

# 一种机器人谐波减速器内嵌扭矩传感器的研制\*

潘新安<sup>1,2</sup>, 王洪光<sup>1</sup>, 姜勇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 针对模块化可重构机器人对关节扭矩测量的需求,研制了一种内嵌于谐波减速器的扭矩传感器。基于二阶纹波模型,对谐波减速器的柔轮进行了应力应变分析。提出了一种基于矢量抵消原理的扭矩传感器设计方法,设计了一种基于三矢量抵消的扭矩传感器,使一、二阶纹波及更多阶纹波甚至所有其他高阶纹波都通过矢量叠加而抵消,且通过使用冗余应变片提高测量精度。分析了系统的输出与扭矩的关系,并进行了传感器误差分析。研制了扭矩传感器物理样机和测试平台,并进行了加载测试,结果表明,研制的扭矩传感器具有较高的灵敏度和精度,精度与波发生器的转动有相关性。

**关键词:** 关节模块; 谐波减速器; 扭矩传感器; 矢量叠加; 应变电桥; 误差分析

中图分类号: TH823 TP242 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Development of a built-in torque sensor in harmonic drive gears for robots

Pan Xin'an<sup>1,2</sup>, Wang Hongguang<sup>1</sup>, Jiang Yong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

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

**Abstract:** To meet the demand of joint torque measurement for a modular reconfigurable robot, a built-in torque sensor in harmonic drive gear was developed. Based on the two-order ripple model, the stress and strain of the flexspline in the harmonic drive gear were analyzed. A vector-added-and-cancelled-out-principle based torque sensor design method was proposed, and a three-vector-added-and-cancelled-out-based torque sensor was designed. The torque sensor cancels out the first order, the second order, and even all the other higher order ripples through ripple vector addition. The redundant strain gauges were employed to improve the measurement accuracy. The relationship between the output signal and the input torque was obtained, and the error analysis was given. A torque sensor prototype and a test bed were developed; and the loading experiments were conducted. The experimental results show that the torque sensor possesses high sensitivity and accuracy, and the accuracy has correlation with the wave generator rotation.

**Keywords:** joint module; harmonic drive gear; torque sensor; vector addition; strain bridge; error analysis

## 1 引言

模块化可重构机器人(modular reconfigurable robot, MRR)通过选择合适的构型而执行给定的作业任务,因此具有适应多任务种类的能力。机器人力控制是MRR完成某些任务所必不可少的,而力/力矩传感器是实现力

控制的必要传感器件。与仅在机器人末端附加多维力/力矩传感器<sup>[1-3]</sup>相比,在机器人关节处配置扭矩传感器具有不需解算关节力等优点。通过在机器人关节的构件上设计弹性体并利用电阻应变片<sup>[4-5]</sup>、光学原理<sup>[6]</sup>、电磁原理<sup>[7]</sup>等可以实现对关节扭矩的测量。当MRR的关节模块的传动链以谐波减速器为输出级时,由于谐波减速器的柔轮在工作过程中会产生较大的应变,柔轮可以替

收稿日期: 2013-04 Received Date: 2013-04

\* 基金项目: 国家 863 计划(2012AA041401)、国家自然科学基金(60905048)、机器人学国家重点实验室课题(RLZ200802)资助项目

代弹性体<sup>[8]</sup>, 并且不改变关节的结构, 不带来额外的柔性, 因此具有一定的优越性。

谐波减速器工作过程中, 其柔轮上的应变来源主要是其所传递的扭矩和波发生器的旋转所引起的柔轮变形。其中前者是测量的目标信号, 后者则是干扰信号。对于谐波减速器内嵌扭矩传感器来说, 如何区分这 2 种信号并把后者(下文称为“纹波信号”)消除是至关重要的。纹波信号的建模方法主要有一阶模型和二阶模型 2 种。其中一阶模型<sup>[8-9]</sup>仅包含 2 倍于波发生器旋转频率的正(余)弦波成分, 而二阶模型则包含有 2 倍和 4 倍的频率成分<sup>[9]</sup>。

通过不同位置的应变片产生具有 180° 相位差的纹波信号, 进而利用信号叠加可实现纹波的抵消<sup>[8, 10-12]</sup>, 为便于区分, 该方法称为“电桥补偿法”。通过多个在圆周上均布的独立半桥电路通道的信号的加权叠加实现纹波信号的抵消<sup>[9, 13-17]</sup>, 称为“加权叠加法”。此外, Taghirad 等人<sup>[11, 18]</sup>应用卡尔曼滤波等方法对扭矩信号进行滤波, 然而该方法会引起时间延迟, 可能会影响系统的实时性。

电桥补偿法通过相隔 90° 和 45° 的应变片, 使前两阶纹波都得到 180° 的相位差, 对应应变片位置精度要求较高。加权叠加法得到的是前两阶纹波的综合抵消效果, 且增益系数的调节计算与操作较复杂。

本文采用二阶纹波信号建模方法, 分析了谐波减速器柔轮上的应力应变。提出了一种基于矢量叠加抵消原理的谐波减速器内嵌扭矩测量方法, 从原理上分别对前两阶及更高阶纹波进行直接叠加抵消。给出了系统输出的代数解和误差估计。完成了样机研制, 并进行了性能测试。

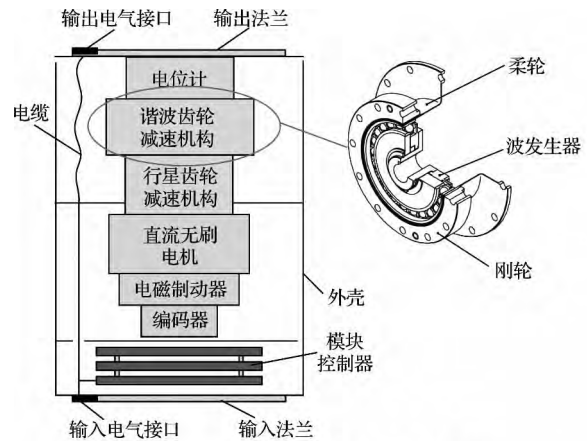
## 2 谐波减速器柔轮应力与应变分析

### 2.1 关节模块介绍及柔轮扭矩测量原理

模块化可重构机器人实验系统(modular reconfigurable robot experimental system, MRRES)是一种关节型的模块化可重构机器人实验系统, 它包含有关节模块、连杆模块、末端执行器等模块, 这些模块构建出一个基本的机器人模块库<sup>[19-20]</sup>。对于不同的作业任务, 可选择合适的机器人构型, 从模块库中选择对应的模块组成机器人本体去执行任务<sup>[21]</sup>。关节模块是 MRRES 的核心部件, 它是一个集成机械传动、控制、传感等子系统于一体的智能单元。如图 1(a) 所示, 关节模块传动链的输出级为谐波减速器。

采用应变电测法测量扭矩时, 设计柔度合适且对被测物理量敏感的弹性体是关键, 然后通过在弹性体上合理布置的应变片组成测量桥路, 将被测物理量转换为电信号。由于谐波减速器的柔轮具有弹性体的特征, 因此本文将柔轮作为测量扭矩的弹性体。在如图 1(b) 所示区域, 柔轮表面的应变大小和梯度合适, 因此被选为测量

区域。然而, 与一般扭矩传感器的纹波相比, 且与其测量的目标信号(由扭矩引起的应变)相比, 柔轮上测量的应变的纹波很大。区分目标信号和纹波, 并把纹波消除是提高扭矩传感器精度的关键。



(a) 关节模块及谐波减速器的结构  
(a) Structures of a joint module and its harmonic drive gear



(b) 柔轮及其上贴应变片的区域  
(b) Flexspline and the strain gauge cemented area

图 1 关节模块及其集成的谐波减速器

Fig. 1 A joint module and its integrated harmonic drive gear

由于纹波具有一定规律性, 通过设计合适的应变片布置和接桥方式可抵消纹波。谐波减速器柔轮上应变的纹波是不同频率的正弦波(或余弦波)的叠加, 各种频率波形的幅值和相位是一定的。通过在柔轮的同一直径但周向位置不同的一系列位置粘贴应变片, 则对于每一种频率成分, 可得到一系列幅值相同但相位不同的波形。如图 2 所示, 以 3 个波形的叠加抵消为例, 假设某一个频率的 3 个正弦波分别为  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_3$ , 若三者相位差分别为 120°, 则可等效看作是封闭的共点矢量系, 其矢量和为零, 从而实现纹波的抵消。

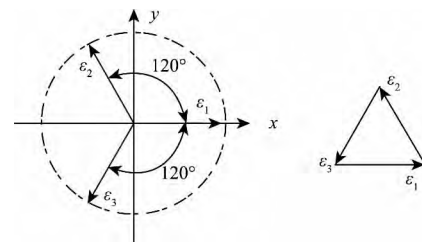


图 2 矢量的叠加

Fig. 2 Vector addition

2.2 柔轮在扭矩作用下的应变分析

如图3(a)、(b)所示,在柔轮上取一个扇形单元体,其半径方向上长度为 $dr$ ,则单元体的剪应力为:

$$\tau_r = \frac{T}{2\pi r^2 t} \quad (1)$$

式中: $T$ 是柔轮传递的扭矩, $r$ 是单元体距离轴心的距离, $t$ 是柔轮厚度。

由于 $dr \rightarrow 0$ 时 $\tau_r = \tau_{r+dr}$ ,于是可使该扇形单元体等效为图3(c)所示的正方形单元体,且:

$$\tau = \tau_r \quad (2)$$

于是得其主应力为:

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} = \tau \quad \sigma_2 = 0 \quad \sigma_3 = \sigma_{\min} = -\tau \quad (3)$$

且 $\tan 2\alpha_0 = -2\tau_{xy} / (\sigma_x - \sigma_y) \rightarrow +\infty$ ,即 $\alpha_0 = 45^\circ$ 或 $135^\circ$ ,也就是说,从 $x$ 轴量起由 $\alpha_0 = 45^\circ$ 确定 $\sigma_{\max}$ 所在的主平面,而由 $\alpha_0 = 135^\circ$ 确定 $\sigma_{\min}$ 所在的主平面。

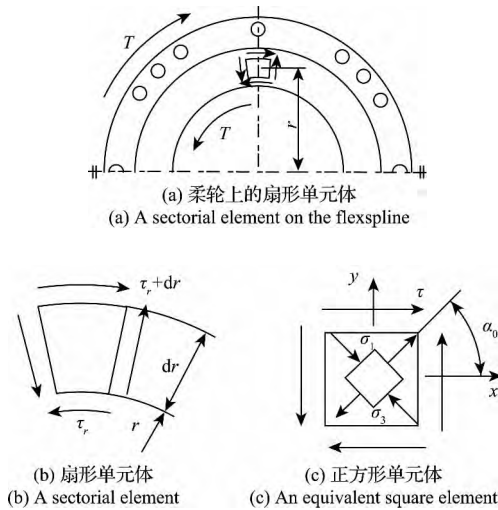


图3 柔轮的应力分析

Fig. 3 Stress analysis of the flexspline

由广义虎克定律及式(1)~(3)得单元体主应变为:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \frac{1+\mu}{E} \tau = \frac{1+\mu}{E} \frac{T}{2\pi r^2 t} = \frac{T}{4\pi r^2 t G} \quad (4)$$

$\varepsilon_2 = 0$

且主应变的方向与主应力的方向一致。

贴装应变片时,应当将敏感栅的轴线方向与被测量的敏感方向重合,即与第一主应变的方向重合,此时应变片测得的由扭矩引起的应变为:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_1 = \frac{T}{4\pi r^2 t G} \quad (5)$$

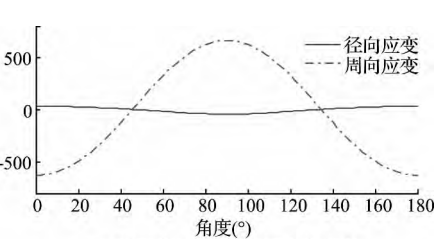
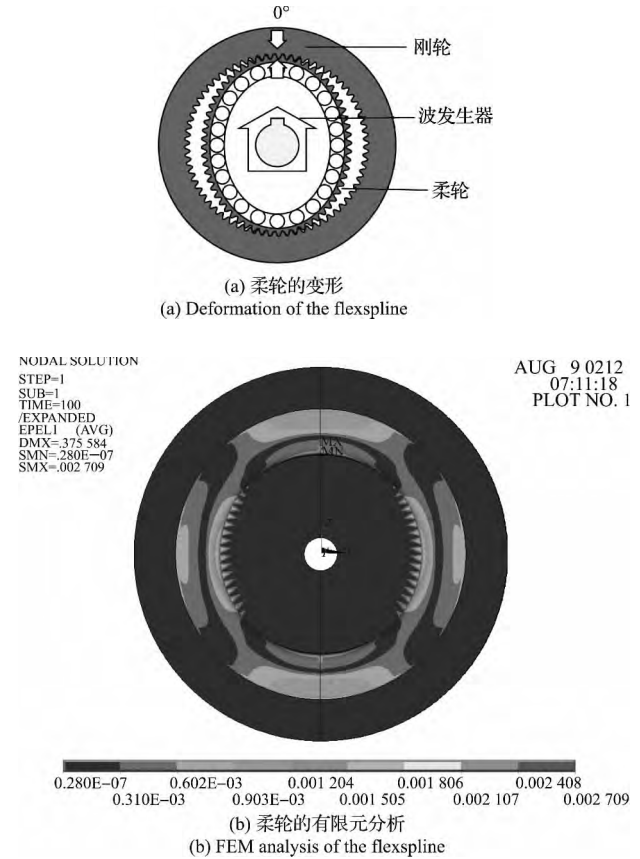
2.3 柔轮在强制变形条件下的应变分析

如图4(a)所示,当波发生器旋转时,其椭圆形凸轮的长轴挤压柔轮,使柔轮强制变形为相对应的椭圆形,并产生周期性应变。在波发生器静止状态下对柔轮进行了

有限元分析,得到如图4(b)所示的应变云图,此应变在 $180^\circ$ 内完成一个周期,如图4(c)所示。并且经过对比发现在 $R30\text{ mm}$ 圆周上更适宜测量扭矩。然而,波发生器的旋转还会给柔轮带来更高频率的应变。本文采用二阶模型,即设波发生器引起的柔轮某一半径的圆周上产生的应变为:

$$\varepsilon_G = a + b\sin 2\omega_c t + c\sin 4\omega_c t = a + b\sin 2\beta + c\sin 4\beta \quad (6)$$

式中: $\omega_c$ 和 $\beta$ 分别是波发生器旋转角速度和角度。



(c) The strains on a semicircle with radius of 30 mm

图4 柔轮在波发生器挤压下的应变

Fig. 4 Flexspline strains due to the compression of the wave generator

如图5所示,应变片 $R_1$ 和 $R_2$ 垂直交叉贴在柔轮上,且在接桥时此二应变片处于相邻的桥臂上。根据式(6),图5中A、B两点的强制变形应变为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{CA} &= a_{rA} + b_{rA} \sin 2(\beta_1 - \varphi) + c_{rA} \sin 4(\beta_1 - \varphi) \\ \varepsilon_{CB} &= a_{rA} + b_{rA} \sin 2(\beta_1 + \varphi) + c_{rA} \sin 4(\beta_1 + \varphi) \end{aligned}$$

所以得:

$$\varepsilon_{CA} - \varepsilon_{CB} = 2b_{rA} \cos 2\beta_1 \sin 2\varphi + 2c_{rA} \cos 4\beta_1 \sin 4\varphi$$

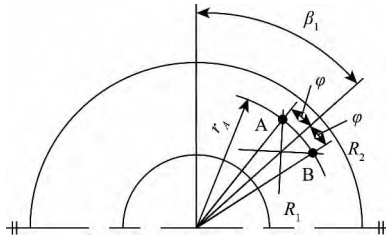


图 5 强制变形条件下的应变分析

Fig. 5 Strain analysis due to the forced deformation

从而得 2 个应变片所测得的由变形引起的应变为:

$$\varepsilon_{C1} - \varepsilon_{C2} = 2 \int_0^{\varphi_0} (2b_{rA} \cos 2\beta_1 \sin 2\varphi + 2c_{rA} \cos 4\beta_1 \sin 4\varphi) dl \quad (7)$$

$$\text{又有 } \frac{l}{\sin \varphi} = \frac{r}{\sin(\pi/4 - \varphi)}$$

忽略参数  $b_{rA}$  和  $c_{rA}$  的变化, 并改写为  $b_r$  和  $c_r$ , 得:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{C1} - \varepsilon_{C2} &= \\ 2\sqrt{2}r \int_0^{\varphi_0} \frac{b_r \cos 2\beta_1 \sin 2\varphi + c_r \cos 4\beta_1 \sin 4\varphi}{\sin^2(\pi/4 - \varphi)} d\varphi &= \\ b_0 \cos 2\beta_1 + c_0 \cos 4\beta_1 \end{aligned} \quad (8)$$

式中:

$$b_0 = 2\sqrt{2}rb_r \int_0^{\varphi_0} \frac{\sin 2\varphi}{\sin^2(\pi/4 - \varphi)} d\varphi \quad (9)$$

$$c_0 = 2\sqrt{2}rc_r \int_0^{\varphi_0} \frac{\sin 4\varphi}{\sin^2(\pi/4 - \varphi)} d\varphi$$

### 2.4 应变的合成

扭矩引起的应变以及变形引起的应变线性叠加即可得应变片  $R_1$  和  $R_2$  所测得的总应变, 即:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_{t1} + \varepsilon_{C1} - (\varepsilon_{t2} + \varepsilon_{C2}) \quad (10)$$

$$\text{又知 } \varepsilon_{t1} = -\varepsilon_{t2} = \varepsilon_t \quad (11)$$

把式(5)、(8)和(11)代入(10)得:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 2\varepsilon_t + b_0 \cos 2\beta_1 + c_0 \cos 4\beta_1 \quad (12)$$

## 3 基于矢量叠加抵消原理的扭矩传感器设计与分析

### 3.1 基于矢量叠加抵消原理的纹波补偿

定义 1: 在柔轮同一个位置呈垂直十字交叉布置的 2 个应变片称为 1 个“应变片组”, 它们被接入相邻的 2 个桥臂时产生式(12)所示的应变。

若有  $n$  个矢量叠加抵消, 则其矢量间相位差为  $\Delta\theta = 2\pi/n$ 。由于一阶纹波的频率是波发生器旋转角频率的 2

倍, 因此有:

定理 1: 采用  $n$  ( $n \in \mathbf{N}$ , 且  $n \geq 2$ ) 个矢量抵消一阶纹波, 则至少需要  $n$  个应变片组, 且它们在柔轮周向的一个布置方式为依次间隔:

$$\Delta\theta_1 = \pi/n$$

此  $n$  个应变片组产生  $n$  个一阶纹波, 与这些一阶纹波对应的矢量若依次首尾相连, 则组成一个封闭的正  $n$  边形, 即它们的矢量和为零。

由于二阶纹波的频率是波发生器旋转角频率的 4 倍, 因此有:

定理 2: 采用  $n$  ( $n \in \mathbf{N}$ , 且  $n \geq 2$ ) 个矢量抵消前两阶纹波, 则可使用  $2n$  个应变片组, 且它们在柔轮周向的一个布置方式为依次间隔:

$$\Delta\theta_2 = \pi/(2n)$$

此  $2n$  个应变片组产生  $2n$  个一阶和二阶纹波, 一阶纹波矢量依次首尾相连, 则组成一个封闭的边数为  $2n$  的正多边形; 对于二阶纹波矢量, 若同方向的连在一起, 然后再依次首尾相连, 则组成一个封闭的边数为  $n$  的正多边形, 其中每个边具有 2 个矢量。

进而, 将上述理论推广到一般情形, 则有:

定理 3: 采用  $n$  ( $n \in \mathbf{N}$ , 且  $n \geq 2$ ) 个矢量抵消前  $m$  ( $m \in \mathbf{N}$ ) 阶纹波, 则可使用  $mn$  个应变片组, 且它们在柔轮周向的一个布置方式为依次间隔:

$$\Delta\theta_3 = \pi/(mn)$$

这些应变片组产生的一阶纹波矢量依次首尾相连, 组成一个封闭的正  $mn$  边形, 与第  $m$  阶对应的矢量首尾相连则组成一个正  $n$  边形, 且每个边上有  $m$  个矢量。

当矢量个数为奇数时, 应变片组的数量可减半, 并且可以抵消无限多阶的频率为波发生器角频率偶数倍的纹波, 即:

定理 4: 采用  $n$  ( $n \in \mathbf{N}$ ,  $n \geq 2$ , 且  $n$  为奇数) 个矢量抵消所有频率为波发生器旋转角频率偶数倍的纹波, 则可使用  $n$  个应变片组, 且它们在柔轮周向的一个布置方式为依次间隔:

$$\Delta\theta_4 = \pi/n$$

各阶纹波矢量分别依次首尾相连, 则组成一个封闭的正  $n$  边形, 且每个边具有多个矢量。

相隔  $\pi$  的 2 组应变片测量结果一致, 因此为提高传感器的测量精度, 可使应变片组尽可能均匀地在分布在  $2\pi$  范围内, 于是可使应变片稠密的区域的部分应变片贴到与现有位置呈角度  $\pi$  的位置。

冗余应变片可提高传感器的测量精度。由于定理 1 ~ 4 中, 所有应变片都集中在  $\pi$  的角度范围内, 因此可在与每个应变片组呈角度  $\pi$  的位置贴装冗余应变片组。此时, 矢量组成的多边形的边数不变, 但每条边上的矢量的数目加倍。

需要注意的是, 定理 4 中当  $n$  为 3、5、7 等数值时, 会

存在电桥臂上的应变片数量不一致的情况,此时可在应变片较少的桥臂上配上合适数量和电阻值的精密电阻,或采用冗余应变片贴法即可。

### 3.2 扭矩传感器设计

由定理4可知,当采用奇数个矢量叠加原理时,不仅能消除前两阶纹波,后续所有频率是波发生器旋转角频率偶数倍的纹波全能消除。因此采用奇数矢量抵消方法,且为简化设计,采用三矢量抵消原理。此外,采用冗余应变片设计提高传感器精度。

应变片组粘贴在以柔轮的中心为中心的半径为R30 mm的圆周上,如图6(a)所示。此二应变片的轴线分别沿第1或第3主应变(由扭矩产生的应变)。采用的应变片布置方案如图6(b)所示,共有12个应变片组依次相隔30°均布于R30 mm的圆周上。

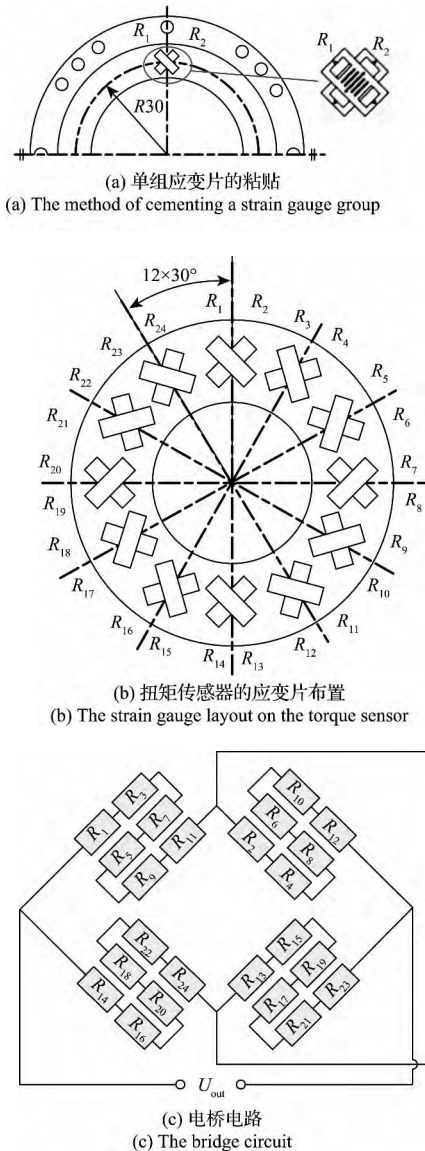


图6 应变片的布置及电桥电路

Fig. 6 Strain gauge layout and the bridge circuit

应变片的接桥方法如图6(c)所示,所有应变片组成一个全桥电路。应变片R<sub>1</sub>和R<sub>2</sub>分别处于相邻的2个桥臂上;据式(12)知它们测得的应变纹波相位角分别为2β<sub>1</sub>和4β<sub>1</sub>。同理R<sub>3</sub>和R<sub>4</sub>的纹波相位角为2β<sub>2</sub>和4β<sub>2</sub>,其他依此类推。由于β<sub>i</sub>和β<sub>i+1</sub>相差30°,得前两阶纹波如图7所示(假定β<sub>1</sub> = 0),叠加后分别被抵消。

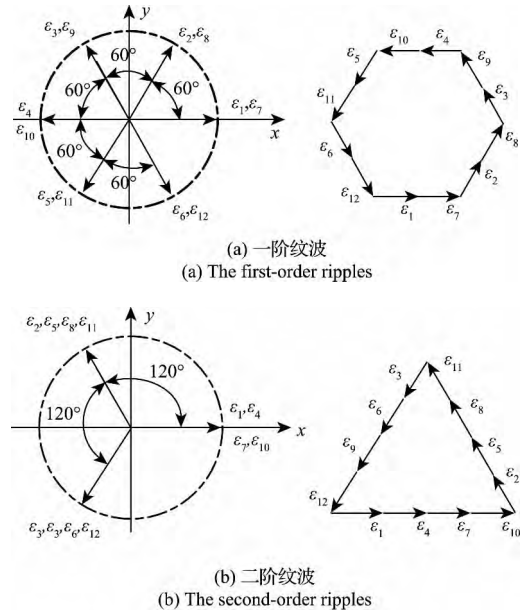


图7 纹波信号及其叠加

Fig. 7 Ripples and their additions

### 3.3 电桥测量值分析

由于应变片R<sub>1</sub> ~ R<sub>24</sub>组成了一个全桥,其输出为:

$$\varepsilon_d = \sum_{i=1}^{12} \varepsilon_{2i-1} - \sum_{i=1}^{12} \varepsilon_{2i} \quad (13)$$

设R<sub>1</sub>和R<sub>2</sub>在柔轮上周向角度位置为β<sub>1</sub>,R<sub>3</sub>和R<sub>4</sub>为β<sub>2</sub>,依次类推R<sub>2i-1</sub>和R<sub>2i</sub>为β<sub>i</sub>,则据式(12)和(13)得:

$$\varepsilon_d = 24\varepsilon_t + b_0 \sum_{i=1}^{12} \cos 2\beta_i + c_0 \sum_{i=1}^{12} \cos 4\beta_i \quad (14)$$

式中:β<sub>i+1</sub> = β<sub>i</sub> + π/6, i = 1, 2, ..., 12。

当β<sub>i</sub>不存在误差时,可得:

$$b_0 \sum_{i=1}^{12} \cos 2\beta_i = 0, \quad c_0 \sum_{i=1}^{12} \cos 4\beta_i = 0 \quad (15)$$

把式(15)代入式(14)得:

$$\varepsilon_d = 24\varepsilon_t \quad (16)$$

已知对于全桥电路:

$$U_{out} = \frac{UK}{4} \varepsilon_d \quad (17)$$

把式(16)代入式(17),从而得到电桥的输出为:

$$U_{out} = \frac{UK}{4} \varepsilon_d = 6UK\varepsilon_t \quad (18)$$

由此可见,当应变片无贴装位置误差时,可以同时把两阶纹波都抵消。把式(5)代入式(18)得:

$$U_{out} = \frac{3UKT}{2\pi r^2 tG} \quad (19)$$

式(19)表明,该系统的输出较其他方法都大,是一般单全桥电路的6倍,是文献[9]方法的4倍。

#### 4 扭矩传感器误差分析

贴装应变片时难免会存在位置和角度误差,使电路不能完全地抵消全部纹波,从而影响扭矩传感器的精度。这里只考虑应变片沿柔轮圆周方向的角度粘贴误差。根据目前的贴装工艺精度,应变片的角度误差在 ±0.1° 以内。设应变片的角度误差分别为:

$$\Delta\beta = [\Delta\beta_1, \Delta\beta_2, \Delta\beta_3, \dots, \Delta\beta_{12}]^T \quad (20)$$

式(14)可改写为:

$$\varepsilon_d = 24\varepsilon_t + b_0 \sum_{i=1}^{12} \cos 2(\beta_i + \Delta\beta_i) + c_0 \sum_{i=1}^{12} \cos 4(\beta_i + \Delta\beta_i) \quad (21)$$

则纹波为:

$$\varepsilon_R = b_0 \sum_{i=1}^{12} \cos 2(\beta_i + \Delta\beta_i) + c_0 \sum_{i=1}^{12} \cos 4(\beta_i + \Delta\beta_i) \quad (22)$$

式中:

$$b_0 \sum_{i=1}^{12} \cos 2(\beta_i + \Delta\beta_i) = \sum_{i=1}^{12} (\cos 2\beta_i \cos 2\Delta\beta_i - \sin 2\beta_i \sin 2\Delta\beta_i) \quad b_0 \leq 4 [\max(\cos 2\Delta\beta_i) - \min(\cos 2\Delta\beta_i)] b_0 + 2\sqrt{3} [\max(\sin 2\Delta\beta_i) - \min(\sin 2\Delta\beta_i)] b_0 = 0.024 2b_0 \quad (23)$$

同理得:

$$c_0 \sum_{i=1}^{12} \cos 4(\beta_i + \Delta\beta_i) \leq 0.048 5c_0 \quad (24)$$

把式(23)和(24)代入式(22)得:

$$\varepsilon_R \leq 0.024 2b_0 + 0.048 5c_0$$

又由式(9)得:

$$b_0 \leq 2\sqrt{2}rb_r \left( \frac{1}{2} \frac{\sin 2\varphi_0}{\sin^2(\pi/4 - \varphi_0)} \varphi_0 \right) = 0.053 6b_r$$

$$c_0 \leq 2\sqrt{2}rc_r \left( \frac{1}{2} \frac{\sin 4\varphi_0}{\sin^2(\pi/4 - \varphi_0)} \varphi_0 \right) = 0.107c_r$$

其中根据应变片自身的参数得  $\varphi_0 = 1^\circ$ 。所以得:

$$\varepsilon_R \leq 0.001 297b_r + 0.005 19c_r$$

由有限元分析结果可知  $\varepsilon_t = 60 \mu\text{m}/\text{m}$ ,  $b_r \approx 750 \mu\text{m}/\text{m}$ , 又知  $c_r$  约为  $b_r$  的 1/20, 即有  $c_r \approx 37 \mu\text{m}/\text{m}$ , 所以得:

$$e_r = \frac{\varepsilon_R}{24\varepsilon_t} \leq 2.5\% \text{ FS}$$

#### 5 样机研制及测试

基于以上分析,研制了一套谐波减速器内嵌扭矩传

感器,如图8所示。在谐波减速器的柔轮上贴上16组应变片(共32片)其中12组(24片)组成了图6(c)所示的电桥电路。信号采集电路板具有为传感器提供激励、信号采集、信号调理和CAN通信等功能。信号采集电路采用了低噪声的仪表放大器及24位分辨率(16位有效)的模数转换芯片,系统分辨率为1/5 000 ~ 1/10 000FS,采样率100 Hz(最大可达1 kHz)。信号采集电路板与机器人关节模块内部的模块控制器之间通过CAN通信连接。传感器的设计量程为40 N·m。

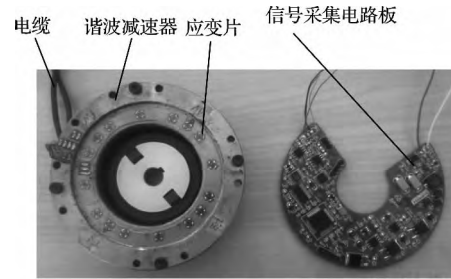


图8 扭矩传感器样机

Fig. 8 Prototype of the torque sensor

使用如图9所示的测试平台,分别在谐波减速器静止和运动情况下,对扭矩传感器进行了测试。其中,波发生器静止状态下负载加载及卸载过程进行了2次,其中一次如图10所示,其中施加最大负载为38.41 N·m。由于测试平台的负载靠人工增减砝码实现,因此负载变化过程中扰动较大。但负载稳定后扭矩传感器输出平稳。最大负载及零负载时的电压差为  $\Delta U = 2.271 69 \text{ mV}$ , 所以可得传感器的灵敏度为:

$$K = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{2.271 69}{38.41} = 0.059 14 \text{ mV}/\text{N} \cdot \text{m}$$

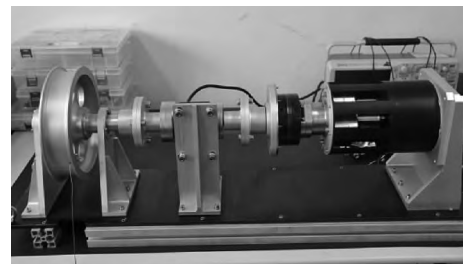


图9 测试平台

Fig. 9 Testbed for the torque sensor

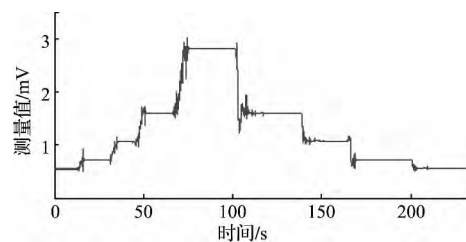


图10 加载和卸载的时间历程

Fig. 10 Loading and releasing processes of the sensor

波发生器静止状态下两次加载的输入输出关系如图 11(a)、(b)所示,图 11(b)是图 11(a)的局部放大图。由两次测试曲线之间的偏差及传感器的重复性计算公式得传感器的重复性为(取置信概率为 95%):

$$e_f = \pm \frac{2}{Y_{FS}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} = \pm 0.22\% \text{ FS}$$

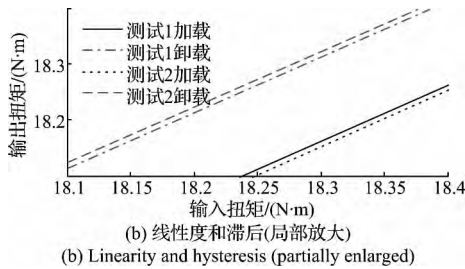
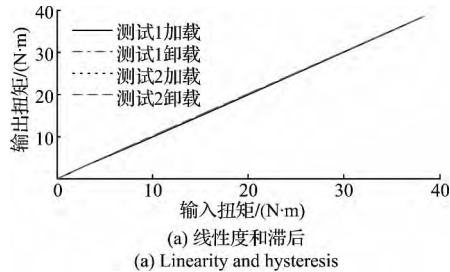


图 11 两次加载的对比

Fig. 11 Comparison between two loading tests

谐波减速器内嵌扭矩传感器与标准扭矩输出的最大差发生在负载为  $8.86 \text{ N} \cdot \text{m}$  时,其值为  $\Delta_1 = 0.16887 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,所以得传感器的非线性度为:

$$e_l = \pm \frac{\Delta_1}{Y_{FS}} = \pm \frac{0.16887}{38.41} = \pm 0.44\% \text{ FS}$$

扭矩传感器加载和卸载过程两个曲线的最大偏差为  $\Delta_2 = 0.20685 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,所以得传感器的滞后为:

$$e_z = \pm \frac{\Delta_2}{Y_{FS}} = \pm \frac{0.20685}{38.41} = \pm 0.54\% \text{ FS}$$

波发生器运动状态下的测试曲线如图 12所示,扭矩波动的范围约为  $\Delta_3 \approx \pm 0.9 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,所以得传感器在波发生器运动的状态下的精度为:

$$e_M = \frac{\Delta_3}{Y_{FS}} = \pm \frac{0.9}{38.41} = \pm 2.3\% \text{ FS}$$

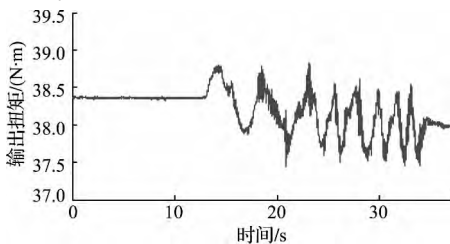


图 12 波发生器运动对传感器的影响

Fig. 12 The effect of wave generator rotation on the torque sensor

由以上可知,扭矩传感器在波发生器静止时具有较高的精度,但波发生器的旋转会给传感器带来较大误差,约为波发生器静止时的 4 倍。

## 6 结 论

基于二阶纹波模型,建立了谐波减速器柔轮的应变模型。设计了一种基于矢量叠加抵消原理的传感器,所有阶次的纹波得到了抵消。对电桥的输出及误差进行了分析。研制了物理样机并进行了测试,结果表明:传感器具有较高的灵敏度和精度;波发生器静止状态下,影响传感器精度的最大因素为滞后,约为  $\pm 0.54\% \text{ FS}$ ;波发生器的旋转运动对传感器精度影响最大,误差为  $\pm 2.3\% \text{ FS}$ 。

研制的扭矩传感器具有以下特点: 1) 不改变关节的结构,因此不会引入额外的柔性、重量等; 2) 精度较好,能满足机器人关节的使用需求; 3) 与关节模块的集成度高,可将测得的扭矩实时传送到关节模块控制器; 4) 不仅可应用于机器人关节,还可应用于其他以谐波减速器为输出级的机械传动装置。

未来需要进一步研究如何降低波发生器旋转对传感器精度的影响: 一方面可对谐波减速器零部件的加工和装配精度、应变片的贴装位置精度等对传感器精度的影响开展深入的定性定量研究; 另一方面可通过研究剩余纹波的特性,对传感器误差进行主动补偿。

## 参考文献

- [1] 吕洪波,宋亦旭,贾培发. 机器人修磨中融合先验知识的适应学习建模方法[J]. 机器人, 2011, 33(6): 641-648.  
LV H B, SONG Y X, JIA P F. Incorporation of prior knowledge in adaptive learning for modeling the robotic profile grinding[J]. Robot, 2011, 33(6): 641-648.
- [2] 于振中,惠晶,许胜,等. 多自由度遥操作系统控制的波变量法[J]. 信息与控制, 2012, 41(2): 147-152.  
YU ZH ZH, HUI J, XU SH, et al. Wave variable method for multi-DOF teleoperation system control[J]. Information and Control, 2012, 41(2): 147-152.
- [3] 俞志伟,宫俊,张昊,等. 基于三维力反馈的仿壁虎机器人单腿运动控制[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2674-2680.  
YU ZH W, GONG J, ZHANG H, et al. One-leg motion control of gecko robot based on three-dimensional force feedback[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 2674-2680.
- [4] ALBU-SCHAFFER A, EIBERGER O, GREBENSTEIN M, et al. Soft robotics[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2008, 15(3): 20-30.

- [5] 黄云天, 陈卫东, 孙逸翔. 基于碰撞检测的护理型操作臂的安全性设计与实现[J]. 机器人, 2011, 33(1): 40-45.  
HUNG Y T, CHEN W D, SUN Y X. Safety design and realization of an assistive robotic manipulator based on collision detection[J]. Robot, 2011, 33(1): 40-45.
- [6] TSETSERUKOU D, TACHI S. Torque sensors for robot joint control[C]. Sensors, Focus on Tactile, Force and Stress Sensors (Edited by Rocha J G and Lancers-Mendez S) InTech, Vienna, Austria, 2008: 15-36.
- [7] VISCHER D, KHATIB O. Design and development of high-performance torque controlled joints[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, August 1995, 11(4): 537-544.
- [8] HASHIMOTO M, KIYOSAWA Y, PAUL R P. A torque sensing technique for robots with harmonic drives[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(1): 108-116.
- [9] GODLER I, HORIUCHI M, HASHIMOTO M, et al. Accuracy improvement of built-in torque sensing for harmonic drives[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2000, 5(4): 360-366.
- [10] HASHIMOTO M, SHIZUKA T, GODLER I, et al. Velocity dependence of the characteristics of harmonic drive built-in torque sensing[C]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. San Francisco, CA, 2000: 1334-1339.
- [11] TAGHIRAD H D, BELANGER P R. Intelligent built-in Torque sensor for harmonic drive systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 1999, 48(6): 1201-1207.
- [12] 谢光辉, 张进春, 程福刚, 等. 扭矩嵌入检测的机器人关节伺服舵机研究[J]. 自动化仪表, 2010, 7, 31(7): 26-28.  
XIE G H, ZHANG J CH, CHENG F G, et al. Research on the servo steering gear with built-in torque sensing for robot joint[J]. Process Automation Instrumentation, July 2010, 31(7): 26-28.
- [13] HASHIMOTO M, HATTORI T, HORIUCHI M, et al. Development of a torque sensing robot arm for interactive communication[C]. Proceedings of IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication, Berlin, Sept. 25-27, 2002: 344-349.
- [14] GODLER I. A method to compensate periodic errors by gain tuning in instrumentation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(1): 37-42.
- [15] SENSINGER J W, WEIR R F. Improved torque fidelity in harmonic drive sensors through the union of two existing strategies[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(4): 457-461.
- [16] LIU G J, ABDUL S, GOLDENBERG A A. Distributed control of modular and reconfigurable robot with torque sensing[J]. Robotica, 2008, 26: 75-84.
- [17] GODLER I, HASHIMOTO M, HORIUCHI M, et al. Performance of gain-tuned harmonic drive torque sensor under load and speed conditions[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2001, 6(2): 155-160.
- [18] TAGHIRAD H D, BELANGER P R. Torque ripple and misalignment torque compensation for the built-in torque sensor of harmonic drive system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(1): 309-315.
- [19] PAN X A, WANG H G, JIANG Y, et al. Automatic kinematic modelling of a modular reconfigurable robot[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, available online, doi: 10.1177/0142331212459538.
- [20] 姜勇, 王洪光, 潘新安, 等. 模块化可重构机器人的构形在线自主辨识[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 17-24.  
JIANG Y, WANG H G, PAN X AN, et al. Autonomous online identification of configurations for modular reconfigurable robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 17-24.
- [21] 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, 8(4): 1-6.  
PAN X AN, WANG H G, JIANG Y, et al. Development of a modular reconfigurable robot system[J]. CAAI Transactions on Intelligent systems, 2013, 8(4): 1-6.

#### 作者简介



潘新安, 中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生, 主要研究方向为机器人机构学及测力传感器设计。

E-mail: panxinan@sia.cn

Pan Xin'an is a Ph. D. candidate in Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include robotic mechanism and force-measuring sensor design.



王洪光, 中国科学院沈阳自动化研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为机器人机构学、特种机器人和机电一体化技术等。

Wang Hongguang is a research fellow and Ph. D. supervisor in Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include robotic mechanism, advanced robots and mechatronics.