

文章编号 1004-924X(2017)增-0080-07

九自由度超冗余机械臂的设计和测试

何俊培^{1,2}, 徐振邦^{1*}, 于 阳¹, 韩春杨¹, 吴清文¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了更好地执行空间在轨服务任务,设计了面向空间的超冗余九自由度串联机械臂。该串联臂由一种大输出力矩、大减速比、小关节长度的机械臂关节组成,具有结构紧凑、灵活性好、空间避障能力强等特点。首先,介绍了串联臂的设计要求和单关节的主要元器件。接着,以两个关节的传动方式为例分析了串联臂的工作原理,即通过输出轴上的关节连接轴来实现力矩的传递。然后,基于脊椎曲线方法对串联臂末端位置坐标进行推导。最后,对串联臂进行了性能测试。实验结果表明:单关节的输出扭矩值可达 $190 \text{ N} \cdot \text{m}$,运转角速度可达 0.14 rad/s ,该九自由度机械臂最底端关节的旋转角度误差可控制在 0.1° 以内。本文设计的九自由度超冗余机械臂具有很好的可重构性,能够满足不同场合的应用需求。

关键词:九自由度;冗余机械臂;超冗余;串联臂;旋转关节;可重构

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172514.0080

Design and experimental testing of a 9-DOF hyper-redundant robotic arm

HE Jun-pe^{1,2}, XU Zhen-bang^{1*}, YU Yang¹, HAN Chun-yang¹, WU Qing-wen¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: xuzhenbang@gmail.com*

Abstract: In order to perform on-orbit service tasks better, a spatial 9-DOF hyper-redundant robotic manipulator was designed. This manipulator could provide a large output torque, large reduction ratio and small joint length, with the characteristics of compact structure, high flexibility, space obstacle avoidance and etc. First, the design requirements of manipulator and main components of one joint were presented. Operating principle of the manipulator were analyzed by taking the driving method of two joints as an example. The torque was transferred via connecting shaft of output shaft. Then based on the method of backbone curve, the end-position coordinate of the manipulator was derived. Finally, the performance parameters of the manipulator were tested. The results show that the output torque of single joint can be up to $190 \text{ N} \cdot \text{m}$ and the angular velocity of single joint reaches

收稿日期:2017-08-24;修订日期:2017-09-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11672290);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20160520074JH);中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2014195)

0.14 rad/s. The rotation angle error of the bottom joint of the 9-DOF manipulator is reduced within 0.1° . The proposed 9-DOF hyper-redundant robotic manipulator is reconfigurable and suitable for many different applications.

Key words: 9-DOF; redundant manipulator; hyper-redundant; robotic arm; rotary joint; reconfigurable

1 引言

航天界将应用于空间探索 and 研究的机械臂、探测器等智能化设备统称为空间机器人^[1]。目前,空间机器人已经用于空间基础设施的建设和维护^[2]。它可以协助空间飞行器完成交会对接、航天器维修、燃料补充、太空垃圾回收等空间任务,减轻宇航员的工作负担。在月球登陆、火星探测等太空计划中,空间机器人可以替代人类到危险且恶劣的环境中执行探险任务。空间机器人最重要的组成之一便是空间机械臂,它是一种自动化机械装置,能够接受指令精确地定位到三维(或二维)空间上的某一点进行作业。近年来,随着卫星发射数量的大幅上升,出现故障的卫星数量不断增多,而故障卫星的维护和报废卫星的清理都需要空间机械臂^[3]。

目前,国际上投入使用的空间机械臂多安装于航天飞机、空间站以及实验卫星上。典型的机械臂系统有:加拿大臂 Canadarm (Shuttle Remote Manipulator System, SRMS),应用于国际空间站的移动服务系统 (Mobile Servicing System, MSS),它包括第二代加拿大臂 Canadarm2 (Space Station Remote Manipulator System, SSRMS)和 NASA 的专用灵巧机械手 (Special Purpose Dexterous Manipulator, SPDM),日本臂 JEMRMS (Remote Manipulator System of Japanese Experiment Module),欧洲臂 ERA (European Robotic Arm),以及应用于日本工程实验卫星 7 号 (Engineering Test Satellite No. 7, ETS-VII) 的空间机械臂^[4-7]。

当机械臂的总自由度超过刚好完成给定任务所需要的自由度时,就具有了运动学冗余度。冗余机械臂是机器人学研究的前沿领域。常规机械臂的关节空间维数等于任务空间维数,这意味着一旦某关节发生故障,将无法完成既定任务或者

终止工作。运动学冗余的机械臂因具有灵活性强、结构互换性强、容错性好、避障能力高等优点,越来越受科研工作者的重视。它不仅可实现避奇异、避关节超限和任务空间避障,还可以实现针对特定任务的最小化关节力矩、最小化能量消耗。本质上超冗余机械臂能达到较高的自治程度,从而优化某个适当的性能指标^[8-10]。

旋转关节是实现机械臂运动的关键部件,一方面,机械臂关节的输出力矩决定着一条机械臂的最大工作载荷;另一方面,过大的自重,会占用有限的发射载荷,使得机械臂关节的输出扭矩被自重消耗,导致机械臂的有效载荷减小,增加发射成本。因此,机械臂旋转关节的设计要尽可能地使关节轻量化或者输出力矩最大化。

现有的机械臂关节,其减速器和关节旋转轴均为同轴布置。为了实现机械臂关节的最小化,通常的方案是增大减速比,采用大减速比的减速器或者多个小减速器串联布置。然而,采用大减速比减速器或者多个小减速比减速器串联,会产生关节长度过长的的问题。因此,如果能够在保证关节输出力矩不变的情况下实现关节结构的最小化和紧凑化,同时不增加关节长度,具有十分重要的工程意义。

本文设计了一种大输出扭矩、大减速比、小关节长度的机械臂关节。该旋转关节组成的超冗余机械臂能够克服自身重力来完成设计范围内的运动学轨迹规划,进而减弱了对模拟太空失重环境的依赖。

2 串联臂结构形式及工作原理

2.1 设计要求

串联机械臂结构有多方面的设计要求:其一,要求整臂刚性好、自重轻、关节输出力矩大。刚度决定了串联臂完成指定任务时的平稳性、末端位置精度以及垂直方向弯曲变形和水平方向扭转变

形的程度,机械臂自重过大会导致沉头现象,严重时会导致机械臂卡死,损坏电机;其二,机械臂的运动速度要适当,因为惯性会使运转速度过快,从而影响启动和停止的平稳性;其三,机械臂结构要紧凑小巧;其四,位置精度要高,由于关节式机械臂结构复杂,末端定位精度由各个关节的累积转角误差决定,所以要提高位置精度,除了采用先进的控制方法外,其结构还需要进行多次优化;其五,适用性强,能实现不同环境下的指定任务。

设计时如果只追求刚性好、载重大,往往结构粗大,反而增加机械臂的自重,增大惯性力,影响运转平稳性。因此,在设计机械臂时,需综合考虑末端抓取质量、自由度数、工作范围、运动速度及机械臂的整体布局和工作条件等因素,以实现动作准确、可靠、灵活、结构紧凑、刚度大、自重小,从而保证机械臂的位置精度和适应性。

2.2 单关节结构设计

本文设计了一种能够同时具备大输出扭矩、大减速比、小关节长度的机械臂关节。如图 1 所示,该关节主要包括关节外壳、电机、驱动器、谐波减速器、正齿轮减速器、同步带轮、输出轴、关节连接轴、主连接板、副连接板、圆形光栅尺和读数头等部件。谐波减速器和电机同轴串联装配,谐波减速器和正齿轮减速器呈平行轴固定在关节外壳内,且谐波减速器和正齿轮减速器的输出轴轴线与关节外壳的轴线互相垂直。同步带轮设置在关节外壳内,一个带轮连接谐波减速器的输出端,另一带轮连接正齿轮减速器的输入端。输出轴为中空轴,一端与谐波减速器的输出端同轴连接,另一端伸出关节外壳。

关节外壳为类似圆柱形的中空结构,由关节上壳、中壳和下壳 3 部分组成。关节上壳上固定有读数头,用来采集圆形光栅尺的码值。关节中壳的外壁上设有散热孔,且散热孔上固定有散热风扇。两个关节也通过连接板和关节连接轴连接在一起,且关节连接轴的轴线垂直于输出轴的轴线。

2.3 串联臂的工作原理

如图 2 所示,主连接板采用减重设计,主连接板的外壁上设有走线槽,走线槽的端部设有走线孔。前一个机械臂关节的电源线和信号线从控制

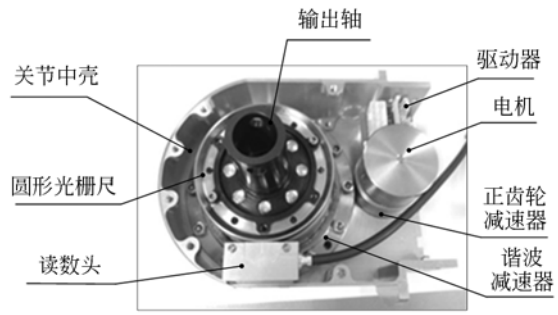


图 1 关节内部图

Fig. 1 Internal diagram of joint

电箱内的电路板接出,通过输出轴的内部中空结构穿出,沿后一个机械臂关节的主连接板的走线槽进入走线孔,再沿走线孔进入到关节外壳内,与关节外壳内的控制电箱连接,以此实现 9 个旋转关节的串联。

在工作时,电机运转后将力矩传递给正齿轮减速器,正齿轮减速器将输出力矩通过同步带轮传递给谐波减速器,再次进行减速后输出力矩变大,然后谐波减速器将输出力矩传输给输出轴。然后,输出轴通过关节连接轴,将前一个关节的输出力矩传递给后一个关节,实现由一个关节带动并控制后一个关节运转角度的目的。

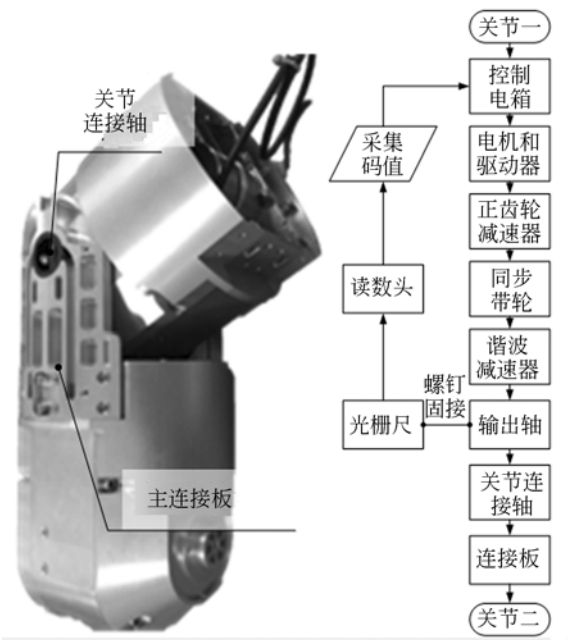


图 2 两关节的传动方式

Fig. 2 Driving method of two joints

图 2 所示为两个关节的传动方式, 其中光栅尺和输出轴通过螺钉固接, 读数头采集到的光栅尺码值可以转化为输出轴转动的角度值, 以此来控制关节的旋转角度, 逐级将上一个电机产生的力矩传递给下一个关节。

表 1 为各个关节的参数值, 其中所有关节的外形尺寸都是相同的。由此可知, 关节总臂长 l 约为 1 489.5 mm, 总质量约为 30.60 kg。

表 1 串联臂各关节参数值

Tab.1 Parameters of joints of robotic arm

关节编号	质量/kg	臂长/mm	半径/cm	旋角/(°)
关节 1	3.40	165.5	68.5	±90
关节 2	3.40	165.5	68.5	±90
...
关节 8	3.40	165.5	68.5	±90
关节 9	3.40	165.5	68.5	±90

3 串联臂的运动学分析

一般情况下, 末端执行器完成空间任意位置的轨迹跟踪时需要 6 个自由度。图 3 为整臂的模型图, 由于每个关节都有一个旋转自由度, 本串联臂具有 9 个自由度, 这样就构成了运动学冗余。超冗余串联臂由于自由度多, 即使部分关节出现故障, 也依然能完成指定空间任务^[11-12]。设串联臂末端目标位置的坐标为 (x_l, y_l) , 则关节末端位置精度的平均误差 e 为:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^9 \sqrt{(x_i - x_l)^2 + (y_i - y_l)^2}}{n}. \quad (1)$$

理论上, 如果用传统方法进行超冗余机械臂建模和轨迹规划比较复杂。因此, 基于脊椎坐标系的方法被提出^[13]。该方法的核心是用一个沿着脊椎、以弧长 s 为参数的坐标系来建立运动学模型, 其中脊椎在点 s 处的局部运动用局部坐标系来建模。该方法使得连续体雅克比矩阵的建立以及正向运动学的计算, 都和刚性连杆系统相似^[13-14]。

如图 3 所示, 脊椎曲线的曲率为^[15-16]:

$$\kappa(s) = A \sin\left(\frac{2\pi}{l}s + \theta\right), \quad (2)$$

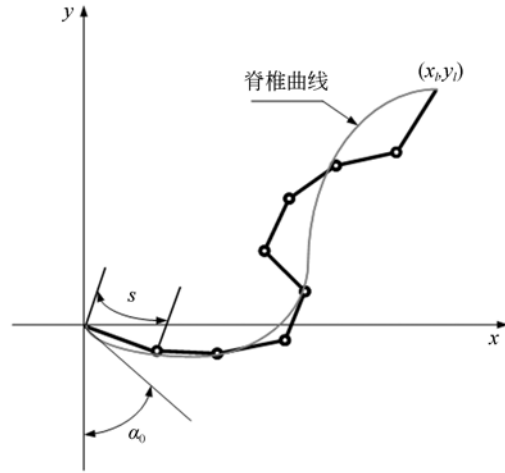


图 3 脊椎曲线示意图

Fig.3 Diagram of backbone curve

其中: $A = \frac{2\pi}{l} \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$, $\theta = \arctan \frac{a_1}{a_2}$ 。

式(2)化简可到脊椎曲率 $\kappa(s)$ 的计算式为:

$$\kappa(s) = \frac{2\pi}{l} a_1 \cos\left[\frac{2\pi}{l}s\right] + \frac{2\pi}{l} a_2 \sin\left[\frac{2\pi}{l}s\right], \quad (3)$$

式中: a_1, a_2 为协同系数, l 为脊椎曲线总长度(和机械臂总长度相等), s 表示弧长。

设脊椎曲线 s 点的切线与 x 轴的夹角为 $\alpha(s)$, α_0 为机械臂起始点切线和 y 轴的角度, 则有:

$$\alpha(s) = \alpha_0 + \int_0^s \kappa(u) du. \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)可化简得:

$$\alpha(s) = \alpha_0 + \int_0^s \kappa(u) du = \alpha_0 + a_1 \sin\left[\frac{2\pi}{l}s\right] + a_2 \left[1 - \cos\left[\frac{2\pi}{l}s\right]\right]. \quad (5)$$

由脊椎曲线可得串联臂末端位置的坐标 (x_l, y_l) 公式为:

$$\begin{cases} x_l = \int_0^l \cos[\alpha(s)] ds \\ y_l = \int_0^l \sin[\alpha(s)] ds \end{cases}. \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)求积分化简可得串联臂的末端坐标为:

$$x_l = \int_0^l \cos[\alpha(s)] ds = \cos(a_2 + \alpha_0) J_0(\sqrt{a_1^2 + a_2^2}) l, \quad (7)$$

$$y_l = \int_0^l \sin[\alpha(s)] ds = \sin(a_2 + \alpha_0) J_0(\sqrt{a_1^2 + a_2^2}) l. \quad (8)$$

其中 J_0 为零阶贝塞尔函数^[17]。

机械臂关节的角坐标可由脊线上相应点的切线角度来确定。不论采用哪种形式的坐标系,核心问题都是怎样用建立的模型来实现超冗余机械臂的轨迹规划。在任意空间曲线建模时,连续体运动学模型的基本形式要以无穷多自由度为特征。要以有限自由度的方式来控制离散关节或连续体的超冗余机械臂,其基本思路在于利用连续体模型来描述超冗余机械臂。针对不同的任务需求进行合理的运动学分析,其核心思想是通过建立一条脊椎曲线来对超冗余机械臂的关节实体进行建模。具体实行过程是先进行运动学轨迹规划,这样可以得到一条(理论上的)曲线,然后让(离散的)机械臂脊椎去拟合所产生的(连续的)曲线^[16]。

4 性能测试

由于超冗余机械臂是由多个旋转关节串联的,所以单关节的性能参数直接影响整条臂的功能。这里对关节进行了两个方面的测试:第一方面是串联臂单关节的输出力矩测试;第二方面是对串联臂单关节的运转角速度进行测试。

4.1 关节输出力矩测试

将关节固定在支撑底座上,在关节输出轴处通过设计的专用轴套固定一定杆长的钢管,在钢杆的另一端加上重物块,启动电机运转,重物块若能被顺利提起,单关节所能达到的输出力矩值大约为杆长乘以重物块的重力。如图 4 所示,通过多次测试,得到稳定的工作力矩达到 $190 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

4.2 关节运转角速度测试

运转角速度的测试分两种工况进行,其一是单独测试单关节的角速度,如图 5(a)所示;其二是将多个关节串联后再测试各个关节的角速度,如图 5(b)所示。以上两种工况多次测量取平均值,得到关节的角速度为 0.14 rad/s 。

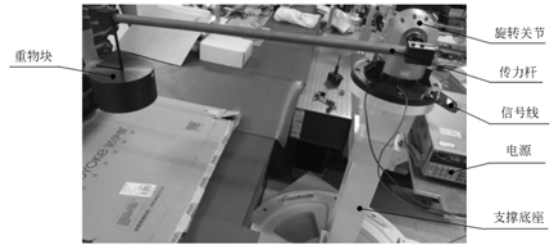


图 4 关节输出扭矩测试

Fig. 4 Output torque test of joints



图 5 关节角速度测试

Fig. 5 Angular velocity test of joints

4.3 旋转角度精度测试

影响机械臂旋转角度精度的因素有很多,其中关节间隙对位姿误差的影响决定着运动学分析的精度^[18]。本文只针对本关节转角误差进行测试分析,如图 6 所示,9 个关节叠加后最底部的关节受力是最大的,自然累积误差也就最大。本实验针对末端关节的误差进行了测量,通过码值采集得到末端关节的角度偏差在 0.1° 以内。

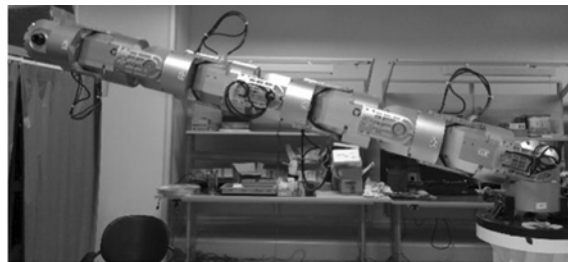


图 6 机械臂转角精度测试

Fig. 6 Accuracy test of rotation angle for robotic arm

5 结 论

与现有技术相比,本文在不减小关节输出力矩的情况下,通过增大减速比,采用轻型电机,减小了整个关节的质量。关节采用两级减速器平行布置,中间采用同步带轮连接来传递扭矩,避免了减速器同轴串联而导致关节过长的弊端,从而进一步减小关节尺寸,实现了关节的紧凑化。关节

采用中空轴结构走线,避免了外部走线而导致关节导线缠绕的问题,也使得关节看上去更加整洁美观。本关节在有限的结构尺寸下,实现了较大的传动力矩的输出,同时可以通过增减关节数来增减自由度,以满足不同场合的实际需求。实验结果表明:关节的输出扭矩可达 $190 \text{ N} \cdot \text{m}$,运转角速度可达 0.14 rad/s ,该九自由度机械臂最底端关节的旋转角度误差为 0.1° ,基本满足超冗余串联机械臂对末端位置精度的要求。

参考文献:

- [1] FLORES-ABAD A, MA O, PHAM K, *et al.*. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, 68: 1-26.
- [2] KIMURA S, TSUCHIYA S, NISHIDA S, *et al.*. Module-type space manipulator[J]. *SPIE*, 1999, 3839: 307-315.
- [3] KIMURA S, MINENO H, YAMAMOTO H, *et al.*. Preliminary experiments on technologies for satellite orbital maintenance using Micro-LabSat 1 [J]. *Advanced Robotics*, 2004, 18(2): 117-138.
- [4] 田士涛,吴清文,贺帅,等. 空间机械臂锁紧机构等效线性化分析及验证[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(3): 590-599.
TIAN SH T, WU Q W, HE SH, *et al.*. Linear analysis and practical tests of fixation mechanisms in space robotic arm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3): 590-599. (in Chinese)
- [5] MCMAHAN W, CHITRAKARAN V, CSENC-SITS M, *et al.*. Field trials and testing of the oct arm continuum manipulator[C]. *Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2006: 2336-2341.
- [6] ROLLINSON D, BILGEN Y, BROWN B, *et al.*. Design and architecture of a series elastic snake robot[C]. *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2014: 4630-4636.
- [7] HIRZINGER G, BRUNNER B, LAMPARIELLO R, *et al.*. Advances in orbital robotics[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2000, 1: 898-907.
- [8] BAILLIEUL J. Avoiding obstacles and resolving kinematic redundancy[C]. *1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 1986: 1698-1704.
- [9] YOSHIKAWA T. Dynamic manipulability of robot manipulators[C]. *1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 1985: 1033-1038.
- [10] 姜力,周扬,孙奎,等. 七自由度冗余机械臂避障控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1795-1802.
JIANG L, ZHOU Y, SUN K, *et al.*. Obstacle avoidance control for 7-DOF redundant manipulators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1795-1802. (in Chinese)
- [11] ZHAO J D, ZHAO L L, WANG Y. A Novel Method for the Motion Planning of Hyper-redundant Manipulators Based on Monte Carlo [M]//ZHANG X M, WANG N F, HUANG Y J. *Mechanism and Machine Science*. Singapore: Springer, 2017: 11-22.
- [12] ZHAO J D, ZHAO L L, LIU H. Motion planning of hyper-redundant manipulators based on ant colony optimization[C]. *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, IEEE, 2016: 1250-1255.
- [13] MOCHIYAMA H, SHIMEMURA E, KOBAYASHI H. Shape correspondence between a spatial curve and a manipulator with hyper degrees of freedom [C]. *1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 1998, 1: 161-166.
- [14] JONES B A, WALKER I D. Kinematics for multisection continuum robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(1): 43-55.
- [15] MA S G, WATANABE M, KONDO H. Dynamic

control of curve-constrained hyper-redundant manipulators[C]. *Proceedings of 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, IEEE, 2001: 83-88.

- [16] CHIRIKJIAN G S, BURDICK J W. A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, 10(3): 343-354.

- [17] ANDREWS L C. *Special Functions of Mathematics for Engineers*[M]. New York: McGraw Hill Inc., 1992.

- [18] 刘迎春, 余跃庆. 考虑运动副间隙的连杆及机器人机构研究进展[J]. *机械科学与技术*, 2004, 23(4): 454-460.

LIU Y CH, YU Y Q. A survey of mechanism and robot with clearances[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2004, 23(4): 454-460. (in Chinese)

作者简介:



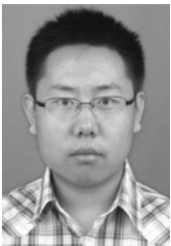
何俊培(1992—),男,湖北荆州人,博士研究生,2014年于吉林大学获得学士学位,主要从事超冗余机械臂等方面的研究。E-mail: hejp613@163.com

导师简介:



吴清文(1968—),男,四川简阳人,研究员,1991年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1994年、1997年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光学精密仪器 CAD/CAE 和空间光学遥感器热控技术的研究。E-mail: wuqw@ciomp.ac.cn

通讯作者:



徐振邦(1982—),男,内蒙古通辽人,副研究员,2005年、2010年于中国科技大学分别获得学士、博士学位,主要从事振动控制、空间遥感器的力学分析研究。E-mail: xuzhenbang@gmail.com