

基于测量基准变换的增量直线式时栅传感器研究^{*}

陈自然, 刘小康, 杨继森, 李 钢

(重庆理工大学 机械检测技术与装备教育部工程研究中心 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室 重庆 400054)

摘要:针对目前绝对直线场式时栅无法满足全闭环数控系统要求的增量式直线位移反馈的问题,采用测量基准转换方式从时间域的角度处理绝对直线场式时栅的空间位移信息,运用时间序列算法分析绝对式时栅采样数据序列的内在相关性,建立自适应推算算法。通过时间触发采样将时栅传感器过去的测量数据作为样本集,递推时栅下一个采样时刻的位移,在下一个采样周期内将直线时栅的绝对位移代表的增量式时间脉冲通过脉宽调制的方式连续发出,实现绝对式直线时栅到增量式直线时栅位移传感器的转换设计。实验表明在 76.604 mm 的范围内增量式直线时栅位移传感器达到 $\pm 2 \mu\text{m}$ 的测量精度。此研究可将原绝对式直线时栅位移传感器运用于全闭环增量式直线运动数控系统,具有重要现实意义。

关键词: 增量式;时栅;直线式位移测量;测量基准

中图分类号: TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Research on incremental linear time grating sensor based on measurement standard transformation

Chen Ziran, Liu Xiaokang, Yang Jisen, Li Gang

(Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Aiming at the problems that current absolute linear magnetic-field type time grating displacement sensors do not provide incremental linear displacement feedback for full closed-loop numerical control system, in this paper the measurement standard transformation method is adopted to process the spatial displacement information of the absolute linear displacement magnetic-field type time grating sensors in time domain. The inherent relevant of the sampling data series of the absolute linear displacement time grating sensor is analyzed using time series algorithm, and the self-adaptive recursive algorithm is established. The measured linear absolute displacement data sampled in time-triggered pattern are employed as sample set, and the absolute linear displacement for the next sampling period is calculated through recursion. Then the incremental time clock pulses represented by the absolute linear displacement of the time grating sensor are sent continuously using pulse width modulation pattern during the next sampling period. In this way, the absolute linear time grating sensor is transformed into an incremental linear one. Experiment results prove that the dynamic displacement measurement error of the proposed incremental linear time grating sensor is within $\pm 2 \mu\text{m}$ in the range of 76.604 mm. With the proposed method, the absolute linear time grating sensor can be applied for incremental linear displacement feedback required in full closed-loop numerical control system.

Keywords: incremental; time grating; linear displacement measurement; measurement standard

1 引言

数控技术已成为先进制造技术的核心,其整体水平已成为衡量一个国家现代化制造水平的重要标志。传统的数控系统都是采用封闭式设计,其中以德国 Siemens 和日本 Fanuc 最具代表性。其最大弊端就是很难在原有基础上再添加新的控制策略或扩展新功能。针对此现象,各国都在试图改变现有束缚性现状,研发开放式数控系统,以期给机床领域带来革命性变革。其中最具代表性的为美国的 Delta Tau Data System、德国的 Power Automation 以及 Indramat。在开放式数控系统中,最为流行的是以 PC 机和运动控制卡,辅以位置传感器作为反馈元件构建的全闭环数控系统。高档数控机床、坐标测量机、齿轮测量中心等数字化精密机械测量仪器和装备广泛采用光栅传感器作为位置反馈部件^[1-2]。光栅作为数控系统核心部件具有高技术和高附加值的专业化成品,其精度和成本直接决定着数控系统的整体性能及成本^[3,4]。例如 Heidenhain 公司为欧洲最大的天文望远镜那列大型望远镜提供的代表国际先进水平的 ERA 780C 光栅尺沿转台内部的基圆贴一圈构成光栅环,长达 48.48 m,栅距为 40 μm ,具有 1 212 000 线。每个栅距可 4 096 倍细分,使得方位轴定位步距达 10 nm^[5,6]。

光栅采用莫尔条纹作为测量基准,虽然此原理早在 20 世纪 50 年代就已经被人们所熟知,但由于我国工业基础比较薄弱,工艺落后,至今未能实现高精度光栅的国产化。发达国家很多都将高精度光栅作为战略物资对我国限制进口。

面对此困境,采用时空基准转换方法研制出了时栅位移传感器^[7-8],此传感器不同于基于空间均匀细分的位置传感器,其采用时间作为测量基准实现空间位置测量,彻底回避了精密机械刻线使加工难度和成本大大降低,具有较强的抗油污、粉尘和高智能化特点。

2 直线时栅测量原理

直线时栅结构与直线交流电机类似,如图 1 所示。直线时栅主要由定尺、定测头 b 和动测头 a 组成。定尺基体的内面上开槽,并按要求在槽内嵌线构成空间对称的三相绕组,在定子基体内嵌入一根导线作为定测头 b。在三相绕组中施加三相对称激励电流,则在定尺气隙中产生一个以速度 V 作直线运动的行波磁场 M (需要说明的是,这种直线运动是一种看不见但客观存在的运动),行波磁场以匀速 V 始于 c 点、终于 d 点,每隔扫描时间周期 T ,行波磁场行进单位位移 W ,连续不断,在相继经过定、动测头 b、a 时,感应出电信号,也就得到瞬时时刻 T_0 和 T_i 。

在测量过程中行波磁场扫描定测头的时间间隔固定

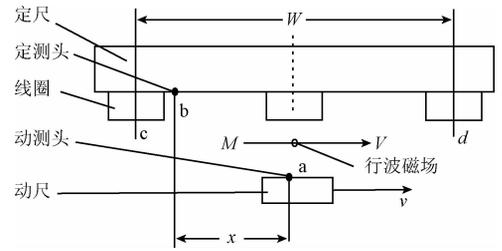


图 1 直线型场式时栅原理

Fig. 1 Schematic diagram of linear magnetic-field time grating

不变,即为测量周期 T ,通过比相定、动测头信号即可得到 ΔT 信号,即时栅每隔 T 可测得一个位移 x 值^[9]。

$$x = V(T_i - T_0) = V \times \Delta T \quad (1)$$

由此可见,在单位测量周期 T ,直线时栅获得一个位移值 x 。当直线时栅动尺运动过快时,单位测量周期 T 获得的位移值 x 较大。相反当动尺运动过慢时,单位测量周期 T 获得的位移值 x 较小。

3 增量式直线时栅设计原理

由于目前市场数控系统普遍采用光栅作为位置检测元件,采用空间均分的莫尔条纹转换的电脉冲作为位置反馈信号。如果直接将直线式时栅位移传感器代替光栅作为位置检测元件,由于两者的测量原理和信号格式的不同必然导致不同步问题,如图 2 所示。

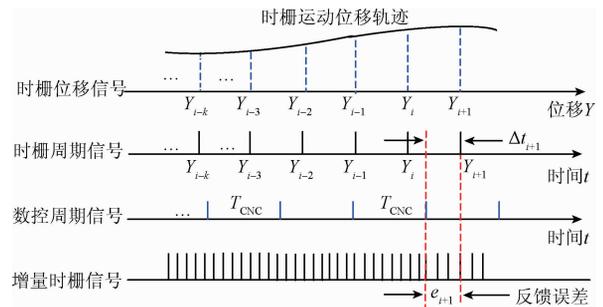


图 2 增量式直线时栅设计原理

Fig. 2 Design principle diagram of linear incremental time grating

当直线式时栅动尺随运动部件做直线运动时,设其在采样周期 $T_{i-k}, \dots, T_{i-3}, T_{i-2}, T_{i-1}, T_i$ 采样得到直线时栅位移为 $Y_{i-k}, \dots, Y_{i-3}, Y_{i-2}, Y_{i-1}, Y_i$ 。数控系统采用定时采样光栅脉冲作为数控位置反馈信息,由于时栅采样周期和数控系统采用独立的时钟源,因而存在采样周期的不同步的问题。如图 2 所示,当数控系统 T_{CNC} 到来时,时栅采样周期 T_{i+1} 滞后 Δt_{i+1} ,其结果就会造成时栅和数控系统在时间和空间上的不同步,就会造成反馈

误差 e_{i+1} 。当此误差较大时,可能使得数控系统加工产生剧烈抖动,甚至无法正常工作。

其解决办法就是将绝对式直线时栅信号转换成增量式时栅信号,通过转换后的增量式时栅脉冲解决数控系统和时栅位移传感器存在的时-时不同步、空-空不同步、时-空不同步的问题。

4 增量式直线时栅位置递推算法

自诺贝尔经济学奖获得者 Granger C 和 Engle R. F. 建立时间序列理论以来,时间序列以运算量小,递推精度高得到许多学者的青睐,获得了长足的发展,目前已经广泛应用于信息处理^[10]、电力预测^[11]、水质预测^[12]、数据挖掘^[13-14]及工业故障诊断^[15]等领域,并取得了丰硕成果。

为解决直线式时栅在数控系统中存在的闭环反馈误差问题,本研究引入时间序列理论对被测对象已知信息点进行建模,提取其运动动态特征,建立稳定影响因素和系统状态改变之间的关系,通过已知采样周期得到的时栅位移序列递推下一采样周期的位置值。

$$\hat{Y}_{i+1} = L(Y_{i+1} | Y_{i-k}, Y_{i-k+1}, \dots, Y_i) \quad (2)$$

然后在此采样周期内将预测的增量式位移转换成增量式脉冲信号发送出去。设单个增量脉冲代表的空间当量为 W , 前一个采样周期增量式脉冲精度误差为 e_i , 则增量式脉冲个数为:

$$N_{i+1} = (\hat{Y}_{i+1} - Y_i - e_i) / W \quad (3)$$

时间序列是建立在平稳序列理论的基础上,即要求样本的统计特性与统计起点无关。对于非平稳数据需先将非平稳数据转换成平稳数据,再按平稳模型建模,具体步骤如下。

1) 数据预处理

当直线式时栅动尺随运动部件做直线运动时,设其在采样周期 $T_{i-k}, \dots, T_{i-3}, T_{i-2}, T_{i-1}, T_i$ 采样得到直线时栅位移为 $Y_{i-k}, \dots, Y_{i-3}, Y_{i-2}, Y_{i-1}, Y_i$, 采用二阶差分算法提取其趋势性和周期性,将运动采样得到的非平稳数据转换成平稳数据^[15]:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{k+1} \sum_{i=i-k}^i Y_i \quad (4)$$

$$Y'_i = Y_i + Y_{i+2} - 2Y_{i-1} - \hat{\mu} \quad (5)$$

2) 模型选择

序列样本方差:

$$\hat{\gamma}(0) = \frac{1}{i-k-2} \sum_{i=i-k-2}^i (Y'_i)^2 \quad (6)$$

样本自协方差函数:

$$\hat{\gamma}(0) = \frac{1}{i-k-2} \sum_{i=i-k-2}^i (Y'_i \times Y'_{i-s})^2 \quad (7)$$

样本自相关函数:

$$\rho(s) = \frac{\gamma(s)}{\gamma(0)} \quad (8)$$

样本偏自相关系数:

$$\varphi_{kk} = \begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{(k-2)} & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 & \dots & \rho_{(k-3)} & \rho_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \dots & \rho_1 & \rho_k \end{vmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{(k-2)} & \rho_{(k-1)} \\ \rho_1 & 1 & \dots & \rho_{(k-3)} & \rho_{(k-2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \dots & \rho_1 & 1 \end{vmatrix}$$

由于时间序列经典模型包含自回归 (autoregressive, AR) 模型、滑动平均 (moving average, MA) 模型、自回归滑动平均 (autoregressive moving average, ARMA) 模型,通过样本自相关函数和偏自相关函数的截尾和拖尾特性实现模型的而选择。

3) 模型参数估计

采用最小二乘估计法,利用递推残差平方和最小求模型参数,针对 AR 模型,则:

$$\hat{\varepsilon}_j = Y'_j - (d_1 Y'_{j-1} + d_2 Y'_{j-2} + \dots + d_p Y'_{j-p}) \quad (10)$$

式中: $\hat{\varepsilon}_j$ 为递推残差, d_1, d_2, \dots, d_{j-p} 为 AR 系数,为了使得残差平方和最小^[16],则:

$$S(d_1, d_2, \dots, d_p) = \sum_{j=p+1}^N [Y'_j - (d_1 Y'_{j-1} + d_2 Y'_{j-2} + \dots + d_p Y'_{j-p})]^2 = |\mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{d}|^2 \quad (11)$$

$$\text{式中: } \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y'_{p+1} \\ Y'_{p+2} \\ \vdots \\ Y'_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} Y'_p & Y'_{p-1} & \dots & Y'_1 \\ Y'_{p+1} & Y'_p & \dots & Y'_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y'_{N-1} & Y'_{N-2} & \dots & Y'_{p-p} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_p \end{bmatrix}。$$

使得 $S(d_1, d_2, \dots, d_p)$ 取得最小值,即 $(\mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{d})$ 和 \mathbf{X} 的每个列向量正交,则系数 \mathbf{d} 应满足:

$$\mathbf{X}^T (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{d}) = 0 \quad (12)$$

所以:

$$(\hat{d}_1, \hat{d}_2, \dots, \hat{d}_p)^T = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (13)$$

式中: $\hat{d}_1, \hat{d}_2, \dots, \hat{d}_p$ 为自回归系数的最小二乘估计值。

5 实验研究

为了验证增量式直线时栅脉冲精度,搭建了如图 3 所示的实验装置台。

为减小温度及振动对试验台的影响,实验采用大理

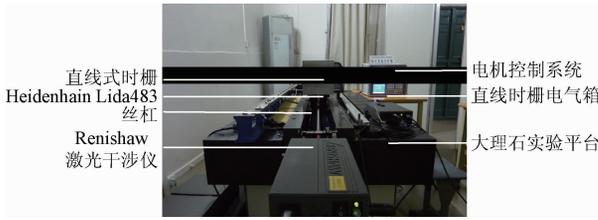


图3 实验平台
Fig. 3 Experiment setup

石平台。将精度为 $\pm 1.0 \mu\text{m}$ 直线式时栅定尺安装在试验工装内,固定在大理石平台上,动尺与运动部件固定在一起。安装时,动测头 a 一般用片簧机构固定在测头架上,与定尺正对放置但不与定尺接触,保持一定的间隙(控制在 0.4 mm 以内),安装如图 4 所示。



图4 直线式时栅位移传感器
Fig. 4 Linear displacement time grating sensor

上位机发出定位指令通过电机控制系统驱动电机旋转。滚珠丝杠作为传动元件将电机的回转运动转换成直线运动,带动运动部件与动尺同步做直线运动。实验采用栅距为 $20 \mu\text{m}$,精度为 $0.2 \mu\text{m}$ 的敞开式光栅尺 Heidenhain Lida483 作为运动部件位置检测元件,将测量值反馈给上位机实现闭环控制。为了检验绝对式直线式时栅信号转换成增量式脉冲信号精度,实验采用 Heidenhain 专用细分卡 IBV102 将光栅栅距 100 倍细分,使得细分分辨力达到 $0.2 \mu\text{m}$ 。实验采用采集板等时间采集 Heidenhain 专用细分卡 IBV102 细分后的光栅脉冲和绝对直线式时栅转换后的增量式脉冲得到直线式时栅转换成脉冲信号精度,实验结构如图 5 所示。

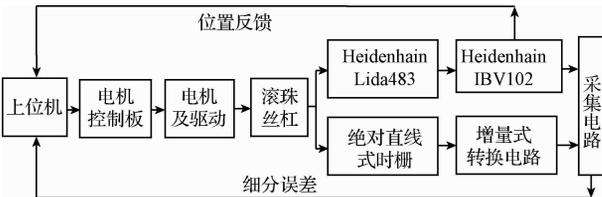


图5 实验结构
Fig. 5 Structure diagram of the experiment

实验采用直线电机驱动运动部件带动直线时栅动尺

做同步运动,采集板以 1 ms 为采样周期等时采样直线式时栅运动位置,数据显示直线式时栅在 19.6 s 的时间内运动 76.604 mm ,如图 6 所示。为了检验直线式时栅信号转换成增量式算法在各个不同运动状态下的准确性及鲁棒性,实验设计直线电机先做匀速运动 (3.08 mm/s),再加速运动,然后又做匀速运动 (4.61 mm/s),再减速运动,最后恢复先前匀速的运动方式。

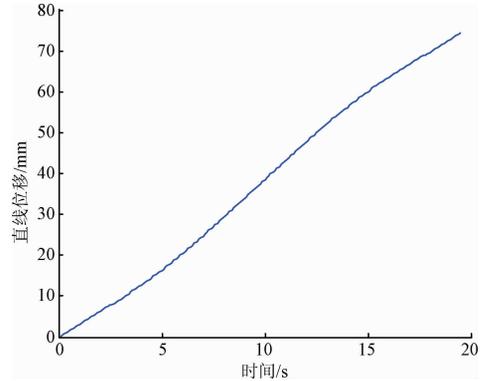


图6 直线式时栅传感器运动位移
Fig. 6 Moving displacement diagram of linear time grating sensor

将图 7 所示的速度曲线做差分运算处理即得到直线式时栅运动的加速度曲线。以加速度曲线作为递推样本,计算得到自相关系数拖尾,偏自相关系数 4 阶截尾,即采用 AR(4) 建模。采用自相关系数和偏自相关系数通过最小二乘估计建模。实时递推回归系数递推直线式时栅加速度,然后再递推到位移得到直线式时栅在下一个采样周期的位移。图 8 所示为直线式时栅实际加速度和递推加速度比较效果。

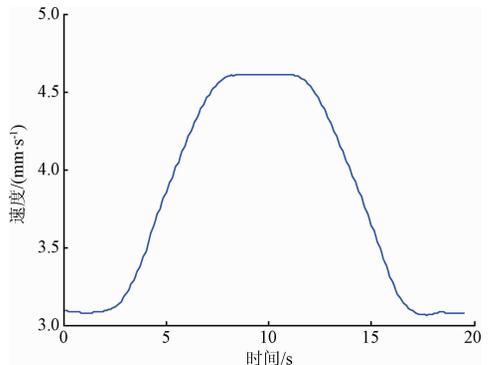


图7 直线式时栅运动速度
Fig. 7 Moving velocity diagram of linear time grating sensor

由图 8 所示,直线式时栅在匀速运动时递推加速度精度较高,当加速和减速运动时递推加速度误差相对会有增大。图 9 所示为减速时的加速度递推效果图。

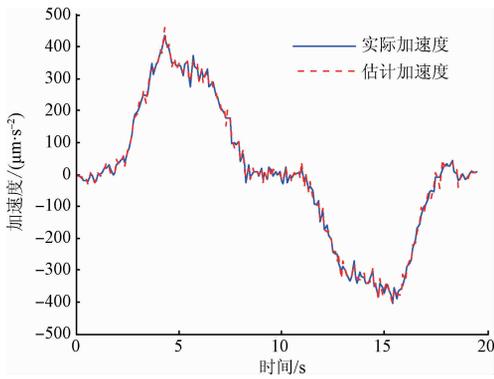


图8 直线式时栅运动加速度估计效果

Fig. 8 Evaluating acceleration of linear time grating sensor

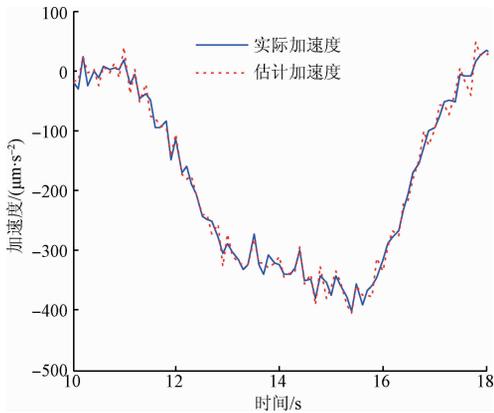


图9 直线式时栅减速运动加速度估计效果

Fig. 9 Estimation result of the acceleration of linear time grating sensor for decelerated motion

把设计的基于绝对式直线时栅转换成增量式直线时栅的测量数据与标准的 Heidenhain Lida483 经过 Heidenhain IBV102 细分后的细分脉冲做比较得到在 76.604 mm 测量范围内转换成增量式脉冲信号测量误差图如图 10 所示,误差范围在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 范围内。

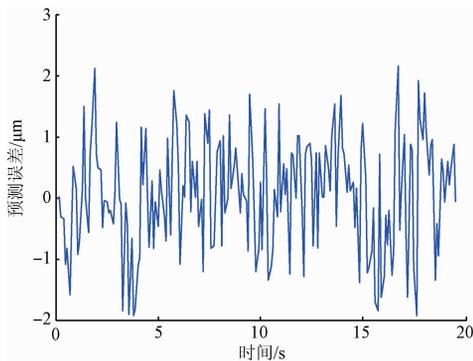


图10 直线式时栅信号增量式脉冲估计误差

Fig. 10 Estimation errors of the incremental clock pulses of a linear time grating sensor

6 结 论

直线磁场式时栅采用行波磁场作为直线位移测量载体,将行波磁场运动速度作为桥梁,通过单位扫描周期得到直线式时栅传感器直线运动位移量,因而所得到的是绝对式直线位移。为了能将直线磁场式时栅直接运用到全闭环数控系统解决增量式直线位移反馈的问题,本文采用域变换的方式,将直线式位移信号转换成时间域的方式,通过运用时间序列算法分析绝对式时栅采用数据序列的内在相关性,建立自适应递推算法,时栅扫描周期内将绝对式直线位移转换成增量式脉冲信号,解决了绝对式直线式时栅信号与增量式数控系统在位移反馈出现的时-时不同步、时-空不同步、空-空不同步问题,实验结果验证了此研究的可行性和实用性。

参考文献

- [1] 李志军,刘成颖,孟凡伟,等. 基于光栅信号的直线电机加速度估计方法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2015,55(11): 1258-1263.
LI ZH J, LIU CH Y, MENG F W, et al. Linear motor acceleration estimation method based on grating signals[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2015,55(11): 1258-1263.
- [2] GAO W, KIM S W, BOSSE H, et al. Measurement technologies for precision positioning[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2015, 64(2): 773-796.
- [3] MISSOFFE A, CHASSAGNE L, TOPCU S, et al. New simple optical sensor: From nanometer resolution to centimeter displacement range[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 176(4): 46-52.
- [4] FLEMING A J. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 190(1): 106-126.
- [5] EIKENBERRY S S, DONOSO H V, ETEDGUI E, et al. MIRADAS for the gran telescopio canarias: System overview [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012, 8(8):428-429.
- [6] SCHIPANI P, ARCIDIACONO C, ARGOMEDO J, et al. The tracking control system of the VLT Survey Telescope[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(9): 094501-094501-9.
- [7] CHEN Z R, LIU X K, PENG D L, et al. Dynamic model of NC rotary table in angle measurements with time series[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2013, 35(2): 181-187.
- [8] 刘小康,彭凯,王先全,等. 纳米时栅位移传感器的理论模型与误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2014,

- 35(5): 1136-1142.
- LIU X K, PENG K, WANG X Q, et al. Theoretical model and error analysis of nanometer time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1136-1142.
- [9] CHEN Z R, PUH J, LIU X K, et al. A time grating sensor for displacement measurement with long range and nanometer accuracy [C]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement. 2015, 64 (11): 3105-3115.
- [10] 雷苗,彭宇,彭喜元. 一种面向混沌时间序列预测的虚拟特征提取算法[J]. 电子与信息学报, 2014 36(10): 2400-2404.
- LEI M, PENG Y, PENG X Y. A virtual feature extraction method for chaotic time series prediction [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(10): 2400-2404.
- [11] 于之虹,黄彦浩,鲁广明,等. 基于时间序列关联分析的稳定运行规则提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 519-526.
- YU ZH H, HUANG Y H, LU G M, et al. A time series associative classification method for the operation rule extracting of transient stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 519-526.
- [12] 刘祥明,石为人,范敏. 一种时间序列连续分段多项式模式表示方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1052-1056.
- LIU X M, SHI W R, FAN M. Continuous piecewise polynomial model representation method of time series [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1052-1056.
- [13] 郑宝芬,苏宏业,罗林. 无监督特征选择在时间序列数据挖掘中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 834-840.
- ZHENG B F, SU H Y, LUO L. Application of unsupervised feature selection in time series data mining [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(4): 834-840.
- [14] 秦剑,王建平,张崇巍. 基于相空间重构小波神经网络的短期风速预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(3): 236-241.
- QIN J, WANG J P, ZHANG CH W. Short-term wind speed forecasting based on wavelet neural network of phase space reconstruction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(3): 236-241.
- [15] ROMANI L A S, DE AVILA A M H, CHINO D Y T,

et al. A new time series mining approach applied to multitemporal remote sensing imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51 (1): 140-150.

- [16] ZHAO J P, ITTI L. Classifying time series using local descriptors with hybrid sampling [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2016, 28 (3): 623-637.

作者简介



陈自然, 2012年于合肥工业大学获得博士学位, 现为重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心副研究员, 主要从事精密位移传感器和机电一体化研究。
E-mail: czr@cqut.edu.cn

Chen Ziran received his Ph. D. from Hefei University of Technology in 2012. He now work as an associate research fellow in Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment (Ministry of Education), Chongqing University of Technology. His research interest includes high precision displacement sensors and mechatronics.



刘小康, 分别在1999年、2002年和2005年分别在重庆大学获得学士、硕士和博士学位, 2008年从合肥工业大学仪器科学与技术博士后流动站出站, 现为重庆理工大学教授, 主要研究方向为智能仪器与传感器。
E-mail: lxx@cqut.edu.cn

Liu Xiaokang received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Chongqing University in 1999, 2002 and 2005, respectively. He finished his postdoctoral research in Hefei University of Technology in 2008. He is currently a professor in Chongqing University of Technology, China. His research interest mainly includes intelligent instrument and sensor.



杨继森(通讯作者), 2001年于湖北汽车工业学院获得学士学位, 分别在2003年和2007年于重庆大学获得硕士学位和博士学位, 现为重庆理工大学副教授, 主要研究方向为精密测量与智能传感器。
E-mail: ywei@cqut.edu.cn

Yang Jisen (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2001 from Hubei University of Automobile Technology, received his M. Sc. degree in 2003 and Ph. D. degree in 2007 both from Chongqing University. Now, he is an associate professor in Chongqing University of Technology. His main research interest includes precision measurement technology and smart sensor.