

基于陀螺转子的非接触式光电测角方法

王先华 贾 森 高立民 肖茂森 吴易明

中国科学院西安光学精密机械研究所光学定向与测量技术研究室, 陕西 西安 710119

摘要 提出了一种利用表面刻有周期性规则图案的陀螺转子进行非接触式角度测量的方法, 这种方法利用光电传感器读取陀螺转子表面的图案信息, 从而实时测量陀螺转子的偏转角。介绍了这种测角方法的原理和测角装置的结构, 并建立三维几何模型, 详细推导了测角方法的角度解算算法, 得到了陀螺转子在无偏转、一维偏转及二维偏转三种情况下的偏转角与光电传感器测得的陀螺转子表面图案信息之间的关系曲线或曲面。计算结果表明, 两个正交方向的光电传感器共同探测, 即可得到陀螺转子的偏转角及偏转方向, 其结果唯一, 且测角范围大于 30° 。该测角方法可用于静态测量和高速动态测量。

关键词 测量; 非接触式测量; 光电传感器; 陀螺转子

中图分类号 O713+.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1004001

Non-Contact Photoelectric Angle Measurement Based on Gyrorotor

Wang Xianhua Jia Sen Gao Limin Xiao Maosen Wu Yiming

Laboratory of Optical Directional and Measurement Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract A non-contact angle measurement method based on gyrorotor with periodical pattern surface is proposed. By using photoelectric sensors to detect the information from periodical pattern surface of gyrorotor, we can measure the deflection angle of gyrorotor in real time. The angle measurement principle and its device are introduced. By constructing three-dimensional geometrical models, the angle decoding algorithm of the angle measurement method is derived in detail, and the curves or the surfaces of the relationships between the gyrorotor's pattern surface information detected by photoelectric sensors and the angle deflections (calculated under the conditions that the gyrorotor is without deflection, with one-dimensional deflection and with two-dimensional deflection respectively) are obtained. The results show that the deflection angle and the deflection direction of gyrorotor can be measured by two photoelectric sensors in orthogonal directions, and the measurement values are unique and the measurement range of deflection angle is larger than 30° . This method can be used to measure angle deflection both in static and high-speed dynamic measurements.

Key words measurement; non-contact measurement; photoelectric sensor; gyrorotor

OCIS codes 120.3940; 120.3930; 000.2170

1 引 言

角度测量是计量科学中发展较为完备的一个分支, 主要的测角技术包括机械式、电磁式和光学式测角三大类^[1-3]。机械式和电磁式测角技术大多为手工测量, 不易实现自动化, 其应用范围受到了限制。光学测角技术以其较高的测量精度受到人们的重视, 其应用也越来越广泛。目前, 光学测角常用的方法有光学分度头法、多面棱镜法、光电编码器法、自准直法、叠栅条形码法、平行干涉图法、圆光栅法、光学内反射法、激光干涉法、环形激光法等^[4-9]。这些方法大部分已成功应用于角度的精密测量中, 但是, 光学仪器的操作复杂, 很难

收稿日期: 2016-05-09; **收到修改稿日期:** 2016-06-13

基金项目: 西部之光项目(Y429681213)、国家自然科学基金青年基金(11404387)

作者简介: 王先华(1981—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光电精密测量技术方面的研究。E-mail: xhwang@opt.ac.cn

实现动态、自动化测量。因此,迫切需要发展新的测角技术和研制新的测角仪器。

传统的测角方法通过测量陀螺转子在转动过程中切割其外围缠绕的定子线圈时产生的感应电动势间接得到相对角位移。这种方法在小角度范围(小于 15°)内具有较好的线性度和测量精度,但角位移与感应电动势呈正弦函数关系,且有害磁场、力矩、涡流效应等因素会产生非线性误差,使得该方法难以满足大角度测量范围的需求^[10]。在静电陀螺的信息读取技术中,采用在陀螺转子表面绘制周期性的规则图案,并通过光电传感器读取图案信息的方法,得到陀螺转子的姿态信息^[11-12]。基于此,结合陀螺转子的结构特点和偏转角测量特点,本文提出了一种角度测量方法,即利用光电传感器读取陀螺转子表面图案信息的非接触式测量方法,从而实时测量陀螺转子转轴的偏转角。通过建立三维几何模型,详细推导了这种测角方法的角度测量算法,建立陀螺转子的偏转角与光电传感器测得的陀螺转子表面图案信息之间的关系,并在偏转角大于 30° 的范围内验证该测角方法的可行性。

2 测角原理

测量陀螺转子偏转角的装置结构示意图如图 1 所示。陀螺转子为一个球台,处于初始位置(即自转轴位于竖直位置),在其表面涂覆有黑、白相间的条纹图案,将一个黑色条纹和与其相邻的一个白色条纹作为一组条纹。在距转子表面一定距离且与陀螺转子初始位置自转轴垂直的同心圆上,每隔 90° 放置一个能够发射光并且能够接收黑、白条纹反射光的光电传感器,共放置 4 个光电传感器。

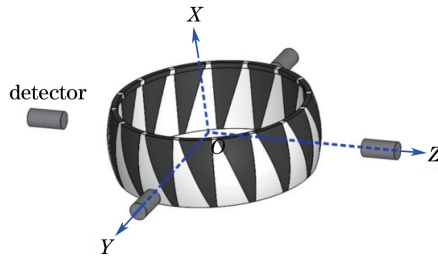


图 1 陀螺转子偏转角的测量装置示意图

Fig. 1 Diagram of measurement device of gyrorotor deflection angle

当陀螺转子以一定的角速度绕其自转轴旋转时,光电传感器可以接收到黑、白条纹反射的光。由于黑、白条纹对信号光的反射率存在差异,可以将光电传感器接收到白条纹反射光的时间与接收到该组黑白条纹反射光的时间之比定义为占空比 k 。若陀螺转子转速恒定,则占空比 k 可以转化为光电传感器所在的平面与陀螺转子表面相交的交线在白条纹部分的弧长与在该组黑白条纹部分的弧长之比。若陀螺转子的自转轴没有发生偏转(即位于初始位置),4 个光电传感器所测得的占空比是相同的;若陀螺转子的自转轴以球心为定点发生偏转,则 4 个固定不动的光电传感器所测得的占空比会发生变化。根据光电传感器测得的占空比值即可得到陀螺转子的偏转角度。

3 三维几何模型的建立

以陀螺转子的球心为坐标原点,陀螺转子的自转旋转轴为 X 轴,建立右手坐标系。旋转方向定义:右手握住旋转轴,竖起拇指指向旋转轴正方向,正向旋转方向为其余手指卷曲的方向。从旋转轴正方向看下去,逆时针方向为正向旋转方向。

假设在陀螺转子表面涂覆的黑、白条纹的数目均为 n ,则赤道圆上每个黑条纹或白条纹所对应的角度均为 $\alpha = \pi/n$,陀螺转子上下表面对应的球心角为 ϕ_m ,如图 2 所示(为便于表示,以红色标识白条纹)。

弧 \widehat{DBI} 所在的大圆可以看作由过 B 点的经线圆(即弧 \widehat{ABC} 所在的大圆)以 OB 为轴(即 Y 轴)逆时针旋转 β 角得到,弧 \widehat{DEF} 所在的大圆可以看作由过 B 点的经线圆绕 X 轴顺时针旋转 α 角得到。根据三维空间坐标旋转的变换矩阵和弧 \widehat{ABC} 所在大圆的方程,得到弧 \widehat{DBI} 和弧 \widehat{DEF} 所在大圆的方程。由几何关系可知,若 α 和 ϕ_m 均为定值,则 β 也为定值,其关系式为 $\tan \beta = \sin \alpha / \tan \phi_m$ 。

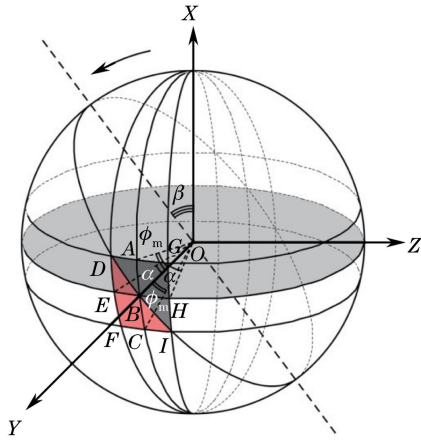


图 2 陀螺转子的三维几何模型

Fig. 2 Three-dimensional geometrical model of gyrorotor

4 不同偏转情况下占空比的计算

由于 X 轴为陀螺转子的自转轴,陀螺转子在三维空间的偏转可以分解为两个正交方向的旋转,即绕 Y 轴的旋转和绕 Z 轴的旋转。因此,根据旋转的维度,可以将陀螺转子的姿态分为无偏转、绕一个轴偏转(即一维偏转)和绕两个轴偏转(即二维偏转)三种情况。以下分别计算这三种情况下传感器探测到的占空比。计算占空比的步骤:依据三维空间坐标旋转的变换矩阵和某一基准经线圆的方程得到一组黑白条纹中三条边界线的方程;在三条边界线上各取一点,令其处于同一纬度圆上(即令三个点的 x 坐标相等),然后通过弧长公式和余弦定理得到该纬度圆上白条纹及黑条纹的弧长,则白条纹的弧长与黑、白条纹总弧长之比即为占空比。

4.1 无偏转时传感器测得的占空比

在弧 \widehat{DBI} 和弧 \widehat{DEF} 上各取一点,分别为点 $L(x_L, y_L, z_L)$ 和点 $M(x_M, y_M, z_M)$,则点 L 和点 M 的坐标分别满足弧 \widehat{DBI} 和弧 \widehat{DEF} 所在大圆的方程。令点 L 与点 M 处于同一纬度圆上,即 $x_L = x_M = x$,则弧 \widehat{LM} 的长度可以通过弧长公式及余弦定理计算得到。

若点 L 位于点 D ,则点 M 也位于点 D ,对应 $x = R \sin \phi_m$ (R 为经线圆的半径),则弧 \widehat{LM} 的长度为 0;若点 L 位于点 B ,则点 M 位于点 E ,对应 $x = 0$,则弧 \widehat{LM} 的长度为 $R\alpha$;若点 L 位于点 I ,则点 M 位于点 F ,对应 $x = -R \sin \phi_m$,则弧 \widehat{LM} 的长度为 $R \arccos(1 - 2 \sin^2 \alpha \cos^2 \phi_m)$ 。弧 \widehat{LM} 的长度即为传感器探测到白条纹的宽度。

在弧 \widehat{GHI} 上取一点 N ,其坐标 (x_N, y_N, z_N) 满足弧 \widehat{GHI} 所在大圆的方程,弧 \widehat{MN} 的长度即为传感器探测到的一组黑白条纹的总宽度。占空比 k 定义为弧 \widehat{LM} 的长度与弧 \widehat{MN} 的长度之比。若取 $R = 1, \alpha = \pi/16, \beta = \pi/9$,则不同纬度上的占空比 k 随 x 的变化曲线如图 3 所示。

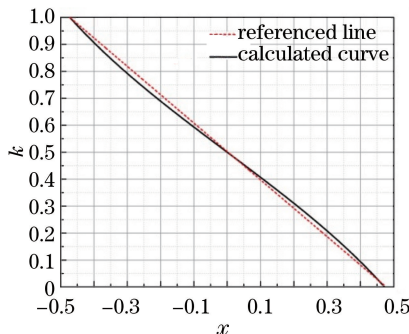


图 3 陀螺转子未发生偏转时占空比 k 随 x 的变化曲线

Fig. 3 Curve of duty ratio k with the change of x when the gyrorotor is without angle deflection

x 的取值范围为 $(-R \sin \phi_m, R \sin \phi_m)$, k 的取值范围为 $(0, 1)$, 由图可知 k 随 x 的变化是非线性的 (图中的红色虚线为一直线)。若 4 个光电传感器分别位于 Y 轴正半轴、 Y 轴负半轴、 Z 轴正半轴和 Z 轴负半轴上, 其测得的占空比均为 0.5, 对应陀螺转子的偏转角 $\Phi = 0^\circ$ 。

4.2 陀螺转子一维偏转时传感器测得的占空比

当陀螺转子的转轴发生一维偏转后, 设陀螺转子绕 Y 轴逆时针旋转 γ 角度, 则原坐标系中沿 X 轴的单位向量 $(1, 0, 0)$ 变为 $(\cos \gamma, 0, -\sin \gamma)$, 这两个向量之间的夹角 $\Phi = \gamma$, 该角度即为最终所要测量的偏转角。陀螺转子在一维偏转情况下的坐标关系如图 4(a) 所示, 原坐标系 $OXYZ$ 经旋转后变为 $OX'Y'Z'$, 旋转后的黑白条纹与原赤道圆的位置关系可以等效为陀螺转子不发生偏转而原赤道圆绕 Y 轴顺时针旋转 γ 角, 如图 4(b) 所示。为方便计算, 4 个传感器均假定位于坐标轴上, 即位于 $x=0$ 平面上。

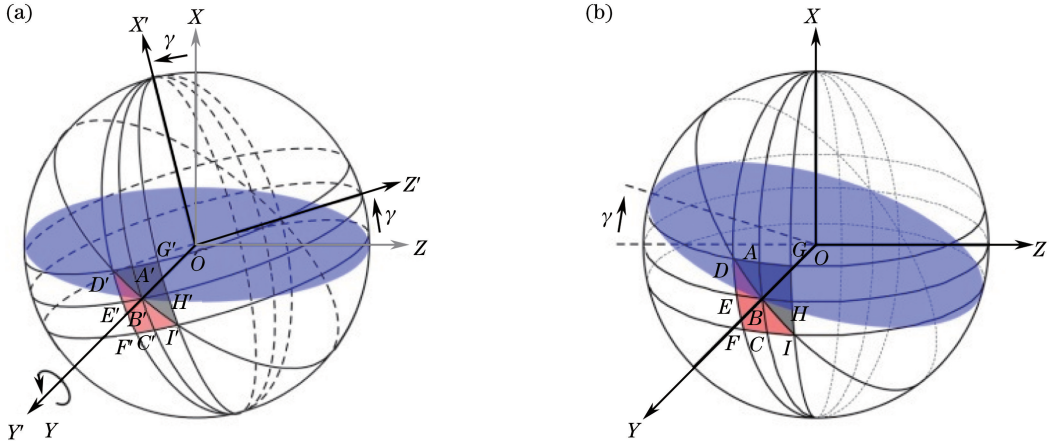


图 4 陀螺转子在一维偏转情况下的坐标关系

Fig. 4 Coordinate relationship when the gyrorotor deflects in one dimension

4.2.1 位于 Y 轴正半轴的传感器测得的占空比

原赤道圆的方程为 $y^2 + z^2 = R^2$, 利用三维空间坐标旋转的变换矩阵可得到赤道圆偏转后的方程, 与弧 \widehat{DEF} 、 \widehat{DBI} 和 \widehat{GHI} 所在大圆的方程分别联立求解, 可得到赤道圆偏转后与弧 \widehat{DEF} 、 \widehat{DBI} 和 \widehat{GHI} 的交点 L_1 、 M_1 、 N_1 的坐标。占空比 k_1 为弧 $\widehat{L_1M_1}$ 的长度与弧 $\widehat{M_1N_1}$ 的长度之比, 计算得到 $k_1 = 0.5$, 即位于 Y 轴正半轴上的光电探测器测得的占空比为 0.5, 与偏转角度无关。

4.2.2 位于 Z 轴正半轴的传感器测得的占空比

过点 $(0, 0, R)$ 经线圆的方程为 $x^2 + z^2 = R^2$, 对应的黑白条纹边界的三个圆的方程可由三维空间坐标旋转的变换矩阵得到。设陀螺转子绕 Y 轴逆时针旋转 γ 角度, 即等效为陀螺转子不发生偏转而原赤道圆绕 Y 轴顺时针旋转 γ 角, 其方程分别与上述三个边界圆的方程联立, 得到交点 M_2 、 L_2 和 N_2 的坐标, 与上节所述计算方法相同, 即可得到占空比 k_2 。若取 $R = 1, \alpha = \pi/16, \beta = \pi/9$, 占空比 k_2 随 γ 的变化曲线如图 5 所示。由计算结果可知, 占空比 k_2 随 γ 的变化近似线性 (图中红色虚线为一直线)。

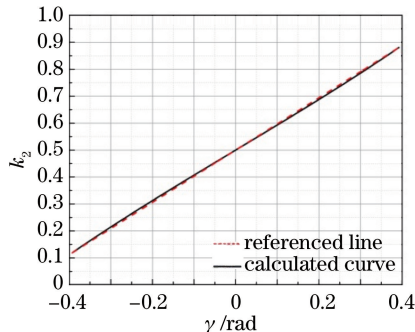


图 5 位于 Z 轴正半轴的传感器测得的占空比 k_2 随 γ 的变化曲线

Fig. 5 Curve of duty ratio k_2 with the change of γ obtained by the detector on positive Z axis

4.2.3 分析与讨论

上述计算以陀螺转子绕 Y 轴逆时针旋转为例,绕 Y 轴顺时针旋转或绕 Z 轴旋转均与之类似,不再赘述。上述计算以 4 个光电传感器均位于坐标轴上(即位于 $x=0$ 平面上)为例,实际中未必满足这一条件,但只须将 $x=0$ 替换为 $x=b$ 作为光电传感器到赤道面的距离即可,计算结果亦不再赘述。

由以上计算结果可知,在陀螺转子一维偏转情况下,只有一个方向上的光电传感器无法确定陀螺转子的实际偏转角度(对应于 4.2.1 节中 $k_1=0.5$ 的情况),因此必须采用两个正交方向的光电传感器共同探测,才能确定陀螺转子的偏转角度。当 k_1 始终为 0.5 时, k_2 随 γ 不断变化,即可确定陀螺转子只绕 Y 轴发生了旋转,旋转角度 γ 可由 k_2 计算得出。

4.3 陀螺转子二维偏转时传感器测得的占空比

当陀螺转子发生二维偏转时,设原坐标系先绕 Y 轴逆时针旋转 γ 角,再绕 Z 轴逆时针旋转 δ 角,得到新坐标系,则原坐标系中沿 X 轴的单位向量 $(1, 0, 0)$ 变成了 $(\cos \gamma \cos \delta, \cos \gamma \sin \delta, -\sin \gamma)$, 这两个向量之间的夹角 $\Phi = \arccos(\cos \gamma \cos \delta)$ 即为所要测量的偏转角。陀螺转子在二维偏转情况下的坐标关系如图 6(a) 所示,原坐标系 OXYZ 经旋转后变为 OX''Y''Z'', 旋转后的黑白条纹与原赤道圆的位置关系可以等效为陀螺转子不发生偏转而原赤道圆先绕 Y 轴顺时针旋转 γ 角后再绕 Z 轴顺时针旋转 δ 角,如图 6(b) 所示。同样地,为方便计算,4 个传感器均假定位于坐标轴上,即位于 $x=0$ 平面上。

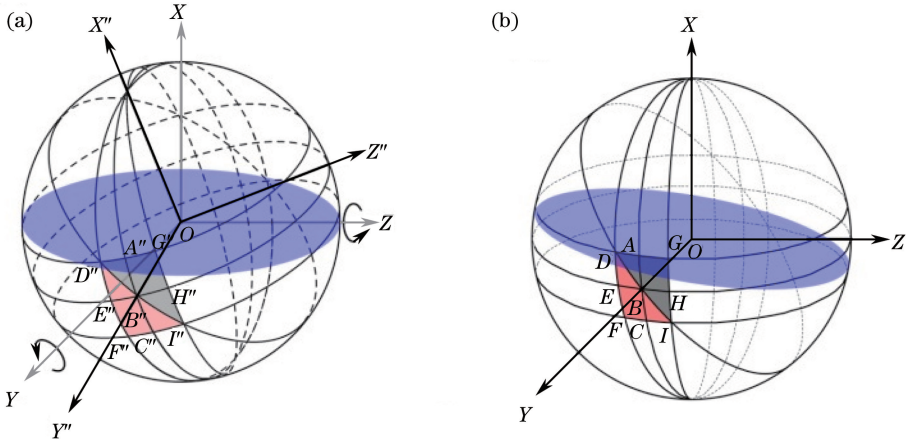


图 6 陀螺转子在二维偏转情况下的坐标关系

Fig. 6 Coordinate relationship when the gyrorotor deflects in two dimensions

4.3.1 位于 Y 轴正半轴的传感器测得的占空比

与一维偏转分析类似,原赤道圆的方程为 $y^2 + z^2 = R^2$, 赤道圆先绕 Y 轴逆时针旋转 γ 角,再绕 Z 轴逆时针旋转 δ 角,利用三维空间坐标旋转的变换矩阵可得到赤道圆偏转后的方程,此方程与弧 \overline{DEF} 、 \overline{DBI} 和 \overline{GHI} 所在的大圆的方程分别联立求解,可得到赤道圆偏转后与弧 \overline{DEF} 、 \overline{DBI} 和 \overline{GHI} 的交点 L_3 、 M_3 、 N_3 的坐

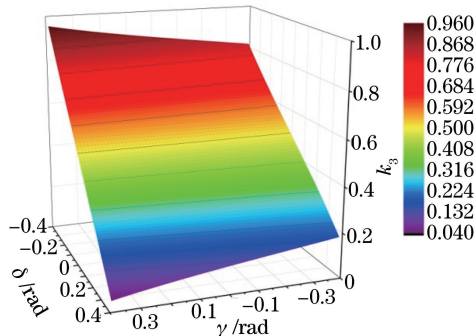


图 7 位于 Y 轴正半轴的传感器测得的占空比 k_3 随 γ 和 δ 的变化曲面

Fig. 7 Curved surface of duty ratio k_3 with the change of γ and δ obtained by the detector on positive Y axis

标。占空比 k_3 为弧 $\widehat{L_3M_3}$ 的长度与弧 $\widehat{M_3N_3}$ 的长度之比。同样取 $R=1, \alpha=\pi/16, \beta=\pi/9$, 占空比 k_3 随 γ 和 δ 的变化曲面如图 7 所示。

4.3.2 位于 Z 轴正半轴的传感器测得的占空比

与前述分析类似, 位于 Z 轴正半轴的传感器测得的占空比 k_4 随 γ 和 δ 的变化曲面如图 8 所示。

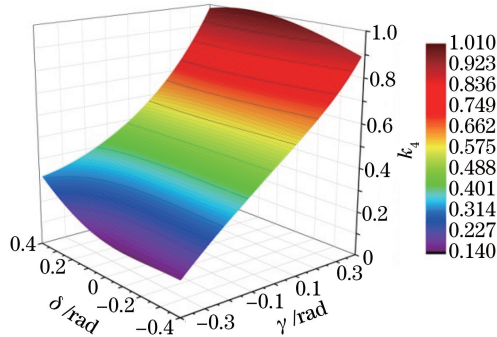


图 8 位于 Z 轴正半轴的传感器测得的占空比 k_4 随 γ 和 δ 的变化曲面

Fig. 8 Curved surface of duty ratio k_4 with the change of γ and δ obtained by the detector on positive Z axis

4.3.3 利用 k_3 和 k_4 解算 γ 和 δ

对 γ 和 δ 在 $(-\pi/9, \pi/9)$ 区间内每隔 0.005 rad 取一个值, 每对 γ 和 δ 计算得到一组 $k_3, k_4, \Phi = \arccos(\cos \gamma \cos \delta)$ 的值。以 k_3 和 k_4 为自变量, γ, δ 和 Φ 为因变量作图, 结果如图 9~11 所示。

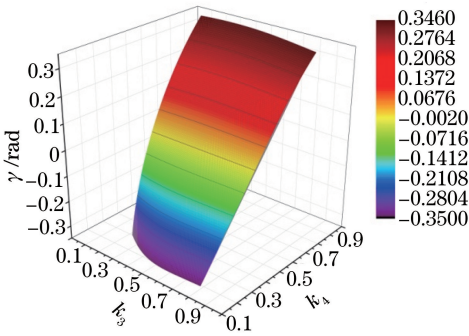


图 9 偏转角 γ 与占空比 k_3 和 k_4 的关系曲面

Fig. 9 Relationship among deflection angle γ , k_3 and k_4

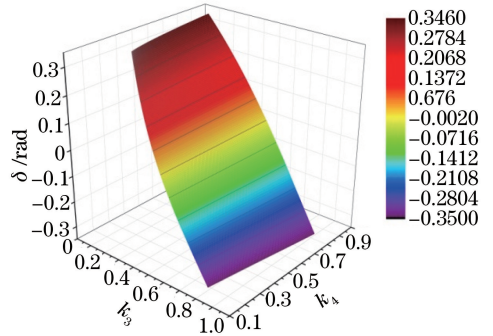


图 10 偏转角 δ 与占空比 k_3 和 k_4 的关系曲面

Fig. 10 Relationship among deflection angle δ , k_3 and k_4

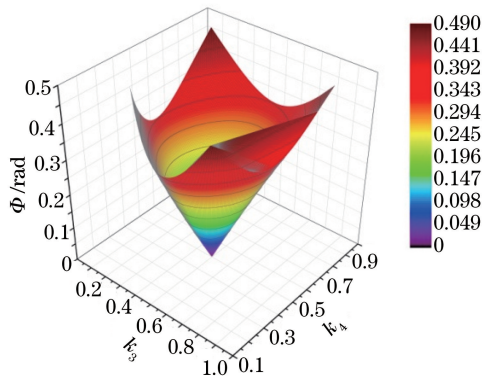


图 11 偏转角 Φ 与占空比 k_3 和 k_4 的关系曲面

Fig. 11 Relationship among deflection angle Φ , k_3 and k_4

4.3.4 分析与讨论

由图 9~11 的结果可知, 一对 k_3 和 k_4 的值对应一组 γ, δ 和 Φ 的值, 即 γ, δ 和 Φ 是 k_3 和 k_4 的单值函数, 因此利用测得的一对 k_3 和 k_4 值即可获得对应的 γ, δ 和 Φ 值, 从而可以确定偏转角 Φ 的大小及方向。

由图 11 可以得到, 偏转角 Φ 的最大值接近 0.5 rad (约 30°), 还可以继续增大, 但考虑到陀螺转子具有自

转轴且厚度受限等因素,其测角范围远小于 90° 。实际测量过程中,利用合适的函数(如多项式函数等)对其进行拟合,即可得到 γ 、 δ 、 Φ 与 k_3 、 k_4 的关系式。前述4.1节中的讨论对应 $\gamma=\delta=0$ 的情况,4.2节中的讨论对应 $\gamma\neq 0$ 且 $\delta=0$ 的情况。

5 结 论

提出了一种基于表面刻有周期性规则图案的陀螺转子的非接触式光电角度测量方法。通过建立三维几何模型,对这种测角方法的原理和角度解算算法进行了详细的数学推导,得到陀螺转子在无偏转、一维偏转及二维偏转情况下偏转角与光电传感器测得陀螺转子表面图案信息(即占空比 k)之间的关系曲线/曲面。结果显示,采用两个正交方向的光电传感器共同探测即可确定陀螺转子的偏转角度和方向。实际测量过程中,传感器的安装位置及陀螺转子表面刻画条纹的具体参数可能发生变化,但只须进行局部调整后继续沿用前述计算方法即可得到陀螺转子的偏转角与传感器测得的占空比之间的具体关系式。与电磁线圈法相比,这种测角方法不受磁场、涡流等因素的影响,且具有较大的测角范围(大于 30°)。该测角方法既可用于传统的静态测量,也可用于高速动态非接触式测量。

参 考 文 献

- Zhang Zhuo, Li Pengsheng, Qiang Xifu, *et al.* The developing situation of angle measurement technique in home and abroad[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 1994, 13(4): 4-11.
张 琢, 李鹏生, 强锡富, 等. 测角技术国内外发展概况[J]. *宇航计测技术*, 1994, 13(4): 4-11.
- Tao Wei, Pu Zhaobang, Sun Yunbin. The development of angle measurement technique[J]. *Laser Journal*, 2002, 23(2): 5-7.
陶 卫, 浦昭邦, 孙运斌. 角度测量技术的发展[J]. *激光杂志*, 2002, 23(2): 5-7.
- Li Jinyang, Wu Jiantong, Han Huiqun. Small angle measurement with optical methods and its application[J]. *Applied Science & Technology*, 2006, 33(7): 15-18.
李金阳, 吴简彤, 韩慧群. 小角度测量的光学方法及应用[J]. *应用科技*, 2006, 33(7): 15-18.
- Prakash S, Singh S, Rana S. Automated small tilt-angle measurement using Lau interferometry[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(28): 5905-5909.
- Sun J H, Zhang J, Liu Z, *et al.* High-dynamic angle measurement based on laser displacement sensors[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(23): 5676-5685.
- Zhang S, Tan Y D, Zhang S L. Non-contact angle measurement based on parallel multiplex laser feedback interferometry [J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(11): 114202.
- Zhu Y W, Liu S C, Kuang C F, *et al.* Roll angle measurement based on common path compensation principle[J]. *Optics and Lasers Engineering*, 2015, 67: 66-73.
- Filatov Y V, Loukianov D P, Probst R. Dynamic angle measurement by means of a ring laser[J]. *Metrologia*, 1997, 34(4): 343-351.
- Popiołek-Masajada A, Borwińska M, Fraczek W. Testing a new method for small-angle rotation measurements with the optical vortex interferometer[J]. *Measurement Science Technology*, 2006, 17: 653-658.
- Zhao Yongliang, Shen Kai, Zhao Shanbiao, *et al.* Analysis and simulation of angle measurement for coordinator gyrorotor by electro-optic sensor[J]. *Journal of Projectiles Pockets Missiles and Guidance*, 2009, 29(3): 69-71.
赵永亮, 申 恺, 赵善彪, 等. 位标器转子光电测角的解析法分析与仿真[J]. *弹箭与制导学报*, 2009, 29(3): 69-71.
- Deng Zhihong, Fu Mengyin, Zhang Jiwei, *et al.* Inertial device and inertial navigation system [M]. Beijing: Science Press, 2012.
邓志红, 付梦印, 张继伟, 等. 惯性器件与惯性导航系统[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- Gao Zhongyu. Electrostatic gyroscope technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
高钟毓. 静电陀螺仪技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.