

使用适用于 Simulink® 的 Microchip 电机模型库

作者: Jason Sachs
Microchip Technology Inc.

概述

Microchip 电机模型库是一个组件（“模块”）集，可与 MathWorks® 提供的 Simulink® 仿真工具配合使用。工程师可采用这些模块为具有永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）的系统建模，电机由 Microchip dsPIC® 数字信号控制器（Digital Signal Controller, DSC）等嵌入式单片机进行闭环控制。基于模型的工程技术有助于开发、测试和了解电机控制系统。仿真可用于确认实际系统的行为，也可以用于探究某些条件下的系统行为，而这些是无法或难以在实际系统中进行测试的。

Microchip 电机模型库专为在 MATLAB® 和 Simulink 环境下使用而设计。该库包含永磁同步电机（PMSM）的连续时间仿真模型。PMSM 模型旨在帮助工程师通过仿真来了解 PMSM 动力学特性，从而简化这类电机的控制环设计。

该库是 Microchip 携手奥地利林茨的林茨机电一体化中心（Linz Center of Mechatronics, LCM）开发的。

电机模型库安装

一般要求

MATLAB 和 Simulink 可在最新版本的 Microsoft® Windows®、Apple® Mac OS® X 和 Linux® 操作系统上运行。有关最新的系统要求，请参见“参考资料”部分。

使用该库时，要求 MATLAB 和 Simulink 为 R2012b 或更高版本。不需要使用其他工具箱。

我们建议用户在使用本电机模型库之前先熟悉一下 MATLAB 和 Simulink。MathWorks, Inc. 网站提供了相关信息和教程来帮助您快速入门。（见“参考资料”部分。）

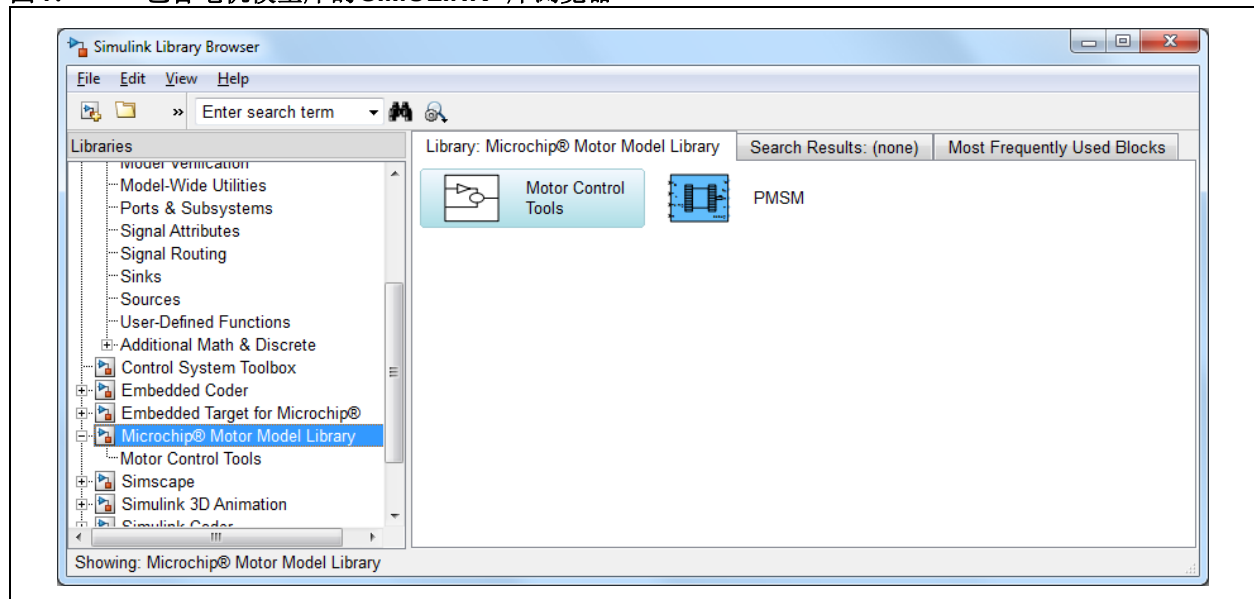
模型安装和初始化

库安装和内容

电机模型化工具包内含有一个归档文件 MicrochipMotorModelLibrary.zip，其中包含 Simulink 库文件和一些示例文件。

要使用该工具包，首先应将其解压缩到所选的目录下，然后将该目录添加到 MATLAB 搜索路径。完成此操作后，下次启动 MATLAB 时，电机模型库（图 1）将出现在 Simulink 库浏览器中。

图 1: 包含电机模型库的 SIMULINK® 库浏览器



AN1770

该库包含一个电机模型模块（PMSM，即基本线性永磁同步电机模型）以及一些用于参考变换的辅助模块。更多详细信息将在本应用笔记的后面部分介绍。

要在新建的 Simulink 模型中使用其中一个模块，首先应单击所需模块将其选中，然后单击右键并选择“Add to a new model (Ctrl-I)”（添加到新模型 (Ctrl-I)）。

要在现有 Simulink 模型中使用其中一个模块，首先应单击所需模块将其选中，然后将其拖放到模型中。

库模块

电机模型库包含以下模块（见表 1）：

表 1： 电机模型库模块

模块名称	说明
PMSM	永磁同步电机，基本线性模型。
abc-to-alpha	Clarke 变换：从三相测量值（abc 坐标）转换为双元素正交静止参考坐标系（ $\alpha\beta$ 坐标）。
abc-to-alpha0	Clarke 变换：从三相测量值（abc 坐标）转换为三元素正交静止参考坐标系（ $\alpha\beta 0$ 坐标）。
alpha-to-abc	Clarke 变换：从双元素正交静止参考坐标系（ $\alpha\beta$ 坐标）转换为三相测量值（abc 坐标）。该模块有时称为 Clarke 反变换。（Park 和 Clarke 变换最初仅用于分析，也就是将测得的相电压和相电流转换为不可测量的同步参考坐标系。随着磁场定向电机控制的出现，现在也会使用反变换来将同步参考坐标系转换回三相测量值。）
alpha-to-dq	Park 变换：从双元素正交静止参考坐标系（ $\alpha\beta$ 坐标）转换为旋转参考坐标系（dq 坐标）。
alpha0-to-abc	Clarke 变换：从三元素正交静止参考坐标系（ $\alpha\beta 0$ 坐标）转换为三相测量值（abc 坐标）。
cstheta	给定输入角 θ (theta)，计算用于 Park 变换模块的双元素向量 $[\cos\theta \sin\theta]$ 。
dq-to-alpha	Park 变换：从旋转参考坐标系（dq 坐标）转换为双元素正交静止参考坐标系（ $\alpha\beta$ 坐标）。该模块有时称为 Park 反变换。
vector mixer	（也称为叉积。）给定两个输入 A 和 B（每个输入都是双元素向量），将输入视为复数并通过可选的共轭计算乘积。该模块在 Park 变换模块中用于旋转向量，也可以在锁相环（Phase-Locked Loop, PLL）中用于正交调制/解调。

初始化库参数

库中的PMSM模块具有一些需要适当设置的屏蔽参数。
表2对这些参数进行了说明。

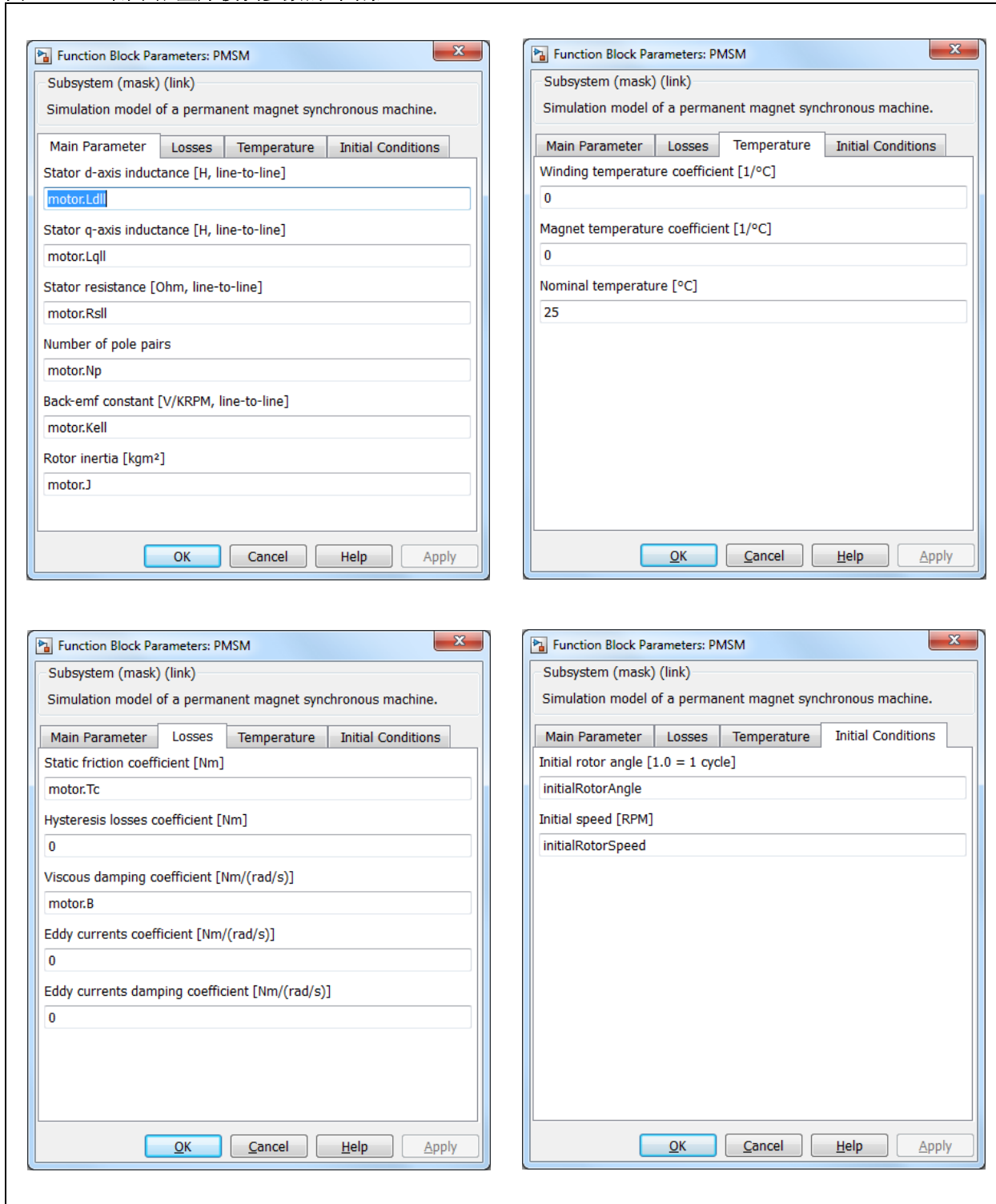
要输入这些参数，应双击PMSM模块以打开参数对话框
(图2)。

表2: 库模块参数

参数	说明	单位	备注
主要电机参数			
Ld	定子d轴电感	H, 线-线	
Lq	定子q轴电感	H, 线-线	
Rs	定子电阻	Ω , 线-线	
n_p	极对数		
Ke	反电动势常数	V/KRPM, 线-线, 零-峰值	如果电机数据手册中列出的反电动势常数以RMS表示, 则可通过乘以 $\sqrt{2}$ (≈ 1.414) 来转换为零-峰值
J	转子惯量	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	
损耗			
cf	静摩擦系数	N·m	
chy	磁滞损耗系数	N·m	经验表明, 等效于cf ⁽¹⁾
d	粘性阻尼系数	N·m/(rad/s)	
ced	涡流阻尼系数	N·m/(rad/s)	经验表明, 等效于d ⁽¹⁾
ded	磁通涡流阻尼系数	N·m/(rad/s)	该参数保留供将来使用; 设为0
温度灵敏度			
alphaCU	绕组温度系数	1/°C	
alphaPM	磁体温度系数	1/°C	
Temp_nom	标称温度	°C	通常在20-25°C之间; 其他参数在此温度下指定或测量
初始条件			
theta_m0	初始转子角度	转数 (1.0 = 1周)	
omega_m0	初始速度	RPM	

注 1: 静摩擦和粘性摩擦这两个术语均包含来自机械和电气两方面的分量。如果使用样本电机的转矩和速度测量值来确定这些参数, 则机械和电气分量基本上是无法区分的。在这种情况下, 我们建议仅使用cf和d, 并将其他两个参数设为0。

图2: 用于配置库模块参数的对话框



当电机参数可能发生变化时，建议尽可能使用符号变量，而不要使用固定的数字常量。这些参数必须在对 Simulink 可见的工作区中定义；大多数情况下是在对 MATLAB 命令窗口可见的同一顶层工作区中定义。这样一来，便可从模型外部更改这些参数的值，然后将其放入脚本（扩展名为 .m 的文件），必要时还可以进行版本控制。如果直接在 Simulink 模型中使用数字，如果不重

新保存模型将无法保留更改，即使模型的结构能够保持完全不变。而若单独配置参数，便可以保持模型参数的更改独立于模型结构的更改。

相关示例，请参见文件 `examples/motorAC300020.m`（例 1）。这些参数从电机的数据手册中获取。

例 1： 样本电机参数文件

```
function motor = motorAC300020()

% MicrochipDirect AC300020
motor.manufacturer = 'Hurst';
motor.manufacturerPartNumber = 'DMB0224C10002';
motor.href = 'http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Hurst%20Motor%20DataSheet.pdf';
% unit conversion factors
KRPM_rads = 0.060/2/pi;           % KRPM/(rad/s):
                                   % 2pi rad/s = 1Hz = 60RPM = 0.060 KRPM
Nm_ozin = 7.061552e-3;           % N*m/(oz*in):
                                   % see NIST SP811 for reputable reference

% Electrical specifications
motor.Rsll = 4.03;                % line-line resistance, ohms
motor.Lqll = 4.60e-3;             % line-line q-axis inductance, H
motor.Ldll = motor.Lqll;         % non-salient rotor so Ld=Lq
motor.Kell = 7.24;               % 7.24V/KRPM 0-peak, line-line
motor.Np = 5;                    % number of pole pairs

% Mechanical specifications
motor.J = 0.000628 * Nm_ozin;    % 0.000628 oz*in*s^2
                                   % convert to N*m*s^2

% Not given by the data sheet:
motor.B = 0;                      % damping coefficient, N*m/(rad/s)
motor.Tc = 0;                     % coulomb friction, N*m
```

AN1770

输入和输出

PMSM 模块包括有限数量的输入和输出，具体在表3中列出。其中一些内部信号也可用于调试用途。

表3: 库模块输入和输出

参数	说明	单位	备注
输入			
u_s	定子端子电压向量	V	这是一个三元素向量，电机的三个端子（ABC）分别对应一个元素。
T_L	负载转矩	N·m	正负载转矩对正向旋转起反作用。如果电机不产生电磁转矩，则正负载转矩将使电机朝负角速度方向加速。
Temp	定子绕组和磁体温度	°C	这是一个双元素向量；Temp(1) = 绕组温度，Temp(2) = 磁体温度。凭借该参数，可使用电机模型参数中的温度系数确定反电动势和绕组电阻。
Ω	转子角速度	rad/s	电机的输入；在许多情况下，该模块的角速度输出将以该输入的形式反馈给电机。
输出			
i_s	定子端子电流向量	A	这是一个三元素向量，电机的三个端子（ABC）分别对应一个元素。正电流流入定子端子。
θ_m	机械转子角度	rad	输出转子角速度的积分。
Ω	输出转子角速度	rad/s	PMSM 模型包含转子惯量的机械模型。如果使用机械模型，则应将该参数反馈到转子角速度输入中；如果不使用机械模型，则可以忽略该参数。
T	电机转矩	N·m	电机产生的总转矩。包括电磁转矩、磁滞和粘性阻尼转矩。不包括负载转矩。
调试（具有内部信号的 Simulink® 总线）			
debug.idq	同步坐标系定子电流向量	A	该电流和端子电流 i_s 使用 Park 变换和 Clarke 变换进行关联。向量的 q 轴分量（第二元素）产生转矩； d 轴改变转子气隙磁通。
debug.udq	同步坐标系定子电压向量	V	该电压和端子电压使用 Park 变换和 Clarke 变换进行关联。
debug.psidq	同步坐标系定子磁通向量	V·s	定子磁通 $\psi_{dq} = \psi_m + L_{dq}i_{dq}$ ，其中 ψ_m 为永磁磁通， L_{dq} 为对角电感矩阵。
debug.T_e	电磁转矩	N·m	由于定子磁通和定子电流的叉积而导致电机产生的转矩。
debug.theta_r	转子电角度	rad	电角度 $\theta_r = N_p \int \omega_m dt$ 。
debug.omega_r	转子电频率	rad/s	电角度 $\omega_r = N_p \omega_m$ ，其中 ω_m 为输入转子角速度 Ω 。

仿真安装和用例

库目录中有一个名为“examples”的子目录，其中包含一个Simulink模型（FOCopenloop.slx）和各种安装文件（图3）。

在MATLAB中打开该目录，然后在命令窗口提示符处输入以下内容：

```
>> FOCopenloop
>> FOCopenloop_setup1
```

随即打开一个包含FOCopenloop模型的窗口（图4）。

FOCopenloop模型代表一个开环磁场定向控制器，它利用理想的电机电角度信息将定子电压应用到电机的同步（dq）坐标系中。（实际的电机可能具有位置传感器（例如，编码器或霍尔传感器），也可能使用无传感

器估算器。在仿真中，我们可以使用确切的电角度。）速度既可以由PMSM模块本身（包含机械模型）确定，也可以由外部施加的速度信号确定。

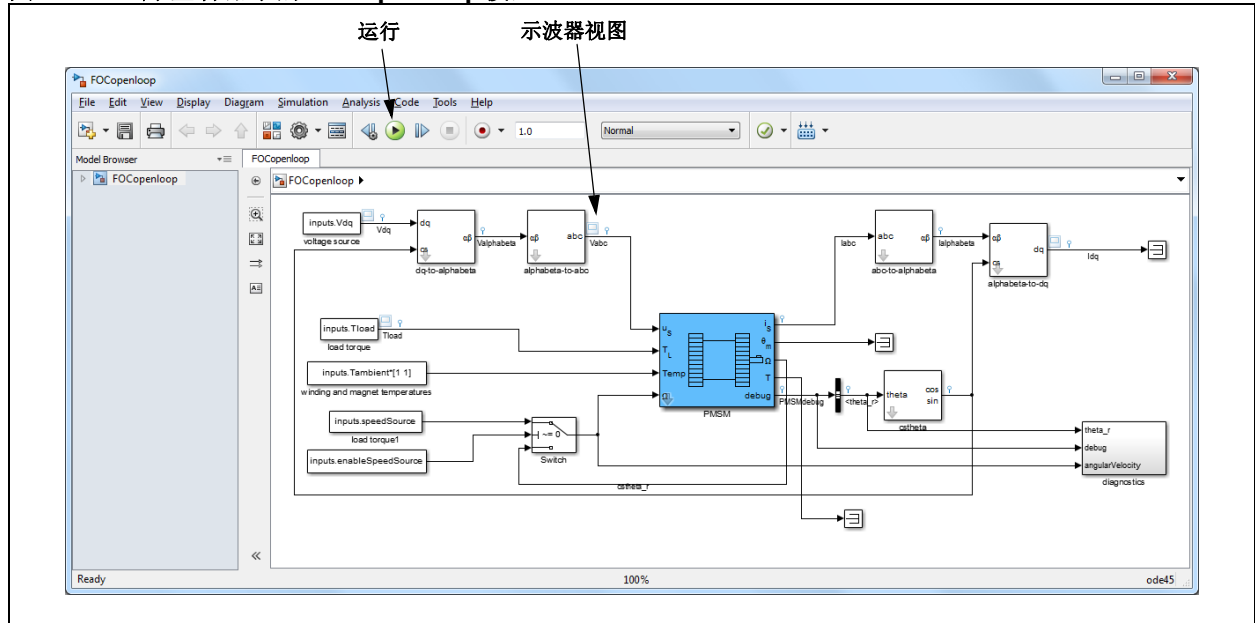
该示例还说明了Microchip电机模型中许多参考变换模块的使用。这些模块在 abc 参考坐标系（直接对应于电机三相的三元素向量）、 $\alpha\beta$ 参考坐标系（静止坐标系中的双元素正交向量）和 dq 参考坐标系（双元素正交旋转参考坐标系）之间转换坐标。Park变换模块在静止参考坐标系和旋转参考坐标系之间转换，需要双元素向量（余弦输入和正弦输入，可从 $cstheta$ 模块获取）。在FOCopenloop示例中， $cstheta$ 模块的输入是电机的同步电角度 $\theta_{e,r}$ 。

有关PMSM电机模型的更完整说明，请参见附录A：“Microchip PMSM模型”。

图3: 示例目录

Name	Date modified	Type	Size
FOCopenloop.slx	6/13/2013 12:41 PM	Simulink Model (S...	18 KB
FOCopenloop_setup_common.m	6/13/2013 12:42 PM	MATLAB Code	1 KB
FOCopenloop_setup1.m	6/13/2013 12:18 PM	MATLAB Code	1 KB
FOCopenloop_setup2.m	6/13/2013 12:54 PM	MATLAB Code	1 KB
motorAC300020.m	6/13/2013 11:21 AM	MATLAB Code	2 KB

图4: 库查看器中的FOCopenloop模型



AN1770

脚本FOCopenloop_setup1.m使用Hurst DMB0224C10002电机（Microchip 直销网站部件编号AC300020）的电机参数和一个特定仿真曲线的输入信号来准备MATLAB工作区。

FOCopenloop_setup1仿真曲线施加了一对 q 轴电压斜坡，并在每个斜坡完成后施加一些瞬时负载脉冲，然后对电机应用三相短路。施加负载转矩后，电机速度不受调节并降低。使用开环电压控制时，电流与反电动势不对齐： d 轴分量不为0，电压源的大部分电流能力会被不必要地浪费掉。

执行该安装脚本后，按下Run（运行）按钮（见图4）。仿真随即运行并更新一些将随模型一起打开的示波器查看器图形。如果出于某种原因未显示示波器查看器窗口，可双击FOCopenloop模型中显示的其中一个浅蓝

色Scope（示波器）图标。示波器查看器图形是Simulink中的一项功能，旨在快速查看仿真结果，并不包含用于对这些图形进行格式设置的众多选项。要完全控制图形样式，可将数据导出到MATLAB中，然后根据需要进行绘制。

在示波器查看器窗口中，单击Auto-Scale（自动缩放）按钮（见图5）将提供一个组合视图（图6）。

图5： 工具栏上的AUTO-SCALE按钮

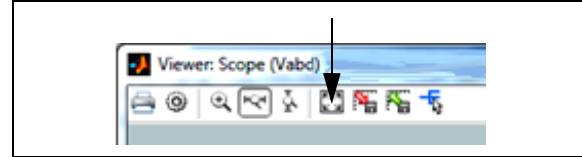
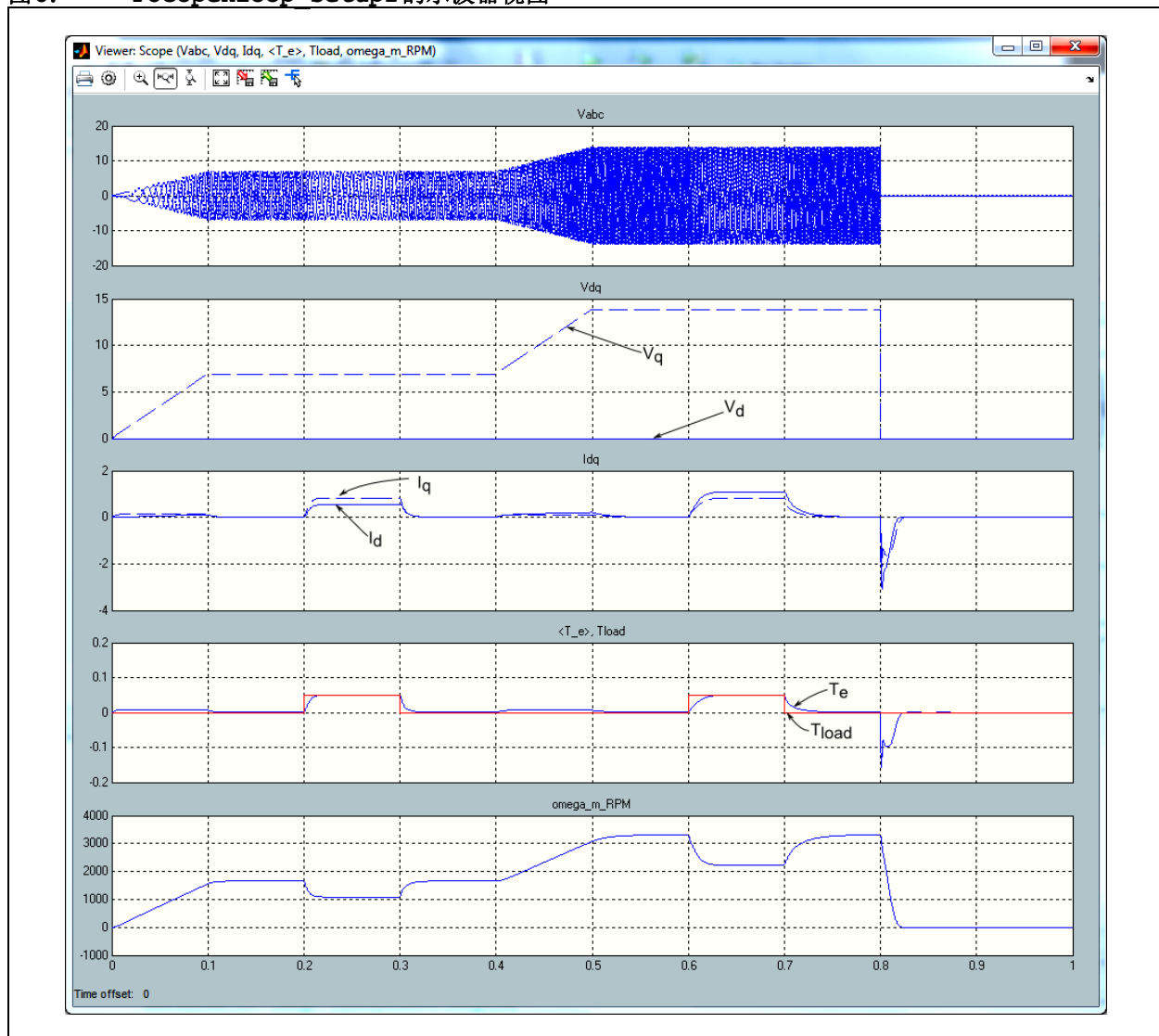


图6： FOCopenloop_setup1的示波器视图

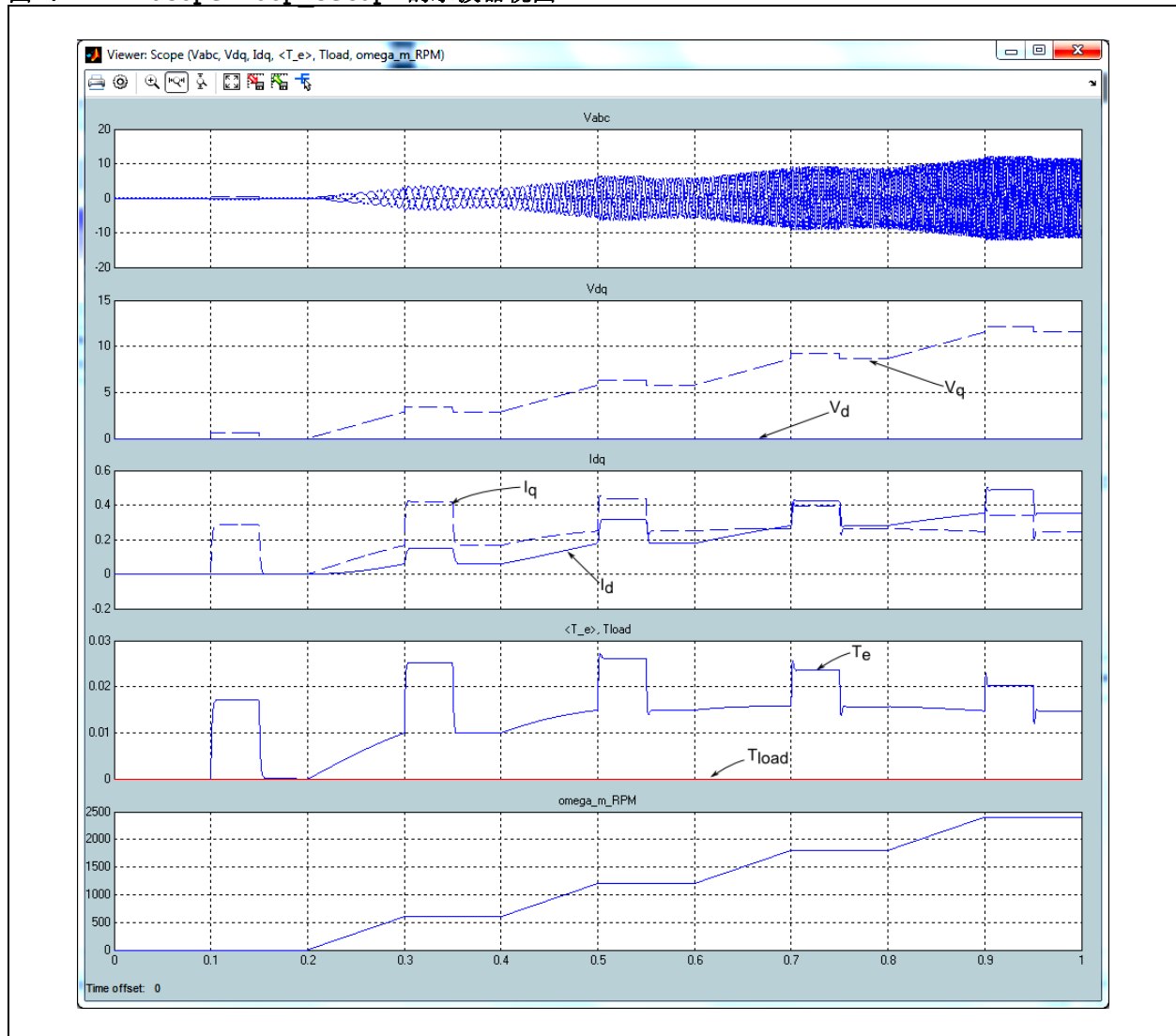


另一个安装文件FOCopenloop_setup2.m定义外部施加的速度曲线。该模型代表连接到发动机或其他原动机的大惯量电机，可作为示例以供查看各种速度下的瞬态响应。（这是一种在闭环电流控制器中调整电流环的实用技术。）该曲线中的负载转矩为0。该曲线中的速度多次出现平稳阶段。电机端子的驱动波形与电机电频率

同步，使用电机模型的电角度输出，斜坡具有与速度波形类似的平稳阶段。此外，在每个速度平稳阶段的开头还有额外的电压脉冲（如图7中的 V_{dq} 所示）。

请注意，瞬态响应随速度的增加而变化。这是由于受电机电感影响， d 轴和 q 轴之间的交叉耦合将随速度增加而加强。图7所示为该脚本的组合和自动缩放示波器视图。

图7: FOCopenloop_setup2的示波器视图



常见问题解答

1. 模型涵盖哪种类型的PMSM电机？

该线性PMSM模型可仿真任何带有绕线式定子和永磁转子的平衡三相电动机械（电机或发电机）。这类电机包括市场上的大多数商用电机，如“无刷直流电机”或“永磁同步电机”。定子和转子凸极性（定子和转子出现的不均匀磁路随绕转子轴的角度而变化的程度）是需要考虑的重要特性。

电机模型适用于表面永磁转子（磁非凸极转子， $L_d = L_q$ ）和内部永磁转子（磁凸极转子， $L_d \neq L_q$ ）。

尽管转子凸极性的影响包括在该PMSM模型中，但定子凸极性的影响并未包括在内。大多数商用电机的定子都尽可能设计为非凸极，因此定子凸极性唯一未建模的特性是少量的齿槽转矩，其表现为周期性转矩干扰，仅在低转速下才比较明显。

该模型不支持非平衡三相电动机械（例如，各相匝数不相等的电机）。

没有外露中性点连接的星形和三角形绕线式电动机械均可以使用该模型。（星形绕线式电动机械也称为Y形绕线式电动机械。）电动机械被视为带有三个端子的黑盒。三角形绕线式电动机械可能会有循环电流且没有中性点连接，但是从端子处来看，它与星形绕线式电动机械在数学上是相同的。循环电流在端子处不可见，可以假设“虚拟”中性点的电压为端子电压的平均值。

2. PMSM模型是否包括任何非线性效应，例如铁饱和或反电动势谐波？

目前不包括。在许多情况下，基本线性模型便可满足需求。

3. 何时使用内部机械模型，何时必须使用自定义机械模型？

如果仅使用惯量、粘性阻尼和静摩擦以及外部施加的负载转矩便可对系统建模，请使用内部机械模型，并通过配置电机模型参数来使用系统惯量/阻尼/静摩擦。

如果您的系统包含更为复杂的机械元素，则最好在Simulink中创建自定义机械模型。在这种情况下，请忽略输出转子角速度，而应将模型的转子角速度作为PMSM电机模块的输入。

4. 如何仿真一个或多个电机端子上的开路，或者外部电感/电阻/电容的影响？

PMSM模型是一个电压输入、电流输出模型。与大多数Simulink模块一样，该模型基于单向信号流，不属于网络模型（例如Simscape™中的网络模型）。这意味着电机需要3个电压源，并且将输出3个电流测量值。该模型无法直接为开路建模。

参考资料

有关MATLAB和Simulink产品的最新信息，请访问The MathWorks, Inc的网站：

www.mathworks.com

有关运行MATLAB和Simulink的最新系统要求，请访问：

http://www.mathworks.com/support/sysreq/current_release/index.html

有关Simulink的入门信息，请访问：

<http://www.mathworks.com/help/simulink/gettingstarted-with-simulink.html>

有关配置MATLAB搜索路径的信息，请访问：

http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_env/what-is-the-matlab-search-path.html

其他商标

“MATLAB”和“Simulink”是The MathWorks, Inc的注册商标。

AN1770

注:

附录A: MICROCHIP PMSM 模型

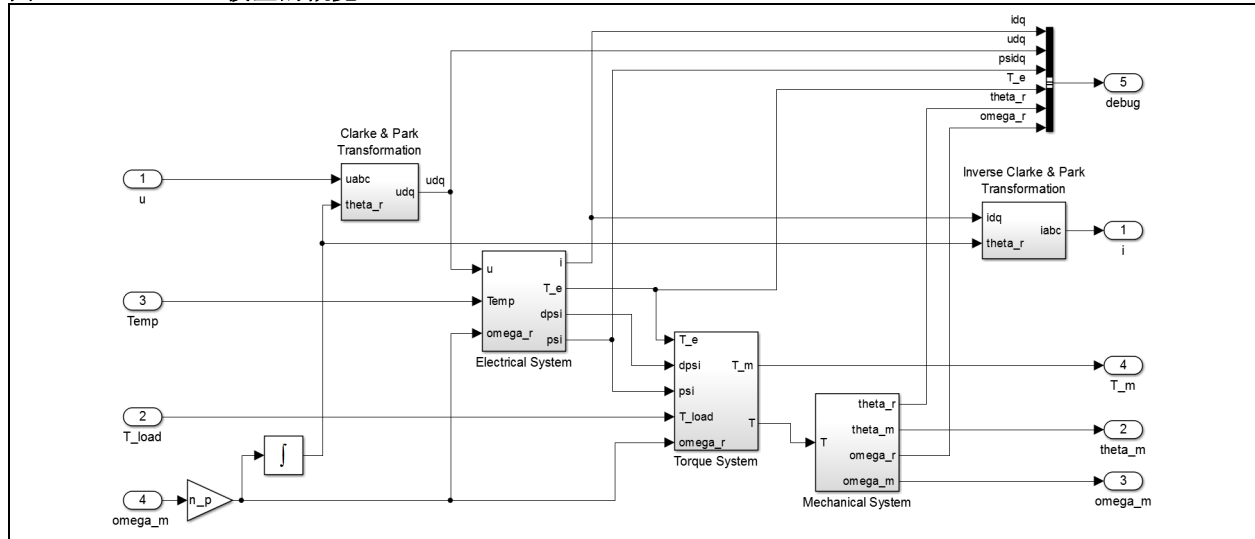
Simulink 库中使用的适用于 PMSM 的 Microchip 电机模型基于电机的线性模型。该模型采用分层结构；您可以在 Simulink 中进行探究，具体方法是选择 PMSM 模型模块，然后按下 Ctrl+U 以在模块屏蔽下进行查看。

电机模型中有多个分量采用同步坐标系。因此，需使用 Clarke 和 Park 变换将三相电压值 (abc) 转换为同步 (dq) 参考坐标系 (图A-2)。

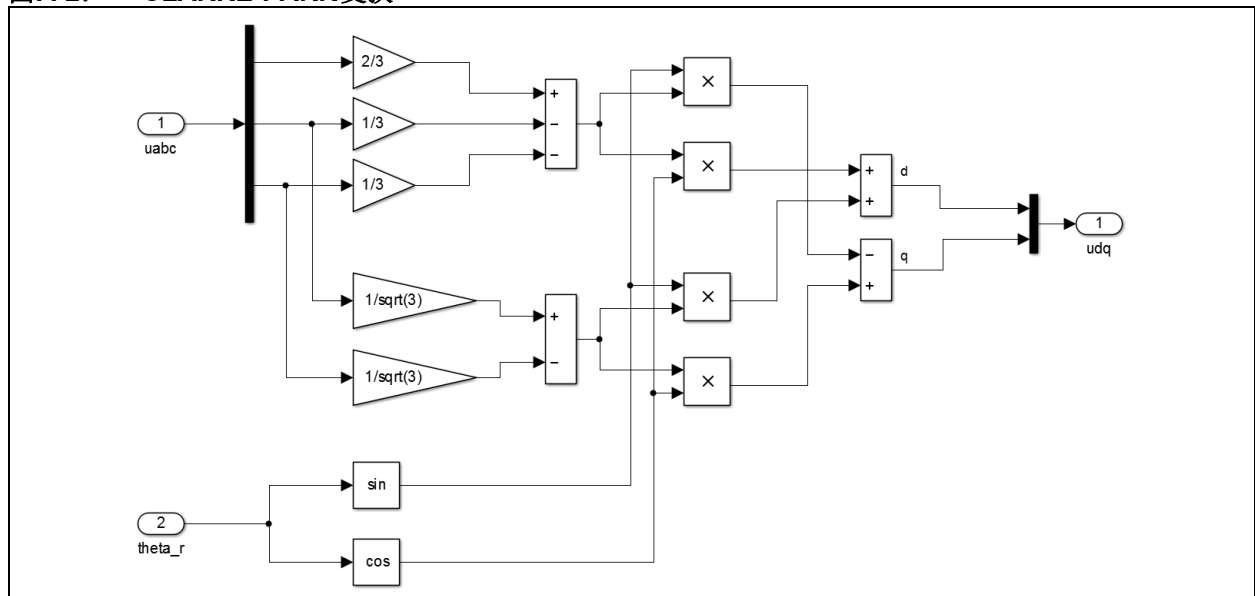
这些变换的 Simulink 模型为以下公式的具体实现形式：

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad [A1]$$

图A-1: PMSM 模型的概览



图A-2: CLARKE-PARK 变换



电机的电气模型（图A-3）根据电压确定定子电流、定子磁通和电磁转矩。该模型用于仿真以下公式

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - J\omega_r \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad [A2]$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L_d & 0 \\ 0 & 1/L_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix} \quad [A3]$$

对于电压和电流公式：

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

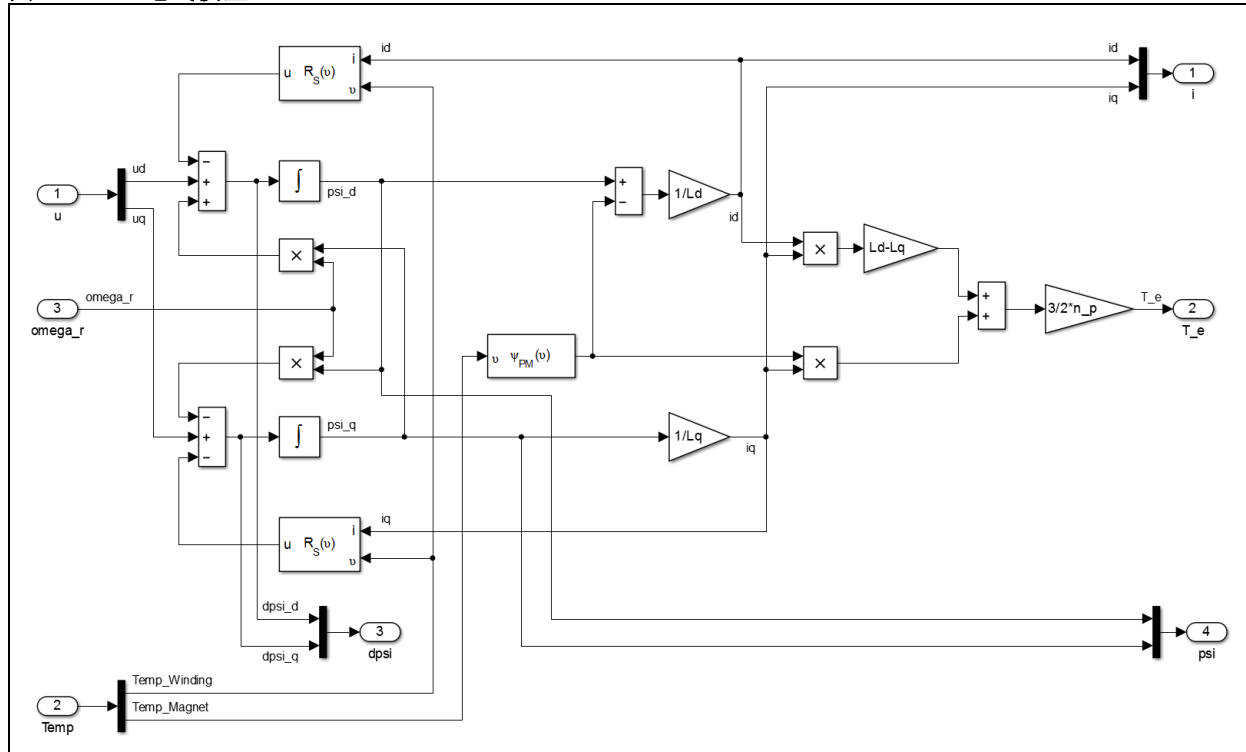
且

$$T_e = \frac{3}{2}n_p\psi_{PM}i_q + \frac{3}{2}n_p(L_d - L_q)i_d i_q \quad [A4]$$

(= 回正转矩 + 反转矩)

对于转矩公式： R_s 和 ψ_{PM} 均是与温度相关的变量。

图A-3: 电气模型



电机的转矩模型（图A-4）用于仿真内部电机转矩和净转矩的公式：

$$T = T_m - T_{load} \quad [A5]$$

$$T_m = T_e - T_{friction} - T_{viscous} - T_{d\psi} \quad [A6]$$

$$T_{friction} = (c_{hy} + c_f)\text{sgn}\omega_m \quad [A7]$$

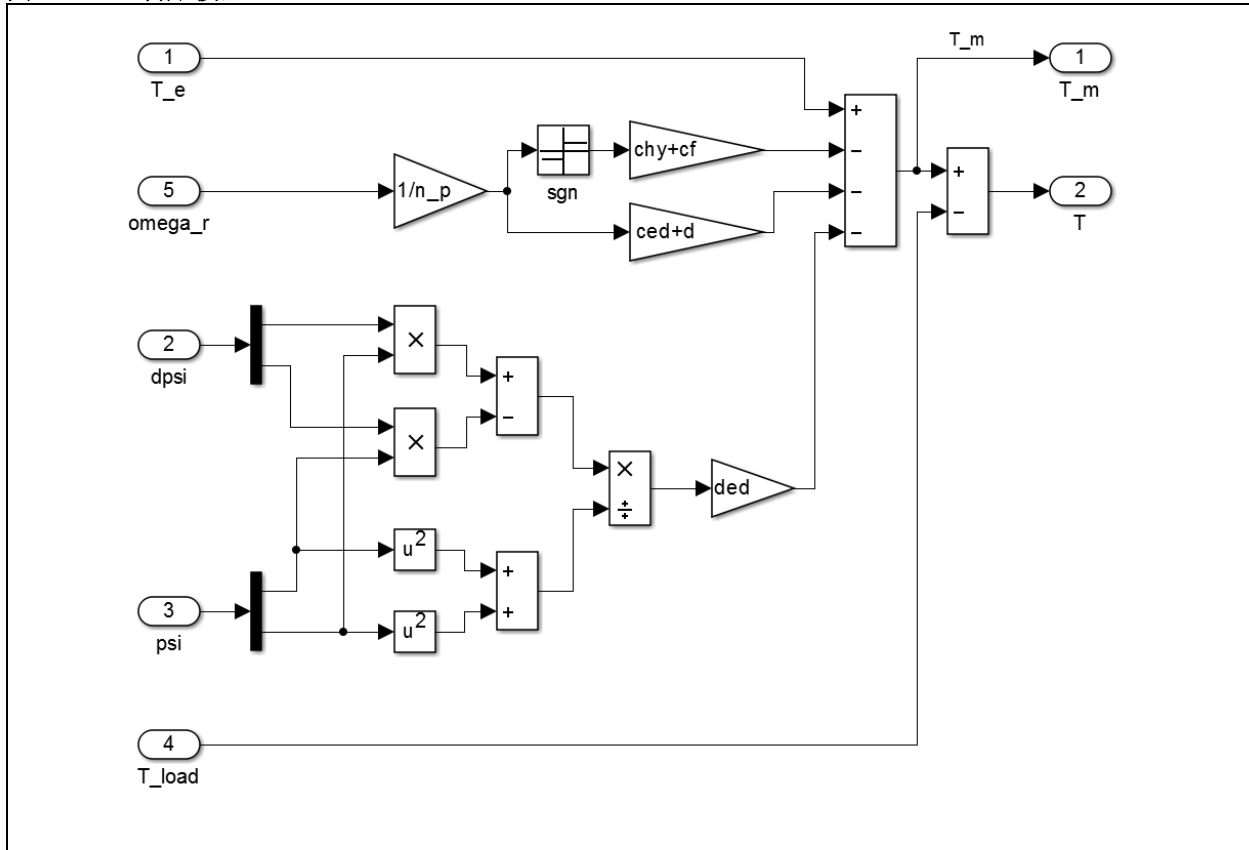
$$T_{viscous} = (c_{ed} + d)\omega_m \quad [A8]$$

$$T_{d\psi} = d_{ed} \frac{d\psi_{dq}}{dt} \times \psi_{dq} \quad [A9]$$

$$\frac{d\psi_{dq}}{dt} \times \psi_{dq} \quad [A9]$$

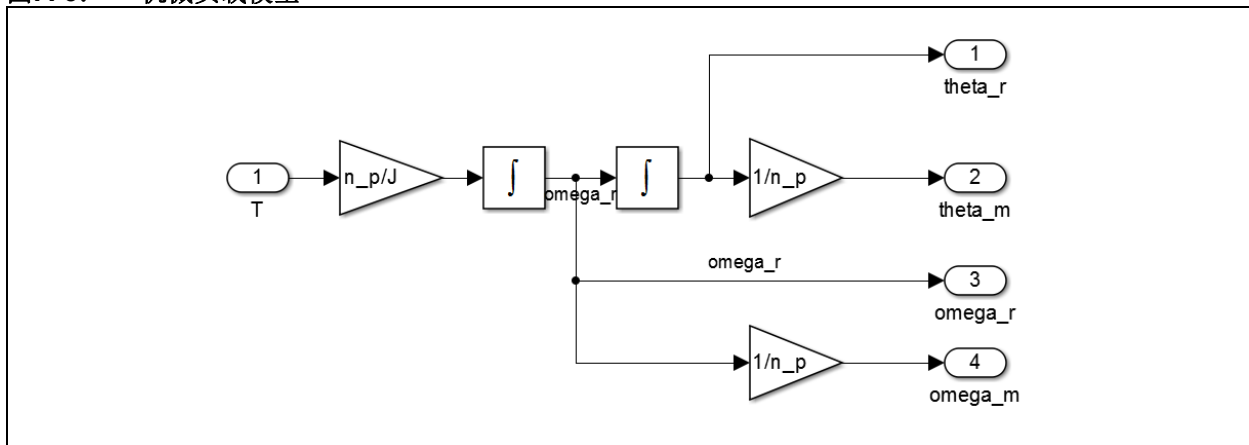
其中， $T_{friction}$ 为磁滞和库伦摩擦力， $T_{viscous}$ 为涡流和粘性阻力， $T_{d\psi}$ 为随时间变化的磁通引起的阻力。

图A-4: 转矩模型



负载的机械模型（图A-5）包括这些转矩对电机惯量的影响。如前文所述，“m”项表示机械变量（ θ_m 和 ω_m 分别为转子角度和速度）；“r”项表示相对于转子的电气变量（ θ_r 和 ω_r 分别为角度和频率）。

图A-5: 机械负载模型



AN1770

注:

请注意以下有关 Microchip 器件代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术指标。
- Microchip 确信：在正常使用的情况下，Microchip 系列产品是当今市场上同类产品中最安全的产品之一。
- 目前，仍存在着恶意、甚至是非法破坏代码保护功能的行为。就我们所知，所有这些行为都不是以 Microchip 数据手册中规定的操作规范来使用 Microchip 产品的。这样做的人极可能侵犯了知识产权。
- Microchip 愿与那些注重代码完整性的客户合作。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。

代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字千年版权法案 (Digital Millennium Copyright Act)》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下，能访问您的软件或其他受版权保护的成果，您有权依据该法案提起诉讼，从而制止这种行为。

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为您提供便利，它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范，是您自身应负的责任。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对其使用情况、质量、性能、适销性或特定用途的适用性的声明或担保。Microchip 对因这些信息及使用这些信息而引起的后果不承担任何责任。如果将 Microchip 器件用于生命维持和 / 或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切伤害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任，并加以赔偿。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗或以其他方式转让任何许可证。

有关 Microchip 质量管理体系的更多信息，请访问 www.microchip.com/quality。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Adaptec、AnyRate、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、chipKIT、chipKIT 徽标、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi 徽标、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PacTime、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TempTrackr、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的注册商标。

APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、FlashTec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、Liberio、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus 徽标、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、Vite、WinPath 和 ZL 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、BlueSky、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、EtherGREEN、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、KleerNet、KleerNet 徽标、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICTail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、SAM-ICE、Serial Quad I/O、SMART-I.S.、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、ViewSpan、WiperLock、Wireless DNA 和 ZENA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 Microchip Technology Incorporated 在美国的服务标记。

Adaptec 徽标、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology 和 Symmcom 均为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 Microchip Technology Inc. 的子公司 Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2020, Microchip Technology Incorporated 版权所有。

ISBN: 978-1-5224-5777-0

全球销售及及服务网点

美洲

公司总部 **Corporate Office**
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 1-480-792-7200
Fax: 1-480-792-7277

技术支持:
<http://www.microchip.com/support>

网址: www.microchip.com

亚特兰大 Atlanta
Duluth, GA

Tel: 1-678-957-9614
Fax: 1-678-957-1455

奥斯汀 Austin, TX
Tel: 1-512-257-3370

波士顿 Boston
Westborough, MA
Tel: 1-774-760-0087
Fax: 1-774-760-0088

芝加哥 Chicago
Itasca, IL
Tel: 1-630-285-0071
Fax: 1-630-285-0075

达拉斯 Dallas
Addison, TX
Tel: 1-972-818-7423
Fax: 1-972-818-2924

底特律 Detroit
Novi, MI
Tel: 1-248-848-4000

休斯敦 Houston, TX
Tel: 1-281-894-5983

印第安纳波利斯 Indianapolis
Noblesville, IN
Tel: 1-317-773-8323
Fax: 1-317-773-5453
Tel: 1-317-536-2380

洛杉矶 Los Angeles
Mission Viejo, CA
Tel: 1-949-462-9523
Fax: 1-949-462-9608
Tel: 1-951-273-7800

罗利 Raleigh, NC
Tel: 1-919-844-7510

纽约 New York, NY
Tel: 1-631-435-6000

圣何塞 San Jose, CA
Tel: 1-408-735-9110
Tel: 1-408-436-4270

加拿大多伦多 Toronto
Tel: 1-905-695-1980
Fax: 1-905-695-2078

亚太地区

中国 - 北京
Tel: 86-10-8569-7000

中国 - 成都
Tel: 86-28-8665-5511

中国 - 重庆
Tel: 86-23-8980-9588

中国 - 东莞
Tel: 86-769-8702-9880

中国 - 广州
Tel: 86-20-8755-8029

中国 - 杭州
Tel: 86-571-8792-8115

中国 - 南京
Tel: 86-25-8473-2460

中国 - 青岛
Tel: 86-532-8502-7355

中国 - 上海
Tel: 86-21-3326-8000

中国 - 沈阳
Tel: 86-24-2334-2829

中国 - 深圳
Tel: 86-755-8864-2200

中国 - 苏州
Tel: 86-186-6233-1526

中国 - 武汉
Tel: 86-27-5980-5300

中国 - 西安
Tel: 86-29-8833-7252

中国 - 厦门
Tel: 86-592-238-8138

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2943-5100

中国 - 珠海
Tel: 86-756-321-0040

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-213-7830

台湾地区 - 台北
Tel: 886-2-2508-8600

台湾地区 - 新竹
Tel: 886-3-577-8366

亚太地区

澳大利亚 **Australia - Sydney**
Tel: 61-2-9868-6733

印度 **India - Bangalore**
Tel: 91-80-3090-4444

印度 **India - New Delhi**
Tel: 91-11-4160-8631

印度 **India - Pune**
Tel: 91-20-4121-0141

日本 **Japan - Osaka**
Tel: 81-6-6152-7160

日本 **Japan - Tokyo**
Tel: 81-3-6880-3770

韩国 **Korea - Daegu**
Tel: 82-53-744-4301

韩国 **Korea - Seoul**
Tel: 82-2-554-7200

马来西亚
Malaysia - Kuala Lumpur
Tel: 60-3-7651-7906

马来西亚 **Malaysia - Penang**
Tel: 60-4-227-8870

菲律宾 **Philippines - Manila**
Tel: 63-2-634-9065

新加坡 **Singapore**
Tel: 65-6334-8870

泰国 **Thailand - Bangkok**
Tel: 66-2-694-1351

越南 **Vietnam - Ho Chi Minh**
Tel: 84-28-5448-2100

欧洲

奥地利 **Austria - Wels**
Tel: 43-7242-2244-39
Fax: 43-7242-2244-393

丹麦
Denmark - Copenhagen
Tel: 45-4485-5910
Fax: 45-4485-2829

芬兰 **Finland - Espoo**
Tel: 358-9-4520-820

法国 **France - Paris**
Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

德国 **Germany - Garching**
Tel: 49-8931-9700

德国 **Germany - Haan**
Tel: 49-2129-3766400

德国 **Germany - Heilbronn**
Tel: 49-7131-72400

德国 **Germany - Karlsruhe**
Tel: 49-721-625370

德国 **Germany - Munich**
Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

德国 **Germany - Rosenheim**
Tel: 49-8031-354-560

以色列 **Israel - Ra'anana**
Tel: 972-9-744-7705

意大利 **Italy - Milan**
Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

意大利 **Italy - Padova**
Tel: 39-049-7625286

荷兰 **Netherlands - Drunen**
Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

挪威 **Norway - Trondheim**
Tel: 47-7288-4388

波兰 **Poland - Warsaw**
Tel: 48-22-3325737

罗马尼亚
Romania - Bucharest
Tel: 40-21-407-87-50

西班牙 **Spain - Madrid**
Tel: 34-91-708-08-90
Fax: 34-91-708-08-91

瑞典 **Sweden - Gothenberg**
Tel: 46-31-704-60-40

瑞典 **Sweden - Stockholm**
Tel: 46-8-5090-4654

英国 **UK - Wokingham**
Tel: 44-118-921-5800
Fax: 44-118-921-5820