

有刷直流电机基础

作者: Reston Condit
Microchip Technology Inc.

简介

有刷直流电机被广泛用于从玩具到按钮调节式汽车座椅的应用中。有刷直流（Brushed DC，BDC）电机价格便宜、易于驱动并且易于制造成各种尺寸和形状。本应用笔记将讨论 BDC 电机的工作原理、驱动 BDC 电机的方法以及将驱动电路与 PIC® 单片机接口的方法。

工作原理

图 1 给出了一个简单 BDC 电机的结构。所有 BDC 电机的基本组件都是一样的：定子、电刷和换向器。后面的章节将更详细地介绍每个组件。

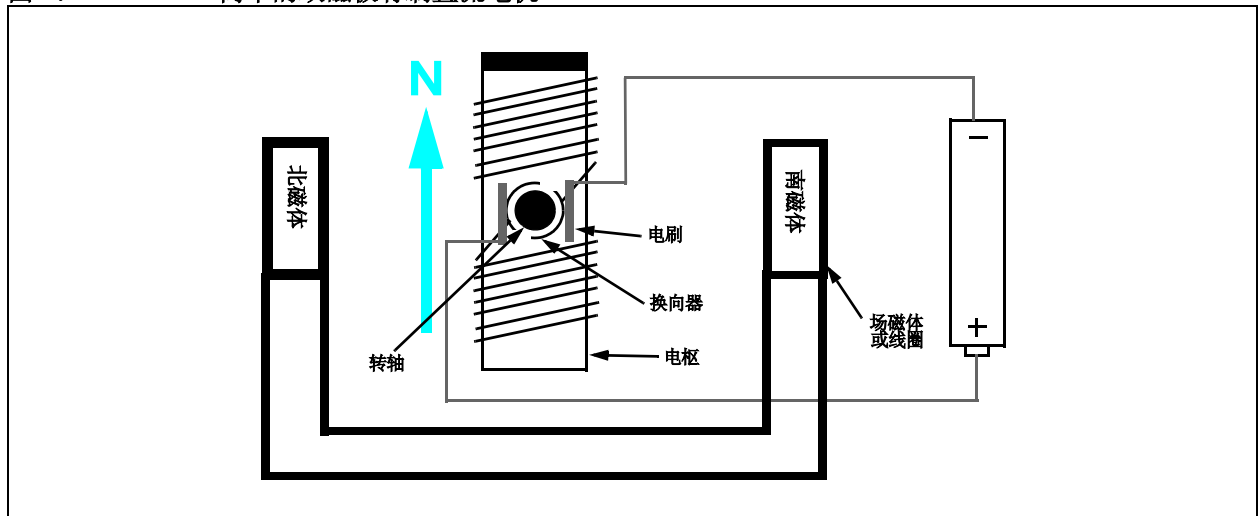
定子

定子会在转子周围产生固定的磁场。这一磁场可由永磁体或电磁绕组产生。BDC 电机的类型由定子的结构或电磁绕组连接到电源的方式划分（欲知 BDC 电机的不同类型请参见[步进电机的类型](#)）。

转子

转子（也称为电枢）由一个或多个绕组构成。当这些绕组受到激励时，会产生一个磁场。转子磁场的磁极将与定子磁场的相反磁极相吸引，从而使定子旋转。在电机旋转过程中，会按不同的顺序持续激励绕组，因此转子产生的磁极绝不会与定子产生的磁极重叠。转子绕组中磁场的这种转换被称为换向。

图 1: 简单的双磁极有刷直流电机



电刷和换向器

与其他电机类型（即，无刷直流电机和交流感应电机）不同，BDC 电机不需要控制器来切换电极绕组中电流的方向，而是通过机械的方式完成 BDC 电机绕组的换向。在 BDC 电机的转轴上安装有一个分片式铜套，称为换向器。随着电机的旋转，碳刷会沿着换向器滑动，与换向器的不同分片接触。这些分片与不同的转子绕组连接，因此，当通过电机的电刷上电时，就会在电机内部产生动态的磁场。注意电刷和换向器由于两者之间存在相对滑动，因而是 BDC 电机中最容易损耗的部分，这一点很重要。

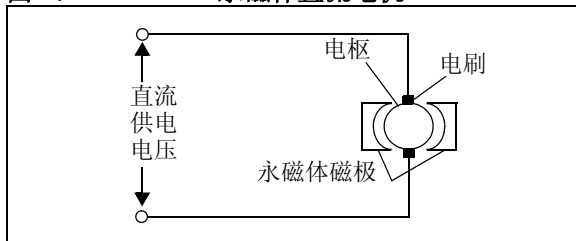
步进电机的类型

如前所述，BDC 电机的各种类型用定子中固定磁场的产生方式来区别。本节将讨论 BDC 电机的不同类型，以及每种类型的优缺点。

永磁体

永磁体有刷直流（Permanent Magnet Brushed DC，PMDC）电机是最常见的 BDC 电机。这类电机使用永磁体产生定子磁场。PMDC 电机通常用在包括分马力电动机在内的应用中，这是因为永磁体比绕组定子具有更高的成本效益。PMDC 电机的缺点是永磁体的磁性会随着时间的推移逐渐衰退。某些 PMDC 电机的永磁体上还绕有绕组，以防止磁性丢失的情况发生。PMDC 电机的性能曲线（电压与速度关系曲线）的线性非常好。电流与转矩成线性关系。由于定子磁场是恒定的，所以这类电机对电压变化的响应非常快。

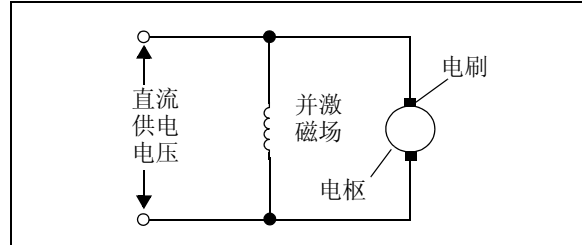
图 2： 永磁体直流电机



并激

并激有刷直流（Shunt-wound Brushed DC，SHWDC）电机的励磁线圈与电枢并联。励磁线圈中的电流与电枢中的电流相互独立。因此，这类电机具有卓越的速度控制能力。SHWDC 电机通常用在需要五个或五个以上马力的应用中。在 SHWDC 电机中，不会出现磁性丢失的问题，因此它们通常比 PMDC 电机更加可靠。

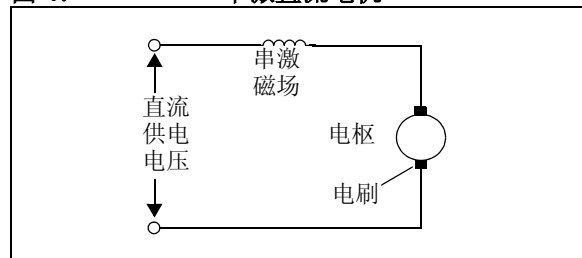
图 3： 并激直流电机



串激

串激有刷直流（Series-wound Brushed DC，SWDC）电机的励磁线圈与电枢串联。由于定子和电枢中的电流均随负载的增加而增加，因此这类电机是大转矩应用的理想之选。SWDC 电机的缺点是它不能像 PMDC 和 SHWDC 电机那样对速度进行精确控制。

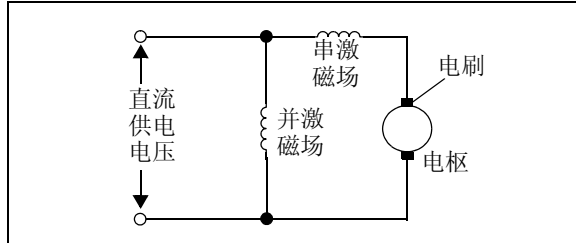
图 4： 串激直流电机



复激

复激 (Compound Wound, CWDC) 电机是并激和串激电机的结合体。如图 5 所示, CWDC 电机可产生串激和并激两种磁场。CWDC 电机综合了 SWDC 和 SHWDC 电机的性能, 它具有比 SHWDC 电机更大的转矩, 又能提供比 SWDC 电机更佳的速度控制。

图 5: 复激直流电机



基本驱动电路

驱动电路用在了使用了某类控制器并且要求速度控制的应用中。驱动电路的目的是为控制器提供改变 BDC 电机中绕组电流的方法。本节中讨论的驱动电路允许控制器对 BDC 电机的供电电压进行脉宽调制。就功耗来说, 这样的速度控制方法在改变 BDC 电机的速度方面比起传统的模拟控制方法效率要高很多。传统的模拟控制要求与电机绕组串联一个额外的变阻器, 这样会降低效率。

驱动 BDC 电机的方法多种多样。有些应用场合仅要求电机往一个方向运转。图 6 和图 7 给出了向一个方向驱动 BDC 电机的电路。前者采用低端驱动, 后者采用高端驱动。使用低端驱动的优点是可以不必使用 FET 驱动器。FET 驱动器的用途是:

1. 将驱动 MOSFET 的 TTL 信号转换为供电电压的电平。
2. 提供足以驱动 MOSFET 的电流⁽¹⁾
3. 提供半桥应用中的电平转换。

注 1: 对于绝大多数 PIC[®] 单片机应用, 第二点通常不适用, 这是因为 PIC 单片机的 I/O 引脚可提供 20 mA 的拉电流。

注意, 在每个电路中, 电机的两端都跨接有一个二极管, 目的是防止反电磁通量 (Back Electromagnetic Flux, BEMF) 电压损坏 MOSFET。BEMF 是在电机转动过程中产生的。当 MOSFET 关断时, 电机的绕组仍然处于通电状态, 会产生反向电流。D1 必须具有合适的额定值, 以能够消耗这一电流。

图 6: 低端 BDC 电机驱动电路

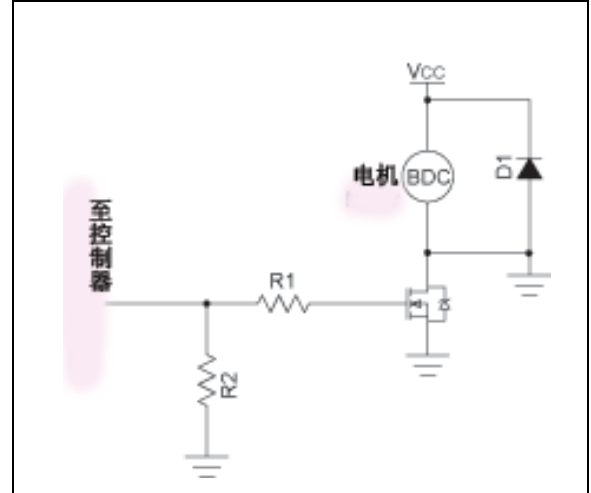


图 7: 高端 BDC 电机驱动电路

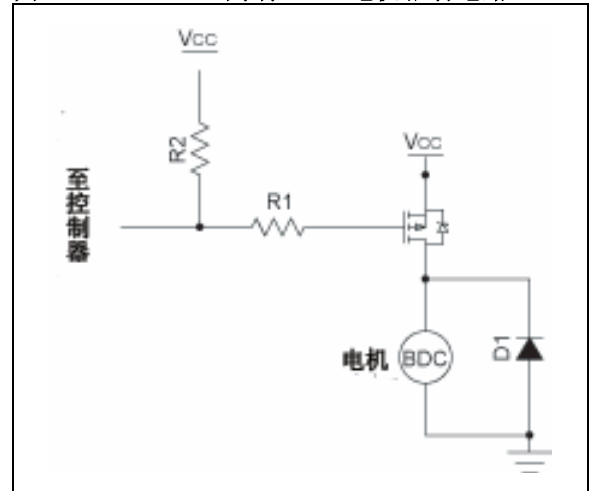


图 6 和图 7 中的电阻 R1 和 R2 对于每个电路的工作很重要。R1 用于保护单片机免遭电流突增的破坏, R2 用于确保在输入引脚处于三态时, Q1 关断。

BDC 电机的双向控制需要一个称为 H 桥的电路。H 桥的得名缘于其原理图的外观，它能够使电机绕组中的电流沿两个方向运动。要理解这一点，H 桥必须被分为两个部分，或两个半桥。如图 8 所示，Q1 和 Q2 构成一个半桥，而 Q3 和 Q4 构成另一个半桥。每个半桥都能够控制 BDC 电机一端的导通与关断，使其电势为供应电压或地电位。例如，当 Q1 导通，Q2 关断时，电机的左端将处于供电电压的电势。导通 Q4，保持 Q3 关断将使电机的相反端接地。标注有箭头的 IFWD 显示了该配置下电流的流向。

注意，每个 MOSFET 的两端都跨接有一个二极管（D1-D4）。这些二极管保护 MOSFET 免遭 MOSFET 关断时由 BEMF 产生的电流尖峰的破坏。只有在 MOSFET 内部的二极管不足以消耗 BEMF 电流时，才需要这些二极管。

电容（C1-C4）是可选的。这些电容的值通常不大于 10 pF，它们用于减少由于换向器起拱产生的 RF 辐射。

图 8： 双向 BDC 电机驱动（H 桥）电路

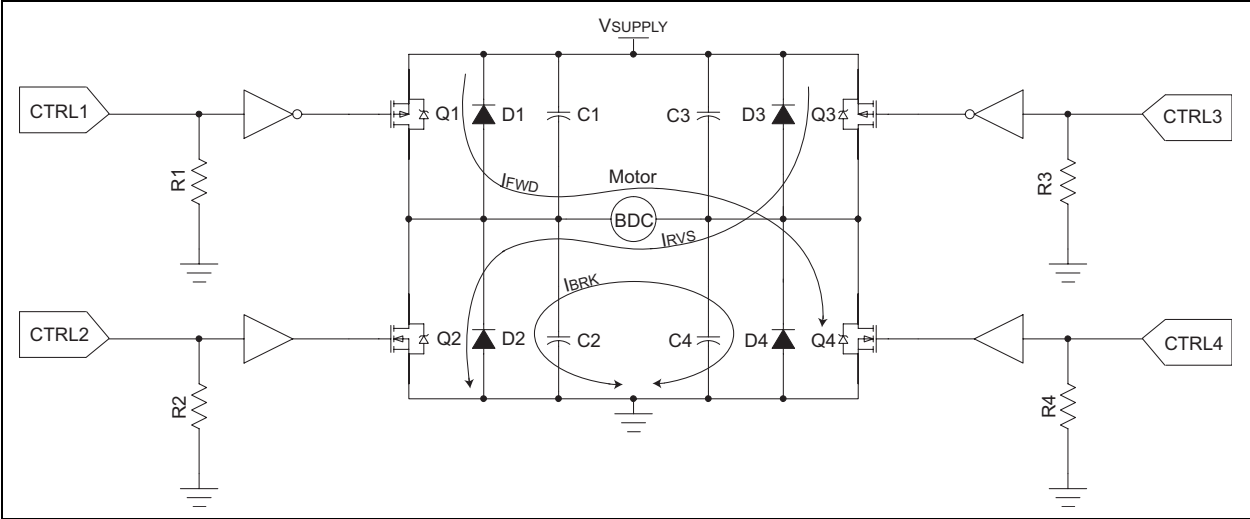


表 1 给出了 H 桥电路的不同驱动模式。在前向和后向模式中，桥的一端处于地电势，另一端处于 V_{SUPPLY}。在图 8 中，IFWD 和 IRVS 箭头分别描绘了前向和后向运行模式的电路路径。在惯性滑行（Coast）模式中，电机绕组的接线端保持悬空，电机靠惯性滑行直至停转。刹车（Brake）模式用于快速停止 BDC 电机。在刹车模式下，电机的接线端接地。当电机旋转时，它充当一个发电机。将电机的引线短路相当于电机带有无穷大负载，可使电机快速停转。IBRK 箭头描绘了这一点。

设计 H 桥电路时，必须要考虑到一个非常重要的事项。当电路的输入不可预测（比如单片机启动过程中）时，必须将所有的 MOSFET 偏置到关断状态。这将确保 H 桥每个半桥上的 MOSFET 绝不会同时导通。同时导通同一个半桥上的 MOSFET 将导致电源短路，最终导致损坏 MOSFET，致使电路无法工作。每个 MOSFET 驱动器输入端上的下拉电阻将实现该功能（配置图请见图 8）。

表 1： H 桥的工作模式

| | Q1 (CTRL1) | Q2 (CTRL2) | Q3 (CTRL3) | Q4 (CTRL4) |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 前向 | 通 | 断 | 断 | 通 |
| 后向 | 断 | 通 | 通 | 断 |
| 惯性滑行 | 断 | 断 | 断 | 断 |
| 刹车 | 断 | 通 | 断 | 通 |

速度控制

BDC 电机的速度与施加给电机的电压成正比。当使用数控技术时，脉宽调制（PWM）信号被用来产生平均电压。电机的绕组充当一个低通滤波器，因此具有足够频率的 PWM 信号将会在电机绕组中产生一个稳定的电流。平均电压、供电电压和占空比的关系由以下公式给出：

公式 1：

$$V_{\text{AVERAGE}} = D \times V_{\text{SUPPLY}}$$

速度和占空比之间成正比关系。例如，如果额定 BDC 电机在 12V 时以转速 15000 RPM 旋转，则当给电机施加占空比为 50% 的信号时，则电机将（理想情况下）以 7500 RPM 的转速旋转。

PWM 信号的频率是考虑的重点。频率太低会导致电机转速过低，噪音较大，并且对占空比变化的响应过慢。频率太高，则会因开关设备的开关损耗而降低系统的效率。经验之谈是在 4 kHz 至 20 kHz 范围内，调制输入信号的频率。这个范围足够高，电机的噪音能够得到衰减，并且此时 MOSFET（或 BJT）中的开关损耗也可以忽略。一般来说，针对给定的电机用实验的办法找到满意的 PWM 频率是一个好办法。

如何使用 PIC 单片机来产生控制 BDC 电机速度的 PWM 信号？一个方法是通过编写专门的汇编或 C 代码来交替翻转输出引脚的电平⁽¹⁾。另一个方法是选择带有硬件 PWM 模块的 PIC 单片机。Microchip 提供的具有该功能的模块为 CCP 和 ECCP 模块。许多 PIC 单片机都具有 CCP 和 ECCP 模块。请参见产品选型指南了解具有这些功能模块的器件。

注 1： Microchip 的应用笔记 AN847 给出了使用固件对 I/O 引脚进行脉宽调制的汇编代码例程。

CCP 模块（捕捉比较和 PWM（Capture Compare 和 PWM）的英文缩写）能够在一个 I/O 引脚上输出分辨率为 10 位的 PWM 信号。10 位分辨率意味着模块可以在 0% 至 100% 的范围内实现 2^{10} （即 1024）个可能的占空比值。使用该模块的优点是它能在 I/O 引脚上自主产生 PWM 信号，这样解放了处理器，使之有时间完成其他任务。CCP 模块仅要求开发者对模块的参数进行配置。配置模块包括设置频率和占空比寄存器。

ECCP 模块（增强型捕捉比较和 PWM（Enhanced Capture Compare 和 PWM）的英文缩写）不仅能提供 CCP 模块的所有功能，还可以驱动全桥或半桥电路。ECCP 模块还具有自动关断功能和可编程死区延时。

注： Microchip 的应用笔记 AN893 给出了配置 ECCP 模块来驱动 BDC 电机的详细说明。该应用笔记中还包含有固件和驱动电路示例。

反馈机制

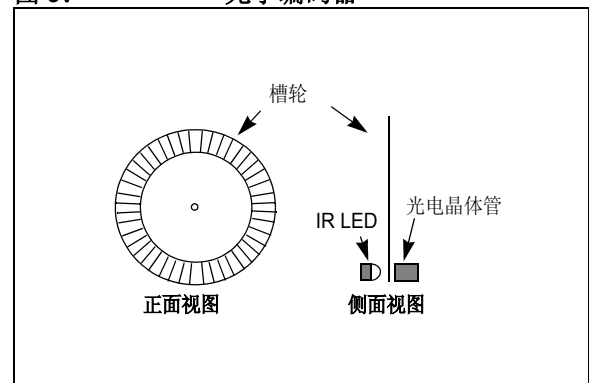
虽然 BDC 电机的速度一般与占空比成正比，但不存在完全理想的电机。发热、换向器磨损以及负载均会影响电机的速度。在需要精确控制速度的系统中引入某种反馈机制是个好主意。

速度控制可以两种方式实现。第一种方式是使用某种类型的速度传感器。第二种方式是使用电机产生的 BEMF 电压。

传感器反馈

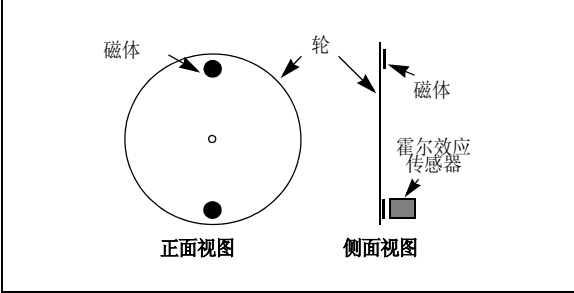
有多种传感器可用于速度反馈。最常见的是光学编码器和霍尔效应传感器。光学编码器由多个组件组成。在电机非驱动端的轴上安装一个槽轮。一个红外 LED 在轮的一侧提供光源，一个光电晶体管在轮的另一侧对光线进行检测（见图 9）。通过轮中槽隙的光线会使光电晶体管导通。转轴转动时，光电晶体管会随着光线通过轮槽与否导通和关断。晶体管通断的频率表征电机的速度。在电机发生移位的应用中，还将使用光学编码器来反馈电机位置。

图 9： 光学编码器



霍尔效应传感器也被用来提供速度反馈。与光学编码器类似，霍尔效应传感器需要电机上连有一个旋转元件，并且还需要一个静止元件。旋转元件是一个外缘安装有一个或多个磁体的转轮。静止的传感器检测经过的磁体，并产生 TTL 脉冲。图 10 显示了霍尔效应传感器的基本组成部分。

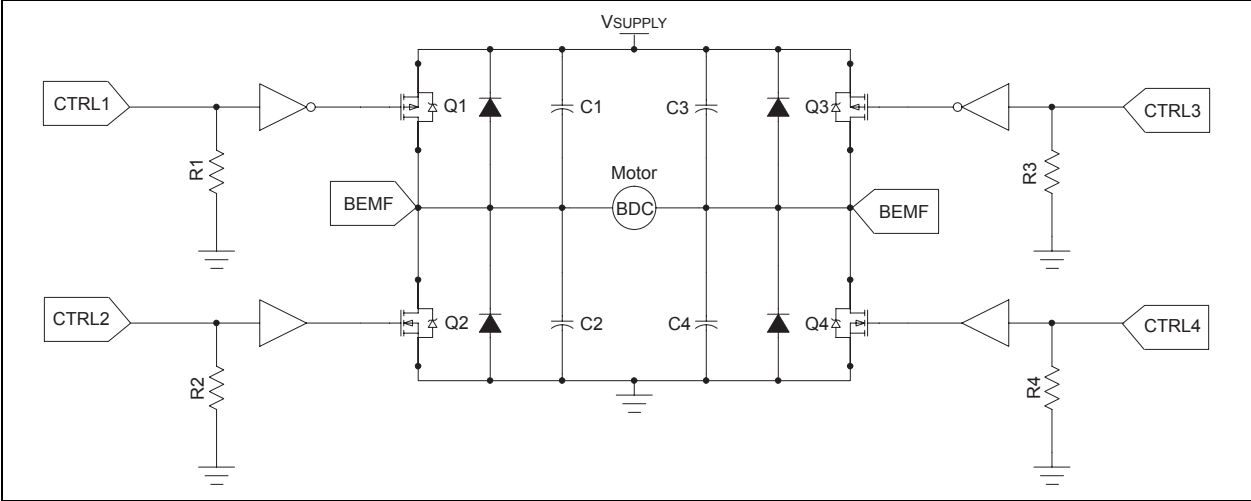
图 10: 霍尔效应传感器



反电磁通量（BEMF）

提供 BDC 电机的快速反馈的另一种形式是 BEMF 电压测量。BEMF 电压和速度成正比。图 11 显示了在双向驱动电路中测量 BEMF 电压的位置。一个分压器用于使 BEMF 电压下降到 0-5V 范围内，这样才能被模数转换器读取。BEMF 电压是在 PWM 脉冲之间，当电机的一端悬空而另一端接地时测量的。在这种情况下，电机充当发电机，并且产生与速度成正比的 BEMF 电压。

图 11: 反 EMF 电压测量



由于效率和材料不同，所有 BDC 电机的行为会略有不同。实验是确定给定电机速度下 BEMF 电压的最好方法。电机转轴上的反射带有助于数字转速计测量电机的转速（单位为 RPM）。在读取数字转速计时测量 BEMF 电压将获取电机速度和 BEMF 电压的关系。

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------------|
| 注： | Microchip 的应用笔记 AN893 提供了使用 PIC16F684 读取 BEMF 电压的固件和电路示例。 |
|-----------|-----------------------------------------------------------|

结论

有刷直流电机的使用和控制都非常简便，因此它的设计周期较短。PIC 单片机，特别是具有 CCP 或 ECCP 模块的单片机是驱动 BDC 电机的理想之选。

参考资料

AN893 *Low-Cost Bidirectional Brushed DC Motor Control Using the PIC16F684*。

AN847 *RC Model Aircraft Motor Control*。

www.howstuffworks.com

www.engin.umich.edu/labs/csdl/me350/motors/dc/index.html

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。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《数字器件千禧版权法案 (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。在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中或以其他方式转让任何许可证。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Accuron、dsPIC、KEELOQ、KEELOQ 徽标、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、PRO MATE、rfPIC 和 SmartShunt 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

FilterLab、Linear Active Thermistor、MXDEV、MXLAB、SEEVAL、SmartSensor 和 The Embedded Control Solutions Company 均为 Microchip Technology Inc. 在美国的注册商标。

Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、In-Circuit Serial Programming、ICSP、ICEPIC、Mindi、MiWi、MPASM、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、mTouch、PICkit、PICDEM、PICDEM.net、PICtail、PIC³² 徽标、PowerCal、PowerInfo、PowerMate、PowerTool、REAL ICE、rfLAB、Select Mode、Total Endurance、UNI/O、WiperLock 和 ZENA 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 是 Microchip Technology Inc. 在美国的服务标记。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2008, Microchip Technology Inc. 版权所有。

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==

Microchip 位于美国亚利桑那州 Chandler 和 Tempe 与位于俄勒冈州 Gresham 的全球总部、设计和晶圆生产厂及位于美国加利福尼亚州和印度的设计中心均通过了 ISO/TS-16949:2002 认证。公司在 PIC[®] MCU 与 dsPIC[®] DSC、KEELOQ[®] 跳码器件、串行 EEPROM、单片机外设、非易失性存储器和模拟产品方面的质量体系流程均符合 ISO/TS-16949:2002。此外，Microchip 在开发系统的设计和生产方面的质量体系也已通过了 ISO 9001:2000 认证。



MICROCHIP

全球销售及服务中心

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://support.microchip.com>
网址: www.microchip.com

亚特兰大 Atlanta
Duluth, GA

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

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
Farmington Hills, MI
Tel: 1-248-538-2250
Fax: 1-248-538-2260

科科莫 Kokomo
Kokomo, IN
Tel: 1-765-864-8360
Fax: 1-765-864-8387

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

圣克拉拉 Santa Clara
Santa Clara, CA
Tel: 408-961-6444
Fax: 408-961-6445

加拿大多伦多 Toronto
Mississauga, Ontario,
Canada
Tel: 1-905-673-0699
Fax: 1-905-673-6509

亚太地区

亚太总部 **Asia Pacific Office**
Suites 3707-14, 37th Floor
Tower 6, The Gateway
Harbour City, Kowloon
Hong Kong
Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

中国 - 北京
Tel: 86-10-8528-2100
Fax: 86-10-8528-2104

中国 - 成都
Tel: 86-28-8665-5511
Fax: 86-28-8665-7889

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

中国 - 南京
Tel: 86-25-8473-2460
Fax: 86-25-8473-2470

中国 - 青岛
Tel: 86-532-8502-7355
Fax: 86-532-8502-7205

中国 - 上海
Tel: 86-21-5407-5533
Fax: 86-21-5407-5066

中国 - 沈阳
Tel: 86-24-2334-2829
Fax: 86-24-2334-2393

中国 - 深圳
Tel: 86-755-8203-2660
Fax: 86-755-8203-1760

中国 - 武汉
Tel: 86-27-5980-5300
Fax: 86-27-5980-5118

中国 - 厦门
Tel: 86-592-238-8138
Fax: 86-592-238-8130

中国 - 西安
Tel: 86-29-8833-7252
Fax: 86-29-8833-7256

中国 - 珠海
Tel: 86-756-321-0040
Fax: 86-756-321-0049

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-536-4818
Fax: 886-7-536-4803

台湾地区 - 台北
Tel: 886-2-2500-6610
Fax: 886-2-2508-0102

台湾地区 - 新竹
Tel: 886-3-572-9526
Fax: 886-3-572-6459

亚太地区

澳大利亚 Australia - Sydney
Tel: 61-2-9868-6733
Fax: 61-2-9868-6755

印度 India - Bangalore
Tel: 91-80-4182-8400
Fax: 91-80-4182-8422

印度 India - New Delhi
Tel: 91-11-4160-8631
Fax: 91-11-4160-8632

印度 India - Pune
Tel: 91-20-2566-1512
Fax: 91-20-2566-1513

日本 Japan - Yokohama
Tel: 81-45-471-6166
Fax: 81-45-471-6122

韩国 Korea - Daegu
Tel: 82-53-744-4301
Fax: 82-53-744-4302

韩国 Korea - Seoul
Tel: 82-2-554-7200
Fax: 82-2-558-5932 或
82-2-558-5934

马来西亚 Malaysia - Kuala Lumpur
Tel: 60-3-6201-9857
Fax: 60-3-6201-9859

马来西亚 Malaysia - Penang
Tel: 60-4-227-8870
Fax: 60-4-227-4068

菲律宾 Philippines - Manila
Tel: 63-2-634-9065
Fax: 63-2-634-9069

新加坡 Singapore
Tel: 65-6334-8870
Fax: 65-6334-8850

泰国 Thailand - Bangkok
Tel: 66-2-694-1351
Fax: 66-2-694-1350

欧洲

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

丹麦 Denmark-Copenhagen
Tel: 45-4450-2828
Fax: 45-4485-2829

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

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

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

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

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

英国 UK - Wokingham
Tel: 44-118-921-5869
Fax: 44-118-921-5820

01/02/08