

基于 BLF 多约束反演控制的电动收获机分布式驱动控制方法研究

袁朝春¹ 刘敏¹ 何友国¹ 陈龙¹ SHEN Jie² 徐立章³

(1. 江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013; 2. 密西根大学迪尔伯恩分校, 迪尔伯恩 48128;

3. 江苏大学智能农业机械装备理论与技术重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 针对电动收获机分布式驱动面对喂入扰动时控制的实时性、准确性和稳定性问题,以电动收获机为平台,建立部件负载模型,结合部件转速约束,设计 BLF (Barrier Lyapunov function) 多约束反演控制算法;利用 AMESim 与 Matlab/Simulink 平台搭建联合仿真模型验证控制算法性能。结果表明,与传统 PID 控制相比本文算法在面对不同喂入扰动时,割台电机、输送电机、脱粒滚筒电机转速控制超调量分别减少 4%、34%、92%;调节时间分别减少 34%、54%、72%;各部件电机最大转速误差上,本文算法维持在预设转速的 3% 内,而 PID 则在 8% 内。验证了本文算法具有控制迅速、转速跟踪误差小、抗扰能力强的特点,能将部件转速约束在边界内,可实现不同喂入扰动下鲁棒控制,有利于稳定整机作业质量。

关键词: 电动收获机; 分布式驱动控制; 反演控制; 约束控制; 鲁棒控制; BLF

中图分类号: S225.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0212-09

OSID:



Distributed Drive Control Method of Electric Harvester Based on BLF Multi-constraint Inversion Control

YUAN Chaochun¹ LIU Min¹ HE Youguo¹ CHEN Long¹ SHEN Jie² XU Lizhang³

(1. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. University of Michigan-Dearborn, Dearborn 48128, USA

3. Key Laboratory for Theory and Technology of Intelligent Agriculture Machinery and Equipment, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Current combine harvesters faced challenges such as low levels of automation, environmental pollution, high costs, and complex operations, requiring operators to possess advanced driving skills. During harvesting, operators needed to adjust the harvester's parameters based on prevailing field conditions. However, reliance on operators' subjective experience for assessing field conditions and adjusting harvesting parameters impeded the intelligent development of combine harvesters. Consequently, electric harvesters, with their promising prospects for intelligent development and variable transmission ratios of working components, emerged as a new trend. The issues of real-time control, accuracy, and stability in the distributed drive system of electric harvesters under feed-in disturbances were primarily addressed. Using an electric harvester as the platform, a component load model was established, and a multi-constraint inverse control algorithm based on the barrier Lyapunov function (BLF) was designed. Joint simulation models were developed by using the AMESim and Matlab/Simulink platforms to validate the performance of the control algorithm. The results demonstrated that compared with traditional PID control, this algorithm significantly reduced overshoot in the cutter platform, conveyor, and threshing drum motor speed control by 4%, 34%, 92%, respectively, when facing various feed-in disturbances. The adjustment times were reduced by 34%, 54%, 72%, respectively. The maximum motor speed error for each component was maintained within 3% of the preset speed, and that was 8% for PID control. This validated the algorithm's rapid control response, minimal

收稿日期: 2024-01-13 修回日期: 2024-03-25

基金项目: 江苏大学农业装备学部重点项目 (NZXB20210103)、国家自然科学基金项目 (52172346、52225212、U20A20333、U20A20331、51875255) 和江苏省重点研发项目 (BE2020083-3、BE2019010-2)

作者简介: 袁朝春 (1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆智能化装备研究, E-mail: yuance_78@163.com

speed tracking error, and strong disturbance rejection capabilities. It effectively constrained component speeds within their boundaries, enabling robust control under different feeding disturbances and thereby contributing to the stability of the overall machine’s operational quality.

Key words: electric harvester; distributed drive control; backstepping control; constraint control; robust control; barrier Lyapunov function

0 引言

传统轮式谷物联合收获机采用皮带传动,存在操纵复杂、传动系统复杂、可靠性差等问题,且受制于机械耦合结构,很难实现智能化发展。电动收获机凭借智能化、发展前景广、工作部件传动比可变等特点成为了趋势。通过对传统谷物联合收获机的割台、输送、脱粒、清选、粉碎、卸粮等主要部件进行电气化改装,使用电机驱动主要部件,实现了多部件转速解耦,减少传动路径,提高了部件驱动灵活性和传动效率。

收获机在实际作业时,割台、输送、脱粒滚筒转速是收获质量的主要影响因素,但由于工作部件转速控制具有强非线性、多干扰、喂入时滞^[1-4]等特点,对电动收获机分布式驱动的鲁棒性提出了更高要求。

目前电动收获机分布式驱动控制还未有相关研究,但已有对传统收获机部分电气化进行转速控制的研究。如,KADIROVA 等^[5]提出了一种联合谷物收获机割台的电气化改装方案,使用直流无刷电机对割台进行驱动,并使用单片机设计割台控制系统。然而该研究仍停留在信号验证阶段。陈进等^[6]基于模糊控制控制比例继动阀,实现了电控调节拨禾轮转速。久保田等公司已将电控部件应用于收获机产品,实现行驶速度、拨禾轮转速、割台高度等参数

的自适应鲁棒调节。但距离实现多部件解耦协同控制还有一定差距。孙意凡等^[7]利用电机控制收获机割台、脱粒、谷仓以及行走,实现收获机电气化改造,设计了联合收获机运动部件转速-喂入量匹配控制模型,控制电机转速,但没有考虑电机的负载波动特性。

可见已有研究多是依赖对行驶速度^[8-13]进行控制,来使收获机主要部件转速保持在预设范围内,该控制方法面对收获机工作时受到的多种扰动时,难以保证部件转速控制实时性、准确性和稳定性。此外,对于电动收获机各部件电机负载特性缺少相应研究,同时缺乏相适应的电机控制算法。

为解决上述问题,本文首先基于割台动力学方程对喂入量进行估算,以割台喂入量建立割台电机、输送电机、脱粒滚筒电机负载模型^[14-16],再将负载模型以及转速约束边界作为核心控制参数,设计基于障碍型李亚普洛夫函数^[17]以及反演理论^[18]的 BLF(Barrier Lyapunov function)多约束反演控制算法(简称 BLFB 控制算法),对控制输出进行限制,使转速不超过预设转速约束边界,以提升喂入负载波动下的控制实时性、准确性和稳定性,为电动收获机研究提供参考。

1 部件负载模型建立

电动收获机拓扑如图 1 所示。

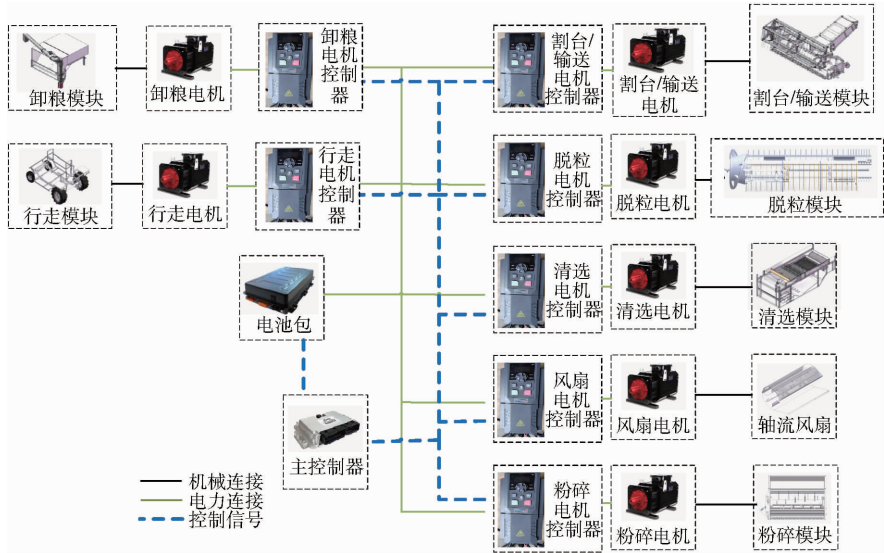


图 1 电动收获机拓扑图
Fig. 1 Topology of electric harvester

根据全喂入谷物联合收获机工作原理^[19],作物传动路径如图 2 所示,各部件电机负载主要受谷物特征的影响,即喂入量。而喂入量受谷物密度、行驶速度、割幅等因素的影响,部分因素目前还未有合适

的量化手段。因此本文基于割台动力学响应来对喂入量进行估算,再基于割台喂入量与输送、脱粒滚筒喂入量时滞关系建立割台、输送、脱粒滚筒电机部件负载模型,为后续控制算法设计提供核心参数信息。

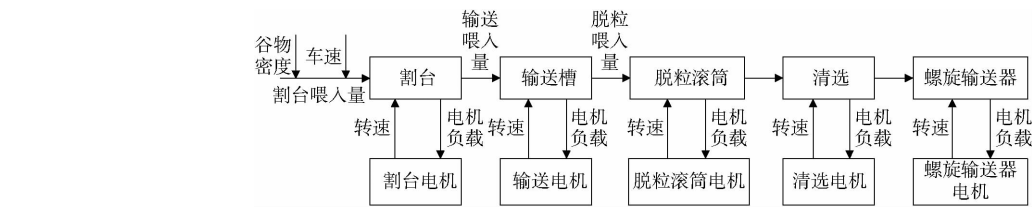


图 2 电动收获机作物传动路径示意图
Fig. 2 Electric harvester crop transmission path

1.1 割台喂入量估算

基于割台动力学方程对割台喂入量进行估算,计算式为

$$q_r = \frac{M_h - \left(M_f + J \frac{dn_h}{dt} \right)}{k} \tag{1}$$

式中 M_h ——割台扭矩
 M_f ——割台摩擦力矩
 J ——割台转动惯量
 k ——割台喂入量估算系数
 q_r ——喂入量估算值
 n_h ——割台电机转速

根据电动收获机工作部件结构,割台喂入量与各部件存在时滞关系,一是由于割台扭矩传感器采样延迟,二是由于割台喂入量与后续部件存在输送时滞关系,如图 3 所示。图中 t 为当前采样时刻, t_h 为割台扭矩传感器采样延迟时间; t_c 为输送时滞; t_i 为脱粒时滞。基于割台喂入量估算值与各部件喂入量估算值的时滞关系分别建立割台电机、输送电机、脱粒滚筒电机负载模型。由于各部件转速为恒定值,因此延迟时间可通过试验标定。

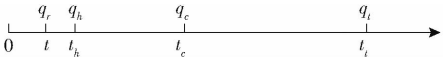


图 3 喂入时滞关系示意图
Fig. 3 Time-delay relation of feed

1.2 割台电机负载模型

割台受到的负载力矩^[20-22]主要有拨禾轮、切割器、割台螺旋输送器受到的摩擦力矩;作业过程中满足拨禾轮拨动作物运动、割刀切割作物茎秆、割台螺旋输送器推动作物运动所需要的力矩,并考虑扭矩传感器采样延迟。割台电机负载模型为

$$T_h = M_{bf} + M_{gf} + M_{jf} + k_{b0}q_h + k_gq_h + k_jq_h + \left(\frac{J_h}{i_h} + \frac{J_j}{i_j} \right) \frac{dn_h}{dt} \tag{2}$$

其中 $q_h = q_r(t - t_h)$ (3)

式中 T_h ——割台电机转矩

M_{bf} ——拨禾轮空转摩擦力矩
 M_{gf} ——割刀空转摩擦力矩
 M_{jf} ——割台螺旋输送器空转摩擦力矩
 i_h ——割台电机至拨禾轮传动比
 i_j ——割台电机至割台螺旋输送器传动比
 J_h ——拨禾轮转动惯量
 J_j ——割台螺旋输送器转动惯量
 q_h ——割台喂入量
 k_g, k_{b0}, k_j ——割刀、拨禾轮以及螺旋输送器的喂入负载系数

1.3 输送电机负载模型

输送工作部件主要目标是将割台输送进来的谷物通过链条拨齿输送到脱粒滚筒进行脱粒。因此该工作部件需克服自身的空载摩擦力和推动谷物运动所需要的力矩。作物输送器传动齿轮、轴的转动惯量很小,影响可以忽略。作物输送器刚度足够大,作业过程中机械系统不发生形变。作物输送器效率足够高,忽略其摩擦损耗。此外,考虑割台喂入量估算值与输送喂入量存在时滞关系。得出输送电机负载模型为

$$T_b = M_{bi} + M_{bw} + \frac{(J_b + m_b R_b)}{i_b} \frac{dn_b}{dt} \tag{4}$$

其中 $M_{bw} = m_b g f_b R_b \cos \theta + m_b g R_b \sin \theta + \pi q_c n_b i_b R_b^2$ (5)

$$m_b = \int_0^{t_b} q_c \{ 1 - \delta [t - l_b / (2 \pi n_b i_b R_b)] \} dt \tag{6}$$

$$q_c = q_h(t - t_c)$$
 (7)

式中 T_b ——输送电机转矩
 M_{bi} ——作物输送器空转摩擦力矩
 M_{bw} ——作物输送器推禾力矩
 J_b ——输送器转动惯量
 i_b ——输送电机减速器减速比
 m_b ——输送作物总质量
 f_b ——摩擦因数
 R_b ——传送带主动轮半径

t_b ——传送带输送时间
 θ ——输送带倾斜角度
 l_b ——传送带长度
 δ ——输送带靶齿角度
 g ——重力加速度
 q_c ——输送喂入量
 n_b ——输送电机转速

1.4 脱粒滚筒电机负载模型

脱粒滚筒工作过程要克服包括滚筒运转过程中滚筒自身空转所需的力矩、推动谷物克服阻力运动的力矩、克服滚筒自身转动惯量产生角加速度的力矩和推动谷物使之获得加速度的力矩 4 部分。同样考虑脱粒喂入量与割台喂入量估算值存在时滞关系。其负载模型为

$$T_r = \frac{J_r}{i_r} \frac{dn_r}{dt} + (A + Bn_r^2) + \frac{q_r R_r^2 n_r}{2(1-f_r)} \frac{\Delta + \lambda}{1 + \Delta} \quad (8)$$

其中 $q_t = q_h \delta [t - l_b / (2\pi n_b i_b R_b)]$ (9)

式中 T_r ——脱粒滚筒转矩

J_r ——脱粒滚筒转动惯量

n_r ——脱粒滚筒电机转速

A ——机械摩擦力产生的力矩

B ——滚筒鼓风力矩系数

R_r ——钉齿作用半径

f_r ——搓擦系数

Δ ——谷草比

λ ——排草口抛出茎秆运动速度与滚筒旋转线速度之比

q_t ——脱粒滚筒喂入量

i_r ——脱粒滚筒电机减速比

2 BLF 多约束反演控制算法设计

从控制目标的角度出发,根据第 1 节的部件负载模型,结合部件转速约束设计 BLF 多约束反演控制算法。

2.1 控制目标

电动收获机分布式驱动控制目的在于在喂入量变化的过程中保证损失率不超过规定值,大量研究^[3-17]表明这需要保持部件转速在预设值范围内。以脱粒滚筒为例,过高滚筒转速会导致谷粒出现损伤甚至破损,该转速被称为极限转速^[23],转速低于一定值则会导致滚筒不能及时输送谷物而堵塞,使负荷变大,造成脱粒滚筒故障等问题,同时会造成损失率上升,影响收获质量。此外在满足损失率的条件下,要保证收获效率^[24]。因此对控制快速性和稳定性要求较高。

收获机部件转速控制本质在于控制各部件电机

扭矩。因此本文通过设计 BLF 多约束反演控制算法对电机扭矩进行控制,使其面对喂入负载波动的情况下,电机转速维持在设定值附近。此外为了延长电机使用寿命,扭矩控制波动应尽可能小^[25-27]。

2.2 障碍型李亚普洛夫函数

通过对障碍型李亚普洛夫函数设计将部件转速维持在转速约束边界内。

根据李亚普洛夫稳定性理论^[28],对于非线性系统 $\dot{x} = f(x, t)$,假设 $x_0 = 0$ 是一个平衡系统的点,满足 $f(x_0, t) = 0$ 。集合 M 为包含平衡点的邻域,如果存在一个连续的正定标量函数 $V(x, t)$ 在集合 M 内有一阶偏导数,且 $\dot{V}(x, t) \leq 0$,则系统稳定。并且采用李亚普洛夫直接法^[29]设计稳定控制系统,是从能量角度出发,不依赖模型精度。

定义跟踪误差 S_1 为

$$S_1 = x_1 - \beta_d \quad (10)$$

式中 x_1 ——各部件转数

β_d ——各部件预设转数参考值

时变误差界定义为

$$\begin{cases} k_a(t) = \beta_d - \bar{k}_\beta \\ k_b(t) = \bar{k}_\beta - \beta_d \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\bar{k}_\beta = 1.05\beta_d$, $k_\beta = l(t) \leq 0.97\beta_d$, $\bar{k}_\beta$ 、 k_β 分别表示转数约束上、下界。实际使用时约束上、下界应以损失率最佳为原则进行设置。

定义正切型李亚普洛夫函数为

$$V_1(S_1) = (1 - q(S_1)) \frac{k_a}{\pi} \tan^2 \left(\frac{\pi S_1}{2k_a} \right) + q(S_1) \frac{k_b}{\pi} \tan^2 \left(\frac{\pi S_1}{2k_b} \right) \quad (12)$$

$$q(S_1) = \begin{cases} 0 & (-k_a(t) < S_1 \leq 0) \\ 1 & (0 < S_1 < k_b(t)) \end{cases} \quad (13)$$

式中 k_a 、 k_b ——时变误差上、下界

对于二阶系统,状态量的 i 阶导数在设计过程中对变量和参考值进行控制,系统始终在约束边界之内,上述函数的定义符合下列假设^[30]:

假设 1:对于任意 $t \geq 0$,存在常数 $\underline{k}_{ci}$ 以及 $\bar{k}_{ci}$ ($i = 0, 1, 2$),满足约束 $\underline{k}_{ci}(t) \geq \underline{k}_{c0}$ 和 $\bar{k}_{ci}(t) \leq \bar{k}_{c0}$,并且对应的导数满足 $|\underline{k}_{ci}^{(i)}| \geq \underline{k}_{ci}$ 和 $|\bar{k}_{ci}^{(i)}| \geq \bar{k}_{ci}$ ($i = 1, 2$)。

假设 2:对于任意的 $\underline{k}_{ci}(t)$ 和 $\bar{k}_{ci}(t)$,存在函数 $\underline{Y}_0(t)$ 、 $\bar{Y}_0(t)$ 和常数 Y_1 、 Y_2 满足理想跟踪信号 $y_d(t)$,并且其多阶导数满足: $\underline{Y}_0(t) \leq y_d(t) \leq \bar{Y}_0(t)$ 、 $|\dot{y}_d(t)| \leq Y_1$ 、 $|\ddot{y}_d(t)| \leq Y_2$ 。并且存在一个满足内部连续性的集合 $\Omega_{y_d} = \{[y_d(t) \quad \dot{y}_d(t) \quad \ddot{y}_d(t)]^T : y_d^2(t) + \dot{y}_d^2(t) + \ddot{y}_d^2(t) \leq \delta_{y_d}\} \subset \mathbf{R}^3$ 。

2.3 反演控制算法设计

通过对反演控制算法进行设计来保障部件转速跟踪的收敛性。

反演设计方法基本思想是通过将系统分解为不超过系统阶数的子系统,并通过李亚普洛夫函数和中间虚拟控制量,使每个子系统稳定,逐步“后退”到整个系统稳定,适用于干扰或不确定性不满足匹配条件时的鲁棒控制,这与收获机环境复杂多变,很难量化具体影响相适应。因此本文考虑将反演控制与障碍型李亚普洛夫律结合,来使得整个闭环系统满足期望的动静态性能指标。图4为BLF多约束反演控制结构。图中 n_{ref} 为割台电机、输送电机、脱粒滚筒电机转速目标值; n_m 为割台电机、输送电机、脱粒滚筒电机转速传感器转速信息; u 为控制算法计算的输入信号; T_m 为电机控制器输出转矩控制信号; $f(x, t)$ 、 $g(x)$ 为负载模型关键参数。

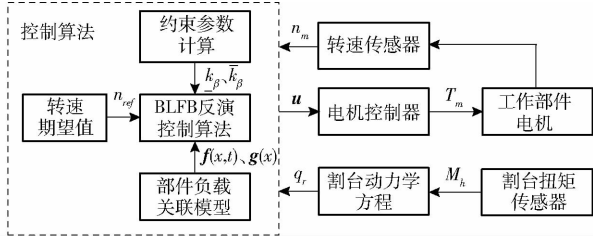


图4 控制系统框图

Fig.4 Block diagram of control system

对第1节的部件负载模型进行变换,可以写为

$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{f}(x, t) + \mathbf{g}(x) \mathbf{u} \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{f}(x, t) = \begin{bmatrix} M_{bf} + M_{gf} + M_{jf} + M_{qr} \\ M_{bi} + M_{bw} \\ A + Bn_r^2 + \frac{q_r R_r^2 n_r}{2(1-f_r)} \frac{\Delta + \lambda}{1 + \Delta} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_b + J_i} & \frac{1}{J_b + m_b R_b} & \frac{1}{J_r} \\ \frac{1}{i_b} & \frac{1}{i_j} & \frac{1}{i_r} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} T_h \\ T_b \\ T_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} n_h \\ n_b \\ n_r \end{bmatrix}$$

式中 M_{qr} ——割台电机推禾力矩
符合严格参数反馈系统。

对控制律进行推导,由式(12)得

$$\dot{V}_1(S_1) =$$

$$\left[(1 - q(S_1)) \frac{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)}{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)} + q(S_1) \frac{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)}{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)} \right] \dot{S}_1 \quad (15)$$

结合式(10)、(12)、(14)得

$$\dot{V}_1(S_1) = (1 - q(S_1)) \frac{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)}{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)} + q(S_1) \frac{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)}{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)} + x_2 - \dot{\beta}_d \quad (16)$$

式中 x_2 ——各部件转速

设计虚拟控制量 S_2 为

$$S_2 = x_2 + k_1 S_1^2 + (1 - q(S_1)) \frac{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)}{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)} + q(S_1) \frac{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)}{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)} + \dot{\beta}_d \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)得

$$\dot{V}_1(S_1) = -k_1 S_1^2 + S_2 \left[(1 - q(S_1)) \frac{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)}{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)} + q(S_1) \frac{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)}{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)} \right] \quad (18)$$

当 $S_2 \rightarrow 0$ 时, $\dot{V}_1(S_1) = -k_1 S_1^2 \leq 0$ 。此时子系统 S_1 稳定,即 $x_1 \rightarrow \beta_d$ 。设计李亚普洛夫函数 V_2 来进一步使 $x_2 \rightarrow \dot{\beta}_d$,表达式为

$$V_2 = V_1(S_1) + \frac{1}{2} S_2^2 \quad (19)$$

对式(19)求导得

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1(S_1) + S_2 \dot{S}_2 \quad (20)$$

令

$$A' = (1 - q(S_1)) \frac{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)}{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)} + q(S_1) \frac{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)}{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)} \quad (21)$$

$$G = k_1 S_1^2 \left[(1 - q(S_1)) \frac{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)}{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_a}\right)} + q(S_1) \frac{\cos^3\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)}{\sin\left(\frac{\pi S_1}{2k_b}\right)} \right] \quad (22)$$

结合式(14)、(18)、(20)~(22)得

$$\dot{V}_2 = -k_1 S_1^2 + S_2 A' + S_2 (\mathbf{g}(x) \mathbf{u} + \mathbf{f}(x, t) + \dot{G} - \ddot{\beta}_d) \quad (23)$$

设计控制律 u 为

$$u = \frac{1}{\mathbf{g}(x)} (-k_2 S_2 - \mathbf{f}(x, t) - \dot{G} - A') \quad (24)$$

将式(24)代入式(23)得

$$\dot{V}_2 = -k_1 S_1^2 - k_2 S_2^2 \leqslant 0 \tag{25}$$

其中 $k_1、k_2 > 0$ ，为控制器参数， k_1 取 0.000 001、0.000 01、0.000 000 1， k_2 取 3.1、2、3.1。

此时子系统 S_2 稳定，则 $\boldsymbol{x}_2 \rightarrow \dot{\boldsymbol{\beta}}_d$ 。

至此，二阶系统渐进稳定且符合李亚普洛夫第二方法。

3 仿真验证

仿真建模参数如表 1 所示。

表 1 建模参数
Tab.1 Modeling parameters

部件	参数	数值
割台电机	最大扭矩/(N·m)	150
	输出功率/kW	10.5
	输出转速/(r·min ⁻¹)	3 198
	减速比	6
输送电机	最大扭矩/(N·m)	60
	输出功率/kW	3.1
	输出转速/(r·min ⁻¹)	3 018
	减速比	6
脱粒滚筒电机	最大扭矩/(N·m)	300
	输出功率/kW	19.8
	输出转速/(r·min ⁻¹)	3 155
	减速比	5
电池	容量/(kW·h)	41
	电压/V	540
	最大充电电流/A	156
	最大放电电流/A	156
收获机	质量/kg	5 300
	最大喂入量/(kg·s ⁻¹)	9

图 5 为 Matlab/Simulink 与 AMESim 联合仿真平台搭建的整体结构示意图。图 6 为基于 AMESim 的电动收获机仿真模型。

3.1 作业工况设计

收获机在收获过程中受到的扰动主要包括整车

在收粮过程中行走或收获机行驶速度逐渐加大或减小过程中喂入量受到的斜坡扰动；整车遇陡坡、作物密度突然增大或突然减小等引起的脉冲扰动。地面坡度周期性起伏引起的喂入量低频正弦扰动。设计含扰动的喂入量如图 7 所示。

此外收获机在工作过程中喂入量本身存在一定的随机扰动特征，本文以高斯白噪声来模拟随机扰动特征，如图 8 所示。设计的低频正弦扰动周期为 1，幅度为 1，随机白噪声的数学期望为 0，标准差为 1，斜坡扰动的斜率为 1.2、0.4。

3.2 仿真结果对比

基于 AMESim 与 Matlab/Simulink 联合仿真平台，与传统 PID 控制算法对比，验证不同喂入波动下 BLF 多约束反演控制对割台电机、输送电机、脱粒滚筒电机转速和转矩的控制效果。仿真对比结果如图 9 ~ 11 所示。

3.3 仿真结果分析

根据 3 个工作部件仿真结果对比图（图 9 ~ 11），以调节时间、超调量、最大转速误差为评价指标^[24]，分析 BLF 多约束反演控制算法与传统 PID 控制算法控制性能；此外，假设约束转速边界内为最佳损失率区域。对比结果如表 2 所示。

根据表 2 可以得出，本文设计的控制器在基于喂入量的外部负载波动下，在面对喂入波动时，对比传统 PID 控制器，超调量分别减少 4%、34%、92%；调节时间分别减少 34%、54%、72%；在最大转速误差上，该算法能维持在 3% 内，而 PID 则在 8% 内。因此所设计的控制算法控制性能优于传统 PID 控制器，且都将转速限制在约束范围内，满足收获机部件转速控制快速性和稳定性要求，有利于稳定整机的收获质量。

4 电机负载测试验证

为进一步验证算法的有效性，进行电机负载测

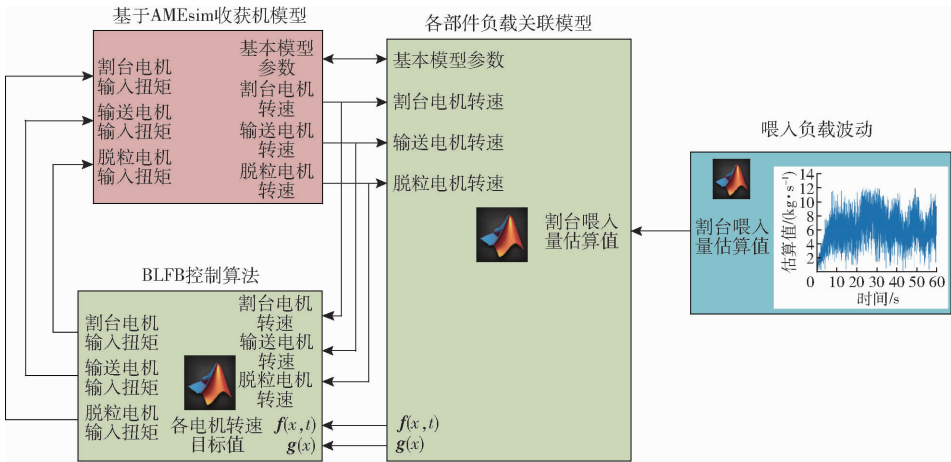


图 5 联合仿真结构图

Fig.5 Co-simulation structure

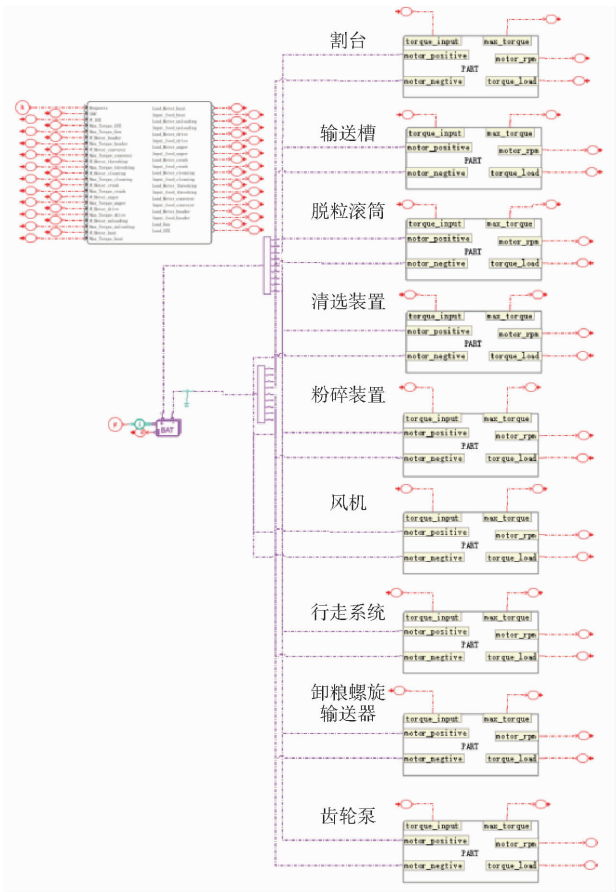


图 6 电动收获机仿真模型

Fig. 6 Electric harvester simulation model

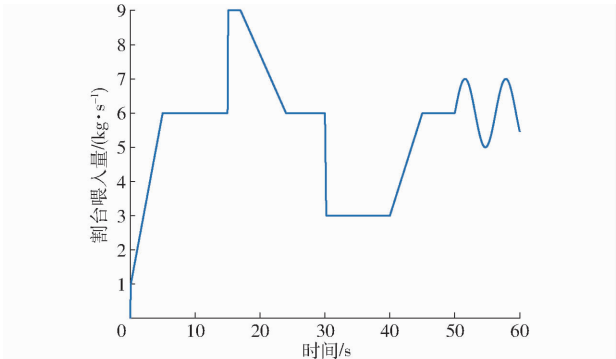


图 7 包含扰动的喂入量变化曲线

Fig. 7 Feed containing perturbations

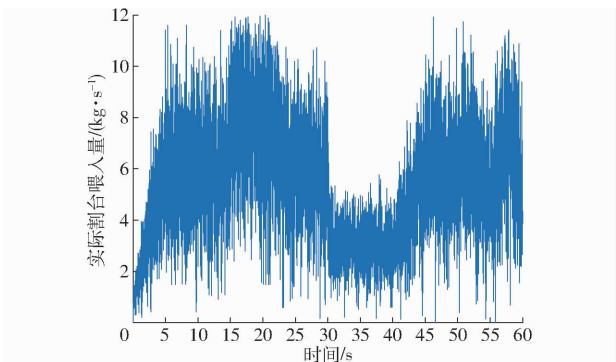


图 8 包含扰动以及随机扰动的喂入量变化曲线

Fig. 8 Feed containing perturbations and random perturbations

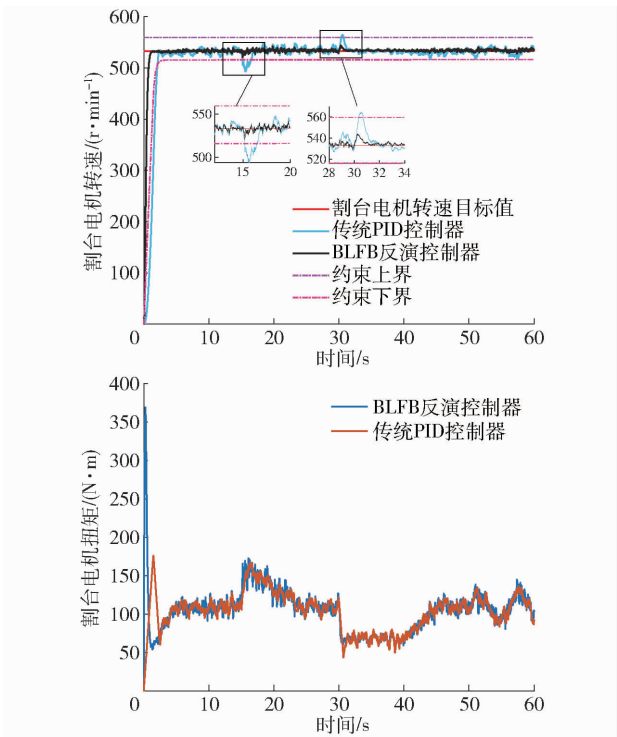


图 9 割台电机转速和转矩变化曲线

Fig. 9 Curves of header-motor speed and torque

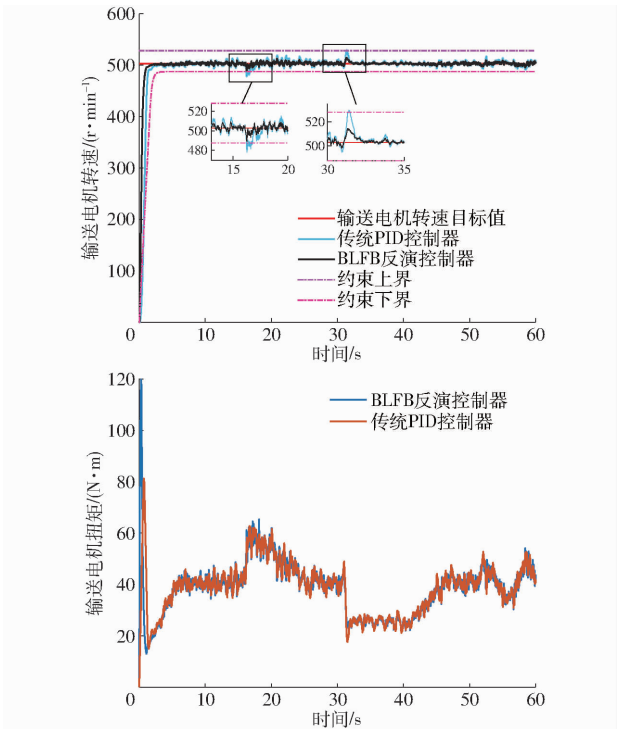


图 10 输送电机转速和转矩变化曲线

Fig. 10 Curves of convey-motor speed and torque

试验。通过磁粉制动器来模拟割台电机的负载特性,从而验证本文设计的控制算法在该负载特性下电机转速控制的有效性,试验参数与软件仿真设置一致。图 12 为电机负载测试台架结构。

电机测试结果如图 13 所示。由图 13 可知,该算法在设计负载下,与软件仿真结果近似,能够确保电机转速的稳定性。

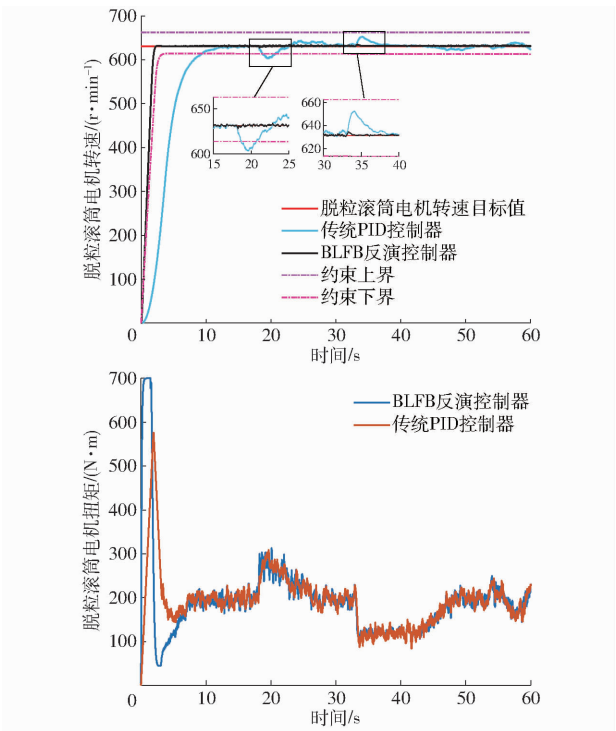


图 11 脱粒滚筒电机转速和转矩变化曲线
Fig. 11 Curves of thresh-motor speed and torque

表 2 控制性能对比

Tab. 2 Control performance comparison

模块	PID			BLFB		
	调节 时间/s	超调 量/%	最大转速 误差/%	调节 时间/s	超调 量/%	最大转速 误差/%
割台模块	2.10	2.4	7.3	1.38	2.3	2.2
输送模块	1.38	2.3	5.3	0.63	1.5	2.7
脱粒模块	6.70	2.5	4.2	1.90	0.2	0.5

5 结论

(1) 基于割台动力学响应估算喂入量,再基于

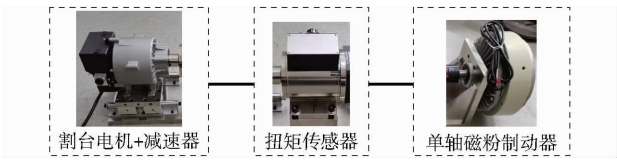


图 12 电机负载测试台架结构示意图
Fig. 12 Motor load test bench structure

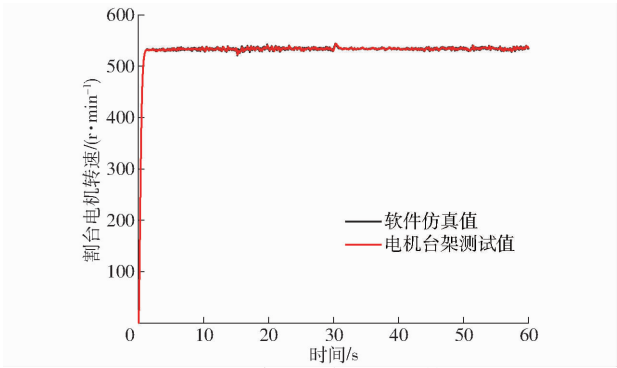


图 13 割台电机负载测试结果
Fig. 13 Header-motor load test results

割台喂入量与输送、脱粒滚筒喂入量时滞关系建立割台、输送、脱粒滚筒电机部件负载模型,为收获机部件电机负载特性研究提供参考。

(2) 设计了 BLF 多约束反演控制算法。通过 AMEsim 与 Matlab/Simulink 联合仿真表明,与 PID 控制相比在超调量上分别减少 4%、34%、92%;在调节时间上分别减少 34%、54%、72%;在最大转速误差上该算法维持在预设转速的 3% 内,而 PID 则在 8% 内。验证了该算法控制迅速,在面对收获机工作过程中的各种扰动时,可以将转速稳定在约束边界内。最后,通过电机负载测试台架验证了该算法的有效性。在实际使用时,结合各部件最佳损失率转速约束边界,该算法可稳定收获机的收获质量。

参 考 文 献

[1] 王凯. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 农业工程技术, 2023, 43(17): 64–65.

[2] 刘伟健,罗锡文,曾山,等. 基于模糊 PID 控制的再生稻自适应仿形割台性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 1–9.

LIU Weijian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Performance test and analysis of the self-adaptive profiling header for ratooning rice based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 1–9. (in Chinese)

[3] CHAAB R K, KARPARVARFARD S H, RAHMANIAN-KOUSHKAKI H, et al. Predicting header wheat loss in a combine harvester, a new approach[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2020, 19(2): 179–184.

[4] 张学军,李茜,朱兴亮,等. 基于自抗扰-动态矩阵的油葵联合收获机脱粒滚筒转速控制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 9–16.

ZHANG Xuejun, LI Xi, ZHU Xingliang, et al. Rotational speed control of threshing cylinder of oil sunflower combine harvester based on active disturbance rejection controller–dynamic matrix predictive[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 9–16. (in Chinese)

[5] KADIROVA S Y, NENOV T R. Microcontroller system for control of the harvester’s header propulsion with BLDC motor[C]// 2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). IEEE, 2017: 149–154.

[6] 陈进,汪树青,练毅. 稻麦联合收获机割台参数按键电控调节装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 19–26.

CHEN Jin, WANG Shuqing, LIAN Yi, et al. Design and test of header parameter keys electric control adjusting device for rice and wheat combined harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 19–26. (in Chinese)

[7] 孙意凡,刘仁杰,李世超,等. 基于 GWO-MPC 的联合收获机喂入量控制方法与仿真实验[J]. 农业机械学报, 2023,

- 54(11):83–91.
SUN Yifan, LIU Renjie, LI Shichao, et al. Feed rate control method and simulation experiment of combine harvester based on GWO–MPC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11):83–91. (in Chinese)
- [8] 秦云, 赵德安, 张超, 等. 联合收割机负荷控制半实物仿真平台的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):142–147.
QIN Yun, ZHAO Dean, ZHANG Chao, et al. Design of a hardware-in-loop simulation platform for combines load control[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):142–147. (in Chinese)
- [9] 丁幼春, 夏中州, 彭靖叶, 等. 联合收获机单神经元 PID 导航控制器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7):34–42.
DING Youchun, XIA Zhongzhou, PENG Jingye, et al. Design and experiment of the single-neuron PID navigation controller for a combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7):34–42. (in Chinese)
- [10] 王鹏, 金诚谦, 王超, 等. 谷物联合收获机脱粒系统研究现状[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(5):48–57.
WANG Peng, JIN Chengqian, WANG Chao, et al. Research status of threshing system of grain combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(5):48–57. (in Chinese)
- [11] 杨丽丽, 田伟泽, 徐媛媛, 等. 谷物联合收割机油耗随机森林预测模型[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9):275–281.
YANG Lili, TIAN Weize, XU Yuanyuan, et al. Predicting fuel consumption of grain combine harvesters based on random forest[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9):275–281. (in Chinese)
- [12] 宁小波, 陈进, 李耀明, 等. 联合收获机脱粒系统动力学模型及调速控制仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):25–34.
NING Xiaobo, CHEN Jin, LI Yaoming, et al. Kinetic model of combine harvester threshing system and simulation and experiment of speed control[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):25–34. (in Chinese)
- [13] 徐立章, 朱志豪, 胡金鹏, 等. 一种增程式电动联合收获机及其控制方法: CN114402793A[P]. 2022–04–29.
- [14] 赵男, 金诚谦, 王超, 等. 谷物联合收获机清选系统智能化技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(3):163–170.
ZHAO Nan, JIN Chengqian, WANG Chao, et al. Research progress on intelligent technology of grain combined harvester cleaning system[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(3):163–170. (in Chinese)
- [15] ŠOTNAR M, POSPIŠIL J, MAREČEK J, et al. Influence of the combine harvester parameter settings on harvest losses[J]. Acta Technologica Agriculturae, 2018, 21(3):105–108.
- [16] 陈艳普, 滕悦江, 王廷恩, 等. 纵轴流双螺旋滚筒的设计与试验分析[J]. 农机化研究, 2020, 42(7):62–69.
CHEN Yanpu, TENG Yuejiang, WANG Ting'en, et al. Design and experimental analysis of longitudinal and axial flow double spiral roller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(7):62–69. (in Chinese)
- [17] LIU L, LIU Y J, CHEN A, et al. Integral barrier Lyapunov function-based adaptive control for switched nonlinear systems[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(13):1–14.
- [18] HUANG H, LUO C, HAN B. Prescribed performance fuzzy back-stepping control of a flexible air-breathing hypersonic vehicle subject to input constraints[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 33(3):853–866.
- [19] 陈进, 宁小波, 李耀明, 等. 联合收获机前进速度的模型参考模糊自适应控制系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10):87–91.
CHEN Jin, NING Xiaobo, LI Yaoming, et al. Fuzzy adaptive control system of forward speed for combine harvester based on model reference[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):87–91. (in Chinese)
- [20] TANG Z, ZHANG H, ZHOU Y, et al. Effects of stem cutting in rice harvesting by combine harvester front header vibration[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019(1):1–15.
- [21] FAN C, ZHANG D, YANG L, et al. Development and performance evaluation of the electric-hydraulic concave clearance control system based on maize feed rate monitoring[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(2):156–164.
- [22] GUAN Z, WU C, LI Y, et al. Cutting speed follow-up adjusting system of bidirectional electric drive side cutter for rape combine harvester[J]. Science Progress, 2020, 103(3):72–81.
- [23] 丁翰韬, 陈树人, 周巍伟, 等. 喂入量扰动下联合收获机振动特性机理研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2):20–27.
DING Hantao, CHEN Shuren, ZHOU Weiwei, et al. Mechanism analysis of combine harvester's vibration characteristics under feeding interference[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Suppl. 2):20–27. (in Chinese)
- [24] SUN X, XU N, CHEN Q, et al. State of power capability prediction of lithium-ion battery from the perspective of electrochemical mechanisms considering temperature effect[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 9(2):2453–2463.
- [25] SARIYILDIZ E, OBOE R, OHNISHI K. Disturbance observer-based robust control and its applications: 35th anniversary overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3):2042–2053.
- [26] SUN X, WU M, LEI G, et al. An improved model predictive current control for PMSM drives based on current track circle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(5):3782–3793.
- [27] ZHANG G, ZHOU H, WANG G, et al. Current sensor fault-tolerant control for encoderless IPMSM drives based on current space vector error reconstruction[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(4):3658–3668.
- [28] CHEN L, WANG Q, HU C H. Adaptive fuzzy command filtered backstepping control for uncertain pure-feedback systems[J]. ISA Transactions, 2022, 129:204–213.
- [29] CHENG D, GUO L, HUANG J. On quadratic Lyapunov functions[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(5):885–890.
- [30] LI H, WANG Y. Lyapunov-based stability and construction of Lyapunov functions for Boolean networks[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2017, 55(6):3437–3457.