

文章编号:1009-3087(2014)06-0139-06

两相驱动型时栅位移传感器测角系统误差建模与分析

杨继森,江中伟,冉扬洁,李宏伟

(重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心,重庆 400050)

摘要:为了进一步拓展时栅位移传感器的应用范围,在传统场式时栅位移传感器测角系统的基础上,提出一种两相驱动型时栅位移传感器测角系统。该系统以低分辨率、低成本的圆光栅和直接数字频率合成器构成一种新的“时间行波”,结合传统时栅位移传感器的处理技术,构成一个新的测角系统。对该测角系统的误差模型进行研究。实验结果表明:该测角系统的主要误差成分为光栅信号的不正交、不等幅与残余直流电平3项误差源,通过该误差模型可以有效地减小时栅位移传感器的原始误差,提高测角系统的测量精度,精度达到 $\pm 3.2''$ 。

关键词:时栅位移传感器;行波;光栅;误差模型

中图分类号:TH712

文献标志码:A

Two-phase Driven Time Grating Displacement Sensor Angle Measuring System Error Modeling and Analysis

YANG Jisen,JIANG Zhongwei,RAN Yangjie,LI Hongwei

(Eng. Research Center of Mechanical Testing Technological and Equipment of Ministry of Education, Chongqing Univ. of Technol., Chongqing 400050, China)

Abstract: In order to further expand the scope of applications of the time grating displacement sensor, a novel angle measuring system in view of a two-phase driving type time grating displacement sensor was proposed based on the traditional field type time grating displacement sensor. Position signals from grating sensor with low resolution, low-cost and time signals based on the direct digital frequency synthesizer technique were used to form one novel time traveling wave in the angle measuring system. Under the support of traditional technology from the traditional time grating displacement sensor, the time traveling wave was used to construct a new type angle measuring system. The error model of the angle measuring system was studied and the results showed that the main errors are made up of non-orthogonal grating signals, non-equal amplitude of grating signals and residual DC level. The experimental results showed that the measuring errors of time grating displacement sensor are reduced effectively, and the measuring accuracy of the angle measuring system is improved greatly and the measuring accuracy reaches $\pm 3.2''$ through the error model.

Key words: time grating displacement sensor; traveling wave; grating; error model

时栅位移传感器采用了“以时间测量空间”的新型测量原理^[1],即用外部的精密高频时钟脉冲去插补空间的相位角以此达到测量角位移的目的。彭东林、刘成康等^[2]采用同步电机带动装有磁栅传感器的蜗轮副,而磁盘录有2道略有差异的栅线,通过差频信号与原始信号比相,然后再插入时钟脉冲以达到时间测空间的目的,该方案成功验证了“以时

间测量空间”的原理,但同步电机转速难以控制、磁栅刻线误差、空气阻力和测头磁力的牵引等因素导致差频式时栅位移传感器分辨不高、稳定性差。彭东林、张兴红等^[3]通过引入“运动的场”这种特殊物质的运动属性来构成匀速运动的坐标系,结构上采用定转子绕线的方式,该方案规避了差频式时栅的同步电机转速不稳定、刻线误差等因素,提高了分辨

收稿日期:2014-05-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205434);重庆理工大学研究生创新基金资助项目(YCX2013215);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400904);重庆市科技计划项目(cstc2014jcyjA70003)

作者简介:杨继森(1977—),男,副教授,博士。研究方向:计算机辅助测量研究。E-mail: ywei@cqut.edu.cn

力和测量精度,但机加工开槽的方式增加了材料成本与生产周期,同时为了增加时栅传感器的可靠性和稳定性,还需要采用特殊的绕线方式。王先全等^[4]提出两相非等节距时栅位移传感器,在保证测量精度的前提下采用减少定子槽数的方式来减少场式时栅位移传感器对机械加工的依赖,但该方案仍要采用特殊的机械加工方式和绕线方式。郑方燕、陈锡候等^[5]提出一种齿电式时栅位移传感器,这种传感器把定子分为上、中、下3层,在3层槽齿上分别绕有对称的三相绕组,使传感器的对极数达到槽数的1/2,该方案虽然规避了场式时栅位移传感器的定、转子槽的精密加工,提升了整个结构的加工系数,同时对于3层绕组也增加了时栅位移传感器的生产周期,降低了传感器的稳定性。杨伟等^[6]提出基于变耦合系数变压器原理的时栅位移传感器,采用二相正交的驻波(拍频波)电场直接合成一个行波电场,同时采用端面齿代替原来的内外齿,可以使信号得到增强,但所得电行波信号相对较弱,载波较大,难以滤除,且很容易受到周围电磁环境干扰。

基于以上时栅传感器的不足,提出利用现成的低成本光栅传感器输出信号的正交性结合直接频率合成技术利用驻波构成时间行波的新方法,结合传统时栅位移传感器的处理技术,构建了一种成本低、工艺简单的新型时栅位移传感器测角系统,彻底规避了传统时栅位移传感器中机械加工复杂,绕线方式特殊等问题,并通过计算机误差仿真验证表明:理论推导的两相驱动型时栅位移传感器测角系统误差模型和计算机进行仿真的误差模型相吻合。

1 行波形成及测角系统

1.1 驻波到行波的理论推导

由三角函数关系可知,行波的波动方程为:

$$y = A \sin(\omega t + 2\pi \frac{x}{W}) = A \cos 2\pi \frac{x}{W} \sin \omega t +$$

$$A \sin 2\pi \frac{x}{W} \cos \omega t = y_1 + y_2 \quad (1)$$

由式(1)可知,一列振幅一定的行波可分解为2列振幅相同的驻波的叠加^[7-8]。设有2列 A 、 λ 、 ω 和振动方向均相同的驻波 ξ_1 和 ξ_2 进行叠加,则有:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 \quad (2)$$

由驻波的产生条件可知,驻波是2列振幅相同的相干波在同一直线上沿相反方向叠加的情形,则有:

$$\xi_1 = \xi_{1P} + \xi_{1N} \quad (3)$$

$$\xi_2 = \xi_{2P} + \xi_{2N} \quad (4)$$

式中, ξ_{1P} 、 ξ_{2P} 为沿正方向传播行波, ξ_{1N} 、 ξ_{2N} 为沿负方向传播行波,将式(3)、(4)代入式(2),可得:

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_1 + \xi_2 = \xi_{1P} + \xi_{1N} + \xi_{2P} + \xi_{2N} = \\ &(\xi_{1P} + \xi_{2P}) + (\xi_{1N} + \xi_{2N}) = \xi_P + \xi_N \end{aligned} \quad (5)$$

式中, ξ_{1P} 、 ξ_{2P} 叠加后的 ξ_P 仍为一列同频率沿正方向传播的行波。同样, ξ_N 为一列沿负方向传播的行波。欲使 ξ 为行波,由式(5)可知,则有 $\xi_P = 0$ 或 $\xi_N = 0$ 。设:

$$\begin{cases} \xi_1 = A \cos(kx + a_1) \cos(\omega t + \phi_1), \\ \xi_2 = A \cos(kx + a_2) \cos(\omega t + \phi_2) \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)进行分解:

$$\begin{cases} \xi_{1P} = \frac{A}{2} \cos(\omega t - kx + \phi_1 - a_1), \\ \xi_{1N} = \frac{A}{2} \cos(\omega t + kx + \phi_1 + a_1), \\ \xi_{2P} = \frac{A}{2} \cos(\omega t - kx + \phi_2 - a_2), \\ \xi_{2N} = \frac{A}{2} \cos(\omega t + kx + \phi_2 + a_2) \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5),可得:

$$\begin{aligned} \xi_P &= \xi_{1P} + \xi_{2P} = \frac{A}{2} \cos(\omega t - kx + \phi_1 - a_1) + \\ &\frac{A}{2} \cos(\omega t - kx + \phi_2 - a_2) = A_P \cos(\omega t - kx + \phi_P) \end{aligned} \quad (8)$$

式中:

$$A_P^2 = \left(\frac{A}{2}\right)^2 + \left(\frac{A}{2}\right)^2 + 2\left(\frac{A}{2}\right)^2 \cos[(\phi_2 - a_2) - (\phi_1 - a_1)] \quad (9)$$

$$\phi_P = \arctan \left[\frac{\sin(\phi_2 - a_2) + \sin(\phi_1 - a_1)}{\cos(\phi_2 - a_2) + \cos(\phi_1 - a_1)} \right] \quad (10)$$

由式(9)可知,

$$(\phi_2 - a_2) - (\phi_1 - a_1) = \pm (2m + 1)\pi,$$

其中, $m = 0, 1, 2, \dots, n$,即 $A_P = 0$, $\xi_P = 0$,则有:

$$\xi = \xi_N.$$

因此, ξ_1 和 ξ_2 叠加后就成为一列沿负方向传播的行波 ξ_N 。

同理,当

$$(\phi_2 + a_2) - (\phi_1 + a_1) = \pm (2m + 1)\pi,$$

其中, $m = 0, 1, 2, \dots, n$,此时有 $\xi_N = 0$,则 $\xi = \xi_P$ 。因此, ξ_1 和 ξ_2 叠加后就成为一列沿正方向传播的行波 ξ_P 。

1.2 光电式行波形成

2列驻波可由4列不同形式简谐波来构成,而

这4列简谐波可以用1组以空间位移 x 为自变量的相互正交的简谐波信号 u_1 、 u_2 和1组以时间 t 为自变量的相互正交的简谐波信号 u_3 、 u_4 来表达,形成时间行波原理图,如图1所示。

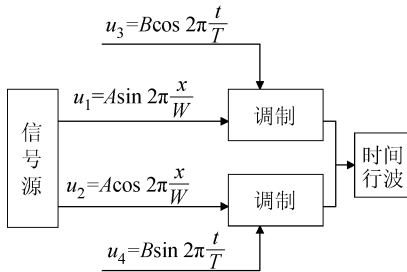


图1 行波形成原理

Fig.1 Theory of synthesizing traveling wave

图1中,以时间 t 为自变量的相互正交的简谐波信号 u_3 、 u_4 , 可以采用高精度双通道的直接数字频率合成器 (DDS) 来实现 (例如, A/D 公司的 AD9958、AD9854), DDS 每个通道输出的波形如下:

$$\begin{cases} f_0 = \frac{FTW}{2^{32}} \times f_s, \\ \phi = \frac{POW}{2^{14}} \times 360^\circ, \\ A = \frac{ACR}{2^{10}} \times V_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ACR 为幅值控制字; V_{\max} 与芯片外接电阻 R_{SET} 相关; FTW 为频率控制字, $0 \leq FTW \leq 2^{31}$; f_s 为片内时钟; POW 为相位偏移字^[9-10]。根据传统计量光栅的输出特性可知, 当其处于非调制式状态时^[11-12], 经差分放大后光栅的输出为:

$$\begin{cases} u_s = A \sin 2\pi \frac{x}{W}, \\ u_c = A \cos 2\pi \frac{x}{W} \end{cases} \quad (12)$$

式中, A 为输出信号的幅值, x 为两光栅的相对位移, W 为光栅栅距。由式(12)可以看出, 其输出恰好满足以空间位移 x 为自变量的相互正交。通过上述分析, 新型时栅位移传感器框图如图2所示。

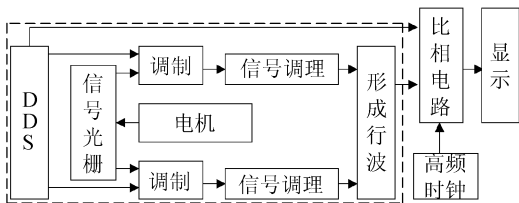


图2 新型时栅位移传感器框图

Fig.2 Block diagram of new type time grating displacement sensor

2 误差模型分析

通过上述分析, 该系统的误差主要来源于: 以时间 t 为自变量相互正交的信号和以空间位移 x 为自变量相互正交的信号。时间信号通过 DDS 合成, 频率精度高、均分性好、稳定性好。因此, 在系统的误差理论推导过程中, 可以假设时间信号是理想信号^[13]。对于信号光栅, 其原理是基于莫尔条纹原理, 光栅移动一个栅距, 输出信号变化一个周期^[14]。在理想的情况下, 其输出为标准的正弦信号, 但在实际中, 由于存在如加工、环境、操作、安装等影响因素, 则可能导致信号光栅的输出信号幅值不等、相位不正交以及存在残余直流电平, 从而引起整个时栅位移传感器系统的测量误差^[15-16]。下文将从复数向量的角度来对空间信号带来的误差进行量化。

2.1 信号光栅幅值不等引起的误差

设信号光栅输出的2路正交信号为:

$$\begin{cases} u_1 = A \sin 2\pi \frac{x}{W}, \\ u_2 = A(1 + \varepsilon_1) \cos 2\pi \frac{x}{W} \end{cases} \quad (13)$$

那么, 调制后的2路时空正交驻波为:

$$\begin{cases} u_{1z} = u_1 \times u_3 = A \sin 2\pi \frac{x}{W} \times B \cos 2\pi \frac{t}{T} = AB \sin 2\pi \frac{x}{W} \cos 2\pi \frac{t}{T}, \\ u_{2z} = u_2 \times u_4 = AB(1 + \varepsilon_1) \cos 2\pi \frac{x}{W} \sin 2\pi \frac{t}{T} \end{cases} \quad (14)$$

经过叠加形成后的时间行波为:

$$\begin{aligned} u_T &= u_{1z} + u_{2z} = AB \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{W} \right) + \\ &AB \varepsilon_1 \cos 2\pi \frac{x}{W} \sin 2\pi \frac{t}{T} \end{aligned} \quad (15)$$

信号光栅输出信号的幅值不等, 造成了最终的行波信号同理想的行波信号有一定的偏差, 由于 ε_1 的存在, 此时行波 u_T 随变量 x 变化作非线性变化, 理想的行波表达式可表示为:

$$u_T = u_{1z} + u_{2z} = AB \sin(\omega t + \theta) \quad (16)$$

则式(16)的向量表达式为:

$$\begin{aligned} U_T &= AB \sin \theta \times \cos \omega t + AB \cos \theta \times \sin \omega t = \\ &AB(\sin \omega t \times \cos \theta + \cos \omega t \times \sin \theta) = \\ &A(U \cos \theta + jU \sin \theta) = AU(\cos \theta + j \sin \theta) = AUe^{j\theta} \end{aligned} \quad (17)$$

则式(15)的向量表达式为:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_T &= A\mathbf{U}(\cos\theta + j(1 + \varepsilon_1)\sin\theta) = \\ &A\mathbf{U}(e^{j\theta} + j\varepsilon_1\sin\theta) \end{aligned} \quad (18)$$

那么,式(18)在复平面的表示如图3所示。

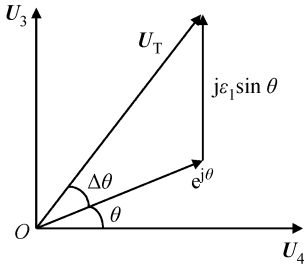


图3 空间信号不等幅误差向量图

Fig.3 Spatial signal unequal-amplitude error vector diagram

图3中, $\Delta\theta$ 为测量误差,结合式(18)略去微小量可得:

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{2}\varepsilon_1\sin 2\theta \quad (19)$$

因此,引起的误差为2次正弦谐波误差。

2.2 信号光栅相位不正交引起的误差

设光栅2路输出空间正交信号分别为:

$$\begin{cases} u_1 = A\sin 2\pi \frac{x}{W}, \\ u_2 = A\cos(2\pi \frac{x}{W} + \varepsilon_2) \end{cases} \quad (20)$$

则叠加形成后的行波为:

$$\begin{aligned} u_T &= u_{1z} + u_{2z} = AB\sin 2\pi(\frac{t}{T} + \frac{x}{W}) - \\ &AB\sin 2\pi \frac{t}{T}(\cos 2\pi \frac{x}{W} - \cos(2\pi \frac{x}{W} + \varepsilon_2)) \end{aligned} \quad (21)$$

那么,式(21)的向量表达式为:

$$\mathbf{U}_T = A\mathbf{U}(e^{j\theta} - \varepsilon_2\sin\theta) \quad (22)$$

式(22)在复平面的表示如图4所示。

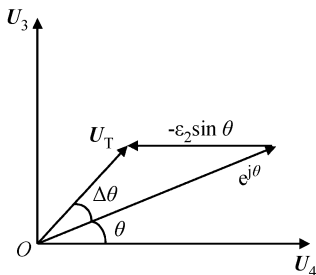


图4 空间信号相位不正交误差向量图

Fig.4 Spatial signal phase non-orthogonal error vector diagram

图4中, $\Delta\theta$ 为空间相位不正交带来的误差,结合式(22)可得:

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{2}\varepsilon_2 - \frac{1}{2}\varepsilon_2 \times \cos 2\theta \quad (23)$$

因此,引入的误差为常数误差和2次余弦谐波误差。

2.3 信号光栅输出存在直流电平引起的误差

光栅输出信号存在直流电平时,设其2路输出表示为:

$$\begin{cases} u_1 = A(\sin 2\pi \frac{x}{W} + \varepsilon_3), \\ u_2 = A(\cos 2\pi \frac{x}{W} + \varepsilon_4) \end{cases} \quad (24)$$

那么,经过叠加形成后的行波为:

$$\begin{aligned} u_T &= u_{1z} + u_{2z} = AB\sin 2\pi(\frac{t}{T} + \frac{x}{W}) + \\ &AB(\varepsilon_3\cos 2\pi \frac{t}{T} + \varepsilon_4\sin 2\pi \frac{t}{T}) \end{aligned} \quad (25)$$

则式(25)的向量表达式为:

$$\mathbf{U}_T = A\mathbf{U}(e^{j\theta} + \varepsilon_4 + j\varepsilon_3) \quad (26)$$

则式(26)的复平面表达如图5所示。

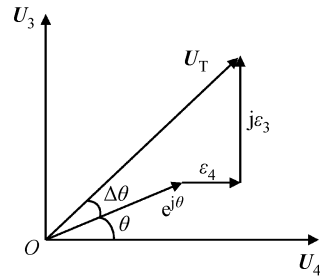


图5 空间信号残余直流电平误差向量图

Fig.5 Spatial signal DC level of residual error vector diagram

图5中, $\Delta\theta$ 为信号光栅输出的2路信号存在直流电平引起的误差:

$$\Delta\theta \approx \varepsilon_3\cos\theta - \varepsilon_4\sin\theta \quad (27)$$

由式(27)可以看出,引起的误差为1次正弦谐波误差和1次余弦谐波误差。

3 实验与仿真

3.1 计算机仿真

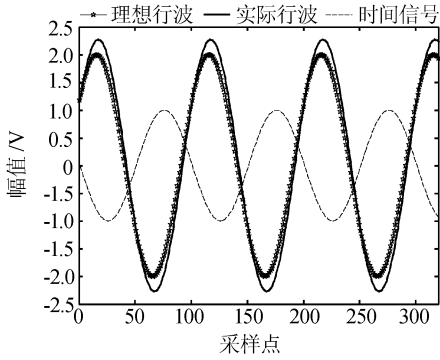
通过计算机仿真可知由信号光栅输出信号引入的各类误差仿真波形图如图6所示。

从图6可知,对于该系统的误差理论推导和计算机仿真结果相符。通过数学变化可知相对误差与系统行波的表达式为:

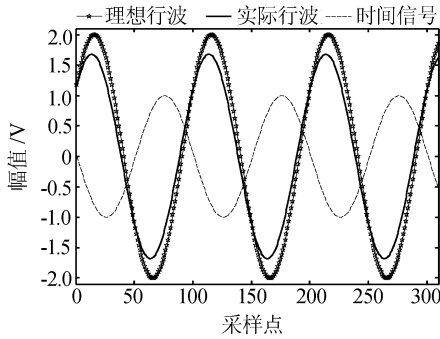
$$u_T = f(\delta, x) \times AB\sin[2\pi(\frac{t}{T} + \frac{x}{W}) + \sigma(\delta, x)] \quad (28)$$

式中, δ 为相对误差, $f(\delta, x)$ 为用相对误差和位移

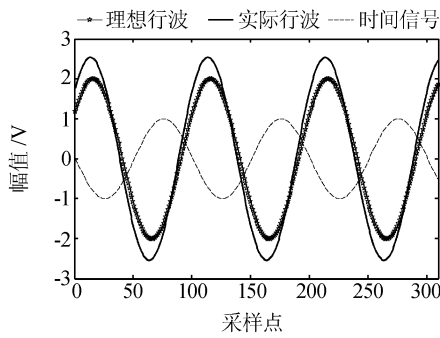
表示的幅值函数, $\sigma(\delta, x)$ 为用相对误差和位移表示的相位函数。



(a) 光栅信号不等幅误差波形仿真



(b) 光栅信号相位不正交误差波形仿真



(c) 光栅信号残余直流电平误差波形仿真

图6 光栅信号误差波形仿真图

Fig.6 Grating signal error waveform simulation diagram

3.2 实验验证

信号光栅通过弹性联轴器与基准光栅在步进电机带动下工作转台下同步转动,信号光栅产生的2路空间正交信号和 DDS 产生的2路时间信号相调制,经过调制的2路驻波信号相叠加后送入信号处理电路进行处理,处理后的数据通过串口发送到上位机。整个系统的实验平台如图7所示。

图8为步进电机转速为8 r/min的新型时栅位移传感器误差曲线,其中,图8(a)为新型时栅位移传感器原始误差曲线,其精度为 $\pm 229.3''$,同时其误差成分相当复杂,究其原因可能是信号光栅输出信号的幅值不等、相位不正交以及存在残余直流电平叠加后造成的,还存在时栅位移传感器的安装误差、

电气误差,零位误差等。因此,先通过误差分离技术(如多测头对径安装可以消除除了测头整数倍以外的高次谐波),再通过式(28)进行误差修正,可以将原始误差大幅度削减。图8(b)为原始误差经修正后的误差曲线图,其精度为 $\pm 3.2''$ 。

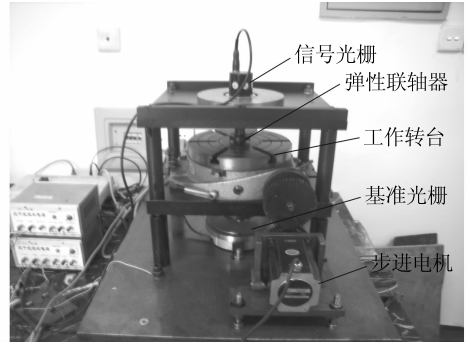
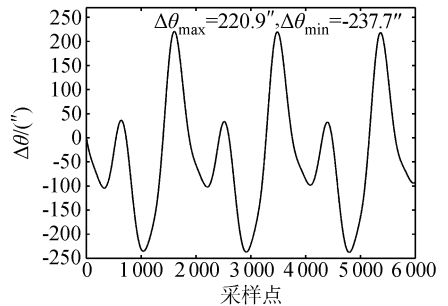
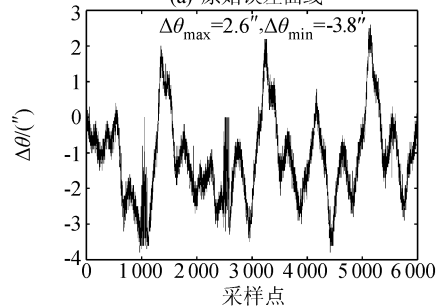


图7 新型时栅位移传感器实验平台

Fig.7 Experimental table for new type time grating displacement sensor



(a) 原始误差曲线



(b) 修正后的误差曲线

图8 新型时栅位移传感器误差曲线

Fig.8 Error curves for new time grating displacement sensor

4 结论

为了解决时栅位移传感器由于机加工开槽以及复杂绕线工艺带来的生产成本低、生产周期长等问题,提出一种成本低、工艺简单的两相驱动型时栅位移传感器的原理及新的行波合成方式,同时,对其误差模型进行了理论推导和仿真,从误差仿真波形图可以看出,模型推导的结果与仿真结果一致。为了进一步提高两相驱动型时栅位移传感器的测量精

度,可以同时考虑将以时间 t 为自变量的相互正交的信号和以空间位移 x 为自变量相互正交的信号作为误差源,利用时间变量与空间变量的对偶性,以容易实现的时间量修正或者补偿不容易修正的空间量,对传感器进行误差模型的建立,辅以计算机仿真以达到进一步完善两相驱动型时栅位移传感器误差理论的目的。

参考文献:

- [1] Peng Donglin, Zhang Xinghong, Liu Xiaokang. Comparison between the principle of the new precision displacement measurement method based on time space coordinate transformation and traditional method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(4): 423 - 426. [彭东林, 张兴红, 刘小康. 基于时空转换的精密位移测量新方法与传统方法的比较[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(4): 423 - 426.]
- [2] Peng Donglin, Liu Chengkang, Tan Weimin, et al. Study on differential frequency model time grating displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(5): 506 - 509. [彭东林, 刘成康, 谭为民, 等. 差频式时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(5): 506 - 509.]
- [3] Peng Donglin, Zhang Xinghong, Liu Xiaokang, et al. Study on the time grating displacement sensor of the field type[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(3): 321 - 323. [彭东林, 张兴红, 刘小康, 等. 场式时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(3): 321 - 323.]
- [4] Wang Xianquan, Wu Min, Peng Donglin, et al. A two-phase unequal-pitch time grating displacement sensor[J]. Journal of Southwest University: Natural Science, 2009, 31(5): 162 - 167. [王先全, 吴敏, 彭东林, 等. 两相非等间距时栅位移传感器[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(5): 162 - 167.]
- [5] Zheng Fangyan, Chen Xihou, Gao Zhonghua, et al. Research on a novel electrical gear type time grating displacement sensor [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(3): 396 - 399. [郑方燕, 陈锡侯, 高忠华, 等. 一种新型齿电式时栅位移传感器研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(3): 396 - 399.]
- [6] Yang Wei, Peng Donglin, Zhu Ge, et al. Design of time grating sensor based on variable coupling coefficient transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(11): 1403 - 1405. [杨伟, 彭东林, 朱革, 等. 基于变耦合系数变压器原理的时栅位移传感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1403 - 1405.]
- [7] 程守洙, 江之永. 普通物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 87 - 94.
- [8] Kutsaev S V, Sobenin N P, Smirnov A Y, et al. Design of hybrid electron linac with standing wave buncher and traveling wave structure [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, 636(1): 13 - 30.
- [9] Wang Jianzhong, Qi Weiwei, Song Qiuzhi, et al. Mobile robot fuzzy control based on a new error model[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(3): 244 - 247. [王建中, 齐伟伟, 宋迺志, 等. 基于一种新误差模型的移动机器人模糊控制[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(3): 244 - 247.]
- [10] Baird J, Huntley R. DDS IC initiates synchronized signals [J]. Microwaves and RF, 2005, 44(4): 76 - 78.
- [11] Bao Jilong, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng, et al. Dual overwritten fiber gratings characteristics with nonlinear modulation of refractive index[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(9): 813 - 816. [鲍吉龙, 章献民, 陈抗生, 等. 折射率非线性调制的双重光纤光栅特性[J]. 中国激光, 2001, 28(9): 813 - 816.]
- [12] Peng Yongjun, Qiu Kun, Wu Baojian, et al. Numerical simulation on nonlinear transmissive characteristics of fiber bragg grating[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(3): 378 - 383. [彭拥军, 邱昆, 武保剑, 等. 光纤布拉格光栅非线性传输特性的数值仿真[J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(3): 378 - 383.]
- [13] Deng Yaohua, Wu Liming, Zhang Likai, et al. Design of dual DDS arbitrary wave generator based on FPGA and denoising of spur noise[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2255 - 2261. [邓耀华, 吴黎明, 张力锴, 等. 基于FPGA的双DDS任意波发生器设计与杂散噪声抑制方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2255 - 2261.]
- [14] 强锡富. 传感器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 172 - 229.
- [15] Liu Shifeng. The study of grating Moire fringe technology based on amplitude sampling[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007: 30 - 41. [刘世峰. 基于幅值采样的光栅莫尔条纹信号细分技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 30 - 41.]
- [16] Xiong Wenzhuo, Kong Zhiyong, Zhang Wei, et al. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(11): 1745 - 1748. [熊文卓, 孔智勇, 张炜, 等. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1745 - 1748.]