

基于 DOB 的永磁同步电机蚁群优化鲁棒控制

白雪儿,杨向宇,白雪宁

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641)

摘要:针对永磁同步电机参数测量不准或摄动的问题,设计了一种经蚁群算法优化的 H_∞ 混合灵敏度鲁棒控制器,从而获得良好鲁棒性。为使系统兼顾鲁棒跟踪性能和抗扰性,引入扰动观测器并对控制器参数和扰动观测器参数进行组合寻优。在 Matlab/Simulink 搭建仿真模型仿真后结果表明,该控制系统在参数摄动时仍保持良好的动稳态跟踪性能,具有很强的鲁棒性和抗扰性,在复杂未知的实际工况中应用前景广阔。

关键词:加权函数;扰动观测器;蚁群优化算法;混合灵敏度鲁棒控制

中图分类号:TP202+.7; TM351 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)05-0172-05

A DOB-based Robust Controller of PMSM Optimized by Ant Colony Algorithm

BAI Xueer, YANG Xiangyu, BAI Xuening

(South China University of Technology, School of Electric Power, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Aiming at the problem that the inaccuracy or perturbation exist in the parameter measurement of permanent magnet synchronous motor, an H_∞ mixed-sensitivity robust controller optimized by ant colony algorithm is designed to obtain good robustness. To reduce the conservativeness and make the system has both robust tracking performance and anti-disturbance ability, a disturbance observer (DOB) is used to optimize the parameters of the controller and DOB. The simulation results based on Matlab/Simulink indicate that the control system shows excellent dynamic and steady state performances even when the parameters are perturbed. It has extraordinary robustness and anti-disturbance ability and it is of a good application prospect in complex actual working conditions.

Keywords: weight function; disturbance observer; ant colony algorithm; mixed-sensitivity H_∞ Control

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)由于其高功率密度、高转矩惯量比和控制性能优良等特点,在驱动方面具有广阔的应用前景。近年来,许多控制方法如预测控制、反馈线性化、无源性等都被提出并应用到电机控制上,但这些算法均建立在模型精确的前提下,无法很好应对实际应用中模型不准确、参数摄动、负载扰动等问题^[1],因此如何克服不确定性而获得满意的效果,是一个研究热点。

鲁棒 H_∞ 混合灵敏度控制在考虑了一定的模型不确定性后,将对系统的性能要求和稳定性要求转换成标准 H_∞ 控制进行求解,能较好兼顾鲁棒稳定性和鲁棒性能。文献[2]将 H_∞ 混合灵敏度控制应用到永磁同步电机上,实验验证抗扰性能得到改善,但加权函数参数由人工设计试凑的方法获得,耗时耗力且对象适配度不高。文献[3]以误差积分准则为目标函数,采用遗传算法对加权函数参数寻优,与常规混合灵敏度控制器对比,响应更快且抗扰性更强,但超调较大、稳态精度未知且并未考虑发生参数摄动时的情况。文献[4]从系统带宽角度设计加权函数,通过不断调整加权函数参数求解得到一阶鲁棒控制器,与

常规混合灵敏度控制相比鲁棒性更强,但未考虑系统抗扰性能。文献[5]采用混合灵敏度法在外回路设计控制器、在内回路设计扰动观测器(disturbance observer, DOB),保证高稳态精度的同时提高了抗扰性,但设计过程繁琐、控制器阶次过高,且并未考虑参数间的耦合。

为应对实际工况中参数测量不准确、带载时折算到电机轴端的转动惯量发生变化等问题,本文采用 H_∞ 混合灵敏度设计速度控制器。为了在保证控制精度和快速性的同时提高抗扰性,加入扰动观测器对负载转矩进行补偿。最后应用蚁群优化算法对加权函数参数和 DOB 参数进行组合优化。

1 PMSM 控制系统模型

dq 旋转两相坐标系下的永磁同步电机电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_1 i_d + p \Psi_d - \omega \Psi_q \\ u_q = R_1 i_q + p \Psi_q + \omega \Psi_d \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程

$$\begin{cases} \Psi_d = \Psi_f + L_d i_d \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

坐标变换采用幅值相等原则时,转矩方程为

$$T_e = 1.5 n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3)$$

运动方程

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

式中: p 是微分算子; ω 是转子旋转电角速度; R_l 是定子等效电阻; u_d 、 u_q 分别是定子 d 轴和 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别是定子 d 轴和 q 轴电流; Ψ_d 、 Ψ_q 分别是定子 d 轴和 q 轴磁链; L_d 、 L_q 分别是 d 轴和 q 轴等效电感; n_p 是极对数; J 是折算到电动机轴端的转动惯量; T_e 是电磁转矩; T_L 是负载转矩; B 是黏滞系数。

令 $K_e = n_p \Psi_f$, $K_{te} = 1.5K_e$, 经拉氏变换后可得电机传递函数模型 $M(s)$ 。通过 $i_d = 0$ 策略实现解耦控制后, 采用转速、电流双闭环控制如图 1 所示。

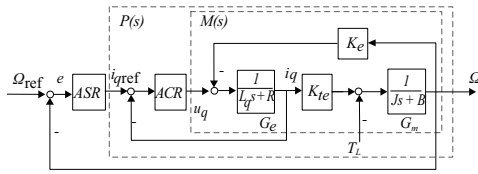


图 1 PMSM 双闭环控制系统框图

其中 $P(s)$ 为转速控制器的实际控制对象, 其标称模型为

$$P_n(s) = \frac{\Omega}{i_{qref}} \bigg|_{T_L=0} = \frac{K_{te} G_{ACR} G_e G_m}{1 + G_{ACR} G_e + K_{te} K_e G_e G_m} \quad (5)$$

负载转矩 T_L 到转速的传递函数为

$$G_{T_L 2\Omega} = \frac{\Omega}{T_L} \bigg|_{i_{qref}=0} = -\frac{G_m (1 + G_{ACR} G_e)}{1 + G_{ACR} G_e + K_{te} K_e G_e G_m} \quad (6)$$

特征方程最高阶系数为 JL_q , 由于小型 PMSM 转动惯量和交轴电感很小, 故该系数可近似为 0。

2 PMSM 鲁棒混合灵敏度转速控制器

2.1 H_∞ 混合灵敏度控制器

在上述双闭环控制系统中, 电流环由 PI 控制器控制, 速度环采用 H_∞ 混合灵敏度法设计, 如图 2 所示。

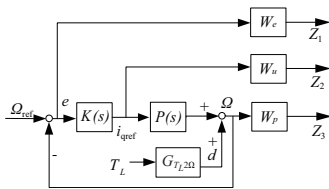


图 2 H_∞ 混合灵敏度控制框图

为考察跟踪误差 e 、控制量 i_{qref} 和输出转速 Ω , 对三者分别乘以加权函数 W_e 、 W_u 、 W_p , 所得 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 作为评价输出。则系统输入 Ω_{ref} 到评价输出 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 的传递函数为

$$Z_1(s)/\Omega_{ref}(s) = W_e S = W_e (1 + PK)^{-1} \quad (7)$$

$$Z_2(s)/\Omega_{ref}(s) = W_u R = W_u (1 + PK)^{-1} K \quad (8)$$

$$Z_3(s)/\Omega_{ref}(s) = W_p T = W_p (1 + PK)^{-1} PK \quad (9)$$

式中 S 、 R 、 T 分别为该系统在标称情况下的灵敏度函数、输入灵敏度函数和补灵敏度函数。

将混合灵敏度问题转换成如图 3 所示的标准 H_∞ 控制问题。当永磁同步电机参数测量不准或发生摄动时, 只

要发生摄动的电流环模型满足式 (10) 的乘积摄动模型:

$$P = \{ \tilde{P}(s) = P(s) [1 + \Delta(s) W_p(s)], \Delta(s) \in \overline{BH_\infty} \} \quad (10)$$

且输入输出传递函数矩阵 $T_{zue}(s)$ 满足

$$\|T_{zue}\|_\infty = \left\| \begin{bmatrix} W_e S \\ W_u R \\ W_p T \end{bmatrix} \right\|_\infty = \sup_\omega \sqrt{|W_e S|^2 + |W_u R|^2 + |W_p T|^2} \leq 1 \quad (11)$$

则式 (11) 求解所得的实有控制器 K 可镇定标称系统和摄动系统并使 e 、 i_{qref} 和 Ω 达到期望范围。

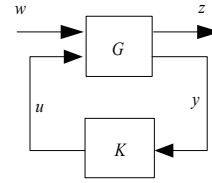


图 3 标准 H_∞ 控制

2.2 加权函数的确定

由式 (11) 可知, 得到控制器的关键在于加权函数的设计。考虑到可实现性, 加权函数应选取正则、稳定、非最小相位传递函数。为避免运算量过大, 在保证控制效果前提下宜选阶次小的传递函数。

1) W_e 。根据图 2, 灵敏度函数

$$S(s) \big|_{T_L=0} = \frac{e(s)}{\Omega_{ref}(s)}, S(s) \big|_{\Omega_{ref}=0} = \frac{\Omega(s)}{d(s)} \quad (12)$$

即 S 既表征指令 Ω_{ref} 下的相对跟踪误差, 也表征于扰动 d 对电机输出 Ω 的影响。在需要满足性能要求的低频段, S 应保持低增益。因此要求 W_e 具有低通特性。此外, 由式 (5)、式 (7)、式 (9) 可得, 闭环系统 T 对转动惯量 J 的归一化灵敏度为

$$\frac{\partial T J}{\partial J T} = \left(\frac{\partial P J}{\partial J P} \right) S \quad (13)$$

因此 W_e 的转折频率应不小于 P 对 J 的归一化灵敏度。

2) W_p 。式 (10) 中 W_p 表征系统鲁棒稳定得到满足的模型不确定范围。 T 一般要求为低通函数, 因此 W_p 应具有高通特性, 转折频率应不小于满足性能要求最高频率。

3) W_u 。引入 W_u 一方面可放宽式 (11) 中存在解的条件, 另一方面可限制控制量 i_{qref} 大小, 防止实际运行过程中控制量过大对执行器产生损害^[5]。通常取 W_u 为常数。

根据上述要求, 设 W_e 和 W_p 的结构分别为

$$W_e(s) = \frac{s/M_s + \omega_s}{s + \omega_s A_s}, W_p(s) = \frac{s/\omega_t + 1/M_T}{A_T s/\omega_t + 1} \quad (14)$$

当 $s \rightarrow 0$ 时, $W_e \rightarrow 1/A_s$, 稳态误差 $e_{ss} \rightarrow A_s$ 。因此 A_s 可以根据稳态精度要求来直接确定。其余参数需要在合理范围内按响应进行调整。

3 基于 DOB 的 PMSM 鲁棒控制系统

3.1 PMSM 混合灵敏度控制系统的抗扰性

在混合灵敏度方法中, 通常假设扰动施加于被控对象

输出端。但是 PMSM 的转矩扰动施加点位于对象模型内,需通过等效变换将其移动到对象输出端,如图 2 所示。设转矩扰动 $T_L(s)$ 为阶跃输入,则根据式 (6),它与等效到电机输出端的扰动 $d(s)$ 的对比图如图 4 所示。

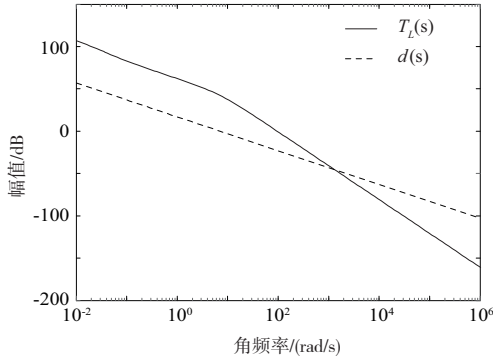


图 4 转矩扰动与等效扰动示意图

可见,为减少 $d(s)$ 对系统的影响,灵敏度函数 S 的截止频率还应更高。但 S 和 T 为互补关系,需要在二者间进行折中。因此对于小型 PMSM,在保证系统响应快速性和精度的前提下,混合灵敏度控制器难以获得很好的抗扰性。为了兼顾二者,可以加入一个扰动观测器对负载转矩进行补偿。

3.2 DOB 的设计

本文引入由 T. Umeno 和 Y. Hori 提出的扰动观测器^[6],以进一步提高系统抗扰性。其输入输出传递函数为

$$G_{u_p}(s) = \frac{\Omega}{i_{qref}} = \frac{P(s)P_n(s)}{P_n(s) + [P(s) - P_n(s)]Q(s)} \quad (15)$$

$$G_{dy}(s) = \frac{\Omega}{d} = \frac{P(s)P_n(s)[1 - Q(s)]}{P_n(s) + [P(s) - P_n(s)]Q(s)} \quad (16)$$

式中: $P(s)$ 为 PMSM 交轴电流环; $P_n(s)$ 为其标称模型。

Q 滤波器应满足以下条件:

1) 考虑到可实现性,其分母阶次应大于等于标称模型分母阶次;但其阶次不宜太高以免系统阶次过高。

2) Q 滤波器应具有低通特性,其增益在低频段接近 1,既抑制低频扰动也降低对前向通道的影响;在高频段趋于 0 以抑制高频噪声^[7]。

按照以上两个条件,设 Q 滤波器的形式为

$$Q(s) = \frac{1}{(\mu s + 1)^2} \quad (17)$$

加入 DOB 后系统框图如图 5 所示。在 H_∞ 控制器和 DOB 共同作用下,对象后扰动到转速的传递函数为

$$\frac{\Omega}{d} = G_{dy} \frac{1}{1 + PK} = G_{dy} S \quad (18)$$

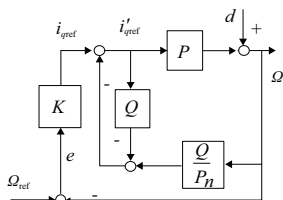


图 5 加入 DOB 后系统框图

4 蚁群算法优化 H_∞ 控制

根据前文所述,系统中待确定的参数有加权函数参数 $M_T, M_S, \omega_s, \omega_i, W_u$ 和 DOB 参数 μ 。这些参数存在一定的耦合性,需要协同寻优。蚁群算法在求解离散组合优化问题方面具有优越性^[8],因而采用蚁群算法对参数组合寻优,从而减少时间和人力消耗、克服保守性。应用蚁群算法优化参数的步骤如下:

1) 初始化

假设数位共 n 个,设定各节点信息素初始值 τ 、挥发系数 ρ 和每只蚂蚁走完一次后释放的信息素总量 Q_τ ,清零迭代次数编号 N_c 和各节点信息素增加量 $\Delta\tau$ 。设定蚂蚁数为 m 并将其随机放置在第一个数位的 10 个节点上。

2) 按概率选择下一步节点

在第 N_c 次迭代中,即将走第 i 步的蚂蚁 k 选择下一节点 y_{ij} ($j=0, 1, \dots, 9$) 的概率为

$$P_k(x_i, y_{ij}, N_c) = \frac{\tau^\alpha(x_i, y_{ij}, N_c) \eta^\beta(x_i, y_{ij}, N_c)}{\sum_{j=0}^9 \tau^\alpha(x_i, y_{ij}, N_c) \eta^\beta(x_i, y_{ij}, N_c)} \quad (19)$$

其中 $\tau(x_i, y_{ij}, N_c)$ 表示 $N_c - 1$ 次迭代后在节点 (x_i, y_{ij}) 残留的信息素; $\eta(x_i, y_{ij}, N_c)$ 为该节点的启发因子。

$$\eta(x_i, y_{ij}, N_c) = \frac{10 - |y_{ij} - y_i^*(N_c)|}{10} \quad (20)$$

其中: $y_i^*(N_c)$ 为上次迭代最佳; α 和 β 分别为 τ 和 η 的权重。

3) 计算目标函数 F

当所有蚂蚁完成一次各自的路程后,计算每只蚂蚁对应的系统输出的性能指标

$$F = W_1 F_1 + W_2 F_2 + W_3 F_3 + W_4 F_4 + W_5 F_5 \quad (21)$$

其中 $W_1 - W_5$ 分别为性能指标 $F_1 - F_5$ 的权重,各性能指标取与期望值相比的相对值。

4) 信息素更新

根据 F 更新各节点上的信息素以求 F 的最大值:

$$\tau_{next}(x_i, y_{ij}, N_c + 1) = \rho \tau(x_i, y_{ij}, N_c) + \Delta \tau(x_i, y_{ij}, N_c) \quad (22)$$

$$\Delta \tau(x_i, y_{ij}, N_c) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_k(x_i, y_{ij}, N_c) \quad (23)$$

$$\Delta \tau_k(x_i, y_{ij}, N_c) = \begin{cases} Q_\tau F_k, & \text{若蚂蚁 } k \text{ 本次迭代经过该节点} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (24)$$

5) 迭代终止条件

当整个蚁群收敛到同一路径且目标函数 $F_1 - F_5$ 均达到期望值时,认为迭代可终止,寻优结束,输出最优参数组合。

5 仿真及其分析

在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型,对设计的控制器进行可行性验证。利用 Matlab 自带的鲁棒控制工具箱中的 hinfscn 函数即可求解得到鲁棒控制器。其中电流环 PI 参数分别为 300、15,而电机参数设定如表 1 所示。

表1 永磁同步电机参数

转动惯量/ (kg·m ²)	定子电阻/Ω	交直流电 感/mH	极对数
0.000 765	2.875	1.8	4
直流电压/V	额定电流/A	额定转矩/ (N·m)	额定转速/(r/min)
311	20	14	1 500

最终寻优所得参数如表2所示。两种情况均满足不等式(11),鲁棒稳定性和鲁棒性能得到满足。

表2 寻优结果

	未加入 DOB	加入 DOB
DOB 参数 μ	—	0.000 1
W_u, γ	0.1, 0.784 3	0.2, 0.971
W_e	$\frac{0.769\ 2s+6\ 300}{s+7.056}$	$\frac{0.666\ 7s+250}{s+0.125}$
W_p	$\frac{10.1s+588\ 200}{5.051s+1\ 000\ 000}$	$\frac{50s+5\ 882}{25s+10\ 000}$
无 DOB 时的 鲁棒控制器	$K = \frac{1.854s^3+367\ 100s^2+2\ 622\ 000s+71\ 290}{1.972s^3+392\ 700s^2+2\ 790\ 000s+138\ 500}$	
有 DOB 时的 鲁棒控制器	$K = \frac{3.965s^3+161\ 4s^2+11\ 330s+308}{2.554s^3+63\ 660s^2+11\ 140s+397.9}$	

5.1 蚁群寻优的收敛

本文选用的性能指标及期望值如表3所示。其中对调节时间的定义为从指令发生改变到速度到达并维持在指令的 $\pm 0.2\%$ 以内的时间。

表3 所选性能指标及期望值

性能 指标	调节时 间/s	稳态误 差/%	受扰后速 度波动/%	受扰后恢 复时间/s	受扰后稳 态误差/%
期望值	0.1	± 0.2	8	0.08	± 0.2

如图6(a)所示,经过40次迭代后寻得的最大目标函数已趋于稳定且达到期望值。

图6(b)给出了蚁群路径分布图,为便于观察将蚂蚁的落点扩散至各节点附近,节点上的点密度越大意味着越多蚂蚁走过该节点。蚁群遍历了所有节点,且最终全部集中在同一路径上。

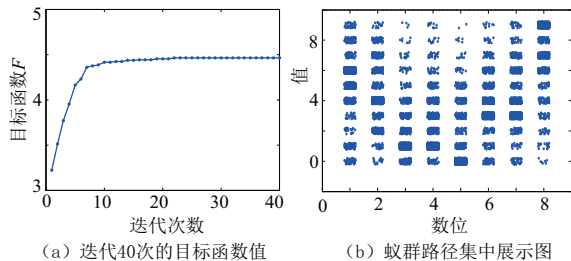


图6 寻优迭代收敛

5.2 仿真结果分析

对同样的双闭环系统,分别用PI控制器、按文献[5]

中的方法设计得到的未优化鲁棒控制器与本文设计的优化鲁棒控制器做阶跃响应的对比。仿真条件设定为转速指令1 500 r/min 并从0 s 开始空载运行,在0.5 s 时加入7 N·m 的负载转矩作为扰动。

1) 无参数摄动时

由图7可见,优化前后的鲁棒控制均能达到 $\pm 0.2\%$ 的稳态精度。优化鲁棒控制比未优化鲁棒控制和PI控制更快进入稳态(调节时间 < 0.01 s),且无超调,稳差在 $\pm 0.2\%$ 以内。

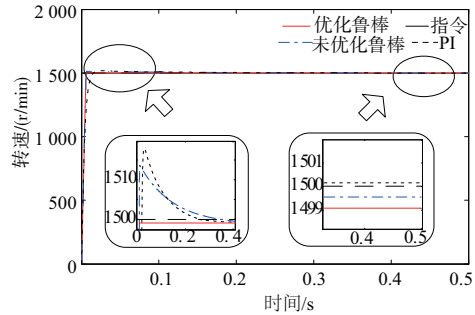


图7 无参数摄动时输出转速对比

2) 存在参数摄动时

PMSM 速度控制系统主要对转动惯量 J 的变化较为敏感,故仅展现 J 摄动时的控制效果。

当 J 为 $2J_0$ 时,由图8可见,在全频段有 $|P/P_n - 1| \leq |W_p|$,满足如式(10)的乘积摄动模型。不同控制系统对 J 的归一化灵敏度如图9所示,可见优化鲁棒控制下闭环系统对 J 的摄动更为不敏感。

由图10可知,鲁棒控制和PI控制超调分别为约2%和3%;而优化鲁棒控制响应几乎不受波动,无超调且稳差仍在 $\pm 0.2\%$ 以内,显现出更优秀的鲁棒性能。

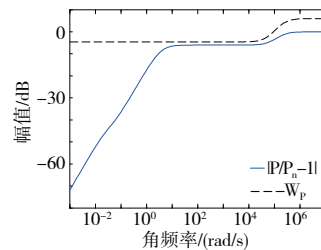
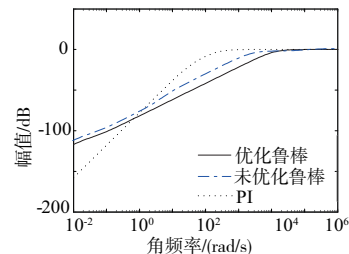
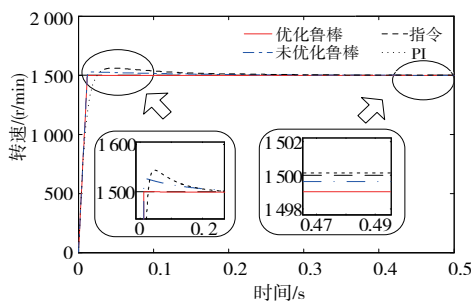
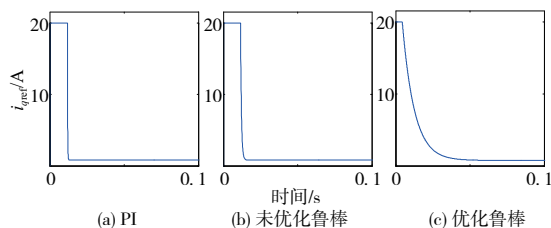
图8 $J = 2J_0$ 时满足乘积摄动模型图9 T 对 J 的归一化灵敏度

图11中 i_{qref} 波形显示,相比下优化鲁棒控制在电机启动阶段维持电流较大值时间更长,更快达到稳态。

3) 发生负载扰动时

图12、图13和图14分别展示了发生负载扰动时,优化

图 10 $J=2J_0$ 时输出转速对比图 11 $J=2J_0$ 时控制量

鲁棒控制器带 DOB 前后的速度、控制量和扰动观测情况。

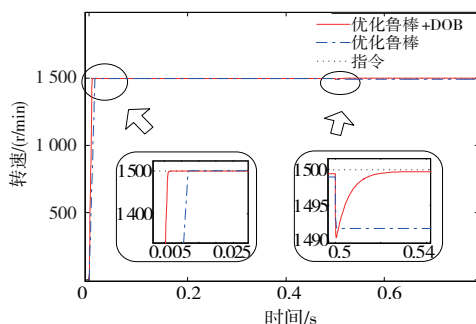
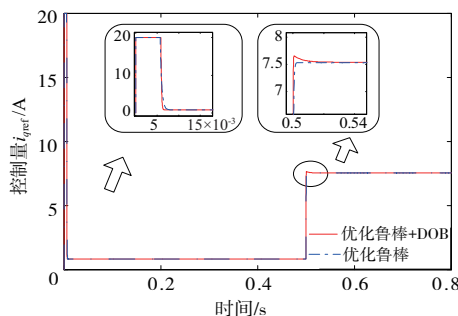


图 12 发生负载扰动时输出转速对比

图 13 发生负载扰动时控制量 i_{qref} 对比

根据图 12, 加入 DOB 后, 速度暂降基本不变 (约 0.7%), 但稳态精度在约 0.01 s 后恢复到了 $\pm 0.2\%$, 抗扰能力大大提升。根据图 13, 加入 DOB 后, 发生负载扰动时控制量在极短时间内上升以减小转速下降幅度, 并很快恢复稳态。根据图 14, DOB 观测到的负载转矩值在 0.002 s 左右接近实际扰动值, 观测误差约 1%。

为分析鲁棒控制器与 DOB 对提高系统抗扰性的贡献, 根据式(9)、式(16)、式(18)计算出二者单独作用时扰动 d 到转速 Ω 的传递函数幅值如图 15 所示。在低于 10^4 的频段, DOB 对扰动的抑制作用明显大于控制器的作用,

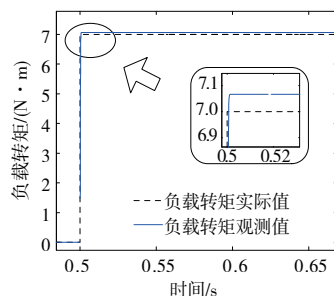


图 14 负载观测情况

对扰动幅值的削弱约为控制器的平方。

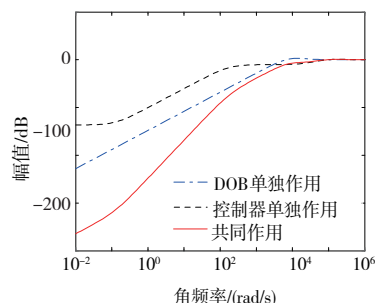


图 15 控制器与 DOB 的贡献

6 结语

本文以 PMSM 为被控对象, 采用混合灵敏度设计速度控制器以提高鲁棒性, 引入二阶 DOB 以使系统在保持高稳态精度和平稳快速过渡前提下提高抗扰性, 最后利用蚁群算法对参数进行优化, 并对 DOB 和控制器对抗扰性提高的贡献进行了分析。仿真结果表明, 系统在遭遇电机参数摄动、负载扰动等突发情况下仍能保持优越的跟踪性能, 在 0.01 s 内即可到达 $\pm 0.2\%$ 的稳态精度, 发生扰动时在 0.01 s 内可恢复同样的稳态精度, 与 PI 和常规混合灵敏度控制相比具有很强的鲁棒性和抗扰性, 在复杂未知的实际工况中非常具有优势。

参考文献:

- [1] 钱苗旺. 基于粒子群优化算法的永磁同步电机 H_2/H_∞ 混合控制[J]. 计算机应用, 2012, 32(8): 2381-2384.
- [2] 鱼瑞文, 张辉, 谭国俊, 等. 永磁同步电机 H_∞ 鲁棒控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(2): 102-104.
- [3] 胡佳琳, 秦哲, 臧怀泉, 等. 电动汽车永磁同步电机遗传优化鲁棒控制[J]. 燕山大学学报, 2017, 41(1): 51-55.
- [4] 恒庆海, 鲁婧, 李丽. 无刷直流电机 H_∞ 鲁棒 PI 控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(增刊): 87-91.
- [5] 方强. 被动式力矩伺服控制系统设计方法及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [6] T.Umeno, T.Kaneko, Y.Hori. Robust servo system design with two degree of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators[J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 1993(40): 473-485.
- [7] 吴敏, 何勇, 余锦华. 鲁棒控制理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 81-120.
- [8] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 272-281.

收稿日期: 2019-06-25