

## 用于可变速 BLDC 风扇控制系统的微控制器

作者：*倫德全*

飞思卡尔半导体公司系统工程师

### 简介

便于携带、功能丰富、性能高和小巧玲珑是大多数电子产品的显著趋势。这些电子产品（如笔记本电脑）所产生的热量引起了人们越来越多的关注。使用冷却风扇仍然是预防电子设备过热的最为普遍、最有效的途径。

为了实现快速变化的电子产品规范，人们需要使用基于微控制器（MCU）的智能可变速度控制的无刷直流电源（BLDC）风扇。可变速度控制、低噪声、可靠性、长寿命、低功耗、保护功能、维护/升级的简便性以及通信接口功能是基于闪存 MCU 的 BLDC 的主要特征。

本文描述了 BLDC 风扇的可变速度控制算法，该算法包括降低噪声的方法、功耗注意事项、锁检测和自动重启、热分流和通信接口。

### DC 风扇和 BLDC 风扇的区别

BLDC 风扇与传统风扇的物理外观基本上没有什么差异。两种风扇在将电能转化成机械运动时所用的原理也相同。当直流电压应用到其终端时，风扇旋转，风扇的速度取决于终端上应用的电压。

主要区别在于它们的内部构造。两种风扇系统都要求整流，使电流流经风扇绕组，并在每旋转 180 度时倒转一次。

在传统的直流风扇系统中，永磁体的定子由两个或多个永磁体极性块组成，转轴由连接到机械刷（整流器）的绕组组成。接通电源的绕组的相对极性和定子磁体吸引着转轴，然后转轴开始旋转，直到它与定子处于同一水平位置。就象转轴要达到水平位置一样，刷子在整流器触头内移动，并为下一次绕组提供动力。因此，风扇转轴就连续旋转。

然而，BLDC 风扇却旋转电力机械，其中，定子是一流的两相定子，转轴拥有表面安装的永磁体。在这一方面，BLDC 风扇就相当于一个呈逆时针旋转的传统直流风扇，电流极性通过电力整流器而不是通过机械刷进行更改。

由于极性翻转由与转轴位置进行同步切换的晶体管/FET 执行，因此要使用霍尔效应传感器来传感转轴的实际位置。BLDC 的典型构造如图 1 所示。

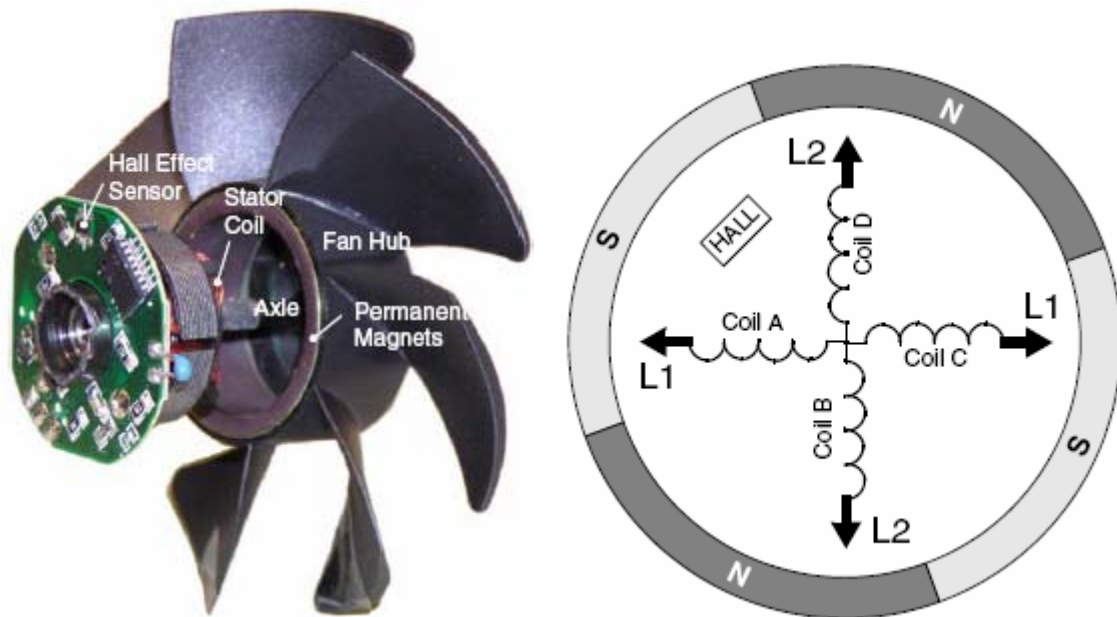


图 1. BLDC 风扇的构造

## 智能 BLDC 风扇的需求

由于庞大的转轴线圈，传统直流风扇具有更高的惰性，而 BLDC 风扇则因为有了永磁体而使转轴更为轻巧。由于 BLDC 风扇拥有更轻的转轴，能把更多能量传给载荷，就实现了更高的效率。BLDC 风扇使用电力换向，因而没有传统直流风扇固有的一些问题，如旋转时整流器刷子中的机械磨损、火花和电磁接口（EMI）等。

由于智能可变速度控制 BLDC 风扇系统能够轻松地进行配置、且具有诸如锁检测、自动重启、自动热分流等增强功能，满足了人们对现代电子产品快速变化的要求，因此，它的使用越来越广泛。

## BLDC 风扇中的速度控制

BLDC 风扇中有固定速度控制和可变速度控制两种控制方式。

### 1. BLDC 风扇中的固定速度控制

在固定速度控制风扇中采用了具有外部或内置驱动装置的霍尔效应传感器。

#### a) 具有外部驱动装置的三引脚霍尔传感器

在这种方法中，BLDC 使用了具有外部晶体管/FET 的单信号输出闭锁霍尔效应传感器。通常情况下，该传感器用于 BLDC 风扇，因为它能为电力换流传感 BLDC 的正极和负极磁场。该传感器包括用于磁性传感的片上霍尔电压生成器、能够放大霍尔电压的比较器、为抑制噪声提供转换滞后的 Schmitt 触发器和集电极开路输出。该传感器的典型配置如图 2 所示。

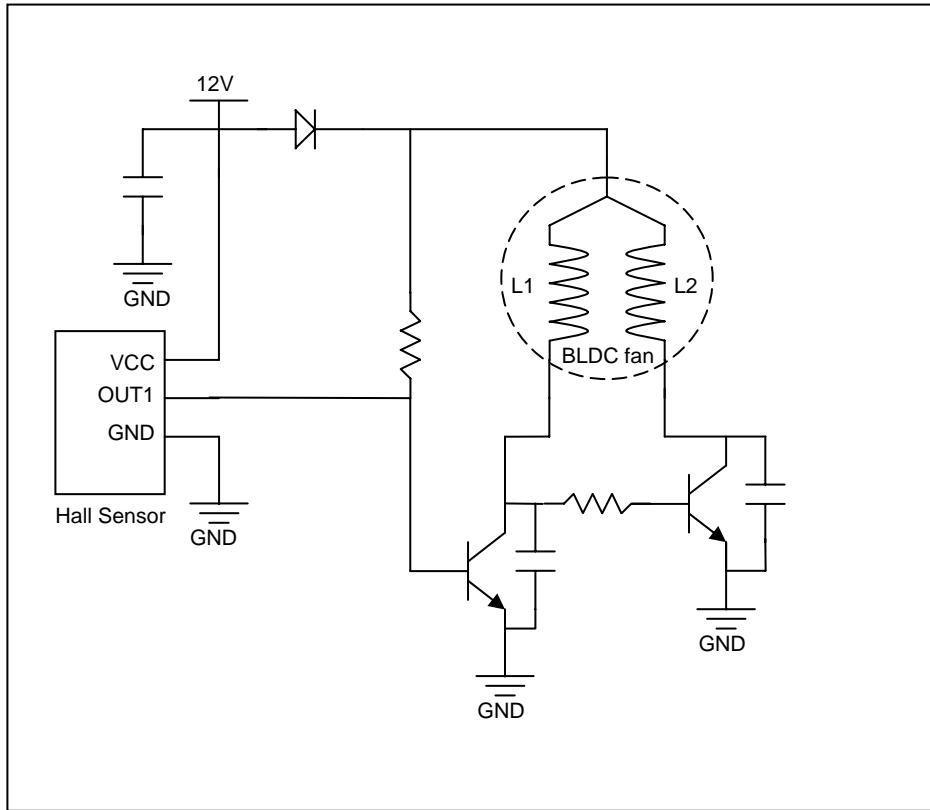


图 2. 带外部驱动装置的三脚霍尔传感器

传感器监测由转轴上的永磁体生成的磁场的极性，提供有关转轴位置的信息。该信息用来触发外部晶体管/FET 的开与关。随着晶体管的运行，BLDC 风扇将连续旋转，旋转速度的快慢取决于供应电压。

#### b) 具有内置驱动装置的霍尔传感器

这种实施类型采用具有外部驱动装置的三脚霍尔传感器的增强版本。霍尔传感器不但包含一个与三脚霍尔传感器一样的片上霍尔放大电路，还拥有两个用于两相 BLDC 风扇线圈驱动的补充输出和一些额外功能，如自动锁定关闭和自动重启等。霍尔传感器的典型配置如图 3 所示。

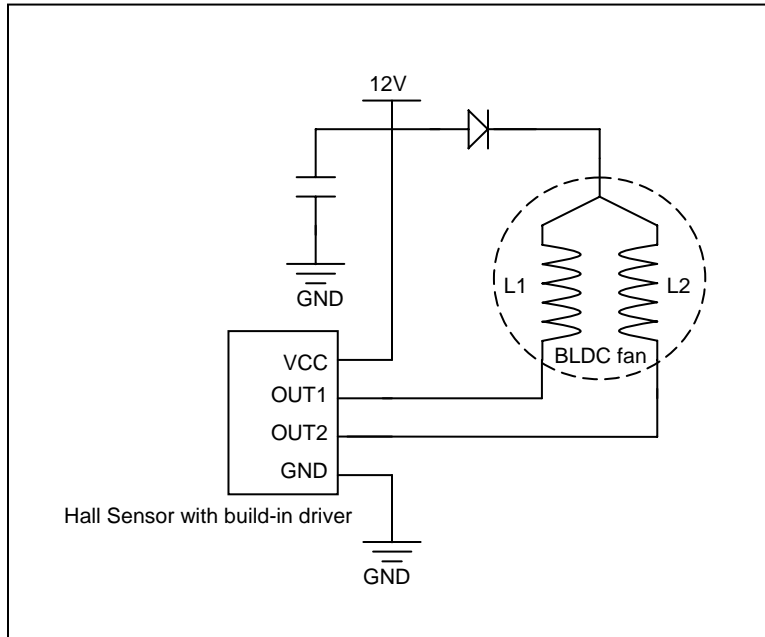


图 3. 带内置驱动装置的霍尔传感器

很多 BLDC 风扇制造商都使用这种实施类型。这种实施的优势在于有更多的 PCB 主板空间可用于额外的外部组件，风扇也由于芯片上内置的基本保护功能而变得更加可靠。这种实施类型的劣势是它的驱动能力。由于有限的封装空间，输出驱动能力将由于使用了更小或速率更低的 BLDC 风扇而受到限制。一般来说，最大的输出电流应该限制在 20mA 以内。

## 2. BLDC 风扇内的可变速度控制

BLDC 风扇中有用于可变速度控制的外部 and 内部方案。

外部方案是把一个外部晶体管/FET 与 BLDC 风扇（高端配置/低端配置）进行串行连接，通过(c)线性镇流器、(d) DC-DC 镇流器或(e)脉冲宽度调制 (PWM)驱动方法控制整个风扇内的供应电压。BLDC 风扇的速度与供应电压成正比。

内部方案是使用 BLDC 风扇内置的内部晶体管/FET，通过(f) ASIC 解决方案或(g) MCU 解决方案更改速度。

下面分别介绍可变速度控制 BLDC 风扇解决方案内的一些典型实施：

### c) 外部方案中的线性调节驱动方法

DC 或 BLDC 风扇的速度可以通过风扇内的应用电压进行更改。整台风扇内的 DC 电压通过使用传统的线性镇流器进行调整。图 4a 和 4b 分别显示了高端和低端配置。这种方法的主要问题在于被动组件的散热和较窄的可控制速度范围。

当风扇在零速或全速状态下运转时，被动组件要么在零速中完全关闭，要么在全速中完全开启。在这种情况下，所有功率都转移到 BLDC 风扇上。而且这还意味着被动组件中无功率浪费。但当 BLDC 风扇不在零速或全速时，被动组件中就将有部分功率浪费，因此这种方法的效率值得怀疑。

由于这种方法没有速度监视，因此也就无法了解风扇的状态。为了确保风扇能够启动，它需要在最大电压的 60% 范围内选择启动电压，所以，可控制速度范围在剩余的 40% 部分中（即最大速度的 60% 至 100%）。

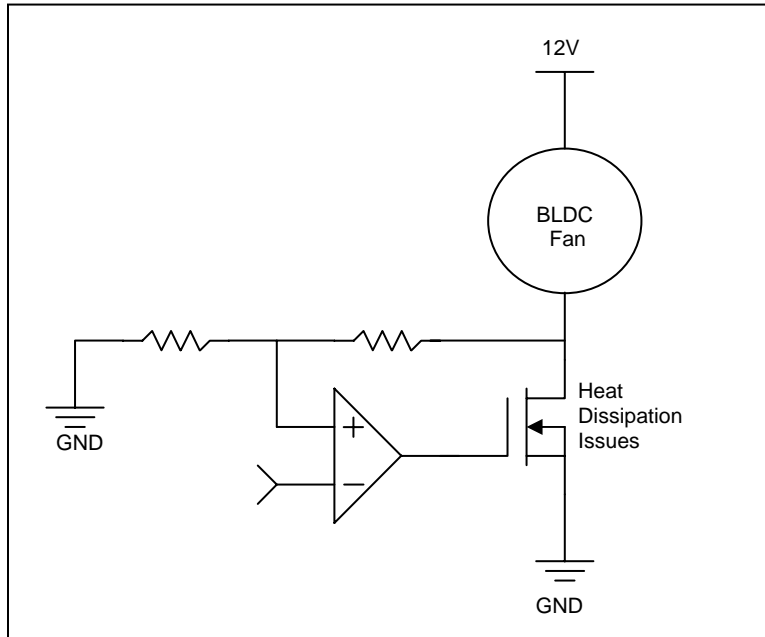


图 4a. 线性调节，低端配置

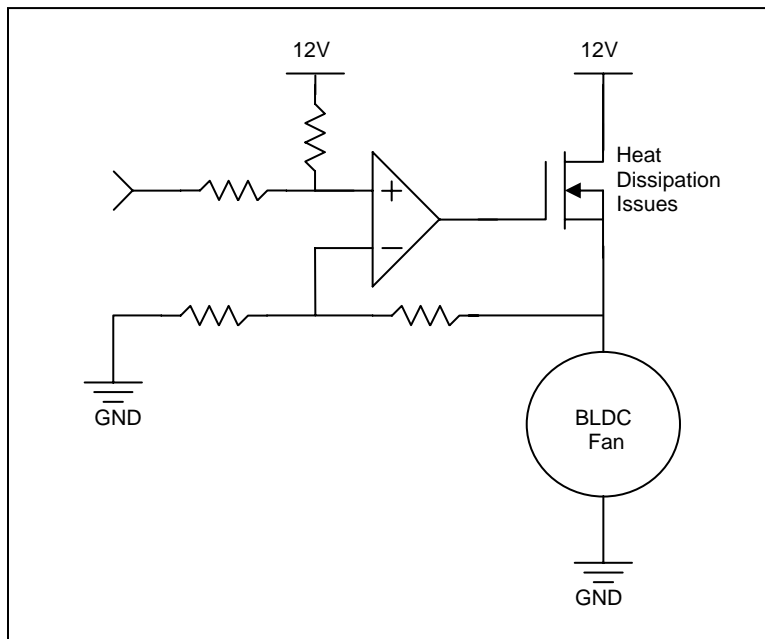


图 4b. 线性调节，高端配置

通过用外部微控制器添加转速表来监视风扇状态的方法，可以对其进行一些改进。在这种情况下，虽然可以实现较高的效率和更低的启动电压，但系统成本也将大幅增加。

#### d) 外部方案中的 DC-DC 调节驱动方法

由于线性调节方法中的缺陷，有些设计人员使用 DC-DC 调节。这种驱动方法主要是使用开关模式电源来更改风扇的供应电压。这种方法消除了热耗散效应，但效率有待考虑。由于 DC-DC 开关电源不可能实现 100% 的效率，因此风扇的总体效率在 DC-DC 开关模式调节中将降低 5-25%。但是，与线性调节相比，它的总体效率更高一些，而且这要取决于电压调节值的高低。这正好与线性调节方法降低调节供应电压将降低功率损失形成鲜明对比。这种方法的劣势在于更高的系统成本、高频率噪声和电路复杂性。其典型配置如图 5a 和 5b 所示。

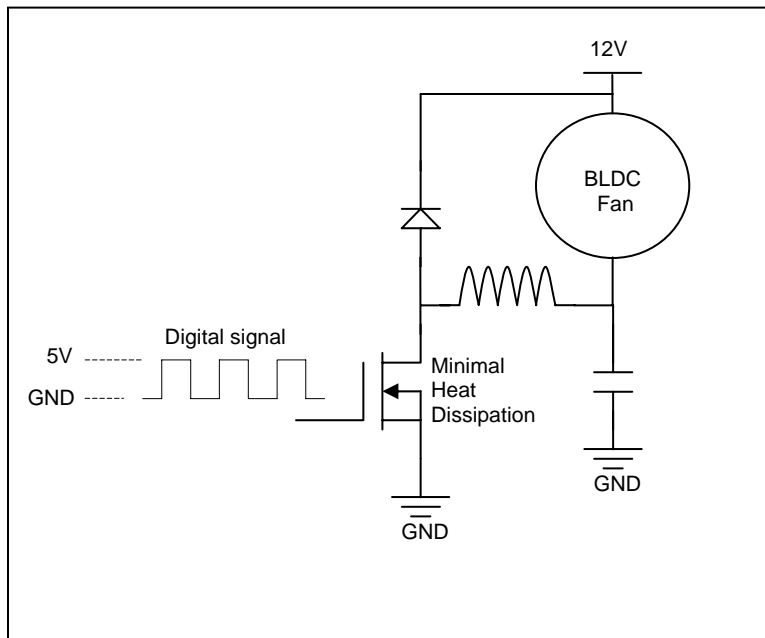


图 5a. DC-DC 调节，低端配置



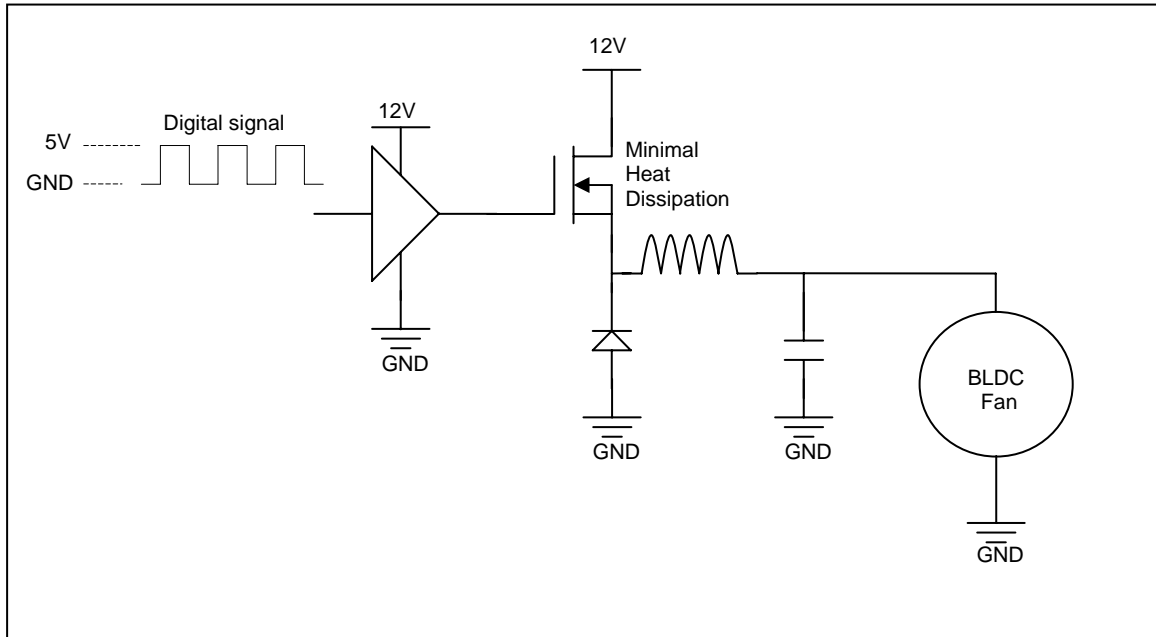


图 5b. DC-DC 调节，高端配置

#### e) 内部方案中的 PWM 驱动方法

PWM 驱动方法的引入是为了克服线性和 DC-DC 调节中的效率问题。BLDC 风扇的速度由应用到外部开关装置（晶体管/FET）中的 PWM 固定信号的任务处理周期控制。风扇的速度与 PWM 的任务处理周期成正比。提高 PWM 信号的任务处理周期的百分比将提高风扇的速度。但是这种方法的一个重要注意事项是 PWM 频率的选择。更高的 PWM 频率将导致风扇内部换流电路的功能失常，较低的 PWM 频率将导致风扇振动。因此，PWM 频率的流行值是这一方法的主要注意事项。由于 PWM 频率要符合人耳的听力范围，但风扇运行时会出现噪声。因此，需要添加一些额外的组件来消除这一影响。其典型配置如图 6a 和 6b 所示。

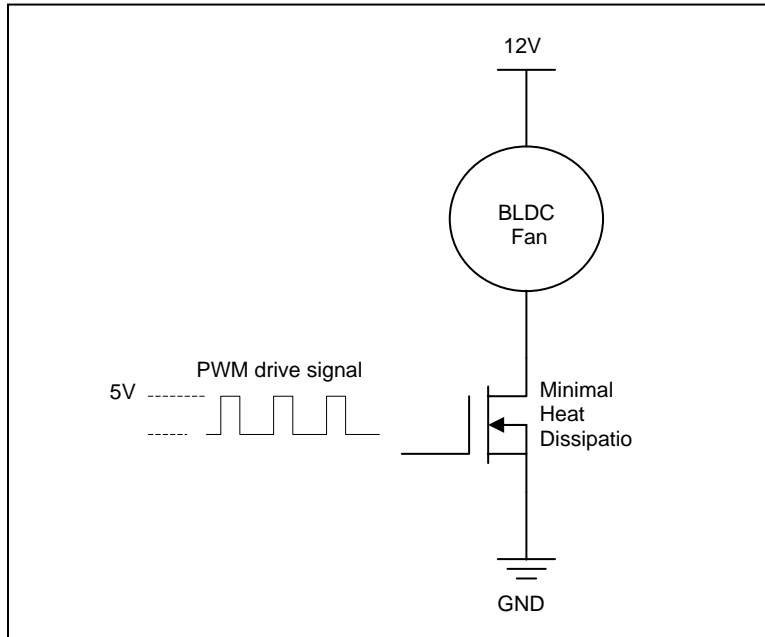


图 6a. PWM 驱动电路，低端配置

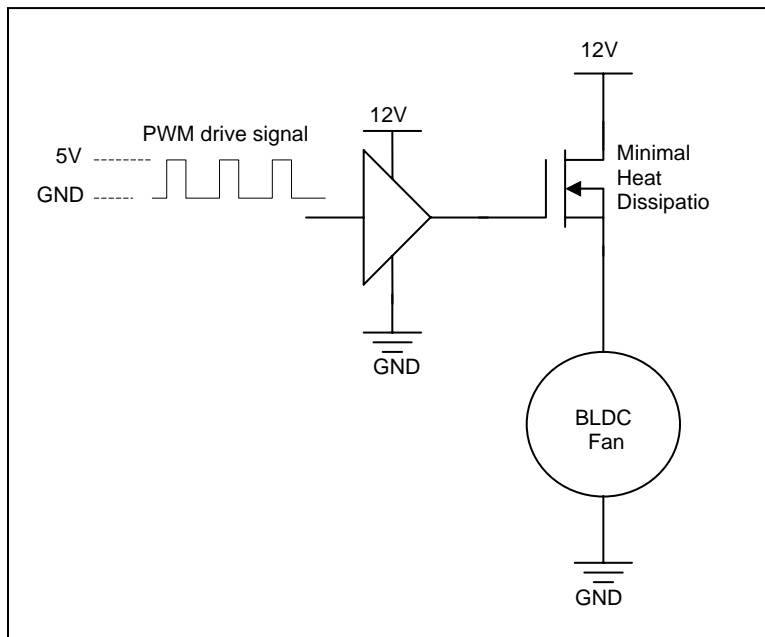


图 6b. PWM 驱动电路，高端配置

这种方法的优势在于没有线性调节中的热耗散和低效率问题，也没有 DC-DC 调节中的成本和复杂性问题。但是，在考虑系统成本和风扇的性能时，大多数外部方案都不能很容易地改进。因此，有些制造商开始使用内部方案来降低系统成本、改进系统性能，甚至为了满足客户需求而在 BLDC 风扇内添加一些先进保护功能。

#### f) ASIC 解决方案

在 ASIC 解决方案中，所有功能、速度控制方法和硬件配置引脚都经过了定义和修改。这种方法的优势在于实施更简单，但劣势在于缺乏灵活性。ASIC 半导体制造商设计出 ASIC 控制器来满足一些特殊风扇控制应用的要求，把预先定义的速度控制算法和某些功能用于保护和其它目的。

当 ASIC 解决方案推出时，大多数 ASIC 控制器都是为了控制电源断开时间以调整 BLDC 风扇的速度。这种类型的风扇速度控制解决方案的典型配置如图 7a 所示。

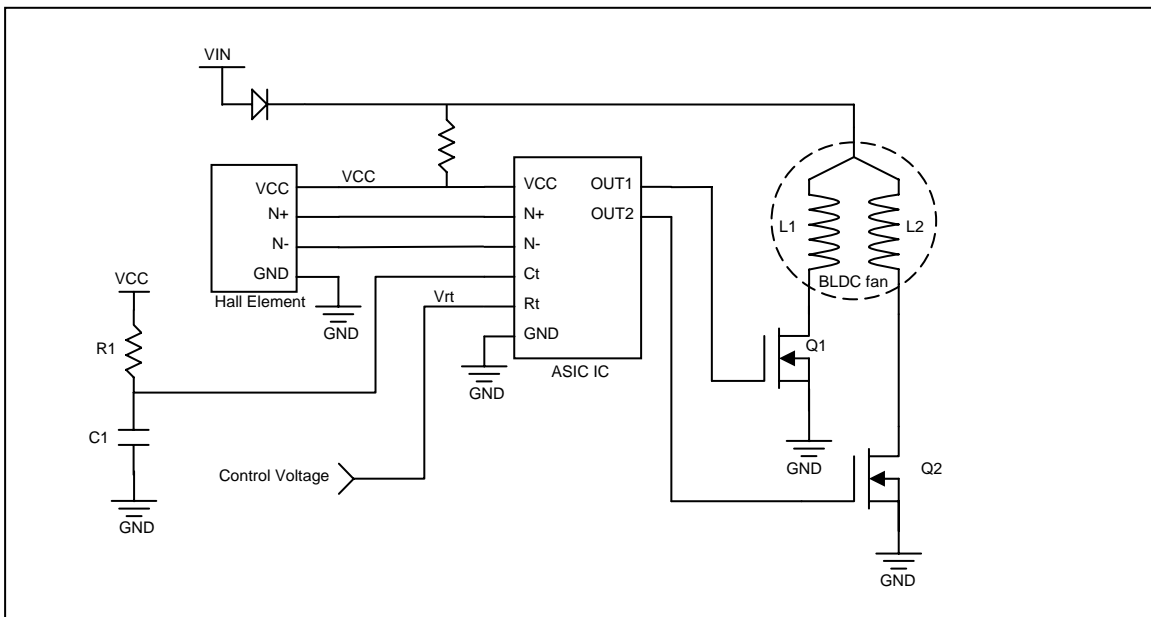


图 7a. ASIC IC 中电源断开时间的速度控制

在该配置中，根据 R1 和 C1 的时间常量，旋转速度通过设置 Ct 电压的充电时间来决定。将它与外部电压命令 Vrt 进行比较，以决定风扇绕组的电源断开时间。在电压命令 Vrt 和 BLDC 风扇的实际速度之间有一种线性关系。Vrt 越高，风扇的速度也越高。这种类型的可变速度控制方法的优势在于其实施更简单，成本更低，劣势在于旋转速度中相对较高的误差。一般来说，旋转速度的准确性大约在 +/- 10% 之间。此外，大多数 ASIC 控制器具有内置的霍尔传感器电路，霍尔元件和霍尔传感器都可以接受这一电路。

现在，有些制造商开始为 BLDC 风扇开发更为先进的 ASIC 控制器。这种类型的 ASIC 控制器使用具有高速 PWM 技术的闭环速度控制来改进效率和可靠性。越来越多的额外功能也将添加到这些芯片中，包括基本保护、通信接口、用于速度控制的不同输入命令界面、甚至自动的片上热分流功能。这种类型的风扇速度控制解决方案的典型配置如图 7b 所示。

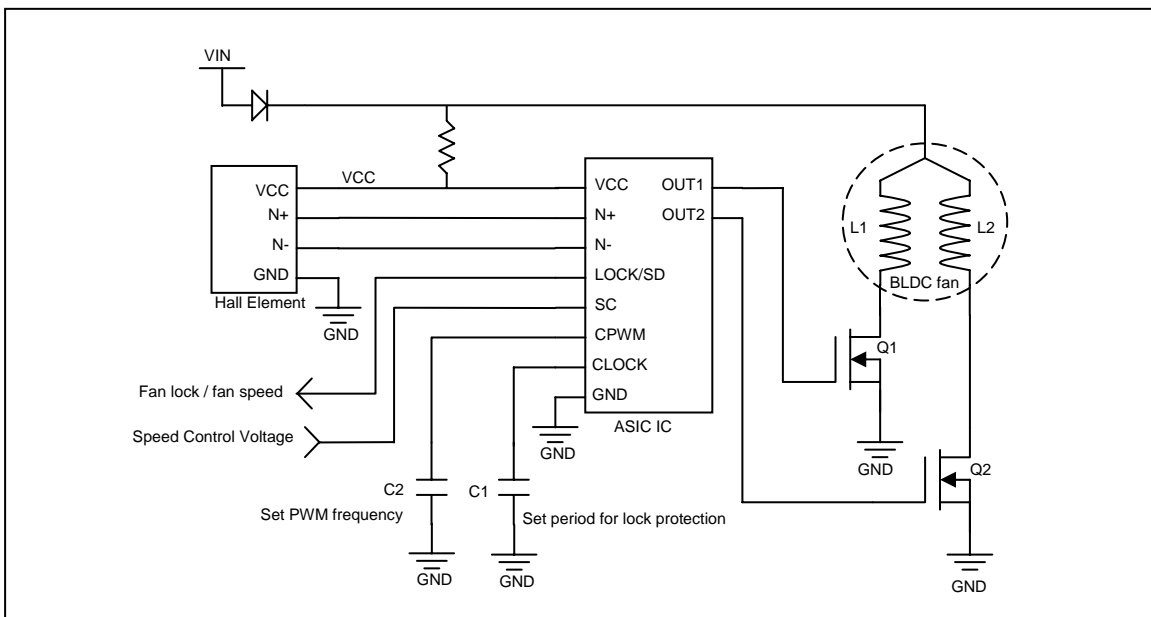


图 7b. ASIC IC 中的 PWM 速度控制

在图 7b 中，BLDC 风扇的转轴位置由来自外部霍尔传感器的不同信号或来自霍尔元件的集电极开路输出信号进行监测。所有驱动输出都需要与转轴位置保持同步。BLDC 风扇的速度要么由来自速度控制“SC”针脚的外部电压控制，要么由来自“CPWM”针脚的外部 PWM 信号控制。

使用“SC”针脚控制风扇速度、提高“SC”针脚中的电压都将由于补充输出针脚“OUT11”和“OUT2”PWM 驱动的任务处理周期的更高百分比而提高风扇速度。使用“CPWM”针脚来控制风扇速度时，风扇速度与 PWM 输入信号的任务处理周期成正比。PWM 频率可以通过连接到该针脚的外部电容器进行设置。典型的 PWM 频率设置为大约 25kHz。

LOCK/SD 针脚也可以用来显示风扇状态。在正常操作情况下，该针脚以两倍于风扇旋转速度的频率输出信号。如果风扇被锁定，该针脚就由于内部拉起式电阻器而处于逻辑高状态。然后，OUT1 和 OUT2 就进入自动启动驱动模式以保护外部驱动设备和马达绕组。在这种情况下，风扇将驱动很短一段时间，然后在重新尝试驱动前等待较长一段时间。时间的长短取决于连接到“CLOCK”针脚的电容器值。

用于 BLDC 的 ASIC 控制器具有不同的功能，有些具有通信接口（如 I2C、ISI 或 SMBus），而有些具有片上热分流功能。

ASIC 解决方案的优势在于其实施更为简单。所有功能都是预定义的。BLDC 风扇制造商的设计人员只需更改外部组件就能符合其产品要求。ASIC 解决方案的主要劣势在于缺乏灵活性。

由于不同的最终客户可能要求 BLDC 风扇具有不同性能和功能，预定义的 ASIC IC 可能不能满足他们的要求。ASIC IC 不能提供客户要求的空间。例如，ASIC 控制器只能用外部电压，提供线性关系速度控制。如果需要更改速度和电压之间的关

系，ASIC 控制器就不能完成这一操作。使用微控制器（MCU），就可以很轻松地克服类似问题。利用 MCU，只需更改查询表，就能相应地更改速度控制和外部命令（电压）之间的关系，即使它们之间的关系是线性的。这也是 BLDC 风扇开始使用 MCU 而不使用 ASIC 的原因。而且，MCU 可以通过固件提供一条更轻松地更改任何与计时有关的参数的途径。在 ASIC 控制器中，更改任何与计时有关的参数都要求更改外部组件。

### **g) MCU 解决方案**

最近，微控制器的成本降低了。很多 BLDC 风扇制造商开始为其产品采用微控制器。

MCU 解决方案中可以采用很多速度控制算法。典型的可变速度控制方法是：i) 相位开/关时间延迟和 ii) PWM 控制。

选择哪种类型的控制方法取决于 BLDC 风扇的要求。飞思卡尔半导体开发出一系列适合风扇控制应用的 MCU，包括 M9RS08KA2、M9S08QG8 和 M9S08QD4 MCU。所有这些 8 位 MCU 都具有内置的内部时钟源（ICS），为 MCU 操作提供时钟源代码。通过使用 ICS 模块，可以消除外部时钟源代码，从而降低风扇的系统成本，相同的封装内拥有更多可用的引脚。这些 MCU 不仅拥有通用的 MCU 功能，如模拟至数字转换器（ADC）、模拟比较器（ACMP）、模计时器、外部中断和计时器/脉冲宽度调制器，还拥有一些串行通信接口，如串性通信接口（SCI）和串行外围设备接口（SPI）。另一方面，需要的话，风扇应用中可以安装片上温度传感器，用于 ADC 校准和片上热分流保护。

由于 MCU 提供了灵活性优势，很多功能都可以通过更改固件轻松实施。我们能将更多精力放在两种类型的闭环速度控制方法的配置、它们的优势和劣势及设计/实施注意事项问题上。

## h) 内部方案中的相位开/关延迟时间控制方法

内部方案中的相位开/关延迟时间控制方法用来调节相位交换时的关闭时间。旋转速度可以通过调节关闭时间的长短来调节。关闭时间与提供给风扇的能量成反比。也就是说，关闭时间越长，供应给定子线圈的能量越少，从而导致更低的风扇速度。但是应该满足的一个条件是它需要与来自霍尔传感器（即换流）的反馈信号保持同步。这种方法的基本原理与PWM方法的原理有些类似。两种方法都是通过更改打开/关闭时间的比率来更改应用到绕组线圈的能量。但它们之间的准确性、当前波纹和噪声水平有所不同。

相位开/关延迟时间方法的配置如图8a所示。基本的运行原理是MCU驱动晶体管，让BLDC风扇开始旋转，霍尔传感器根据BLDC风扇的位置更改逻辑水平。根据来自霍尔传感器的信号，MCU相应地驱动风扇（换流）。速度取决于来自热量传感器外部电压的输入信号。MCU将根据热量传感器的输入更改关闭时间的长短。

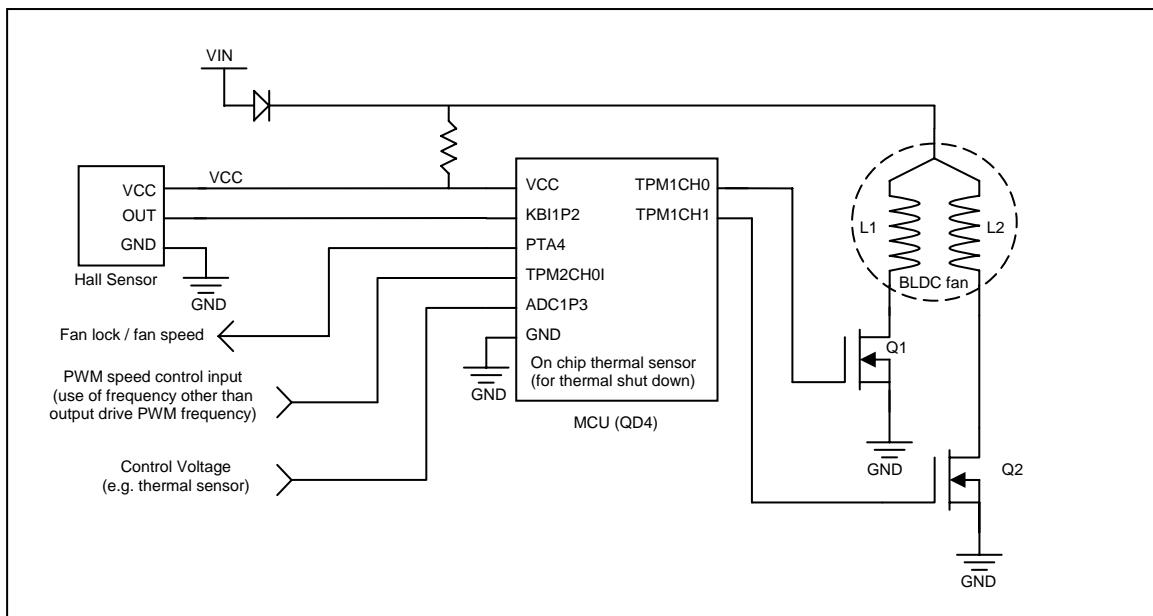


图 8a. 相位开/关延迟时间或 MCU 中的 PWM 速度控制

图 8b 显示了 BLDC 风扇中交换与速度控制之间的关系。L1 需要与霍尔信号的下落边缘保持同步，而 L2 需要与霍尔信号的上升边缘保持同步，以确保正确的交换。BLDC 风扇的全速度、关闭时间长度等于零。要想实现更低的速度，就必须延长关闭时间，缩短打开时间。

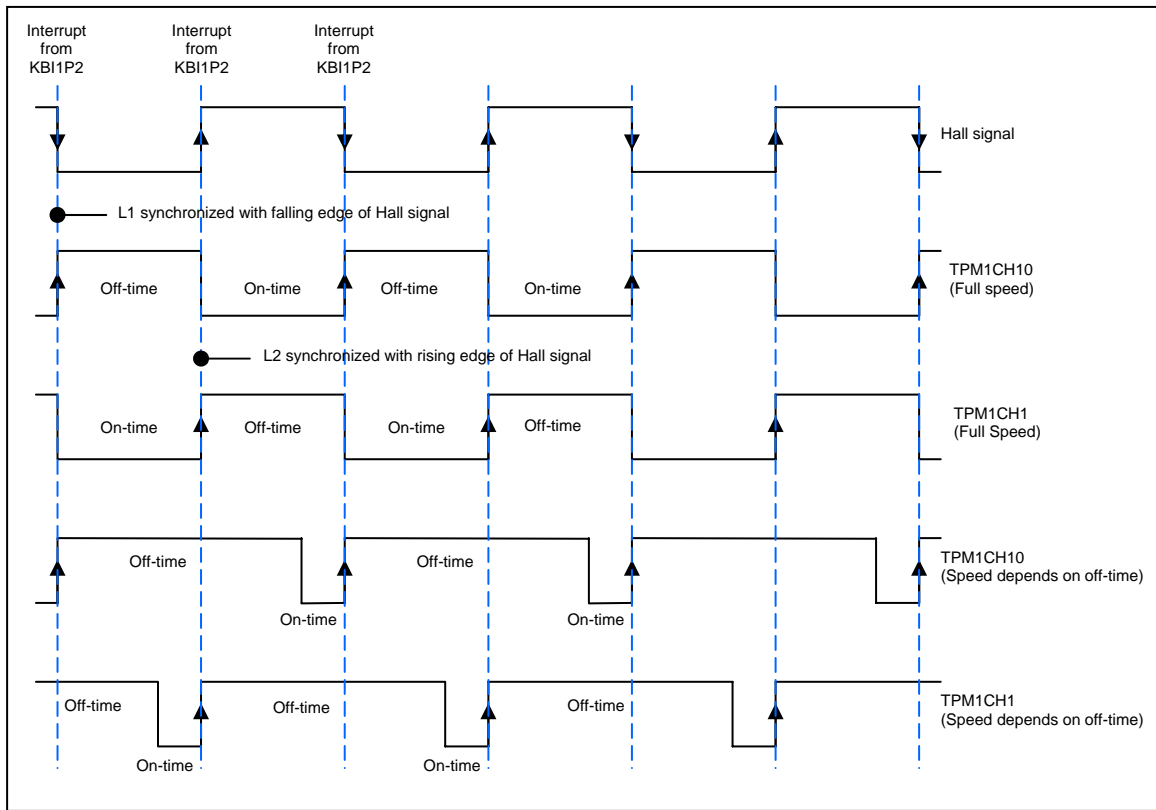


图 8b. MCU 中开/关延迟时间速度控制的计时示意图

风扇的速度取决于连接到 MCU 的 ADC 针脚的热量传感器的温度。速度控制算法根据热量传感器的读数，调节 Q1 和 Q2 晶体管/FET 中的关闭时间长度。由于 BLDC 风扇和热量传感器的特征在不同制造商之间有所不同，热速度配置文件需要根据不同设计而定。温度速度映射查询表提供了实现这一目标的简单途径。图 8c 显示了温度与速度之间的实际关系。使用 MCU，可以轻松更改温度-速度查询表，



以符合不同 BLDC 风扇的要求。这是 BLDC 风扇中的 MCU 解决方案的一个主要优势。

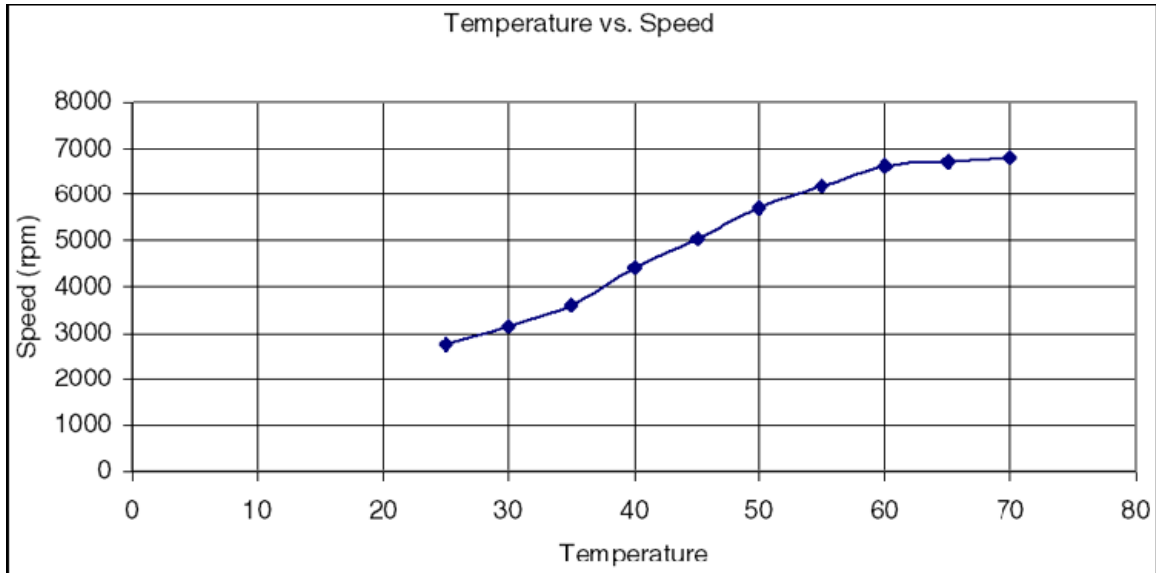


图 8c. 温度-速度剖面图

由于这种速度控制方法比较简单，对 MCU 的要求也相对较低。很多低端 MCU 可以用于这一应用，如 MC9RS08KA2 MCU。这种方法的优势在于实施简便、容易更改速度配置文件和添加一些额外功能。

使用 MCU 解决方案的另一个优势是有些风扇制造商能为不同的最终用户设计他们的产品。硬件是相同的，但速度配置文件要根据最终用户的要求而定。因此，在固件发往客户前，客户可以对其进行编程。而且，有些风扇需要为识别目的编辑不同的序列号，特别是在多风扇系统中。

尽管这种速度控制方法的实施相对简单，但还是存在一些劣势，如较低的准确性和更高的噪声水平。因此，它可能不符合有些高端系统的要求。这种类型的速度控制方法的准确性大约在 $\pm 10\%$ 之间，具体取决于 BLDC 的最大速度、MCU 的最大总线速度和计时器中位的数量。例如，如果我们需要用具有较低分辨率计时器的低速 MCU 驱动速度更高的 BLDC 风扇，就会出现较低的速度准确性。如果使用 MC9RS08KA2，最大的总线速度是由 ICS 和 8 位计时器分辨率生成的 10MHz。它可以提高速度准确性。

#### **i) 内部方案中的 PWM 控制方法**

由于相位开/关延迟时间控制方法的一些缺陷，PWM 控制方法可以提供更高的准确性和更低的噪声水平。这种方法的硬件配置/连接与图 8a 中显示的相位开/关延迟时间控制方法中的相同。但驱动控制机制存在差异。速度由 PWM 的任务处理周期控制，而不是通过更改关闭时间长度进行控制。

在这种方法中，速度由独立驱动 BLDC 风扇中两个绕组线圈的 PWM 的任务处理周期控制。两个绕组线圈交替打开，但线圈的电压由 PWM 驱动信号的任务处理周期控制。这种方法中的 PWM 频率是一个重要的设计注意事项。一般来说，PWM 频率可以在 18kHz 至 60kHz 的频率范围内选择。

PWM 频率范围的选择由三个因素决定：噪声水平、效率和可控制的速度范围。正如外部方案的 PWM 控制方法中所提到的，如果 PWM 频率在人耳能够听到的范围内，就会出现噪声。在这种方法中，PWM 频率高于 18kHz（该频率超出人耳能够听到的范围），这就意味着风扇可以更安静的方式运行。另一方面，使用更高的频率来控制绕组线圈的电压意味着可以获得更高的频率。由于高速 PWM (18kHz – 60kHz) 远远高于 1/交换期间的 PWM，这意味着更改任务处理周期将会更改应用到绕组线圈中的平均 DC 电压。与相位开/关时间延迟方法相比，当前波纹降低了。

因此，它将通过降低当前波纹的方式改进效率和噪声水平。由于功率损失通过外部组件得到消除，更多可用功率得以使用，因此内部方案中的可控制速度范围从 40%-100% 提高到 25%-100%，而且没有任何启动和停顿问题。

如果使用成本更高的 H-bridge 开关驱动装置，在两台高端开关打开期间通过重新计算感应电流来维持定子绕组中的电能，就可以进一步提高效率。

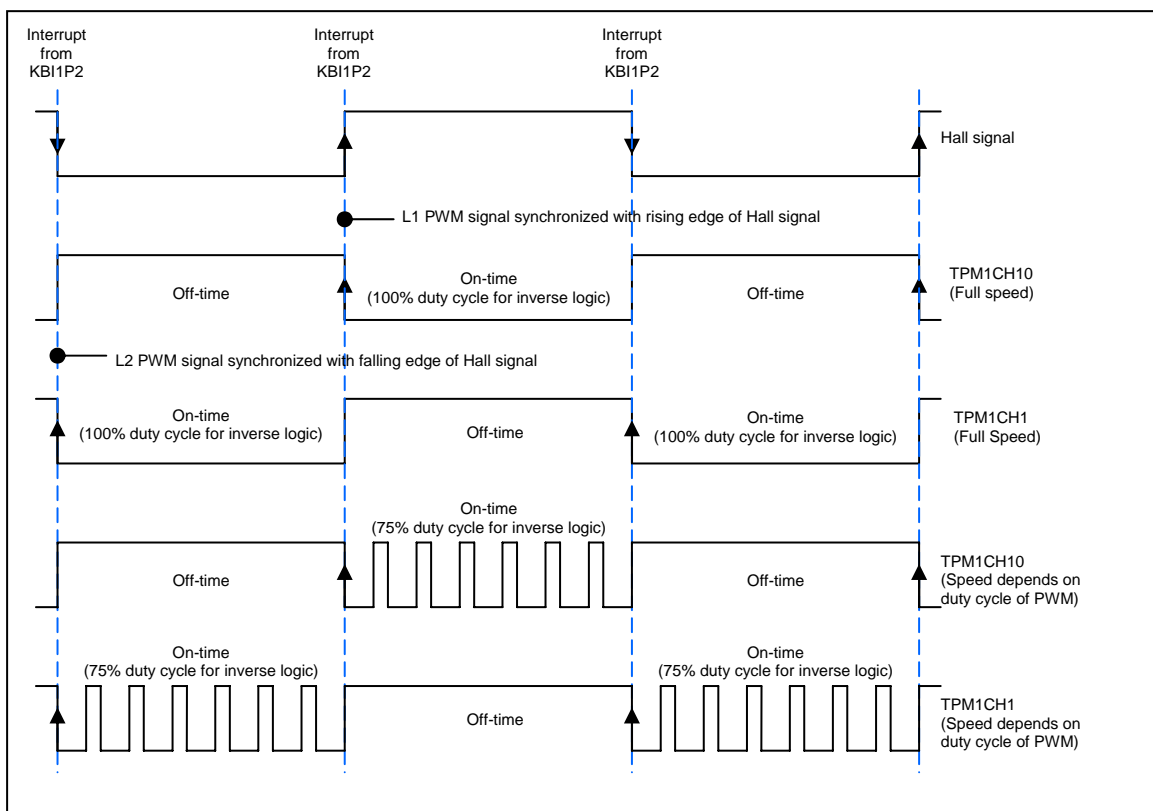


图 9a. MCU 中用于 PWM 速度控制的计时示意图

图 9a 显示了向两个补充输出 TPM1CH0 和 TPM1CH1 的驱动 PWM 波形。与相位开/关延迟时间方法类似，风扇的速度由连接到 MCU 的 ADC 针脚的热量传感器决定。但 PWM 方法中的速度是 Q1 和 Q2 晶体管/FET 在驱动相应的绕组线圈过程中通过调节 PWM 的任务处理周期来调节的。在 ASIC 解决方案中，PWM 输入控制

频率是固定的（如 25kHz），因为 ASIC IC 将使用它来驱动风扇。与 ASIC 控制器不同的是，MCU 解决方案中的 PWM 输入控制信号可以在任何频率中使用。更低的 PWM 频率（如 5kHz）可用于 PWM 输入控制信号，输出 PWM 频率可以维持在更高的 PWM 频率（如 25kHz）中，以驱动风扇的绕组线圈。

在 MCU 解决方案中，输入速度命令（即来自热量传感器的电压）通过 ADC 针脚进行传感，它将首先与温度-速度查询表进行比较，以获得与温度相对应的预定义要求速度。而且，PWM 的任务处理周期也相应地进行变动。实际速度将通过霍尔信号进行监视，并用于闭环速度控制以更改 PWM 的任务处理周期。根据 MCU 的应用和性能情况，闭环控制既可以是简单的预计算 PI/PID 查询表，也可以是 MCU 固件的实时计算。对低端应用来说，应使用查询表。

来自飞思卡尔的新 MCU MC9S08QD4 非常适合于低端和中端 BLDC 风扇应用。它不但为热感应准确性提供了 10 位 ADC 针脚，还为 BLDC 风扇控制的 PWM 生成和速度感应提供了两个 16 位计时器/PWM 调制器。PWM 调制器的使用能够解放 MCU，因此，在需要时，MCU 拥有足够的带宽来执行不同的任务。有些常见的 MCU 功能（如内置的 ICS）提供了 8MHz 总线频率，此外，该 MCU 中还包括外部中断和可编程的斜率 I/O 端口。

## 结论

风扇控制有很多不同的实施方法，如同使用霍尔传感器和两个晶体管来驱动固定速度 BLDC 风扇一样简单。文中描述了从固定速度控制到可变速度控制、从外部方案到内部方案等各种不同的实施方法。

智能 BLDC 风扇可为电力和机械保护以及通信界面提供先进的速度控制算法、高效率、低噪声、低功耗、低待机功耗、系统智能保护功能。

ASIC 和 MCU 内部方案逐渐成为智能可变速 BLDC 风扇控制的流行解决方案。MCU 解决方案具有灵活性优势。很多制造商开始为他们的产品使用 MCU，特别是对有些定制的风扇来说。因此，低成本、低引脚计数、高准确率内置振荡器（如 ICS）、高分辨率 ADC 和高分辨率 PWM 调制器/发电机 MCU 非常适合于未来的 BLDC 风扇产品。飞思卡尔的 MC9S08QD4 是符合所有这些要求的 MCU 产品。它是一款低成本的 8 位、8 引脚计数 MCU，此外，它还包括 +/-2% 内置振荡器、10 位 ADC 模块、两个 16 位计时器/PWM 调制器。所有这些功能都非常适合 BLDC 风扇应用。