

文章编号 1004-924X(2011)08-1859-08

# 柔性变栅距光栅角位移传感器的 精度分析与工艺实现

包艳<sup>1,2\*</sup>, 杨德兴<sup>1</sup>, 李秉实<sup>2</sup>, 王东辉<sup>2</sup>, 郑普超<sup>2</sup>

- (1. 西北工业大学 理学院 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072;  
2. 中国航天工业集团公司 西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:**研制了用于采集和反馈飞机舵面位置信息的柔性变栅距光栅角位移传感器。分析了影响传感器精度的主要因素, 给出了制备过程所采用的精密成型工艺。首先, 根据柱面变栅距光栅在柔性变栅距光栅角位移传感器中的核心作用, 介绍了传感器的工作原理; 分析了工艺误差对传感器精度的影响, 提出了柔性变栅距光栅精密成型为柱面变栅距光栅后内表面圆度应不大于 0.01 mm。在圆度对传感器精度影响的量值基础上, 采用了柱面变栅距光栅精密成型工艺。最后, 利用有限元仿真分析了柱面变栅距光栅精密成型工艺的可行性。实验结果表明: 柱面变栅距光栅内表面圆度达到 0.004 3 mm, 传感器的线性度达到最大工作角度的 0.27%, 满足了航空机载传感器的精度要求。

**关键词:** 柔性变栅距光栅; 柱面变栅距光栅; 角位移传感器; 弹性凸模

**中图分类号:** TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1859

## Precision analysis and process implementation of angular displacement sensor based on flexible varied line-space grating

BAO Yan<sup>1,2\*</sup>, YANG De-xing<sup>1</sup>, LI Bing-shi<sup>2</sup>, WANG Dong-hui<sup>2</sup>, ZHENG Pu-chao<sup>2</sup>

(1. Shanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710065, China)

\* Corresponding author, E-mail: by2298@sina.com

**Abstract:** An angular displacement sensor based on a flexible varied-line-space grating was developed for the fly-by-light flight control system. The main factors effecting on the sensor precision and the process for sensor fabrication were discussed. Firstly, the principle of the sensor was introduced based on the key role of cylindrical varied-line-space grating played in the displacement sensor. Then, the effects of process errors on sensor precision were analyzed, and a conclusion was pointed out that the inner surface roundness of the cylindrical varied-line-space grating should be limited to be less than 0.01 mm when it was shaped from the flexible varied-line-space grating. According to analysis results, an accurate forming process was adopted, and its feasibility was conformed by ANSIS analysis.

收稿日期: 2010-10-12; 修订日期: 2011-01-11.

基金项目: 中航工业技术创新基金资助项目 (No. 2009D61864)

Experimental results show that the inner surface roundness of the sensor can be 0.004 3 mm, and the sensor linearity can be 0.27% of the full range. Obtained results meet the precision requirement of the aero-sensors.

**Key words:** flexible varied-line-space grating; cylindrical varied-line-space grating; angular displacement sensor; elastic punch

## 1 引言

光传飞行控制技术是继电传飞控技术后的一次技术跨越,既继承了电传控制系统的技术优势,又在对抗恶劣电磁环境、提高信息化和智能化,以及开放式结构和功能扩展方面具有更强的技术能力,不但是现代飞机飞行控制发展的必然趋势,更是国防军事设备的广泛需求<sup>[1-3]</sup>。光位移传感器是光传飞控系统的关键部件,其技术已成为光传飞控系统快速发展的核心技术之一。光位移传感器的优点为:有效预防电磁干扰、电磁感应以及雷电引起的电磁冲击,提高强电磁环境下飞机的生存能力和任务能力;光路具有可挠曲性、结构简单、体积小、重量轻;通道间干扰弱,在传输中,相邻光纤之间绝对没有相互干扰;灵敏度高、传输带宽高、信息处理速度快。国外从 20 世纪 80 年代开始研究光位移传感器,波音公司空间防务组在 80 年代开发出航空用光纤位移传感器(Ladar Fiber Optic Sensor, LFOS),已通过实验室验证;1984 年,美国 NASA/DOD 开始致力于第一个光传操纵计划,开发出数字编码盘式光位移传感器,并在 F-18 飞机上试飞<sup>[4]</sup>;1986 年,Douglas Aircraft 公司开发出副翼光位置传感器在 DC-10 飞机上试飞<sup>[5]</sup>;1994 年,美国国防高级研究计划局提出先进光传飞控系统硬件(FLASH)计划,采用变栅距光栅线位移传感器代替传统 LVDT 作为液压作动器的位置反馈部件,在 F/A-18(SRA)上进行飞行测试,并将应用于 F-22Z 战斗机<sup>[6]</sup>;20 世纪末,光位移传感器在无人机上进行了试飞验证。当前,国外对光位移传感器的研究已进入实际应用阶段;而国内对于光位移传感器的研究尚处于起步阶段<sup>[2]</sup>,因此,大力推进光位移传感器的研究工作具有重要意义。

柔性变栅距光栅角位移传感器是应我国光传飞控系统需求而研制成功的一类新型位移传感

器,该传感器的研制解决了多项关键技术,其中柱面变栅距光栅精密成型工艺研究是已突破的关键技术之一。本文在分析了影响传感器精度影响因素的基础上,对传感器的精密成型工艺进行了研究,并通过有限元分析证明了该工艺的可行性。

## 2 柔性变栅距光栅角位移传感器工作原理

柔性变栅距光栅角位移传感器工作原理如图 1 所示。

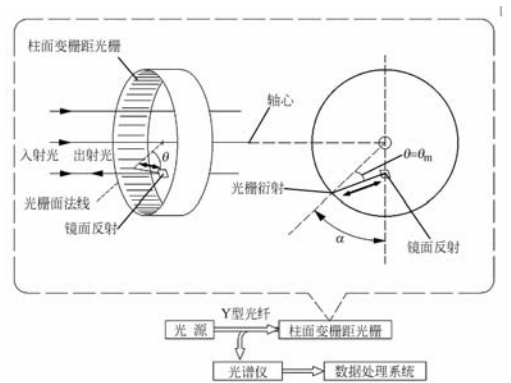


图 1 柔性变栅距光栅角位移传感器工作原理

Fig. 1 Principle of angular displacement sensor based on flexible varied line-space grating

角位移传感器柱面变栅距光栅的栅距  $d$  沿圆柱面弧长与转角  $\alpha$  成线性关系如式(1),白光通过 Y 型光纤中的一根光纤入射到柱面变栅距光栅后(入射角为  $\theta$ ),由自准直角衍射(衍射角为  $\theta_m = \theta$ )回来的光通过 Y 型光纤中的另一根光纤回到光谱仪中,由衍射光的中心波长  $\lambda$  与变栅距光栅栅距  $d$  的关系式(2)知:光谱仪测量得到的衍射光的中心波长  $\lambda$  值能够计算出变栅距光栅的栅距  $d$ ,再通过式(1)能够得到角位移  $\alpha$  与波长  $\lambda$  的关系式,即式(3),这样通过由光谱仪采集的衍射光的中心波长值可计算出传感器的角度位移<sup>[7]</sup>。

$$d = d_0 - GR\alpha (0 \leq \alpha \leq \alpha_N), \quad (1)$$

式中,  $d$  为柱面光栅的任意栅距,  $d_0$  为起始栅距,  $G$  为栅距随弧长变化的斜率,  $R$  为柱面变栅距光栅半径,  $\alpha$  为角位移。

光栅方程为

$$2d \sin \theta = \lambda, \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为任意位置光栅衍射光中心波长,  $\theta$  表示入射角。

由式(1)和式(2)可知角位移  $\alpha$  与衍射光中心波长  $\lambda$  呈线性关系

$$\alpha = \frac{d_0}{RG} - \frac{\lambda}{2RG \sin \theta}, \quad (3)$$

同时,由式(1)和式(2)也可得到

$$G = \frac{d_0 - d_N}{R\alpha_N} = \frac{\lambda_s - \lambda_x}{2R\alpha_N \sin \theta}, \quad (4)$$

式中,  $d_N$  为光栅最小栅距,  $\lambda_s$  为工作波长上限,  $\lambda_x$  为工作波长下限,  $\alpha_N$  为光栅最大转角,  $R_{\alpha_N}$  为柱面光栅工作弧长。

### 3 柔性变栅距光栅成型工艺的误差分析

图 1 中所示的柱面变栅距光栅是由平面柔性变栅距光栅经过弯曲成型后得到的。平面柔性变栅距光栅采用全息光刻法<sup>[8]</sup>, 在金属镍上镀铝制成栅距连续变化的薄片金属光栅<sup>[9]</sup>。其中, 白光照射下的效果如图 2(a), 其正弦槽形如图 2(b)所示。正弦槽形高度虽然仅为数百纳米, 但其面形失真度和槽形高度对输出衍射光的传播方向和强度都会产生影响。

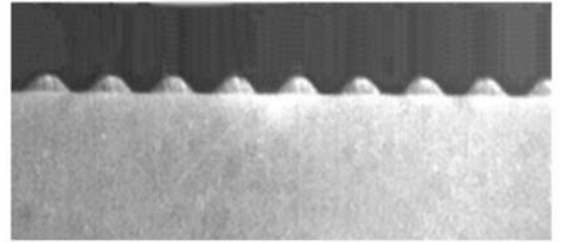
将平面柔性变栅距光栅牢固粘接于旋转杯体内圆表面的成型工艺是实现柔性变栅距光栅角位移传感器的一项关键技术。成型后的柱面光栅内圆表面的精度和质量直接影响着柔性变栅距光栅角位移传感器的精度。

柔性变栅距光栅的成型工艺误差使入射点曲率半径发生偏移, 从而产生入射角偏差  $\Delta\theta$ , 即柔性变栅距光栅角位移传感器实际入射角变为  $\theta' = \theta + \Delta\theta$ , 由此产生角位移误差  $\Delta\alpha$ 。因此, 工艺误差与传感器的精度指标有着直接的关系<sup>[10]</sup>, 尤其是柱面变栅距光栅的圆度对传感器精度的影响尤其显著。



(a) 白光照射下的变栅距光栅

(a) Varied line-space grating irradiated with white light



(b) 正弦槽形光栅的扫描电镜图像

(b) SEM image of sinusoidal gratings

图 2 柔性变栅距光栅

Fig. 2 Flexible varied line-space gratings

设理想入射方向和实际入射方向的光线均照射在光栅的同一位置, 入射角相差  $\Delta\theta$ , 由式(3)可知, 在理想入射情况下的角位移为

$$\alpha_n = \frac{d_0}{RG} - \frac{2d}{2RG}, \quad (5)$$

实际入射情况下的角位移则为

$$\alpha_n' = \frac{d_0}{RG} - \frac{2d \sin(\theta + \Delta\theta)}{2RG \sin \theta}, \quad (6)$$

由式(4)、(5)和(6), 得角位移误差  $\Delta\alpha_n$  为

$$\Delta\alpha_n = \alpha_n' - \alpha_n = \frac{\lambda_n \alpha_N}{\lambda_s - \lambda_x} (1 - \cos \Delta\theta - \cot \theta \sin \Delta\theta) \approx \frac{\lambda_n \alpha_N}{\lambda_s - \lambda_x} K_\psi, \quad (7)$$

式中,

$$K_\psi = 1 - \cos \Delta\theta - \cot \theta \sin \Delta\theta,$$

为角位移偏差系数。

$\Delta\alpha_n$  数值取决于  $K_\psi$  极值处的栅距  $d_n$  所对应的衍射光中心波长  $\lambda_n$ , 显然,  $\lambda_n = \lambda_s$  时  $\Delta\alpha_n$  获得最大值。

$$|\Delta\alpha_n|_{\max} = \left| \frac{\lambda_n \alpha_N}{\lambda_s - \lambda_x} \cdot K_\psi \right|_{\max} = \frac{\lambda_s \alpha_N}{\lambda_s - \lambda_x} \cdot |K_\psi|_{\max}.$$

角位移传感器的精度指标——线性度  $\sigma$  可按

$$\sigma = \frac{|\Delta\alpha_n|_{\max}}{\alpha_N} = \frac{\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_x} \cdot |K_\psi|_{\max} = \frac{100\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_x} \cdot K_{\psi m} \cdot \% F. R, \quad (8)$$

估算。式中,  $K_{\psi m} = |K_{\psi}|_{\max}$  为线性度计算因子,  $F.R$  为传感器最大工作角度。

$K_{\psi m}$  由柱面变栅距光栅半径  $R$ 、入射角  $\theta$  和圆度  $\epsilon$  确定。当工作波长上限  $\lambda_s$  和下限  $\lambda_x$  确定后, 只要求得圆度  $\epsilon$  产生的入射角偏差  $\Delta\theta$ , 即可得到圆度对柔性变栅距光栅角位移传感器的线性度  $\sigma$  的影响。

### 3.1 圆度的影响

光栅理想状态为圆柱面, 其圆柱正截面方程为

$$x^2 + y^2 = R^2. \quad (9)$$

圆柱正截面的半径为  $R$ , 由于工艺误差致使圆柱正截面为椭圆, 其圆度为  $\epsilon$ , 则可近似设椭圆长半轴为  $a = R + \frac{\epsilon}{4}$ ; 短半轴为  $b = R - \frac{\epsilon}{4}$ , 其方程为

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1. \quad (10)$$

椭圆曲率中心  $q$  坐标  $(\xi, \eta)$  为

$$\begin{cases} \xi = x - y' \frac{1 + y'^2}{y''} \\ \eta = y + \frac{1 + y'^2}{y''} \end{cases}. \quad (11)$$

由式(10)得

$$y = \frac{a}{b} (b^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

$$y' = -\frac{a}{b} x (b^2 - x^2)^{-\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

$$y'' = -ab (b^2 - x^2)^{-\frac{3}{2}}. \quad (14)$$

设理想圆光栅的入射点  $m$  在坐标中的理论转角为  $\alpha$ , 其法线为  $m$  点半径  $om$ , 设法线方程为

$$y = kx, \quad (15)$$

则该法线与椭圆光栅的交点  $n$  由式(12)与式(15)联立求解得

$$\begin{cases} x_{nt} = \frac{ab}{\sqrt{a^2 + k^2 b^2}} \\ y_{nt} = kx_{nt} \end{cases}, \quad (16)$$

则椭圆  $b$  点的曲率中心  $s$  坐标  $(\xi_s, \eta_s)$  为

$$\begin{cases} \xi_s = \frac{b^2 - a^2}{b^4} x_{nt}^3 \\ \eta_s = kx_{nt} - \frac{a}{b^3} x_{nt}^2 (b^2 - x_{nt}^2)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{ab} (b^2 - x_{nt}^2)^{\frac{3}{2}} \end{cases}, \quad (17)$$

由此, 得到实际法线转角(见图 3)为

$$\alpha_t = \operatorname{arccot} \frac{y_{nt} - \eta_s}{x_{nt} - \xi_s}. \quad (18)$$

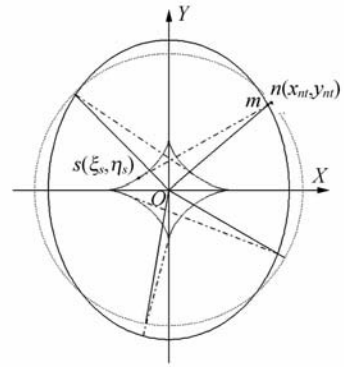


图 3 圆度产生的角度偏差示意图

Fig. 3 Schematic diagram of angular deviation from roundness error

椭圆引起的人射角偏差

$$\Delta\theta_t = \alpha_t - \alpha = \arctan \frac{y_{nt} - \eta_s}{x_{nt} - \xi_s} - \alpha. \quad (19)$$

采用数值计算方法可以得到  $\Delta\theta_t$  具有如下函数形式

$$\Delta\theta_t = -A_{ij} \sin 2\alpha + B_{ij} \sin 4\alpha + \dots, \quad (20)$$

### 3.2 线性度的估算

圆度  $\epsilon$  产生的入射角偏差  $\Delta\theta$  很小时, 通过近似可得

$$K_{\psi} = (1 - \cos \Delta\theta_t) - \cot \theta \cdot \sin \Delta\theta_t = A_{ij} \cdot \cot \theta \cdot \sin 2\alpha, \quad (21)$$

将式(21)代入式(8)得

$$K_{\psi m} = |K_{\psi}|_{\max} = A_{ij} \cdot \cot \theta$$

则得线性度为

$$\sigma = \frac{100\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_x} \cdot \cot \theta \cdot A_{ij} \% F.R, \quad (22)$$

式中  $A_{ij}$  可由图 4 所示  $A_{ij} = f_i(R, \epsilon)$  的曲线查得。

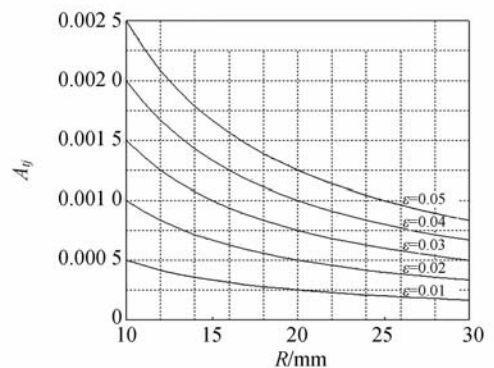


图 4  $A_{ij} = f_i(R, \epsilon)$  的关系曲线

Fig. 4 Relation of  $A_{ij} = f_i(R, \epsilon)$

### 3.3 实际验证

光传飞控系统对该柔性变栅距光栅角位移传感器提出的精度指标——线性度  $\sigma \leq 0.5\%F.R.$

传感器的结构与设计参数如下:

入射角  $\theta = 21^\circ$ ; 工作行程  $80^\circ$ , 旋转杯体半径  $R = 12 \text{ mm}$ ; 工作波长上限  $\lambda_s = 750 \text{ nm}$ ; 工作波长下限  $\lambda_x = 597 \text{ nm}$ 。

查图4, 当  $\epsilon = 0.01 \text{ mm}$  时,  $A_{ij} = 0.0004$ , 则由式(22)可算出传感器的线性度  $\sigma = 0.51\%F.R.$

从以上分析知, 圆度对柔性变栅距光栅角位移传感器的精度产生了直接的影响。根据上述推算结果, 对柔性变栅距光栅的粘接成型环节提出成型为柱面光栅后圆度不大于  $0.01 \text{ mm}$  的定量要求, 同时要求在成型过程中不允许污染、损伤光栅的工作表面。

### 4 柱面变栅距光栅精密成型工艺

为达到柔性变栅距光栅粘接成型环节中对圆度的要求, 利用有机硅橡胶材料在受压和热膨胀时的各向同性、等温、弹性变形恢复迅速等特点, 对柱面变栅距光栅的圆环面实施橡胶胀形工艺<sup>[11]</sup>。

如图5所示, 整个胀形工艺工装结构分为四个部分, 分别是: 金属芯轴、弹性凸模、柔性变栅距光栅和旋转杯体。首先把金属芯轴插入弹性凸模中间的孔内, 由于弹性凸模是用有机硅橡胶制成, 其内圆环面受到金属芯轴径向挤压后会向外扩张变形, 从而挤压两片对称放置的柔性变栅距光栅, 使其紧贴于刚性旋转杯体的内腔圆柱表面上。此时, 弹性凸模在柔性变栅距光栅的表面上施加了均匀的径向压力, 使柔性变栅距光栅表面形状和旋转杯体的内圆表面形状保持一致, 从而利用旋转杯体的内腔圆柱表面精度来保证柱面变栅距光栅内表面的圆度。

由于有机硅橡胶材料自身的超弹性, 所以该工艺不但能避免对柔性变栅距光栅表面正弦槽形的硬性损伤。而且还可补偿微小的形位偏差。成型过程中须严格控制弹性凸模的压力和温度。

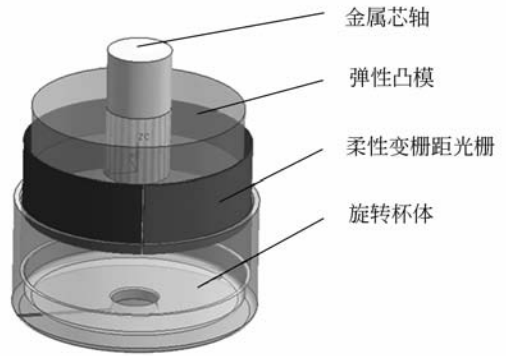


图5 柱面变栅距光栅胀形工艺结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bulging technology of cylindrical varied line-space grating

## 5 有限元分析

在柱面变栅距成型工艺中, 弹性凸模对柔性变栅距光栅所施加的胀形力为复合压力, 即金属芯轴的胀形应力与温度应力的耦合。

有机硅橡胶材料作为一种超弹性材料, 其势能  $W$  可表示为

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (\bar{I}_1 - 3) / (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k} \quad (23)$$

式中,  $W$  为应变势能,  $\bar{I}_1, \bar{I}_2$  为应变不变量,  $J$  为弹性体积比,  $d_k$  表示材料的压缩性,  $c_{ij}$  为 Rivlin 系数。

### 5.1 有限元模型

采用 Ansys Workbench 12.0 有限元分析软件对该工艺样件进行热固耦合仿真, 有限元模型网格如图6所示。

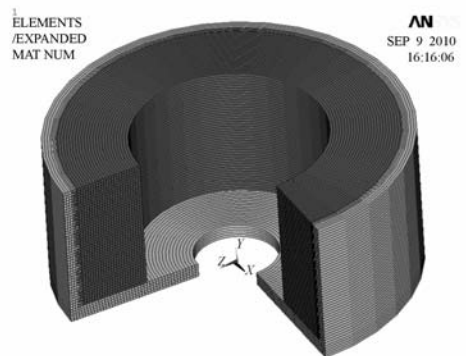


图6 柱面变栅距光栅成型结构有限元模型

Fig. 6 Finite element model for bulging mechanism of cylindrical varied line-space grating

分析的材料设定:有机硅橡胶的邵尔 A 型硬度为 53°A,抗拉强度为 4.81 MPa,泊松比接近于 0.5。

### 5.2 约束与载荷

模拟弹性凸模胀形时的工作状态,环境温度 为 60 °C,求解出达到热稳定状态时的应力和变形,并将此结果作为热固耦合仿真的输入约束,假设金属芯轴插入后弹性凸模的变形量为 0.3 mm,通过仿真分析可以得到热固耦合条件下光栅表面的应力选用 Neo-Hookean 本构模型,其中

$$N=1, C_{01}=0, C_{10}=\frac{\mu}{2}, \text{ 则}$$

$$W = \frac{\mu}{2}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2, \quad (24)$$

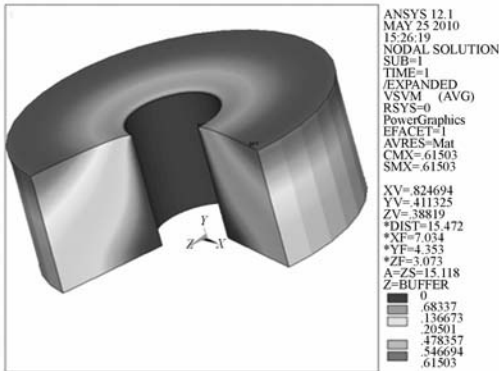
式中,  $\mu$  为初始剪切模量,取值为 0.027 1 MPa;  $d$  为体积压缩参数,取值为 1.443 Pa<sup>-1</sup>。

### 5.3 结果与分析

图 7(a)为弹性凸模热固耦合后的全变形云图,图 7(b)所示为弹性凸模施加在光栅上的接触压力云图。

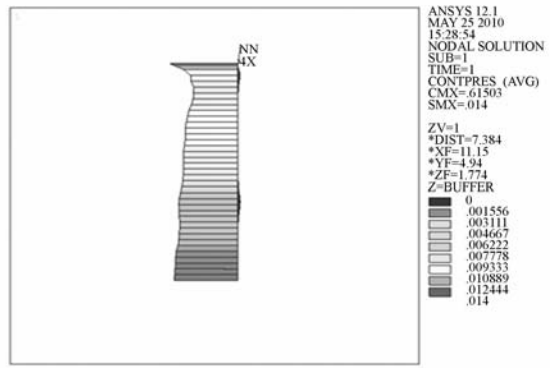
从分析结果可以看出,在受到金属芯轴的挤压后,弹性凸模在整个高度方向的变形量差别不大。由于在工程应用中只使用光栅全高度中央三分之一的区域,仿真结果表明,这段区域变形波动极小。因此,通过弹性凸模挤压成型的光栅内圆柱表面的圆跳动满足工程应用要求。

通过图 7(b)可以看出,施加于光栅全高度中央三分之一区域的径向压力是均匀、等强度的,所以不会造成光栅的局部物理缺陷。这从制造工艺上保证了柔性变栅距光栅角位移传感器的成功率和精度。



(a)弹性凸模热固耦合后的全变形云图

(a) Deformation of elastic punch after thermosetting coupling



(b)弹性凸模施加在光栅上的接触压力云图

(b) Contact pressure distribution on grating from elastic punch

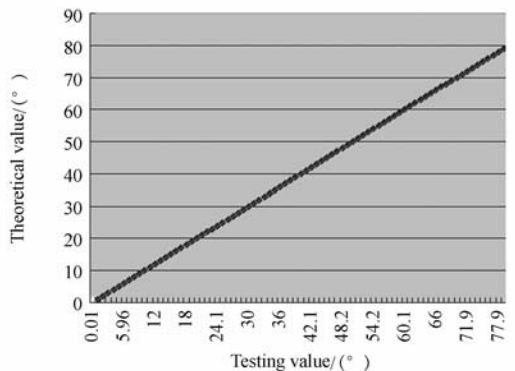
图 7 弹性凸模的应力和应变

Fig. 7 Stress and strain distribution in the elastic punch

由于有限元仿真在分析过程中对原工装夹具的几何模型进行了简化,在材料定义、边界条件约束、网格划分等方面和实际工程应用情况存在差异,由此造成的分析误差需在后续工艺试验中进一步检验和修正。

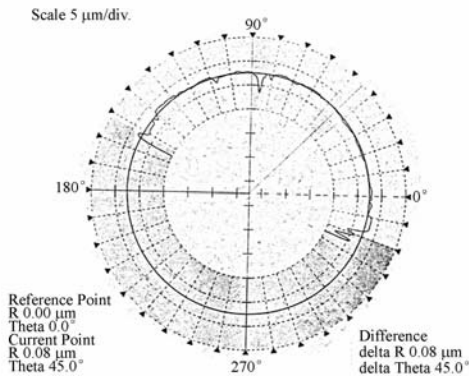
## 6 光栅角位移传感器原理样机

使用柱面变栅距光栅精密成型工艺制作成功了国内首台原理样机。该样机线性度达到 0.27% F.R, 并且柱面变栅距光栅内表面圆度达到 0.004 3 mm, 见图 8, 满足了航空机载传感器的精度指标要求。



(a)理论与实测角度关系曲线

(a) Inferred vs. actual angle curve



(b)柱面变栅距光栅内表面圆度

(b) Roundness of inner surface based on cylindrical varied line-space grating

图 8 双余度柔性变栅距光栅角位移传感器测试结果  
Fig.8 Measurement results of double redundant angular displacement sensor based on varied line-space grating

研制成功的双余度柔性变栅距光栅角位移传感器在某些性能指标上超过了国外同类产品水平<sup>[7]</sup>,其与美国 Simmonds 精密飞机系统公司研制的同类产品性能对比见表 1。

表 1 与国外同类产品性能对比

Tab.1 Performance comparison with similar foreign products

性能指标	制造厂家	
	美国 Simmonds 公司	西安飞行自动控制研究所
余度数	1	2
工作行程	0~210°	0~80°
最大偏差	2°	0.25°
线性度	0.95% F. R	0.27% F. R

## 7 结 论

本文根据新一代光传飞行控制系统的需求,研制出了双余度柔性变栅距光栅角位移传感器,以采集和反馈飞机舵面的位置信息。在研制双余度柔性变栅距光栅角位移传感器的进程中,掌握和解决了多项关键技术,尤其是柱面变栅距光栅精密成型工艺的研究。

通过工程实践证明,本文提出的柱面变栅距光栅精密成型工艺是一种简单有效的工艺方法。

## 参考文献:

[1] 随予行. 光传操纵系统综述[J]. 光电子技术与信息, 2002,15(6):35-38.  
SUI Y H. An Overview on Fly-by-light(FBL) [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, 15(6):35-38. (in Chinese)

[2] 李昆, 王少萍. 光传操纵系统的发展趋势[J]. 北京航空航天大学学报, 2003,29(12):1068-1072.  
LI K, WANG SH P. Development of fly-by-light control system[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(12): 1068-1072. (in Chinese)

[3] 李爱军, 闫建国, 王新民. 光传飞控系统实现的关键技术[J]. 飞行力学, 2004,22(1):6-9.  
LI A J, YAN J G, WANG X M. Key techniques for implementing fly-by-light control systems [J]. *Flight Dynamics*, 2004,22(1):6-9. (in Chinese)

[4] RAUMBICK R. NASA's fly-by-light program[C]. *In: Proceeding of lasers and Electro-Optics Socie-*

*ty Annual Meeting*, 1992:282-283.

[5] TODD J R. Fly-by-light flight control development for transport aircraft [C]. *In: Proceeding of the 15th Digital Avionics Systems conference, AIAA/IEEE*, 1996:153-158.

[6] SPILLMAN W B, Jr., LACLAIR R D, et al.. wavelength encoding long stroke fiber optic linear position sensor for actuator control applications[C]. *Fly-by-Light Technology Transfer*, 1995, 2467: 187-194.

[7] SPILLMAN W B, Jr., RUDD R D, et al.. Wavelength encoded fiber optic angular displacement sensor[J]. *Fiber Optic and Laser Sensors VIII*, 1990, 1367:197-203.

[8] 李燕青, 郝德阜. 衍射光栅制造技术的发展[J]. 长春理工大学学报, 2003, 26(1):66-68.  
LI Y Q, HAO D F. Development of diffraction grating manufacture[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2003,26(1): 66-68. (in Chinese)

- [9] 叶超, 谢永军. 采用弹性基底制作变间距光栅[J]. 微细加工技术, 2006, 2: 21-24.  
YE CH, XIE Y J. Fabrication of varied-line-spacing grating by elastic medium [J]. *Microfabrication Technology*, 2006, 2:21-24. (in Chinese)
- [10] 李秉实, 吴忠. 波长编码光纤线位移传感器的位移误差及补偿[J]. 信号与系统, 2004, 11:32-35.  
LI B SH, WU ZH. Position error and compensator for wavelength encoding fiber optic sensor[J].

*Signal Process & System*, 2004, 11: 32-35. (in Chinese)

- [11] 龚科家, 危银涛. 填充橡胶超弹性本构参数试验与应用[J]. 工程力学, 2009, 26(6):193-198.  
GONG K J, WEI Y T. Constitutive parametric experiment of tire rubber hyperelastic laws with application [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26 (6):193-198. (in Chinese)

#### 作者简介:



**包 艳**(1972—),女,江苏江阴人,高级工程师,1996年于西北工业大学获得学士学位,主要从事航空微特电机及光位移传感器技术的研究。E-mail: by2298@sina.com



**王东辉**(1969—),男,山东烟台人,研究员,主要从事航空微特电机及光位移传感器技术的研究。E-mail: cem@facri.com



**杨德兴**(1966—),男,四川绵竹人,博士,教授,西北工业大学理学院陕西省光信息技术重点实验室副主任,主要从事光电子技术及应用的研究。E-mail: dxyang@nwpu.edu.cn



**郑普超**(1982—),男,陕西礼泉人,工程师,主要从事航空光位移传感器技术的研究。E-mail: fox0911@126.com



**李秉实**(1942—),男,天津人,研究员,主要从事航空微特电机及光位移传感器技术的研究。E-mail: lbs0135@126.com