



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102591257 A

(43) 申请公布日 2012. 07. 18

(21) 申请号 201210045978. 0

(22) 申请日 2012. 02. 27

(71) 申请人 山东理工大学

地址 255086 山东省淄博市高新技术产业开发区高创园 D 座 1012

(72) 发明人 赵国勇 赵玉刚 王士军 申永

(51) Int. Cl.

G05B 19/406 (2006. 01)

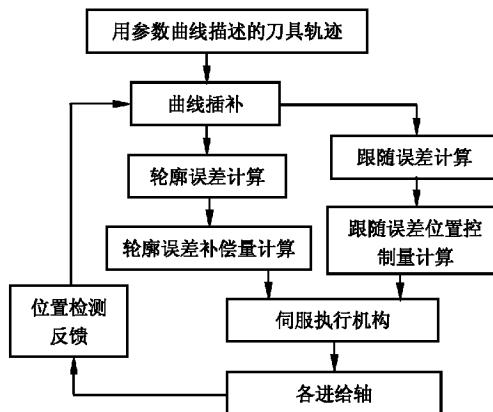
权利要求书 1 页 说明书 4 页 附图 3 页

(54) 发明名称

面向参数曲线刀具轨迹的数控系统轮廓误差控制方法

(57) 摘要

本发明提供一种面向参数曲线刀具轨迹的数控系统轮廓误差控制方法,采用以下步骤:1) 轮廓误差计算,2) 轮廓误差补偿量计算及控制,其特征在于:步骤 1) 中,在对参数曲线刀具轨迹进行曲线插补加工的每个采样周期,根据当前实际刀位点和所跟踪参数曲线刀具轨迹上的插补点,计算轮廓误差 ε ,即计算当前实际刀位点到所跟踪参数曲线刀具轨迹的最短距离;步骤 2) 中,计算轮廓误差 ε 沿 X 轴、Y 轴、Z 轴的分量,经比例控制得到轮廓误差补偿量,再分别与 X 轴、Y 轴、Z 轴对跟随误差的位置控制量相叠加,输出到伺服执行机构,进行轮廓误差补偿控制。本发明优点是:轮廓误差计算精度高,轮廓误差补偿方法简单、有效,能显著提高轮廓精度。



1. 一种面向参数曲线刀具轨迹的数控系统轮廓误差控制方法,采用以下步骤:1) 轮廓误差计算,2) 轮廓误差补偿量计算及控制,其特征在于:步骤1)中,在对参数曲线刀具轨迹进行曲线插补加工的每个采样周期,经X轴、Y轴、Z轴各自的位置传感器检测得到当前实际刀位点R,再找到参数曲线刀具轨迹上距当前实际刀位点R最近的两个插补点 P_a 、 P_b ,设插补点 P_a 、 P_b 所对应曲线参数分别为 u_a 、 u_b ,设曲线参数 $\frac{u_a+u_b}{2}$ 所对应参数曲线刀具轨迹上的点为 P_c ,则轮廓误差 $\varepsilon \approx RP_c$;步骤2)中,将步骤1)计算得到的轮廓误差 ε 沿X轴、Y轴、Z轴进给方向分解,分别得到 ε_x 、 ε_y 、 ε_z ;借用X轴、Y轴、Z轴进给系统各自跟随误差PID位置控制器中的比例系数 K_{px} 、 K_{py} 、 K_{pz} ,计算沿X轴、Y轴、Z轴的轮廓误差补偿量, $C_{\varepsilon_x} = \varepsilon_x \cdot K_{px}$, $C_{\varepsilon_y} = \varepsilon_y \cdot K_{py}$, $C_{\varepsilon_z} = \varepsilon_z \cdot K_{pz}$;然后将轮廓误差补偿量 C_{ε_x} 、 C_{ε_y} 、 C_{ε_z} 分别叠加到X轴、Y轴、Z轴对跟随误差的位置控制量中,最后将叠加结果输出到X轴、Y轴、Z轴的伺服执行机构进行轮廓误差补偿控制。

面向参数曲线刀具轨迹的数控系统轮廓误差控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种误差补偿控制方法,特别是涉及一种面向参数曲线刀具轨迹的数控系统轮廓误差控制方法。

背景技术

[0002] 在机械制造业中,许多复杂零件的轮廓可以用参数曲线来描述(如样条曲线、Bezier 曲线、B 样条曲线、NURBS 曲线等),相应的可以用参数曲线来描述加工这些零件的刀具轨迹。对于参数曲线刀具轨迹,先进的数控系统多采用曲线插补方法。相对于用直线段逼近参数曲线刀具轨迹再进行直线插补,采用曲线插补方法时,所有插补点均在参数曲线刀具轨迹上,并且理论上可以同时提高加工精度和加工速度。另一方面,对于这些复杂零件,往往用多轴数控机床加工。数控加工中轮廓误差指当前实际刀位点到所跟踪刀具轨迹指令曲线的最短距离,轮廓误差由多种因素造成,如螺距误差、正交轴不垂直、反向间隙等几何误差,热变形引起的热误差,切削力误差以及伺服控制误差等。Syh-Shiuh Yeh 等在学术期刊《IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS》(2002,7(1):44-50)上发表的论文“Estimation of the Contouring Error Vector for the Cross-Coupled Control Design”中,指出数控机床各进给轴之间实际动态性能很难做到完全匹配,这直接影响了轮廓精度的提高,是造成轮廓误差的重要原因,提出在零件加工中对轮廓误差计算并进行实时补偿,是提高系统轮廓精度的有效途径。

[0003] 对现有的技术文献检索发现,徐志祥等在学术期刊《机械科学与技术》(2006,25(12):1451-1453)上发表的论文“一种基于 NURBS 插补器的多轴交叉耦合控制方法”中,提出在每个采样周期根据各轴反馈的实际刀具位置与存储的一定数量的插补指令点,找到离实际刀具位置最近的插补点,两点之间距离近似为轮廓误差,计算方法简单,但该方法中轮廓误差模型精度不太高。Syh-Shiuh Yeh 等在学术期刊《IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY》(2003,11(3):375-382)上发表的论文“Analysis and Design of Integrated Control for Multi-Axis Motion Systems”中,将某采样周期实际刀位点到指令刀轨曲线上当前插补点处切线的距离近似为轮廓误差,称为轮廓误差“切线近似法”,该方法在进给速度较低、所跟踪轮廓曲率较小时可取得较高精度。Myung-Hoon LEE 等在学术期刊《JSME International Journal》(2004,47(1):P144-149)上发表的论文“A multi-axis contour error controller for free form curves”中,针对参数曲线提出一种基于轮廓误差矢量的控制方法,在每个采样周期,采用二分法和牛顿迭代法求解非线性方程组来计算轮廓误差。该方法存在的问题是,牛顿迭代法对初值的要求很高,且计算量较大,有时难以满足数控系统实时性要求。Myung-Hoon LEE 在该文中还提出除了各轴跟随误差 PID 位置控制器,对于近似计算得到的轮廓误差,另外设计一套 PID 控制器来计算轮廓误差补偿量,但该 PID 控制器的控制参数很难整定。

[0004] 综上所述,在零件数控加工中,对于用参数曲线描述的刀具轨迹,如何在每个采样周期,高精度并尽量简单的计算轮廓误差和轮廓误差补偿量,对各进给轴伺服执行机构进

行补偿控制,对于增强各进给轴之间匹配程度,提高轮廓精度,实现多轴协同控制具有重要意义,已成为本领域技术人员急需解决的技术问题。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种能克服现有技术的不足、轮廓误差计算精度高、轮廓误差补偿控制简单的面向参数曲线刀具轨迹的数控系统轮廓误差控制方法。其技术方案为:

[0006] 采用以下步骤:1) 轮廓误差计算,2) 轮廓误差补偿量计算及控制,其特征在于:步骤1)中,在对参数曲线刀具轨迹进行曲线插补加工的每个采样周期,经X轴、Y轴、Z轴各自的位置传感器检测得到当前实际刀位点R,再找到参数曲线刀具轨迹上距当前实际刀位点R最近的两个插补点 P_a 、 P_b ,设插补点 P_a 、 P_b 所对应曲线参数分别为 u_a 、 u_b ,设曲线参数 $\frac{u_a+u_b}{2}$

所对应参数曲线刀具轨迹上的点为 P_c ,则轮廓误差 $\varepsilon \approx RP_c$;步骤2)中,将步骤1)计算得到的轮廓误差 ε 沿X轴、Y轴、Z轴进给方向分解,分别得到 ε_x 、 ε_y 、 ε_z ;借用X轴、Y轴、Z轴进给系统各自跟随误差PID位置控制器中的比例系数 K_{px} 、 K_{py} 、 K_{pz} ,计算沿X轴、Y轴、Z轴的轮廓误差补偿量, $C_{\varepsilon_x} = \varepsilon_x \cdot K_{px}$, $C_{\varepsilon_y} = \varepsilon_y \cdot K_{py}$, $C_{\varepsilon_z} = \varepsilon_z \cdot K_{pz}$;然后将轮廓误差补偿量 C_{ε_x} 、 C_{ε_y} 、 C_{ε_z} 分别叠加到X轴、Y轴、Z轴对跟随误差的位置控制量中,最后将叠加结果输出到X轴、Y轴、Z轴的伺服执行机构进行轮廓误差补偿控制。

[0007] 本发明与现有技术相比,其优点是:

[0008] 1、轮廓误差计算方法简单,计算精度高。

[0009] 2、轮廓误差补偿量计算方法简单、有效。

附图说明

[0010] 图1是本发明的面向参数曲线刀具轨迹的数控系统轮廓误差控制方法流程图。

[0011] 图2是本发明的面向参数曲线刀具轨迹的数控系统轮廓误差计算方法示意图。

[0012] 图3是本发明的面向参数曲线刀具轨迹的数控系统轮廓误差计算补偿程序流程图。

[0013] 图4是采用本发明的三轴联动数控运动平台硬件结构图。

[0014] 图5是一段用NURBS描述的参数曲线刀具轨迹。

[0015] 图6是插补跟踪图5所示参数曲线刀具轨迹时轮廓误差图。

[0016] 图中: P_a 、插补点 P_b 、插补点 P_k 、插补点L、刀具轨迹 P_c 、刀具轨迹上的点R、实际刀位点A~I为刀具轨迹的控制顶点

具体实施方式

[0017] 下面结合图1~3对本发明做进一步详细描述:

[0018] 步骤1),在对参数曲线刀具轨迹进行曲线插补加工的每个采样周期,根据当前实际刀位点和所跟踪参数曲线刀具轨迹上的插补点,计算轮廓误差,即计算当前实际刀位点到所跟踪参数曲线刀具轨迹的最短距离。具体如图2所示,设用NURBS参数曲线描述该刀具轨迹L,刀具轨迹L上每一点为

[0019]

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u)W_iV_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u)W_i} \quad (1)$$

[0020] 其中 V_i 为控制顶点, W_i 为权因子, $B_{i,k}(u)$ 为 k 次 B 样条基函数。对应每个曲线参数 u , 有 $P(u) = (x(u), y(u), z(u))'$, 即与刀具轨迹 L 上一点对应。需要指出的是, 不管用什么样的参数曲线形式 (如样条曲线、Bezier 曲线、B 样条曲线、NURBS 曲线等) 描述刀具轨迹, 每个曲线参数 u 都与刀具轨迹上一点对应, 并且用曲线插补时, 所有插补点均在刀具轨迹上, 因此图 2 中用 NURBS 参数曲线来描述刀具轨迹是具有一般性的。

[0021] 在第 k 个插补采样周期, 设此时插补点为 P_k 。经各进给轴位置检测反馈得知实际刀位点为 R , 从过去的 10 个插补点, 即从 $(P_{k-9}, P_{k-8} \cdots P_k)$ 中搜寻距点 R 最近的两个插补点, 设为插补点 P_a 、插补点 P_b 。设插补点 P_a 、插补点 P_b 所对应曲线参数分别为 u_a 、 u_b , 即满足

$$[0022] \quad P_a = P(u_a) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u_a)W_iV_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u_a)W_i}, P_b = P(u_b) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u_b)W_iV_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u_b)W_i}。$$

[0023] 设曲线参数 $\frac{u_a + u_b}{2}$ 所对应参数曲线刀具轨迹 L 上的点为 P_c , 即

[0024]

$$P_c = P\left(\frac{u_a + u_b}{2}\right) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,k}\left(\frac{u_a + u_b}{2}\right)W_iV_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,k}\left(\frac{u_a + u_b}{2}\right)W_i} \quad (2)$$

[0025] 则在该采样周期, 令轮廓误差

$$[0026] \quad \varepsilon \approx RP_c \quad (3)$$

[0027] 即用 RP_c 来近似当前实际刀位点 R 到刀具轨迹 L 的最短距离。

[0028] 步骤 2), 将步骤 1) 计算得到的轮廓误差 ε 沿 X 轴、Y 轴、Z 轴进给方向分解, 分别得到 ε_x 、 ε_y 、 ε_z ; 借用 X 轴、Y 轴、Z 轴进给系统各自跟随误差 PID 位置控制器中的比例系数 K_{px} 、 K_{py} 、 K_{pz} , 计算沿 X 轴、Y 轴、Z 轴的轮廓误差补偿量, $C_{\varepsilon_x} = \varepsilon_x \cdot K_{px}$, $C_{\varepsilon_y} = \varepsilon_y \cdot K_{py}$, $C_{\varepsilon_z} = \varepsilon_z \cdot K_{pz}$; 然后将轮廓误差补偿量 C_{ε_x} 、 C_{ε_y} 、 C_{ε_z} 分别叠加到 X 轴、Y 轴、Z 轴对跟随误差的位置控制量中, 最后将叠加结果输出到 X 轴、Y 轴、Z 轴的伺服执行机构进行控制。具体如图 3 中面向参数曲线刀具轨迹的数控系统轮廓误差计算补偿程序流程图所示: 在读入第 n 个用参数曲线描述的刀具轨迹加工程序段后, 在第 k 采样周期, 经曲线插补得到插补点 P_k , 同时检测各进给轴位置得到实际刀位点 R , 然后进行两方面计算:

[0029] (1) 由实际刀位点 R 和当前插补点 P_k 得到跟随误差 $E = RP_k$ 。设 X 进给轴跟随误差 PID 位置控制器系数为 K_{px} 、 K_{ix} 、 K_{dx} , Y 进给轴跟随误差 PID 位置控制器系数为 K_{py} 、 K_{iy} 、 K_{dy} , Z 进给轴跟随误差 PID 位置控制器系数为 K_{pz} 、 K_{iz} 、 K_{dz} , 则经 PID 位置控制后, 易得 X 轴、Y 轴、Z 轴的跟随误差位置控制量 C_{Ex} 、 C_{Ey} 、 C_{Ez} 。

[0030] (2) 用式 (3) 计算轮廓误差 ε , 将轮廓误差 ε 沿 X 轴、Y 轴、Z 轴分解得到 ε_x 、 ε_y 、 ε_z 。借用 X 轴、Y 轴、Z 轴跟随误差 PID 位置控制器中的比例系数 K_{px} 、 K_{py} 、 K_{pz} , 经比例控制

得到 X 轴、Y 轴、Z 轴的轮廓误差补偿量 C_{ε_x} 、 C_{ε_y} 、 C_{ε_z} ：

$$[0031] \quad C_{\varepsilon_x} = \varepsilon_x \cdot K_{px} \quad (4)$$

$$[0032] \quad C_{\varepsilon_y} = \varepsilon_y \cdot K_{py} \quad (5)$$

$$[0033] \quad C_{\varepsilon_z} = \varepsilon_z \cdot K_{pz} \quad (6)$$

[0034] 将上述两步计算得到的沿 X 轴、Y 轴、Z 轴的轮廓误差补偿量分别与 X 轴、Y 轴、Z 轴对跟随误差的位置控制量叠加，将叠加结果 $(C_{E_x}+C_{\varepsilon_x})$ 、 $(C_{E_y}+C_{\varepsilon_y})$ 、 $(C_{E_z}+C_{\varepsilon_z})$ 分别输出到各进给轴伺服执行机构进行控制，既可实现刀具按指定速度运动，同时又使刀具趋近指令轮廓，提高轮廓精度。

[0035] 本发明在图 4 所示的三轴联动数控运动平台的数控系统中获得实现：由工控机和 SEED-DEC2812 运动控制卡构成上下位机结构，通过 USB2.0 实现数据通信，X 轴、Y 轴、Z 轴进给系统均采用松下小惯量伺服电机，采样周期等于插补周期，均为 $T = 4\text{ms}$ 。用光栅尺实现对 X 轴、Y 轴、Z 轴进给方向实际位置的检测。SEED-DEC2812 运动控制卡中核心 DSP 处理芯片为 TMS320-F2812，具有 USB2.0 通讯接口，主频为 150MHz，开发环境为 CCS2.0。在 SEED-DEC2812 运动控制卡中实现 NURBS 曲线插补、轮廓误差计算及补偿控制、跟随误差位置控制、加减速控制等。

[0036] 图 5 为一段用 NURBS 参数曲线描述的刀具轨迹。其中，

[0037] 控制顶点为：A(0,0,0)，B(125,0,3)，C(250,0,10)，D(350,25,40)，E(250,50,30)，F(125,50,40)，G(0,50,10)，H(0,25,3)，I(0,0,0)；其中点 A 和点 I 重合；

[0038] 权因子为：(1, 1.2, 1.1, 1, 0.9, 11, 0.8, 1, 1)；

[0039] 节点矢量为：(0,0,0,0,0.3266,0.4667,0.6018,0.7655,0.9333,1,1,1,1)。

[0040] 图 6 为插补跟踪图 5 所示参数曲线刀具轨迹时轮廓误差图。首先，在 SEED-DEC2812 运动控制卡中实现“切线近似法”轮廓误差补偿方法，插补跟踪图 5 所示刀具轨迹，轮廓误差如图 6 中 data2 所示，最大轮廓误差为 0.064mm 左右；然后，在 SEED-DEC2812 运动控制卡中实现本发明所提出轮廓误差计算补偿方法，在同样的工作环境下，插补跟踪图 5 所示刀具轨迹，轮廓误差如图 6 中 data1 所示，最大轮廓误差为 0.042mm 左右。

[0041] 对比说明，本发明所提出轮廓误差计算补偿方法可对轮廓误差实现有效补偿，提高轮廓精度，增强各进给轴之间匹配程度，减小各运动轴之间实际动态性能不匹配的影响。该发明可在数控系统和数控机床中应用和推广，特别是对于用参数曲线描述的刀具轨迹和零件的数控加工具有重要意义。

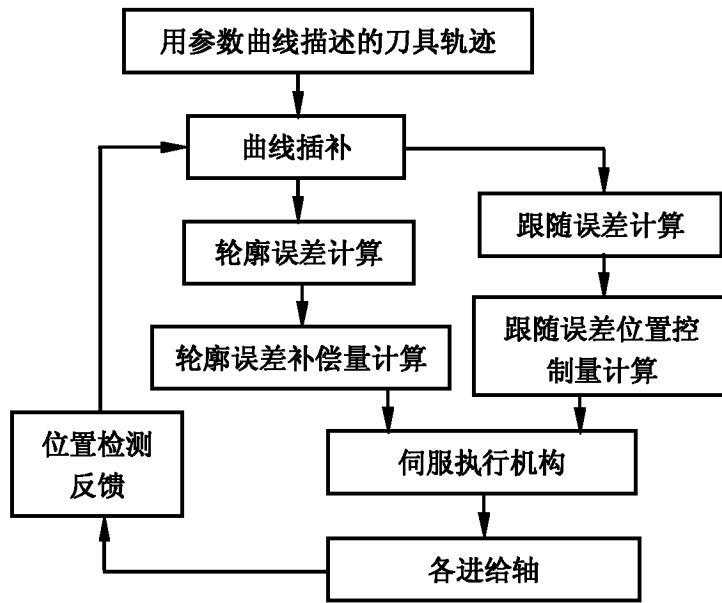


图 1

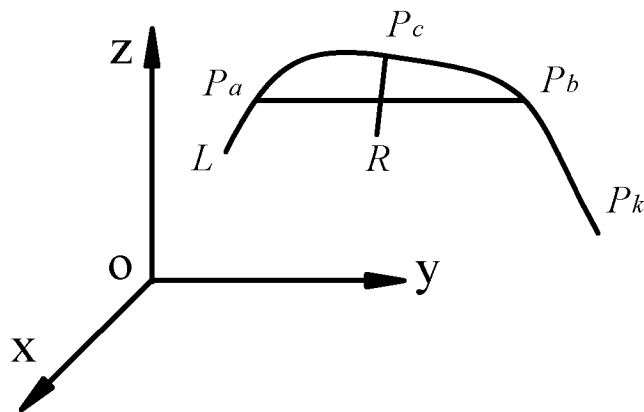


图 2

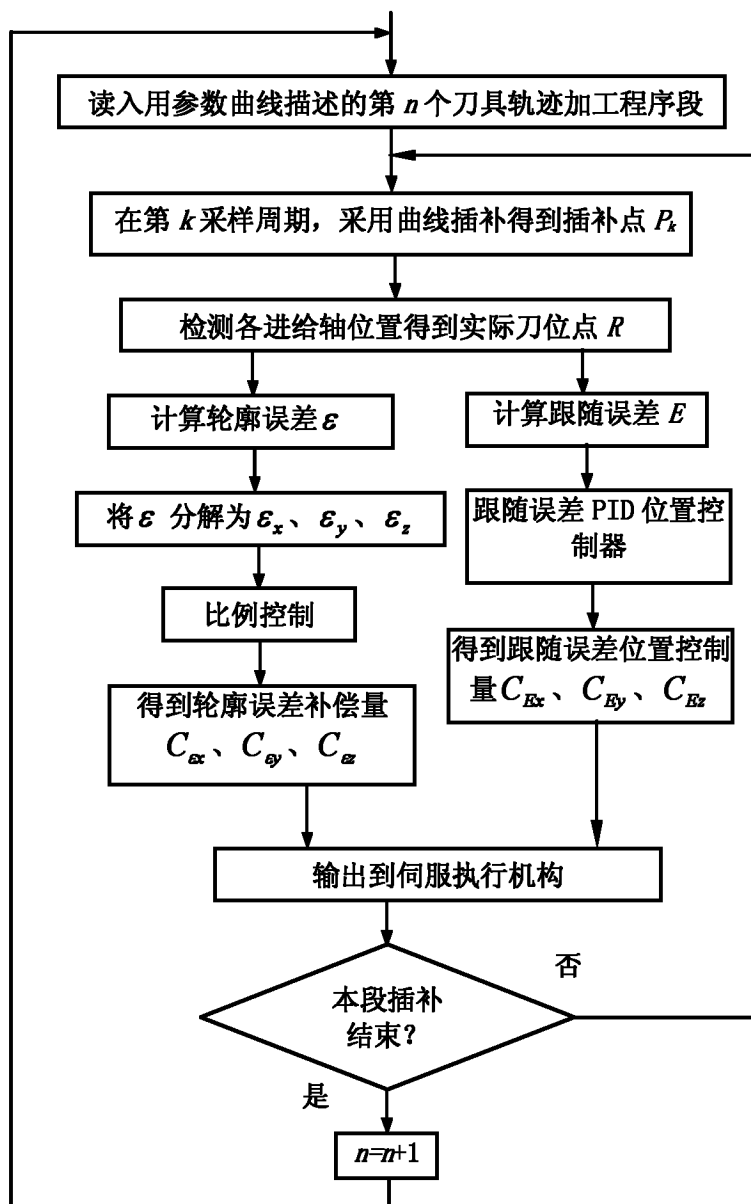


图 3

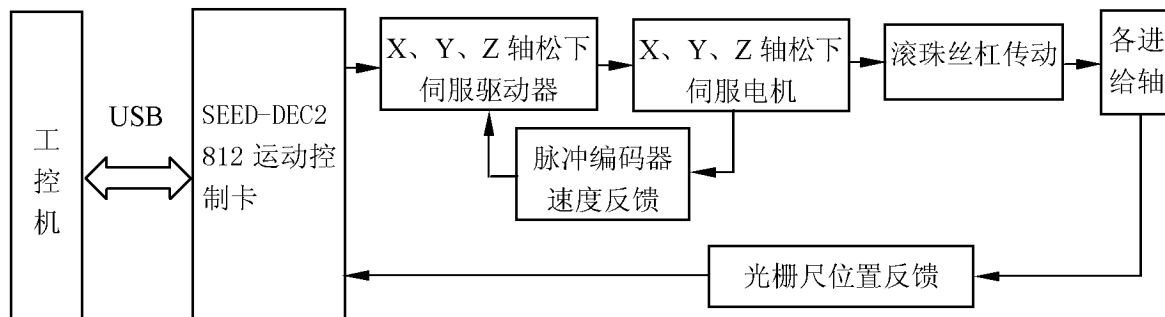


图 4

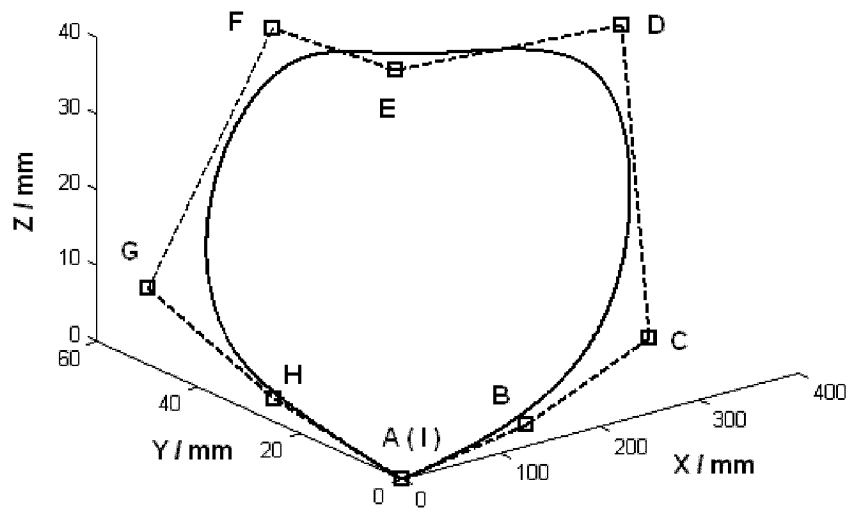


图 5

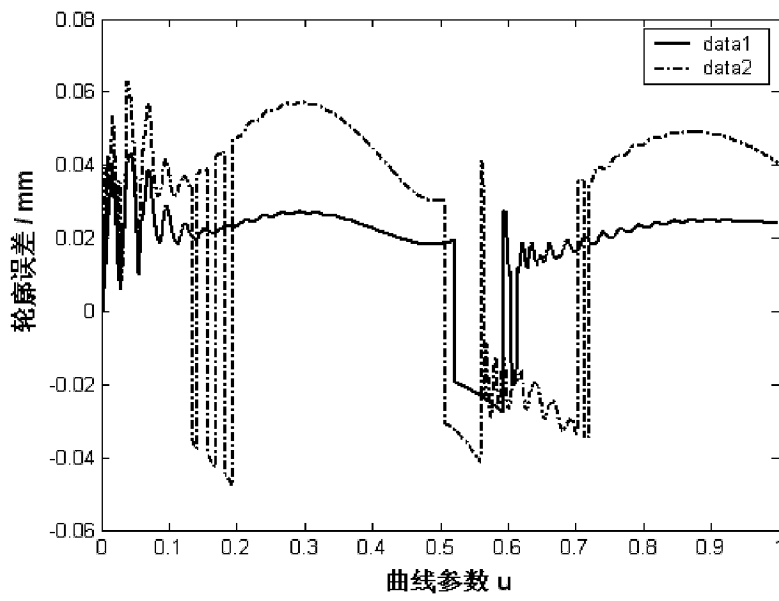


图 6