

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107424

基于 Vold-Kalman 滤波的光栅谐波动态抑制方法*

蔡崇文^{1,2}, 叶国永^{1,2}, 刘红忠^{1,2}

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

摘要:谐波信号失真问题,是影响光栅位移传感器测量精度及分辨力的关键因素之一。针对光栅变速运动情况下的谐波动态抑制难题,探索 Vold-Kalman 滤波在光栅信号处理中的应用。阐述了 Vold-Kalman 滤波的基本原理,建立了基于 Vold-Kalman 滤波的光栅谐波抑制模型,优化设计了 Vold-Kalman 滤波器的权重因子,开发了基于 Labview+FPGA 的 Vold-Kalman 滤波电路,并在光栅信号处理中进行了实验验证。仿真结果表明,经 Vold-Kalman 滤波后,三次谐波的幅值下降约 95%,五次谐波的幅值下降约 98%。实验结果表明,经 Vold-Kalman 滤波后,三次谐波的幅值下降约 71.3%,五次谐波的幅值下降约 83.2%。仿真及实验结果均证明了 Vold-Kalman 滤波在光栅谐波动态抑制中的有效性。

关键词: Vold-Kalman 滤波;光栅;谐波失真;动态抑制

中图分类号: TH741.6 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Dynamic suppression of harmonic distortion for optical encoders via Vold-Kalman filtering

Cai Chongwen¹, Ye Guoyong^{1,2}, Liu Hongzhong^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Harmonic distortion is one of the key factors that affects the measurement accuracy and resolution of optical encoders. However, it is a challenge to dynamically suppress the harmonic distortion when optical encoders operate at variable speed. We explore the application of the Vold-Kalman filter in the signal processing of optical encoders. The basic principle of the Vold-Kalman filter is introduced. The dynamic harmonic suppression model based on the Vold-Kalman filter is formulated. The weight factor of the Vold-Kalman filter is optimized. The Vold-Kalman filter is developed, which is based on Labview and FPGA. It is applied to signal processing of an optical encoder. Simulation results show that the amplitudes of the dominant third and fifth harmonics are suppressed by about 95% and 98%, respectively. Experimental results indicate that the amplitude of the third harmonic is suppressed by about 71.3%, and the amplitude of the fifth harmonic is suppressed about 83.2%. Both simulation and experimental results demonstrate the effectiveness of the Vold-Kalman filter in dynamic harmonic suppression of optical encoders.

Keywords: Vold-Kalman filtering; optical encoders; harmonic distortion; dynamic suppression

0 引言

精密位移测量技术及器件,作为超精密定位与控制“眼睛”,是高端制造/测量装备精度保持及提升的核心技术和关键功能部件。激光干涉技术和光栅测量技术,是公认最具发展前景的大量程精密位移测量技术。

随着微/纳米制造工艺与光栅测量原理的发展,光栅栅距尺度已下探至 512 nm,与激光干涉仪波长(632.8 nm)相当;且其凭借极短的干涉光程,服役环境中的精度保持性优于激光干涉仪^[1]。因此,精密光栅位移传感器已经成为高端装备中不可或缺的定位器件,广泛应用于数控机床、机器人、光刻机等领域^[2-5]。

理想情况下,光栅位移传感器输出两路相位正交的

收稿日期:2021-01-22 Received Date: 2021-01-22

* 基金项目:国家自然科学基金(52075430, 51625504)、陕西省重点研发计划(2020ZDLGY14-03)项目资助

正余弦信号,通过对正余弦信号解调和细分,获得被测位移信息。实际工作过程中,受安装误差、电路干扰等多方面因素的影响,光栅传感器输出信号通常包含以下非理想特征:幅值不等、直流偏置、相位不正交以及谐波失真。鉴于谐波失真量相对较小,大量的研究工作集中于幅值不等、直流偏置、相位不正交的修正^[6-9]。当光栅位移传感器向纳米级精度进一步下探时,谐波失真引入的测量误差比重已不容忽略,谐波失真抑制成为高精度光栅位移传感器设计中的关键技术之一。

目前,针对光栅位移传感器谐波失真抑制方法的研究,主要分为光学滤波和电子学滤波两类。光学滤波法通过优化光栅结构或光电探测器等元件的结构参数,实现光栅谐波信号抑制。吴宏圣等^[10]针对几何莫尔光栅位移传感器的谐波失真问题,分析了莫尔条纹的谐波特性,提出了基于指示光栅结构优化的相位差滤波法,实现了对莫尔条纹高次谐波的削弱。Ye等^[11]推导了基于干涉成像扫描原理的光栅光学谐波失真模型,揭示了光栅谐波形成机理;设计了基于相位偏移多码道指示光栅,实现了对3和5次谐波的光学滤除^[12];优化了光电探测阵列单元的线宽,实现了对5次谐波的近零响应^[13]。光学滤波法的优势在于,滤波效果几乎不受光栅运动速度影响,也无需增加后续处理电路,但需要在光栅位移传感器设计阶段进行优化。电子学滤波法,通过构建模拟或数字低通滤波电路,实现对光栅谐波信号的滤除。Jin等^[14]设计了一种滑模滤波器,具有相位滞后小、平滑滤波等特点,能有效地消除脉冲噪声和高频噪声,但滤波器的截止频率为固定值,当光栅运动速度变化导致谐波频率变化时,其滤波效果下降。Wang等^[15]提出了一种截止频率可调的FIR数字滤波器来抑制光电编码器输出信号中的高次谐波,滤波器的截止频率与编码器转速之间存在一个固定的比值,因此可以获得不同速度下的截止频率,但当基频过低时,信号的正弦指数不能满足细分要求。电子学滤波法的优势在于,当光栅传感器出厂后,用户能够根据工况进行灵活的后端处理。但由于光栅谐波信号频率随光栅位移传感器运动速度变化而变化,变速情况下光栅谐波的动态电子学滤波,依旧是一个挑战。

Kalman滤波所解决的问题,正是对动态变化系统的状态跟踪问题。Vold和Lauridan在1993年最先提出了基于Kalman滤波器的转速阶比跟踪算法,即Vold-Kalman阶比跟踪方法,使得阶比跟踪分析中实现了时变阶比谱分析功能^[16-17]。在Vold-Kalman阶比跟踪方法中,阶比信号定义为旋转轴在每转内循环振动产生的信号,每个阶比分量设定为一个调制的正弦信号^[18]。针对光栅位移传感器而言,其输出信号的基波和谐波亦为正弦信号,与旋转机械中的阶比信号形式一致。因此,Vold-Kalman滤波在光栅谐波抑制中的应用,具有技术可

行性,有望为光栅谐波的动态电子抑制提供一条新思路。

本文探索Vold-Kalman滤波在光栅谐波动态抑制中的应用,阐述了Vold-Kalman滤波的基本原理,建立了基于Vold-Kalman滤波的光栅谐波动态抑制模型,优化设计了Vold-Kalman滤波器的关键参数,仿真及实验结果证明了Vold-Kalman滤波在光栅谐波动态抑制中的有效性。

1 Vold-Kalman 动态滤波原理

1.1 光栅谐波信号模型

光栅位移传感器的输出信号,可用幅值包络函数与载波函数的乘积表示为:

$$y(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k(t) \theta_k(t) \quad (1)$$

式中: k 为阶次; $a_k(t)$ 为第 k 阶比信号的幅值包络函数; $\theta_k(t)$ 为第 k 阶比信号的载波函数,其离散形式为^[19]:

$$\theta_k(n) = \exp[ik \times 2\pi(f_1 + f_2 + \dots + f_n)\Delta t] \quad (2)$$

式中: f_n 为在第 n 个采样点时的瞬时频率; Δt 为信号离散采样的时间间隔; $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

Vold-Kalman滤波是一个递归算法,使得预估值与观测值之间的均方误差最小。其实现过程的关键,在于局部约束方程的定义,即状态方程和观测方程的定义。

1.2 Vold-Kalman 滤波的状态方程

光栅位移传感器的输出信号,其幅值包络是平滑变化的。因此,可以用相对光滑的低阶多项式表示 $a_k(t)$,其离散形式为:

$$\nabla^s a_k(n) = \psi_k(n) \quad (3)$$

式中: ∇ 为差分算子; s 为差分阶数; $\psi_k(n)$ 为幅值包络 $a_k(n)$ 的高次项。式(3)中,通常选取 $s = 2$ ^[20-21],此时其表示的差分方程为:

$$a_k(n+1) - 2a_k(n) + a_k(n-1) = \psi_k(n) \quad (4)$$

将式(4)写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} a_k(n) \\ a_k(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_k(n-1) \\ a_k(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_k(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)即为Vold-Kalman滤波系统的状态方程。当提取 k 个阶比分量时,需要对 $2k \times 1$ 阶矩阵进行求解,计算量较大。针对光栅位移传感器的滤波需求,只需提取输出信号的第1阶比分量。此时,Vold-Kalman滤波系统的状态方程为:

$$\mathbf{A}(n+1) = \mathbf{F} \cdot \mathbf{A}(n) + \psi(n) \quad (6)$$

式中: \mathbf{F} 为状态转移矩阵; \mathbf{A} 为幅值包络线的状态量; $\psi(n)$ 为状态预估过程中的过程噪声,通常将其建模为零均值的白噪声。式(6)中各个矩阵的具体表达式为:

$$\mathbf{A}(n+1) = \begin{bmatrix} a_1(n) \\ a_1(n+1) \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}(n) = \begin{bmatrix} a_1(n-1) \\ a_1(n) \end{bmatrix}, \boldsymbol{\psi}(n) = \begin{bmatrix} 0 \\ \psi(n) \end{bmatrix}.$$

1.3 Vold-Kalman 滤波的观测方程

Vold-Kalman 滤波系统的观测方程为:

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k(n) \theta_k(n) + \varepsilon(n) \quad (7)$$

同样,对于光栅位移传感器信号,Vold-Kalman 滤波器只需要提取第1阶分量,其他阶分量和误差作为观测噪声处理。此时,式(7)所示的观测方程,可以改写为:

$$y(n) = \mathbf{B}(n) \mathbf{A}(n) + \varepsilon(n) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{B}(n) = [0 \ \theta_1(n)]$; $y(n)$ 为实测离散数据; $\theta_1(n)$ 为第1阶比分量的载波; $\varepsilon(n)$ 为观测噪声,通常将其建模为零均值的白噪声。

1.4 Vold-Kalman 滤波器的动态滤波过程

基于上述定义的状态方程和观测方程,光栅谐波 Vold-Kalman 滤波算法流程,如图1所示。表1所示为算法流程所涉及的变量和参数的相关含义和矩阵维度。

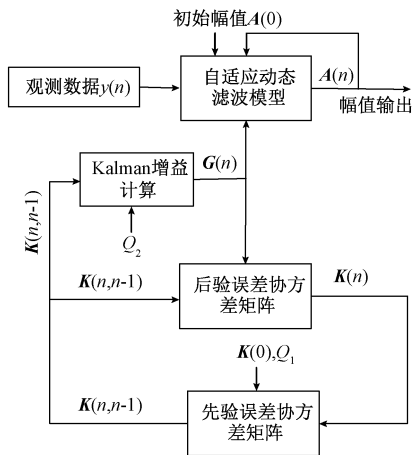


图1 光栅谐波的 Vold-Kalman 滤波算法流程

Fig. 1 Processing of Vold-Kalman filter for harmonics

Vold-Kalman 算法流程的关键在于,状态估计误差的协方差矩阵 $\mathbf{K}(n)$ 、Vold-Kalman 系统的增益 $\mathbf{G}(n)$ 、以及幅值包络状态量 $\mathbf{A}(n)$ 的计算。Vold-Kalman 滤波算法的递归实现过程,可以表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{A}(n, n-1) = \mathbf{F} \times \mathbf{A}(n-1) \\ \mathbf{K}(n, n-1) = \mathbf{F} \times \mathbf{K}(n-1) \times \mathbf{F}^H + \mathbf{Q}_1(n) \\ \mathbf{G}(n) = \mathbf{F} \times \mathbf{K}(n, n-1) \mathbf{B}^H(n) \times \\ \quad [\mathbf{B}(n) \mathbf{K}(n, n-1) \mathbf{B}^H(n) + \mathbf{Q}_2(n)]^{-1} \\ \mathbf{A}(n) = \mathbf{A}(n, n-1) + \mathbf{G}(n) \times [y(n) - \\ \quad \mathbf{B}(n) \mathbf{A}(n, n-1)] \\ \mathbf{K}(n) = \mathbf{K}(n, n-1) - \mathbf{G}(n) \mathbf{B}(n) \mathbf{K}(n, n-1) \end{cases} \quad (9)$$

表1 Vold-Kalman 滤波算法的参数和变量

Table 1 Parameters and variables of Vold-Kalman filtering

变量	含义	维度
$\mathbf{A}(n-1)$	$n-1$ 时刻的最优值	2×1
$\mathbf{A}(n, n-1)$	n 时刻的预估值	2×1
$\mathbf{A}(n)$	n 时刻的最优值	2×1
$\mathbf{K}(n-1)$	$n-1$ 时刻的误差协方差矩阵	2×2
$\mathbf{K}(n, n-1)$	n 时刻的先验状态估计误差协方差矩阵	2×2
$\mathbf{K}(n)$	n 时刻的后验状态估计误差协方差矩阵	2×2
$\mathbf{G}(n)$	n 时刻 Kalman 增益	2×1
$y(n)$	n 时刻观测值	1×1
\mathbf{F}	状态转移矩阵	2×2
$\mathbf{B}(n)$	n 时刻观测矩阵	1×2
$\mathbf{Q}_1(n)$	过程噪声的协方差矩阵	2×2
$\mathbf{Q}_2(n)$	观测噪声的协方差矩阵	1×1
r	权重因子	1×1

1.5 Vold-Kalman 滤波器的参数优化

在 Vold-Kalman 滤波器设计中,过程噪声与观测噪声的大小,直接影响滤波器的收敛时间和幅值波动范围。为分析过程噪声和观测噪声对滤波效果的影响,通常引入权重因子 r 。因此,权重因子 r 的优化,对滤波器的优化设计至关重要。权重因子 r 的定义为^[19]:

$$r^2 = \frac{q_2}{q_1} \quad (10)$$

式中: q_1 与 q_2 分别为 $\mathbf{Q}_1(n)$ 、 $\mathbf{Q}_2(n)$ 的系数。针对图1所示的 Vold-Kalman 滤波算法,采用 Matlab 软件对不同权重因子 r 下的滤波过程进行仿真分析,通过对滤波后信号的时域及幅值信息进行分析,即可得到权重因子 r 对滤波器收敛时间和幅值波动范围的影响曲线。仿真过程中,给定的光栅信号表达式为:

$$y = 0.5 \sin(2\pi ft) + 0.15 \sin(6\pi ft) + 0.075 \sin(10\pi ft) \quad (11)$$

权重因子 r 对滤波器收敛时间和幅值波动范围的影响曲线,如图2所示。幅值收敛时间随着 r 的增大呈近似线性增加;当 $r < 80$ 时,随着 r 的增加,幅值波动范围急剧减小,当 $r \geq 80$ 时,随着 r 的增加,幅值波动范围减小趋缓。因此,选取权重因子为 $r = 80$,以实现幅值收敛时间与幅值波动范围的平衡考虑。此时,幅值收敛时间在 0.3 s 以内,幅值波动范围在 2% 以内。

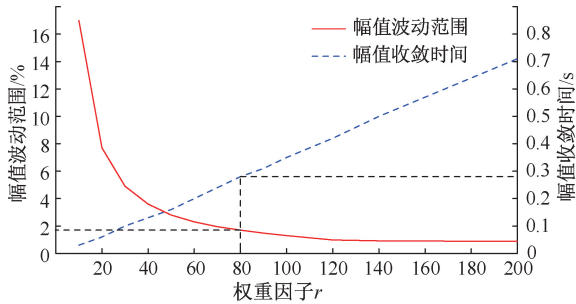


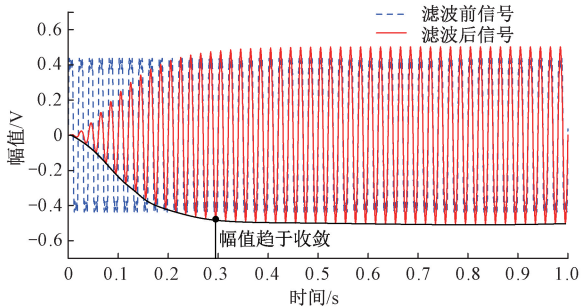
图2 幅值波动范围和幅值收敛时间与权重因子 r 的关系
Fig. 2 The influence of weight factor r on amplitude range and fluctuation amplitude convergence time

2 仿真分析

2.1 光栅匀速运动下的滤波效果

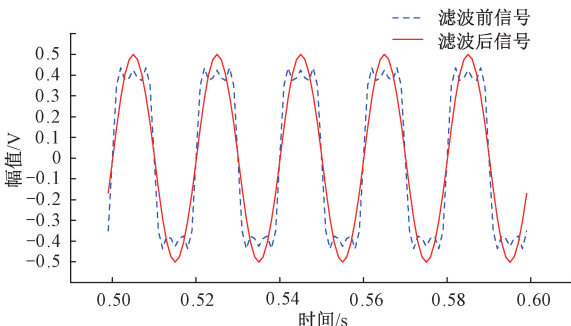
光栅匀速运动情况下,光栅信号的基波及谐波幅值都为定值。在仿真光栅匀速运动下的 Vold-Kalman 滤波效果时,依旧采用式(11)所示的光栅信号作为输入信号,即:光栅基波频率为 $f=50\text{ Hz}$,基波幅值为 0.5 V ,3次谐波幅值为 0.15 V ,5次谐波幅值为 0.075 V 。

图3(a)为 Vold-Kalman 滤波前后的光栅信号波形,可以看出,Vold-Kalman 滤波的幅值收敛时间小于 0.3 s 。图3(b)为光栅信号波形在 $0.5\sim 0.6\text{ s}$ 的局部放大图,明



(a) 滤波前后的光栅信号波形

(a) Signal waveforms before and after filtering



(b) 滤波前后的光栅信号局部波形

(b) Local amplification of signal waveforms before and after filtering

图3 光栅匀速运动时 Vold-Kalman 滤波前后的光栅信号波形

Fig. 3 Encoder signal waveforms before and after Vold-Kalman filtering when grating moves at constant speed

显地,滤波后的光栅信号波形更接近于理想正弦波形。为了对 Vold-Kalman 滤波前后的光栅谐波分量进行量化分析,对如图3所示的光栅信号波形进行傅里叶变换,频谱曲线如图4所示:3次谐波分量从 -18.88 dB 衰减至 -43.79 dB ,5次谐波分量从 -22.54 dB 衰减至 -53.31 dB 。若将图4所示的谐波分量幅度转换为相应的谐波幅值,则:3次谐波幅值从 0.15 V 降到 0.0085 V ,幅值下降 94% ;5次谐波幅值从 0.075 V 降到 0.0019 V ,幅值下降 97% 。

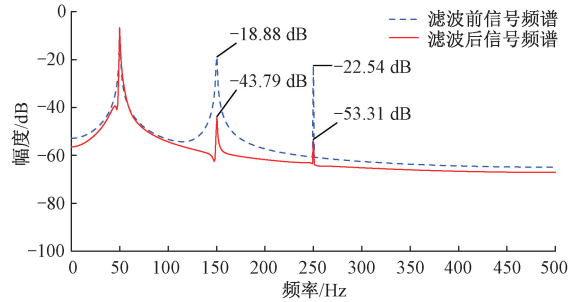


图4 光栅匀速运动时 Vold-Kalman 滤波前后的光栅信号频谱

Fig. 4 Spectrum of encoder signals before and after Vold-Kalman filtering when grating moving at constant speed

2.2 光栅变速运动下的滤波效果

为了对光栅变速运动下的 Vold-Kalman 滤波效果进行仿真,本文假设光栅位移传感器做匀加速运动,即光栅基波频率随时间线性增大: $f=(\alpha t)\text{ Hz}$, α 为线性增大系数。仿真中,选取 $\alpha=40$,3次谐波和5次谐波的幅值同式(11)。则仿真的光栅信号表达式为:

$$y = 0.5\sin(2\pi ft) + 0.15\sin(6\pi ft) + 0.075\sin(10\pi ft) \quad (12)$$

图5(a)为光栅变速运动下 Vold-Kalman 滤波前后的光栅信号波形图,可以看出,Vold-Kalman 滤波的幅值收敛时间依旧在 0.3 s 以内。图5(b)为光栅信号波形在 $0.6\sim 0.7\text{ s}$ 的局部放大图,相比与滤波前,滤波后的光栅信号波形更接近于理想正弦波形。

光栅在变速运动的情况下,光栅信号会产生频率混叠现象,因此对如图5所示的光栅信号波形进行短时傅里叶变换分析,得到的时频图如图6所示。图6(a)为滤波前的光栅信号时频图,光栅信号含有较高成分的3次谐波分量和5次谐波分量。图6(b)为 Vold-Kalman 滤波后的信号时频图,相比于图6(a),3次谐波幅度约从 -22 dB 衰减至 -50 dB ,5次谐波的幅度约从 -25 dB 衰减至 -62 dB 。将谐波分量的幅度转换为相应谐波幅值,则:3次谐波的幅值下降约 95% ,5次谐波的幅值下降约 98% 。仿真结果表明,在光栅变速运动情况下,Vold-Kalman 滤波算法依旧保持了良好的谐波抑制效果。

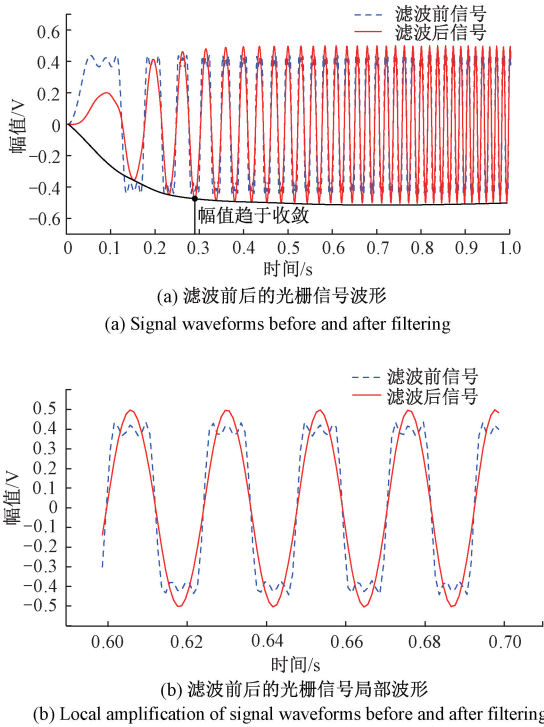


图5 光栅变速运动时 Vold-Kalman 滤波前后的光栅信号波形
Fig. 5 Spectrum of encoder signals before and after Vold-Kalman filtering when grating moving at variable speed

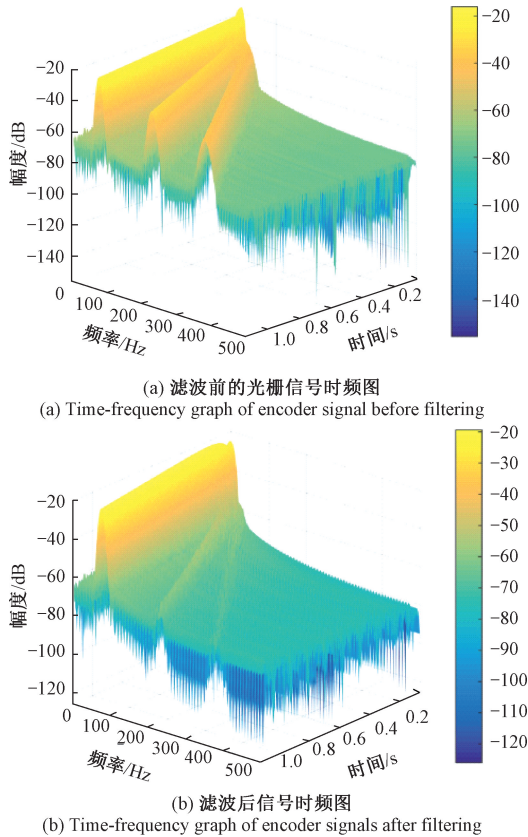


图6 光栅变速运动时 Vold-Kalman 滤波前后的光栅信号频谱
Fig. 6 Time-frequency graph of encoder signals before and after Vold-Kalman filtering when grating moving at variable speed

3 实验验证

3.1 实验设计

实验验证方案如图7所示。实验中,以栅距为 $20\ \mu\text{m}$ 的光栅位移传感器(光栅尺和读数头)作为信号源。光栅信号经NI公司的USB-7856R采集卡,上传至上位机。上位机中,基于Labview+FPGA开发Vold-Kalman滤波电路模块,对光栅信号的谐波成分进行滤波,FPGA采用的主时钟频率为100 MHz。实验过程中,为了验证Vold-Kalman滤波电路在光栅变速运动下的滤波效果,读数头通过直线电机驱动实现变速(匀加速)运动,设置其运动速度为: $v = at = 18t\ \text{mm/s}$,相应地,输出光栅基波信号的频率为: $f = \alpha t = 900t\ \text{Hz}$ 。

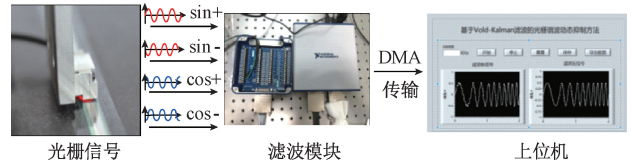


图7 Vold-Kalman 滤波算法在光栅谐波抑制中的验证实验
Fig. 7 Experimental setup for evaluating harmonic suppression performance of Vold-Kalman filter

3.2 实验结果

光栅变速运动下,光栅信号基波频率随之变化。为了对Vold-Kalman滤波前后的信号谐波进行量化分析,截取若干短时区间内的光栅信号,进行离散傅里叶变换,以得到滤波前后的光栅信号频谱图。实验结果分析中,截取的3个短时区间内的光栅信号基频分别为:92 Hz、1.06 kHz、8.58 kHz。离散傅里叶变换得到的信号频谱图,如图8~10所示:光栅输出信号中含有明显的2、3、5次谐波分量,经Vold-Kalman滤波后,各阶谐波分量得到显著抑制。因此,Vold-Kalman滤波适用于光栅变速运动下谐波动态抑制。

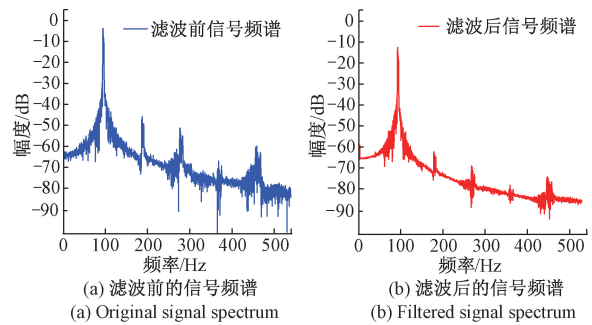


图8 基频为92 Hz的光栅信号频谱图
Fig. 8 Spectrum for encoder signals with a fundamental frequency of 92 Hz

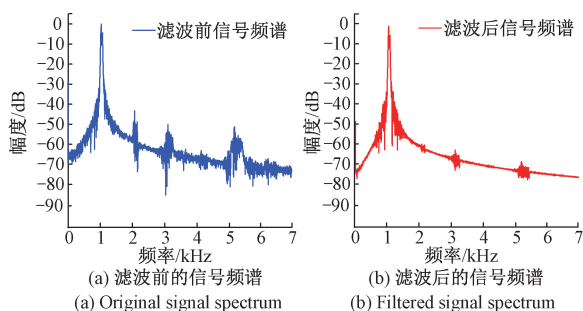


图9 基频为 1.06 kHz 的光栅信号频谱图

Fig. 9 Spectrum for encoder signals with a fundamental frequency of 1.06 kHz

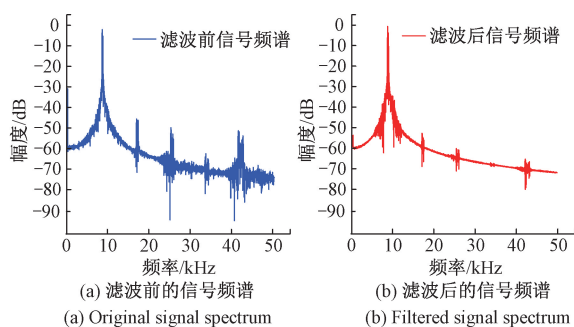


图10 基频为 8.58 kHz 的光栅信号频谱图

Fig. 10 Spectrum for encoder signals with a fundamental frequency of 8.58 kHz

表2对图8~10的数据进行提取,以清晰地量化对比。对比结果显示:二次谐波幅度的平均衰减比为17.2%,三次谐波幅度的平均衰减比为21.3%,五次谐波幅度的平均衰减比为30.8%。将谐波的幅度衰减比转换为相应的幅值下降比,即二次谐波幅值的平均下降比为61.6%,三次谐波幅值的平均下降比为71.3%,五次谐波幅值的平均下降比为83.2%。

表2 Vold-Kalman 滤波前后的光栅谐波对比

Table 2 Comparison of harmonic amplitude before and after Vold-Kalman filtering

基频 频率/Hz	谐波 次数	滤波前 幅度/dB	滤波后 幅度/dB	幅度 衰减比/%	幅值 下降比/%
92	二次	-47.9	-56.3	17.5	62.5
	三次	-51.9	-63.1	21.6	72.1
	五次	-50.8	-66.6	31.2	83.8
1 060	二次	-50.3	-59.9	19.2	67.7
	三次	-54.9	-65.7	19.9	71.1
	五次	-52.1	-68.8	32.1	85.6
8 580	二次	-45.9	-52.7	14.8	54.4
	三次	-47.7	-58.3	22.3	70.7
	五次	-48.8	-63.1	29.1	80.3

4 结 论

本文探索了 Vold-Kalman 滤波在光栅谐波动态抑制中的应用,详细阐述了 Vold-Kalman 滤波的基本原理,以及其在光栅谐波滤除中的实现过程,优化设计了 Vold-Kalman 滤波器的关键参数,开发了 Vold-Kalman 数字滤波模块,并开展了仿真分析和实验验证。仿真结果表明,Vold-Kalman 滤波后,3次谐波的幅值下降约95%,5次谐波的幅值下降约98%。实验结果表明,3次谐波的幅值下降约71.3%,5次谐波的幅值下降约83.2%。因此,Vold-Kalman 滤波在光栅谐波动态抑制中的应用,具有切实有效性。

参考文献

- [1] KIM M, PARK C, JE S, et al. Real-time compensation of simultaneous errors induced by optical phase difference and substrate motion in scanning beam laser interference lithography system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, (4): 1491-1500.
- [2] 王磊杰,张鸣,朱煜,等. 面向浸没式光刻机的超精密光学干涉式光栅编码器位移测量技术综述[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 1909-1918.
WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, et al. Review of ultra-precision optical interferential grating encoder displacement measurement technology for immersion lithography scanner [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(9): 1909-1918.
- [3] MAO G Y, ZHANG X M, XIE L B. Precision positioning control based on two-coordinate incremental encoder[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, 790: 012176.
- [4] 尹云飞,刘兆武,吉日嘎兰图,等. 二维光栅位移测量技术综述[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1224-1238.
YIN Y F, LIU ZH W, JIRI G L T, et al. Overview of 2D grating displacement measurement technology [J]. Chinese Optics, 2020, 13(6): 1224-1238.
- [5] 刘小树,万秋华,王树洁,等. 光电编码器检测装置研究现状与展望[J]. 半导体光电, 2016, 37(6): 763-769.
LIU X SH, WAN Q H, WANG SH J, et al. Current developing situation and trend of measurement devices of

- photoelectric encoder [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(6): 763-769.
- [6] 孙名佳, 林剑峰, 曹文智, 等. 基于三角函数的正弦波编码器信号处理技术研究 [J]. 制造业自动化, 2014, 36(1): 9-12.
SUN M J, LIN J F, CAO W ZH, et al. Study on signal processing technology of sinusoidal encoder based on trigonometric function [J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(1): 9-12.
- [7] 陈晓怀, 杜国山, 程真英. 光栅测量系统的误差研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(3): 187-191.
CHEN X H, DU G SH, CHEN ZH Y. Research on dynamic error of grating measurement system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(3): 187-191.
- [8] 高旭, 万秋华, 赵长海, 等. 莫尔条纹光电信号正交性偏差的实时补偿 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 213-219.
GAO X, WAN Q H, ZHAO CH H, et al. Real-time compensation of orthogonality deviation for moiré fringe photoelectric signal [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 213-219.
- [9] 沈思博, 万秋华, 杜颖财, 等. 高精度光电编码器信号补偿技术的研究进展 [J]. 电子技术应用, 2017, 43(10): 26-30.
SHENG S B, WAN Q H, DU Y C, et al. Development of signal compensation technology for high-precision photoelectric encoder [J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(10): 26-30.
- [10] 吴宏圣, 曾琪峰, 乔栋, 等. 提高光栅莫尔条纹信号质量的滤波方法 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1944-1949.
WU H SH, ZENG Q F, QIAO D, et al. Filtering method of improving quality of grating moiré fringe [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1944-1949.
- [11] YE G Y, LIU H ZH, FAN S J, et al. A theoretical investigation of generalized grating imaging and its application to optical encoders [J]. Optics Communications, 2015, 354: 21-27.
- [12] YE G Y, LIU H ZH, BAN Y W, et al. Development of a reflective optical encoder with submicron accuracy [J]. Optics Communications, 2018, 411: 126-132.
- [13] YE G Y, LIU H ZH, SHI Y SH, et al. Optimizing design of an optical encoder based on generalized grating imaging [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(11): 115005.
- [14] JIN SH H, KIKUU R, YAMAMOTO M. Real-time quadratic sliding mode filter for removing noise [J]. Advanced Robotics, 2012, 26(8-9): 877-896.
- [15] WANG Y, LIU Y, YAN X J, et al. Compensation of moire fringe sinusoidal deviation in photoelectrical encoder based on tunable filter [J]. Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2011, 39(3): 1-4.
- [16] VOLD H, LEURIDAN J. High resolution order tracking at extreme slew rates using Kalman tracking filters [J]. Shock and Vibration, 1995, 2(6): 507-515.
- [17] 冯珂, 王科盛, 宋理伟, 等. 基于阶次谱的Vold-Kalman滤波带宽优选方法 [J]. 振动工程学报, 2017, 30(2): 319-324.
FENG K, WANG K SH, SONG L W, et al. An order spectrum based selection method to Vold-Kalman filter bandwidth [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(2): 319-324.
- [18] 赵晓平, 薛胜军, 侯荣涛. 参数对自适应Vold-Kalman阶比跟踪影响的研究 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 88-91.
ZHAO X P, XUE SH J, HOU R T. Influence of parameters on order tracking of adaptive Vold-Kalman [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7): 88-91.
- [19] PAN M CH, WU CH X. Adaptive Vold-Kalman filtering order tracking [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(8): 2957-2969.
- [20] 傅炜娜. 基于Vold-Kalman跟踪滤波的旋转机械阶比分析方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
FU W N. Research on rotating machine order analysis method based on Vold-Kalman tracking filter [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [21] 管涛, 刘智豪, 王辉, 等. 基于Vold-Kalman滤波的阶次分析系统设计与实现 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(7): 43-46, 50.
ZAN T, LIU ZH H, WANG H, et al. Design and implementation of order analysis system based on Vold-Kalman filter [J]. Modular Machine Tool and Automatic

Manufacturing Technique, 2019(7): 43-46, 50.

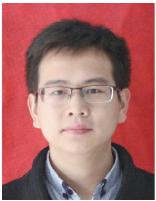
作者简介



蔡崇文, 2018 年于重庆大学获得学士学位, 现为西安交通大学硕士研究生, 主要研究方向为精密测量与测试技术。

E-mail: 515335462@qq.com

Cai Chongwen received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2018. He is currently a master student at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include precision measurement and testing techniques.



叶国永 (通信作者), 2010 年于江南大学获得学士学位, 2015 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安交通大学副教授, 主要研究方向为精密测量与测试技术、微纳制造与传感技术。

E-mail: guoyongye@mail.xjtu.edu.cn

Ye Guoyong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangnan University in 2010, and received his Ph. D.

degree from Xi'an Jiaotong University in 2015. He is currently an associate professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include precision measurement and testing technology, and micro-nano manufacturing and sensing technology.



刘红忠, 1992 年于兰州交通大学获得学士学位, 1998 年于兰州交通大学获得硕士学位, 2004 年于西安交通大学获得博士学位。现为西安交通大学教授。主要研究方向为精密测量和微纳加工。

E-mail: hzliu@mail.xjtu.edu.cn

Liu Hongzhong received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Lanzhou Jiaotong University in 1992 and 1998, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2004. He is currently an associate professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include precision measurement and micro/nano fabrication.