

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202003034



# 无刷直流电机 DSP 逻辑控制程序的 Petri 网设计方法

詹瑜坤<sup>1,2</sup>, 孙佳伟<sup>1</sup>, 罗继亮<sup>1,2</sup>, 郑力新<sup>3</sup>, 张兵<sup>4</sup>

- (1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 华侨大学 福建省电机控制与系统优化调度工程研究中心, 福建 厦门 361021;  
3. 华侨大学 工学院, 福建 泉州 362021;  
4. 南阳农业职业学院 机电工程系, 河南 南阳 473000)

**摘要:** 提出一种无刷直流(BLDC)电机数字信号处理(DSP)逻辑控制程序的 Petri 网设计方法. 首先, 建立霍尔传感器和电机旋转方向的 Petri 网模型; 其次, 利用功率管(MOSFET)二二切换规则, 设计功率管通断的变迁, 获得电机的逻辑控制 Petri 网模型, 并根据 Petri 网可达图算法, 计算无刷直流电机动态系统的状态集合, 并利用换相逻辑逐个验证; 最后, 借助 Petri 网变迁的激发规则, 设计无刷直流电机 DSP 逻辑控制程序, 并对文中方法进行实验验证. 结果表明: 文中方法能够保证控制程序的正确性和可靠性, 可以有效地简化无刷直流电机 DSP 逻辑控制程序的调试过程.

**关键词:** Petri 网; 无刷直流电机; 数字信号处理; 逻辑控制程序

**中图分类号:** TP 273.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2020)06-0816-08

## Design Method of DSP Logic Control Programs for Brushless Direct Current Motors Using Petri Nets

ZHAN Yukun<sup>1,2</sup>, SUN Jiawei<sup>1</sup>, LUO Jiliang<sup>1,2</sup>,  
ZHENG Lixin<sup>3</sup>, ZHANG Bing<sup>4</sup>

- (1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule,  
Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
3. Engineering Institute, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;  
4. Department of Electromechanical Engineering, Nanyang Vocational College of Agriculture, Nanyang 473000, China)

**Abstract:** A method is proposed by Petri nets for designing digital signal processing (DSP) logic control programs for brushless direct current (BLDC) motors. Firstly, the Petri net models are constructed for the Hall sensors and rotation direction of motor. Secondly, using the two-two switching rule of metal-oxide-semiconductor field effect transistor (MOSFET), the transitions between MOSFET on-off states are designed such that the logic control Petri net model of motor is obtained. Thereafter, the states of the dynamic system of BLDC motor are all calculated via the Petri nets reachable graph algorithm, and verified one by one with the commutation logic. Finally, the DSP control program for a BLDC motor is obtained with the excitation rules of

Petri net transitions, and the proposed method is verified by experiment. The results show that the proposed method can ensure the correctness and reliability of control program, and can effectively simplify the debugging process of BLDC motor DSP logic control program.

**Keywords:** Petri nets; brushless direct current motor; digital signal processing; logic control programs

电机等设备的逻辑控制程序需要人工反复调试和检测,非常费时、费力<sup>[1]</sup>,而且难以避免程序中的逻辑错误,例如,英国希思罗机场行李分拣系统事故<sup>[2]</sup>. 因此,需要研究逻辑控制程序的形式化设计方法,从而有效地减少控制程序设计和调试的时间,节约人力成本<sup>[3-4]</sup>.

Petri 网是一种描述离散事件系统的形式化语言,适合描述数字硬件电路,尤其是异步或自动定时电路. 文献[5]给出一种将 Petri 网翻译为布尔方程的方法,从而利用 Petri 网和布尔代数设计逻辑控制器. 文献[6]利用 Petri 网及其关联矩阵,给出现场可编程门阵列(FPGA)逻辑控制器的设计方法. 文献[7-8]给出基于 Petri 网的可编程逻辑控制器(PLC)程序设计方法. 文献[9-10]提出基于输入输出 Petri 网的无刷直流电机 FPGA 逻辑控制程序的设计方法,将噪音滤波器、正交解码器、脉冲宽度调制(PWM)生成器和无刷直流电机换相管理器描述为 Petri 网结点,利用网结构刻画各功能模块的复杂关系,确保逻辑的正确性和可靠性,并利用 Petri 网设计电机的超高速硬件描述语言(VHDL)控制程序. 基于普通 Petri 网,本文提出一种无刷直流(BLDC)电机数字信号处理(DSP)逻辑控制程序的设计方法.

# 1 基本概念

普通 Petri 网是一个三元组  $N=(P,T,F)$ ,  $P$  为库所集,  $T$  为变迁集,  $F$  为库所和变迁之间有向弧的集合. 设  $m(p)$  为库所内的托肯数;  $m_0$  为初始标识;  $\bullet t$  为变迁  $t$  的所有输入库所集;  $t\bullet$  为变迁  $t$  的所有输出库所集. 如果  $\forall p_i \in \bullet t$ , 当  $m(p_i) \geq 1$  时, 标识  $m$  下变迁  $t$  是使能的; 如果  $t$  激发, 则托肯从输入库所跃迁到输出库所, 得到后继标识  $m'$ .

可达图以有向图的形式描述 Petri 网的动态行为, 每个结点表示 Petri 网的一个可达标识, 结点之间用一条有变迁标记的有向弧相连, 它描述了弧的终点标识是由弧的起点标识通过激发该变迁得到的. 可达图生成算法是根据 Petri 网的激发规则计算其可达图的计算方法<sup>[11]</sup>, 主要有以下 4 个步骤.

- 步骤 1 将初始标识  $m_0$  标记为一个新结点.
- 步骤 2 任意选择一个新结点  $m$ , 激发  $m$  对应标识下每个使能的变迁  $t$ , 如果生成的标识  $m'$  在可达图中没有出现过, 则将  $m'$  标记为一个新结点, 并画一条从  $m$  到  $m'$  的有向弧, 该弧上标记变迁  $t$ .
- 步骤 3 将结点  $m$  标记为旧结点.
- 步骤 4 如果可达图中存在新结点, 任意选择一个新结点, 记作  $m$ , 执行步骤 2; 否则, 算法退出, 输出可达图.

无刷直流电机驱动电路, 如图 1 所示. 图 1 中:  $VT_1 \sim VT_6$  为功率管;  $D_1 \sim D_6$  为二极管;  $AA', BB', CC'$  为无刷直流电机定子的三相电枢绕组. 无刷直流电机的驱动电路主要由 6 组功率管构成, 功率管根据两两导通(表 1)的规则控制通断, 通过霍尔传感器检测转子位置, 控制器处理位置信号, 输出换相信息, 驱动逆变电路 3 个桥臂上的功率管  $VT_1 \sim VT_6$ <sup>[12-15]</sup>.

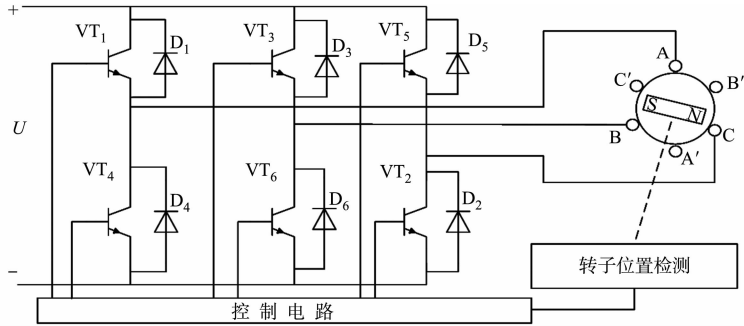


图 1 无刷直流电机驱动电路  
Fig. 1 BLDC motor drive circuit

表 1 霍尔状态与换相关系(两两导通)

Tab.1 Relations of Hall sensor and commutation (two-two conduction)

霍尔信号输出			霍尔 状态	开关管工作状态(正转)						开关管工作状态(反转)					
$H_1$	$H_2$	$H_3$		VT <sub>1</sub>	VT <sub>2</sub>	VT <sub>3</sub>	VT <sub>4</sub>	VT <sub>5</sub>	VT <sub>6</sub>	VT <sub>1</sub>	VT <sub>2</sub>	VT <sub>3</sub>	VT <sub>4</sub>	VT <sub>5</sub>	VT <sub>6</sub>
1	0	1	5	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
0	0	1	1	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
0	1	1	3	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
0	1	0	2	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
1	1	0	6	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
1	0	0	4	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF

2 无刷直流电机逻辑驱动电路的 Petri 网建模方法

无刷直流电机逻辑驱动电路的 Petri 网建模包括两个部分:一是建立无刷直流电机驱动电路的被控 Petri 网模型;二是建立控制电路的 Petri 网模型. 建立无刷直流电机驱动电路的被控 Petri 网模型是为建立控制 Petri 网切换提供前提条件.

**算法 1** 无刷直流电机驱动电路的被控 Petri 网模型设计方法.

输入:霍尔信号  $H_i(1\leq i\leq 3)$ ;电机旋转方向控制变量  $D$

输出:驱动电路的被控 Petri 网模型  $N_p=((P_p,T_p,F_p),m_0)$

```
1:  $P_p=\varnothing, T_p=\varnothing, F_p=\varnothing$ 
2: for all  $H_i$  do
3:   if  $(p_{H_i}^0\notin P_p\wedge t_{H_i}^-\notin T_p)$  then
4:      $P_p=P_p\cup\{p_{H_i}^1,p_{H_i}^0\}; T_p=T_p\cup\{t_{H_i}^+,t_{H_i}^-\};$ 
        $F_p=F_p\cup\{(\langle p_{H_i}^0,t_{H_i}^+\rangle),(\langle t_{H_i}^+,p_{H_i}^1\rangle),(\langle p_{H_i}^1,t_{H_i}^-\rangle),(\langle t_{H_i}^-,p_{H_i}^0\rangle)\};$ 
        $m_0(p_{H_i}^1)=0,m_0(p_{H_i}^0)=1;$ 
5:   end if
6: end for
7: for  $D$  do
8:   if  $(p_D^0\notin P_p\wedge t_D^-\notin T_p)$  then
9:      $P_p=P_p\cup\{p_D^1,p_D^0\}; T_p=T_p\cup\{t_D^+,t_D^-\};$ 
        $F_p=F_p\cup\{(\langle p_D^0,t_D^+\rangle),(\langle t_D^+,p_D^1\rangle),(\langle p_D^1,t_D^-\rangle),(\langle t_D^-,p_D^0\rangle)\};$ 
        $m_0(p_D^1)=0,m_0(p_D^0)=1;$ 
10:  end if
11: end for
```

霍尔传感器和电机旋转方向控制变量的 Petri 网模型,如图 2 所示.

根据算法 1,设计驱动电路的被控 Petri 网模型. 将每个霍尔传感器描述为 2 个库所和 2 个变迁组成的环,用一对库所  $p_{H_i}^1$  和  $p_{H_i}^0$  分别描述霍尔传感器的高电平信号和低电平信号,用一对变迁  $t_{H_i}^+$  和  $t_{H_i}^-$  分别描述霍尔传感器由低电平向高电平切换和霍尔传感器由高电平向低电平切换,如图 2(a)所示.

相似地,将电机旋转方向控制输入描述为 2 个库所和 2 个变迁组成的环,用一对库所  $p_D^1$  和  $p_D^0$  分别描述电机的正转和反转,用一对变迁  $t_D^+$  和  $t_D^-$  分别描述电机由反转向正转切换和电机由正转向反转切换,如图 2(b)所示. 在获得被控 Pe-

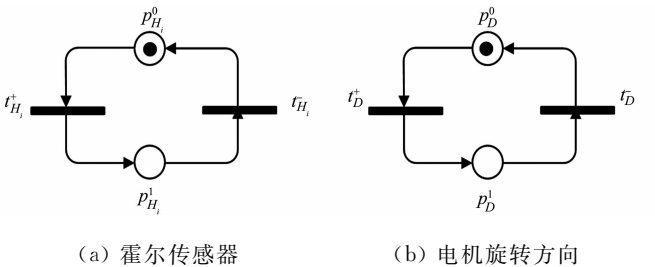


图 2 霍尔传感器和电机旋转方向控制变量的 Petri 网模型

Fig.2 Petri net models of Hall sensors and control variables of motor rotation direction

tri 网模型后,便可将功率管通断切换的规则集成到 Petri 网模型中,为后续模型验证奠定基础。

算法 1 的输入变量包括 3 个霍尔传感器和 1 个电机旋转方向变量,为每个输入变量设计 2 个库所和 2 个变迁结点,总计 8 个库所和 8 个变迁结点,因此,其时间复杂性是输入变量个数的多项式,即其复杂性是多项式级的。

**算法 2** 驱动电路的控制 Petri 网模型设计方法。

输入:被控对象的 Petri 网模型  $N_p=((P_p,T_p,F_p),m_0)$  和逆变电路两两导通切换规则

输出:驱动电路的控制 Petri 网模型  $N_c=((P_c,T_c,F_c),m_0),1\leq i\leq 6$

```
1:  $P_c=P_p, T_c=T_p, F_c=F_p$ 
2: for all  $VT_i$  do
3:   建立库所  $p_{VT_i}^0, P_c=P_c\cup\{p_{VT_i}^0, p_{VT_i}^1\}$ ;
    $m_0(p_{VT_i}^0)=1, m_0(p_{VT_i}^1)=0$ ;
4:    $T_c=T_c\cup\{t_{VT_i}^+, t_{VT_i}^-\}$ ;
5:    $F_c=F_c\cup\left\{\begin{aligned} & (p_{VT_i}^0, t_{VT_i}^+), (p_{H_i}^1, t_{VT_i}^+), (p_{H_i}^0, t_{VT_i}^+), (p_D^1, t_{VT_i}^+), (p_D^0, t_{VT_i}^+), (t_{VT_i}^+, p_{VT_i}^1) \\ & (p_{VT_i}^1, t_{VT_i}^-), (p_{H_i}^1, t_{VT_i}^-), (p_{H_i}^0, t_{VT_i}^-), (p_D^1, t_{VT_i}^-), (p_D^0, t_{VT_i}^-), (t_{VT_i}^-, p_{VT_i}^0) \end{aligned}\right\}$ ;
6: end for
```

算法 2 分为 3 个部分:一是设计表示功率管导通和关断的库所(步骤 3);二是在被控 Petri 网基础上增加功率管导通和关断的变迁集合(步骤 4);三是增加功率管导通和关断的有向弧集合(步骤 5)。用一对库所  $p_{VT_i}^1$  和  $p_{VT_i}^0$  分别描述功率管的导通状态和关断状态;将功率管的换向逻辑表达式形式化为析取范式,将其中每个合取逻辑描述为一个变迁,变迁的输入对应合取逻辑表达式中逻辑变量对应的库所结点;变迁的输出为功率管对应的导通或关断库所结点;变迁的激发规则为功率管的导通或关断条件。

以功率管  $VT_3$  为例,根据算法 2,设计其控制 Petri 网模型,变迁的输入为  $p_{H_1}^1, p_{H_1}^0, p_{H_2}^1, p_{H_2}^0, p_{H_3}^1, p_{H_3}^0, p_D^1$  和  $p_D^0$ ,输出为  $p_{VT_3}^1$  和  $p_{VT_3}^0, VT_3$  在 4 个变迁条件下是导通的,在 6 个变迁条件下是关断的。功率管  $VT_3$  的控制 Petri 网模型,如图 3 所示。图 3 中: $t_{VT_3}^+, t_{VT_3}^-$  分别为导通变迁和关断变迁。

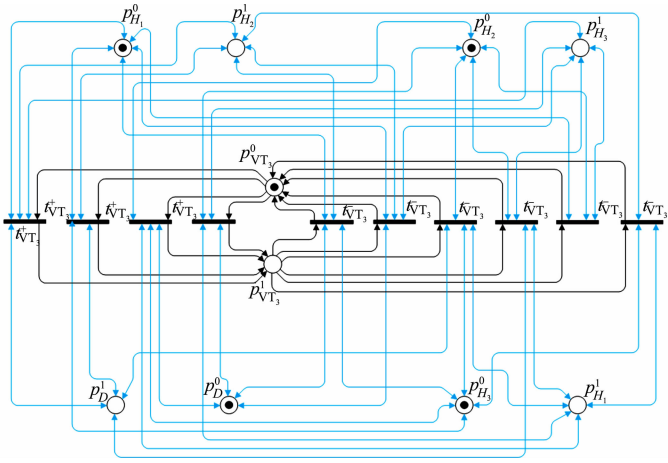


图 3 功率管  $VT_3$  的控制 Petri 网模型  
Fig. 3 Controlled Petri net model of MOSFET  $VT_3$

在驱动电路中,功率管是控制电流通断的执行器件,算法 2 设计了功率管通断逻辑的 Petri 网模型,以描述驱动电路的控制执行逻辑。算法 2 具有 6 个功率管输入变量,为每个功率管设计了 2 个库所和 10 个变迁,因此,如果  $n$  表示输入变量的个数,那么,算法 2 的时间复杂性是  $12n$ ,即算法 2 具有多项式级的时间复杂性。

**3 基于可达图的分析 and 验证**

在获得驱动电路的控制 Petri 网模型后,定义输入变迁和输出变迁的激发规则,生成的状态可达图可以完整地呈现程序运行过程中的状态迁移。

根据控制 Petri 网模型(图 3),通过可达图算法,得到无刷直流电机的控制 Petri 网可达图,如图 4 所示.图 4 中:每个状态表示一个向量,即

$$\begin{aligned} \boldsymbol{m} = & (m(p_{H_1}^0), m(p_{H_1}^1), m(p_{H_2}^0), m(p_{H_2}^1), m(p_{H_3}^0), m(p_{H_3}^1), m(p_D^0), m(p_D^1), \\ & m(p_{VT_1}^0), m(p_{VT_1}^1), m(p_{VT_2}^0), m(p_{VT_2}^1), m(p_{VT_3}^0), m(p_{VT_3}^1), m(p_{VT_4}^0), m(p_{VT_4}^1), \\ & m(p_{VT_5}^0), m(p_{VT_5}^1), m(p_{VT_6}^0), m(p_{VT_6}^1))^T. \end{aligned}$$

上式中:当  $m(p_{H_i}^0)$  为 1,  $m(p_{H_i}^1)$  为 0 时,表示霍尔传感器为低电平信号;当  $m(p_{H_i}^0)$  为 0,  $m(p_{H_i}^1)$  为 1 时,表示霍尔传感器为高电平信号;当  $m(p_D^0)$  为 1,  $m(p_D^1)$  为 0 时,表示电机反转;当  $m(p_D^0)$  为 0,  $m(p_D^1)$  为 1 时,表示电机正转;当  $m(p_{VT_i}^0)$  为 1,  $m(p_{VT_i}^1)$  为 0 时,表示功率管的关断状态;当  $m(p_{VT_i}^0)$  为 0,  $m(p_{VT_i}^1)$  为 1 时,表示功率管的导通状态.

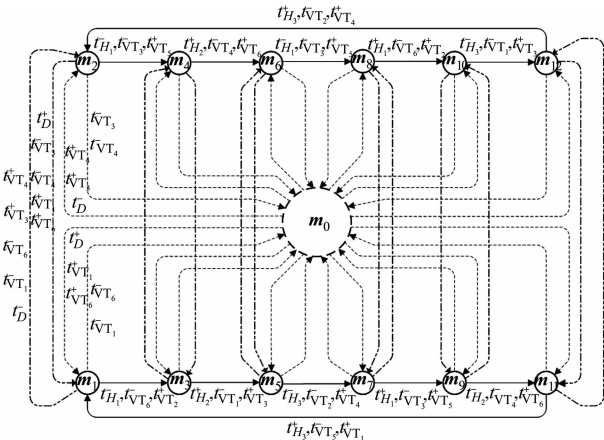


图 4 直流无刷电机的控制 Petri 网可达图

Fig. 4 Reachable graph of BLDC motor control Petri nets

计算控制 Petri 网的可达图,  $\boldsymbol{m}_0$  为初始状态,默认全部信号为低电平或关断状态,即  $\boldsymbol{m}_0 = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0)^T$ . 可达图中关键结点表示的状态,如表 2 所示.  $\boldsymbol{m}_0$  经由变迁  $t_D^+$  激发进入正转过程,旋转顺序为  $\boldsymbol{m}_1 \rightarrow \boldsymbol{m}_3 \rightarrow \boldsymbol{m}_5 \rightarrow \boldsymbol{m}_7 \rightarrow \boldsymbol{m}_9 \rightarrow \boldsymbol{m}_{11}$ ;  $\boldsymbol{m}_0$  经过变迁  $t_D^-$  激发进入反转过程,旋转顺序为  $\boldsymbol{m}_2 \rightarrow \boldsymbol{m}_4 \rightarrow \boldsymbol{m}_6 \rightarrow \boldsymbol{m}_8 \rightarrow \boldsymbol{m}_{10} \rightarrow \boldsymbol{m}_{12}$ .

表 2 可达图中关键结点表示的状态

Tab. 2 Status represented by key nodes in reachable graph

关键结点	状态	关键结点	状态
$\boldsymbol{m}_0$	$(1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0)^T$	$\boldsymbol{m}_7$	$(1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0)^T$
$\boldsymbol{m}_1$	$(0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1)^T$	$\boldsymbol{m}_8$	$(0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1)^T$
$\boldsymbol{m}_2$	$(0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0)^T$	$\boldsymbol{m}_9$	$(0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0)^T$
$\boldsymbol{m}_3$	$(1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0)^T$	$\boldsymbol{m}_{10}$	$(0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0)^T$
$\boldsymbol{m}_4$	$(0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0)^T$	$\boldsymbol{m}_{11}$	$(0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1)^T$
$\boldsymbol{m}_5$	$(1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0)^T$	$\boldsymbol{m}_{12}$	$(0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0)^T$
$\boldsymbol{m}_6$	$(0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1)^T$		

为了使可达图更加简洁明了,对其他结点(图 4)进行隐藏.如实线有向弧所示,在电机正转(反转)过程中的状态切换时,隐藏了 3 个中间状态,例如,从状态  $\boldsymbol{m}_1$  到状态  $\boldsymbol{m}_3$  的切换过程中,隐藏了 3 个中间状态,这样的状态切换有 12 个,因此,电机正转或反转过程共隐藏了 36 个中间状态.如虚线有向弧所示,电机启动隐藏了 3 个中间状态,电机关断隐藏了 2 个中间状态,启动和关断各有 12 种可能,因此,电机启动和关断共隐藏了 60 个中间状态.如点划线有向弧所示,电机正、反转切换隐藏了 40 个中间状态,这样的切换共有 12 种可能,因此,电机正、反转切换共隐藏了 480 个中间状态.

在计算可达图时,涉及 9 个变量,包括 3 个霍尔传感器  $H_i$ 、1 个电机旋转方向控制变量  $D$  和 6 个功率管  $VT_i$ . 可达图状态随着变量个数快速增长,其状态结点数达到 589 个.

根据 Petri 网可达图,计算无刷直流电机动态系统的状态集合,并根据换向逻辑将信号逐个代入逻辑表达式,验证是否符合规范,若不符合,则重新设计系统的 Petri 网模型.

4 基于 Petri 网的电机驱动 DSP 逻辑控制程序的设计

根据无刷直流电机驱动电路的 Petri 网模型设计无刷直流电机的 DSP 逻辑控制程序.

**步骤 1** 借助每个霍尔传感器的 Petri 网, 根据其库所名称  $p_b^1$  和  $p_b^0$ , 在 DSP 控制程序中, 定义该传感器对应的输入变量为  $H_i$ .

**步骤 2** 借助转向控制变量的 Petri 网, 根据其库所名称  $p_D^1$  和  $p_D^0$ , 在 DSP 控制程序中, 定义电机旋转方向控制对应的输入变量为  $D$ .

**步骤 3** 借助功率管变量的 Petri 网, 根据其库所名称  $p_{VT_i}^1$  和  $p_{VT_i}^0$ , 在 DSP 控制程序中, 定义该功率管对应的输入变量为  $VT_i$ .

**步骤 4** 借助每个功率管的 Petri 网, 根据每个变迁的执行逻辑, 设计无刷直流电机 DSP 逻辑控制程序, 编写功率管  $VT_i$  的赋值程序指令.

以功率管  $VT_3$  为例, 其 DSP 控制程序为  $VT_3 = ! VT_3 * (! H_1 * H_2 * H_3 D + ! H_1 * H_2 ! H_3 * D + H_1 * ! H_2 * ! H_3 ! D + H_1 * ! H_2 * H_3 ! D) + VT_3 * (! ! H_1 * ! H_2 * H_3 + H_1 * H_2 * ! H_3 + H_1 * ! H_2 * ! H_3 * D + H_1 * ! H_2 * H_3 * D + ! H_1 * H_2 * ! H_3 * ! D + ! H_1 * H_2 * H_3 * ! D)$ .

在  $VT_3$  的 DSP 控制程序中: 当  $VT_3$  为 0 时, 表示管子开始由关断切换到导通, 第一个括号中的布尔公式表示导通条件; 当电机正转,  $D$  为 1, 霍尔信号  $H_1 H_2 H_3$  为 011 和 010 时,  $VT_3$  是导通的; 当电机反转,  $D$  为 0, 霍尔信号  $H_1 H_2 H_3$  为 100 和 101 时,  $VT_3$  是导通的.

当  $VT_3$  为 1 时, 表示管子开始由导通切换到关断, 第二个括号中的布尔公式表示关断条件; 当电机正转时,  $D$  为 1, 当霍尔信号  $H_1 H_2 H_3$  为 100 和 101 时,  $VT_3$  是关断的; 当电机反转,  $D$  为 0, 霍尔信号  $H_1 H_2 H_3$  为 010 和 011 时,  $VT_3$  是关断的; 无论电机是正转还是反转, 当霍尔信号  $H_1 H_2 H_3$  为 001 和 110 时,  $VT_3$  都是关断的. 将控制程序与表 1 一一对应进行验证, 可证明控制逻辑是正确的.

5 实验分析

无刷直流电机转速控制实验装置, 如图 5 所示. 无刷直流电机 DSP 控制实验系统采用 TPR3003-3C 型电源(广东省深圳市安泰信电子公司); 无刷直流电机(江苏省南通市海安华洋机电有限公司)的额定电压为 24 V, 额定转速为  $1\,600\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ; F28335 型开发板、BLDC-V2 型驱动电路(江苏省南京研旭电气科技有限公司); ZDS2024PLUS 型示波器(广东省广州致远电子股份有限公司); TPS2024B 型示波器(上海市泰克科技(中国)有限公司).

将基于 Petri 网的无刷直流电机 DSP 逻辑控制程序下载到开发板, 完成开环正、反转和速度环正、反转实验. 供电电压为 24 V, 电机速度环正转转速为  $1\,600\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 反转转速为  $-1\,600\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ .

电机正、反转实验中的速度变化曲线, 如图 6 所示. 图 6 中:  $v$  为电机转速. 电机先正转, 然后, 再切换到反转, 多次正、反转切换.

当电机正转和反转时, 霍尔信号和功率管的电压( $U$ )变化曲线, 如图 7 所示. 图 7 中: PWM 信号表



图 5 无刷直流电机转速控制实验装置  
Fig. 5 BLDC motor experiment device  
of speed control

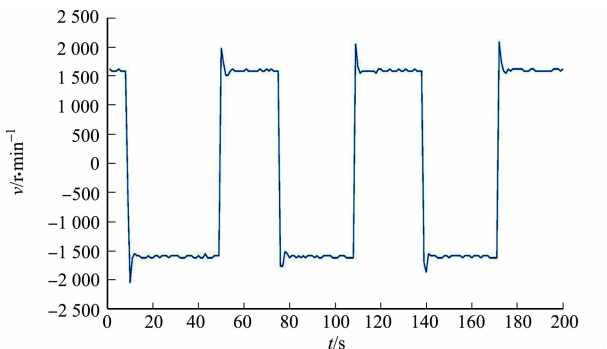


图 6 无刷直流电机正、反转实验中的速度变化曲线  
Fig. 6 BLDC motor speed change curve in  
positive and negative rotation experiment



示管子导通,高电平表示管子关断.当电机正转,霍尔信号为 101 时,管子  $VT_1$  和  $VT_6$  是导通的;当霍尔信号为 001 时,管子  $VT_1$  和  $VT_2$  是导通的;当霍尔信号为 011 时,管子  $VT_2$  和  $VT_3$  是导通的;当霍尔信号为 010 时,管子  $VT_3$  和  $VT_4$  是导通的;当霍尔信号为 110 时,管子  $VT_4$  和  $VT_5$  是导通的;当霍尔信号为 100 时,管子  $VT_5$  和  $VT_6$  是导通的.

当电机反转,霍尔信号为 101 时,管子  $VT_3$  和  $VT_4$  是导通的;当霍尔信号为 001 时,管子  $VT_4$  和  $VT_5$  是导通的;当霍尔信号为 011 时,管子  $VT_5$  和  $VT_6$  是导通的;当霍尔信号为 010 时,管子  $VT_1$  和  $VT_6$  是导通的;当霍尔信号为 110 时,管子  $VT_1$  和  $VT_2$  是导通的;当霍尔信号为 100 时,管子  $VT_2$  和  $VT_3$  是导通的.实验结果与表 1 相符.

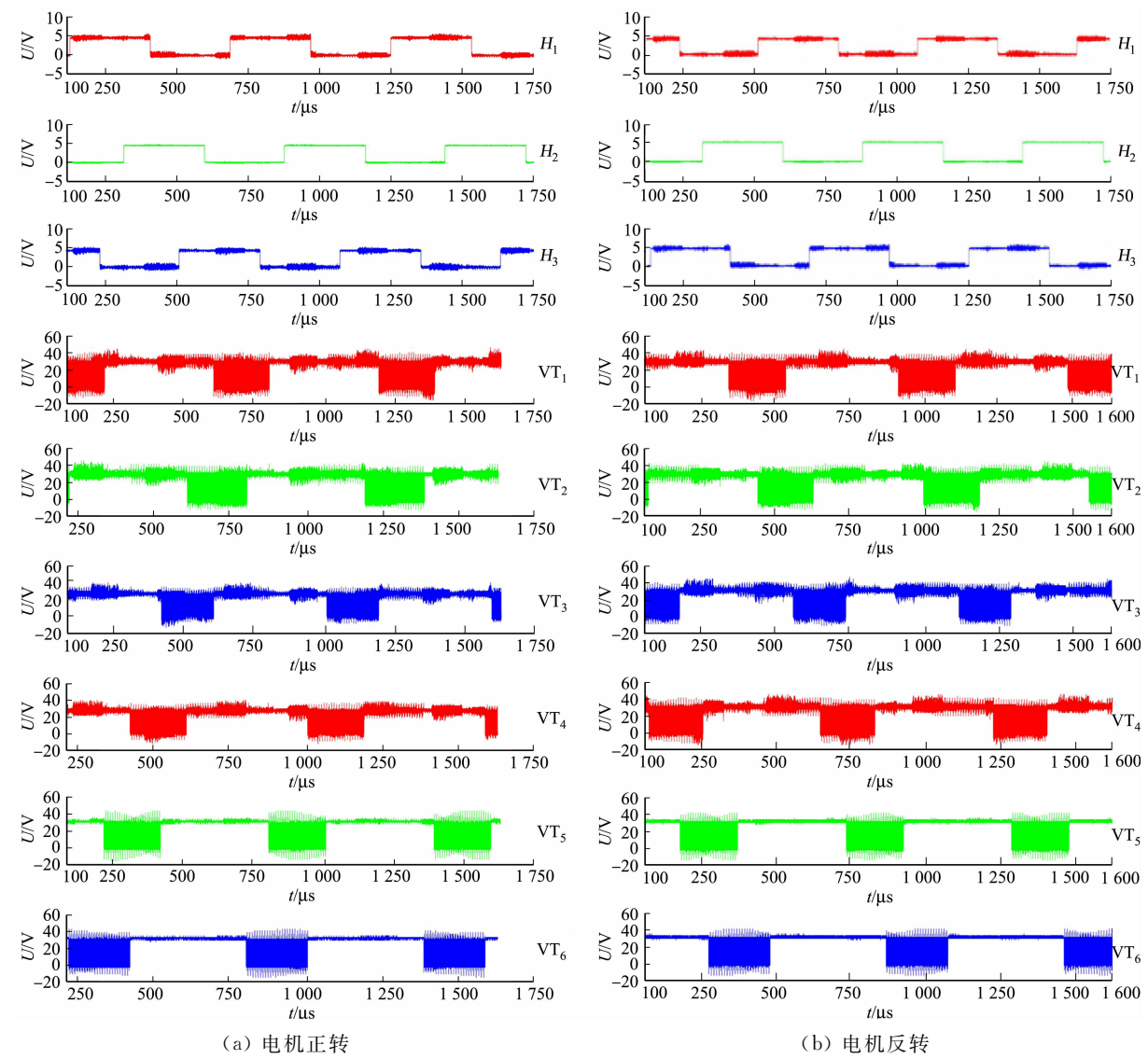


图 7 霍尔信号和功率管的电压变化曲线

Fig. 7 Change curves of Hall signals and MOSFET voltage

传统的无刷直流电机 DSP 逻辑控制程序的设计和调试比较繁琐,难以避免程序中的逻辑错误,而 Petri 网可克服现有技术的不足.首先,根据 Petri 网可达图,计算无刷直流电机动态系统的状态集合;然后,根据换向逻辑将信号逐个代入逻辑表达式,验证其是否符合规范,若不符合,则重新设计系统的 Petri 网模型.因此,通过 Petri 网先保证控制程序的逻辑正确性,再进行 DSP 程序的设计,无需反复测试.

6 结束语

设计无刷直流电机系统的控制 Petri 网模型,利用可达图验证模型表示的控制逻辑,根据 Petri 网设计 DSP 逻辑控制程序,并进行实验验证.

利用基本环状结构描述霍尔传感器和旋转方向控制变量,并按二二切换规则设计功率管库所状态切换变迁,获得无刷直流电机的控制 Petri 网模型;利用可达图算法对系统状态逐一验证,确保模型的正确性和可靠性;最后,给出 Petri 网转换为 DSP 程序的方法,并进行实验验证。相较于文献[9-10]的谓词 Petri 网,文中方法基于普通 Petri 网设计无刷直流电机的控制器,每个变量均描述为网络结点,具有更为严格的形式化语义,能够采用可达图算法进行严格的控制系统分析和验证。

## 参考文献:

- [1] FREY G, LITZ L. Formal methods in PLC programming[C]// IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Nashville: IEEE Press, 2000: 2431-2436. DOI: 10. 1109/ICSMC. 2000. 884356.
- [2] SWARTJE L, VANBEEK D A, FOKKINK W J, *et al.* Model-based design of supervisory controllers for baggage handling systems[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2017, 78(11): 28-50. DOI: 10. 1016/j. simpat. 2017. 08. 005.
- [3] YAKOVLEV A, KOELMANS A M. Petri nets and digital hardware design[M]. Berlin: Springer, 1998.
- [4] YAKOVLEV A, GOMES L, LAVAGNO L. Hardware design and Petri nets[M]. Norwell: Kluwer, 2000.
- [5] DIAZ-RODRIGUEZ M, LOPEZ-MELLADO E, BRAMERET P, *et al.* Translation from Petri nets to Boolean equations for the algebraic design of logic controllers[C]// IEEE International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control. Merida City: IEEE Press, 2011: 1-6. DOI: 10. 1109/ICEEE. 2011. 6106622.
- [6] SILVA C, QUINTANS C, COLMENAR A, *et al.* A method based on Petri nets and a matrix model to implement reconfigurable logic controllers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(10): 3544-3566. DOI: 10. 1109/TIE. 2009. 203894.
- [7] 罗继亮, 陈雪琨, 齐鹏飞, 等. 间歇式化工形式化建模与顺序控制器设计[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(12): 1896-1900. DOI: 10. 16183/j. cnki. jsjtu. 2012. 12. 004.
- [8] 倪会娟, 罗继亮. 采用普通 Petri 网的自动化立体仓库系统的 PLC 程序设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 146-150. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2014. 02. 0146.
- [9] PEREIRA F, GOMES L. FPGA based speed control of brushless DC motors using IOPT Petri net models[C]// IEEE International Conference on Industrial Technology. Cape Town: IEEE Press, 2013: 1011-1016.
- [10] PEREIRA F, GOMES L. The IOPT-flow modeling framework applied to power electronics controllers[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2017, 64(3): 2363-2372. DOI: 10. 1109/TIE. 2016. 2620101.
- [11] 大卫 R, 奥兰 H. 佩特利网和逻辑控制器图形表示工具(GRAFCET)[M]. 黄建文, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [12] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [13] 温嘉斌, 赵红阳, 刘子宁. 无刷直流电机神经网络 PI 控制系统设计[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(12): 50-52.
- [14] 杨婷婷, 张兰红, 王韧纲. 无刷直流电机直接转矩控制系统的相电流检测及处理[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(2): 87-94.
- [15] 王维强, 曾晓松, 夏茂树. 电动汽车永磁无刷直流电机控制器设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 20-25. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201808005.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 吴逢铁)