

文章编号: 1002-0446(2000)07-0752-03

五轴并联机器人数控机床设计研究

徐志刚¹ 房立金¹ 余晓流² 赵明扬¹ 陈书宏¹

(1 中国科学院沈阳自动化研究所 110015; 2 东北大学 沈阳 110006)

摘要: 研制了一种新型结构五轴并联数控机床, 阐述机床机构运动原理和控制系统组成, 建立运动学方程, 分析机床工作空间, 依据测量数据反演建立五轴并联机床误差模型, 利用该模型对机床进行实时精度补偿, 可使机床定位精度大为提高。

关键词: 五轴并联数控机床; 运动学; 工作空间; 精度补偿

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

1 引言

并联数控机床是 90 年代问世的新型数控加工装备, 近年来, 国内外学者在这一领域开展了大量的研究工作^[1~5]. 与实现等同功能的传统五轴数控机床相比, 并联机床具有刚度重量比大、响应速度快、环境适应性强、技术附加值高等优点^[6]. 但该机床也存在严重不足: ① 工作空间小, ② 由于无法实时精确地检测机床位姿, 因而难以在控制系统中实施精确补偿, 从而导致机床精度不高, 正是这两点限制了并联机床产业化进程. 本文提出的五轴并联数控机床与基于 Stewart 平台并联机床相比, 采用了与传统机床相结合机构方案, 可消除冗余自由度关节, 使机床工作空间有效增大. 采用基于测量数据的误差建模方法, 建立位姿误差模型, 进而利用误差模型对机床实施精度补偿, 可使机床精度大为提高.

2 五轴并联数控机床机构

五轴并联数控机床本体采用龙门结构布置(见图 1), 主运动由电机直接带动刀具完成, 置于床身上的工作台在 X 轴(坐标系设定见图 2)伺服电机驱动下完成 x 轴进给运动. 由于床身导轨的长度可根据需要设计, 这样就使得机床沿 X 方向工作空间大为增加. 运动平台由安放在 2 个立柱上的 4 个电机驱动的并联机构带动, 具有 4 个自由度. 六边型支架底边即为床身, 顶边与运动平台铰接, 具有 3 个自由度. 横梁将两侧立柱联结起来, 构成长门框架以提高机床本体刚度^[7]. 四个杆件两端的球副设计均采用可随时调隙的球面关节轴承, 这样可以实现零间隙甚至微小过盈. 由于用面接触代替了虎克铰形式的线接触, 机床本体运动部分刚度大为提高^[8].

3 机构运动学分析

3.1 运动学逆解

五轴并联数控机床的机构简图如图 2 所示. 首先在机构的固定平台建立参考坐标系 OXYZ, 在运动平台上建立动坐标系 O'X'Y'Z'^[9]. 连杆 L₁, L₂, L₃, L₄ 的上端与可以沿 Z 轴方向移动的滑块 H_i (i=1, 2, 3, 4) 相连, 下端与运动平台相连, L₁, L₄ 相连的关节可以绕 X 和 Y 轴旋转, L₂ 与 L₃ 相互交叉且只能绕 X 轴旋转. 工作平台沿 X 方向移动, 位移用 H₅ 表示. 这里 L_i, x_i, y_i, z_i (i=1, 2, 3, 4), Z_i 为机构参数.

设刀具位置是 P=(p_x, p_y, p_z)^T, 刀具绕 X' 与 Y' 轴旋转角度分别为 A, B. 可得出刀尖点的位姿矩阵 T:

$$T = \begin{pmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos B & \sin A \sin B & \cos A \sin B & p_x \\ 0 & \cos A & -\sin A & p_y \\ -\sin B & \sin A \cos B & \cos A \cos B & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \text{工具的派生运动: } R \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x Z_i \\ a_y Z_i \\ a_z Z_i \end{pmatrix}$$

设四个连杆的长度分别为: L₁, L₂, L₃, L₄, 那么由机构的几何关系即可得到位置逆解方程组:

基金项目: 国家 95 攻关资助项目.
收稿日期: 2000-03-08

340

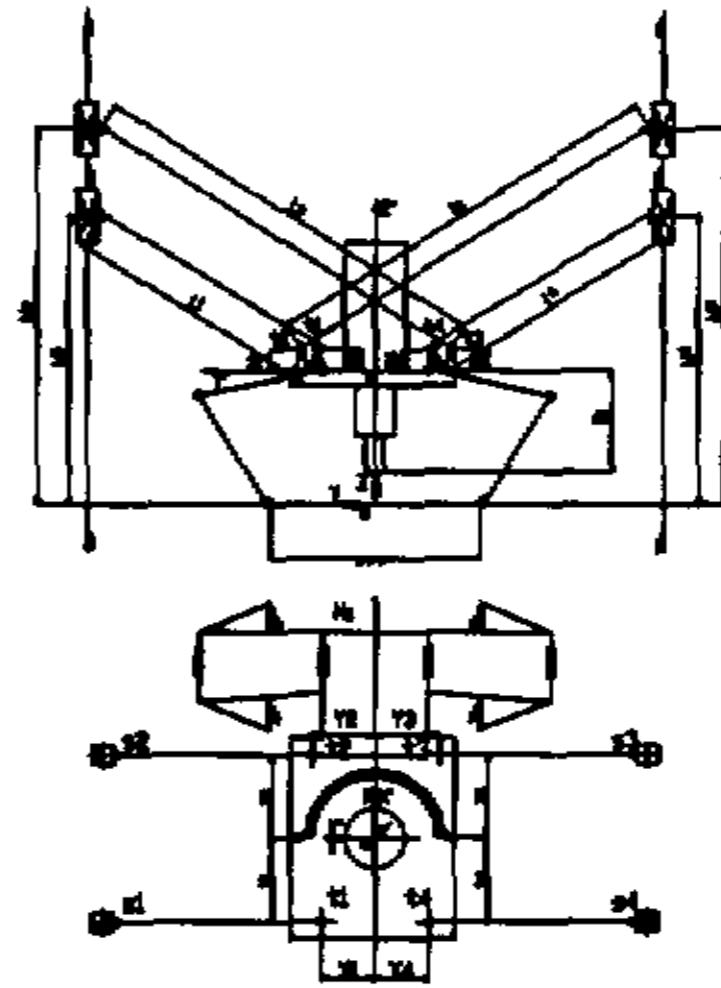


图 1 五轴并联数控机床

图 2 五轴并联数控机床的机构简图

$$\begin{cases} L_i^2 = (x_n - x_u)^2 + (y_n - y_u)^2 + (H_i - z_n)^2 & (i = 1, 2, 3, 4) \\ p_y = -H_5 + a_y Z_i \end{cases} \quad (1)$$

进而得出五个驱动分支的行程 $H_i (i=1, 2, 3, 4)$ ：

$$\begin{cases} H_i = z_n + \sqrt{L_i^2 - (x_n - x_u)^2 - (y_n - y_u)^2} & (i = 1, 2, 3, 4) \\ H_5 = -p_y + a_y Z_i \end{cases} \quad (2)$$

3.2 运动学正解

将四铰链 ($i=1, 2, 3, 4$) 的坐标代入 (1)，则得到关于 x_0, z_0, p_y, A, B 的方程组：

$$f_i = 0 \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

把 $x_0, z_0, \sin A, \cos A, \sin B, \cos B$ 视为未知数。注意到 $\sin^2 A + \cos^2 A = 1, \sin^2 B + \cos^2 B = 1$ 恒成立，因此，可以采用拟牛顿迭代法求解出这六个未知数。计算出 $x_0, z_0, \sin A, \sin B, \cos A, \cos B$ 之后，即可得到刀尖点的位姿

p_x, p_y, p_z, A, B ； $p_x = x_0 - Z_i \cos A \sin B, p_y = -H_5 - Z_i \sin A, p_z = z_0 - Z_i \cos A \cos B, A = \arctan \frac{\sin A}{\cos B}, B = \arctan \frac{\sin B}{\cos B}$ 。采用上述迭代方法，位姿正解的求解时间少于 5ms，能够满足控制系统实时控制的要求。

4 工作空间分析

工作空间反映机床可加工工件的大小。以运动学逆解方程为基础，采用极限边界数值搜索算法可求解其工作空间。因为本机床沿 X 轴方向的运动是由工作台独立驱动的，故该机床的工作空间是以 X 方向导轨行程为长度，以 Y-Z 平面六曲边形为截面的柱形。图 3 所示不同 A 转角下的工作空间。

5 五轴并联数控机床控制系统

控制系统原理采用“PC 总线工业控制计算机”+“DOS 环境(插补及实时多任务管理技术)”+“可编程多轴运动控制卡(多电机同步控制技术)”的体系结构。其框图见图 4。该体系结构将三维造型、自动编程(前置和后置处理)及 CNC 模块连接起来，可完成从零件造型到加工的全部过程。该系统具有自动、点动、步进、MDI、主轴修调、进给修调、超程解除、故障诊断等多种功能。

6 误差建模与精度补偿

已知并联机床各向误差随运动平台位姿的变化而变化，那么，可以假定机床的位姿误差为运动平台位姿的函数，以 x 向位姿误差为例说明建模过程。构造多项式误差模型如下：

$$\begin{aligned} \Delta x &= f_x(x, y, z, A, B, C) \\ &= a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4 A + a_5 B + a_6 C + a_7 x^2 + a_8 y^2 + a_9 z^2 + a_{10} A^2 + \\ &\quad a_{11} B^2 + a_{12} C^2 + a_{13} xy + a_{14} xz + a_{15} xA + a_{16} xB + a_{17} xC + a_{18} yz + a_{19} yA + a_{20} yB + \end{aligned}$$

341

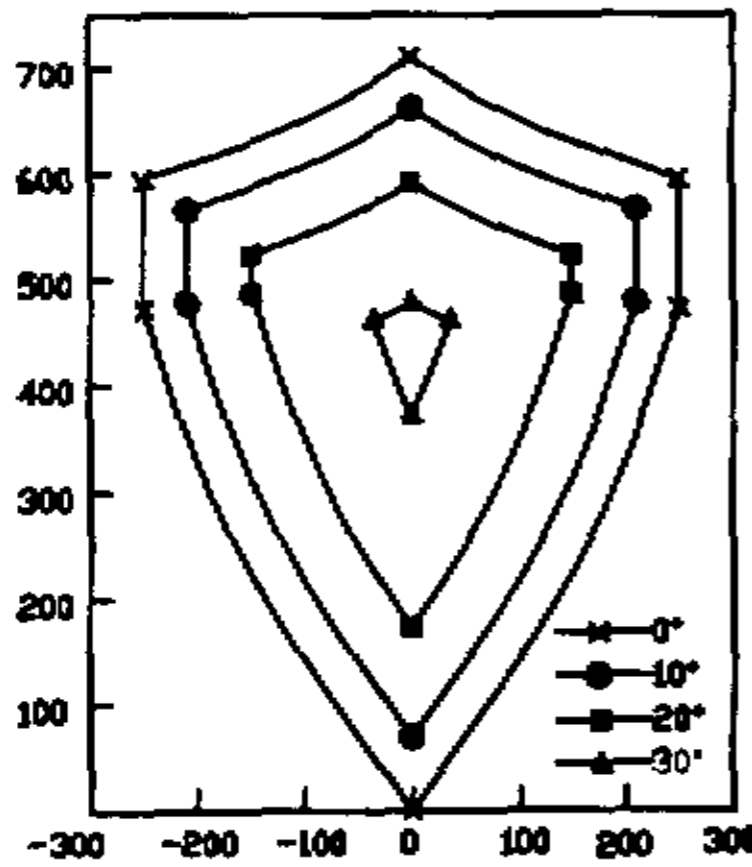


图3 五轴并联数控机床工作空间Y-Z截面图

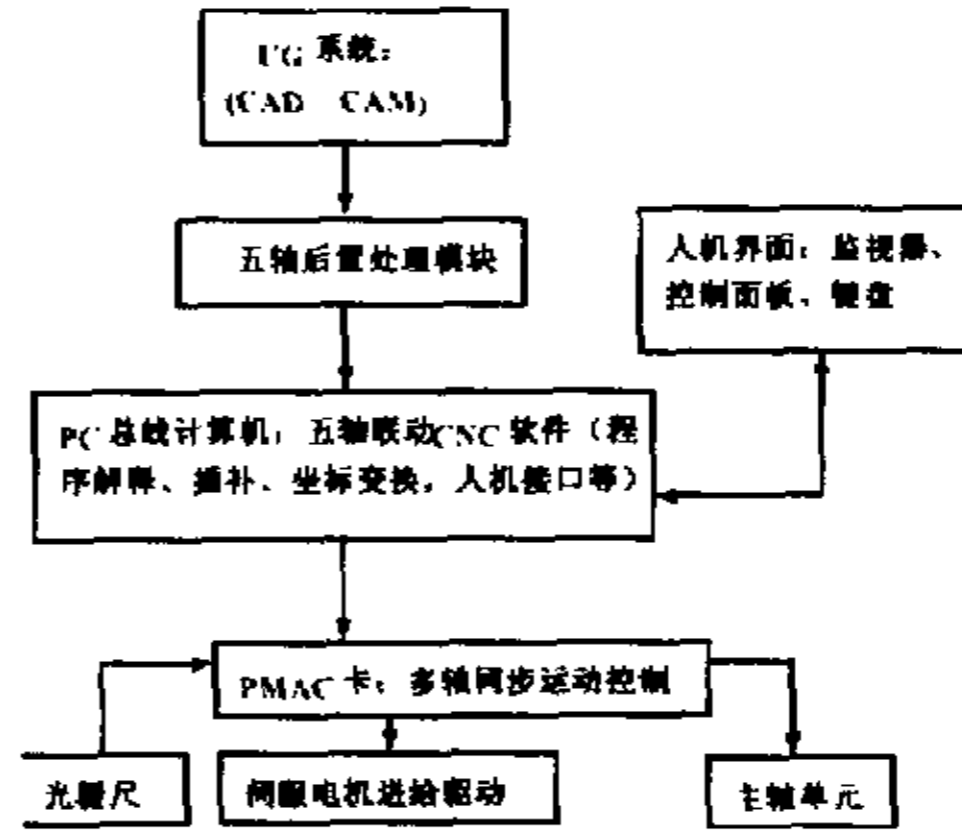


图4 控制系统原理框图

$$a_{21}yC + a_{22}zA + a_{23}zB + a_{24}zC + a_{25}AB + a_{26}AC + a_{27}BC + \dots \quad (4)$$

在式(1)中,令 $x_0=1, x_1=x, x_2=y, x_3=z, x_4=A, x_5=B, x_6=C, x_7=x^2, x_8=y^2, x_9=z^2, x_{10}=A^2, x_{11}=B^2, x_{12}=C^2, x_{13}=xy, x_{14}=xz, x_{15}=xA, x_{16}=xB, x_{17}=xC, x_{18}=yz, x_{19}=yA, x_{20}=yB, x_{21}=yC, x_{22}=zA, x_{23}=zB, x_{24}=zC, x_{25}=AB, x_{26}=AC, x_{27}=BC, \dots$, 式(1)可写成多元一次多项式的形式:

$$\Delta x = \sum_{i=0}^n a_i x_i \quad (5)$$

式中, n 为多项式项数. 计算残差平方和

$$S = \sum_{k=1}^m [\Delta x_k - \sum_{i=0}^n a_i x_{ki}]^2 \quad (6)$$

m 为测量结果数目. 依次对 a_i 求偏导, 并令:

$$\frac{\partial S}{\partial a_i} = -2 \sum_{k=1}^m [\Delta x_k - \sum_{i=0}^n a_i x_{ki}] x_{ki} = 0 \quad (7)$$

式(4)可写成如下形式:

$$GP^T = Q \quad (8)$$

式中: G —— $(n+1) \times (n+1)$ 阶系数矩阵

$$P = (a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$$

$$Q(i) = -2 \sum_{k=1}^m \Delta x_k x_{ki}$$

$$(i = 0, 1, 2, 3, \dots, n, j = 0, 1, 2, 3, \dots, n, k = 0, 1, 2, 3, \dots, m)$$

解式(5)得 P , 即为模型参数识别值. 将其代入式(1), 即可得到运动平台误差模型. 对并联机床任何位姿参量误差建模, 均可获得精确的误差模型, 利用所得模型对机床位姿进行补偿, 即可提高机床沿该位姿方向的定位精度.

7 结论

研制了一种新型结构五轴并联数控机床, 通过采用可调隙冗余自由度单元有效地增大了工作空间, 提高了系统的刚度, 依据测量数据反演建立五轴并联机床误差模型, 利用该模型对机床进行实时精度补偿, 提高了机床定位精度.

作者简介:

徐志刚 (1971-), 男, 硕士. 研究领域: 工业机器人及其应用.

24/2