

永磁同步电机的多目标互补控制

张桂林, 徐淑亮, 刘浩天

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:针对存在模型不确定性、外界干扰和测量噪声的永磁同步电机高性能跟踪控制问题,以及单一控制结构的局限性,提出一种跟踪性能和抗干扰性能互补的鲁棒控制方法。首先,采用正弦扫频辨识方法建立系统标称模型和系统乘性不确定性模型,设计PI控制器以满足较高的跟踪性能,同时设计 H_∞ 控制器以克服模型不确定性的影响,提高系统鲁棒性。其次,综合PI控制器与 H_∞ 控制器,采用多目标互补控制架构设计一个鲁棒控制器,有效解决系统鲁棒性与最优性能之间的冲突问题。最后,实验结果表明,多目标互补控制方法空载时的调节时间缩短至 H_∞ 控制器的83.8%,施加 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时的转速跌落为PI控制器的48.7%,有效结合了 H_∞ 控制器的抗干扰能力和PI控制器的跟踪性能。

关键词:永磁同步电机;模型辨识;鲁棒控制; H_∞ 控制;模型不确定性;多目标互补控制

DOI:10.15938/j.emc.2025.06.014

中图分类号:TM341

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)06-0134-07

Multi-objective complementary control of permanent magnet synchronous motors

ZHANG Guilin, XU Shuliang, LIU Haotian

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: To address the challenges of high-performance tracking control for permanent magnet synchronous motor under model uncertainty, external disturbances, and measurement noise, along with the limitations of a single control structure, a robust control method was proposed that combines tracking and disturbance rejection capabilities. Initially, the system's nominal model and multiplicative uncertainty model were established using the sinusoidal frequency-sweeping identification method. A PI controller was designed to achieve high tracking performance, while an H_∞ controller was developed to mitigate the effects of model uncertainties and enhance system robustness. Subsequently, integrating the PI and H_∞ controllers within a multi-objective complementary control structure, a robust controller was formulated, effectively resolving the conflict between system robustness and optimal performance. Finally, experimental results demonstrate that the multi-objective complementary control method reduced the adjustment time under no-load conditions to 83.8% of that achieved with the H_∞ controller, and when subjected to a $2\text{ N}\cdot\text{m}$ load, the speed drop was 48.7% of that observed with the PI controller, effectively integrating the disturbance rejection capability of the H_∞ controller with the tracking performance of the PI controller.

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61933006);山东省引进顶尖人才“一事一议”专项经费

作者简介: 张桂林(1983—),男,博士,副教授,研究方向为系统辨识、动态迟滞非线性控制等;

徐淑亮(1999—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制等;

刘浩天(1998—),男,博士研究生,研究方向为系统辨识、鲁棒控制等。

通信作者: 刘浩天

Keywords: permanent magnet synchronous motor; model identification; robust control; H_∞ control; model uncertainty; multi-objective complementary control

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)凭借紧凑的结构以及高效率、高功率密度、高可靠性等优点,在家庭应用、工业自动化、医疗器械和高科技领域都得到了广泛关注与应用,同时也推动了 PMSM 控制理论的快速发展^[1]。目前,工业应用对 PMSM 的高精度、高动态响应、高效能源利用、抗干扰能力、灵活性和可靠性等方面有较高的需求^[2]。

传统 PI 控制虽凭借其设计简单、易于实现的优势在伺服系统中得到了广泛应用,但伺服电机系统通常是强耦合、非线性的,且对模型不确定性、外部干扰和测量噪声敏感^[3-4],致使传统 PI 控制难以在不同应用场景下满足过高的性能控制需求。因此,如何抑制电机调速系统的不确定性以提高系统的鲁棒性成为了国内外学者的研究重点^[5]。

在电机控制方法中,直接转矩控制(direct torque control, DTC)和磁场定向控制(field-oriented control, FOC)是最常被使用的^[6-7]。其中,FOC 凭借其快速、完全解耦的转矩和磁链控制优势,使其在永磁同步电机中得到了广泛应用。为进一步获得更高的控制性能,基于系统模型的控制方法被应用到 PMSM 中。然而,基于电机标称参数的机理建模方法和基于理想电机数学模型的参数辨识方法通常在处理损耗等参数时做出理想的假设,同时忽略了电机控制系统中其他设备的数学模型,致使系统模型精确程度难以满足高性能控制器的设计需求^[8]。基于正弦频率扫描信号的系统频率辨识方法允许在整个频率范围内以较高的分辨率获取系统的响应,并能够选择所需的主要频率段动态特性^[9]。该方法具有辨识精度高、便于实现的特点,对于精确分析伺服电机的频率特性非常有帮助。

为提高 PMSM 在不同应用中的跟踪性能,学者们提出许多先进的非线性控制方法,如神经网络控制^[10]、反步控制^[11]、预测控制^[12]、自适应控制^[13]等。此外, H_∞ 控制通过在系统频率特性上进行设计,为抑制外部干扰和控制对象未建模部分所产生

的不确定性提供了有效方法,在速度调节中可有效替代传统 PI 控制^[14]。其中,基于混合灵敏度的设计方法通过在不同频段上设计加权函数来约束系统性能,从而将控制目标转化为加权 H_∞ 性能指标,利用代数黎卡提方程或线性矩阵不等式方法^[15]对性能指标进行优化求解。这种设计方法具有简化、直观、高效和适应性强的优势。但在实际设计中,多目标优化问题往往会受到多方面的约束限制,具体表现为系统各通道之间以及单通道各频率之间的性能存在着复杂的博弈关系^[16]。因此,单一控制器设计很难使得系统性能得到过度改善,或者很难同时实现多个性能指标的显著改善。

为有效解决控制器性能与鲁棒性之间的冲突问题,实现 2 个性能目标下的控制器优化设计,本文通过采用新型控制架构提高 PMSM 伺服系统的转速跟踪性能和抗扰性能。经实验验证,本文所提方法能够有效抑制外界干扰和系统参数摄动对电机转速的影响,使得闭环系统在不失稳态精度的情况下实现动态性能和抗干扰能力的兼顾和提高,最终实现高精度的鲁棒跟踪控制。

1 PMSM 系统频率特性辨识

在采用 $i_d = 0$ 的转子磁场定向控制条件下,对永磁同步电机进行解耦后,控制特性呈现出类似于他励直流电机的控制方式^[6]。其控制结构可由典型的速度环和电流环组成,形成一个双环结构,如图 1 所示。由图可知,通过控制 q 轴电流和电压就能实现对电机转速的控制。

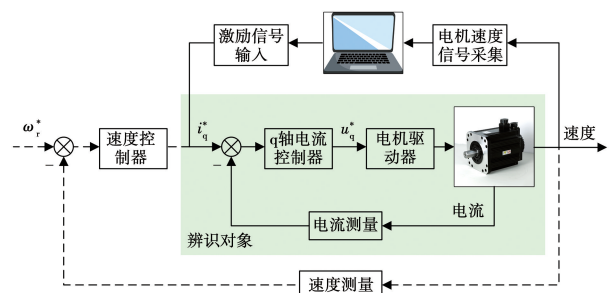


图 1 系统模型辨识配置

Fig. 1 System model identification configuration

根据图 1 所示的系统模型辨识原理,断开速度

控制器输出 i_q^* 并施加正弦扫频激励信号,驱动电机做相应转动,计算机同步记录输入的激励信号和编码器输出的速度信号,对输入输出信号进行预处理后,通过离散傅里叶变换将时域的实验数据变换到频域中,计算得到该系统的频率特性。对该频率特性进行拟合,进而可得到能够表征系统动态特性的传递函数模型。

连续时间序列的正弦扫频激励信号为

$$i(t) = A \sin[\omega(t)]. \quad (1)$$

式中: A 为激励信号的幅值; $\omega(t) = 2\pi f_0(1 + ct^n)$, $c = (f_T - f_0)/[(n+1)f_0 T^n]$, $[f_0, f_T]$ 为频率变换范围, T 为扫描时长, n 为频率变换的阶次。

对采集到的输入数据 u 和输出数据 y , 采用 Welch's 重叠段平均谱估计算法^[17] 求其功率谱密度 $P_{uu}(\omega)$ 和交叉功率谱密度 $P_{uy}(\omega)$, 则永磁同步电机速度开环频率特性可表示为

$$G(\omega) = \frac{P_{uy}(\omega)}{P_{uu}(\omega)}. \quad (2)$$

根据图1所示,在 i_q^* 处施加以下参数的正弦激励信号进行扫频辨识: $A = 1.2$; $f_0 = 0.1$ Hz; $f_T = 200$ Hz; $T = 25$ s; $n = 3$; 系统采样时间为 0.001 s。输入激励信号及系统输出响应曲线如图2所示,利用 MATLAB 系统辨识工具箱得到系统频率特性曲线及拟合曲线 Bode 图如图3所示,由图3可以看出,系统标称模型的截止频率为 27.89 Hz,相位裕度为 7.92°,拟合曲线的传递函数为

$$G_0(s) = \frac{30\,941(s + 0.123\,1)}{(s + 23.29)(s + 1.024)(s + 0.143\,2)}. \quad (3)$$

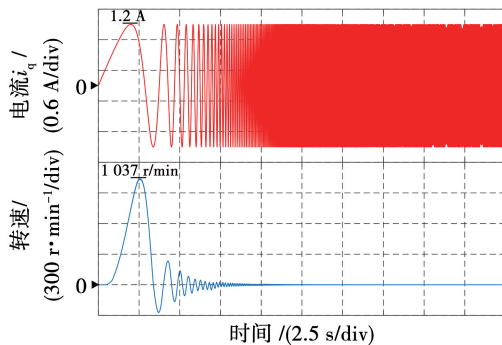


图2 扫频激励信号及速度输出响应曲线

Fig. 2 Sweep frequency excitation signal and speed output response curve

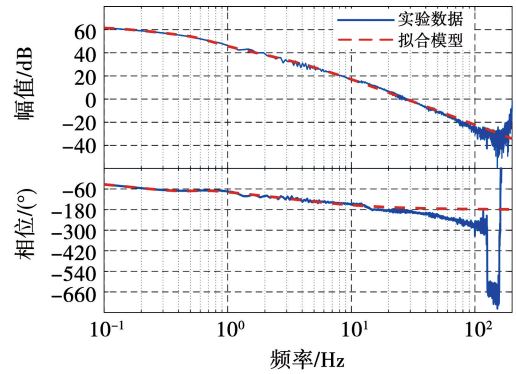


图3 速度开环频率特性及拟合曲线

Fig. 3 Open-loop frequency characteristics of speed and fitting curve

2 H_∞ 混合灵敏度鲁棒控制器设计

本文充分考虑模型不确定性,运用 H_∞ 混合灵敏度设计方法设计鲁棒控制器。考虑到鲁棒稳定性和抗外界干扰能力是 PMSM 双闭环矢量控制系统的重要性能指标,因此在混合灵敏度设计中考虑了灵敏度和补灵敏度这 2 个指标^[18]。图4为一种通用混合灵敏度模型设计结构,关于从 r 到 e 、 y 的闭环传递函数分别为:

$$S(s) = [I + K_c(s)G_0(s)]^{-1}; \quad (4)$$

$$T(s) = K_c(s)G_0(s) [I + K_c(s)G_0(s)]^{-1} = I - S(s). \quad (5)$$

式中: S 为灵敏度函数; T 为补灵敏度函数。

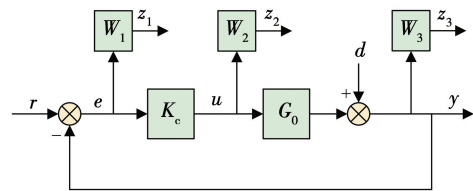


图4 加权混合灵敏度模型配置

Fig. 4 Weighted mixed sensitivity model configuration

图4中: r 为参考输入; e 为跟踪误差; u 为控制输入; d 为外部干扰; y 为系统输出; W_1 、 W_2 、 W_3 分别为针对 e 、 u 、 y 的加权函数; z_1 、 z_2 、 z_3 为用于系统评估的信号。

本文将混合灵敏度问题转化为寻找一个满足 H_∞ 性能指标的有理函数控制器问题,以确保闭环系统的稳定性,并使其 H_∞ 范数最小化。为使设计的

控制器具有良好的性能,结合加权函数定义,可得到最优性能设计指标为

$$\min_{K_c} \left\| \begin{array}{c} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K_c(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{array} \right\|_{\infty} \quad (6)$$

现实中,控制对象不可避免地存在各种不确定性,数学模型只能是对其简化近似^[19]。尽管高精度机电伺服系统可能存在一定程度的参数不确定性,但未建模的动态不确定性却是这类系统中最主要的不确定因素。为了便于鲁棒分析,伺服控制系统中常见的方法是利用非结构有界不确定性块 $\|\Delta\|_{\infty} \leq 1$ 描述动态不确定性,并采用模型集合 G 来概括反映真实对象的所有此类不确定性。本文采用图5的结构来表示对象不确定性,基于小增益定理,不确定性结构对应系统的鲁棒稳定条件为

$$\|W_m T\|_{\infty} \leq 1. \quad (7)$$

式中 W_m 为乘性不确定性权重。此时将乘性不确定性建模转化为对加权函数 W_3 的建模问题^[16]。

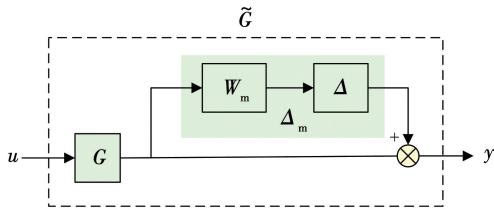


图5 乘性不确定性形式

Fig. 5 Formulation of multiplicative uncertainty

包含系统模型乘性不确定性的系统集合为 $\{\tilde{G}(s) \mid G(s) = G_0(1 + W_m\Delta), \|\Delta\|_{\infty} \leq 1\}$ 。

(8)

式中: $\tilde{G}$ 为模型集合; G 为摄动模型; G_0 为标称模型。

在 H_{∞} 鲁棒控制器设计时,首先进行系统乘性不确定性的建模。根据图3所示的原系统频率响应与标称模型频率响应,可计算两者的相对误差为

$$\Delta(j\omega) = [\tilde{G}(j\omega) - G_0(j\omega)]/G_0(j\omega). \quad (9)$$

图6为得到的模型不确定性频率响应曲线。绘制模型不确定性上界并进行拟合求解,构建3阶的模型不确定性上界传递函数为

$$W_m(s) = \frac{4.0813(s+1810)(s+158)(s+0.1242)}{(s+2.769)(s^2+801.3s+2029000)}. \quad (10)$$

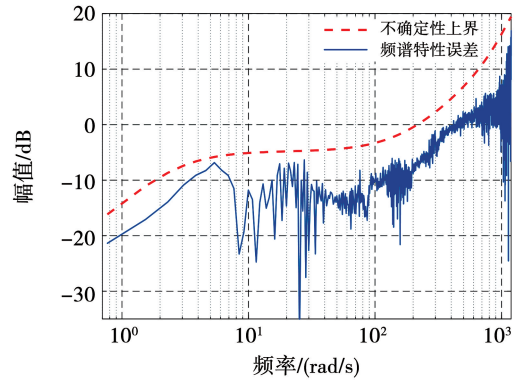


图6 伺服系统乘性不确定性建模

Fig. 6 Modeling of multiplication uncertainty in servo systems

根据式(6)的 H_{∞} 混合灵敏度设计指标及上述求取的乘性模型不确定性上界 W_m , 选取加权函数为:

$$W_1(s) = \frac{0.01(s+2000)}{(s+0.006666)}; \quad (11)$$

$$W_2 = 10; \quad (12)$$

$$W_3(s) = W_m(s). \quad (13)$$

利用 MATLAB 提供的 Hinfsvn 函数,计算出满足 H_{∞} 性能指标的鲁棒控制器,利用平衡随机截断法^[20]进行降阶处理后,得到三阶速度环控制器为

$$K_c(s) = \frac{240.38(s+21.51)(s+0.9383)}{(s+2900)(s+79.4)(s+0.006403)}. \quad (14)$$

经验证 $\|W_m T\|_{\infty} = 0.543 \leq 1$, 因此设计的 H_{∞} 控制器满足鲁棒稳定条件。 H_{∞} 控制通常要求系统在广义的条件下保持稳定,但这会影响系统的跟踪性能。在实际应用中,需要权衡系统的性能和稳定性,以及对不确定性的鲁棒性要求。

3 多目标互补控制

在传统反馈控制中,控制器性能与鲁棒性之间存在一定的内在冲突,为尽可能克服这种冲突,本文结合二自由度控制、内模控制以及容错控制的基本思想,采用如图7所示的多目标互补控制架构^[21],使每一个内部稳定反馈控制系统的控制器 K 可以由3个功能块来实现。

这种控制架构的优势在于 Q 是由残差信号 $f(s) = G_0(s)u(s) - y(s)$ 驱动的,该信号可视为标称模型与真实系统之间的差异,如果没有模型不确定性($G_0 = G$)、外部干扰或故障,则内环反馈信号

f 总是 0, 即 $f = 0$, 此时该系统由高性能控制器 K_0 单独控制; 若控制器 Q 被激活, 即当 $f \neq 0$ 时, 信号 q 的强度取决于模型不确定性的尺寸、扰动的大小和故障的程度, 因此 Q 可以被设计成鲁棒控制器。可以看出该控制器设计架构在性能和鲁棒性之间有一个明确的分离。

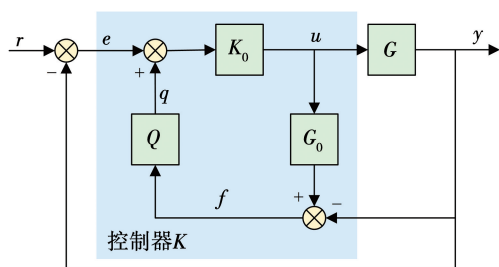


图7 多目标互补控制架构

Fig.7 Multi-objective complementary control structure

为构造出合适的控制器 Q , 可设计鲁棒控制器 K_1 和性能控制器 K_0 来分别确保系统具备较好的抗干扰能力和动态性能。在此基础上稳定的 Q 可被构造为

$$Q = (K_1 - K_0) [K_0(K_1 G_0 + 1)]^{-1} \quad (15)$$

控制器 K 的调控效果会随着信号 f 的变化而在控制器 K_0 与控制器 K_1 之间变动, 形成相互协同的互补控制, 以实现更有效的系统调节。

为应对系统的复杂性, 本文将采纳 PI 控制器和 H_∞ 控制器相结合的设计方法, 使他们在设计中相互协同, 以满足系统对于鲁棒性和最优性能的双重需求。其中: PI 控制器确保系统对于一般变化具有迅速而稳定的响应; H_∞ 控制器处理系统的不确定性和外部扰动, 提高系统的鲁棒性和抗干扰性。

3.1 标称性能控制器 K_0 设计

根据式 (3) 的系统标称模型 G_0 , 通过 Control System Tuner toolbox 整定速度环 PI 控制器参数为 $k_p = 0.011$ 、 $k_i = 0.012$, 即

$$K_0(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{0.011s + 0.012}{s} \quad (16)$$

3.2 控制器 Q 的设计

根据设计得到的 PI 性能控制器 K_0 、 H_∞ 鲁棒控制器 K_c 以及辨识出的系统标称模型 G_0 , 并可知 K_0 、 G_0 为最小相位。根据式 (15) 并利用平衡随机截断法进行降阶处理, 可求得鲁棒控制器为

$$Q(s) = \frac{18886(s - 0.1066)(s + 10.07)(s + 18.39)}{(s + 2901)(s + 12.8)(s^2 + 81.56s + 2750)} \quad (17)$$

为验证所提方法的控制效果, 将根据得到的 K_0 、 Q 按图 7 所示的控制结构构建出兼顾标称性能和鲁棒性的速度控制器, 在相同实验条件下进行与 H_∞ 控制器及 PI 控制器的对比实验验证。

4 实验验证

为验证本文基于 H_∞ 控制的多目标互补控制性能, 将该方法应用在如图 8 所示的实验平台上进行研究分析。实验平台为灵思创奇 (Links) 的表贴式永磁同步电机对拖实验平台, 控制核心为 VxWorks 实时操作系统。两对拖永磁同步电机为同型号森创 (Syntron) 130MB150A-701311, 其额定参数如表 1 所示。动力驱动器为 Links-HS0150A, 负载驱动器为森创 HS0150AE-P22S, 搭配的制动电阻为 $40\ \Omega$ 。增量式编码器线数为 2500 线, 空间矢量脉宽调制频率设定为 10 kHz, 死区时间设定为 $3\ \mu s$ 。

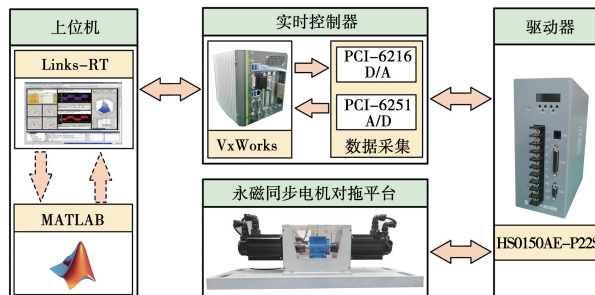


图8 PMSM 实验平台

Fig.8 Experimental platform for PMSM drives

表1 三相 PMSM 参数

Table 1 Parameters of three-phase PMSM

参数	数值
定子电阻 R/Ω	1.79
相电感 L/mH	6.68
额定转速 $n_N/(r/min)$	1000
额定相电流 I_N/A	6.76
转动惯量 $J/(kg \cdot cm^2)$	17.92
额定功率 P_N/kW	1.5
额定转矩 $T_N/(N \cdot m)$	14.32
极对数 P	4

图 9 展示了 PMSM 空载启动运行下的速度和 q 轴电流的波形对比图, 实验包括了加减速阶跃、 $2\ N \cdot m$ 加减载测试。其中: 系统分别在 0、10 s 时进行幅值为 500 的加速阶跃响应; 在 2.5、12.5 s 时进

行 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 加载阶跃响应;在 6、16 s 时进行 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 减载阶跃响应;在 20 s 时进行幅值为 400 的减速阶跃响应。图 10 展示了 PMSM 在 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 带载启动运行下的阶跃响应的速度波形对比图。其中:系统分别在 0、4 s 时进行幅值为 500 的加速阶跃响应;在 7、10 s 时进行幅值为 400 的减速阶跃响应。

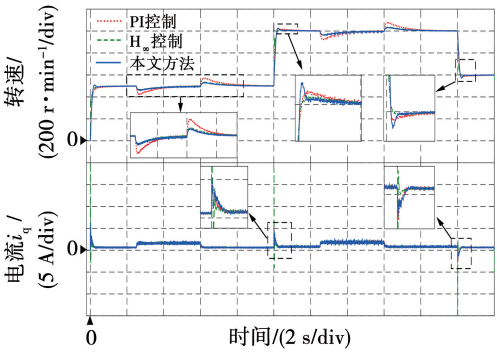


图 9 空载阶跃及负载扰动抑制响应

Fig. 9 No-load step and load disturbance rejection responses

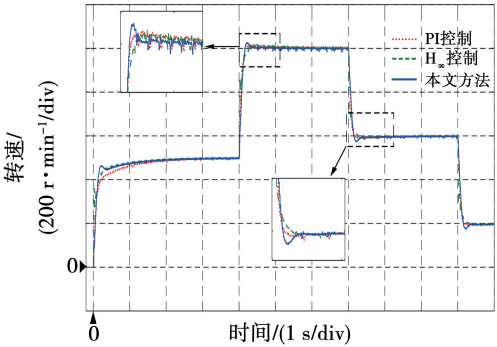


图 10 负载阶跃响应

Fig. 10 Load step response

为验证本文所提方法的动态性能,通过图 9 对不同控制算法下的电机阶跃响应进行分析。观察电机在 10 s 时的阶跃响应动态性能,其中调节时间为达到稳态 $1\,000\text{ r/min}$ 时所需的时间。此外,在转速跟踪过程中,还观察了 q 轴电流(i_q)的峰值大小,具体数据见表 2。

表 2 不同算法的性能比较

Table 2 Performance comparison of different algorithms				
控制方法	上升时间/s	调节时间/s	超调量/%	电流 i_q 峰值/A
PI	0.21	2.03	3.4	5.30
H_∞	0.24	1.54	2.2	18.67
本文方法	0.17	1.29	5.2	5.21

通过表 2 的数据对比,本文方法相较于 PI 控制和 H_∞ 控制,在超调量相对增大(转速调整时标称模型与原系统的差值信号 $f>0$ 导致)的情况下,具有更短的上升时间和调节时间,表明本文所提方法具有更好的动态性能。此外,本文方法和 PI 控制能够在快速响应的同时使电流 i_q 保持在较小范围内波动,避免了调节过程中的剧烈变化超过设备承受范围。

图 10 中带载情况下的阶跃响应也有效验证了本文方法兼顾了 PI 控制在动态性能上的优势。电机在 4 s 时的阶跃响应:本文方法的上升时间为 0.16 s、超调量为 5.2%; H_∞ 控制上升时间为 0.27 s、超调量为 3.6%;PI 控制上升时间为 0.19 s、超调量为 3.2%。

在 PMSM 控制系统中,突加负载转矩通常被视为转速环中最为严重的非周期性扰动之一^[22],这种突加负载会导致转速急剧下降。因此,为验证所提方法的鲁棒性,针对不同控制算法,在电机稳定转速分别为 500 r/min 和额定转速 $1\,000\text{ r/min}$ 的情况下,施加 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 的负载扰动,观察转速的下降情况。具体数据如表 3 所示。电机稳定在额定转速,突加 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时,本文所提方法的转速下降幅度仅为 PI 控制的 48.7%,同时,该方法在抗扰能力上表现基本与 H_∞ 控制相当。相较于 PI 控制,本文方法和 H_∞ 控制在面对突加负载扰动时,表现出更小的转速波动,具有更强的抗干扰能力。

表 3 负载突变时不同算法的转速下降情况

Table 3 Speed reduction under load transients for different algorithms

(单位:r/min)		
控制方法	50% 额定转速时	额定转速时
PI	77	78
H_∞	40	38
本文方法	41	38

综上,本文所提方法兼顾了 PI 控制的跟踪性能和 H_∞ 控制的抗干扰能力,使电机在调节过程中转速跟踪更快速、抖动更小,面对负载变化和参数摄动具有较强的鲁棒性。

5 结 论

针对永磁同步电机传统反馈控制框架中性能与

鲁棒性存在的冲突问题,本文采用一种多目标互补控制架构,融合PI控制和 H_∞ 控制各自的优势,增强二者的互补性,提高在不同工作条件下的适应性和稳定性。未来工作将进一步优化控制器性能,提高系统模型辨识的精度以降低过载超调,并考虑将其应用到无速度传感器控制中,推动永磁同步电机朝着低成本、高性能、高可靠性、宽调速范围及应用领域广的方向发展。

参考文献:

- [1] 程启明, 刘科, 张昕, 等. 永磁同步电机的复叠式螺旋滑模控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(6): 116.
CHENG Qiming, LIU Ke, ZHANG Xin, et al. Research on cascade spiral sliding mode control strategy of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(6): 116.
- [2] 马伟明, 王东, 程思为, 等. 高性能电机系统的共性基础科学问题与技术发展前沿[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2025.
MA Weiming, WANG Dong, CHENG Siwei, et al. Common basic scientific problems and development of leading-edge technology of high performance motor system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2025.
- [3] YANG J, CHEN W H, LI S, et al. Disturbance/uncertainty estimation and attenuation techniques in PMSM drives—a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 3273.
- [4] 侯利民, 申鹤松, 阎馨, 等. 永磁同步电机调速系统 H_∞ 鲁棒控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(7): 1478.
HOU Limin, SHEN Hesong, YAN Xin, et al. H_∞ robust control of PMSM speed regulation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1478.
- [5] WANG S. Nonlinear uncertainty estimator-based robust control for PMSM servo mechanisms with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2535.
- [6] 袁雷. 现代永磁同步电机控制原理及MATLAB仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [7] WANG M, SUN D, KE W, et al. A universal lookup table based direct torque control for OW-PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6188.
- [8] RAFAQ M S, JUNG J W. A comprehensive review of state-of-the-art parameter estimation techniques for permanent magnet synchronous motors in wide speed range[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7): 4747.
- [9] 邓永停, 李洪文, 陈涛. 2 m级望远镜跟踪架控制系统动态性能分析[J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 654.
DENG Yongting, LI Hongwen, CHEN Tao. Dynamic analysis of two meters telescope mount control system[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(3): 654.
- [10] ZHOU S, SUI S, TONG S. Adaptive neural networks optimal control of permanent magnet synchronous motor system with state constraints[J]. Neurocomputing, 2022, 504: 132.
- [11] 赵剑飞, 蒋永群, 吴德亮. 电动车用非对称双盘永磁同步电机全速域驱动控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2541.
ZHAO Jianfei, JIANG Yongqun, WU Deliang. Asymmetric dual-disc PMSM drive control strategy in full speed range for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2541.
- [12] 邱建琪, 毛意涵, 陈卓易, 等. 永磁同步电机新型有限集模型预测速度控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(4): 1.
QIU Jianqi, MAO Yihan, CHEN Zhuoyi, et al. Improved finite set model predictive speed control of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(4): 1.
- [13] YU Y, DING L, WANG W. Finite-time composite adaptive fuzzy control of permanent magnet synchronous motors[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2022, 24(1): 135.
- [14] YAN X, WANG P, QING J, et al. Robust power control design for a small pressurized water reactor using an H_∞ mixed sensitivity method[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(7): 1443.
- [15] ZHOU K, DOYLE J C. Essentials of robust control[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.
- [16] 苏为洲, 闻成. 鲁棒与最优控制在伺服系统中的应用[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 888.
SU Weizhou, WEN Cheng. Applications of robust and optimal control in servo systems[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 888.
- [17] ATTIVISSIMO F, SAVINO M, TROTTA A. A study on nonlinear averagings to perform the characterization of power spectral density estimation algorithms[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(5): 1036.
- [18] ZHANG Y, WU J, MENG Q, et al. Robust control of dielectric elastomer smart actuator for tracking high-frequency trajectory[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 20(1): 224.
- [19] 王杰, 周志杰, 胡昌华, 等. 不确定性信息表示及推理[J]. 控制与决策, 2023, 38(10): 2749.
WANG Jie, ZHOU Zhijie, HU Changhua, et al. Expression and inference of uncertain information[J]. Control and Decision, 2023, 38(10): 2749.
- [20] ZHOU K. Frequency-weighted model reduction with L_∞ error bounds[J]. Systems & Control Letters, 1993, 21(2): 115.
- [21] ZHOU K, REN Z. A new controller architecture for high performance, robust, and fault-tolerant control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(10): 1613.
- [22] DING S, HOU Q, WANG H. Disturbance-observer-based second-order sliding mode controller for speed control of PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 38(1): 100.

(编辑:邱赫男)