv[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 179-190.

(下转第47页)

度与厚度的玻璃浆料薄膜即可。图9显示结果表明,在现有条件下使用3D打印PUA材料印章通过微接触转印技术已成功在硅基底上转印出符合键合要求的玻璃浆料薄膜。

### 3 结论

本文首次提出了基于传统微接触印刷的玻璃浆料印刷技术,发现随着印章凸模厚度的下降玻璃浆料薄膜的宽度也会随之下降。通过改变印刷装置不同的凸模厚度以及形状,可以控制所印刷

得到的玻璃浆料层的宽度、厚度以及其形状外观。当凸模厚度下降至70  $\mu\text{m}$ 时,成功得到宽度为200  $\mu\text{m}$ 的玻璃浆料薄膜且能保持其厚度在45~60  $\mu\text{m}$ 之间,满足封装要求。后期成功通过图案化的凸模来得到玻璃浆料层的图案化。微接触印刷有效地控制了玻璃浆料层的宽度和厚度,极大地提高了玻璃浆料键合工艺的可控性,对于进一步推进玻璃浆料在MEMS器件的封装等应用领域具有重要的实践意义。

#### 参考文献:

- [1] 梁经伦,陈家钊,莫景会,等.精密视觉印刷设备的标定[J].光学精密工程,2013,21(2):522-530.
- [2] 陈骁,罗乐.采用精密印刷技术的玻璃浆料圆片级气密封装[J].功能材料与器件学报,2010,16(3):227-232.
- [3] LIU Y, CHEN D, ZHAN Z, et al. Research on Glass Frit Deposition Based on the Electrospray Process[J]. Materials, 2016, 9(4):292.
- [4] 潘力佳,何平笙.纳米器件制备的新方法—微接触印刷术[J].化学通报,2000,63(12):12-17,48.
- [5] BERNARD A, RENAULT J P, MICHEL B, et al. Microcontact Printing of Proteins[J]. Advanced Materials, 2000, 12(14):1067-1070.
- [6] LAUER L, KLEIN C, OFFENHÄUSSER A. Spot compliant neuronal networks by structure optimized micro-contact printing [J]. Biomaterials, 2001, 22(13):1925-1932.
- [7] 王伟,熊斌,王跃林,等.低温玻璃浆料圆片级真空封装的研究[J].传感器与微系统,2012,31(1):62-64.
- [8] 喻兰芳,梁庭,熊继军,等.玻璃浆料键合气密性研究[J].传感器与微系统,2015,34(1):34-35,39.
- [9] 刘益芳,王凌云,孙道恒,等.玻璃浆料键合中的孔洞抑制和微复合调控[J].光学精密工程,2016,24(4):780-787.
- [10] BARBALINARDO M, GENTILI D, BRUCALÉ M, et al. Self-protective action in multicomponent fluorescent self-assembled monolayers[J]. Rsc Advances, 2016, 6(21):17106-17109.
- [11] FU J, WANG Y K, YANG M T, et al. Mechanical regulation of cell function with geometrically modulated elastomeric substrates[J]. Nature Methods, 2010, 7(9):733-736.
- [12] KIM J, JEONG Y, KIM H, et al. F-number matching method in light field microscopy using an elastic micro lens array[J]. Optics Letters, 2016, 41(12):2751.
- [13] SEIDEL P, RAVOO B J. Preparation of Microscale Polymer Janus Particles by Sandwich Microcontact Printing[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2016.
- [14] FILIPPONI L, LIVINGSTON P, KAŠPAR O, et al. Protein patterning by microcontact printing using pyramidal PDMS stamps [J]. Biomedical microdevices, 2016, 18(1):1-7.
- [15] CHUA, CHEEKAI. 3D printing and additive manufacturing : principles and applications / Fourth edition of Rapid pr[M]. World Scientific, 2015.
- [16] LEUKERS B, GÜLKAN H, IRSEN S H, et al. Hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering made by 3D printing[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2005, 16(12):1121-1124.
- [17] 周如海.基于双凹凸台结构的玻璃浆料键合关键工艺研究[D].厦门:厦门大学,2015.

~~~~~  
(上接第5页)

- [5] TIAN W, ZENG Y, ZHOU W, et al. Calibration of robotic drilling systems with a moving rail[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(6):1598-1604.
- [6] HUANG J, WU D, MA Z, et al. Using an Adaptive Differential Evolution Algorithm to Calibrate an Industry Robot and External Axle[C]//Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2010:4922-4926.
- [7] LEALI F, VERGNANO A, PINI F, et al. A workcell calibration method for enhancing accuracy in robot machining of aerospace parts[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1-4):47-55.