

文章编号 1004-924X(2011)01-0077-06

基于正交机构的机器人肩关节 静力学分析与结构参数设计

崔冰艳^{1,2}, 金振林¹

(1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河北农业大学 海洋学院, 河北 秦皇岛 066003)

摘要:为了增大机器人肩关节的工作空间和承载能力,改善机器人肩关节的通用性与适应性,提出一种基于 3-RRR 正交球面并联机构的新型机器人肩关节,并对机器人肩关节进行了静力学分析和结构参数设计。首先,应用虚功原理建立机器人肩关节的静力学传递方程;其次,利用矩阵理论中的范数知识,将力雅克比矩阵引入静力学性能评价指标中,定义了机器人肩关节的静力学性能评价指标和全域力矩性能评价指标,并绘制了静力学性能评价指标在工作空间内的性能图谱。建立了基于机器人肩关节全域力矩性能评价指标的目标优化函数,分析了目标优化函数与全域力矩性能评价指标的关系,并利用全域搜索法,得到了机器人肩关节的优化结构参数:中间杆 WB 的杆长为 49.8~60 mm,连杆杆 AU 的杆长为 90~112 mm。分析结果表明,机器人肩关节在初始位置附近具有良好的静力学传递性,且其随着转角的增大而降低。最后,根据优化的结构参数设计了新型的机器人肩关节。

关键词:机器人;肩关节;正交球面并联;全域力矩性能评价指标;目标函数;
中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111901.0077

Statics analysis and structure parameter design of robot shoulder joint based on orthogonal mechanism

CUI Bing-yan^{1,2}, JIN Zhen-lin¹

(1. *College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;*
2. *Ocean College, Hebei Agricultural University, Qinhuangdao 066003, China*)

Abstract: In order to increase the workspace and carrying capacity of a robot shoulder joint and to improve its popularity and adaptability, a novel robot shoulder joint was proposed based on 3-RRR orthogonal spherical parallel mechanism. The statics performance of the robot shoulder joint was analyzed and the structure parameters were designed. Firstly, the static transmission equation of the robot shoulder joint was established based on the principle of virtual works. Then, by use of the norm in matrix theory, the force Jacobian matrix was introduced into the statics performance evaluation index to define the statics performance evaluation index and the global torque performance evaluation index and to plot the performance atlas of the statics performance evaluation index at the work spaces of the robot shoulder joint. Furthermore, the objective optimal function based on the global torque performance evaluation index of the robot shoulder joint was established, and the relation of the objective op-

收稿日期:2010-02-03;修订日期:2010-04-23.

基金项目:机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金资助项目(No. MSV-2010-24)

timal function and the global torque performance evaluation index was analyzed. By use of fully automatic searching method, the optimal structural parameter ranges of the robot shoulder joint are 49.8—60 mm for the middle follower length of WB and 90—112 mm for the frame connecting rod length of AU. Analysis results show that the robot shoulder joint has good static transmission performance at the initial position, and the static transmission performance decreases with increasing turning angle. Finally, using a set of optimal structural size parameters, a novel robot shoulder joint was designed.

Key words: robot; shoulder joint; orthogonal spherical parallel; global torque performance evaluation index; objective function

1 引言

近年来国内外很多学者将并联机构应用到机器人中^[1-3],如腰关节^[4]、腕关节^[5]、髌关节^[6]和肘关节^[7]等。肩关节也是机器人的重要组成部分,为了增加机器人手臂的承载能力和运动范围,本文提出一种基于 3-RRR 正交球面并联机构的新型机器人肩关节。与传统的机器人肩关节相比,基于并联机构的机器人肩关节有很多的优点。首先,它能够完全避免加工制造和装配时出现的问题,使 9 个转动副的轴线汇于一点,保证了加工和装配精度;其次,结构对称、具有良好的承载能力和较大的工作空间;再者,该肩关节机构便于驱动器的安装,结构紧凑,精度高,可以模拟人体肩关节的转动,完全实现空间三维转动。该机器人肩关节可以作为微动机器人的宏动平台,也可用于拟人机器人、工业机械臂、农用机器人的水果采摘机或玉米掰棒机等要求空间三维转动的机器人上,具有广泛的应用空间。

静力学分析是并联机器人设计的重要组成部分,可以确定力传递特性,为机器人的机构尺寸参数设计提供依据^[8],很多学者对并联机构进行了力学方面的研究工作^[9-11]。针对三自由度并联机器人的静力传递特性,张华等^[12]根据微分误差模型,建立了平面三自由度并联机构的静刚度映射矩阵。金振林等^[13]对球面三自由度机器人进行了力矩输入均衡性能分析。高峰等^[14]利用拆杆法建立了机构的静力学平衡方程。

本文提出的新型机器人肩关节由动平台、机架和 3 个结构完全相同的 R-R-R 支链组成,其动平台相对于机架具有 3 个转动自由度。根据其结

构的特点,本文建立了机器人肩关节的静力学传递方程,定义了静力性能评价指标和全域力矩性能评价指标,对其进行了静力学分析。另外,绘制了静力学性能评价指标图谱,并建立了基于机器人肩关节全域力矩性能评价指标的目标优化函数,得到了最佳的肩关节结构参数。最后,根据结构参数设计机器人肩关节,为机器人肩关节进一步的动力学研究奠定了理论基础。

2 机器人肩关节的结构模型

新型机器人肩关节通过 3 条均匀分布的 R-R-R 运动支链将机架和动平台连接起来,其中 U_i ($i=1,2,3$)为与机架相连的 3 个转动副的轴线方向,它们互相垂直; V_i ($i=1,2,3$)为与动平台相连的 3 个转动副的轴线方向,也相互垂直; W_i ($i=1,2,3$)为 3 个中间轴轴线方向,3 条支链的 9 个转动副的轴线汇交于一点,该点为机器人肩关节的转动中心,记为 O 点。

机器人肩关节的机构简图如图 1 所示,以转动中心 O 为原点,建立与机架相连的固定坐标系

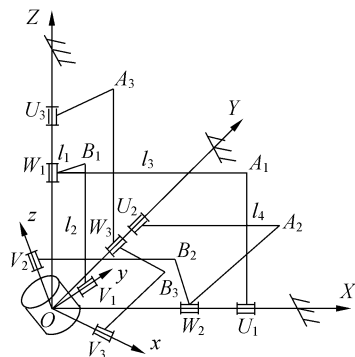


图 1 机器人肩关节的机构简图

Fig. 1 Structure of robot shoulder joint

$\{F\}$; O -XYZ, 其中 OX, OY, OZ 轴分别与 U_i ($i=1, 2, 3$) 的轴线重合; 同时建立与动平台相连的动坐标系 $\{K\}$: O -xyz, 其中 Ox, Oy, Oz 轴分别与 V_i ($i=1, 2, 3$) 的轴线重合; 3 个中间轴为 W_i 。

从图 1 可以看出, 机器人肩关节是由 3 条完全相同的支链组成的, 这里定义了每条支链中的 4 个结构尺寸参数, 中间杆 WB 的杆长为 l_1 , 中间杆 BV 的标长为 l_2 , 连杆 WA 的杆长为 l_3 , 连架杆 AU 的杆长为 l_4 。

定义初始姿态为固定坐标系与动坐标系重合, 所有转动副轴线与建立的坐标轴重合。

3 静力学性能分析与设计

3.1 静力学传递方程

根据虚功原理, 当机器人肩关节仅受外力矩作用, 机器人肩关节的各个构件处于静力平衡状态, 则经过任意构件的虚位移所做的虚功为 0^[15]。

设 $\tau = (\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3)^T$ 是机器人肩关节机构的关节驱动力矩矢量, $M = (M_x \quad M_y \quad M_z)^T$ 是机器人肩关节机构对应的末端执行器所受的外力矩矢量。令机器人肩关节末端执行器的虚转角为 $\delta\theta$, 即 $\delta\theta = (\delta\theta_1 \quad \delta\theta_2 \quad \delta\theta_3)^T$, 输入端驱动关节的虚转角为 $\delta\varepsilon$, 即 $\delta\varepsilon = (\delta\varepsilon_1 \quad \delta\varepsilon_2 \quad \delta\varepsilon_3)^T$ 。根据虚功原理, 除约束力以外, 所有的外力矩所做的功之和为 0, 即

$$\tau \cdot \delta\varepsilon - M \cdot \delta\theta = 0. \quad (1)$$

由于机器人肩关节机构的虚转角 $\delta\varepsilon$ 和 $\delta\theta$ 并非独立, 要满足几何约束条件, 两者之间的几何约束由雅克比矩阵 J 所决定, 应满足

$$\delta\theta = J\delta\varepsilon, \quad (2)$$

综合式(1), 式(2), 建立的静力学传递方程为

$$M = G\tau, \quad (3)$$

式中, G 为这种机器人肩关节机构的力雅克比矩阵, 而

$$G = (J^{-1})^T. \quad (4)$$

3.2 静力学性能评价指标

从静力学传递方程式(3)可以看出, 机器人肩关节在运动时, 力雅克比矩阵 G 决定了输入力矩与输出力矩的大小, 根据矩阵理论中范数的内容,

对式(3)取 2 范数, 即

$$\|M\|^2 = \tau^T G^T G \tau, \quad (5)$$

设输入量为单位量, 则

$$\|\tau\| = \tau^T \tau = 1, \quad (6)$$

引用拉格朗日算子,

$$L_M = \tau^T G^T G \tau - \lambda_M (\tau^T \tau - 1), \quad (7)$$

式中, λ_M 为拉格朗日乘子。

根据式(7), 输出力矩的极值条件为

$$\frac{\partial L_M}{\partial \tau} = 0: G^T G \tau - \lambda_M \tau = 0, \quad (8)$$

式中, λ_M 为 $G^T G$ 的特征值。

由式(8), 推出输出力矩 M 的极值为

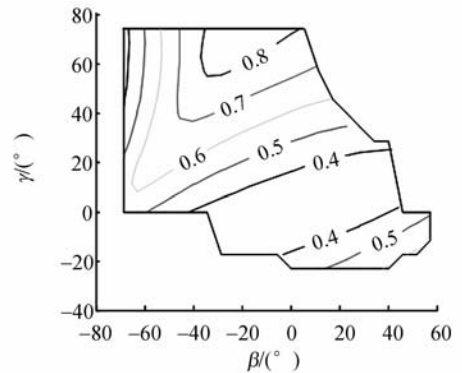
$$\|M\|_{\max} = \sqrt{\lambda_{M\max}}, \quad \|M\|_{\min} = \sqrt{\lambda_{M\min}}, \quad (9)$$

对于某一位姿, 可以根据极值公式求出机器人肩关节末端承载力矩的最大值和最小值。

由于机器人肩关节为正交结构, 肩关节在工作空间中仅改变姿态, 姿态空间的姿态角为 α, β 和 γ 。为了分析机器人肩关节的承载能力, 在定姿态工作空间内, 分析机器人肩关节的承载能力, 利用极值定义肩关节的静力学性能评价指标为

$$\eta = \|M\|_{\min}, \quad (10)$$

取机器人肩关节的结构尺寸参数: $l_1 = 40$ mm, $l_3 = 160$ mm, $l_2 = 100$ mm, $l_4 = 100$, 综合式(9)及式(10), 绘制机器人肩关节的静力学性能评价指标 η 值在工作空间姿态角 α 截面内的分布, 如图 2 所示。对图 2 分析得出, η 值越大, 机构在该姿态下的静力学传递性能越好。肩关节的静力学形成呈现对称趋势, 在初始姿态附近, 静力学性能好; 越靠近极限位置时, 力学传递性能越低。



(a) $\alpha = -70^\circ$

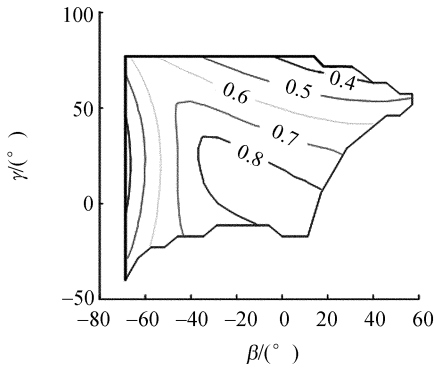
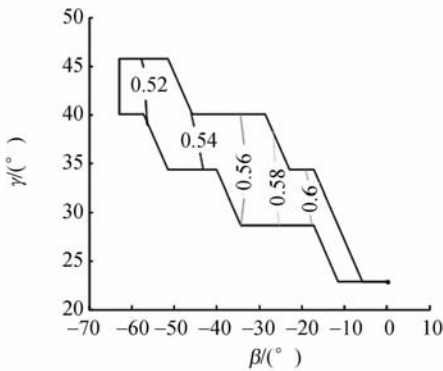
(b) $\alpha = -20^\circ$ (c) $\alpha = 45^\circ$

图 2 力矩性能评价指标在工作空间内的分布

Fig. 2 Distribution of static performance evaluation index on workspace

3.3 基于结构参数的优化设计

机器人肩关节的结构参数优化设计的目标是找到在工作空间内,满足力矩传递性能要求的最优结构尺寸参数。

定义全域力矩传递能评价指标为

$$\eta_M = \frac{\left(\int_V \| \mathbf{M} \|_{\min} dV \right)}{\int_V dV}, \quad (11)$$

由于设计的机器人肩关节应符合人体的结构尺寸,因此,机器人肩关节中连杆 WA 的杆长 160 mm 为定尺寸。又由于肩关节的结构特点,中间杆 BV 的杆长和连架杆 AU 的杆长相等,即 $l_2 = l_4$,所以机器人肩关节在工作空间内的全域力矩传递性主要取决于两个设计参数,即中间杆 WB 的杆长和连架杆 AU 的杆长。

取机器人肩关节结构参数的设计变量为

$$X = \{x_1 \ x_2\} = \{l_1 \ l_2\}, \quad (12)$$

设机器人肩关节优化的目标函数为

$$F(X) = f\{x\} = \frac{\left(\int_V \| \mathbf{M} \|_{\min} dV \right)}{\int_V dV}, \quad (13)$$

机器人肩关节的结构参数的变化范围为:

$$X_{\max} = \{70 \ 130\}, X_{\min} = \{40 \ 80\},$$

姿态角变化范围为:

$$(-150^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ, -150^\circ \leq \beta \leq 150^\circ, -150^\circ \leq \gamma \leq 150^\circ),$$

根据机器人肩关节结构参数的变化,计算了不同结构尺寸机构的全域力矩性能评价指标值 η_M 。每种机器人肩关节机构取 800 个位形采样点。根据式(13),并利用 matlab 算出结构参数与力矩全域性能评价指标关系的等高线分布图,如图 3 所示。

从图 3 上可以看出,中间杆 WB 的杆长 $l_1 = 49.8 \sim 60$ mm,连架杆 AU 的杆长 $l_4 = 90 \sim 112$ mm 时,机器人肩关节的力矩全域性能评价指标较好。

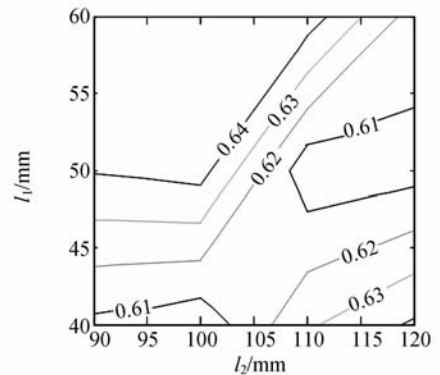


图 3 全域力矩传递性能图谱

Fig. 3 Atlas of globe torque transmission evaluation index

3.4 基于全域力矩性能评价指标的设计

通过静力学性能及全域力矩传递性能的分析,设计了一款三自由度正交球面并联结构的新型机器人肩关节。取机器人肩关节的结构参数为: $l_2 = l_4 = 110$ mm, $l_1 = 50$ mm, $l_3 = 160$ mm,新型机器人肩关节实体模型如图 4 所示。

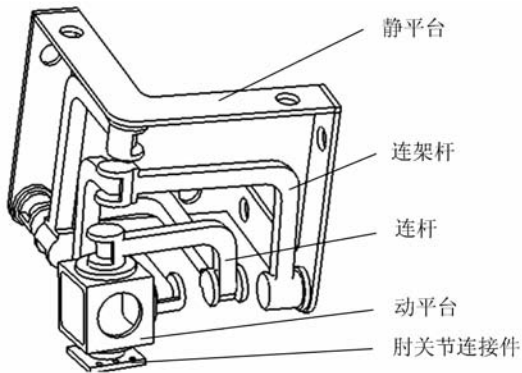


图4 新型机器人肩关节

Fig.4 Designed robot shoulder joint

4 结 论

本文对机器人肩关节进行了静力学分析,结果表明机器人肩关节在初始位置的静力学传递性能最好;随着机器人肩关节转动角度的增大,机器人肩关节静力学传递性能减小。根据静力学分析的特性,建立了机器人肩关节的目标优化函数,分析了全域力矩性能评价指标与机器人肩关节结构参数的关系,得到中间杆 WB 的杆长为 49.8~60 mm,连架杆 AU 的杆长为 90~112 mm 时,机器人肩关节稳定性高,力矩传递性好,使用寿命长。根据结构参数优化,设计了一款基于三自由度正交球面并联机构的新型机器人肩关节,为机器人肩关节的动力学研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] SELLAOUTI R, OUEZDOU F. Design and control of a 3DOFs parallel actuated mechanism for biped application[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, 40: 1367-1393. (in Chinese)
- [2] 王振华, 陈立国, 孙立宁. 集成式 6 自由度微动并联机器人系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9): 1391-1397.
WANG ZH H, CHEN L G, SUN L N. Integrated 6-DOF parallel micro-positioning robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1391-1397. (in Chinese)
- [3] 陈修龙, 赵永生, 鹿玲. 并联机床的灵巧度评价指标及其应用[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 237-242.
CHEN X L, ZHAO Y SH, LU L. Dexterity measures of parallel machine tool and its application[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 237-242. (in Chinese)
- [4] 金振林, 荣誉. 基于三支非均匀分布球面并联机构的腰关节设计[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(22): 2697-2700.
JIN ZH L, RONG Y. Design of a waist joint based on three branches unequal spaced distribution spherical parallel manipulator[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(22): 2697-2700. (in Chinese)
- [5] 孙立宁, 刘宇, 祝宇虹. 一种用于腕关节的球面三自由度并联解耦机构位置分析[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(10): 831-834.
SUN L N, LIU Y, ZHU Y H. A kinetic analysis of 3-DOF decoupled spherical parallel mechanism used for the wrist joint[J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(10): 831-834. (in Chinese)
- [6] SELLAOUTI R. Design of a 3 DOFs parallel actuated mechanism for a hip joint[C]. *Washington DC, Proc. ICRA*, 2002: 1161-1166.
- [7] 金振林, 崔冰艳. 实现屈曲和旋转运动的机器人的肘关节: 中国, CN101157219A[P]. 2008.
JIN ZH L, CUI B Y. *Realized buckling and rotational motion of the robot elbow joint: China*, CN101157219A[P]. 2008.
- [8] TSAI L W. *Robot Analysis: the Mechanics of Serial and Parallel Manipulators* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [9] 杜兆才, 余跃庆, 苏丽颖. 动平台惯性参数对柔性并联机构动力学特性的影响及优化设计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 1009-1016.
DU ZH C, YU Y Q, SU L Y. Effects of inertia parameters of moving platform on the dynamic characteristic of flexible parallel mechanism and optimal design[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1009-1016. (in Chinese)
- [10] 于靖军, 毕树生, 宗光华, 等. 3 自由度柔性微机器

- 人的静刚度分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(4): 7-11.
- YU J J, BI SH SH, ZONG G H, *et al.*. Analysis for the static stiffness of a 3dof parallel compliant micro-manipulator[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(4): 7-11. (in Chinese)
- [11] 李永刚, 宋轶民, 黄田, 等. 少自由度并联机器人机构的静力分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 80-84.
- LI Y G, SONG Y M, HUANG T, *et al.*. Static force analysis of lower-mobility parallel manipulators[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(9): 80-84. (in Chinese)
- [12] 张华, 李育文, 王立华, 等. 龙门式混联机床的静刚度分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 182-185.
- ZHANG H, LI Y W, WANG L H, *et al.*. Stiffness analysis of gantry hybrid machine tools[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(2): 182-185. (in Chinese)
- [13] 李研彪, 金振林. 球面三自由度机器人的力矩输入均衡性能分析与设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 730-735.
- LI Y B, JIN ZH L. Analysis and design of input torque of spherical 3-DOF manipulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 730-735. (in Chinese)
- [14] 周玉林, 刘磊, 高峰. 3 自由度球面并联机构 3-RRR 静力全解[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 169-177.
- ZHOU Y L, LIU L, GAO F. Static full-solutions of spherical parallel mechanism 3-RRR with 3-DOF [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(6): 169-177. (in Chinese)
- [15] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 中国高等教育出版社, 2006.
- HUANG ZH, ZHAO Y SH, ZHAO T SH. *Advanced Spatial Mechanism* [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:



崔冰艳(1978—), 女, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 讲师, 2006 年于内蒙古工业大学获得硕士学位, 主要从事机器人关节的研究。E-mail: bingyan_cui@yahoo. cn

导师简介:



金振林(1962—), 男, 辽宁抚顺人, 教授, 博士生导师, 2001 年于燕山大学获得博士学位, 主要从事并联机器人理论与应用技术方面的研究。E-mail: zljin@ysu. edu. cn