

智能功率模块的结构与使用

汤正道 鲁昌华

智能功率模块(IPM)是一种先进的功率开关器件,它是以功率器件 IGBT 为主同时将驱动电路和欠压保护、过流保护、短路保护、过温保护等多种保护集成在同一模块内。这种高度集成化不但大大缩短产品的研发周期,还能减少其体积、降低噪声干扰、改善驱动和保护性能,同时系统的可靠性也得到了较大的改善。这些优点为其在电力电子领域创造了良好的应用条件,利用 IPM 的控制功能,与微处理器相结合,可方便地构成智能功率控制系统。IPM 应用广泛:如在变频器、直流调速系统、DC-DC 变换器以及有源电力滤波器等领域都有着不俗的表现,尤其在电机控制方面的应用受到广泛关注。目前,IPM 主要由富士公司、三菱电器、国际整流器公司、西门子电器等著名厂家提供,我国在这方面还处于起步阶段。

IPM 内部结构

IPM 分 6 单元和 7 单元两种结构,基板常用陶瓷作绝缘材料。为了避免发热量较大的主控部分对控制部分的影响,通常将其主控元件和控制芯片分别贴装在不同的基板上,此举进一步增强了 IPM 的可靠性。下面以富士公司 R 系列 IPM 为例来介绍其内部结构。如图 1 所示,这是一种包括制动单元在内的完整的逆变器,其中包括 7 个 IGBT 和 7 个快速功率二极管,IGBT1~ IGBT6 组成逆变桥,VDF1~ VDF6 是与 6 个主 IGBT 反并联的回馈二极管,IGBT 7 是动力制动用的开关管,VDW 是它的续流二极管(它具有快速反向恢复特性,可较好地抑制电磁干扰噪声)。图中有关检测元件、保护电路含在驱动框内没有具体画出。驱动部分具有下述功能:驱动信号放大、短路保护、控制电源欠压保护、IGBT 过热保护、IGBT 及 VDF、VDW 过流保护。其中 IGBT4、6、2、7 及过热保护电路经电阻 R 由 16 号端子 ALM 输出报警信号。当 IPM 内部出现故障时,ALM 将输出报警信号提示系统停止工作。由于控制电源共地处理的限制,ALM 信号由具有共地端的驱动器中取出,即由 IGBT 4、6、2 及 7 中取出。当有 ALM 信号输出时,IGBT4、6、2 及 7 被封锁,由于没有电流通路,故 IGBT 1、3、5 也同样受到保护。另

外,对于该模块上桥臂的三只 IGBT (IGBT1、IGBT3、IGBT5)是独立供电的;而下桥臂的三只 IGBT (IGBT2、IGBT4、IGBT6)及制动管 IGBT7 是公用一组电源。

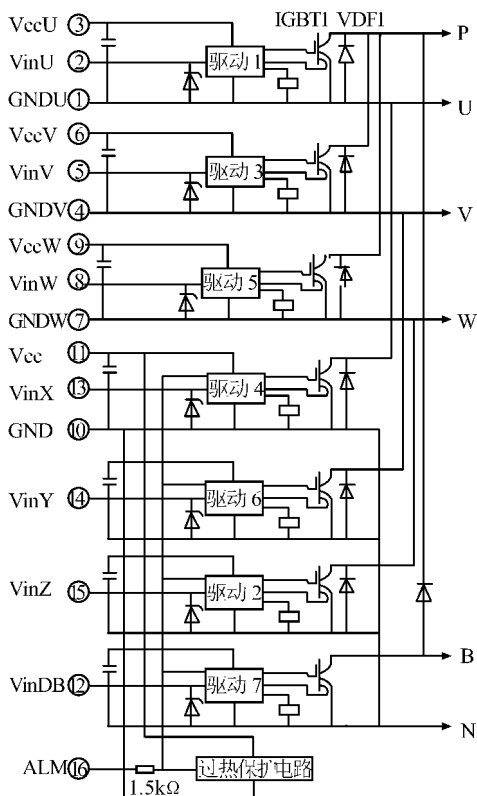


图 1 IPM 的内部结构图

IPM 控制信号源

波形及算法 良好的控制信号源是改善输出波形质量的重要条件之一。IPM 大多工作在 PWM 波调制下,因此 PWM 波的产生和控制技术的优良是能否提供良好控制信号源的关键。下面我们就此重点来阐述:就 PWM 而言,本质在于优化开关函数,使得逆变器按一定规律输出电压或电流。目前,基于微控制器的 PWM 波产生方法主要有:等脉宽 PWM 法、正弦波 PWM 法(SPWM 法)、磁链追踪型 PWM 法、电流跟踪型 PWM 法和最近发展起来的空空间矢量 PWM 法(SVPWM 法),但常用的 PWM 控制算法有两种,即 SPWM 算法和 SVPWM 算法。虽然与 SPWM 算法相比,SVPWM 算法具有直流电压利用率高、损耗较小、便于数字化方案实现的优

点,但在实际中用的最多的还是 SPWM 控制,该波形特别适合在线计算——当我们知道其采样时刻时就很方便地确定该采样周期内脉冲信号的开关点。SPWM 法的基本思想是使输出的脉冲宽度按正弦规律变化,因此,它有效的抑制了输出电压中的低次谐波分量,使电机工作在近乎正弦的交变电压下,转矩脉动小,大大扩展了交流电机的调速范围。

SPWM 法可由模拟电路和数字电路等硬件电路来实现,也可由微型计算机(或微处理器)即硬件与软件结合的方法来实现。用硬件电路实现 SPWM 法,通常是用一个正弦波信号发生器产生可以调幅调频的正弦波(称为调制波)信号,再用一个三角波信号发生器产生幅值不变的三角波(称为载波)信号,将它们进行比较,由两者的交点来确定逆变器开关的转换。如果用微处理器实现则根据软件化方法的不同分为表格法(又称 ROM 法)、随时计算法(又称 RAM 法)和实时计算法,前两种方法的共同特点是把计算过程中要用到的一些数据(如正弦波一个周期中一些点的值)以常数形式存放在 ROM 或 RAM 中。计算时用快速的查表指令代替复杂的乘除运算指令,以减轻单片机负担。由于这两种方法中的数据是离线计算的,在负载情况较复杂,或者需要产生任意频率和载波比的 SPWM 波时显然不能满足要求。同时这种查表法对空间的浪费也很大,尤其在连续变频时很难同时存放下多组数据。即使利用数据的规律性也很难减小所需空间,故此法通常用于系统前期分析。另外这两种方法也无实时处理能力。实时计算要有数学模型,采样型 SPWM 法就是其中一种模型,它分自然采样法和规则采样法。自然采样法其原理简单易于用模拟电路实现,但由于其开关模式不能用显式表达,很难用微机进行实时控制,故通常采用简化的数学模型——规则采样法。而规则采样法中又分对称规则采样法与不对称规则采样法,实际中常采用前者(如图 2 所示)。虽然对称规则采样法的谐波分量比不对称规则采样法要大,但可以通过提高载波的频率来缩小两者差别。另外还有人基于规则采样法进行一定的算

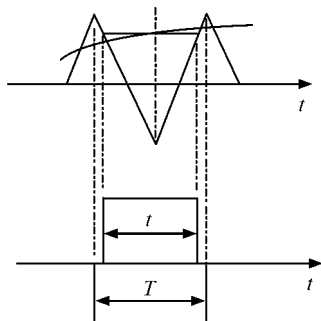


图 2 对称规则采样法原理图

法改进也取得了良好的效果。

目前,随着具有高速运算能力的 DSP 器件的出现,越来越多的设计围绕 DSP 展开。专用 DSP 的出现(比如专门用于逆变器控制的 TMS320F240)为 SPWM 调速提供了更可靠、更简便的方法。

死区分析 在三相桥式逆变电路中,通常采用双极性 SPWM 调制技术,即在同一桥臂上下两功率管上施加互补的两路驱动信号。为防止两管的直通,一般将驱动信号上升沿滞后插入死区。死区的存在使 SPWM 变频器不能完全精确地复现控制信号的波形,必然产生新的谐波。由于功率器件的延迟开通,变频器的输出电压存在幅值和相位的误差,而且误差的大小随负载而变化。由于在每一载波周期驱动信号都有延迟,幅值和相位误差则随着变频器输出频率的降低而增大,并直接影响电动机在低速下的运行性能。死区效应已越来越受到广泛关注,死区时间过长会导致输出波形出现较严重的交越失真,其过短又容易使逆变器在电机启动时因电流过大而造成支路和输出短路,并使过流保护变得困难。为此,人们提出不少死区补偿办法,常用的死区补偿方法有两种——电压反馈补偿和电流反馈补偿。前者是将三相的输出电压检测出来同调制波作比较,这样就得到一定的偏差电压,然后将其偏差电压叠加到调制波上产生新的调制信号。该补偿方法时间上存在滞后性,每次比较的结果要在下一个开关周期才能得到校正,同时还要求对输出电压进行高精度检测。而后者是通过检测三相输出电流的极性来确定补偿电压,但该方法很难克服对电流过零点的检测所带来的误差,尤其在低频输出情况下。如果我们从电动机的角度出发,即如何使电动机获得一个理想的圆磁场。把输出电流矢量和偏差电压矢量转化为同步旋转坐标系下进行补偿,克服了滞后性问题,但这在硬件和软件的实现方面增加了难度。当然还可以从抑制谐波的角度出发,尤其是针对低频时谐波分量相对比较高的特点,计算出特定的 PWM 波,对所选用的功率器件作相应补偿。还有的文献中提出的通过对输入电流过零点的检测形

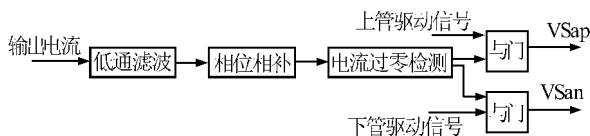


图 3 无死区控制原理图

成功率管的封锁脉冲可实现无死区控制, 考虑到实际电流过零点的模糊性和干扰的存在, 并在电流采样中增加低通滤波器, 通过相位补偿电路对低通滤波器引起的滞后进行补偿, 其原理图如图 3 所示。该方案的可行性已由其提出者通过实验验证。

IPM 的保护

IPM 内部的 IGBT 分为上、下桥臂, 分别有不同的保护功能。上桥臂一般包括短路保护、过流保护和欠压保护; 下桥臂除以上三种保护外还含有过热保护。若有任一故障出现时, IPM 内部电路会自动封锁驱动信号并向外送出一个故障信号, 以便外部的控制器及时处理现场。各种保护功能具体如下:

欠压保护 IPM 内部控制电路由外接的直流电源供电, 当此电源电压下降到指定的阈值以下且超过一定的时间时将发生欠压保护, 此时封锁门极驱动信号同时产生故障信号输出。另外要注意在控制电源上电和掉电期间, 欠压保护电路都起作用, 这点在编程时不可忽视。

过温保护 靠近 IGBT 芯片的绝缘基板上安装了一个温度传感器, 当温度传感器测出其基板的温度超过设定的阈值时将发生过温保护, IPM 内部的保护电路将关断门极驱动信号同时输出故障信号。

过流保护 由内置的电流传感器检测各桥臂电流, 若通过的电流超过一定阈值且持续时间超过一定额定时间则发生过流保护, IGBT 将会被软关断并向外输出故障信号。该保护是很重要的保护, 尤其在变频器中, 其对调速系统的可靠性起决定作用; 为了尽量缩短过流保护的电流检测和故障动作间的响应时间, IPM 内部应采用实时电流控制电路, 使其有效地抑制电流和功率峰值以便提高保护效果。在此指出: 为避免发生过大的 di/dt , 建议 IPM 采用两级关断模式即软关断模式。

短路保护 若负载发生短路或系统控制器发生故障, 使得上下桥臂同时导通, 则立刻发生短路保护, 封锁门极驱动电路, 输出故障信号。跟过流保护一样, 为避免发生过大的 di/dt , IPM 也应采用两级关断模式。

由上可见, 在故障输出信号持续的短时间内, IPM 会自动封锁门极驱动信号并关断 IPM。当故障输出信号持续时间结束后, IPM 内部会自动复位, 门极驱动通道开放。但器件自身产生的故障信号是非保持性的, 如果故障输出信号持续时间结束

后故障源仍未排除, IPM 就会重复自动保护的过流、短路、过热保护动作都是非常恶劣的运行状况, 应避免其反复动作, 因此仅靠 IPM 内部保护电路还不能完全实现器件的自我保护。要使系统真正安全、可靠运行, 还需要辅助的外围保护电路。这方面既可以通过软件的方式也可通过硬件的方式来实现, 软件保护不需增加硬件, 简便易行, 但可能受到软件设计和计算机故障的影响; 硬件保护则反应迅速, 工作可靠。在实际应用中最好采用软件与硬件相结合的保护方式来提高系统的可靠性。

IPM 使用中的注意事项

尽管 IPM 自身有着比较完善的保护措施, 但在使用中我们还要注意以下几个方面:

- 避免因静电而击穿, 确保模块在使用前要一直用石墨织物等将其控制端子短路, 不要用手直接接触端子, 焊接过程中烙铁头要接地、设备、工作台面和人都应接地。

- 由于 IPM 通常工作在信号控制的高频开关状态, 且电流较大温度上升较快。即使有过温保护功能, 但急剧的温升仍然对 IGBT 构成威胁, 因此对散热器的设计要求较高。另外在散热器与模块之间的接触面还要加上 100~ 200 μm 的导热硅脂, 以降低接触面的热阻同时也可以避免接触表面被腐蚀。

- 在内置制动单元的 IPM 中, 当不使用制动时应将 DB 输入端子用 20K Ω 上拉电阻连于 V_{cc} 。否则, du/dt 可能引起误动作。而对于 6 封装(即无制动单元)类型, 应将 B 端子接到 N 或 P 电位上以避免在悬空状态下使用。

- 上桥臂侧仅有保护动作而无报警输出, 只有当下桥臂侧出现异常时才输出故障信号。

- 四组控制电源与主电源间必须加以绝缘。而且, 随着 IGBT 的开关动作, 该绝缘部位将有很大的 du/dt 作用, 因此还要确保足够的距离。上电时应先接通控制电源, 然后再加主电源; 如果先加主电源, 则可能在保护电路还没动作时 IPM 已损坏。

综上所述, IPM 以其良好的性能除了在工业变频器中被大量采用之外, 经济型的 IPM 在近年内也开始在一些民用品中得到应用。如厦门宏发电声有限公司生产的 HF5418 双列直插式智能功率模块 (DIP IPM) 非常适用于小型化的家电——空调器、电冰箱、洗衣机等, 它是一种集成度更高、内置功能

如何目测估算牛顿环装置所用透镜的曲率半径

璜

怎样将理论教学与实验教学紧密结合起来, 加强学生对于理论知识的综合理解和整合应用是物理教学工作一直勤于探讨的问题。

笔者通过教学实践, 将光学中的等厚干涉与光学仪器的分辨率结合起来, 提出一种通过目测来估算牛顿环装置中所用平凸透镜的曲率半径数量级的简单而有趣的方法, 并以此作为思考题, 在讲授实验原理的教学过程中以启发的方式向学生剖析, 得到了学生的肯定。

一、牛顿环实验现象及估算透镜

曲率半径的基本思路

牛顿环是典型的等厚干涉现象, 一般工科院校均会开设这一普通物理实验。在平整的光学玻璃板上放置一曲率半径较大的(通常采用 1m 数量级)平凸透镜(如图 1), 两者之间将形成一空气隙, 则在两者接触点 O' 附近可以看到一系列同心的明暗交替的干涉环纹, 不同的环纹对应于不同的空气隙厚度, 且最近邻的两条暗纹(或明纹)下方的空气隙的厚度在光源垂直入射的情况下相差 $\lambda/2$ (λ 为观察牛顿环所用单色光在空气中波长)。放大后, 如图 2 所示。干涉环纹自圆心所在的接触点向外, 随半径及

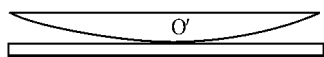


图 1 牛顿环装置

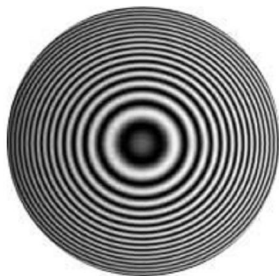


图 2 干涉环纹

其所对应的气隙厚度逐渐增加, 环纹间距连续变小。当此间距小至某一极限以下, 则用肉眼观察环纹将连成一片, 从而不可分辨。

通常这一实验装置中所用的平凸透镜的曲率半径是在具有固定光频的单色或近单色光源垂直照射下, 配合移测显微镜测量具有固定级别差的两条干涉纹的直径而获得的。然而如果我们可以估测到牛顿环纹的目测可见范围对透镜曲率中心所张的最大空间角度, 即可由此估得透镜的曲率半径。如图 3, O 为透镜的曲率中心, \overline{AB} 为目视可见最大干涉纹直径, α 为其对曲率中心所张的角度, 则曲率半径可近似为

$$\rho = \overline{AB} / \alpha, \quad (1)$$

其中 \overline{AB} 可作为一次性目测后的已得结果, 关键是 α 如何求出。

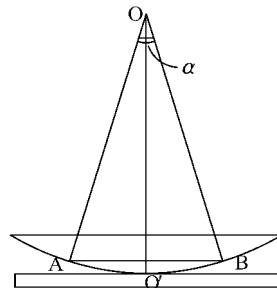


图 3

虽然牛顿环的理论教学过程中看似没有可资直接导出 α 的相关内容, 但在劈尖状空气膜所形成的干涉纹的教学过程中却有着可以用于求解空间角度的信息, 若将其善加利用, 则可以求出 α 。

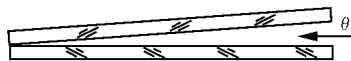


图 4

二、局域空气劈尖等厚干涉近似

将两块平板玻璃片如图 4 放置, 一端相互叠合,

更强、体积更小、更易使用的智能功率模块。其控制端子可直接兼容 5V CMOS/TTL 电平, 外部可不加光耦或隔离变压器等隔离电路, 单一控制电源 15VDC, 故障输出脉冲宽度可外部调节, 过流保护阈值也可通过外部电阻来设置。在实现系统小型

化、专用化、高性能、低成本方面又推进了一步。现在, 有些公司已经把 IPM 和整流模块封装在同一模块内, 使系统电路设计更简单、体积更小。因此, IPM 在电力电子领域有着广阔的发展前景。

(安徽合肥工业大学计算机与信息学院 230009)