

基于遗传算法的冗余任务并联机器人驱动优化^{*}

刘 玮 常思勤

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

【摘要】 以六棱锥式并联机器人为研究对象,采用拉格朗日法建立机构动力学模型,结合直线电动机设计原理,获得驱动电流与任务轨迹之间变化的对应关系。基于遗传算法以瞬时动能最小为优化目标对电动机驱动力进行优化,优化后能耗较非冗余任务能耗降低了47.6%。进行了样机冗余任务轨迹实验,实验结果表明电流变化与仿真结果吻合,验证了优化方法的可行性和合理性。

关键词: 并联机器人 动力学 遗传算法 冗余优化

中图分类号: TH112; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0221-04

Drive Optimization of Parallel Robot under Redundant Tasks Based on Genetic Algorithm

Liu Wei Chang Siqin

(College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract

A six pyramid parallel robot was taken as the object, and the dynamic model of the robot was established by using the Lagrange method. The relationship between the drive current and tasks trajectory was analyzed combined with the design principle of linear motor. With the goal of minimum instantaneous kinetic energy, motor drive was optimized based on genetic algorithm. Energy consumption optimized was reduced by 47.6% compared with non redundant tasks. The experiment of redundant track tasks was carried out. The experimental results showed that the current change was in good agreement with the simulation results, and the feasibility and rationality of this optimization method was verified.

Key words Parallel robot, Dynamics, Genetic algorithm, Redundant optimization

引言

当机构自由度大于任务空间维数时,并联机器人处于驱动冗余状态。驱动冗余可以提高机构的承载能力,获得较好的刚度特性和动态性能。目前对冗余机器人的研究主要分为运动学和动力学两部分。Wang^[1]和张立杰^[2]等研究了冗余机器人的奇异性和工作空间等问题,Cheng等^[3]研究了冗余机器人的控制问题。而对于冗余驱动力优化问题目前主要有3种优化方法:加权伪逆法、拉格朗日法和直

接代入法。邵华等^[4]对一种4自由度冗余并联机器人进行驱动力解析,可降低最大驱动力幅值。Müller等^[5]通过合适的驱动力分配消除反冲力,提高了机构的精度。Garg等^[6]提出了一种比例因子比较的解析方法进行驱动力优化。

针对文献[7]中提出的一种六棱锥式并联机器人机构,本文采用拉格朗日法从能量角度建立机器人的动力学模型,并引入遗传算法研究其在冗余任务下以瞬时动能最低为目标的驱动力优化问题。旨在通过对驱动力的合理分配实现驱动器瞬时负载与

收稿日期: 2012-01-09 修回日期: 2012-02-06

^{*} 江苏省科技支撑计划资助项目(BE2008133)

作者简介: 刘玮,博士生,主要从事并联机器人机构学、运动学和动力学研究,E-mail: singo5151@163.com

通讯作者: 常思勤,教授,博士生导师,主要从事高性能电磁直线执行器、车辆电子控制研究,E-mail: changsq@mail.njust.edu.cn

瞬时输出功率的均衡优化。

1 六棱锥式并联机器人机构

1.1 结构组成与工作原理

六棱锥式并联机器人结构简图如图 1 所示。系统定义了 2 个笛卡尔坐标系：① 惯性参考坐标系 $Oxyz$ ，其坐标原点为 6 根导轨方向延长线交点。② 动坐标系 $O'xyz$ ，固联于负载平台质心，坐标轴初始状态下与惯性坐标系坐标轴平行。6 根导轨倾斜布置于下平台，运动连杆下端通过球铰副 B_i 与导轨动子铰接，上端通过虎克铰 A_i 共同联接于负载平台。机构通过 6 个动子在导轨 $Di - Di' (i = 1 \sim 6)$ 内的往复运动实现负载平台中心沿直角坐标系的 3 个方向的平动以及绕坐标轴的 3 个方向的转动。

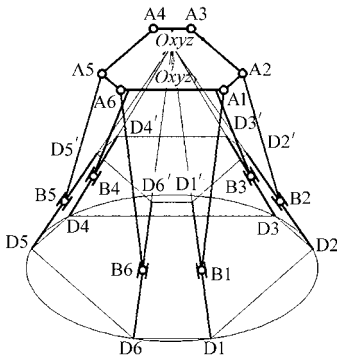


图 1 六棱锥式并联机器人结构简图
Fig. 1 Structure diagram of six pyramid parallel robot

1.2 机构自由度计算

六棱锥式并联机器人活动构件包括 6 个电动机动子、6 根运动连杆以及负载平台，总计数量为 13 个；运动副包括 6 个移动副、6 个虎克铰副以及 6 个球铰副，总计数量为 18 个；球铰副限制自由度为 3，虎克铰副限制自由度为 4，移动副限制自由度为 5。由 Kutzbach-Grubler 公式^[8]计算机构运动自由度数为

$$f_0 = 6m - \sum_{i=1}^n f_i \tag{1}$$

式中 m ——活动构件数 n ——运动副数
 f_i ——运动副限制自由度与相应运动副个数的乘积

由式(1)可以计算出机构的自由度为 6。

2 动力学建模

目前建立并联机器人动力学模型方法主要有牛顿欧拉法、拉格朗日法、凯恩方程法和虚功原理等，各种方法从本质来说都是等价的，只是分析的角度不同。其中拉格朗日法^[9]从能量的角度建立动力学模型，方程能够获得解析解并能确定系统的动力学特性。

2.1 拉格朗日方程

拉格朗日函数 Γ 定义为机械系统的动能 K_E 和势能 K_p 之差。对于六棱锥式并联机器人，系统的哥氏力和离心力一般较小，可以忽略不计。若定义负载平台输出位姿 $\mathbf{P} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 和电动机的驱动力 $\boldsymbol{\tau}$ ，则系统的拉格朗日方程写为矢量的形式为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \dot{\mathbf{P}}} \right) - \frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{P}} = \boldsymbol{\tau} \tag{2}$$

若将系统动能和势能表示为

$$\begin{cases} K_E = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{P}}^T \mathbf{M}(\mathbf{P}) \dot{\mathbf{P}} \\ K_p = F(\mathbf{P}) \end{cases} \tag{3}$$

则并联机器人的拉格朗日动力学方程为

$$\mathbf{M}(\mathbf{P}) \ddot{\mathbf{P}} + \mathbf{G}(\mathbf{P}) = \boldsymbol{\tau} \tag{4}$$

式中 $\mathbf{M}(\mathbf{P})$ ——惯性矩阵，由系统动能获得，包括负载平台惯性矩阵和连杆惯性矩阵

$\mathbf{G}(\mathbf{P})$ ——系统势能偏导数

2.2 系统动能

六棱锥式并联机器人的动能可以分为两部分：负载平台动能和连杆动能。若负载平台总质量为 m ，质心速度为 $(\mathbf{v}_p, \boldsymbol{\omega}_p)$ ，绝对坐标系中的绕坐标轴的转动惯量为 $\mathbf{I}$ ，坐标系变换矩阵为 $\mathbf{R}$ ，其动能可以表示为

$$K_{E1} = \frac{1}{2} (m \mathbf{v}_p^2 + \boldsymbol{\omega}_p^T \mathbf{R} \mathbf{I} \mathbf{R}^T \boldsymbol{\omega}_p) \tag{5}$$

对于有负载的平台，若其质心与负载平台几何中心的距离为 s ，将式(5)转换成式(3)的形式，则可得负载平台的惯性矩阵为 $\mathbf{M}_1^{6 \times 6}$ 。

由于六棱锥式并联机器人将驱动电动机固定于底平面，相对于传统 Stewart 平台来说，连杆在运动过程中的转动惯量大大降低，因此在计算连杆动能时，为简化模型将连杆视为质点。若有连杆质量为 m_i ，则第 i 根连杆的动能可以表示为

$$K_{E2} = \frac{1}{2} m_i \sum_{i=1}^6 (\mathbf{v}_{Ai} + \mathbf{v}_{Bi})^T (\mathbf{v}_{Ai} + \mathbf{v}_{Bi}) \tag{6}$$

为求得连杆的惯性矩阵，需要将 $\mathbf{v}_{Ai}$ 和 $\mathbf{v}_{Bi}$ 用 $\mathbf{P}$ 的导数来表示。并联机器人的雅可比矩阵表征输入速度和输出速度之间的映射关系，从六棱锥式并联机器人运动过程中杆长不变的集合条件能够得出电动机位移输入 $\mathbf{B}$ 和负载平台位姿输出 $\mathbf{P}$ 关系并对其求导得

$$\dot{\mathbf{B}} = - \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{B}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{P}} \dot{\mathbf{P}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{P}} \tag{7}$$

式中 $\mathbf{J}$ ——雅可比矩阵

而 $\mathbf{v}_{Ai}$ 与负载平台输出点处于同一个刚体上，若

刚体质心到各铰点的向量为 $\mathbf{r}_{Ai}$, 由刚体运动学可知两者关系为

$$\mathbf{v}_A = \mathbf{v}_P + \boldsymbol{\omega}_P \times \mathbf{r}_{Ai} = \mathbf{G} \dot{\mathbf{P}} \quad (8)$$

可得连杆的惯量矩阵为

$$\mathbf{M}_2 = \sum_{i=1}^6 (\mathbf{G} + \mathbf{J})^T (\mathbf{G} + \mathbf{J}) \quad (9)$$

2.3 系统势能

负载平台的势能由质心相对于绝对坐标系 $Oxyz$ 的垂直距离决定, 将连杆视为质点则连杆势能只与质心的坐标有关, 得到系统势能的表达式为

$$K_p = mg(z + s \cos \beta \cos \alpha) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 m_{li} g (z_{Ai} + z_{Bi}) \quad (10)$$

由式(4)、(5)、(9)、(10)可得六棱锥式并联机器人对于一个六维输出的轨迹任务, 需要提供的电动机驱动力为

$$\boldsymbol{\tau} = (\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2) \ddot{\mathbf{P}} + \frac{\partial K_p}{\partial \mathbf{P}} \quad (11)$$

3 基于遗传算法的驱动优化

3.1 遗传算法优化

当目标任务轨迹只与输出位置 (x, y, z) 有关, 该任务为 3 自由度冗余任务。由式(11)可知, 满足动力学方程组的驱动力解不唯一, 驱动力优化旨在找出最优的转动角 (α, β, γ) 使得瞬时动能最小, 从而保证六棱锥式并联机器人良好的动力学特性。对于该类复杂非线性问题, 引入遗传算法^[10-11]对目标任务进行优化:

(1) 编码。3 个转动角变量 (α, β, γ) 在 $[-\pi/3, \pi/3]$ 范围内, 采用二进制编码, 个体数量为 100, 最大遗传代数为 500, 每个变量使用 20 位表示, 使用代沟为 0.9。

(2) 适应度函数。以瞬时动能为优化目标, 当位姿输出为 $\mathbf{P} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 时, 瞬时动能可以表示为

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{P}}^T (\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2) \dot{\mathbf{P}} \quad (12)$$

(3) 选择、交叉、变异算子。为防止迭代过早收敛, 采用新个体插入种群的方法, 达到最大遗传代数后, 最终获得最优解。

3.2 优化仿真

六棱锥式并联机器人结构参数包括: 连杆长度 $L = 28$ cm; 负载平台半径 $r = 8$ cm; 直线电动机行程 $D = 10$ cm; 电动机倾斜角度 $\theta = 45^\circ$ 。负载平台平动运动规律为

$$\begin{cases} x = 0.1t^2 - 0.6t + 1 \\ y = -0.1t^2 + 0.3t + 2 \\ z = 0.02t - 3 \end{cases} \quad (13)$$

使用 Matlab 编程, 在 $t = 0 \sim 10$ s 内, 计算出使瞬时动能最小的转动角。为了便于比较, 将转动角 $(\alpha, \beta, \gamma) = (0, 0, 0)$ 代入式(12)得到非冗余状态下瞬时动能的变化曲线, 如图 2 所示。

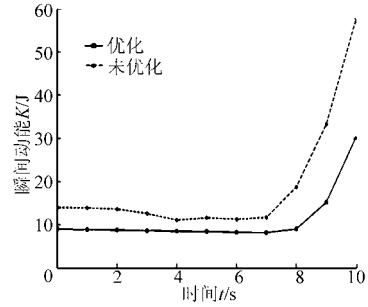


图 2 瞬时动能变化曲线

Fig. 2 Change curves of instantaneous kinetic energy

由图 2 可看出, 对于式(13)的运动规律, 在 $t = 0 \sim 7$ s 内, 优化后的瞬时动能在 8.2 ~ 9.0 J 内缓慢增大; 未优化的瞬时动能则在 11 ~ 14 J 内波动, 说明经过驱动力分配优化后六棱锥式并联机器人运动所需能量值稳定。在 $t = 7 \sim 10$ s 内, 并联机器人完成任务所需的动能大大增加, 优化后能量增长的斜率降低, 所需动能的最大值为 30.32 J, 而未优化所需最大动能为 57.84 J。仿真结果表明, 基于遗传算法的六棱锥式并联机器人 3 自由度冗余任务优化能够将系统瞬时动能需求降低 47.6%。

4 实验验证

4.1 样机系统组成

基于文献[7]的理论研究, 研制了六棱锥式并联机器人样机并基于 dSPACE 系统进行运动控制(图 3)。样机系统主要组成包括: dSPACE 系统, 包括驱动器和 I/O 板用于系统控制; 电流传感器, 用于测量驱动电动机线圈电流; 航姿传感器, 用于测量负载平台位姿; 六棱锥式并联机器人; 直线位移传感器, 用于测量电动机动子位置; 上位机, 使用 ControlDesk 软件进行实验监控与数据处理。

当六棱锥式并联机器人完成任务轨迹时, 由航姿传感器监控负载平台的运动轨迹, 同时能够测得电动机动子的位移变化曲线以及直线电动机的电流变化曲线。由安培力公式 $F = BIL$ 可知, 直线电动机电流与驱动力呈正比关系, 所研究的直线电动机常数 $BL = 18$; 需要注意的是, 由式(11)计算出的驱动力 $\boldsymbol{\tau}$ 为电动机驱动力 $\mathbf{F}$ 与电动机阻力 $\mathbf{F}_0$ 的合力,

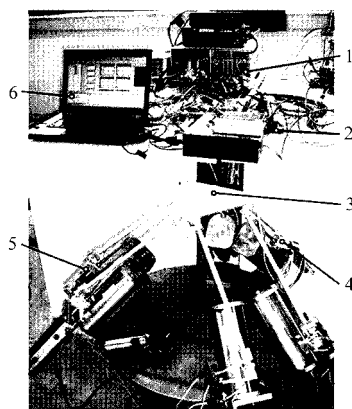


图3 六棱锥式并联机器人系统

Fig. 3 System of six pyramid parallel robot

1. dSPACE 系统 2. 电流传感器 3. 航姿传感器 4. 六棱锥式并联机器人 5. 直线位移传感器 6. 上位机

因此可以得出直线电动机电流与运动轨迹之间的关系为

$$I = \frac{\tau + F_0}{BL} \quad (14)$$

4.2 实验验证与分析

由遗传算法优化得到完成任务轨迹式(13)的最优解集合能够得到理论驱动电流变化曲线。当六棱锥式并联机器人系统按照最优解集合拟合的规律运动时,可以测得各个驱动电动机的电流变化曲线。为了验证优化方法,将仿真电流变化曲线和实验测得的电流变化曲线作对比,如图4所示。

由图4可以看出,实测电流略高于仿真结果的原因主要包括:驱动电动机阻力在仿真时为定值,而实际运动中由于连杆正压力随运动规律变化导致阻

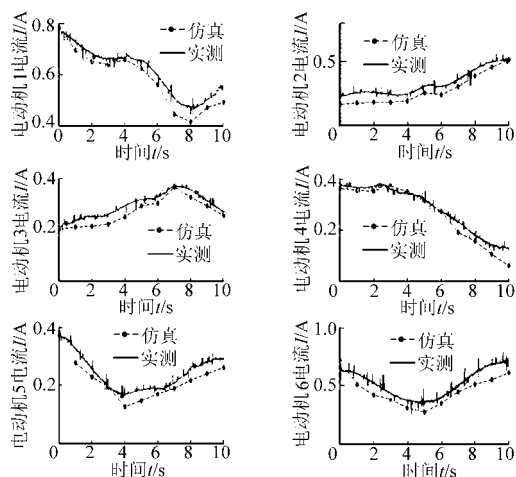


图4 仿真电流与实测电流对比

Fig. 4 Comparison of simulation and measured current

力变化;电流传感器测量误差。实验结果表明,实际电流变化与仿真结果吻合,上述基于遗传算法的优化方法是可行的。

5 结论

(1)简述了一种六棱锥式并联机器人结构,建立了机构动力学模型,得到了驱动电动机电流与负载平台轨迹之间的关系。

(2)基于遗传算法的3自由度冗余任务驱动力优化能够使能耗较非冗余任务所需能耗降低47.6%。

(3)六棱锥式并联机器人系统轨迹实验结果表明,实测电流与仿真电流变化吻合,上述优化算法是可行的、合理的。

参考文献

- Wang J, Gosselin C M. Kinematic analysis and design of kinematically redundant parallel mechanisms [J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(1):109~118.
- 张立杰,牛跃伟,李永泉. 球面二自由度冗余驱动并联机器人可达工作空间的分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(24): 2974~2978.
Zhang Lijie, Niu Yuewei, Li Yongquan. Research on workspace of a spherical 2-DOF parallel manipulator with actuation redundancy[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(24): 2974~2978. (in Chinese)
- Cheng H, Yiu Y K, Li Z X. Dynamics and control of redundantly actuated parallel manipulators [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(4):483~491.
- 邵华,关立文,王立平,等. 冗余并联机床驱动力优化解析[J]. 清华大学学报, 2007, 47(8):1325~1329.
Shao Hua, Guan Liwen, Wang Liping, et al. Drive force optimization for a redundant parallel machine [J]. Journal of Tsinghua University, 2007, 47(8):1325~1329. (in Chinese)
- Müller A, Maisser P. Generation and application of prestress in redundantly full-actuated parallel manipulators [J]. Multibody System Dynamics, 2007, 18(2):259~275.
- Garg V, Nokleby S B, Carretero J A. Wrench capability analysis of redundantly actuated spatial parallel manipulators [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(5):1070~1081.

- 3 陆海波,邓海涛,朱延松. 往复式电脑控制喷涂机设计的几个要点[J]. 苏盐科技,2000,3(1):31~33.
Lu Haibo, Deng Haitao, Zhu Yansong. Several design points of reciprocating spraying machine [J]. Jiangsu Salt Science & Technology, 2000, 3(1): 31~33. (in Chinese)
 - 4 李发忠,赵德安,张超,等. 基于CAD的喷涂机器人轨迹优化[J]. 农业机械学报,2010,41(5):213~217.
Li Fazhong, Zhao Dean, Zhang Chao, et al. Trajectory optimization of spray painting robot based on CAD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(5):213~217. (in Chinese)
 - 5 陈伟,赵德安,汤养. 自由曲面喷漆机器人喷枪轨迹优化[J]. 农业机械学报,2008,39(1):147~150.
Chen Wei, Zhao Dean, Tang Yang. Trajectory optimization on robotic spray painting of free-form surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(1):147~150. (in Chinese)
 - 6 马晓伟,魏学业. 喷涂厚度自动控制系统的研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
Ma Xiaowei, Wei Xueye. Research on the automatic control system for coating thickness [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
 - 7 邢东升,张大卫. 六自由度喷涂机器人结构设计及控制[D]. 天津:天津大学,2008.
Xing Dongsheng, Zhang Dawei. Mechanical design and control for 6-DOF spraying robot [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
 - 8 沈惠平,邓嘉鸣,蒋益兴,等. 一种单喷枪喷涂五轴混联机器人:中国,2011100428260[P]. 2011-02-23.
Shen Huiping, Deng Jiaming, Jiang Yixing, et al. 5-DOF hybrid robot with one spray gun: CN, 2011100428260[P]. 2011-02-23. (in Chinese)
 - 9 邓嘉鸣,沈惠平,蒋益兴,等. 一种多喷枪协同式喷涂五轴混联机器人:中国,2011100428311[P]. 2011-02-23.
Deng Jiaming, Shen Huiping, Jiang Yixing, et al. 5-DOF hybrid robot with several spray guns for collaborative spraying: CN, 2011100428311[P]. 2011-02-23. (in Chinese)
 - 10 廖常初. 可编程序控制器应用技术[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
-

(上接第 224 页)

- 7 Liu Wei, Chang Siqin. Modeling and simulation for a novel 6-DOF parallel manipulator[C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Modeling and Simulation, Manchester, England: World Academic Press, 2009,2:451~456.
- 8 Murray R M, Li Z X, Sastry S S. A mathematical introduction to robotic manipulation[M]. Florida: CRC Press, 1994.
- 9 王洪波,黄真. 六自由度并联式机器人拉格朗日动力方程[J]. 机器人,1990,12(1):23~26.
Wang Hongbo, Huang Zhen. Langrange's dynamic equation of six-DOF parallel multi-loop robot manipulator[J]. Robot, 1990, 12(1):23~26. (in Chinese)
- 10 钟美鹏,郑水英,潘晓弘. 基于遗传算法的压缩机参数优化[J]. 农业机械学报,2009,40(8):198~202.
Zhong Meipeng, Zheng Shuiying, Pan Xiaohong. Parameter optimization of compressor based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8):198~202. (in Chinese)
- 11 杨文柱,李道亮,魏新华,等. 基于改进遗传算法的棉花异性纤维目标特征选择[J]. 农业机械学报,2010,41(4):173~178.
Yang Wenzhu, Li Daoliang, Wei Xinhua, et al. Feature selection for cotton foreign fiber objects based on improved genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):173~178. (in Chinese)
- 12 刘洪,彭增雄,荆崇波. 轴向柱塞泵滑靴油膜形状的遗传算法数值分析[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(1):75~79.
Liu Hong, Peng Zengxiong, Jing Chongbo. Numerical analysis of slipper bearing's film shape in axial piston pump using genetic algorithms[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(1):75~79. (in Chinese)