

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.05.013

# 基于机械臂辅助的卫星柔顺装配技术研究\*

刘仁伟<sup>1</sup>, 徐晓辉<sup>2</sup>, 谢永权<sup>1</sup>, 陈小弟<sup>1\*</sup>, 侯 鹏<sup>1</sup>

(1. 上海卫星装备研究所 上海 200240; 2. 上海航天技术研究院 上海 201109)

**摘要:**针对卫星大型部件、重载单机装配中位姿调整、接触应力、重力卸载的控制问题,将机械臂辅助装配技术应用到了卫星装配中,提出了一种基于力传感交互控制的机械臂辅助柔顺装配技术。通过力传感器实时采集了机械臂末端作用力,进行了负载重力参数标定,提取了外力/力矩分量;建立了基于外部作用力/力矩控制的装配体位姿柔顺随动算法,对算法的误差识别及控制方法进行了分析;搭建了机械臂辅助柔顺装配系统,在某卫星结构舱板装配、星上单机装配中进行了应用实验。研究表明:力/力矩控制范围下限达到 10 N/2 Nm,与传统装配方法相比,该技术具有位姿调整柔顺、装配接触应力可控、负载重力承载/卸载精确、适用于狭窄空间等优势。

**关键词:**机械臂;力传感交互;柔顺调姿;卫星装配

中图分类号:TH161.7;TP249

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)05-0532-05

## Compliant assembly technology of satellite assisted by robot arm

LIU Ren-wei<sup>1</sup>, XU Xiao-hui<sup>2</sup>, XIE Yong-quan<sup>1</sup>, CHEN Xiao-di<sup>1</sup>, HOU Peng<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Aiming at the control issues for position and posture adjustment, contact stress, unloading gravity during large component or heavy payload assembly to the satellite, the technology of robot arm aided assembly was applied. A compliant assembly technology with robot arm assistance based on force sensing interactive control was presented, through real-time acquisition of force/torque at the end of robot, the load gravity parameters were calibrated, external force/torque was extracted. Then the compliant follow-up algorithm of assembly position and posture was established, based on external force/torque control, the deviations and control methods of the algorithm were analyzed. Meanwhile, a system of robot arm assisted compliant assembly was built, the application experiments were carried out in a large structural cabin plate and a heavy payload assembly to a satellite. The experimental results show that the lower limit of force/torque control range reaches 10 N/2 Nm. Compared with traditional assembly method, this method has the following advantages of compliant adjustment of position and posture, controllable assembly contact stress, accurately carrying and unloading gravity, suitability for assembly with a specific posture among confined space.

**Key words:** robot arm; force sensing interaction; compliant adjustment of position and posture; satellite assembly

## 0 引 言

机械臂具有承载重量大、定位精度高、多自由度、响应速度快等特点。近年来,国内外针对机械臂在航

空航天装备中的应用开展了广泛研究<sup>[1-3]</sup>,力传感器<sup>[4-6]</sup>、机器视觉<sup>[7-8]</sup>等技术也在机械臂辅装中得到了应用。由于航天器产品单件小批量的生产模式,使得机械臂辅助装配在航天器产品研制领域尚未实现批量

收稿日期:2019-12-16

基金项目:装备预研共用技术项目(41423010401)

作者简介:刘仁伟(1987-),男,湖北建始人,硕士,工程师,主要从事机械臂辅助装配、工业运动控制方面的研究。E-mail:dawei131358@163.com

通信联系人:陈小弟,男,硕士,研究员。E-mail:19436680@qq.com

自动化装配,只在装配定位与检测等工序中得到应用<sup>[9-12]</sup>。

大型卫星平台具有高精度、大承载的结构特征,装配中对安装位置精度、接触面应力范围等有严格的要求。大型结构舱板、重载单机等部件装配目前多采用吊装、安装支架车装备辅助人工装配等方法,该方法存在以下问题:(1)依赖人工经验,工艺装备无法实现装配姿态的实时显示及精度的量化控制;(2)需反复调姿,桁吊、安装支架车等设备多次启停,重力承载面、装配对接面的接触应力频繁波动,存在应力损伤风险。

针对上述装配需求,笔者提出一种基于力传感交互控制的机械臂辅助柔顺装配技术。

## 1 总体方案设计

机械臂辅助柔顺装配系统如图1所示。

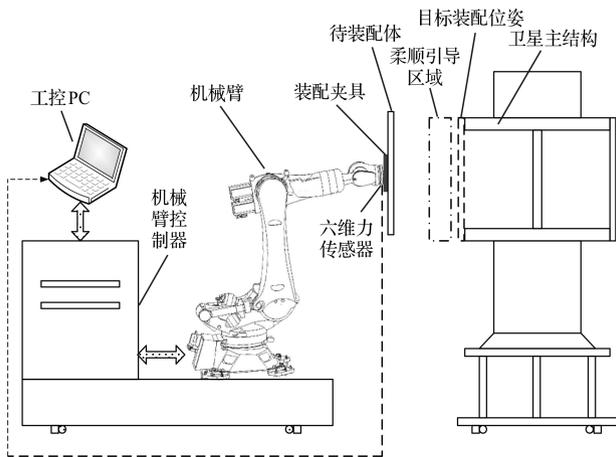


图1 机械臂辅助柔顺装配系统

图1中,六维力传感器安装在机械臂末端法兰与装配夹具之间,与柔顺装配控制软件进行连接通信。力传感器实时采集作用于机械臂末端的合力/力矩,包含力传感器、装配夹具及待装配体的重力、人手作用力及外部接触力等;通过软件算法对机械臂末端负载重力参数进行标定,提取外力/力矩分量,控制机械臂末端随人手以及外部接触作用力/力矩进行位姿调整,实现柔顺调姿及精确定位;完成待装配体向卫星主结构的连接后,依据待装配体重力标定值,进行机械臂末端负载重力的精确卸载,将重力承载面转移至卫星主结构,完成装配。

## 2 系统关键技术实现

### 2.1 负载重力参数标定

机械臂姿态调整过程中,为实现对末端装配体的负载重力实时补偿,须对装配夹具、待装配体等负载重

力参数进行精确标定。重力参数包括重力值、质心位置;六维力传感器的坐标系为正交坐标系,有X、Y、Z3个坐标轴。

负载重力G在力传感器坐标系下的表示如图2所示。

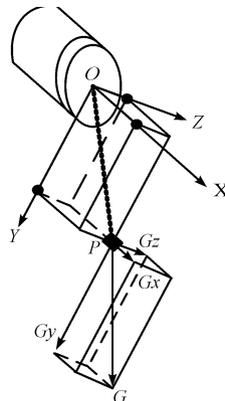


图2 负载重力G在力传感器坐标系下的表示

机械臂末端未受到外力作用时,六维力传感器测得的力/力矩值由传感器初始偏移及负载重力引起。通过控制机械臂使负载处于不同的空间姿态,可获得多组六维力测量数据,利用最小二乘法求解负载的重力值与质心位置。

力传感器安装至机械臂末端后,通过力传感器系统接口读取传感器初始偏移量 $F_0$ 如下:

$$F_0 = [F_{x0}, F_{y0}, F_{z0}, M_{x0}, M_{y0}, M_{z0}] \quad (1)$$

装配夹具连接到机械臂末端后,力传感器读数 $F_1$ 如下:

$$F_1 = [F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}, M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}] \quad (2)$$

将待装配体连接到装配夹具后,力传感器读数 $F_2$ 如下:

$$F_2 = [F_{x2}, F_{y2}, F_{z2}, M_{x2}, M_{y2}, M_{z2}] \quad (3)$$

通过式(1,2)已知量,计算装配夹具重力 $G_1$ ,即:

$$\begin{cases} G_{x1} = F_{x1} - F_{x0} \\ G_{y1} = F_{y1} - F_{y0} \\ G_{z1} = F_{z1} - F_{z0} \\ M_{gx1} = M_{x1} - M_{x0} \\ M_{gy1} = M_{y1} - M_{y0} \\ M_{gz1} = M_{z1} - M_{z0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $[G_{x1}, G_{y1}, G_{z1}]$ —装配夹具重力 $G_1$ 的力分量;  
 $[M_{gx1}, M_{gy1}, M_{gz1}]$ —重力 $G_1$ 对X、Y、Z轴的力矩分量。

装配夹具重力值计算式为:

$$|G_1| = \sqrt{G_{x1}^2 + G_{y1}^2 + G_{z1}^2} \quad (5)$$

式中: $|G_1|$ —装配夹具重力值。

通过式(4)的已知量,计算装配夹具质心 $P_1$ 位

置,即:

$$\begin{cases} M_{gx1} = G_{z1} \times y_1 - G_{y1} \times z_1 \\ M_{gy1} = G_{x1} \times z_1 - G_{z1} \times x_1 \\ M_{gz1} = G_{y1} \times x_1 - G_{x1} \times y_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $[x_1, y_1, z_1]$ —质心  $P_1$  在力传感器坐标系中的坐标。

控制机器人变换末端姿态,取  $N$  个姿态 ( $N \geq 3$ , 至少有 3 个姿态下机器人末端的法向量不共面,且尽量不接近共面),通过式(5,6) 计算出装配夹具重力值及质心位置的  $N$  组数值,再利用最小二乘法求解重力值最佳,估计  $|\hat{G}_1|$  与质心位置最佳估计  $\hat{P}_1 = [\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1]$ 。

在装配夹具重力  $G_1$  已求解的条件下,通过式(3) 已知量  $F_2$ ,采用与上述夹具重力参数同样的计算方法,求解待装配体重力值最佳估计  $|\hat{G}_2|$  与质心位置最佳估计  $\hat{P}_2 = [\hat{x}_2, \hat{y}_2, \hat{z}_2]$ 。

经计算得出的负载质心位置为相对于六维力传感器坐标系的值。力控调姿时需转换到设定的机械臂工具坐标系下,可通过转换矩阵运算进行转换。

由于机械臂末端装配夹具与力传感器固连,工具坐标系与力传感器坐标系存在固定的空间转换关系:

$$T_{\text{tool}}^{\text{sensor}} = \begin{bmatrix} R_t^s \\ P_t^s \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $T_{\text{tool}}^{\text{sensor}}$ —工具坐标系相对于力传感器坐标系的转换矩阵;  $R_t^s, P_t^s$ —3 维旋转、平移矩阵。

## 2.2 外力/力矩分量提取

当人手力或外部接触力作用在装配夹具或待装配体上时,六维力传感器测量值为传感器初始偏移量、负载重力、外力的耦合值。力控调姿所响应的输入参数仅为外力/力矩值,因此,需对外力/力矩分量进行提取。

装配过程中,工具坐标系相对于全局坐标系的位姿随机臂末端运动而变化,因此负载重力在工具坐标系中各坐标轴的力/力矩分量也随之变化。由于负载质心位置相对于工具坐标系固定,重力在全局坐标系下的方向始终保持竖直向下,可通过机械臂瞬时姿态下工具坐标系与全局坐标系确定的转换关系,计算重力在工具坐标系的瞬时力/力矩分量。

瞬时姿态下工具坐标系相对于全局坐标系的转换矩阵为:

$$T_{\text{tool}}^{\text{robroot}} = \begin{bmatrix} R_t^r \\ P_t^r \end{bmatrix} \quad (8)$$

设定竖直向下为全局坐标系  $Y$  轴正向,通过式(5, 8) 的已知量,负载重力  $G_1, G_2$  转换到工具坐标系下的力分量为:

$$G_1^t = \begin{bmatrix} G_{x1}^t \\ G_{y1}^t \\ G_{z1}^t \end{bmatrix} = [R_t^r]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ |\hat{G}_1| \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$G_2^t = \begin{bmatrix} G_{x2}^t \\ G_{y2}^t \\ G_{z2}^t \end{bmatrix} = [R_t^r]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ |\hat{G}_2| \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $G_1^t, G_2^t$ —瞬时姿态下负载重力  $G_1, G_2$  在工具坐标系的表示。

重力  $G_1$  在工具坐标系下力矩分量  $M_{g1}^t$  为:

$$\begin{cases} M_{gx1}^t = G_{z1}^t \times \hat{y}_{11} - G_{y1}^t \times \hat{z}_{11} \\ M_{gy1}^t = G_{x1}^t \times \hat{z}_{11} - G_{z1}^t \times \hat{x}_{11} \\ M_{gz1}^t = G_{y1}^t \times \hat{x}_{11} - G_{x1}^t \times \hat{y}_{11} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $[\hat{x}_{11}, \hat{y}_{11}, \hat{z}_{11}]$ —装配夹具质心位置  $\hat{P}_1$  转换到工具坐标系下的坐标值。

在工具坐标系下,重力  $G_2$  力矩分量  $M_{g2}^t$  可采用式(11) 同样计算方法得出,即:

$$M_{g2}^t = [M_{gx2}^t, M_{gy2}^t, M_{gz2}^t] \quad (12)$$

外力作用下瞬时姿态时,六维力传感器测得合力/力矩读数  $F_3$ ,转换到工具坐标系下表示为  $F_3^t$ :

$$F_3^t = [F_{x3}^t, F_{y3}^t, F_{z3}^t, M_{x3}^t, M_{y3}^t, M_{z3}^t] \quad (13)$$

力传感器初始偏移量  $F_0$  转换到工具坐标系下表示为  $F_0^t$ :

$$F_0^t = [F_{x0}^t, F_{y0}^t, F_{z0}^t, M_{x0}^t, M_{y0}^t, M_{z0}^t] \quad (14)$$

外力/力矩  $F_c^t$  的计算式为:

$$\begin{cases} F_{cx}^t = F_{x3}^t - G_{x2}^t - G_{x1}^t - F_{x0}^t \\ F_{cy}^t = F_{y3}^t - G_{y2}^t - G_{y1}^t - F_{y0}^t \\ F_{cz}^t = F_{z3}^t - G_{z2}^t - G_{z1}^t - F_{z0}^t \\ M_{cx}^t = M_{x3}^t - M_{gx2}^t - M_{gx1}^t - M_{x0}^t \\ M_{cy}^t = M_{y3}^t - M_{gy2}^t - M_{gy1}^t - M_{y0}^t \\ M_{cz}^t = M_{z3}^t - M_{gz2}^t - M_{gz1}^t - M_{z0}^t \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $[F_{cx}^t, F_{cy}^t, F_{cz}^t, M_{cx}^t, M_{cy}^t, M_{cz}^t]$ —工具坐标系下外部作用  $F_c^t$  的力/力矩分量。

## 2.3 位姿柔顺随动控制算法

位姿柔顺随动控制是对机器臂末端的运动均采用外力/力矩控制,对机械臂末端负载实时进行重力补偿,待装配体被近似认为是“悬浮”在空中,可自动顺应人手或外部接触作用力/力矩进行位姿调整。

位姿柔顺随动控制算法流程如图 3 所示。

机械臂辅助装配的典型工序均采用该控制算法实现,如人手牵引、销钉定位及紧固件柔性安装等。为改善装配调姿的平稳性以及外力去除后能快速停止,需

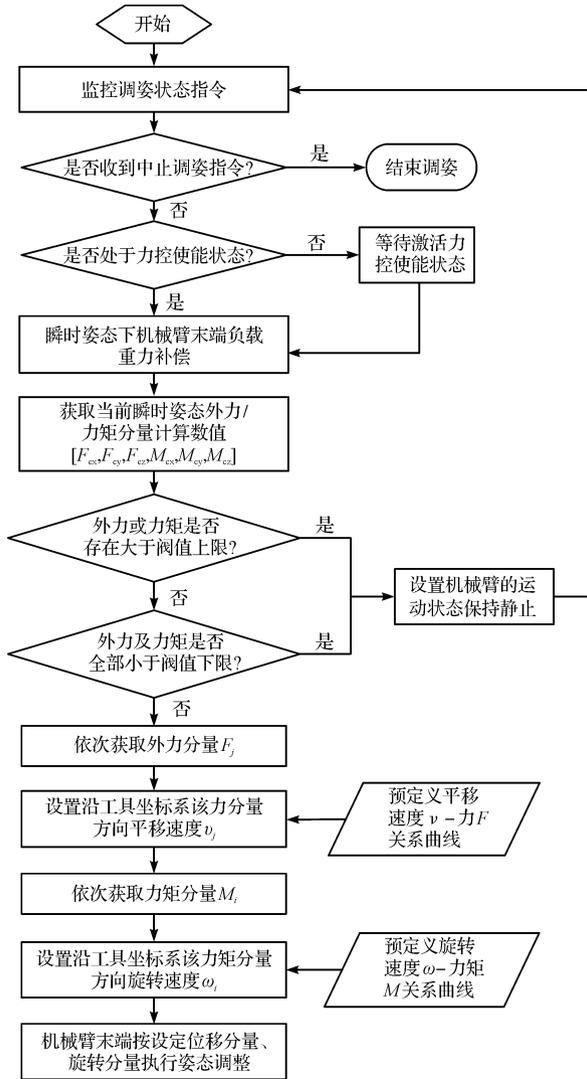


图3 位姿柔顺随动控制算法流程

合理设置力控阈值下限  $F_{min}$ , 即人力或外部接触力低于该阈值, 机械臂无运动响应。同时, 为使待装配体调姿过程中受到超过允许范围的碰撞力能立即停止, 需设置力控阈值上限  $F_{max}$ , 即外部人力或外部接触力超过该阈值, 机械臂停止运动响应。

外力 / 力矩识别误差源主要包括力传感器的测量精度、负载重力参数标定误差两个方面: (1) 力传感器的测量误差为系统误差, 该误差值通过厂家计量标定, 笔者将该值及力传感器初始安装状态受力 / 力矩值作为传感器初始偏移量  $F_0$ , 通过上述相关算法对该误差项进行消除。(2) 负载重力标定的误差直接影响外力 / 力矩识别的准确度。该误差可由最小二乘法求解重力估算值时的“相关系数  $R$ ”及“标准偏差  $\sigma$ ”表示。算法将  $R \geq 0.95, \sigma \leq k \cdot F_{min}$  作为重力估算有效性判据, 其中系数小于 1。

为有效控制外力 / 力矩识别误差对位姿随动性能的影响, 笔者设计机械臂末端随动平移速度 - 外力关

系曲线为“S 曲线”, 如图 4 所示。

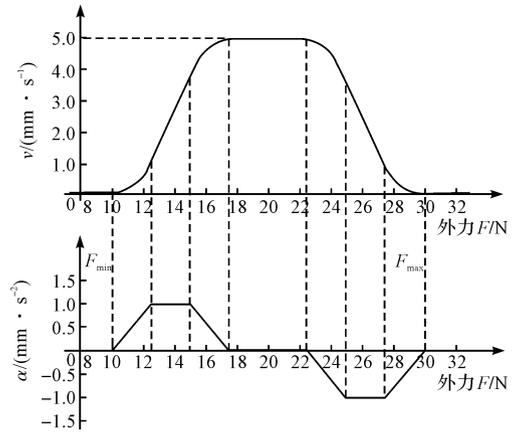


图4 随动平移速度 - 外力关系曲线

随动旋转速度 - 外力矩  $M$  关系也设计为相似“S 曲线”。“S 曲线”可抑制外力 / 力矩误差在力控范围外以及边界附近区域产生附加运动响应, 同时可避免因加速不连续产生的机械臂抖动。

### 3 实验与分析

笔者构建了机械臂辅助柔顺装配系统, 采用 KUKA 公司工业机械臂和 ATI 公司的六维力传感器。其中, 机械臂型号为 KR300R2500 ultra, 有 6 个自由度, 额定负载 300 kg, 重复定位精度  $\pm 0.06$  mm, 工作空间半径 2 496 mm; 传感器型号为 Omega191, 力测量范围  $\pm 7\ 200$  N, 力分辨率达到 11/2 N, 力矩测量范围  $\pm 1\ 400$  Nm, 力矩分辨率达到 5/24 Nm。

笔者设定该系统的力和力矩阈值上、下限分别为 (10 N, 30 N) 和 (2 Nm, 5 Nm), 在某卫星结构进行了舱板装配、单机装配实验。

#### 3.1 结构舱板装配

卫星结构舱板装配属于大型部件装配, 机械臂辅助卫星结构舱板装配的应用如图 5 所示。

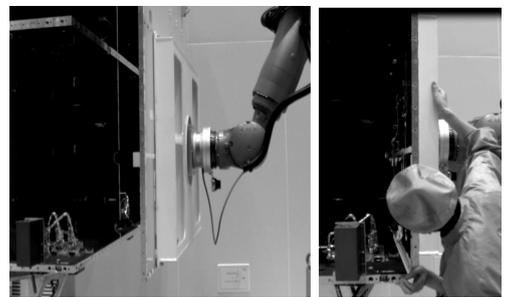


图5 机械臂辅助卫星结构舱板装配的应用

该结构舱板尺寸 1 500 mm \* 1 500 mm \* 30 mm, 质量达 100 kg。与传统方法相比, 采用机械臂辅助柔顺装配技术可以减少人工数量, 调姿灵活且精度高, 装

配接触应力可控。

### 3.2 星上单机装配

星上单机装配属于重载部件装配,机械臂辅助星上单机装配的应用如图 6 所示。

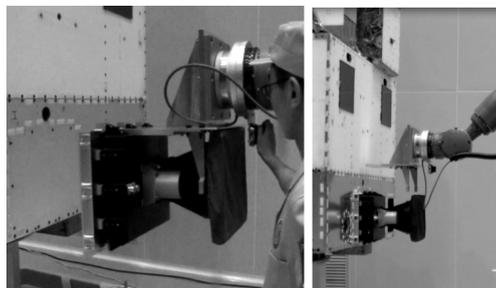


图 6 机械臂辅助星上单机装配的应用

该单机包络尺寸为 450 mm × 300 mm × 450 mm,质量达 46 kg。传统的安装方法无法从上部或底部承载单机直接到达安装部位进行装配,而机械臂能从舱体侧面空间或以特定姿态到达安装部位,进行单机的安装。

## 4 结束语

基于机械臂辅助装配技术,笔者分析了卫星的装配工艺需求,采用力传感交互控制的机械臂位姿随动技术,构建了机械臂辅助柔顺装配系统,实现了装配位姿柔顺调整、装配接触应力量化控制、负载重力精确承载/卸载等功能,为解决卫星大型部件、重载单机的安装精度及接触应力控制的技术难题提供了一种可行的解决方案,应用实验也证明了这一点。

接下来研究的重点是在人手施加作用力难以达到顺滑的条件下,优化外力/力矩的预处理及速度响应算法,以提升调姿的平稳性和柔顺性。

### 参考文献 (References):

- [1] 黎田,胡晓雪,姚为,等.机器人在航天装备自动化装配中的应用研究[J].航空制造技术,2014,465(21):102-104.
- [2] 张明,喻懋林,张玉生.自动化技术在卫星天线高精度装配中的应用研究[J].航空制造技术,2013,440(20):26-29.
- [3] 沈建新,田威.基于工业机器人的飞机柔性装配技术[J].南京航空航天大学学报,2014,46(2):181-189.
- [4] 张立建,胡瑞钦,易旺民.基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究[J].自动化学报,2017,43(3):439-447.
- [5] 董晓星.空间机械臂力柔顺控制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2013.
- [6] FAROOQ M, WANG Dao-bo. Hybrid force/position control scheme for flexible joint robot with friction between the end-effector and the environment [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2008, 46(12):1266-1278.
- [7] 张建中,何永义,李军.机器人装配视觉定位应用研究[J].机电工程,2011,28(8):934-937.
- [8] 季旭全,王君臣,赵江地,等.基于机器人与视觉引导的星载设备智能装配方法[J].机械工程学报,2018,54(23):63-72.
- [9] 张铁,刘文波.基于模糊控制的机器人柔顺装配研究[J].机械设计与研究,2013,29(3):62-69.
- [10] 邱铁成,张满,张立伟,等.机器人在卫星舱板装配中的应用研究[J].航天器环境工程,2012,29(5):579-585.
- [11] 王杰鹏,谢永权,宋涛,等.力觉交互控制的机械臂精密位姿控制技术[J].机械设计与研究,2019,35(4):47-52.
- [12] 张大伟,梁常春,危清清,等.机械臂辅助舱段转位轨迹跟踪控制与精度分析[J].载人航天,2014,20(2):104-109.

[编辑:李辉]

#### 本文引用格式:

刘仁伟,徐晓辉,谢永权,等.基于机械臂辅助的卫星柔顺装配技术研究[J].机电工程,2020,37(5):532-536.

LIU Ren-wei, XU Xiao-hui, XIE Yong-quan, et al. Compliant assembly technology of satellite assisted by robot arm [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(5):532-536.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>