

IGBT 使用可靠性研究

陈克选, 张 旺, 杜永鹏

(兰州理工大学 有色金属省部共建教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对 IGBT 使用过程中容易炸管等损坏现象, 结合实际应用, 从 IGBT 参数选择、缓冲电路和散热设计等方面就 IGBT 使用过程中的可靠性问题进行了研究, 提出了设计方案, 同时针对常用驱动模块 EXB841、M57959L 在 IGBT 保护中出现的问题, 对驱动电路做出了改进与优化。

关键词: IGBT; 可靠性; 缓冲电路; 驱动电路

中图分类号: TM461.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2007)05-0023-05

Research on reliability in using IGBT

CHEN Ke-xuan, ZHANG Wang, DU Yong-peng

(Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys, The Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In view of the IGBT explode damage phenomenon during the using process, With the actual application, This article researched the reliability during the using process, in the aspect of IGBT parameter choosing, heat radiation design and the buffer circuit design, we proposed the design scheme. Furthermore, aiming at the shortcoming which commonly appears during using driving module EXB841, M57959L, we made some improvement and optimization to the driving circuit.

Key words: IGBT; reliability; buffer circuit; driving circuit

0 前言

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)绝缘门极双极晶体管, 由于同时具有双极型功率晶体管和功率 MOSFET 的优点, 即电压控制、输入阻抗高、驱动功率小、控制电路简单、开关损耗小、通断速度快和工作频率高等优点。因而广泛应用于电焊机、UPS 不间断电源、交流电机、变频器、开关电源、照明电路、牵引传动等领域。随着 IGBT 功率的增大, 应用越来越广泛, 但是作为电力电子器件, 不仅要工作在正常状态, 有时也会工作在一些极端情况下, 例如较大的 di/dt 、 du/dt 。作为电路的重要开关管, IGBT 的工作性能直接影响到整个电路的工作性能, 因此研究 IGBT 工作过程中的可靠性就显得相当重要。

1 IGBT 电参数的选择

元器件的属性直接决定了电源的可靠性, 所以元器件的选用非常重要。因为大多数 IGBT 模块工作

在由交流电网通过单相或三相整流而获得的直流母线电压下, 所以通用 IGBT 耐压(600 V, 1 200 V, 1 700 V)对应了常用电网的电压等级。

因此, 选型的第一步是根据电网电压 U_N (如果是可控整流桥, 则控制角为 0)或理想空载直流电压 U_d 来大致选择耐压。

然后检查在出现最大电压的情况下模块最大允许电压是否被超过, 即

(1)静态的输入电压为最大值(电网的额定电压加上波动幅度, 例如 15%)。

(2)电网的动态过电压, 该电压为未被电网的滤波器、直流母线电容或直流电压端的吸收电路所吸收的电压。

(3)关断过电压 $U_{off} = U$, 其中

$$U = L \cdot I_{max} / t_f, \quad (1)$$

式中 L 为换流回路的寄生电感; I_{max} 为最大可能的集电极或漏极关断电流; t_f 为集电极或栅极电流的下降时间。

在实际应用过程中, 如果负载的阻抗变化很大, 回路中电压、电流很大, 且其波动很剧烈, 在选取 IGBT 时, 其耐压和额定电流要能够满足要求。

收稿日期: 2007-04-22

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(ZS032-B25-001)

作者简介: 陈克选(1962—), 男, 山西临猗人, 教授, 主要从事焊接设备及控制方面的教学与科研工作。

耐压方面: 必须能够承受电源的最大空载电压, 同时要考虑电网电压瞬态尖峰、电压波动、开关电流引起的电压尖峰等方面的影响, 并具有一定的裕量, 因此选用 IGBT 的耐压值应该约为稳态时加在其两端电压峰值的两倍以上。

额定电流: 必须能够承受电源的最大额定电流, 同时 IGBT 的集电极峰值电流必须处在 IGBT 开关安全工作区以内, 以及能够承受一定程度的过载, 因此选用 IGBT 的额定电流值也应该约为最大电流值的 1.5 倍。

2 IGBT 栅极驱动设计

IGBT 的栅极通过一层氧化膜与射极实现电气隔离。由于此氧化层很薄, 其击穿电压一般只能达到 20~30 V, 因此, 栅极击穿是 IGBT 失效的常见原因之一。

IGBT 的驱动电路是 IGBT 与控制电路之间的接口, 它对 IGBT 的正常运行具有非常重要的影响。采用一套性能良好的驱动电路, 可缩短开关时间, 减小开关损耗, 使 IGBT 工作在较理想的开关状态下, 同时对电源的运行效率、可靠性和安全性都有重要的意义。另外, 一套性能良好的驱动电路由于本身具有多种保护措施, 可以防止在运行中的一些意外冲击对 IGBT 造成损坏, 因此驱动电路的选择和设计显得尤为重要。

2.1 栅极正偏压和反偏压设计

栅极正偏电压 $+U_{GE}$ 增加, 则 IGBT 的开关损耗和 U_{CE} 将减小, 但是集电极电流 I_c 随 $+U_{GE}$ 的增加而增加, 这将使 IGBT 承受短路损坏的脉宽变窄, 所以应该选择合适的正偏电压 $+U_{GE}$ 。

栅射极施加反向偏压有利于 IGBT 快速关断, 但反偏压 $-U_{GE}$ 受 IGBT 栅射极之间反向最大耐压的限制, 过大的反向电压会造成 IGBT 栅射极的反向击穿, 所以 $-U_{GE}$ 应取合适的值, 一般为 $-2 \sim -15 V$ 。

同时, 为了避免栅极被击穿, 一般在栅-射极间加稳压管。

2.2 栅极电阻 R_g 的选择

由于 IGBT 的开通延迟时间 t_d 的长短取决于栅路时间常数 $\tau = R_g C_{ies}$, 因此 τ 越低, 栅路充电速度越高, 到达开通电压时间也越短; 集电极电流在导通过程中的上升速度与 τ 有关, 当 R_g 较小时, 上升时间 t_r 便较短, 相应的开通能耗也较小。 R_g 的选择需要折中, 从减少关断损耗角度出发应该尽可能减低

R_g , 但过低的 R_g 却使关断过电压加剧, 因此应该在开关损耗允许的情况下采用大的 R_g 值^[1]。

2.3 EXB840/1 驱动电路

EXB840/1 厚膜驱动电路采用单电源 (+20 V) 供电, 可产生 +15 V/-5 V 的正负偏压, 具有过电流检测和软关断等主要功能, 其外围电路比较简单, 最适合于驱动 300 A/1 200 V、400 A/600 V 以下的 IGBT。但是 EXB840/1 存在约 3 μs 的保护盲区, 且无过电流保护自锁功能, 负偏压不足 (-4.5 V), 软关断保护可靠性差。

因此, 在对 EXB841 使用时需要做一定的改进, 如图 1 所示。将其内部的 5 V 稳压管抛开, 在外部接 8 V 稳压管, 同时为了保证 +15 V 的正偏压, 将其 20 V 单电源提高到 23 V, 这样就将其内部 -5 V 的负偏压提高到 -8 V。这样不仅将过电流检测门槛电压由原来的 7.5 V 降低到 4.5 V 左右, 同时还缩短了其保护盲区的时间。另外将负偏压提高还提高了 IGBT 的关断能力, 弥补了 EXB841 偏压不足的缺陷。

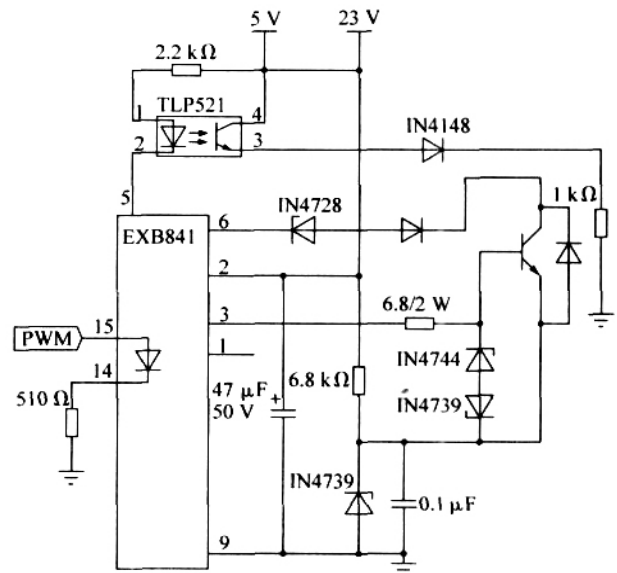


图 1 EXB841 改进电路

Fig.1 Improvement EXB841 module circuit

2.4 M57959L 驱动电路

M57959L/M57962L 厚膜驱动电路采用双电源 (+15 V, -10 V) 供电, 输出负偏压为 -10 V, 具有“封闭性软关断”功能, 输入输出电平与 TTL 电平兼容, 配有短路/过载保护和封闭性短路保护功能, 同时具有延时保护特性。分别适合于驱动 1 200 V/100 A、600 V/200 A 和 1 200 V/400 A、600 V/600 A 及其以

下的 IGBT。M57959L/M57962L 在驱动中小功率的 IGBT 时, 驱动效果和各项性能表现优良, 但当其工作在高频下时, 其脉冲前后沿变得较差, 即信号的最大传输宽度受到限制。且厚膜内部采用印刷电路板设计, 散热不是很好, 容易因过热造成内部器件的烧毁。

3 IGBT 过电压保护与吸收电路设计

限制主电路端子间过电压的方法可以分为无源缓冲网络、有源箝位和动态栅极控制、限制主电路中的电压尖峰。

3.1 无源缓冲网络

无源网络(缓冲吸收网络)由 R、L、C、抑制二极管、二极管、压敏电阻等无源元件构成, 如图 2 所示。

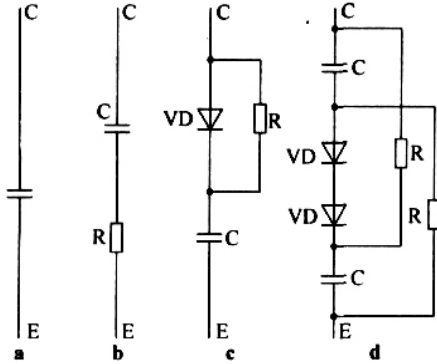


图 2 吸收缓冲电路
Fig.2 Absorption circuit

无源缓冲网络的原理是附加一个电容用来吸收储存于回路电感 L 中的能量 $E=L/2 \cdot i^2$, 从而避免电感 L 所感应的危险过电压。此时电容将被充电, 形成电压差 $U^2 = L \cdot i^2/C$ 并限定了过电压的数值。所吸收的能量必须在两个充电过程之间重新释放, 以维持缓冲网络的继续运行。对于简单的缓冲网络, 这一任务可以通过缓冲电阻的热量转换或回馈至直流母线电容来完成。

图 2a 为最简单的缓冲电路, 利用一个电容(薄膜电容或类似元件)将直流母线电压箝位于功率模块端子。此种情况下的电容值约为 0.1~0.2 μF 。缺点是 IGBT 开通时有浪涌电流冲击, 易出现擎住效应使得电路失控。

为了吸收 C 和 L 之间的寄生振荡, 电压箝位可以通过一个 RC 网络来完成(见图 2b)。这一方法适用于低电压与大电流的场合, 可以用来防止模块端子处直流母线电压极性的寄生变化, 但是对于频率较

高的开关电路不利。

图 2c 和图 2d 是 RCD 网络。此处快速吸收二极管应该具有低的正向开通过电压和软的反向恢复特性。此外, 为了减小回路电感, RCD 网络一般选用无感电阻、无感电容, 并联压敏电阻, 把它们焊接在电路板上, 直接安装在主回路铜板上, 并紧靠模块。

IGBT 在设计缓冲电路时应该注意缓冲电路参数的选择, 当缓冲电路的参数选择不合适时, 也很难对 IGBT 进行过电压保护。电容和电阻匹配不当时所测的 IGBT 集-射极两端电压如图 3 所示。在重复几组不同的阻容参数后获得了一组较好的阻容吸收波形, 如图 4 所示。经过多次实验可以得出, 当开关频率较高时, 对缓冲电路的要求较高。一般, 电容值选择较大, 相应的电阻值较小, 有利于吸收因开关速度较快而引起的电压尖峰。

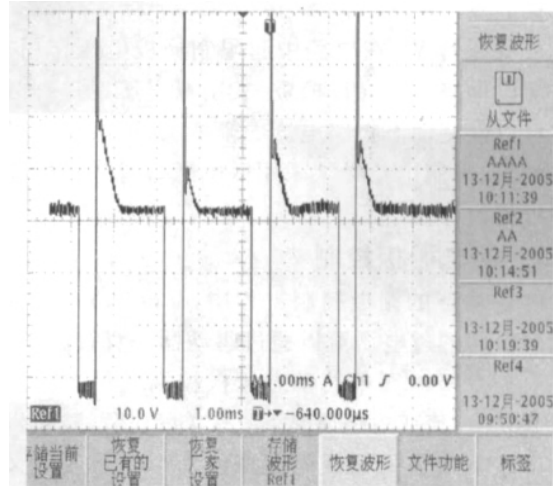


图 3 RCD 阻容参数选择不当的波形
Fig.3 Unsuitable RCD parameter Profile

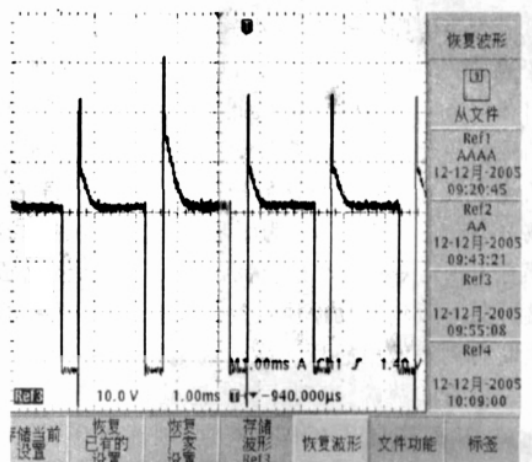


图 4 RCD 阻容参数选择较好的波形
Fig.4 Well matched RCD parameter Profile

专题讨论——焊机中电子元器件的选择与应用

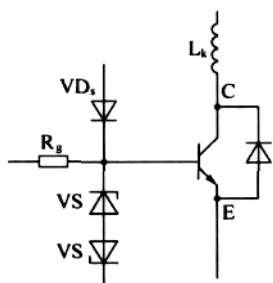


图 5 IGBT 有源箝位基本电路
Fig.5 Basic circuit of active clamp

3.2 有源箝位

有源箝位是将集电极或漏极电位通过一个稳压元件直接反馈到栅极,原理如图 5 所示。反馈支路包括一个稳压元件 VS 和一个串联二极管 VD_c , 后者可以防止在 IGBT 开通期间电流从驱动电路流向集电极。

稳压管 VS 在电路中起限制栅极电压作用,一方面以保持最大允许栅极-发射极电压,另一方面,它可以限制动态短路电流的幅度。为了保证获得最佳效果,限制电路必须采用低电感布置并尽可能地靠近栅极。

3.3 动态栅极控制

在动态的栅极控制过程中, di/dt 和 du/dt 及由此而引起的过电压可以通过驱动器来直接影响。

一个极为简单的动态栅极控制的保护方式是在 IGBT 过流或短路情况下减慢关断过程。这可以通过串接一个大的栅极电阻或注入一个预先定义了的电流来实现。

3.4 限制主电路中的尖峰电压

当 IGBT 关断时,主电路中的电流会发生急剧变化,由于主电路中存在电感,这些电感能感应出很高的开关浪涌电压,此时 IGBT 上电流、电压的运行将会超出 IGBT 的安全工作区,即电压峰值甚至会超出 IGBT 的集射极电压 U_{ces} 的允许值,造成 IGBT 的损坏。因此,为了限制主回路中的滤波电感在 IGBT 关断时产生过高的 di/dt ,在滤波电感两端并接一反向大功率快恢复二极管。而此时在 IGBT 关断时刻滤波电感所产生的高电压 $L \cdot di/dt$ 则加载在二极管的两端,直到滤波电感储存的能量全部损耗掉,从而降低了 IGBT 的关断浪涌电压,起到保护 IGBT 的作用。图 6 为滤波电感两端加快恢复二极管和不加快恢复二极管时 IGBT 的 C、E 端电压波

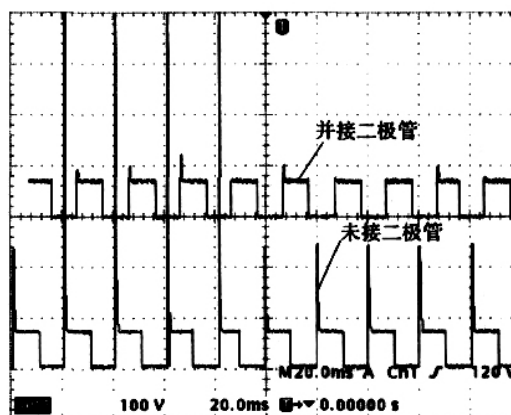


图 6 IGBT 输出波形对比
Fig.6 IGBT output wave shape contrast chart

形对比图,从图中可看出,在并接快恢复二极管后,IGBT 的关断浪涌电压有明显下降。

4 过电流保护与过电流检测设计

在试验中发现 IGBT 的损坏主要是由于过电流引起的。当流过 IGBT 的电流过大时,会产生不可控的擎住效应,导致器件损坏。

对 IGBT 的过电流保护采用集电极电压识别方法。在正常工作时,IGBT 的通态饱和电压降 U_{on} 与漏极电流 I_D 呈近似线性变化的关系,识别 U_{on} 的大小即可判断 IGBT 集电极电流的大小。当 IGBT 集电极过电流或负载短路时,由其输出特性可知,其饱和压降会显著上升。通过检测 IGBT 的导通压降就可判定 IGBT 是否过电流和短路。如果过电流,首先削弱驱动约 $8 \sim 10 \mu s$,使集电极电流变化率 di/dt 不至于太高,以避免产生过高的浪涌电压而使 IGBT 关断失败而损坏。集电极电流降下来后,栅极再加反向驱动电压,关断 IGBT。在具体应用中还需注意以下两点。

(1)识别时间。从识别出过电流信号至切断栅极信号的这段时间必须小于 IGBT 允许短路过电流的时间。

(2)保护时的关断速度问题。由于 IGBT 过电流时电流幅值很大,加之 IGBT 关断速度很快,如果按正常的关断速度,就会造成 $L \cdot di/dt$ 过大,从而形成很大的尖峰电压,极易损坏 IGBT。因此让 IGBT 在允许的短路时间内进行“软关断”。

5 IGBT 的散热设计

在电力电子应用中,IGBT 主要

2.5 控制效益的优选和触发指令的确定

2.5.1 控制效益的优选

设当前即将开始第 m 次点焊的第 n 个半周。

(1)在此如果满足 $|E(m, n-1)| < |E(1, n-1)|$ 和 $|E(m, n-1)| < |E(1, n)|$ 则按式(9)确定所采纳的控制效益 $E(m, n)$

$$E(m, n) = E_p(m, n). \tag{9}$$

(2)如 $|E(1, n)| < |E(1, n-1)| < |E(m, n-1)|$, 则按式(10)确定所采纳的控制效益 $E(m, n)$

$$E(m, n) = E_r(1, n). \tag{10}$$

(3)在其他情形下, 则按式(11)确定所采纳的控制效益 $E(m, n)$

$$E(m, n) = \frac{1}{2} [E_p(m, n) + E_r(1, n)]. \tag{11}$$

2.5.2 触发指令的确定

已知第 m 次点焊中第 n 个半周的电流给定值为 $I_g(m, n)$, 所采纳的控制效益为 $E(m, n)$, 则按式(12)确定触发指令 $I_i(m, n)$

$$I_i(m, n) = \frac{I_g(m, n)}{E(m, n)}. \tag{12}$$

Page 26

工作在开关状态, 并周期性地经历各种静态和动态的状态。而在这每一个状态中, 都会产生一部分功率损耗或能量损耗, 这些功率损耗使器件发热。因此, IGBT 在应用时不得超过最大允许结温 (一般来说应该低于 150)。

功率模块的通态损耗、开关损耗、截止损耗等所产生的温升需由散热器来降低。散热器的作用是增加功率模块的传热和辐射面积、扩张热流以及缓冲传热过渡过程。

基于 IGBT 模块的绝缘性能, 一个系统的所有模块都可安装在一整块散热器上。散热器同时还可当作外壳、底座等结构部件。散热器的散热过程为: 通过直接传导或借助于传热介质将热量传递到冷却介质。传热介质可以是空气、水或者绝缘油, 通过其自身的重力或通过风扇以及泵来实现循环过程。冷却方式可以选择自然冷却或者强制对流方式。

散热器材料应该具有尽可能好的导热系数。金属铝(纯铝 $\lambda=247 \text{ W/K}\cdot\text{m}$)通常是优先被采用的材料。在要求特别高的场合有时也可以采用铜($\lambda=398 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ 。

热量的扩散对散热器的散热效率有着可观的影响。因此, 对散热器根部厚度的优化、翼片数目、翼片高度以及翼片厚度之间比例的合适选取对于

根据 $I_i(m, n)$ 可确定相应的触发控制角。

3 结论

针对采用晶闸管进行通电控制的电阻点焊电源这一具体应用场合, 提出了控制效益这一概念, 阐述了一种预测可能控制效益的方案, 提出了对同一参数下已进行的各次点焊过程的所有半周的控制效益进行优选的方案和确定各半周实际采纳的控制效益与触发指令的决策方案。

所提出的预测-优选控制策略综合利用了已进行的各次点焊过程负载动态变化信息及本次已通电各半周的负载动态变化信息, 具有对负载变化适应能力强、控制精度高、控制调节时间短、鲁棒性好的优点。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊手册(第1卷)——焊接方法及设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [2] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

IGBT 得到可靠使用显得相当重要。

(1)散热器的根部是用于安装 IGBT 模块的、不含分岔的平面区域。

(2)对于空冷散热器来说, 热量是通过翼片以辐射和传导的方式传递到周边环境的。对于水冷散热器, 热量是由循环水通道来实现的。

在数字化控制电路中, 为更可靠地保护 IGBT, 还可利用温度传感器检测 IGBT 的壳温, 当超过允许温度时, 单片机报警且封闭 IGBT 的输出实现器件保护。

6 结论

IGBT 作为功率电源的主要电力电子器件, 其工作的可靠性决定了整个电源系统的可靠性, 只有正确选择参数, 设计合适的过电压保护电路、过电流检测电路以及适当的驱动电路, 才能够保证 IGBT 运行可靠。

参考文献:

- [1] 林渭勋. 现代电力电子电路[M]. 浙江: 浙江大学出版社, [时间不详].
- [2] 陈克选, 祖立国, 李春旭, 等. 微弧氧化电源 IGBT 驱动和保护研究[J]. 电焊机, 2006, 36(10): 40-44.
- [3] 王可恕. IGBT 的栅极驱动[J]. 国外电子元器件, 1996(5): 34-38.