

基于 CMAC 的永磁同步电机模型参考自适应方法研究^①

张桐瑞^{②*} 刘璇^{③*} 张建华^{*} 周传安^{*} 陈浩^{**}

(^{*} 河北工业大学机械工程学院 天津 300130)

(^{**} 机科发展科技股份有限公司 北京 100044)

摘 要 为改善永磁同步电机(PMSM)在自动导引车(AGV)复杂工况下的驱动性能,使其调速系统满足快速响应要求,且对频繁的负载扰动具有更强抵抗性及适应性,提出一种混合控制方法。该方法将小脑神经网络(CMAC)应用于永磁同步电机的模型参考自适应控制(MRAC)调速系统中,发挥小脑神经网络局部泛化、执行速度快的优势,在缩短系统响应时间的同时减小永磁同步电机的转矩脉动和转矩扰动。在此基础上,搭建永磁同步电机仿真控制系统,仿真结果验证了该方法的有效性和鲁棒性。

关键词 永磁同步电机(PMSM); 自动导引车(AGV); 小脑神经网络(CMAC); 模型参考自适应控制(MRAC); 调速系统

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有结构紧凑简单、体积小、重量轻的优点,且不存在励磁损耗,运行效率得到提高。因而广泛应用于自动导引车(automated guided vehicle, AGV)、数控机床、工业机器人、微型汽车、家用电器、医疗器械、化工及纺织等领域^[1]。特别对于 AGV, PMSM 正逐渐成为其驱动系统的主流电机之一。

AGV 作为常用的物料输送设备,其运行工况较为复杂,需时常启停,且运载货物重量不确定,即存在频繁的负载扰动,对运行平稳性有较高要求。PMSM 在 AGV 中的使用,关于智能控制方面的研究较少。而传统 PID 控制方式为保持电机运行状态,必须对转速环 PI 控制器参数进行微调,其不易实现且可导致系统不稳定与不可控,难以满足需求。与传统技术相比神经网络在非线性系统建模方面具有很大的优势^[2],特别是小脑神经网络(cerebellar model articulation controller, CMAC),由于其权重局

部修正的性质,在电机控制算法中更加容易实现^[3-4]。CMAC 具有很强的局部泛化能力,与其他神经网络相比迭代次数较少,收敛训练周期数更是要小几个数量级^[5]。在众多学者的研究中,多将 CMAC 与传统控制方式或智能控制方式相融合以应用于电机等非线性控制系统中,在一定程度上抑制了系统非线性,缓解了参数不确定性对系统的影响,确保了系统的鲁棒性^[6-10]。但 CMAC 也存在过学习现象,导致学习过程产生发散现象,因此需加以抑制。

本文针对上述 AGV 永磁同步电机伺服系统控制要求较高的问题,为实现稳定控制与运行平稳,研究 AGV 永磁同步电机非线性及时变转速控制,提出一种基于 CMAC 的模型参考自适应控制方法(CMAC-MRAC)。该方法中,CMAC 实现前馈控制,模型参考自适应控制(model reference adaptive control, MRAC)方案用于在线消除被控电机和其转速参考模型之间的跟踪偏差,抑制 CMAC 学习发散现象,常规 PID 算法实现 AGV 永磁同步电机调速系统反馈控制,给予 PMSM 以初始响应,同时保证系统

① 国家重点研发计划(2017YFB1302002)资助项目。

② 男,1993 年生,硕士生;研究方向:特种机器人;E-mail: ZhangTongrui1212@163.com

③ 通信作者;E-mail: xuaner1007@163.com

(收稿日期:2019-07-18)

稳定性。

1 AGV 永磁同步电机的数学模型建立

目前 AGV 调速控制研究中, 为方便控制器的设计, PMSM 数学模型常采用同步旋转坐标系 $d-q$ 下的模型形式^[11, 12], 忽略 PMSM 铁芯的饱和, 不计其涡流和磁滞损耗带来的影响, 数学模型建立如下所示。

定子电压表示为:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d}{dt}\psi_d - \omega_e\psi_q \\ u_q = Ri_q + \frac{d}{dt}\psi_q + \omega_e\psi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链表示为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

运动方程表示为:

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

电磁转矩表示为:

$$T_e = 1.5P_n i_q [(L_d - L_q) i_d + \psi_f] \quad (4)$$

将式(1)和式(2)联合, 得:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(1)~式(5)中, u_d 表示定子电压的 d 轴分量, u_q 为定子电压的 q 轴分量, R 表示电机定子电阻, i_d 表示定子电流 d 轴分量, i_q 表示定子电流 q 轴分量, ψ_d 表示定子磁链的 d 轴分量, ψ_q 表示定子磁链的 q 轴分量, L_d 表示 d 轴电感, L_q 表示 q 轴电感, ω_e 表示电机的电角速度, ω 表示电机的机械角速度, ψ_f 表示永磁体磁链, P_n 表示极对数, J 表示转动惯量, T_e 表示电磁转矩, T_L 表示负载转矩, B 表示阻尼系数。

2 基于 CMAC-MRAC 的混合速度控制器设计

2.1 AGV 永磁同步电机转速参考模型

参考模型即为 AGV 永磁同步电机的期望速度

曲线, 为实现简单可控, 选用一阶惯性系统, 其传递函数表示为:

$$G(s) = \frac{n_{ref}(s)}{n^*(s)} = \frac{1}{T_{ref}s + 1} \quad (6)$$

式(6)中, n_{ref} 表示 AGV 永磁同步电机的转速参考模型输出, $n_{ref}(t) = (1 - e^{-t/T}) n^*(t)$; n^* 表示参考模型的速度阶跃输入, 同时也是 CMAC 的速度指令输入信号; T_{ref} 表示时间常数, 为获得 AGV 永磁同步电机实际所需的指数形式速度曲线, 需根据不同的期望转速选取合适的 T_{ref} 值。

2.2 小脑神经网络结构

AGV 永磁同步电机转速 CMAC-MRAC 控制方案中的 CMAC 应用了其函数逼近的能力, 实质是神经网络的权值优化。CMAC 是一种运用查表法解决复杂非线性问题的技术, 而并非是一种数值计算方法^[13]。CMAC 通过相应学习算法改变表格信息, 从而实现信息归类存储的功能, 其结构如图 1 所示。

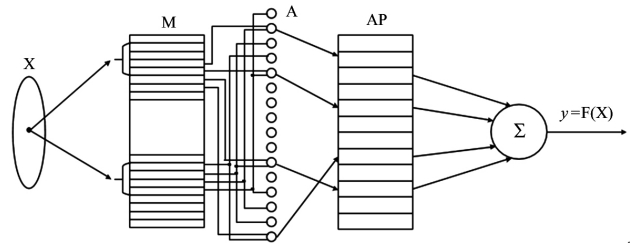


图 1 CMAC 结构框图

网络结构分为 3 个部分, 即输入层、中间层、输出层。CMAC 的工作过程可分解为 4 步映射:

(1) 从输入空间 X 到输入量化器 M 的映射。变量 x 自输入空间 X 经量化后, 映射至输入量化器 M , 成为离散变量 $[x]$ 。

(2) 从输入量化器 M 到概念存储器 A 的概念映射。通常通过滚动组合得到, 离散变量 $[x]$ 激活概念存储器 A 中的 C 个单元, 被激活的单元储存值 1, 其余的单元储存值为 0。

(3) 从概念存储器 A 到实际存储器 AP 的实际映射。通过杂散技术, 将 A 中较大存储空间的数据映射到一个小得多的存储器 AP 中。

(4) 从实际存储器 AP 到网络输出 F 的映射。将存储器 AP 中被激活的权值单元通过线性累加, 得到网络输出。

2.3 CMAC-MRAC 混合速度控制器

AGV 永磁同步电机的 CMAC-MRAC 混合速度控制器结构设计如图 2 所示。

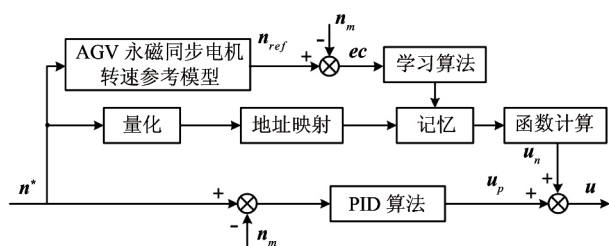


图 2 CMAC-MRAC 混合速度控制器结构

对于 AGV 永磁同步电机控制系统的每一个控制周期,计算出 CMAC 输出 $u_n(k)$,与混合控制器输出 $u(k)$ 相比较,对网络权值进行修正,从而进入学习过程,最终使 CMAC 输出与混合控制器输出之差最小。即通过 CMAC 的自主学习过程,使混合控制器总输出完全由 CMAC 输出产生。

控制算法表示为:

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k) \quad (7)$$

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^c w_i a_i \quad (8)$$

式(7)和(8)中, $u(k)$ 表示混合控制器总输出, $u_n(k)$ 表示CMAC网络输出, $u_p(k)$ 表示PID控制器输出, a_i 表示二进制选择向量, c 表示网络泛化参数。

CMAC 的映射原理及学习算法,如下所示。

CMAC 概念映射。在区间 $[X_{\min}, X_{\max}]$ 上将输入空间 X 分成 $N + 2c$ 个间隔,即:

$$v_1 \cdots v_c = X_{\min} \quad (9)$$

$$v_j = v_{j-1} + \Delta v_j (j = c + 1, \cdots, c + N) \quad (10)$$

$$v_{N+c+1} \cdots v_{N+2c} = X_{\max} \quad (11)$$

CMAC 实际映射采用的方法:

$$a_j = \begin{cases} 1 & X_j \in [v_j, v_{j+c}] \\ & (j = c + 1, \cdots, c + N) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

为使 CMAC 网络输出与混合控制器总输出之差达到最小值,应在每一控制周期结束后,令 $u_n(k)$ 与 $u(k)$ 进行比较,CMAC 修改权值并进入学习过程,直至控制运行结束。本文采用梯度下降法对 CMAC 权值进行调整,以 AGV 永磁同步电机转速参

考模型与被控电机输出之差为重要设计变量,规则规定为式(13)~式(15)。

将参考模型与被控电机输出之差引入权值调整指标:

$$E(k) = \frac{1}{2} (n_m(k) - n^*(k))^2 \cdot \frac{1}{c} \quad (13)$$

每个学习周期内权值调整量:

$$\begin{aligned} \Delta w &= -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w} = \eta \frac{n_m(k) - n^*(k)}{c} a_i \\ &= \eta \frac{ec(k)}{c} a_i \end{aligned} \quad (14)$$

每个学习周期权值调整结果:

$$\begin{aligned} w(k) &= w(k-1) + \Delta w(k) + \alpha (w(k) \\ &\quad - w(k-1)) \end{aligned} \quad (15)$$

式中, η 表示CMAC学习速率,且 $\eta \in (0, 1)$; α 表示惯性量,且 $\alpha \in (0, 1)$; $ec(k)$ 表示参考模型与被控电机输出之差。

CMAC 运行开始后,网络训练过程如下。

(1) 输入空间变量产生输入状态离散点后,按式(9)~式(12)得到概念储存器中被激活单元个数;

(2) 按式(8)计算本周期内CMAC的输出值;

(3) 比较参考模型理想输出与被控电机实际输出的差,按式(13)~式(15)更新CMAC权值;

(4) 计算误差与设定精度 ε 的大小关系,直至当 $\|n_m(k) - n^*(k)\| \leq \varepsilon$ 时,对应权值不需修改,否则返回步骤(2),直至误差精度达到设定要求;

(5) 按照式(8)计算CMAC最终输出值。

将CMAC-MRAC混合速度控制器工作原理描述为控制系统开始运行时,首先置CMAC权值 $w = 0$,此时 $u_n = 0$, $u = u_p$,系统速度环由PID控制器进行控制,给AGV永磁同步电机一个初始反应。随后通过CMAC的学习,使被控电机输出与AGV永磁同步电机转速参考模型之间的差缩小,最终两者达到完全一致,从而使PID控制器的输出 u_p 趋近并最终等于0,CMAC控制器的输出 $u_n(k)$ 最终等于CMAC-MRAC混合控制器总输出 $u(k)$ 。

3 控制系统结构设计

AGV 永磁同步电机转速控制主要是通过控制

交流频率来实现,调速性能由控制器结构的优劣决定。本文 AGV 永磁同步电机控制系统采用电流内环及转速外环双闭环控制结构。其中,电流内环仍采用常规 PI 控制器进行调节^[14,15],可实现抑制电流环内的扰动、提高系统的快速响应、控制电流上限以保证 AGV 永磁同步电机系统运行安全的作用。由于转速外环更能决定系统的性能,内环引起的干扰也可以由外环抑制和补偿。将本文所述 CMAC-

MRAC 混合控制方案应用于转速外环,利用 Matlab 的 S 函数进行编写。在逆变部分使用 $i_d = 0$ 的电压空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 方法,它较常规 PWM 调制方法更易于实现数字化,同时绕组电流波形的谐波成分小,可有效降低 PMSM 的转矩脉动,减小开关管通断次数,减少开关损耗,增大直流母线电压的利用率,使 AGV 永磁同步电机获得更宽范围的调速机能。系统控制框图如图 3 所示。

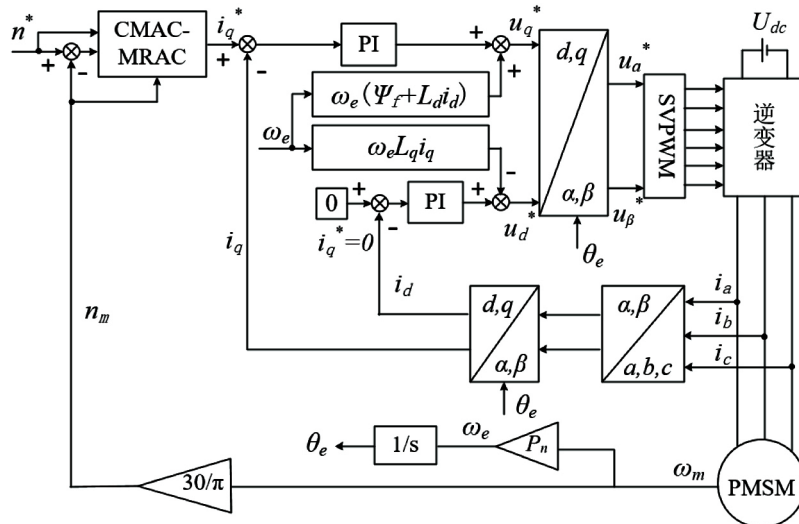


图3 基于CMAC-MRAC的AGV永磁同步电机矢量控制框图

4 仿真实验

4.1 仿真参数

本文仿真所用 AGV 永磁同步电机基本参数为定子电阻 $0.985\ \Omega$,极对数 $p_n = 4$,永磁体磁链 $\psi_f = 0.1827\ \text{Wb}$, d 轴电感 $L_d = 5.25 \times 10^{-3}\ \text{H}$, q 轴电感 $L_q = 12 \times 10^{-3}\ \text{H}$,转动惯量 $J = 0.003\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$,阻尼系数 $B = 0.008\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ 。

设定 CMAC-MRAC 混合控制器参数为转速环 CMAC-MRAC 混合控制中 PID 参数 $k_p = 0.5$, $k_i = 0$, $k_d = 0.13$, k_i 取为零使得 CMAC 的学习仅依赖于本次误差及其变化值。CMAC 泛化参数 $c = 50$, 量化级数 $N = 800$, 学习步长 $\beta = 0.6$, 取惯性量 $\alpha = 0.04$ 调节输出权重。仿真条件设置为直流侧电压 311 V, SVPWM 开关频率为 10 kHz, 采样周期 10 μs , 采用变步长 ode23tb 算法。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 PMSM 空载启动

首先设定 AGV 永磁同步电机空载启动, 给定 AGV 永磁同步电机参考转速 $n^* = 1000 \text{ r/min}$, 并在 0.2 s 时给电机 10 N 的负载转矩扰动, 即 $T_L = 10 \text{ N}$ 。

CMAC-MRAC 控制方案的 AGV 永磁同步电机转速响应曲线及转矩响应曲线如图 4 所示。

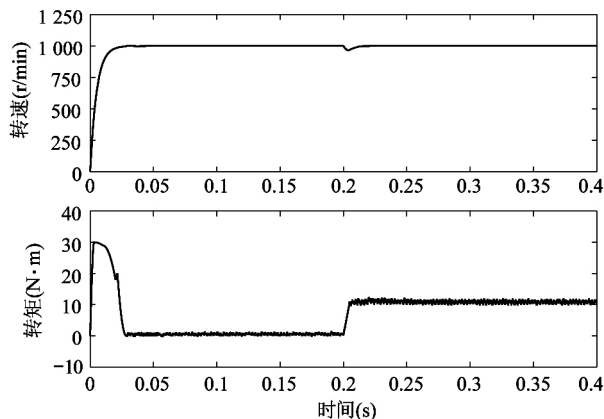


图 4 CMAC-MRAC 混合控制仿真结果

由仿真曲线看出,CMAC-MRAC 控制响应曲线无超调、无静差,使 AGV 永磁同步电机具有良好的转速、转矩跟随能力,且对负载转矩扰动具有一定抵抗作用,动态性能良好。

为更好分析 CMAC-MRAC 控制方案的控制效果,同时进行 AGV 永磁同步电机转速环 PI 控制方案仿真,仿真结果如图 5 所示;转速环小脑神经网络 PD 并行(CMAC-PD)控制方案仿真,仿真结果如图 6 所示。

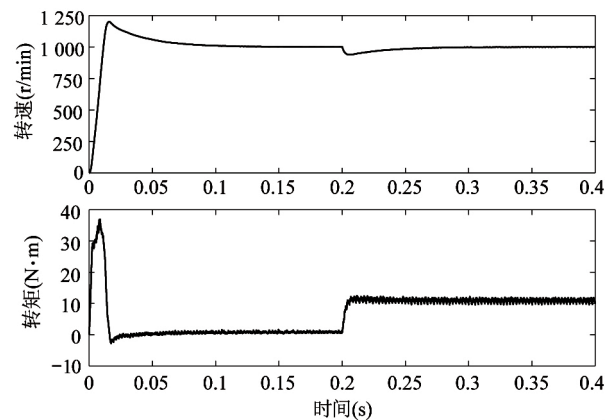


图 5 PI 控制仿真结果

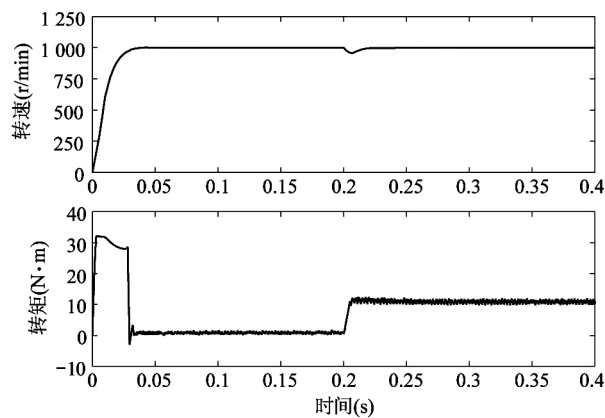


图 6 CMAC-PD 并行控制仿真结果

列出 PI、CMAC-PD、CMAC-MRAC 3 种不同控制方案下的 AGV 永磁同步电机转速响应曲线对比图,如图 7 所示。

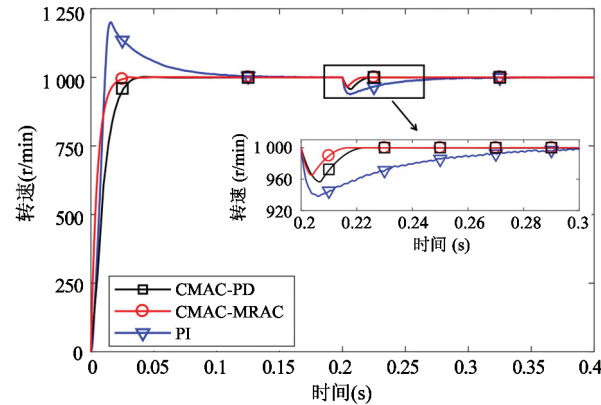


图 7 不同控制方案转速响应曲线对比图

为较直观对比 3 种控制方式下 AGV 永磁同步电机的空载启动性能及抗负载扰动性能,列出动态性能数据,如表 1 所示。

对 3 种控制方案仿真结果进行比较可看出,PI 控制使电机输出超调量较大,突加负载恢复时间较长,动态性能尚需优化。CMAC-PD 控制方法性能较 PI 控制方法有了较大提升。相比之下 CMAC-MRAC 控制方法具有更好的动态性能,在空载启动阶段 AGV 永磁同步电机转速无超调,能有效降低转矩脉动,可以更快速地达到稳定状态,在受到负载扰动时,电机转速产生的波动得到有效控制,且可以更快地恢复到扰动前状态,因而具有更佳的抗负载扰动能力,但在转速响应上升时间方面略有欠缺。

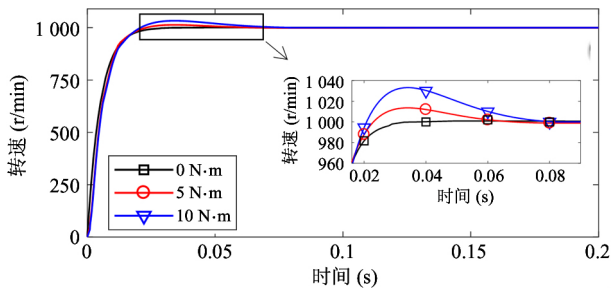
4.2.2 PMSM 带载启动

设定 AGV 永磁同步电机在不同参考转速下带载启动,以考量 CMAC-MRAC 控制方法下电机的带载

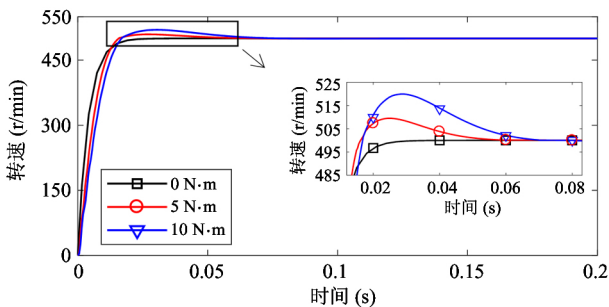
表 1 动态性能比较

算法	启动调节 时间(s)	转速超 调量(%)	启动转矩 (N · m)	突加负载 转速降(r / min)	突加负载 恢复时间(s)
PI	0.103	20.1	36.97	61.8	0.091
CMAC-PD	0.039	0	32.11	42.5	0.023
CMAC-MRAC	0.033	0	30.08	35.3	0.017

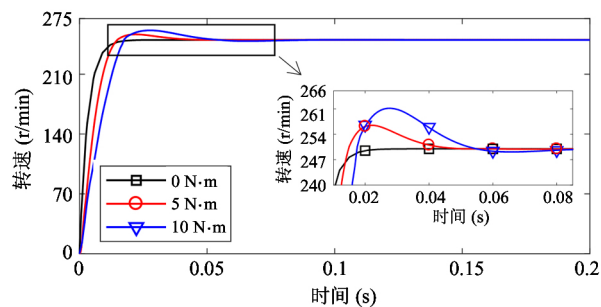
启动性能, 分别给定 1000 r/min、500 r/min、250 r/min 的参考转速指令, 并在 0 N·m、5 N·m、10 N·m 的负载转矩条件下启动, 模拟不同工况下 PMSM 的运行状况, 仿真结果如图 8(a)、(b)、(c) 所示。



(a) $n^* = 1000$ r/min 时电机带载启动转速特性曲线



(b) $n^* = 500$ r/min 时电机带载启动转速特性曲线



(c) $n^* = 250$ r/min 时电机带载启动转速特性曲线

图 8 CMAC-MRAC 方案带载启动仿真结果

由仿真曲线看出, 基于 CMAC-MRAC 方案的 AGV 永磁同步电机调速系统在不同负载下具有不同的启动特性。随着参考转速指令的减小, 系统调节时间相应减少, 表明了系统调速具有一定自适应性。随着负载转矩的增大, PMSM 转速超调量开始增大, 系统稳定时间也随之增大。但总体看来, 在满载 10 N·m 条件下, AGV 永磁同步电机转速超调量甚微, 满足运行平稳要求, 系统稳定时间满足 AGV

快速响应需求, 即通过学习, 系统对不同负载、不同转速均具有较优的调速跟踪效果。

5 结 论

为提升 AGV 驱动性能, 本文针对其 PMSM 伺服系统提出一种将 CMAC 应用于 PMSM 的 MRAC 调速系统控制方案, 充分利用了 CMAC 结构简单、收敛快、实时性好、误差小、鲁棒性强的优点。仿真结果表明, 该控制方案在运行稳定性、抗扰性能和鲁棒性方面表现出较优的功能特性, 满足 AGV 性能需求。未来研究工作将更加集中于搜寻 PD 控制器最优值, 以期减少电机响应上升时间, 使 AGV 获得更好控制性能。

参考文献

- [1] Kivanc O C, Ozturk S B. Sensorless PMSM drive based on stator feedforward voltage estimation improved with MRAS multi-parameter estimation [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(3): 1326-1337
- [2] 刘国海, 陈仁杰, 张多, 等. 两电机调速系统的神经网络逆无模型自适应鲁棒解耦控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(3): 242-248
- [3] Zhou X Y, Jia Y, Yue H X, et al. MC & OS-based CMAC compound control of inertially stabilized platform for aerial remote sensing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4): 764-771
- [4] 岳学磊, 白鹏, 杨瑞坤, 等. CMAC-PID 在无刷直流电机控制系统中的应用 [J]. *仪表技术与传感器*, 2016(7): 112-114
- [5] Zhao J S, Zhao Z N, Wang Z P, et al. Simulation and experimental research of digital valve control servo system based on CMAC-PID control method [J]. *High Technology Letters*, 2017, 23(3): 306-314
- [6] Lin F J, Lu K C, Yang B H. Recurrent fuzzy cerebellar model articulation neural network based power control of a single-stage three-phase grid-connected photovoltaic system during grid faults [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(2): 1258-1268
- [7] Liu Y K, Sun J L, Zhu T, et al. CMAC and Kalman filter composite control AVR optimization [J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(14): 98-104

- [8] Lin F J , Sun I F , Yang K J , et al. Recurrent fuzzy neural cerebellar model articulation network fault-tolerant control of six-phase permanent magnet synchronous motor position servo drive [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* , 2016 , 24(1) : 153-167
- [9] Fei C , Zhou D , Lin C M , et al. Fuzzy cerebellar model articulation controller network optimization via self-adaptive global best harmony search algorithm [J]. *Soft Computing* , 2018 , 22(10) : 3141-3153
- [10] Ngo T Q , Duong M K , Pham D C , et al. Adaptive wavelet CMAC tracking control for induction servomotor drive system [J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology* , 2019 , 14(2) : 1-10
- [11] Zhou K , Sun Y C , Wang X D , et al. Active disturbance rejection control of PMSM speed control system [J]. *Dianji yu Kongzhi Xuebao/Electric Machines and Control* , 2018 , 22(2) : 57-63
- [12] 韩坤,孙晓,刘秉,等. 一种永磁同步电机矢量控制 SVPWM 死区效应在补偿方法 [J]. 中国电机工程学报 , 2018 , 38(2) : 620-627
- [13] Lin C M , Huynh T T , Le T L. Adaptive TOPSIS fuzzy CMAC back-stepping control system design for nonlinear systems [J]. *Soft Computing* , 2018 , 23(16) : 6947-6966
- [14] 袁雷,胡冰新,魏克银,等. 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: 70-79
- [15] 刘景林,公超,韩泽秀,等. 永磁同步电机闭环控制系统数字 PI 参数整定 [J]. 电机与控制学报, 2018 , 22(4) : 30-36

Research on model reference adaptive control method of permanent magnet synchronous motor based on CMAC

Zhang Tongrui^{*} , Liu Xuan^{*} , Zhang Jianhua^{*} , Zhou Chuan'an^{*} , Chen Hao^{**}

(^{*} College of Mechanical Engineering Hebei University of Technology , Tianjin 300130)

(^{**} Machinery Technology Development Co. Ltd , Beijing 100044)

Abstract

In order to improve actuating properties of permanent magnet synchronous motor (PMSM) under complicated working conditions of automatic guided vehicle (AGV) , make its speed regulating system meet the requirements of fast response , and have stronger resistance and adaptability to frequent load disturbances , a method of hybrid control is proposed. The cerebellar model articulation controller (CMAC) is applied to the speed regulating system based on model reference adaptive control (MRAC) of the permanent magnet synchronous motor , which takes advantage of the local generalization and fast execution speed of the cerebellar model articulation controller. The system response time is shortened while the torque ripple and disturbance of permanent magnet synchronous motor are reduced. On this basis , a simulation control system of the permanent magnet synchronous motor is built. Simulation results verify that the proposed method has good effectiveness and robustness.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM) , automatic guided vehicle (AGV) , cerebellar model articulation controller (CMAC) , model reference adaptive control (MRAC) , speed regulating system