

基于降维负载转矩观测器的永磁同步电机 转矩前馈补偿策略

庄佳磊

(中航工业南京机电液压研究中心, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对飞机电蒸发冷却系统中永磁同步电机(PMSM)在不同工况下的抗负载扰动问题,研究了负载转矩前馈的方法,提出了一种基于降维负载转矩观测器的转矩前馈控制难点。针对降维负载转矩观测器提出工程化设计方法,通过将观测到的负载转矩补偿到电机电流环输入,实现电机对负载扰动的快速响应,提高了抗负载扰动能力。仿真和试验结果验证了降维负载转矩观测器设计方法以及 PMSM 负载转矩前馈控制算法的正确性和有效性。

关键词: 永磁同步电机;降维状态观测器;负载转矩观测器;负载扰动

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)12-0027-06

Torque Feedforward Compensation Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor Control System Based on Reduced-Order Load Torque Observer

ZHUANG Jialei

(Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, AVIC, Nanjing 211106, China)

Abstract: To improve the anti-load disturbance ability of permanent magnet synchronous motor (PMSM) for aircraft electric evaporation cooling system under different operation conditions, the load torque feedforward compensation control strategy was studied. A control method based on reduced-order load torque observer was presented. Engineering design method was introduced for the reduced-order load torque observer. The observed load torque was used for compensation of the motor current loop controller to realize quick response to load disturbance and improve disturbance resisting ability. Simulation and experiment results verified the correctness and effectiveness of the reduced-order load torque observer's design method and the feedforward compensation strategy of PMSM.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); reduced-order state observer; load torque observer; load disturbance

0 引言

随着全电(多电)飞机技术的发展,电力拖动系统在飞机液压伺服系统、燃油控制系统、环境控制系统中扮演着越来越重要的角色。永磁同步电机(PMSM)由于功率密度高、功率因数高、控制性能优越等特点,在航空领域得到广泛应用。然而,传统 PMSM 控制系统的转速环控制器均是假设负载转矩扰动为零或固定值而设计的,因为飞机

蒸发冷却系统经常需面对有负载扰动的工况,所以系统的调速性能较差。由于负载特性的复杂性,仅靠传统 PID 控制器调节已经不能满足系统性能要求。

针对抑制负载扰动以提高电机系统动态性能的问题,文献[1]提出引入负载转矩的前馈补偿,形成二自由度控制器的控制方法。然而负载转矩直接测量往往需要使用扭矩仪,系统成本高,因此通常使用观测器来测量负载转矩。常用的负载观

测器有 Luenberger 观测器、卡尔曼滤波器、模型参考自适应观测器、滑模观测器等^[1-5]。

若系统的输出已经包含系统的全部信息或者部分信息,那么利用这些信息就可以构造出全维或降维状态观测器^[6-7]。状态观测器是一种基于模型的线性观测器,需要比较精确的系统模型。在一些转动惯量变化较小的电机拖动系统中,电机输出包含部分系统信息,此时可以利用降维观测器原理设计负载转矩降维观测器。该观测器实现简单,使用较少运算量的同时可以得到较好的估计性能。本文针对负载观测需求设计,结合降维观测器原理和 PMSM 矢量控制方法,设计了降维负载转矩观测器,研究了观测器参数工程化设计方法。最后通过仿真和试验验证了负载转矩观测器的可行性。

1 降维观测器原理及设计

1.1 降维观测器原理

n 维线性定常系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ —— $n \times n$ 、 $n \times r$ 、 $m \times n$ 阶实矩阵。

引入非奇异线性变换 $\mathbf{Q}$:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{m \times n} \\ \mathbf{R}_{(n-m) \times n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将 $\mathbf{x}$ 分解为 $\bar{\mathbf{x}}_1$ 和 $\bar{\mathbf{x}}_2$, $\bar{\mathbf{x}}_1$ 是 m 维可直接测量的状态变量:

$$\mathbf{x} = \mathbf{Q}^{-1}\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_1 \\ \bar{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则有:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{A}} = \mathbf{Q}\mathbf{A}\mathbf{Q}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{11} & \bar{\mathbf{A}}_{12} \\ \bar{\mathbf{A}}_{21} & \bar{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \\ \bar{\mathbf{B}} = \mathbf{Q}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{B}}_1 \\ \bar{\mathbf{B}}_2 \end{bmatrix} \\ \bar{\mathbf{C}} = \mathbf{C}\mathbf{Q}^{-1} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}] \end{cases} \quad (4)$$

利用 $\mathbf{x} = \mathbf{Q}^{-1}\bar{\mathbf{x}}$ 可将式(1)变化为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\bar{\mathbf{x}}}_1 \\ \dot{\bar{\mathbf{x}}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{11} & \bar{\mathbf{A}}_{12} \\ \bar{\mathbf{A}}_{21} & \bar{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_1 \\ \bar{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{B}}_1 \\ \bar{\mathbf{B}}_2 \end{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_1 \\ \bar{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{x}}_1 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)看出, m 维状态变量 $\bar{\mathbf{x}}_1$ 可以从系统输出中直接得到,因此需要设计 $n-m$ 维状态变量观测器对 $\bar{\mathbf{x}}_2$ 进行观测。对式(5)进行变换得:

$$\begin{cases} \dot{\bar{\mathbf{x}}}_2 = \bar{\mathbf{A}}_{21}\mathbf{y} + \bar{\mathbf{A}}_{22}\bar{\mathbf{x}}_2 + \bar{\mathbf{B}}_2\mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{y}} = \bar{\mathbf{A}}_{11}\mathbf{y} + \bar{\mathbf{A}}_{12}\bar{\mathbf{x}}_2 + \bar{\mathbf{B}}_1\mathbf{u} \end{cases} \quad (6)$$

定义 $\mathbf{v} = \bar{\mathbf{A}}_{21}\mathbf{y} + \bar{\mathbf{B}}_2\mathbf{u}$, $\mathbf{z} = \dot{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{A}}_{11}\mathbf{y} - \bar{\mathbf{B}}_1\mathbf{u}$, 则:

$$\begin{cases} \dot{\bar{\mathbf{x}}}_2 = \bar{\mathbf{A}}_{22}\bar{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{v} \\ \mathbf{z} = \bar{\mathbf{A}}_{12}\bar{\mathbf{x}}_2 \end{cases} \quad (7)$$

利用式(7)可对 $\bar{\mathbf{x}}_2$ 进行状态观测。观测器输出 $\hat{\mathbf{z}}$ 和实际值 $\mathbf{z}$ 作差,通过反馈矩阵使 $\hat{\mathbf{z}}$ 快速逼近 $\mathbf{z}$ 。由此可得状态变量观测器结构如图 1 所示。

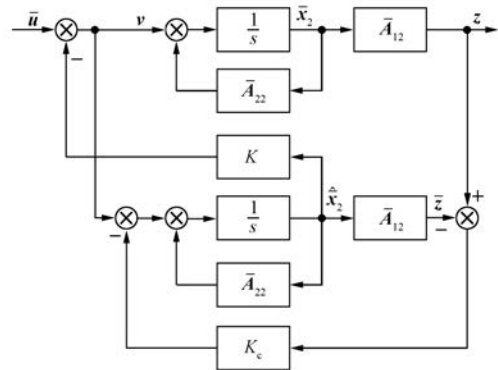


图 1 状态变量观测器结构

1.2 PMSM 负载转矩观测器设计

PMSM 数学模型为^[8]

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (8)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \varphi_f \quad (9)$$

$$T_e = 1.5 p i_q [\varphi_f + (L_d - L_q) i_d] \quad (10)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (11)$$

式中: u_d 、 u_q —— d 、 q 轴电压;

R_s ——绕组电阻;

i_d 、 i_q —— d 、 q 轴电流;

L_d 、 L_q —— d 、 q 轴电感;

ω_e 、 ω_m ——电机电角速度和机械角速度;

φ_f ——电机永磁磁链;

T_e 、 T_L ——电机电磁转矩和负载转矩;

p ——电机转子极对数;

J ——电机转子以及转子所连接负载的转动惯量;

B ——阻尼系数。

假设采样足够高,在一个采样周期 t_s 内负载转矩 T_L 不会变化,那么可以认为在这个采样周期内负载转矩恒定,即 $dT_L/dt=0$ 。根据式(11),选取观测状态变量 $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\omega}_m \quad \hat{T}_L]^T$,并结合前文的分析可得降维观测器方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{11} & \bar{\mathbf{A}}_{12} \\ \bar{\mathbf{A}}_{21} & \bar{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{u} + \mathbf{K}_e[\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}] \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (12)$$

其中: $\bar{\mathbf{A}}_{11} = 0; \bar{\mathbf{A}}_{12} = [1 \quad 0]; \bar{\mathbf{A}}_{21} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$;

$$\bar{\mathbf{A}}_{22} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{u} = T_e; \mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}; \mathbf{C} = [1 \quad 0]。$$

对式(12)进行简化,可得:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_e + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} [\omega_m - \hat{\omega}_m] \end{aligned} \quad (13)$$

将式(13)中的电机转速 $\hat{\omega}_m$ 估计方程化简为

$$\hat{\omega}_m = \frac{T_e + (\omega_m - \hat{\omega}_m) \left(k_1 J - \frac{k_2}{s} \right)}{sJ + B} \quad (14)$$

将式(14)与 PMSM 的运动方程式(11)联立,推算出负载转矩的估计式:

$$\begin{aligned} \hat{T}_L &= T_e - (sJ + B) \hat{\omega}_m = \\ &(\omega_m - \hat{\omega}_m) \left(k_1 J - \frac{k_2}{s} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

根据式(15)设计负载转矩观测器,其结构框图如图2所示。

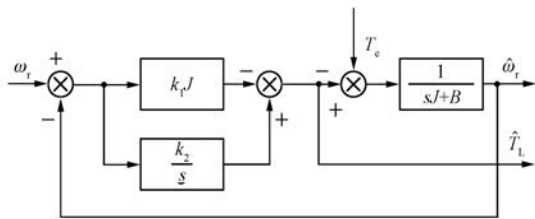


图2 负载转矩观测器结构框图

为了便于观测器的极点配置设计,忽略转子的阻力系数 B ,令 $K_p = k_1 J, K_i = k_2$,式(13)可改写为

$$\hat{\omega}_m = \frac{T_e}{sJ} + \frac{(\omega_m - \hat{\omega}_m)}{sJ} \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (16)$$

那么整个降维观测器可以看成由一个 PI 环节和一个积分器构成,在设计转矩观测器时只需要设计 PI 控制器的比例、积分参数,可降低调试难度。

2 基于负载转矩观测器的转矩前馈设计

转矩前馈策略通过将观测器输出的转矩信号计算成力矩电流,前馈至电流环输入,从而加快电机速度环响应速度,提高电机的动态性能。利用降维转矩观测器进行转矩前馈补偿的电机系统如图3所示。

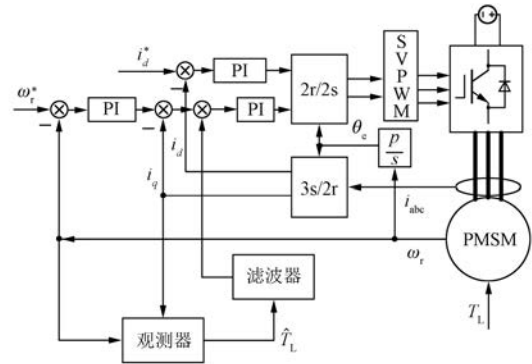


图3 电机系统转矩前馈示意图

2.1 负载转矩观测器设计

假设电机的直轴电流 i_d 与交轴电流 i_q 完全解耦,并忽略电流和转速采样滤波的影响,负载转矩信号 T_L 到负载转矩估计信号 $\hat{T}_L$ 的系统结构框图如图4所示。

电机转矩系数 $K_t = 1.5p\varphi_f$,并忽略电机的转动阻尼系数 B 。电机电流环开环传递函数为

$$G_{\text{curopen}}(s) = \frac{sK_{Pi} + K_{Li}}{s(sL_s + R)} \quad (17)$$

令 $K_{Pi} = \alpha L_s, K_{Li} = \alpha R$,可将电流环开环传递函数化简为

$$G_{\text{curopen}}(s) = \frac{\alpha}{s} \quad (18)$$

式中: α ——电流环的截止频率 ω_{ci} 。

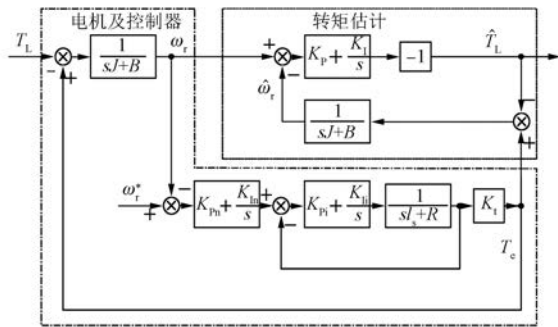


图4 观测器负载转矩估计系统框图

等效电流环传递函数 $G_{\text{curcl}}(s)$ 为

$$G_{\text{curcl}}(s) = \frac{G_{\text{europen}}(s)}{1 + G_{\text{europen}}(s)} = \frac{\omega_{ci}}{s + \omega_{ci}} \quad (19)$$

电机速度环设计时,常用工程化设计方法^[9]。
令:

$$\frac{\omega_{ci}}{K_{ln}/K_{pn}} = \frac{1/\tau_c}{1/\tau_n} = h \quad (20)$$

式中: h ——电机速度环中频宽。

则,电机速度环开环传递函数可化简为

$$G_{\text{splopen}}(s) = \frac{K_t K_{pn} (s + \omega_{ci}/h)}{s^2 J (s + \omega_{ci})} \quad (21)$$

化简后的观测器负载转矩估计等效系统框图如图5所示。

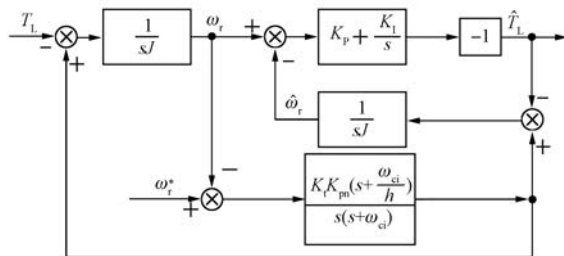


图5 观测器负载转矩估计等效系统框图

根据梅森增益公式可得传递函数^[10]为

$$G(s) = \frac{(sK_p + K_I)}{(s^2 J + sK_p + K_I)} \quad (22)$$

将传递函数化简消元,可得等效传递函数为

$$G(s) = \frac{(sK_p + K_I)}{s^2 J} \quad (23)$$

则等效开环传递函数 $G'_{\text{open}}(s)$ 为

$$G'_{\text{open}}(s) = \frac{(sK_p + K_I)}{s^2 J} = \frac{K_I}{J} \left(\frac{K_p}{K_I} s + 1 \right) \quad (24)$$

系统可以等效看成一个II型系统。观测器负载转矩估计等效闭环系统框图如图6所示。

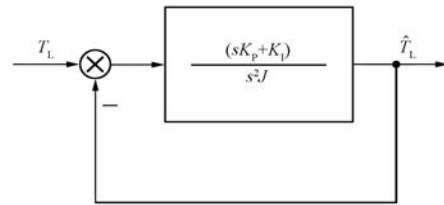


图6 观测器负载转矩估计等效闭环系统框图

2.2 降维转矩观测器工程化设计方法

工程上期望系统对数幅频曲线的低频段斜率大,以获得较高增益,提高系统稳定性;中频段以 -20 dB/dec 穿越 0 dB ,以此获得良好的稳定性;高频段衰减快,以抑制高频噪声^[9]。

根据式(24)画出降维转矩观测器等效波特图,如图7所示。

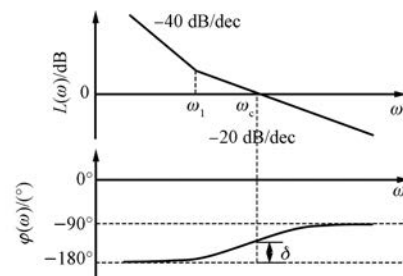


图7 降维转矩观测器等效波特图

对于中频段,由式(24)可得:

$$G(j\omega_c) \approx \frac{K_p/J}{j\omega_c} \quad (25)$$

由 $L(\omega_c) = 20\log[|G(j\omega_c)|] = 0$ 化简可得:

$$\omega_c = \frac{K_p}{J} \quad (26)$$

系统相频函数的表达式为

$$\varphi(\omega) = -180^\circ + \arctan \frac{\omega K_p}{K_I} \quad (27)$$

则系统相角裕度为

$$\gamma = \arctan \frac{\omega_c K_p}{K_I} \quad (28)$$

利用式(26)和式(28)可得观测器PI参数计

算式:

$$\begin{cases} K_P = \omega_c J \\ K_I = \frac{\omega_c^2 J}{\tan \gamma} \end{cases} \quad (29)$$

观测器高频段的斜率为-20 dB/dec,对高频噪声的抑制能力较弱,需要增加滤波器以抑制高频噪声。

在选定负载转矩观测器的截止频率 ω_c 和稳定裕度 γ 等指标后,由式(29)可以计算出观测器的参数。

2.3 转矩前馈设计

当负载变化时,电机转速突变,与给定转速之间的误差变大。仅依靠传统的速度环 PI 控制器进行调节,需要很长的调节时间。如果引入一个负载转矩的力矩电流作为系统的前馈补偿,可以越过电机转速闭环,直接补偿负载扰动对系统的影响,提高电机系统在负载突变时的动态响应。

转矩电流前馈将观测器输出 $\hat{T}_L$ 计算为负载转矩力矩电流 i_L ,并经过低通滤波器前馈至电机电流环输入端。

3 仿真验证

为了验证降维负载转矩观测器的性能,利用 MATLAB/Simulink 平台搭建仿真模型进行仿真验证。电机仿真参数如表 1 所示。

表 1 电机仿真参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
极对数	4	永磁磁链/mWb	73.4
相电阻/ Ω	0.048	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	4 000
相电感/mH	0.358	转动惯量/($kg \cdot m^2$)	0.003

系统的控制参数为电流环 $K_{Pi} = 0.4, K_{Ii} = 48$, 转速环 $K_{Pn} = 0.9, K_{In} = 18$ 。期望观测器截止频率 $\omega_c = 100 \text{ rad/s}$,相角裕度 $\gamma \geq 60^\circ$ 。结合式(29),设计出观测器参数为 $K_p = 0.3, K_i = 18$ 。

3.1 降维负载转矩观测器验证

首先进行起动特性试验仿真,如图 8 所示。

由图 8 可知,在转速上升阶段,转矩估计值 $\hat{T}_L$ 一直跟踪实际负载转矩 T_L ,但是存在一定噪声。当转速进入稳态时,观测器输出噪声显著降低。可见观测器无论在电机调速阶段还是稳速运

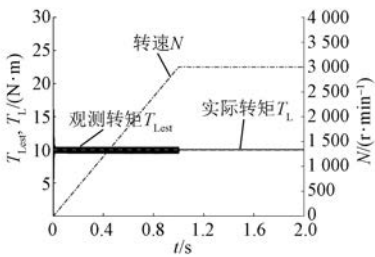


图 8 起动仿真验证

行阶段均具有一定跟踪能力。观测器抑制高频噪声能力较弱,而且在电机转速变化时观测器输出的高频噪声分量更加明显。

3.2 转矩前馈仿真验证

将经过低通滤波器的转矩观测器输出计算成力矩电流并前馈至电流环输入。实际负载变化及观测器输出曲线如图 9 所示。转矩前馈控制策略转速曲线如图 10 所示。

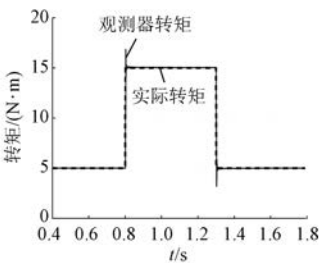


图 9 实际负载变化及观测器输出曲线

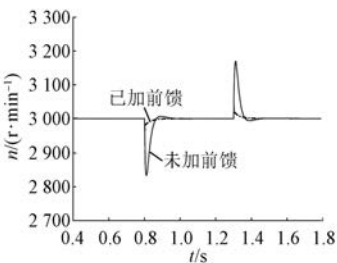


图 10 转矩前馈控制策略转速曲线

电机转速一直保持在 3 000 r/min,在 0.5 s 时负载由 5 N·m 突加至 15 N·m,在 0.9 s 时突减负载至 5 N·m,转矩观测器迅速跟踪负载转矩的变化。没有加入转矩前馈的转速变化最大幅值约 200 r/min,加入转矩前馈后转速变化显著降低至约 30 r/min。可见系统在加入转矩前馈后,发生负载扰动时,电机的转速变化减小,调节时间缩短。

仿真结果表明,转矩前馈补偿可以提高电机抗负载干扰能力和系统的鲁棒性。

4 试验验证

为了验证负载转矩观测器和电机转矩前馈补偿方案的可行性,基于 DSP F2812 微处理系统搭建 PMSM 驱动控制试验平台。控制系统时钟频率 120 MHz,脉宽调制开关周期频率 10 kHz,并利用 DSP 的 eCan 模块上传传感器采集的试验数据。

分别采用不带前馈补偿器以及带有转矩前馈补偿的 PI 控制方式进行试验,使用相同的电流环和转速环 PI 控制参数,转速指令保持在 2 000 r/min,使用加载台对电机进行加减载试验,电机负载由 1 N·m 增加到 8 N·m,保持一段时间后再卸载到 1 N·m。负载观测器输出如图 11 所示;转速变化如图 12 和图 13 所示。

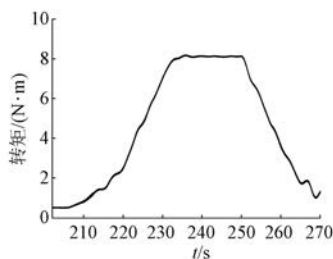


图 11 负载观测器输出

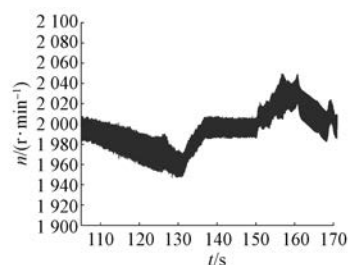


图 12 传统控制方式的转速波形

在未加入负载前馈时,当 $t = 108$ s 时增加负载,转速由 2 000 r/min 下降至约 1 950 r/min;在 $t = 150$ s 时卸载,转速由 2 000 r/min 上升至约 2 050 r/min。在加入转矩前馈后,在 $t = 208$ s 时增加负载,转速由 2 000 r/min 下降至约 1 965 r/min;在 $t = 250$ s 时卸载,转速由 2 000 r/min 上升至约 2 025 r/min。在加入了转矩前馈补偿后,加卸载时的转速波动由无补偿的约

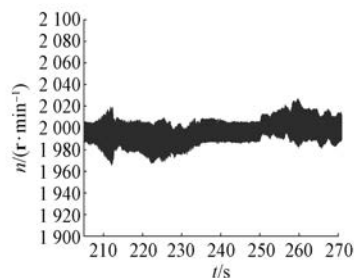


图 13 带有转矩前馈补偿控制方式的转速波形

50 r/min 下降至约 35 r/min。

试验表明,转矩前馈补偿有效降低了电机系统在面对负载扰动时的转速波动和调节时间,提高了系统动态性能和鲁棒性。

5 结 语

根据降维转矩观测器原理,设计出 PMSM 控制系统负载转矩观测器,对负载前馈补偿进行了深入研究。针对负载转矩观测器参数,根据 PMSM 系统数学模型以及负载转矩观测器数学模型推导出一种负载转矩观测器工程化参数设计方法。仿真和试验结果表明:

(1) 工程化负载转矩观测器参数设计方法有效可行,使用截止频率和稳定裕度等指标就可以完成观测器参数设计,降低了设计难度;

(2) 负载转矩前馈补偿控制策略有效提高了电机调速系统在面对负载扰动时的动态性能和系统抗负载扰动的能力,增强了鲁棒性。

【参考文献】

- [1] 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.
- [2] ZHANG X,HOU B.Novel reaching law-based sliding-mode load torque observer for PMSM[C]//2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),2016.
- [3] ZHENG C,ZHANG J,LIU W,et al. A novel reduced-order load torque observer based discrete-time sliding mode control for PMSM speed servo system[C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),2017.
- [4] 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.

(下转第 60 页)

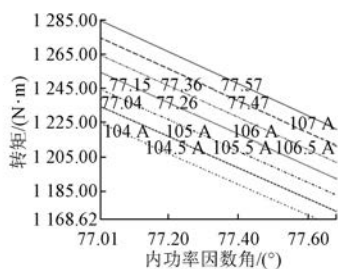


图 15 平均转矩-内功率因数角和电流

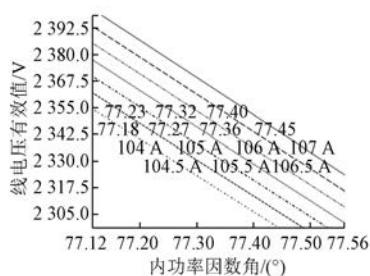


图 16 线电压-内功率因数角和电流

数角。

6 结 语

本文通过 ANSYS Maxwell 2D 参数化建模,实现了模型变化的即时性,使得设计人员能够快速掌握 PMASRM 性能与结构参数的之间的变化关系,降低了设计难度,提高了电机设计的质量和优化效率。通过该技术的运用得出以下结论:

(1) 结构参数化有助于对电机的各个参数进行优化,提高电机优化质量。

(2) 以参数化建模方法具有通用性、可借鉴性,设计人员可以依据需要,设计出更加多样性的电机结构,并根据几何关系对结构进行参数化,并进行参数寻优,完成优化设计。

【参 考 文 献】

- [1] 赵争鸣.新型同步磁阻永磁电机发展及现状[J].电工电能新技术,1998(3): 22.
- [2] 李新华,阮波,徐竟成,等.电动大巴永磁辅助磁阻同步电动机仿真分析[J].微特电机,2014,42(3): 1.
- [3] 黄辉,胡余生.永磁辅助同步磁阻电机设计与应用[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [4] 唐任远.现代永磁电机:理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [5] 刘慧娟.Ansoft Maxwell 13 电机电磁场实例分析[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [6] 李正.永磁电机的设计[M].西安:西安电子科技大学出版社,2016.
- [7] 李新华,汪斯敏,易梦云,等.钕铁硼永磁磁阻同步电机及其仿真分析[J].微特电机,2018,46(8): 49.
- [8] 沈建新,蔡顺,郝鹤,等.同步磁阻电机分析与设计(连载之十二)永磁辅助同步磁阻电机的设计研究[J].微电机,2017,50(3): 79.

收稿日期: 2019-09-23

(上接第 32 页)

- [5] 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.
- [6] 段广仁.线性系统理论[M].2版.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.
- [7] 王伟颖.永磁同步电机抗负载扰动控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [8] SENJYU T, SHINGAKI T, UEZATO K. Sensorless

vector control of synchronous reluctance motors with disturbance torque observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(2): 402.

- [9] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M].4版.北京:机械工业出版社,2015.
- [10] 胡寿松.自动控制原理[M].5版.北京:科学出版社,2007.

收稿日期: 2019-09-11