

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.007

步进电机驱动六自由度并联运动平台设计

潘光绪, 贾光政*, 边颖聪, 刘旭, 陈佳丽

(东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 为了能够在实验室内进行小型仪器元件的六自由度运动模拟和演示, 设计了以步进电机驱动滚珠丝杠传动的小型六自由度并联运动平台。通过运动学反解建立了算法公式, 应用 Matlab 仿真, 得出了平台运动时各支路长度的变化曲线, 验证了求解算法的正确性; 运用 Kutzbach-Grubler 公式分析了电驱动 UPU 结构形式并联运动平台自由度的计算方法。根据给定参数建立了平台的三维模型, 进行了结构协调性检测, 并完成了步进电机驱动的六自由度平台的实体结构研制。将 LabVIEW 组态软件与 Matlab 脚本解算程序结合, 用于对平台的运动控制。测试结果表明: 平台完全可以按照预定轨迹进行空间 6 个自由度的运动, 实现对小型仪器元件的运动模拟。

关键词: 六自由度平台; 滚珠丝杠; 运动学反解; LabVIEW 控制

中图分类号: TH122; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1117-05

Design of the 6-DOF parallel platform driven by stepping motor

PAN Guang-xu, JIA Guang-zheng, BIAN Ying-cong, LIU Xu, CHEN Jia-li

(School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: In order to simulate different degrees of freedom for small instrument components in laboratory conditions, a 6-DOF parallel platform with stepping motor drive ball screw was designed. The algorithm formula was established by kinematic inverse solution, and the variation curve of the length of the tributaries is obtained by Matlab simulation to verify the correctness of the algorithm. The Kutzbach-Grubler formula was used to analyze the method of calculating the degree of freedom of the parallel motion platform in the UPU structure. The 3D model of the platform is established according to the given parameters, and the development of 6-DOF platform driven by stepping motor was completed. Combining the LabVIEW configuration software with the Matlab scripting program, the motion control of the platform was realized. The experimental results can be showed by the phenomenon that the platform can move six degrees of freedom in space according to the given trajectory, to achieve the movement simulation for small instrument components.

Key words: 6-DOF platform; ball screw; inverse kinematics; LabVIEW control

0 引言

六自由度并联机构于 1965 年由德国学者 Stewart D 提出^[1], 后又称为 Stewart 平台。按法国学者 Jean-Pierre Merlet 对于并联机构的定义, 并联机构就是一种运动末端与基座之间通过 2 个或 2 个以上支链进行连接的封闭机构, 根据 Stewart 平台的结构特性, 机构学上称其为

并联机器人^[2]。与串联机器人相比, 具有结构紧凑、刚度大、承载能力强、自重负荷比小、无累积误差、精度高、运动学反解相对简单等优点, 形成了功能互补, 结构和性能特点对偶的关系^[3-4]。随着六自由度并联运动平台的不断发展, 对 6-UPU 结构平台研究逐渐增多^[5-6], 大型六自由度并联运动平台主要采用液压驱动, 广泛应用于海洋平台运动仿真^[7], 飞行模拟器^[8]等。而小型六

收稿日期: 2016-12-26

作者简介: 潘光绪 (1993-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 主要从事机械设计、机电一体化方面的研究。E-mail: guangxupan@yeah.net

通信联系人: 贾光政, 男, 博士, 教授。E-mail: jiaguangzheng@126.com

自由度并联运动平台，考虑其体积和成本等因素的影响，多采用电动缸作为中间传动装置。电动缸在复杂的环境下工作只需要定期的注脂润滑，并无易损件需要维护更换，将比液压系统和气压系统减少了大量的维修成本。

为能够在实验室条件下进行多自由度的运动模拟，本研究设计以步进电机驱动滚珠丝杠为中间传动部件的小型六自由度并联运动平台。

1 数学模型的建立与运动学分析

1.1 平台结构确定

六自由度并联运动平台由一个上平台，一个下平台以及多个支路组成。为便于描述平台的空位置，方便运动控制，建立两个坐标系：动坐标系 $O_L-X_L Y_L Z_L$ 及静坐标系 $O_W-X_W Y_W Z_W$ ，简称为坐标系 $\{L\}$ 和坐标系 $\{W\}$ ，其模型如图 1 所示。

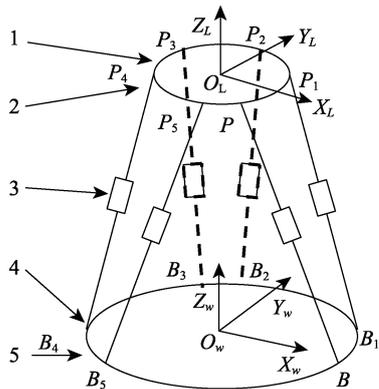


图 1 6-UPU 并联运动平台坐标示意图

1-上平台；2-上铰点；3-中间传动装置；4-下铰点；5-下平台

6 个上铰点 P_i 依次连线构成一个对称多边形，6 个下铰点 B_i 依次连线也构成一个对称多边形，上、下铰点分别在两个半径不同的圆上。下平台静坐标系 $\{W\}$ 固定在下平台处，且原点 O_W 与下平台几何中心重合。上平台动坐标系 $\{L\}$ 固定在上平台处且随上平台一起运动，原点 O_L 与上平台几何中心重合。在初始状态下，动静坐标系坐标轴方向重合且 Z_W 轴穿过上平台中心点。

该机构中的构件数共有 14 个：分别是上、下平台，6 个电动缸的缸筒部分及驱动杆。该机构的运动副是上、下共 12 个虎克铰（每个虎克铰包含两个转动副）和 6 根电动缸（每个电动缸包含一个移动副），即运动副的总数为 18 个。

自由度计算公式（Kutzbach-Grubler）为^[9]：

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \zeta \quad (1)$$

式中： M —自由度数； d —机构的阶数； n —构件总数；

g —运动副的数目； f_i —第 i 个运动副所具有的自由度； v —多环并联机构冗余约束的数目； ζ —机构的局部自由度数目。

由上述分析可知，该机构 $n=14$ ， $g=18$ ，每个虎克铰只有 2 个相对转动的自由度，每个电动缸只有 1 个自由度，电动缸内螺旋副看做机构的冗余约束，机构内无局部自由度。将各数据代入上式可得：

$$M = 6(14 - 18 - 1) + (12 \times 2 + 6 \times 1) + 6 = 6$$

由此，上下平台、6 根电动缸及上、下两端都是虎克铰构成的并联平台即有 6 个自由度，在三维空间可以做 3 个方向的平移和 3 个方向的旋转转动。

1.2 运动学反解

6 个电动缸的往复直线运动可以带动上平台进行位姿变换，由上平台的位置参数求解 6 个电动缸驱动杆的长度称为多自由度平台运动学反解^[10]。

假设平台绕 x, y, z 轴的旋转角度分别为 α, β, γ 。经过 RPY 变换^[11]后得旋转矩阵 R 为：

$$R = R(z, \gamma)R(y, \beta)R(x, \alpha) = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & c\gamma s\alpha s\beta - s\gamma c\alpha & s\alpha s\gamma + c\alpha s\beta c\gamma \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & s\beta s\gamma c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & s\alpha c\beta & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $s\alpha = \sin\alpha$ ， $c\beta = \cos\beta$ ，其余以此类推。

设动坐标系 $O_L-X_L Y_L Z_L$ 的原点 O_L 在定坐标系 $O_W-X_W Y_W Z_W$ 中的平移量为 (x_p, y_p, z_p) ，经过平移和旋转之后的齐次变换矩阵为：

$$T = \begin{bmatrix} & & x_p \\ & R & y_p \\ & & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

即动坐标系中某点 P_i 经过上述平移和旋转之后在定坐标系中的齐次坐标 P 为：

$$P = TP_i \quad (4)$$

根据位置矢量关系，可得到支路 i 中的上铰点 P_i 在定坐标系 $\{W\}$ 中的位置矢量关系为：

$$P + P_i = b_i + l_{1i}n_{1i} + l_{2i}n_{2i} \quad (5)$$

式中： P_i —上铰点 P_i 在体坐标系 $\{L\}$ 中的位置矢量在惯性坐标系 $\{W\}$ 中的表示； P —动平台上控制点 O_L 在坐标系 $\{W\}$ 中的位置矢量； b_i —下铰点 B_i 在坐标系 $\{W\}$ 中的位置矢量； l_{1i} —支路 i 中电动缸从点 B_i 到活塞下端面的轴向距离，是一个变化量； l_{2i} —支路 i 中电动缸从点 P_i 到活塞下端面的轴向距离，是一个固定值； n_{1i} —电动缸缸筒的轴线单位矢量方向； n_{2i} —电动缸活塞杆的轴线单位矢量方向，且有 $n_{1i} = n_{2i}$ 。

在支路 i 中, 电动缸从点 B_i 到点 P_i 的轴向距离为:

$$l_i = l_{i1} + l_{i2} \quad (6)$$

由式 (4, 5) 可得 l_i 的值为:

$$l_i = \sqrt{(\mathbf{p} + \mathbf{p}_i - \mathbf{b}_i)^T (\mathbf{p} + \mathbf{p}_i - \mathbf{b}_i)} \quad (7)$$

由此便可得到各支路电动缸的实时轴向距离。将 l_i 进行一阶及二阶求导, 便可得到各支路电动缸的运动速度及加速度。

2 结构设计

本研究根据运动学反解分析以及给定的运动空间的运动范围, 并结合平台的运动规律, 该并联六自由度运动平台的设计参数如表 1 所示。

表 1 并联六自由度运动平台设计参数

参数	尺寸
电动缸数量/个	6
动平台 6 角点长边对应圆心角/(°)	75
动平台 6 角点短边对应圆心角/(°)	45
固定平台 6 角点长边对应圆心角/(°)	90
固定平台 6 角点短边对应圆心角/(°)	30
电动缸最小长度/mm	485
电动缸最大长度/mm	585
动平台 6 角点分度圆直径/mm	308
固定平台 6 角点分度圆直径/mm	500
平台最大有效负载重量/N	50

本研究依据 Stewart 类并联运动平台的结构特征^[12], 将该并联六自由度运动平台的机械结构分为上平台、上虎克铰、电动缸、下虎克铰、下平台等 5 大模块。

2.1 虎克铰结构设计

在设计万向节传动装置时, 可以选择虎克铰或者是球铰, 但是虎克铰较之球铰受拉性能较好^[13], 本身转角范围较大, 因此采用虎克铰将电动缸连接于动、定平台之间。

虎克铰结构如图 2 所示。

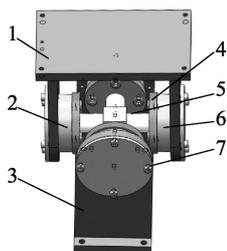


图 2 虎克铰三维结构图

1-传动轴叉; 2-轴承套; 3-万向节叉; 4-透盖; 5-十字轴; 6-滚针轴承; 7-内多角螺钉

在该虎克铰中, 以十字轴为载体, 以滚针轴承为支撑, 传动轴叉与万向节叉可以绕着十字轴产生两个自由度的旋转运动, 通过上、下共 12 个虎克铰的联动及电动缸的往复直线运动, 便可以使上平台在一定范围内按六个自由度方向运动。

2.2 电动缸结构设计

相对于液压传动系统而言, 电传动系统具有起停容易、转动惯量小、加减速性能好等优点, 因而在轻载的情况下, 电机传动在高速、高精度、小型化、节能等方面更能满足工业机器人的需要^[14]。因此, 中间传动系统采用步进电机+齿轮传动+滚珠丝杠传动形式。结构如图 3 所示。

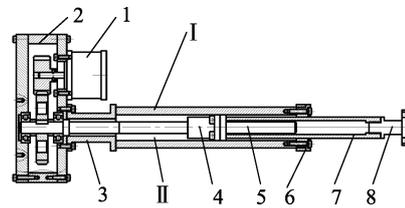


图 3 电动缸结构图

1-步进电机; 2-齿轮传动箱; 3-电动缸壳体(I、II平行板约束); 4-防转螺母; 5-滚珠丝杠; 6-端部导向套; 7-伸缩杆; 8-接头

伸缩杆与防转螺母定位安装, 防转螺母将丝杠的旋转运动转化为伸缩杆的直线运动。电动缸壳体两侧设计成平行板导向约束结构, 使其内表面与防转螺母的侧平面间隙配合, 产生转动约束, 并兼顾伸缩导向。伸缩杆与电动缸壳体上端部采用圆柱面间隙配合, 保证伸缩杆运动具有良好的导向性, 防止产生伸缩卡阻现象。

2.3 六自由度平台结构设计

本研究利用 SolidWorks 建立的小型六自由度并联运动平台三维模型如图 4 所示。

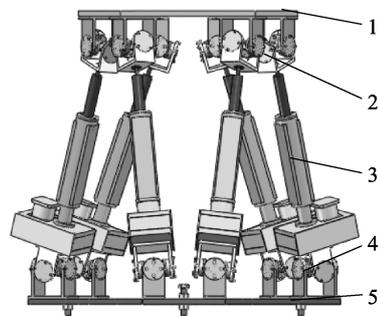


图 4 六自由度运动平台三维模型图

1-上平台; 2-上虎克铰; 3-电动缸; 4-下虎克铰; 5-下平台

平台总体结构为 UPU 结构, 上、下铰链均采用虎

克铰,受拉性能更好,设计更加模块化;丝杠螺母副将滚珠丝杠的旋转运动转变为直线运动,从而替代了液压缸的往复直线运动,与液压传动相比,既减少了复杂的配套元器件的使用,又保证了运动的精度要求。

3 基于 Matlab 的运动学仿真

本研究在 Matlab 环境中,首先给出动平台的运动轨迹,经过模型仿真后,Matlab 会输出各支路长度在一定时间内的变化曲线。

首先,设定输入信号的正弦波为 $y=50 \sin t$,设定上平台绕 Y 轴方向做旋转运动,振幅 50 mm,频率 1 Hz,仿真时间 $0\sim 2\pi s$,得各支路杆长变化曲线,如图 5 所示。

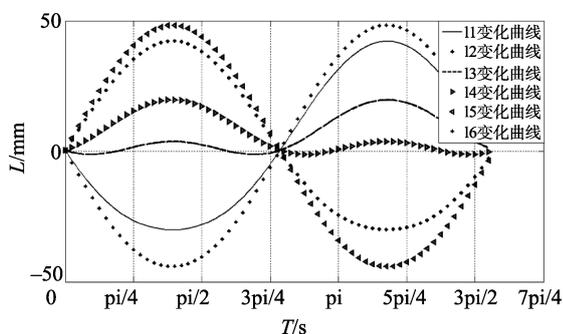


图 5 上平台沿 Y 轴平移时各支链位移曲线

通过分析平台运动仿真曲线可知,并未发生干涉、碰撞等非正常现象,在 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 几个采样时间点基本符合运动规律,说明了该解算方法可行,该轨迹可作为平台的实际运动轨迹。因此可将各杆长变化参数转换为实际脉冲值以驱动步进电机运动。

在 $2\pi s$ 时间内,以 $0.1 s$ 为时间间隔取出所有点的纵坐标即实时支路长度存入“txt 文本数据库”,作为脉冲数据源,当需要向步进电机发送控制命令时,调用数据库内前后两点的差值作为本次电机转数的基础数据,配合步进驱动器“每转步数”参数便可发射相应数量的脉冲驱动步进电机转动。采样周期过长,运动失真,采样周期过短,运算量较大,从图 5 中可知,在到达第一个采样周期即 $0.1 s$ 时便完成运动响应,保证了控制的实时性。此方法可扩展到多个运动周期。

平台的运动原理为:

步进电机接受脉冲指令后,按照一定的方向和速度转动,通过传动箱内齿轮副减速增扭后将运动传递给滚珠丝杠,螺母副将丝杠的旋转运动变为直线运动,通过与上、下虎克铰的旋转运动配合,带动下平台完成 3 个方向的平移及 3 个方向的旋转运动,实现动平台在空间 6 个自由度的运动。

4 控制系统的设计

4.1 控制流程

六自由度并联运动平台控制系统涉及了电气、计算机、空间机构解算、软件编程、组态监控等多学科、多领域知识。以“工控机+运动控制卡”的控制模式为基础,采用开放性系统^[15]和模块化设计对控制系统进行设计。控制原理图如图 6 所示。

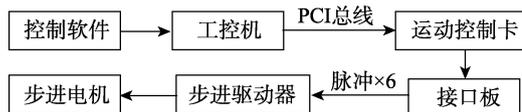


图 6 系统控制原理图

上位机采用工控机,下位机采用 ADT-856 运动控制卡。控制流程图如图 7 所示。

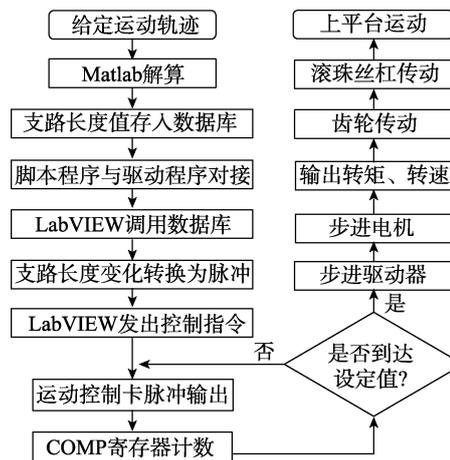


图 7 运动平台控制流程

控制软件采用 LabVIEW 软件,将 Matlab 解算程序作为数学脚本嵌入到 LabVIEW 程序框图中。进行运动演示之前,将需要的平台运动姿态输入到控制界面中,界面中的“运行轨迹”与 Matlab 脚本程序呼应,解算之后在 LabVIEW 中将杆长变化量转换为脉冲值,通过运动控制卡及接口板将驱动命令发送给步进驱动器,驱动器将信号放大后,驱动步进电机按照给定的方向和频率运动。

该系统为半闭环控制,可以不安装位移传感器。通过运动控制卡内置的 COMP+寄存器和 COMP-寄存器分别不断检测比较对象计数值的上限和下限,并将检测值反馈到 LabVIEW。当计数器数值超过 COMP+寄存器设定值时,控制卡正方向驱动命令自动停止;当计数器数值超出 COMP-寄存器设定值时则负方向驱动命令自动停止,从而达到软件限位的目的,既使控制回路大大简化又节省了成本。

4.2 试验结果及分析

笔者研制的六自由度运动平台及其控制系统如图 8 所示。

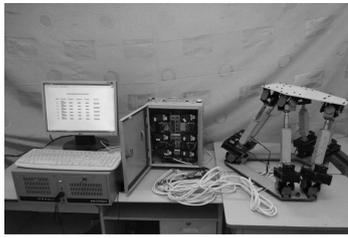


图 8 六自由度运动平台及控制系统

笔者按照前文所述运动姿态,使平台绕 Y 轴做旋转运动,从图 8 中可见,平台有绕着 Y 轴做旋转运动的确定性运动,实现了平台的准确运动控制。说明了解算方法的正确性,结构的合理性以及控制的准确性。运行模式可选择按单自由度模式运行,也可选择按多自由度模式运行。开始运行前,笔者将电机位置回零,设置各支路的初始速度、驱动速度及加速度。

相应的控制界面如图 9 所示。



图 9 小型六自由度并联运动平台控制界面

5 结束语

为了能够在实验室条件下对小型仪器进行运动模拟,笔者研制了以步进电机驱动滚珠丝杠传动的小型六自由度并联运动平台。通过运动学反解得出了给定姿态下平台运动的算法公式,并运用 Kutzbach-Grubler 公式说明了电驱动 UPU 结构平台自由度计算方法。

笔者设计了新型结构的虎克铰和电动缸,在 SolidWorks 环境下建立了平台各部分的三维模型并完成了装配;通过 Matlab 脚本程序与 LabVIEW 组态软件的有机结合,实现了运动解算与驱动控制的有效对接。LabVIEW 与运动控制卡结合使用保证了脉冲信号的有效传递,通过运动控制卡内 COMP 寄存器实现了系统

的半闭环控制。

试验结果表明,该平台完全可以按照预定轨迹进行 6 个自由度的运动,达到了本研究的运动模拟目的。

参考文献(References):

- [1] STEWART D. A platform with six degrees of freedom a new form of mechanical linkage which enables a platform to move simultaneously in all six degrees of freedom developed by Elliotte-automation[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1966, 38(4): 30-35.
- [2] 熊文文. 基于六自由度并联机构的汽车模拟驾驶设备的研究[D]. 长沙: 湖南大学机械与汽车工程学院, 2014.
- [3] 刘 胜, 宋 佳, 李晚龙, 等. 并联六自由度运动平台控制系统研究[J]. *自动化技术与应用*, 2006, 25(4): 7-10.
- [4] 李 磊. 六自由度并联平台运动规律及控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学机电工程学院, 2007.
- [5] 武光华, 龚烈航, 潘春萍, 等. 6-UPU 电动平台安全性设计分析[J]. *机械设计*, 2011, 28(9): 83-88.
- [6] 赵 强, 阎绍泽. 双端虎克铰型六自由度并联机构的动力学模型[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2005, 45(5): 610-613.
- [7] 吕 锋. 六自由度并联船舶运动模拟器的设计及其控制系统设计[D]. 镇江: 江苏科技大学机电工程学院, 2012.
- [8] 杨灏泉, 赵克定, 吴盛林, 等. 飞行模拟器六自由度运动系统的关键技术及研究现状[J]. *系统仿真学报*, 2002, 14(1): 84-87.
- [9] 侯骏飞. 双端虎克铰型并联六自由度平台运动及其控制系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 2016.
- [10] 段建民, 刘 磊. 基于虚拟样机技术的六自由度平台运动学仿真[J]. *机械设计与制造*, 2011(1): 81-83.
- [11] 朱世强, 王宣银. 机器人技术及其应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.
- [12] KARMJIT S G, ROGER D, PEARSONK J. LQG controller design applied to a pneumatic stewart-gough platform[J]. *International Journal of Automation & Computing*, 2012, 9(1): 45-53.
- [13] 黄 真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [14] 党田峰. 液压六自由度并联机构虚拟样机研究[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学院, 2008.
- [15] 侯凯翔. 六自由度动感体验设备及控制系统开发[D]. 长春: 吉林大学机械工程学院, 2011.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

潘光绪, 贾光政, 边颖聪, 等. 步进电机驱动六自由度并联运动平台设计[J]. *机电工程*, 2017, 34(10): 1117-1121.

PAN Guang-xu, JIA Guang-zheng, BIAN Ying-cong, et al. Design of the 6-DOF parallel platform driven by stepping motor [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(10): 1117-1121.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>