

T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2026

基于 SiC/GaN 的固态变压器高频电力 电子变换模块技术规范

Technical specification for high-frequency power electronic conversion
module of solid-state transformer based on SiC/GaN

(征求意见稿)

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国机电设备工程协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 系统结构	2
5.1 总体架构	3
5.2 输入级	3
5.3 隔离级	3
5.4 输出级	3
5.5 控制系统	3
6 技术要求	3
6.1 一般要求	3
6.2 输入级技术要求	4
6.3 隔离级技术要求	4
6.4 输出级技术要求	4
6.5 功率器件技术要求	5
6.6 整机性能要求	5
6.7 电磁兼容性要求	6
6.8 安全与保护要求	6
6.9 环境适应性要求	6
6.10 可靠性要求	6
7 试验方法	7
7.1 试验条件	7
7.2 外观与结构检查	7
7.3 输入级性能试验	7
7.4 隔离级性能试验	7
7.5 输出级性能试验	8
7.6 功率器件试验	8
7.7 整机性能试验	9
7.8 电磁兼容性试验	9
7.9 安全与保护试验	9
7.10 环境适应性试验	10
7.11 可靠性试验	10

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由特变电工电气装备集团有限公司提出。

本文件由中国机电设备工程协会归口。

本文件起草单位：特变电工电气装备集团有限公司、深圳麦格米特电气股份有限公司、上海置信电气非晶有限公司、西安西电电力电子有限公司、江苏华辰变压器股份有限公司、上海广电电气（集团）股份有限公司。

本文件主要起草人：吴银福、周军、张志键、白世军、高冬、陈静、陈光胜、向军、石楠。

基于 SiC/GaN 的固态变压器高频电力电子变换模块技术规范

1 范围

本文件规定了基于碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）功率器件的固态变压器高频电力电子变换模块的系统结构、技术要求和试验方法。

本文件适用于额定电压不超过35 kV、额定功率不超过5 MVA的固态变压器中高频电力电子变换模块的设计、制造、检验和应用。其他类似应用场景的高频电力电子变换模块可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温
- GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温
- GB/T 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验
- GB/T 2423.22 环境试验 第2部分：试验方法 试验N：温度变化
- GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）
- GB/T 3859.1 半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第1-1部分：基本要求规范
- GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）
- GB/T 4937.34 半导体器件 机械和气候试验方法 第34部分：功率循环
- GB/T 4937.35 半导体器件 机械和气候试验方法 第35部分：塑封电子元器件的声学显微镜检查
- GB/T 5080.1 可靠性试验 第1部分：试验条件和统计检验原理
- GB/T 13422 半导体变流器 电气试验方法
- GB/T 14048.1 低压开关设备和控制设备 第1部分：总则
- GB/T 16935.1 低压供电系统内设备的绝缘配合 第1部分：原理、要求和试验
- GB/T 17626.2 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验
- GB/T 17626.3 电磁兼容 试验和测量技术 第3部分：射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 17626.4 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验
- GB/T 17626.5 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验
- GB/T 17626.6 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度
- GB/T 17626.11 电磁兼容 试验和测量技术 第11部分：对每相输入电流小于或等于16 A设备的电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验
- GB/T 17626.30 电磁兼容 试验和测量技术 第30部分：电能质量测量方法
- GB/T 21419 变压器、电源装置、电抗器及其类似产品 电磁兼容（EMC）要求
- SJ/T 2658.15 半导体红外发射二极管测量方法 第15部分：热阻
- IEC 60747-8 半导体器件分立器件第8部分：场效应晶体管（Semiconductor devices - Discrete devices - Part 8: Field-effect transistors）

3 术语和定义

GB/T 3859.1、GB/T 13422界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

固态变压器 solid state transformer; SST

通过电力电子变换器和高频变压器实现电压变换、能量传递和电气隔离的电力电子装置，具有电压变换、功率调节、无功补偿、谐波治理和故障隔离等功能。

3.2

高频电力电子变换模块 high-frequency power electronic conversion module

固态变压器中实现AC/DC、DC/DC或DC/AC电能变换的基本功能单元，采用高频开关技术，工作频率不低于20 kHz。

3.3

双有源桥 dual active bridge; DAB

由两个对称的有源H桥通过高频变压器连接组成的双向DC/DC变换拓扑结构，可实现双向功率流动和电气隔离。

3.4

级联H桥 cascade H-bridge; CHB

将多个H桥功率单元在交流侧串联、直流侧独立输出的多电平拓扑结构，适用于中高压应用场景-39。

3.5

共模瞬态抗扰度 common mode transient immunity; CMTI

栅极驱动IC在承受高电压变化率（dv/dt）时维持正常工作的能力，是衡量驱动电路抗干扰性能的重要指标，单位为伏特/纳秒（V/ns）。

3.6

动态导通电阻 dynamic on-resistance; dynamic RDS(on)

功率器件在高频开关工作条件下，因界面陷阱捕获效应导致导通电阻相对于静态值的增量，单位为毫欧（mΩ）。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AC: 交流（Alternating Current）

CMTI: 共模瞬态抗扰度（Common Mode Transient Immunity）

DAB: 双有源桥（Dual Active Bridge）

DC: 直流（Direct Current）

EMC: 电磁兼容性（Electromagnetic Compatibility）

EMI: 电磁干扰（Electromagnetic Interference）

GaN: 氮化镓（Gallium Nitride）

HEMT: 高电子迁移率晶体管（High Electron Mobility Transistor）

HFT: 高频变压器（High Frequency Transformer）

MMC: 模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter）

MOSFET: 金属-氧化物半导体场效应晶体管（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）

NPC: 中性点箝位（Neutral Point Clamped）

PFC: 功率因数校正（Power Factor Correction）

SiC: 碳化硅（Silicon Carbide）

SST: 固态变压器（Solid State Transformer）

WBG: 宽禁带（Wide Bandgap）

5 系统结构

5.1 总体架构

基于SiC/GaN的固态变压器高频电力电子变换模块采用模块化、多级电能变换的总体架构，由输入级、隔离级、输出级和控制系统四个功能单元组成。

5.2 输入级

输入级应根据应用电压等级选择合适的拓扑结构：

- a) 对于低压应用（ $\leq 1140\text{ V AC}$ ），可采用两电平三相全桥拓扑或交错并联Boost PFC拓扑；
- b) 对于中压应用（ $1140\text{ V AC} \sim 10\text{ kV AC}$ ），可采用三电平NPC拓扑或模块化多电平拓扑；
- c) 对于高压应用（ $10\text{ kV AC} \sim 35\text{ kV AC}$ ），宜采用级联H桥（CHB）拓扑，每个H桥单元作为一个独立的功率变换模块。

输入级功率器件应根据应用场景选用SiC MOSFET或GaN HEMT：

- 1) 电压等级 $\geq 1200\text{ V}$ 的应用宜选用SiC MOSFET；
- 2) 电压等级 $\leq 650\text{ V}$ 且开关频率 $\geq 500\text{ kHz}$ 的应用宜选用GaN HEMT。

5.3 隔离级

隔离级应采用基于双有源桥（DAB）的高频隔离变换架构。每个DAB单元由两个有源H桥和一个高频变压器组成，支持双向功率流动。

高频变压器的设计要求：

- a) 工作频率： $20\text{ kHz} \sim 200\text{ kHz}$ （根据功率等级和器件选型确定）；
- b) 磁芯材料：宜选用纳米晶、铁氧体或非晶材料；
- c) 绝缘等级：应满足系统电压等级的绝缘配合要求。

5.4 输出级

5.4.1 输出级拓扑结构

输出级应根据输出类型采用相应的拓扑结构：

- a) 直流输出：可采用Buck、Boost或Buck-Boost拓扑，或多相交错并联拓扑以提高输出电流能力；
- b) 交流输出：可采用单相或三相全桥逆变拓扑，或三电平NPC逆变拓扑。

5.4.2 输出级功能

输出级应具备以下功能：

- a) 电压/电流闭环调节；
- b) 输出过压、过流、短路保护；
- c) 输出电压谐波抑制（总谐波畸变率 $\text{THD} \leq 5\%$ ）。

5.5 控制系统

控制系统应包括以下功能模块：

- a) 采样单元：实时采集输入/输出电压、电流、温度等运行参数；
- b) 驱动单元：为SiC/GaN功率器件提供栅极驱动信号，应具备有源米勒钳位、退饱和检测和过流保护功能；
- c) 控制单元：实现PWM调制、电压/电流闭环控制、功率均衡和模式切换；
- d) 保护单元：实现过压、过流、过温、短路和缺相等故障检测与保护；
- e) 通信单元：支持CAN、RS485、Ethernet等通信接口，实现模块间协调控制和系统级管理。

6 技术要求

6.1 一般要求

6.1.1 正常使用条件

模块在下列环境条件下应能正常工作：

- a) 环境温度：-25℃~55℃；
- b) 相对湿度：5%~95%（无凝露）；
- c) 海拔高度：不超过2000 m（超过2000 m时需降额使用）；
- d) 污染等级：2级。

6.1.2 外观与结构要求

- a) 模块外观应整洁、无损伤，标识清晰、完整；
- b) 电气连接应可靠，接触电阻应符合设计要求；
- c) 散热结构应保证功率器件结温不超过额定值；
- d) 模块应具备防误插、防反接设计。

6.2 输入级技术要求

输入级技术指标应符合表1的规定。

表1 输入级技术要求

项目	技术指标	备注
额定输入电压（AC）	380 V/690 V/1 140 V/3 300 V/6 600 V/10 kV/35 kV	按应用场景选取
额定输入电压（DC）	600 V/800 V/1200 V/1500 V/3000 V	按应用场景选取
输入电压波动范围	±15%	额定电压范围内
功率因数（PF）	≥0.99	额定负载条件下
输入电流总谐波畸变率（THDi）	≤5%	额定负载条件下
输入级效率	≥98%(SiC);≥97%(GaN)	额定工况
输入级开关频率	20 kHz~200 kHz(SiC);100 kHz~2 MHz(GaN)	按器件选型确定
输入过压保护阈值	额定电压×115%	响应时间≤10 μs
输入欠压保护阈值	额定电压×85%	响应时间≤10 μs
输入过流保护阈值	额定电流×120%	响应时间≤5 μs

6.3 隔离级技术要求

隔离级技术指标应符合表2的规定。

表2 隔离级技术要求

项目	技术指标	备注
额定输入/输出电压	按系统设计确定	与输入级匹配
额定功率	10 kW~500 kW/单元	可按模块扩展
隔离电压（工频）	≥2.5 kV（低压模块）；≥10 kV（中压模块）；≥35 kV（高压模块）	1 min无击穿
隔离级效率	≥97%	额定工况
开关频率	20 kHz~100 kHz	推荐50 kHz
高频变压器工作频率	20 kHz~200 kHz	与开关频率匹配
高频变压器温升	≤85 K	额定工况
高频变压器绝缘电阻	≥100 MΩ	500 V兆欧表
电压调节范围	±10%	额定电压范围内
功率密度	≥10 kW/L	含高频变压器

6.4 输出级技术要求

输出级技术指标应符合表3的规定。

表3 输出级技术要求

项目	技术指标	备注
额定输出电压	按负载需求确定	AC或DC
额定输出电流	按功率等级确定	—
输出电压精度	±1%	额定工况
输出电压总谐波畸变率（THD）	≤3%（AC输出）	线性负载

输出级效率	$\geq 98\%$ (SiC); $\geq 96\%$ (GaN)	额定工况
输出过压保护阈值	额定电压 $\times 110\%$	响应时间 $\leq 10 \mu\text{s}$
输出过流保护阈值	额定电流 $\times 120\%$	响应时间 $\leq 5 \mu\text{s}$
短路保护响应时间	$\leq 10 \mu\text{s}$	—
动态响应时间	$\leq 100 \mu\text{s}$	负载突变 $20\% \sim 100\%$

6.5 功率器件技术要求

6.5.1 SiC MOSFET 技术要求

SiC MOSFET 器件的主要技术指标应符合表4的规定。

表4 SiC MOSFET 器件技术要求

项目	技术指标	备注
漏-源电压 (V_{DSS})	650 V/1 200 V/1700 V/3300 V	—
漏极电流 (I_{D})	30 A~200 A	视封装而定
峰值漏极电流 (I_{DM})	$\geq 2 \times I_{\text{D}}$	—
导通电阻 ($R_{\text{DS(on)}}$)	15 m Ω ~80 m Ω @ 25 °C; 25 m Ω ~120 m Ω @ 175 °C	随温度升高而增大
栅-源阈值电压 ($V_{\text{GS(th)}}$)	2.0 V~4.0 V	—
推荐栅极驱动电压	18 V~22 V (导通); -3 V~-5 V (关断)	SiC MOSFET 专用
最大允许结温 ($T_{\text{j(max)}}$)	175 °C	部分产品可达200 °C
开关能量 ($E_{\text{on}}+E_{\text{off}}$)	$\leq 0.65 \text{ mJ}$ @ 1200 V/30 A	@25 °C
开关时间	56 ns~105 ns	@25 °C
体二极管正向压降	$\leq 3.5 \text{ V}$ @ 额定电流	—
体二极管反向恢复时间	$\leq 50 \text{ ns}$	SiC 器件优势显著
结-壳热阻 (R_{JC})	$\leq 0.3 \text{ }^\circ\text{C/W}$ (模块); $\leq 1.5 \text{ }^\circ\text{C/W}$ (分立器件)	—

6.5.2 GaN HEMT 技术要求

GaN HEMT 器件的主要技术指标应符合表5的规定。

表5 GaN HEMT 器件技术要求

项目	技术指标	备注
漏-源电压 (V_{DSS})	150 V/650 V	高压GaN以650 V为主
漏极电流 (I_{D})	10 A~150 A	视封装而定
导通电阻 ($R_{\text{DS(on)}}$)	25 m Ω ~200 m Ω @ 25 °C	—
栅极驱动电压范围	4.5 V~6.0 V	增强型GaN HEMT
最大允许结温 ($T_{\text{j(max)}}$)	150 °C	—
开关频率能力	$\leq 2 \text{ MHz}$	GaN 核心优势
栅极电荷 (Q_{g})	5 nC~30 nC	远低于SiC/Si
输出电容 (C_{oss})	50 pF~500 pF	—
反向恢复电荷 (Q_{rr})	0	GaN 无体二极管, 反向恢复电荷为零
动态导通电阻增量	$\leq 15\%$	高频开关工况下
栅极驱动IC CMTI	$\geq 150 \text{ V/ns}$	推荐值
栅极驱动IC 绝缘耐压	$\geq 2500 \text{ V}_{\text{rms}}$	1 min

6.6 整机性能要求

整机性能技术指标应符合表6的规定。

表6 整机性能技术要求

项目	技术指标	备注
整机额定功率	50 kW~5 MW	按模块扩展
整机效率	$\geq 96\%$ (额定工况)	含输入+隔离+输出级
功率密度	$\geq 5 \text{ kW/L}$	含散热系统
输出电压精度	$\pm 1\%$ (稳态); $\pm 5\%$ (动态)	动态指负载突变
输出电压纹波	$\leq 1\%$ (DC输出)	峰峰值/额定电压

输入功率因数	≥0.99	额定负载
输入电流THD	≤5%	额定负载
输出电压THD	≤3% (AC输出)	线性负载
响应时间	≤200 μs	负载突变
启动时间	≤5 s	软启动

6.7 电磁兼容性要求

电磁兼容性要求应符合表7的规定。

表7 电磁兼容性技术要求

项目	技术指标
静电放电抗扰度	接触放电±6 kV；空气放电±8 kV
射频电磁场辐射抗扰度	10 V/m(80 MHz~1000 MHz)
电快速瞬变脉冲群抗扰度	电源端口±2 kV；信号端口±1 kV
浪涌（冲击）抗扰度	电源端口线—线±1 kV；电源端口线—地±2 kV
射频场感应的传导骚扰抗扰度	10 V(150 kHz~80 MHz)
电压暂降抗扰度	0% $U_{_T}$ /1周期；40% $U_{_T}$ /10周期；70% $U_{_T}$ /25周期
传导发射限值	Class A（工业环境）；Class B（居住环境）
辐射发射限值	Class A（工业环境）；Class B（居住环境）

注： $U_{_T}$ 为额定电压；性能判据A、B、C的定义见GB/T 17626各分标准。

6.8 安全与保护要求

安全与保护要求应符合表8的规定。

表8 安全与保护技术要求

项目	技术指标	备注
绝缘电阻	≥20 MΩ（相对地）；≥100 MΩ（相对相）	500 V兆欧表
工频耐压	≥2.5 kV（低压模块）；≥10 kV（中压模块）；≥35 kV（高压模块）	GB/T 16935.1，1 min无击穿
电气间隙	按GB/T 16935.1确定	污染等级2级
爬电距离	按GB/T 16935.1确定	材料组别IIIb
保护接地连续性	≤0.1 Ω	接地端子与外壳之间
过压保护动作值	额定电压×115%	—
欠压保护动作值	额定电压×85%	—
过流保护动作值	额定电流×120%	—
短路保护动作值	≥额定电流×200%	—
过温保护动作值	散热器温度≥85℃或；器件结温≥150℃	—

6.9 环境适应性要求

环境适应性要求应符合表9的规定。

表9 环境适应性技术要求

项目	技术指标
低温工作	-25℃，持续16 h
高温工作	55℃，持续16 h
恒定湿热	温度40℃，相对湿度93%，持续48 h
温度变化	-25℃↔55℃，循环5次，转换时间≤3 min
振动耐受	频率10 Hz~55 Hz，振幅0.35 mm；每轴向1 h
外壳防护等级	IP20（室内）；IP54（户外）

6.10 可靠性要求

可靠性要求应符合表10的规定。

表10 可靠性技术要求

项目	技术指标	备注
平均无故障工作时间 (MTBF)	≥50000 h	额定工况, 40 °C 环境
功率循环能力	≥20000次	$\Delta T_{_j} \geq 50 \text{ } ^\circ\text{C}$
温度循环能力	≥1000次	-40 °C ~ 125 °C
高温高湿反偏试验 (H3TRB)	1000 h, 无失效	$T_{_j} = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$, RH=85%, $V_{_{DS}} = 80\%$ 额定值
高温栅偏试验 (HTGB)	1000 h, 无失效	$T_{_j} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_{_{GS}} =$ 额定值

7 试验方法

7.1 试验条件

除另有规定外, 试验应在下列条件下进行:

- 环境温度: 15 °C ~ 35 °C;
- 相对湿度: 45% ~ 75%;
- 大气压力: 86 kPa ~ 106 kPa;
- 电源质量: 电压波形畸变率≤5%, 频率偏差≤0.5 Hz;
- 测量仪器精度: 应符合相关试验方法标准的要求, 准确度等级不低于0.5级。

7.2 外观与结构检查

按表11规定的试验方法进行。

表11 外观与结构检查方法

项目	试验方法	执行标准
外观整洁、无损伤, 标识清晰完整	目测法, 在照度≥300 lx条件下观察	—
电气连接可靠, 接触电阻符合要求	使用微欧计测量关键连接点接触电阻, 电阻值≤1.1倍设计值	GB/T 14048.1
散热结构保证结温不超限	红外热成像仪检查散热器及功率器件表面温度分布, 结合热仿真验证	—
防误插、防反接设计	目测及插拔试验 (至少5次)	—

7.3 输入级性能试验

输入级各项技术要求按表12规定的试验方法进行。

表12 输入级性能试验方法

项目	试验方法	执行标准
额定输入电压 (AC/DC)	施加额定电压, 模块应能正常启动并稳定运行	GB/T 13422
输入电压波动范围	调节输入电压为额定值的85%和115%, 分别运行30 min, 检查功能是否正常	GB/T 13422
功率因数 (PF)	额定负载条件下, 使用功率分析仪测量PF值	GB/T 3859.1
输入电流THDi	额定负载条件下, 使用电能质量分析仪测量THDi	GB/T 17626.30
输入级效率	测量输入功率与输出功率之比, 采用功率分析仪同步采集	GB/T 13422
输入级开关频率	使用示波器测量功率器件栅极驱动信号频率, 允许偏差±5%	GB/T 13422
输入过压保护阈值	缓慢升高输入电压至保护动作, 记录动作电压值 (应为额定值×115%±5%)	GB/T 13422
输入欠压保护阈值	缓慢降低输入电压至保护动作, 记录动作电压值 (应为额定值×85%±5%)	GB/T 13422
输入过流保护阈值	通过负载突增或电流源方式使电流升至额定值×120%, 记录动作值及响应时间 (≤5 μs)	GB/T 13422

7.4 隔离级性能试验

隔离级各项技术要求按表13规定的试验方法进行。

表13 隔离级性能试验方法

项目	试验方法	执行标准
额定输入/输出电压	施加额定电压, 测量原副边电压, 偏差应在±2%以内	GB/T 13422

额定功率	施加额定功率负载，连续运行 ≥ 1 h，无过温或保护动作	GB/T 3859.1
隔离电压（工频）	原边与副边之间施加表2规定的工频耐压，持续1 min，无击穿或闪络	GB/T 16935.1
隔离级效率	测量隔离级输入功率与输出功率之比（额定工况）	GB/T 13422
开关频率	使用示波器测量DAB原边H桥驱动信号频率	GB/T 13422
高频变压器工作频率	使用电流探头测量变压器原边电流波形，读取基波频率	—
高频变压器温升	额定工况运行至热稳定（温度变化 ≤ 1 °C/h），测量热点温度与环境温度之差	GB/T 21419
高频变压器绝缘电阻	原副边间及对地施加500 V直流，测量绝缘电阻（ ≥ 100 M Ω ）	GB/T 3859.1
电压调节范围	调节控制信号占空比或移相角，测量输出电压相对于额定值的变化范围（ $\geq \pm 10\%$ ）	GB/T 13422
功率密度	测量模块（含高频变压器及散热器）外形体积（L \times W \times H），计算额定功率/体积（kW/L）	—

7.5 输出级性能试验

输出级各项技术要求按表14规定的试验方法进行。

表14 输出级性能试验方法

项目	试验方法	执行标准
额定输出电压	施加额定负载，测量输出电压，偏差应在 $\pm 2\%$ 以内	GB/T 13422
额定输出电流	施加额定电流负载，模块应能连续运行	GB/T 3859.1
输出电压精度	额定工况下测量输出电压与设定值的最大偏差（ $\leq \pm 1\%$ ）	GB/T 13422
输出电压THD（AC输出）	线性负载下使用电能质量分析仪测量THD（ $\leq 3\%$ ）	GB/T 17626.30
输出级效率	测量输出级输入功率与输出功率之比	GB/T 13422
输出过压保护阈值	缓慢升高输出电压至保护动作，记录动作值（ \leq 额定值 $\times 110\%$ ）及响应时间（ ≤ 10 μ s）	GB/T 13422
输出过流保护阈值	通过负载突增使电流升至额定值 $\times 120\%$ ，记录动作值及响应时间（ ≤ 5 μ s）	GB/T 13422
短路保护响应时间	输出端直接短路（或通过短路开关），测量从短路发生到保护动作的时间（ ≤ 10 μ s）	GB/T 13422
动态响应时间	负载从20%额定值阶跃至100%（或反之），测量输出电压恢复至 $\pm 5\%$ 稳态值的时间（ ≤ 100 μ s）	GB/T 13422

7.6 功率器件试验

7.6.1 SiC MOSFET 试验

SiC MOSFET各项技术要求按表15规定的试验方法进行。

表15 SiC MOSFET试验方法

项目	试验方法	执行标准
漏-源电压 V_{DS}	使用晶体管图示仪或专用测试仪，施加指定 $V_{GS}=0$ V，测量漏极电流达到250 μ A时的 V_{DS}	GB/T 3859.1
漏极电流 I_D	施加额定 V_{GS} （20 V），逐步增加漏极电流至额定值，检查器件是否在安全区	—
峰值漏极电流 I_{DM}	施加短时（ ≤ 10 μ s）脉冲电流，测量器件能否承受2倍额定 I_D 而不损坏	—
导通电阻 $R_{DS(on)}$	在指定 V_{GS} 和 I_D 下测量漏-源电压，计算电阻（25 °C和175 °C各测一次）	GB/T 3859.1
栅-源阈值电压 $V_{GS(th)}$	$V_{DS}=V_{GS}$ ，漏极电流为规定值（通常250 μ A或1 mA），读取 V_{GS}	GB/T 3859.1
推荐栅极驱动电压	使用示波器测量实际驱动波形，确认导通电压在18 V~22 V，关断电压在-3 V~-5 V	—
最大允许结温 $T_j(max)$	通过热阻法或红外热像法测量，确认器件在 $T_j=175$ °C时仍能正常工作	SJ/T 2658.15
开关能量 $E_{on}+E_{off}$	双脉冲测试，在额定电压、额定电流、25 °C条件下测量开关损耗	-
开关时间	双脉冲测试，测量导通延迟、上升、关断延迟、下降时间	-
体二极管正向压降	测量体二极管导通时的正向压降（@额定电流）	GB/T 3859.1
体二极管反向恢复时间	测量体二极管反向恢复波形，读取 t_{rr}	-
结-壳热阻 $R_{\theta JC}$	电学法或红外法测量，计算 $R_{\theta JC}=\Delta T_j/P_{loss}$	SJ/T 2658.15

7.6.2 GaN HEMT 试验

GaN HEMT各项技术要求按表16规定的试验方法进行。

表16 GaN HEMT试验方法

项目	试验方法	执行标准
漏-源电压 V_{DSS}	类似表26方法, 注意 $V_{GS}=0\text{ V}$, 漏电流达 $250\text{ }\mu\text{A}$ 时 V_{DS}	GB/T 3859.1
漏极电流 I_D	施加额定 V_{GS} (5 V), 逐步增加漏极电流至额定值	—
导通电阻 $R_{DS(on)}$	测量条件: $V_{GS}=5\text{ V}\sim 6\text{ V}$, $I_D=\text{额定值}$	GB/T 3859.1
栅极驱动电压范围	使用示波器测量驱动波形, 确认电压在 $4.5\text{ V}\sim 6.0\text{ V}$ 之间	—
最大允许结温	通过热阻法测量, 确认在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时功能正常	SJ/T 2658.15
开关频率能力	测量驱动信号频率, 应达到产品标称值 (如 2 MHz)	GB/T 13422
栅极电荷 Q_g	使用栅极电荷测试仪测量	IEC 60747-8
输出电容 C_{oss}	使用LCR电桥在 1 MHz 频率下测量	IEC 60747-8
反向恢复电荷 Q_{rr}	双脉冲测试, 验证 $Q_{rr}\approx 0$ (无体二极管)	-
动态导通电阻增量	在 500 kHz 、额定电压电流下连续工作, 测量 $R_{DS(on)}$ 相对于静态值的增量 ($\leq 15\%$)	-
栅极驱动IC CMTI	施加 150 V/ns 共模瞬态电压, 观察驱动输出是否异常	GB/T 17626.4
栅极驱动IC绝缘耐压	驱动IC原副边施加 2500 V_{rms} , 持续 1 min	GB/T 16935.1

7.7 整机性能试验

整机性能各项技术要求按表17规定的试验方法进行。

表17 整机性能试验方法

项目	试验方法	执行标准
整机额定功率	施加额定输入电压和额定负载, 连续运行 $\geq 2\text{ h}$, 无异常	GB/T 3859.1
整机效率	测量整机输入总功率与输出总功率之比 (额定工况)	GB/T 13422
功率密度	测量整机外形体积 (含散热系统), 计算额定功率/体积	—
输出电压精度 (稳态)	额定工况下测量输出电压与设定值的最大偏差 ($\leq \pm 1\%$)	GB/T 13422
输出电压精度 (动态)	负载突变 $20\%\sim 100\%$ 额定值, 测量输出电压最大偏差 ($\leq \pm 5\%$)	GB/T 13422
输出电压纹波 (DC输出)	使用示波器 (20 MHz 带宽) 测量纹波峰峰值 ($\leq 1\%$ 额定电压)	GB/T 3859.1
输入功率因数	额定负载下使用功率分析仪测量	GB/T 3859.1
输入电流THD	额定负载下使用电能质量分析仪测量 ($\leq 5\%$)	GB/T 17626.30
输出电压THD (AC输出)	额定线性负载下测量THD ($\leq 3\%$)	GB/T 17626.30
响应时间	负载突变 (如 $20\%\leftrightarrow 100\%$), 测量输出电压恢复到稳态值 $\pm 5\%$ 的时间 ($\leq 200\text{ }\mu\text{s}$)	GB/T 13422
启动时间	从输入供电开始至输出电压稳定在额定值 $\pm 5\%$ 所需时间 ($\leq 5\text{ s}$)	GB/T 13422

7.8 电磁兼容性试验

电磁兼容性各项技术要求按表18规定的试验方法进行。

表18 电磁兼容性试验方法

项目	试验方法	执行标准
静电放电抗扰度	接触放电 $\pm 6\text{ kV}$, 空气放电 $\pm 8\text{ kV}$, 每点正负极性各10次	GB/T 17626.2
射频电磁场辐射抗扰度	频率 $80\text{ MHz}\sim 1000\text{ MHz}$, 场强 10 V/m , 80% AM调制 (1 kHz)	GB/T 17626.3
电快速瞬变脉冲群抗扰度	电源端口 $\pm 2\text{ kV}$, 信号端口 $\pm 1\text{ kV}$, 频率 5 kHz , 持续 1 min	GB/T 17626.4
浪涌 (冲击) 抗扰度	线-线 $\pm 1\text{ kV}$, 线-地 $\pm 2\text{ kV}$, 正负极性各5次	GB/T 17626.5
射频场感应的传导骚扰抗扰度	频率 $150\text{ kHz}\sim 80\text{ MHz}$, 电压 10 V , 80% AM调制	GB/T 17626.6
电压暂降抗扰度	$0\% U_T > 1$ 周期、 $40\% U_T > 10$ 周期、 $70\% U_T > 25$ 周期, 各施加3次	GB/T 17626.11
传导发射限值	频率 $150\text{ kHz}\sim 30\text{ MHz}$, 按Class A/Class B限值判定	GB/T 21419
辐射发射限值	频率 $30\text{ MHz}\sim 1000\text{ MHz}$, 按Class A/Class B限值判定	GB/T 21419

7.9 安全与保护试验

安全与保护各项技术要求按表19规定的试验方法进行。

表19 安全与保护试验方法

项目	试验方法	执行标准
绝缘电阻(相对地)	500 V兆欧表测量主电路对地绝缘电阻 ($\geq 20 \text{ M}\Omega$)	GB/T 3859.1
绝缘电阻(相对相)	500 V兆欧表测量相间绝缘电阻 ($\geq 100 \text{ M}\Omega$)	GB/T 3859.1
工频耐压	施加表8规定的耐压值, 持续1 min	GB/T 16935.1
电气间隙	使用卡尺测量, 对照GB/T 16935.1判定	GB/T 16935.1
爬电距离	使用卡尺测量, 对照GB/T 16935.1判定	GB/T 16935.1
保护接地连续性	接地电阻测试仪测量接地端子与外壳之间电阻 ($\leq 0.1 \Omega$)	GB/T 14048.1
过压保护动作值	模拟输入/输出过压, 记录动作电压值 (额定值 $\times 115\% \pm 5\%$) 及响应时间	GB/T 13422
欠压保护动作值	模拟输入欠压, 记录动作电压值 (额定值 $\times 85\% \pm 5\%$) 及响应时间	GB/T 13422
过流保护动作值	模拟过流, 记录动作电流值 (额定值 $\times 120\% \pm 5\%$) 及响应时间 ($\leq 5 \mu\text{s}$)	GB/T 13422
短路保护动作值	输出端短路, 记录保护动作电流值 (\geq 额定值 $\times 200\%$) 及响应时间	GB/T 13422
过温保护动作值	加热散热器或功率器件至保护动作, 记录动作温度 (散热器 $\geq 85 \text{ }^\circ\text{C}$ 或结温 $\geq 150 \text{ }^\circ\text{C}$)	GB/T 3859.1

7.10 环境适应性试验

环境适应性各项技术要求按表20规定的试验方法进行。

表20 环境适应性试验方法

项目	试验方法	执行标准
低温工作	-25 $^\circ\text{C}$ 环境中存放2 h后通电, 持续运行16 h, 检查功能	GB/T 2423.1
高温工作	55 $^\circ\text{C}$ 环境中存放2 h后通电, 持续运行16 h, 检查功能	GB/T 2423.2
恒定湿热	40 $^\circ\text{C}$ 、93% RH环境中存放48 h, 期间通电检查功能	GB/T 2423.3
温度变化	-25 $^\circ\text{C}$ \leftrightarrow 55 $^\circ\text{C}$, 循环5次, 转换时间 $\leq 3 \text{ min}$, 高低温各保持 $\geq 30 \text{ min}$	GB/T 2423.22
振动耐受	频率10 Hz~55 Hz, 振幅0.35 mm, 每轴向扫描1 h	GB/T 2423.10
外壳防护等级	按IP20 (室内) 或IP54 (户外) 要求进行防尘、防水试验	GB/T 4208

7.11 可靠性试验

可靠性各项技术要求按表21规定的试验方法进行。

表21 可靠性试验方法

项目	试验方法	执行标准
平均无故障工作时间 (MTBF)	定时截尾试验方案, 累计运行时间 $\geq 10000 \text{ h}$ (可加速), 置信度90%	GB/T 5080.1
功率循环能力	$\Delta T_{\text{j}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, 循环 ≥ 20000 次, 监测导通电阻或饱和压降变化	GB/T 4937.34
温度循环能力	-40 $^\circ\text{C}$ ~ 125 $^\circ\text{C}$, 循环 ≥ 1000 次, 每循环 $\geq 30 \text{ min}$	GB/T 4937.35
高温高湿反偏试验 (H3TRB)	$T_{\text{j}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$, RH=85%, $V_{\text{DS}} = 80\%$ 额定值, 持续1000 h	-
高温栅偏试验 (HTGB)	$T_{\text{j}} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_{\text{GS}} =$ 额定值 (导通偏置或关断偏置), 持续1000 h	-