

文章编号 1004-924X(2024)19-2899-12

谐波减速器集成式扭矩传感器的设计与测试

王晓东, 杜志杰, 沈文强, 高海龙, 刘玉杰, 娄志峰*

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:为实现协作机器人关节力控和提高集成度,提出一种集成于谐波减速器内部的扭矩传感器,以精确获取关节输出扭矩值,推动智能化控制的实现。采用有限元计算方法分析了谐波减速器柔轮底面应变与加载扭矩之间的规律;然后根据有限元分析的结果,考虑柔轮底面敏感栅在不同栅丝长度、栅丝间距和栅丝位置情况下,建立底面应变与扭矩变化皮尔逊相关系数的响应面模型,求解模型获得最优的敏感栅结构参数,确保该结构下集成式传感器具有最佳线性响应,结合惠斯通电桥原理设计扭矩传感器结构;最后,对集成式扭矩传感器进行标定和测试。结果表明:集成式扭矩传感器的灵敏度为 $0.249 \text{ mV/N}\cdot\text{m}$,线性度为 0.99974 ,迟滞误差为 2.19% 。施加 $0\sim70 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间阶梯变化的负载扭矩并进行重复实验,集成式扭矩传感器相对于标准扭矩传感器均方根误差为 $0.89\sim0.98 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。施加在 $\pm70 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间正弦变化的负载扭矩,均方根误差为 $0.96\sim1.05 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。该集成式扭矩传感器能够较为精准地感应负载扭矩,有助于实现协作机器人关节力控制,提升机器人系统的集成度。

关键词: 扭矩传感器;谐波减速器;有限元分析;敏感栅;响应面法

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243219.2899

Design and testing of harmonic reducer integrated with torque sensor

WANG Xiaodong, DU Zhijie, SHEN Wenqiang, GAO Hailong, LIU Yujie, LOU Zhifeng*

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

* Corresponding author, E-mail: louzf@dlut.edu.cn

Abstract: The article introduces an integrated torque sensor within a harmonic drive reducer to accurately measure joint output torque, enhancing intelligent control and integration of collaborative robots. Using finite element analysis, the relationship between strain on the harmonic drive reducer's flexible wheel surface and torque is examined. A response surface model based on this analysis determines optimal grid structure parameters for the sensor, ensuring the best linear response. The sensor is designed using the Wheatstone bridge principle. Calibration and testing show a sensitivity of $0.249 \text{ mV/N}\cdot\text{m}$, a linearity of 0.99974 , and a hysteresis error of 2.19% . With load torque changes from 0 to $70 \text{ N}\cdot\text{m}$, the root mean square error is between $0.89 \text{ N}\cdot\text{m}$ and $0.98 \text{ N}\cdot\text{m}$; for sinusoidal changes between $\pm70 \text{ N}\cdot\text{m}$, it's $0.96 \text{ N}\cdot\text{m}$ to $1.05 \text{ N}\cdot\text{m}$. This sensor accurately detects torque magnitude,

收稿日期:2024-03-09;修订日期:2024-04-11.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2023YFB4704301);辽宁省“兴辽英才计划”项目(No. XLYC2002020)

aiding joint force control in collaborative robots and enhancing system integration.

Key words: torque sensor; harmonic reducer; finite element analysis; sensitive grid; response surface methodology

1 引言

随着制造业的迅速发展,对机器人的需求呈现不断增长的趋势。面对复杂多变的工作环境,对机器人的智能性、安全性等方面的要求越来越高^[1]。为了提高人机协同工作的效率并高效胜任多种复杂的生产任务,具有卓越柔性性能和出色安全性能的协作机器人开始进入人们的视野。协作机器人的显著特点在于出色的外力感知和灵活的柔性控制,这极大地增强了机器人对外部力高精度控制的能力^[2]。

协作机器人通过对自身关节输出扭矩进行精确测量或者安装其他力/力矩传感器实现工作过程的实时力感知,确保人机协作中的效率和安全性^[3]。目前,协作机器人进行外力感知的方法主要包括:

(1)六维力/力矩传感器法^[4-8]。在机械臂的末端安装六维力/力矩传感器,通过测量不同方向上的力和扭矩为机械臂控制实时反馈环境中的力觉信息。由于六维力/力矩传感器安装于机械臂末端,只能感知腕部所受力的变化,对于其他关节位置无法感知,同时昂贵的造价以及低可靠性也阻碍了六维力传感器的推广。

(2)电流检测法^[9-12]。检测机器人各关节电机的电流估计输出扭矩,通过建立机器人动力学方程计算各关节的理论扭矩,二者对比,若扭矩差异超过设定的阈值,判定关节感知到外界力的作用。电流检测法的可信度很大程度上取决于对关节电机电流的准确检测,然而,在动力学模型中引入的摩擦项使得对关节扭矩的估计存在相当的不确定性,所以该方法的灵敏度较低。

(3)模块化关节扭矩传感器法^[13-16]。在机器人关节内部安装单独设计的梁结构,梁结构上粘贴应变片感知结构的应变来获取机器人关节扭

矩,但梁结构的低刚度特性会直接影响机器人的整体刚性和运动精度。

(4)内嵌应变片扭矩传感器法。在谐波减速器柔轮表面粘贴应变片感知柔轮的应变实现机器人对关节扭矩测量的需求。潘新安^[17]等研发了一种嵌入谐波减速器内部的扭矩传感器。由于柔轮的裙边变形相当复杂,制作过程中需要在谐波减速器柔轮上粘贴 16 组应变片,提高了传感器的制造难度。

针对目前研究存在的不足,本文设计了一种集成于谐波减速器内部的扭矩传感器,感应柔轮产生的应变估计谐波减速器所受的扭矩。为提高传感器的准确性,需要合理设计扭矩传感器敏感栅结构和布局方式,减少由波发生器转动作用产生的应变纹波干扰。通过对谐波减速器进行有限元分析,获取谐波减速器柔轮传动过程的应变变化,在不同敏感栅结构参数下,建立柔轮底面应变与扭矩的皮尔逊相关系数的响应面模型,拟合得到敏感栅结构参数相对于应变-扭矩皮尔逊相关系数的回归方程。为了使所研制的扭矩传感器的线性度尽可能高,以应变-扭矩皮尔逊相关系数的最大值为目标求解回归方程,获得最优敏感栅结构尺寸,扭矩传感器为一体式设计,粘贴于柔轮底部,敏感栅整体为圆环状,内部划分为四部分,连接成惠斯通电桥电路。最后,通过对集成式扭矩传感器测得扭矩与实际输出扭矩进行测试,通过实验验证,该集成式扭矩传感器有效降低了应变纹波的影响,能够较为精确地估计输出扭矩。

2 谐波减速器基本参数

谐波减速器基本构件包括波发生器、柔轮和刚轮。其中,波发生器是负责产生谐波振动的元件,分为滚轮、偏心盘和凸轮等结构,凸轮

式应用最广泛,由凸轮和薄壁轴承组成。柔轮是谐波减速器中的柔性元件,具有弯曲变形特性,它与刚轮之间的啮合实现能量传递,常见结构有筒形、礼帽型和环型。刚轮为刚性零件,通常具有较高刚度。谐波减速器的基本构成如图 1(a)所示,其柔轮为礼帽型。谐波减速器在机器人关节内部安装如图 1(b)所示,驱动电机作为输入端与波发生器相连,刚轮与输出法兰相连作为动力输出,柔轮与关节模组固定连接。机器人工作,时该谐波减速器的额定负载扭矩为 70 N·m。

谐波减速器采用 40CrNiMoA 作为柔轮的主要材料,波发生器和刚轮则主要采用机械制造行业应用最为广泛的调制钢 40Cr,谐波减速器的材

料属性如表 1 所示。

表 1 谐波减速器的材料属性

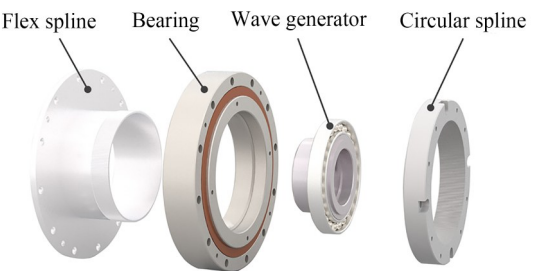
Tab. 1 Material properties of harmonic reducer

构件	材 料	杨氏模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)
柔轮	40CrNiMoA	209	0. 295	7 850
波发生器	40Cr	211	0. 277	7 850
刚轮	40Cr	211	0. 277	7 850

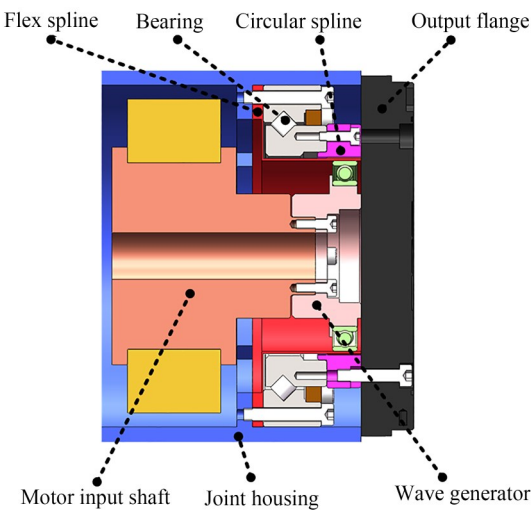
3 应变片敏感栅布局

3.1 应变片粘贴位置分析

谐波减速器在负载扭矩作用下,柔轮产生不同应变,扭矩传感器通过获取该应变来估计相对应的扭矩,因此,扭矩传感器的应变片需要粘贴在柔轮薄壁上。图 2 所示为谐波减速器柔轮在波发生器和扭矩共同作用下的应变分布云图,可以发现,筒壁部位和底面部分区域受扭矩作用应变大,但柔轮筒壁内侧与波发生器配合,外侧与轴承连接,两个位置都需要润滑,不适合粘贴应变片,因此选取柔轮底部位置作为应变片的粘贴位置,如图 3 所示。该方式并不会改变谐波减速器结构,因此不会对谐波减速器的性能产生影响,同时也不妨碍谐波减速器在机器人关节内的安装。



(a) 谐波减速器的基本构成
(a) Basic composition of harmonic reducer



(b) 谐波减速器安装示意图
(b) Installation diagram of harmonic reducer

图 1 谐波减速器的构成及安装
Fig. 1 Composition and installation of harmonic reducer

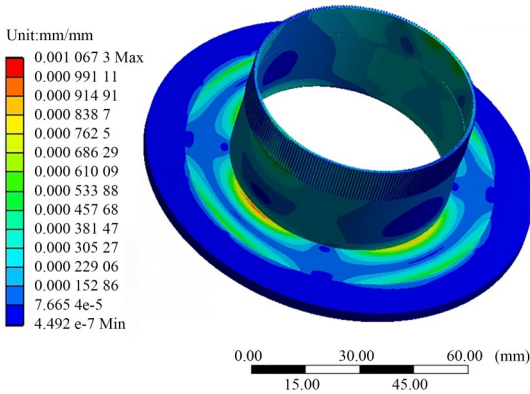


图 2 柔轮应变分布云图
Fig. 2 Cloud chart of flex spline strain distribution

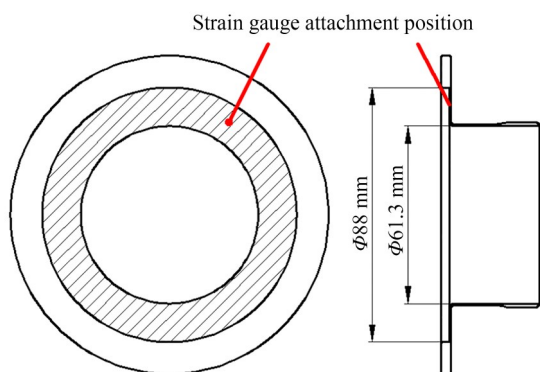


图3 应变片粘贴位置

Fig. 3 Strain gauge attachment position

3.2 柔轮底面在扭矩作用下的应变分析

谐波减速器工作过程中,扭矩引起的变形是柔轮作为薄壁圆筒沿着扭矩方向发生的扭转变形,如图4(a)所示。在柔轮底面取一单元体,其应力分析如图4(b)所示,该单元体对应的应力圆如图4(c)所示,当 $d_r \rightarrow 0$ 时,单元体中有:

$$\tau = \tau_r = \tau_{r+d_r}. \quad (1)$$

分析应力圆可知,主应力为:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_{\max} = \tau \\ \sigma_2 = 0 \\ \sigma_3 = \sigma_{\min} = -\tau \end{cases}. \quad (2)$$

主应力方向分别为 45° 和 135° ,因此在设计敏感栅结构时,敏感栅的敏感方向应与底面圆心连线呈 45° 或 135° 布局^[16]。

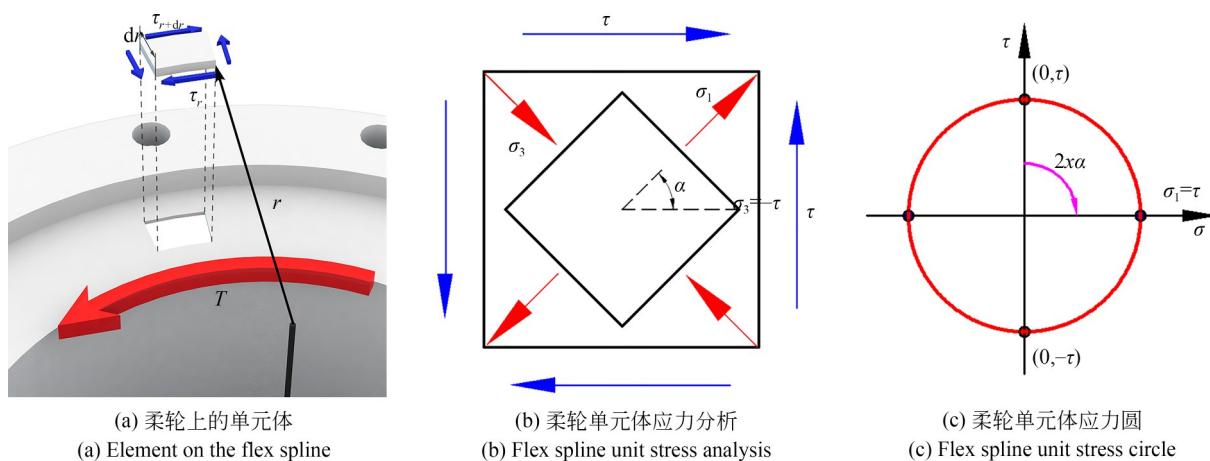


图4 柔轮应力分析

Fig. 4 Flex spline stress analysis

3.3 柔轮底面应变规律

使用Solidworks对谐波减速器进行三维建模,将模型以x_t格式导入到ANSYS workbench中处理后,设置相关参数进行有限元分析,提取谐波减速器柔轮的底面应变,在仿真模型中按照图5所示,在柔轮底部按照不同半径建立不同的圆周路径,图6为所建立的圆周路径在波发生器和扭矩作用下的应变曲线,图7为柔轮底面受扭矩和波发生器作用下的应变云图,分析发现,受波发生器的影响,应变曲线整体呈周期性波动,在不同扭矩 M_i 的作用下,半径 r 角度 θ 位置处的应变为:

$$\epsilon = f(\theta, r, M_i). \quad (3)$$

空载时,柔轮底面应变不同半径下圆周路径

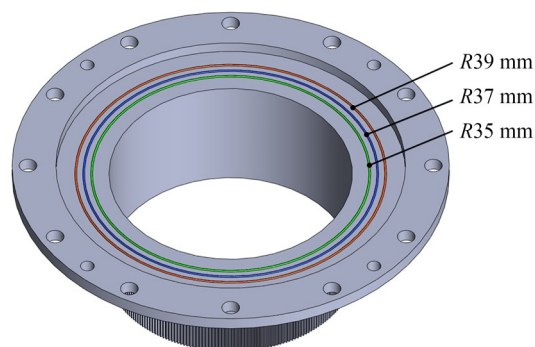


图5 柔轮底面圆周路径

Fig. 5 Flex spline bottom circumferential path

一个周期内的应变积分为0,即:

$$\int_0^\pi f(\theta, r, M_0) d\theta = 0, \quad (4)$$

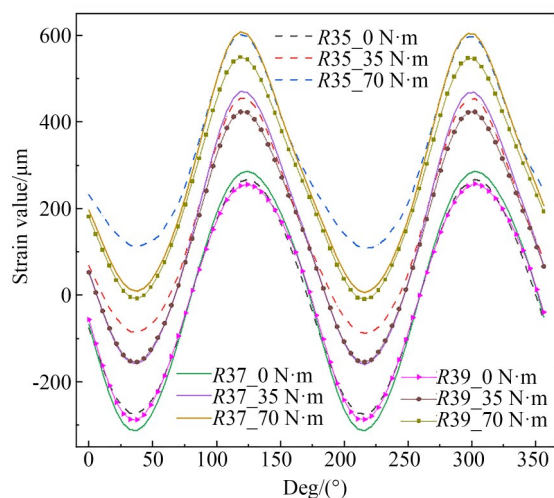


图 6 圆周路径应变曲线

Fig. 6 Circumferential strain curves

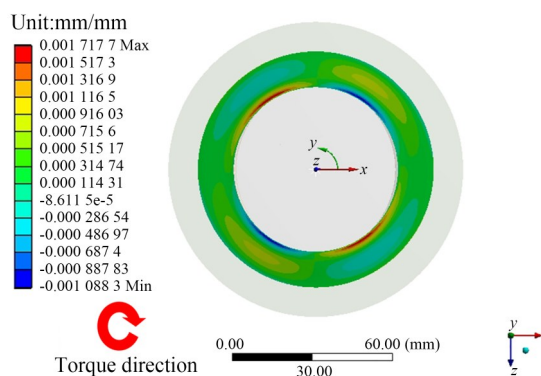


图 7 柔轮底面应变云图

Fig. 7 Strain cloud map of flex spline bottom surface

受波发生器装配力的影响,相同半径下不同角度 θ 的应变不同,半径 r 不变的情况下,不同扭矩的作用,应变曲线波动趋势变化不大,整体发生上下平移,可知在相同扭矩差值下,不同角度处的应变差值是固定值。不同扭矩作用下相对于空载时的应变差值如下:

$$\Delta \epsilon_i = f(\theta, r, M_i) - f(\theta, r, M_0) = krM_i, \quad (5)$$

式中 k 为固定常量,该应变差值与扭矩呈线性相关。负载扭矩为 M_i 时,对整个圆周路径的应变差值进行积分,可得:

$$\epsilon = \int_0^{2\pi} \Delta \epsilon_i d\theta = 2\pi krM_i. \quad (6)$$

由此可知,圆周路径的应变积分只与所处半径位置和所受扭矩有关,消除了波发生器的干扰,因此应变片的整体布局应该布局为圆环状,以确保

能够采集相同半径下一周内的所有应变值,消除波发生器转动作用产生的应变纹波干扰。

4 扭矩传感器敏感栅结构参数设计

4.1 响应面法

响应面法的基本思想是通过近似构造一个简单的显示函数来模拟实际结构负载的输入输出关系^[18]。最常见的数学模型形式是低阶多项式(一阶或者二阶),当一阶模型因变量和表面曲率之间的相互作用而失拟时,二阶模型可以很好地拟合模型,常见的二阶模型曲线方程如下:

$$\hat{y}(x) = \delta_0 + \sum_{i=1}^n \delta_i x_i + \sum_{i=1}^n \delta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \delta_{ij} x_i x_j + \epsilon, \quad (7)$$

式中: δ_0 是常数项; n 为变量个数,在二阶模型中, $n=2$; x_i, x_j 为两个不同的变量; ϵ 为曲线方程误差; δ_i 为线性偏移; δ_{ii} 为二阶偏移; δ_{ij} 为交互系数,系数经多元线性回归确定。

4.2 响应面模型设计

如图8所示,响应面模型中以栅丝长度 L 、栅丝间距 S 以及栅丝位置 R 为设计变量,其中,栅丝位置以圆环形敏感栅最外圈所处半径 R 作为栅丝的定位位置。传感器的线性度是指传感器的输出与输入信号之间的直线关系程度,线性度越高,传感器的准确性越高。本文所研究的扭矩传感器的主要原理是利用粘贴在柔轮底面的敏感栅感应柔轮底面的应变,将扭矩信号进行输出,因此如式(8)所示,将不同敏感栅参数下柔轮底面应变积分值与扭矩的皮尔逊相关系数作为目标响应函数,该系数可以度量敏感栅应变值与

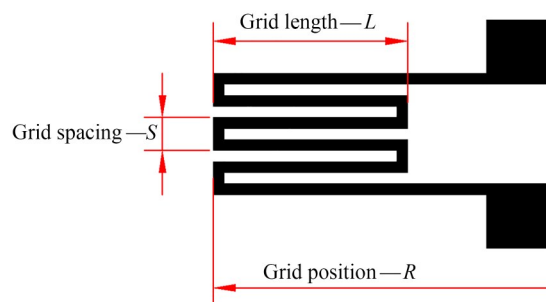


图 8 敏感栅结构参数示意图

Fig. 8 Structural parameters of sensitive grid

扭矩之间的线性相关性。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \bar{\epsilon})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}}, \quad (8)$$

式中: M_i 为一组实验中所施加的不同扭矩; $\bar{M}$ 为施加扭矩的均值; ϵ_i 为一组实验中扭矩作用下敏感栅的应变和; $\bar{\epsilon}$ 为应变和的均值。

常用的响应面分析方法为 Box-Behnken Design(BBD)与 Central Composite Design(CCD), CCD 适用于具有多因素和多水平的实验设计, 尤其在存在连续变量的情况下表现出良好的适用性; 而 BBD 则更适用于因素较少且水平为 3 的实验设计。通过分析, 敏感栅结构设计参数为 3 个, 适合 BBD 方法, 利用响应面法结合有限元仿真数据可以建立应变-扭矩皮尔逊相关系数的响应面模型, 敏感栅参数的取值范围如表 2 所示。

表 2 敏感栅参数的取值范围

Tab. 2 Range of values for sensitive grid parameters

敏感栅参数	取值
栅丝长度 L/mm	3~8
栅丝间距 S/mm	0.3~0.8
栅丝位置 R/mm	35~43

基于 BBD 方法, 实验设计共计 17 组, 根据表 3 中的试验设计进行有限元仿真计算, 将计算得到的应变-扭矩皮尔逊相关系数填入到相应列中。

应用响应面法拟合得到敏感栅三因素相对

表 3 响应面模型设计和结果

Tab. 3 Response surface model and results

序号	L/mm	S/mm	R/mm	Pearson correlation
1	3	0.55	35	0.943 1
2	3	0.3	39	0.918 6
3	5.5	0.3	43	0.831 0
...	...	...	...	...
15	8	0.8	39	0.969 7
16	5.5	0.8	43	0.830 2
17	8	0.3	39	0.960 3

于应变-扭矩皮尔逊相关系数的回归方程为:

$$r = -4.094 48 - 0.021 521L + 0.211 58S + 0.273 28R + 0.012 24LS + 0.001 335LR + 0.000 6SR - 0.002 476L^2 - 0.282S^2 - 0.003 792 19R^2. \quad (9)$$

4.3 模型精度评价

模型中各个因素的重要性通过 F 值和 P 值来衡量, F 值可比较各因素之间差异是否显著, P 值可检验实验数据与模型不相关的显著程度^[19]。 F 值越大、 P 值越小表示模型显著性越强, 模型拟合精度越高, 当 P 值 < 0.05 时, 表面显著程度较高, 可靠性较高, 回归模型可接受。通过表 4 数据可知, 模型 F 值为 149.75, 且 P 值 $< 0.000 1$, 表示模型回归效果显著, 其中栅丝位置 R 对模型影响最为显著, F 值为 713.96, 交互作用显著项为 LR , 平方项显著项为 R^2 。

响应面模型的 R^2 越接近 1, 变异系数 (C. V.) 小于 10, 信噪比 (Adeq Precisor) 大于 4, 同时调整后的拟合度 (Adjusted R^2) 与预测的拟合度 (Predicted R^2) 差值小于 0.2, 说明模型可信度较高。从表 5 数据可知, R^2 为 0.994 8, 接近 1, 调整后的拟合度与预测的拟合度差值为 0.027 2, 小于 0.2, 变异系数 0.68 小于 10, 信噪比 36.101 大于 4, 表明该响应面模型可靠性强, 精度高。

如图 9 所示, 采用响应面法, 通过基于底面应

表 4 响应面模型方差分析结果

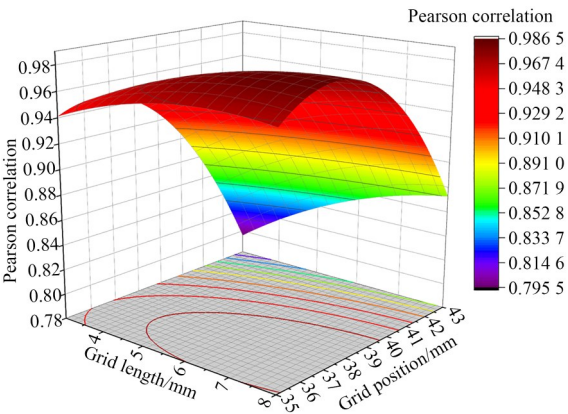
Tab. 4 Response surface model analysis of variance results

类型	F 值	P 值
模型	149.75	$< 0.000 1$
L	127.7	$< 0.000 1$
S	0.79	0.403 4
R	713.96	$< 0.000 1$
LS	5.93	0.045 1
LR	18.06	0.003 8
SR	0.036	0.853 9
L^2	25.55	0.001 5
S^2	33.14	0.000 7
R^2	392.73	$< 0.000 1$

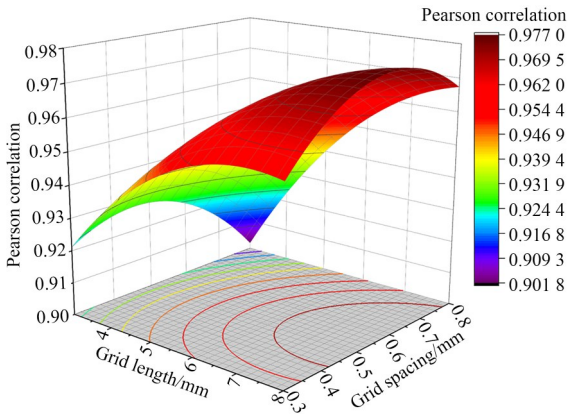
表 5 模型可靠性检验分析

Tab. 5 Model reliability test analysis

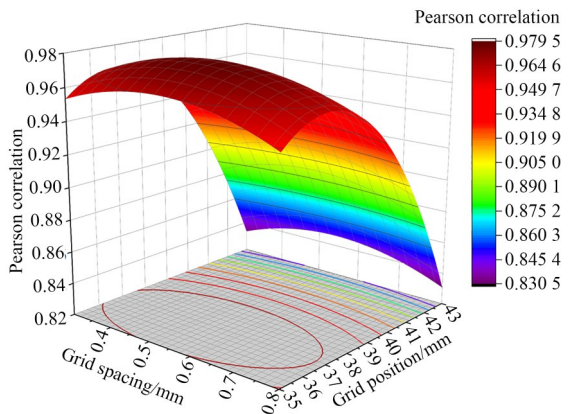
R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2	C. V. /%	Adeq Precisor
0.994 8	0.988 2	0.961	0.68	36.101



(a) 栅长和位置对扭矩皮尔逊相关系数的交互影响
(a) Interacting effects of grid length and grid position on torque pearson correlation coefficient



(b) 栅长和间距对扭矩皮尔逊相关系数的交互影响
(b) Interacting effects of grid length and grid spacing on torque pearson correlation coefficient



(c) 间距和位置对扭矩皮尔逊相关系数的交互影响
(c) Interacting effects of grid spacing and grid position on torque pearson correlation coefficient

图 9 栅丝长度、栅丝间距和栅丝位置对扭矩皮尔逊相关系数的响应面

Fig. 9 Response surface of torque pearson correlation coefficient to grid length, grid spacing, and grid position

变和扭矩变化的皮尔逊相关系数模型,构建敏感栅结构参数之间的交互作用的三维立体响应曲面。在此过程中,将一个参数设为固定值,一般为取值范围的中点,研究其他两参数交互作用对应变-扭矩皮尔逊相关系数的影响^[20]。变化范围越大,说明交互作用对应变-扭矩皮尔逊相关系数影响越显著,可以看出栅丝位置和栅丝长度对其交互作用最强。

4.4 敏感栅结构设计

利用构建的响应面模型计算,求解目标为栅丝长度、栅丝间距、栅丝位置在各自取值范围内所能取得的应变-扭矩皮尔逊相关系数的最大值,从而确保所研制的扭矩传感器线性度最高。最优结果如表 6 所示,最优设计尺寸为:栅丝长度 6.04 mm,栅丝间距 0.522 mm,栅丝位置 36.647 mm。最终敏感栅的设计尺寸定为:栅丝长度 6 mm,栅丝间距 0.5 mm,栅丝位置 36.5 mm。

表 6 敏感栅的最优设计尺寸

Tab. 6 Optimal design dimensions for sensitive grid			
栅丝长度/ mm	栅丝间距/ mm	栅丝位置/ mm	皮尔逊相关 系数
6.04	0.522	36.647	0.982

敏感栅最终设计外观如图 10 所示,根据分析,敏感栅每根栅丝方向与圆心连线夹角为 45°或 135°,整体布局为圆环状,便于消除波发生器的干扰。通过仿真分析可知,谐波减速器柔轮底面应变在圆周方向以 180°为一个周期,以柔轮中心进行中心对称的两部分的应变值相同,将敏感

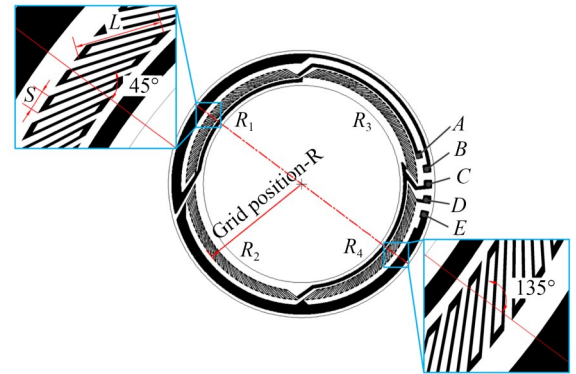


图 10 敏感栅结构设计

Fig. 10 Structure design of sensitive grid

栅在一周内平均分为四部分。其中, R_1 和 R_2 布局方向相同, R_3 和 R_4 布局方向相同, 两部分的栅丝方向在中心对称位置互为 90° 布局, 则中心对称位置处测得的应变值互为相反数。将四部分设计为惠斯通电桥, 谐波减速器受到扭矩作用后柔轮底面发生应变, 扭矩传感器应变片感应到应变后转换为电压信号, 等效电路如图 11 所示。

假设谐波减速器所受负载为 M_i 时, 应变栅 4

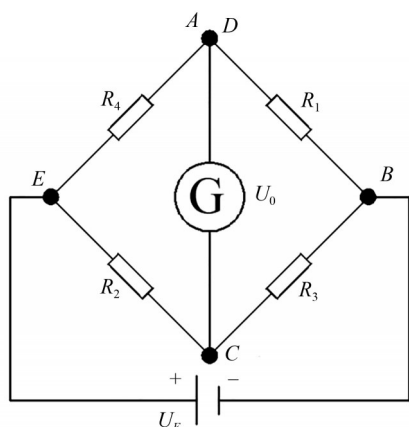


图 11 惠斯通电桥图

Fig. 11 Wheatstone bridge circuit diagram

$$U_0 = \frac{U_E (R\Delta R_1 + R\Delta R_2 + \Delta R_1\Delta R_2 - R\Delta R_3 - R\Delta R_4 - \Delta R_3\Delta R_4)}{(2R + \Delta R_2 + \Delta R_3)(2R + \Delta R_1 + \Delta R_4)} \quad (13)$$

将式(12)代入得:

$$U_0 = \frac{U_E (\Delta R_1 + \Delta R_2)}{2R} = \frac{U_E G (\epsilon_1 + \epsilon_2)}{2}, \quad (14)$$

利用式(6)进一步化简得:

$$U_0 = \frac{U_E G}{2} \int_{r_1}^{r_2} \int_0^\pi f(\theta, r, M_i) d\theta dr = KC U_E M_i, \quad (15)$$

式中 K 为常数, C 为与半径 r_1, r_2 有关的参数, 由于 $r_1 = 30.5 \text{ mm}$, $r_2 = 36.5 \text{ mm}$ 已经确定, 因此 C 也是常数。保持电压 U_E 恒定, 最终, 输出电压 U_0 只与所受扭矩 M_i 有关, 说明该设计可以消除波发生器转动作用产生的应变纹波干扰。

5 传感器性能测试

5.1 传感器测试平台

按照以上分析设计, 对传感器应变片进行加工制作, 将制作好的应变片粘贴于谐波减速器柔

部分的应变值分别为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$, 由之前分析可知柔轮底面应变函数 $f(\theta, r, M_i)$ 的周期为 180° , 因此有:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta, r, M_i) d\theta dr \\ \epsilon_2 = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\frac{\pi}{2}}^\pi f(\theta, r, M_i) d\theta dr \\ \epsilon_3 = -\int_{r_1}^{r_2} \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} f(\theta, r, M_i) d\theta dr = -\epsilon_2 \\ \epsilon_4 = -\int_{r_1}^{r_2} \int_\pi^{\frac{3\pi}{2}} f(\theta, r, M_i) d\theta dr = -\epsilon_1 \end{cases}, \quad (10)$$

$$\Delta R = R \cdot G \cdot \epsilon_i. \quad (11)$$

式(11)为敏感栅电阻变化量与所受应变大小的关系式。式中, R 为应变片的初始电阻, G 为应变片的应变增益系数, ϵ_i 为施加在应变片上的应变值。联立式(10)可以求解 4 组敏感栅多产生的电阻变化量有如下关系:

$$\begin{cases} \Delta R_3 = R \cdot G \cdot \epsilon_3 = -\Delta R_2 \\ \Delta R_4 = R \cdot G \cdot \epsilon_4 = -\Delta R_1 \end{cases} \quad (12)$$

根据惠斯通电桥原理, 图 9 中所需测量的电压 U_0 为:

轮底面, 实时监测柔轮底面受扭矩作用后产生的应变, 实物如图 12 所示。为验证所设计的扭矩传感器测量效果, 搭建如图 13 所示实验测试平台对信号进行采集标定。图 14 为测试平台的原理图,

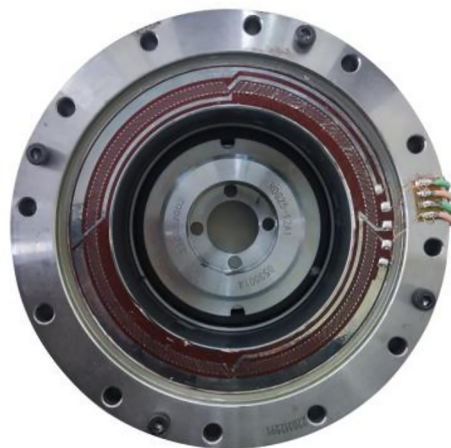


图 12 谐波减速器集成式扭矩传感器

Fig. 12 Harmonic reducer integrated with torque sensor

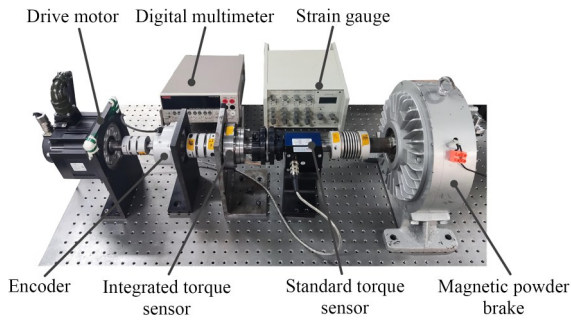


图 13 实验测试平台

Fig. 13 Experimental testing platform

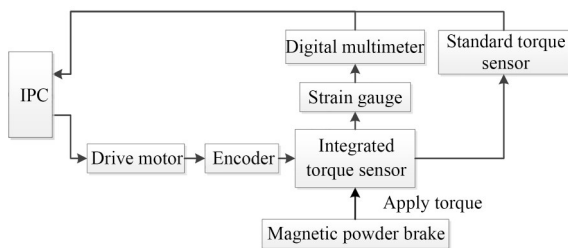


图 14 实验台运行原理

Fig. 14 Experimental bench operational principle

伺服电机连接角度编码器作为动力输入与谐波减速器的波发生器相连,刚轮作为谐波减速器输出端连接标准扭矩传感器,随后连接扭矩加载设备磁粉制动器,集成式扭矩传感器信号通过应变仪放大滤波后,接入数字万用表反馈给工控机控制软件,标准扭矩传感器测得实时扭矩同样反馈给工控机(IPC)作为比较数据。

该实验平台中,标准扭矩传感器选择 B. I. W 公司的 0261 型号扭矩传感器,该传感器量程为 $200 \text{ N}\cdot\text{m}$,测量精度为 $0.05\% \text{ F.S.}$ 。应变仪灵敏度为 $0.1 \text{ V}/100 \mu\text{E}$ (桥压 2 V),非线性度小于 $\pm 0.1 \text{ F.S.}$,频率响应为 $\text{DC}\sim 2\,500 \text{ kHz}$ ($-3 \text{ dB}\pm 1 \text{ dB}$)。数字万用表测量最大值为 100 mV 的直流电压时,分辨率为 100 nV ,最高采样频率为 1 MHz 。

5.2 扭矩传感器标定

扭矩测量前需要先对自制扭矩传感器进行标定。标定过程中,谐波减速器输入端固定不动,在输出端逐渐施加最大值为 $\pm 70 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的扭矩,扭矩的施加顺序为:正向加载-正向卸载-反向加载-反向卸载,形成一个循环,通过标准扭矩传感器获得实际所加的扭矩,工控机实时采集应变

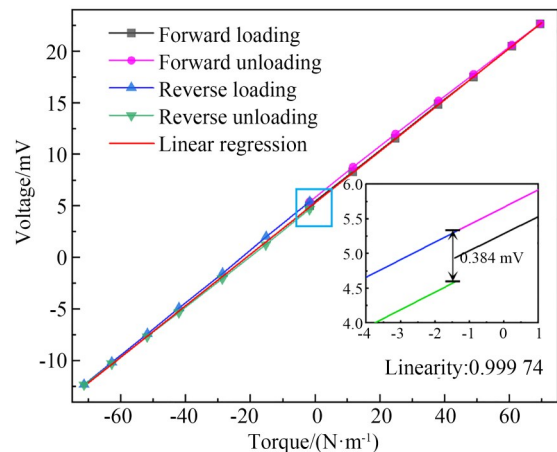


图 15 标定结果

Fig. 15 Calibration result

片输出的电压信号,获得输出电压与实际扭矩的关系,如图 15 所示。对获得数据进行一次多项式最小二乘拟合,建立扭矩与电压的拟合表达式为:

$$U_0 = 0.249T + 5.289, \quad (16)$$

式中: U_0 为集成式扭矩传感器的输出电压, T 为谐波减速器所施加的负载扭矩。通过标定结果可知,集成式扭矩传感器的灵敏度为 $0.249 \text{ mV}/\text{N}\cdot\text{m}$,线性度为 $0.999\,74$ 。从图中可知,加载和卸载过程中集成式扭矩传感器最大差值为 0.384 mV ,扭矩增加 $70 \text{ N}\cdot\text{m}$,输出电压变化 17.531 mV ,因此传感器的迟滞误差为:

$$e_H = \frac{0.384}{17.531} \times 100\% = 2.19\%. \quad (17)$$

5.3 扭矩传感器测试

利用标定获得的关系式进行扭矩测量实验,谐波减速器输入端保持恒定转速,对谐波减速器输出端施加 $0\sim 70 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间阶梯变化的扭矩,获得集成式扭矩传感器信号进行滤波处理后,采集标准扭矩传感器的信号作为对比,如图 16 所示。实验过程中,扭矩误差为 $-2.14\sim 0.96 \text{ N}\cdot\text{m}$,计算均方根误差为 $0.89 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。保持转速不变,对谐波减速器施加在 $\pm 70 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间变化的正弦负载扭矩,获得图 17 所示曲线,与标准传感器对比扭矩误差为 $-2.56\sim 2.69 \text{ N}\cdot\text{m}$,均方根误差为 $1.02 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。分别对两种加载方式进行多次重复实验,获得均方根误差数据如表 7 所示,阶梯扭矩

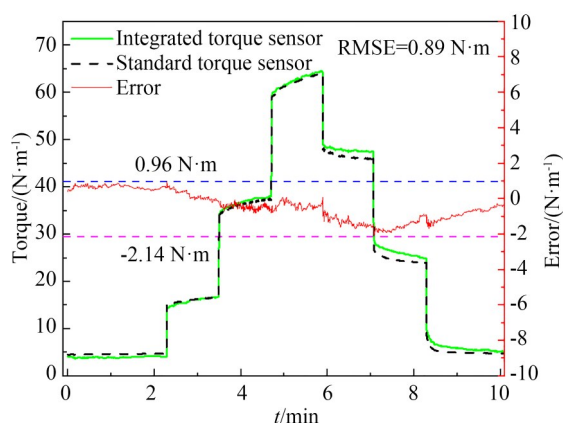


图 16 施加阶梯扭矩

Fig. 16 Apply step torque

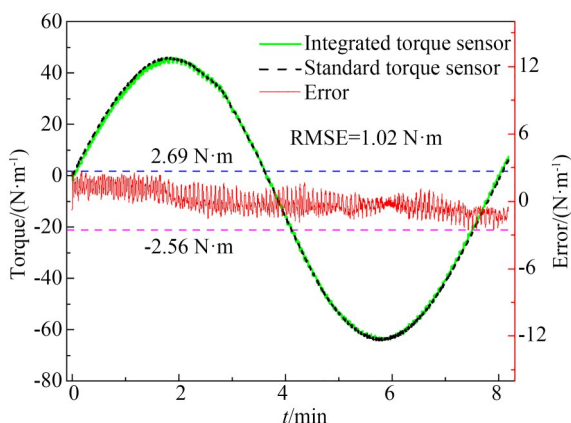


图 17 施加正弦扭矩

Fig. 17 Apply sinusoidal torque

加载均方根误差为 0.89~0.98 N·m, 正弦扭矩加载均方根误差为 0.96~1.05 N·m, 集成式扭矩传感器的重复测量精度较好。

分析误差产生原因, 一方面由于集成式扭矩传感器应变片通过涂胶进行粘贴, 胶层控制不均匀导致柔轮底面应变传递存在差异, 最终信号输出存在误差; 另一方面, 谐波减速器工作过程中柔轮和钢轮齿啮合传动会产生振动, 该振动影响

柔轮底面的应变, 会使应变片输出信号内部引入干扰。

表 7 集成式扭矩传感器加载实验结果

Tab. 7 Result of integrated torque sensor loading experiment (N·m⁻¹)

阶梯扭矩加载均方根误差	正弦扭矩加载均方根误差
0.89	1.02
0.91	0.98
0.92	1.05
0.96	0.96
0.91	0.97
0.98	1.04

6 结 论

本文针对协作机器人关节力控和高集成度需求, 利用有限元分析和响应面模型设计了一种基于应变感应的谐波减速器集成式扭矩传感器。通过有限元分析获取谐波减速器柔轮底面的应变规律, 结合响应面模型获取最优敏感栅结构为栅丝长度 6 mm, 栅丝间距 0.5 mm, 栅丝位置 36.5 mm, 利用惠斯通电桥原理将集成式扭矩传感器设计为圆环状, 以消除波发生器转动作用产生的应变纹波干扰。对设计的集成式扭矩传感器进行测试, 标定获得集成式扭矩传感器的灵敏度为 0.249 mV/N·m, 线性度为 0.999 74, 迟滞误差为 2.19%。施加 0~70 N·m 之间阶梯变化的负载扭矩, 集成式扭矩传感器均方根误差为 0.89~0.98 N·m。施加在 ±70 N·m 之间正弦变化的负载扭矩, 均方根误差为 0.96~1.05 N·m。该传感器的灵敏度较高, 能够精准地控制机器人关节力。

参考文献:

- [1] TSETSERUKOU D, KAWAKAMI N, TACHI S. Design, control and evaluation of a whole-sensitive robot arm for physical human-robot interaction [J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2009, 6(4): 699-725.

- [2] TRIPUTEN S, GOPAL A, WEBER T, *et al.* Methodology to analyze the accuracy of 3D objects reconstructed with collaborative robot based monocular LSD-SLAM[C]. *2018 International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS)*. March 1-3, 2018. Singapore. IEEE, 2018: 185-190.

- [3] 康杰, 贾凯, 邹凤山, 等. 基于协作机器人仿真环境的关节轨迹预测方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 180-184.
KANG J, JIA K, ZOU F SH, *et al.* Joint trajectory prediction method based on collaborative robot simulation environment[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(31): 180-184. (in Chinese)
- [4] 徐兴盛, 李映君, 王桂从, 等. 轮辐结构压电式六维力传感器设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2655-2664.
XU X SH, LI Y J, WANG G C, *et al.* Design of six-axis force piezoelectric sensor with spoke structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(12): 2655-2664. (in Chinese)
- [5] 晏家梁. 基于光纤光栅的医疗手术机器人腕部六维力/力矩感知研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
YAN J L. *Research on Six-axis Force/moment Perception of Medical Surgery Robot Wrist Based on Fiber Bragg Grating*[D]. Jinan: Shandong University, 2023. (in Chinese)
- [6] AHMAD A R, WYNN T, LIN C Y. A comprehensive design of six-axis force/moment sensor[J]. *Sensors*, 2021, 21(13): 4498.
- [7] PU M H, LUO Q, LIANG Q, *et al.* Modeling for elastomer displacement analysis of capacitive six-axis force/torque sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(2): 1356-1365.
- [8] CAO M Y, LAWS S, BAENA F R Y. Six-axis force/torque sensors for robotics applications: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(24): 27238-27251.
- [9] HO C N, SONG J B. Collision detection algorithm robust to model uncertainty[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2013, 11(4): 776-781.
- [10] WAHRBURG A, BOS J, LISTMANN K D, *et al.* Motor-current-based estimation of Cartesian contact forces and torques for robotic manipulators and its application to force control[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(2): 879-886.
- [11] MA L J, DONG L L, HAN Y, *et al.* A method of sensorless collision detection based on motor current for robot manipulator[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2020, 64(1/2/3/4): 237-244.
- [12] CAO F, DOCHERTY P D, NI S L, *et al.* Contact force and torque sensing for serial manipulator based on an adaptive Kalman filter with variable time period[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 72: 102210.
- [13] MIN J K, AHN K H, PARK H C, *et al.* A novel reactive-type joint torque sensor with high torsional stiffness for robot applications[J]. *Mechatronics*, 2019, 63: 102265.
- [14] KIM U, MAENG C Y, BAK G, *et al.* High-stiffness torque sensor with a strain amplification mechanism for cooperative industrial manipulators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(3): 3131-3141.
- [15] LI Y J, WANG G C, ZHANG S, *et al.* Design and calibration of spoke piezoelectric six-dimensional force/torque sensor for space manipulator[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(1): 218-235.
- [16] QI L, YANG D P, CAO B S, *et al.* Design of a ring-type bearingless torque sensor with low cross-talk error[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(19): 18376-18383.
- [17] 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.
PAN X A, WANG H G, JIANG Y. Development of a built-in torque sensor in harmonic drive gears for robots[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(1): 154-161. (in Chinese)
- [18] 吉利. 基于响应面法的航天器有限元模型修正方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
JI L. *Research on Updating Method of Spacecraft Finite Element Model Based on Response Surface method*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [19] HATTAB M W. On the use of data transformation in response surface methodology[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2018, 34(6): 1185-1194.
- [20] 张凤玲, 张旭, 艾延廷, 等. 基于响应面法的高温应变计敏感栅结构优化研究[J]. 仪器仪表学报,

2023, 44(6): 144-155.

ZHANG F L, ZHANG X, AI Y T, *et al.* Sensitive grid structure optimization of high temperature

strain gauge based on response surface methodology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6): 144-155. (in Chinese)

作者简介:



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,博士生导师,1989年于南京航空学院获得学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获得硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微装配技术与系统、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn

通讯作者:



娄志清(1978—),男,黑龙江肇东人,副教授,1999年、2008年于大连理工大学分别获得学士和博士学位,研究方向为微小组件自动装配技术、数控机床误差测量与补偿技术等。E-mail: louzhiqing@dlut.edu.cn