

使用 CIP 实现斜率补偿的优势

作者: *Gheorghe Turcan*
Microchip Technology Inc.

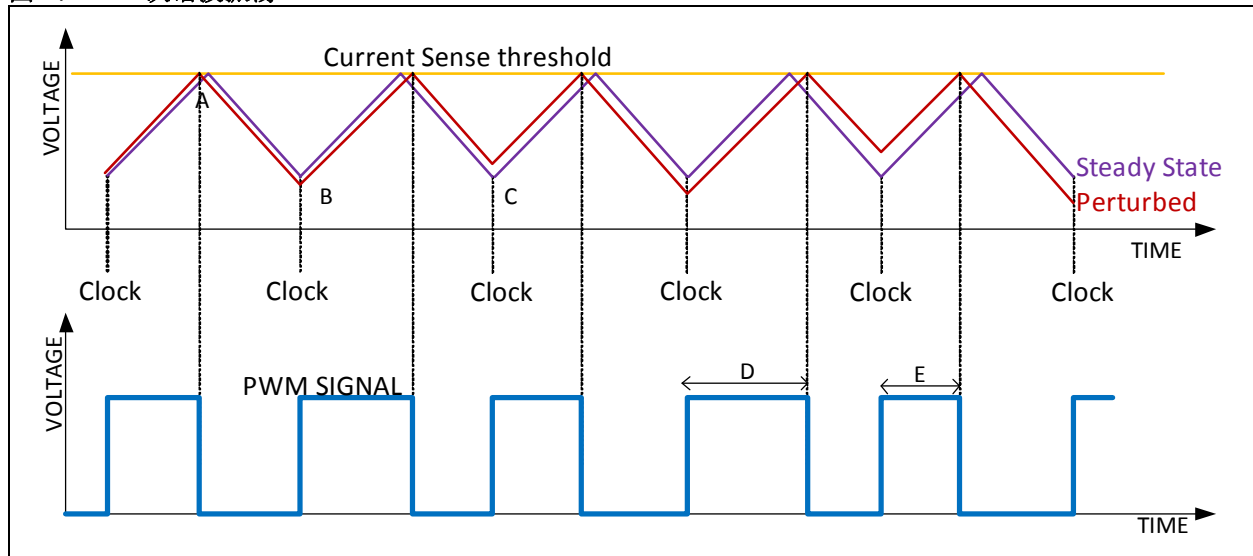
简介

在开关电源 (switched-mode power supplies, SMPS) 中, 电流模式控制相对于电压模式控制具有诸多优势, 但存在一个问题——电流环可能发生振荡。这是众所周知的现象, 称为次谐波振荡。解决谐波振荡问题的方法是将斜率补偿斜坡加到电流反馈中, 或从误差电压中减去斜坡。PIC16F176X/7X 单片机 (MCU) 带有可编程斜坡发生器 (Programmable Ramp Generator, PRG) 外设, 能够产生斜率补偿斜坡。本应用笔记描述了其他 SMPS 控制器采用的迭加斜率补偿的方法, 以及这些解决方案的缺点。它说明了单片机的斜坡发生器如何克服这些缺点。

工作原理

当占空比接近 50% 时, 会发生次谐波振荡 (甚至在 45% 时也可能发生), 这种振荡表现为长脉冲后跟短脉冲。图 1 显示了电流环振荡的特性, 时钟启动开关的导通时间, 在占空比大于 50% 时, 控制波形 (橙色) 终止导通时间, 并调节峰值电流。稳定状态电流波形 (紫色) 显示它如何在没有扰动的情况下工作, 扰动电感电流 (红色) 显示系统如何振荡。扰动将达到相同的峰值电流 (A), 但在下一个时钟周期中, 扰动变为负 (B), 幅度增大。另一个开关周期后, 扰动再次为正 (C), 但进一步增大。这将导致 PWM 信号具有长脉冲 (D), 后跟短脉冲 (E), 系统发生振荡。众所周知, 电流环不稳定的解决方案是加上补偿斜坡 (斜率补偿)。

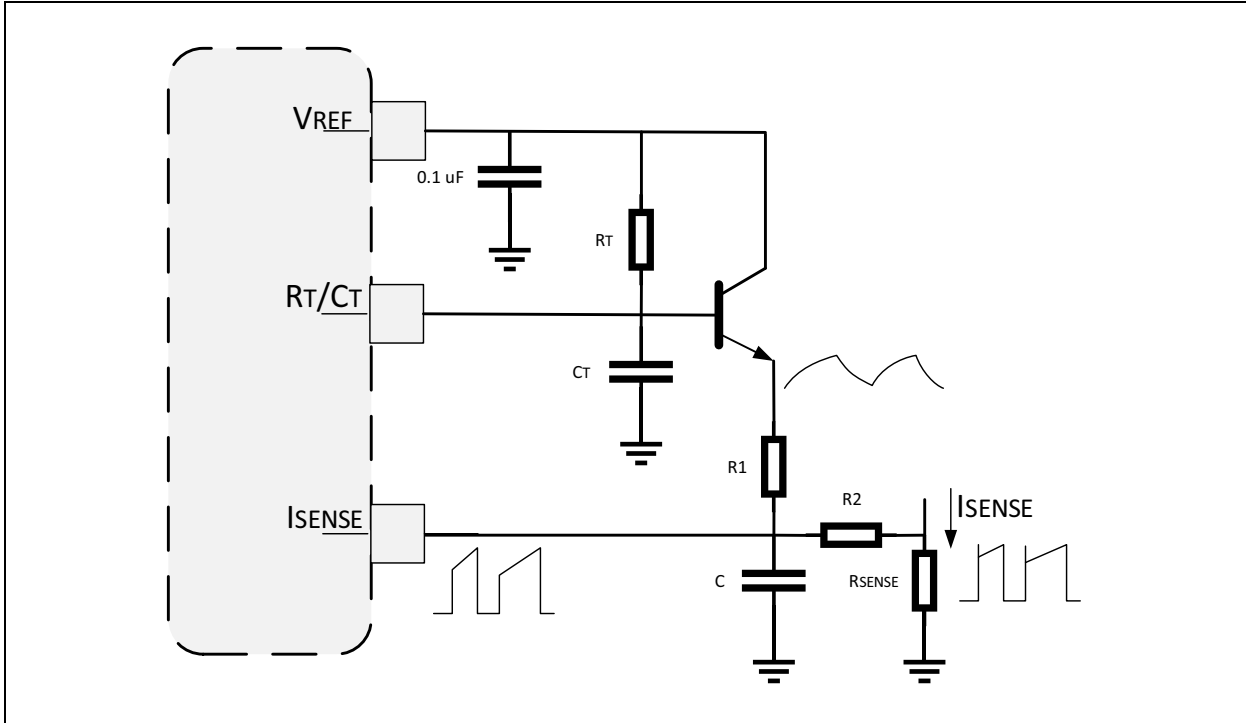
图 1: 次谐波振荡



当前解决方案

为了进行比较，我们选择了可用于控制隔离式和非隔离式 SMPS 的传统控制器，它们并非专用于特定拓扑或功率范围。传统解决方案，例如 UC3843a 或 KA3842B 甚至更新版本的 UCC3803 控制器，都使用 R_T/C_T 外部元件产生的时钟信号来获取补偿斜坡，如图 2 所示。

图 2: 传统解决方案中的斜率补偿实现



此解决方案目前仍在采用，因为很多工程师还在使用传统器件进行设计，但它存在一些问题。

1. 由于布线不当，用于生成斜率补偿的外部元件容易受到噪声影响。这将影响 I_{SENSE} 信号，该信号应当尽可能干净，这样才能具有良好的精度和控制。
2. 产生斜率补偿的 R_T/C_T 线路也很容易受到噪声影响，提早终止可能造成时钟周期变化；这将影响斜坡偏置和斜率。
3. 斜率补偿斜坡是从 R/C 元件产生的，这使得斜坡成为非线性。然后，将斜率补偿斜坡加到 I_{SENSE} 中，这种非线性能够产生占空比抖动。
4. 由于需要外部元件来产生斜率补偿，这会增加解决方案的 BOM 成本、额外布线设计工作量和总成本。

5. 只能通过更改外部电阻的值来配置斜坡电平，从而限制任何修改或更新。
6. 在调试过程中，信号隔离也是一大难题。如果其中一个信号（滤波的 I_{SENSE} 或斜率补偿信号）存在噪声问题，则它们无法单独进行分析以查明问题所在，这会延长设计时间。

在 TLE6389 等较新型控制器中，斜率补偿斜坡由固定内部电流源产生，如图 3B 所示。而在 LM5021 或 LTC3803 等其他型号中，可通过更改外部电阻值来配置内部电流源，然后将其加到 I_{SENSE} 波形上，如图 3C 和图 3A 所示。

这些解决方案只能解决上文所述的一部分问题。

图 3A: 传统控制器 (LTC3803) 中的内部斜率补偿

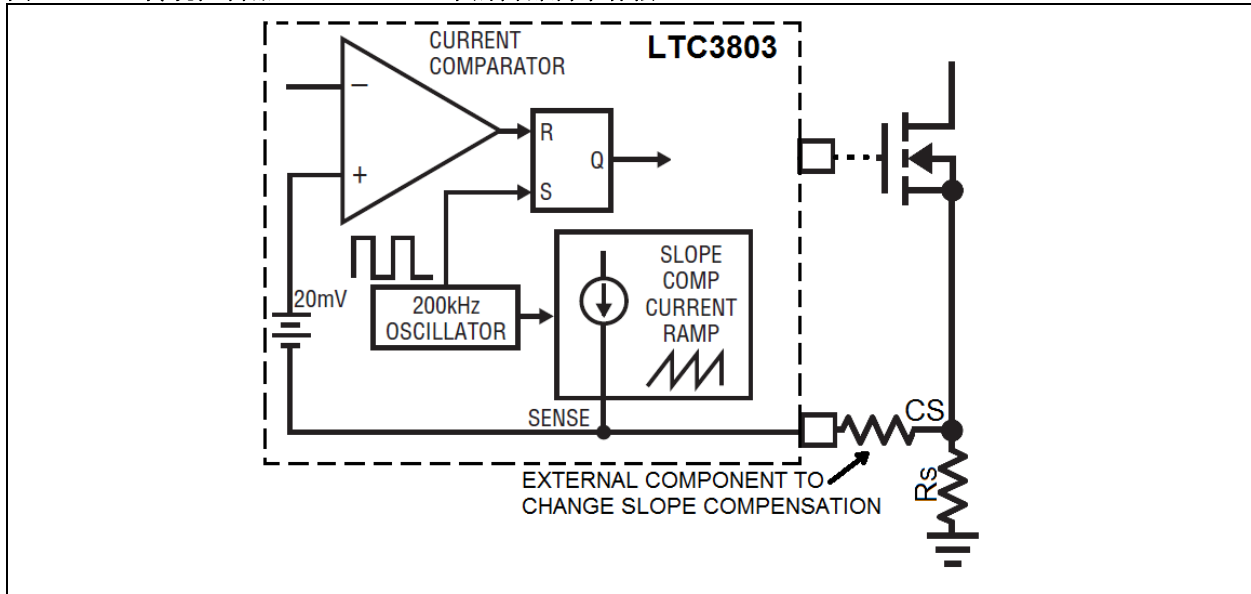


图 3B: 传统控制器 (TLE6389) 中的内部斜率补偿

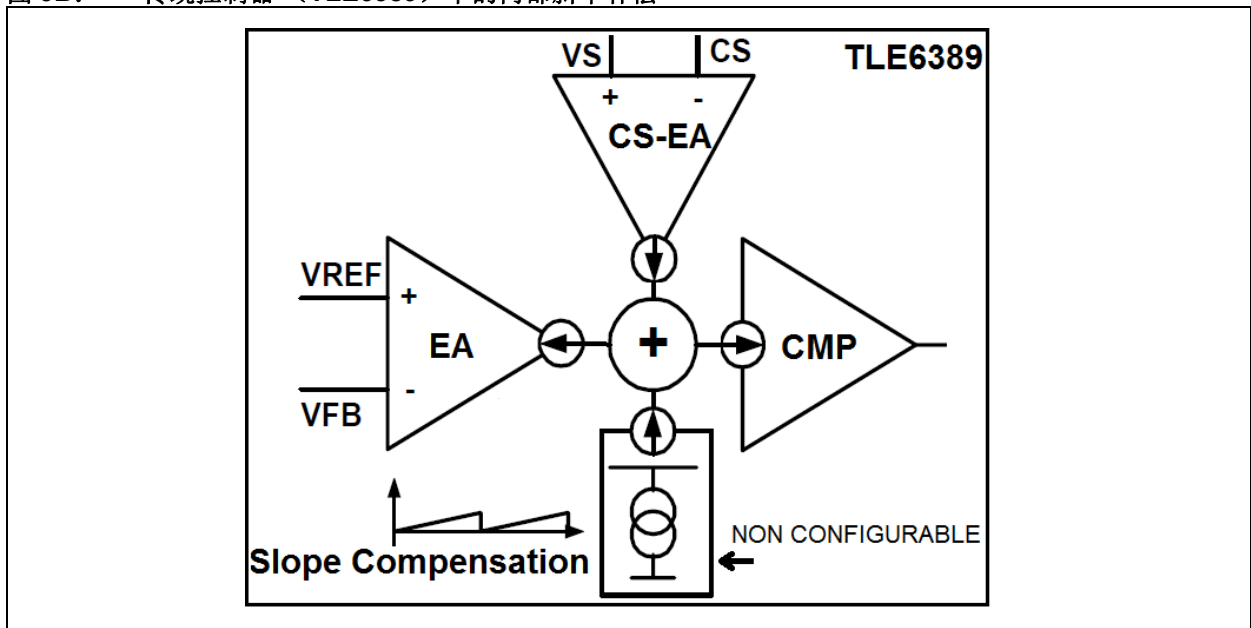
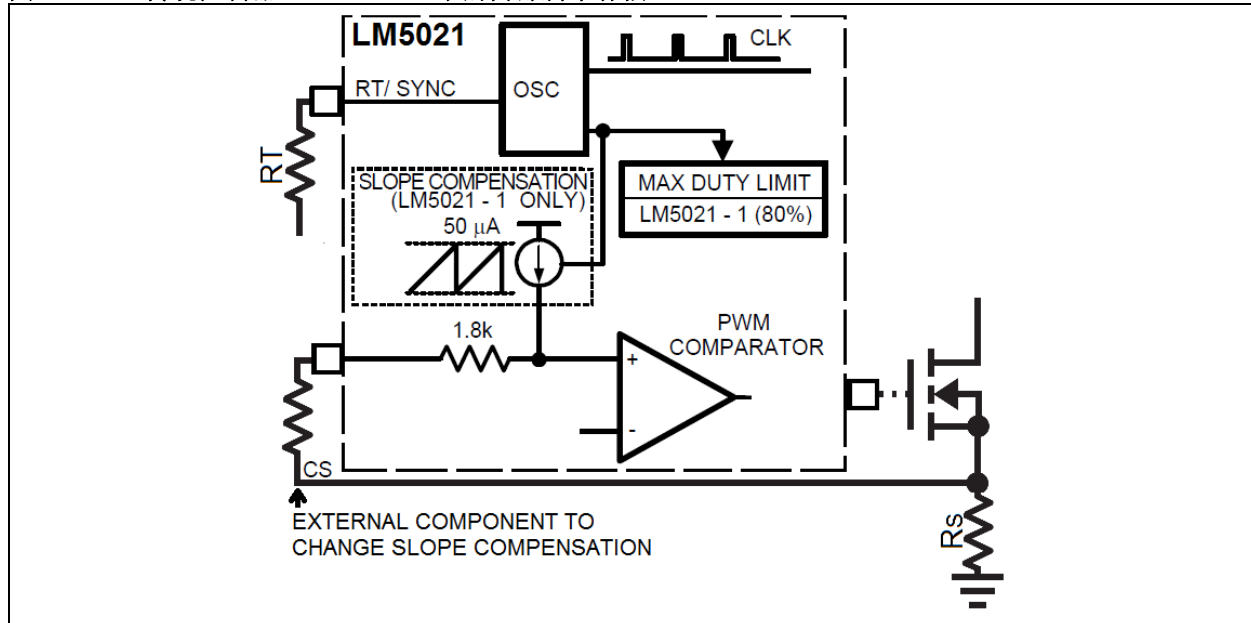


图 3C: 传统控制器 (LM5021) 中的内部斜率补偿



这些解决方案解决了线性问题，以及来自时钟的噪声问题，如果是固定版本，还能消除对外部元件的需求。仍然存在的问题包括：缺乏可配置性（如果是固定版本）；需要外部元件；由于外部元件的布线产生噪声；只能通过外部元件变化来进行配置；难以进行调试，因为斜率补偿斜坡在内部加到 ISENSE 上，而没有机会测量实际斜坡。

虽然上述问题并不妨碍 SMPS 应用工作，但大多数设计人员还是倾向于能够正确解决这些问题的解决方案。

CIP 解决方案

带有 SMPS 专用外设的 Microchip 单片机（例如：PIC16F176X/7X）能够实现电流模式控制环。这些器件具有内部模拟和数字外设，独立于内核工作，能够内部连接；它们被称为独立于内核的外设（Core Independent Peripheral, CIP）。运算放大器、比较器、输出发生器和斜率补偿器等 CIP 都是模拟和异步的，能够进行连接，在单片机内部获取完整的 SMPS 控制器。

有关这些器件的更多信息，更好地了解如何将它们用于 SMPS 应用，请参见 TB3140 《可编程斜坡发生器》（DS90003140A_CN），网址为 www.microchip.com/design-centers/8-bit/peripherals/intelligent-analog/slope-comp-program-ramp。

可编程斜坡发生器（PRG）外设用于生成需要的斜率补偿信号。该 CIP 可通过多种方式进行配置，提供众多不同的斜率值。它可以内部连接到其他 CIP，其输出可以传到输出引脚，以便进行单独测量。对于电流模式控制的 SMPS 应用，PRG 可以满足斜率补偿功能，对于电压模式控制的 SMPS 应用，则可满足锯齿信号功能。

PRG 使用内部电流源来产生上升和下降的线性斜坡，并将它们加到信号中。在大多数 SMPS 控制器中，斜坡加到 ISENSE 信号中，但利用这项功能，斜率补偿斜坡既可作为上升斜坡加到 ISENSE 中，也可作为下降斜坡从反馈误差信号中减去，这样可以实现斜率补偿波形从电流波形的分离。PRG 非常灵活，可将斜坡加到其他信号和电流限制中。它允许多个条件斜坡启动或停止，甚至允许锯齿信号生成，以便进行电压模式控制。

如何在 ISENSE 波形上使用 PRG 作为典型斜坡的示例如图 4 所示。

上升和下降事件可从多个内部 CIP 触发。在本例中，使用 COG 输出来获得斜坡，当脉冲高度变大时，斜坡开始上升，它还与占空比值同步下降。在此解决方案中，斜率补偿斜坡被加到 ISENSE 波形中，因此斜坡无法单独测量，但可以加到误差反馈波形中，如图 5 所示。使用内部运算放大器作为缓冲，设计人员能够独立于 ISENSE 信号测量斜率补偿。

图 4: 在 ISENSE 波形中实现的斜率补偿

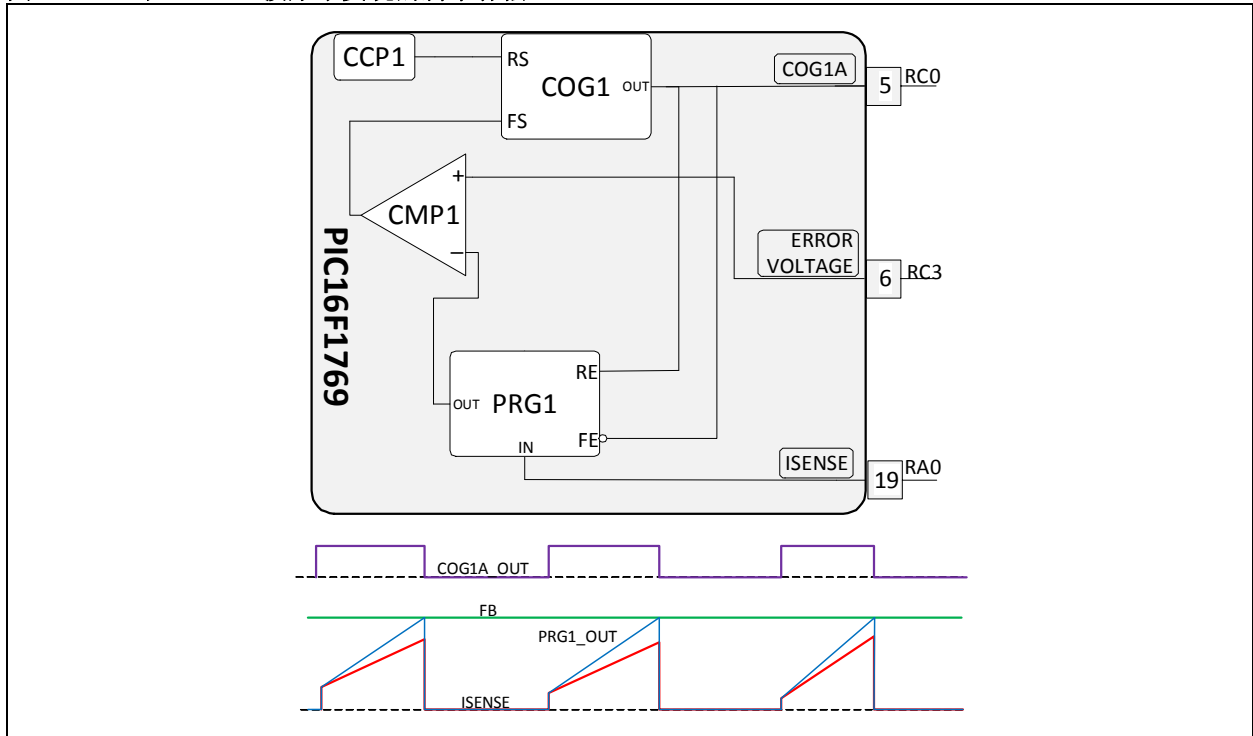
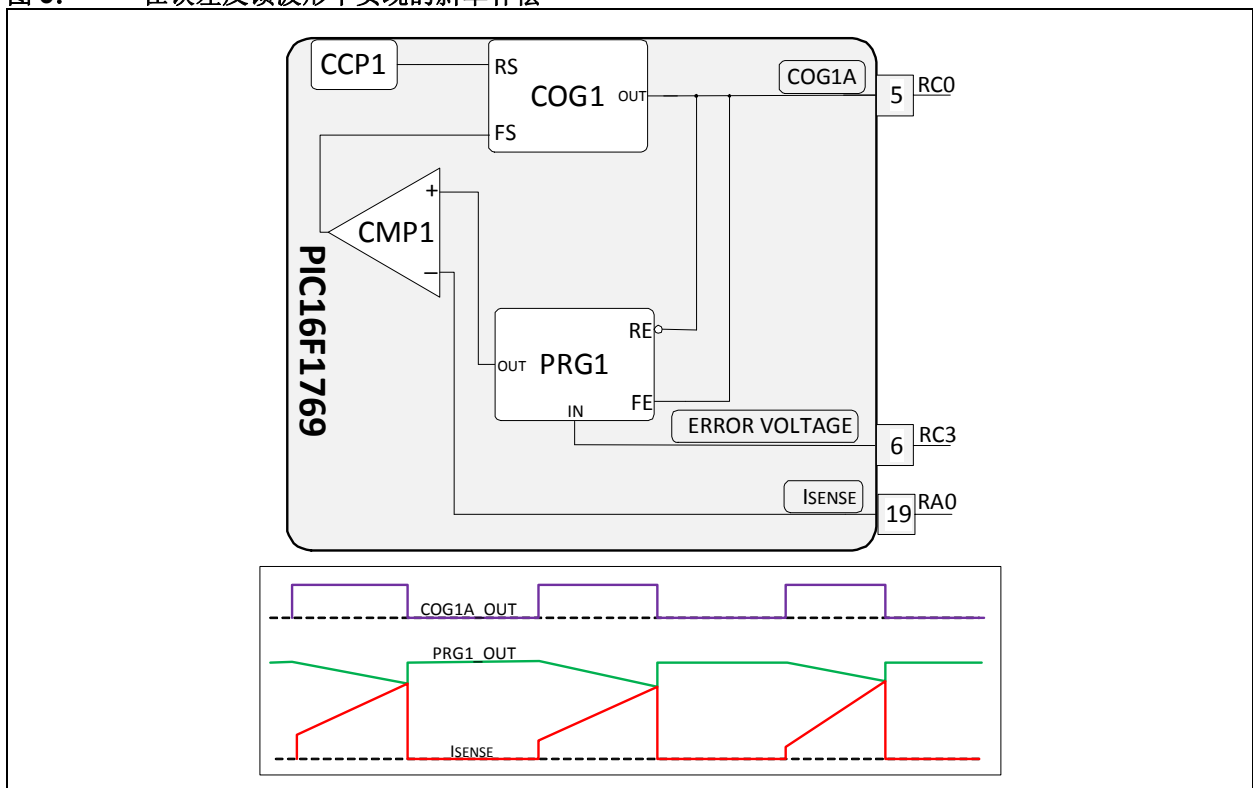


图 5: 在误差反馈波形中实现的斜率补偿



AN2375

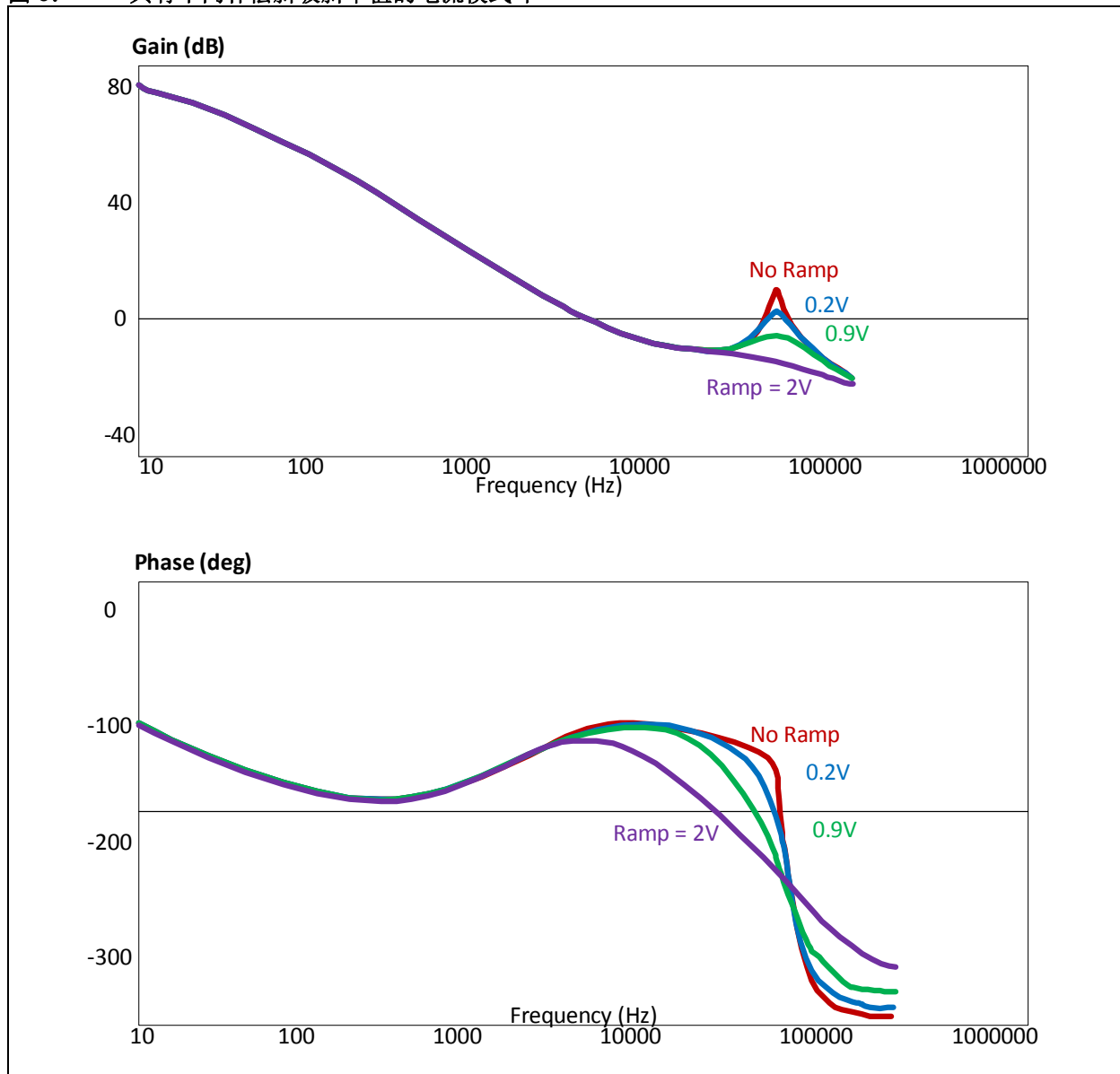
在 SMPS 应用中，能够更改斜坡值是非常重要的，它的效果可在电流模式环中看到，如图 6 所示。没有实现斜率补偿的电路的波特图以红色标记，这种特性描述了不稳定的 SMPS 控制。加上斜坡后，我们可以看到改进：使用 0.2V 斜坡，情况有所改善，但系统仍然不稳定；使用 0.9V 斜坡，系统处于稳定的边界，任何变化仍然可能导致不稳定；使用 2V 斜坡，系统保持稳定。通常，SMPS 控制器需要外部元件来更改斜坡值，但使用 PRG CIP，更改可在单片机内部完成。

在设计和测试阶段，CIP 带来的补偿斜坡的斜率变化非常重要。看似一旦设置了斜率，就不再需要此项功能了，但当 SMPS 具有很大范围的输出功率时，此项功能会很有用，因为设计人员可以实现一种功能，以通过输出功率来调节斜坡。

这样可以解决设置过大固定斜坡的难题，虽然在高功率下可很好地提供补偿，但对于低功率的情况，该斜坡过大。此项功能的另外一个用途是在更加复杂的智能 SMPS 设计中，它可在多个电流模式控制环之间切换，甚至在电流模式控制和电压模式控制环之间切换。

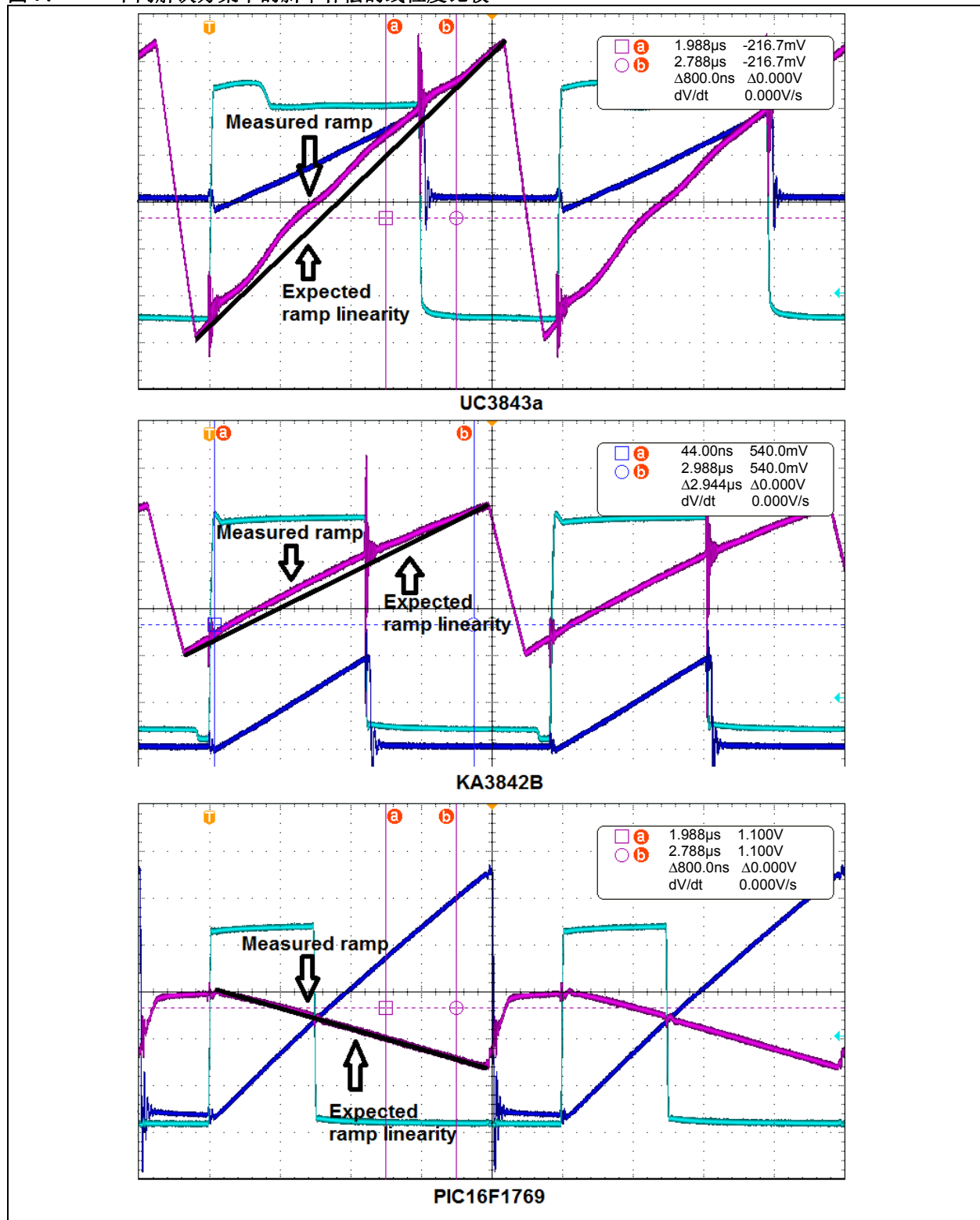
使用这种 CIP 可以实现更智能的控制环管理。

图 6: 具有不同补偿斜坡斜率值的电流模式环



与外部元件相比，使用 CIP 获取的斜率补偿的线性度也是非常出色的，如图 7 所示。

图 7: 不同解决方案中的斜率补偿的线性度比较



AN2375

这些结果表明，使用 PRG CIP 实现的斜率补偿解决了在其他解决方案中遇到的所有问题，并为设计人员提供了内部连接的更大灵活性，以便实现智能控制环管理。

使用这种外设，再也无需其他解决方案中常用的额外外部元件，它实现了斜率补偿和修改的典型用途，可以改进特定解决方案。

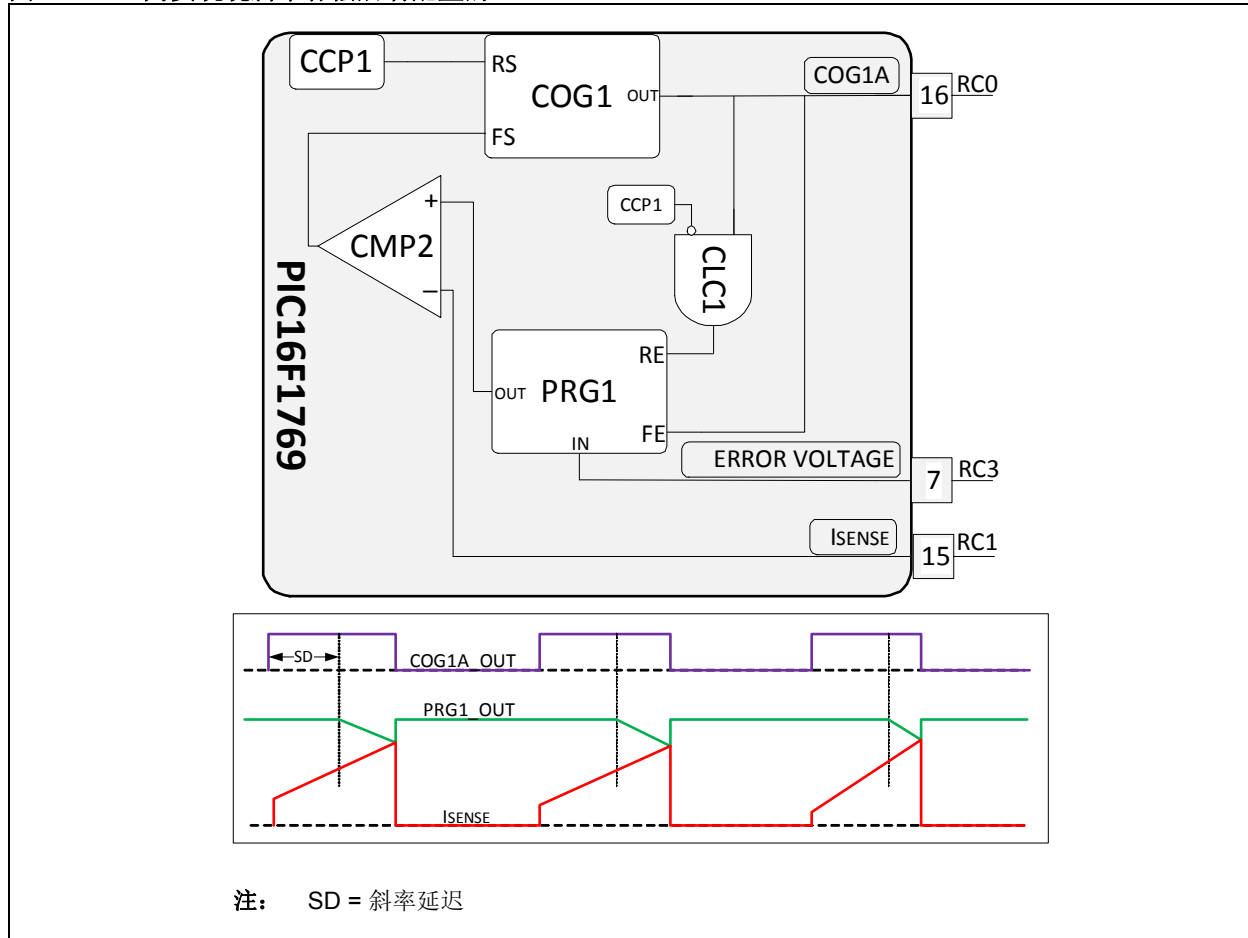
示例 1:

需要对 SMPS 解决方案进行修改的一个例子是斜坡的晚启动。

在此种 SMPS 设计中，我们需要较小的斜率补偿斜坡，但可用的最小斜坡仍然过大。通过斜坡的晚启动，最小值可以缩小到我们需要的值，如图 8 所示，斜率补偿斜坡作为下降斜坡，加到误差反馈信号上。由于晚启动不到开关周期的 40%，因此在没有实现斜坡的时间段内，不会发生次谐波振荡。

CCP1 设置了斜率延迟 (Slope Delay, SD)，因此用户能够自由地选择开始使用斜坡的开关周期百分比。在本例中，SD 是占空比的 30%。一旦 COG 关闭了 MOSFET，斜坡将会复位；这样就消除了由于延迟导致的任何错误触发。

图 8: 为实现晚斜率补偿启动配置的 PRG



此配置的测量结果如图 9 和 10 所示。

图 9 显示了误差反馈波形和电流感应波形顶部的斜率补偿波形；这个斜坡实现了无干扰进入电流模式稳定状态。图 10 显示，即便在 80% 的占空比下，也能在反激式转换器上无干扰进入稳定状态。

图 9： 为晚斜率补偿启动配置的结果

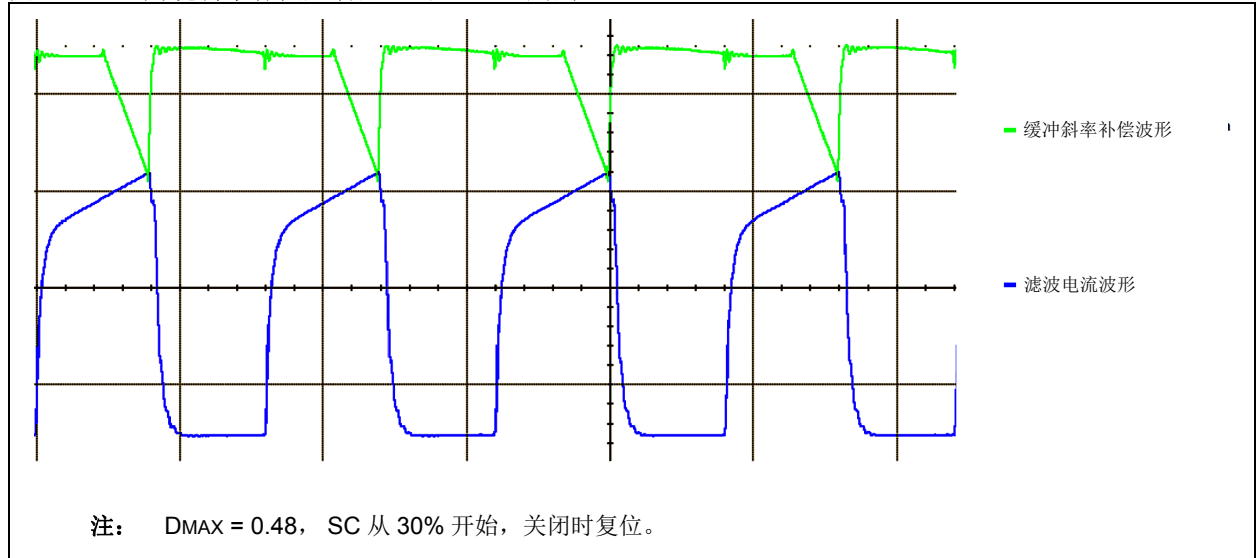
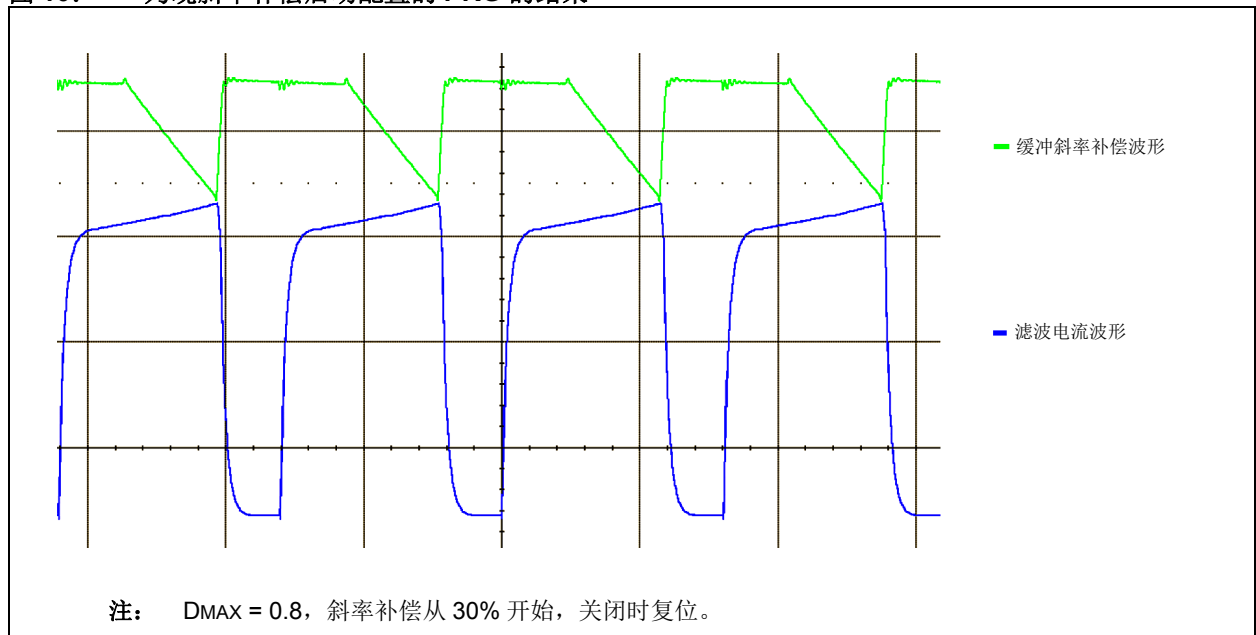


图 10： 为晚斜率补偿启动配置的结果



AN2375

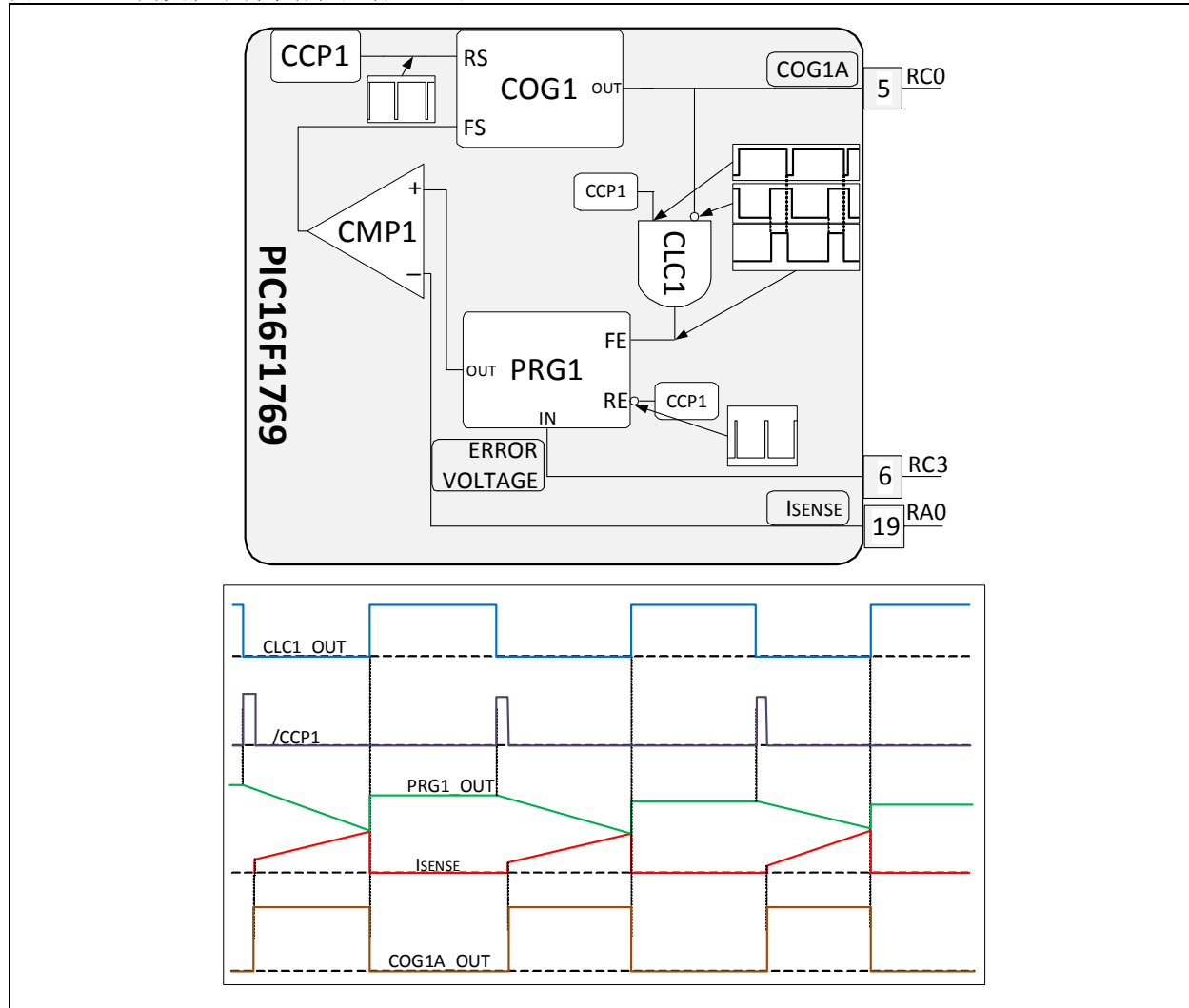
示例 2:

使用 CIP 实现解决方案改进的另一个很好例子是斜率补偿的早启动。

在本例中，也使用 PRG 产生斜率补偿，作为下降斜坡加到反馈误差信号中，但其他内部 CIP 连接到 PRG，产生自定义斜坡，为占空比控制提供更高的精度。

图 11 显示了用于实现早启动斜坡的内部 CIP 连接。此解决方案可在占空比限制方面实现更高的精度，而其他解决方案很难做到这一点。这只是能够实现这个结果的众多方法的一个示例。

图 11: 为实现早斜率补偿启动配置的 PRG



使用此解决方案时，在 ISENSE 波形上需要良好的滤波器，以便实现精确细致的占空比控制。也可以使用消隐，但最小占空比随后将会提高。

图 12 显示了此解决方案的测量结果，它显示占空比控制非常稳定且无干扰，即便在从开环转换到闭环，或从闭环转换到脉冲跳跃时也是如此，而大多数 SMPS 控制器都会遇到高抖动。

图 12: 为早斜率补偿启动配置的 PRG 的结果

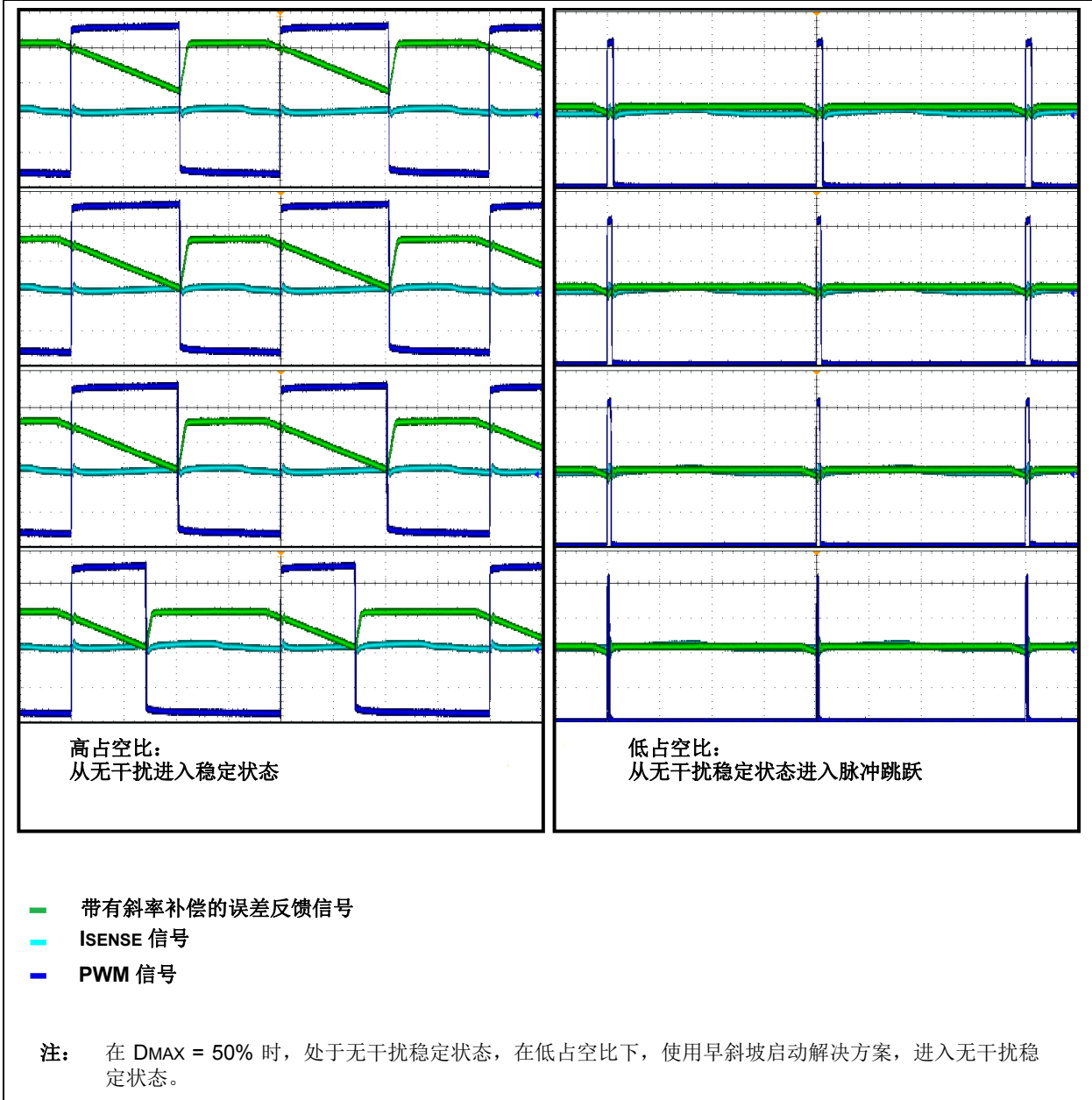
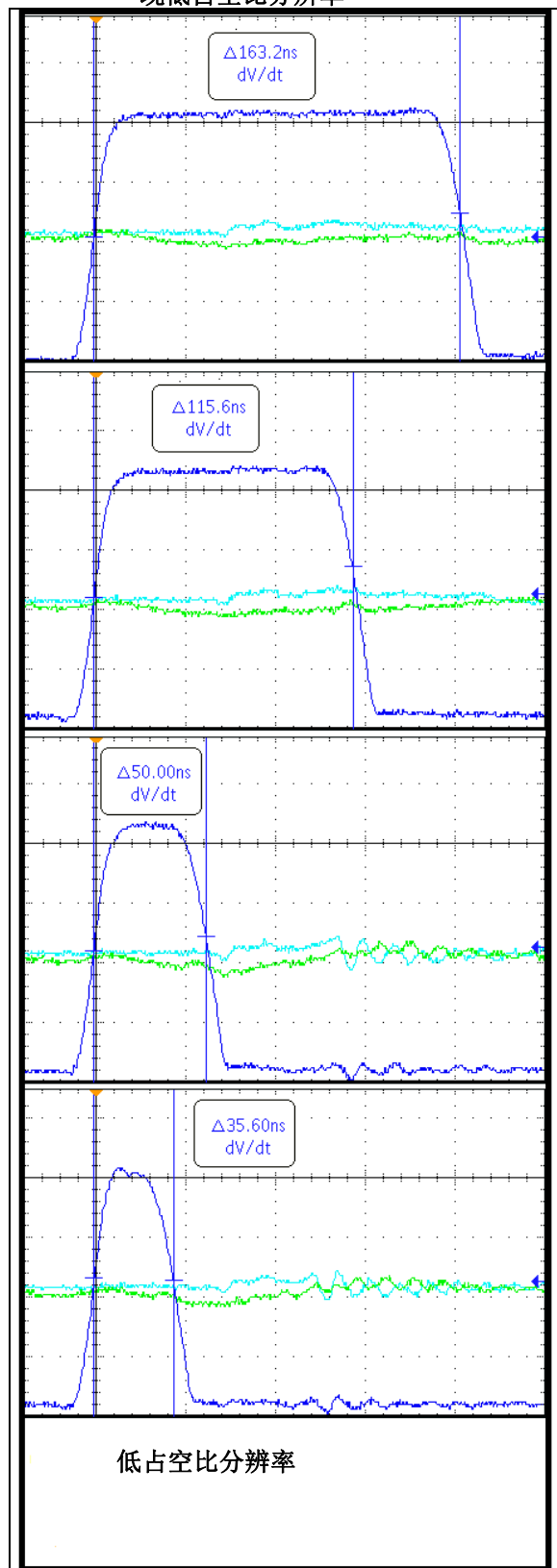


图 13 显示了精确测量时的低占空比分辨率。在这种情况下，ISENSE 波形有良好的滤波器，没有使用消隐，以避免限制最小占空比。解决方案在低至 0.5% 的占空比 ($SWF = 125 \text{ kHz}$) 下展现了良好的控制，还展现了系统的良好稳定性。

图 13: 使用 CIP 利用早斜坡启动解决方案实现低占空比分辨率



结论

当为 SMPS 设计选择了电流模式控制时，斜率补偿非常重要，它可以解决当占空比接近 50% 时出现的次谐波振荡问题。即便控制器的最大占空比限制为 50%，使用斜率补偿也是一种好的做法，因为次谐波振荡甚至在占空比值为 45% 时就会出现。

传统控制器使用的迭加斜率补偿的解决方案可能在某些情况下效果很好，但众所周知，它存在着可能导致不稳定的问题。

使用 PRG 独立于内核的外设的方法可以解决上述所有问题，例如：易受布线噪声干扰、线性度、需要外部元件、配置、时钟噪声、信号隔离，另外它还能提高灵活性和增加更多功能。

使用此解决方案，设计人员能够实现更智能的控制环管理，加快设计速度，轻松进行调试和测量，简化布线设计，还能够利用 CIP 及功能添加内部控制的能力。所有这些都有助于我们构建更加稳定和智能的 SMPS。

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、适用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 and 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: 978-1-5224-1908-2

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

亚太总部 **Asia Pacific Office**
Suites 3707-14, 37th Floor
Tower 6, The Gateway
Harbour City, Kowloon
Hong Kong
Tel: 852-2943-5100

Fax: 852-2401-3431

中国 - 北京
Tel: 86-10-8569-7000
Fax: 86-10-8528-2104

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

中国 - 重庆
Tel: 86-23-8980-9588
Fax: 86-23-8980-9500

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
Fax: 86-571-8792-8116

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: 86-21-3326-8000
Fax: 86-21-3326-8021

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

中国 - 深圳
Tel: 86-755-8864-2200
Fax: 86-755-8203-1760

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

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

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

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2943-5100
Fax: 852-2401-3431

亚太地区

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

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-213-7830

台湾地区 - 台北
Tel: 886-2-2508-8600
Fax: 886-2-2508-0102

台湾地区 - 新竹
Tel: 886-3-5778-366
Fax: 886-3-5770-955

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

印度 India - Bangalore
Tel: 91-80-3090-4444
Fax: 91-80-3090-4123

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

印度 India - Pune
Tel: 91-20-3019-1500

日本 Japan - Osaka
Tel: 81-6-6152-7160
Fax: 81-6-6152-9310

日本 Japan - Tokyo
Tel: 81-3-6880-3770
Fax: 81-3-6880-3771

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

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

法国 France - Saint Cloud
Tel: 33-1-30-60-70-00

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