

IGBT 过流保护电路设计

张海亮, 陈国定*, 夏德印

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 为解决绝缘栅双极性晶体管(IGBT)在实际应用中经常出现的过流击穿问题,在分析了IGBT过流特性和过流检测方法的基础上,根据过流时IGBT集电极电流的大小分别设计了过载保护电路和短路保护电路。过载保护电路在检测到过载时立即关断IGBT,根据不同的过载保护要求可实现持续封锁、固定时间封锁及单周期封锁IGBT的驱动信号;短路保护电路通过检测IGBT通态压降判别短路故障,利用降栅压、软关断和降频综合保护技术降低短路电流并安全关断IGBT。详细阐述了保护电路的保护机制及电路原理,最后对设计的所有保护电路进行了对应的过流保护测试,给出了测试波形图。试验结果表明,IGBT保护电路能及时进行过流检测并准确动作,IGBT在不同的过流情况下都得到了可靠保护。

关键词: 绝缘栅双极性晶体管;过流保护;降栅压;软关断

中图分类号: TN386.2; TM13

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)08-966-05

Design of IGBT over-current protection circuit

ZHANG Hai-liang, CHEN Guo-ding, XIA De-yin

(School of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to solve the over-current breakdown problem of insulated gate bipolar transistor(IGBT) in practical applications, short-circuit protection circuit and overload protection circuits were proposed according to the IGBT's collector current, after the analysis of IGBT's characteristics and over-current measures. When overload protection circuits detected over-current, it switched off IGBT immediately, IGBT's drive signal can be blocked continuously, for fixed time or for a single cycle based on different overload protection requirements; short-circuit protection circuit detected the over-current by measuring IGBT's on-state voltage drop, using dropping the grid voltage, soft switch-off and reducing IGBT's working frequency the circuit can decrease short-circuit current and switch off IGBT safely. Detailed elaboration of circuits' operating mechanism was given. The over-current testing of the all designed protection circuits was done. The waveform graphs were obtained. The experimental results indicate that protection circuits can detect over-current in time and response accurately, IGBT is protected reliably under different over-current conditions.

Key words: insulated gate bipolar transistor(IGBT); over-current protection; drop grid voltage; soft switch off

0 引言

IGBT既具有功率MOSFET的高速开关及电压驱动特性,又具有巨型晶体管(GTR)的低饱和电压特性及易实现较大电流的能力,广泛应用于电机调速、UPS、开关电源等领域。

在IGBT的应用中,过流保护是其中的一项关键技术。过流保护电路不仅关系到IGBT本身的工作性能和运行安全,也影响到整个系统的性能及安全。可

以说,过流保护电路的设计水平在很大程度上决定了系统整体设计的成败。

本研究针对IGBT不同的应用场合及多种过流情况分别设计过流保护电路,并对保护电路进行测试。

1 IGBT 过流保护电路设计要点

IGBT常见的损坏原因有:过热、栅极过压、 U_{EC} (IGBT集电极-发射极电压)或 dU_{EC}/dt 超限、过流等^[1-3]。考虑到IGBT高压大电流的应用场合,过流损坏的出

收稿日期:2012-02-16

作者简介:张海亮(1987-),男,浙江余姚人,主要从事电力电子与智能电源方面的研究。E-mail:ziv051035@163.com

通信联系人:陈国定,男,教授,博士。E-mail:gdchen@zjut.edu.cn

现频率最高,相应的过流保护电路也最为复杂。

1.1 IGBT 的特性

1.1.1 IGBT的过流特性

IGBT能承受很短时间的短路电流,且较低的栅极驱动电压能降低短路电流并延长器件的短路承受时间^[4]。过流保护电路必须在这段时间内完成过流检测并减小或截断IGBT的集电极电流。

1.1.2 IGBT的锁定效应

IGBT为4层结构,体内存在一个寄生晶体管,当流过IGBT的电流过大或 dU_{EC}/dt 过高将导致寄生晶体管开通,使栅极失去对集电极电流的控制作用,即产生所谓的锁定效应^[5]。过流保护电路的设计须避免IGBT产生锁定效应。

1.1.3 栅极电阻对驱动波形的影响

IGBT的MOS沟道受栅极驱动电压的直接控制,而MOSFET部分直接影响IGBT的通断特性。栅极驱动电路的阻抗包括栅极驱动电路的内阻抗和栅极串联电阻两部分,影响着驱动波形的上升、下降速率。所以栅极电阻影响IGBT的开关时间、电压电流的变化率^[6-7]。

1.2 IGBT 过流检测

1.2.1 检测集电极电流

本研究用电阻或电流互感器初级与IGBT串联直接检测IGBT集电极电流,当发生过流时封锁驱动信号。

1.2.2 检测负载电流

当负载短路或负载电流超出额定值时,也可能使前级的IGBT集电极电流增大,导致IGBT损坏。当本研究在负载处检测到过流发生时控制IGBT关断,达到保护IGBT的目的,是一种间接的检测方法。

1.2.3 检测 U_{CE} 电压

U_{CE} 在数值上等于集电极电流与器件通态阻抗的乘积,因此一旦IGBT过流, U_{CE} 会随着集电极电流的增大而增大^[8]。根据这一特性,研究者可以通过检测 U_{CE} 来判断IGBT是否过流。

另外,通过这种检测方式可以检测 IGBT 是否退饱和。当 IGBT 的栅极电压过低时,IGBT 会退出饱和区而进入放大区,使器件的开关损耗急剧增大而导致热损坏。IGBT 的退饱和会引起 U_{CE} 的上升,检测电路将其判定为过流而关断 IGBT,避免退饱和和以至损坏 IGBT。

2 IGBT 过流保护电路设计

IGBT 的过流保护电路可以分为两类:低倍数(1.2~2 倍)的过载保护和高倍数(8~10 倍)的短路保

护。过载可分为持续性的输出过载和IGBT开通时的短暂尖峰电流过载。

为方便叙述电路的工作原理,本研究中所有电路均默认控制信号、驱动信号低电平开通IGBT,过流信号低电平有效,封锁信号高电平有效。

2.1 输出过载保护电路设计

对于输出过载,保护电路不必有很高的响应速度,并且可采用集中式的保护策略,过流时封锁所有IGBT的驱动信号直至控制电路给出复位信号。

本研究采用的输出过载保护电路如图1所示。当过流时比较器的输出由高电平转变为低电平,与非门输出高电平使 Q_3 开通,过流信号变为低电平并自锁。过流信号可以反馈给控制电路封锁驱动信号。当手动按下S1或控制电路给出复位信号都会使 Q_2 导通, Q_3 重新截止,过流信号恢复高电平。此时,只要过流故障消除,驱动信号就能恢复对IGBT的控制。

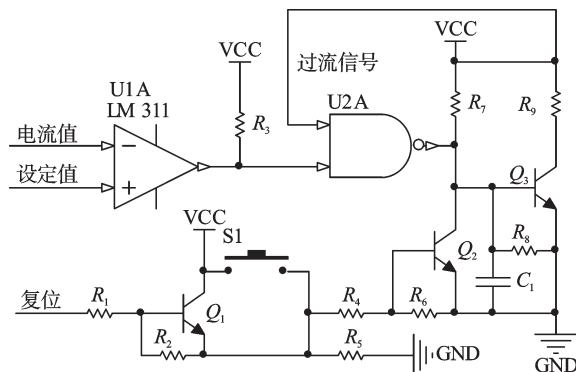


图1 输出过载保护电路

2.2 尖峰电流保护电路设计

当IGBT开通时可能因电路结构(如IGBT后级存在大容量电容)而产生尖峰电流,并且出现的频率接近IGBT的工作频率。针对尖峰电流的保护电路可以分为:时间封锁电路和脉冲封锁电路。前者对驱动信号的封锁只持续固定的时长,在保证IGBT完全关断后,如果开通信号依然存在则会再次开通IGBT;后者在下一个开通信号到来前对驱动信号保持封锁。

时间封锁电路的原理图如图2所示。当尖峰电流超过阈值时,比较器输出翻转, Q_1 导通, C_1 完成充电,

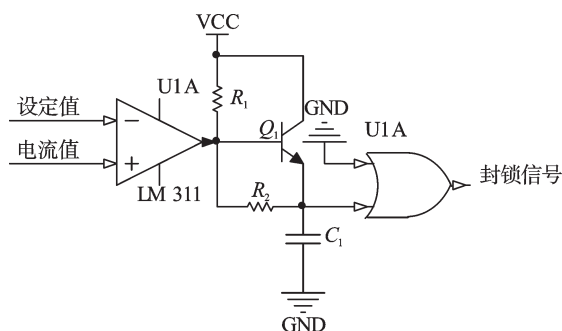


图2 尖峰电流保护电路一时间封锁

封锁信号变成高电平。IGBT关断后,电流值下降,比较器输出恢复正常时的低电平, Q_1 截止, C_1 通过 R_2 及比较器放电,在 C_1 电压下降到或门的输入低电平阈值电压(约0.7 V)之前,封锁信号将维持在高电平。通过调节 C_1 的放电时间就能控制封锁信号的持续时间。

脉冲封锁电路如图3所示。当尖峰电流超出设定值时比较器输出变为低电平(若系统正常,驱动信号此时应为低电平), Q_3 导通, C_1 放电, Q_1 截止,封锁信号变为高电平。 Q_1 保持截止状态直到驱动信号变为高电平使 Q_2 导通对 C_1 充电, Q_1 导通,封锁信号变为低电平,下一次的开通将不受影响。使用或门是为了避免 Q_2 、 Q_3 同时导通。

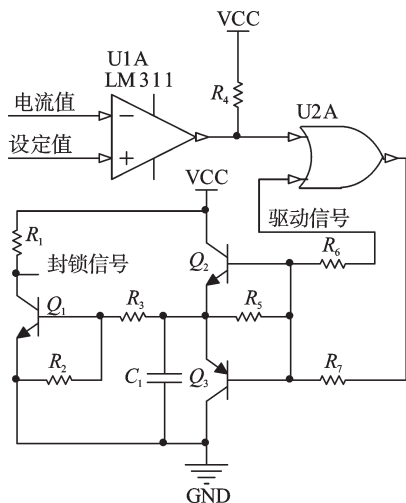


图3 尖峰电流保护电路—脉冲封锁

2.3 短路保护电路设计

低倍数的过载发生时可通过直接关断IGBT来达到保护的目的,但是在短路电流出现时,为避免IGBT

关断时产生较大的 di/dt 引起过电压和锁定效应损坏,通常采用降栅压和软关断综合保护技术;当检测到短路时立即降低栅压以降低短路电流峰值并提高IGBT的短路承受能力,在栅压降低后延时一段时间以判别短路故障的真实性,如果短路依然存在则对IGBT实施软关断并启动降频保护,如果故障消失则恢复正常的栅压^[9-10]。这样,短路电流的幅值和 di/dt 都能受到限制,IGBT的集电极电流和 U_{CE} 都运行于安全范围之内,使IGBT不至于因有限次的保护而损坏,并且具有一定的抗干扰能力。

本研究依照上述原理设计的短路保护电路如图4所示。该电路通过检测 U_{CE} 识别短路故障,并在短路发生时通过降栅压、降频、软关断保护IGBT。

正常工作时,故障检测二极管 D_1 导通,将a点的电压钳位在稳压二极管 $ZD1$ 的击穿电压以下, Q_1 保持截止状态,光耦U1截止,过流信号为高电平, Q_4 导通, C_3 保持在高电平,反相器输出低电平, Q_9 导通, C_5 完全放电,即过流信号、软关断控制、降频控制都不对控制信号进行封锁,控制信号即驱动信号。电容 C_1 为电路正常时硬开关提供短暂的延时,使得 Q_3 开通时 U_{CE} 有一定的时间从关断时的高压下降至通态压降,而不使保护电路动作。

当发生过流故障时, Q_3 的 U_{CE} 上升,a点电位随之上升,到一定值时, $ZD1$ 击穿, Q_1 导通,过流信号随着光耦U1导通变为低电平。并且 Q_1 导通后+15 V通过 R_4 对 C_2 充电,b点电位下降。当b点电压下降约1.4 V时, Q_2 导通,栅极电压随 C_2 的充电开始下降。通过调节 C_2 和 R_4 的值可以控制电容的充电速度,进而控制发生过流

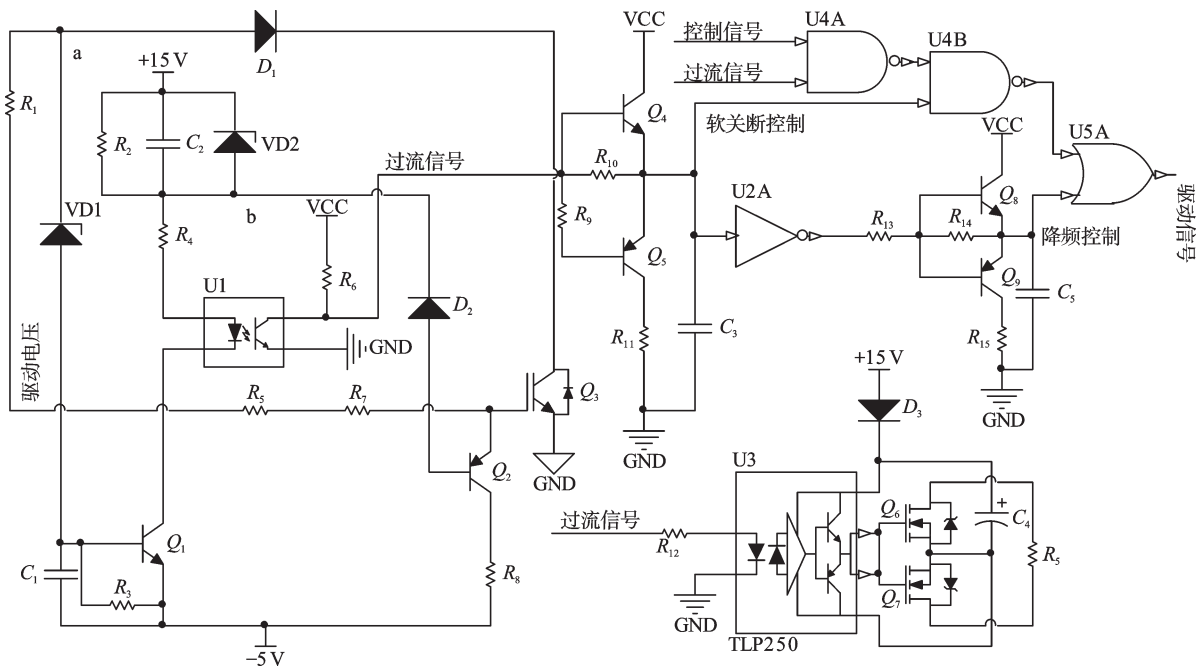


图4 降栅压、降频、软关断短路保护电路

至降栅压的延时及栅极电压的下降速率。当电容充电至ZD2的击穿电压时,ZD2击穿,b点电位不再下降,栅极电压也被钳位在一固定值上,降栅压过程结束。

当电路启动降栅压保护后,过流信号通过U4A与非门封锁控制信号,以避免控制信号在过流故障时对IGBT进行硬关断,保证保护电路能执行一个完整的慢降栅压、软关断的过流保护程序。

同时过流信号变成低电平后 Q_5 开通, C_3 通过 R_{10} 放电,当电压下降至0.7 V时,U4B与非门输出翻转为高电平,驱动信号也立即翻转为高电平进行软关断。 C_3 从VCC放电至0.7 V的这段时间内如果过流故障消除,则a点电位下降, Q_1 恢复截止, C_2 通过 R_2 放电,b点电位上升, Q_2 恢复截止,栅极电压恢复为15 V,过流信号变为高电平, C_3 立刻充电至VCC,电路恢复正常工作,完成真假过流的甄别。通过调节 C_3 和 R_{10} 的值可以调节延时的长短。

该电路采用改变关断时栅极电阻的方法来实现过流时的软关断。当过流信号变为低电平, Q_6 、 Q_7 截止, R_5 串入栅极驱动回路中,当 C_3 放电结束驱动信号变为高电平关断IGBT时,因 R_5 的存在,驱动电压的下降速率变慢,实现了IGBT的软关断。正常情况下通过TL2P250和 C_4 驱动 Q_6 、 Q_7 将 R_5 短路。

电路启动软关断的同时U3A反相器输出高电平, Q_8 导通对 C_5 充电, C_5 上的电压使驱动信号保持为高电平。过流消除后, Q_9 开通, C_5 通过 R_{13} 放电至0.7 V后,控制信号才能恢复对IGBT的控制作用。本研究通过选取 C_5 、 R_{13} 的值使 C_5 的放电周期为1 s左右,就能把IGBT的工作频率限制在1 Hz以下。只要故障消除,电路就能恢复到正常状态。

3 测试及结论

本研究依照过流保护测试电路(如图5所示)对保护电路的性能进行测试,通过 C_1 、 C_2 两个大电容之间的放电模拟短路电流,串入 L_1 模拟尖峰电流,通过调节输入电压可以控制短路电流持续时间和尖峰电流幅值。

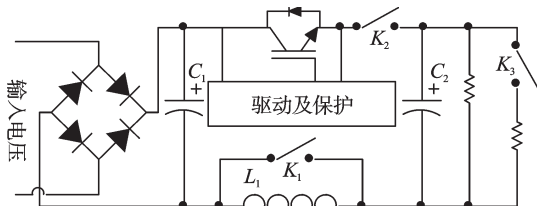


图5 过流保护测试电路

3.1 输出过载保护电路测试

本研究闭合 K_1 、 K_2 ,电流采样点设在输出负载上,以一定的占空比驱动IGBT,闭合 K_3 ,使输出电流超出设定值。测试波形如图6所示。

3.2 尖峰电流保护电路测试

本研究闭合 K_2 ,将IGBT的集电极电流作为保护电路的采样电流,以一定的占空比开通IGBT。闭合 K_3 ,使尖峰电流超出设定值。两种尖峰电流保护电路的测试结果如图7、图8所示。

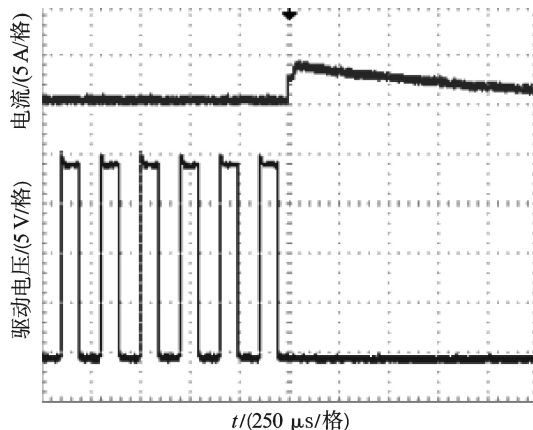


图6 过载保护测试结果

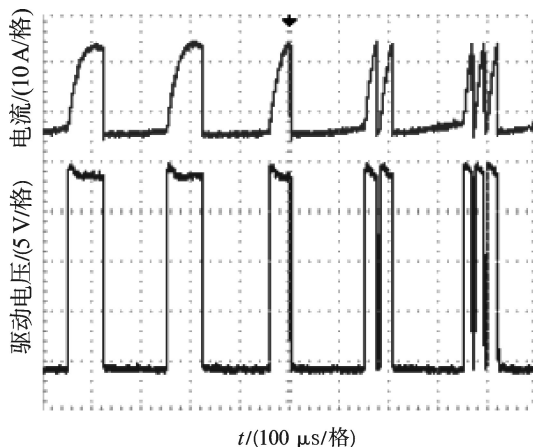


图7 尖峰电流保护-时间封锁测试结果

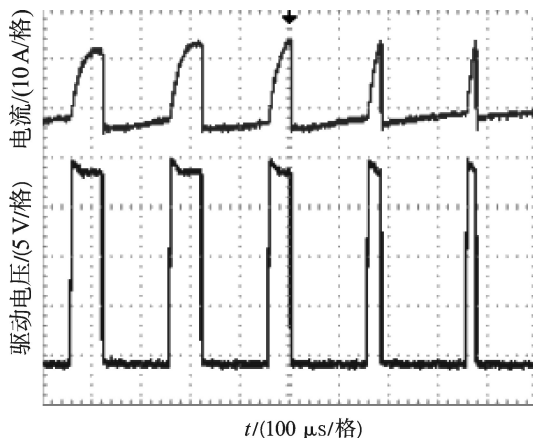


图8 尖峰电流保护-脉冲封锁测试结果

3.3 短路保护电路测试

本研究闭合 K_1 、 K_3 ,保持IGBT为导通状态。闭合 K_2 ,使IGBT通过短路电流。测试波形如图9所示。

3.4 结论

测试结果表明:本研究设计的过流保护电路在过

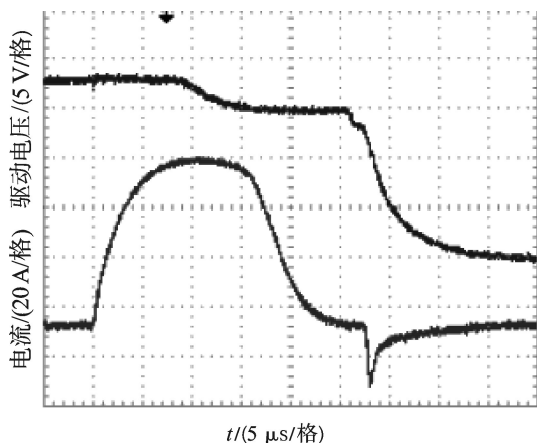


图9 短路保护测试结果

流发生时都能及时做出响应,通过采取相应的保护措施将电流限定在安全值以下,使IGBT得到可靠保护而免遭损坏。

4 结束语

根据IGBT的特性,本研究针对不同应用场合、多种过流情况设计了相应的过流保护电路,根据发生过流故障时保护电路的动作可分为:持续封锁的过载保护电路、封锁固定时长的时间封锁保护电路、封锁持续到下个开通信号的脉冲封锁保护电路以及降栅压、降频、软关断短路保护电路。

本研究以具体的电路原理图对过流保护电路的工作原理进行了详尽的分析,并通过实验对设计的所

有过流保护电路进行了测试。测试波形表明:本研究设计的过流保护电路在过流发生时都能及时作出响应,通过采取相应的保护措施将电流限定在安全值以下,使IGBT得到可靠保护而免遭损坏。

参考文献(References):

- [1] 吴耀辉,杨焦赞,魏仁灿. IGBT高频开关电源的故障分析及处理[J]. 电力电子技术,2009,43(5):61-62.
- [2] 杨岳峰,张奕黄. IGBT的瞬态保护和缓冲电路[J]. 电机电器技术,2003(3):10-11.
- [3] 杨斌文,胡浩,张建. IGBT的有关保护问题[J]. 电气开关,2006(6):7-9.
- [4] 华伟. IGBT驱动及短路保护电路M57959L研究[J]. 电力电子技术,1998,32(1):88-91.
- [5] 周志敏,周纪海,纪爱华. IGBT和IPM及其应用电路[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.
- [6] HERMWILLE M. 使用栅极电阻控制IGBT的开关[J]. 电源世界,2009,12(2):44-45.
- [7] 陈振伟,陈辉明,王正仕,等. 一种新型单电源IGBT驱动电路[J]. 机电工程,2007,24(9):33-35.
- [8] 陈义怀,胡卫华,王彦. IGBT的保护[J]. 电源技术应用,2004,7(5):282-285.
- [9] 王正仕,吴益良,向群,等. IGBT的过流保护[J]. 电力电子技术,1996,30(3):70-73.
- [10] 胡宇,吕征宇. IGBT驱动保护电路的设计与测试[J]. 机电工程,2008,25(7):58-60.

[编辑:李辉]

(上接第948页)

参考文献(References):

- [1] 吴毅杰,张志明. C/S与B/S的比较及其数据库访问技术[J]. 船舶电子工程,2003(2):32-35.
- [2] 焦圣明,包云轩,郭静,等. 基于RIA气象站信息平台的设计与实现[J]. 计算机工程,2010,36(20):217-219.
- [3] 董龙飞,肖娜. Adobe Flex大师之路[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [4] 张晓蓉. 基于RIA技术的石油企业信息化平台的构建[J]. 西安文理学院学报,2011,14(1):88-91.
- [5] 帅黎,陈铁军,李晓媛,等. 智能控制理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [6] 侯亚丽,李铁. 基于LM优化算法的BP神经网络目标识别方法[J]. 探测与控制学报,2008,30(1):53-57.
- [7] 傅勤毅,傅俭毅,王峰林. 一种无频带错位的小波包算法[J]. 振动工程学报,1999,12(3):423-428.
- [8] 马平,董彩凤. 基于D-S推理的旋转机械融合诊断[C]//2002年全国振动工程及应用学术会议论文集. 上海:上海高教电子音像出版社,2002.
- [9] 胡劲松,周方浩. 基于com的Matlab与Delphi混合编程研究[J]. 计算机应用与软件,2008,25(2):31-34.
- [10] 鲍海燕. 基于Delphi平台的数据库程序设计研究[J]. 太原科技大学学报,2011,32(4):273-276.

[编辑:李辉]