AN1767

放大器电路中射频电磁干扰的解决方案

作者： *Dragos-George Ducu*
Microchip Technology Inc.

电磁干扰（EMI）

当下，移动设备的数量日渐增多。所有移动设备都是无线设备，它们辐射的电磁波会对其他设备产生电磁干扰。

电磁干扰是一种因电磁感应或外部源发射的电磁辐射而对电路产生影响的干扰。人为造成或自然产生的外部干扰会导致电气设备的性能下降。

电磁干扰（Electromagnetic Interference，EMI）可以通过传导、辐射或二者的混合方式进入系统（或设备）。辐射EMI最常通过连接到运放等有源器件的印刷电路板（Printed Circuit Board，PCB）走线或接线传导。这些走线和接线的物理长度使得它们成为有效的微波和射频（Radio Frequencies，RF）天线。此外，可以将对EMI敏感的设备放置在能够大幅衰减此类辐射信号的屏蔽容器内。在这种情况下，容器内外的接线和连接形成EMI信号进入设备的惟一传导路径。另一方面，传导EMI有多种来源。除辐射EMI信号外，传导EMI也可通过供电网进入系统，或由系统自身产生。例如，开关电源就可能是EMI的一个来源。

电磁干扰示例包括将手机放到计算机扬声器附近时扬声器中传出的噪声，或者在车内使用手机接打电话时磁带放音机产生的响亮的静电噪声。该EMI通过信号传导、电源线传导和/或真空辐射在系统中传播。最常见的传导干扰源是开关电源、交流电机、单片机或数字电路。

由于EMI会影响包括医疗和航电设备在内的大多数电子设备，因此现代设备包含EMI滤波器，以确保在严苛的EMI环境中正常工作。EMI滤波器通常用于抑制任意电源和信号线中存在的传导干扰，也可用于抑制设备自身及其他设备产生的干扰，从而提高设备对其所处电磁环境中存在的EMI信号的抵抗能力。

EMI滤波器的阻抗具有很高的无功分量。这意味着该滤波器会对高频信号产生更大的阻碍作用。这种高阻抗会衰减或降低这些信号的强度，进而减弱它们对其他设备的影响。但是，大多数EMI滤波器都是分立元件，最新的发展趋势是将EMI滤波器集成到集成电路中。本应用笔记将讨论两种解决EMI问题的方法。

为了提高EMI抗扰度，Microchip Technology Inc.已着手设计具有输入EMI滤波器的运放和其他线性器件。例如，MCP642X系列具有增强型EMI保护功能，可最大程度地削弱来自电源线、无线电台和移动通信等外部源的所有电磁干扰。这一功能使得这些器件非常适合对EMI敏感的应用。

© 2016 Microchip Technology Inc.

EMI类型

EMI可按多种方式进行分类：

- 按其耦合机制：
  - 辐射
  - 传导
- 按其产生方式：
  - 人为造成的EMI
  - 自然产生的EMI
- 按其持续时间：
  - 连续干扰
  - 冲激噪声
- 按带宽：
  - 窄带
  - 宽带

对系统和电子设备设计人员而言，最重要的EMI分类方式是耦合机制。辐射耦合时，干扰源和被干扰对象相隔一段距离。干扰源辐射信号，而被干扰对象以一种会破坏其性能的方式接收该信号。传导耦合时，存在一条用于传输信号的传导路径（电源电缆和互连电缆）。

耦合EMI具有以下几种模式：

- 当两根导线中的噪声的相位相同时，发生共模EMI耦合。
- 当两根导线中的噪声的相位不同时，发生差模EMI耦合。

根据EMI耦合类型，共模和差模EMI可能需要不同的滤波器。

图1给出了两种形式的感性耦合，而图2和图3分别给出了容性耦合和磁性耦合。

- **感性耦合**——当EMI源与受干扰对象具有相同的地时，EMI源引起的任何电流都会进入地连接，并在受干扰对象的输入端上产生寄生电压。EMI源输出上的高频、高di/dt信号将更有效地耦合到受干扰对象中，因为接地层阻抗相对于这些信号表现为电感。如果这两个电路之间存在反馈路径，则寄生信号可能引起振荡。解决方案是将这两个电路连接到不同的地，从而避免共模阻抗。

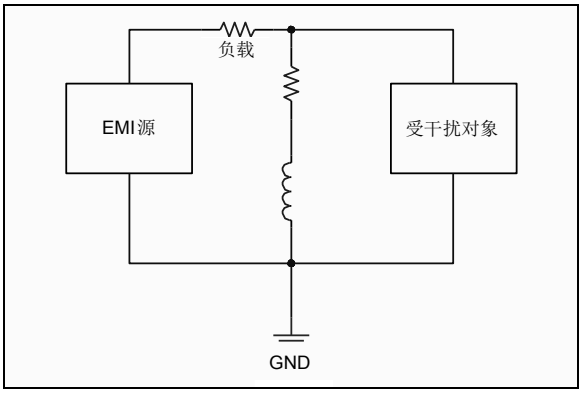

图1：　感性耦合

- **容性耦合**——如果一根导线中的电压发生变化，则会产生与相邻导线耦合的电压，进而在相邻导线中产生感应电压。噪声以$C_C * dV_L/dt$值注入受影响的导线，其中C_C为导线间的电容。

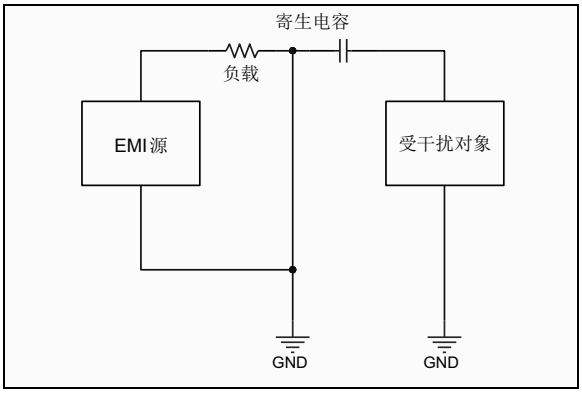

图2：　容性电流耦合

- **磁性耦合**——当寄生磁场在干扰源和受干扰对象之间进行传播时，将发生磁性耦合。一根导线中的电流变化会产生磁场，该磁场与相邻导线耦合并在其中感应出寄生电压。感应电压为$V_M = -M * di_L/dt$，其中M为互感。

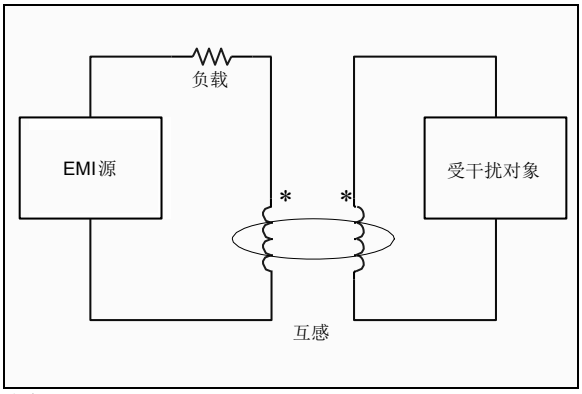

图3：　磁性耦合

© 2016 Microchip Technology Inc.

定义EMIRR

运放对RF EMI的主要响应是失调误差电压或失调电压漂移。该误差反映在运放的输出上，会导致系统性能降低。失调电压漂移因交流EMI到直流信号的非线性转换所致。该非线性行为由内部PN结（构成二极管，对EMI信号进行整流）引起，通常出现在输入的ESD二极管中。EMI导致的误差信号会叠加到现有的直流失调电压上。

用于描述运放的抗EMI性能的参数是电磁干扰抑制比（Electromagnetic Interference Rejection Ratio，EMIRR）。它定量描述了RF干扰信号对运放性能的影响。与不具有内部滤波器的早期器件相比，具有内部无源滤波器的新型器件提高了EMIRR。也就是说，采用良好的PCB布线技术时，电磁兼容性（Electromagnetic Compatibility，EMC）性能将更为出色。

EMIRR的定义如公式1所示：

公式1：

$$EMIRR(dB) = 20 \bullet log\left(\frac{V_{RF}}{\Delta V_{OS}}\right)$$

其中：

V_{RF} = RF干扰信号的峰值幅值（V_{PK}）

ΔV_{OS} = 输入失调电压漂移（V）

具有EMI加强型运放的典型应用

所有放大器应用都需要进行EMI滤波；以下示例用于说明这一观点。

气体传感器

气体传感器是用于检测某种气体是否存在及其浓度为多少的设备。它们通常采用电池供电，可以发出声光警告。

例如，一氧化碳（Carbon Monoxide，CO）传感器根据暴露给内部元件的空气中的CO含量按比例减小电阻，以此对CO气体进行响应。由于该传感器可能因寄生电磁信号而损坏，因此可使用EMI运放（MCP6421）进行调理。尽管磁场极少，但由于传感器周围的电路阻抗较小，这些磁场可通过耦合到电路中产生噪声。

许多气体传感器都罩有金属网，用于降低EMI敏感度。金属网尺寸与要屏蔽的辐射频率相匹配，也就是说，既允许气体进入传感器，又可以提供电磁屏蔽。尽管金属屏蔽网的尺寸将影响最大衰减频率，但最大间距为2 mm的屏蔽网足以覆盖最高频率为100 MHz的区域。不过，高频干扰信号会穿过金属网，对传感器造成影响。

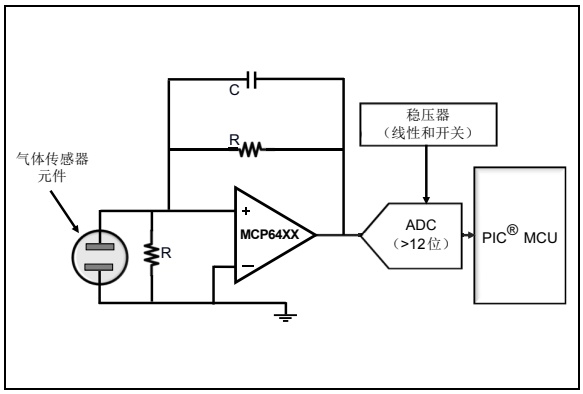

图4：　　气体传感器信号链

压力传感器

图5中使用了三运放仪表电路来调理来自压力传感器的信号。无内部EMI滤波的运放如图6所示，MCP6421 EMI加强型运放如图7所示。

两种运放的差异显而易见。手机发射RF信号后，典型标准运放将产生1V以上的输出电压漂移（干扰信号）。而EMI加强型运放却不会出现任何明显的干扰。

由此可见，采用MCP6424的设计具有良好的稳定性，而无需任何外部EMI滤波。

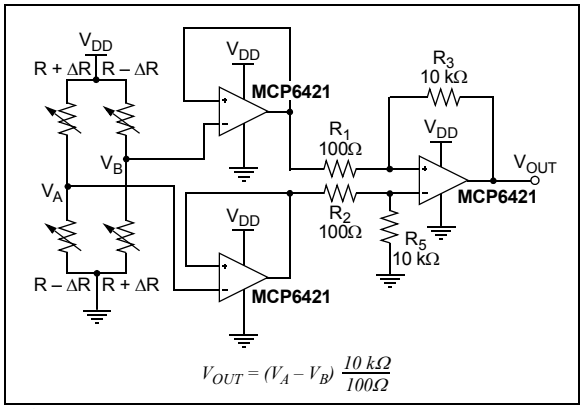

图5：　　惠斯通电桥放大器

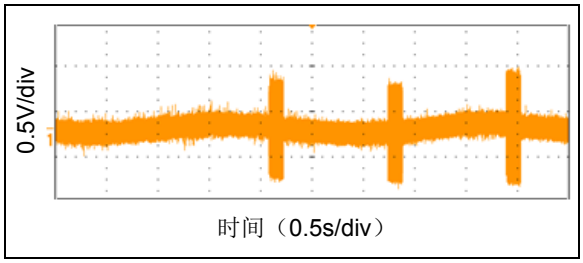

图6：　具有标准运放且无外部滤波的压力传感器放大器输出

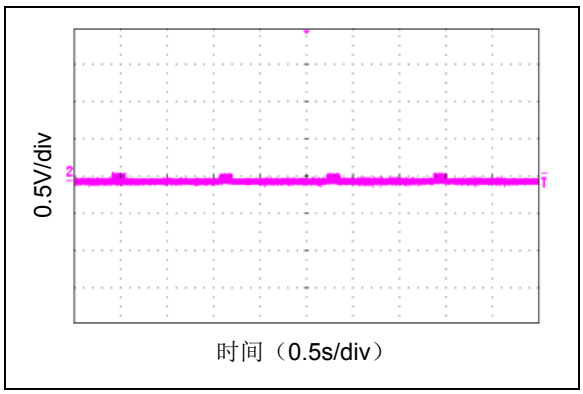

图7：　具有EMI加强型运放（MCP6421）且无外部滤波的压力传感器放大器的输出

电流传感器

MCP6421/2/4运放的共模输入范围比两个电源轨高0.3V，适用于上桥臂和下桥臂电池电流检测应用。低静态电流有助于延长电池寿命，轨到轨输出支持低电流检测。

图8 给出了上桥臂电池电流传感器电路。选择大小为10Ω的电阻可最大程度降低功耗。流过10Ω电阻的电池电流（I_{DD}）导致其顶部端子电压低于底部端子电压。这使运放的共模输入电压低于V_{DD}，处于允许的范围内。运放的输出也将低于V_{DD}，处于最大输出电压摆幅规定的范围内。低功耗电流检测的应用十分广泛，甚至普及到汽车应用中。

图9和图10给出了EMI加强型运放与标准运放间的差异。如图10所示，以连续脉冲表示的寄生信号产生了错误的输出电流值。

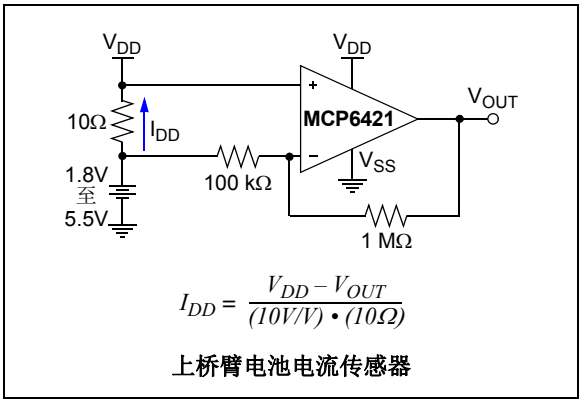

图8：　电池电流检测

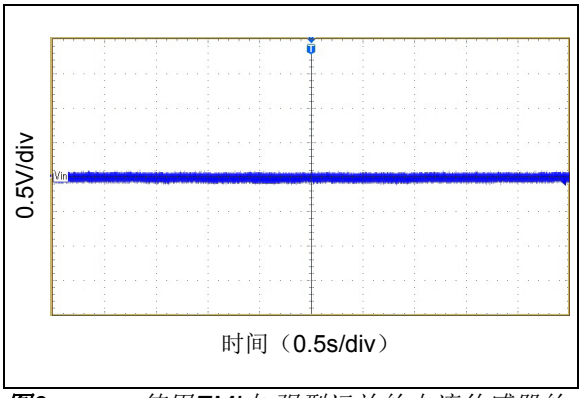

图9：　使用EMI加强型运放的电流传感器的输出

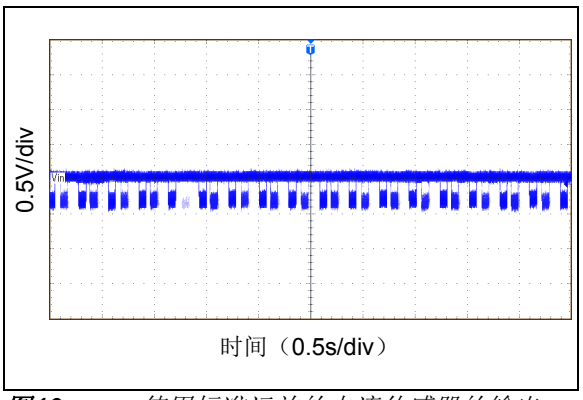

图10：　使用标准运放的电流传感器的输出

© 2016 Microchip Technology Inc.

降低EMI的经典解决方案

外部滤波器

减少寄生RF信号或防止这些信号进入运放输入级的传统方法是在靠近输入的位置使用低通滤波器（Low-Pass Filter，LPF）。对于图11中的反相运放，滤波电容C放置在等值电阻R_1和R_2之间。请注意，C不可直接与运放的反相输入相连，因为这样会导致不稳定。为了最大限度地减少信号损耗，滤波器带宽至少应为信号带宽的20或30倍。对于图12中的同相运放，电容C可直接与运放输入相连（如图所示），值为“R”的输入电阻会产生与反相运放相同的角频率。

在这两种情况下，必须使用低电感芯片式电容。该电容必须不受阻性损耗或电压系数问题的影响，这将选择限制为所提及的NP0或薄膜式。请注意，可使用铁氧体磁珠来替代R_1。但是，铁氧体磁珠的阻抗是非线性的，无法很好地进行控制，并且在10 MHz到100 MHz的频率范围内时通常不超过100Ω。这就需要一个大电容来衰减低频。

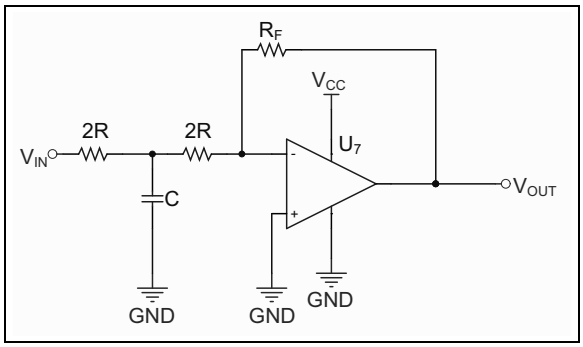

图11：　具有EMI外部滤波器的反相放大器

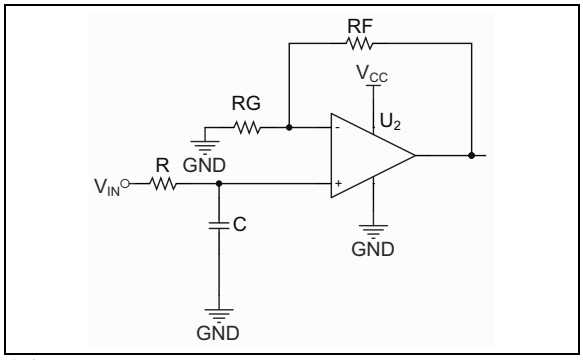

图12：　具有EMI外部滤波器的同相放大器

公式2用于计算反相和同相放大器的EMI滤波器的截止频率。

公式2：

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

高精度仪表放大器（Instrumentation Amplifier，INA）对由于存在共模（Common-mode，CM）EMI/RFI而引起的直流失调误差特别敏感。这与运放中存在的问题十分相似，实际情况是，运放相较于低功耗仪表放大器而言对EMI/RFI更敏感。

仪表放大器前面的平衡RC滤波器相对比较复杂，可执行所有高频滤波。共模扼流器提供一种简单的单元件EMI/RFI保护方案来代替无源RC滤波器，如图13所示。除使用的元件数量较少外，基于扼流器的滤波器还可通过去除电阻来提供更低的噪声。不过，选择适当的共模扼流器非常关键。请注意，与RC滤波器系列不同，仅使用扼流器的滤波器不提供差分滤波。可以在扼流器后面的第二级添加差模（Differential-Mode，DM）滤波。

即使最好的CM扼流器也会产生一些DM电流（主要因泄漏电感所致），因此必须在CM扼流器后面添加两个差模扼流器，后跟一个与放大器输入端相连的电容。两个CM电容必须接地到外壳或模拟地。

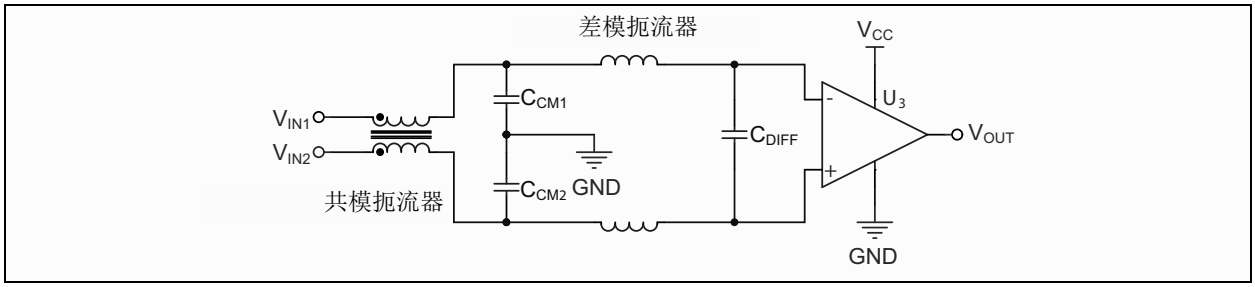

图13：　具有外部EMI滤波器的差分放大器

图14给出了输入处有RC滤波器的经典三运放INA。如果时间常量$R_5 – C_5$和$R_6 – C_6$未完全匹配，V_{IN}处的一些输入共模信号会在仪表放大器输入处转换为差模信号。因此，C_5和C_6必须完全匹配且远远小于C_4。此外，R_5和R_6也必须完全匹配。假设相对于$R_5 – R_6$而言，V_{IN}端子处的源电阻较低且匹配。在这种滤波器中，所选C_4必须远远大于C_5或C_6（$C_4 >> C_5$且$C_4 >> C_6$）才能抑制因CM-DM转换过程中$R_5 – C_5$和$R_6 – C_6$时间常量不匹配引起的杂散差分信号。滤波器总带宽必须至少为输入信号带宽的10倍。实际上，滤波器元件必须在接地层区域较大的PC板上靠近仪表放大器输入对称安装才能实现最佳性能。

对称放置元件的一种方法是在C_4周围对称放置$R_5 – C_5$和$R_6 – C_6$。

图14给出了MCP6H04 INA评估板（订货号：MCP6H04EV）。使用该评估板执行了三个测试。将个人手机用作EMI寄生信号源，输入信号为10 mV峰峰值的正弦波。

手机位于评估板上方10 cm处，寄生信号是大约850 MHz的GSM信号。

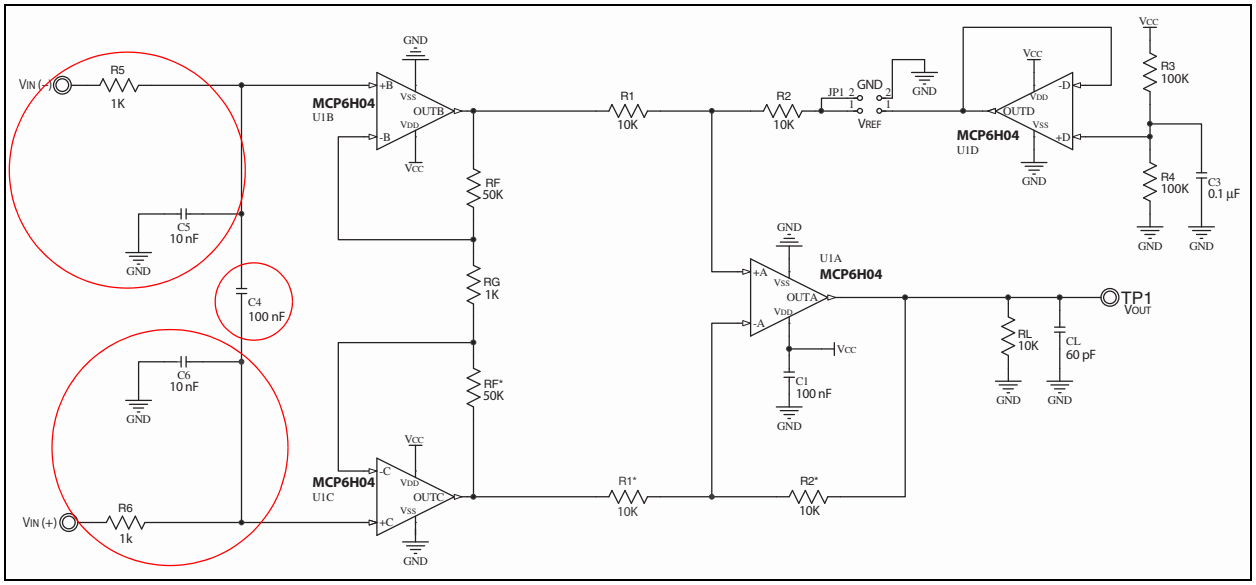

图14：　三运放仪表放大器

在第一次测试中，我们移除了EMI输入滤波器（$R_5 – C_5$、C_4和$R_6 – C_6$），并施加了来自手机的寄生信号。结果如图15所示。

在第二次测试中，评估板上保留了输入滤波器并重复进行了测试。结果如图16所示。

共模滤波器带宽使用公式3计算，而差模滤波器带宽则使用公式4计算。这些公式用于估算窄带寄生信号抑制比。

由于电容寄生电感的原因，400 MHz – 3 GHz等较大带宽（公式3和公式4）的寄生信号抑制比无法提供相同的精度。例如，采用紧凑的PCB布局时，0603 SMD电容的电感约为5 nH。10 nH电容的谐振频率约为23 MHz。许多EMI滤波器使用100 pF电容，其谐振频率约为230 MHz。这使得EMI抑制能力有很大差别。通过比较图16和图17可以看出这种差别。在图17中，10 nF C_5和C_6电容被替换为100 pF电容。

© 2016 Microchip Technology Inc.

在第三次测试中，将MCP6H04运放替换为MCP6424 EMI加强型运放并移除了EMI输入滤波器（$R_5 – C_5$、C_4和$R_6 – C_6$）。在相同条件下重复测试，结果如图18所示。

公式3：

$$BW_{CM} = \frac{1}{2\pi(R_5 \parallel R_6)(C_5 \parallel C_6)}$$

公式4：

$$BW_{DM} = \frac{1}{2\pi(R_5 + R_6)(2C_4 + C_5 \parallel C_6)}$$

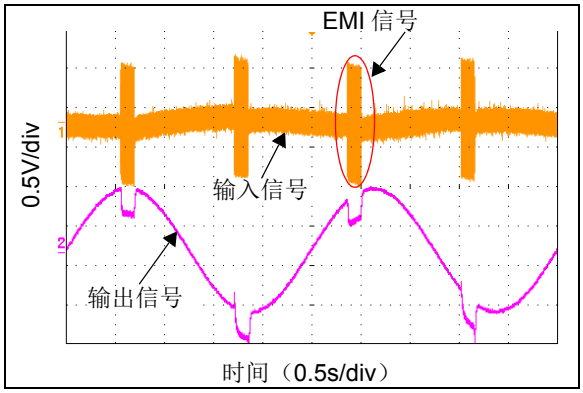

图15： *不具有外部滤波的标准放大器*

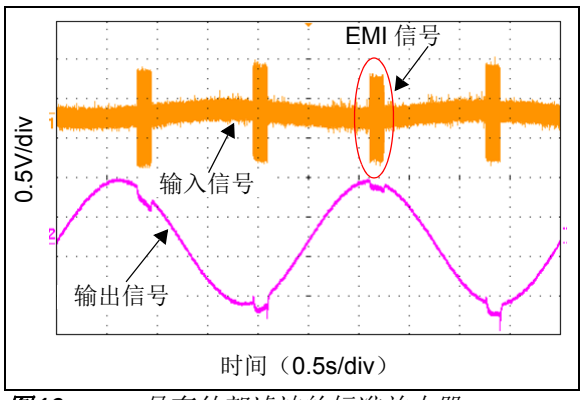

图16： *具有外部滤波的标准放大器（$C_5 = C_6 = 10$ nF）*

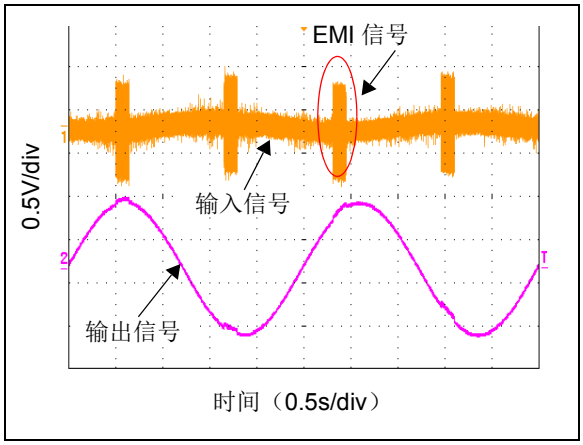

图17： *具有外部滤波的标准放大器（$C_5 = C_6 = 100$ pF）*

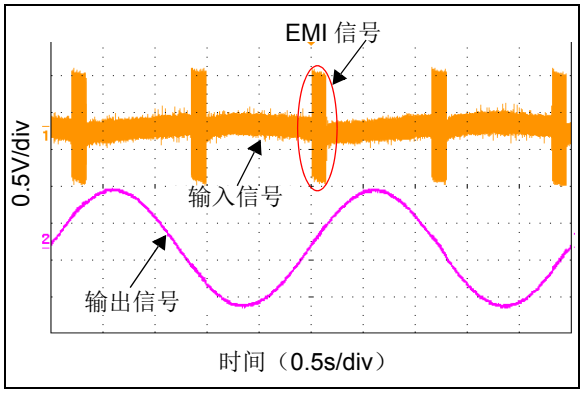

图18： *不具有外部滤波的EMI放大器（MCP6424）*

引脚保护

还需要保护放大器输出不受EMI/RFI影响，特别是在它们必须驱动用作天线的长距离电缆时。输出线上接收到的RF信号耦合回放大器输入并进行整流，然后以失调漂移形式再次出现在输出上。

与输出串联的电阻和/或铁氧体磁珠是最简单、成本最低的输出滤波器，如图19所示。其下面的电路中，添加一个电阻-电容-电阻“T”型电路可在稍微增加复杂度的情况下提高该滤波器的性能。输出电阻和电容从放大器转移大部分高频能量，这使得该配置即使对于低功耗有源器件也非常有用。当然，为了最大程度减小所需输出信号的衰减程度，必须谨慎选择滤波器的时间常量。在某些情况下（尤其是在输出电流较高时），铁氧体磁珠会加重非线性失真。

© 2016 Microchip Technology Inc.

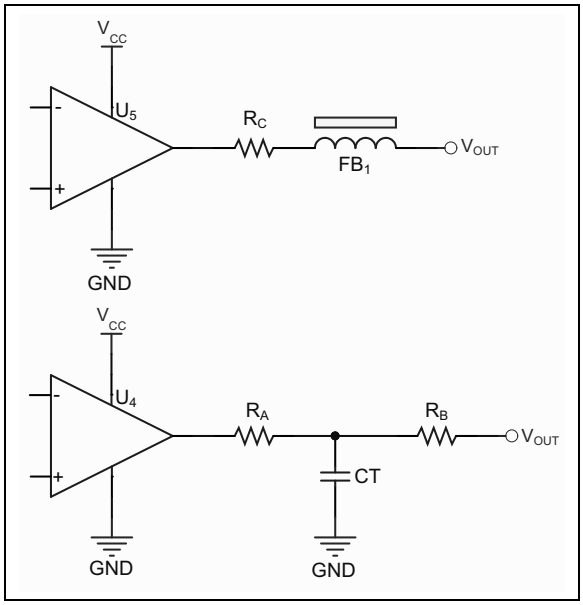

图19：　输出引脚保护技术

由EMI引起的二阶效应

运放对EMI的最常见响应是运放输出上出现的直流失调电压发生漂移。高频EMI信号转换为直流信号是器件内硅P-N结组成的内部二极管（尤其是ESD二极管）的非线性行为的结果。由于交流信号转换为直流信号，因此该行为被称为整流。RF信号整流会在运放电路中生成小直流电压。当运放信号路径中发生这一整流行为时，产生的效应会被放大并以直流失调的形式出现在运放输出上。该效应是不需要的效应，因为它会添加到失调误差中。

EMIRR是描述运放如何有效地抑制整流EMI的有用指标。如图20所示，EMI加强型运放能够比标准运放更有效地抑制高频EMI。与MCP6286标准运放（80 dB）相比，MCP6421在1.8 GHz（97 dB）时具有较高的电磁干扰抑制比（EMIRR）。

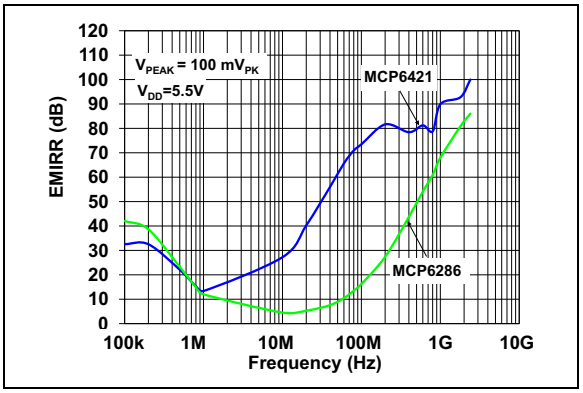

图20：　EMI加强型运放和标准运放的EMIRR—频率曲线

图21显示了EMI加强型运放抑制不同级别寄生噪声时的效果。

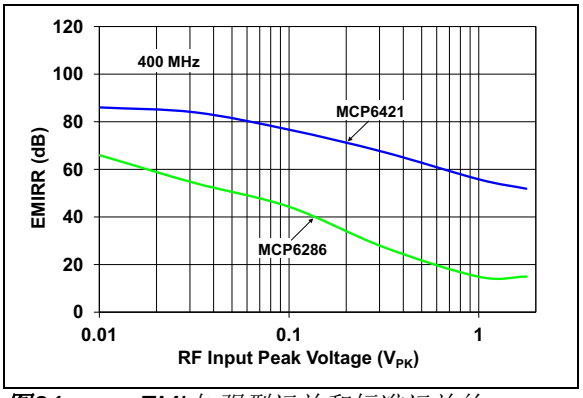

图21：　EMI加强型运放和标准运放的EMIRR—寄生信号级别曲线

© 2016 Microchip Technology Inc.

针对EMI的PCB提示与窍门

正常模式EMI通过在电路中意外形成的环形天线进行传播。电流量、EMI频率和环形面积决定了天线的效果。EMI感应电流与环形面积成比例。大部分共模EMI来自电容耦合（传导）的正常模式EMI。寄生信号的频率越高，PCB上相邻导线间的耦合程度就越高。因此，相邻导线可用作天线。

包含回路电流的PCB走线和接线可起到天线的作用，并将EMI/RFI耦合到电路内或电路外。平衡线路和平衡PCB信号走线可用于防止共模EMI（传导或感应）转换为差分信号。如果线路后面的电路在EMI频率下表现出共模抑制（Common-mode Rejection，CMR），则共模EMI将消除到可用CMR的程度。平衡线路由两根相同且间距恒定的导线组成，二者的介电特性一致，因此它们的阻抗相同且每根导线的EMI电压/电流也相同。

在不平衡线路的电路中，每根不同的导线在暴露于共模EMI下时都会面临不同的电气环境。每根导线的对地阻抗不同，因此各自形成的电压也不同。EMI到达线路后面的电路时，将会显示为差分电压。如果使用有源电路且该电路具有足够的带宽，则会放大EMI并将其传送到后面的信号路径中。

由电介质（空气和真空以及所有固体或液体绝缘物质都是电介质）隔开的任意两根导线之间都存在电容。如果一根导线上的电压发生变化，则另一根导线上的电荷也将发生变化，位移电流将流入电介质。

如果流过一个电路的电流中的变化磁通耦合到另一个电路，则会在第二个电路中感应出电磁场（Electromagnetic Field，EMF）。与具有高dI/dT值的电路耦合时，这类互感将成为一种非常麻烦的噪声源。

为了消除或降低共用阻抗的传导路径引起的噪声（即共模阻抗噪声），必须遵循以下准则：

1. 在低频和高频下对运放电源引脚去耦。
2. 减小共模阻抗。
3. 消除共用路径。
4. 使用低阻抗电解电容（低频）和局部低电感（高频）旁路。
5. 使用接地层和电源层。
6. 优化系统设计。

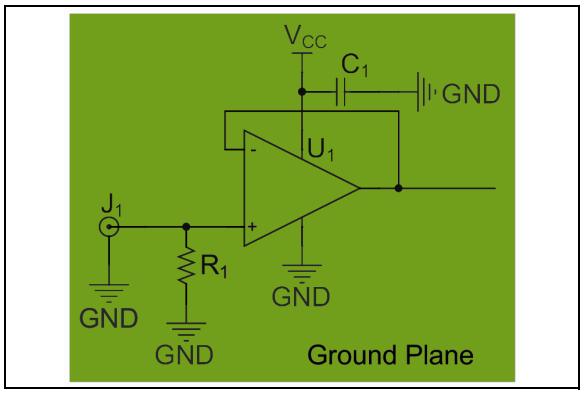

图22： *连续接地层和小型电流环路——推荐布局*

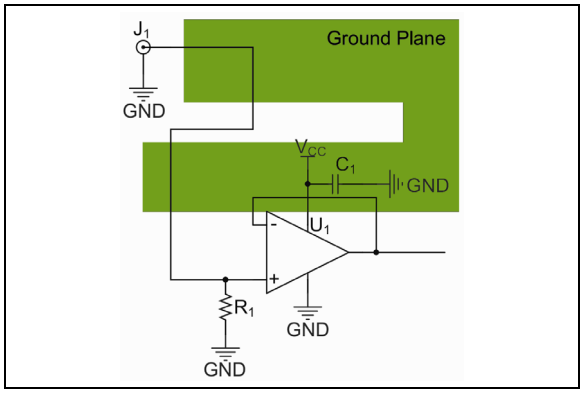

图23： *不连续接地层和大型电流环路——不推荐的布局*

在一些应用中，低级别信号会遇到高级别共模阻抗噪声，这种干扰无法避免，因此可能需要更改系统架构。可能的更改包括：

- 以差分形式传输信号
- 将信号放大到更高级别，以增大信噪比（Signal-to-Noise Ratio，SNR）
- 将信号转换为电流以进行传输
- 直接将信号转换为数字形式

串扰是第二种最常见的干扰形式。近场干扰（在噪声源附近）不是以电磁波的形式传输，术语“串扰”可应用于感性或容性耦合信号。

减小耦合电容（通过增大导线间距实现）可降低容性耦合噪声，但最简单的解决方法是屏蔽。信号源与受影响节点间的导电和接地屏蔽（称为法拉第屏蔽）通过将位移电流直接接地消除该噪声。

请注意，使用此类屏蔽时，必须始终将法拉第屏蔽层接地。屏蔽层悬空或开路势必会增大容性耦合噪声。

测量EMIRR

测量输出失调电压

MCP6421 EMIRR评估板用于演示MCP6421运放的EMI抑制性能。为达到这一效果，请使用图24中的设置。

电源电压必须在运放的允许范围内。运放通过50Ω传输线、RC缓冲电路和LC低通滤波器进行偏置，以抑制高频电源噪声。

高频信号发生器用于向运放施加输入信号，并控制幅值和频率。由于PCB走线和连接器引起阻抗不匹配，运放输入处的幅值与初始RF电压的幅值不同。这些阻抗不匹配会沿信号路径产生反射，从而改变输入信号的幅值。

谨慎地将运放输入与50Ω信号发生器输出阻抗进行匹配，可避免或最大程度减少这些反射。运放输入阻抗永远不会与信号发生器输出阻抗完全匹配。低频时，使用两个并联的50Ω电阻来匹配运放输入。

因RF信号整流产生的运放直流输出失调电压可使用万用表测量。由于反馈网络的原因，运放输出上可能存在EMI，为了防止EMI信号进入万用表，需要在运放输出上连接一个低通滤波器（LPF）。为了分离固有失调电压和EMI产生的失调电压，需要进行两次测量。在第一次测量中，信号发生器关闭，运放输出上仅出现固有失调电压。在第二次测量中，在运放的输入引脚上施加RF输入信号，整流过程的结果是，输出上出现固有失调电压和与EMI相关的失调电压。这两个结果的差值即表示运放整流产生的失调电压漂移。

© 2016 Microchip Technology Inc.

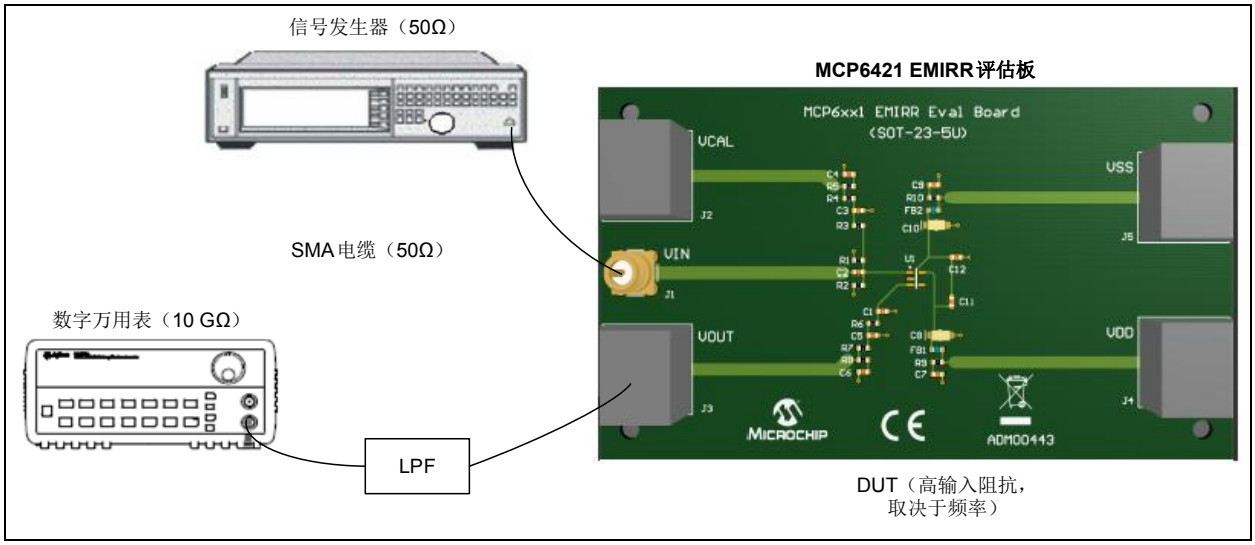

图24：　运放的EMIRR特性设置

结论

EMI是当前的一个实际问题，它会影响大多数电子设备，包括医疗和航电设备。现代设备包含EMI滤波器以确保在严苛的EMI环境中正常工作。

本应用笔记揭示了EMI加强型运放能够比标准运放更有效地抑制高频EMI，还介绍了标准运放如何使用外部滤波器抑制EMI。

本应用笔记通过几个示例演示了Microchip放大器的EMI性能，并讨论了如何测量EMIRR及确定其特性值。

参考资料

MCP6H04用户指南—— *“MCP6H04 Evaluation Board User’s Guide”*（DS52005），Microchip Technology Inc.，2011

MCP6421用户指南—— *“MCP6421 Electromagnetic Interference Rejection Ratio Evaluation Board User’s Guide”*（DS50002175），Microchip Technology Inc.，2013

注：

© 2016 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、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、Heldo、JukeBlox、KeeLoq、KeeLoq 徽标、 Kleer、 LANCheck、 LINK MD、 MediaLB、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PIC、PICSTART、PIC32 徽标、 RightTouch、 SpyNIC、 SST、 SST 徽标、SuperFlash 及 UNI/O 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。

Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、BodyCom、chipKIT、chipKIT 徽标、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、EtherGREEN、 In-Circuit Serial Programming、 ICSP、 Inter-Chip Connectivity、 JitterBlocker、 KleerNet、 KleerNet 徽标、MiWi、motorBench、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、 PICDEM、 PICDEM.net、 PICkit、 PICtail、PureSilicon、 RightTouch 徽标、 REAL ICE、 Ripple Blocker、Serial Quad I/O、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。

© 2016, Microchip Technology Inc. 版权所有。

ISBN：978-1-5224-0479-8

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

克里夫兰 Cleveland
Independence, OH
Tel: 1-216-447-0464
Fax: 1-216-447-0643

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

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

纽约 New York, NY
Tel: 1-631-435-6000

圣何塞 San Jose, CA
Tel: 1-408-735-9110

加拿大多伦多 Toronto
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: 852-2943-5100
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 - 杭州
Tel: 86-571-8792-8115
Fax: 86-571-8792-8116

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2943-5100
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: 86-755-8864-2200
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 - 珠海
Tel: 86-756-321-0040
Fax: 86-756-321-0049

亚太地区

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-213-7828

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

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

德国 Germany - Dusseldorf
Tel: 49-2129-3766400

德国 Germany - Karlsruhe
Tel: 49-721-625370

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

意大利 Italy - Venice
Tel: 39-049-7625286

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

波兰 Poland - Warsaw
Tel: 48-22-3325737

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

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

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

07/14/15

© 2016 Microchip Technology Inc.