

A Model Reference Adaptive PI Speed Control System for Three-Phase Brushless DC Motor Based on ARM + CPLD

Jiaming Zhang, Lijun Zhang

CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., LTD, Qingdao Shandong
Email: 15275218706@163.com

Received: Dec. 4th, 2017; accepted: Dec. 22nd, 2017; published: Dec. 29th, 2017

Abstract

A three-phase brushless DC Motor (BLDCM) speed control system is designed and developed by using ARM and CPLD: motor drive commutation, square wave drive, fast fault protection and motor speed measurement logic being realized by CPLD chip; model reference adaptive PI control algorithm is implemented by ARM chip. Full duplex communication between ARM and CPLD is conducted over SPI bus interface. Precise control of motor speed is achieved by two chips' joint work. The effectiveness of the control system structure and control algorithm was tested through Simulink simulation and actual experiment. Model reference adaptive PI algorithm improved the robustness of the BLDCM closed loop feedback control system. Consequently, when the motor parameter or the motor load changes, without adjusting PI parameters, the closed-loop control system is still able to maintain excellent control performance.

Keywords

Brushless DC Motor, Model Reference Adaptive, Simulation Model, Robustness, ARM, CPLD

一种基于ARM + CPLD的三相无刷直流电机模型参考自适应PI调速控制系统

张家明, 张利军

中车青岛四方车辆研究所有限公司, 山东 青岛
Email: 15275218706@163.com

收稿日期: 2017年12月4日; 录用日期: 2017年12月22日; 发布日期: 2017年12月29日

摘要

本文设计并开发了一种基于ARM + CPLD的三相无刷直流电机模型参考自适应PI调速控制系统: 由CPLD芯片实现无刷直流电机的换相与方波驱动、快速故障保护, 兼具电机转子机械转速实时测量功能; 由ARM芯片实现模型参考自适应PI控制算法。ARM与CPLD之间通过SPI总线接口实现全双工通信, 两块芯片联合工作实现电机转速的精确控制。通过Simulink仿真和实际试验, 验证了该驱动控制系统硬件结构和控制算法的有效性。采用的模型参考自适应PI控制算法, 提高了无刷直流电机闭环负反馈控制的鲁棒性, 使得电机参数或者电机负载发生变化时, 在不重新整定PI参数的前提下, 闭环控制系统依然能够保持良好的控制性能。

关键词

无刷直流电机, 模型参考自适应, 仿真模型, 鲁棒性, ARM, CPLD

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

无刷直流电机(BLDCM)具备直流电机优越的调速性能, 伺服性能强, 又取消了碳刷、滑环等结构所带来的各种问题, 使得电机本身不附加励磁损耗和机械损耗, 节电率很高[1], 非常适合应用于对用电量要求较为严苛的场合, 例如, 风电变桨控制系统所使用的变桨电机, 或者是电动汽车所用驱动电机, 就可以采用无刷直流电机, 既可以达到优越的控制性能, 又可以最大限度的可节省用电量, 从而有效促进新能源产业的发展。

采用双芯片的控制结构, 使得两块芯片各司其职, 由CPLD负责无刷直流电机的换向与方波驱动, 充分发挥了其硬件逻辑快速响应的优势, 使得电机发生故障时能够实现快速保护; 由ARM实现模型参考自适应PI控制算法, 当电机的自身参数发生变化或者出现负载扰动时, 模型参考自适应PI控制算法相较于传统的PI控制算法, 有着更强的鲁棒性。两块芯片协同工作, 确保电机安全、可靠、平稳运行。

2. 系统总体设计

系统的硬件结构如图1所示, 三相无刷直流电机的驱动电路为三相全桥电路, 电机的额定工作电压为24VDC, 电机内置三相霍尔传感器用于转子位置检测。CPLD芯片5M240ZT100I5N主要实现电机的换相驱动和PWM调速, 以及电机的快速故障保护, 包括过压和过流保护等, 还具备电机转子机械转速的实时测量的功能; ARM芯片STM32F100为主控制器, 片内实现模型参考自适应PI控制算法, 与CPLD配合实现转速双闭环控制。

ARM与CPLD通过SPI总线接口进行全双工通信。具体的通信机制是: ARM向CPLD发送控制字来, 再由CPLD按照通信协议进行解析, 进而控制电机的转速、转向和制动等, 每一次下发控制字的同时CPLD上传当前的电机转速或位置信息给ARM。

闭环控制结构为双闭环串级控制系统, 外环为转速环, 内环为电流环, 充分发挥了串级控制系统快速响应的优点; 闭环控制算法的选择, 摒弃了传统的增量式PI控制算法, 而是采用了模型参考自适应

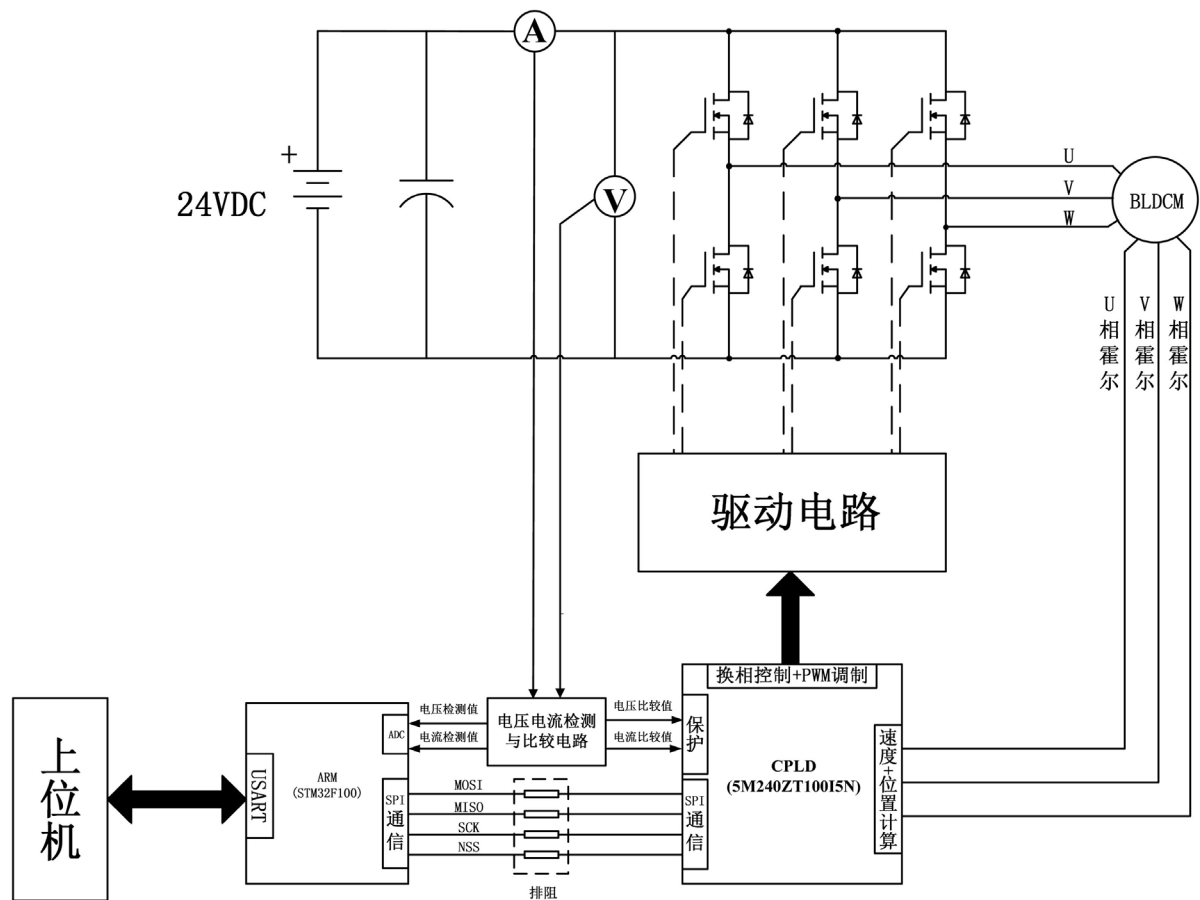


Figure 1. Block diagram of system hardware
图 1. 系统硬件结构图

PI 算法, 提高了直流无刷电机双闭环负反馈控制的鲁棒性, 使得电机参数或者电机负载发生变化时, 闭环控制系统依然能够保持良好的控制性能。

3. 三相无刷直流电机数学模型

本文涉及的三相无刷直流电机的转子结构为隐极式结构, 定子绕组为星型连接。无刷直流电机的电压方程的矩阵形式可以具体表示为[2]

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

- u_a, u_b, u_c —— 每相定子绕组的相电压(V);
- R_a, R_b, R_c —— 每相定子绕组的电阻(Ω);
- i_a, i_b, i_c —— 每相定子绕组的相电流(A);
- L_a, L_b, L_c —— 每相定子绕组的自感(H);
- $M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$ —— 两相定子绕组之间的互感(H);
- e_a, e_b, e_c —— 每相定子绕组的反电动势(V)。

由于电机的三相定子绕组完全对称, 所以有

$$R_a = R_b = R_c = R \quad (2)$$

因为直流无刷电机的转子结构形式为表面粘贴式的隐极结构, 所以我们可以认为, 电机的绕组电感一个常量, 不随着时间的变化而变化。由于电机的定子三相绕组是结构完全相同而且对称摆放的, 因此每相绕组的自感是相等的, 两相绕组之间的互感也相等, 可以取 L, M , 令:

$$\begin{aligned} L_a = L_b = L_c = L \\ M_{ab} = M_{ac} = M_{ba} = M_{bc} = M_{ca} = M_{cb} = M \end{aligned} \quad (3)$$

则式(1)可以改写为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于三相电流满足

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (5)$$

式(4)可进一步简化为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 $L_s = L - M$ 。

与大多数的物理系统相类似, 在分析直流无刷电机的转矩和功率的时候, 也可以采用能量转换的方式。电机在运行的过程中从电源吸收电功率, 这些功率一部分转化电机的铜耗和铁耗, 另一部分转化为机械驱动传递给转子, 这部分功率就是电磁功率, 它在数值上等于各相绕组的反电动势和电流的乘积之和, 即[2]:

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (7)$$

不计转子的机械损耗和其他损耗, 电机输出的电磁功率能够全部转化为转子的动能, 所以机械功率可以表示为:

$$P_e = T_e \omega \quad (8)$$

式中: T_e ——电磁转矩(N.m);

ω ——电机的机械角速度(rad/s)。

由式(7)和式(8)得

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (9)$$

要想能够构成一个完整的机电系统数学模型, 除了上述推导出的电机的电压方程和转矩方程, 还需要引入电机的运动方程[2],

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (10)$$

式中: T_L ——负载转矩(N·m);

J ——转子的转动惯量(kg)。

4. 驱动逻辑设计

如图 2 所示为三相无刷直流电机的驱动主回路。六个 MOSFET 的标号为 M1~M6, 的开关驱动信号由 CPLD 给出, 三相霍尔传感器的输出脉冲信号接入 CPLD 的 I/O 引脚, CPLD 片内逻辑首先对这三路脉冲信号进行整形, 整形的目的是为了滤除脉冲信号上叠加的干扰信号。然后对应于整形后的脉冲信号组合, 根据表 1 所示的真值表给出 MOSFET 的开关驱动信号。

表 1 所示的真值表适用于所有内置三相霍尔传感器的三相无刷直流电机。可以看出, 任意时候, 仅有两个 MOSFET 导通, 也就是说, 图 2 中所示三相全桥逆变电路为 120° 导通型逆变电路, 三相无刷直流电机在任意时刻仅有两相定子绕组通有电流, 第三相定子绕组为悬空状态。

ARM 片内程序, 基于模型参考自适应 PI 控制算法, 计算出控制量, 然后通过 SPI 总线下发给 CPLD, CPLD 接收后按照通信协议解析, 将控制量转化成对应占空比的方波信号, 即 PWM 信号。CPLD 基于表 1 确定了当前时刻应该导通的 2 个 MOSFET, 上桥 MOSFET 的驱动电平为常高, 下桥 MOSFET 的驱动信号为 PWM 信号。开环控制下, 电机转速满足式(11):

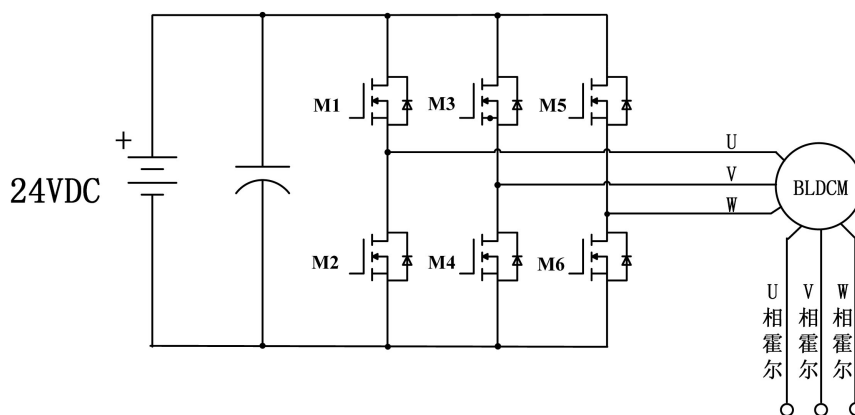


Figure 2. Main drive circuit of three-phase brushless DC motor
图 2. 三相无刷直流电机驱动主回路

Table 1. True value table of three-phase brushless DC motor commutation drive
表 1. 三相无刷直流电机换相驱动真值表

状态编号	霍尔(U、V、W)	电机转向	控制信号 M1~M6
1	101	正转	100100
2	100	正转	100001
3	110	正转	001001
4	010	正转	011000
5	011	正转	010010
6	001	正转	000110
1'	101	反转	011000
2'	100	反转	010010
3'	110	反转	000110
4'	010	反转	100100
5'	011	反转	100001
6'	001	反转	001001

$$n = \text{PWM_Duty_Ratio} \cdot n_0 \tag{11}$$

其中, n_0 为电机的额定转速, 转速 n 与 PWM 信号的占空比 PWM_Duty_Ratio 成正比关系。

CPLD 的片内逻辑还能够实现电机转子机械转速的实时测量, 其硬件逻辑框图如图 3 所示。

具体实现方式是: CPLD 接收到电机内置三相霍尔传感器的输出脉冲后, 首先进行信号调理, 也就是前述的脉冲整形。将整形后的脉冲信号作“异或”运算, 可以得到频率与转子机械转速成正比的方波信号, 然后基于传统的“T 法测速”原理, 在 CPLD 片内设计一个 20 kHz 的时基脉冲信号, 也就是图 3 中的“基准时钟”。通过计算计算“异或”后得到的方波信号相邻两个上升沿之间的 20 kHz 时基脉冲信号的个数 N , 然后通过 CPLD 片内的 D 触发器, 在 D 触发器的时钟上升沿, 将计数值 N 通过 SPI 总线上传给 ARM, ARM 片内程序即可按照式(12)计算出当前电机的转子机械转速。

$$\text{Rotor_Speed} = \frac{1}{N/20000 \cdot 3 \cdot p} \cdot 60 \tag{12}$$

式(12)中, Rotor_Speed 为电机的转子机械转速, p 为电机的极对数, Rotor_Speed 的单位是 rpm。

图 3 中的“时间计数”时序图如图 4 所示。

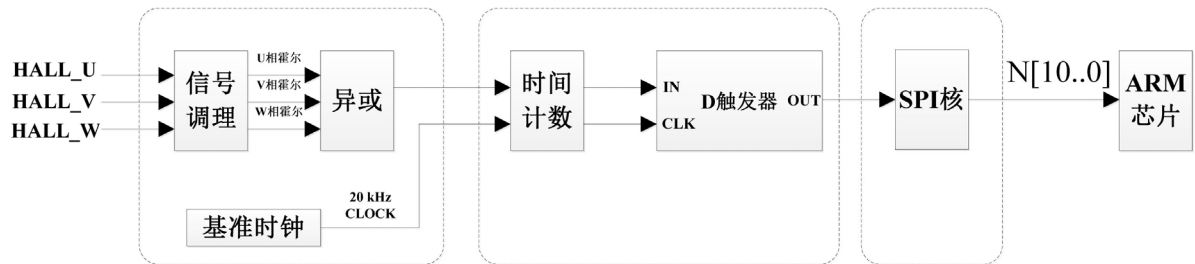


Figure 3. Block diagram of rotor mechanical speed measurement logic in CPLD

图 3. CPLD 片内转子机械转速实时测量逻辑框图

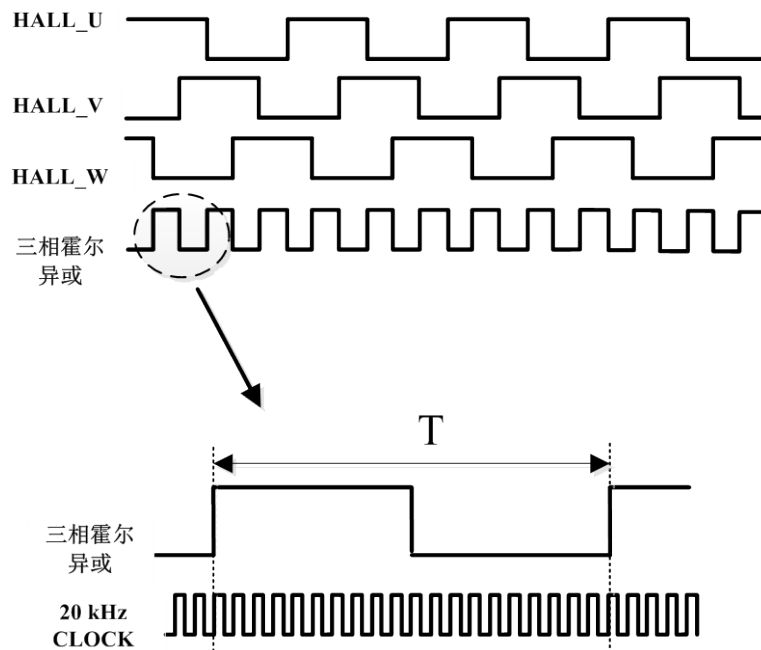


Figure 4. Sequence diagram of time count logic

图 4. 时间计数逻辑的时序图

CPLD 芯片的片内逻辑本质上属于“硬件逻辑”，其响应延时仅为逻辑门电路的输出延时，因此可以实现电机的快速故障保护。图 1 中所示的“电压电流检测”电路，首先将电压/电流传感器的输出信号转化为电压信号，然后接入两路电压比较器，电压比较器的输出接入 CPLD 的 I/O 引脚。只要有一路电压比较器的输出为高电平，CPLD 接收到之后就会立刻封锁图 2 中 6 个 MOSFET 的驱动信号，起到保护电机的作用。

5. 控制算法设计

模型参考自适应控制在直流无刷电机控制系统中的应用主要的有三种：基于状态反馈的设计方法，基于信号自适应的设计方法，基于参数估计的设计方法[3]。本系统采用的基于信号自适应的控制算法，而这一控制算法正是通过 ARM 来实现的。

5.1. 基于信号自适应的设计方法

取直流无刷电机双闭环控制系统的状态方程为

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (13)$$

其中 $x(t) \in R^n$ 可测， $u(t) \in R^m$, $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$ 是常系数矩阵。取参考模型的状态方程为

$$\dot{x}_m = A_m x_m(t) + B_m r(t) \quad (14)$$

其中 $A_m \in R^{n \times n}$ 是一个常系数且稳定的矩阵， $B_m \in R^{n \times m}$ 是一个常系数矩阵， $r(t) \in R^m$ 是一个可选的、有界的、分段连续的参考输入。

控制系统的理想性能可以理解为直流无刷电机的双闭环控制的状态矢量 $x(t)$ 能够跟踪参考系统给出的状态矢量 $x_m(t)$ 。

定义跟踪误差

$$e(t) = x(t) - x_m(t) \quad (15)$$

由式(13), (14)和(15)可得

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_m(t) = A_m e(t) + \sigma(t) - bu_A(t) \quad (16)$$

其中 $\sigma(t) = (A_m - A)x(t) + (b_m - b)r(t)$ 。

取 Lyapunov 函数为[4] [5]

$$V = \frac{1}{2} e^T P e \quad (17)$$

其中 $A^T P + PA = -Q$, Q 是一个正定矩阵。

对式(17)求导, 得

$$\dot{V} = \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} \quad (18)$$

将式(16)带入上式得

$$\dot{V} = -e^T Q e + 2e^T P \sigma - 2e^T P b u_A \quad (19)$$

取信号自适应控制律为[6]

$$\begin{aligned} u_A(t) &= h \cdot \text{sign}(v(t)) \\ v(t) &= d^T e(t), \quad d^T = b^T P, \quad P = P^T > 0 \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $v(t)$ 是通用误差表达式, d^T 误差加权系数向量, P 是对称的正定矩阵, 且满足 $A_m^T P + P A_m = -Q$, $Q = Q^T > 0$ 。

由式(19)、(20)得

$$\dot{V} = -e^T Q e + 2e^T P \sigma - 2e^T P b h \cdot \text{sign}(b^T P e(t)) \quad (21)$$

为了使 $\dot{V} < 0$, 我们就要合理地取 h 值使 $h > \sigma$, 这样才能保证系统的稳定性[7]。

5.2. 参考模型的选取

取参考模型系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{k_1}{s^2 + k_2 s + k_3} \quad (22)$$

相应的状态方程为

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k_3 & -k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ k_1 \end{pmatrix} r(t) \quad (23)$$

对应式(14)可知,

$$A_m = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k_3 & -k_2 \end{pmatrix}, B_m = \begin{pmatrix} 0 \\ k_1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

5.3. 自适应控制率的计算

取[8]

$$Q = m \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

其中 m 为可变的正数, 参考模型(22)的参数选择为

$$k_1 = 6.6, k_2 = 3.3, k_3 = 6.6 \quad (26)$$

则根据式(20)可以计算出

$$P = m \begin{pmatrix} \frac{7}{5} & \frac{3}{40} \\ \frac{3}{40} & \frac{69}{400} \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{20}{3} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$u_A(t) = h \cdot \text{sign} \left(m \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{23}{20} \end{pmatrix} e(t) \right) \quad (28)$$

6. Simulink 仿真

图 5 为三相无刷直流电机的模型参考自适应 PI 调速控制系统结构图, 被控参数是电机的转速。

对应于图 5, 得到图 6 所示仿真模型。

对应于式(20), 取 $h = 3000, d^T = (120 \ 12)$, 基于图 6 所示的模型, 分别在电机参数变化和电机负载变化两种情况下进行仿真, 给定转速均为 3000 rpm。图 7 为电机的转动惯量发生变化时的转速响应曲线, 图 8 为电机的定子绕组电阻值发生变化时的速度响应曲线, 图 9 为电机的负载发生变化时的速度响应曲线。

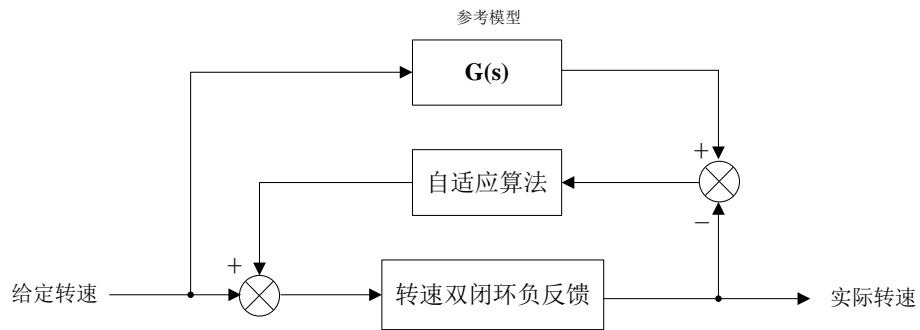


Figure 5. Block diagram of A Model Reference Adaptive PI Speed Control System for Three-Phase Brushless DC Motor
图 5. 三相无刷直流电机模型参考自适应 PI 调速控制系统结构图

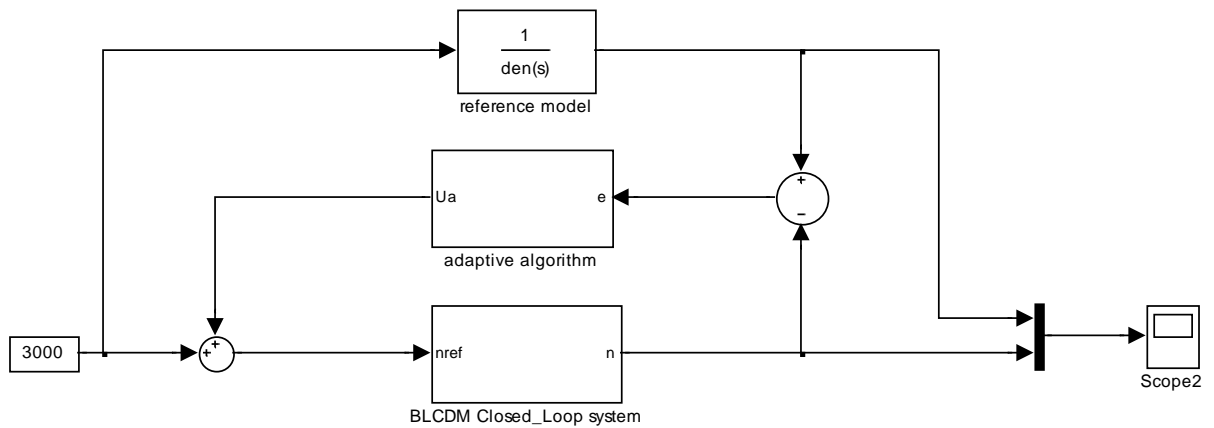


Figure 6. Simulink simulation model
图 6. Simulink 仿真模型

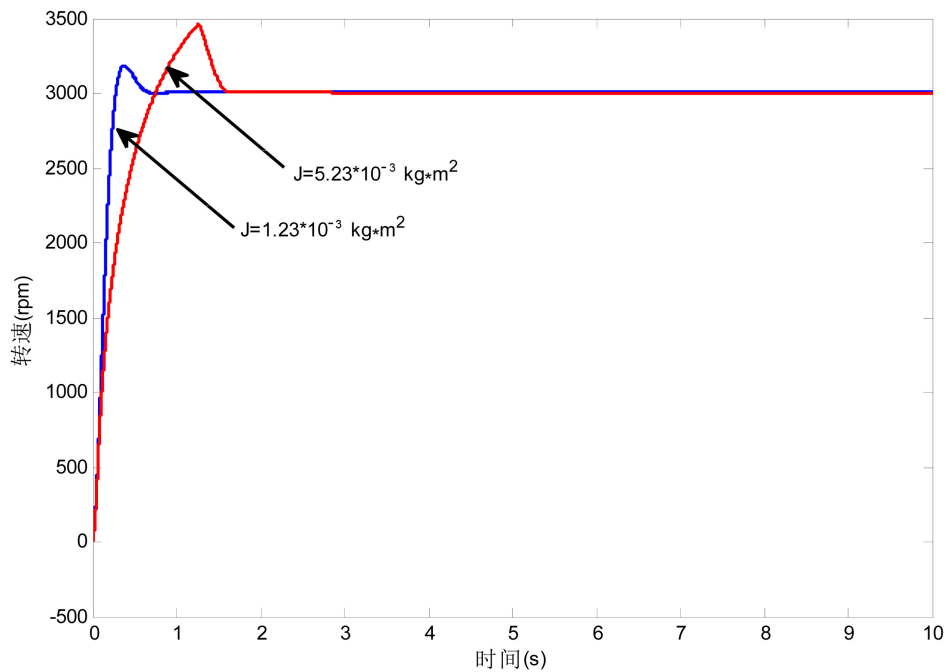


Figure 7. Speed response at the different moment of inertia
图 7. 电机转动惯量变化时的速度响应

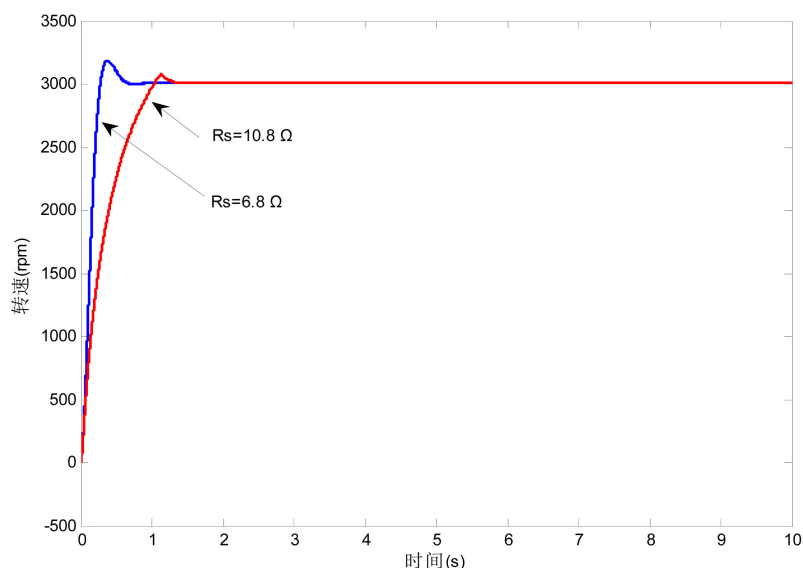


Figure 8. Speed response at the different stator winding resistance

图 8. 电机定子绕组电阻值发生变化时的速度响应

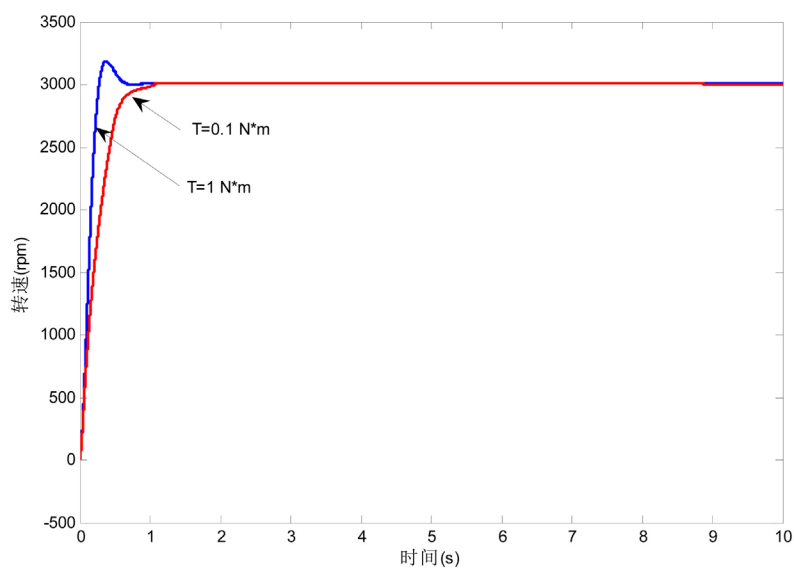


Figure 9. Speed response at the different motor load

图 9. 电机负载发生变化时的速度响应

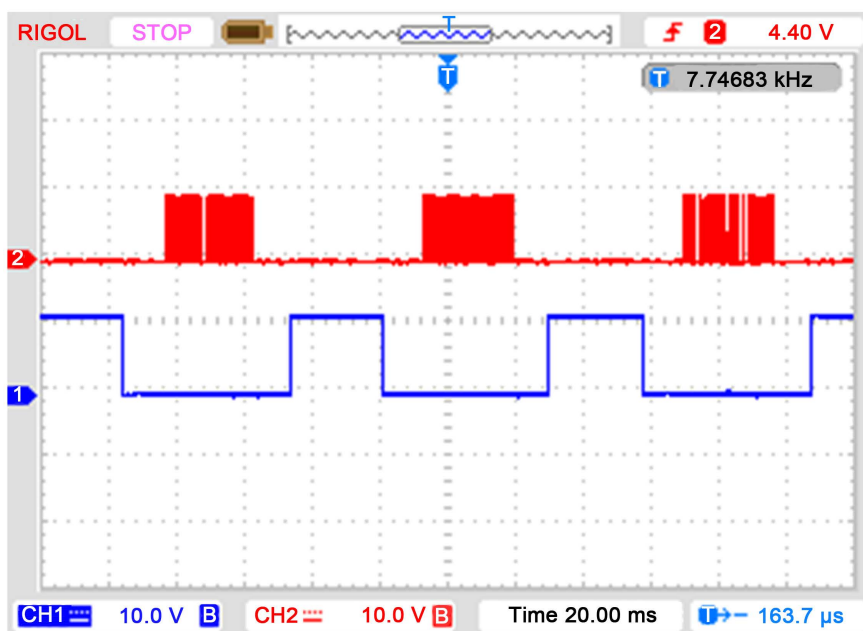
由仿真结果可以看出, 模型参考自适应 PI 控制算法能够保证当电机自身参数或者电机负载发生变化时, 闭环负反馈系统仍能够保持较好的控制性能。

7. 试验结果与分析(开环 + 闭环)

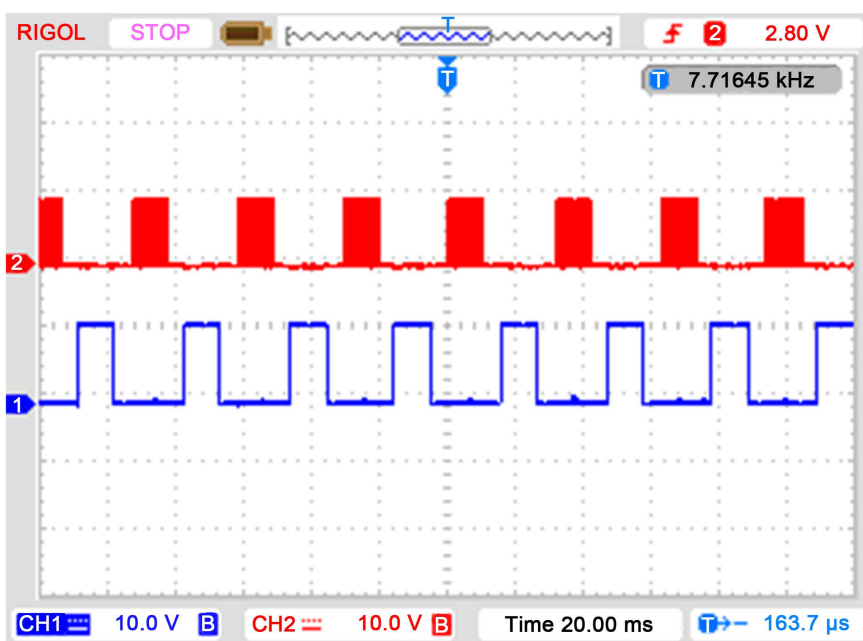
表 2 为试验所用三相无刷直流电机参数。

7.1. 开环试验结果

图 10 为电机开环调速试验时, 上桥 PWM 驱动信号占空比分别 10% 和 20% 的情况下, 示波器抓取的上、下桥 MOSFET 的驱动信号。



10% 占空比



20% 占空比

Figure 10. MOSFET drive signal waveform on open-loop control mode

图 10. 电机开环调速上、下桥 MOSFET 驱动信号波形

7.2. 闭环试验结果

图 11 为电机转速闭环控制响应曲线, 给定转速为 1000 rpm, 控制算法为模型参考自适应 PI 控制算法。在试验的过程中, 当电机的转速达到稳态后, 多次施加了负载扰动, 由试验结果可以看出, 当负载扰动出现时, 电机转速会发生小幅波动, 随后在控制算法的调节作用下, 最终达到稳态 1000 rpm, 从而验证了模型参考自适应 PI 控制算法的有效性, 也验证了这种基于 ARM + CPLD 的硬件架构的可靠性。

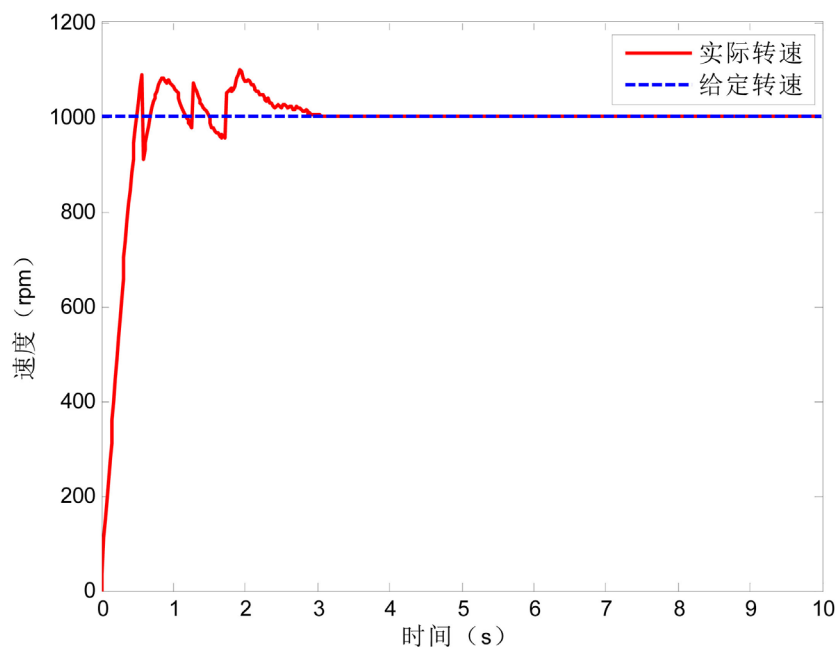


Figure 11. Speed response of motor closed-loop control

图 11. 电机转速闭环控制时的速度响应曲线

Table 2. Parameters list of motor

表 2. 电机参数列表

符号	参数	值
P_m	额定功率	110 W
V_m	额定电压	24 VDC
T_m	额定转矩	0.35 N·m
ω_m	额定转速	3000 rpm
p	极对数	4
R_{sp}	定子绕组电阻	0.85 Ω
T_c	转矩常数	0.11 N·m/A

8. 总结

本文详细介绍了一种基于 ARM + CPLD 的三相无刷直流电机模型参考自适应 PI 调速控制系统, 由 CPLD 实现换相与方波驱动、快速故障保护和电机转子机械转速实时测量功能, 由 ARM 实现模型参考自适应 PI 控制算法。双芯片联合控制实现电机精确的转速闭环控制, 充分发挥了硬件架构与模型参考自适应 PI 控制算法的优越性。

参考文献 (References)

- [1] 黄辉. 无刷直流电机控制关键技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [2] Liu, Y., Zhao, J., Xia, M.Z. and Luo, H. (2014) Model Reference Adaptive Control-Based Speed Control of Brushless DC Motors With Low-Resolution Hall-Effect Sensors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**, 1514-1522. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2262391>

-
- [3] 马瑞卿, 刘卫国. 无刷直流电动机控制中的几个技术问题分析[J]. 微电机, 2012, 45(5): 77-79.
- [4] 姜卫东, 廖玉茗, 王培侠, 王永生, 黄辉孔, 万敏. 减小无刷直流电机换相转矩波动和换相时间的协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2120-2131.
- [5] Tao, G. (2014) Multivariable Adaptive Control: A Survey. *Automatica*, **50**, 2737-2764.
<https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.10.015>
- [6] 唐立军, 桂欣, 贺慧勇, 吴定祥, 王哲, 李芑. 基于 ARM+CPLD 的无刷直流电机控制系统[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(3): 77-85.
- [7] 陈炜, 刘志博, 刘凯, 夏长亮, 耿强. 低速下无刷直流电机三相电压矢量位置检测方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 134-139.
- [8] Baby, B.K. and Geroge, S. (2012) Effects of Approximating Back Emf of a Brushless DC Motor from Trapezoidal to Sinusoidal. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, Bengaluru, 16-19 December 2012, INSPEC Accession Number: 13400164.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-677X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: dsc@hanspub.org