

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.02.003

基于改进型负载转矩观测器的 永磁同步电机滑模控制

颜伟平^{1,2}, 王 兵^{1,2}, 刘 凯¹, 余 鑫¹, 李江坪¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;

2. 湖南工业大学 电传动控制与智能装备湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为减少负载转矩扰动对永磁同步电机控制造成的影响, 设计了一种改进型负载转矩观测器。以转速和负载转矩为观测对象建立负载转矩观测器, 将观测的负载转矩前馈补偿至转矩电流中, 并加入可变增益算法, 有效抑制了滑模速度控制器输出的抖振问题; 采用改进滑模速度控制器替代传统的PI控制, 通过改进控制器中指数趋近律函数, 提高了系统的响应速度。仿真结果表明, 该方法能准确地观测负载转矩, 减少系统抖振问题, 提高系统的抗干扰能力及动态响应性能。

关键词: 永磁同步电机; 负载转矩观测器; 前馈补偿; 可变增益算法; 滑模控制

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)02-0015-08

引文格式: 颜伟平, 王 兵, 刘 凯, 等. 基于改进型负载转矩观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(2): 15-22.

Sliding Mode Control of PMSM Based on Improved Load Torque Observer

YAN Weiping^{1, 2}, WANG Bing^{1, 2}, LIU Kai¹, YU Xin¹, LI Jiangping¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Electric Drive Control and Intelligent Equipment,
Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of a reduction of the influence of load torque disturbance on the control of permanent magnet synchronous motors, an improved load torque observer has thus been designed. The load torque observer is established with the speed and load torque as the observation object, the observed load torque is fed forward and compensated to the torque current, with the variable gain algorithm added to suppress the chattering problem of the output of the sliding mode speed controller. The improved sliding mode speed controller is used to replace the traditional PI control, and meanwhile the system response speed is improved by improving the exponential reaching law function in the controller. Simulation results show that the method can accurately observe the load torque, and reduce the chattering problems, thus improving the anti-interference ability and dynamic response performance of the system.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; load torque observer; forward compensation; variable gain algorithm; sliding mode control

收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2093); 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目(18A267)

作者简介: 颜伟平(1995-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代电力电子技术及系统,

E-mail: 843228499@qq.com

通信作者: 王 兵(1965-), 男, 湖南常德人, 湖南工业大学副教授, 硕士, 主要从事特种电机及其控制方面的教学与研究,

E-mail: wb1112@126.com

1 研究背景

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 具有效率高、扭矩大、转速性能好等优点, 被广泛应用在制造、电动汽车、工业生产等领域中^[1-2]。PMSM 控制是参数时变的复杂系统, 发生负载扰动或内部参数摄动时, 会影响 PMSM 的稳态误差、动态性能和调速范围等性能参数^[3-4]。采用传统的 PI 控制无法较好地抑制负载转矩扰动对系统的影响, 系统的抗负载扰动能力较差, 不能达到高性能控制要求^[5-6]。而滑模变结构控制 (sliding mode control, SMC) 具有动态响应快、对负载扰动及参数摄动具有强鲁棒性等优点, 满足高性能控制要求, 逐渐引起了学者们的重视^[7-8]。

近些年, 不少国内外学者将滑模变结构控制应用在 PMSM 高性能伺服控制系统中^[9]。如文献 [10] 设计了一种开环扰动观测器, 并引入积分补偿, 具结构简单的优点, 且提高了系统的鲁棒性和快速性。文献 [11] 考虑到负载时变的控制场合, 提出了负载转矩滑模观测器, 能较好地观测负载转矩, 有效削弱抖振, 但观测器未利用其反馈增益值优势, 在观测性能上稍显不足。文献 [12] 在传统观测器积分环节中引入比例环节对负载转矩进行观测, 提高了观测收敛速度, 但由于转速环采用传统 PI 控制, 抗扰性能较差。文献 [13] 采用滑模速度控制器代替传统 PI 控制器, 并改进了控制器中指数趋近率, 在滑模面中引入转速误差积分项减小系统静态误差, 提高了系统的抗扰能力。

为提高 PMSM 控制性能, 本文采用一种改进指数趋近率的滑模速度控制器取代传统滑模速度控制器, 以提高系统的响应速度; 为提高对负载转矩观测响应速度并减少转矩观测的波动性, 将观测的负载转矩前馈补偿至电流调节器中, 并在传统观测器中加入可变增益算法。设计的改进型负载转矩观测器, 能减小负载波动、缩短收敛时间, 进一步提升了观测器性能, 减少负载扰动对控制系统的影响, 提高了系统鲁棒性。

2 PMSM 数学模型

忽略铁心涡流与磁滞损耗, 考虑转子上无阻尼绕组等影响, 采用 $i_d=0$ 的 PMSM 转子磁场定向控制, 建立 PMSM 在 $d-q$ 轴旋转坐标系下的数学模型, 电压方程如下:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega_e L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt}, \\ u_q = Ri_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f + L_q \frac{di_q}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

对于凸极式 PMSM 矢量控制系统 (采用 $i_d=0$ 控制方式), 其电磁转矩方程如下:

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

PMSM 运动方程:

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

式 (1) ~ (3) 中: u_d 、 u_q 分别为 $d-q$ 轴的电压;

L_d 、 L_q 分别为 $d-q$ 轴的电感;

i_d 、 i_q 分别为 $d-q$ 轴的电流;

T_e 为电磁转矩;

J 为转动惯量;

ψ_f 为永磁体磁链;

R 为定子电阻;

ω_m 为转子机械角速度;

ω_e 为转子电角速度;

T_L 为负载转矩;

p 为电机极对数。

3 滑模速度控制器

3.1 滑模速度控制器设计

引用文献 [11] 中滑模速度控制器, 定义 PMSM 系统的状态变量如下:

$$\begin{cases} x_1 = \omega^* - \omega, \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω^* 为电机给定转速;

ω 为电机实际转速。

由式 (2) ~ (4) 可知:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega} = -\frac{1}{J} \left(\frac{3p\psi_f}{2} i_q - T_L \right), \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega} = -\frac{3p\psi_f}{2J} \dot{i}_q. \end{cases} \quad (5)$$

对式 (5) 进行化简, 令 $D=1.5p\psi_f/J$, $u=i_q$, 可得系统状态空间方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} u. \quad (6)$$

为使系统更好地达到稳态, 选择滑模面函数为

$$s = cx_1 + x_2. \quad (7)$$

式中, c 为滑模面参数, 且 $c > 0$ 。

对式 (7) 求导可得:

$$\dot{s} = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = cx_2 + \dot{x}_2 = cx_2 - D\dot{i}_q. \quad (8)$$

为改善滑模趋近运动中的动态品质, 引用文献 [11] 中的指数趋近律, 其表达式为

$$\dot{s} = -k_1 \operatorname{sgn}(s) - k_2 s, \quad k_1 > 0, k_2 > 0. \quad (9)$$

式中: $-k_1 \operatorname{sgn}(s)$ 为等速趋近项;

$-k_2 s$ 为指数趋近项。

k_1 、 k_2 两个系数分别决定滑模面的抖振和趋近过程的运动品质。

为提高系统响应速度, 在传统指数趋近率的基础上进行改进, 改进的趋近律为

$$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 |x_1| \operatorname{sgn}(s) - k_2 s, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |x_1| = 0, k_1 > 0, k_2 > 0. \end{cases} \quad (10)$$

在等速趋近项中加入转速误差绝对值 $|x_1|$, 使系统转速误差绝对值 $|x_1|$ 与系统状态变量在趋近滑模面过程中的速度 k_1 相联系。当系统状态变量离滑模面较远时, 此时 $|x_1|$ 较大, 状态变量将以 $-k_1 |x_1| \operatorname{sgn}(s) - k_2 s$ 的速度趋近滑模面, 当状态变量靠近滑模面时, 指数项近似为 0, 系统以 $-k_1 |x_1| \operatorname{sgn}(s)$ 速度将状态变量不断减少, 逐渐减少到 0。

结合式 (8) (10), 可以得到控制器输出转矩电流分量 i_q' 为

$$i_q' = \frac{1}{D} \int (cx_2 + k_1 |x_1| \operatorname{sgn}(s) + k_2 s) dt. \quad (11)$$

控制器中含有积分项, 将控制量进行滤波, 可削弱系统抖振、减少系统的稳态误差, 提高系统稳定性。

3.2 稳定性分析

定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2. \quad (12)$$

根据 Lyapunov 稳定性定理, 只要 $\dot{V} = s\dot{s} < 0$ 就可保证系统是渐进稳定的, 由式 (10) (12) 可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -k_1 |x_1| s \operatorname{sgn}(s) - k_2 s^2. \quad (13)$$

式中, $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, $s \operatorname{sgn}(s) \geq 0$, 故 $\dot{V} < 0$, 此结果表明系统跟踪误差能在有限时间内收敛到零, 系统能稳定运行。

4 负载转矩观测器

4.1 传统负载转矩观测器

滑模控制主要通过增大控制器中不连续项的幅值来抑制参数变化和外部负载扰动对系统的影响, 但幅值增大会引起滑模固有抖振。为解决滑模控制系统抖振与抗扰性之间的矛盾, 利用观测器实时观测负载扰动变化, 将观测值前馈补偿至电流调节器中, 以降低滑模控制中不连续项幅值, 削弱系统抖振问题, 实现对负载扰动的快速抑制。

根据 PMSM 电磁转矩与运动方程, 对于恒定的阶跃性负载, 在变化周期内可认为是一恒定值, 即 $\dot{T}_L = 0$, 将负载转矩与电机机械角速度作为状态变量,

构成 PMSM 状态方程:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_m = \frac{3p\psi_f}{2J} i_q - \frac{T_L}{J}, \\ \dot{T}_L = 0. \end{cases} \quad (14)$$

在式 (14) 基础上, 以负载转矩与电机机械角速度为观测对象, 建立如下传统负载转矩观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}}_m = \frac{3p\psi_f}{2J} i_q - \frac{\hat{T}_L}{J} + U, \\ \dot{\hat{T}}_L = gU. \end{cases} \quad (15)$$

式中: $U = k \operatorname{sgn}(\hat{\omega}_m - \omega_m)$;

$\hat{\omega}_m$ 为机械角速度估计值;

g 为观测器的反馈增益;

k 为观测器的滑模增益;

$\hat{T}_L$ 为负载转矩的观测值。

根据式 (15) 搭建传统负载转矩观测器的原理框图, 如图 1 所示。

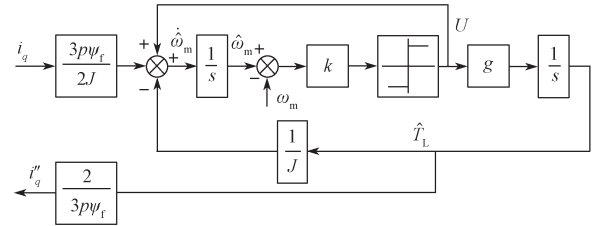


图1 传统负载转矩观测器原理框图

Fig. 1 Block diagram of the traditional load torque detector

将式 (14) 与式 (15) 相减, 得到传统负载转矩观测器误差方程如下:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\frac{e_2}{J} + U, \\ \dot{e}_2 = gU. \end{cases} \quad (16)$$

式中: e_1 为机械角速度估算误差, 且 $e_1 = \hat{\omega}_m - \omega_m$;

e_2 为负载转矩观测误差, 且 $e_2 = \hat{T}_L - T_L$;

定义观测器滑模面为 $s_1 = e_1 = \hat{\omega}_m - \omega_m = 0$ 。

根据滑模可达性条件, 可得系统稳定条件为 $k \leq -|e_2/J|$, 且 $g < 0$, 负载转矩观测误差为

$$e_2 = T_L - \hat{T}_L = c_1 e^{\frac{g}{J}t}. \quad (17)$$

式中: c_1 为常数。

随着时间 t 的变化, 观测误差 e_2 以指数方式逐渐减少到 0, 且反馈增益 g 的取值范围与辨识速度与转矩观测波动性相关。

在传统观测器中, 反馈增益 g 的取值大小对负载转矩观测结果影响较大。反馈增益 g 越大, 观测转矩波动性越小, 但观测转矩辨识速度越慢; 反馈增益 g

越小,观测转矩速度越快,但观测转矩波动性越大。出于对此问题的考虑,在传统负载转矩观测器中,综合考虑负载转矩的观测速度与波动性,将反馈增益 g 取一个折中值,但这会舍弃大反馈增益时的波动性小和小反馈增益时的观测速度快的优势。

4.2 改进型负载转矩观测器

为了充分利用反馈增益 g 在高、低值时的优势,本文在传统负载转矩观测器基础上,根据两相邻时刻负载转矩观测值大小,设计一种可变增益算法,在负载转矩观测值变化小时,给予反馈增益 g 较大值,使观测结果波动性小,稳定性更强;在负载转矩观测值变化大时,给予反馈增益 g 较小值,使观测速度快,最终得到观测速度快和波动小的结果,实现反馈增益 g 参数自整定。可变增益原理图如图2所示。

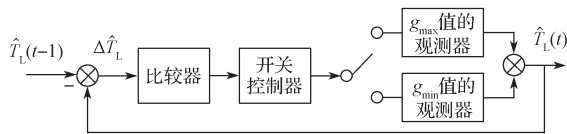


图2 可变增益算法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the variable gain algorithm

在图2中, \$\hat{T}_L(t)\$ 是 \$t\$ 时刻负载转矩观测值, \$\hat{T}_L(t-1)\$ 是 \$t-1\$ 时刻负载转矩观测值, \$\Delta \hat{T}_L\$ 是负载转矩观测值前后时刻差值, \$g_{\max}\$ 是波动性最小的大反馈增益值, \$g_{\min}\$ 是最快辨识速度的小反馈增益值。

在改进型负载转矩观测器中,可变增益算法采用 \$s\$ 函数进行编写,在算法开始阶段,先选取 \$g_{\min}\$,确保算法能快速计算辨识结果,设置一个比较值误差 \$\varepsilon\$,将负载转矩观测值前后时刻差值与 \$\varepsilon\$ 进行比较以判断当前观测的波动情况,当大于 \$\varepsilon\$ 认为波动大,而小于 \$\varepsilon\$ 认为波动小。可变增益算法具体流程如图3所示。

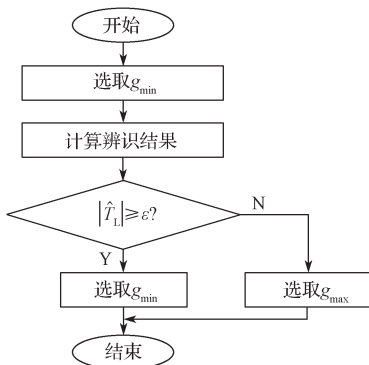


图3 可变增益算法流程图

Fig. 3 Variable gain algorithm flow chart

将可变增益算法加入到传统负载转矩观测器中,对反馈增益 g 实现参数自整定,得到改进型负载转矩观测器原理框图如图4所示。

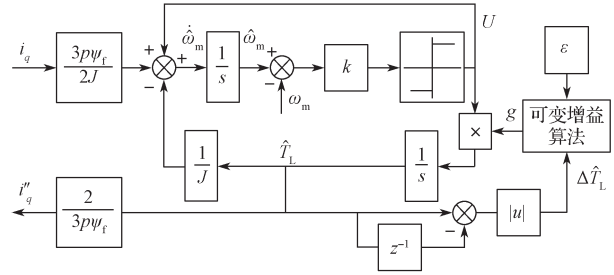


图4 改进型负载转矩观测器原理框图

Fig. 4 Block diagram of the improved load torque observer

在改进型负载转矩观测器对负载转矩精确测量的情况下,将负载转矩的观测值转换成转矩电流分量前馈补偿至电流调节器的输入,作为系统负载扰动的补偿输入 \$i_q^*\$,对滑模速度控制器的输出电流进行补偿。结合式(11),得到的转矩电流给定 \$i_q^*\$ 为

$$i_q^* = i_q' + i_q'' = \frac{1}{D} \int (cx_2 + k_1 |x_1| \operatorname{sgn}(s) + k_2 s) dt + k_1 T_L. \quad (18)$$

式中, \$k_1\$ 为转矩观测补偿系数,由式(2)中电磁转矩与电流之间关系,可以得出 \$k_1\$ 应取 \$2/(3p\psi_f)\$。

比较式(11)与式(18)可得,当负载扰动发生时,为保证电机转速恒定,则需选取较大 \$k_1\$、\$k_2\$ 值来提供充足的给定电流值;而式(18)将负载转矩观测值前馈补偿至电流调节器中,在不需要较大 \$k_1\$、\$k_2\$ 值的情况下就能提供负载扰动时所需的给定电流,减少滑模速度控制器的不连续幅值及输出负担,能较好地抑制系统的抖振。

5 系统仿真与结果分析

为验证本文设计的改进型负载转矩观测器的正确性及改进 SMC 转矩前馈补偿控制方法的可行性,通过 Matlab/Simulink 软件进行仿真研究,根据图1搭建的传统负载转矩观测器仿真模块如图5所示,系统仿真模型如图6所示,根据图4搭建的改进型负载转矩观测器仿真模块如图7所示。

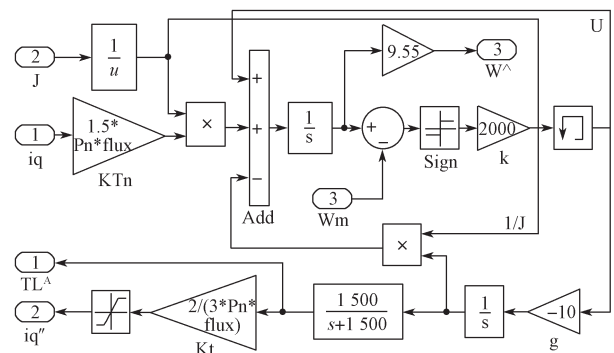


图5 传统负载转矩观测器仿真模块

Fig. 5 Traditional load torque observer simulation module

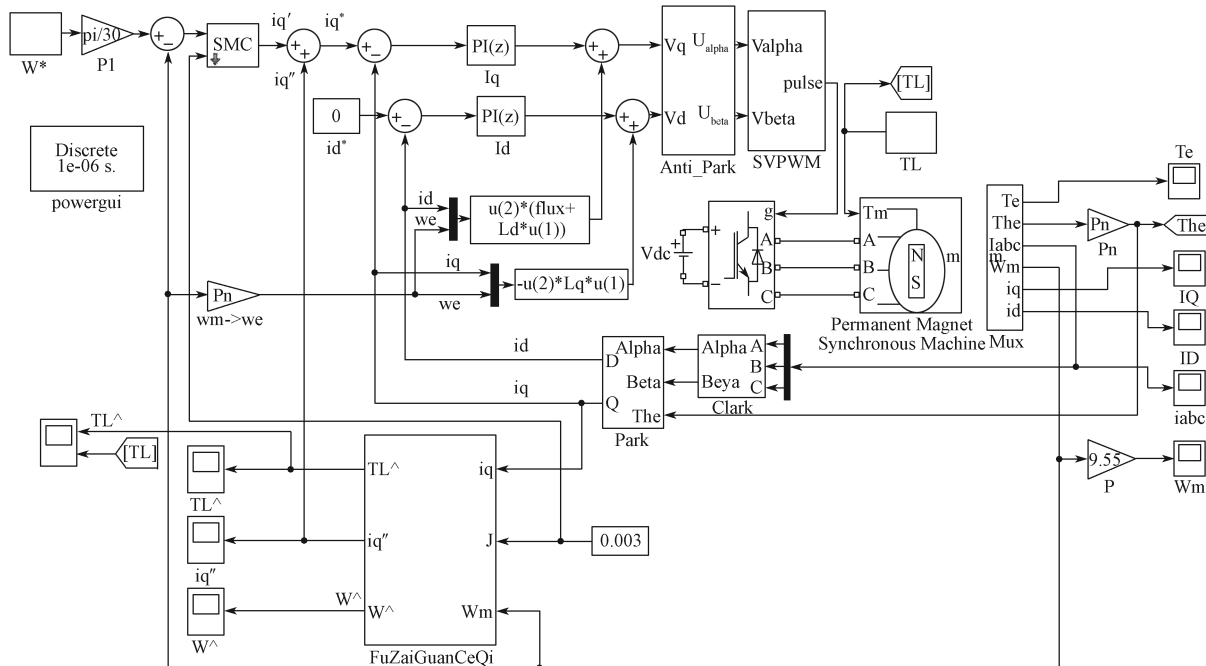


图6 系统仿真模型

Fig. 6 System simulation model

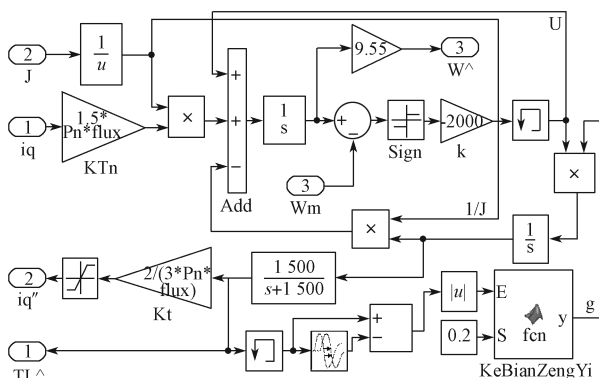


图7 改进型负载转矩观测器仿真模块

Fig. 7 Improved load torque observer simulation module

选取的 PMSM 参数如表 1 所示。

表1 PMSM 参数设置

Table 1 PMSM parameters setting

参 数	参数值
定子绕组相电阻 R/Ω	2.875
极对数 p_n	2
额定电流 I_N/A	11.65
额定转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	1 500
定子绕组 d 轴电感 L_d/H	0.003 173
定子绕组 q 轴电感 L_q/H	0.003 507
转子磁链 ψ/Wb	0.175
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.003
额定负载 $T_N/(N \cdot m)$	22

5.1 转速突变分析

给定额定负载转矩为 22 N·m, 设定系统初始转速为 1 500 r/min, 0.2 s 时转速突减至 1 200 r/min, 0.4

s 时转速突增至 1 400 r/min。图 8 为两种控制策略下转速响应仿真结果。

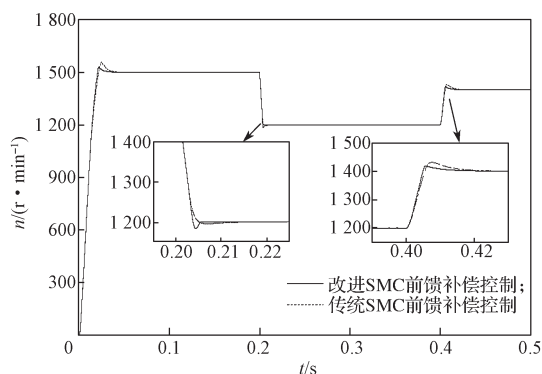


图8 两种控制策略下转速响应波形对比

Fig. 8 Comparison of speed response waveforms under two control strategies

由图 8 可以看出, 传统 SMC 前馈补偿控制的超调较大, 调节时间长; 而改进 SMC 前馈补偿控制的超调较小, 响应速度较快, 与传统 SMC 控制对比优势明显。

5.2 负载突变分析

为验证系统在负载突变时的控制性能, 针对电机在不同转速工况下, 进行突加、减负载转矩。给定初始负载转矩为 0 N·m, 在 0.2 s 时由 0 N·m 突增至额定负载 22 N·m, 0.4 s 时突减至 0 N·m。

给定系统转速 1 500 r/min, 两种控制策略下系统突加、减负载转速响应仿真结果如图 9 所示。

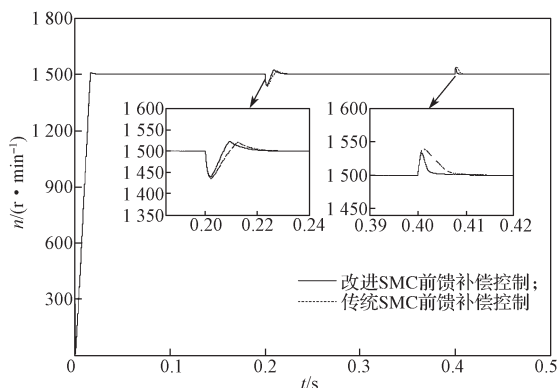


图9 突加、减负载时两种控制策略转速响应波形对比

Fig. 9 Comparison of the speed response waveforms of the two control strategies during sudden load increase and load decrease

由图9可以看出,空载启动下,两种控制策略超调量均较小,无较大差异,但在突加、减负载时,两种控制策略差异明显。突加额定负载时,传统SMC前馈补偿控制转速有65 r/min左右的跌落,经过26 ms回到给定转速;改进SMC前馈补偿控制转速有60 r/min左右跌落,只需19 ms左右回到给定转速。卸负载时,传统SMC前馈补偿控制转速有34 r/min上升,经过10 ms回到给定值,而改进SMC前馈补偿控制转速有30 r/min上升,只需6 ms即回到给定转速。相比而言,改进后系统鲁棒性更好,响应速度更快。

给定系统转速为1 500 r/min,在两种控制策略下电机在不同负载转矩作用下,加、减负载时转速变化值和调节时间如表2所示。

表2 两种控制策略下电机转速变化值和调节时间

Table 2 Motor speed change value and adjustment time under two control strategies

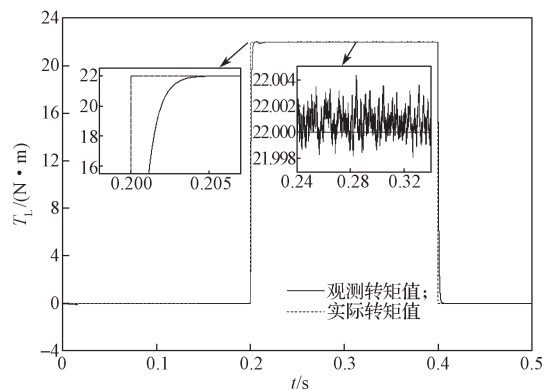
控制策略	给定 负载/(N·m)	加负载时 转速/(r·min ⁻¹)	调节 时间/ms	卸负载时 转速/(r·min ⁻¹)	调节 时间/ms
改进 SMC 前馈补偿	30% T_N	1 491	4	1 508	4
	50% T_N	1 485	5	1 514	4
	70% T_N	1 469	14	1 521	5
	100% T_N	1 440	19	1 530	6
传统 SMC 前馈补偿	30% T_N	1 486	8	1 515	9
	50% T_N	1 475	10	1 523	9
	70% T_N	1 461	14	1 528	11
	100% T_N	1 435	26	1 534	10

分析表2中数据可知,在不同负载转矩工况下,改进型SMC前馈补偿控制较传统SMC前馈补偿控制具有转速波动较小、响应速度较快、调节时间更短,能较好地抑制负载变化对系统转速的影响,抗扰动性能较强。

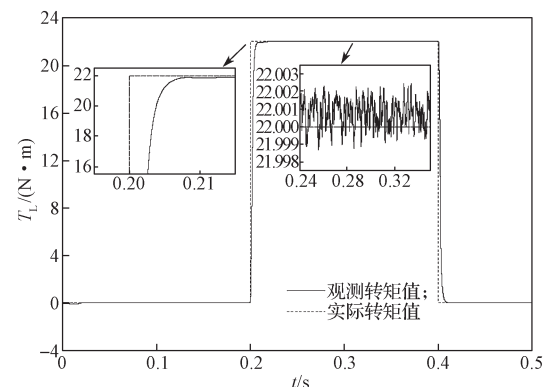
5.3 反馈增益系数对负载转矩观测的影响分析

负载转矩观测器基于滑模控制实现对负载转矩

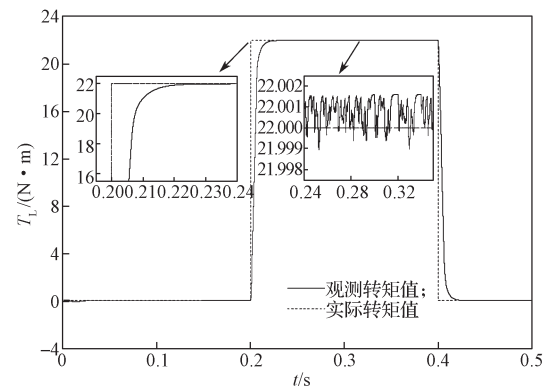
的观测,并将观测的负载转矩前馈补偿至电流调节器中。观测器中反馈增益 g 的取值会影响对负载转矩观测的结果,传统SMC前馈补偿中反馈增益 g 是取折中值进行仿真分析。本文按控制指标需求先设定两个极值大致范围,然后用递推算法确定最佳值,选取反馈增益系数为 $g_{\max}=-0.8$, $g_{\min}=-10$,折中值 $g=-2$,对永磁同步电机的额定负载转矩进行观测,仿真结果如图10所示。



a) $g_{\min}=-10$



b) $g=-2$



c) $g_{\max}=-0.8$

图10 不同 g 值下传统负载转矩观测器
实际转矩值与观测转矩值

Fig. 10 The actual torque value and the observed torque value of the traditional load torque observer under different g

图10a、10b、10c分别为传统负载转矩观测器在取小反馈增益和取折中值以及大反馈增益情况下

的转矩观测波形。从收敛速度上看, 当反馈增益取 $g_{\min}=-10$ 时, 收敛时间为 0.004 s, 收敛速度最快; 当取折中值 $g=-2$ 时, 收敛时间为 0.008 s, 收敛速度较快; 当取 $g_{\max}=-0.8$ 时, 收敛时间为 0.025 s, 收敛速度最慢。因此, 反馈增益系数越小, 负载转矩的观测波形收敛速度越快。此外, 随着反馈增益系数变小, 收敛速度变化趋势逐渐降低, 当收敛速度达到一定值后, 减少反馈增益系数对负载转矩的收敛速度的提高作用变小。从波动幅值上看, 当反馈增益取 $g_{\min}=-10$ 时, 波动范围在 0.006 N·m 左右, 波形振荡幅值最大; 当取折中值 $g=-2$ 时, 波动范围在 0.004 N·m 左右, 波形振荡幅值较低; 当取 $g_{\max}=-0.8$ 时, 波动范围在 0.002 N·m 左右, 波形振荡幅值最小。通过设定的 3 个不同反馈增益值仿真结果可知, 反馈增益系数越小, 负载转矩观测的振荡幅值越大, 波动性越强; 反馈增益越大, 负载转矩观测的振荡幅值越小, 观测精度越高。

5.4 可变增益算法对负载转矩观测器的影响分析

在改进负载转矩观测器中, 采用 s 函数编写可变增益算法, 取 $g_{\max}=-0.8$, $g_{\min}=-10$ 作为增益变换值, 通过不断的参数调整, 设置比较值 ε 为 0.2^[14], 改进型负载转矩观测器观测的仿真波形如图 11 所示。

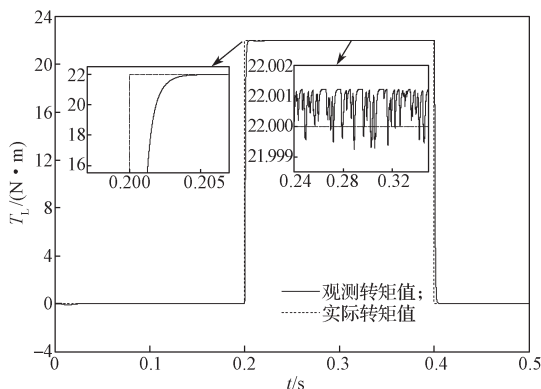


图 11 改进型负载转矩观测器实际转矩值与观测转矩值

Fig. 11 The actual torque value and the observed torque value of the improved load torque observer

从图 11 可知, 在可变增益算法下, 改进负载转矩观测器对负载转矩的观测收敛时间约为 0.004 s, 观测转矩波动范围在 0.002 N·m 左右。

不同反馈增益 g 下, 传统负载转矩观测器与改进型负载转矩观测器对负载转矩观测效果对比, 如表 3 所示。从表 3 可以看出, 可变增益算法解决了传统负载转矩观测器中小反馈增益导致转矩观测波动大的问题, 以及大反馈增益收敛时间长的问题, 收敛时间和波动幅度指标都优于折中增益算法的。可变增益算法能快速跟踪负载转矩变化值, 将传统负载转矩观测器的固定反馈增益优点保留, 对缺点进行改进,

达到了较好的观测效果。

表 3 不同算法下观测效果对比

Table 3 Comparison of observation effects under different algorithms

观测器	反馈增益	收敛时间 /s	观测波动 /(N·m)
传统观测器 (固定反馈增益)	$g=g_{\min}=-10$	0.004	0.006
	$g=-2$	0.008	0.004
	$g=g_{\max}=-0.8$	0.025	0.002
改进观测器 (可变增益算法)	可变 g 值	0.004	0.002

6 结语

本文在对 PMSM 负载转矩观测器研究的基础上, 通过改进滑模速度控制器指数趋近率函数, 在传统负载转矩观测器基础上, 加入可变增益算法, 得到一种改进型负载转矩观测器。改进型负载转矩观测器提高了对负载转矩的辨识速度, 减少了观测波动, 有效抑制了系统抖振, 提高了系统抗干扰性能, 对永磁同步电机抗负载扰动研究有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 陆毓泉, 林鹤云, 韩俊林. 永磁同步电机的扰动观测器无位置传感器控制 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1387-1394.
LU Xiaoquan, LIN Heyun, HAN Junlin. Position Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Using a Disturbance Observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1387-1394.
- [2] 郎志, 杨明, 徐殿国. 双惯量弹性系统负载扰动观测器设计研究 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊2): 84-91.
LANG Zhi, YANG Ming, XU Dianguo. Mechanical Resonance Suppression and Disturbance Rejection of Two-Mass System Based on State-Feedback Observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S2): 84-91.
- [3] 纪科辉, 沈建新. 采用扰动转矩观测器的低速电机伺服系统 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 100-106.
JI Kehui, SHEN Jianxin. A Low Speed Servo Motor Drive System with Disturbance Torque Observers[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 100-106.
- [4] 张虎, 朱晓虹, 孙明山. 带有负载转矩观测器的 PMSM 自适应反步控制 [J]. 电机与控制应用, 2016, 43(4): 17-21.
ZHANG Hu, ZHU Xiaohong, SUN Mingshan. Adaptive Backstepping Control Strategy of PMSM Based on Load Torque Observer[J]. Electric Machines & Control

- Application, 2016, 43(4): 17-21.
- [5] 刘京, 李洪文, 邓永停. 基于新型趋近律和扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 工程科学学报, 2017, 39(6): 933-944.
- LIU Jing, LI Hongwen, DENG Yongting. PMSM Sliding-Mode Control Based on Novel Reaching Law and Disturbance Observer[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(6): 933-944.
- [6] 刘春强, 刘伊伦, 孔凡一, 等. 基于时变参数扰动观测器补偿的永磁同步电机非光滑速度调节器[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 664-672.
- LIU Chunqiang, LIU Yilun, KONG Fanyi, et al. Non-Smooth Speed Controller Based on Time-Varying Parameter Disturbance Observer Compensation for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 664-672.
- [7] 关欣, 李叶松. 基于实时负载转矩反馈补偿的永磁同步电机变增益PI控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 38-45.
- GUAN Xin, LI Yesong. Variable Gain PI Control Method for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Load Torque Feedback Real-Time Compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 38-45.
- [8] 谢振球, 谭兮, 张阳, 等. 基于滑模观测器的永磁同步电机自整定调速系统[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(5): 25-31.
- XIE Zhenqiu, TAN Xi, ZHANG Yang, et al. A Self-Tuning Speed Control System of PMSM Based on the Sliding Mode Observer[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2019, 33(5): 25-31.
- [9] 郑泽东, 李永东, 肖曦, 等. 永磁同步电机负载转矩观测器[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 30-36.
- ZHENG Zedong, LI Yongdong, XIAO Xi, et al. Load Torque Observer of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 30-36.
- [10] 刘颖, 周波, 方斯琛. 基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 80-85.
- LIU Ying, ZHOU Bo, FANG Sichen. Sliding Mode Control of PMSM Based on a Novel Disturbance Observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 80-85.
- [11] 张晓光, 孙力, 赵克. 基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 111-116, 8.
- ZHANG Xiaoguang, SUN Li, ZHAO Ke. Sliding Mode Control of PMSM Based on a Novel Load Torque Sliding Mode Observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 111-116, 8.
- [12] 荀倩, 王培良, 蔡志端, 等. 基于负载转矩观测器的PMSM抗负载扰动控制策略[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(5): 36-41, 54.
- XUN Qian, WANG Peiliang, CAI Zhiduan, et al. Anti-Load Disturbance Control Strategy of PMSM Based on Load Torque Observer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(5): 36-41, 54.
- [13] 王宁, 刘兴勇. 基于抗负载扰动的永磁同步电机双滑模控制[J]. 大连海事大学学报, 2016, 42(2): 75-82.
- WANG Ning, LIU Xingyong. Load Disturbance Rejection Based Dual Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2016, 42(2): 75-82.
- [14] 宋宏帅, 尹万军, 王佐勋. 改进的永磁同步电机转动惯量辨识方法及其在PI自整定中的应用[J]. 齐鲁工业大学学报, 2018, 32(4): 65-70.
- SONG Hongshuai, YIN Wanjun, WANG Zuoxun. Improved Inertia Identification Method of Permanent Magnet Synchronous Motor and Its Application in PI Self-Tuning[J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry(Natural Science Edition), 2018, 32(4): 65-70.

(责任编辑: 申剑)