

文章编号:1671-5896(2026)04-0790-09

基于连续时间模型预测控制的 PMSM 转速控制

邵克勇, 苗露阳

(东北石油大学 电气工程信息学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 针对永磁同步电机在高动态运行和外部负载扰动条件下转速控制性能下降与鲁棒性不足的问题, 提出一种结合 Laguerre 函数参数化建模与非线性扰动观测补偿机制的连续时间模型预测控制方法。该方法采用 Laguerre 正交函数对控制增量进行有限维参数化, 以降低优化维度并提升求解效率; 同时设计自适应平滑因子, 实现控制响应速度与输入平滑性间的动态平衡。为提高控制系统的工程适用性, 构建连续可微的软约束机制, 以避免硬约束引发的数值不稳定问题。仿真结果表明, 在相同控制条件下, 所提方法在转速跟踪精度和抗扰动性能方面优于传统模型预测控制方法。

关键词: 永磁同步电机; 连续时间模型预测控制; 非线性扰动观测器; Laguerre 函数; 参数化

中图分类号: TP273; TM341

文献标识码: A

Speed Control of PMSM Based on Predictive Control of Continuous-Time Model

SHAO Keyong, MIAO Luyang

(School of Electrical and Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: To address the degradation of performance in speed control and insufficient robustness of permanent magnet synchronous motors under high dynamic operation and external load disturbances, a continuous-time model predictive control method that integrates Laguerre function-based parameterization with a nonlinear disturbance observer compensation mechanism is proposed. The method employs finite-dimensional parameterization of the control increment using Laguerre orthogonal functions to significantly reduce the optimization dimension and improve computational efficiency. An adaptive smoothing factor is designed to achieve a dynamic balance between control response speed and input smoothness. To enhance the engineering applicability of the control system, a continuously differentiable soft constraint mechanism is introduced to avoid numerical instability caused by hard constraints. Simulation results verify that the proposed method exhibits superior speed tracking accuracy and disturbance rejection performance compared to conventional model predictive control under the same conditions.

Key words: permanent magnet synchronous motor; continuous-time model predictive control; nonlinear disturbance observer; Laguerre function; parameterization

0 引言

永磁同步电机(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)具有功率密度高、效率高、成本低和动态响应快等优点^[1-2], 已成为电动汽车、机器人和可再生能源系统等现代工业应用中的关键部件^[3-6]。然而, 电机参数不准确会导致 PMSM 控制系统性能下降, 尤其在外部干扰下运行时, PMSM 的控制仍

收稿日期: 2025-06-24

基金项目: 黑龙江省重点研发基金资助项目(ZDYF2024GXJS007); 黑龙江省属高校专项基金资助项目(2022TSTD-04)

作者简介: 邵克勇(1972—), 男, 河南淮阳人, 东北石油大学教授, 博士生导师, 主要从事分数阶系统理论、鲁棒控制和混沌系统研究, (Tel)86-13945931672 (E-mail) shaokeyongauto@163.com。

面临较大挑战^[7]。在传统控制方法中,场定向控制(FOC; Field-Oriented Control)和直接转矩控制(DTC; Direct Torque Control)是两种广泛采用的 PMSM 驱动策略。传统 FOC 采用带 PI(Proportional Integral)控制器的多回路结构跟踪电流和转速,但在参数变化和负载扰动影响下难以保持最优性能^[8]。传统的 DTC 算法是一种使用磁滞控制器、扭矩指令值和定子磁通指令值的查找表(LUT; Lookup Table)跟踪电机的扭矩和磁通量的控制方法。但使用磁滞控制器和 LUT 的传统 DTC 算法有一个明显的缺点,即在电机旋转期间,转子和定子磁通间的负载角度无法始终保持,因此会产生转矩波动^[9]。

近年来,模型预测控制(MPC; Model Predictive Control)因易于理解、结构简单、动态性能优越而成为研究热点^[10],已成功应用于 PMSM 和感应电机驱动系统的速度控制^[11]并相继提出许多改进 MPC 方法。Errouissi 等^[12]将基于泰勒级数展开的连续时间模型预测控制(CMPC; Continuous-Time Model Predictive Control)与非线性扰动观测器结合,实现了 PMSM 驱动系统中的负载扰动解耦;Das 等^[13]提出一种数值算法,通过对控制轨迹容许空间进行有限参数化直接求解 CMPC 问题;Abdissa^[14]应用 Laguerre 函数为表面贴装式 PMSM 提出离散模型预测速度控制策略,在保持快速动态响应的同时实现了良好稳态性能;Kuo 等^[15]利用 Laguerre 函数逼近控制信号,提出了带输入约束的非线性系统跟踪控制方案。

虽然上述研究在电机控制及 MPC 改进方面取得了显著进展,但仍存在抗干扰能力弱或计算复杂度高问题。为此,笔者提出一种基于 Laguerre 函数的 CMPC 方法,结合非线性扰动观测器(NDO; Nonlinear Disturbance Observer)实现 PMSM 速度控制,电流控制部分则采用无差拍预测控制以保证电流跟踪精度。

1 永磁同步电机的数学模型

在 d - q 轴坐标系下,表面贴装 PMSM 的电压方程为

$$u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e Li_q, \quad (1)$$

$$u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_e Li_d + \omega_e \psi_f, \quad (2)$$

其中 u_d 、 u_q 为 d - q 轴定子电压, i_d 、 i_q 为 d - q 轴定子电流, R 为定子电阻, L_d 、 L_q 为 d - q 轴电感, ω_e 为电角速度,其中 $\omega_e = p\omega_m$, p 为极对数, ω_m 为机械转速, ψ_f 为永磁体磁链。

SPMSM 的电磁转矩由永磁体磁链和凸极效应共同产生,则有

$$T_e = \frac{3}{2}p\psi_f i_q, \quad (3)$$

其中 $\frac{3}{2}p\psi_f$ 为转矩常数,记为 K_t 。

PMSM 的机械动态由牛顿第二定律描述,如下:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m. \quad (4)$$

代入转矩方程 $T_e = K_t i_q$, 机械运动方程可重写为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{B}{J}\omega_m + \frac{K_t}{J}i_q - \frac{T_L}{J}. \quad (5)$$

定义状态变量 $x = \omega_m$, 输入 $u = i_q$, 扰动 $d = -T_L/J$, 系统参数 $a = -B/J$, $b = K_t/J$, 则转速动态方程为

$$\dot{x} = ax + bu + d. \quad (6)$$

在离散时间下,采用欧拉前向差分近似可得:

$$x(k+1) = x(k) + T_s(ax(k) + bu(k) + d(k)). \quad (7)$$

2 基于 Laguerre 的控制器设计

笔者在 CMPC 中采用 Laguerre 函数对控制增量进行有限维参数化,将控制输入表示为 Laguerre 基函数系数的线性组合,从而将连续时域无限维优化问题转化为有限参数优化,显著降低计算复杂度。

2.1 CMPC 的原理

CMPC 是一种基于连续时间模型的控制方法,通过预测系统未来行为优化目标函数,计算最优控制输入,以实现高性能的控制目标。其核心在于直接优化控制信号的导数,以保证控制输入的平滑性和系统稳定性。

与离散时间 MPC 相比,CMPC 基于连续时间模型,可避免离散化误差引起的性能退化。对 PMSM 这类快速动态系统,连续时间建模能更准确反映状态演化过程,提高预测精度。

假设 PMSM 模型中的扰动 d 在预测时域内保持不变($d(t) = d(k)$, $t \in [kT_s, kT_s + T_p]$),并通过 NDO 估计 T_L 。

由于 CMPC 的输出预测轨迹由系统模型和控制输入决定,扰动 $d(t)$ 通过 NDO 估计后影响初始条件,不直接参与预测轨迹的生成,所以将扰动 $d(k)$ 通过 NDO 预补偿到初始转速 $x(k) = \omega(k)$,即调整为

$$x'(k) = \omega(k) - \frac{\hat{d}(k)}{B}. \quad (8)$$

状态 $x(t)$ 在预测时域 T_p 内的动态为

$$\dot{x}(t) = -\frac{B}{J}x(t) + \frac{k_T}{J}u(t), \quad (9)$$

其中 $t \in [kT_s, kT_s + T_p]$, $x(t) = \omega_m(t)$ 为当前时刻的转速, $u(t) = i_q(t)$ 为预测时域内的控制输入。

CMPC 的目标是使转速 ω_m 跟踪参考转速 ω_{ref} ,同时最小化控制输入的能量消耗。定义目标函数为

$$J = \int_{kT_s}^{kT_s + T_p} [Q(x(t) - \omega_{ref})^2 + R(u(t) - i_q(k))^2] dt, \quad (10)$$

其中 Q 为状态权重,反映转速误差的惩罚, R 为控制权重,反映控制输入变化的惩罚, ω_{ref} 为参考转速, $i_q(k)$ 为当前时刻 q 轴电流, $u(t)$ 为预测输入的整体。

在预测时域内,可以将控制输入 $u(t)$ 表示为增量形式: $u(t) = i_q(k) + \Delta u(t)$ 。其中 $\Delta u(t)$ 为控制增量。所以目标函数可以重写为

$$J = \int_{kT_s}^{kT_s + T_p} [Q(x(t) - \omega_{ref})^2 + R\Delta u(t)^2] dt. \quad (11)$$

如果直接优化 $\Delta u(t)$,需要对整个预测时域进行数值积分,会使计算的复杂度增加。因此,将引入 Laguerre 函数对 $\Delta u(t)$ 进行参数化,简化优化问题。

2.2 Laguerre 函数

Laguerre 函数具有正交性和指数衰减特性,适于建模平稳控制信号。其收敛速度快、表达紧凑,适用于实时求解的连续时间预测控制问题。根据函数逼近理论, Laguerre 函数可在一定阶数内逼近任何平稳控制信号,其正交性也使优化问题中相关矩阵计算更为简洁,有助于提升求解效率与数值稳定性。

对 PMSM 系统而言,在转速控制中引入 Laguerre 函数作为控制器基函数,将控制增量表达为有限阶 Laguerre 函数的组合,能增强系统对模型不确定性和负载扰动的鲁棒。一组 Laguerre 函数可以定义为

$$\begin{cases} l_1(t) = \sqrt{2p} e^{(-pt)}, \\ l_2(t) = \sqrt{2p} (-2pt + 1) e^{(-pt)}, \\ \vdots \\ l_i(t) = \sqrt{2p} \frac{e^{pt}}{(i-1)!} \frac{d^{(i-1)}}{dt^{(i-1)}} [t^{(i-1)} e^{(-2pt)}], \end{cases} \quad (12)$$

其中 $p > 0$ 表示时间缩放因子,用于调整 Laguerre 函数的时间尺度,而控制指数衰减速率则由该因子的大小决定。

Laguerre 函数的拉普拉斯变换为

$$L_i(s) = \frac{\sqrt{2p}(s-p)^{(i-1)}}{(s+p)^i}. \quad (13)$$

Laguerre 函数满足正交性:

$$\int_0^\infty l_i(t)l_j(t)dt = \delta_{ij}, \quad (14)$$

其中 δ_{ij} 为 Kronecker 函数 ($i=j$ 时为 1, 否则为 0)。

控制增量 $\Delta u(t)$ 可表示为 Laguerre 函数的线性组合:

$$\Delta u(t) = \sum_{i=1}^N c_i l_i(t - kT_s). \quad (15)$$

定义 Laguerre 函数向量 $\mathbf{L}(t) = [l_1(t - kT_s), l_2(t - kT_s), \dots, l_N(t - kT_s)]^T$, 系数向量 $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_n]^T$, 则 $\Delta u(t) = \mathbf{L}(t)^T \mathbf{c}$ 。

将 $\Delta u(t)$ 代入预测模型, 则状态 $x(t)$ 为

$$x(t) = e^{-B/J(t-kT_s)} x'(k) + \frac{k_T}{J} \int_{kT_s}^t e^{-B/J(t-\tau)} \Delta u(\tau) d\tau. \quad (16)$$

结合式(15), 可得

$$x(t) = e^{-B/J(t-kT_s)} x'(k) + \frac{k_T}{J} \int_{kT_s}^t e^{-B/J(t-\tau)} \mathbf{L}(\tau)^T \boldsymbol{\eta} d\tau. \quad (17)$$

CMPC 的目标函数通过优化系数 $\boldsymbol{\eta}$ 最小化:

$$J = \int_{kT_s}^{kT_s+T_p} [Q(x(t) - \omega_{\text{ref}})^2 + R(\boldsymbol{\eta}^T \mathbf{L}(t))^2] dt. \quad (18)$$

定义积分项:

$$\boldsymbol{\varphi}(t) = \int_{kT_s}^t e^{-B/J(t-\tau)} \mathbf{L}(\tau)^T d\tau. \quad (19)$$

则状态 $x(t)$ 为

$$x(t) = e^{-B/J(t-kT_s)} x'(k) + \frac{k_T}{J} \boldsymbol{\varphi}(t) \boldsymbol{\eta}. \quad (20)$$

将式(20)代入目标函数(18)中可得:

$$J = \int_{kT_s}^{kT_s+T_p} [Q(e^{-B/J(t-kT_s)} x'(k) + \frac{k_T}{J} \boldsymbol{\varphi}(t) \boldsymbol{\eta} - \omega_{\text{ref}})^2 + R(\boldsymbol{\eta}^T \mathbf{L}(t))^2] dt. \quad (21)$$

由于 J 是关于 $\boldsymbol{\eta}$ 的二次函数, 可通过对 $\boldsymbol{\eta}$ 求偏导数并令 $\partial J / \partial \boldsymbol{\eta} = 0$, 解得最优系数 $\boldsymbol{\eta}$, 从而得到最优控制输入。

通过上述对 Laguerre 函数参数化, 使优化变量从整个预测时域的 $\Delta u(t)$ 简化为有限系数 $\boldsymbol{\eta}$ (维度 N), 计算复杂度从 $O(N^2)$ 降至 $O(N)$ 。

2.3 自适应平滑因子

平滑因子用于减少数据波动性。固定平滑因子在转速突变或扰动时易引起控制输入波动, 笔者提出基于预测误差动态调整的自适应平滑因子机制, 通过实时监测预测误差动态调整控制器对增量输入的响应强度, 实现控制平滑性与动态响应速度的自适应权衡。

引入自适应平滑因子

$$\alpha = \max\left(0.1, 1 - \frac{|\varepsilon|}{\max(|\omega_{\text{ref}}|, 1)}\right), \quad (22)$$

其中 ε 为预测误差。平滑后的控制输入为: $i_{q,\text{ref}} = \alpha i_{q,\text{ref}} + (1-\alpha) i_{q,\text{prev}}$, 其中 $i_{q,\text{ref}}$ 为上一时刻的控制输入。 α 根据误差动态调整: 误差较大时 α 接近 0.1, 增强平滑效果; 误差较小时 α 接近 1, 加快响应速度。

2.4 软约束

在模型预测控制中, 输入约束是常见的工程实际需求。如果忽略这些限制, 控制器可能会给出超出执行能力的控制指令, 使系统不稳定。传统的硬约束是在优化问题中加入不等式限制。但硬约束方法可能导致控制输入出现“碰撞边界”的不连续行为, 使求解器收敛困难。

因此, 笔者在 CMPC 结构中引入了软约束机制, 通过设计连续可微的饱和函数对控制输入进行平滑限制。与硬约束相比, 该方法在保证约束满足的同时, 避免了边界处的突变行为, 有助于提升系统动态

性能。而且,软约束的连续特性可在一定程度上缓解数值震荡,从而提升控制器在实时应用中的可行性。约束函数如下:

$$i_{q,\text{ref}} = 30 \tanh\left(\frac{i_{q,\text{ref}}}{30}\right), \quad (23)$$

其中 $\tanh$ 函数将 $i_{q,\text{ref}}$ 限制在 $[-30, 30]$ 范围内,同时保持控制输入的平滑性。

3 非线性扰动观测器设计

在 PMSM 的控制中,影响系统性能的主要外部扰动为负载转矩,尤其在负载突然发生变化时,会导致电机转速发生较大的波动。如果仅使用 CMPC 控制器,在面对不可测扰动或系统不确定性时,容易出现预测轨迹偏移。

NDO 可实现对 PMSM 系统外部扰动的快速准确估计,并将该估计值反馈至 CMPC 控制器模型中,从而实现扰动前馈补偿。因此,引入 NDO 作为转速控制系统的观测器,通过动态修正模型预测初始条件增强控制系统的鲁棒性,改善系统的控制性能与响应精度。

3.1 NDO 的原理

根据式(4),PMSM 的转速动态方程为

$$\dot{\omega}_m = \frac{T_e - B\omega_m}{J} - \frac{T_L}{J}. \quad (24)$$

定义非线性函数:

$$f = \frac{T_e - B\omega_m}{J}. \quad (25)$$

则:

$$\dot{\omega}_m = f + d. \quad (26)$$

NDO 的目标是估计扰动 d , 并通过 $d = -\frac{T_L}{J}$ 计算负载转矩估计值 $\hat{T}_L$ 。

NDO 的核心思想是通过引入辅助变量 z 和非线性增益函数,构造扰动估计器。假设扰动 d 在短时间内变化缓慢(即 $\dot{d} \approx 0$)。定义辅助变量 z 满足:

$$z = \hat{d} - p(\omega_m), \quad (27)$$

其中 $\hat{d}$ 为扰动估计值, $p(\omega_m)$ 为非线性增益函数,依赖于转速 ω_m 。对 z 求导:

$$\dot{z} = \dot{\hat{d}} - \dot{p}(\omega_m). \quad (28)$$

由于 $\dot{d} \approx 0$, 假设 $\dot{\hat{d}} \approx 0$ (估计值快速收敛), 且:

$$\dot{p}(\omega_m) = \frac{dp}{d\omega_m} \dot{\omega}_m = l(\omega_m) \dot{\omega}_m. \quad (29)$$

代入式(26)可得:

$$\dot{z} = -l(\omega_m)(f + d). \quad (30)$$

由于 $d = \hat{d} = z + p(\omega_m)$, 代入式(30)可得:

$$\dot{z} = -l(\omega_m)(f + z + p(\omega_m)). \quad (31)$$

在离散时间下,采用欧拉前向差分近似:

$$z(k+1) = z(k) - T_s l(\omega_m(k))(f(k) + z(k) + p(\omega_m(k))). \quad (32)$$

扰动估计值为

$$\hat{d}(k) = z(k) + p(\omega_m(k)). \quad (33)$$

负载转矩估计值为

$$\hat{T}_L(k) = -\hat{d}(k)/J, \quad (34)$$

其中非线性增益函数 $p(\omega_m)$ 和其导数 $l(\omega_m)$ 的设计直接影响 NDO 的估计精度和收敛速度。

设计 $p(\omega_m)$ 为二次函数形式:

其中 l_0 控制基础增益水平, l_1 控制对转速变化的灵敏度。该结构可增强观测器对高速扰动或强激励下的响应能力, 防止估计饱和或过冲。则:

选择 $l_0=0.05$, $l_1=0.01$, 以确保该增益为正值, 并在转速范围内进行适度变化。

在实际电机控制中,由于负载扰动具有一定上限,所以可以通过物理先验知识对估计结果加边界限制,其不仅能增强扰动观测的可信度,还能使控制系统保持稳健运行。

为防止估计值在外部扰动剧烈或系统模型存在偏差时发生突变,导致控制器输入不稳定,对扰动估计值 $\hat{t}$ 施加幅值约束:

该约束可有效限制 NDO 的输出范围,避免不合理的扰动反馈进入 CMPC 控制器,提升系统的整体稳定性和安全性。

为验证上述设计方案的可行性,通过仿真软件 Matlab/Simulink 搭建仿真平台进行模拟仿真,仿真系统整合参数以及电机参数如表 1、表 2 所示。

Tab.1 Simulation system integration parameters

参数	采样时间/s	Laguerre 阶数	Laguerre 缩放因子	NDO 基础增益	NDO 非线性增益	NDO 估计扰动范围
数值	8×10^{-5}	5	40	0.05	0.01	$[-10, 10]$

Tab. 2 Parameters of the PMSM

参数	额定电压/V	定子电阻/ Ω	定子电感/H	永磁体磁链/Wb	极对数	转动惯量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	摩擦系数/ ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$)
数值	380	0.958 5	5.25×10^{-3}	0.182 7	4	6.329×10^{-4}	3×10^{-6}

系统整体仿真结构如图 1 所示。其采用了电流环和速度环双闭环的控制方式,外环速度环采用连续时间模型预测控制以及非线性扰动观测器进行扰动估计,内环采用无差拍电流预测控制。



Fig. 1 Overall simulation structure of the system

在上述仿真环境下,设定永磁同步电机供电电压为 380 V,转速为变化转速,在 0 ~ 0.02 s 为 1 000 r/min,在 0.02 ~ 0.04 s 为 1 200 r/min,在 0.04 ~ 0.1 s 为 1 000 r/min。并在 0.06 s 时加入一个 10 N · m 的负载干扰,且该负载干扰在持续到 0.08 s 时降为 5 N · m,并持续到 0.1 s。

图 2 为 d - q 轴电流随时间变化的曲线。在 0 ~ 0.06 s, i_q 随转速阶跃进行快速调整,峰值约 30 A,反映了 CMPC 对转速变化的快速响应。在 0.06 s 时加入负载, i_q 上升至 13 A 并迅速恢复,0.08 s 负载降至 5 N · m 时减小至 5 A,反映了 CMPC 有效调节转矩以对抗负载。

图 3 为三相电流随时间的变化曲线。在 0 s ~ 0.06 s,三相电流随转速阶跃快速调整,峰值约 25 A 和 -25 A,反映了转速变化引起的转矩需求;在 0.06 s 加入 10 N · m 负载时,三相电流幅值增至约 10 A,0.08 s 负载降至 5 N · m 时幅值减小至约 5 A ~ -5 A,表明系统可有效响应负载变化。

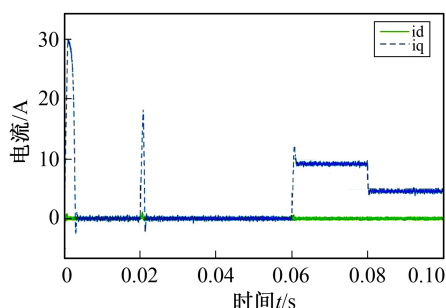


图 2 d - q 轴电流随时间变化曲线

Fig. 2 Curve of d - q axis current with time

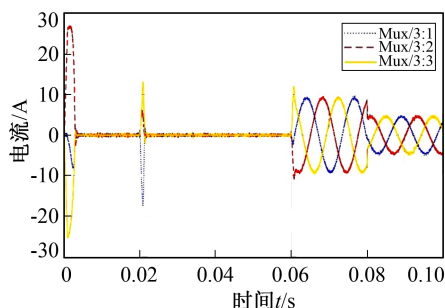


图 3 三相定子电流随时间变化曲线

Fig. 3 Three-phase stator current curve over time

图 4 为电磁转矩 T_e 、负载转矩 T_L 和 NDO 估计的负载转矩随时间变化的曲线。在 0 ~ 0.6 s, T_e 随转速阶跃进行快速调整,峰值约 30 N · m,反映了转速变化引起的转矩需求;在 0.06 s 加入负载时, T_e 迅速上升至约 10 N · m,0.08 s 负载降低时, T_e 减小至约 5 N · m,反映了 CMPC 可有效调节转矩以对抗负载。NDO 估计值在 0.06 s 和 0.08 s 快速跟踪实际 T_L ,反映了 NDO 能精准估计扰动。

为进一步验证非线性扰动观测器对系统抗干扰性能的提升效果,笔者对比了无和有 NDO 的情况下,CMPC 控制器的转速响应,仿真结果如图 5 所示。由图 5 可知,在施加负载时,有 NDO 的实际转速能快速逼近给定转速并稳定在 1 200 r/min。在没有 NDO 的情况下,最终转速只能达到 1 193 r/min 附近。实验证明,通过加入 NDO 系统的抗干扰能力有较大提升。

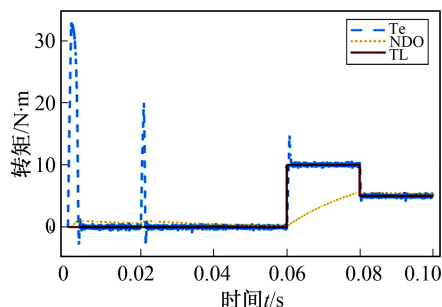


图 4 转矩随时间变化仿真曲线

Fig. 4 Torque over time simulation curve

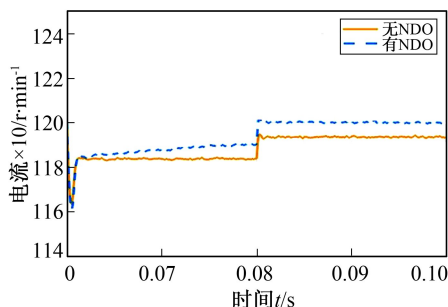


图 5 负载扰动时两种控制方法的转速仿真曲线

Fig. 5 Simulated velocity curves of two control methods with load disturbances

图 6 为在传统 MPC 和 CMPC 控制下电机转速随时间变化的对比曲线,其中虚线表示 CMPC 控制器下的转速,实线表示 MPC 控制器下的转速。在 0 ~ 0.02 s 的转速跟踪阶段,初始转速指令为 1 000 r/min。传统 MPC 的转速上升时间约为 0.004 s,超调量约为 26 r/min;CMPC 的上升时间为 0.003 s,超调量为 8 r/min。与传统 MPC 相比,CMPC 的上升时间缩短了 25%,超调量减少了 69%。在 0.02 ~ 0.06 s,转速指令从 1 000 r/min 升至 1 200 r/min。传统 MPC 的转速上升时间约为 0.002 s,超调量约为 8 r/min,但到 0.04 s 才恢复至 1 200 r/min 附近;CMPC 的上升时间约为 0.001 s,超调量约为 8 r/min,并在 0.002 s 内

恢复至1 200 r/min 附近。在0.06 s 加入10 N·m 负载干扰时,传统 MPC 的转速约下降至1 165 r/min,下降幅度为35 r/min,恢复时间约为0.014 s;CMPC 的转速约下降至1 162 r/min,下降幅度为32 r/min,恢复时间缩短至0.007 s,恢复时间缩短了50%。在0.08 s 负载降至5 N·m 时,传统 MPC 的转速超调幅度约为15 r/min;CMPC 的转速超调幅度约为2 r/min,减少了86%。

实验结果表明,在相同控制条件下,CMPC 在转速跟踪精度和干扰抑制方面相较所选的传统 MPC 控制器有更好的控制性能。

5 结 语

笔者针对永磁同步电机快速响应与抗扰动控制需求,提出了基于连续时间模型预测控制的转速控制策略。通过Laguerre 函数对控制增量进行有限维参数化,降低了优化维度;引入自适应平滑机制与软约束结构,提升了输入平滑性与系统实用性;结合非线性扰动观测器实现扰动估计与补偿,增强了系统鲁棒性。仿真结果表明,所提方法在速度跟踪性能、超调控制与扰动抑制方面均优于传统 MPC。后续工作将面向硬件平台进行实时验证。

参考文献:

[1] 王金玉,路鑫宇,张忠伟. 基于改进占空比调制的PMSM 模型预测控制[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2023, 41(5): 787-792.
WANG J Y, LU X Y, ZHANG Z W. Predictive Control of PMSM Based on Improved Duty Cycle Modulation[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2023, 41(5): 787-792.

[2] 任娇. CACA 优化的滑模观测器在IPMSM 调速中的应用[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2021, 39(3): 310-317.
REN J. Application of Sliding-Mode Observer CACA Optimized in IPMSM Speed Regulation[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2021, 39(3): 310-317.

[3] ZHANG Z, SUN Q, ZHANG Q. A Computationally Efficient Model Predictive Control Method for Dual Three-Phase PMSM of Electric Vehicle with Fixed Switching Frequency[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(1): 1105-1116.

[4] PANG S Z, ZHANG Y H, HUANG Y G, et al. A Virtual MPC-Based Artificial Neural Network Controller for PMSM Drives in Aircraft Electric Propulsion System[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(2): 3603-3612.

[5] GUO K, GUO Y, FANG S, et al. Design and Analysis of a Permanent Magnet Frameless Motor[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(3): 3124-3134.

[6] 李金子,肖炯然,潘剑飞. 多永磁同步直线电机协同控制研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2019, 37(1): 32-39.
LI J Z, XIAO J R, PAN J F. Research on Cooperative Control of Multi-PMSM Linear Motors[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2019, 37(1): 32-39.

[7] ZHANG X, FANG S, ZHANG H. Predictive Current Error Compensation Based Strong Robust Model Predictive Control for PMSM Drive Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(12): 15280-15289.

[8] ABOELHASSAN A, WANG S, BUTICCHI G, et al. Modulated Model Predictive Speed Controller for PMSM Drives Employing Voltage-Based Cost Function[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2024, 5: 122-131.

[9] SON D-I, HAN J-S, PARK J S, et al. Performance Improvement of DTC-SVM of PMSM with Compensation for the Dead Time Effect and Power Switch Loss Based on Extended Kalman Filter[J/OL]. Electronics, 2023, 12(4): 966 [2025-06-20].
<https://doi.org/10.3390/electronics12040966>.

[10] ELMORSHEDY M F, XU W, EL-SOUSY F F M, et al. Recent Achievements in Model Predictive Control Techniques for

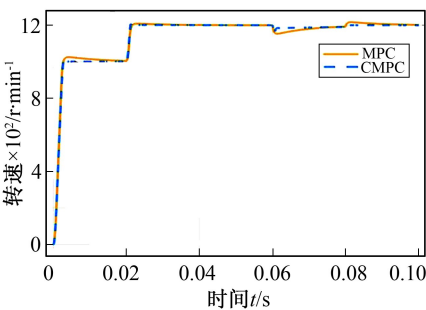


图6 两种控制方法的转速响应仿真曲线
Fig.6 Simulation curves of speed response of two control methods

- Industrial Motor: A Comprehensive State-of-the-Art [J]. IEEE Access, 2021, 9: 58170-58191.
- [11] LIU M. Dual Cost Function Model Predictive Direct Speed Control with Duty Ratio Optimization for PMSM Drives [J]. IEEE Access, 2020, 8: 126637-126647.
- [12] ERROUSSI R, AL-DURRA A, MUYEEN S M, et al. Continuous-Time Model Predictive Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive with Disturbance Decoupling [J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(5): 697-706.
- [13] DASS, GANGULY S, ANJALI M, et al. Towards Continuous-Time MPC: A Novel Trajectory Optimization Algorithm [C]// 2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 3276-3281.
- [14] ABDISSA C M. Improved Model Predictive Speed Control of a PMSM via Laguerre Functions [J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2024(1): 5562771 [2025-06-20]. <https://doi.org/10.1155/2024/5562771>.
- [15] KUO Y L, PONGPANYAPORN P. Continuous-Time Nonlinear Model Predictive Tracking Control with Input Constraints Using Feedback Linearization [J/OL]. Applied Sciences, 2022, 12(10): 5016 [2025-06-20]. <https://doi.org/10.3390/app12105016>.

(责任编辑: 刘俏亮)