

文章编号: 1000-128X(2017)01-0009-05

# 轨道牵引用 IGBT 过程质量评估方法与系统

刘文业, 李冬蕾, 李彦涌, 赖伟, 王丽萍, 傅航杰

(中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

**摘要:** 针对目前 IGBT 应用质量的评估还没有系统体系的情况, 建立牵引 IGBT 过程质量评估系统, 并结合参数正态性检测、过程能力指数 ( $C_{pk}$ )、威布尔分布 (Weibull) 等专业分析工具和方法, 实施对器件的过程质量评估和器件故障的追溯分析。该研究为器件品质保障及应用质量监管提供了方法和思路。

**关键词:** IGBT; 过程质量;  $C_{pk}$ ; Weibull; 质量评估

**中图分类号:** U264.3<sup>+</sup>7; TN303

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.01.003

## Traction IGBTs Process Quality Assessment Methods and System

LIU Wenyue, LI Donglei, LI Yanyong, LAI Wei, WANG Liping, FU Hangjie

(CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology &amp; Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** Aiming to the absence of IGBT's application process quality assessment system, a quality assessment system of traction IGBTs was established, which achieved the process quality assessment and fault tracing analysis by using parameters normality checking, process capability index ( $C_{pk}$ ), Weibull distribution and other special tools and methods. This study provided a new idea for device's quality assurance and its field reliability supervision.

**Keywords:** IGBT; process quality;  $C_{pk}$ ; Weibull; quality assessment

## 0 引言

IGBT 目前已广泛应用于新能源发电、机车、高压输电等领域。随着 IGBT 的大批量应用, 其可靠性问题也日益突出<sup>[1]</sup>。

在机车牵引、电动汽车等高可靠变流应用领域, 变流设备运行环境较为复杂, 高速飞驰、频繁启动与制动、振动、高温等工况严重威胁着功率器件的可靠性和使用寿命。应用数据表明, IGBT 已成为影响变流可靠性的关键部件<sup>[2-5]</sup>。而目前对于器件的评估和筛选并未建立一套科学、有效的方法, 对于模块故障追溯也没有深入到器件参数中去。因此, 建立一套行之有效的方法实现 IGBT 质量评估及故障回溯具有重要意义。

## 1 IGBT 参数性能表征与过程质量评估分析方法

### 1.1 器件性能表征参数

IGBT 出厂参数直接表征 IGBT 的工作性能, 其主要包括电、热、机三方面的参数<sup>[6]</sup>。其中器件电气参数按类型可以分为静态参数和动态参数; 按参数测试的条件又可以分为常温参数 (如 25℃) 和高温参数 (如 125℃)。静态参数主要包括饱和导通压降  $V_{CE}$ 、反向导通压降  $V_F$  (也有厂商称为  $V_{EC}$ )、阈值电压  $V_{GE(th)}$ 、器件漏电流  $I_{CES}$ 、 $I_{GES}$  等; 动态参数主要包括安全工作区、开通时间  $t_{on}$ 、关断时间  $t_{off}$ 、导通损耗  $E_{on}$ 、关断损耗  $E_{off}$  等。为获得器件动态参数, 一般采用双脉冲测试的方法。

### 1.2 过程质量评估方法

#### 1.2.1 $C_{pk}$ 指数定义

过程能力指数  $C_{pk}$  指工序在一定时间内, 处于控制

状态（稳定状态）下的实际加工能力。它是工序固有的能力，也是工序保证质量的能力，这里的工序是指操作者、机器、原料、工艺方法和生产环境等 5 个基本质量因素综合作用的过程。 $C_{pk}$  指数越高，则产品质量特征值一致性就越好，产品质量越稳定可靠<sup>[7]</sup>。

基于  $C_{pk}$  的统计意义及结合各行业在生产过程管控中的实践经验， $C_{pk}$  取值与产品失效率之间存在一定的对应关系，通用评价标准如表 1 所示。

表 1  $C_{pk}$  指数及评价标准

$C_{pk}$ 取值	失效率	过程评价
<1.0	>0.27%	能力差，不可接受
1.0~1.33	0.007%~0.27%	能力一般，需改善
1.33~1.67	0.007%~6.8PPM	能力尚可
>1.67	< 6.8PPM	能力充足，质量稳定

注：PPM(Parts Per Million) 指每百万个产品中的不良品比例。

由表 1 可以看出， $C_{pk}$  指数要求大于 1.33，低于该值，表示生产过程能力控制出现问题，产品应用可靠性存在较大风险。

### 1.2.2 $C_{pk}$ 指数计算

通用的  $C_{pk}$  计算公式如下：

$$C_{pk} = \frac{\min(USL - \bar{x}, \bar{x} - LSL)}{3\hat{\sigma}} \quad (1)$$

式中：USL、LSL 为标准上、下限； $\hat{\sigma}$  为参数标准差估计。

对于 3 300 V/1 200 A 器件，所关注的一些关键参数其标准上下限如表 2 所示。为便于说明问题，分别用 A 器件、B 器件等来区别各供应商的同型牵引级 IGBT。

表 2 器件关键参数的上下限设置

A 器件	USL/V	LSL/V	B 器件	USL/V	LSL/V
$V_{CE}$	4.2	0	$V_{CE}$	4.3	0
$V_{GE(th)}$	7.5	4.5	$V_{GE(th)}$	6.0	4.2
$V_F$	3.6	0	$V_F$	3.5	0

## 1.3 Weibull 分析

### 1.3.1 Weibull 定义及计算

威布尔分布被广泛应用到可靠性工程实践中，最初是用于材料疲劳分析，后来扩展到许多工程应用领域<sup>[8]</sup>。

2 个参数的威布尔累积分布函数形式如式(2)所示：

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^r\right] \quad (2)$$

式中： $a$  为尺度参数； $r$  为形状参数。

对式(2)进行变换，并两边取对数，可得式(3)：

$$\ln\left(\frac{1}{F(t)-1}\right) = \left(\frac{t}{a}\right)^r \quad (3)$$

两边再取对数，最后可得到式(4)所示的线性表示形式：

$$\ln \ln\left(\frac{1}{F(t)-1}\right) = r \cdot \ln t - r \cdot \ln a \quad (4)$$

令  $y = \ln \ln\left(\frac{1}{F(t)-1}\right)$ ， $x = \ln t$ ，式(4)可变换为

$$y = rx - r \cdot \ln a \quad (5)$$

由式(5)可知， $x$  与  $y$  成线性关系，其中  $r$  为直线的斜率。

### 1.3.2 $r$ 值意义

威布尔分布  $r$  值与器件失效所处的阶段具有如图 1 所示的关系。

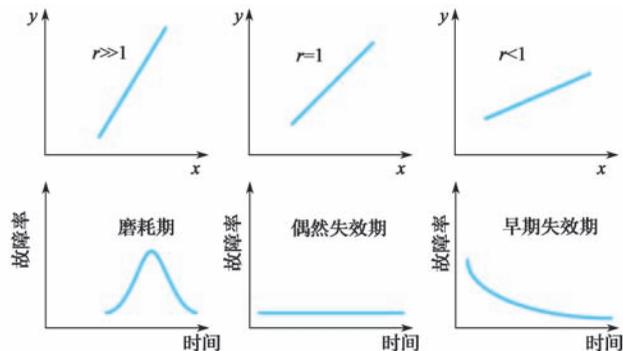


图 1  $r$  值与器件失效所处阶段的关系

由图 1 可知，当  $r \gg 1$  时，表示器件进入磨耗期；当  $r = 1$  时，表示器件处于偶然失效期；而当  $r < 1$  时，表示器件处于早期失效期。

## 2 器件过程质量评估系统

器件参数及故障查询分析系统基于数据库和 JAVA 技术，实现器件参数查询、分析，失效器件信息检索、统计、追溯等主要功能。

### 2.1 器件基础信息数据库

IGBT 出厂参数的分布情况与产品批次质量强相关，并决定该产品的应用可靠性，特别是对于一些关键参数，其分布、变化情况在一定程度上能够反映产品批次的质量水平，可借助专业分析工具对其进行评估。例如，当 IGBT 厂家改变工艺、原材料、人员、设备时，该种调整必然反映在产品  $C_{pk}$  指数变化上。如何快速、准确、全面分析器件出厂参数并掌握其规律，成为一个需要迫切解决的问题。为此，应用数据库、JAVA 技术建立出厂参数分析系统，是实现  $C_{pk}$  等参数自动分析以及图表自动生成的前提。

借助通用数据库 MYSQL 及可视化操作数据库软件 Navicat，将之前归档的零散繁多的 Excel、CSV 格式器件出厂数据文件，统一规范录入数据库作为记录保存，为后续基于数据库操作的器件 ID 查询、数据检索和分析、供应商器件质量工艺评估提供强大技术支持。

### 2.2 参数及故障信息查询

过程信息录入包括器件数据手册、出厂参数、故障信息等。器件数据手册的显示与当前所选择的器件类型关联；器件信息依据输入 ID 可查询到该器件自出厂到应用车型的全部参数信息；故障模块信息录入能

够将查询到的器件进行标记, 一旦选择标记, 在数据库中直接映射为一个故障器件子集, 便于进行故障回溯分析。参数查询和故障信息录入功能如图 2 所示。



图 2 器件参数和故障信息查录

### 2.3 过程质量分析

器件过程质量分析包括器件参数分析和故障信息统计两大功能。

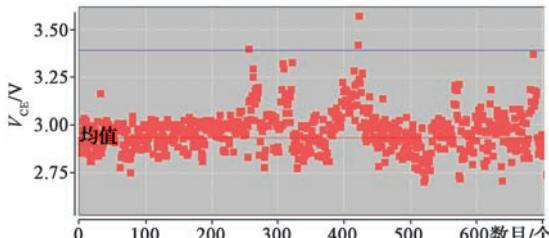
参数分析功能主要实现过程评价指标计算、参数分布性评估等工作。过程质量指标包括平均值、均方差、 $C_{pk}$  指数等。 $C_{pk}$  的计算如图 3 所示。



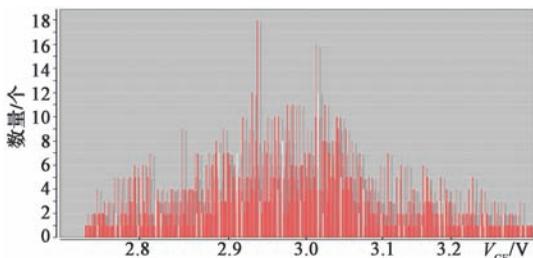
图 3  $C_{pk}$  参数分析

参数分布性评估主要考察器件参数批次分布是否符合正态性及对该种符合程度的评估, 如 QQ 图等。

以 A 器件  $V_{CE}$  参数为例, 图 4 (a) 给出了该参数某月批次的散点分布图, 图 4 (b) 为正态分布柱状图。在图 4 (a) 基础上, 还可进一步考察平均值及平均值  $\pm 3\sigma$  控制水平。



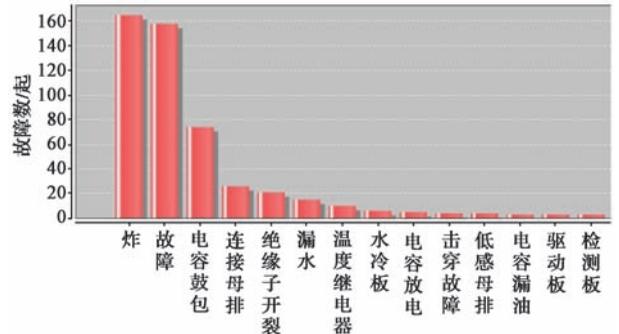
(a)  $V_{CE}$  散点图



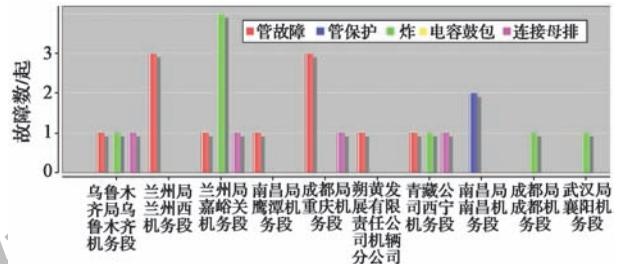
(b)  $V_{CE}$  柱状分布图

图 4 A 器件某月  $V_{CE}$  参数分布情况

器件故障信息统计主要关注现场应用质量数据分布情况及挖掘器件故障内在规律性的东西。故障信息可满足多维度统计需求, 如按故障模式、故障位置、故障车型、故障时间和所属机务段等。图 5 给出的是分别按故障模式和机务段统计的结果。



(a) 故障模式统计分类



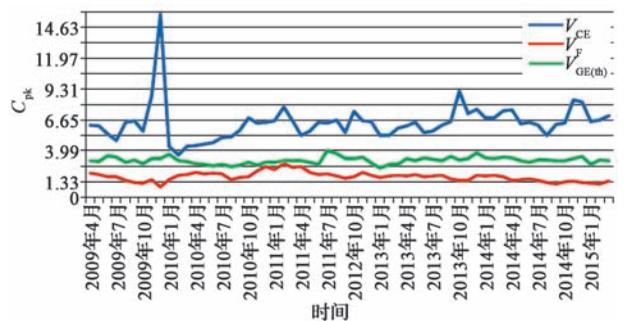
(b) 各机务段故障分布

图 5 A 器件故障信息统计

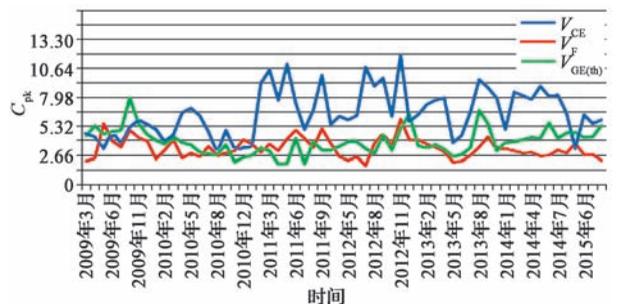
## 3 应用案例分析

### 3.1 A 器件与 B 器件过程质量对比

图 6 给出的是 A、B 器件各月  $C_{pk}$  指数变化情况。两图对比可发现 B 器件所列关键参数, 其  $C_{pk}$  指数均大于 2, 其最小值也大于 1.66, 从整体上讲, B 器件的



(a) A 器件  $C_{pk}$  波动情况



(b) B 器件  $C_{pk}$  波动情况

图 6 器件  $C_{pk}$  指数对比分析

产品稳定性更好。特别地，对于A器件 $V_F$ 参数，2009年9~12月，2014年8~12月，及2015年1、2月的 $C_{pk}$ 指数都低于1.33。进一步分析发现，A器件2014年7个月中有6个月 $C_{pk}$ 指数小于1.5，并且从2014年以来并没有改善的趋势。

根据现场返回的器件故障信息，对上述器件应用质量数据进行重点跟踪，发现应用A型器件的某型机车在上线半年时间内器件失效率高出正常水平近10倍。对器件失效数据进行威布尔分析，其分布拟合结果如图7所示。

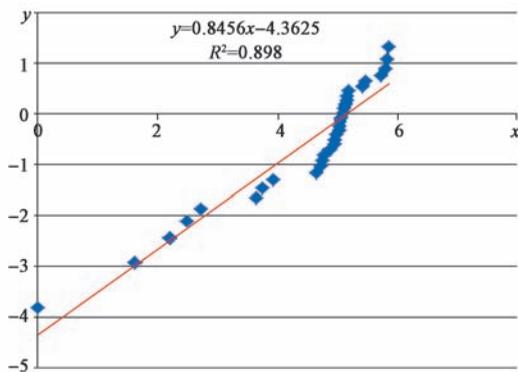


图7 A器件失效数据威布尔分析

由图7可知，拟合直线的斜率为0.8456，即其 $r$ 值小于1。根据图1所示判据，表明该批器件属于早期失效，A器件可能出现了批次质量问题。

将器件失效数据与 $C_{pk}$ 指数进行关联分析，结果如表3所示。

表3 A器件失效数据与 $C_{pk}$ 关联分析

批次号	2~7	8	9	10
失效数	6	7	8	4
失效比	24%	28%	32%	16%
$C_{pk\_V_F}$	>1.430	1.269	1.136	1.301

注：表中批次号依次对应2014年各月份。

分析发现，器件 $V_F$ 的 $C_{pk}$ 值低于1.33的2014年8、9、10月批次，其失效数显著大于2-7月批次，说明器件失效率高与过程质量的稳定性存在必然联系。

### 3.2 器件筛选及评价

A器件厂商对有问题批次进行了召回，筛选后的 $C_{pk}$ 值如表4所示。

表4 A器件筛选后 $C_{pk}$ 指数水平

批次	$C_{pk\_V_{CE}}$	$C_{pk\_V_F}$	$C_{pk\_V_{GE(th)}}$
筛选后批次一	7.184	1.452	3.059
筛选后批次二	8.097	1.342	2.868

由表4可知，实施筛选后的器件参数 $C_{pk}$ 值有所增加，其中 $V_F$ 的 $C_{pk}$ 值已超过了1.33，但相比往年接近2.0的 $C_{pk}$ 值，仍有较大差距。 $V_F$ 的对比结果如图8所示。

尽管图8(e)、图8(f)对应的 $C_{pk}$ 值大于1.33，但其参数分布较筛选前并没有得到改善；另外，参数 $V_{CE}$ 的 $C_{pk}$ 值有了很大提高，可认为对IGBT芯片实施了有效筛选，而对FRD芯片筛选效果不明显。

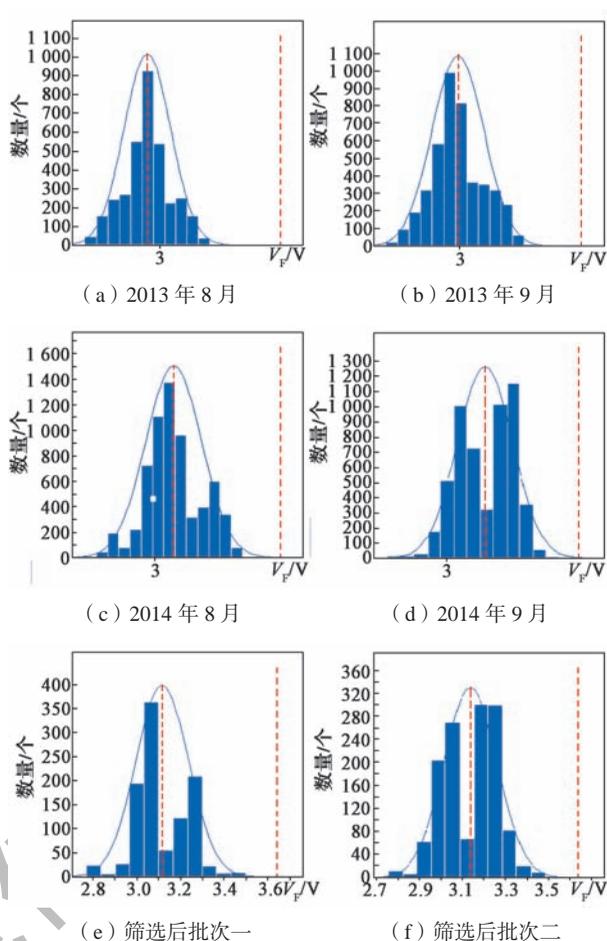


图8 A器件模块 $V_F$ 参数分布对比

C器件厂商针对早期失效率高现象，出厂测试追加了高频部分的多脉冲斩波筛选试验。实施筛选方案过程中1368只器件共出现2只失效，失效率为0.15%。筛选前后 $C_{pk}$ 对比如表5所示。

由表5可知，筛选后器件 $V_{CE(sat)}$ 的 $C_{pk}$ 值有明显上升， $V_F$ 的 $C_{pk}$ 也处于较高的水平。两参数正态分布情况如图9所示。

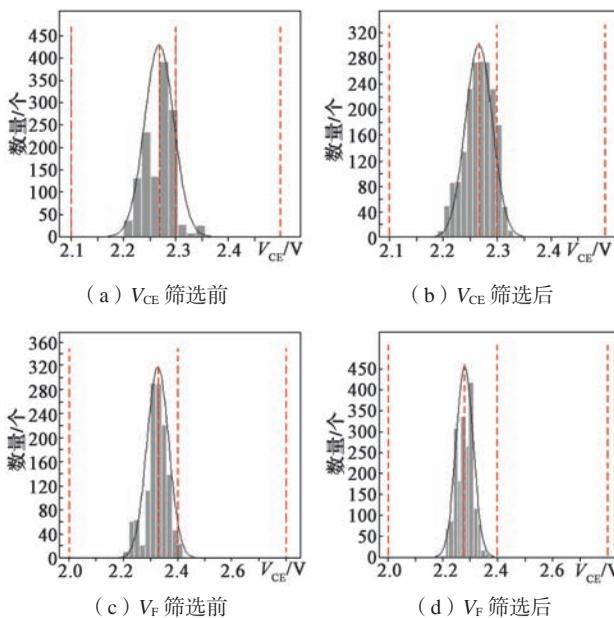


图9 C器件筛选前后参数分布对比

表5 C 器件筛选前后  $C_{pk}$  值对比

年月	$C_{pk\_V_{CE}}$	$C_{pk\_V_F}$	年月	$C_{pk\_V_{CE}}$	$C_{pk\_V_F}$
2014年4月	3.029	2.215	2015年1月	2.481	2.430
2014年5月	3.727	2.143	2015年2月	3.200	2.262
2014年6月	3.865	4.288	2015年3月	3.222	3.166
2014年7月	3.950	2.630	2015年4月	3.310	3.050
2014年9月	4.524	3.177	2015年5月	4.308	3.619
2014年11月	3.821	2.652	筛选后	6.863	2.993

结合表5和图9分析可知, 实施筛选是有效的,  $V_{CE}$  参数呈较好的正态分布, 正态分布的峰峰值与目标值比较接近; 而  $V_F$  参数虽然正态分布性有所提高, 但其峰峰值与目标值偏移量增大, 导致  $V_F$  参数的  $C_{pk}$  指数提升效果不明显。

## 4 结语

本文建立了轨道牵引用 IGBT 过程质量评估系统, 通过应用参数正态性检测、 $C_{pk}$ 、Weibull 分布等专业的分析和方法, 实现了对器件的过程质量评估以及故障模块信息回溯分析。分析结果表明: B 器件过程质量控制水平优于 A 器件; A 器件在应用过程中某些批次存在早期失效高的现象, 认为与产品批次质量紧密相关; 经过追加筛选条件, C 器件的过程质量指数有所

提升, 而 A 器件却变化不明显。该系统研发为器件品质保障及应用质量监管提供了方法和思路, 具有一定的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 叶利剑, 邹勉, 杨小慧. IGBT 发展综述 [J]. 半导体技术, 2008, 33(11): 937-940.
- [2] 王彦刚, Chamund Dinesh, 李世平, 等. 功率 IGBT 模块的寿命预测 [J]. 机车电传动, 2013(2): 13-19.
- [3] 张明. 大功率半导体器件的可靠性评估 [J]. 大功率交流技术, 2015(1): 1-9.
- [4] 周维维, 吴军科, 杜雄, 等. 功率变流器的可靠性研究现状及展望 [J]. 电源学报, 2013(1): 1-15.
- [5] 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.
- [6] 李世平, 黄蓉, 奉琴, 等. IGBT 功率循环能力与可靠性试验 [J]. 机车电传动, 2015(3): 16-18.
- [7] 马义中, 赵逢禹. 过程能力指数的若干评述 [J]. 中国质量, 2002(12): 20-24.
- [8] 赵宇. 可靠性数据分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 91-119.

作者简介: 刘文业 (1979-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事变流器可靠性及寿命预测前沿技术研究。

(上接第4页)

引线寄生参数等影响器件电特性的参数进行仿真, 实现了 IGBT 结构设计最优化; 通过对 IGBT 芯片的选配、芯片键合、标准二次焊接、超声波空洞率检测以及固化灌胶等 IGBT 封装的关键过程控制、采用专用工装和工艺实现国产化 IGBT 的封装。封装的国产化 IGBT 通过了器件、功率模块、辅助变流柜和机车级的试验验证, 并小批量装车, 目前在线无故障运行超过 15 万 km, 满足了干线机车系统要求。完全国产化 6 500 V/200 A 高压大功率 IGBT 器件的研制成功, 实现了 IGBT 芯片—IGBT 器件—功率模块—变流器产业链的形成, 并成功批量应用在国内轨道交通领域, 具有重大的意义和市场前景。

## 参考文献:

- [1] 刘志伟. IGBT 吸收电路的研究 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 徐凝华, 吴义伯, 刘国友, 等. 混合动力、电动汽车用 IGBT 功率模块的最新封装技术 [J]. 大功率交流技术, 2013(1): 1-6.
- [3] 覃荣震, 张泉. 大功率 IGBT 模块封装中的超声引线键合技术 [J]. 大功率交流技术, 2011(2): 22-25.
- [4] 丁荣军, 刘国友. 轨道交通用高压 IGBT 技术特点及其发展 [J]. 机车电传动, 2014(1): 1-6.
- [5] 蒋玉想, 李征. 基于双脉冲的 IGBT 及驱动电路测试方法 [J]. 电子技术, 2012(7): 78-80.

作者简介: 陈宏 (1975-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事变流装置和功率模块单元的设计开发。