TB3155

采用 8 位 PIC® 单片机实现具有二极管仿真的多相交错式 PWM 控制器

作者： *June Anthony Asistio*
Franz Thalheimer
Microchip Technology Inc.

简介

本技术简介论述了基于 Microchip 的 8 位 PIC® 单片机实现多相 PWM 控制器的方法。

这个目标可通过使用8位单片机器件中的特定可自由配置的独立于内核的外设（Core Independent Peripheral，CIP）来实现。不同的开关电源（Switch Mode Power Supply， SMPS）拓扑需要不同的外设配置。数字 PWM 模块（CCP或PWM）和互补输出发生器（Complementary Output Generator，COG）用于生成各种开关配置所需的PWM输出波形。运算放大器（Operational Amplifier，OPA）、可编程斜坡发生器（Programmable Ramp Generator， PRG）和模拟高速比较器（Analog High-Speed Comparator， CMP）等外设模块用于建立独立的模拟反馈环路，支持电压模式、峰值和平均电流模式。另外还有其他胶合逻辑外设模块，例如可编程逻辑单元（Configurable Logic Cell， CLC）或数字信号调制器（Digital Signal Modulator， DSM），它们让设计人员能够组合信号，以便解决特定的设计难题或处理复杂的故障和工作条件。因此，带有 CIP 的 8 位 MCU 器件非常适合驱动和控制单级和多级降压 / 正激、升压和降升压类型的转换器，它们在固定和各种可变频率模式下以及单相和多相配置下运行。

本技术简介将介绍必需的外设装配和配置，用于通过二极管仿真驱动和控制固定频率、峰值电流模式控制以及同步多相升压转换器拓扑，作为此类和类似多相实现的最佳实践示例。

多相交错式 PWM 工作

电源转换器的多相配置通常用于在多个相同并行拓扑之间分流电流，以实现系统级尺寸、滤波和效率优化。各个相位共享相同的输入和输出，它们各自开关时间通常相移 360°/n （其中 n = 相位数）。

在两相交错式同步升压转换器中，两个 PWM 信号相互 180° 反相工作。转换器在峰值电流模式控制下工作，有一个共同的外部电压环，为两个独立内部峰值电流环提供控制参考。实现了相位之间的适当电流平衡、短路保护以及在连续导通和断续导通模式之间转换时的低变化。

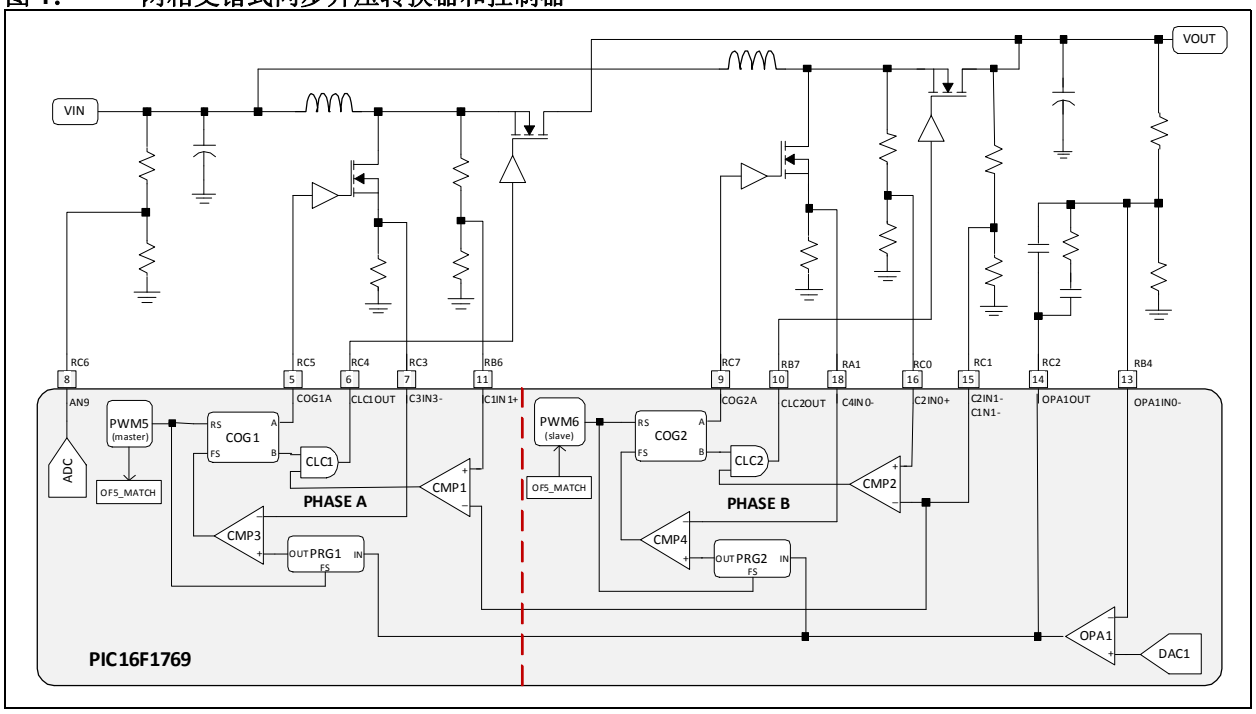
对于同步整流，则还需要采取更多措施，防止在断续导通模式下电感停止放电时电流回流到输入端。当电感电流为零时，上桥臂同步整流开关必须关闭。这种仿真二极管功能的技术称为二极管仿真。

两相交错式同步升压控制器

图 1 显示了所提出的带有同步整流的两相交错式升压转换器。单片机的内部框图显示了如何配置和连接 CIP，以形成交错式升压控制器。

© 2017 Microchip Technology Inc.

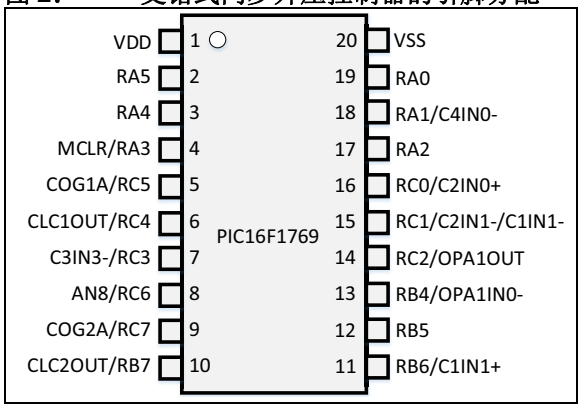
图 1： 两相交错式同步升压转换器和控制器



单片机选择

选择了 PIC16F1769 是因为它包含实现这种拓扑所需的全部外设。图 2 显示了充当交错式同步升压控制器 PIC16F1769 的引脚分配。

图 2： 交错式同步升压控制器的引脚分配



推荐的设计工具

MPLAB® X IDE 的 MPLAB 代码配置器（MPLAB Code Configurator， MCC）插件可用于设置 8 位单片机的外设，让它们作为交错式同步升压转换器的控制器工作。可通过 MCC 逐个设置外设，并将它们连接在一起，从而实现这个目标，如图 1 中的内部框图所示。

本技术简介中使用的 MPLAB X 项目可从 www.microchip.com 下载。完整列表请参见**附录 A：“MPLAB X 项目文件”**。

© 2017 Microchip Technology Inc.

设计两相交错式同步升压控制器

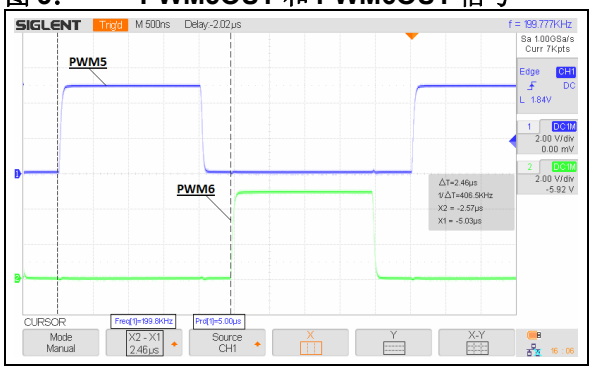
建立开关单元

两相 PWM 信号可以使用 PWM5 和 PWM6 模块生成。每个模块以相同工作频率和固定占空比工作，唯一差异是 PWM6 信号前沿相对于 PWM5 信号前沿延时 180°。

为了便于说明，PWM5 和 PWM6 可配置为 200 kHz 的开关频率和 40% 的最大占空比。 PWM6 自 PWM5 的 180° 相位延时可以通过以单次从动模式操作 PWM6 来实现，其触发器来自 OF5_match。OF5_match 是来自主控PWM5的偏置时间事件，设置为2.5 us。这些PWM MCC 设置请参见本文档的**附录 B：“MCC 设置”**。

图 3 显示了 PWM5OUT 和 PWM6OUT 的波形，分别从 RA2 和 RB5 进行监控。

图 3： PWM5OUT 和 PWM6OUT 信号



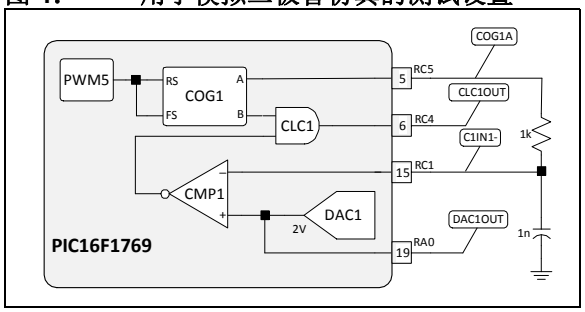
添加二极管仿真

实现二极管仿真的方法是将COG外设的互补输出COGxB馈送到两输入 AND 逻辑 CLC。AND 逻辑的另一个输入连接到比较器的输出，该比较器检测上桥臂同步开关是否已进入零电流状态。比较器的输入横跨开关进行连接。通过这种方式，可以监控零电流状况，在零电流期间关闭开关。

模拟二极管仿真

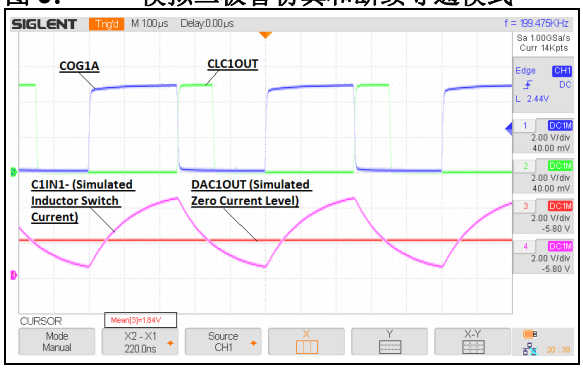
为了模拟这种场景，可以实现图 4 中所示的测试设置。PWM5 配置为生成方波，占空比为 50%，频率为 200 kHz。 RC 积分器连接到输出 COG1A。由此生成模拟电感开关电流的锯齿波形。它与 COG1A 进行同步，锯齿信号注入到比较器的输入 C1IN1-。DAC1OUT 电平用于模拟电流的零电平。DAC1OUT连接到C1IN+输入。只要锯齿波形触及 DAC1OUT 电平，CMP1 的输出即为低电平。在断续模式（Discontinuous mode，DCM）期间，CLC1OUT 保持低电平，这样可以实现二极管仿真。

图 4： 用于模拟二极管仿真的测试设置



在 DCM 下模拟二极管仿真的结果可参见图 5。在实际应用中，同步开关由 CLC1OUT 控制， PWM 开关则由 COG1A 控制。

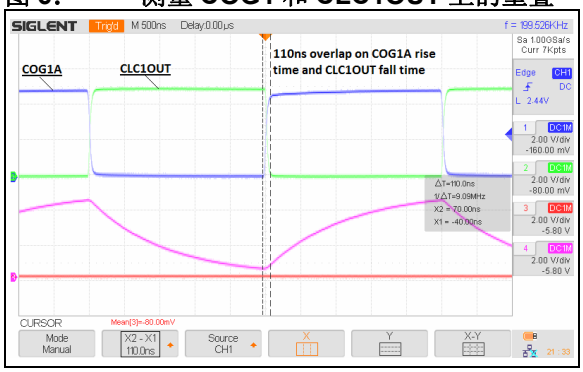
图 5： 模拟二极管仿真和断续导通模式



请注意，在 COG1A 的上升时间和 CLC1OUT1 的下降时间内，可能发生重叠。在实际应用中必须防止这种情况发生，因为这意味着在这个短重叠中，PWM 开关和同步开关都处于导通。在 COG1A 的下降时间和 CLC1OUT 的上升时间内，情况同样如此；可能发生这种重叠。

COG1 的上升事件和下降事件必须添加一个死区，以确保不会发生此短导通时间。通过模拟导通模式（Conduction mode， CCM），测量 COG1A 上升和 CLC1OUT 下降之间的重叠间隙，可检查重叠。图 6 显示重叠时间量为 110 ns。

图 6： 测量 COG1 和 CLC1OUT 上的重叠



在图 7 和图 8 中，可以看到为 COG 的上升事件和下降事件添加 110 ns 死区的效果。

图 7： COG1 的上升事件上添加的死区

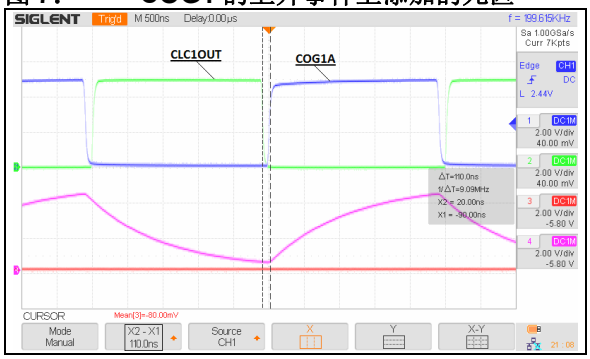
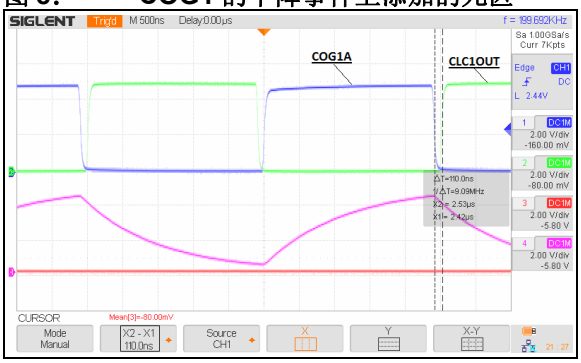


图 8： COG1 的下降事件上添加的死区



建立反馈环路

在图 1 中，创建反馈环路的方式是对输出电压进行采样，并将其馈送到误差放大器 OPA1。误差放大器的参考电压由 DAC1 设置。使用 2 类补偿器来补偿输出电压和参考电压之间的误差电压量。

关闭环路

误差电压馈送到电流比较器 CMP3 和 CMP4。每个比较器将误差电压与来自每个相位的 PWM 开关电流进行比较。为了保持稳定性，在将误差电压馈送到比较器之前，使用 PRG1 和 PRG2 将斜率补偿添加到误差电压。

其他多相 PWM 控制器配置

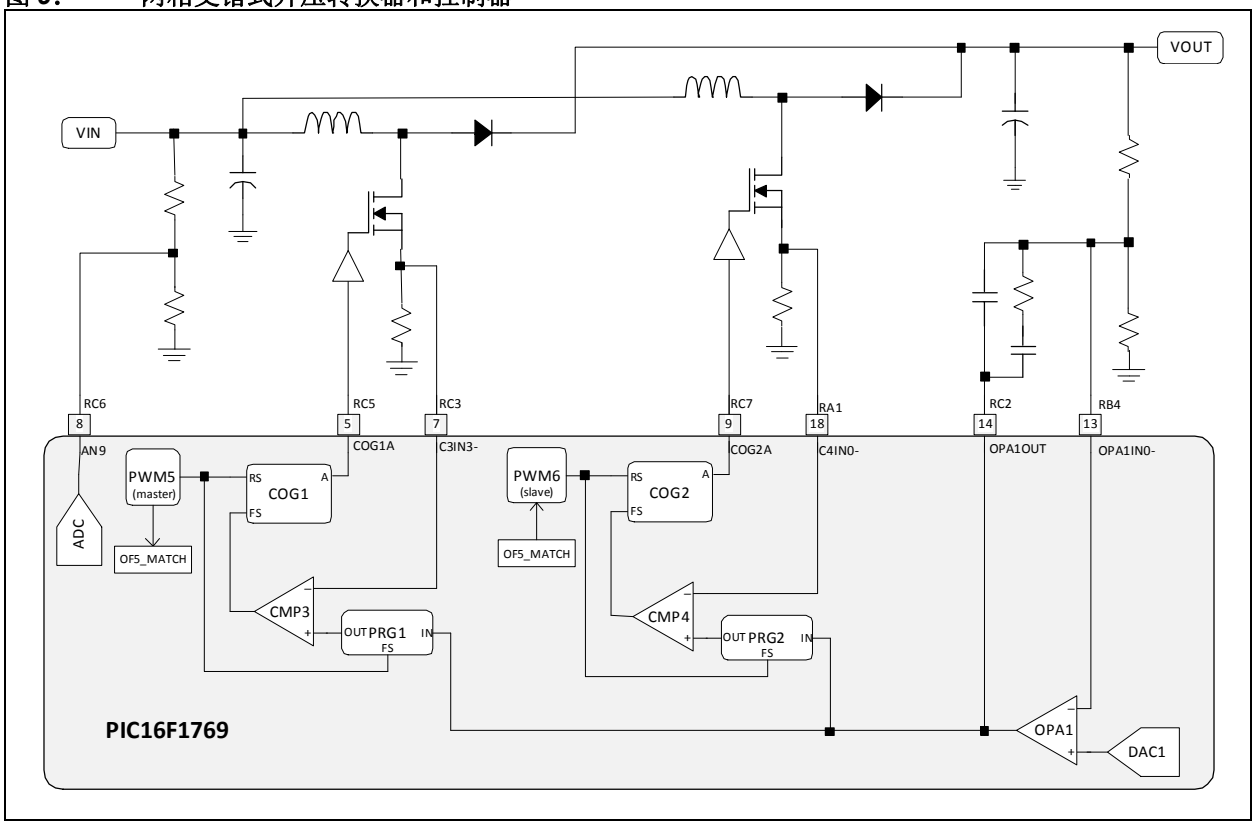
不同的 SMPS 拓扑需要对控制器设计进行不同的修改。下面我们将讨论不同多相 SMPS 拓扑的外设配置。有关 SMPS 拓扑理论和设计的更多信息，请参见 AN1114《开关电源（SMPS）拓扑（第一部分）》（DS01114）和 AN1207 《开关电源 （SMPS）拓扑 （第二部分）》（DS01207）。

两相交错式升压控制器

如果交错式升压拓扑不包括同步整流，则可移除用于二极管仿真的 CMP1-CLC1 和 CMP2-CLC2，以简化外设配置；无需再生成 COG1B 和 COG2B 输出。请参见图 9。

© 2017 Microchip Technology Inc.

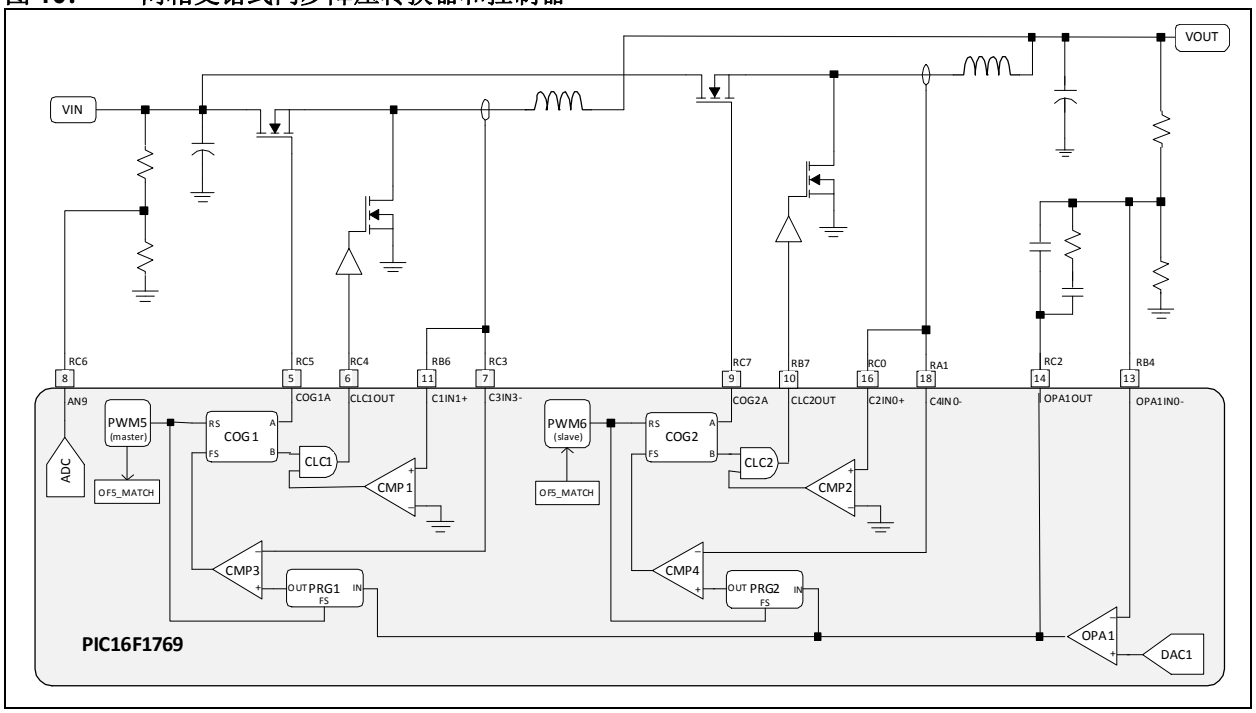
图 9： 两相交错式升压转换器和控制器



两相交错式同步降压控制器

图 10 显示如何将 PIC16 单片机配置为两相交错式同步降压控制器。

图 10：　两相交错式同步降压转换器和控制器

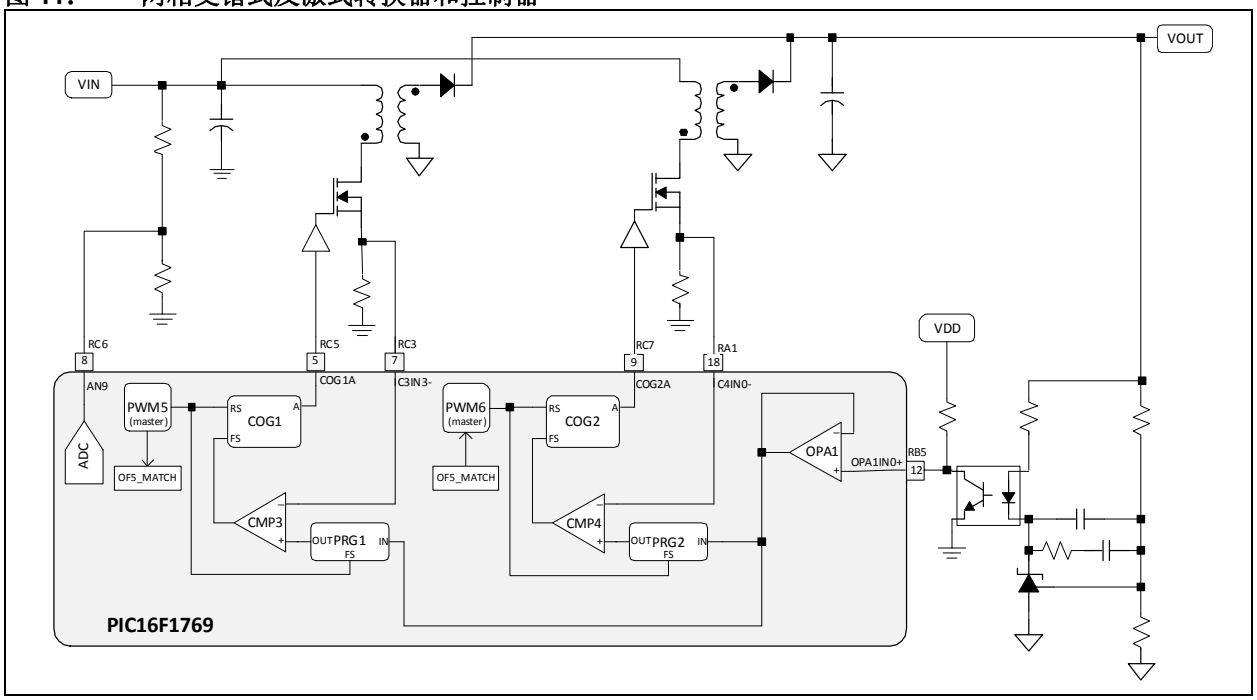


© 2017 Microchip Technology Inc.

两相交错式反激式转换器控制器

图 11 显示如何将 PIC16 单片机配置为两相交错式反激式控制器。OPA1 设置为单位增益放大器，它是可选的。集电极可通过 RC2 直接连接到 PRG1IN0 和 PRG2IN1。

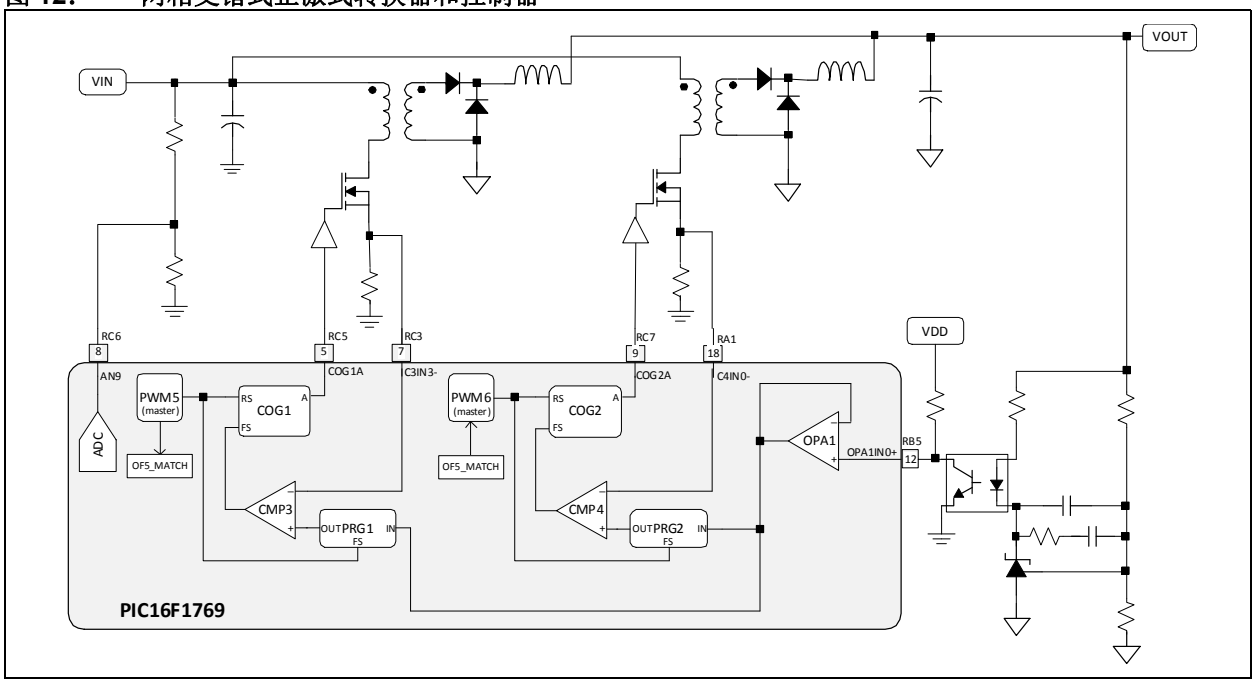
图 11：　两相交错式反激式转换器和控制器



两相交错式正激式控制器

图 12 显示如何将 PIC16 单片机配置为两相交错式正激式控制器。OPA1 设置为单位增益放大器，它是可选的。集电极可通过 RC2 直接连接到 PRG1IN0 和 PRG2IN1。

图 12：　两相交错式正激式转换器和控制器



结论

本技术简介讨论了用于多相PWM工作的Microchip 8位PIC 单片机的功能，以及如何能够在 8 位 MCU 上实现二极管仿真，这是使用同步整流器的转换器必需的一项功能。它还阐明了多相交错式 PWM 控制器的设计如何随着选定 SMPS 拓扑的复杂性不同而发生变化。

© 2017 Microchip Technology Inc.

附录 A： MPLAB X 项目文件

本技术简介的 MCC 配置文件可从 Microchip 网站下载：
（http://www.microchip.com）。

说明	文件名
1. 两相交错式同步升压控制器项目文件 （图 1 和图 2）	2PhIntrlvSyncBoost-PIC16F1769.x
2. 二级管仿真测试外设项目文件 （图 4）	DiodeEmuTest-PIC16F1769.x

附录 B： MCC 设置

图 B-1： PWM5 和 PWM6 频率、占空比和相位设置

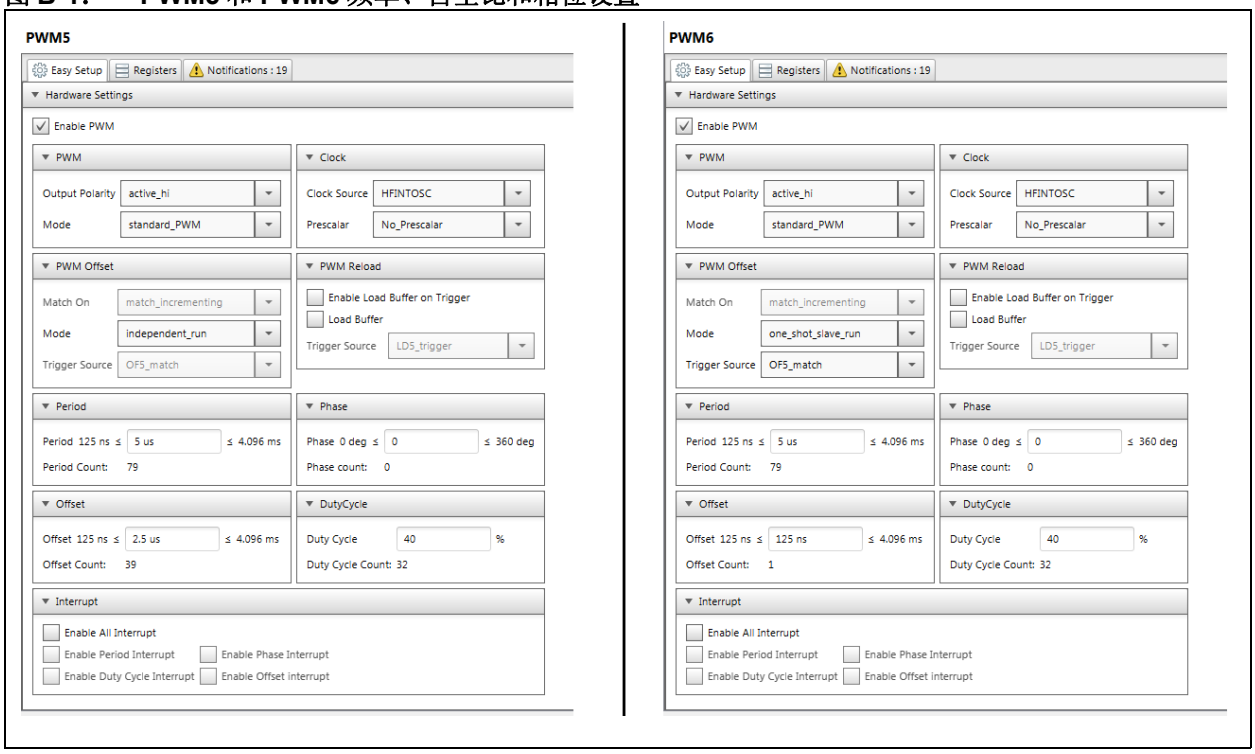
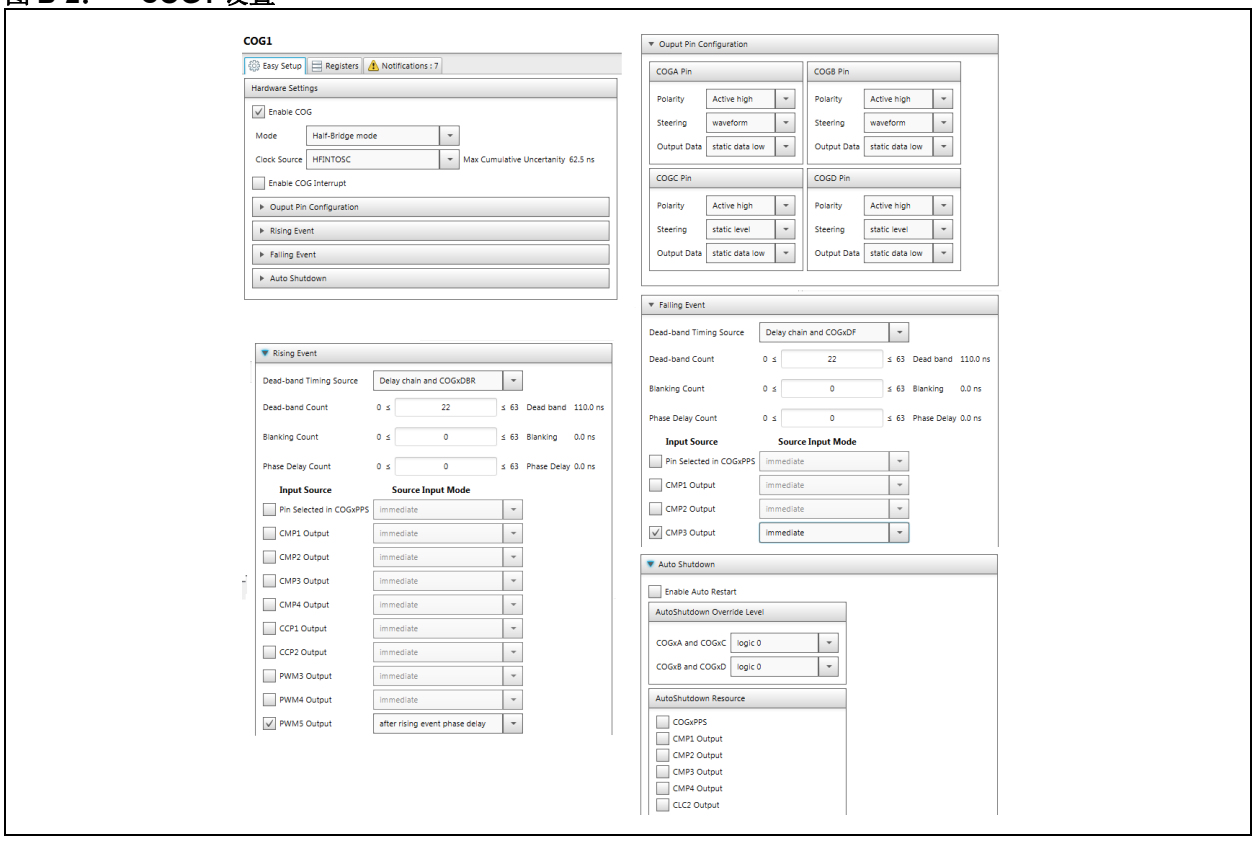


图 B-2： COG1 设置



© 2017 Microchip Technology Inc.

图 B-3： PRG 斜率补偿设置

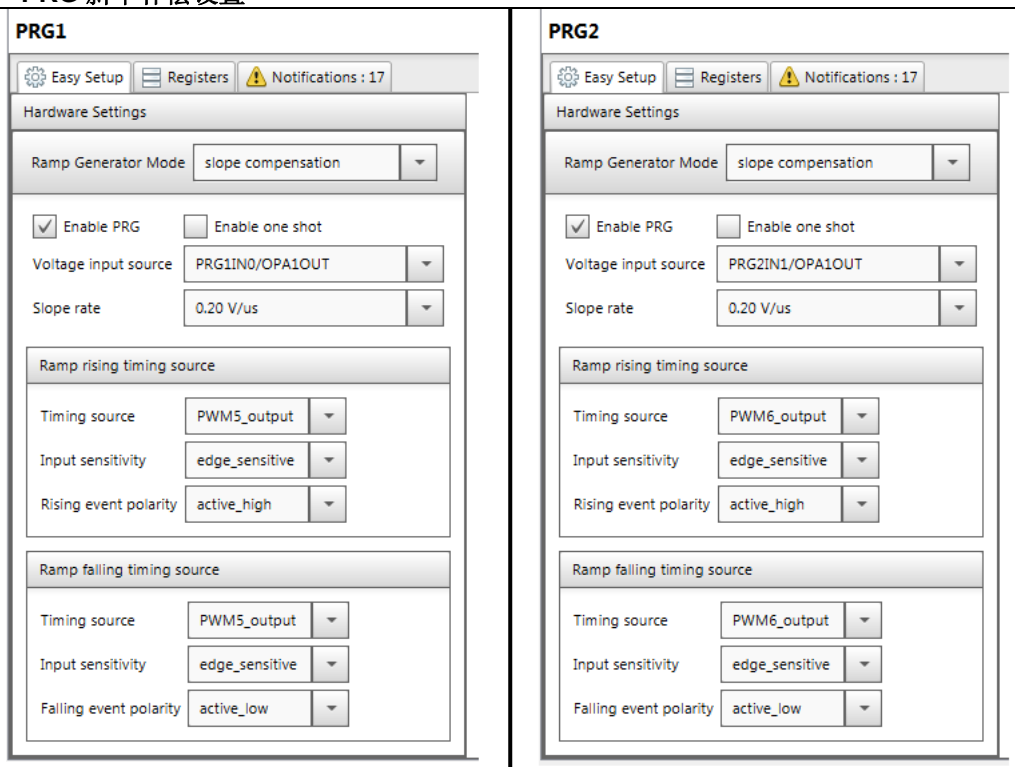


图 B-4： OPA1 设置

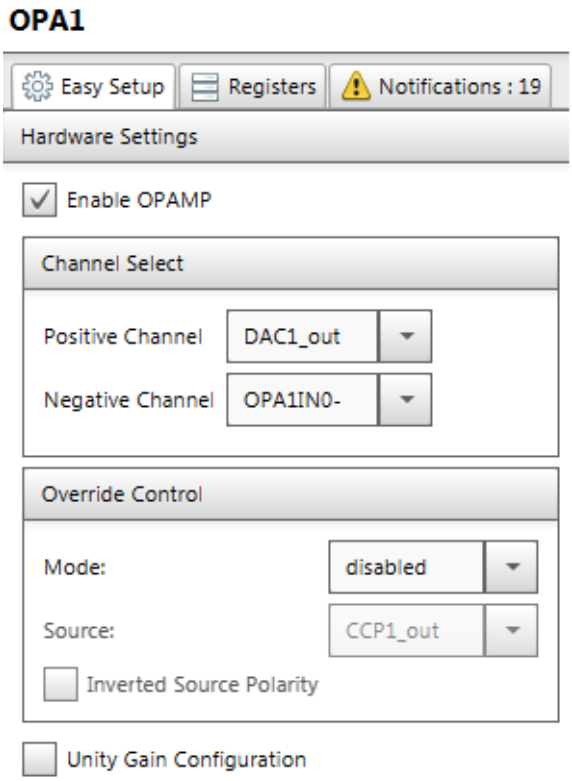


图 B-5： DAC1 电压参考设置

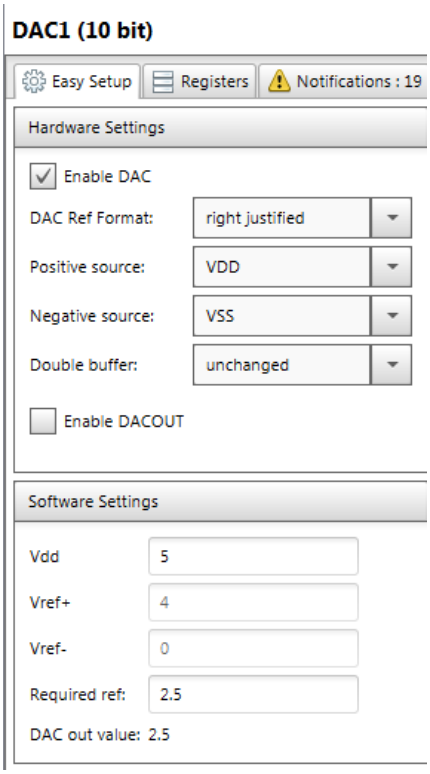
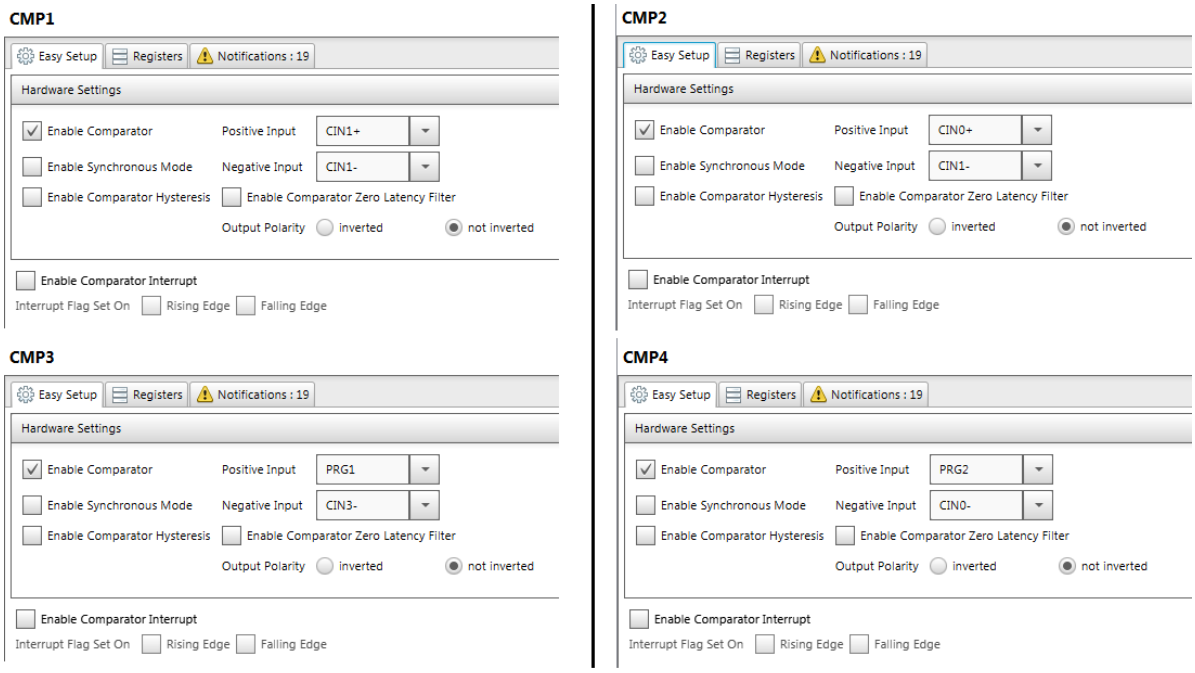


图 B-6： CMP 设置



© 2017 Microchip Technology Inc.

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 《数字器件千年版权法案 （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，不得暗中或以其他方式转让任何许可证。

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-16949:2009 认证。Microchip 的 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严格遵守公司的质量体系流程。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。

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
═ ISO/TS 16949 ═

商标

Microchip 的名称和徽标组合、 Microchip 徽标、 AnyRate、 AVR、 AVR 徽标、 AVR Freaks、 BeaconThings、 BitCloud、 CryptoMemory、 CryptoRF、 dsPIC、 FlashFlex、 flexPWR、 Heldo、 JukeBlox、 KEELOQ、 KEELOQ 徽标、 Kleer、 LANCheck、 LINK MD、 maXStylus、 maXTouch、 MediaLB、 megaAVR、 MOST、 MOST 徽标、 MPLAB、 OptoLyzer、 PIC、 picoPower、 PICSTART、 PIC32 徽标、 Prochip Designer、 QTouch、 RightTouch、 SAM-BA、 SpyNIC、 SST、 SST 徽标、 SuperFlash、 tinyAVR、 UNI/O 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

ClockWorks、 The Embedded Control Solutions Company、 EtherSynch、 Hyper Speed Control、 HyperLight Load、 IntelliMOS、mTouch、Precision Edge 和 Quiet-Wire 均为 Microchip Technology Inc. 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、BodyCom、chipKIT、chipKIT 徽标、 CodeGuard、 CryptoAuthentication、 CryptoCompanion、 CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、 DAM、 ECAN、 EtherGREEN、 In-Circuit Serial Programming、 ICSP、 Inter-Chip Connectivity、 JitterBlocker、 KleerNet、KleerNet 徽标、Mindi、MiWi、motorBench、MPASM、 MPF、 MPLAB Certified 徽标、 MPLIB、 MPLINK、 MultiTRAK、 NetDetach、 Omniscient Code Generation、 PICDEM、 PICDEM.net、PICkit、PICtail、PureSilicon、QMatrix、RightTouch 徽标、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 Inc. 在美国和其他国家或地区的商标。

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

Silicon Storage Technology 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。

© 2017, Microchip Technology Inc. 版权所有。

ISBN：978-1-5224-2470-3

全球销售及服务网点

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: 45-4450-2828
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: 49-7131-67-3636

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: 47-7289-7561

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

© 2017 Microchip Technology Inc.