

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.05.012

基于卡尔曼滤波和 MRAC 的卷绕张力控制

蒋林军^{1,2}, 张 华^{1,2}

(1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018;
2. 浙江理工大学 浙江省现代纺织装备技术重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘 要:针对纱线收卷系统张力控制存在非线性和时变性以及存在测量噪声等问题,课题组提出了一种卡尔曼滤波和模型参考自适应相结合的张力控制方法。为提高卷绕系统的抗干扰性和稳定性,在张力测量环节通过参考模型设计卡尔曼滤波器有效抑制测量噪声。在纱线张力控制上,采用基于 Lyapunov 稳定性原理的模型参考自适应的控制策略对张力实时补偿。MATLAB 仿真结果表明:基于卡尔曼滤波和 Lyapunov-MRAC 的卷绕张力控制系统具有良好的鲁棒性、自适应性。该控制方法具有一定的应用前景。

关 键 词:张力控制;自适应控制;卡尔曼滤波;Lyapunov-MRAC

中图分类号:TP273;TH39 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)05-0064-05

Winding Tension Control Based on Kalman Filter and MRAC

JIANG Linjun^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Modern Textile Equipment Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems of non-linearity, time-varying and measurement noise in tension control of yarn winding system, a tension control method combining Kalman filter and model reference adaptive control was proposed. In order to improve the anti-interference and stability of the winding system, Kalman filter was designed through a reference model during the tension measurement process to effectively suppress the measurement noise. In the yarn tension control, a model reference adaptive control strategy based on the Lyapunov stability principle was used to compensate the tension in real time. MATLAB simulation results show that the winding tension control system based on Kalman filter and Lyapunov-MRAC has good robustness and adaptability. The control method has certain application prospects.

Keywords: tension control; adaptive control; Kalman filter; Lyapunov-MRAC

纱线卷绕系统生产过程中,不仅要让纱线保持一定输送速度,还要保持纱线张力稳定。因为张力波动会直接影响筒纱的成型质量^[1]。如果张力过小,会影响筒纱的成形;如果纱线张力过大,纱线和机件摩擦力增大,导致毛羽增多和纱线断头率增大,因此张力保持稳定具有重要意义^[2]。国内外学者对张力控制都提出了各种智能控制方法。郑忠杰等针对放卷张力随卷径改变提出了一种基于对象参数观测器的张力自适应控制方法^[3]。符燕辉等采用模糊 PID 控制方法实现纱线恒定张力输送^[4]。李琳等使用基于变速趋近律的滑模变结构控制策略优化张力控制,具有较强的鲁棒性^[5]。Chu 等研究了存在模型不确定性和外部干扰的

多电机分布式卷绕系统的滑模控制策略^[6]。Wang 等提出了前馈补偿和内模控制 PID 整定方法,将纱线张力保持在微边界范围内,提高了纺织工业产品质量^[7]。

纱线卷绕系统中存在的测量噪声和非线性控制干扰,传统的 PID 控制效果并不理想。为改善张力控制系统,课题组提出了一种基于卡尔曼滤波的模型参考自适应张力控制方法,实现了纱线张力的稳定控制,具有控制简单、抗干扰性强等特点。

1 纱线卷绕系统数学模型

纱线卷绕张力控制系统如图 1 所示。系统由放卷机构(放卷电机,放卷纱筒)、收卷机构(收卷电机,收卷纱筒)和张力调节系统(张力传感器,控制器)组成。

收稿日期:2021-04-26;修回日期:2021-07-13

第一作者简介:蒋林军(1995),男,浙江金华人,硕士研究生,主要研究方向为纱线张力控制。E-mail:1443274815@qq.com

收卷是纱线卷绕成型的最终环节,其张力稳定控制尤为重要。

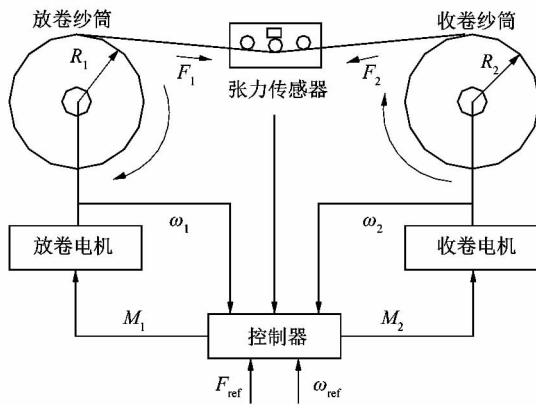


图1 纱线卷绕张力控制系统

Figure 1 Yarn winding tension control system

纱线卷绕设备运行中,收卷纱筒的半径不断增大,要保持系统运行线速度不变,收卷电机的转速需要逐渐减小,由转矩平衡原理可得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}(J_1\omega_1) &= M_1 + F_1R_1 - b_1\omega_1; \\ \frac{d}{dt}(J_2\omega_2) &= M_2 - F_2R_2 - b_2\omega_2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: J_1, J_2 为放卷纱筒和收卷纱筒的等效转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω_1, ω_2 为放卷和收卷的电机角速度, rad/s ; F_1, F_2 为纱线所受张力, N ; b_1, b_2 为粘性摩擦因数, $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$; M_1, M_2 为放卷电机和收卷电机的电磁转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

收卷机构的等效转动惯量 $J_2(t)$ 由收卷电机转动惯量 J_{20} 和收卷纱筒转动惯量 J_u 组成,即:

$$J_2(t) = J_{20} + J_u. \quad (2)$$

其中:

$$J_u = \int_{R_{20}}^{R_2} d(mR^2) = \int_{R_{20}}^{R_2} \rho d(VR^2) = \int_{R_{20}}^{R_2} R^2 \rho b \cdot 2\pi R dR = \frac{1}{2} \pi \rho b (R_2^4 - R_{20}^4). \quad (3)$$

式中: m 为纱线质量, kg ; ρ 为纱线密度, g/cm^3 ; R_2 为纱筒实时收卷半径, m ; R_{20} 为纱筒初始半径, m ; b 为纱筒宽度, m 。

由式(2)可知, $J_2(t)$ 是时间变量。同时,由角速度和线速度关系 $\omega_2 = v_2/R_2$ 可得

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{R_2} \frac{dv_2}{dt} - \frac{v_2}{R_2^2} \frac{dR_2}{dt}. \quad (4)$$

由式(1)~(3)得

$$F_2 = \frac{M_2}{R_2} - \frac{b_2 v_2}{R_2^2} + \left(\frac{J_2 v_2}{R_2^3} - 2\pi \rho b R_2 v_2 \right) \frac{dR_2}{dt} - \frac{J_2 dv_2}{R_2^2 dt}. \quad (5)$$

根据式(5)可得, M_2 和 R_2 是影响纱线卷绕系统张力变化的主要因素。收卷纱筒半径会随时间逐渐增大,可以通过传感器测量或者通过相关数学模型计算得到^[8]。课题组采用绝对式编码器测量纱筒半径,绝对式编码器安装在收卷纱筒筒芯同一水平线上,随着纱筒卷绕半径增大,与绝对式编码器相连的机械结构偏离初始位置,带动编码器转动相同的角度 θ ,示意图如图2所示。则实时半径 R 可以表示为

$$R = L \sin(\theta + \theta_0). \quad (6)$$

式中: θ_0 为起始角度, $(^\circ)$; L 为中心距, m 。

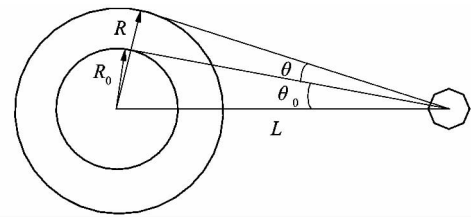


图2 纱筒半径实时测量示意图

Figure 2 Schematic diagram of real-time measurement of bobbin radius

通过设定系统目标卷绕张力和运行时的目标线速度,获取收卷纱筒实时半径、收卷电机输出转矩和转速,在控制器中建立收卷系统张力数学模型,求解收卷电机的输出转矩,实现纱线收卷时张力保持稳定状态。

2 基于卡尔曼滤波的 MRAC 张力控制策略

可调增益的模型参考自适应控制 (Lyapunov-MRAC) 原理,如图3所示^[9]。在同一参考输入 $y_r(t)$ 下,比较被控对象的输出 y_p 和参考模型的输出 y_m ,得到输出偏差 $e(t)$ 。根据 Lyapunov 稳定性理论调整可调增益 $k_c(t)$,或生成一个辅助输入叠加到被控对象输入信号上,使偏差 $e(t)$ 趋近于零。

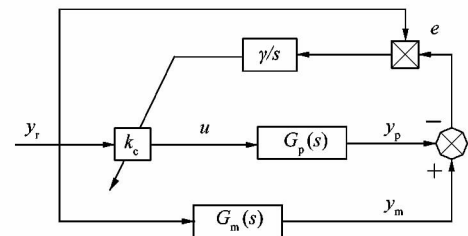


图3 可调增益 Lyapunov-MRAC 原理图

Figure 3 Schematic diagram of Lyapunov-MRAC with adjustable gain

设控制对象模型和参考模型的传递函数 $G_p(s)$, $G_m(s)$ 分别为:

$$G_p(s) = k_p \frac{N(s)}{D(s)} = k_p \frac{b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \cdots + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_0}; \quad (7)$$

$$G_m(s) = k_m \frac{N(s)}{D(s)} = k_m \frac{b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \cdots + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_0}. \quad (8)$$

式中: k_p 为被控对象增益, 根据系统特性假设为常数; $k_m, a_i, b_i (i=0, 1, \cdots, n-1)$ 为系统已知系数。

控制器增益 $k_c(t)$ 是用来补偿对象参数 k_p 的, 根据 Lyapunov 稳定性理论设计 $k_c(t)$ 的调节规律, 使得参考模型输出趋向于系统实际输出, 即输出误差 $e(t)$ 趋向于零。

$$e(t) = y_m(t) - y_p(t) = k \frac{N(s)}{D(s)} y_r(t). \quad (9)$$

式中: $k = k_m - k_c(t)k_p$ 。

由 Lyapunov 稳定性得自适应律:

$$\dot{k}_c(t) = \gamma e(t) y_r(t). \quad (10)$$

式中: γ 为自适应增益, $\gamma > 0$ 。

由图 3 可得, 系统的输入控制律为

$$u(t) = k_c(t) y_r(t).$$

纱线卷绕装备运行中伴随着各种噪声和干扰, 文中采用卡尔曼滤波器进行滤波处理。对于离散线性系统^[10]:

$$\left. \begin{aligned} x(k) &= Ax(k-1) + B[u(k) + w(k)]; \\ y_v(k) &= Cx(k) + v(k). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: 系统 k 时刻的状态为 $x(k)$, 输出为 $y_v(k)$; A, B 为纱线卷绕系统参数; C 为张力传感器系数; $w(k)$ 为过程噪声信号; $v(k)$ 为测量噪声信号; $w(k)$ 和 $v(k)$ 均为高斯白噪声。

图 4 为卡尔曼滤波原理。

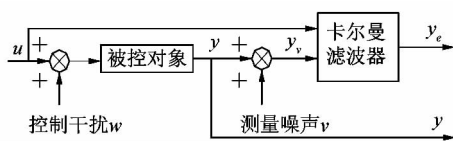


图 4 卡尔曼滤波原理图

Figure 4 Kalman filter principle diagram

离散卡尔曼滤波递推算法:

卡尔曼增益为

$$M_n(k) = \frac{P(k)C^T}{CP(k)C^T}. \quad (12)$$

先验误差协方差矩阵为

$$P(k) = AP(k-1)A^T + BQB^T. \quad (13)$$

更新误差协方差矩阵为

$$P(k) = [I_n - M_n(k)C]P(k). \quad (14)$$

滤波方程为

$$x(k) = Ax(k-1) + M_n(k)[y_v(k) - CAx(k-1)]. \quad (15)$$

滤波输出为

$$y_e(k) = Cx(k). \quad (16)$$

误差的协方差为

$$e_{cov}(k) = CP(k)C^T. \quad (17)$$

图 5 为基于卡尔曼滤波的 Lyapunov-MRAC 控制器。在普通 Lyapunov-MRAC 控制器的基础上, 将卡尔曼滤波器附加在被控对象输出值之后, 可以很好地去掉系统中的高频噪声和非线性干扰, 提高系统的稳定性和鲁棒性。

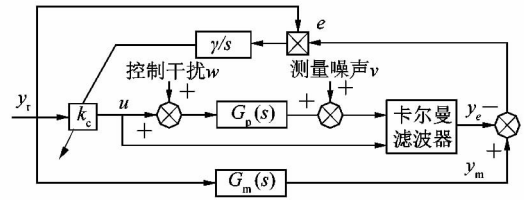


图 5 基于卡尔曼滤波的 MRAC 系统

Figure 5 MRAC system based on Kalman filter

3 仿真分析

在纱线收卷机构前安装张力传感器, 测量的张力值即为系统输出, 系统输入为收卷电机的转矩^[11], 通过 MATLAB 系统辨识工具箱得到被控对象的数学模型:

$$k_p G(s) = \frac{0.351}{s^2 + 1.135s + 0.561}. \quad (18)$$

设仿真采样时间为 1 ms, 采用 Z 变换将系统离散化, 离散状态方程描述为:

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B[u(k) + w(k)]; \\ y_v(k) &= Cx(k) + v(k). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} -1.135 & 0 & -0.561 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0.000 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0.000 \ 0 \ 0.351 \ 0].$$

仿真中控制干扰信号 $w(k)$ 和测量噪声信号 $v(k)$ 假设为白噪声信号, 幅值设为 0.01。输入信号为 1.0、频率为 1.5 Hz 的正弦信号。卡尔曼滤波器仿真参数取 $Q=1, R=1$ 。仿真时间为 3 s, 原始信号及带有噪声的原始信号、原始信号及滤波后的信号分别如图

6~7 所示。仿真结果表明卡尔曼滤波算法对测量噪声和控制干扰具有良好的滤波效果。

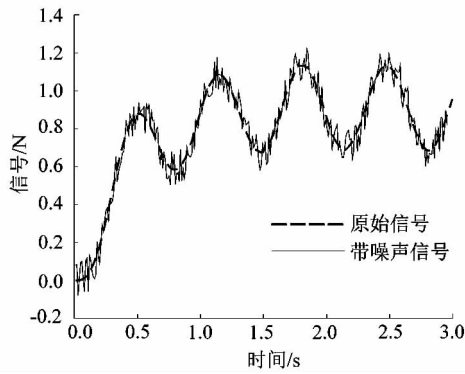


图 6 原始信号和带噪声信号

Figure 6 Original signal & noisy signal

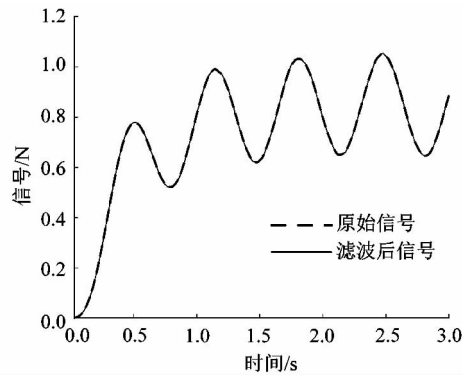


图 7 原始信号及滤波后信号

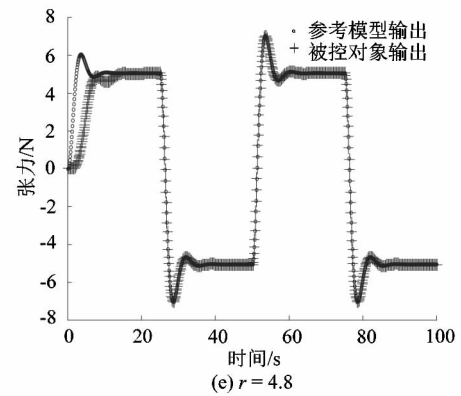
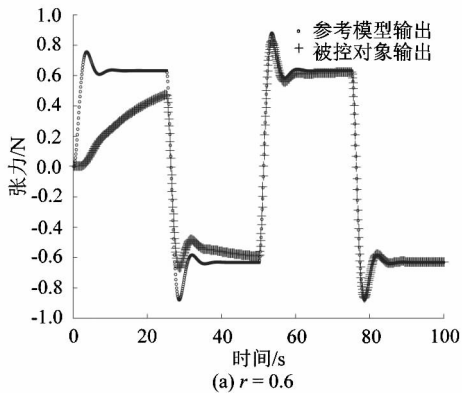
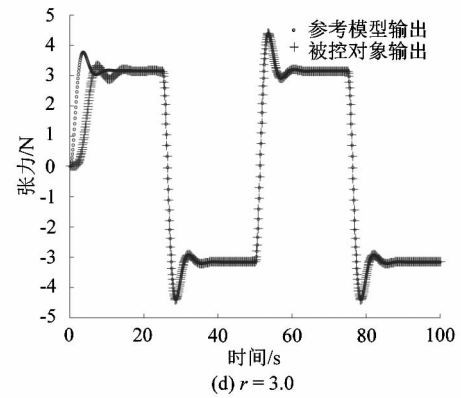
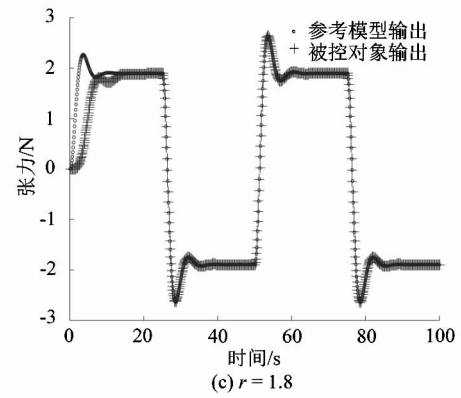
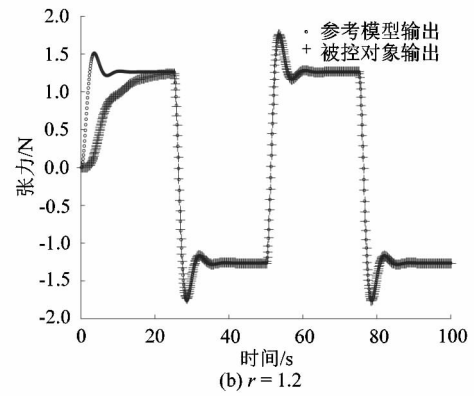
Figure 7 Original signal & filtered signal

MRAC 控制器中参考模型采用

$$k_m G(s) = \frac{k_m}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (20)$$

式中:取 $k_m = 1, a_0 = 1, a_1 = 1$ 。

仿真中设自适应增益 $\gamma = 0.1$, 跟踪输入信号为方波, 幅值 r 分别设为 0.6, 1.2, 1.8, 3.0, 4.8 和 6.0, 结果如图 8 所示。



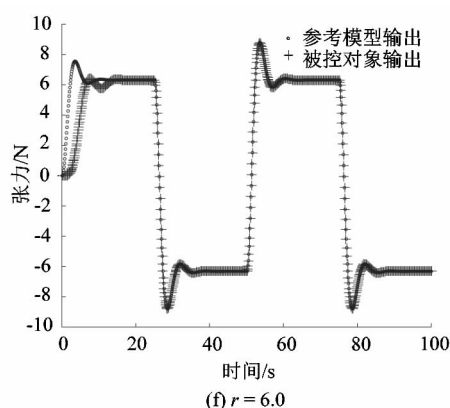


图8 基于卡尔曼滤波和 Lyapunov-MRAC 的
纱线收卷张力控制仿真

Figure 8 Simulation of yarn winding tension control
based on Kalman filter and Lyapunov-MRAC

由图8可得,在不同输入信号作用下,系统闭环输出都能快速跟随参考模型输出。该控制方法具有快速的动态响应、较强的自适应性和全局稳定性,在伴随着高频噪声和非线性干扰的纱线卷绕张力控制中表现出良好的性能。

4 结论

课题组研究了纱线卷绕系统张力控制方法,根据转矩平衡原理建立了纱线张力的数学模型,考虑到系统中存在测量噪声和控制干扰,设计了基于卡尔曼滤波的MRAC控制器,将参考模型作为卡尔曼滤波的数学模型进行离散递推,并将滤波器的结果和自适应率结合,调整被控对象的参数,实现纱线收卷张力的稳定

控制。MATLAB 仿真结果表明:基于卡尔曼滤波的MRAC 控制器具有稳定的跟踪性能,上升时间快,超调小,无明显震荡,具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] 韩帅,狄士春,杨俊杰. 嵌入式纱线张力控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2015(08):140-142.
- [2] HUANG J, GAO M Y, HE Z W. The application of PID controller with dead zone for yarn's constant tension control system [C]//IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Melbourne: IEEE, 2013:348-351.
- [3] 郑忠杰, 陈德传. 基于对象参数观测器的放卷张力自适应控制[J]. 杭州电子科技大学学报, 2013, 33(1):56-59.
- [4] 符燕辉, 陈刚, 柴明. 纱线恒张力喂送系统的设计[J]. 纺织机械, 2014(1):11-14.
- [5] 李琳, 林炯辉, 邹焱飏. 基于滑模变结构的张力控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2016(4):175-177.
- [6] CHU X Y, NIAN X H, FU X R. Tension control of web winding systems for speed-up phase [C]//2020 39th Chinese Control Conference. Shenyang: IEEE, 2020:1756-1761.
- [7] WANG Q, LI A Q, LI Y Y, et al. Microtension control for a yarn winding system with an IMC PID controller [J/OL]. Mechanics & Industry, 2019, 20(6):609-618.
- [8] 刘金华, 彭芳, 刘保军. 空气包覆纱机精密卷绕控制系统的设计及实现[J]. 自动化与仪表, 2013, 28(8):26-29.
- [9] ZHANG D, WEI B. Convergence performance comparisons of PID, MRAC, and PID + MRAC hybrid controller [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2016, 11(2):213-217.
- [10] 董立红. 基于卡尔曼滤波的刮板输送机张力控制系统[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(4):186-190.
- [11] 张立冬, 寇子明, 吴娟, 等. 输送带收卷装置设计及其恒张力控制研究[J]. 机电工程, 2021, 38(3):388-392.

(上接第63页)

子位置实际值,因此电机在高速运行时产生的延时误差还可以通过转速积分进行角度补偿来解决。

参考文献:

- [1] 程启明, 程尹曼, 王映斐, 等. 交流电机控制策略的发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9):145-154.
- [2] 顾聪, 王晓琳, 邓智泉. 一种基于双重锁相环的高速永磁同步电机转子位置估计误差全补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3):962-970.
- [3] 姜燕平. 多摩川旋转变压器原理及其解码[J]. 伺服控制, 2007(1):66-67.
- [4] 邹旭. 旋转变压器信号处理与设计[D]. 武汉:华中科技大学, 2008:39-43.
- [5] 钟再敏, 陈振挺. $\Delta-\Sigma$ ADC 在旋变解码与电流采样中的应用[J]. 微特电机, 2017, 45(10):9-12.
- [6] 李超, 杨益群, 郝旭耀, 等. 基于 $\Sigma-\Delta$ 调制原理的高精度旋变旋转

变量解码系统[J]. 自动化仪表, 2016, 37(3):17-22.

- [7] LIANG X X, WU T, SUN R Y, et al. Applications research of sigma-delta modulator in high precision measurement system of motor current [C]//2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Yangzhou: IEEE, 2017: 421-425, doi: 10.1109/ICEMI.2017.8265979.
- [8] 孙鹏, 马钧华. 基于 TMS320F28377S 的双位置解算系统及其应用[J]. 轻工机械, 2018, 36(4):48-52.
- [9] 郭新华, 庄兴明, 赵峰, 等. 旋转变压器解码芯片 AD2S1200 的解码原理与应用分析[J]. 微电机, 2012, 45(6):52-56.
- [10] 赵瑞杰, 陶学军, 刘德林, 等. 基于角度观测器的旋转变压器解码算法研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(4):1-3.
- [11] 陈大科. 单片集成 R/D 转换及数字处理技术研究与设计[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(3):25-29.
- [12] Analog Devices. AD2S1210 [EB/OL]. [2021-01-05]. https://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/data-sheets/AD2S1210_cn.pdf.