

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802381

# 变刚度柔性关节机构的驱动调节控制优化

陈国斌

(广州华立科技职业学院 广州 511325)

**摘要:** 变刚度柔性关节机构在主-被动复合驱动调节时受到关节部位阻尼的作用,导致驱动调节的全局稳态性不好,提出一种基于复合式幅值饱和和非线性状态反馈的变刚度柔性关节机构优化控制设计方法,构造变刚度柔性关节机构的动力学模型,以柔性关节等效刚度、阻尼力和关节弹簧压缩量等参量为控制约束参量,建立变刚度柔性关节机构的被控对象模型,结合幅值饱和和非线性状态反馈控制方法进行自适应阻尼误差修正,根据主-被动复合刚度特性进行变刚度柔性关节机构的驱动惯性参量调节,实现关节机构驱动调节控制。仿真结果表明,采用该方法进行变刚度柔性关节机构控制的稳定性较好,驱动调节能力较强。

**关键词:** 变刚度柔性关节;机构;驱动调节;控制;柔性

**中图分类号:** TN99;TP242      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.50

## Optimization of driving and regulating control for flexible joint mechanism with variable stiffness

Chen Guobin

(Guangzhou Huali Science and Technology Vocational College, Guangzhou 511325, China)

**Abstract:** The flexible joint mechanism with variable stiffness is affected by joint damping when it is controlled by active and passive composite drive, which leads to poor global steady-state of driving regulation. An optimal control design method for flexible joint mechanism with variable stiffness based on compound amplitude saturation nonlinear state feedback is proposed. The dynamic model of flexible joint mechanism with variable stiffness is constructed, and the equivalent stiffness of flexible joint is used. The damping force and the compression of the joint spring are the control constraints. The controlled object model of the flexible joint mechanism with variable stiffness is established. The adaptive damping error is corrected by using the amplitude saturation nonlinear state feedback control method. According to the characteristics of active and passive composite stiffness, the driving inertia parameter of flexible joint mechanism with variable stiffness is adjusted, and the driving regulation control of joint mechanism is realized. The simulation results show that the stability of the flexible joint mechanism with variable stiffness is better and the driving ability is better.

**Keywords:** variable stiffness flexible joint; mechanism; drive adjustment; control; flexibility

## 0 引 言

在未知工况环境中,刚性机器人容易受到环境因素的影响,导致机械关节的驱动性不好,变刚度柔性关节机构在监测对象的抓取和信息采集作业中受到活动部件的小扰动作用容易产生稳态误差,导致变刚度柔性关节机构的姿态稳定性不好。为了提高机械关节的人机交互性,提高机械装配和柔性驱动能力,需要研究一种有效的变刚度柔性关节驱动控制方法,结合高精度力矩传感器实现对机械装置的动力驱动控制,提高机器人作业过程中的稳定性<sup>[1]</sup>。

变刚度柔性关节机构在驱动调节过程中容易产生稳态误差和震荡误差,使得关节机构驱动调节的稳定性不好,作业精度不高,需要进行变刚度柔性关节机构驱动调节控制优化设计,提高控制品质。传统方法中,对变刚度柔性关节机构的控制方法主要有模糊 PID 控制方法、滑模控制方法<sup>[2-3]</sup>。建立控制约束参量模型并进行控制目标函数的优化求解,结合相应的控制方法实现对变刚度柔性关节机构的驱动力学调节。文献[4]提出一种基于主被动变刚度特性识别的变刚度柔性关节机构稳定性控制方法,采用末端位姿预测方法进行变刚度柔性关节机构的零位偏置误差反

收稿日期:2018-12-04

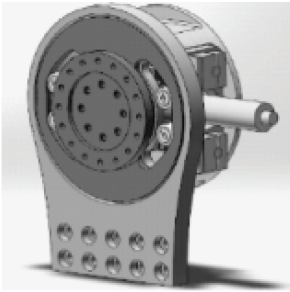
馈补偿计算,结合自适应驱动转矩控制方法,实现关节机构的驱动控制,但该方法的抗干扰性不好,关节动力学调节稳定性不高;文献[5]提出一种基于混沌粒子群优化算法的空间变刚度柔性关节机构调节方法,通过仿生粒子群优化方法进行变刚度柔性关节机构的自适应控制,提高了控制过程的收敛性,但该方法在受到变刚度柔性关节机构的部件的活动性作用和小扰动下容易出现稳态误差。

针对上述问题,本文提出一种基于复合式幅值饱和非线性状态反馈的变刚度柔性关节机构优化控制设计方法,首先构造变刚度柔性关节机构的动力学模型,建立变刚度柔性关节机构的被控对象模型,然后结合幅值饱和非线性状态反馈控制方法进行自适应阻尼误差修正,根据主-被动复合刚度特性进行变刚度柔性关节机构的驱动惯性参量调节,实现关节机构驱动调节控制。最后进行仿真实验分析,展示了本文方法在提高变刚度柔性关节机构的驱动调节控制稳定性方面的优越性能。

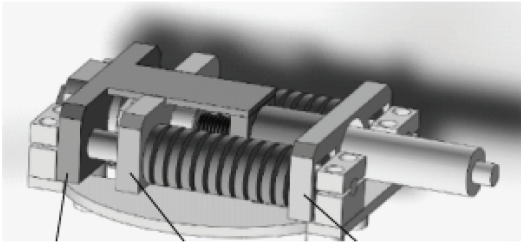
## 1 变刚度机构构型分析与控制约束参量

### 1.1 变刚度机构构型被控对象描述

本文研究的变刚度机构构型采用凸轮机构的被动变刚度柔性关节构型,采用主被动刚度联合调节系统构造,输入盘与关节驱动器连接,输出盘借助两组弹簧产生关节柔性变形弹性力,实现关节柔顺驱动调节,考虑主动调刚度部分机构构型<sup>[6]</sup>,通过输入、输出盘相对转动控制方法进行驱动调节,主-被动变刚度关节结构如图1所示。



(a) 总体结构



(b) 功能结构

图1 主-被动变刚度关节结构

根据图1所示的变刚度柔性关节机构构造,对被控对象分析,采用敏感陀螺仪进行数据采集,给定变刚度柔性关

节机构初始位形  $\theta_{\text{start}} \in \mathbf{C}_{\text{free}}$ , 在驱动调节作业下的初始变刚度特性为  $\mathbf{p}_{\text{obj}}$  和可行驱动调节位姿参量为  $\mathbf{g}_c$ , 驱动调节目标位形  $\theta_{\text{goal}}$  未知,令关节主动变刚度电动机的连杆运动参数集为  $\mathbf{q}_1 = [q_1, \dots, q_7]^T$ ,  $\sin q_i$  和  $\cos q_i$  分别记为  $s_{q_i}$  和  $c_{q_i}$ , 并简记为  $s_i$  和  $c_i$ , 表示变刚度柔性关节机构驱动末端执行器的转向角和角速度,在坐标系  $i$  和  $i-1$  之间构建变刚度柔性关节机构的柔性变形量-输出力矩齐次矩阵  ${}^{i-1}\mathbf{T}_i(q_i)$  可表示为:

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i(q_i) = \begin{bmatrix} c_i & -c_{a_i}s_i & s_{a_i}s_i & a_i c_i \\ s_i & c_{a_i}c_i & s_{a_i}c_i & a_i s_i \\ 0 & s_{a_i} & c_{a_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

可用  $4 \times 4$  的齐次坐标矩阵  ${}^l\mathbf{T}_0(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$  表示 ( $\equiv {}^l\mathbf{T}_0(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ ), 变刚度柔性关节机构驱动作用力矩的末端效应器为  $\Sigma_7$ , 在凸轮圆心坐标系下  $\Sigma_0$  的变刚度柔性关节机构逆向运动和正向运动的联动方程式描述为:

$${}^0\mathbf{T}_7(q_1) = \prod_{i=1}^7 {}^{i-1}\mathbf{T}_i(q_i) = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,柔性变形量-输出力矩存在7自由度的运动空间分布向量,柔性关节输出力矩的控制约束等式为:

$$q_1 \equiv \theta_4 = \arctan 2(\pm p_{4y}, \pm p_{4x}) \quad (3)$$

$$q_2 \equiv \theta_5 = \arctan 2(-p_{4z}, c_1 p_{4x} + s_1 p_{4y} - l_s) \quad (4)$$

类似地,求得  $q_3$  和  $q_4$ :

$$q_3 = \arctan 2(-s_1 o_{4x} + c_1 o_{4y}, -s_2 c_1 o_{4x} - s_2 s_1 o_{4y} - c_2 o_{4z}) \quad (5)$$

$$q_4 \equiv \theta_7 \arctan 2(c_2 c_1 n_{4x} + c_2 s_1 n_{4y} - s_2 n_{4z}, c_2 c_1 a_{4x} + c_2 s_1 a_{4y} - s_2 a_{4z}) \quad (6)$$

以此类推,求得各个自由度空间凸轮结构柔性关节输出力矩,在7自由度空间内求得变刚度柔性关节机构驱动的被控对象模型描述为:

$${}^4\mathbf{T}_5^{-1}(q_i) \cdot {}^4\mathbf{T}_7 = \prod_{i=6}^7 {}^{i-1}\mathbf{T}_i(q_i) \quad (7)$$

上式相当于变刚度柔性关节机构作业的IK解析方程式,对方程式进行优化解算,以柔性关节等效刚度、阻尼力和关节弹簧压缩量等参量为控制约束参量,结合误差补偿和参数反馈调节,提高变刚度柔性关节机构的驱动调节位稳定性<sup>[7]</sup>。

### 1.2 控制约束参量分析

以柔性关节等效刚度、阻尼力和关节弹簧压缩量等参量为控制约束参量,得到控制对象模型描述为:

$$\begin{cases} \dot{V}_m = -[I_{E,m} + g_{Na} m^3 h_m (V_m + V_{E,m} - V_{Na}) + g_L n^4 (V_m + V_{E,m} - V_L) + g_L (V_m + V_{E,m} - V_L)] / C_m \\ \dot{m}_m = \alpha_m (V_m) (1 - m_m) - \beta_m (V_m) m_m \\ \dot{h}_m = \alpha_h (V_m) (1 - h_m) - \beta_h (V_m) h_m \\ \dot{n}_m = \alpha_n (V_m) (1 - n_m) - \beta_n (V_m) n_m \end{cases} \quad (8)$$

以变刚度柔性关节机构步行姿态的稳态性为自变量控制约束条件,取:

$$\dot{\sigma}_i = \begin{cases} \mu \sin \frac{\pi e}{2\mu}, & |e_i| < \mu \\ \mu, & |e_i| \geq \mu \\ -\mu, & |e_i| \leq -\mu \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\mu > 0$ 。结合幅值饱和和非线性状态反馈控制方法进行自适应阻尼误差修正,在迭代学习中以变刚度柔性关节机构的阻尼力矩作为输入参数,输入层的惯性力矩控制参量表示为:

$$\begin{cases} \dot{V}_s = -[I_{E,s} + g_{N_a} m_s^3 h_s (V_s + V_{E,s} - V_{N_a}) + g_k n_s^4 (V_s + V_{E,s} - V_k) + g_L (V_s + V_{E,s} - V_L)] / C_m + u \\ \dot{m}_s = \alpha_m (V_s) (1 - m_s) - \beta_m (V_s) m_s \\ \dot{h}_s = \alpha_h (V_s) (1 - h_s) - \beta_h (V_s) h_s \\ \dot{n}_s = \alpha_n (V_s) (1 - n_s) - \beta_n (V_s) n_s \end{cases} \quad (10)$$

增加的  $u$  这一项,使得柔性关节柔性变形角度能准确地跟随参考轨迹  $y_d(t)$ , 绘制输出力矩  $M$  与柔性变形角度之间曲线关系,采用复合式幅值饱和和非线性状态反馈控制算法<sup>[8]</sup>,得到凸轮与凸轮槽接触点的力矩驱动方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_k(t) = f(t, x_k(t), u_k(t)) \\ y_k(t) = g(t, x_k(t)) + D(t)u_k(t) \end{cases} \quad (11)$$

其中,对变刚度柔性关节机构的第  $k$  次跟踪误差:

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) \quad (12)$$

设  $x^*$  是解集  $\{x_k\}$  中的一个极限点,以柔性关节等效刚度、阻尼力和关节弹簧压缩量等参量为控制约束参量,建立变刚度柔性关节机构的被控对象模型,函数  $f(x)$  在实域中是连续函数,所以:

$$x^* \in F(x^*) = \{x^*\} - G(x^*) \quad (13)$$

柔性关节的刚度和各个电机的等效转动惯量满足:

$$G\{x^*\} = \partial f(x^*) \quad (14)$$

所以得到  $x^*$  是函数  $f(x)$  的稳定点,结合柔性关节的形变补偿方法,进行驱动调节控制<sup>[9]</sup>。

## 2 关节机构的驱动调节控制优化

### 2.1 变刚度柔性关节参数优化设计

在 FJR 连杆端动力学模型中进行变刚度柔性关节参数优化设计,结合幅值饱和和非线性状态反馈控制方法进行自适应阻尼误差修正<sup>[10]</sup>,因为驱动力矩  $Lev_a C \neq \phi$ 。如果  $C(x^*) > 0$ , 则输入、输出盘凸轮槽的初始压缩量:

$$C(x^*) = C(x^*) > 0 = C_o(x^*) \quad (15)$$

采用 7 自由度的旋转控制方法构建变刚度柔性关节机构的动力学模型,由于  $C_o(x^*)$  是伪随机稳定凸函数,且  $C(x^*) < C_o(x^*)$ , 所以接触力作用于凸轮盘的切向力满足:

$$gradE = \sum_i^M \sum_j^M \left( \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} \right)^2 + \sum_i^L \sum_j^M \left( \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} \right)^2 \quad (16)$$

式(16)与  $0 \in \partial C_o(x^*)$  矛盾,因此得到柔性关节的力学调节参数的 Lyapunov 函数满足:

$$C_o(x^*) < 0 \quad (17)$$

如果  $C_o(x^*) < 0$ , 则:

$$\Delta E = -\eta \left[ \left( \frac{\partial E}{\partial \omega} \right)^2 + \left( \frac{\partial E}{\partial b} \right)^2 \right] \quad (18)$$

上式表示变刚度柔性关节参数设计满足稳定性条件,如果  $C_o(x^*) = 0$ , 结合机械设计及标准件选型,得到优化的参数驱动模型为:

$$Y(P, Q, \beta) = Y[red(P, Q, \beta), Q, \beta] \quad (19)$$

根据主-被动复合刚度特性进行变刚度柔性关节机构的驱动惯性参量调节,实现关节机构驱动调节控制<sup>[11]</sup>。

### 2.2 控制律优化

为达到理想的被动变刚,本文采用复合式幅值饱和和非线性状态反馈的变刚度柔性关节机构优化控制方法<sup>[12-13]</sup>,

如果  $\exists a_1 < 0$ , 使得柔性关节柔性变形角度  $f_{\rho 1} = \frac{f_m}{Z_\rho}$ , 可以得到伺服电动机驱动力矩  $\lambda > 0$ 。如果  $\lambda = 0$ , 则:

$$0 \in \partial C_o(x^*) \quad (20)$$

主动变刚度特性方程可以描述为:

$$\begin{cases} W_{ik}(d) = \frac{IDF_1}{IDF_{const}} \times a(H_{ac}) \\ IDF_1 = tf_{ik}(d) \times \log\left(\frac{N}{n_k} + 0.01\right) \\ IDF_{const} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (tf_{ik}(d))^2 \times \left[\log\left(\frac{N}{n_k} + 0.01\right)\right]^2} \end{cases} \quad (21)$$

并结合谐振比率控制方法和扰动观测器,得到单个凸轮有效作用的驱动调节方程为:

$$\begin{cases} \nabla E = 0 \\ \nabla \times E + \frac{1}{C} B = 0 \\ \nabla B = 0 \\ \nabla \times B - \frac{1}{C} E = 0 \end{cases} \quad (22)$$

连杆运动的动力源是电机端与连杆端的转角差<sup>[14]</sup>,则动态补偿项:

$$\| |\nabla|^s (fg) \|_{L_t^2} \leq \| |\nabla|^s f \|_{L_t^2} \| g \|_{L_t^2} + \| f \|_{L_t^2} \| |\nabla|^s g \|_{L_t^2} \quad (23)$$

$$0 \in \lambda \partial f(x^*) + \lambda_2 \partial C(x^*) \quad (24)$$

采用小增益和误差饱和和非线性变换进行驱动调节,  $Lev_a C \neq \phi$ , 又由于  $\exists x \in Lev f$ , 可以得到:

$$Ca(x) = a_1 < 0 \quad (25)$$

根据 Lyapunov 稳定性条件,得知本文设计的控制模型能保证闭环系统所有信号有界<sup>[15]</sup>。

## 3 实验测试分析

为了测试本文方法在实现变刚度柔性关节驱动调节控

制中的应用性能,进行仿真实验,实验的样机采用 Maxon 型柔性关节样机,如图 2 所示。

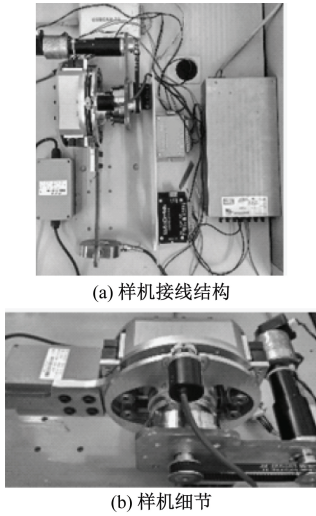


图 2 柔性关节实验样机

采用工业标准凸轮滚针轴进行随动跟踪调节,采用三轴陀螺仪进行变刚度柔性关节机构步态参数采集,截面极惯性矩设定为  $250 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,柔性自由端的载荷为  $1\ 200 \text{ kN}$ ,变刚度柔性关节机构驱动调节数据的测量误差分别设定为  $2.1$ 、 $1.24$ 、 $1.87 \text{ mm}$ ,其他参数设定如表 1 所示。

表 1 柔性关节驱动参数

输出力矩/ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	截面 半径/ mm	弹性 模量/ MPa	减速比	最大承 受力矩/ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	负载/ kg
40	25	2.3	100 : 1	14	1.2

根据上述仿真环境和参数设定,进行柔性关节机构的驱动调节控制,进行柔性关节抛掷实验分析,得到柔性关节的驱动调节位置曲线,如图 3 所示。

测试不同方法进行驱动调节的输出误差,得到对比结果如表 2 所示。

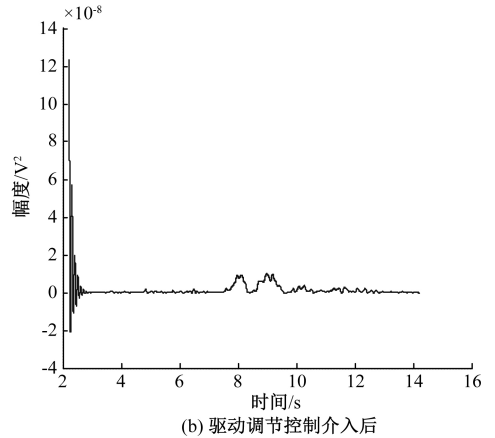
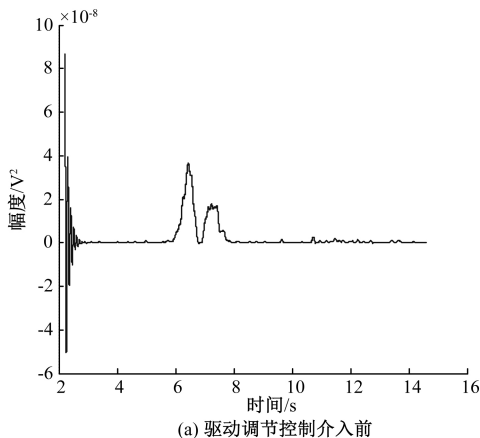


图 3 变刚度柔性关节抛掷试验的位置曲线

表 2 误差性能对比 (mm)

迭代步数	本文方法	PID	滑模控制
100	0.246	0.454	0.664
200	0.165	0.376	0.489
300	0.124	0.213	0.323
400	0	0.124	0.243

分析图 3 和表 2 的结果得知,采用本文方法进行柔性关节的主被动复合驱动调节控制,输出震荡情况明显得到改善,变刚度柔性关节机构控制的稳定性较好,能够达到最佳的运动特性。

#### 4 结 论

本文研究了一种有效的变刚度柔性关节驱动控制方法,结合高精度力矩传感器实现对机械装置的动力驱动控制,提高机器人作业过程中的稳定性。提出一种基于复合式幅值饱和非线性状态反馈的变刚度柔性关节机构优化控制设计方法,构造变刚度柔性关节机构的动力学模型,以柔性关节等效刚度、阻尼力和关节弹簧压缩量等参量为控制约束参量,建立变刚度柔性关节机构的被控对象模型,结合幅值饱和非线性状态反馈控制方法进行自适应阻尼误差修正,根据主-被动复合刚度特性进行变刚度柔性关节机构的驱动惯性参量调节,实现关节机构驱动调节控制。研究表明,本文方法进行柔性关节驱动控制的输出稳定性较好,提高了柔性关节的主被动复合驱动调节控制能力。

#### 参考文献

[1] 史延雷, 张小俊, 张明路. 主-被动复合变刚度柔性关节设计与分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 55-62.

[2] 徐为民, 徐攀. 不确定扰动下双起升桥吊双吊具鲁棒自适应滑模同步协调控制[J]. 控制与决策, 2016,

- 31(7): 1192-1198.
- [3] KOIVUMAKI J, MATTILA J. Stability-guaranteed impedance control of hydraulic robotic manipulators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 601-612.
- [4] KOIVUMAKI J, MATTILA J. Stability-guaranteed force-sensorless contact force/motion control of heavy-duty hydraulic manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(4): 918-935.
- [5] CHEN G R, WANG J Z, WANG S K, et al. Separate meter in and separate meter out energy saving control system using dual servo valves under complex load conditions [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(10): 1053-1058.
- [6] 杜学丹, 蔡莹皓, 鲁涛, 等. 一种基于深度学习的机械臂抓取方法[J]. 机器人, 2017, 39(6): 820-828, 837.
- [7] 王三秀, 俞立, 徐建明, 等. 机械臂自适应鲁棒轨迹跟踪控制[J]. 控制工程, 2015, 22(2): 241-245.
- [8] 郭宪, 马书根, 李斌, 等. 基于动力学与控制统一模型的蛇形机器人速度跟踪控制方法研究[J]. 自动化学报, 2015, 41(11): 1847-1856.
- [9] 田富洋, 吴洪涛, 赵大旭, 等. 柔性多体系统混合递推动力学建模及实时仿真研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(1): 6-12.
- [10] 李可, 米捷. 基于变结构 PID 的仿生机器人机电控制算法[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2016, 28(2): 32-37.
- [11] 刘文, 徐科军, 乐静, 等. 科氏流量计幅值控制中两类关键参数的确定[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10): 183-189.
- [12] 陈辉, 江楠. 用于冲击加速度测量的机械滤波器设计[J]. 中国测试, 2018, 44(10): 107-114.
- [13] 常文龙, 何玉珠. 某型主动雷达导引头自动测试系统设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(20): 88-92.
- [14] 贾昊, 董泽, 闫来清. 基于信号分解和统计假设检验的稳态检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 150-157.
- [15] 蒋帅, 孙小凡, 向茂生, 等. 一种基于 DEM 的机载干涉相位生成算法[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(9): 56-61.

#### 作者简介

陈国斌, 本科、助教, 主要研究方向为机械制造自动化、机械工程。

E-mail: cgb1234567890@126.com