

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2020.10.015

基于重力势能的模块化机械臂构型设计*

赵聪慧^{1,2}, 赵长海¹, 朱明超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 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 针对模块化机械臂面向任务进行构型设计时, 自重过大会降低机械臂输出精度的问题, 提出了一种基于重力势能的多目标构型设计方法。首先, 介绍了机械臂的模块库, 包括模块库中模块的种类划分和模块的数学表达方式; 其次, 对构型的优化设计标准进行了说明, 对重力势能作为优化目标的合理性和可行性进行了分析, 介绍了可操作度和任务点处所需克服重力作为评价标准的函数表达; 最后, 结合机械臂的约束条件, 选用遗传算法对机械臂构型进行了优化设计, 并通过喷涂机械臂设计实例证明了设计方法的可行性。研究表明: 该方法设计得到的喷涂机械臂能够在保证灵活性的同时拥有更小的自重, 减少了机械臂自重对输出精度的影响; 该方法可为模块化机械臂构型设计提供理论依据。

关键词: 可重构机械臂; 模块分类; 构型设计; 评价函数; 遗传算法

中图分类号: TH122; TP242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)10-1215-06

Configuration design of modular manipulator based on gravitational potential energy

ZHAO Cong-hui^{1,2}, ZHAO Chang-hai^{1*}, ZHU Ming-chao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China; 2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the problem of reducing the output accuracy of the manipulator when the dead-weight was too large when it was task-oriented, a multi-objective configuration design method based on gravity potential energy was proposed. Firstly, the module library of the manipulator was introduced, including the classification of the modules in the library and the mathematical expression of the modules. Secondly, the optimization design standard of configuration was explained, the rationality and feasibility of the potential energy of gravity as the optimization objective were analyzed, and the functional expression of the operability and the need to overcome the evaluation standard of gravity at the task point were introduced. Finally, combined with the constraint conditions of the manipulator, genetic algorithm was selected to optimize the configuration of the manipulator. The feasibility of the design method was proved by an example of the spray manipulator configuration design. The results indicate that the spray arm designed by this method can ensure the flexibility and have less dead-weight, reduces the influence of the dead-weight of the arm on the output accuracy, and it provides a theoretical basis for the modular arm configuration design.

Key words: reconfigurable manipulator; module classification; configuration design; evaluation function; genetic algorithm

收稿日期: 2019-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51605465); 吉林省科技发展计划资助项目(20180201020GX)

作者简介: 赵聪慧(1994-), 女, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事机器人运动学、动力学及控制方面的研究。E-mail: conghui_zhao@163.com

通信联系人: 赵长海, 男, 博士, 副研究员。E-mail: changhai403@163.com

0 前 言

目前,机械臂被广泛应用于工业自动化生产线、数控加工等领域。由于传统机械臂构型不可改变,在面对多变化、小批量的生产需求时,存在设计周期长、生产成本高的问题。为此,模块化机械臂以其构型可重构、模块可替换等特点,已经成为替代传统机械臂的首选方案^[1-3]。目前,模块化机械臂被广泛应用于工业生产、林业建筑、农业采摘、航天作业等各个领域^[4-5]。

CHEN、YANG^[6]在1996年提出了一种新型的模块化可重构机器人系统,其特点是将模块数量作为设计变量,用尽量少的模块满足任务要求。该系统基于搭积木原理,所有的模块被设计为立方体的形式,可以在立方体不同的方向上进行连接。这种类型的机械臂模块具有很好的通用性,但在面向具体任务进行机械臂构型设计时专用性不强,且构型设计过程中构型的表示方式较为复杂。

近年来,模块化机械臂的研究方向多集中在模块设计、构型设计、运动学和动力学模型、控制系统等几个方面^[7]。模块化机械臂的设计都是面向给定任务的,设计的参数是机械臂的完整构型^[8],可以用连杆装配矩阵、有根树状拓扑结构图^[9-10]、Denavit-Hartenberg参数(DH矩阵)^[11]等方式表示。在对模块化机械臂构型进行优化设计时,常用遗传算法、模拟退火法、粒子群算法和枚举法等优化方法对构型进行寻优和选取。同时,为保证机械臂的综合性能,CHOI^[12]提出了采用动力学和运动学指标相结合的多目标加权融合方法,作为机械臂构型优劣的判断标准。但对模块化机械臂而言,由于构型是根据给定模块灵活组合而成的,系统动力学模型很难获得^[13],这就使得针对动力学性能的构型评价指标难以获取。

为了提升构型设计效率,笔者提出一种基于重力势能的多目标机械臂构型设计方法,在保证机械臂灵活性的同时,能够减小自重对机械臂输出精度的影响。

1 机械臂模块库

1.1 模块的种类划分

为采用模块化机械臂设计方案,首先须建立模块化机械臂模块库,主要包括关节模块和连杆模块。

(1) 关节模块。作为机械臂最基础的模块,关节模块为机械臂的运动提供驱动力,其简图如图1所示。

笔者选择两种转动关节模块,分别为水平型和竖直型,关节转角范围为 $\pm 120^\circ$,质量为4.8 kg。



图1 关节模块

(2) 连杆模块。连杆模块连接相邻的关节模块,用来固定关节的相对位置。当关节模块种类较少时,可以通过选用轴线方向不同的连杆模块来改变关节的转动方向^[14-16],从而增加机械臂构型的种类。

为了保证关节之间的每种连接都能实现,连杆模块如图2所示。

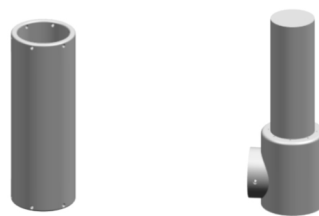


图2 连杆模块

笔者选取的连杆模块有两种类型,每种连杆模块有4种不同的长度。圆柱型连杆长度为0.06 m、0.11 m、0.16 m和0.21 m,拐角型连杆长度为0.09 m、0.17 m、0.25 m和0.33 m。模块库中所有模块的接口都是相同的,能够满足装配关系。

1.2 构型的数学表达

笔者将机械臂坐标系建立在机械臂的每个关节处,机械臂构型可以由改进DH矩阵表示;为了便于构型的进一步优化设计,对模块进行编码,其示意图如图3所示。

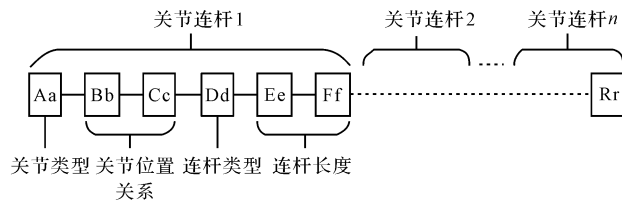


图3 编码示意图

n 自由度的机械臂构型可以由 $6n$ 位二进制字符串表示,字符串分为 n 组,每组有6位二进制字符,每组字符串的第1位表示关节模块的类型,包括水平型($J1$)和竖直型($J2$);第2和第3位表示机械臂当前关节与前一个关节的相对位置关系(第1个关节的2、3位表示机械臂第一关节与大地坐标系 z 轴的关系),分为关节轴线平行(0° 、 180°)和关节轴线垂直(-90° 、 90°)两种;第4位表示连接当前关节与下一个关节的连杆类型,包括圆柱型($L0$)和拐角型($L1$);第5和第

6 位表示连杆的长度($L01 \sim L04$, $L11 \sim L14$)。

2 机械臂构型优化设计

2.1 构型评价标准

2.1.1 评价函数

在对模块化机械臂进行构型设计时,需要设定评价标准用以判断机械臂的优劣。模块化机械臂的构型设计都是面向任务的,对构型优劣的评价标准也要根据任务设定。一般任务要求下的构型评价标准有:

(1) 可操作度。

可操作度是评价机械臂灵活性的常用指标。为保证机械臂灵活性,通过机械臂关节空间的运动控制机械臂末端的运动时,须使机械臂在末端空间每一个方向上的运动能力是相同的,即机械臂关节空间速度转换为末端速度时,末端各个方向上速度的转换能力相同。

机械臂的运行学特征方程可以表示为:

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q}) \dot{\boldsymbol{q}} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{v}$ —机械臂的末端速度; $\dot{\boldsymbol{q}}$ —机械臂的关节速度; $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})$ —机械臂的雅克比矩阵。雅克比矩阵由机械臂构型和机械臂的关节角度共同决定。

一般情况下,选用雅克比矩阵的条件数表示机械臂的可操作度。对于机械臂运动学传递(1)来说,可操作度的值越大,机械臂关节空间的灵活性越好;但当可操作度趋于无穷大时,即:

$$\|\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\|_2 = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \rightarrow \infty \quad (2)$$

此时,机械臂末端速度的各向同性变差,机械臂末端某些方向的速度将不受关节空间速度的影响,此时的机械臂处于奇异位姿。

机械臂可操作度作为评价函数可以表示为:

$$E_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{cond}(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})_i) \quad (3)$$

$$E_1 \leq \varepsilon \quad (4)$$

式中: n —给定任务点数; $\boldsymbol{J}_i$ —机械臂在第 i 个任务点处的雅克比矩阵; $\text{cond}(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})_i)$ —机械臂在第 i 个任务点处雅克比矩阵的条件数; ε —雅克比矩阵允许的最大奇异值,一般取 $\varepsilon = 100$ 。

(2) 在任务点处所需克服重力。

对于处于完整约束的机械臂系统,可以用拉格朗日方程来描述该系统随时间的变化。拉格朗日函数定义为:

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{K} - \boldsymbol{P} \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{L}$ —拉格朗日函数; $\boldsymbol{K}$ —系统总动能; $\boldsymbol{P}$ —系统总

势能。

系统的拉格朗日—欧拉方程可以表示为:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial q_i} \quad (6)$$

式中: τ_i —第 i 个关节的力或力矩; q_i —第 i 个关节的关节角度; $\dot{q}_i$ —第 i 个关节的关节速度。

将拉格朗日—欧拉方程展开可以得到:

$$\frac{\partial \boldsymbol{W}}{\partial q_i} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \boldsymbol{K}}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \boldsymbol{K}}{\partial q_i} + \frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial q_i} \quad (7)$$

式中: $\boldsymbol{D}$ —机械臂系统的能量损耗。

在不考虑能耗时,拉格朗日—欧拉方程可以表示为:

$$\frac{\partial \boldsymbol{W}}{\partial q_i} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \boldsymbol{K}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \boldsymbol{K}}{\partial q_i} + \frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial q_i} \quad (8)$$

对于工业机械臂而言,其关节变量可以通过电位计、轴角编码器等传感器测量得到,所以工业机械臂的广义坐标可以由机械臂的关节变量来表示。对于一个 n 自由度机械臂系统,其机械臂运动学转换关系为:

$$\boldsymbol{v}_i = \boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q}) \dot{\boldsymbol{q}} \quad (9)$$

其动能可以表示为:

$$\boldsymbol{K} = \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{q}}^T \boldsymbol{D}(\boldsymbol{q}) \dot{\boldsymbol{q}} \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{q})$ —机械臂惯性矩阵; $\boldsymbol{v}_i$ —第 i 个关节质心的速度。

系统势能可以表示为:

$$\boldsymbol{P} = \sum_{i=1}^n m_i g h_i \quad (11)$$

式中: h_i —第 i 个关节质心到参考平面的高度。

将式(5 ~ 11)进行整理,可以得到如下表达式:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{D}(\boldsymbol{q}) \ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \quad (12)$$

式中: $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$ —加速度系数; $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$ —重力项; $\boldsymbol{q}$ —机械臂广义关节角度; $\dot{\boldsymbol{q}}$ —机械臂广义关节速度; $\ddot{\boldsymbol{q}}$ —机械臂广义关节加速度。

由力矩方程可知:影响力矩的因素,除了机械臂角速度和角加速度以外,主要是机械臂自身的构型参数。对于工业机械臂来说,如果在其运动过程中所需克服的重力过大,不仅会增加机械臂的运动能耗,还会降低机械臂的输出精度。

笔者对机械臂力矩重力项进行优化,选用机械臂在任务点处运动所需克服重力作为评价标准。对于给定空间任务的机械臂,在执行任务过程中,机械臂满足轨迹规划终端条件,即在任务点处有:

$$\dot{\boldsymbol{q}} = 0 \quad (13)$$

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = 0 \quad (14)$$

此时,机械臂力矩全部用来克服自身重力,机械臂

传递函数为:

$$T_1 = A_1 \quad (15)$$

$$T_i = T_{i-1}A_i \quad (16)$$

式中: A_i —机械臂第 i 个关节的连杆变换矩阵; T_i —机械臂第 i 个连杆末端位置相对于世界坐标系的变换矩阵。

以机械臂在任务点处所需克服的重力作为评价函数,可以表示为:

$$E_2 = m_1 \frac{1}{2} [T_1]_{34} + \dot{m}_1 [T_1]_{34} + \dots + m_i \frac{1}{2} ([T_{i-1}]_{34} + [T_i]_{34}) + \dot{m}_i [T_i]_{34} \quad (17)$$

式中: $[T_i]_{34}$ —机械臂第 i 个关节的高度位置坐标(下标 34 表示传递函数矩阵第 3 行第 4 列的元素); m_i —机械臂第 i 个连杆的质量; $\dot{m}_i$ —机械臂第 i 个关节的质量。

根据可重构机械臂构型设计特点,多目标构型优化设计评价函数定义为,可操作度和目标点处所需克服重力加权求差,即:

$$E = \alpha_1 E_1 - \alpha_2 E_2 \quad (18)$$

式中: α_1 α_2 —评价标准的权重参数。

2.1.2 约束条件

(1) 在机械臂面向任务进行构型设计时,为了保证机械臂执行器能够顺利到达目标点,需要考虑机械臂末端执行器对任务点的可达性,即机械臂的误差值需小于允许的最大误差,即:

$$\max(\Delta_i + \delta_i) \leq \sigma \quad (19)$$

式中: Δ_i δ_i —第 i 个目标点处的位置误差和姿态误差; σ —机械臂所允许的最大误差值。

(2) 为了使机械臂能够在完成任务的过程中避开机械奇异点,对机械臂进行构型设计时,需要考虑机械臂每个关节的转角范围,机械臂的转角需满足如下约束:

$$a_i \leq q_i \leq b_i \quad (20)$$

式中: q_i —机械臂第 i 个关节的关节角; a_i b_i —第 i 个关节的转角范围。

2.2 机械臂构型优化设计流程

在进行机械臂构型设计时,首先要根据任务特点选择适应度值评价标准,适应度评估的标准决定了机械臂对给定任务的适应性。

适应度评估流程如图 4 所示。

在进行适应度值计算之前,须先验证该构型是否满足约束条件。对满足约束条件的构型,用式(37, 18)计算机械臂的适应度值。

对于模块种类少且所需自由度少的机械臂,可以用

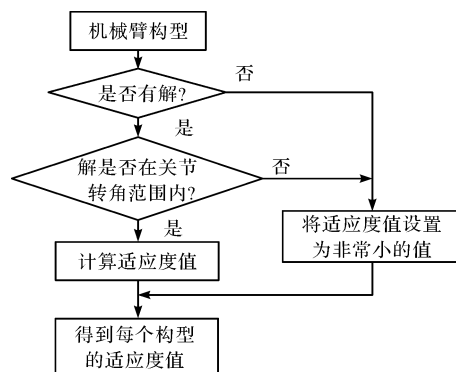


图 4 适应度评估流程

枚举法列举出所有构型并逐一分析;但当模块变量较多或自由度需求较大时,需要借助优化算法进行构型设计。

常用的优化算法有模拟退火法、粒子群算法和遗传算法。其中:(1)模拟退火法。初始温度设置较为复杂,设置温度过高会使计算时间过长,设置温度过低搜索易陷入局部最优;(2)粒子群算法。主要应用在连续问题中,应用于机械臂构型设计时容易陷入局部最优;(3)遗传算法。是一种全局算法,在构型设计时能够得到一组最优解的集合,在得到全局最优解的同时增加构型的选择性。

所以笔者采用遗传算法对构型进行优化设计,其构型设计流程如图 5 所示。

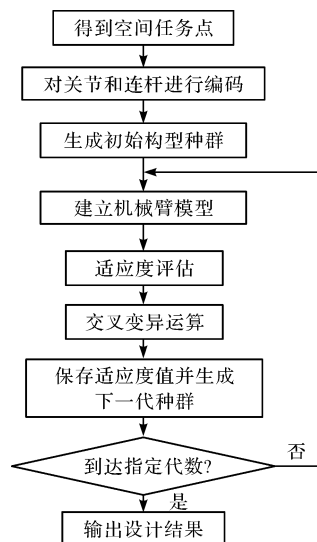


图 5 构型设计流程

在遗传算法中,机械臂构型的初始种群是根据编码形式随机生成的,通过交叉变异运算和最优值保存策略,可使设计结果具有全局性和收敛性。

3 机械臂构型设计实例

3.1 设计目标

给定一个喷涂路径,按照路径顺序选取 10 个空间点作为目标任务点,如表 1 所示。

表 1 目标任务点

任务点序号	坐标 P/m
1	(0. 000 0. 000 0. 540 0)
2	(- 0. 011 6 0. 004 6 0. 532 7)
3	(- 0. 046 4 0. 018 4 0. 510 7)
4	(- 0. 104 5 0. 041 4 0. 474 0)
5	(- 0. 174 2 0. 069 0 0. 430 1)
6	(- 0. 243 9 0. 096 6 0. 386 1)
7	(- 0. 313 5 0. 124 1 0. 342 1)
8	(- 0. 371 6 0. 147 1 0. 305 5)
9	(- 0. 406 4 0. 160 9 0. 283 5)
10	(- 0. 418 0 0. 165 5 0. 276 1)

设计一个喷涂机械臂 ,要求设计得到的机械臂末端能够依次经过给定任务点。对于给定的空间喷涂任务来说 ,只要设计得到的机械臂末端能够到达目标位置 ,对于机械臂末端姿态没有要求 ,所以可以确定设计机械臂为三自由度。

要使设计的机械臂更好地满足任务要求 ,还需要在上述基础上 ,考虑机械臂在任务点处的可操作度和所需克服的重力 ,采用运动学和动力学相结合的多目标评价标准 ,选用遗传算法对机械臂构型进行优化设计。

3.2 设计结果

笔者设定遗传算法中每代机械臂种群大小为 50 ,优化代数 为 100 ,交叉概率为 0. 2 ,变异概率为 0. 05 ,适应度权重参数为 $\alpha_1 = 0. 5$ $\alpha_2 = 0. 5$ 。优化设计结果

为: $X = J0 \overset{0^\circ}{-L0} -J0 \overset{L01}{-90^\circ} -L0 \overset{L04}{-J0} \overset{0^\circ}{-L1} -J \overset{L14}{-J}$ 。

机械臂 DH 参数如表 2 所示。

表 2 机械臂 DH 参数

关节序号	a/m	$\alpha/(^\circ)$	d/m	$\theta/(^\circ)$
关节 1	0	0	0	θ_1
关节 2	0	- 90	0. 06	θ_2
关节 3	0. 21	0	0	θ_3
末端	0	90	0. 33	-

θ_i — 机械臂第 i 个关节的关节变量

机械臂模型示意图如图 6 所示。



图 6 机械臂模型示意图

该机械臂由 3 个旋转关节组成 ,机械臂第一个关节坐标系与地面坐标系重合 ,第三连杆末端连接执行器模块。

此时得到的机械臂构型满足可达性和关节角度约束 ,可以满足给定任务要求。

其适应度变化曲线如图 7 所示。

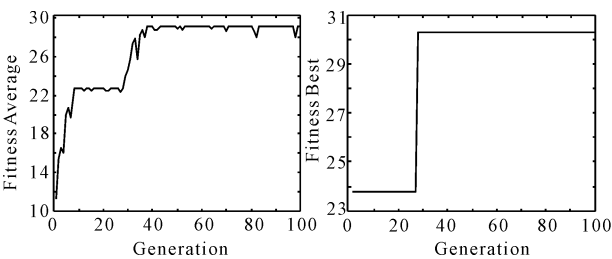


图 7 适应度变化曲线

由图 7 可以看出: 在第 10 代左右出现了能够满足任务要求的机械臂构型; 在第 28 代出现了满足任务要求的最优构型; 此后适应度值最大的机械臂构型由最优值保留策略保存下来; 满足任务的最优构型的适应度为 28. 963 8。

综上所述 ,综合考虑机械臂灵活性和所需克服重力 ,在满足任务要求的前提下最后得到的构型拥有最优性能 ,既保证了机械臂的灵活性 ,又使得机械臂在完成任务过程中所需克服的重力最小。

4 结束语

面对模块化机械臂构型设计时减小自重的需求 ,笔者提出了一种基于重力势能的多目标机械臂构型设计方法 ,采用遗传算法对机械臂进行了优化设计 ,并通过焊接机械臂实例验证了该设计方法的可行性; 为了保证机械臂在减小自重的同时拥有更好的灵活性 ,选用机械臂在任务点处的可操作度和机械臂在运动过程中所需要克服的重力 ,作为综合定量指标; 为了保证优化结果的全局性 ,选用遗传算法对机械臂构型进行了优化设计。

仿真结果表明: 满足任务的最优构型适应度为 28. 963 8 ,说明经过优化设计所得到的机械臂 ,在满足任务要求的基础上 ,能够拥有更好的灵活性和更小的自重。

(下转第 1230 页)

本文引用格式:
赵聪慧 赵长海 朱明超. 基于重力势能的模块化机械臂构型设计[J]. 机电工程 2020 37(10) : 1215 - 1219 ,1230.
ZHAO Cong-hui , ZHAO Chang-hai , ZHU Ming-chao. Configuration design of modular manipulator based on gravitational potential energy[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering , 2020 , 37(10) : 1215 - 1219 ,1230.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

- and stress distribution of single CBN superabrasive grain in high-speed grinding [J]. **Precision Engineering**, 2018 (54): 70-80.
- [12] RAO Z W, DING W F, ZHU Y J, et al. Understanding the self-sharpening characteristics of polycrystalline cubic boron nitride super-abrasive in high-speed grinding of Inconel718 [J]. **Ceramics International**, 2019, 45(10): 13324-13333.
- [13] 高利和, 里 杨, 高 博, 等. 镍基合金换热器的焊接要点 [J]. **压力容器**, 2015, 32(5): 75-79.
- [14] ÖPÖZ T T, CHEN X. Experimental Investigation of Material Removal Mechanism in Single Grit Grinding [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2012, 6(3): 32-40.

[编辑: 冯黎雅]

本文引用格式:

程 强, 梁国星, 郝建宇, 等. 高速磨削 Inconel718 单颗 PCBN 磨粒磨损研究 [J]. **机电工程**, 2020, 37(10): 1225-1230.CHENG Qiang, LIANG Guo-xing, HAO Jian-yu, et al. Wear study of single PCBN abrasive in high speed grinding Inconel718 [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2020, 37(10): 1225-1230. **《机电工程》杂志**: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1219 页)

参考文献(References):

- [1] 冯慧娟, 苗 青, 樊胜秋, 等. 工业机器人机械结构模块化设计 [J]. **机械工程与自动化**, 2019, 213(2): 105-106, 109.
- [2] 王 涛, 李 阳, 王 宁, 等. 模块化可重构坐标机器人设计 [J]. **机械设计与制造**, 2018(8): 126-128, 132.
- [3] 苏华勇, 李海艳. 机械臂系统的动力学建模与分析 [J]. **机电工程技术**, 2020(7): 120-122.
- [4] WU W, GUAN Y, YANG Y, et al. Multi-objective configuration optimization of assembly-level reconfigurable modular robots [C]. **IEEE International Conference on Information & Automation**. Piscataway: IEEE, 2017.
- [5] LEVIN M, DEGANI A. A conceptual framework and optimization for a task-based modular harvesting manipulator [J]. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2019, 166(11): 1-11.
- [6] CHEN I M, YANG G. Configuration independent kinematics for modular robots [C]. **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. Michigan: IEEE, 1996.
- [7] 刘明尧, 谈大龙, 李 斌. 可重构模块化机器人现状和发展 [J]. **机器人**, 2001, 23(3): 275-279.
- [8] 吴文强, 管贻生, 朱海飞, 等. 面向任务的可重构模块化机器人构型设计 [J]. **哈尔滨工业大学学报**, 2014, 46(3): 93-98.
- [9] 于天彪, 乔 木, 李 明. 基于遗传算法的医药码垛机器人结构参数优化研究 [J]. **机电工程**, 2016, 33(11): 1289-1294.
- [10] CHEN I M, YANG G. An evolutionary algorithm for the reduction of DOFs in Modular Reconfigurable Robots [J]. **Proceeding of the ASME Dynamic System and Control Division**, 1998(64): 759-766.
- [11] 潘新安, 王洪光, 姜 勇, 等. 一种模块化可重构机器人系统的研制 [J]. **智能系统学报**, 2013(4): 10-16.
- [12] CHOI J, PARK D, SHIN H, et al. A new approach to generate the DH parameters of modular robots [C]. **2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)**, Piscataway: IEEE, 2017.
- [13] GIUSTI A, ALTHOFF M. Automatic Centralized Controller Design for Modular and Reconfigurable Robot Manipulators [C]. **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems**. Vancouver: IEEE, 2015.
- [14] 林蔚韡, 姚立纲, 东 辉. 一种可重构模块化机器人的设计与运动学分析 [J]. **机械制造与自动化**, 2019, 48(2): 150-154.
- [15] 李秋苹, 章 军, 崔 军. 一种欠驱动柔性机械手的抓取力研究 [J]. **轻工机械**, 2018, 36(3): 21-24.
- [16] 计时鸣, 黄希欢. 工业机器人技术的发展与应用综述 [J]. **机电工程**, 2015, 32(1): 1-13.

[编辑: 冯黎雅]