

文章编号: 1674-8085(2016)01-0085-07

基于 Matlab/Simulink 的无刷直流电机控制系统 建模与仿真

张 军, 时培成, 彭闪闪

(安徽工程大学机械与汽车工程学院, 安徽, 芜湖 241000)

摘 要: 从无刷直流电机的原理入手, 研究了基于脉宽调制 PWM 波的转速和电流双闭环无刷直流电机控制系统, 分析了该系统的各个模块并且用 MATLAB/SIMULINK 软件建立该控制系统的模型, 通过仿真得出无刷直流电机控制系统的电机转矩、转速的响应特性。

关键词: 无刷直流电机; 控制系统; MATLAB/SIMULINK 建模分析

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2016.01.017

MODELING AND SIMULATION OF BRUSH-LESS DC MOTOR CONTROL SYSTEM BASED ON MATLAB/SIMULINK

ZHANG Jun, SHI Pei-cheng, PENG Shan-shan

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: We mainly studies speed and current double closed-loop brush-less DC motor control system based on the PWM wave. With the principle of brush-less DC motor, we do analysis on the various modules of the system and use MATLAB / Simulink software to establish the model of the control system by computer simulation. The result shows no response characteristics of brush-less DC motor control system of torque and rotational speed.

Key words: brush-less DC motor; control system; MATLAB/SIMULINK modeling analysis

电动汽车的关键研究主要包括电机驱动控制技术、整车控制与管理、电池及其管理系统三大部分, 而电机驱动控制是纯电动汽车运行的核心, 其它两个是以电机驱动技术为中心展开研究的。电机驱动控制系统的动态响应特性直接影响纯电动汽车的整车性能, 因此通过建模仿真得出电机控制系统的转速和转矩响应特性, 再根据转速和转矩响应特性对驱动控制系统进行优化显得尤为重要。

1 无刷直流电机原理

在进行建模与仿真之前, 我们必须先了解无刷

直流电机的工作原理。无刷直流电机主要由电动机本体, 霍尔位置传感器和全桥逆变器(电子开关线路)三个部分组成。

电机本体包括永磁铁定子和转子, 定子绕组分为 A, B, C 三相, 每相相位差 120° , 采用星型连接^[1]。定子三相绕组分别与全桥逆变器中相应的功率逻辑开关器件连接。全桥逆变器的主要元器件是场效应晶体管(MOSFET)功率逻辑开关单元, 功率逻辑开关单元可以将电源功率以一定的逻辑分配关系分配给电机定子上的三相绕组, 以便电机产生持续不断的转矩。电机三相绕组与全桥逆变器连接方式如图 1 所示。

收稿日期: 2015-06-10; 修改日期: 2015-10-24

作者简介: *张 军(1990-), 男, 江苏泰州人, 硕士生, 主要从事电机控制方面的研究(E-mail:526867982@qq.com);

时培成(1976-), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士, 主要从事汽车系统动力学, 汽车振动分析和测试技术研究(E-mail:shipeicheng@ahpu.edu.com);

彭闪闪(1989-), 女, 安徽亳州人, 硕士生, 主要从事汽车电子方面的研究(E-mail:2091247400@qq.com).

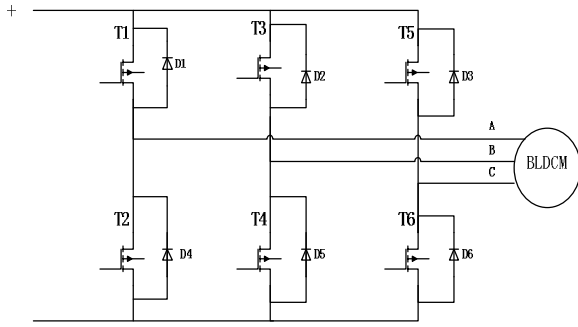


图1 电机三相绕组与全桥逆变器连接图

Fig.1 Connecting diagram of three-phase winding and full bridge converter

霍尔位置传感器的作用是检测转子磁极相对于定子绕组的位置信号。这样全桥逆变器中的功率逻辑开关与霍尔传感器配合就能够控制定子各相绕组通电的顺序，时刻和时间长短。实现与直流电机换向器一用的功能。无刷直流电机实物图如图2所示。

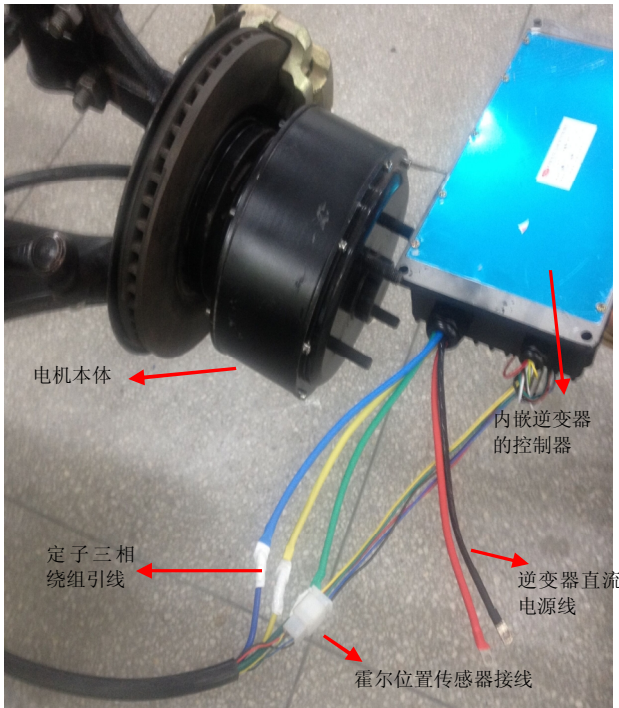


图2 无刷直流电机实物图

Fig.2 Brush-less DC motor physical map

2 无刷直流电机数学模型

忽略铁芯饱和及齿槽效应定子各项绕组、电感均相等，转子上无阻尼绕组，定子绕组感应电势为典型的 120° 梯形波。则A相绕组的电压方程为：

$$u_a = Ri_a + \frac{d\varphi_a}{dt} + u_n \quad (1)$$

其中A相绕组磁链

$$\varphi_a = \varphi_{am} + \varphi_{a\sigma} \quad (2)$$

φ_{am} 、 $\varphi_{a\sigma}$ 分别为A相的主磁链和漏磁链。

将(2)式代入(1)式得：

$$u_a = Ri_a + \frac{d(\varphi_{am} + \varphi_{a\sigma})}{dt} + u_n \quad (3)$$

其中A相绕组的漏磁链

$$\varphi_{a\sigma} = L_\sigma i_a \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式得：

$$u_a = Ri_a + \frac{d\varphi_{am}}{dt} + \frac{d(L_\sigma i_a)}{dt} + u_n = Ri_a + \frac{d\varphi_{am}}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} + L_\sigma \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_\sigma}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} + u_n \quad (5)$$

其中 $\frac{d\varphi_{am}}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$ 为A相绕组感应电动势 e_a ，转子

电角度 θ 关于时间的微分 $\frac{d\theta}{dt}$ 为转子电角速度 ω ，

所以(5)式可以整理为：

$$u_a = Ri_a + e_a + L_\sigma \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_\sigma}{d\theta} \omega + u_n \quad (6)$$

同理可得B,C相电压方程为：

$$u_b = Ri_b + e_b + L_\sigma \frac{di_b}{dt} + i_b \frac{dL_\sigma}{d\theta} \omega + u_n \quad (7)$$

$$u_c = Ri_c + e_c + L_\sigma \frac{di_c}{dt} + i_c \frac{dL_\sigma}{d\theta} \omega + u_n \quad (8)$$

上述各式中 u_a 、 u_b 、 u_c 分别为A、B、C三相绕组的端电压； i_a 、 i_b 、 i_c 分别为A、B、C三相绕组的相电流； φ_a 、 φ_{am} 、 $\varphi_{a\sigma}$ 为A相绕组磁链、主磁链、漏磁链； R 、 L_σ 为每相绕组的电阻和电感； e_a 、 e_b 、 e_c 为每相绕组感应电动势； ω 为转子电角速度； θ 为转子电角度； u_n 为定子绕组中性点电压^[2]； t 为时间常量。

对于梯形波感应电动势的直流无刷电机，其磁阻不随转子位置的变化而变化^[3]，即 $dL_\sigma/dt = 0$ ，所以式(6) - (8)可整理为：

$$u_a = Ri_a + e_a + L_\sigma \frac{di_a}{dt} + u_n \quad (9)$$

$$u_b = Ri_b + e_b + L_\sigma \frac{di_b}{dt} + u_n \quad (10)$$

$$u_c = Ri_c + e_c + L_\sigma \frac{di_c}{dt} + u_n \quad (11)$$

无刷直流电机的转矩方程为:

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega_m \quad (12)$$

无刷直流电机的运动方程为:

$$T_e = T_L + B\omega + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (13)$$

式(12)、式(13)中 ω_m 为转子机械角速度; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; B 为阻尼系数。

3 基于 Matlab/Simulink 无刷直流电机控制系统各模块模型的建立

3.1 PWM 模块

全桥逆变器中功率逻辑开关单元即图 1 中 T1-T6 六个场效应晶体管将直流电源功率以一定的逻辑关系分配给无刷直流电机定子三相绕组。本无刷直流电机控制系统采用脉宽调制 PWM 控制六个功率管的通断时间长短,从而实现控制无刷直流电机的转速。本控制系统是电流和转速双闭环的控制系统,即通过反馈电流和转速来控制 PWM 占空比来控制电机转速,这样仿真结果会更精确。

首先将电机反馈的角速度 ω 转化为转速 n ,它们之间的关系为:

$$n = \omega \frac{30}{\pi} \quad (14)$$

将 n 与指定转速相减并通过 PI 控制器得到一个参考电流 I_{ref} 。其次我们要通过霍尔位置传感器获得的转子电角度 θ 来判断当前时刻是哪一相是导通的,此功能主要是通过编 MATLAB 函数来实现的。代码如下:

```
function Iabc = fcn(Ia,Ib,Ic,theta)
if theta>=pi/2&&theta<5*pi/6Iabc=abs(Ia);
elseif theta>=pi/6&&theta<pi/2
```

```
Iabc=abs(Ib);
elseif theta>=5*pi/6&&theta<7*pi/6
Iabc=abs(Ic);
elseif theta>=2*pi/2&&theta<11*pi/6
Iabc=abs(Ia);
elseif theta>=7*pi/6&&theta<3*pi/2
Iabc=abs(Ib);
else
Iabc=abs(Ic);
end
```

最后将采集到的该相反馈相电流与 I_{ref} 作差,得到指定转速下所需要的电流,所需电流值通过 PI 控制器与三角波信号作差就得到了一个脉宽调制 PWM 波。自此,PWM 模块模型建立完毕,模型如图 3 所示。传统相电流检测的方法是通过判断转子电角度再通过 Simulink 模块中的选择开关模块输出参考相电流。采用选择开关检测相电流的模型如图 4 所示。通过图 4 可以看出本文 MATLAB Function 电流检测的方法简单方便而且 MATLAB Function 的执行效率显然更高。

3.2 全桥逆变器模块

全桥逆变器中同一时刻上下两个场效应管只有一个导通,且三条支路上只有两个晶体管导通,另一个场效应晶体管。这样就有六种情况分别为 T_1T_4 、 T_1T_6 、 T_1T_6 、 T_3T_2 、 T_3T_6 、 T_5T_2 、 T_5T_4 。PWM 模块产生的 PWM 波通入逆变器的六个场效应晶体管的栅极。这里列举一个晶体管来说明图 3 输出的 S 信号即 PWM 波与逆变器输出电压信号的关系。假设逆变器两端接的是直流电压 V_d ,当 PWM 输入栅极高电平时场效应晶体管 T_1 导通,电机定子绕组两端电压为 V_d ,持续时间为 t_1 , t_1 时间后,PWM 变为低电平,场效应晶体管 T_2 截止,电机定子绕组两端电压为零。 t_2 时间后,栅极输入重新变为高电平,场效应晶体管重复前面的动作,直至反馈过来的转速信号改变 PWM 的占空比。一个晶体管的原理如图 5 所示。PWM 波形和逆变器输出电压即电机定子绕组两端电压波形如图 6 所示。

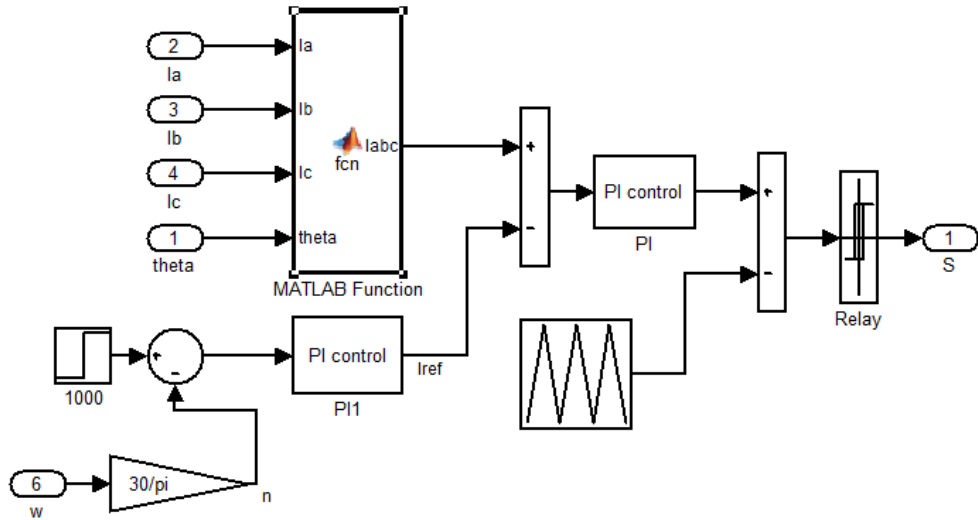


图3 PWM 模块模型

Fig.3 PWM module model

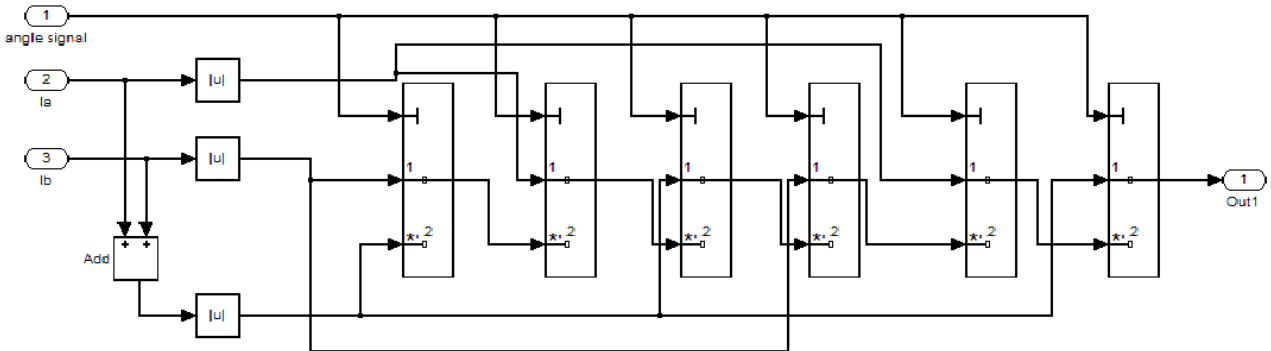


图4 采用选择开关的相电流检测模型

Fig.4 Phase current detection model using selective switch

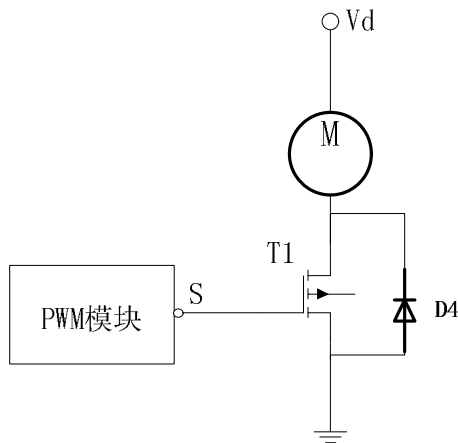


图5 原理图

Fig.5 Schematic diagram

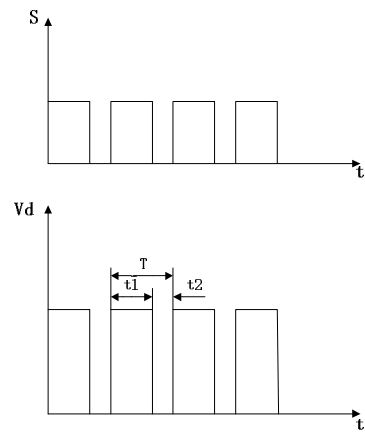


图6 输入 PWM 波和定子绕组电压

Fig.6 Input PWM wave and stator winding voltage

由图5可知逆变器输出到电子绕组两端的电压为:

$$U_a = \frac{t_1 V_d + 0}{t_1 + t_2} = \frac{t_1 V_d}{T} \quad (15)$$

其它场效应管与 T_1 一样, 只是要根据霍尔位置传感器检测到的转子电角度 θ 来判断通断 S 信号的时间。通过上面的分析, 全桥逆变器就可以通过编 MATLAB 函数来实现, 代码如下:

```
function [Uan,Ubn,Ucn] = fcn(theta,S,Vd)
if theta>=0&&theta<pi/3
Uan=S*Vd/2;
Ubn=Vd/2;
Ucn=-Vd/2;
elseif theta>=pi/3&&theta<2*pi/3
Uan=S*Vd/2;
Ubn=-Vd/2;
Ucn=Vd/2;
elseif theta>=2*pi/3&&theta<pi
Ubn=S*Vd/2;
Uan=-Vd/2;
Ucn=Vd/2;
elseif theta>=pi&&theta<4*pi/3
Ubn=S*Vd/2;
Uan=Vd/2;
Ucn=-Vd/2;
elseif theta>=4*pi/3&&theta<5*pi/3
Ucn=S*Vd/2;
Uan=Vd/2;
Ubn=-Vd/2;
else
Ucn=S*Vd/2;
Uan=-Vd/2;
Ubn=Vd/2;
End
```

逆变器模块如图 7 所示。而传统逆变器的模型如图 8 所示。通过图 7 与图 8 的对比,可以很容易看出传统的建模需要很多端口和接线,而且内部还要放很多子功能模块,是一个很繁琐的过程,而且在仿真过程中容易出现错误,而通过 MATLAB Function 达到了事半功倍的效果,而且执行的可靠性和效率都比传统建模的要高。

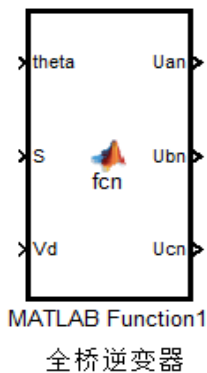


图 7 用 MATLAB Function 建立的全桥逆变器模型
Fig.7 MATLAB function full bridge converter

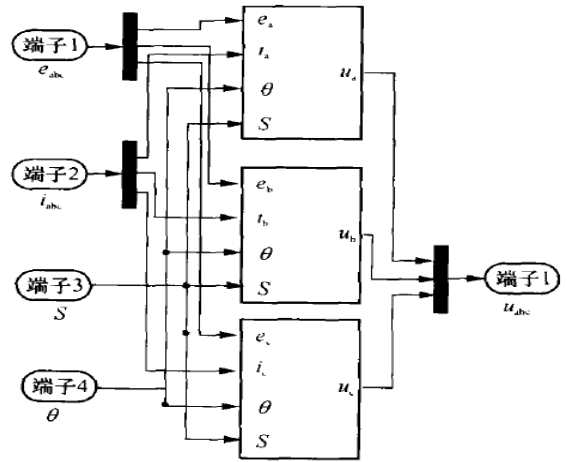


图 8 传统方法建立的全桥逆变器模型
Fig.8 Traditional converter model

3.3 电机本体模块

全桥逆变器模块建立完成以后,其输出电压给无刷直流电机的三相定子绕组。根据式(6)、(7)、(8)可以建立流经无刷直流电机三相绕组的电流的模型,模型如图 9 所示。

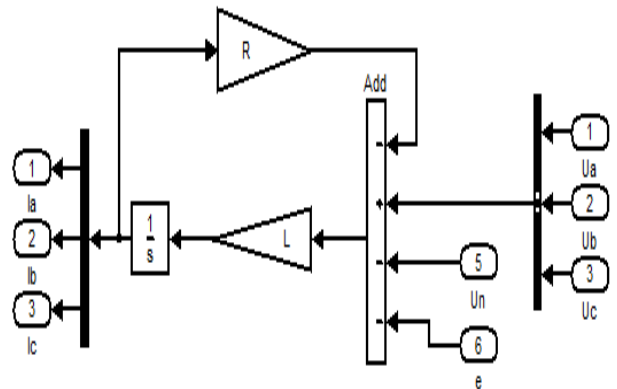


图 9 电机三相绕组电流子模块
Fig.9 Motor three-phase winding current sub module

文献[2]定子绕组中性点电压 U_n 满足下式:

$$U_n = \frac{u_a + u_b + u_c}{3} - \frac{e_a + e_b + e_c}{3} \quad (16)$$

对于 120° 的梯形波的三相定子绕组感应电动势,本文采用 Simulink 中的 Lookup Table^[4]模块实现,Lookup Table 实质是通过查表构造波形,将 $0 \sim 2\pi$ 内感应电动势的单位波形预先输入 Lookup Table 中,再乘上一个梯形波的幅值就得到了理想梯形波的感应电动势,感应电动势幅值:

$$e = K_e \omega \quad (17)$$

其中 K_e 为电动机感应电动势系数。 120° 梯形波感应电动势模型如图 10 所示。该方法同样根据式(13)

可以建立电机角速度 ω 的模型，模型如图 11 所示。

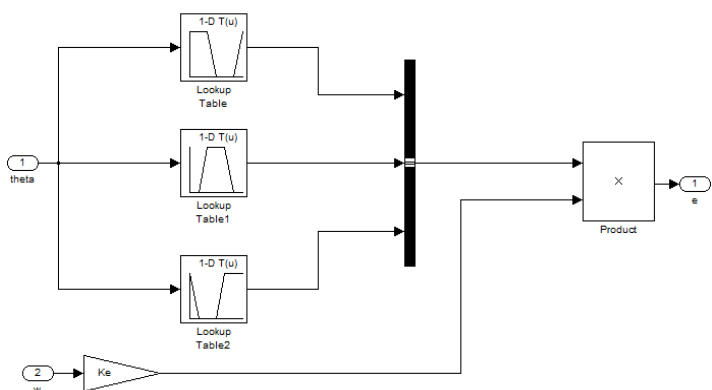


图 10 120° 梯形波感应电动势 e 子模块

Fig.10 120° sub module for trapezoidal wave induced electromotive force

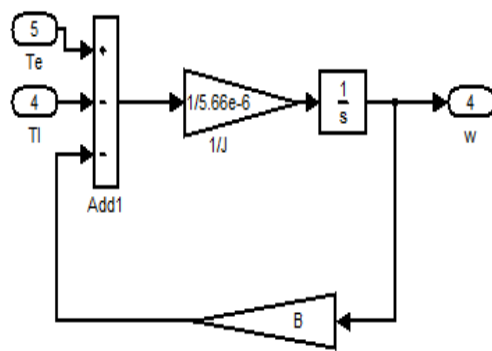


图 11 电机角速度 ω 子模块

Fig.11 Motor angular velocity sub module

根据式 (12)、(17) 可得：

$$T_e = K_e(i_a + i_b + i_c) = \frac{e}{\omega}(i_a + i_b + i_c) \quad (20)$$

所以该子模块就是将 120° 梯形波感应电动势图 10 中所所示的 ω 去掉即得到 e/ω ，然后再与图 9 中的 i_a ， i_b ， i_c 相乘求和就得到了电磁转矩 T_e 。

位置信号 θ 根据得到的电机角速度通过编写 S 函数来实现^[5]。

本控制系统最基础的部分无刷直流电机本体的模型建立完毕，无刷直流电机的模型如图 12 所示。图中 Sub-e 为图 10 所示的 120° 梯形波感应电动势 e 子模块，Sub-E/w 为 e/ω 输出子模块。至此无刷直流电机的三大模块，即 PWM 模块、逆变器模块和电机本体模块都建立完成，整个无刷直流电机控制系统模型如图 13 所示。

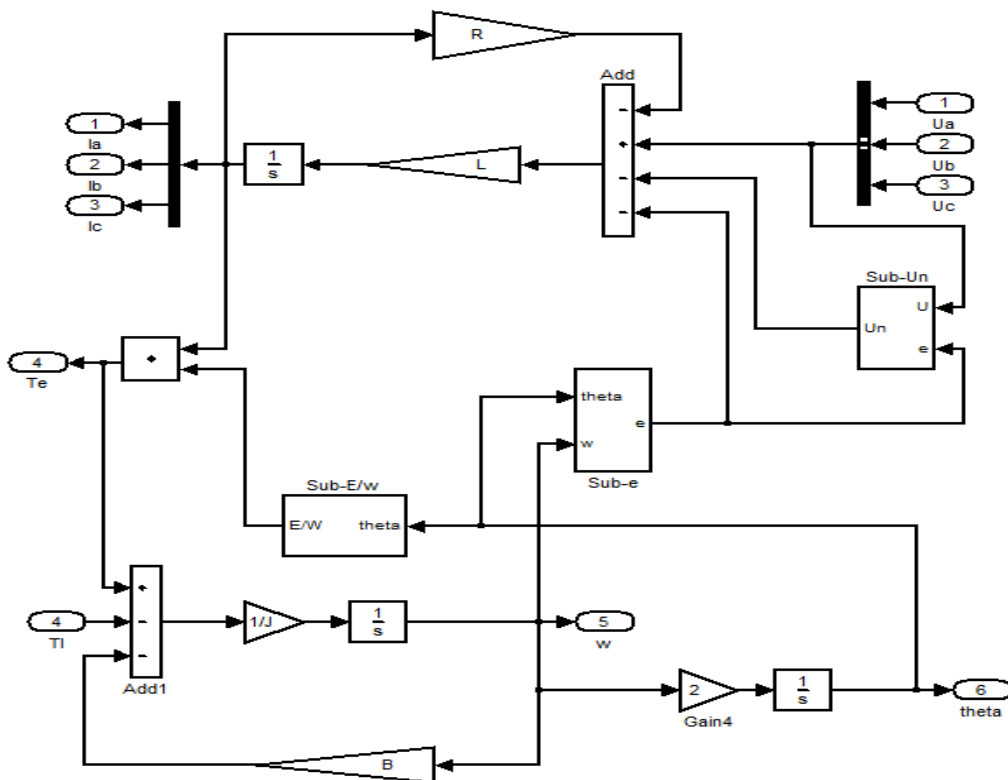


图 12 无刷直流电机模型

Fig.12 Brush-less DC motor model

受、人力紧缺、缺乏经济回报等,这与林乐平、彭伟霞等人的研究结果基本相同。针对这些困难,林乐平、彭伟霞、刘宇靖等人的研究提出在社区卫生服务中心可以通过政府加大财政投入、增加人员聘用、改善医务人员待遇、降低病人重复就医次数、在医保费用总量控制基础上提高均次费用上限、加大在居民中对临床预防服务的宣传等措施,以满足病人的基本医疗服务需求^[2,5-6]。我们也认为这些措施同样也可在乡镇医院应用。从长期的角度看,乡镇医院开展临床预防服务将成为主流,需要从人力、物力和财力方面加大投入,也需要与卫生及医保部门沟通进行政策调整,为乡镇医院开展临床预防服务提供支持。

受研究经费等因素的影响,本次调查只选择了吉安市所辖乡镇医院和社区卫生服务中心进行调查,可能存在一定的选择性偏倚。

参考文献:

- [1] 傅华,叶亭亭. 临床预防服务[M].2版.上海: 复旦大学出版社,2014:3-4.
- [2] 林乐平,滕斌,戴俊明,等. 社区全科医生临床预防服务技能及相关因素调查[J].上海预防医学杂志,2011,23(5): 244-246.
- [3] 中华人民共和国卫生部疾病控制司.慢性非传染性疾病预防医学诊疗规范[EB/OL]. <http://www.doc88.com/p-737498035889.html>, 2012.12.21.
- [4] 杨巧媛,王家骥,雷毅雄,等. 开展临床预防医学教育的实践与体会[J].实用全科医学,2008,6(5):491-492.
- [5] 彭伟霞,傅华,丁永明. 社区卫生服务中心开展临床预防服务影响因素的定性研究[J].中华全科医学,2011,9(1): 86-87.
- [6] 刘宇婧,赵亚利,杨珺,等. 北京市社区公共卫生服务项目及考核现况的定性访谈研究[J].中国全科医学,2010, 13(7):709-711.

(上接第 91 页)

参考文献:

- [1] 林瑞光.电机与拖动基础[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2013.
- [2] 谢志诚,李益华,林利红. 无刷直流电机双闭环控制系统的建模与仿真[J].电机技术,2010(2):26-30.
- [3] 张垒. 无刷直流电机控制系统的设计与研究[D]. 衡阳:

南华大学,2014.

- [4] 李延升,窦满峰,雷金莉. 对转式永磁无刷直流电机的建模与仿真[J].微电机,2011,4(44):19-22.
- [5] 朱剑波.无刷直流电机控制系统的仿真与分析[J].国外电子测量技术,2013,32(12):25-30.