

基于 PSO-TSM 的伺服电机精准调距控制

裴水旺^{1,2,3}, 刘松凯^{2,3}, 杨明毅^{2,3}, 祁臣勇⁴, 郭小兵⁴

(1. 沈阳化工大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110142;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;

4. 泸州北方化学工业有限公司, 四川 泸州 646003)

摘要: 球(扁)形药是狙击枪弹的重要动力能源,其弧厚一致性直接关系到枪弹的弹道性能。目前球(扁)形药的挤压成型工艺主要应用于橡胶行业的开炼机,虽能实现功能性挤压,但存在挤压精度低、成型一致性差等问题。针对上述问题,开发了一套基于粒子群优化-终端滑模(PSO-TSM)的挤压机辊距智能调节系统,该系统采用粒子群优化(PSO)算法对终端滑模(TSM)控制器中多参数进行迭代优化,达到精确调节辊距、提高弧厚一致性的目的。通过挤压试验验证,与开炼机相比,球(扁)形药药粒弧厚误差控制在 ± 0.02 mm,挤压合格率达到95%以上。

关键词: 伺服电机; 球(扁)形药; 精密挤压; 粒子群优化; 终端滑模

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)03-0056-09

doi: 10.12177/emca.2022.180

Precision Pitch Control of Servo Motor Based on PSO-TSM

PEI Shuiwang^{1,2,3}, LIU Songkai^{2,3}, YANG Mingyi^{2,3}, QI Chenyong⁴, GUO Xiaobing⁴

(1. College of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;

4. Luzhou North Chemical Industries Co., Ltd., Luzhou 646003, China)

Abstract: The oblate spherical powder is an important power source of sniper ammunition, the consistency of thickness is directly related to the ballistic performance of the projectile. At present, the extrusion molding process of the oblate spherical powder is all applied in rubber industry. Although the functional extrusion can be achieved, there are some problems such as low extrusion accuracy and poor molding consistency. Aiming at the above problems, a set of extruding machine roll distance accurate adjustment system based on particle-swarm optimization-terminal-sliding-mode (PSO-TSM) is developed. In this system, particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to optimize multiple parameters in terminal sliding mode (TSM) controller iteratively, so as to achieve accurate adjustment of roll distance and improve the consistency of arc thickness. It is verified by extrusion test that the thickness error of the oblate spherical powder is controlled within ± 0.02 mm, and the pass rate of extrusion reaches more than 95%.

Key words: servo motor; oblate spherical powder; precision flattening; particle swarm optimization; terminal sliding mode (TSM)

收稿日期: 2022-09-18; 收到修改稿日期: 2022-10-17

作者简介: 裴水旺(1993—),男,硕士,研究方向为自动化产线与智能控制。

0 引言

球(扁)形药是一种能量密度高、燃烧速度快、弧厚薄的球(扁)形发射药。世界各国为了获得更高的射击精度并实现更远的射击距离,在枪弹发射药的制备工艺上实现了巨大提高,其中欧洲 BOWAS 公司具有成套发射药自动化、连续化生产线,实现了产品质量一致性,有效提升了枪弹射击性能。瑞士硝基化学公司威明斯(Wimmis)工厂 2001 年建成生产能力为 1 000 t/年的发射药生产线,基本实现了自动化控制。20 世纪 70 年代,美国就开始发射药制造技术的现代化改造,生产线上广泛使用在线检测技术、自动控制技术及工艺优化等技术,旨在保证枪弹击发后的射击精度。美国奥林公司已采用先进连续化、数字化成球生产工艺取代间断法球扁药制造工艺,工艺控制技术高度自动化、数字化。2015 年美国完成了“弹药工业基础战略计划”,通过多种质量控制优化技术及方式提高弹药生产质量,解决了因发射药产品质量不稳定影响射击精度、射击距离^[1]的问题。

我国学者对发射药的研究也取得了重大成果。宋亚莘等^[2]选用新型钝感剂材料制备的发射药不仅渐增性燃烧效果好且长储稳定性优良。肖忠良等^[3]通过以硫氢化钠作为脱硝剂,经脱硝工艺后发射药的燃烧情况得到了较大的改善。张洪林等^[4]提出在原料混合硝酸钾的方法来增加药粒内部的燃烧面积,提高燃烧时的渐增性。袁伟忠等^[5]研究通过在生产过程中添加脱水剂,增加驱溶时间,也能够极大地提高球扁药装填密度。

球(扁)形发射药的生产主要有两种,即“内溶法”和“挤压法”,其成形工艺不同于粒状药^[6],前面学者的研究成果大多是通过内溶法制备。上述 2 种球扁药生产所需设备不是精确地指定生产模具,导致了球扁药在生产过程中出现弧厚波动较大的现象。在对枪弹发射药进行深入研究后发现通过提高装药量和能量利用率可以获得较好的射击效果。肖正刚等^[7]试验证明精确挤压的球(扁)形药能够提高发射药的装填密度。其中弧厚是球(扁)形药的重要技术指标之一,刘佳等^[8]研究表明球(扁)形发射药弧厚尺寸不均一性易

造成最大膛压及初速的跳差,从而影响枪械寿命及射击精度,因此在挤压时保证成型的一致性具有重要意义。

目前挤压成型主要应用于橡胶行业的开炼机,其调距方法有 PID 调距、自适应控制调距、智能控制调距等。PID 调距通常对引起误差的因素进行综合调整^[9-10],达到期望,具有结构简单和容易实现的优点,但 PID 控制在有干扰时,存在鲁棒性交叉的现象难以实现快速跟踪与稳定之间的动态平衡;自适应控制^[11]则是对系统参数结构要求较高,在尚未完全清楚系统参数和结构的情况下,需要对位置结构及参数作出准确预测;智能控制^[12]则需要多种控制相互作用才能提高其精确性,关键在于模糊量与精确量之间的准确转换。而目前球(扁)形药存在理论研究不充分、控制模型不明确、生产工艺参数调控依靠人工经验^[13]等问题更加表明不适合该方法的研究。此外,橡胶特性与球扁药材质也存在巨大差异,这些设备无法用于球(扁)药的挤压成型。

球(扁)形药的挤压成型工艺是药粒流经 2 个相对转动的碾辊时在挤压和摩擦下得到弧厚基本一致的药粒。目前挤压工序存在^[14]:(1)现场操作人员多、劳动强度大;(2)辊距设置依靠人工经验,准确性差;(3)弧厚一致性受人因素为影响较大。针对上述问题本文设计了一套基于粒子群-终端滑模(PSO-TSM)的高精密挤压控制系统,该系统利用粒子群(PSO)算法对终端滑模(TSM)参数进行迭代优化,经由永磁同步电机(PMSM)实现辊间距的精确调节,保证挤压成型的一致性。

1 模型理论基础

1.1 PMSM 模型

在采用 $i_d = 0$ 的矢量控制下,由 ABC 坐标转换得到 $d-q$ 坐标系下 PMSM 的数学模型。在 ABC 坐标系下电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_A 、 u_B 、 u_C 为定子相电压; R_s 为定子电阻; i_A 、 i_B 、 i_C 为定子相电流; p 为微分算子 $\frac{d}{dt}$; ψ_A 、 ψ_B 、

ψ_c 为定子磁链。

以 A 相为例变换到 d - q 坐标系, 可得 d - q 坐标系下 $\dot{i}_d$ 、 $\dot{i}_q$ 为

$$\begin{cases} \dot{i}_d = -\frac{1}{L_d}(R_s i_d - u_d - \omega_r L_q i_q) \\ \dot{i}_q = -\frac{1}{L_q}(R_s i_q - u_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f) \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_d 、 i_q 和 u_d 、 u_q 分别为电机 d 、 q 轴电流和电压; R_s 为定子电阻; L_d 、 L_q 分别为等效到 d 、 q 轴的定子电感; ω_r 为电机角速度; ψ_f 为电机的永磁磁通。

电机运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (3)$$

式中: J 为转动惯量; T_e 为电磁转矩; T_L 为机械负载转矩; B 为阻尼系数; ω_m 为电机的机械角速度。

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (4)$$

式中: p 为极对数。

1.2 滑模控制

滑模控制 (SMC) 是一种非线性控制方式, 具有较强的动态响应性、抗干扰能力和强鲁棒性等^[15] 优点, 在现代工业中受到广泛应用。SMC 的思想是令系统状态从滑模面外运动到滑模面上, 之后系统状态保持在滑模面上做理想的滑模运动, 运动方程转变为

$$\dot{e} + \beta e^{\frac{\eta}{\xi}} = 0 \quad (5)$$

现假设速度控制环、电流环和逆变器均为理想情况, 设 PMSM 位置的状态误差可以表示为

$$\begin{cases} e = \theta^* - \theta \\ \dot{e} = \dot{\theta}^* - \dot{\theta} \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ^* 为电机的期望位置; θ 为实际位置。

为了能够提高 PMSM 位置跟踪精度和良好的动态特性, 控制器的滑模面设计为快速 TSM, 其表达形式:

$$s = \dot{e} + \beta e^{\frac{\eta}{\xi}} \quad (7)$$

式中: β 为大于 0 的常数, η 、 ξ 为大于 0 的奇数且 $1 < \xi/\eta < 2$ 。

同时采用连续快速趋近律, 即:

$$\dot{s} = -k[(b^{|s|} - 1) - |s|^{\alpha}] \text{sign}(s) \quad (8)$$

式中: $\alpha \in (0, 1)$; $k > 0$; $b > 1$ 且 $b = 1 + k$ 。

可得 PMSM 位置外环的 SMC 为

$$i_q = \frac{2J}{3p\psi_f} \int_0^t \left\{ \left(\frac{B}{J} - \frac{\beta\eta}{\xi} e^{\frac{\eta}{\xi}-1} \right) \dot{\omega} + k[(p^{|s|} - 1) - |s|^{\alpha}] \text{sign}(s) \right\} d\tau \quad (9)$$

式中: ξ 、 η 均为大于 0 的奇数, $\eta < \xi$ 。

2 PSO-TSM 控制器设计

2.1 PSO 算法

粒子群算法是一种进化迭代算法, 其核心思想是通过模仿鸟类的觅食行为, 将空间中的每一只鸟抽象为一个粒子, 每个粒子代表求解问题的可行解。多个粒子组成为一个种群, 每个粒子均有各自的位置、速度和适应度函数值信息。在每次迭代的过程中, 每个粒子根据自身位置、个体极值和全局极值来调整速度和方向寻找最优位置^[16], 使得飞行轨迹向最优位置逼近^[17]。

PSO 算法首先对种群中的粒子进行初始化, 随机赋予每个粒子不同的初速与位置, 在寻优过程中每个粒子代表待优化问题的可能解空间。设 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij})$ 、 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ij})$ 分别表示第 i 个粒子在运动过程中的位置和速度, $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ij})$ 、 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gj})$ ^[18] 分别表示个体粒子的最佳位置和种群最佳位置。每个粒子的飞行速度 V 及位置 P 会实时与整个群体进行信息交换并进行动态调整^[19]。随着不断地更新迭代, 会不断更新个体粒子的最佳位置 P_i 和种群最佳位置 P_g ^[20], 其速度和位置更新表达式为

$$\begin{cases} V_{id}^{t+1} = V_{id}^t + \lambda k_1 (p_{id}^t - X_{id}^t) + \gamma k_2 (p_{gd}^t - X_{id}^t) \\ X_{id}^{t+1} = X_{id}^t + V_{id}^{t+1} \end{cases} \quad (10)$$

式中: λ 、 γ 为学习因子, 分别为粒子自身的学习系数及粒子之间的作用系数; k_1 、 k_2 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数, 用来对模型施加轻微扰动。

则单个粒子的个体最佳位置为

$$P_{i+1} = \begin{cases} X_i(t+1), J[X_i(t+1)] \geq J[P_i(t)] \\ P_i(t), J[P_i(t)] \geq J[X_i(t+1)] \end{cases} \quad (11)$$

全局最好位置为

$$P_g(t) \in \{P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gd}\} / J[P_g(t)] =$$

$$\min[J(P_1), J(P_2), \dots, J(P_d)] \quad (12)$$

式中: J 为适应度函数, 用此来指征粒子的位置状态。

PSO 算法是一种无交叉运算、无变异运算的简单算法, 具有极佳的运行速度。但是传统 PSO 算法在解空间内搜索时, 有时会出现粒子困于局部最优解^[21]或在全局最优解附近“振荡”的现象。为了避免上述现象, 增加了一个惯性权重 w ^[22], 在对 PSO 参数调节过程中发现如果将 w 设置大一点, 有助于跳出局部最优解, 显著提高了全局搜索的能力, 但会减弱其快速收敛的能力。而较小的权重 w 有助于加速算法的收敛^[23]减少振荡并且能够获得局部快速寻优的能力。为了克服固定参数的缺点, 采用如下自适应惯性权重因子:

$$\begin{cases} V_{id}^{t+1} = w_{id} V_{id}^t + \lambda k_1^t (p_{id}^t - X_{id}^t) + \gamma k_2^t (p_{gd}^t - X_{id}^t) \\ X_{id}^{t+1} = X_{id}^t + V_{id}^{t+1} \end{cases} \quad (13)$$

$$w_{id} = \begin{cases} w_{\min} - \frac{(w_{\max} - w_{\min})(f - f_{\min})}{f_{\text{av}} - f_{\min}}, & f \leq f_{\text{av}} \\ w_{\max}, & f > f_{\text{av}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: w_{id} 为粒子 i 第 d 维上的惯性权重; $w_{\min}$ 和 $w_{\max}$ 分别为 w 的最小值和最大值; f 为粒子的当前目标值; f_{av} 和 $f_{\min}$ 分别为粒子群体的平均和最小目标值。

2.2 自适应惯性权重收敛性分析

由式 (14) 可知在粒子群寻优前期 $f > f_{\text{av}}$, 此时 $w = w_{\max}$ 粒子将在大惯性作用下进行全局搜索; 当 $f \leq f_{\text{av}}$ 时, 惯性权重将逐渐减小, 此时有助于加速算法的收敛减少粒子往复振荡并且能够获得局部快速寻优的能力。

假设矩阵 A_i 的普半径为 ρ_A , 矩阵 B_i 的普半径为 ρ_B 。由文献[24]可知, 矩阵 A_i 和矩阵 B_i 的收敛速度的比值为

$$\chi = \zeta_A / \zeta_B = -\ln(\rho_A) / [-\ln(\rho_B)] = \ln(\max | \lambda_A |) / \ln(\max | \lambda_B |) \quad (15)$$

矩阵的普半径是取矩阵特征值绝对值最大, 故收敛速度和特征值的比值 χ 成正比关系, 即特征值越大, 其收敛速度越慢。

由式 (13) 化简可得:

$$X^{t+1} - (1 + w - \lambda k_1^t - \gamma k_2^t) X^t + w X^{t-1} = \frac{\lambda k_1^t p_i^t + \gamma k_2^t p_g^t}{\lambda k_1^t + \gamma k_2^t} \quad (16)$$

将其写成齐次方程后, 可得特征方程如下:

$$\lambda^2 + \alpha \lambda + \beta = \lambda k_1^t p_i^t + \gamma k_2^t p_g^t \quad (17)$$

式中: $\alpha = -(1 + w - \lambda k_1^t - \gamma k_2^t)$; $\beta = w$, 可知 α, β 的大小均是与 w 有关的量。

式 (17) 为典型的二阶差分方程, 改写成齐次方程后, 特征方程如下:

$$\lambda^2 + \alpha \lambda + \beta = 0 \quad (18)$$

此时式 (18) 有 3 种情况可讨论:

(1) 当 $\Delta > 0$ 时, 可得齐次方程有 2 个不同的实根:

$$\lambda_{1,2} = \frac{(1 + w - \lambda k_1^t - \gamma k_2^t)}{2} \pm \frac{\sqrt{(1 + w - \lambda k_1^t - \gamma k_2^t)^2 - 4w}}{2} \quad (19)$$

据此可得式 (17) 的通解为 $x_t = c_1 \lambda_1^t + c_2 \lambda_2^t$, c_1, c_2 为任何常数, 并且取值需要根据式 (17) 的初值来确定。

(2) 当 $\Delta = 0$ 时, 可得齐次方程有 2 个相同的实根:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = (1 + w - \lambda k_1^t - \gamma k_2^t) / 2 \quad (20)$$

据此可得式 (17) 的通解均可表示为 $x_t = c_1 \lambda_1^t + c_2 t \lambda_2^t$ 。

(3) 当 $\Delta < 0$ 时, 可得齐次方程有 2 个复根:

$$\lambda_{1,2} = \frac{(1 + w - \lambda k_1^t - \gamma k_2^t)}{2} \pm \frac{i \sqrt{(1 + w - \lambda k_1^t - \gamma k_2^t)^2 - 4w}}{2} \quad (21)$$

据此可得式 (17) 的通解均可表示为 $x_t = c_1 (\sqrt{w})^t \cos n\theta + c_2 \sqrt{w} \sin n\theta$, $n = 1, 2, 3, \dots, \theta = \arctan \frac{\sqrt{4w - (1 + w - \lambda k_1^t - \gamma k_2^t)^2}}{-(1 + w - \lambda k_1^t - \gamma k_2^t)}$, 式 (17) 的特解为 $x^* = \frac{\lambda k_1^t p_i^t + \gamma k_2^t p_g^t}{\lambda k_1^t + \gamma k_2^t}$ 。

综合可得:

$$x_t = c_1(t) \lambda_1^t + c_2(t) \lambda_2^t + \frac{\lambda k_1^t p_i^t + \gamma k_2^t p_g^t}{\lambda k_1^t + \gamma k_2^t} \quad (22)$$

由式 (22) 可知, 当 $|\lambda_{1,2}| \geq 1$ 时, 在 $t \rightarrow \infty$ 时算法将无法收敛甚至可能发散, 不满足收敛; 当 $|\lambda_{1,2}| < 1$ 时, 在 $t \rightarrow \infty$ 时算法将收敛到 $\frac{\lambda k_1^t p_i^t + \gamma k_2^t p_g^t}{\lambda k_1^t + \gamma k_2^t}$ 。

传统 PSO 的惯性权重 w 为常值不会动态调整, 搜索前期全局搜索能力较好后期收敛能力较弱, 局部寻优效果差。采用自适应 w , 当前期粒子的惯性权重较大时, 特征根 $|\lambda_{1,2}|$ 较大, 此时粒子的收敛能力较弱, 利于全局搜索; 当惯性权重逐渐减小时, 特征根 $|\lambda_{1,2}|$ 也减小, 收敛能力随之增强, 利于加速算法的收敛减少粒子往复振荡, 提高局部快速寻优的能力。由此可知惯性权重的动态化调整能够更好地控制粒子的搜索速度、扩大搜索范围及提高收敛能力, 以此来平衡局部搜索和全局搜索的性能。

2.3 PSO-TSM 控制器

TSM 控制对非线性、强耦合、结构不确定的系统具有较好的控制效果, 但在控制律参数设置、全局响应速度上存在不足^[25]。控制律参数一经确定, 对于系统结构的任何变化控制器只能按照设定好参数的控制律做固定速率的趋近运动和滑模面上的滑动, 导致无法根据不同的工况对趋近速率和滑动效果做实时的动态调整。为了保证球(扁)形药弧厚的一致性, 设计了基于位置内环的力环控制策略实现挤压机构高精度的力/位混合控制。位置环中将优化参数 $\alpha, k, \beta, \eta, \xi$ 通过 PSO 算法设计, 实现位置的精确、快速控制, 力环控制则通过力矩传感器的实时反馈做微调以保证在挤压过程中力矩的稳定。其中 k 决定了状态空间的点向滑模面趋近的快慢, α 则是决定了状态点到达滑模面后的滑动性能。在控制过程对 $\alpha, k, \beta, \eta, \xi$ 通数之间相互协同共同决定控制器的控制效果。之前需要凭借人工经验调节, 调节时具有较大的随机性难以同时获得一组最佳控制值。PSO 算法具有全局范围内的寻优能力, 因此本文提出利用 PSO 算法作实时性动态优化, 使控制器整体的控制效果达到最优。

PSO-TSM 控制器的输入量为 θ^* 与 θ 的绝对值及其变化率, 其中 $\theta^*(t)$ 是在 t 时刻的期望转速, $\theta(t)$ 为 t 时刻的实际转速。通过适应度函数计算每个粒子的适应度值以判定粒子所在位置的优劣性, 本文采用 PSO-TSM 控制器, 适应度函数:

$$f = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m |(\theta - \theta^*)|^2 \quad (23)$$

式中: M 为代数。

在每一次迭代过程中, 如果当前粒子的位置

比全局最优位置小, 那么全局最优位置与粒子的历史最优位置择优更新为当前粒子的位置。如果当前粒子的位置比全局最优位置大, 但是比粒子历史最优位置小, 那么粒子的历史最优位置更新为当前粒子位置。

式(23)的全局极小值点为 $\theta - \theta^* = 0$ 时, 即适应度函数达到最优值时 $f \rightarrow \min$ 。选取式(23)作为性能指标, 能够保证粒子群算法在迭代过程中粒子速度的变化使滑模变量 s 向原点运动, 同时使滑模变量 s 收敛到原点并稳定在原点。整个过程通过 PSO 算法间接保证 SMC 的到达条件, 实现 SMC 运行。

根据执行机构的最大输出设置粒子的速度范围 $[-10, 10]$, 设置迭代次数为 200, 迭代寻优计算结果如图 1 所示, 约迭代 160 次以后就基本达到最优状态。

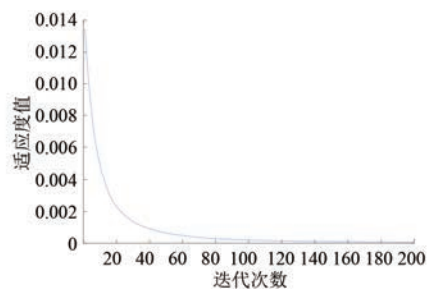


图1 迭代寻优适应度曲线

通过一定的迭代后, PSO 算法找出当前时刻下的最优控制参数, 以当前系统状态作为下一时刻的控制输出。这个过程在每一时刻重复进行, 直到控制系统停止, 优化流程如图 2 所示。

3 仿真试验

根据以上分析在 MATLAB/Simulink 环境下编写 PSO 算法构建 PMSM 控制系统仿真模型, 将时间 t 以及当前 PMSM 位置误差状态作为目标输入 PSO 算法, PSO 计算模块实时输出优化完成的各参数并完成对 TSM 控制器性能的实时更新。搭建的 PSO-TSM 控制系统如图 3 所示。

仿真测试使用 PSO-TSM 控制器对电机模型的位置进行控制, 测试搭建的控制模型对电机转速的控制精度。设定目标转速为 700 r/min, 在 $t=0.1$ s 时负载为 5 N·m 以测试系统的鲁棒性。PMSM 参数如表 1 所示。

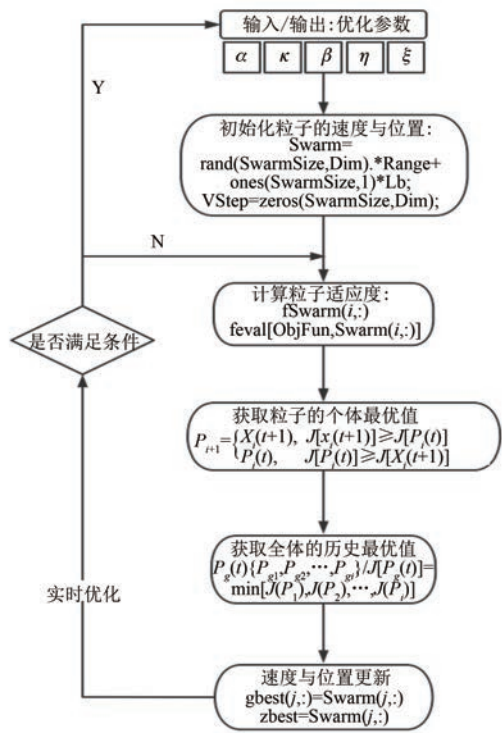


图2 优化流程

表1 电机参数

参数名称	参数值
绕组电阻 R_s/Ω	1.88
绕组电感 L/H	0.019 5
额定电流/A	6.1
磁链/Wb	0.175
转动惯量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 418
极数	8
静态摩擦扭矩/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	0.008

常规 SMC、TSM 控制、PSO-TSM 控制的仿真结果如图 4、图 5 及表 2 所示。PSO-TSM 控制器所产生的超调量最小,到达稳态所需时间最短,对抖振的抑制也优于其他控制器,因此

表2 控制效果比较

变量	SMC	TSM	PSO-TSM
超调量/%	7.1	0.3	0
稳定时间/s	0.22	0.25	0.15
稳态误差/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	-1.0~0.4	-0.8~0.5	-0.5~0.5

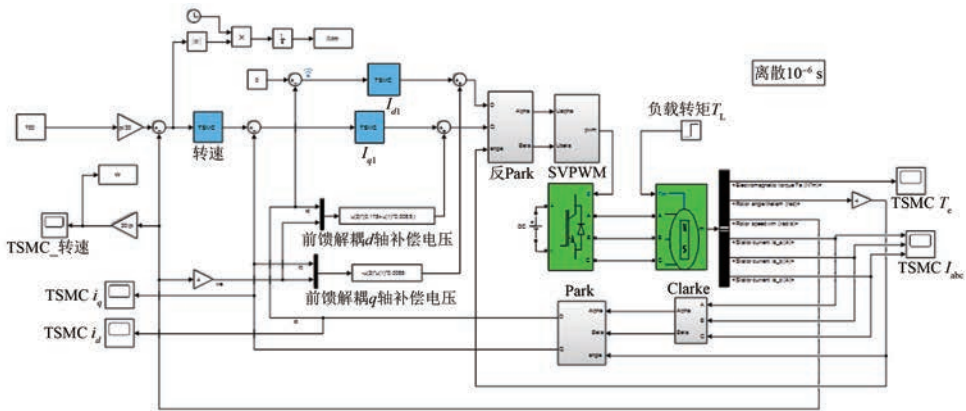


图3 PSO-TSM 控制系统

PSO-TSM 控制器能更好地实现对辊距的快速、精确调节。

4 挤压试验

试验平台模型如图 6 所示,设备主要由布料装置、挤压装置、测量装置三部分组成,其中挤压装置包含碾辊电机、楔块电机、辊距调节电机,辊距位置的精准测量是通过 2 个 MTS 高精度位移传感器来实现,其测量精度能达到 0.01 mm,对于辊距的精准调节是依靠辊距调节电机来完成。本

文辊距调节分为两步,分别是预先调节和精准调节。预先调节采用传统 PID 的方法,根据药粒型号推进至目标弧厚对应的位置,位置的确定是根据碾辊左右两侧的位移磁致尺判断。传统方法在挤压时由于负载的作用容易出现辊距的跳动,传统方法的跳动范围及误差如表 3 所示,其误差难以满足±0.02 mm 以内的要求。

本文所提方法就是在预调节的基础上进行精准调节,目的在于减弱或消除辊距的跳动,实现辊距稳定维持在允许误差范围内,采用本文所提方

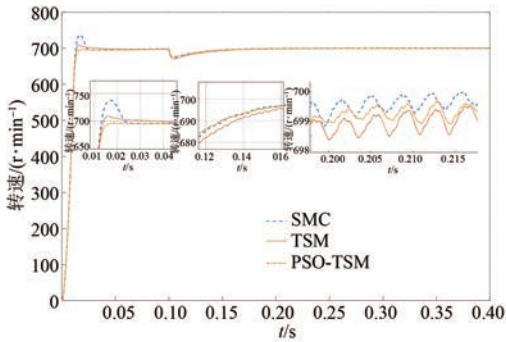


图4 转速波形

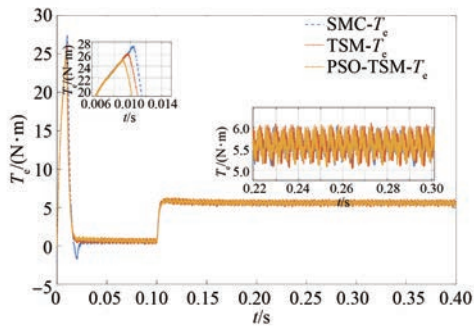


图5 转矩波形

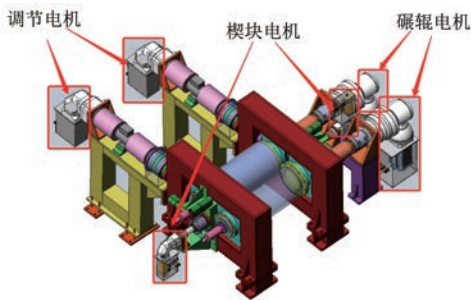


图6 挤压成型设备模型

表3 辊距调节精度					mm
项目	传统方法 辊距跳动 范围	传统 误差	本文所提方 法辊距跳动 范围	本文 所提 误差	
右侧辊距	0.311~0.332	±0.021	0.317~0.322	±0.005	
右侧辊距	0.275~0.303	±0.028	0.287~0.299	±0.012	

法后辊距跳动范围减小,其误差可以满足±0.02 mm 以内的要求。本文将瞬时产生的辊距位移跳动看作是极短时间内的速度变化,分别在碾辊两端各安装一台调节电机,采用速度补偿调节的方式及时对辊距进行补偿以达到消除跳动,实现辊距精准调节的目的。

上位机监控面板如图7所示。挤压成型工艺流程如下:

- (1) 先将原料加入到布料器漏斗内,在上位机软件中设定弧厚值。
- (2) 依次起动挤压机、布料器,在高频振动下物料均匀铺洒并缓慢滑落至两碾辊中间。
- (3) 起动药粒弧厚自动抽检系统,多次测量的弧厚值会自动与设定值比较,并反馈到挤压机控制系统中,由控制系统自动计算修正值,对辊距进行调节直至达到工艺需求。

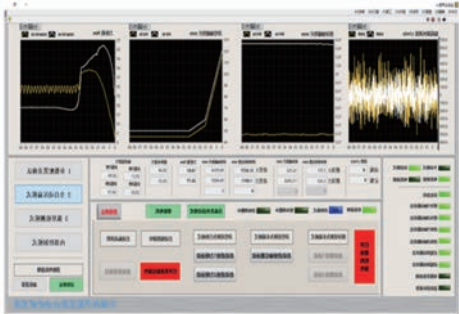


图7 LabVIEW 上位机界面

PSO-TSM 控制下辊距波动曲线及调节电机曲线分别如图8(a)、图8(b)所示。某型药在挤压前药粒弧厚在0.37~0.40 mm,此时右侧辊距设定值为0.323 mm,左侧设定值为0.289 mm,辊距调节精度如表3所示。由图8及表3可以看出在实时辊距及电机位置始终稳定在弧厚误差内。由表4测量数据可知不同辊距挤压时弧厚误差控制在±0.02 mm,且能够保证挤压的一致性且挤压合格率达到95%以上。

表4 弧厚测量数据							mm
辊距	0.24		0.27		0.30		
	原	现	原	现	原	现	
1	0.271	0.253	0.312	0.283	0.351	0.312	
2	0.287	0.255	0.301	0.279	0.347	0.297	
3	0.263	0.252	0.298	0.284	0.358	0.304	
4	0.277	0.257	0.313	0.275	0.374	0.289	
5	0.272	0.247	0.302	0.281	0.352	0.301	

5 结 语

针对球(扁)形药挤压成型过程中存在挤压精度低、成型一致性差等问题,本文设计了一套基

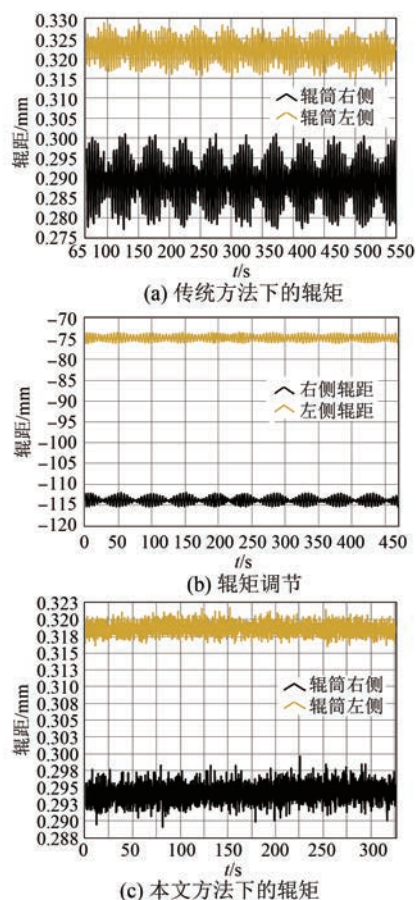


图8 辊距调节曲线

于 PSO-TSM 的高精密挤压控制系统。该系统采用 PSO 与 TSM 相结合的方法,通过 PSO 算法对 TSM 控制器多参数的快速寻优,解决了在挤压过程中控制器各参数一经设定无法随实时工况动态调整辊间距的难题,通过仿真和试验挤压得到以下结论:

(1) 在寻优过程中通过设置自适应惯性权重因子 w ,有效避免了粒子困于局部最优解或者在全局最优解附近“振荡”的情况,显著提高了全局搜索的能力。

(2) 设计的控制器能精准到达期望位置,采用连续快速趋近律能够大大缩短滑模动态的趋近时间,减小了传统控制律产生的抖振,使动态响应能力得到提升。

(3) 在连续挤压成型过程中,辊距始终较好地稳定在设定值附近,药粒弧厚误差控制在 ± 0.02 mm,达到了精确调节辊距、提高挤压成型一致性的目的。

【参考文献】

- [1] 史莹, 范红蕾, 任欣, 等. 梯度硝基球(扁)形药中 NG 的扩散及对燃烧性能的影响[J]. 火工品, 2022(2): 43.
- [2] 宋亚苹, 黄振亚, 解德富, 等. 钝感剂种类对叠氮硝胺发射药贮存稳定性的影响[J]. 火炸药学报, 2020, 43(5): 553.
- [3] LI S, TAO Z, DING Y, et al. Gradient denitration strategy eliminates phthalates associated potential hazards during gun propellant production and application [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(7): 1156.
- [4] 张洪林, 李洪叶, 李欣馨, 等. 发射药连续化生产模型研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(11): 84.
- [5] 袁伟忠. 大弧厚双基球扁形药的制造[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [6] 李全俊, 张博, 史慧芳, 等. 发射药自动混同设备及工艺技术[J]. 兵工自动化, 2020, 39(2): 73.
- [7] 肖正刚, 周伟良, 应三九, 等. 球(扁)形药应用于大口徑火炮高装填密度发射装药[J]. 火炸药学报. 1999(4): 36.
- [8] 刘佳, 马忠亮, 程山, 等. 球扁药药型尺寸对内弹道性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 545.
- [9] RENN J C, TSAI C. Development of an unconventional electro-hydraulic proportional valve with fuzzy-logic controller for hydraulic presses [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26: 10.
- [10] 陈刚, 朱石沙, 王启新, 等. 电液控制技术的发展与应用[J]. 机床与液压, 2006(4): 1.
- [11] ETIEN E, CHAIGNE C, BENSIALI N. On the stability of full adaptive observer for induction motor in regenerating mode [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(5): 1599.
- [12] IM J, KIM R. Improved saliency-based position sensorless control of interior permanent-magnet synchronous machines with single DC-link current sensor using current prediction method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5335.
- [13] 王冬磊, 张智禹, 尹爱军. 双基球扁药工艺优化仿真研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(7): 29.
- [14] 陈春林, 谷强, 贺云, 等. 球(扁)形发射药自动化压扁工艺技术[J]. 兵工自动化, 2021, 40(5): 26.

- [15] 梁传栋, 许刘超, 潘志恒, 等. 一种改进型滑模变结构控制永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(3): 1.
- [16] 师蔚, 阳喜成. 基于粒子群优化算法的永磁电机热网络参数识别[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(3): 102.
- [17] YANG G, ZHOU F R, MA Y, et al. Identifying lightning channel-base current function parameters by powell particle swarm optimization method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(1): 182.
- [18] 石翠翠, 刘媛华, 陈昕. 基于粒子群算法优化支持向量回归的水质预测模型[J]. 信息与控制, 2022, 51(3): 307.
- [19] LI J, ZHANG J Q, JIANG C J, et al. Composite particle swarm optimizer with historical memory for function optimization [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(10): 2350.
- [20] CHENG C, ZHANG X. Interior ballistic charge design based on a modified particle swarm optimizer [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2012, 46: 303.
- [21] LING S H, IU H H C, LEUNG F H F, et al. Improved hybrid particle swarm optimized wavelet neural network for modeling the development of fluid dispensing for electronic packaging [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(9): 3447.
- [22] SHI Y, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization [C] // Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99, 1999.
- [23] WORASUCHEEP C. A particle swarm optimization with stagnation detection and dispersion [C] // 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence), 2008.
- [24] 聂铁军. 数值计算方法[J]. 西安: 西北工业大学出版社, 1990.
- [25] 梁晓瑜, 毛君, 王鑫. 线性压缩机的变速趋近律滑模控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(11): 1754.

(上接第 46 页)

- [14] 张晓光, 赵克, 孙力. 永磁同步电动机混合非奇异终端滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 116.
- [15] 王志宇, 王长松, 齐昕, 等. 永磁同步电机自适应滑模负载观测器研究[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(1): 45.
- [16] 缪仲翠, 张文宾, 余现飞, 等. 基于转速估计的 PMSM 分数阶积分滑模控制[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 28.
- [17] MA Y, LI D, LI Y, et al. A novel discrete compound integral terminal sliding mode control with disturbance compensation for PMSM speed system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(1): 549.

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

