AN2049

单相 BLDC 电机驱动器

作者： *Mike Gomez 和*
Mark Pallones
Microchip Technology Inc.

简介

本应用笔记介绍单相无刷直流（Single-Phase Brushless DC， BLDC）电机的驱动解决方案。 Microchip 的 PIC16F1618 提供了功能丰富的外设，可实现半桥开关的控制、设置电机转速、预测转子位置、校正转速误差、检测故障事件、优化换相，并确保程序存储器数据完整性。

本应用笔记中介绍的解决方案具有以下重要功能：

- 全桥电机控制
- 外部 PWM 转速控制
- 软件可配置和硬件实现的 PID
- 过流检测
- 过温检测
- 电机失速检测
- 支持不可变存储器测试 IEC60730 标准 B 类认证

框图

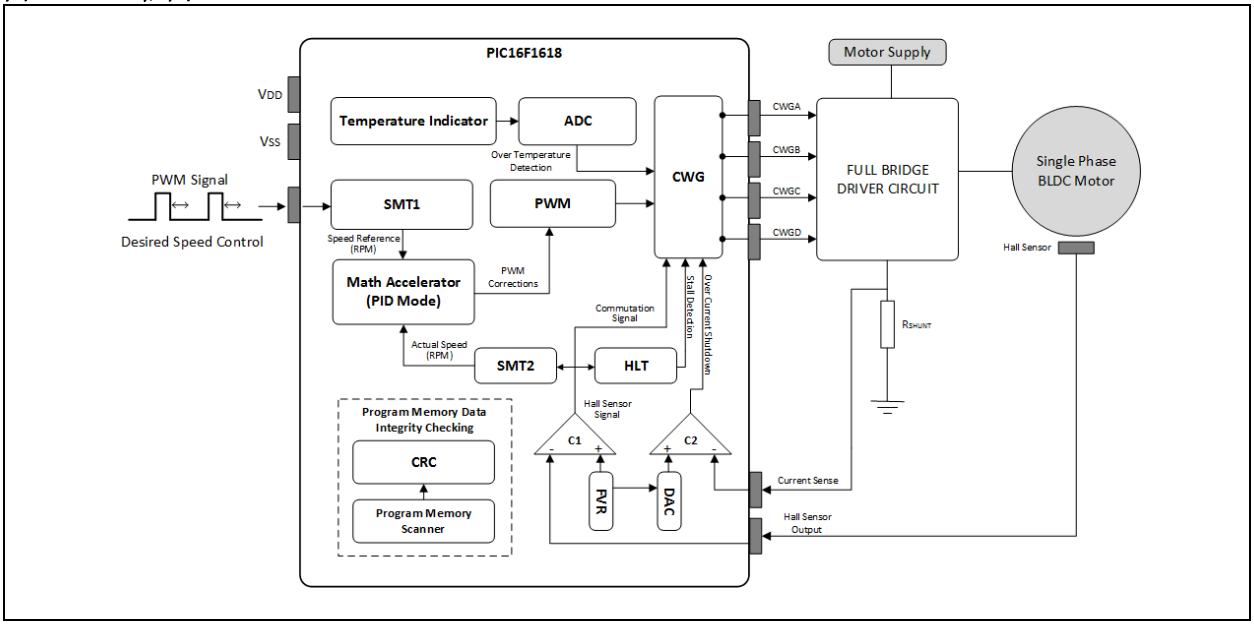
图 1 显示了基于 PIC16F1618 单片机的单相 BLDC 电机驱动器的框图。电机驱动器利用单片机中的独立于内核的外设（Core Independent Peripheral， CIP）执行电机控制功能，仅需极少量的中央处理器（Central Processing Unit， CPU）干预。其设计采用了以下 CIP：

- 信号测量定时器（Signal Measurement Timer，SMT）
- 互补波形发生器（Complementary Waveform Generator， CWG）
- 循环冗余校验（Cyclic Redundancy Checking，CRC/ 扫描）
- 硬件限制定时器（Hardware Limit Timer， HLT）
- 数学加速器（Math Accelerator， MathACC）
- 外设引脚选择（Peripheral Pin Select， PPS）
- 温度指示器（TempIndi）
- 比较器（CMP）

这些 CIP 与 I/O 端口、模数转换器（Analog-to-Digital Converter， ADC）、固定基准电压源（Fixed Voltage Reference， FVR）、数模转换器（Digital-to-Analog Converter， DAC）、脉冲宽度调制器（Pulse-Width Modulation，PWM）和定时器等其他片上外设组合在一起，实现整个系统的智能性。

这些外设通过固件进行内部连接，从而显著减少了该实现所需的外部引脚数。详细原理图请参见**附录 A：“电路原理图”**。

图 1：　框图

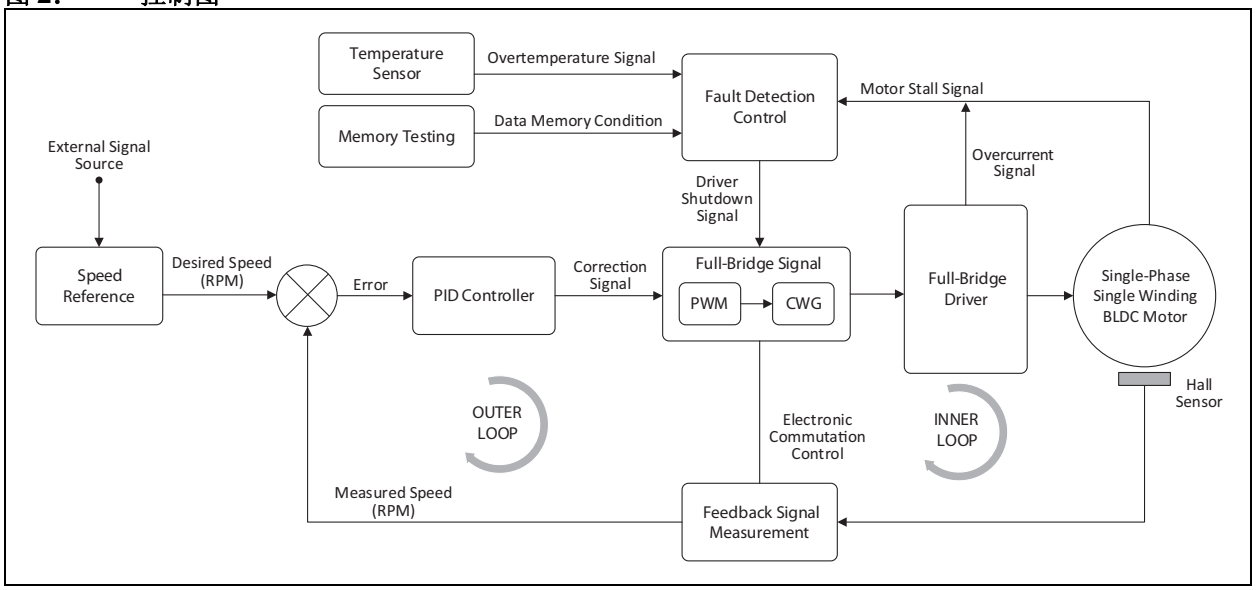


© 2016 Microchip Technology Inc.

控制电机

图 2 显示了电机驱动器的控制图。该驱动器采用两个反馈环路：内部环路负责电机电子换相控制，外部环路负责转速控制和校正。

图 2： 控制图



转速基准

在图 2 中显示的转速基准模块用于设定需要的电机转速。转速基准值越高，电机旋转越快。转速基准的计算取决于以下参数：

- 额定 / 标称电机转速
- 信号测量 Timerx 捕捉周期寄存器 （Signal Measurement Timerx Captured Period Register，SMTxCPR）值
- 信号测量 Timerx 捕捉脉冲宽度寄存器 （Signal Measurement Timerx Captured Pulse-Width Register， SMTxCPW）值

额定的电机电压和转速可在电机的技术规范中找到。在本应用笔记中，额定电机电压为 9V，额定电机转速为 3200 RPM。

外部 PWM 信号转速基准

电机驱动器的转速基准基于外部 PWM 信号。作为电机控制器的输入，外部信号的占空比决定了电机的转速。占空比越高，电机旋转越快。

通过使用信号测量定时器（SMT）外设，可以测量输入信号的占空比，并将其转换为等效转速基准，以每秒转数（RPM）为单位。当利用重复的数据采集为周期和占空比模式配置了 SMT 时，外设按输入信号分割其时钟源（SMTxCLK），并分别通过 SMTxCPW 和 SMTxCPR 寄存器捕捉脉冲宽度和周期。公式 1 表示 SMT 用于确定 SMTxCPR 和 SMTxCPW 值的公式。一旦确定了 SMTxCPR 和 SMTxCPW 值，它们将用于计算 PWM 占空比，如公式 2 所示。该结果与额定电机转速相乘，得出转速基准 （RPM），如公式 3 所示。表 1 使用具有 HFINTOSC （16 MHz）的 500 Hz 输入信号作为选定 SMT 时钟源，显示了转速基准相对于输入信号占空比的汇总。

© 2016 Microchip Technology Inc.

公式 1： SMT 脉冲宽度和周期计算

$$SMT \times CPW = \frac{SMT \times CLK_{(Frequency)}}{Input\ Signal_{(Frequency)}} \times Duty\ Cycle\ (\%)$$

$$SMT \times CPR = \frac{SMT \times CLK_{(Frequency)}}{Input\ Signal_{(Frequency)}}$$

公式 2： 输入信号占空比计算

$$Duty\ Cycle = \frac{SMT \times CPW}{SMT \times CPR}$$

$$Duty\ Cycle\ (\%) = \frac{SMT \times CPW}{SMT \times CPR} \times 100$$

公式 3： 通过占空比计算转速基准

$$Speed\ Reference\ (RPM) = Duty\ Cycle \times Rated\ Motor\ Speed$$

表 1： 基于输入信号占空比的 RPM 值

占空比	SMTxCPW	SMTxCPR	转速基准 （RPM）
100%	32000	32000	3200
90%	28800	32000	2880
80%	25600	32000	2560
70%	22400	32000	2240
60%	19200	32000	1920
50%	16000	32000	1600
40%	12800	32000	1280
30%	9600	32000	960
20%	6400	32000	640
10%	3200	32000	320

内部环路

在单相 BLDC 电机中，四槽定子包括绕组，转子是四极永久磁铁。图 3 显示了单相 BLDC 电机的标准结构。转子是产生电机旋转运动的部件。要让转子旋转，必须有定子产生的旋转磁场。单个绕组进行电励磁，以产生旋转磁场。要提供连续的旋转，并防止永磁转子与定子卡死，定子绕组上的励磁必须按照特定方式排序，同时要知道转子磁铁的准确位置。转子磁铁位置通过使用霍尔效应传感器来确定。

图 3：　　单相 BLDC 电机结构

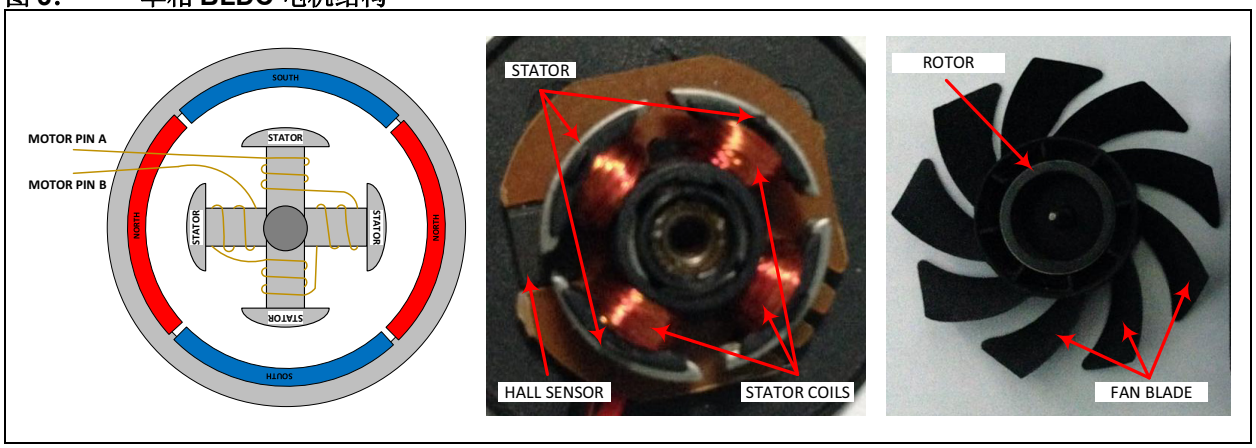


图 4 显示了基于霍尔传感器的时序控制。互补波形发生器（CWG）输出控制定子绕组的励磁，它取决于霍尔传感器输出的状态。为了控制 CWG 输出，比较器将霍尔传感器输出与固定基准电压源（FVR）进行比较。比较器迟滞已使能，以忽略霍尔传感器输出可能增加的噪声。比较器的输出可切换 CWG 的 CWG1CON0 寄存器的CWG1MODE0位。当CWG1MODE0位有效时，CWG 输出处于正向全桥模式，而当该位无效时，CWG 输出处于反向全桥模式。从正向到反向模式的切换产生顺时针旋转，而从反向到正向模式的切换产生逆时针旋转。

CWG 输出馈送到全（H）桥电路的开关输入。图 5 显示了正向和反向全桥操作，以及四槽定子应该基于 CWG 输出产生的相应磁极性。在正向模式中，Q1 处于打开状态，Q2 和 Q3 处于关闭状态，Q4 进行调制。在反向模式中，Q1 和 Q4 处于关闭状态、Q2 进行调制，Q3 处于打开状态。为了产生一个电周期，必须执行正向－反向组合。电机的一次机械旋转需要两个电周期，因此必须执行两个正向－反向组合，才能完成电机的一次顺时针旋转。

© 2016 Microchip Technology Inc.

图 4：　　传感器和驱动时序图

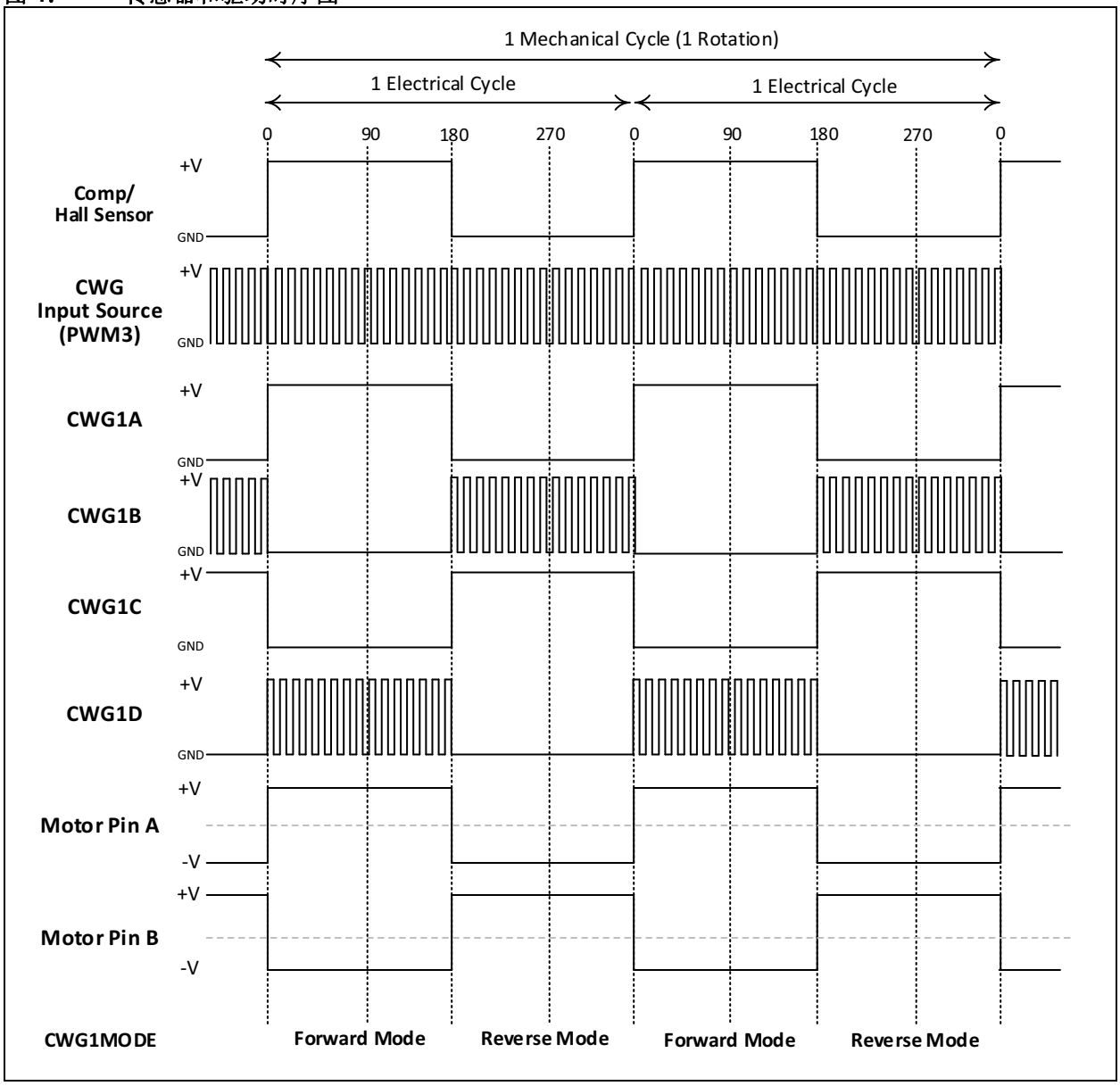
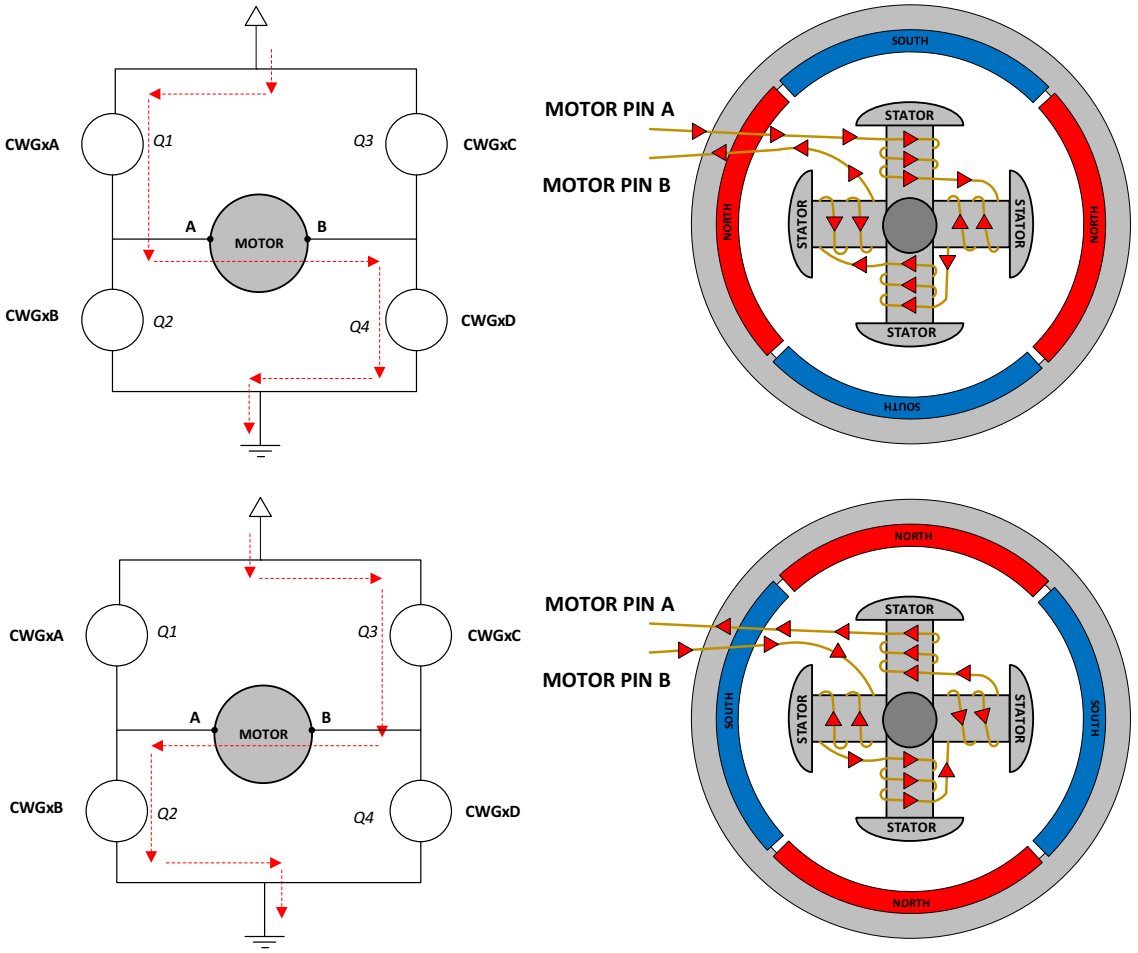


图 5：　　正向和反向全桥操作



	FORWARD MODE	REVERSE MODE
Q1	ON	OFF
Q2	OFF	MODULATED
Q3	OFF	ON
Q4	MODULATED	OFF

© 2016 Microchip Technology Inc.

全 （H）桥电路

附录 A：“电路原理图”显示了全桥电路的原理图，主要包括两个 P 沟道 MOSFET 作为上桥臂开关，两个 N 沟道MOSFET作为下桥臂开关。与使用N沟道MOSFET作为上桥臂开关相比，使用 P 沟道 MOSFET 的主要优势是上桥臂开关位置的栅极驱动技术更加简单，从而降低了上桥臂栅极驱动电路的成本。晶体管 Q5 和电阻 R1、 R3 和 R5 配置为射极跟随器，它充当电平移位电路，以驱动 P 沟道 MOSFET Q1。同样，在全桥电路的另一个支路上，晶体管 Q6 和电阻 R2、 R4 和 R5 也配置为通过这种方式驱动 Q3。当 CWG1A 输出高时，Q5 导电， R1 相对于 V_MOTOR 的电压提供了负压，为栅极－源极电容充电，并打开 Q1。同样，当 CWG1C 输出高时， Q6 和 R2 电压以相同的工作方式打开 Q3。打开 Q1 和 Q3 时， R1 和 R2 的电压应该大于栅极阈值电压 $V_{GS(TH)}$，而且低于 Q1 和 Q3 的最大栅极－源极电压 $V_{GS(MAX)}$。 Q1 和 Q3 的栅极－源极电压可以使用公式 4 和公式 5 进行计算。当 CWG1A 低时，Q5 处于关闭状态， Q1 的栅极－源极电容电压通过 R1 放电，并关闭 Q1。同样，当 CWG1C 低时，Q6 和 Q3 在 R2 上放电以相同的工作方式关闭 Q3。Q1 和 Q3 有效地转换 CWG1A 和 CWG1C PWM 输出信号。

桥臂贯通是上桥臂和下桥臂开关都打开的情况，我们应该避免这种情况发生。否则，它将产生电流直通，可能损坏驱动器的元件。使用 CWG 的计数寄存器，可使 CWG 输出产生死区延迟。这样可以提供无重叠的输出信号，它们将不允许上桥臂和下桥臂开关同时导通。CWG 包含两个 6 位死区延迟计数器，其中一个用于输入源的上升沿，另一个用于输入源的下降沿。死区延迟的定时方法是计算 CWG 时钟周期，从零直到两个 CWG 计数器寄存器 （CWG1DBR 和 CWG1DBF）中的指定值。图 6 显示了存在死区延迟时的 CWG 输出。

公式 4： P 沟道 MOSFET（Q1）栅极－源极电压 （V_{GS}）

$$V_{GS(Q1)} = -\frac{(V_{DD} - V_{BE(Q1)}) \times R1}{\frac{R3}{\beta_{DC}} + R5} \times \left(1 - \frac{1}{\beta_{DC}}\right)$$

$\beta_{DC} = Q5$ *直流电流增益*

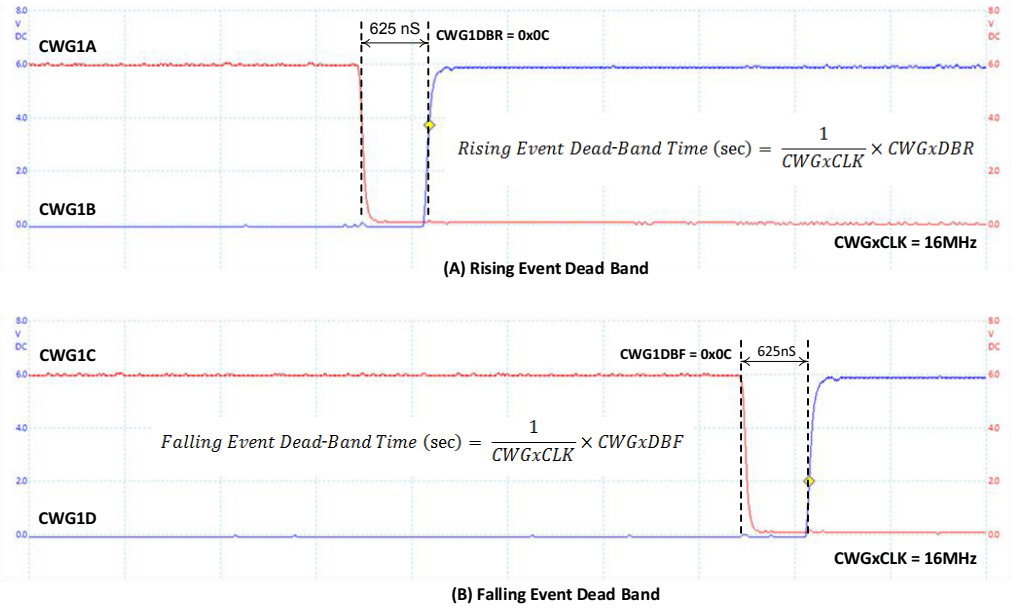
公式 5： P 沟道 MOSFET（Q3）栅极－源极电压 （V_{GS}）

$$V_{GS(Q3)} = -\frac{(V_{DD} - V_{BE(Q3)}) \times R2}{\frac{R4}{\beta_{DC}} + R5} \times \left(1 - \frac{1}{\beta_{DC}}\right)$$

$\beta_{DC} = Q6$ *直流电流增益*

© 2016 Microchip Technology Inc.

图 6：　CWG 输出死区定时器



虽然已经提供了死区，但仍然存在 Q1 和 Q2 或 Q3 和 Q4 同时导通的可能。原因是与栅级－漏级内部密勒电容相关的 MOSFET 自导通现象。当 Q1 处于关闭状态且 Q2 正在调制时，在 Q2 打开的瞬间， Q1 和 Q2 的漏电压从 V_MOTOR 降低至 0V。Q1 漏极的电压快速下降变化（dv⁄dt）产生了电流，通过 Q1 的寄生栅级－漏级密勒电容器 （CGD），在 R1 和 Q1 的内部栅级－漏级电容器（CGS）中流动。因此，在关闭状态下，Q1 的 VGS 可从 0 增加至特定电压电平。如果 VGS 到达阈值电压，也就是 Q1 的 VTH，Q1 将会错误打开，Q1 和 Q2 将发生跨越导通。同样，当 Q1 和 Q2 处于关闭状态时，在 Q1 打开的瞬间， Q1 和 Q2 的漏电压从 0 增加至 V_MOTOR。Q2 漏极的电压快速上升变化 （dv⁄dt）产生电流，通过 Q2 的 CGD，流经 R6 和 Q2 的 CGS。因此，在关闭状态下，Q2 的 VGS 可从 0 增加至特定电平。如果 VGS 到达 Q2 的 VTH， Q2 将会错误打开， Q1 和 Q2 将发生跨越导通。全桥电路的另一个支路也很容易出现这种现象。

VGS 的耦合效应可以使用公式 6 进行粗略计算，其中 R 是电路中的总栅极电阻， CRSS 等于 CGD， CISS 等于 CGS + CGD， VDS 是下桥臂开关的漏极－源极电压，dv⁄dt 是下桥臂开关的漏极－源极电压变化。

公式 6：　VGS 耦合效应计算

$$V_{GS(MILLER)} = \frac{dv}{dt} \times R \times C_{RSS} \cdot \left\{ 1 - e^{\left(\frac{-V_{DS}}{\frac{dv}{dt} \times R \times C_{ISS}} \right)} \right\}$$

© 2016 Microchip Technology Inc.

为了减小内部耦合效应，MOSFET 的栅极－源极终端上连接了外部电容器。在原理图中， Q1、 Q2、 Q3 和 Q4 的栅极－源极终端上分别连接 C1、C2、C3 和 C4。这些电容器增加了每个相应 MOSFET 的有效 CISS。例如，当 Q1 的栅极－源极终端上连接 C1 时，Q1 的 CISS 的有效值等于 CGS + CGD + C1。参考公式 6，当 CISS 增加时，由于密勒耦合， Q1 的 VGS 降低。

在此应用中，选择 MOSFET 时的关键参数基于器件 RDS(ON)（打开时电阻）和 QG（总栅极电荷）。理想情况下，全桥电路中的 N 沟道和 P 沟道 MOSFET 应该具有相同的 RDS(ON) 和 QG，以便达到优化的开关性能。因此，可以非常方便地选择 P 沟道和 N 沟道器件的互补对，以匹配这些参数。但是，由于两个 MOSFET 的构造差异，这一点不可能实现。 P 沟道的芯片尺寸必须达到 N 沟道的两至三倍，以匹配 N 沟道 RDS(ON) 性能，但芯片尺寸越大，对其动态性能（例如 QG）的影响也越大。另一方面，当 P 沟道具有与 N 沟道相同的 QG 值时， P 沟道和 N 沟道将具有相同的芯片尺寸，但 P 沟道的 RDS(ON) 值大于 N 沟道。由于这种权衡取舍关系，我们必须在RDS(ON)和QG之间选择哪一个参数将对MOSFET的开关性能产生最大影响。这一决定要根据 MOSFET 的工作开关频率来确定。在高工作频率下（大于 50 kHz），开关损耗占主导地位。当 P 沟道的 QG 值与 N 沟道 MOSFET 相当时，它将会显著减小整体 MOSFET 功率损耗。相反，在低工作频率下 （小于 50 kHz），导通损耗占主导地位。当P沟道的RDS(ON)值与N沟道MOSFET相当时，它将会显著减小整体 MOSFET 功率损耗。在此电机驱动器解决方案中，开关频率为 15.625 kHz ；因此，我们通过可比较的 RDS(ON) 值来选择 P 沟道和 N 沟道 MOSFET，如表 2 所示。

表 2： MOSFET 特性 （QG 和 RDS(ON)）

MOSFET 类型	P/N	QG	RDS(ON)
P 沟道	FDS6375	26 nC	0.024Ω （VGS = -4.5V 时）
N 沟道	NDS8425	11 nC	0.022Ω （VGS = 4.5V 时）

注： 其他 MOSFET 驱动器也可与本应用笔记中设计的全桥电路配合使用。有关可用全桥驱动器的完整列表，请参见：www.microchip.com。

外部反馈环路

图 2 中显示的外部环路提供电机转速的测量和控制。控制电机转速的目的是在不同条件下（例如负载需求变化、干扰和温度漂移），将电机转速维持在需要的值。要实现外部环路控制，应通过应用必要的转速校正，以维持需要的值，从而决定电机的实际转速。

实际转速测量

SMT 除了用于计算需要的转速基准之外，还用于测量实际的电机转速响应。通过使用 SMT 周期和占空比采集模式（重复数据采集），完成对电机实际转速的测量。使能这种模式，外设将自动测量相对于 SMTx 时钟源（SMTxCLK）的输入信号周期（SMTxIN），结果将存储在 SMTx 捕捉周期寄存器（SMTxCPR）中，如公式 7 所示。结合使用公式 7 以及用于计算 BLDC 电机 RPM 的常规公式（如公式 8 所示），可以计算实际的电机转速（以 RPM 为单位），如公式 9 所示。

公式 7： SMT 捕捉周期寄存器计算

$$SMT \times CPR = \frac{SMT \times CLK}{Motor\ Frequency}$$

公式 8： 电机 RPM 计算

$$RPM = \frac{120 \times Motor\ Frequency}{Number\ of\ Poles}$$

公式 9： 组合公式计算实际转速

$$Actual\ Speed\ (RPM) = \frac{120 \times SMT \times CLK}{Number\ of\ Poles \times SMT \times CPR}$$

比例积分微分控制器 （PID）

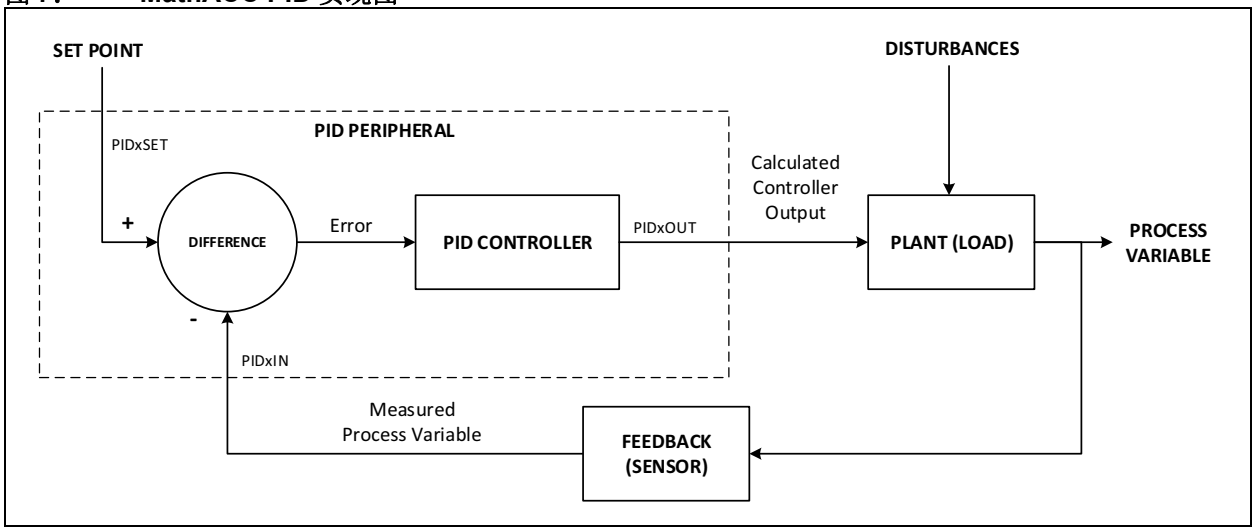
现在对公式 3 中的转速基准和公式 9 中的实际转速进行比较，以确定误差。此误差可能为正或为负，表示实际转速高于或低于转速基准。此误差馈送到 PID 控制器，计算出补偿转速差异的值。

PID 控制器是一种提供系统稳定性的算法。它通常通过软件实现，采用多个指令来执行一系列操作和迭代。与 PID 的常用实现方式相比，此设计采用的 PID 控制器使用了片上 MathACC，以及 PIC16F1618 的 PID 模式模块。这种硬件实现的 PID 可在离散时域中非常高效地执行计算。

图7显示，计算的转速基准用作PIDx设定点（PIDxSET），而电机的实际转速用作 PIDx 输入（PIDxIN）。模块将自动计算补偿值，并将其作为 PIDx 输出（PIDxOUT）生成。该值将用于调节 CWG PWM 输出的占空比。

© 2016 Microchip Technology Inc.

图 7：　MathACC PID 实现图



例 1 显示了实现硬件 PID 计算的示例代码。在软件中实现这个例程时，需要 100 个或更多的指令周期，具体取决于在调谐 PID 过程中使用的系数（Kp、Ki 和 Kd）。在 PID 模式中使用 MathACC 时，只需 9 个指令周期即可执行计算。有关如何实现和使用 MathACC 外设的 PID 控制模式功能的更多信息，请参见技术简介 TB3136 *“PID Control on PIC16F161X by using a PID Peripheral ”*。

例 1：　实现 PID 的代码

```
void    MATHACC_Initialize(void)
{
PID1CONbits.EN = 1;                                 // PID 模块使能
PID1CONbits.MODE = 0b101;                           // PID 模式控制器

// 基于 Kp、 Ki、 Kd 以及采样率计算的 K1、 K2 和 K3
PID1K1 = 80;
PID1K2 = -70;
PID1K3 = 10;

// 输入值选择
PID1SET = 0x00;                                     // 需要的设定点
PID1IN = 0x00;                                      // 测量的过程变量

while (PID1CONbits.PID1BUSY == 1)
result = PID1OUT;                                   // 加载结果
}
```

电机驱动器保护功能

为了避免系统故障、损坏或电机驱动器性能降低，我们在此应用中实施了适当的早期故障检测策略。

过流检测

超过电机允许的最大扭矩负载，可能导致电机绕组达到允许的最大电流，进而导致电机超出允许的最高工作温度。要防止电机过热，必须实施针对过流的故障检测。

为了实施过流检测，我们为驱动电路添加了 RSHUNT，提供与在电机绕组中流动的电流对应的电压。电阻两侧的电压降随着电机电流而发生线性变化。电压馈送到比较器的反相输入，并与特定基准电压进行比较。此基准电压基于 RSHUNT 电阻与电机允许的最大堵转电流之间的结果。基准电压可由 FVR 提供， DAC 可以进一步缩小 FVR的范围。通过这种方式，可以使用很小的基准电压，允许保持低 RSHUNT 电阻。保持低电阻可以减小 RSHUNT 功耗。如果 RSHUNT 电压超过基准，比较器输出将触发 CWG 的自动关闭功能。

过温检测

使用 PIC16F161X 系列中出现的器件片上温度指示器外设，可以检测过温。该指示器测量器件温度，与其环境中的温度对应，有一些延迟。

该指示器用于测量 -40°C 至 +85°C 之间的器件温度。温度指示器的内部电路使用内部晶体管结点阈值电压，产生随温度而变化的可变电压。模数转换器 （ADC）将此电压转换为数字形式。这个 ADC 结果将用于确定公式 10 定义的实际温度读数。为了提供更加精确的温度指示器读数，实施了单点校准。有关校准过程的更多详细信息，请参见应用笔记 AN1333《内部温度指示器的使用和校准》。

公式 10： 温度读数计算

$$Temperature\ Reading = \frac{0.659 - \left[\frac{V_{DD}}{mode} \cdot \left\{1 - \frac{ADC_{RESULT}}{2^n - 1}\right\}\right]}{0.00132} - 40$$

注： 高范围模式 = 4
低范围模式 = 2
n = ADC 分辨率的位数
ADC_{RESULT} = ADRES 寄存器值

© 2016 Microchip Technology Inc.

过温检测实现使用了ADC内部通道输入选择（Channel Input Selection， CHS）位。温度指示器 （TempInd）模块用作 ADC 的通道输入。对于每次定时器中断，完成的 ADC 转换结果将与需要的最高温度限值进行比较。当 ADC 结果超过最大温度限值时， CWG 的输出将会禁用。

表 3 汇总了温度指示器针对不同温度产生的 ADC 结果。

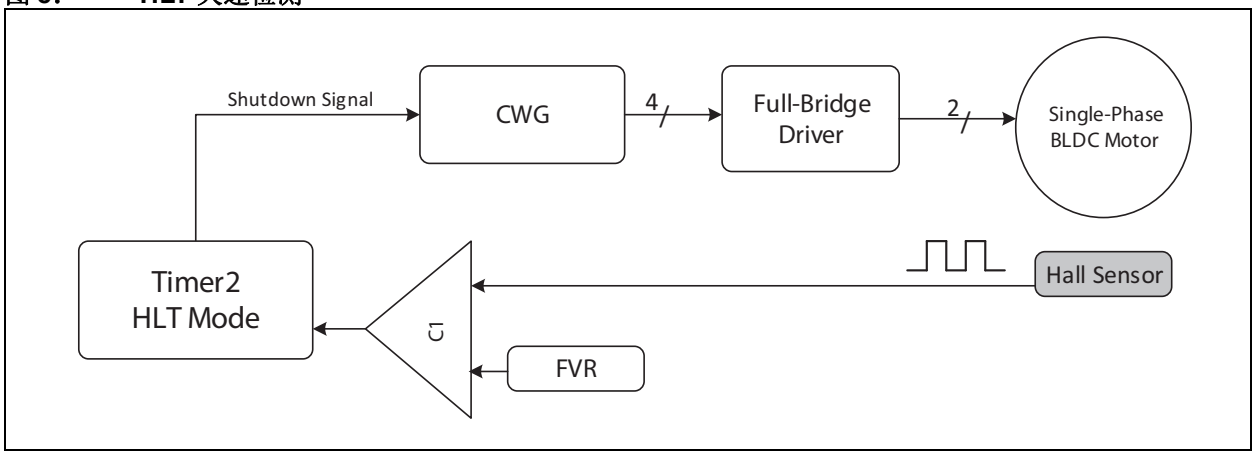
表 3： 温度指示器 ADC 结果汇总

温度 （°C）	V_{TEMP} mV	8 位 ADC 结果	10 位 ADC 结果
-40	2,364	121	484
-30	2,4168	123	494
-20	2,4696	126	505
-10	2,5224	129	516
0	2,5752	131	527
10	2,628	134	538
20	2,6808	137	548
30	2,7336	139	559
40	2,7864	142	570
50	2,8392	145	581
60	2,892	147	592
70	2,9448	150	603
80	2,9976	153	613
85	3,024	154	619

电机失速检测

电机旋转时，霍尔传感器提供周期脉冲。如果电机失速，霍尔传感器也会停止提供脉冲。控制器使用霍尔传感器响应来检测电机失速状况。为了实现电机失速检测，使用了 Timer2/4/6 外设中的边缘触发硬件限幅定时器 （HLT）模式。它的主要功能是监控周期信号中的任何变化，有效设置为可重新触发的单稳态触发器。有关电机控制设计上的 HLT 实现，请参见图 8。

图 8： HLT 失速检测



在此应用中，比较器 1 输出连接到霍尔传感器信号，它被设置为 HLT 的外部信号源。霍尔传感器产生从 32 Hz（31.25 ms）到 110 Hz（9 ms）的信号，具体取决于电机转速。 Timer2 的周期（PR2）寄存器设置为远大于最小输入频率（32 Hz）的值。使用这种方法，可在更广泛的转速范围内检测到电机失速状况。有关基于霍尔传感器信号的 PR2 值计算，请参见公式 11。

公式 11： PR2 计算

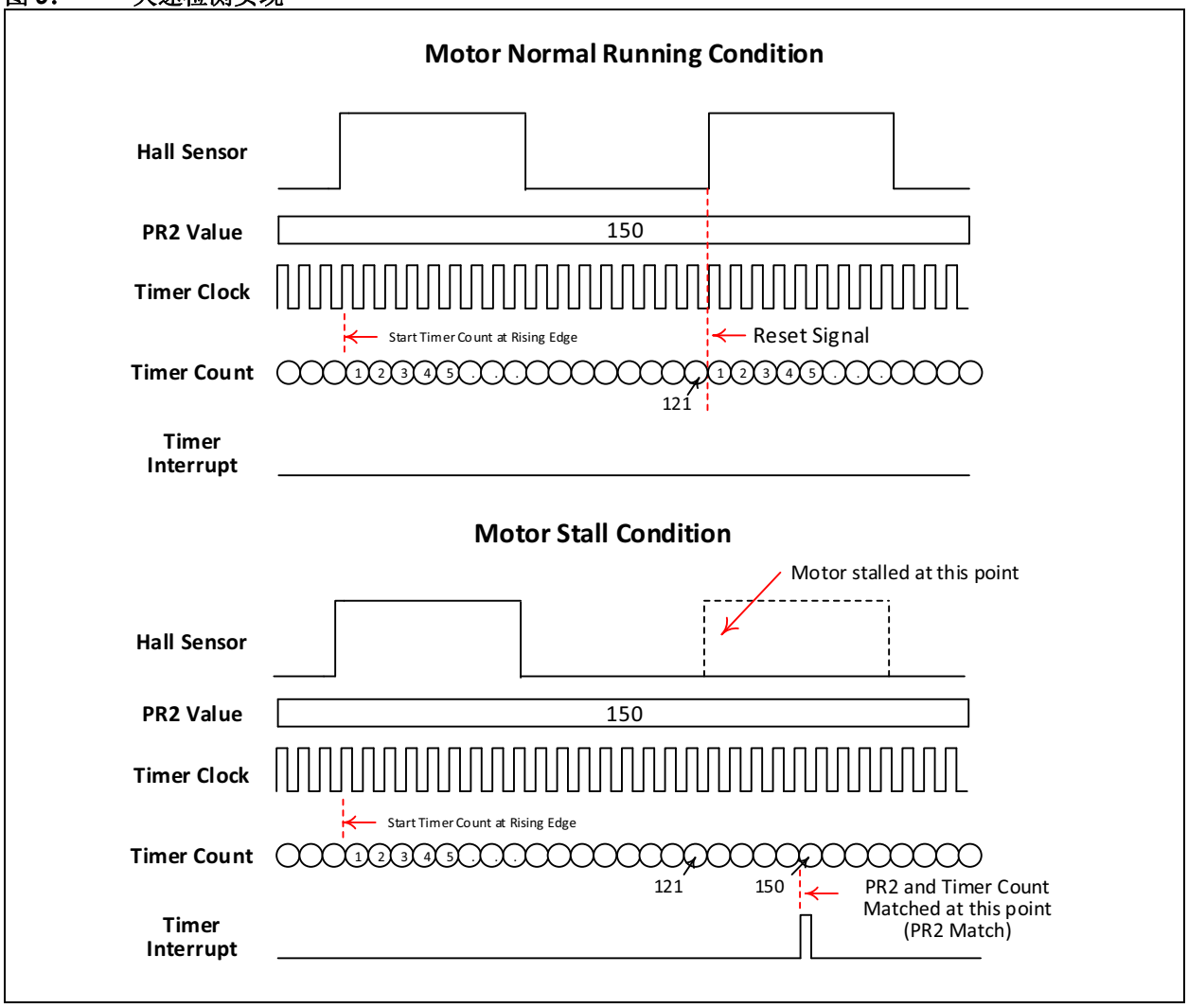
$$PR2 > \frac{TMR2\ Clock\ Source}{Input\ Signal_{(MIN)} \times Prescaler \times Postscaler}$$

$$PR2 > \frac{LFINTOSC}{35\ Hz} > \frac{31000}{32 \times 1 \times 8} > 121$$

注： PR2 寄存器值应大于 121。

需要较大 PR2 值的原因是为了让霍尔传感器脉冲首先产生，并在 PR2 周期匹配发生之前重置 Timer2 计数。对于旋转的电机，霍尔传感器脉冲始终存在，以持续重置 Timer2 计数，避免周期匹配发生。相反，对于失速的电机，霍尔传感器脉冲并不存在，没有重置 Timer2 计数，因此定时器持续递增，直至周期匹配发生。每次周期匹配发生时，都会触发中断事件。可利用这种特性来关闭 CWG 输出，并指示电机没有旋转或处于失速状况下。有关实现 HLT 模式作为失速检测的详细信息，请参见图 9。

图 9： 失速检测实现



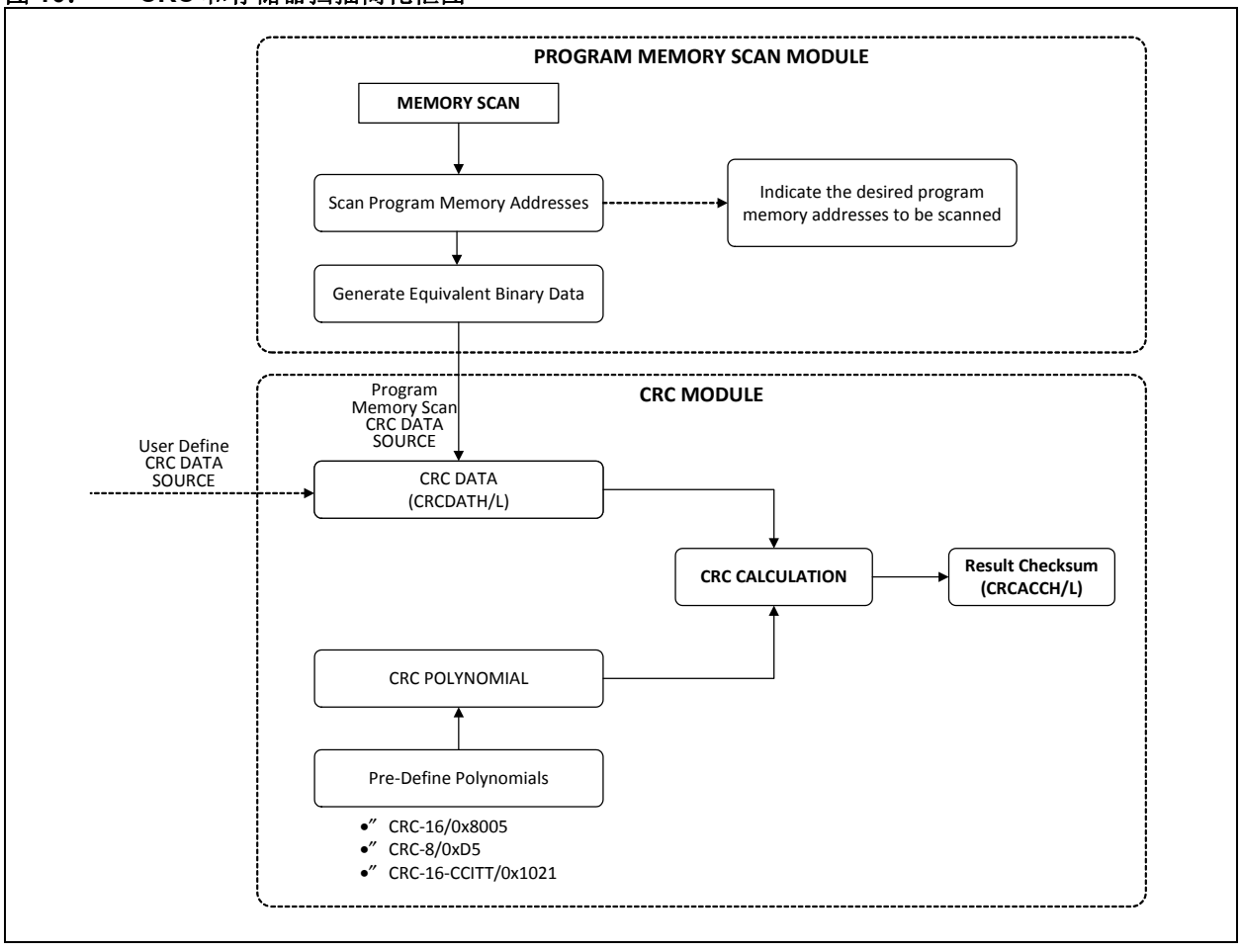
© 2016 Microchip Technology Inc.

程序存储器数据监控和检查

在电机控制应用中，数据完整性对于确保电机安全工作和所有故障检测功能都可靠运行是必需的。由于程序存储器破坏，电机功能及其所有安全功能的实现失败，可能导致驱动器和控制电路损坏。为了避免这种情况，可在控制系统中添加一种错误检查技术，以监控程序存储器数据完整性。使用循环冗余校验（CRC）外设，以及内置的程序存储器扫描模块，可在系统运行时周期性地执行存储器测试程序，而不与电机的工作相冲突。在不可变存储器（闪存 /EEPROM）测试中，这种硬件 CRC 周期性存储器测试实现还有助于遵守 EC 60730 B 类认证标准。有关根据 IEC-60730 B 类认证标准来执行程序存储器校验程序的更多详细信息，请参见应用笔记 AN1799 *“Class B Safety Software Library for 8-bit PIC® MCUs ”*。

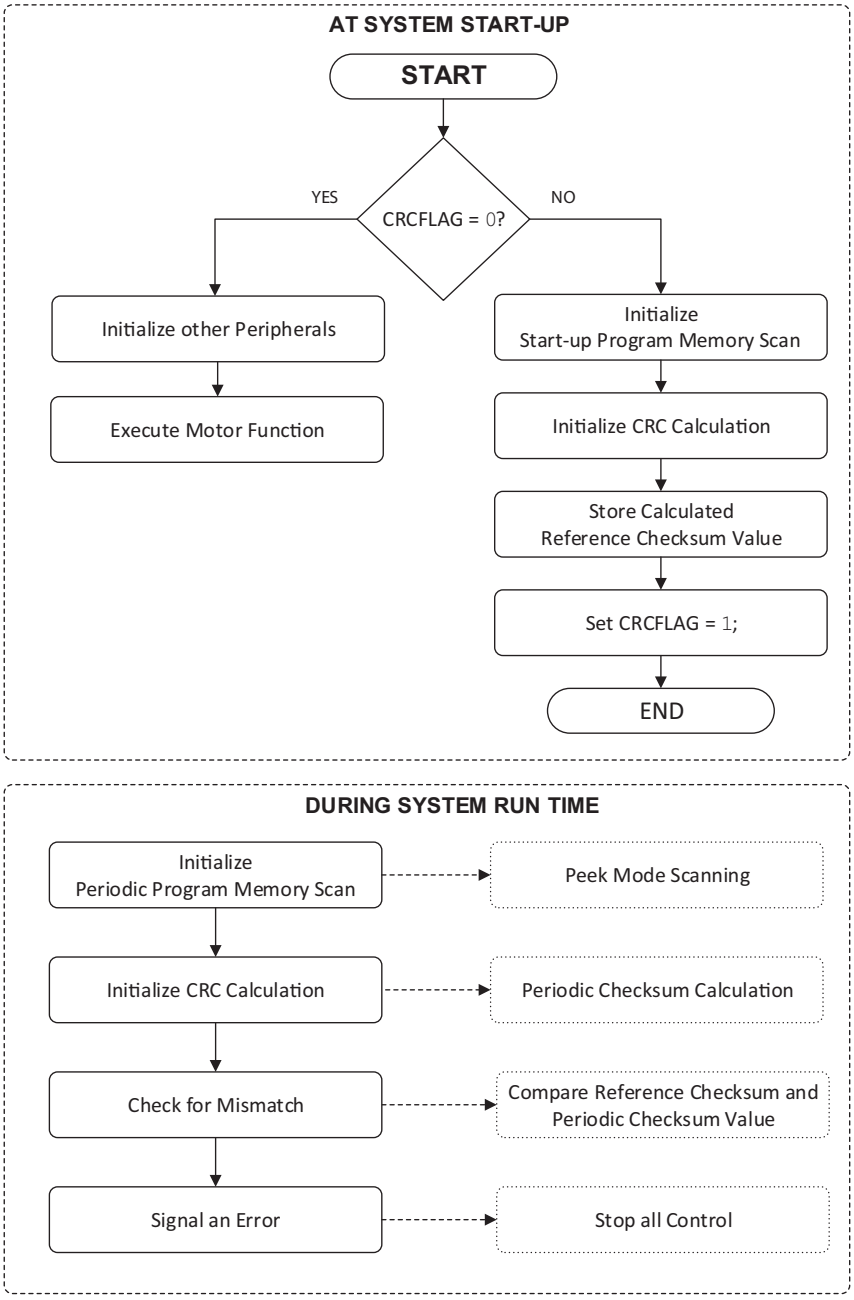
CRC 外设提供了一种计算程序存储器的校验值（校验和）的方式。使用内置的程序存储器扫描器模块，可将程序存储器转换为同等的二进制数据，用作 CRC 的输入数据（CRCDAT）。CRC 校验和（CRCACC）的生成方式是将 CRC 输入数据（CRCDAT）除以另一个二进制数字，称为 CRC 多项式（CRCXOR）。CRC 多项式可以是最多 17 位的任何多项式，或任何常用标准多项式，例如 CRC-16-ANSI/0x8005、CRC-8/0xD5 和 CRC-16/CCITT/0x1021。图 10 显示了本应用中的 CRC 实现的简化框图。有关 CRC 实现和存储器扫描的更多详细信息，请参阅技术简介 TB3128《8 位单片机上的 CRC 和存储器扫描技术简介》。

图 10： CRC 和存储器扫描简化框图



在第一次系统启动时，将使用突发模式工作方式，在整个程序存储器地址执行初始存储器扫描。突发模式产生最高的扫描器吞吐量，但其代价是其他 CPU 功能中止。因此，它通常仅在启动过程中使用。CRC 将使用扫描器输出来计算基准校验和值。然后，在系统运行时，将会周期性地调用扫描器和 CRC 计算，以生成相同程序存储器地址的另一个校验和值。扫描器在峰值模式下扫描，以避免其他 CPU 功能中止，但只能产生最低的扫描器吞吐量。如果基准和周期性生成的校验值匹配，则用户可设置一个指示器，用于指示程序存储器已通过测试，没有找到错误。如果程序存储器测试失败，或者找到错误，则将触发 CWG 输出关闭。图 11 显示了在此应用中使用的 CRC 计算例程的示意图。

图 11： CRC 和存储器扫描实现例程



© 2016 Microchip Technology Inc.

电机驱动器固件

图 12：　固件流程图

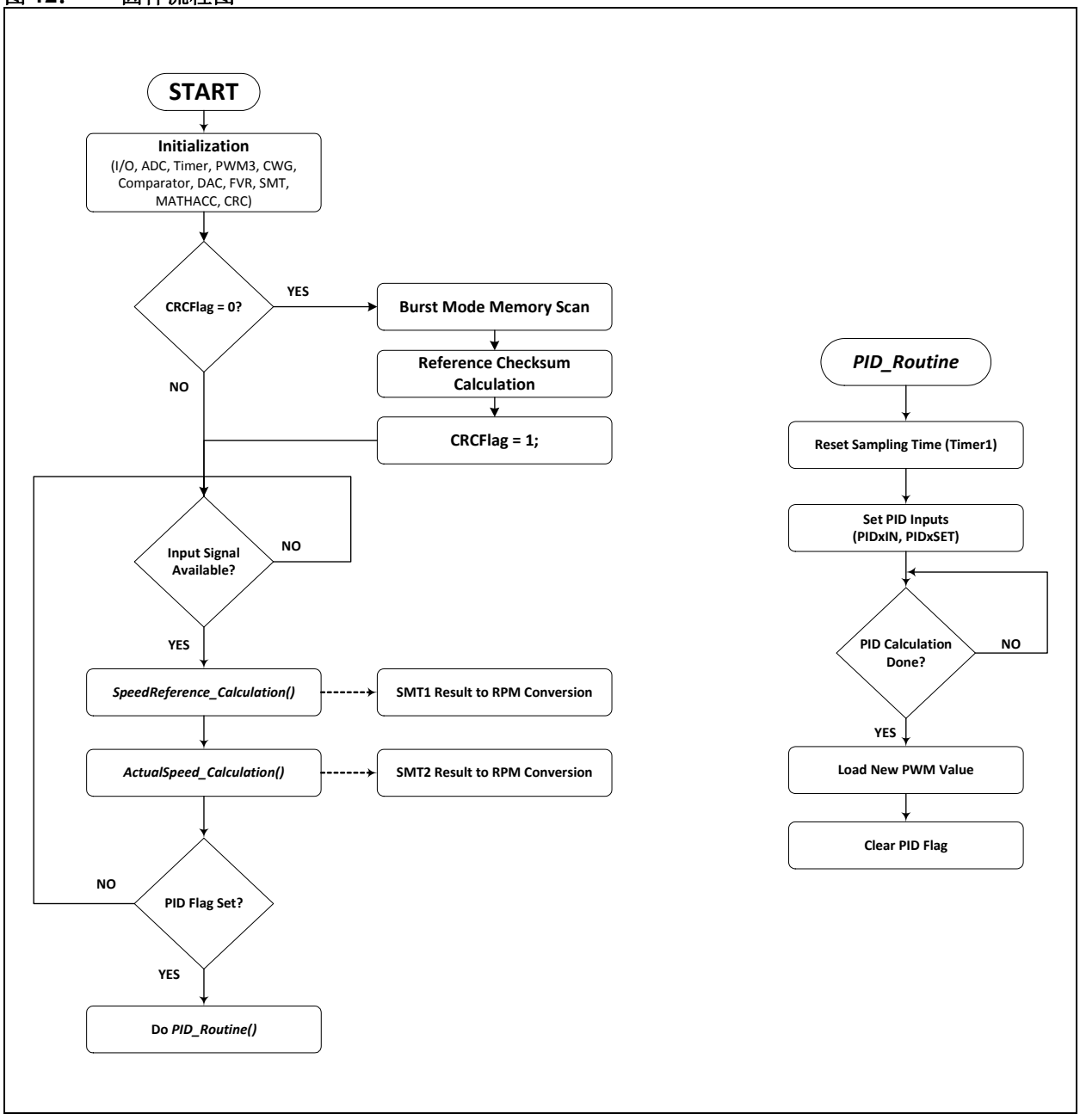
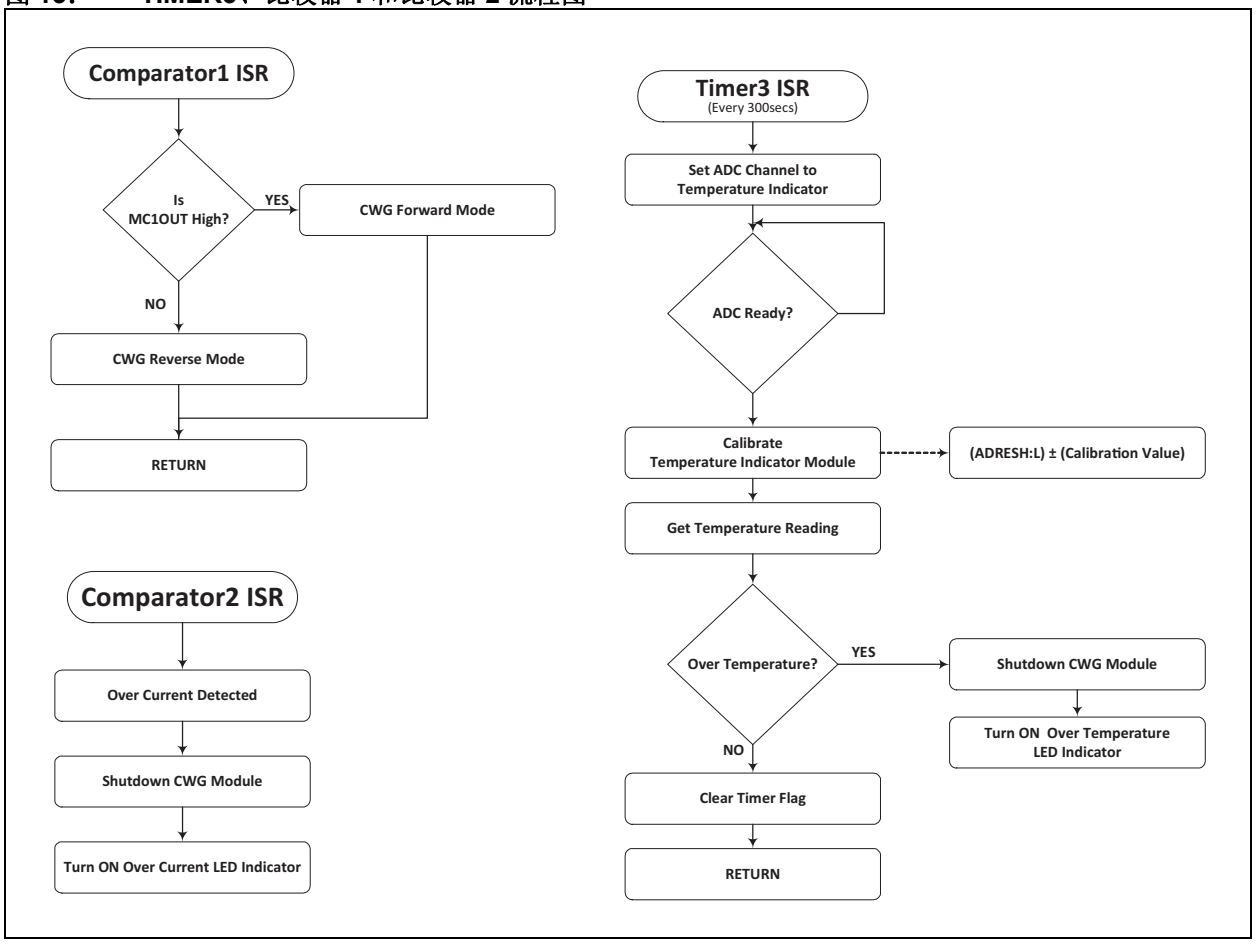


图 12 显示了电机驱动器固件流程图。在系统启动过程中，固件会初始化外设及其之间的连接。外设初始化之后，固件使能程序存储器扫描，并运行 CRC 计算，以确定程序存储器的初始校验和。此值用作基准，周期性地与在系统运行时生成的另一个校验和进行比较，以检查和确保程序存储器数据的完整性。

在所有初始化之后，固件将进入连续循环，允许执行以下重复任务：

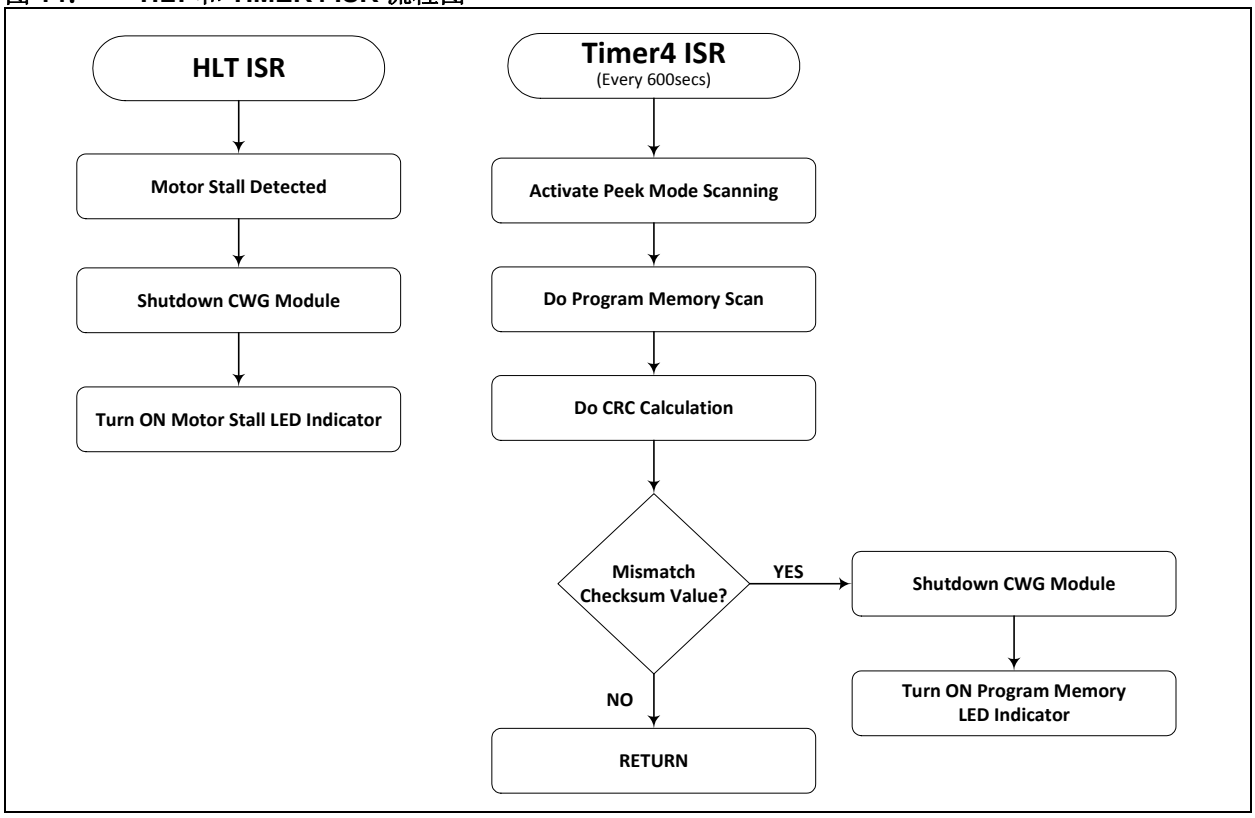
1. 监控输入 PWM 信号的占空比变化，并更新转速基准设置。此任务由 `SpeedReference_Calculation()` 例程执行。
2. 监控实际电机转速响应变化，并更新转速读数。此任务由`ActualSpeed_Calculation()`例程执行。
3. 监控每次 Timer1 溢出中断，并向固件发出信号，以便开始PID计算。Timer1溢出对应于需要的PID控制器采样时间，在此应用中，它等于 10 ms。

图 13： TIMER3、比较器 1 和比较器 2 流程图



© 2016 Microchip Technology Inc.

图 14： HLT 和 TIMER4 ISR 流程图



此外，固件执行多个中断服务例程 （Interrupt Service Routines，ISR），指示特定电机条件。当满足特定的外设条件时，将会自动执行这些中断处理程序。有关外设 ISR 流程图，请参见图 13 和图 14。

1. **比较器 1 ISR** – 监控电机的霍尔传感器信号。每次霍尔传感器输出状态变化时都会执行。当霍尔传感器信号高时， CWG 正向模式使能，否则， CWG 反向模式使能。
2. **比较器 2 ISR** – 监控系统过流。在每次连接到传感电阻 （RSHUNT）的比较器的反相输入（C2IN1-）引脚的上升沿执行。设定时， CWG 输出关闭被触发。
3. **Timer3 ISR** – 监控系统过温。每次 Timer4 溢出时或每 300 秒执行。它向 ADC 发出信号，以便计算片上温度指示器外设读数的同等二进制数据。如果超过 85°C 读数，将会触发 CWG 输出关闭。
4. **Timer4 ISR** – 监控程序存储器数据完整性。每次 Timer6 溢出时或每 600 秒执行。它向程序存储器扫描器模块和循环冗余校验（CRC）外设发出信号，以便计算 CRC 校验和值，并将其与以前在系统启动过程中生成的校验和值进行比较。如果比较不相等，将会触发 CWG 输出关闭。
5. **HLT Timer2 ISR** – 监控电机失速状况。每次 PR2 匹配时执行。设定时， CWG 输出关闭被触发。

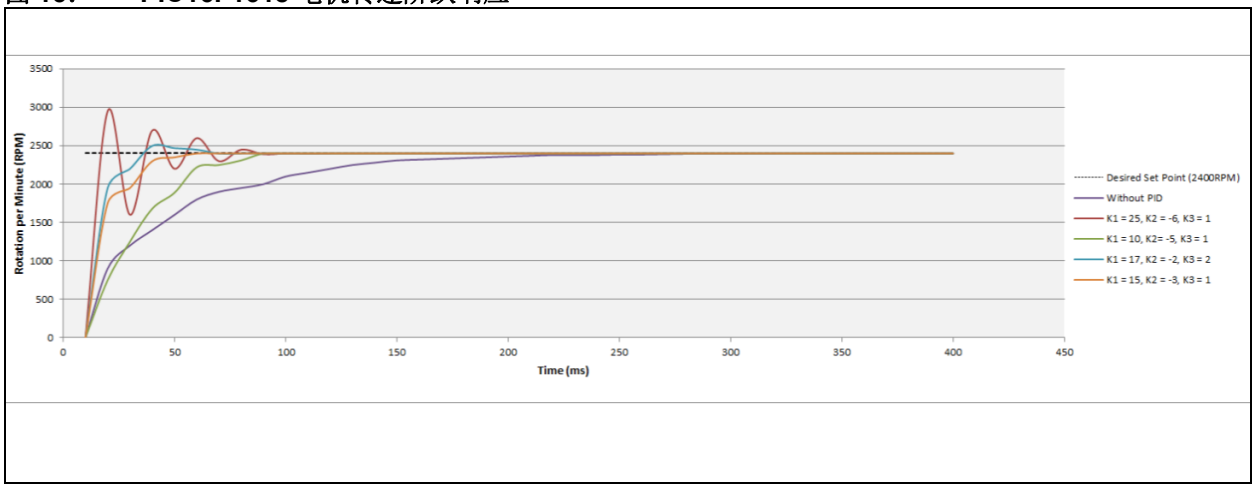
比较器 2、Timer3、Timer4 和 HLT ISR 处理系统故障条件。当执行其中任何一个 ISR 时，LED 指示灯打开，电机驱动器的工作停止。重置 MCU 器件且故障不存在之后，驱动器将重新开始工作。

固件中使用的所有外设都是使用 MPLAB® 代码配置器（MCC）配置和初始化的。**附录 B：“MPLAB® 代码配置器（MCC）外设初始化”**提供了使用 MCC 来初始化外设的程序。要获取完整源代码，请参见**附录 C：“源代码列表”**。

电机驱动器性能

图 15 显示了电机转速阶跃响应。

图 15： PIC16F1618 电机转速阶跃响应



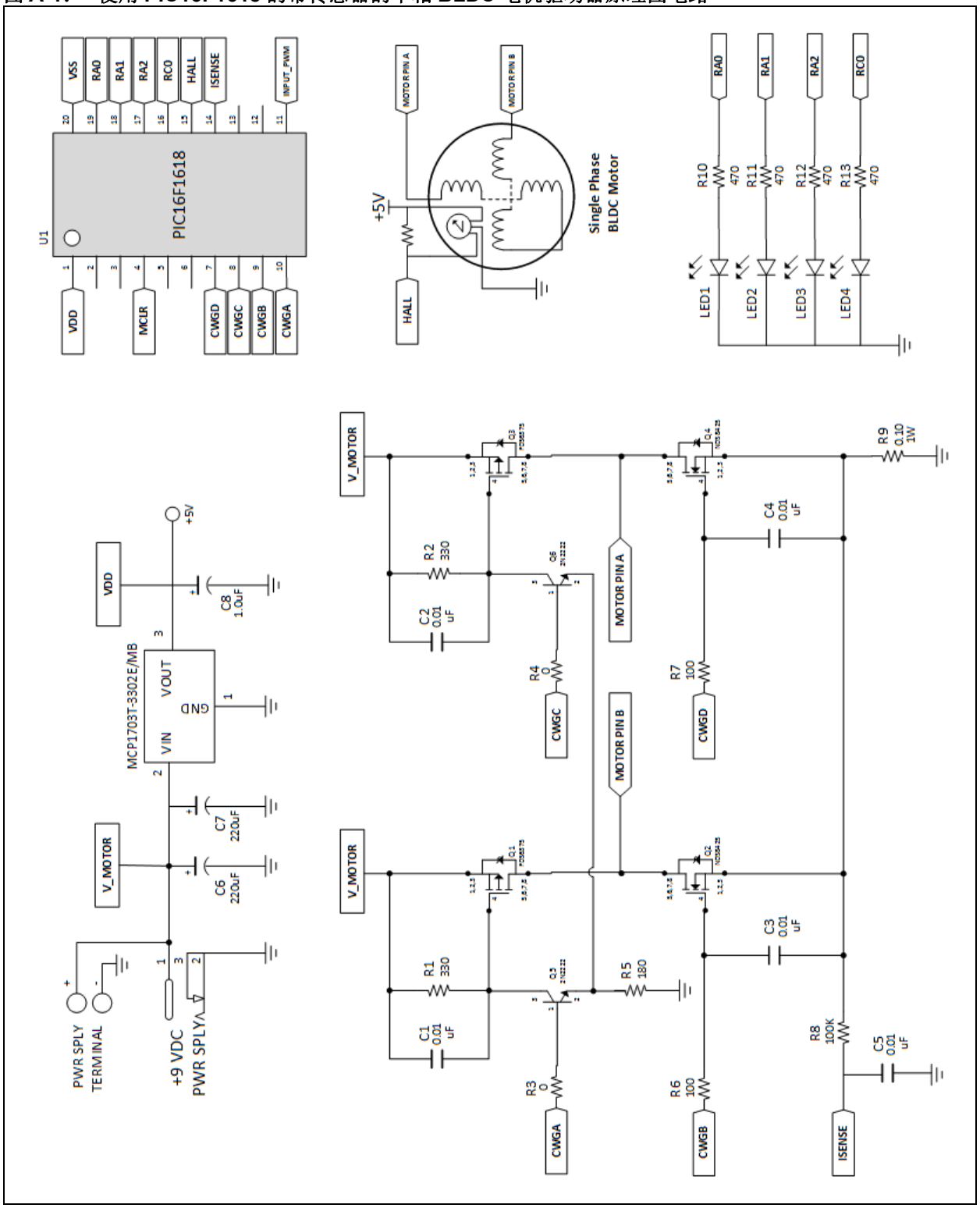
© 2016 Microchip Technology Inc.

结论

在成本敏感型的电机控制应用中，高效灵活的单片机可以产生很大影响。可以对照优化集成外设的水平来测量器件效率，以便控制任务以及引脚 / 存储器数量和封装尺寸。此外，易用性和缩短产品上市时间也非常重要，特别是在需要多个版本的设计的情况下。本应用笔记介绍了低成本单片机如何满足这些需求。通过使用 PIC16F1618 单片机，电机驱动器能够控制驱动器开关、设置电机转速、预测转子位置、校正转速误差、检测故障事件，并且确保程序存储器数据完整性。

附录 A： 电路原理图

图 A-1： 使用 PIC16F1618 的带传感器的单相 BLDC 电机驱动器原理图电路



© 2016 Microchip Technology Inc.

附录 B： MPLAB® 代码配置器 （MCC） 外设初始化

在本部分中，我们使用 MPLAB® 代码配置器（MCC），轻松地配置在电机控制应用中使用的外设。 MCC 是适用于 MPLAB® X IDE 的用户友好型插件工具，可基于在图形用户界面 （Graphical User Interface， GUI）中进行的设置和选择，生成用于控制和驱动 PIC® 单片机外设的驱动程序。有关如何在 MPLAB X IDE 中安装和设置 MCC 的更多信息，请参见《MPLAB® 代码配置器用户指南》（DS40001725B_CN）。

下图将提供如何使用 MCC 配置本应用笔记中的 PIC16F1618 外设的指南。

图 B-1： 配置寄存器设置

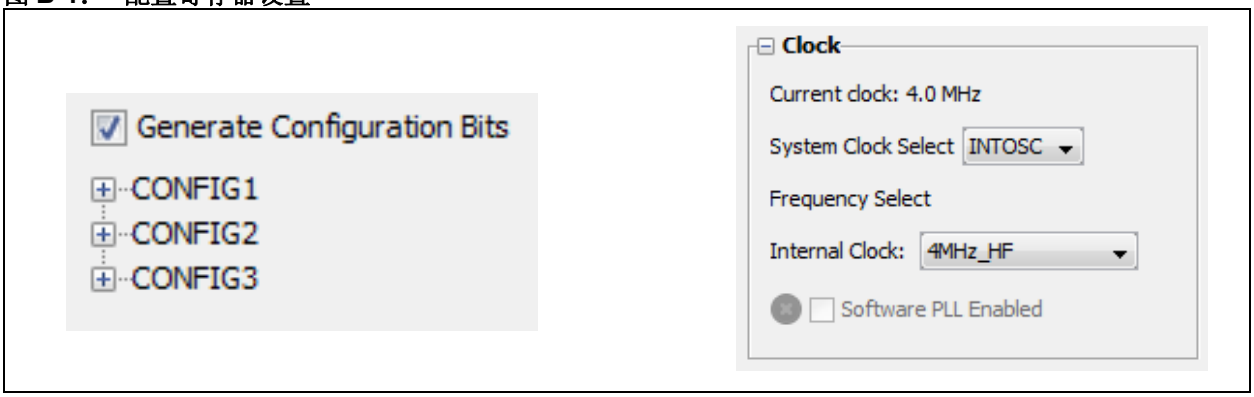


图 B-2： 用于转速基准实现的信号测量 TIMER1 （SMT1）配置

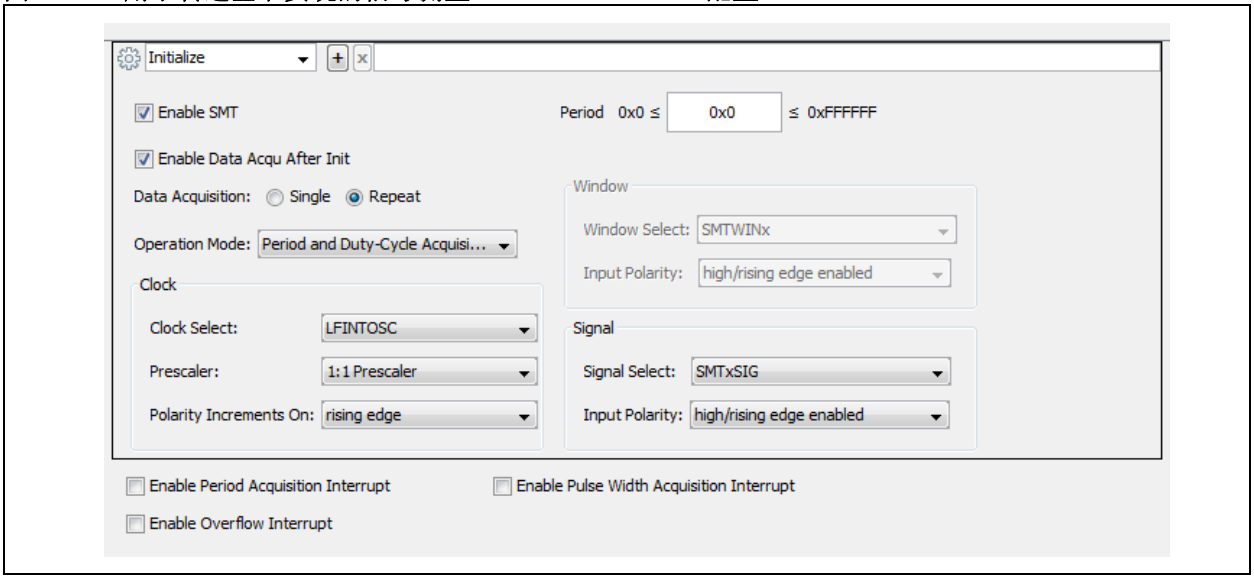


图 B-3： 作为 CWG 输入源的 PWM3 和 TIMER6 外设配置

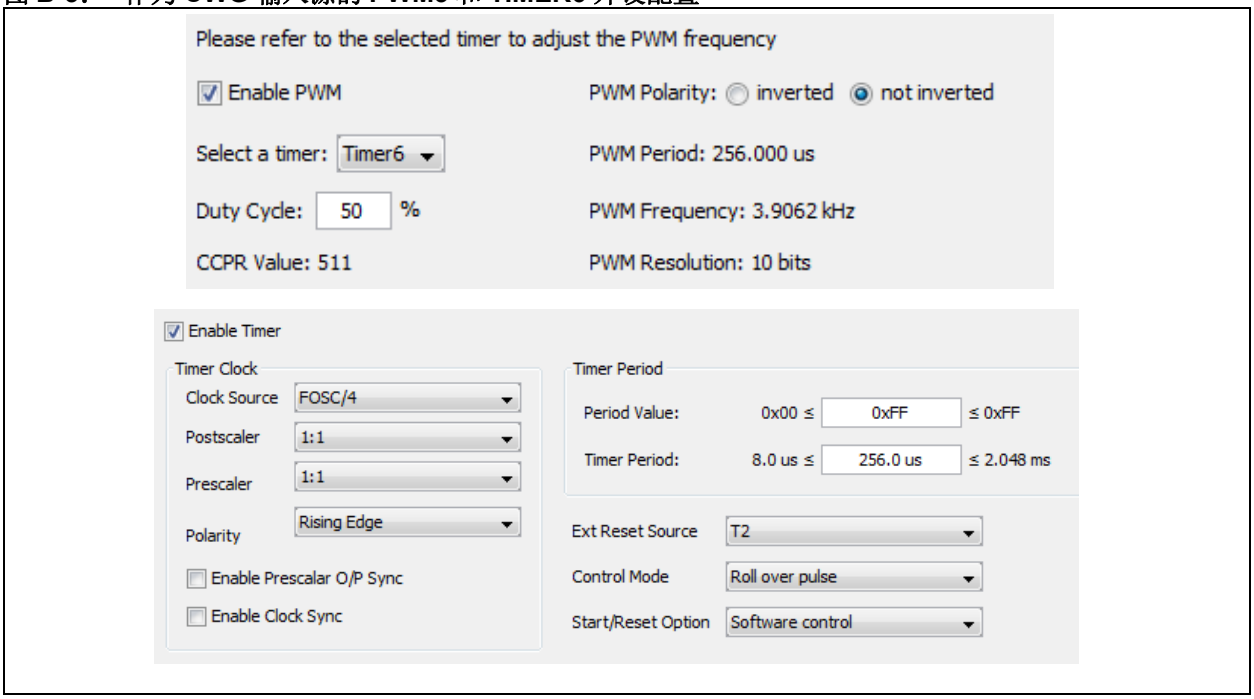
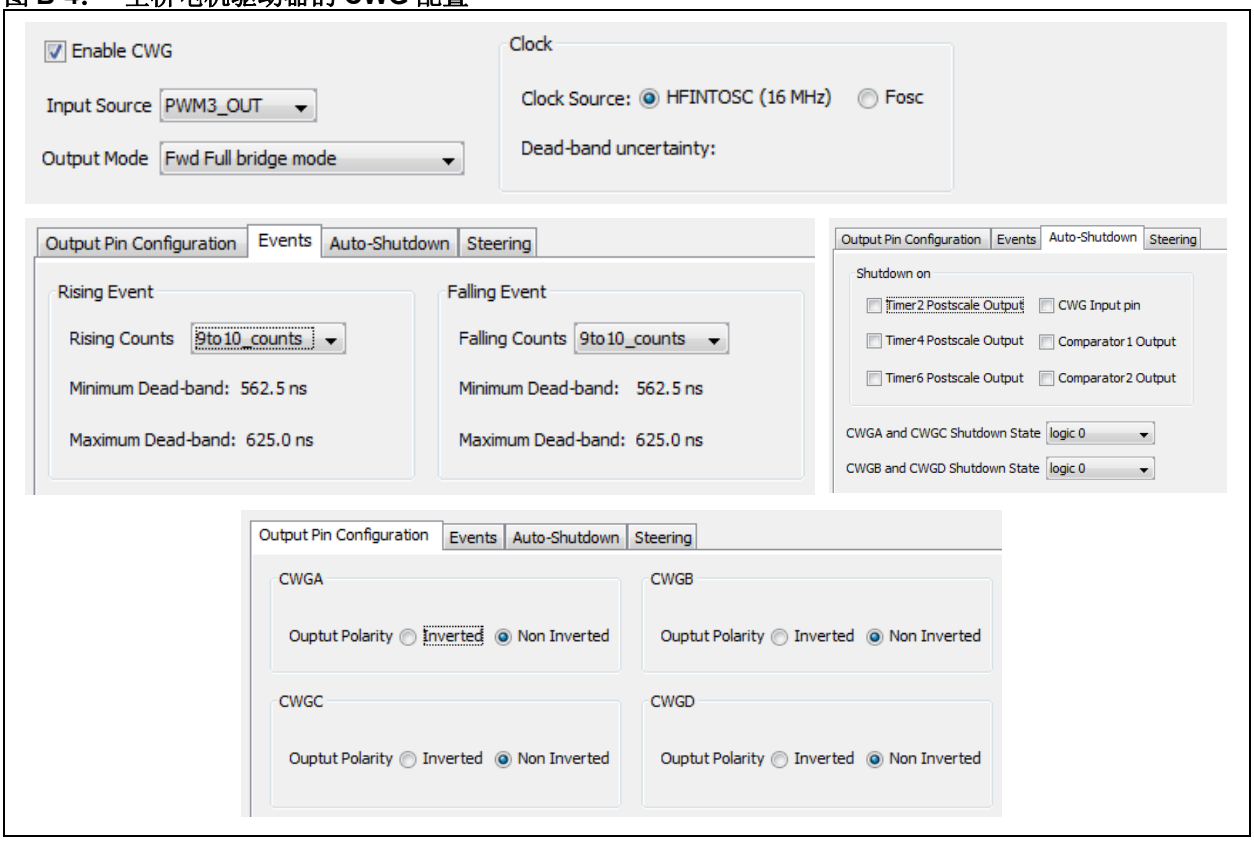


图 B-4： 全桥电机驱动器的 CWG 配置



© 2016 Microchip Technology Inc.

图 B-5： 用于实际转速测量实现的信号测量 TIMER2 （SMT2）配置

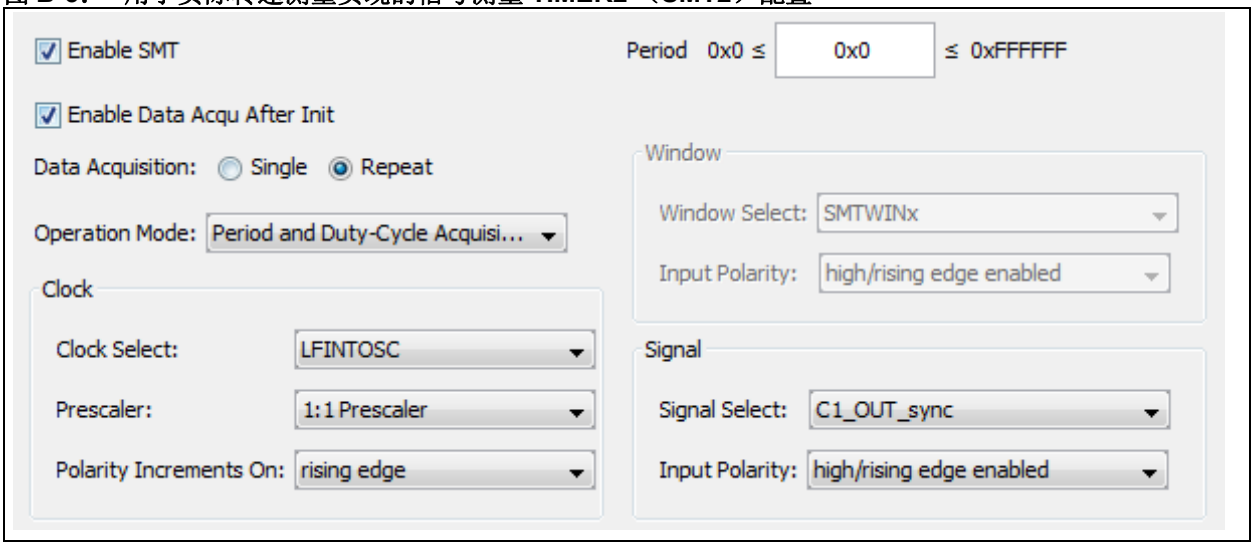


图 B-6： PID 控制器的 MathACC 和 TIMER1 配置

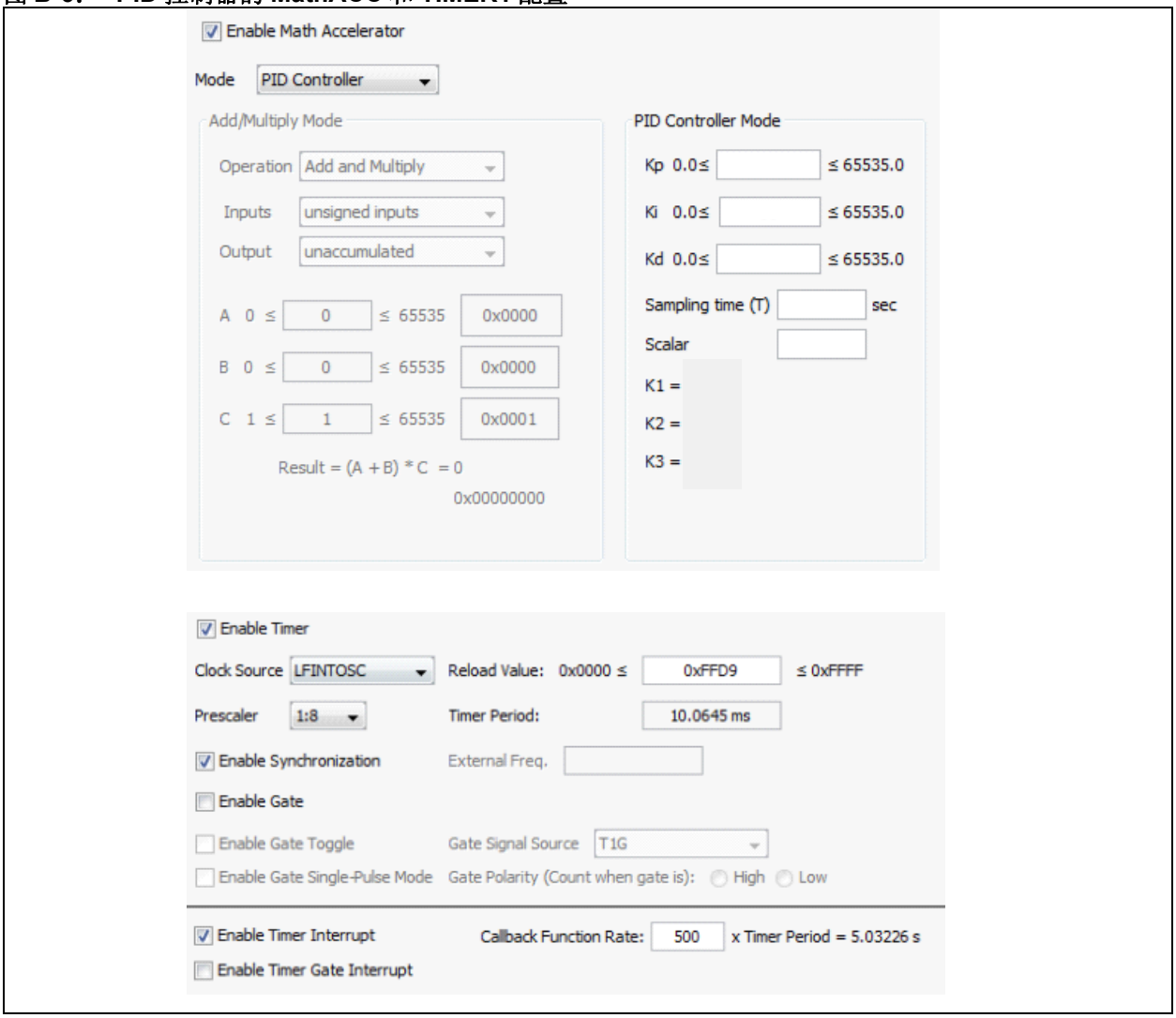


图 B-7： 数模转换器 （DAC）配置

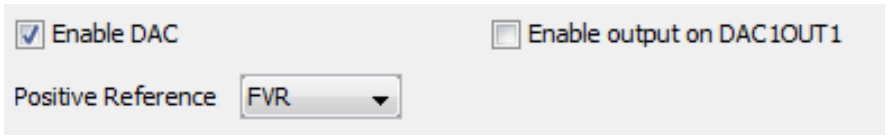


图 B-8： 过流基准的固定基准电压源 （FVR）和数模转换器 （DAC）配置

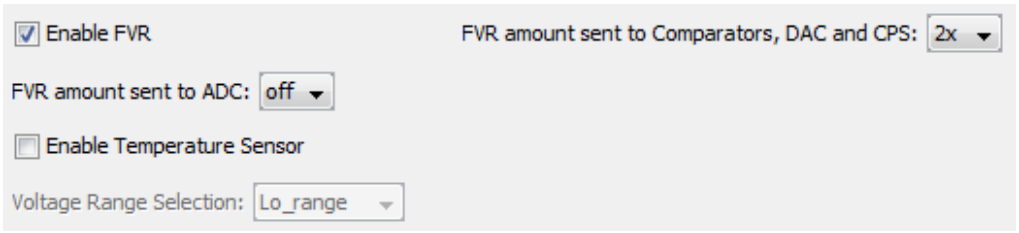


图 B-9： 霍尔传感器基准的比较器 1 配置

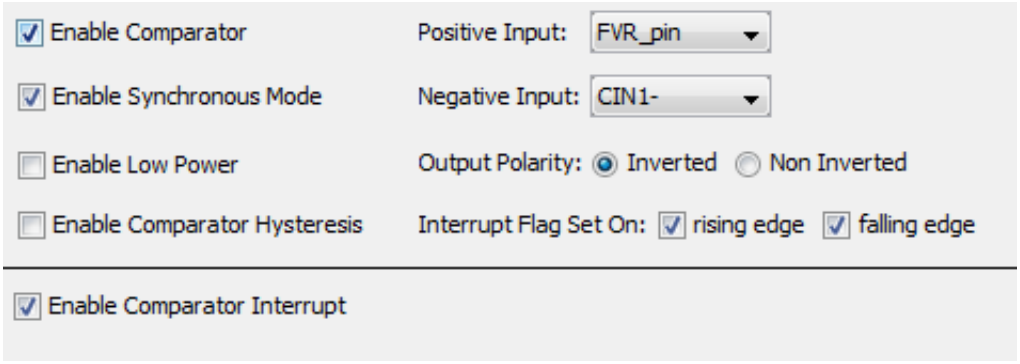
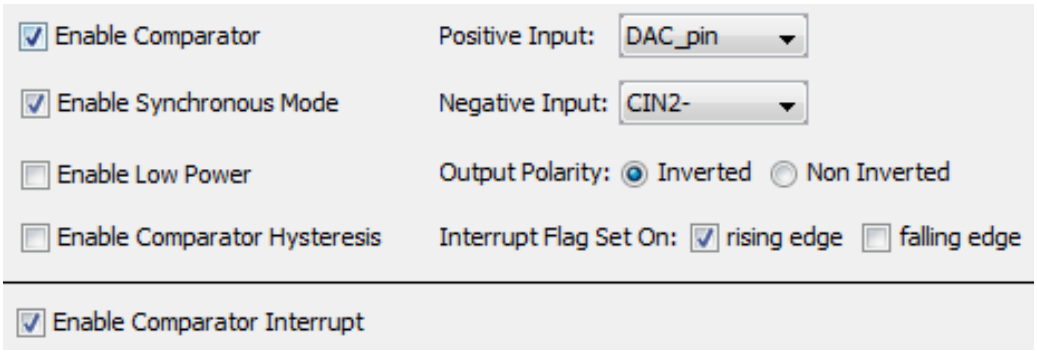


图 B-10：过流检测的比较器 2 配置



© 2016 Microchip Technology Inc.

图 B-11：程序存储器完整性检查的循环冗余校验 （CRC）配置

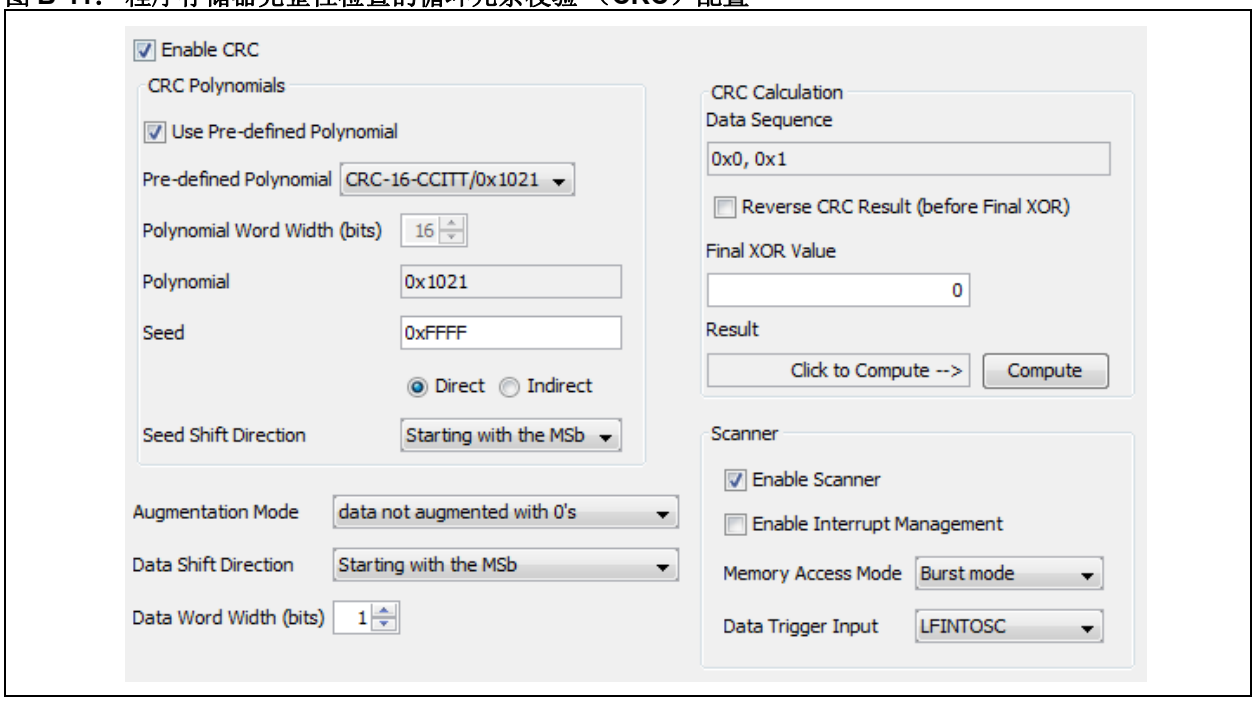


图 B-12：程序存储器完整性监控时间的 TIMER4 配置

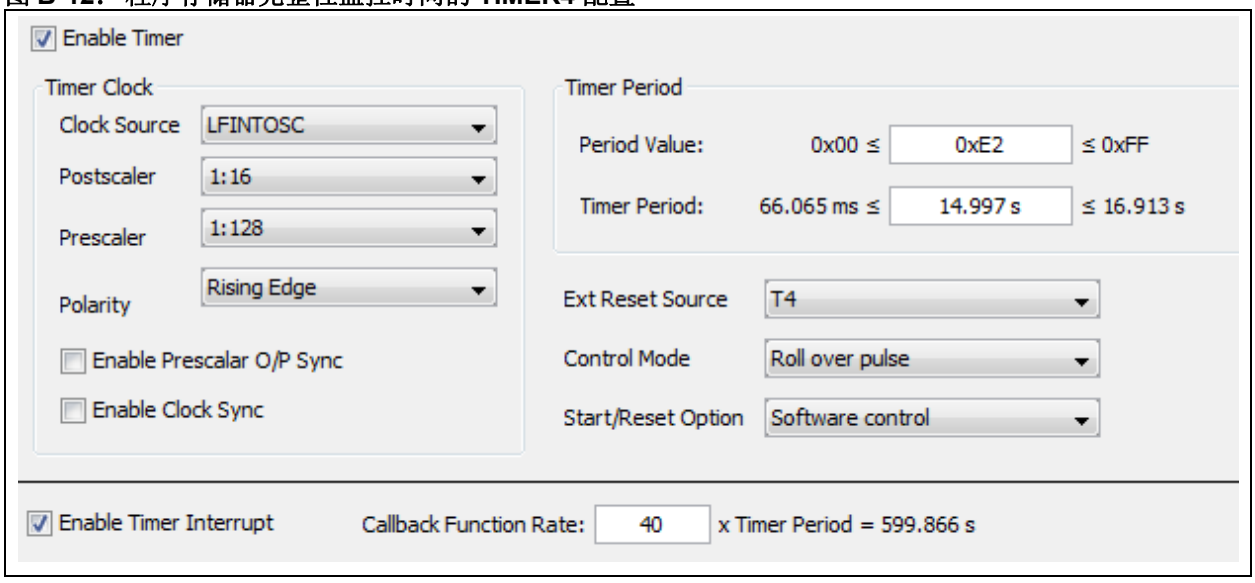


图 B-13：过温指示器的模数转换器 （ADC）配置

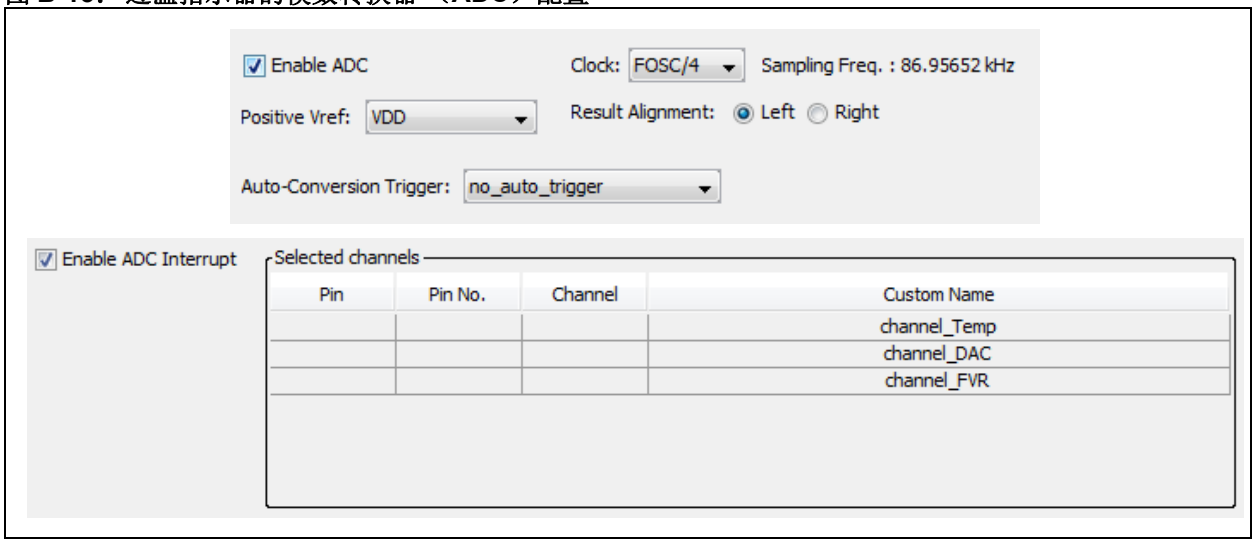


图 B-14：过温监控中断的 TIMER3 配置

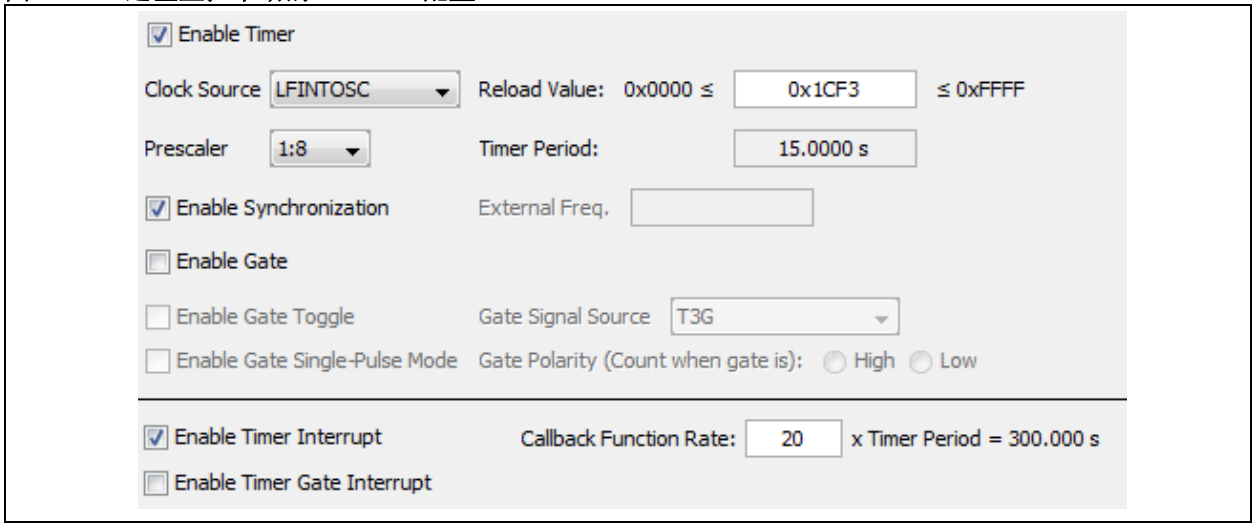
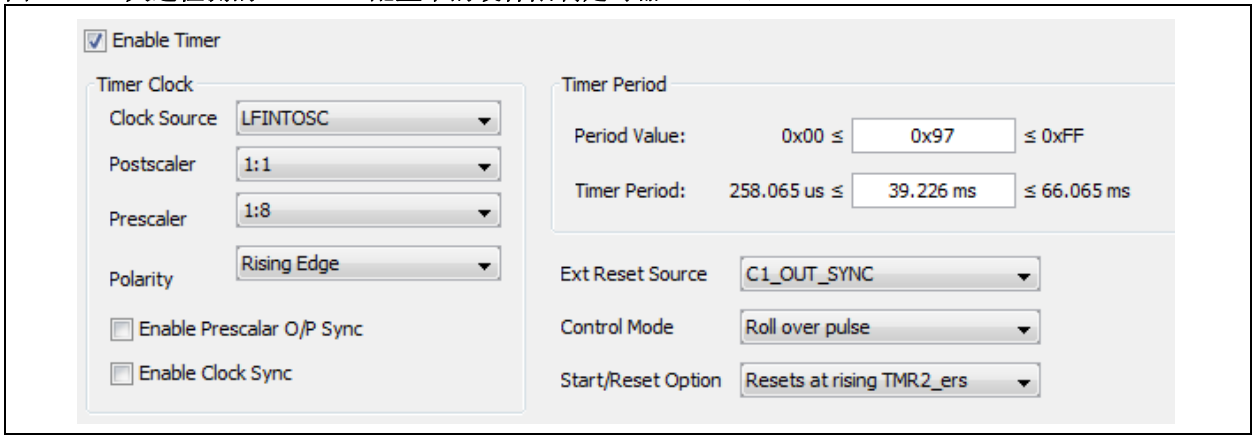
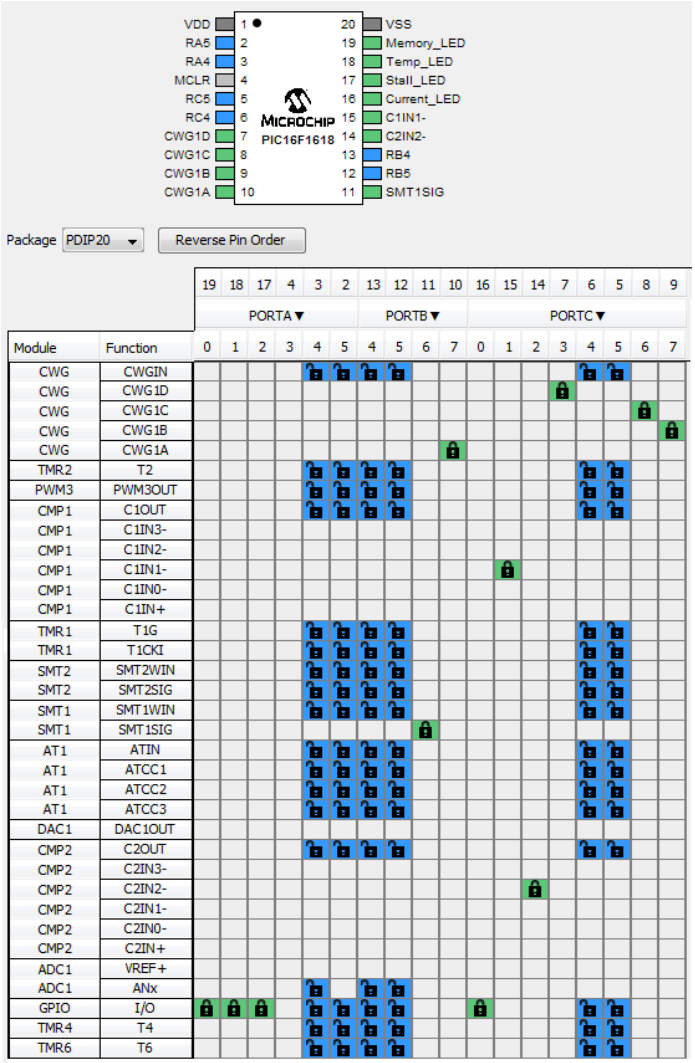


图 B-15：失速检测的 TIMER2 配置中的硬件限制定时器 （HLT）



© 2016 Microchip Technology Inc.

图 B-16：外设输入 / 输出引脚配置



配置所有外设之后，请单击中心面板左上角的“Generate Code（生成代码）”按钮。这样将自动生成项目的 `main.c` 文件。还将初始化模块，并保留用于自定义代码条目的 `empty while (1)` 循环。

附录 C： 源代码列表

最新软件版本可从Microchip网站（www.microchip.com）下载。用户可以找到本应用笔记的电子版本附带的源代码。最新版本为 v3.0。

© 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：978-1-5224-1069-0

11/07/16

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

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

© 2016 Microchip Technology Inc.