

# 基于 56800/E 数字信号处理器和霍尔传感器的三相 BLDC 电机控制

作者 : Leonard N.Elevich

## 1 文档概述

该文档描述了基于 Freescale 56800/E 电机控制设备的三相 BLDC（无刷直流）电机驱动的设计。

BLDC 电动机在许多应用领域都很流行。与直流电机使用机械换向器不同，BLDC 电机用的是电子换向器，所以它比直流电机更可靠。BLDC 电动机通过转子磁铁产生转子磁通，所以能取得更高的效率。因此，BLDC 电动机可用于高档家电产品（冰箱、洗衣机、洗碗机等），高档水泵，电扇和其他需要高可靠性和效率的电器中。

## 2 BLDC 电机理论

无刷直流电动机（BLDC）是一种旋转电机，其定子是像异步电动机那样的典型的三相定子，且表面装有永磁体；如图 1 所示。

### 目录

1	文档概述 .....	1
2	BLDC 电机理论 .....	1
	2.1 BLDC 电机的数字控制 .....	2
3	关于 56800/E 数字信号控制器 .....	11

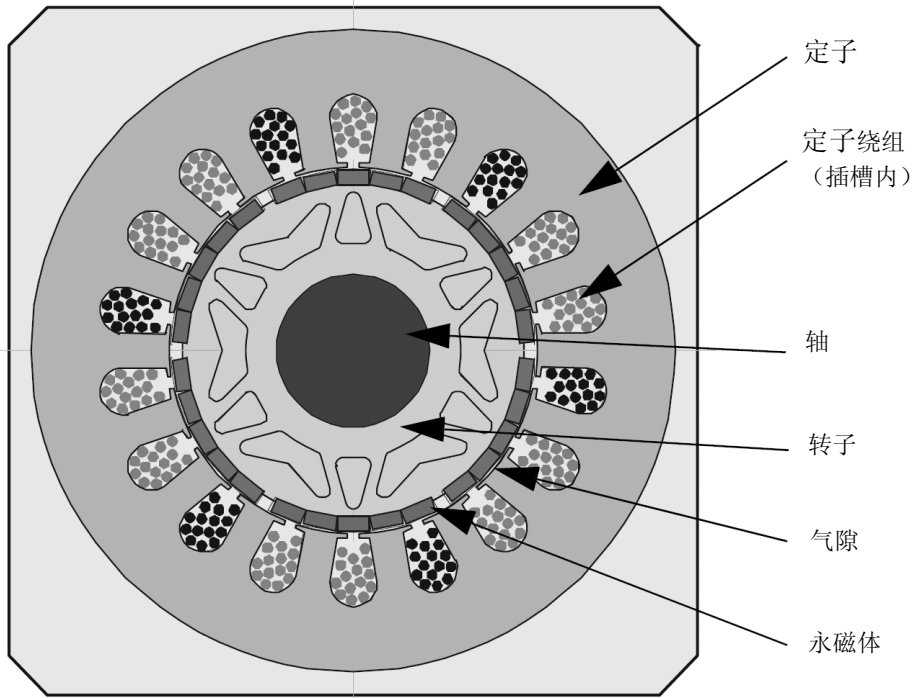


图 1. BLDC 电动机一断面

从关系上看，BLDC 电机与有刷直流电机正好相反，BLDC 电机的永磁体在转子上旋转，而电枢在定子上保持静止。直流电机的电流极性是由换向器和电刷来改变的。然而，无刷直流电机电流极性的改变是由功率晶体管在与转子位置保持同步时进行切换的。因此，BLDC 电机往往包含内部或外部位置传感器来感知转子的实际位置，或者不需要传感器都可以检测到位置。

## 2.1 BLDC 电机的数字控制

BLDC 电机是由矩形电压以及给定的转子位置共同驱动的；如图 2 所示。定子磁通与转子磁铁产生的转子磁通相互作用控制扭矩，从而控制电机的速度。电压必须完全应用于三相绕组系统中的两相，使得定子磁通与转子磁通的角度保持在接近  $90^\circ$ ，从而可以产生最大扭矩。这意味着电机的正常运作需要电子控制。

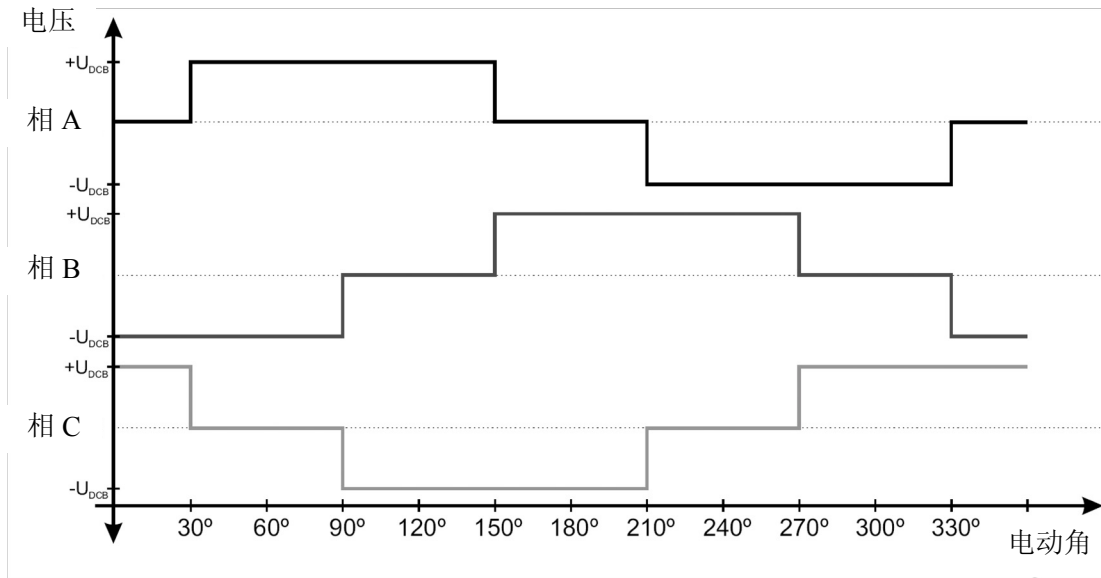


图 2. 用于三相 BLDC 电机的电压波形

普通的三相 BLDC 电机用的是标准的三相功率级，如图 3 所示。这种功率级利用 6 个功率晶体管在独立模式与互补模式间进行切换。

在这两种模式下，三相功率级可总是保持电机两相导通。第三相截止；如图 2 所示。利用 PWM 技术，可以将 6 种可能的电压矢量应用到 BLDC 电机；如图 4 和图 5 所示。下面介绍两种基本类型的功率晶体管开关：独立开关和互补开关。

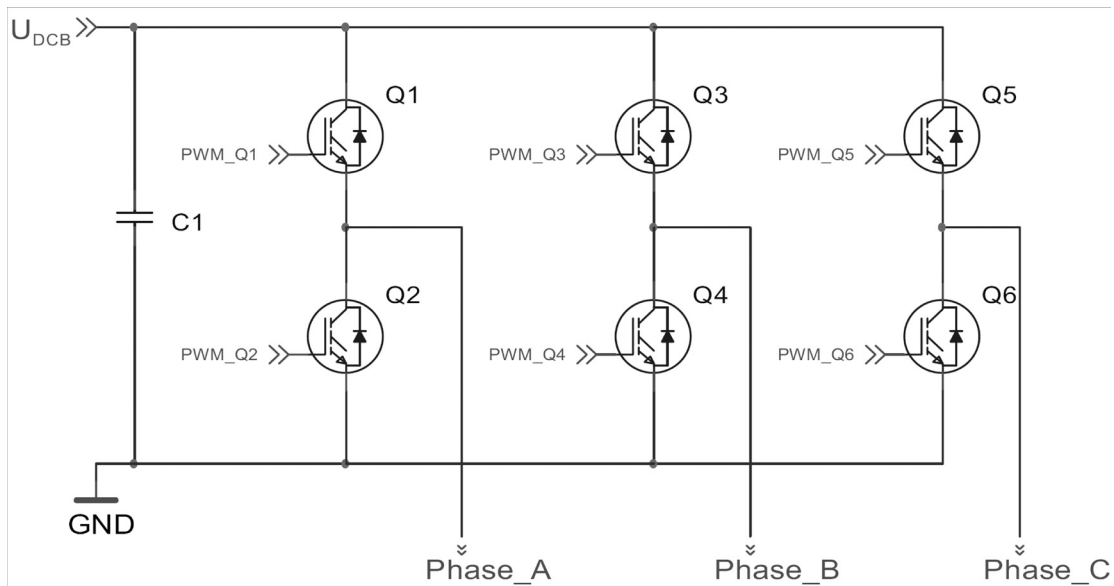


图 3. 三相 BLDC 功率级

### 2.1.1 电源晶体管的独立开关

在独立开关期间，当电流从电源流向 BLDC 电机的相时，只有两个晶体管被导通。在第一个相，上面的晶体管被导通；在第二个相，下面的晶体管被导通；第三个相是断电的。在惯性滑行期间，所有的晶体管都被断开；如图 4 所示。

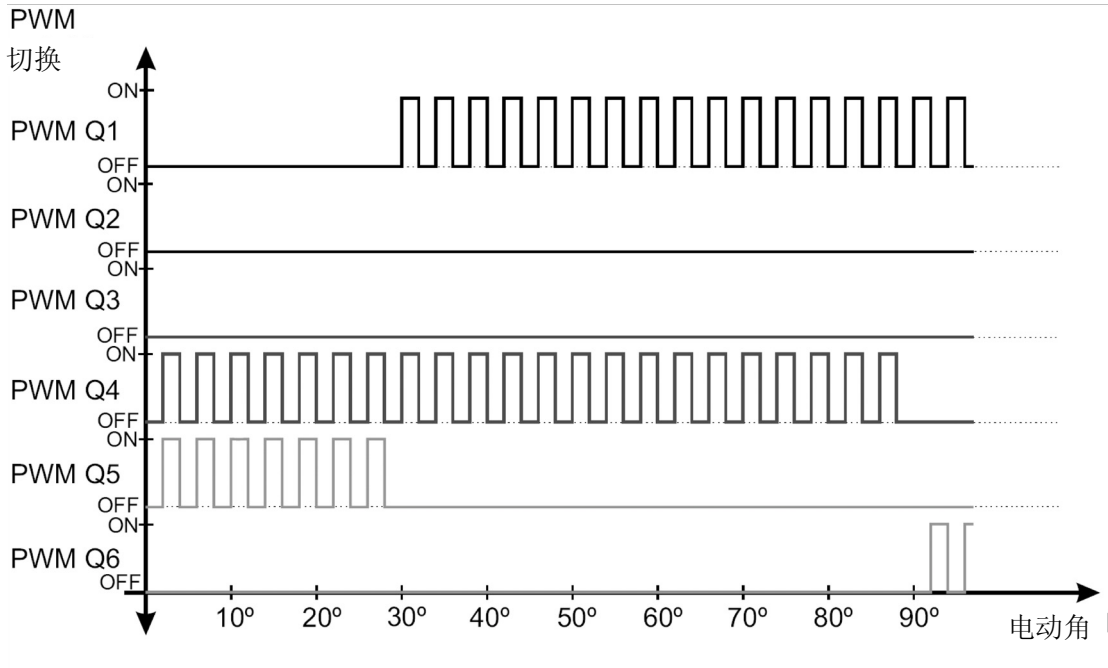


图 4. 功率晶体管的独立开关

### 2.1.2 电源晶体管的互补开关

在互补开关期间，给 BLDC 电机的相供电时，两个晶体管被导通。一个主要的差别出现在惯性滑行期间。对于独立开关，所有的晶体管被截止。电流继续向相同方向流经惯性滑行二极管直到降为 0。对于互补开关，互补晶体管在惯性滑行期间被导通，所以电流向相反方向流动。图 5 描述了互补开关。

注意：独立和互补开关模式都可以工作在双级或单级模式下。图 4 和图 5 所示为双级开关模式。本应用使用的是互补单级 PWM 模式。

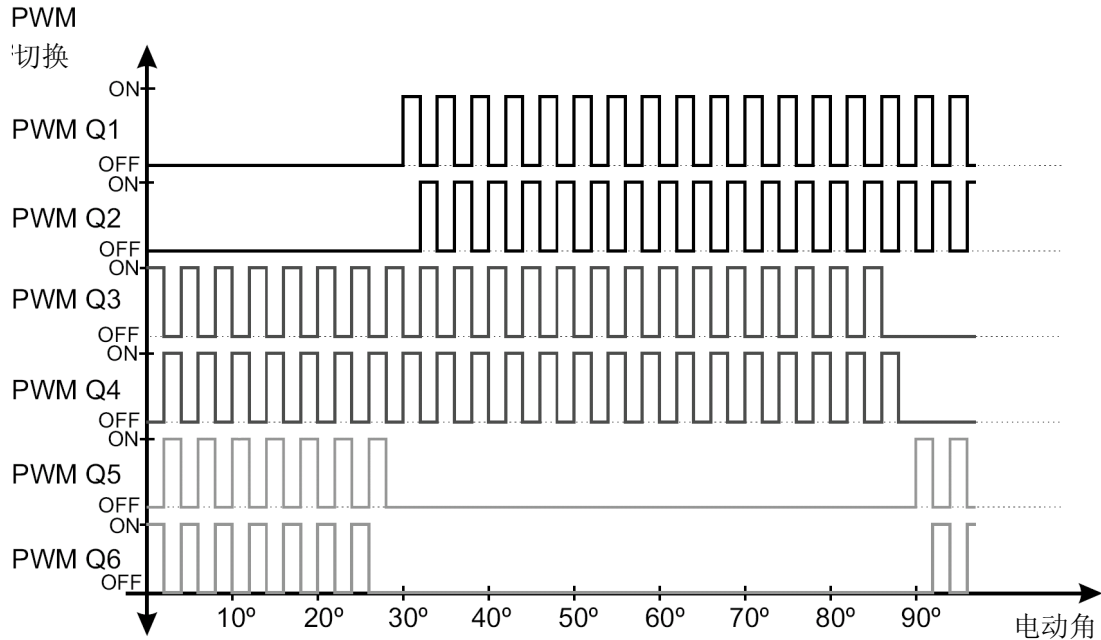


图 5. 功率晶体管的互补开关

### 2.1.3 换向

换向建立一个旋转场。如前所述，为了 BLDC 电机能正常运转，定子与转子间的角度必须保持在接近 90°。6 步控制共产生了 6 种可能的定子磁通矢量。定子磁通矢量必须在转子的一个确定位置上被改变。这个位置通常由霍尔传感器来感知。霍尔传感器有 3 个信号，包含 6 种状态。霍尔传感器的每个状态与定子的一个磁通矢量相对应。其对应关系如图 6 所示。具体可参见表 1 和表 2 所示。

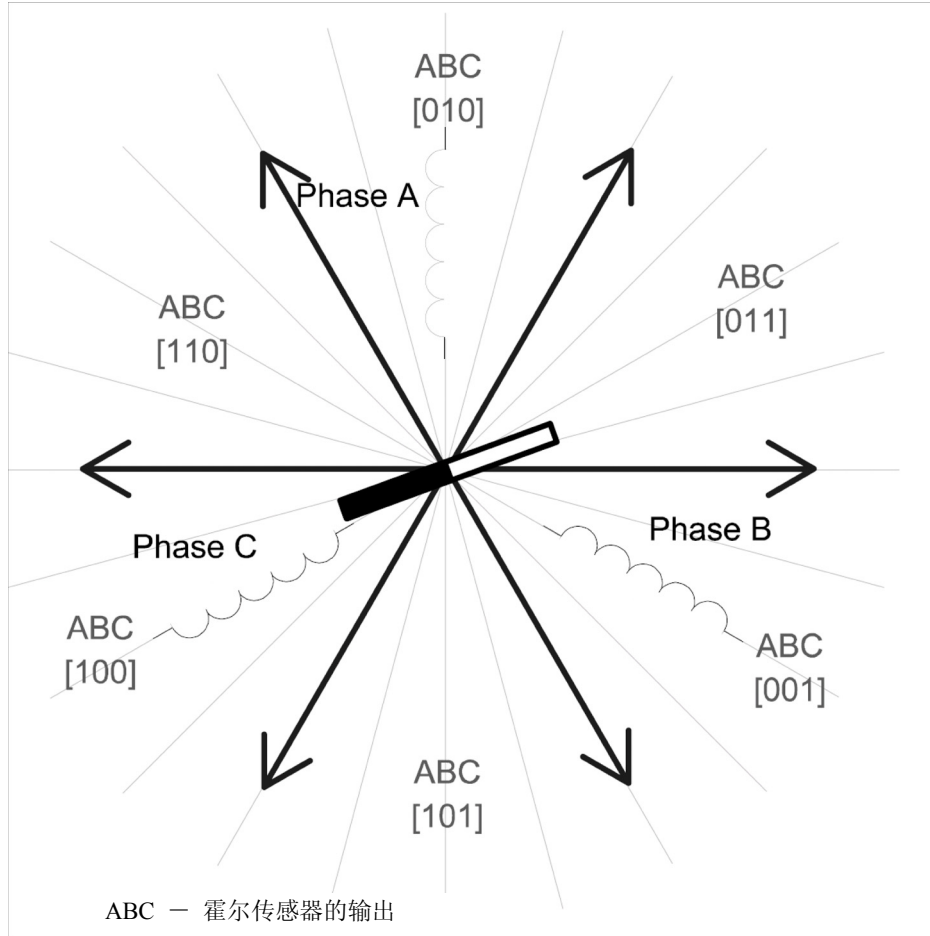


图 6. 六步控制下定子的磁通矢量

下面两个表描述了转子换向过程。图 7 中转子的实际位置对应于霍尔传感器的 ABC[110] 状态；如图 6 所示。实际的电压由表 1 计算出。Phase A 通过晶体管 Q1 被连到 DCBus 电压的正极；Phase C 通过晶体管 Q6 与地相连；Phase B 没有通电。

一旦转子到达一个确定位置（如图 7 所示），霍尔传感器的状态从 ABC[110] 改为 ABC[100]。然后从表 1 中选出一一种新的电压模式应用到 BLDC 电机。

如图所示，使用六步控制技术时，转子磁通与定子磁通间的角度不可能精确地保持到 90°。实际角度从 60° 变到 120°。

每 60° 换向重复一次。这种换向对角的精确度是至关重要的。任何偏差都会引起转矩的波动，从而导致速度的变化。

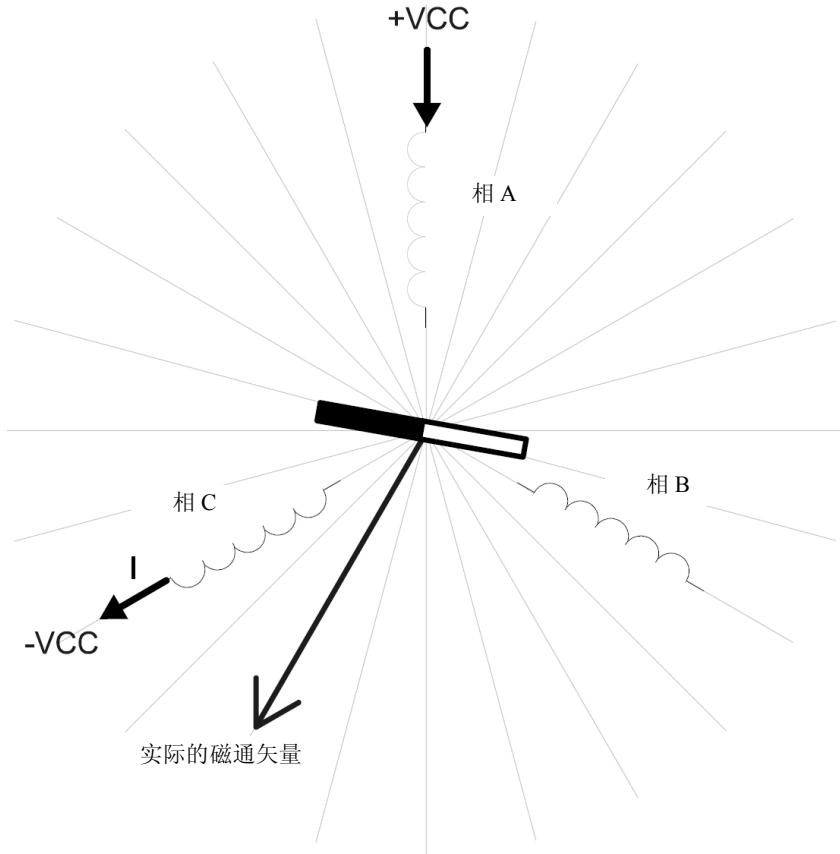


图 7. 换向之前的状态

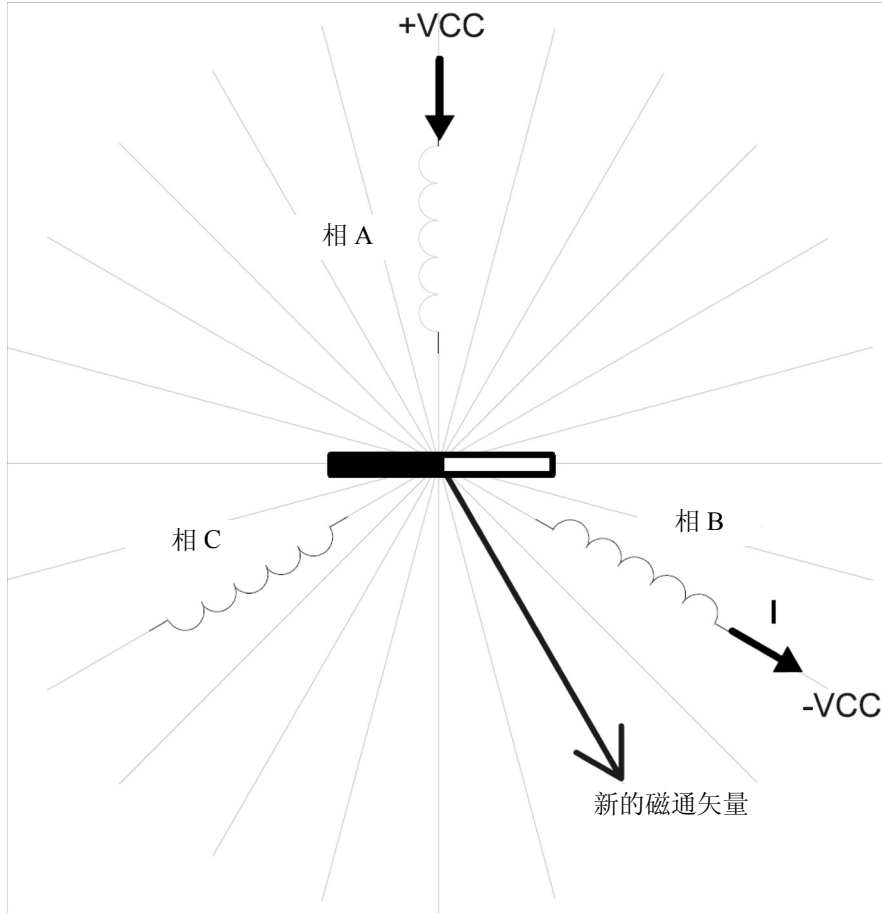


图 8. 换向之后的状态

表 1. 逆时针方向旋转的换向次序

霍尔传感器 A	霍尔传感器 B	霍尔传感器 C	相 A	相 B	相 C
1	0	0	+V <sub>DCB</sub>	-V <sub>DCB</sub>	NC
1	1	0	+V <sub>DCB</sub>	NC	-V <sub>DCB</sub>
0	1	0	NC	+V <sub>DCB</sub>	-V <sub>DCB</sub>
0	1	1	-V <sub>DCB</sub>	+V <sub>DCB</sub>	NC
0	0	1	-V <sub>DCB</sub>	NC	+V <sub>DCB</sub>
1	0	1	NC	-V <sub>DCB</sub>	+V <sub>DCB</sub>



表 2. 顺时针方向旋转的换向次序

霍尔传感器 A	霍尔传感器 B	霍尔传感器 C	相 A	相 B	相 C
1	0	0	-V <sub>DCB</sub>	+V <sub>DCB</sub>	NC
1	0	1	NC	+V <sub>DCB</sub>	-V <sub>DCB</sub>
0	0	1	+V <sub>DCB</sub>	NC	-V <sub>DCB</sub>
0	1	1	+V <sub>DCB</sub>	-V <sub>DCB</sub>	NC
0	1	0	NC	-V <sub>DCB</sub>	+V <sub>DCB</sub>
1	1	0	-V <sub>DCB</sub>	NC	+V <sub>DCB</sub>

### 2.1.4 速度控制

换向确保 BLDC 电机的转子能正确旋转，而电机的速度只取决于外加电压的振幅。这个振幅是通过 PWM 技术来调整的。需要的速度由速度控制器控制。速度控制器的实现用到传统的 PI 控制器。实际速度和理想速度的差额作为 PI 控制器的输入，基于这个差额，PI 控制器控制的是 PWM 脉冲的占空比，该占空比与保持理想速度所需要的电压振幅相对应。

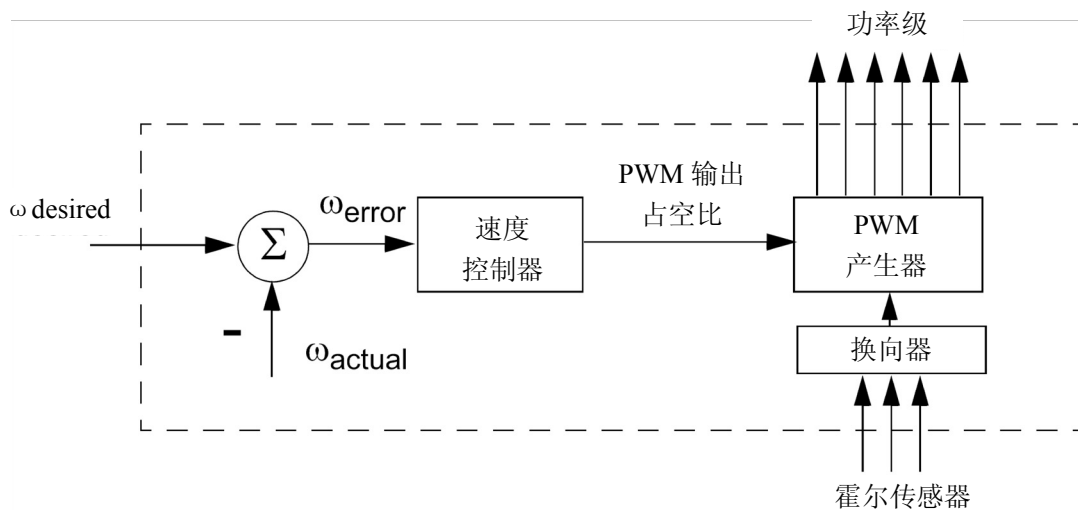


图 9. 速度控制器

速度控制器根据以下公式计算比例积分算法：

$$u(t) = Kc \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad \text{公式. 1}$$

根据 Backward 欧法拉方法，采用近似积分转换到离散时间域，产生以下数字 PI 控制器的计算公式：

$$u(k) = u_p(k) + u_f(k) \quad \text{公式. 2}$$

$$u_p(k) = K_c \cdot e(k)$$

公式. 3

$$u_I(k) = u_I(k-1) + K_c \frac{T}{T_I} \cdot e(k)$$

公式. 4

其中:

- $e(k)$ = 第 k 步的输入错误
- $w(k)$ = 第 k 步的理论值
- $m(k)$ = 第 k 步的测量值
- $u(k)$ = 第 k 步控制器的输出
- $u_p(k)$ = 第 k 步的比例输出部分
- $u_i(k)$ = 第 k 步的积分输出部分
- $u_i(k-1)$ = 第 k-1 步的积分输出部分
- $T_I$ = 积分时间常数
- $T$ = 采样时间
- $K_C$ = 控制器增益

### 2.1.5 转矩控制

对于不管速度而要求电机以指定转矩运行的应用，可以使用电流控制器，因为转矩与电流直接成正比。在这种模式下，为了所有的负载可以达到需要满电枢电流的点，速度将被限制在速度参考信号设置的值以内。如果负载转矩继续增加，由于电流回路里不允许更多的电枢电流流过，所以速度会降低。相反地，如果负载试图迫使速度高于设定的值，电机电流会自动倒流，致使电机刹车，并且重新产生动力至主回路。电流控制器的实现同传统的比例 - 积分（Proportional-Integral，PI）控制器。速度控制器的输出与 DCBus 实测电流一起输入到电流控制器。速度控制器的输出与 DCBus 实测电流一起输入到电流控制器。电流控制器的输出将控制 PWM 脉冲的占空比。速度控制器与转矩控制器的结合如图 10 所示。

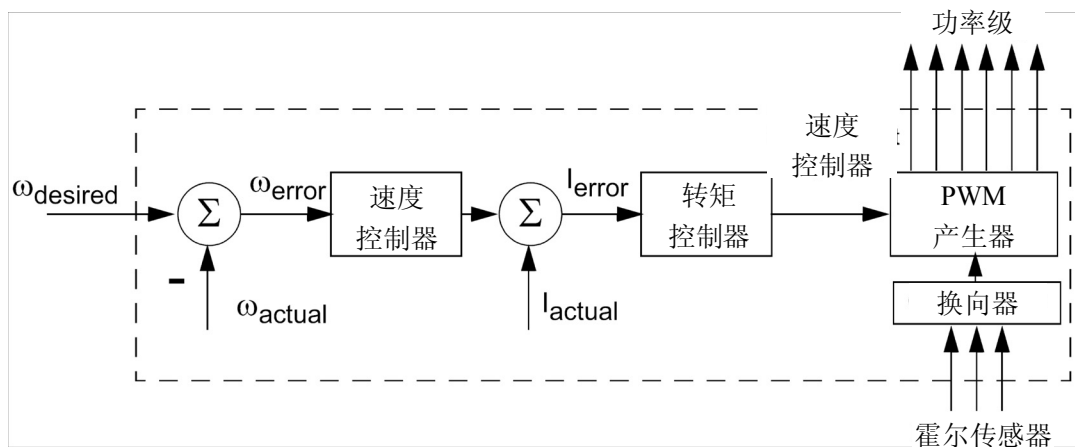


图 10. 速度控制器与转矩控制器的结合

### 3 关于 56800/E 数字信号控制器

Freescale 公司的 56800/E 控制器非常适合 BLDC 电机控制的应用，将 DSP 的运算能力与 MCU 的控制特性结合到一块芯片上。这些设备还提供很多用于电机控制的外围设备，如脉冲宽度调制（PWM）模块、模数转换器（ADC）、定时器、通信设备（SCI、SPI 等）、片上 Flash 和 RAM。

使用霍尔传感器的 BLDC 的应用只要稍作修改就可以将一种 56800/E 设备移植到另一种设备，不过还取决于所用电机的硬件类型，更多信息参见特定应用对象手册。

## 如何联系我们:

**主页:**  
[www.freescale.com](http://www.freescale.com)

**电子邮件:**  
[support@freescale.com](mailto:support@freescale.com)

**美国 / 欧洲或未列出的地方:**  
Freescale Semiconductor  
Technical Information Center, CH370  
1300 N. Alma School Road  
Chandler, Arizona 85224  
1-800-521-6274 or +1-480-768-2130  
[support@freescale.com](mailto:support@freescale.com)

**欧洲、中东和非洲:**  
Freescale Halbleiter Deutschland GmbH  
Technical Information Center  
Schatzbogen 7  
81829 Muenchen, Germany  
+44 1296 380 456 (English)  
+46 8 52200080 (English)  
+49 89 92103 559 (German)  
+33 1 69 35 48 48 (French)  
[support@freescale.com](mailto:support@freescale.com)

**日本:**  
Freescale Semiconductor Japan Ltd.  
Headquarters  
ARCO Tower 15F  
1-8-1, Shimo-Meguro, Meguro-ku,  
Tokyo 153-0064, Japan  
0120 191014 or +81 3 5437 9125  
[support.japan@freescale.com](mailto:support.japan@freescale.com)

**亚太地区:**  
飞思卡尔半导体(中国)有限公司 100022  
北京市朝阳区建国路乙 118 号  
京汇大厦 23 层  
+86 10 5879 8000  
[support.asia@freescale.com](mailto:support.asia@freescale.com)

**仅提供印刷品请求:**  
Freescale Semiconductor Literature Distribution Center  
P.O. Box 5405  
Denver, Colorado 80217  
1-800-441-2447 or +1-303-675-2140  
Fax: +1-303-675-2150  
[LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com](mailto:LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com)

文档号: AN1916  
第 2 版  
2005 年 11 月

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale Semiconductor products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits or integrated circuits based on the information in this document.

Freescale Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in Freescale Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals", must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Freescale Semiconductor product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Freescale Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Freescale Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Freescale Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part.

RoHS-compliant and/or Pb-free versions of Freescale products have the functionality and electrical characteristics as their non-RoHS-compliant and/or non-Pb-free counterparts. For further information, see <http://www.freescale.com> or contact your Freescale sales representative.

For information on Freescale's Environmental Products program, go to <http://www.freescale.com/epp>.

Freescale™ and the Freescale logo are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc. All other product or service names are the property of their respective owners. The Power Architecture and Power.org word marks and the Power and Power.org logos and related marks are trademarks and service marks licensed by Power.org  
© Freescale Semiconductor, Inc. 2005-2008. All rights reserved.