

精油微装量系统的卡尔曼滤波 CMAC-PID 控制

韩顺杰, 齐冀樊

(长春工业大学, 长春 130012)

摘要: **目的** 解决传统精油灌装机精度低、速度慢等问题。**方法** 设计一种基于卡尔曼滤波的 CMAC-PID 液体微装量自校正控制系统。首先采用卡尔曼滤波方法抑制噪声和干扰信号, 再利用有监督学习功能的 CMAC-PID 控制器来提供反馈控制、保持系统稳定, 并结合系统模型, 通过 Matlab 进行仿真验证。**结果** 仿真结果表明, 使用卡尔曼滤波 CMAC-PID 控制方法使系统具备了响应快、超调量小、抗干扰能力强等特点。**结论** 该方法在确保灌装精度的同时, 能够较好地满足系统对灌装速度的要求。

关键词: 微量灌装; 卡尔曼滤波; 小脑神经网络; PID; 质量反馈

中图分类号: TB486⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0007-06

CMAC-PID Control with Kalman Filter in Essential Oil Micro-filling System

HAN Shun-jie, QI Ji-fan

(Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of low precision and slow speed of the traditional essential oil filling machine. A CMAC-PID liquid micro-filling self-tuning control system based on Kalman filter was designed. Firstly, Kalman filter was used to suppress the noise and disturbance signals. Then the CMAC-PID controller with the function to supervise learning was adopted to provide feedback control and keep the system stable. Combined with the system model, simulation verification was carried out through Matlab. The simulation results showed that, by using the CMAC-PID control method with Kalman filter, the system was characterized by fast response, small overshoot and strong anti-interference ability. The method can ensure the filling speed required by the system while ensuring the filling accuracy.

KEY WORDS: micro-filling; Kalman filter; cerebellar neural network; PID; quality feedback

中国包装机器产业起步较晚, 但经过改革开放 30 多年的发展和成长后异军突起^[1]。目前, 随着我国灌装设备向高速化、集成化方向的发展, 小容量精油灌装系统能实现在同一台设备上完成整瓶、送瓶、灌装、封盖、出瓶这一系列的动作^[2]。这些动作的各个环节会直接影响灌装效率和产品质量。由于灌装机械长时间工作导致器件老化、灌装阀门轻微漏气以及高速灌装带来的气泡所造成的影响, 给灌装系统带来一定的灌装误差, 所以有必要进行二次微量灌装, 补偿一次灌装带来的误差^[3-5]。文中针对上述情况, 在分析灌装机原理和灌装工艺技术的基础之上, 设计一种卡尔曼滤波的 CMAC-PID 控制器, 该方法对液体质量进行在线称量, 将超过误差阈值的信号经过优化

后, 转化成伺服电机的控制信号, 以实现精油灌装系统精确、快速灌装。

1 灌装设备的工作原理及组成

该系统主要用于灌装具有一定粘度、价格昂贵的液体, 如精油、香水等^[6], 是以小容量灌装为主的全自动灌装机。灌装机系统结构见图 1。

把待灌装的精油灌装瓶放到进瓶转盘中, 主控制器控制进瓶转盘顺时针转动, 灌装瓶随进瓶转盘做离心运动, 经与转盘的拨瓶杆相互作用后依次进入输送带。当灌装瓶达到 1 号工位时, 转盘开始在主控制器作用下顺时针运动, 2 号工位有光电传感器和称量传感器, 光电传感器检测该工位是否有灌装瓶, 检测得

收稿日期: 2016-11-10

基金项目: 吉林省科技厅科技发展计划 (20150204023GX)

作者简介: 韩顺杰 (1972—), 女, 长春工业大学教授, 主要研究方向为生产过程智能控制、模式识别等。

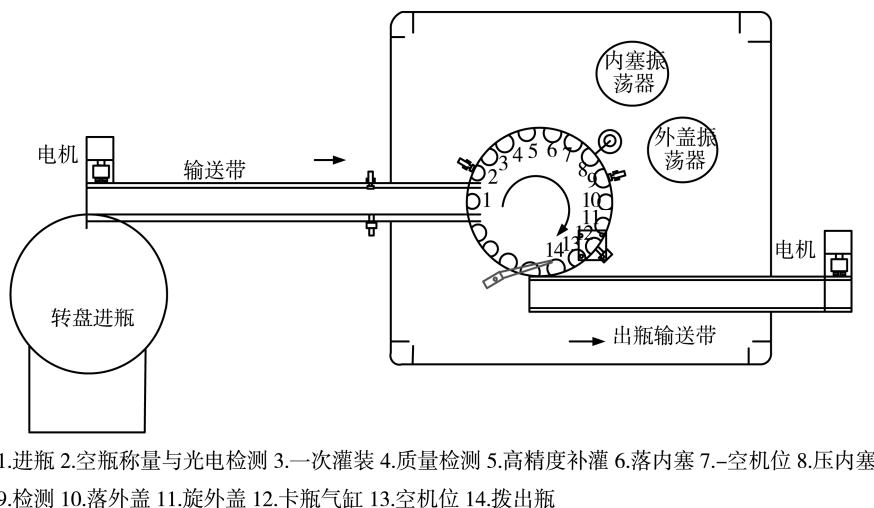


图1 灌装机系统原理结构
Fig.1 Principle and structure diagram of filling machine system

出的信号传入主控制器中,主控制器根据所接收的信号为进入3号工位灌装做准备,实现有瓶灌装、无瓶不灌装。称量传感器称取空灌装瓶的质量,将检测信号输入主控制器中,为5号工位二次微量灌装提供可靠数据。3号工位是精油灌装环节,该灌装环节是由伺服电机、剂量调节器以及链轮组成。其中,伺服电机接到灌装指令后通过链轮带动剂量调节器运动,剂量调节器做离心运动使剂量缸活塞连杆做上下往复运动,达到精油灌装目的。4号工位是对灌装后的灌装瓶进行称量,把检测出来的结果与2号工位检测的数据进行比较,当灌装误差超出0.5%时,5号工位启动二次补灌环节,否则灌装系统直接进入6号落内塞工位。进入6号工位时,精油灌装环节已完成^[7-8]。

2 精油微装量控制系统

2.1 系统的设计

精油微装量控制系统采用位置环、电流环双闭环控制方式。利用常规PID控制方法,完成电流环中快速电流调节^[9];位置环利用卡尔曼滤波方法的小脑神经网络(CMAC)与PID控制算法,保证控制过程系统

的鲁棒性,提高系统抗噪声和干扰信号的能力。

该控制方法是以永磁低速同步伺服电机作为研究对象,在实际灌装过程中存在着各方面扰动的影响(如电源扰动),系统的实际灌装精度会受到影响。在系统存在干扰(环境干扰和电源扰动)的情况下,将会产生灌装生产测量误差。精油微装量控制系统结构见图2,选择标准值(给定值)与测量值的偏差 e 作为CMAC-PID控制器的输入,将输出值送入电流环中,使用电流PID控制器输出PWM控制信号,对伺服电机进行控制,以满足系统精确灌装的要求。

2.2 永磁低速同步伺服电机的数学模型^[10-11]

由于永磁低速同步电机的结构具有特殊性,为简化分析过程,做出下面4种假定:转子轴向气隙磁场的空间分布是正弦分布;不考虑定子铁芯饱和情况;不考虑铁芯涡流、磁滞等带来的损失;转子绕组不计阻尼。

$d-q$ 坐标系下电压平衡方程为:

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d - \omega L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ U_q = R_s i_q - \omega L_d i_d + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

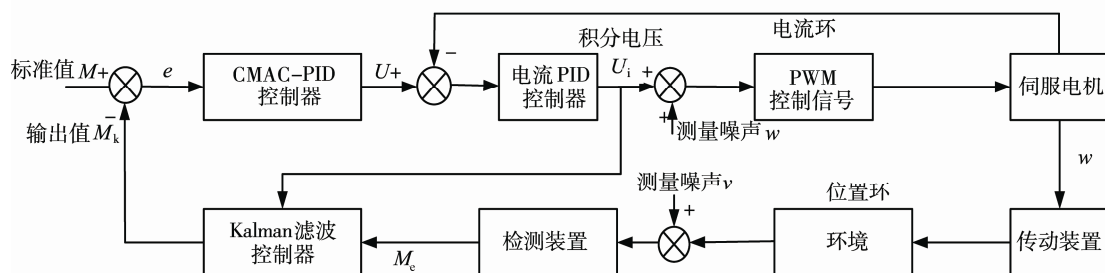


图2 精油微装量控制系统结构
Fig.2 Structure of essential oil micro-charge control system

式中：\$U_d, U_q\$ 分别为 \$d, q\$ 轴电压（\$d\$ 轴为电机磁场的直轴，\$q\$ 轴为电机磁场的交轴）；\$i_d, i_q\$ 分别是 \$d, q\$ 轴电流；\$L_d, L_q\$ 分别为 \$d, q\$ 轴电感；\$R_s\$ 为定子电阻。

转矩平衡方程为：

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_l = \frac{3}{2} p \psi_a i_q \quad (2)$$

式中：\$T_e\$ 为电磁转矩；\$J\$ 为转动惯量；\$\omega\$ 为转子机械角速度；\$B\$ 为摩擦系数；\$T_l\$ 为负载转矩；\$p\$ 为极对数；\$\psi_a\$ 为永磁体励磁磁链。

联立式(1)—(2)，并通过 Laplace 变换求得 \$S\$ 域中永磁同步电机的数学模型：

$$G_M(s) = \frac{K_f K_u \frac{np}{Js} \frac{1}{J}}{\frac{L}{R_s} s + 1} = \frac{K_f K_u np}{J^2 L s^2 + J^2 R_s s} \quad (3)$$

式中：\$G_M(s)\$ 为永磁同步电机模型传递函数；\$L\$ 为同步电机电感值；\$n, K_f, K_u\$ 为电机系统常数。

3 基于卡尔曼滤波的 CMAC-PID 控制方法

3.1 CMAC-PID 控制原理

卡尔曼滤波的 CMAC-PID 控制方法将 Kalman 滤波器和 CMAC 神经网络与常规 PID 相结合，利用 CMAC 和 PID 来实现前馈控制与反馈控制，采取有监督的学习方式。前馈控制应用在 CMAC 控制器中，这样被控对象的逆动态模型就可以被解读出来，负反馈控制由常规 PID 控制器来实现，针对系统中存在的控制干扰、噪声信号难于消除的问题，选择 Kalman 滤波方法对这些干扰信号进行滤波处理，从而使灌装系统具有较好的稳定性，大大减少误差干扰。

由于灌装机械长时间使用导致的器件老化、灌装阀门轻微漏气以及高速灌装带有的气泡所造成的影响，使精油一次灌装的精度并不能够达到要求。文中的二次补灌系统是以采集 2 号工位空瓶质量和 4 号工位液体灌装后的质量差值为数据的在线自校正技术为准则，进行二次微量灌装。采用的卡尔曼滤波 CMAC-PID 控制结构见图 3。

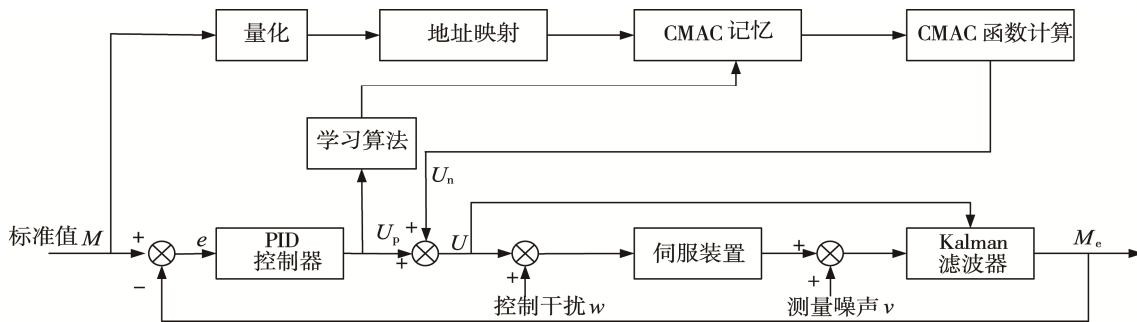


图 3 卡尔曼滤波 CMAC-PID 控制结构
Fig.3 Kalman filter and CMAC-PID control structure

精油装量控制系统首先将标准值 \$M\$ 在小脑神经网络模型中完成各项预处理，在每次控制过程周期完成时，系统会自动得到 CMAC 相对应输出的数值，其数值与系统输入 \$U_p\$ 进行对比，校正权重，进入下一阶段学习过程。学习是为了使系统输入 \$U_p\$ 与 CMAC 的输出之差最小。学习结束后，CMAC 会产生灌装系统的总控制输出 \$U\$。总输出控制量 \$U\$、控制干扰 \$w\$ 以及测量噪声 \$v\$ 通过卡尔曼滤波器作用，可以估算出时域上的输出值 \$M_e\$。

3.2 卡尔曼滤波原理

考虑到灌装伺服系统在灌装操作过程中，由于操作过程中的干扰信号会影响到系统的稳定性，为抑制操作过程中的干扰信号对系统的影响，文中利用卡尔曼滤波器对操作过程中的干扰信号进行滤波，从而提高其抗干扰性^[12-13]。

在 \$k\$ 时刻的状态矢量方程：

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}u(k-1) + \mathbf{w}(k) \quad (4)$$

在 \$k\$ 时刻的预测矢量方程：

$$\mathbf{y}_v(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (5)$$

式中：\$\mathbf{A}\$ 为系统的状态矩阵；\$\mathbf{B}\$ 为控制矩阵；\$\mathbf{C}\$ 为输出观测矩阵；\$\mathbf{w}(k)\$ 为 \$k\$ 时刻过程噪声信号；\$\mathbf{v}(k)\$ 为 \$k\$ 时刻观测噪声信号；\$u(k)\$ 为 \$k\$ 时刻对系统的控制量。

由式(4)—(5)的状态、预测方程可以得到下一状态、预测方程为：

$$\hat{\mathbf{x}}^-(k) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k-1) + \mathbf{B}u(k-1) \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \hat{\mathbf{x}}^-(k) + \mathbf{K}[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}^-(k)] \quad (7)$$

式中：\$\hat{\mathbf{x}}^-(k)\$ 为先验状态估计；\$\hat{\mathbf{x}}(k)\$ 为后验状态估计；\$\mathbf{K}(k)\$ 为 \$k\$ 时刻卡尔曼滤波的增益状态估计；\$\mathbf{H}\$ 为观测系统参数矩阵。根据估计均误差最小的原则可以推导参数更新方程为：

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}^-(k)\mathbf{H}^T[\mathbf{H}\mathbf{P}^-(k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (8)$$

$$P(k)=[I-K(k)H]P^-(k) \quad (9)$$

$$P^-(k)=AP(k-1)A^T+Q \quad (10)$$

式中: I 为单位矩阵; R 为测量噪声协方差矩阵; $P^-(k)$ 为先验估计误差协方差; $P(k)$ 为后验估计误差的协方差; Q 为过程激励噪声协方差矩阵。

3.3 CMAC-PID 控制算法

文中的二次微量灌装系统是利用 CMAC-PID 来实现系统控制的。前馈控制应用在小脑模型神经控制器中; 常规增量式 PID 控制器实现负反馈控制, 使灌装系统具有很好的稳定性, 大大减少误差干扰^[14]。在该系统控制算法中:

$$U_n(k)=\sum_{i=1}^c w_i a_i \quad (11)$$

$$U(k)=U_n(k)+U_p(k) \quad (12)$$

式中: w_i 为计算中的加权值; a_i 为二进制选择向量; c 为泛化参数; $U_n(k)$ 为对应 CMAC 的输出; $U_p(k)$ 为 PID 的输出; $U(k)$ 为 CMAC-PID 的控制输出。

CMAC 权值更新算法为:

$$E(k)=\frac{1}{2}[U_n(k)-U(k)]^2 \cdot \frac{1}{c} \quad (13)$$

$$\Delta w(k)=-\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w}=\eta \frac{U_p(k)}{c} a_i \quad (14)$$

$$w(k)=w(k-1)+\Delta w(k)+\partial[w(k)-w(k-1)] \quad (15)$$

式中: $E(k)$ 为加权平方误差; η 为网络学习速率, $\eta \in (0, 1)$; ∂ 为反应惯量, $\partial \in (0, 1)$; $\Delta w(k)$ 为计算所得的权值误差; $w(k)$ 为第 k 次迭代的权值。

在系统准备使用时, 令 $w=0$, 此时, $U_n=0$, $U=U_p$, 这种条件下产生的输出结果是传统式 PID 控制器的结果。通过对 CMAC 的学习, 使 PID 输出的控制量 $U_p(k)$ 达到最小, 让 CMAC 产生的输出控制量 $U_n(k)$ 和 $U_p(k)$ 的值趋近于 0。

4 仿真及分析

4.1 仿真参数的设置

采用 Matlab R2014a 进行文中算法的仿真^[15], 该控制系统模型包括伺服电机及检测装置, 其中 $L=0.15$ mH, $J=5.1 \times 10^{-5}$ kg·m², $B=7.0 \times 10^{-4}$ N·m·s/rad, $i_d=3.0$ A, 求得该系统的传递函数为:

$$G_p(s)=\frac{200}{s^2+30s} \quad (16)$$

CMAC 神经网络参数: 迭代次数 $N=100$, $c=5$, $\eta=0.1$, $\partial=0.04$, 激活神经元个数 $M=2$, 比例系数 $K_p=48.25$, 积分系数 $K_i=0.01$, 微分系数 $K_d=0.58$ 。

对实验对象离散化, 设定采样时间为 1 ms, 设定式(4)~(5)中的各个参数矩阵:

$$A=\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -30 \end{pmatrix}, B=(0.0001, 0.197)^T, C=(1, 0)。$$

设定干扰信号 $w(k)$ 和噪声信号 $v(k)$ 均是协方差为 1, 幅值为 0.02 的高斯白噪声。仿真中的噪声为随机白噪声。给定输入信号为周期 0.5 s 的方波信号, 方波信号持续输出 2 s, 直至仿真实验结束。

4.2 仿真结果及分析

二次微量灌装系统对灌装的精度要求很高, 这就使得控制电磁阀的导通与断开要足够灵敏。令系统的输入信号为方波信号, 当系统有高电平输入时, 控制精油液体的电磁阀导通。当系统有低电平输入时, 控制精油液体的电磁阀关断。考虑到在实际灌装过程中的环境噪声等影响, 因此在有噪声的条件下对卡尔曼滤波的 CMAC-PID 进行方波信号跟踪。实验结果见图 4。CMAC-PID 复合控制方法的输出以及控制的总输出情况见图 5。当测量过程存在控制干扰和测量噪声时加入卡尔曼滤波器, 误差跟踪见图 6。

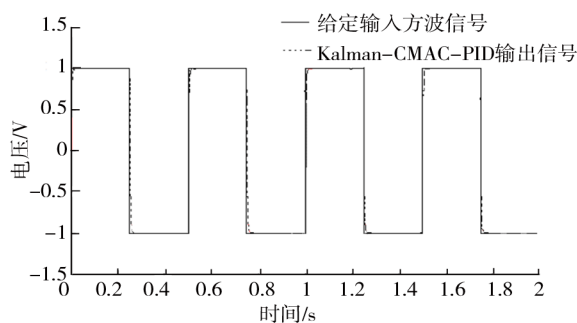
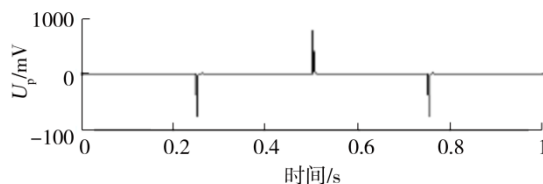
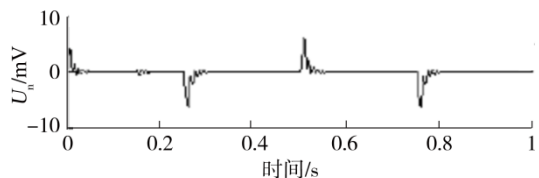


图 4 控制输入方波信号与输出信号

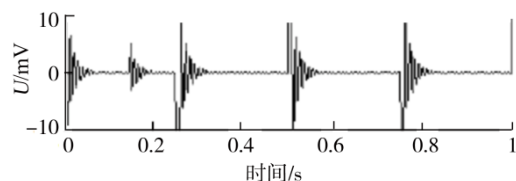
Fig.4 Control input square wave signal and output signal



a PID 控制器输出控制信号 U_p



b CMAC 控制器输出控制信号 U_n



c 输出控制信号 U

图 5 CMAC-PID 控制器输出控制信号

Fig.5 CMAC-PID controller output control signal

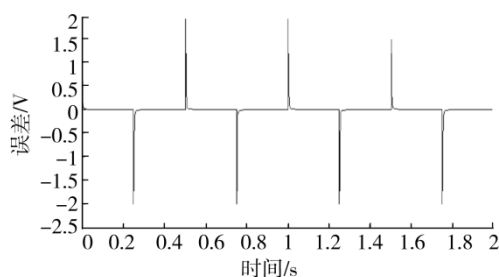


图6 加入卡尔曼滤波器的误差跟踪

Fig.6 Error track with kalman filter

由图4可知,方波信号跟踪中的PID控制器主要作用于第1周期的控制,加入CMAC控制器后,方波跟踪中几乎没有超调,跟踪方波的效果更为接近。图5中 U 为总输出, U_n 为CMAC控制器学习之后的输出, U_p 为经Kalman滤波后的PID控制器的输出。由图5可看出, U_p 可以在极短的时间内迅速响应,经CMAC控制器学习后的输出 U_n 在第1个周期略有超调,但经过CMAC的不断学习,第2,3周期的控制输出没有超调,跟踪方波效果理想,响应速度较快。总输出 U 在 U_n 与 U_p 的共同作用下,虽然第1周期略有超调,此后的几个周期都输出平稳。由图6可知,卡尔曼滤波器可以削减每个周期中的控制干扰信号与测量噪声信号,由于控制输入信号是周期性方波信号,因而信号突然变化时会有持续时间很短的误差,之后随着CMAC的不断学习,误差逐渐减小。

5 结语

设计了利用卡尔曼滤波的CMAC-PID控制方法的液体微量量控制系统,并结合系统模型对该方法进行仿真实验。仿真实验结果表明,使用卡尔曼滤波CMAC-PID的控制方法能够对二次补灌的精油系统进行精确快速的微量灌装。在系统存在一定干扰的情况下,卡尔曼滤波器可以有效地对控制干扰和测量噪声进行抑制,小脑神经网络模型能够使被干扰的控制系统在短时间内达到稳定。该方法控制响应快、超调量小、抗干扰强,在满足灌装精度的同时,兼顾生产工艺对灌装快速性的要求。CMAC-PID控制方法虽未经实际检验,但通过仿真实验验证了该系统能够平稳、快速地响应控制信号,可为相关伺服控制系统设计提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 戴宏民,戴佩燕,周均. 中国包装机械发展的成就及问题[J]. 包装学报, 2012, 14(1): 61—65.
DAI Hong-min, DAI Pei-yan, ZHOU Jun. The Achievements and Problems of China's Packaging Machinery Development[J]. Packaging Journal, 2012,

- 14(1): 61—65.
- [2] 黄小林,陈秀,徐贞,等. 新型袋式气调包装机的设计[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(1): 34—37.
HUANG Xiao-lin, CHEN Xiu, XU Zhen, et al. Design of New Bagged Atmosphere Packaging Machine[J]. Packaging and Food Machinery, 2016, 34(1): 34—37.
- [3] 段文军,石卓栋,徐志刚,等. 基于双闭环容积式自校正灌装设备控制系统设计及应用[J]. 包装工程, 2013, 34(21): 80—84.
DUAN Wen-jun, SHI Zhuo-dong, XU Zhi-gang, et al. Design and Application of Control System Based on Double Closed-loop Volumetric Self-correcting Filling Equipment[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(21): 80—84.
- [4] 李疆. 气动旋转式自动定量灌装机的研制[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 144—145.
LI Jiang. Development on Pneumatic Rotating Filling Machines of Fixed Amount[J]. Food and Machinery, 2012, 28(1): 144—145.
- [5] 杨政通,李少波,何玲,等. 颗粒黏稠物料自动灌装机控制系统研究[J]. 食品工业, 2016(7): 234—236.
YANG Zheng-tong, LI Shao-bo, HE Ling, et al. Study on Control System of Automatic Filling Machine for Granular Viscous Materials[J]. Food Industry, 2016(7): 234—236.
- [6] 杨振昊,张裕中. 高黏稠物料真空定量灌装设备核心部件的设计与流量分析[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 1—6.
YANG Zhen-hao, ZHANG Yu-zhong. Core Component Design of High Viscosity Material Vacuum Quantitative Filling Equipment and Flow Analysis[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 1—6.
- [7] 李长坤,吴波,牛灿. 灌装参数对活塞式灌装系统灌装效果影响的实验研究[J]. 包装工程, 2013, 34(17): 125—129.
LI Chang-kun, WU Bo, NIU Can. Effects of Filling Parameters on Filling Performance of Piston Filling System[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(17): 125—129.
- [8] 袁守彬,王文武,王一冰,等. 液体装量自校正灌装系统设计[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(6): 39—42.
YUAN Shou-bin, WANG Wen-wu, WANG Yi-bing, et al. Design of Self-calibrating Filling System for Liquid Loading[J]. Journal of Packaging and Food Machinery, 2015, 33(6): 39—42.
- [9] 杨永红. 伺服控制技术在灌装机上的应用[J]. 伺服控制, 2011(8): 97—98.
YANG Yong-hong. Application of Servo Control Technology in Filling Machine[J]. Servo Control, 2011(8): 97—98.
- [10] STABILE A, ESTIMA J O, BOCCALETTI C, et al. Converter Power Loss Analysis in a Fault-Tolerant Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive[J]. IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1984—1996.
- [11] CHO Y, LEE K B, SONG J H, et al. Torque-Ripple Minimization and Fast Dynamic Scheme for Torque Predictive Control of Permanent-Magnet Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2182—2190.
- [12] 柴光远, 刘振华, 赵鹏兵, 等. 卡尔曼滤波器在电液位置伺服控制系统中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(8): 36—38.
- CHAI Guang-yuan, LIU Zhen-hua, ZHAO Peng-bing, et al. Application of Kalman Filter in Electro-hydraulic Position Servo Control System[J]. Combined Machine Tool & Auto Machining Technology, 2010(8): 36—38.
- [13] 朱静涛, 曾喆昭, 肖强英. 改进卡尔曼滤波的 PID 控制[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(9): 245—248.
- ZHU Jing-tao, ZENG Zhe-zhao, XIAO Qiang-ying. PID Control of Improved Kalman Filter[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(9): 245—248.
- [14] 王旭, 邱飞岳. 基于卡尔曼滤波 CMAC-PID 的视力检查距离控制系统[J]. 计算机应用, 2011, 31(9): 2589—2592.
- WANG Xu, QIU Fei-yue. Application of CMAC-PID to Visual Inspection Distance Control System Based on Kalman Filtering[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(9): 2589—2592.
- [15] 刘金琨. 先进PID控制Matlab仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- LIU Jin-kun. Advanced PID Control Matlab Simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.