

## 智能风机控制

作者: Justin Milks  
Microchip Technology Inc.

### 引言

本应用笔记介绍智能 4 线风机的实现方法。该设计方案在风机内直接安装了一片 PIC<sup>®</sup> 单片机，包括如何对风机进行速度闭环控制，如何获得速度反馈以及采取哪些额外的安全保护措施。

本应用笔记将涉及到以下内容：

- 无刷直流风机的基本原理
- 单片机一些必要的外设
- 硬件和软件控制技术

本应用笔记主要针对的是 PIC16F616 和 PIC12F615，尽管其适用于很多种类的 PIC<sup>®</sup> 单片机。

### 无刷直流风机的基本原理

由于无刷直流风机是基本的无刷直流电机的变体，因此所有无刷直流电机的基本原理对其都适用。Microchip 的有些应用笔记中涉及到了无刷直流电机的基本原理，这些应用笔记的列表在该文档的参考文献部分给出。

在无刷风机中，电枢是静止的，旋转的是永磁体，如图 1 所示。该永磁体呈环状，风机叶片附于其上。许多风机都在环形磁铁中使用 4 个磁极；不过，可以通过增加磁极数目来获得功率更大的风机。

最后，电枢绕组型式可能会有所不同。一台两相风机具有两个可以分别通电的独立绕组。这两个绕组一直在通电，具有相同的电流流向。还有一种单相系统，其只有一个绕组在持续通电，但电流方向会反向。

两相法所需成本较低，且每相只需一个 MOSFET 器件。然而，在任一特定时刻，其电枢绕组只有一半得到利用，因此，它不适合于功率较高的应用。而单相法，其电枢上的各个绕组同时通电，因此它更适用于功率较高的应用。然而，这种方法共需 4 个 MOSFET 器件。

风机可以通过霍尔传感器来决定对哪一相通电（或采取何种方式给各相通电）。这些传感器能够检测到环形磁铁的磁极位置，为确定电枢绕组的通电方式提供必要的信息。这些传感器将在以下各节中详细介绍。

图 1: 风机本体的结构图

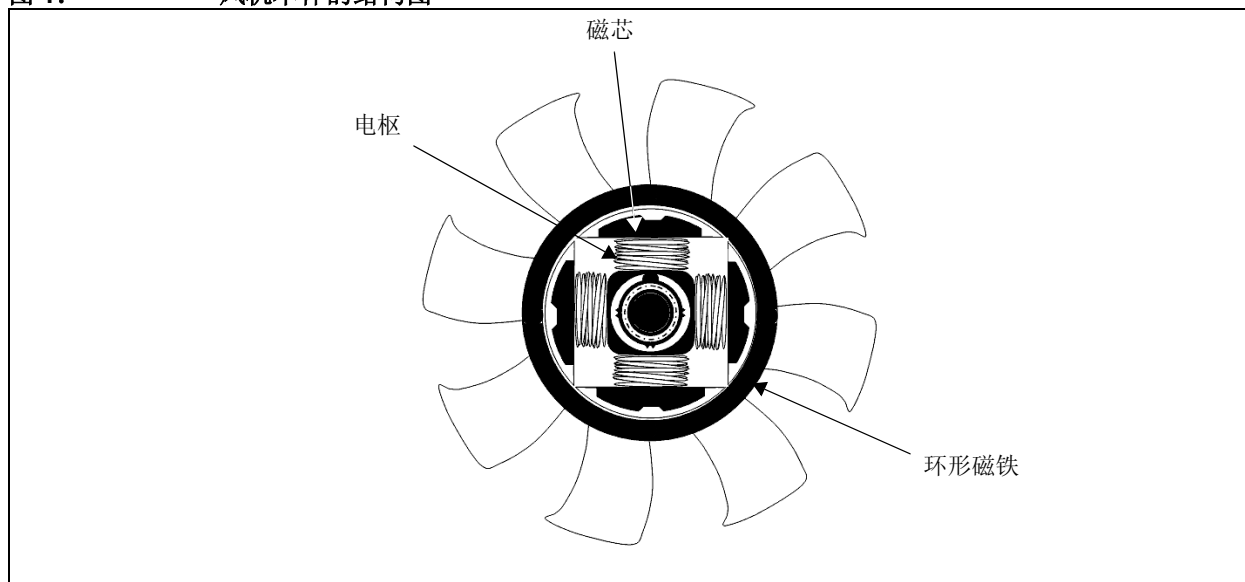


图 2: 风机控制的框图

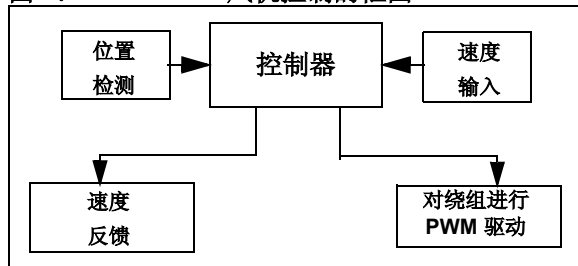


图 2 显示了一个通用的风机控制器的框图。

与该结构图中的各个模块相关的软件与硬件技术将在以下各节中详细介绍。

## 位置检测

位置检测器件有两种类型：霍尔元件和霍尔效应传感器。选用其中任何一种都可以。

## 霍尔元件与霍尔效应传感器的对比

霍尔元件这个术语用来描述那种能够产生与磁场强度相对应的模拟差分电压的器件。

霍尔元件的输出是一个相对较小的模拟差分电压。图 3 显示了当采用旋转环形磁铁时，由霍尔元件产生的输出波形。

使用霍尔元件的主要优点是成本低廉。但要获得最佳性能，其需要使用一个恒流源。此外，霍尔元件的输出电压较低，可能还需要放大。

霍尔效应传感器摒除了以上这些需要把霍尔元件，电流源和放大器封装在一起的弊端。

霍尔传感器有很多种，包括集电极开路输出和 TTL 电平输出。许多无刷风机都采用锁存霍尔传感器，其 N 极将器件锁存为一个状态，直到 S 极出现时，才将器件锁存为相反的状态。

图 3 显示了由旋转风机叶片产生的霍尔传感器输出波形。

## 霍尔效应传感器接口

霍尔效应传感器是一种数字器件，因此，其与单片机进行接口非常简单。可以使用任一可用的具有电平变化中断（IOC）功能的引脚作为其接口。如果采用集电极开路的霍尔效应传感器，那么可以使用内部弱上拉，以减少需要的元件数。

要确保霍尔效应传感器的低电压输出信号在输入引脚的可接受范围内，这一点很重要。如果该低电压输出信号不在引脚输入电压的可接受范围内，那么可以采用一个模拟比较器来对霍尔效应传感器进行读取。

## 霍尔元件接口

与霍尔效应传感器相比，霍尔元件与大部分单片机进行接口并不那么容易。正如前面提到的，霍尔元件需要使用一个电流源。一种低成本解决方案是简单地将霍尔元件与一个电阻串联。该方法的缺点是输出电压较低。

为了能够读取低电压的模拟差分输出信号，有必要使用模拟比较器的两个输入端，如图 4 所示。由图 3 中的霍尔传感器的输出波形可知，当两个输出之间的差小于比较器的输入失调电压时，典型比较器就会遇到问题。

如果所使用的单片机中包含一个具有内部滞后功能的比较器，那么霍尔元件就可以得到有效的使用。PIC12F615 和 PIC16F616 就是两款具备这些功能的单片机。

图 3: 霍尔元件的输出波形

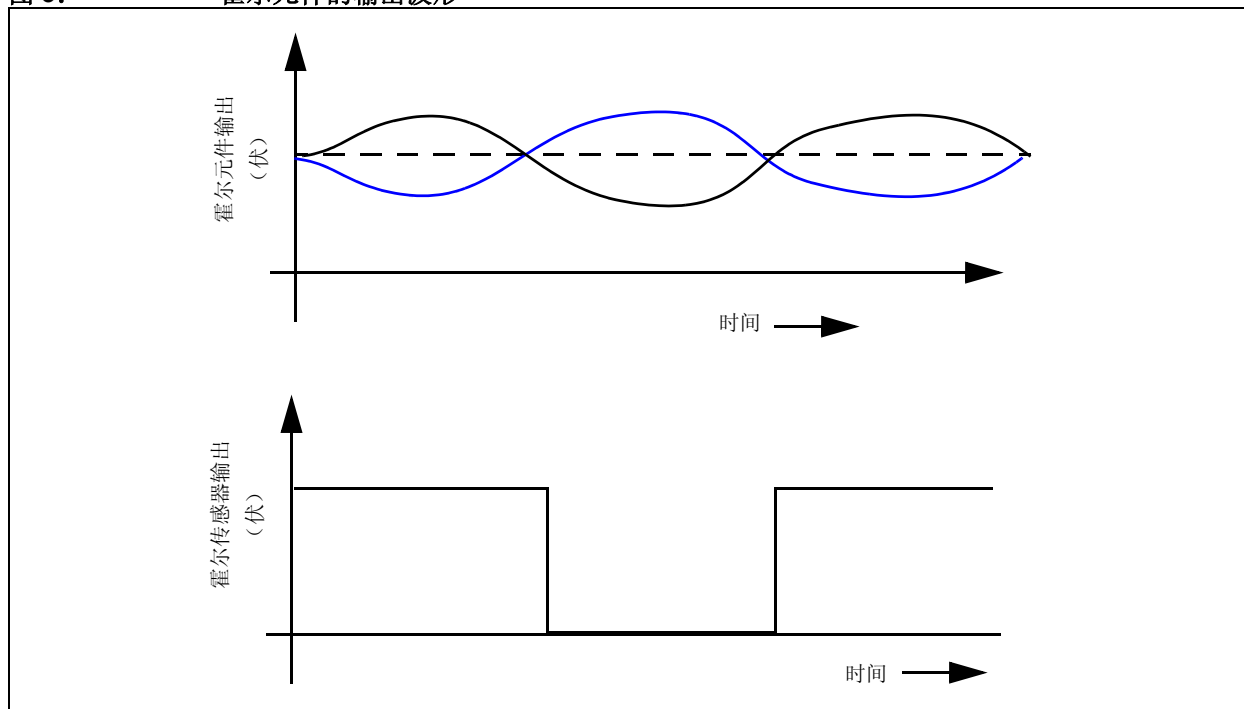
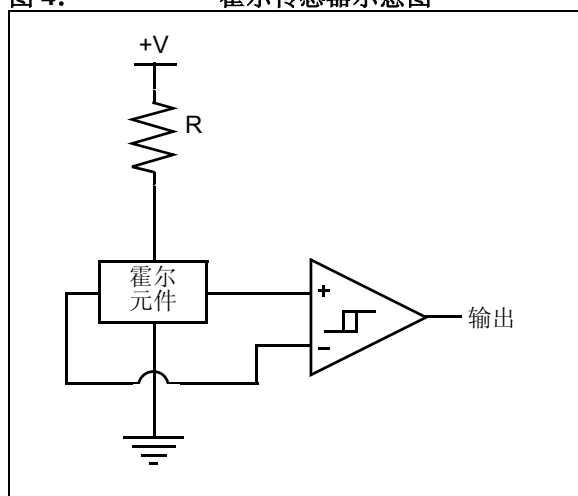


图 4: 霍尔传感器示意图



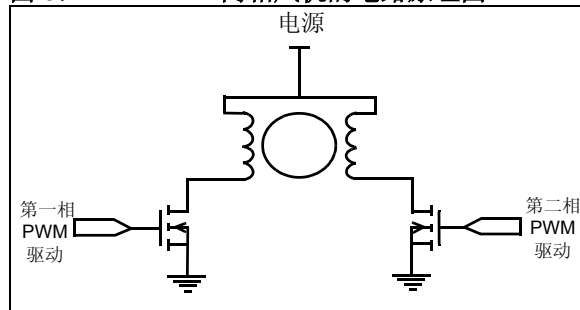
## 对风机绕组进行 PWM 驱动

这一节将介绍几种能够产生必要的 PWM 驱动的方法，其取决于可用的单片机外设资源。此外，还介绍几种能够增加 PWM 分辨率和 PWM 频率的方法。

### PWM 输出连接

在两相风机的应用中，PWM 输出将与 MOSFET 器件相连，如图 5 所示。

图 5: 两相风机的电路原理图



在该配置中，任一时刻只有一个 MOSFET 器件导通。这可以通过在一个时刻只让一相绕组流过电流来保证。需注意的是，绕组中电流的流向总是相同的。

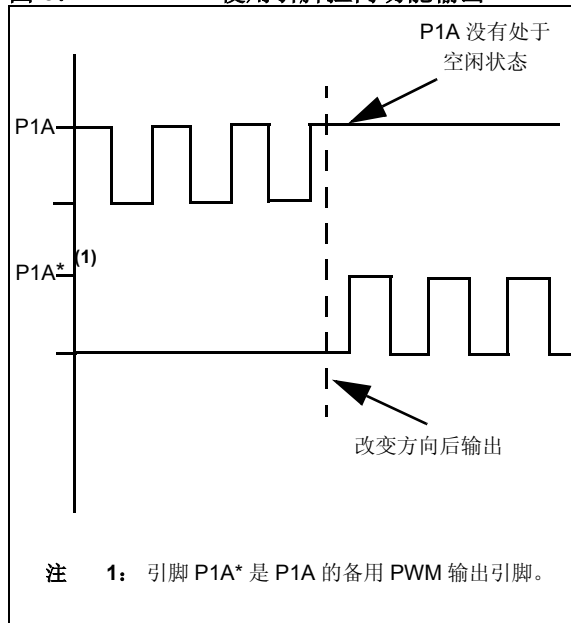
### 利用引脚控向功能来产生多个输出

PIC 单片机，例如 PIC12F615，具有 PWM 引脚控向的选项。这允许捕捉 / 比较 / PWM (CCP) 模块产生一个可用于一个或更多 I/O 引脚的 PWM。

使用这种配置进行风机控制的方式如下：每次换相（取决于霍尔元件或霍尔效应传感器）时，PWM 的输出需改变方向后才加到适当的引脚上。

有一些问题需要考虑。如考虑下面图 6 所示的情况。当 PWM 改变方向时，输出可能仍然保持原态，如果不采取措施，两个输出就可能同时起作用。这不仅会引起电流过大，还会影响风机叶片的速度。

图 6: 使用引脚控向功能输出 PWM



为了解决这个问题，当改变 PWM 的方向时可以采取以下步骤：

1. 禁用 CCP 模块，取消其输出的控制
2. 再次将两个 PWM 输出设置为空闲状态
3. 执行 PWM 控向使其输出方向改变
4. 重新使能 CCP 模块

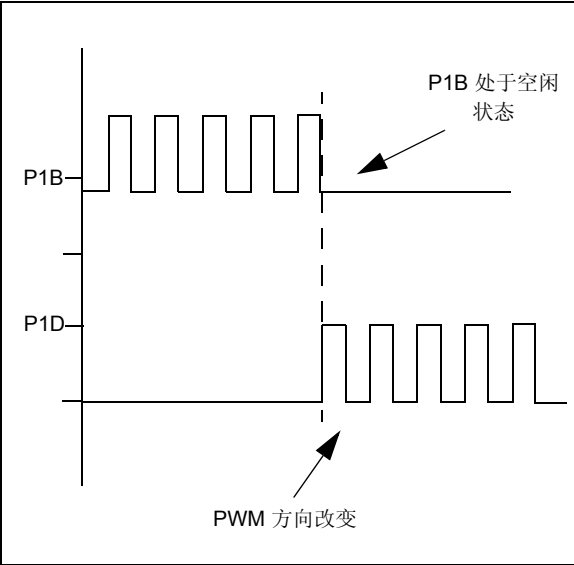
按照以上步骤操作，可以保证两个 CCP 输出不会同时起作用。

### 使用 ECCP 模块来产生多个输出

其它种类的 PIC 单片机，例如 PIC16F616，不具有引脚控向能力。但这些单片机仍然可以用于风机控制的应用中，方法是采用 ECCP 模块的不同模式来产生适当的 PWM 输出。

在全桥模式的正方向，ECCP 模块为引脚 P1D 提供一个 PWM 输出，而使引脚 P1B 处于空闲状态，如下面的图 7 所示。在全桥模式的反方向，ECCP 模块为引脚 P1B 提供一个 PWM 输出，而使引脚 P1D 处于空闲状态。

图 7: 使用 ECCP 模块输出 PWM



每次换相都需要改变 ECCP 模块的方向。如果在该方法中使用 ECCP 模块，需确保两个输出不会同时起作用。

选择 PWM 频率

在选择风机绕组的 PWM 频率时，一个重要的限制条件是保证该频率在音频 20 kHz 以上。鉴于该限制条件，仍有很多种确定频率的方法。

当选择频率时，应使所产生的 PWM 分辨率具有整数位。例如，当采用 8 MHz 的振荡器时，31.25 kHz 的 PWM 频率能够提供精确的 8 位分辨率。具有整数位的分辨率将会简化数学程序。然而，在这个例子中，较高的开关频率会使风机的 MOSFET 产生发热问题。在这种情况下，最好采用较低的频率。

还可以根据风机的其它特性来选择 PWM 频率，如风机的绕组特性，或开关损耗最小的特性。这时，是否保证 PWM 的分辨率具有整数位就不再成为限制条件。选择最低频率会使开关损耗达到最小，同时使 PWM 分辨率达到最大。

公式 1: PWM 周期

$$PWM周期 = [(PR2) + 1] \cdot 4 \cdot T_{osc} \cdot (TMR2 \text{ 预分频值})$$

公式 2: PWM 分辨率

$$分辨率 = \frac{\log[4(PR2 + 1)]}{\log(2)} \text{ 位}$$

频率的选择会影响到 PWM 分辨率，因此有些频率可能无法产生整数个位的 PWM 分辨率。例如，当采用 8 MHz 的振荡器时，20 kHz 的 PWM 频率将会产生一个 99 的 PR2 值和一个 8.6438 位（该位数使用数据手册 CCP 一章中给出的公式来计算，这里转载其中的公式 1 和公式 2）的 PWM 分辨率。这意味着可得到的占空比范围是 0 到 399。根据控制环软件输出的不同，必须对占空比进行比例缩放。

将一个具有较低分辨率的值按比例放大为一个具有较高分辨率的值是不可取的。这样做会导致占空比的步长不均匀，且这种方法没有充分利用可用的 PWM 分辨率。因此，较好的方法是将一个具有较高分辨率的值按比例缩减为一个具有较低分辨率的值。

在该例中，是将 0 到 511（9 位）的范围按比例缩小到 0 到 399 的范围（8.6438 位）。该缩放操作是通过将 9 位控制环的输出乘以一个 8 位的比例因子，再将所得结果的低字节舍弃来实现的。确定比例因子的公式如下面的公式 3 所示。

公式 3: 比例因子的确定

$$比例因子 = \frac{(maxoutput) \cdot 256}{(maxinput)}$$

以上确定比例因子的公式中，最大输出（maxoutput）指的是比例程序中的最大期望输出，而最大输入（maxinput）指的是输入到比例程序的最大值。

当把 9 位按比例缩小到 8.6438 位时，比例因子是 200（十进制）。表 1 显示了比例程序的输入数据和输出数据。从中可以看出，满量程的 9 位输入值 511 与最大占空比 399 相对应。

表 1: 定标程序的结果

9 位值 (0 - 511)	乘以 200	结果的高字节
127	25400	99
255	51000	199
383	76600	299
511	102200	399

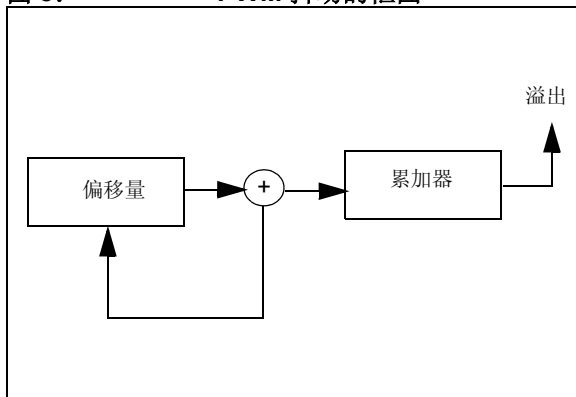
## 增加 PWM 分辨率

根据具体风机的特性，所给定的 PWM 分辨率可能并不够。增加 PWM 分辨率的一种方法是降低频率，但这可能行不通。不过可以采用软件方法来增加有效的 PWM 分辨率。

可以使用一种称为 PWM 抖动的方法。PWM 抖动可以通过在两个不同的占空比之间进行变化来完成。例如，可以通过在 55% 和 56% 的占空比之间不断切换来获得 55.5% 的平均占空比。与 PWM 输出相连的系统需工作在低通方式下，这一点很重要。该系统（本例中指风机）需要对平均占空比进行响应，并不需要具有足够快的反映速度来显示离散变化。

图 7 所示的结构图显示了 PWM 抖动程序的软件执行。

图 8: PWM 抖动的框图



采用一个寄存器作为累加器，而采用另一个寄存器来存储偏移量。该偏移量每隔  $n$  个 PWM 周期加到累加器上一次。如果累加器发生溢出，那么对于下面  $n$  个 PWM 周期来说，PWM 周期会加 1。例如，当采用 8 位累加器和用 128 装载的偏移量时，累加器会每隔一个周期溢出一一次。如果偏移量用 1 来装载，那么累加器每 256 个周期溢出一一次，等等。

这种软件技术的缺陷体现在所需的处理时间上。单片机必须每隔  $n$  个 PWM 周期执行一次软件程序来决定使用何种 PWM 占空比。此外，还必须在边界处加以注意。例如，如果 PWM 占空比设置为 100%，那么因为没有更高的占空比，抖动将不会发生。当占空比设置为 0 时，抖动程序也无法增加占空比，这一点很重要。

## 输入速度测量

为控制器提供期望速度的方法有几种。其中最常用的两种方法是使用 PWM 输入或使用模拟电压。下面将介绍这两种方法：

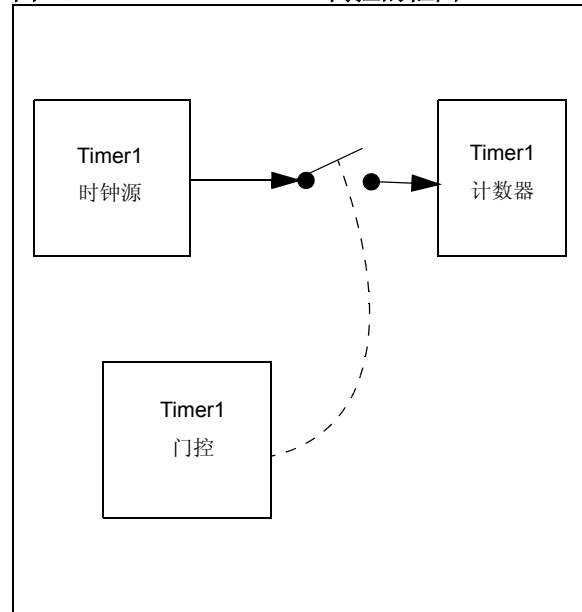
### 使用 PWM 输入

将 PWM 输入到风机中是一种给定速度的常用方法。PWM 输入的占空比决定了风机的运行速度。例如，一个 50% 的占空比给定了风机最大速度的 50%，等等。

通常采用频率为 25 kHz 的 PWM 作为输入（以符合智能风机一些现有的控制规范）。通过使用单片机的几个外设，可以实现对 PWM 的直接数字化测量。

许多 PIC 单片机都具有 Timer1 门控功能。如下面的图 9 所示，Timer1 门控功能允许 Timer1 的时钟源与计数器断开。Timer1 的门控输入源可以是一个数字输入，或是一个模拟比较器的输出。

图 9: TIMER1 门控的框图



在该应用中，使用 T1G 引脚作为 Timer1 的门控源。测量时可按照以下步骤进行：

- 1. 当输入信号为高电平时，将 Timer1 门配置为定时器递增计数。将 Timer0 清零，并将其用于对测量周期进行定时。
- 2. 置 1 Timer0 中断标志，指示测量结束。将 Timer1 中的值进行存储，当输入信号为低电平时，将 Timer1 门配置为允许 Timer1 计数递增。
- 3. 置 1 Timer0 中断标志，指示测量结束。将 Timer1 中的值进行存储，并对其进行处理以确定占空比。

以上处理过程如图 10 所示。测量过程的这部分输出包含两个值，即 T<sub>HIGH</sub> 和 T<sub>LOW</sub>，分别对应于一个测量周期内输入信号的高电平所占时间和低电平所占时间。

基于以上两个值，使用公式 4 来确定占空比。

公式 4:                    计算占空比

$$\text{占空比} = \frac{T_{HIGH}}{T_{HIGH} + T_{LOW}} \cdot 255$$

在公式 4 中，T<sub>HIGH</sub>+T<sub>LOW</sub> 表示由 Timer0 确定的测量周期。该测量通过使用固定的 T<sub>HIGH</sub>+T<sub>LOW</sub> 得以简化。但这样做时，振荡器容差会反映在测量中。通过测量高电平所占时间和低电平所占时间，可以消除振荡器容差。

公式 4 中的因子 255 是一个比例因子。这样做是为了把 100% 的占空比标度为 255，从而产生与输入占空比相对应的 0 到 255 范围的 8 位数。

要确保测量周期比被测信号的周期大得多，这一点很重要。最起码，测量周期至少要比被测信号的周期大 100 倍。

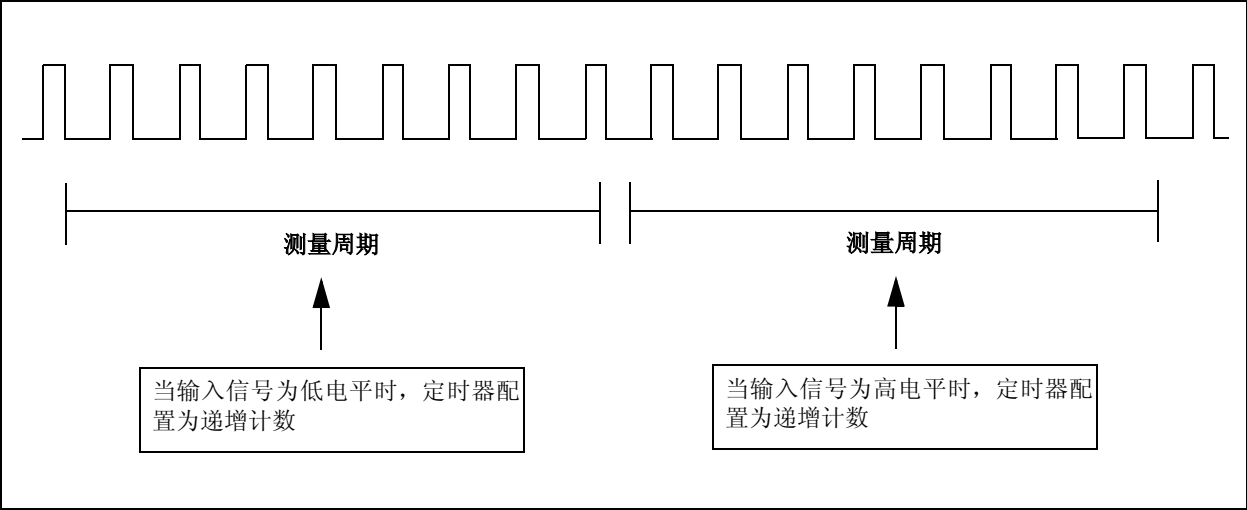
另一个需要注意的问题是，在测量周期内，要确保 Timer1 外设不计满回零。

T<sub>HIGH</sub> 和 T<sub>LOW</sub> 的值一旦确定下来，接着需要使用一个数学程序来作除法。由于 T<sub>HIGH</sub> 可以是一个 16 位的值，当将比例因子考虑在内时，公式 4 中的分子需要 24 位。而分母是两个 16 位数作加法后所得结果，因此需要为它分配 16 位。

Microchip 的应用笔记 AN617 “Fixed Point Routines” 中提供了许多定点数学程序，其中包括一个 24 位除以 16 位的无符号除法程序。

该除法运算一旦执行，所得结果将是与输入占空比相对应 0-255 范围内的值。

图 10:                    执行数字占空比的测量

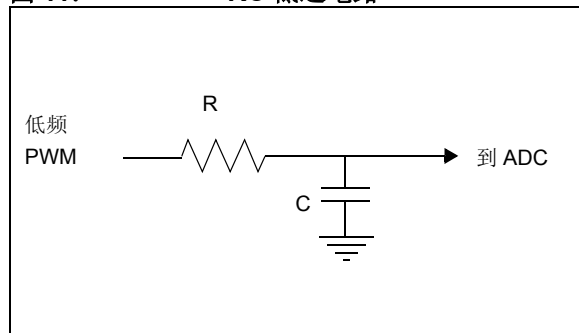


## 使用 ADC 测量输入速度

板上 ADC 也可以用来确定风机控制器的运行设定点。

模拟输入信号可以由一个热敏电阻来提供，或由低通滤波器滤波后的 PWM 信号来提供，如下面的图 11 所示。

图 11: RC 低通电路



当无法直接测量 PWM 输入时（如输入频率太低），可以使用该方法。当主机系统在电压非常低的情况下运行时，（即 3.3 伏或 2.5 伏），该模拟值可由 ADC 读取，并调整响应以匹配主机系统电压。为使风机具有温度可控功能，还可以将 ADC 与一个热敏电阻相接。

## 测量风机速度

为实现闭环控制，有必要对风机的实际速度进行测量。这可以通过测量霍尔器件输出的频率来实现。然而，还有很多问题需要考虑。

## 创建一个软件定时器

在当前的应用中，使用 Timer0 和 Timer1 来测量 PWM，而使用 Timer2 来作为 PWM 的时间基准。这种配置没有为风机速度的测量预留定时器。

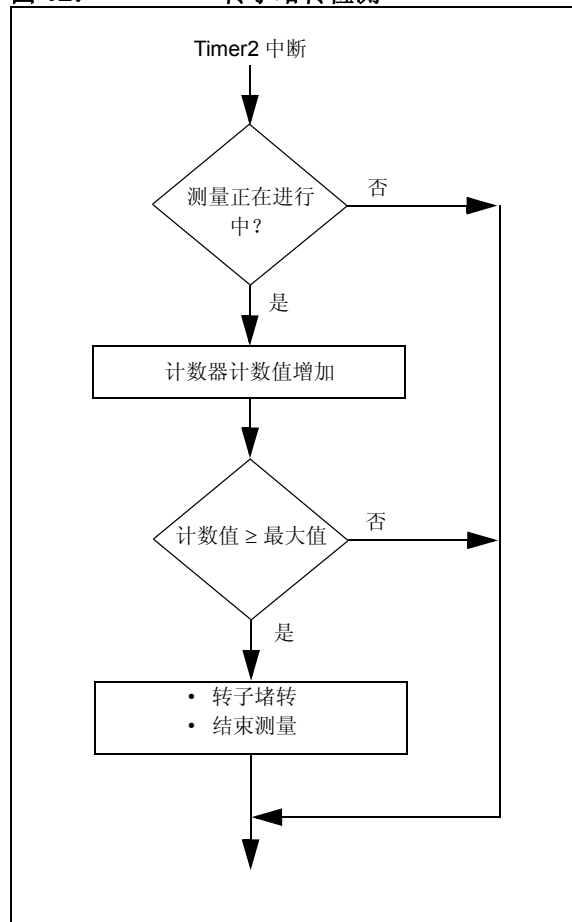
然而，由于 Timer2 从不停止，且总是以定义的时间间隔发生中断，因此，可以用它来创建一个软件定时器以测量风机的速度。下面将对此进行更加详细地介绍。

## 测量花费时间 / 转子堵转

当转子堵转时，对风机转速的测量会遇到困难。一旦风机转子受阻，其速度的测量将花费无限长的时间，因为霍尔器件的频率输出为零。

图 12 显示了一个用于测量霍尔器件周期的软件测量法的流程图。

图 12: 转子堵转检测



可以通过将软件计数值与某个最大值进行比较来处理转子堵转的问题。计数值一旦超过这个最大值，指示转子堵转情况的标志就会被置 1。这使得软件能够妥善处理这种情况。

然而，即使在测量完周期之后，仍然不能确定风机的转速，因为还需要使用一个数学程序来把霍尔器件的周期转换为转速 / 分钟（RPM）。下面将讨论这个问题。

## 测量数学程序

测量数学程序的目标是产生一个与风机给定 RPM 相对应的 8 位数（0 到 255）。例如，对于一台最大 RPM 是 3300 的风机来说，1650RPM 就与值 127 相对应，而 3300 RPM 就与值 255 相对应。这与 PWM 输入的情况类似（值表示全速的一个百分比）。



周期与 RPM 之间的关系成反比，如公式 5 所示：

公式 5：

$$\text{频率} = \frac{1}{\text{周期}}$$

更具体地说，需对数学程序的输出进行标定，以便仅得到 0-255 范围内的值，且这些值都特定于给定风机的最大 RPM。在这种情况下，公式变为：

公式 6：确定最大 RPM 常数

$$\text{速度} = \frac{\frac{(F_{\text{COUNT}} \cdot 255 \cdot 30)}{\text{RPM}_{\text{MAX}}}}{\text{定时器计数}}$$

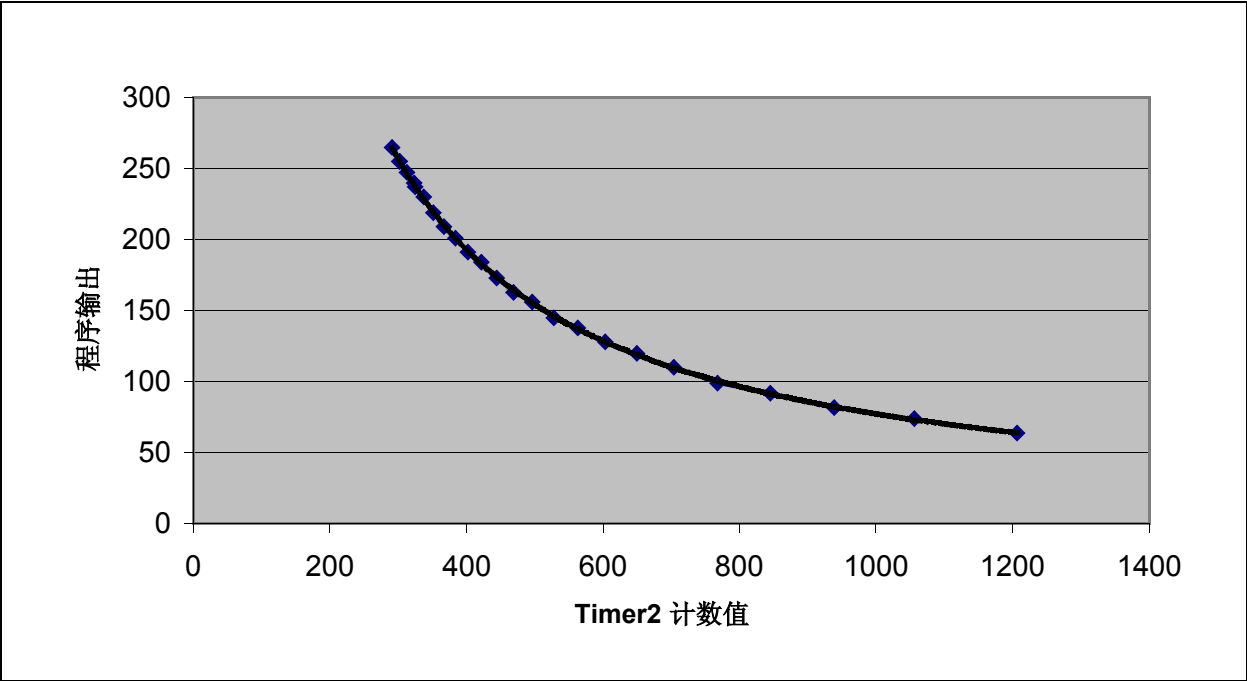
其中，F<sub>COUNT</sub> 是 Timer2 中断的频率（即 PWM 频率），255 是显示期望满量程响应的比例因子，30 是每秒钟从 RPM 到脉冲的转换因子。RPM<sub>MAX</sub> 是给定风机的最大 RPM。

**注：**比例因子选用 30 是假定霍尔器件每转能够提供两个脉冲（4 个沿）。这仅适用于 4 极电机，如果使用的是 8 极电机，就需要对该值作调整。

公式 6 中的分子是一个常数，必须在风机的特定范围内对其进行选择。一种较好的方法是使用 Excel 等工具来显示公式 6 的输出，对该常数进行最优化以达到舍入误差最小。

下面的图 13 所示的曲线给出了软件测量计数和数学程序输出之间的关系（就最大给定 RPM 和给定 PWM 频率而言）。

图 13：速度测量程序



下面重点考虑风机转速超过其最大转速时的情况。在公式 6 中，所得结果的低字节返回与风机转速相对应的 8 位数值（0 到 255）。然而，当风机转速超过其可编程的最大转速时，程序就会返回 9 位结果，由于仅把低 8 位取作风机的转速值，那么此时得到的结论就是风机旋转得非常慢。下面表 2 给出了一个实例，其假定风机的最大转速为 3300 RPM。

表 2：测量程序的输出

风机转速	程序输出	低字节
1500	115	115
3300	255	255
3500	270	14

由于以上情况的出现，有必要确保测量数学程序结果的有效性。方法很简单，即检测所得结果的高字节，如果为一个非零值，就设置指示测量无效的标志。

## 生成一个转速计输出

对于单片机来说，将转速值进行输出是一件相对简单的事情。可以采用很多种方法。

### 通用 I/O 引脚

通用 I/O 引脚可用于产生转速输出。这种方法的优点是它将信号完全置于软件控制之下。在某些情况下，如转子堵转的情况，希望将转速设定为某一水平（即转子堵转情况下总为高），这可以通过软件方法来实现。

该方法很明显的不足之处在于，对于每一次转换都需要进行软件处理。

### 使用全桥 ECCP

如果将 ECCP 模块用于全桥模式（正如先前在“对风机绕组进行 PWM 驱动”一节中所介绍的），那么 P1B 和 P1D 引脚就用作风机绕组的 PWM。使用方向改变功能来实现从 P1B 到 P1D 的转变。

在该模式下使用 ECCP 模块的一个副作用是，每次方向改变时，P1A 和 P1C 引脚也进行切换。可以把这个输出作为转速信号，在这种情况下并不需要软件处理进行转速测量。

### 使用比较器输出

正如前文中的位置检测部分所提到的，可以使用一个霍尔元件来确定转子位置。在这种配置下，比较器用于霍尔元件与单片机之间的接口，其输出用于提供位置数据。比较器的输出还可直接接到输出引脚上，从而为该配置提供转速输出。

## 生成一个报警输出

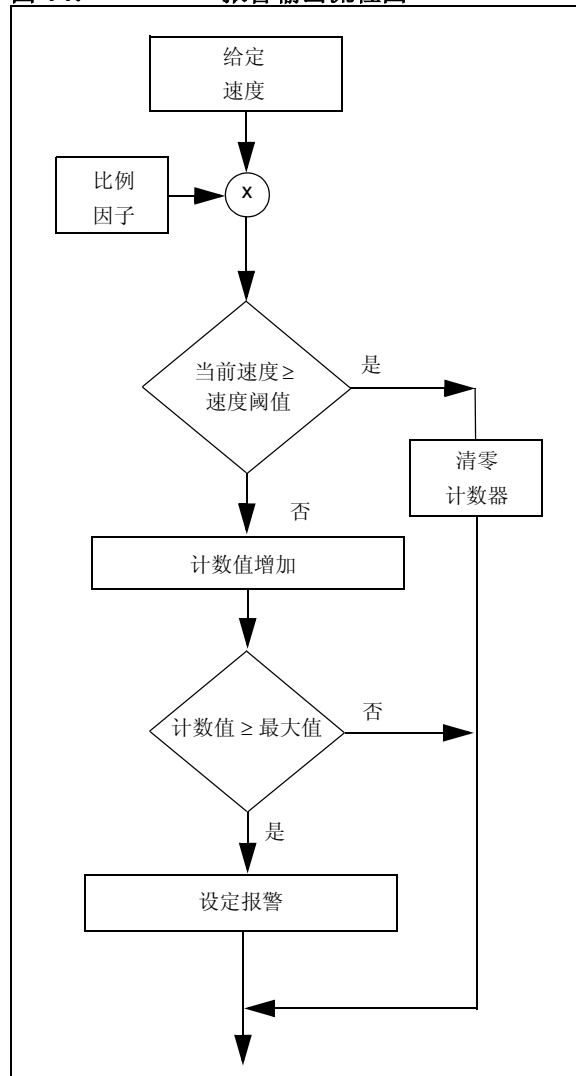
如果说转速计是一种常见的速度检测输出装置，那么报警信号就是另一个。

当出现问题时，报警信号用来通知主机。如果风机的转子发生堵转或风机无法达到其期望转速，那么就会发出报警信号来提醒相关系统。

比较不即时是生成报警输出的困难之一。也就是说，风机的转速低于某一阈值并维持一定时间才发出报警。如果不是这样，那么在风机速度增加到稳态速度之前，会一直发出报警，但这通常不是理想的运行状况。

下面图 14 所示的流程图显示了报警程序的操作。第一步是计算报警阈值，它是动态实现的。例如，报警阈值可以设置为给定速度的 65%。在这种情况下，对于 1000 RPM 的给定速度，阈值将是 650 RPM，而对于 2000 RPM 的给定速度，阈值将是 1300 RPM 等等。

图 14: 报警输出流程图



在计算出报警阈值之后，程序将当前速度与阈值速度作比较。如果当前速度太低，计数器的值将继续增加，并与一个最大值作比较以确定何时进入报警状态。如果当前速度高于阈值速度，则计数器清零，结束报警。

**注：** 可以使用很多种算法来检测报警状态，这只是其中的一种。

## 额外特性

以下部分将介绍几项可以加入到本设计当中的额外功能。

## 软启动和延时

典型无刷风机在首次通电时会汲取大量的电流。这会給电源带来额外的压力，还可能造成电压跌落。为避免这种情况，可以采用启动延时和启动缓冲。

在以下两种情况下，风机需进行启动延时：

1. 风机近期通过电
2. 风机正以零速运行，而控制器令其以非零速运行

该延迟将显著减少风机的浪涌电流。

另外，当不希望风机立即进入全速运行时，可以使用斜坡启动。该方式将使风机能够缓慢增加其速度到运行速度。将开机延时与斜坡启动结合使用将确保风机不会产生很大的浪涌电流。

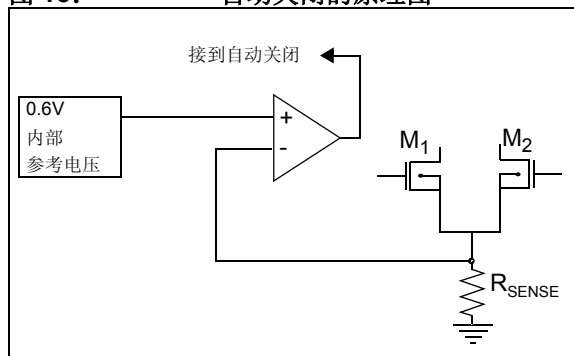
## 限流

根据所用的器件和配置，也可以限制流入风机绕组中的电流。

限流需要使用模拟比较器。然而，直接霍尔元件接口也需要一个比较器。因此，像 PIC12F615 这样的器件不能同时实现霍尔元件接口和限流功能。

如果具有一个模拟比较器，就可以实现限流功能，如下面图 15 所示。

**图 15： 自动关闭的原理图**



在图 15 中，M1 和 M2 是风机绕组的两个开关器件。比较器用来将检测电阻  $R_{SENSE}$  上的电压与内部产生的 0.6 伏参考电压进行比较。

在该配置中，比较器与 PWM 模块的自动关闭逻辑相连。如果比较器的输出翻转，PWM 将自动处于空闲状态。这样配置器件的目的是，一旦比较器输出为低，将允许 PWM 再次运行。

该硬件功能允许按周期对绕组电流进行限制，而不需要任何软件资源或用户干预。此外，当电流值超过跳闸翻转值时会产生一个中断并采取相应的软件措施。

## 电路原理图概览

附录 A 中提供了一个实例的硬件原理图，这里将对其进行详细介绍。

## 保护元件

采用必要的保护元件是该硬件设计的重要组成部分。

- 反向极性保护——设计中采用二极管 D1 是为了实现反向极性保护功能。它能够限制功率管反接时的电流。
- 选用 R2、R3 和 R4 来限制切换过程中或 MOSFET 故障（流入 MOSFET 栅极过多电流）时流入 MOSFET 栅极的电流。
- 下拉电阻 R5 和 R6 用来防止 MOSFET 栅极上发生电荷累积。这将保证风机第一次通电时不会产生过大电流。

- 将串联电阻 R9 接在电路中以防止热拔插时损坏单片机。热拔插是将风机插入到通电系统中的一种操作。发生这种情况时，一些引脚可能比另一些引脚先接通，从而引起过流。

更具体地说，当 PWM 引脚比接地引脚先接通时，会形成一条流入单片机并从 PWM 引脚流出再到主机系统的电流通路。这种情况会同时损坏单片机和主机系统。

- 使用电容器 C1 和 C2 来防止漏-源电压产生尖峰以及损坏 MOSFET。

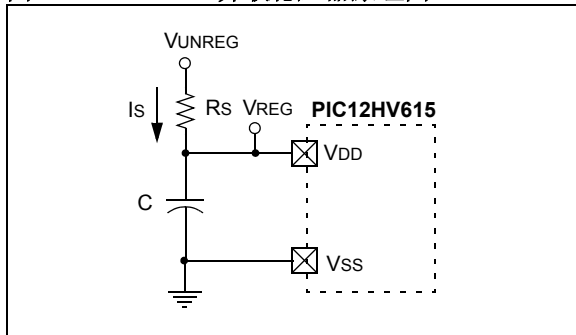
## 并联调节器

为降低系统成本，可以选用具有 HV 选项的 PIC12F615 和 PIC16F616 单片机，其相应型号为 PIC12HV615 和 PIC16HV616。

HV 型器件中含有一个集成并联稳压器，其可用于代替传统的齐纳稳压器或线性稳压器。

并联稳压器的电路原理图如图 16 所示。

图 16: 并联稳压器原理图



并联稳压器具有良好的成本效益，它仅需一个电阻即可运行，且不受与线性稳压器有关的电压限制。此外，它还可为其它元件提供稳定的电压。

## 风机的响应特性

下面两个曲线图（图 17 和图 18）表征的是两台不同的无刷直流风机的不同响应特性。这两个曲线图是通过将风机绕组的 PWM 占空比设置为一个固定值，然后观察风机最终速度得到的。了解风机速度随占空比变化的规律将使得控制程序的实现更为容易。

风机的响应特性也随着电源电压和 PWM 占空比而变化。对于 1 号风机，如图 17 所示，非常小的占空比范围（0%-10%）却能覆盖非常宽的速度范围。为了达到某一速度，其控制程序有必要在各占空比之间进行快速切换。

对于 2 号风机，如图 18 所示，它所需占空比的范围较大（50%-100%）。然而，当占空比低于 50% 时却对风机速度没有影响，而且只会浪费电能。对这台风机来说，由于占空比的任何变化都会通过外部运行噪音反映出来，因此重要的是如何设计一个控制器使其在合适占空比条件下运行于稳定给定速度。

图 17: 1 号风机的响应曲线

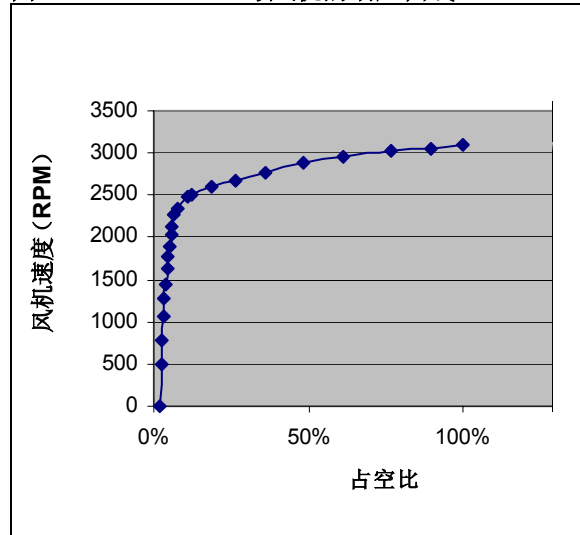
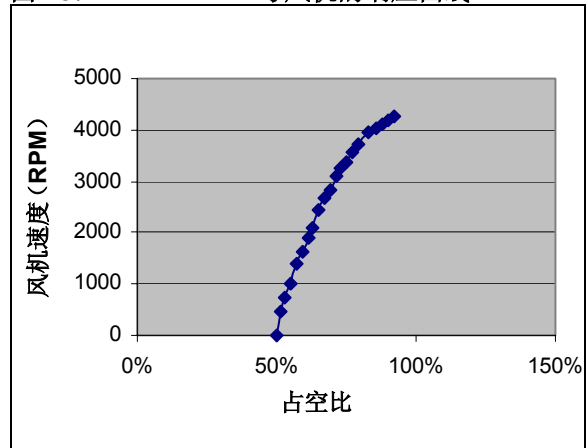


图 18: 2 号风机的响应曲线



控制环软件

本系统的框图如下面的图 19 所示。其中，速度测量模块、设定点测量模块和 PWM 模块已在前文中详细介绍过。现在来介绍控制环。

在对风机进行控制时，存在以下几个问题：

- PIC 单片机仅能控制风机速度增加，却不能减小。
- 风机具有极长的稳定时间和极慢的响应速度。
- 风机的运行条件，包括电压和负载，可能会随时突变。

本控制环软件还取决于实际要求。例如，大部分的风机应用都要求速度控制软件不能引入额外的噪声（即在两个占空比之间剧烈切换引起噪声）。满足这种要求可能是以较慢的响应速度或较长的稳定时间为代价的。

不过，也可以将控制环设计为能够快速达到其设定点，但这样会增加超调量和噪声。

PID 控制（1 号风机）

对于很多应用来说，比例 - 积分 - 微分（PID）控制是一种常用的控制方法。很多应用笔记中都介绍过 PID 控制，例如 AN258、AN964 和 AN937。具体地说，可以使用 AN258 中提供的程序作为 1 号风机的控制环软件。

考虑到风机需要相当长的稳定时间，因此 PID 程序中的微分项对系统几乎没有影响，通常可以将其完全忽略。

加大增益（比例项）将使得风机能够较快地达到期望速度。然而，在某些情况下，它可能会造成风机在不同的占空比之间快速变化而产生噪声。

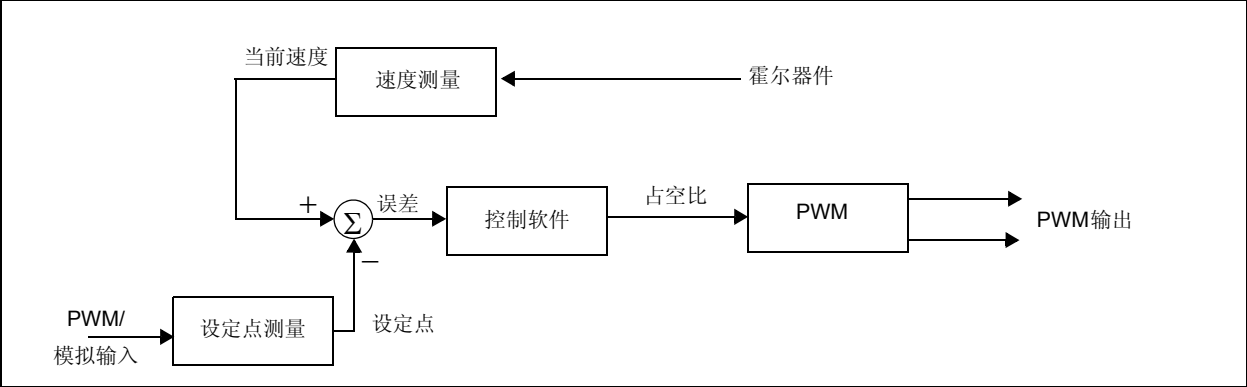
PID 算法的一个缺陷是不容易实现不同 PID 系数之间的切换。例如，当风机的转速从一个低的设定点增加到一个高的设定点时，控制器能够恰当地控制占空比。然而，如果速度突然减小，控制环将无法使风机减速，最终，速度会降到期望值以下。

例如，如果风机在 100% 附近运行，设定点降到最小值（例如 10%），那么风机转速就可能急剧减小以至停转。因此，测试这些情况以确保控制器运行良好，并找到在所有情况下都能获得可接受响应的 PID 常数，就显得尤为重要。

积分控制（2 号风机）

积分控制器是另一种类型的控制器，如公式 7 所示。这种控制器适用于 2 号风机。

图 19: 控制环的框图



公式 7: 积分控制器

输出 =  $\Sigma K_i \cdot \text{误差}$

这种控制器的一个优点是可以对常数  $K_i$  进行修正，而输出不会发生突变。根据当前速度条件，可以选择合适的  $K_i$ 。例如：

- 如果当前速度远大于期望速度，那么风机需要减速到期望速度。这可以通过减小  $K_i$  来实现。
- 如果当前速度接近于期望速度，那么  $K_i$  可以设置为标准运行值。
- 如果当前速度远小于期望速度，那么风机需要加速。可以通过增加  $K_i$  使风机达到快速响应。

2 号风机之所以选用积分控制器，是因为当期望速度减小时，该控制器能够消除速度下冲现象。

这种控制器通常比 PID 控制器具有更长的稳定时间。然而，风机控制器的主要目标之一是降低噪声，因此这种逐步变化是可取的。

## 消除稳态抖动

正常运行情况下，控制环软件会令风机的实际速度等于期望速度。然而，由于 PWM 分辨率和速度测量分辨率的限制，这可能无法实现。

在这种情况下，风机实际转速可能会在期望转速附近振荡。控制环选择过小的占空比将导致风机转速小于期望转速，而控制环选择较大的占空比，可能出现占空比过大而造成风机旋转太快的情况。

如果风机的转速在期望转速附近的振荡比较快，那么这可能在视觉和听觉上并不明显。但如果振荡过程非常慢，可能会非常明显，从而产生问题。

这里推荐两种消除振荡的方法：

1. 增加 PWM 分辨率
2. 采用死区

在这两种方法中，增加 PWM 分辨率的方法最可取。本文档的 PWM 驱动部分已从硬件和软件两个方面介绍了如何使分辨率最大化的方法。

然而，如果无法将 PWM 分辨率最大化，或者这样做仍然无法取得令人满意的结果，那么可使用死区方法。

死区是通过修改误差信号起作用的。如果误差的幅值小于某个量，就将误差设置为零。这可表示如下：

### 公式 8：死区

$$\text{误差} = \begin{cases} 0 & \text{如果 } |\text{误差}| < \text{某个常量} \\ \text{误差} & \text{其他情况} \end{cases}$$

死区的作用是忽略小的误差，认为它们是零。这将消除由微小误差引起的抖动。但它会产生一些副作用。

忽略误差中的微小变化也相当于忽略了输入速度的微小变化。如果死区设置为 2，为了使风机的速度发生实际变化，输入速度可能需要变化 4。

使用死区还要求控制环的状态机发生变化。如果实际非常接近于死区常数，那么抖动仍可能发生（取决于测量精度），除此之外，还会引起实际信号在常量和 0 之间抖动，这可能会造成不稳定行为。

比较可取的做法是，一直等到风机实际速度达到期望速度再使能死区。如果风机速度不在死区作用范围之内，那么就禁用死区，直到风机速度再次达到期望速度为止。

## 最终响应

下面两个曲线图显示了最终版软件的响应特性。第一张曲线图（图 20）是速度随时间变化的瞬态响应图。期望速度首先设置为高值，然后为低值，再设置回高值。这样做可以检测和显示所发生的超调和下冲现象。

第二张曲线图（图 21）显示了实际输出速度（稳定之后）与输入占空比（期望速度）之间的线性度。这有助于确定对于给定输入速度，风机的精确度如何。

图 20: 瞬态响应曲线

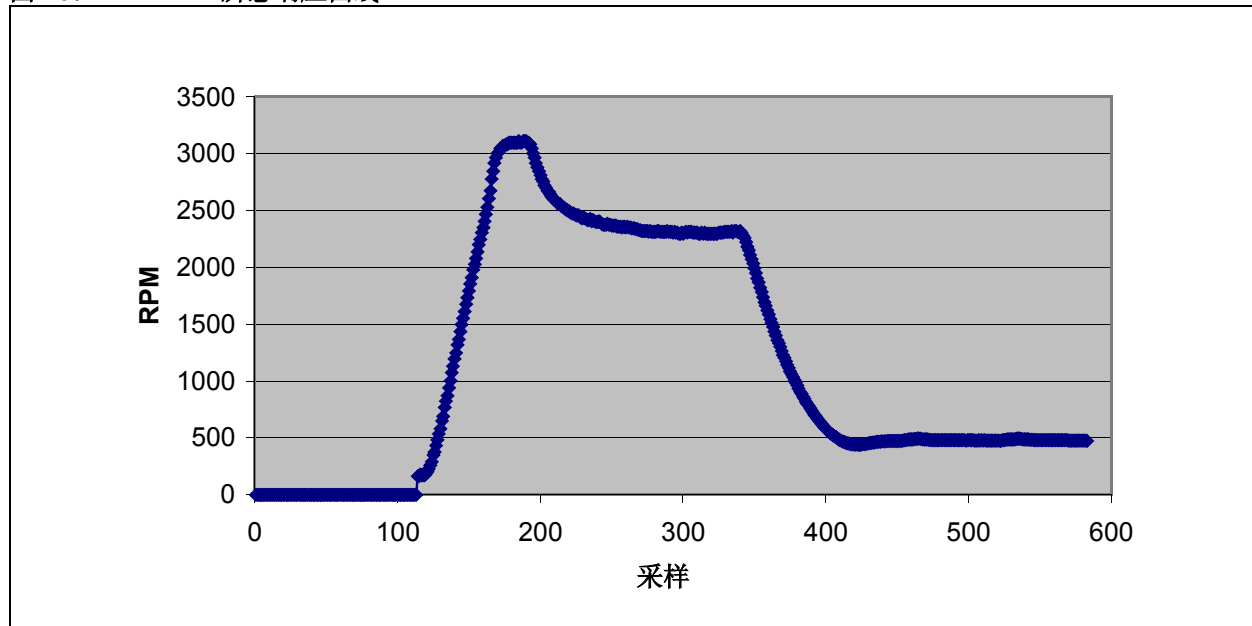
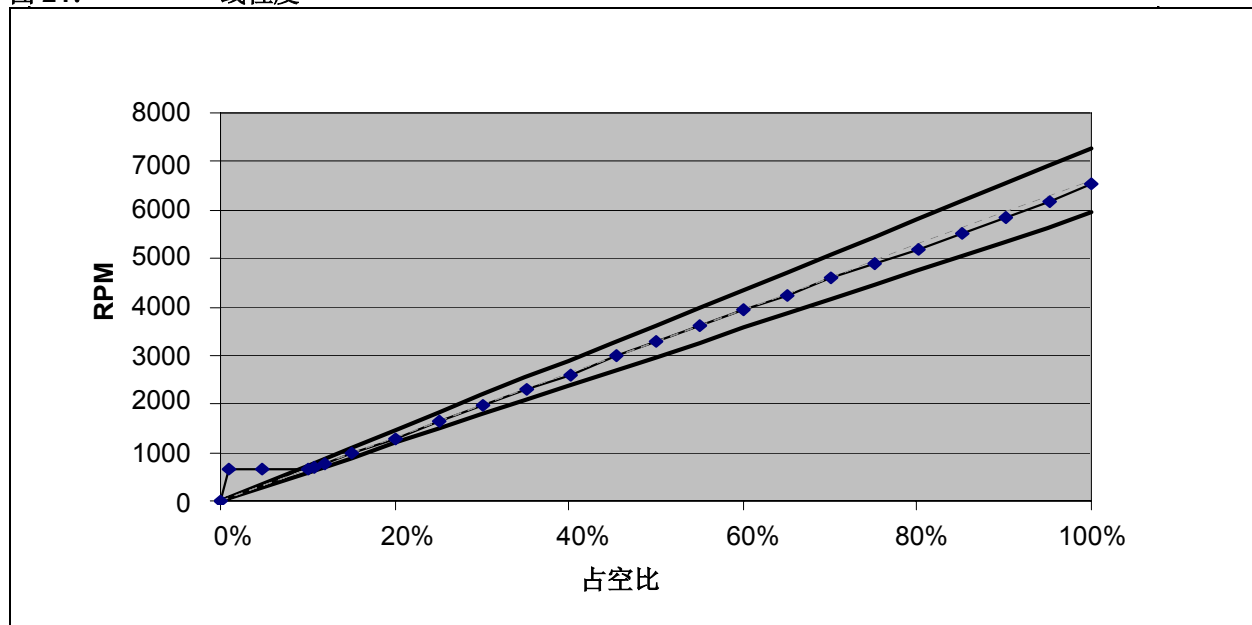


图 21: 线性度



## 软件实现

本应用笔记中包含有可用于 PIC12F615 和 PIC16F616 这两款单片机（它们能够实现本用笔记中介绍的所有功能）的汇编语言软件。

该软件使用一系列 **#define** 语句来配置各种选项，例如转速或报警输出，绕组 PWM 输出为高电平有效还是低电平有效等。在源代码中使用注释来说明了这些选项。

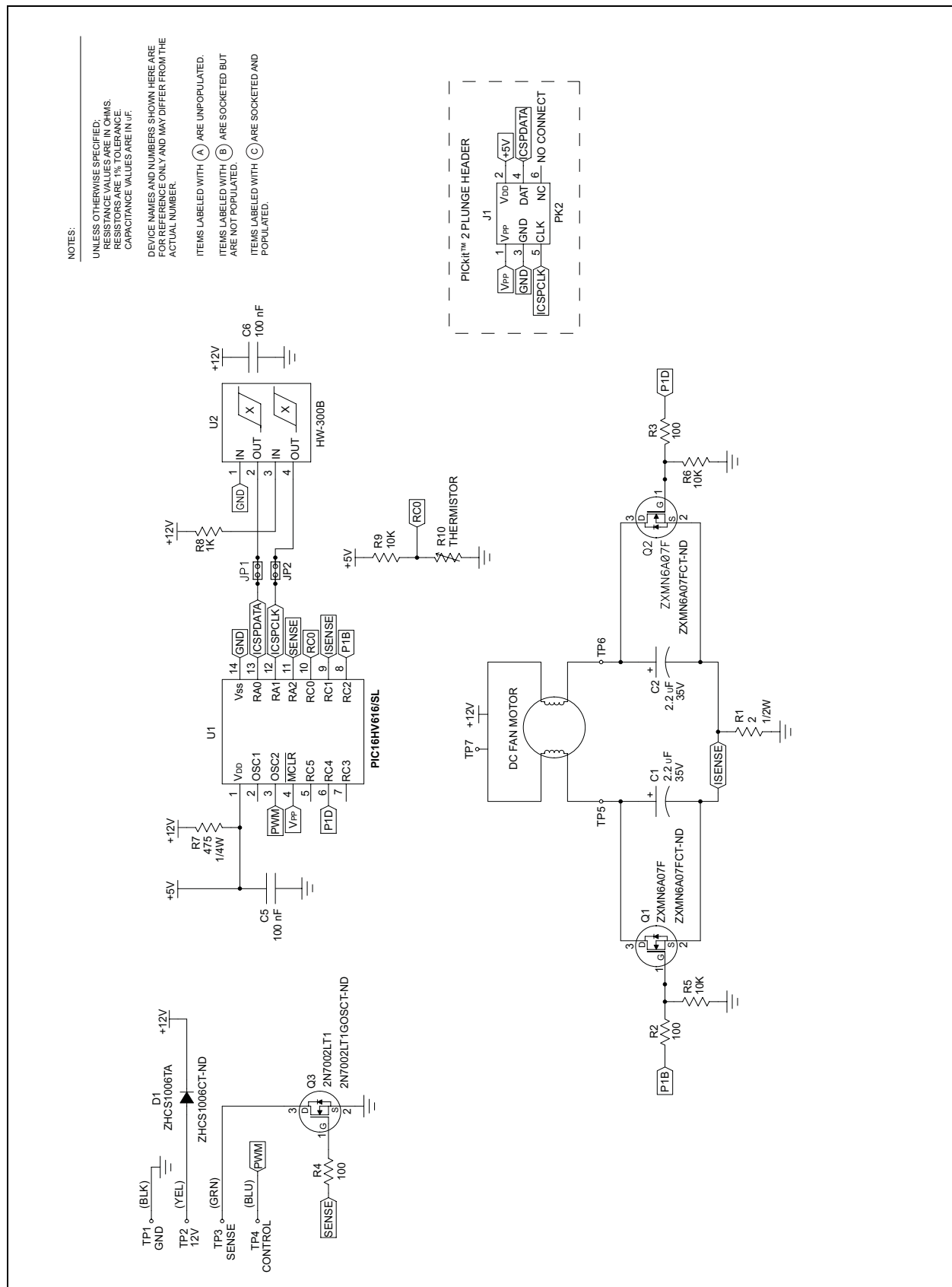
该软件大约使用了程序存储器中 800-900 个字以及数据存储器中 40-50 个字节。其确切的大小要受各种编译选项的影响。

## 参考文献

- AN847     “*RC Model Aircraft Motor Control*”  
          (DS00847)
- AN857     “*Brushless DC Motor Control Made Easy*”  
          (DS00857)
- AN893     “*Low-Cost Bidirectional Brushed DC Motor Control Using the PIC16F684*”  
          (DS00893)
- AN894     《使用 dsPIC30F MCU 控制交流感应电机》  
          (DS00984A\_CN)
- AN898     《根据电机控制应用需求选择合适的 MOSFET 驱动器》(DS00898A\_CN)
- AN905     《有刷直流电机基础》(DS00905A\_CN)



## 附录 A: 电路原理图



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。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、rPIC、SmartShun 和 UNI/O 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、PIC<sup>32</sup> 徽标、PowerCal、PowerInfo、PowerMate、PowerTool、REAL ICE、rLAB、Select Mode、Total Endurance、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<sup>®</sup> MCU 与 dsPIC<sup>®</sup> DSC、KEELOQ<sup>®</sup> 跳码器件、串行 EEPROM、单片机外设、非易失性存储器 and 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。

## 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://support.microchip.com>  
网址: [www.microchip.com](http://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