

基于协作机器人关节集成扭矩传感器的研究

朱弟发^{1,2} 张恩阳^{1,2} 韩 康¹ 徐振邦¹ 王忠素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: 为确保协作机器人的安全性,需要在协作机器人关节处安装扭矩传感器,由于协作机器人自身关节尺寸有限且负载比较小,需要一种结构紧凑、灵敏度高的扭矩传感器。为解决这一难题,在分析传统轮辐式扭矩传感器的基础上,提出了一种机器人关节输出轴和传感器一体化的结构,对传感器弹性体建立力学模型、数学模型,使用响应面法对弹性体结构参数进行优化,根据 Box-Behnken 法进行变量设计,然后利用 UG/Hypermesh 进行有限元仿真验证。结果表明,优化后的传感器具有良好的抗过载能力、线性度及灵敏度。

关键词: 协作机器人; 扭矩传感器; 一体化; 响应面法; 优化设计; 有限元仿真

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1002-1841(2021)10-0006-04

Research on Integrated Torque Sensor Based on Collaborative Robot Joint

ZHU Di-fa^{1,2} ZHANG En-yang^{1,2} HAN Kang¹ XU Zhen-bang¹ WANG Zhong-su¹

(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)

Abstract: In order to ensure the safety of the collaborative robot, it is necessary to install torque sensors at the joints of the collaborative robot. Torque sensors with compact size and high sensitivity are needed due to collaborative robot joint's size limitation and small load. To solve this problem, an integrated structure of output shaft and sensor was proposed based on analysis of the traditional cross-beam torque sensor. The mechanical model and mathematical model for the sensor were established. Response surface methodology was employed to optimize the sensor structural parameters. Variables were designed by Box-Behnken design. Then UG/Hypermesh was used for finite element simulation verification. The results show the optimized sensor has good anti-overload capability, linearity and sensitivity.

Keywords: collaborative robot; torque sensor; integration; response surface methodology; optimal design; finite element simulation

0 引言

协作机器人作为新兴产业代表^[1],被视为实现中国制造2025的关键^[2-3]。协作机器人由于与人协同工作更强调安全性^[4],高灵敏的扭矩传感器能够准确测量机器人关节受力情况,从而确保足够的安全性。而如何获得最优的传感器弹性体结构一直是设计难题^[5]。潘新安等通过将应变片粘贴在谐波减速器柔轮上测量扭矩,但是柔轮的噪声对测量影响很大^[6];文献[7]设计了“弹簧离合器”式传感器,能减少关节的碰撞力;文献[8]设计了一款异形体传感器,灵敏度高但弹性体结构复杂难以加工;王罗罗等设计一款带有保护梁的扭矩传感器,测量应变梁的剪切应变,应变较小^[9];蒋聪等对轮辐式结构进行了优化设

计,加工性好但增加了关节轴向尺寸^[10]。

本文在详细分析传统关节扭矩传感器测量原理的基础上,基于一体化设计理念,提出了扭矩传感器与输出轴一体化结构,降低了关节轴向尺寸,提高了关节负载/自重比。同时,借助有限元仿真及响应面法,得到了一种扭矩传感器弹性体的优化方法。

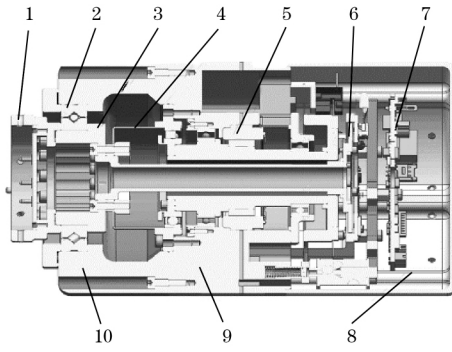
1 扭矩传感器需求分析及结构设计

1.1 传感器需求分析

图1为新一代协作机器人的关节内部结构,即本文传感器设计的应用对象。由于关节外壳、谐波减速器已确定,故传感器最大外径应小于关节上壳内径(63.5 mm),内轮缘上螺栓圆中心线直径为27 mm,最大高度12 mm。根据机械臂工况需求,扭矩传感器量程为0~30 N·m,且具有2.5倍的抗过载能力,即传感器能承受75 N·m的瞬时载荷,载荷释放后,传感器仍可正常工作。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972343)

收稿日期: 2021-01-02

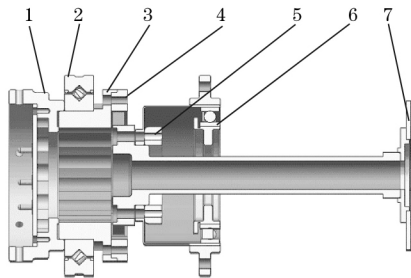


1—输出转接件；2—交叉滚子轴承；3—输出轴；4—谐波减速器；5—无框力矩电机；6—编码器组；7—驱动电源组；8—关节下壳；9—谐波基座；10—关节上壳

图1 协作机器人关节结构图

1.2 传感器整体设计

为最大程度减小关节尺寸,降低关节整体质量,采用一体化设计理念,将关节输出轴与传感器设计为一体,整体安装示意图如图2所示。



1—输出转接件；2—交叉滚子轴承；3—轴承基座；4—扭矩传感器；5—谐波压圈；6—谐波减速器；7—绝对值编码器转子

图2 传感器安装示意图

扭矩传感器的内轮缘与谐波减速器的输出端柔轮通过谐波压圈螺栓连接,扭矩传感器的外轮缘与轴承基座连接,传感器的末端与绝对值编码器转子连接,便于对关节进行位置控制;同时,采用交叉滚子轴承进行支撑,有效避免轴向力与径向力对扭矩传感器的干扰,提高传感器测量的准确性与可靠性;最后通过输出转接件将运动传递至下一关节。

1.3 传感器弹性体设计

考虑到机械臂关节负载较小,内部空间有限,故采用4条轮辐的弹性体结构,一方面便于后期加工和应变片粘贴,另一方面利用其剩余空间便于后期调理电路板的安装。轴承基座和扭矩传感器结构如图3、图4所示。

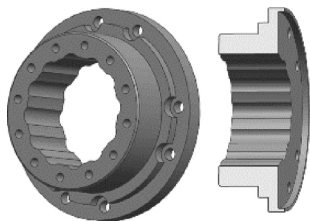


图3 轴承座示意图

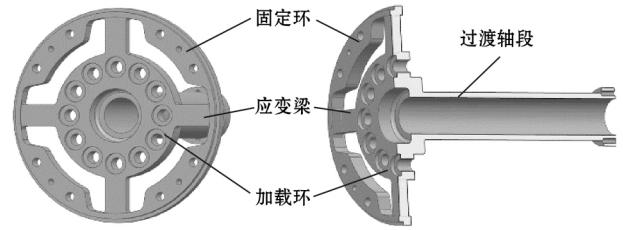


图4 弹性体示意图

传感器弹性体通常要求材料屈服极限高、耐腐蚀、各向同性及加工性好,在对比常用材料后,选择铝合金7075-T6,其材料特性如表1所示。

表1 7075-T6 特性表

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa
2.81	71.7	0.33	503

2 传感器力学模型分析

建立传感器弹性体力学模型,分析弹性体所受力与应变梁变形之间的关系,方便进一步优化传感器结构。由于传感器过渡轴段部分几乎不受力,所以受力分析时可忽略。传感器弹性体的变形主要是应变梁的弯曲变形,加载环与固定环的变形可近似忽略,弹性体可简化为如图5所示。图5中,固定环最大外径为 R_2 ,加载环外径为 R_1 ,应变梁长度为 l ,宽度为 b ,厚度为 b 。

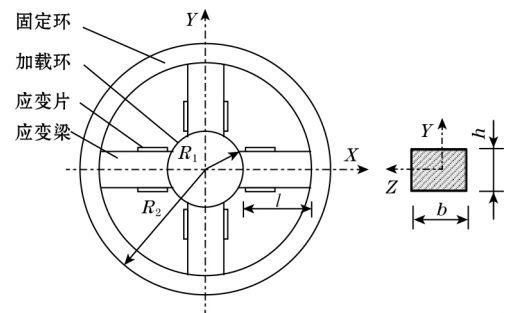


图5 弹性体简化模型

传感器只受到扭矩 M 的作用,取加载环为受力研究对象。加载环受到两部分作用力:扭矩 M 和应变梁的反作用力;由弹性体对称结构可知4条应变梁的反作用力大小相同。取任一条应变梁与加载环接触点,建立力学模型如图6所示。

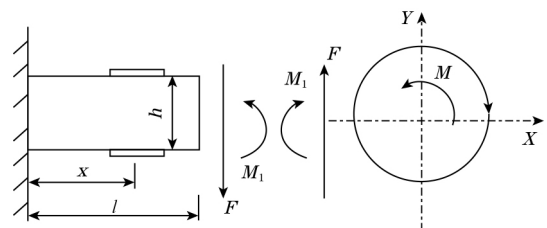


图6 加载环力学模型

应变梁的受力满足力平衡方程:

$$FR_1 + M_1 = M/4 \quad (1)$$

应变梁的弯曲变形可分为 2 部分,作用力 F 引起的变形和扭矩 M_1 引起的变形。

分析力 F 引起的变形,最大挠度 y_F 与端面转角 θ_F 表示为:

$$\begin{cases} y_F|_{x=l} = \frac{4Fl^3}{Ebh^3} \\ \theta_F|_{x=l} = \frac{6Fl^2}{Ebh^3} \end{cases} \quad (2)$$

分析扭矩 M_1 引起的变形,最大挠度 y_{M_1} 与端面转角 θ_{M_1} 表示为:

$$\begin{cases} y_{M_1}|_{x=l} = \frac{6M_1l^2}{Ebh^3} \\ \theta_{M_1}|_{x=l} = \frac{12M_1l}{Ebh^3} \end{cases} \quad (3)$$

联立式(2)、式(3)求解,端面总转角 θ 为

$$\theta = \theta_F - \theta_{M_1} = \frac{6Fl^2}{Ebh^3} - \frac{12M_1l}{Ebh^3} \quad (4)$$

端面总位移 Δy 为:

$$\begin{cases} \Delta y = \theta l \\ \Delta y = y_F - y_{M_1} \end{cases} \quad (5)$$

联立式(1)和式(5)求解得:

$$F_{11} = \frac{3M}{4(l+3R_1)} \quad (6)$$

$$M_{11} = \frac{Ml}{4(l+3R_1)} \quad (7)$$

得到传感器弹性体在 M 作用下单条应变梁的应变为

$$\varepsilon(x) = \frac{F_{11}x - M_{11}}{EW_z} = \frac{3M(x-l)}{4E(l+3R_1)bh^2} \quad (8)$$

式中: E 为弹性模量; W_z 为应变梁的抗弯系数, $W_z = bh^2/6$ 。

3 传感器数学模型分析

传感器一项重要的性能评价指标为灵敏度,在正常使用情况下,传感器的灵敏度越高越好,传感器的灵敏度与弹性体的尺寸有重要关系。传感器灵敏度定义为

$$S = \frac{\Delta U}{U} = K_1 \varepsilon_T \quad (9)$$

式中: ΔU 为全桥输出电压; U 为传感器激励电压; K_1 为应变片灵敏度系数; ε_T 为真实应变。

灵敏度和真实应变成正比例关系,同时传感器弹性体需要满足强度校核,即 $\sigma_{IV} \leq [\sigma]$ 。

为了提高应变梁的应变集中效果,使测量结果更

理想,在应变梁上开设腰型孔,如图 7 所示。

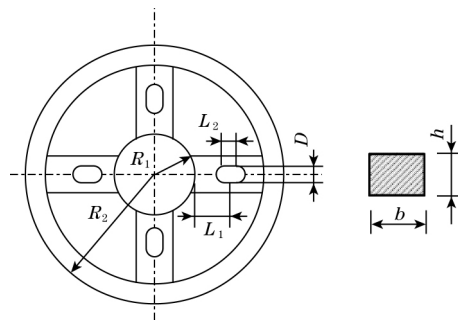


图 7 腰型孔结构示意图

取应变梁厚度 b 及腰型孔位置尺寸 L_1 、外形尺寸 L_2 、 D 为优化变量,得到传感器弹性体优化数学模型为:

$$\begin{cases} \max f_2(x) & x \in R^4 \\ \text{s.t. } \max f_1(x) - [\sigma] \leq 0 & x \in R^4 \\ x - x_{\max} \leq 0 \\ x_{\min} - x \leq 0 \\ x = (D \ L_1 \ L_2 \ b)^T \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f_1(x)$ 为应变片粘贴区域应变梁所受最大应力; $f_2(x)$ 为应变片粘贴区域应变梁的真实平均应变; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 为设计变量的上下限。

变量范围及目标值如下:

$$\begin{cases} 2 \text{ mm} \leq D \leq 3.5 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq L_1 \leq 4 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq L_2 \leq 4 \text{ mm} \\ 4 \text{ mm} \leq b \leq 5 \text{ mm} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \max f_2(x) \\ \max f_1(x) \leq 500 \text{ MPa} \end{cases} \quad (12)$$

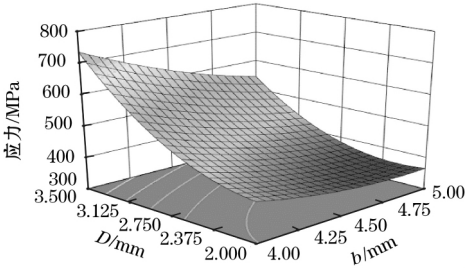
4 传感器仿真分析及优化

4.1 响应面法优化

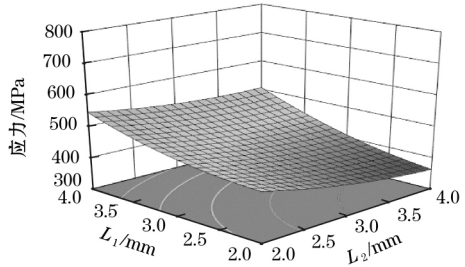
本文对弹性体结构参数采用响应面法进行优化,采用多元二次回归方程来描述变量与响应值之间的对应关系。考虑到有 4 个变量因素,采用 Box-Behnken 法设计变量分组^[11-12],得到 29 组分组数据,借助 UG/hypermesh 对每组参数进行三维建模、受力仿真,得到每组应变梁最大应力及应变。得到应变梁最大应力及应变与变量的响应面曲线图,如图 8、图 9 所示。

得到 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 拟合曲线如下:

$$\begin{aligned} f_1(x) = & 428.83 - 49.08b + 103.52D - 30.70L_1 + \\ & 48.49L_2 - 25.95bD - 1.36bL_1 - 14.05bL_2 + \\ & 3.07DL_1 + 41.29DL_2 + 10.30L_1L_2 + 13.08b^2 + \\ & 57.60D^2 + 15.92L_1^2 + 15.12L_2^2 \end{aligned} \quad (13)$$

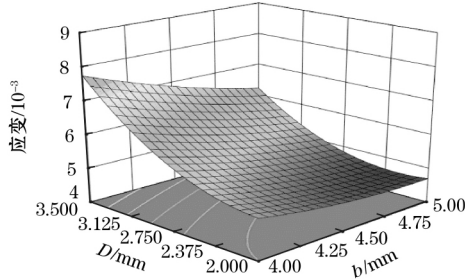


(a)

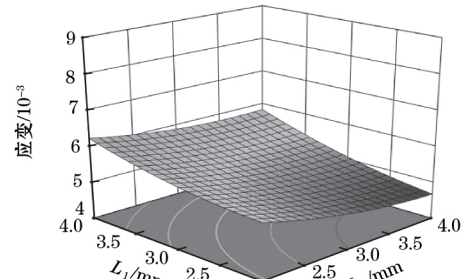


(b)

图 8 应力与变量的响应面曲线图



(a)



(b)

图 9 应变与变量的响应面曲线图

$$f_2(x) = 5\,360 - 600b + 1\,234D - 324L_1 + 605L_2 - 322bD - 17.53bL_1 - 177bL_2 + 212DL_1 + 517DL_2 + 128L_1L_2 + 190b^2 + 658D^2 + 138L_1^2 + 215L_2^2 \quad (14)$$

2 组拟合曲线的拟合评估值如表 2 所示, p 值均小于 0.000 1, 方差与调整方差相近, 信噪比远大于 4, 说明曲线拟合可信度比较高。得到结构优化参数, 如表 3 所示。

表 2 拟合评估值

名称	p 值	方差	调整方差	信噪比
f_1	<0.000 1	0.990 6	0.981 2	36.756 6
f_2	<0.000 1	0.976 7	0.953 5	24.597 9

表 3 优化参数

b	D	L_1	L_2
4.00	3.20	3.97	2.02

将优化后的参数模型建模进行静力学仿真, 弹性体应力云图如图 10 所示。得到传感器在 2.5 倍过载载荷 $75\text{ N}\cdot\text{m}$ 下, 最大应力 $\max f_1(x) = 498.9\text{ MPa} < [\sigma] = 503\text{ MPa}$, 最大应变 $\max f_2(x) = 6.243\times 10^{-3}$ 。可以看出传感器具有良好的抗过载能力。

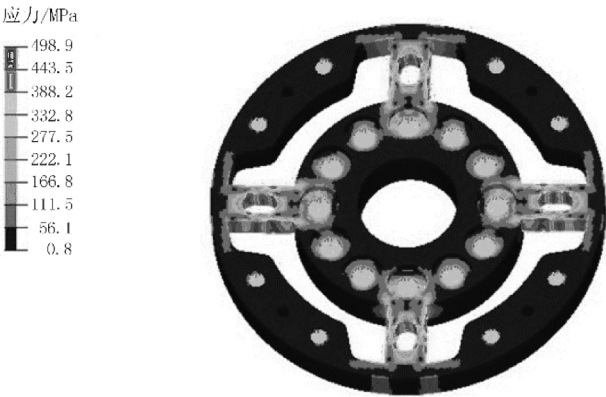


图 10 应力云图

4.2 模拟加载仿真

模拟传感器加载情况, 得到应变片粘贴位置应变梁的平均应变与负载的关系, 如图 11 所示。得到应变与载荷的拟合曲线:

$$y = 71.78x + 1.71 \quad (15)$$

式中: y 为应变; x 为载荷。

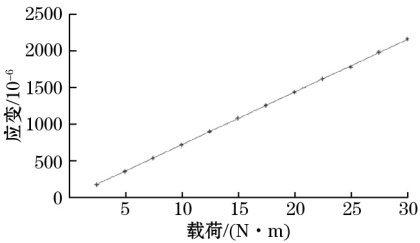


图 11 载荷-应变拟合图

得出拟合线性度误差 0.75%, 满量程 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 时粘贴区域平均应变为 $2\,159\times 10^{-6}$ 。

5 结束语

本文基于一体化设计理念, 利用输出轴设计了一款针对新型协作机器人关节的扭矩传感器, 未增加关节尺寸。对传感器弹性体建立了力学模型、数学优化模型、三维仿真模型, 利用响应面法对 (下转第 22 页)

- 和状态的监测方法: 201910406580.7 [P]. 2019-08-20.
- [6] KRISTIAN C D, SANGHUN S, HYUNGJUN C, et al. Inter-digital capacitor-cased passive LC resonant sensor for improved moisture sensing [J]. *Sensors* 2020 20(21): 6306.
- [7] BABAEI M, ALIZADEH N. Methanol selective gas sensor based on nano-structured conducting polypyrrole prepared by electro-chemically on interdigital electrodes for biodiesel analysis [J]. *Sensors and Actuators B Chemical* 2013 183: 617-626.
- [8] GEVORGIAN S S, MARTINSSON T, LINNAR P, et al. CAD models for multilayered substrate interdigital capacitors [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996 44(6): 896-904.
- [9] IGREJA R, DIAS C J. Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure [J]. *Sensors & Actuators A Physical* 2004 112(2/3): 291-301.
- [10] LIANG Y, MA M, ZHANG F, et al. An LC wireless microfluidic sensor based on low temperature co-fired ceramic (LTCC) technology [J]. *Sensors* 2019 19(5): 1189.
- [11] 焦敬品, 李亮, 何存富, 等. 厚度渐变结构介电性能测试用变间距叉指型相邻电容传感器设计 [J]. *机械工程学报* 2017 53(18): 1-9.
- [12] KHAN S, ALI S, BERMAK A. Recent developments in printing flexible and wearable sensing Electronics for healthcare applications [J]. *Sensors* 2019 19(5): 1230.
- [13] 徐文彬, 庄铭杰, 王德苗. 基于叉指结构的平面分形电容研究 [J]. *集美大学学报(自然科学版)* 2010 15(5): 389-393.
- [14] CARLSSON E, GEVORGION S. Conformal mapping of the field and charge distributions in multilayered substrate CP-Ws [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques* 1999 47(8): 1544-1552.
- [15] 吴晓媛, 杨雁, 贺青, 等. 基于保角变换的微小电容标准建模与设计 [J]. *仪器仪表学报* 2019 40(9): 119-126.
- [16] COSTAMAGNA E. Integration formulas for numerical calculation of the Schwarz-Christoffel conformal transformation [J]. *Microwave & Optical Technology Letters* 2015 15(4): 219-224.
- [17] VASCONCELOS G L. Generalization of the schwarz-christoffel mapping to multiply connected polygonal domains [J]. *Proceedings of the Royal Society A* 2014 470(2166): 20130848.
- [18] WISSAM R. A new proof of the transformation law of Jacobi's theta function [J]. *Proc. Amer. Math. Soc.* 2007 135: 3127-3132.
- [19] SHI Y, GUO P, LU K, et al. Expansion method for modified Jacobi elliptic function and its application. [J] *Acta Physica Sinica* 2004 53(10): 3265-3269.
- 作者简介: 唐忠林(1977—), 工程师, 讲师, 博士, 主要研究方向为智能传感器及医疗电子产品开发。
E-mail: 835614343@qq.com
杨建华(1967—), 教授, 博士, 主要研究方向为新型传感器与集成测试技术。
E-mail: yangjianhua@nwpu.edu.cn

(上接第 9 页) 传感器结构参数进行了优化, 从而提高传感器的灵敏度, 确保足够的安全性。结果验证, 优化效果可靠性比较高, 传感器拟合线性度误差 0.75%, 满量程时粘贴区域平均应变为 2.159×10^{-6} , 安全裕度 2.5。同时, 本文所采用的分析与优化方法也适用于其他尺寸和类型的传感器。

参考文献:

- [1] DIMEAS F, MOULIANITIS V C, ASPRAGATHOS N. Manipulator performance constraints in human-robot cooperation [J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 2018 50.
- [2] 付乐, 武睿, 赵杰. 协作机器人安全规范: ISO/TS 15066 的演变与启示 [J]. *机器人* 2017 39(4): 532-540.
- [3] 陶永, 王田苗, 刘辉, 等. 智能机器人研究现状及发展趋势的思考与建议 [J]. *高技术通讯* 2019 29(2): 149-163.
- [4] 刘洋, 孙恺. 协作机器人的研究现状与技术发展分析 [J]. *北方工业大学学报* 2017 29(2): 76-85.
- [5] 文西芹, 张永忠. 扭矩传感器的现状与发展趋势 [J]. *仪表技术与传感器* 2001(12): 1-3; 11.
- [6] 潘新安, 王洪光, 姜勇. 一种机器人谐波减速器内嵌扭矩传感器的研制 [J]. *仪器仪表学报* 2014 35(1): 154-161.
- [7] CHOI D E, YANG G H, CHOI J, et al. A safe joint with a joint torque sensor [P]. *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 2011 8th International Conference on 2011.
- [8] PAINE N, MEHLING J S, HOLLEY J, et al. Actuator control for the NASA-JSC valkyrie humanoid robot: a decoupled dynamics approach for torque control of series elastic robots [J]. *Journal of Field Robotics* 2015 32(3): 378-396.
- [9] 王罗罗, 孙奎, 谢宗武. 新型关节力矩传感器的优化设计 [J]. *机械与电子* 2009(6): 18-21.
- [10] 蒋聪, 孙恺, 何广平. 串联弹性驱动器内嵌扭矩传感器的研究 [J]. *仪表技术与传感器* 2020(3): 15-21.
- [11] LI J T, LIU Z J, JABBAR M A, et al. Design optimization for cogging torque minimization using response surface methodology [J]. *IEEE Trans. Magn.* 2004 40(2): 1176-1179.
- [12] FERREIRA S L C, BRUNS R E, FERREIRA H S, et al. Box-behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods [J]. *Analytica Chimica Acta* 2007 597(2): 179-186.
- 作者简介: 朱弟发(1995—), 硕士研究生, 主要研究方向为传感器技术。E-mail: olafdf0626@163.com
徐振邦(1982—), 研究员, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为空间智能机器人、空间遥感器设计、振动控制, 力学仿真。E-mail: xuzhenbang@ciomp.com.cn