DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.02.005　　文章编号：1000-128X(2023)02-0050-09

一种具有数据采集功能的IGBT驱动器

杨乐乐，陈燕平，窦泽春，漆　宇，谢舜蒙，魏海山
（中车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：文章介绍了一种新型IGBT驱动器，该驱动器除具有传统的驱动与短路保护功能外，还具有运行状态数据采集功能。采集IGBT运行状态数据及其故障时刻数据，有助于理解IGBT工作环境，分析IGBT失效原理，为电力电子装置改进和正向设计提供理论依据。该驱动器以可编程逻辑器件FPGA为核心，集脉冲控制、驱动与保护、信号采集、串行通信功能于一体。文章详述了驱动器主要功能模块，运用数学建模、仿真和试验测试等方法验证了其功能与可靠性，为驱动技术数字化、智能化发展提供了技术储备，为IGBT模块失效分析与健康管理研究提供数据支撑。

关键词：IGBT驱动；数据采集；FPGA；数字驱动；智能驱动
中图分类号：TM46　　**文献标识码：**A

A gate driver for IGBT with data acquisition function

YANG Lele, CHEN Yanping, DOU Zechun, QI Yu, XIE Shunmeng, WE Haishan

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The paper presents a new type of gate driver for IGBT, which has the function of acquiring the operation state data in addition to traditional gate drive and short-circuit protection functions. Acquiring data of IGBT in normal operation state and at fault is conducive to understanding the working environment of IGBT, analyzing IGBT failure mechanism, and providing theoretical basis for the improvement and positive design of power electronic devices in power system. The gate driver is based on field programmable gate array, which integrates pulse control, drive and protection, signal acquisition, and serial communication functions. The main functional modules are described in detail in the paper, and the functions and reliability were verified by mathematical model simulation and experiments. The paper provides a technical reserve for the digital and intelligent development of gate drive technology, and data support for the failure analysis and health management research of IGBT modules.

Keywords: IGBT gate driver; data acquisition; FPGA; digital gate drive; smart gate drive

0　引言

绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）是电力电子变流装置的核心器件，其能否可靠稳定地工作直接影响着变流系统的性能，而驱动器作为控制系统与IGBT的桥梁，是保证功率器件安全可靠工作的关键因素。据统计，在轨道交通和工业变流器的故障类型中，IGBT和驱动器故障率占50%以上。因此，研究IGBT和驱动器的可靠性是研究大功率变流器可靠性的基础[1]。基于因果模型的可靠性分析方法，是根据电力电子器件老化失效的物理原理，分析

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFB3604104）
通信作者：杨乐乐（1985—），男，工程师，主要从事大功率变流技术方面的研究；E-mail: yangll1@csrzic.com
引用格式：杨乐乐, 陈燕平, 窦泽春, 等. 一种具有数据采集功能的IGBT驱动器[J]. 机车电传动, 2023(2): 50-58.
Citation: YANG Lele, CHEN Yanping, DOU Zechun, et al. A gate driver for IGBT with data acquisition function[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(2): 50-58.

器件失效的本质原理和因果关系，该方法虽然提供了原理层面的阐释，但在多物理场强耦合的复杂工况中的应用价值较低。基于数据模型的可靠性分析方法，建立在数据采集和分析的基础上，进行数据挖掘以及可靠性信息的提取，能够充分利用电力电子装置历史运行数据库提供的海量信息，引入机器学习、数据挖掘和人工智能等大数据科学的最新理论成果，从数据泛在关系出发开展可靠性研究，实际应用价值较高[2]。

随着电子信息技术的发展，信息化、智能化已渗透到各行业各领域，电力电子技术逐渐呈现大数据特征，IGBT运行状态数据开始被监控和分析。由于传统IGBT驱动器不具备IGBT运行状态数据采集功能，为构建IGBT应用工况数据库，本文设计了基于现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array, FPGA）具有IGBT运行状态数据采集功能的IGBT驱动器[3]。

本文首先总体介绍了IGBT数据采集驱动器的原理、设计思路，然后对IGBT开关过程、驱动电路建模计算、高压模拟采样技术、高速通信技术原理进行阐述，最后结合实物试验测试结果得出结论，并对智能IGBT驱动技术发展方向提出设想。

1　IGBT数据采集驱动器总体介绍

在电力电子装置中，IGBT驱动器是其重要组成部分，其基本功能是将控制信号进行隔离传输与功率放大，产生满足IGBT正常开关所需的门极驱动信号，同时检测IGBT故障并做出保护动作。具有数据采集功能的IGBT驱动器，基于FPGA强大的逻辑处理能力，在实现数字化驱动与保护IGBT的同时，对IGBT运行状态数据进行采集[4]。驱动器及IGBT参数如表1所示。

具有数据采集功能IGBT驱动器的功能框图如图1所示。驱动器以FPGA为控制核心，隔离变压器将驱动器分为低压侧和高压侧。其中，低压侧连接控制电源，脉宽调制电路为隔离电源生成固定占空比和固定频率的开关信号；高压侧连接IGBT的集电极（C极）、门极（G极）和发射极（E极）。隔离变压器绕组整流输出高压侧所需电源，V_{CC}为正电压、V_{EE}为负电压、COM为参考地；高压侧DC/DC电源将V_{CC}转换为逻辑控制电路与模拟信号采集所需的电源；电源时钟监控电路监控电源和时钟信号有无异常；光纤收发器与上位机进行实时通信交换数据，由上位机对数据进行实时存储；分压器的功能是将高压信号衰减至ADC可采集的范围；模拟量调理电路的功能是将单端信号转换为差分信号，将负电压偏置为正电压；电平移位电路将脉冲信号分解为2路信号，分别控制开通/关断场效应管，并进行功率放大；检测与保护电路组成故障监测单元，对IGBT提供有效保护[5-6]。

表1　驱动器及IGBT运行参数

Table 1　Driver and IGBT operation parameters

参数项目	IGBT型号	直流电压/V	额定电流/A	开关频率/Hz
参数值或说明	FZ1200R33KF2C	1 800	570	500

2　IGBT驱动电路

IGBT驱动电路是保证IGBT工作在安全工作区（Safe Operating Area, SOA）的关键。采集IGBT状态数据，必须了解开关过程中各状态数据时序及其相互关系。本文首先对IGBT开关过程进行阐述，然后提出IGBT驱动电路模型，并通过数学建模分析，最后总结出驱动器设计的参数边界[7]。

2.1　IGBT开关过程分析

IGBT开通与关断过程时序如图2所示，一个完整的开关周期可分为关断状态、开通延时、I_C电流上

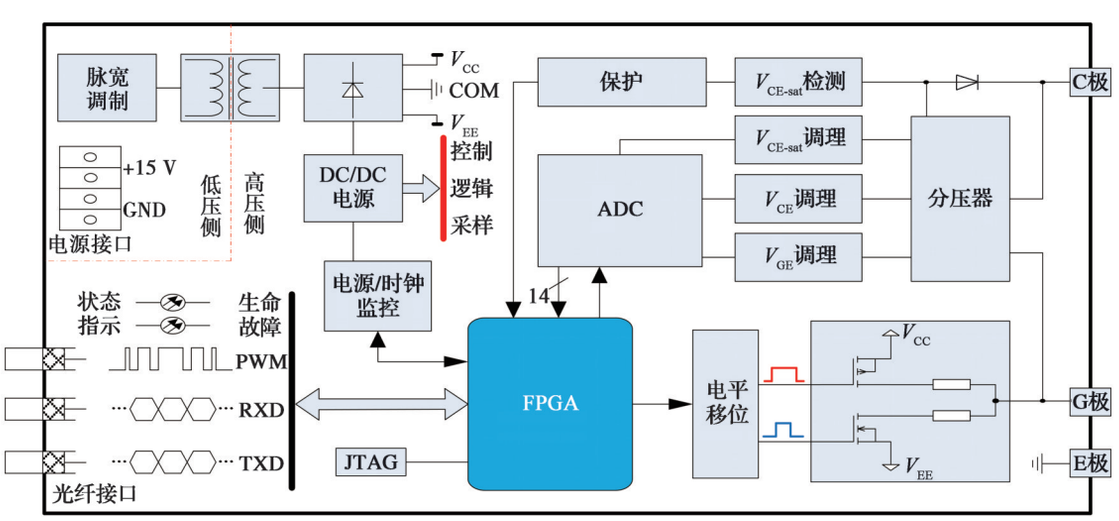


图1　数据采集驱动器功能框图

Fig. 1　Block diagram of data acquisition gate driver

升、V_{CE}电压下降、饱和过程、导通状态、退饱和过程、V_{CE}电压上升、I_C电流下降、电流拖尾、关断状态。

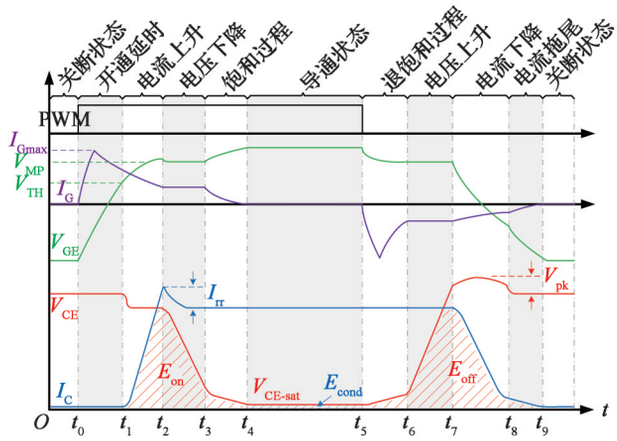


图2 IGBT开关过程时序图

Fig. 2 Sequence chart of IGBT switching process

1）开通过程

关断状态：t_0时刻之前，IGBT门极电压为驱动电源负电压V_{EE}，IGBT处于截止状态。

开通延时（t_0~t_1）：门极电流I_G开始对门极输入电容C_{ies}充电，V_{GE}增大至IGBT开启门槛电压V_{TH}，此阶段I_C和V_{CE}不会变化。

电流上升（t_1~t_2）：I_G继续对C_{ies}充电，V_{GE}继续上升至米勒电压V_{MP}，I_C快速上升，电流变化率$\frac{di}{dt}$较大，该阶段驱动电路方程为：

$$\left.\begin{aligned} V_{GE}(t) &= V_{CC}+\left(V_{EE}-V_{CC}\right)e^{-\frac{t}{R_{on}C_{GE}}} \\ I_G(t) &= \frac{V_{CC}-V_{EE}}{R_{on}}e^{-\frac{t}{R_{on}C_{GE}}} \\ t_2-t_0 &= R_{on}C_{GE}\ln\left(\frac{V_{CC}-V_{G_}}{V_{CC}-V_{MP}}\right) \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中：V_{CC}为驱动器正电源电压；V_{EE}为驱动器负电源电压；V_{MP}为米勒平台电压；$V_{G_}$为IGBT门极关断保持电压。

电压下降（t_2~t_3）：由于米勒效应，I_G和V_{GE}维持不变，“集电极-发射极”电压V_{CE}快速下降，此阶段电压变化率$\frac{dv}{dt}$较大，该阶段驱动电路方程为：

$$\left.\begin{aligned} V_G(t) &= V_{MP} \\ I_G(t) &= \frac{V_{CC}-V_{MP}}{R_{on}} \\ t_3-t_2 &= \frac{QR_{on}}{V_{CC}-V_{MP}} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：Q为米勒效应区存储的电荷量。

饱和过程（t_3~t_4）：I_G继续对C_{ies}充电，V_{GE}增大至驱动电源正电压V_{CC}，V_{CE}继续下降至饱和导通压降V_{CE-sat}，该阶段驱动电路方程为：

$$\left.\begin{aligned} V_{GE}(t) &= V_{CC}+\left(V_{MP}-V_{CC}\right)e^{-\frac{t}{R_{on}(C_{GE}+C_{GC})}} \\ I_G(t) &= \frac{V_{CC}-V_{MP}}{R_{on}}e^{-\frac{t}{R_{on}(C_{GE}+C_{GC})}} \\ t_3-t_4 &= R_{on}(C_{GE}+C_{GC})\ln\left(\frac{V_{CC}-V_{MP}}{V_{CC}-V_{G+}}\right) \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：V_{G+}为IGBT门极开通保持电压。

导通状态（t_4~t_5）：IGBT处于饱和导通状态，门极电流I_G为0，V_{GE}维持在驱动电源正电压V_{CC}。

2）关断过程

关断过程是开通过程的逆过程。与开通过程不同的是，当V_{GE}下降到V_{TH}以下时，集电极电流I_C不会立即消失，而是会以拖尾电流的形式逐渐变为0[8-9]。

2.2 IGBT驱动电路数学建模及分析

2.2.1 IGBT驱动等效电路模型

IGBT驱动电路是控制系统与主电路的连接电路。如图3所示，驱动器输出级采用2个金属氧化物半导体场效应晶体管（Metal Oxide Semiconductor FET, MOSFET），控制脉冲信号经光纤隔离与电平移位，产生2路脉冲信号，分别控制P沟道MOSFET和N沟道MOSFET，为防止N-MOS和P-MOS直通导致电源短路，两路脉冲信号间会插入几十纳秒死区时间。当控制系统发出IGBT开通命令时，P-MOS导通，N-MOS截止，正电源电压V_{CC}通过开通电阻R_{on}、线路寄生电感L_G和IGBT内部门极电阻R_{G_int}给“门极-发射极”电容C_{GE}、“门极-集电极”电容C_{GC}充电，IGBT开通；IGBT关断同理。“门极-发射极”电阻R_{ge}、“门极-发射极”电容C_{ge}、双向瞬变电压抑制二极管TVS组成门极防护电路[10]。

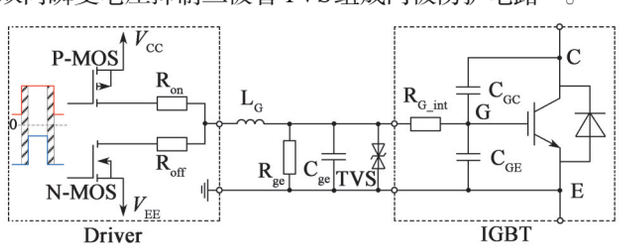


图3 IGBT驱动等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of IGBT driver

驱动电路控制IGBT的开关过程，实际上是对IGBT门极输入电容C_{ies}充放电的过程。IGBT驱动电路等效模型如图4所示。驱动电路对C_{ies}充电时R_G为R_{on}与R_{G_int}串联之和，对C_{ies}放电时R_G为R_{off}与R_{G_int}串联之和；L_G为驱动线路中寄生电感；C_{ies}为C_{GE}、C_{GC}、C_{ge}、

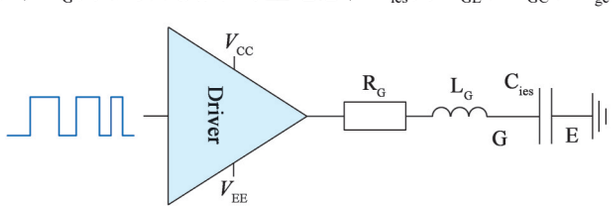


图4 IGBT驱动门极回路模型

Fig.4 Circuit model of IGBT gate driver

TVS二极管结电容以及线路分布电容并联之和。

2.2.2　IGBT驱动门极回路数学模型

1）数学建模

根据图3所示的IGBT驱动门极回路等效模型，其数学表达式为

$$L_{\mathrm{G}}C_{\mathrm{ies}}\frac{\mathrm{d}^2V_{\mathrm{GE}}(t)}{\mathrm{d}t^2}+R_{\mathrm{G}}C_{\mathrm{ies}}\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{GE}}(t)}{\mathrm{d}t}+V_{\mathrm{GE}}(t)=V_{\mathrm{GD}}(t) \tag{4}$$

式中：$V_{\mathrm{GD}}(t)$为驱动器输出电压，假定驱动器输出为理想阶跃电压，$V_{\mathrm{GD}}(t)$可取V_{CC}或V_{EE}。

由式(4)可得出模型传递函数为

$$G(s)=\frac{V_{\mathrm{GE}}(s)}{V_{\mathrm{GD}}(s)}=\frac{1}{L_{\mathrm{G}}C_{\mathrm{ies}}s^2+R_{\mathrm{G}}C_{\mathrm{ies}}s+1} \tag{5}$$

进一步变换可得

$$G(s)=\frac{1/\left(L_{\mathrm{G}}C_{\mathrm{ies}}\right)}{s^2+2\left(\frac{R_{\mathrm{G}}}{2}\sqrt{\frac{C_{\mathrm{ies}}}{L_{\mathrm{G}}}}\right)\frac{1}{\sqrt{L_{\mathrm{G}}C_{ies}}}s+1/\left(L_{\mathrm{G}}C_{\mathrm{ies}}\right)} \tag{6}$$

令$\omega=\dfrac{1}{\sqrt{L_{\mathrm{G}}C_{\mathrm{ies}}}}$，$\zeta=\dfrac{R_{\mathrm{G}}}{2}\sqrt{\dfrac{C_{\mathrm{ies}}}{L_{\mathrm{G}}}}$，那么式(6)为

$$G(s)=\frac{\omega^2}{s^2+2\zeta\omega s+\omega^2} \tag{7}$$

式中：ω为固有频率；ζ为阻尼比。

2）二阶系统时域分析

由式(7)得出单位阶跃输出函数，其函数为

$$C(s)=\frac{G(s)}{s}=\frac{\omega^2}{s^2+2\zeta\omega s+\omega^2}\cdot\frac{1}{s} \tag{8}$$

对式(8)进行反拉普拉斯变换，不同阻尼比的二阶系统单位阶跃冲击时域响应函数为：

①无阻尼（ζ=0）的响应函数为

$$C(t)=1-\cos\omega t \tag{9}$$

由式(9)可知，无阻尼比的二阶系统单位阶跃冲击时域响应函数的取值范围为[0，2]，系统的阶跃响应为等幅无限振荡。

②欠阻尼（0<ζ<1）的响应函数为

$$\left.\begin{aligned}C(t)&=1-\frac{\mathrm{e}^{-\zeta\omega t}}{\sqrt{1-\zeta^2}}\sin\left(\omega\sqrt{1-\zeta^2}\,t+\beta\right)\\ \beta&=\arctan\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

由式(10)可知，欠阻尼比的二阶系统单位阶跃冲击响应是一个衰减振荡趋于1的过程。

③临界阻尼（ζ=1）的响应函数为

$$C(t)=1-\mathrm{e}^{-\omega t}(1+\omega t) \tag{11}$$

④过阻尼（ζ>1）的响应函数为

$$\left.\begin{aligned}C(t)&=1+\frac{\mathrm{e}^{-\frac{t}{T_1}}}{\frac{T_2}{T_1}-1}+\frac{\mathrm{e}^{-\frac{t}{T_2}}}{\frac{T_1}{T_2}-1}\\ T_1&=\frac{1}{\omega\left(\zeta-\sqrt{\zeta^2-1}\right)}\\ T_2&=\frac{1}{\omega\left(\zeta+\sqrt{\zeta^2-1}\right)}\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

借助数学仿真软件可得出二阶系统阶跃曲线，如图5所示。

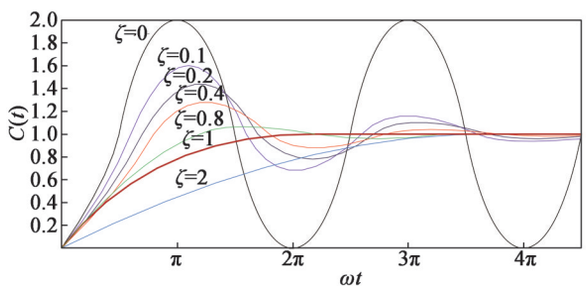


图5　二阶系统阶跃响应

Fig. 5　Step response of second-order system

综合上述分析与仿真曲线，阻尼比对二阶系统稳定性的影响如表2所示[11-12]。

表2　不同阻尼比对二阶系统阶跃响应影响

Table 2　Influence of different damping ratios on step response of second-order system

阻尼比	阻尼特性	稳定性
ζ=0	无阻尼	无穷振荡，不收敛
0<ζ<1	欠阻尼	衰减振荡，存在超调
ζ=1	临界阻尼	快速趋于稳态输出，不超调
ζ>1	过阻尼	趋于稳态输出，系统响应慢

2.3　IGBT驱动门极回路设计

在驱动电路设计过程中，应保证门极驱动电压不振荡、不超调。因此，满足上述模型中电流稳定的阻尼条件为$\zeta\geqslant1$，即

$$\frac{R_{\mathrm{G}}}{2}\sqrt{\frac{C_{\mathrm{ies}}}{L_{\mathrm{G}}}}\geqslant1 \tag{13}$$

由式(13)可知，IGBT门极驱动电路输出电流不振荡的条件为寄生电感L_{G}尽量小，门极电阻R_{G}和门极输入电容C_{ies}尽量大，对于既定的IGBT和驱动板，L_{G}和C_{ies}为特征值，阻尼比仅受门极电阻R_{G}影响，因此可通过调节R_{G}获得理想的阶跃响应。门极驱动电阻R_{G}最小值称为“临界电阻”，其值为

$$R_{\mathrm{G_min}}=2\sqrt{\frac{L_{\mathrm{G}}}{C_{\mathrm{ies}}}} \tag{14}$$

需要注意的是，R_{G}应同时满足IGBT损耗要求和保证IGBT工作在SOA。此时，IGBT驱动器输出峰值电流为

$$I_{G_max}=\frac{V_{CC}-V_{EE}}{R_{G_min}+R_{G_int}} \tag{15}$$

实际上，由于驱动信号不是理想的阶跃信号，驱动峰值电流需乘以折算系数0.74，即$I_{DM}\geq 0.74I_{G_max}$[13-14]。

3 IGBT数据采集

模拟信号采集以模数转换器（Analog Digital Converter, ADC）为核心，此驱动器采集的数据包括“集电极-发射极”电压V_{CE}、饱和导通电压V_{CE-sat}和“门极-发射极”电压V_{GE}。模拟信号采集数据流如图6所示，原始模拟信号经过信号衰减和信号调理电路转化为模数转换器可接收的电压范围，再由FPGA控制高速ADC进行固定周期的连续采样，并将采集得到的数据进行缓存、成帧、编码等处理，最终进入光纤发送端将数据发送给上位机[15]。

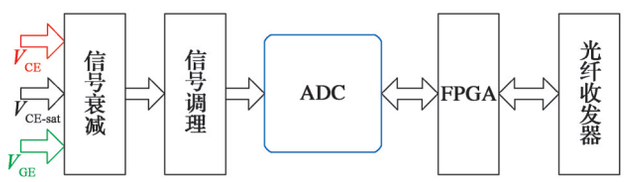
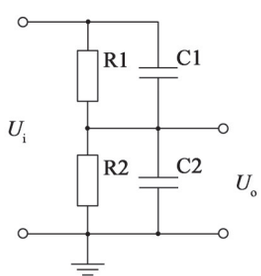


图6 模拟信号采集

Fig. 6 Analog signal acquisition

1）信号衰减

由于IGBT工作于高压环境，而ADC可采集的电压范围为低压信号，因此需要将输入高压信号衰减至合适低压信号进行采集。高压信号常用的衰减方式为电压传感器和分压器，电压传感器基于霍尔原理采样速率较低，一般每秒采集几百到几千个数据点；分压器采样速率主要依赖ADC采样速率。因此，此驱动器采用分压器配合高速ADC的方案进行高压信号采样。分压器主要分为电阻分压器、电容分压器和阻容分压器。其中，电阻分压器一般用于低频高压信号测量；电容分压器利用电容对交流信号的容抗进行分压，一般用于高频测量电路；阻容分压器是采用电阻电容串并联网络进行分压，具有电阻分压器低频特性好的优点和电容分压器高频性能好的优点。阻容分压器的原理如图7所示。



R1—高压臂电阻；C1—高压臂电容；R2—低压臂电阻；C2—低压臂电容。

图7 阻容分压器原理图

Fig. 7 Schematic circuit of resistance-capacitance divider

需要注意的是，这里高压臂或低压臂可以是多个电阻、电容的串并联[16-17]。输入电压U_i与输出电压U_o分压比的数学表达式为

$$\frac{U_o}{U_i}=\frac{R_2}{R_2+R_1\cdot\dfrac{1+j\omega R_2C_2}{1+j\omega R_1C_1}} \tag{16}$$

假设$R_1C_1=R_2C_2$，式(16)可转化为

$$\frac{U_o}{U_i}=\frac{R_2}{R_2+R_1} \tag{17}$$

由式(17)可知：当满足$R_1C_1=R_2C_2$时，分压比与频率无关。此时，阻容分压网络具有良好的频率特性，工作频带宽，不易产生振荡。

2）信号调理

模拟信号调理数据链路如图8所示，高压模拟信号V_{CE}、V_{CE-sat}和V_{GE}经阻容分压网络，衰减为低压模拟信号，其中V_{CE}采集IGBT集电极电压（0~1 800 V），V_{CE-sat}采集高压退饱和检测二极管后端电压（0~30 V），V_{GE}采集双极性电压（−15~15 V）。低压模拟信号为单端电压信号，高速ADC转换芯片一般采用双端差分输入，差分输入的形式对于高精度、高速度的应用具有更好的抗干扰特性。因此，单端电压信号需转换为双端差分信号，进入高速ADC进行模数转换，FPGA控制并读取ADC内数据。

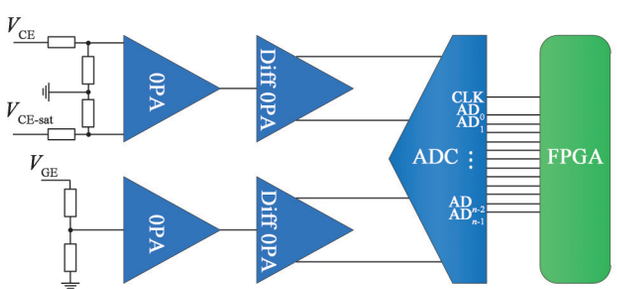


图8 模拟信号调理

Fig. 8 Analog signal conditioning

3）ADC数据采集

根据驱动器对IGBT状态数据采集需求，ADC应选用高速、高精度模数转换芯片，该驱动器采用速率65 MSPS，8 bit高速ADC芯片，对应V_{CE}分辨率为7 V，V_{CE-sat}和V_{GE}分辨率为0.18 V，满足速率和精度要求。高速ADC芯片内部功能模块如图9所示，其中“VIN+”为模拟信号正输入端，“VIN−”为模拟信号负输入端，“CLK+”“CLK−”为时钟信号输入端，“AD_0~AD_{n-1}”为并行数据输出端。

高速ADC芯片采用单一的时钟信号来控制内部所有的转换，ADC采样是在时钟的上升沿完成。一般采用带有误差校正逻辑的多级差分流水结构，采样时钟的占空比应保持在45%~55%；在低电平期间，输入处于采样状态；在高电平期间，输出处于保持状态。图10为高速ADC采样时序图。从图10可以看出，在每个时钟周期的上升沿捕获1个采样，8个时钟周期以后才

可以输出转换结果。

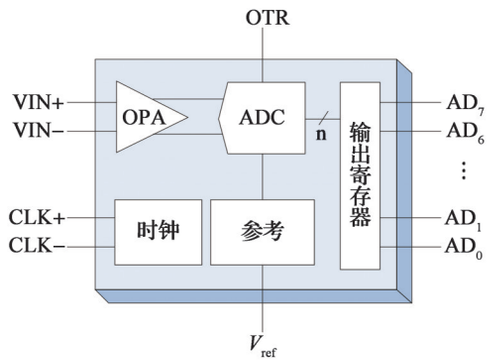


图 9　ADC芯片功能模块

Fig. 9　Function modules of ADC chips

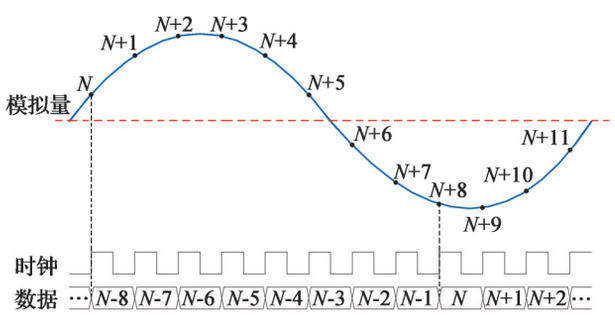


图 10　ADC采样时序

Fig. 10　Sequence chart of ADC acquisition

IGBT“集电极−发射极”电压V_{CE}和饱和导通电压$V_{CE\text{-}sat}$都是单极性电压。对于单极性电压，其电压计算数学表达式为

$$V_S = V_{ref} \cdot \frac{B}{2^n - 1} \tag{18}$$

式中：V_S为单极性电压；V_{ref}为ADC参考电压；B为ADC输出二进制数。

双极性电压V_D采集：IGBT“门极−发射极”电压V_{GE}为双极性电压，其电压计算数学表达式为

$$V_D = V_{ref} \cdot \left(\frac{B}{2^n - 1} - \frac{1}{2} \right) \tag{19}$$

式中：V_D为双极性电压。

4　IGBT驱动器与上位机通信

4.1　通信协议

4.1.1　UART异步串行通信

通用异步收发器(Universal Asynchronous Receiver Transmitter, UART)是一种异步收发器，可以实现全双工传输和接收。UART通信双方只要采用相同的帧格式和波特率，无需时钟同步信号，仅用2根信号线就可以实现通信功能[18]。

4.1.2　通信物理层

驱动器与上位机通信以高速光纤为传输介质，光纤通信具有传输距离远、速度快、损耗低、抗干扰性强等特点。此外，IGBT驱动器采用光纤通信还考虑了电气隔离功能。驱动器通信物理层最主要参数包括波特率、起始位、数据位、校验位和停止位。波特率定义需小于光纤收发器最大传输速率，此驱动器光纤速率为50 MB，故设定波特率为37.5 MB。数据帧格式为：以光纤接收器接收到光信号为起始位，中间传送8 Bit的数据位，1 Bit校验位，以光纤接收器无光输入为停止位，空闲状态为无光。物理层格式如图11所示。



图 11　物理层格式

Fig. 11　Format of physical layer

4.1.3　通信协议层

协议层是基于物理层，包括由FPGA发送到上位机的数据为上行数据，由上位机发送到FPGA的数据为下行数据。

1) 上行数据包

上行数据长度固定，对上行数据打包压缩，包含如下字段：帧头，作为数据包的起始标志；数据，n Byte数据包含驱动器采集的IGBT状态数据；检验，检验接收到的数据是否有误，通常检验算法有累加和校验、循环冗余校验(CRC)；帧尾，数据包结束标志。上行数据包格式如表3所示。

表3　上行数据包

Table 3　Uplink data packages　　Byte

项目	帧头	数据	校验	帧尾
位数	1	n	1	1

2) 下行数据包

控制器发送给驱动器的信号主要为脉冲信号和通信状态信号。脉冲信号位包含IGBT开关命令，“0”表示关断，“1”表示开通；通信状态信号表示通信有无出错，“0”表示通信正常，“1”表示通信错误，此时程序需进行通信复位操作。下行数据包格式如表4所示。

表4　下行数据包

Table 4　Downlink data packages　　bit

项目	起始位	数据位	校验位	停止位
位数	1	2	1	1

4.2　程序实现

通信程序包括接收模块和发送模块，由于接收模块和发送模块是互逆的过程，本文仅对接收模块程序进行设计。

为了实现串行数据接收每一位数据采样更为精确，需要时钟电路的频率为波特率的整数倍，以保证采样在每一位的中点。接收状态切换包括：“空闲（R_idle）”、“起始（R_start）”、“接收（R_sample）”、“校验（R_parity）”、“停止（R_stop）”状

态。其中，“空闲”状态为初始化或“空闲”状态，等待数据的起始位；“起始”状态为判断是否为起始位，“是”即等待起始位结束，跳转到“接收”状态，“否”则返回到“空闲”状态；“接收”状态为开始接收数据，进行串并转换，完成后跳转到“校验”状态；“校验”状态为检验接收数据是否正确，“是”即跳转到“停止”状态，“否”则返回到“空闲”状态；“停止”状态为判断是否为停止位，“是”即等待停止位结束，跳转到“空闲”状态，“否”则直接回到“空闲”状态[19-20]。接收模块程序状态机如图12所示。

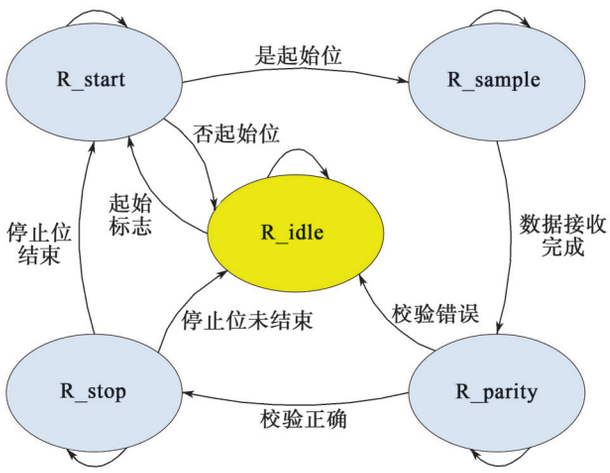


图12 接收模块程序状态机

Fig. 12 State machine of receiver module

5 试验结果

基于上述原理与分析，设计了一款IGBT驱动器，可驱动3 300 V及以下高压大功率IGBT器件，驱动器实物如图13所示。

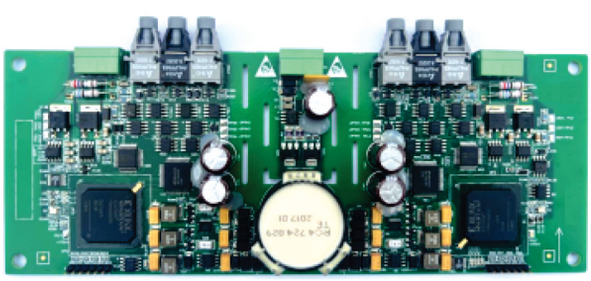


图13 驱动器实物

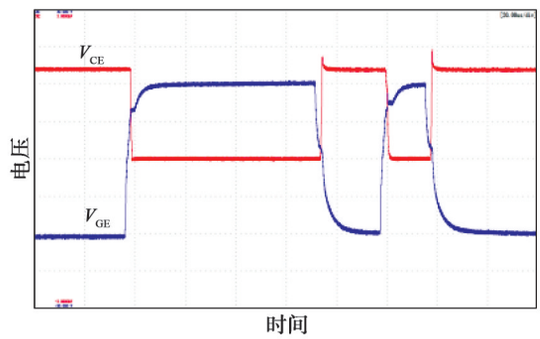
Fig. 13 Photo of the gate driver

5.1 试验测试

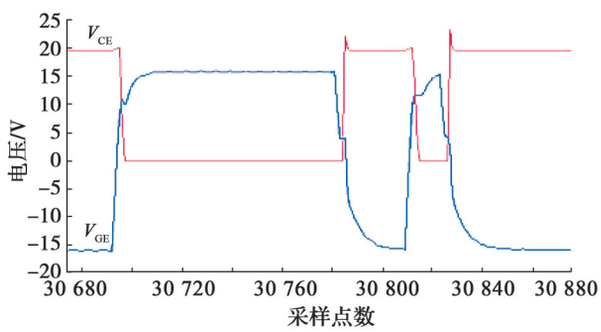
对驱动器适配IGBT器件进行双脉冲测试，测试波形如图14所示。在图14中示波器和驱动器同时采集了V_{CE}与V_{GE}数据，其中图14(a)为示波器采集波形，图14(b)为驱动器采集的数据通过相关软件还原的波形。通过对比分析，2个数据波形基本一致。

5.2 误差分析

测试数据统计如表5所示，分别记录IGBT“门极-发射极”正负电压V_{GE+}和V_{GE-}、“集电极-发射极”电压V_{CE}和饱和导通电压V_{CE-sat}，表5中的每个物理量为多次测量平均值，相对误差为



(a) 示波器采集波形



(b) 驱动器采集波形

图14 驱动器试验测试波形

Fig. 14 Experimental waveforms of gate driver

$$\delta=\frac{|A-E|}{E}\times 100\% \tag{20}$$

式中：A为实测值，以驱动器测量值为实测值；E为理论值，以示波器测量值为理论值。

表5 数据统计

Table 5 Data statistics V

参数	V_{GE+}	V_{GE-}	V_{CE-sat}	V_{CE}
实测值	15.43, 15.51, 15.92	−15.72, −15.58, −15.65	3.50, 3.58, 3.75	1 884, 1 960, 2 030
实测平均值A	15.62	−15.65	3.61	1 958
理论值E	15.28	−15.31	3.55	1 890
误差/%	2.2	2.2	1.7	3.5

由表5可知，随着采集电压升高，误差有所增大。试验数据是基于3 300 V/1 200 A IGBT器件所得，误差小于5%，满足工程设计需要。由此可见，该驱动器可适配3 300 V及以下IGBT器件，可覆盖轨道交通、工业变流、新能源等大部分应用场景。

6 结语

本文分析了IGBT开关过程的各状态数据之间的时

序关系，得出各阶段电路方程，并通过对IGBT驱动电路建模分析，计算出驱动电路二阶系统单位阶跃响应趋于稳定的边界条件，为IGBT驱动设计和参数选择提供理论支撑；提出了基于FPGA具有IGBT状态数据采集功能的驱动器方案，并说明了高速ADC采样、高速通信原理；基于理论方案设计出一款驱动器，通过测试验证了方案的所有功能。通过本文的分析，可得出以下结论：

①驱动电路中的寄生参数R_G、L_G影响IGBT门极回路阶跃响应，由于门极电阻R_G关系IGBT是否工作在安全工作区，影响IGBT开关损耗，为获得稳定的系统响应，在进行PCB设计时应控制门极回路布线长度，门极导线优先选用同轴电缆或双绞线。

②高速ADC采样能实现对IGBT关键状态数据V_{CE}、$V_{CE\text{-}sat}$和V_{GE}的采集，光纤高速通信可实现与上位机进行数据交互，底层数据能够通过人机界面呈现出来，通过与示波器采集数据对比，误差不超过5%，下一步提高光纤通信速率与采样分辨率，将进一步减小误差。

③IGBT运行状态数据在整个产品生命周期有至关重要的作用，这些数据可作为寿命评估的基础，亦可作为改进产品设计的输入，对提高IGBT驱动技术的质量与可靠性有重要意义。

④基于FPGA与ADC架构，使IGBT驱动器具有感知与逻辑运算能力，为实现IGBT智能控制奠定基础。

参考文献：

[1] 忻力, 荣智林, 窦泽春, 等. IGBT在轨道交通牵引应用中的可靠性研究[J]. 机车电传动, 2015(5): 1-5.
XIN Li, RONG Zhilin, DOU Zechun, et al. Study on IGBT reliability of rail transit traction converter application[J]. Electric Drive for Locomotives, 2015(5): 1-5.

[2] 何湘宁, 石巍, 李武华, 等. 基于大数据的大容量电力电子系统可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 209-221.
HE Xiangning, SHI Wei, LI Wuhua, et al. Reliability enhancement of power electronics systems by big data science [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 209-221.

[3] 王彬, 曹琳. 轨道交通用IGBT器件寿命预测技术综述[J]. 机车电传动, 2020(1): 9-12.
WANG Bin, CAO Lin. IGBT module lifetime prediction technology for rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 9-12.

[4] 李鑫. 具有健康状态监测功能的IGBT驱动电路[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
LI Xin. The IGBT gate driving circuits with health condition monitoring technique[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[5] ELEFFENDI M A, JOHNSON C M. Evaluation of on-state voltage $V_{CE(ON)}$ and threshold voltage V_{th} for real-time health monitoring of IGBT power modules[C]//IEEE. 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe). Geneva: IEEE, 2015: 1-10.

[6] 刘亚辉. 多参数IGBT在线监测系统设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
LIU Yahui. Design of multi-parameter IGBT online monitoring system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.

[7] 唐开毅, 尹新, 沈征, 等. IGBT驱动设计原理及技术比较[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 693-696.
TANG Kaiyi, YIN Xin, SHEN Zheng, et al. Design principles and technical comparisons of IGBT gate driver[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3): 693-696.

[8] HYON B, PARK J S, KIM J H. The active gate driver for switching loss reduction of inverter[C]//IEEE. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit: IEEE, 2020: 2219-2223.

[9] PROKOPENKO N N, BUDYAKOV P S, BUTYRLAGIN N V. The correction circuits for the broadband resistive voltage dividers with the capacitive load[C]//IEEE. Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2014). Kiev: IEEE, 2014: 1-4.

[10] 福尔克, 郝康普. IGBT模块: 技术、驱动和应用[M]. 韩金刚, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016：151-218.
VOLKE A, HORNKAMP M. IGBT modules: technologies, driver and application[M]. HAN Jingang, translated. Beijing: China Machine Press, 2016：151-218.

[11] 宁大龙, 同向前, 胡勋. IGBT器件的门极驱动模型及应用[J]. 电力电子技术, 2012, 46(12): 106-108.
NING Dalong, TONG Xiangqian, HU Xun. Model of IGBT gate driving circuit and its application[J]. Power Electronics, 2012, 46(12): 106-108.

[12] NEJADPAK A, MOHAMMED O A. Functional ON/OFF behavioral modeling of power IGBT using system identification methods[C]//IEEE. 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Orlando: IEEE, 2012: 1826-1832.

[13] COBOS J B, NIVIA E P. New formulation for the step response to the overdamped dynamic second order systems [C]//IEEE. 2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC). Ibague: IEEE, 2021: 31-36.

[14] 吴相甫, 徐健. 基于阶跃响应曲线特征的线性系统辨识方法研究[J]. 测控技术, 2019, 38(5): 127-133.
WU Xiangfu, XU Jian. Study on identification method for linear system based on the feature of step response curve[J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38(5): 127-133.

[15] LI Xinchang, XU Dawei, ZHU Hongyue, et al. Indirect IGBT over-current detection technique via gate voltage monitoring and analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3615-3622.

[16] 苟轩, 王增增. 高频大电压阻容分压网络的频率特性研究[J]. 中国测试, 2018, 44(12): 152-156.

GOU Xuan, WANG Zengzeng. Study on frequency characteristics of high frequency and large voltage resistor-voltage divider network[J]. China Measurement & Test, 2018, 44 (12): 152-156.

[17] 董巍, 叶子阳, 孙泽来, 等. 阻容分压器高精度测量技术与试验[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 328-335.
DONG Wei, YE Ziyang, SUN Zelai, et al. Measurement technology and tests for high precision RC voltage dividers [J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 328-335.

[18] 党俊博, 李哲, 李雅俊. 基于FPGA的串口通信电路设计与实现[J]. 电子科技, 2016, 29(7): 106-109.
DANG Junbo, LI Zhe, LI Yajun. Design and implementation of serial communication circuits based on FPGA[J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(7): 106-109.

[19] GUPTA A K, RAMAN A, KUMAR N, et al. Design and implementation of high-speed universal asynchronous receiver and transmitter (UART)[C]//IEEE. 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). Noida: IEEE, 2020: 295-300.

[20] 范善宇. 基于FPGA的数据采集与光纤发送设计[J]. 信息通信, 2019(3): 87-88.
FAN Shanyu. Design of data acquisition and optical fiber transmission based on FPGA[J]. Information & Communications, 2019(3): 87-88.

收稿日期：2022-04-27
修回日期：2023-03-01