

分立器件在电驱系统中的应用

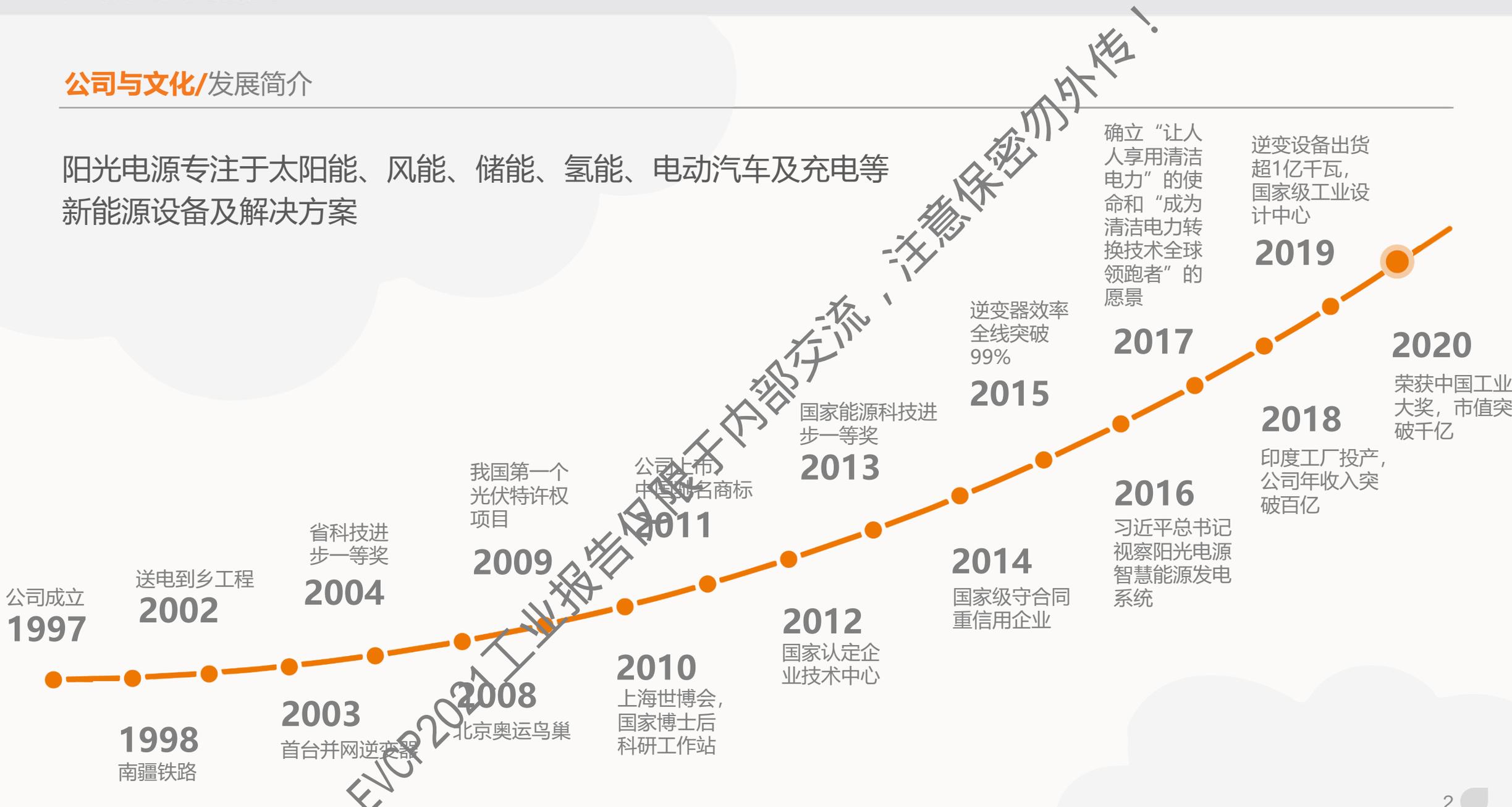
报告人：阳光电力 日期：2021年7月10日

EVCP2021工业报告仅限于内部交流，注意保密勿外传！



公司与文化/发展简介

阳光电源专注于太阳能、风能、储能、氢能、电动汽车及充电等
新能源设备及解决方案



公司与文化/使命、愿景、价值观

使命 让人人享用清洁电力

愿景 成为清洁电力转换技术全球领跑者

价值观 诚恳务实 严谨开放 成就客户

EVCP2021工业报告仅限于内部交流，注意保密勿外传！



公司与文化/十大业务

光伏逆变器



新能源投资开发业务



储能变流及储能系统



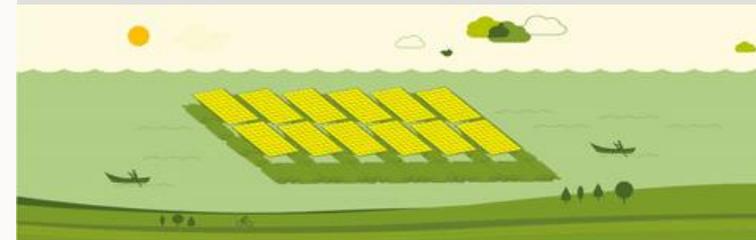
风电变流器



新能源汽车驱动系统



水面光伏系统



智慧运维业务



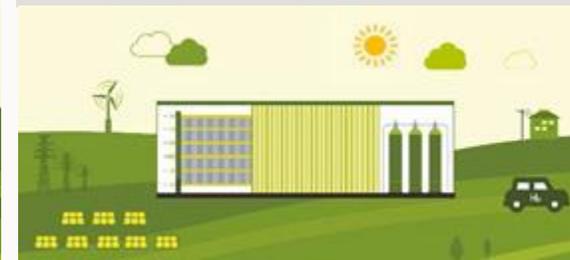
电动汽车充电设备



光伏智能清扫业务



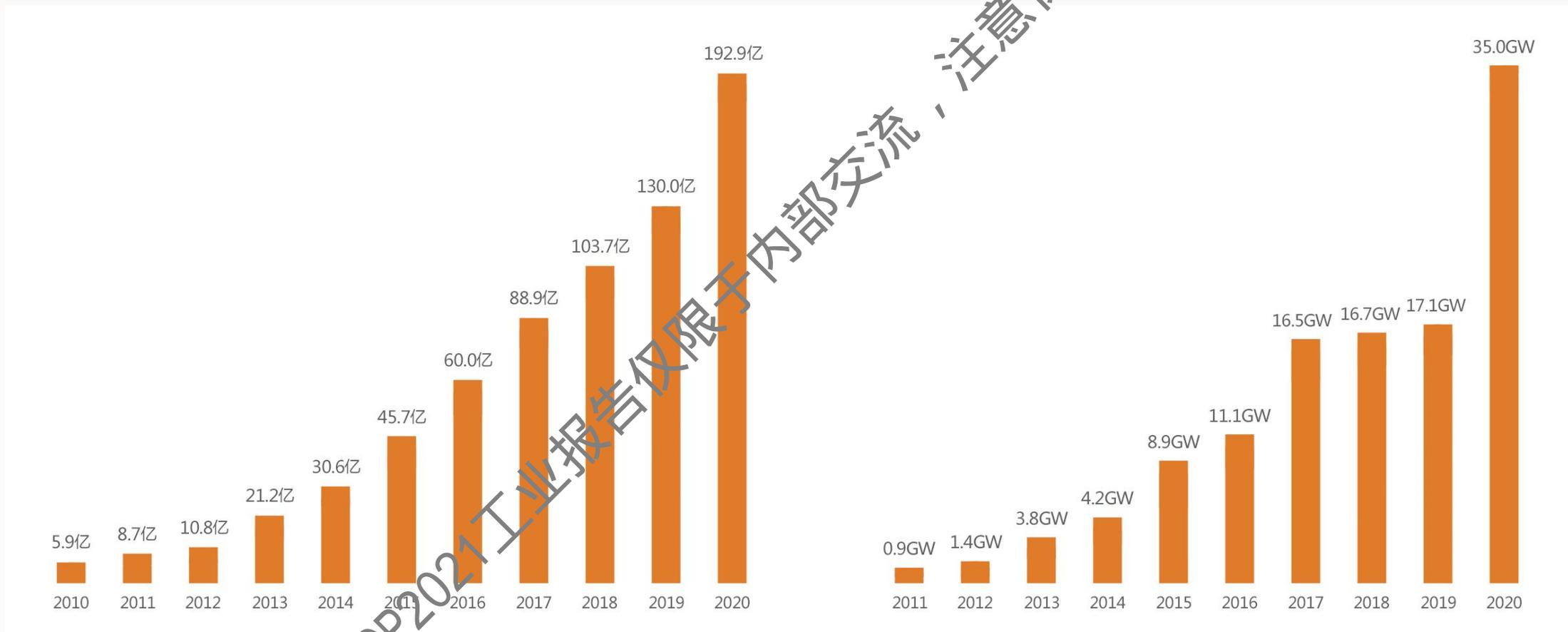
可再生能源制氢系统



注：智能清扫属于阳光生态企业

公司与文化/营业收入

光伏逆变器发货量连续4年全球第一、连续10年中国第一



研发与创新/创新平台



5.5MW光伏实验电站



10米法EM4G电波暗室



3MW储能微网测试平台



35kV 16MW高压实验室



组串与户用设备功能及环境试验

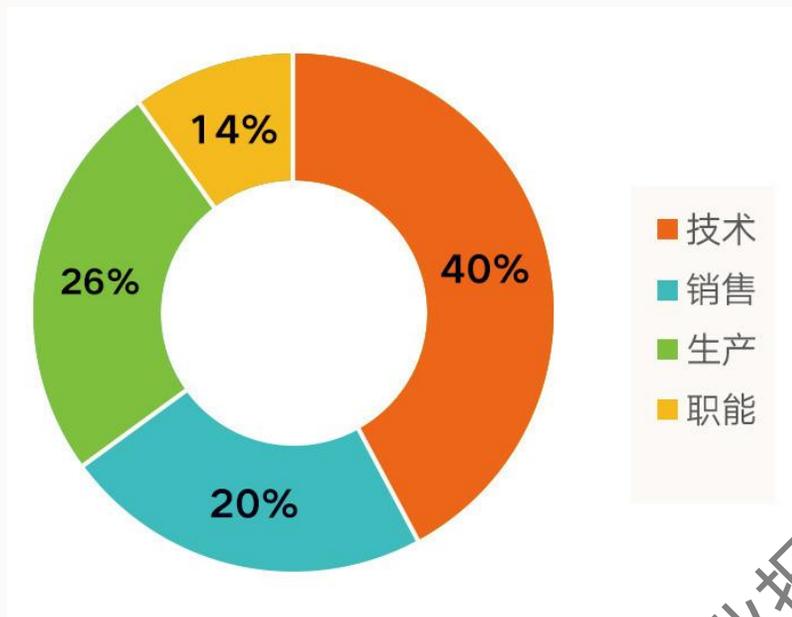


电池、电芯环境安全试验箱

EVCP2021工业报告仅限于内部交流，注意保密勿外传！

研发与创新/创新队伍与模式

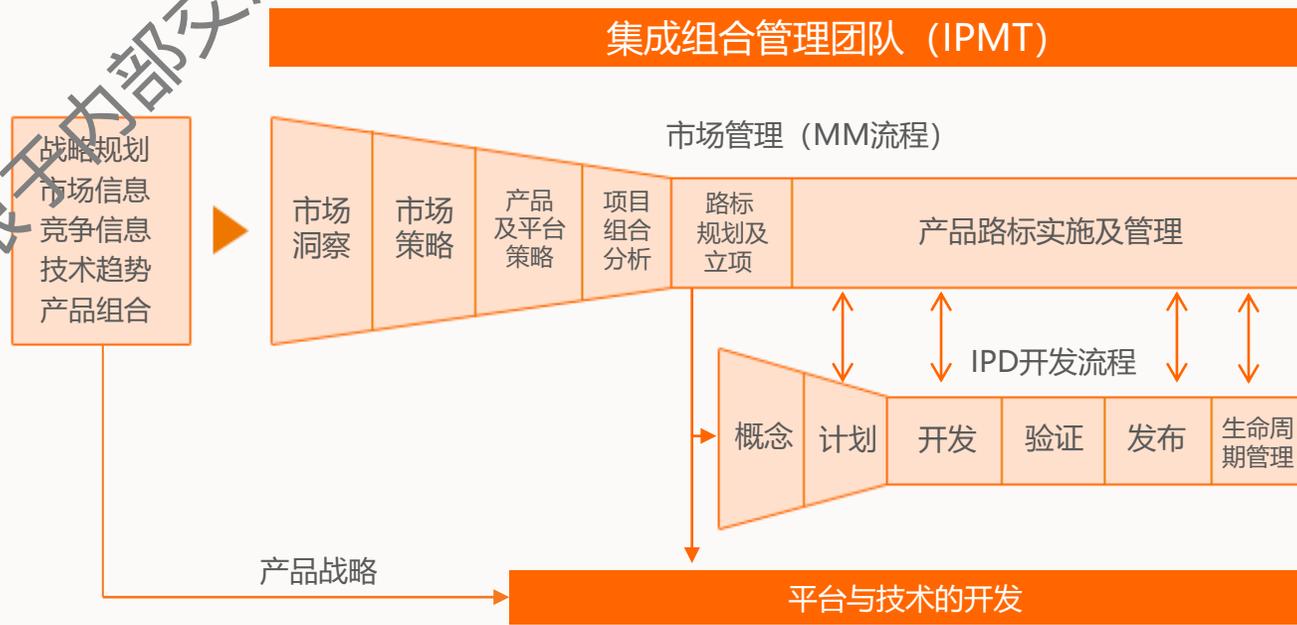
研发人员占员工总数40%



每年高强度研发投入，注重选拔、培养创新型人才，并与合肥工业大学、浙江大学、中国电科院等多家科研院所合作，着力为研发人才提供创新型组织氛围和环境

领先的集成产品开发模式 (IPD)

IPD明确产品开发是投资行为，并且是基于市场的创新、基于平台的异步开发模式和重用策略。



研发与创新/标准制定与专利

● 引领技术方向，主持制定了行业相关国家标准



● 申请专利 2600+，已获得专利权 1600+，其中发明 600+



EVCP2021工业报告仅限于内部交流，注意保密勿外传！

目录

01 Why-为什么选择分立器件并联

02 How-怎么做好

03 What-我们的产品

EVCP2021工业报告仅限于内部交流，注意保密勿外传！

Tesla在Model S 车型采用分立IGBT并联电控产品

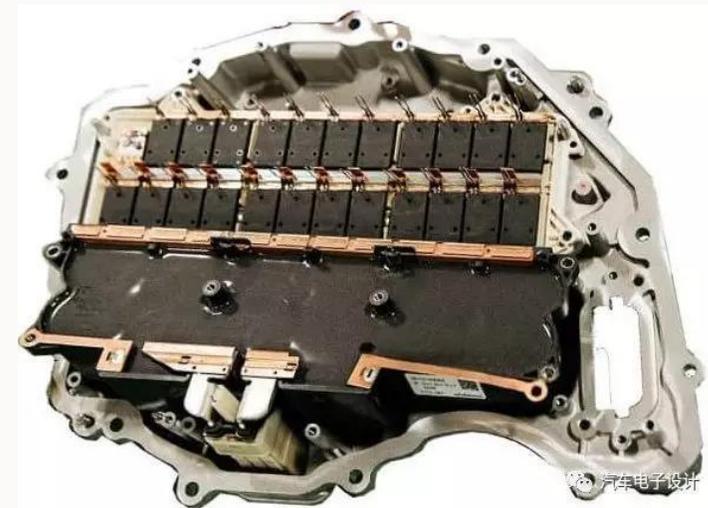
TESLA: 车型MODEL S P100D 控制器峰值功率: **375 kW** 并联数量: **16**只并联



Tesla 分立IGBT并联电机控制器

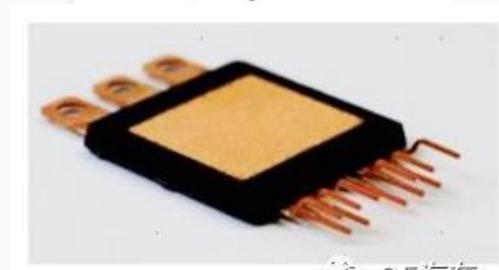
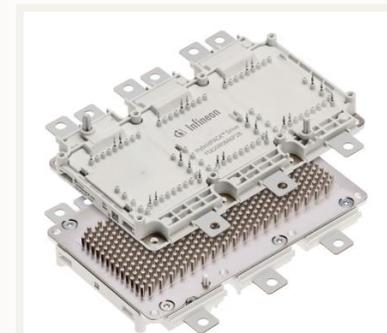
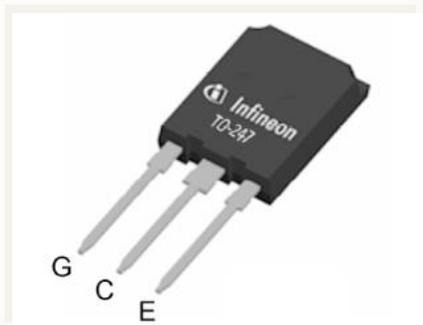
Tesla在Model 3 车型采用分立Sic MOSFET并联电控产品

TESLA: 车型MODEL 3 功率器件: Sic MOSFET 并联数量: 4只并联



Tesla 分立Sic并联电机控制器

理由一：封装简单、良率高



- 标准封装、工艺成熟，良品率高。
- 用途广，产量大，有规模优势。
- **多供方**，各品牌产品规格、封装兼容，有效保障供货。

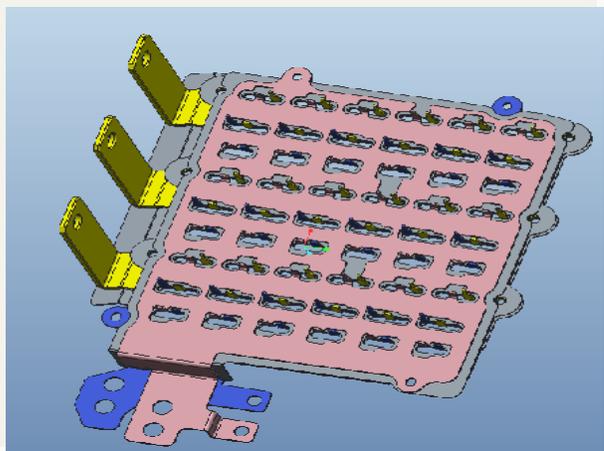
- 模块规格少，可选型号少。
- 各品牌产品规格、封装不兼容，供货渠道单一。

理由二：分立器件并联功率扩展灵活，实现平台化，减少整车开发周期2个月

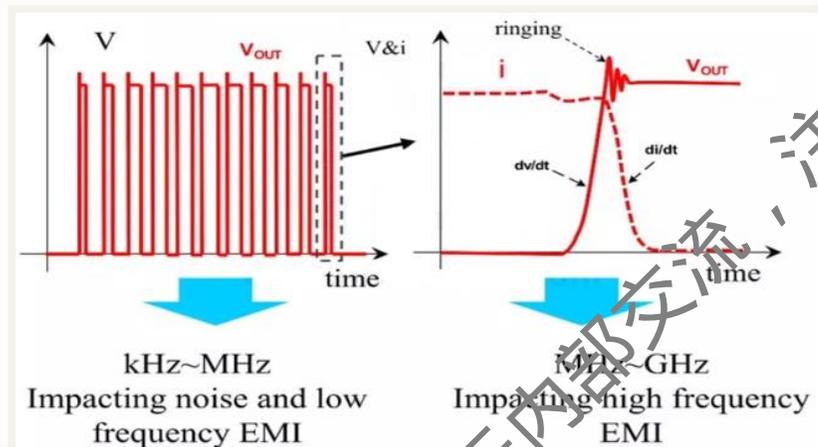
阳光电控型号	额定/峰值容量	持续/短时电流	分立IGBT	IGBT模块	适用车型
EC300	37/74kVA	100/200Arms	2管并联	650V400A	1.5T/A00
EC301	40/85kVA	110/230Arms	3管并联	650V400A	2.0T/A00
EC302	52/111kVA	140/300Arms	4管并联	650V660A	2.5T/A0
EC303	63/137kVA	170/370Arms	5管并联	650V660A	3.5T/A
EC304	78/167kVA	210/450Arms	6管并联	650V820A	4.5T/A+

- 可灵活拓展整体电流输出能力，实现不同的规格，如2单元并联、3单元并联、4单元并联、.....。
- 规避“大马拉小车”带来的价格虚高。
- 同一车型，不同动力配置，不需改电控整车布置、减少整车开发周期。

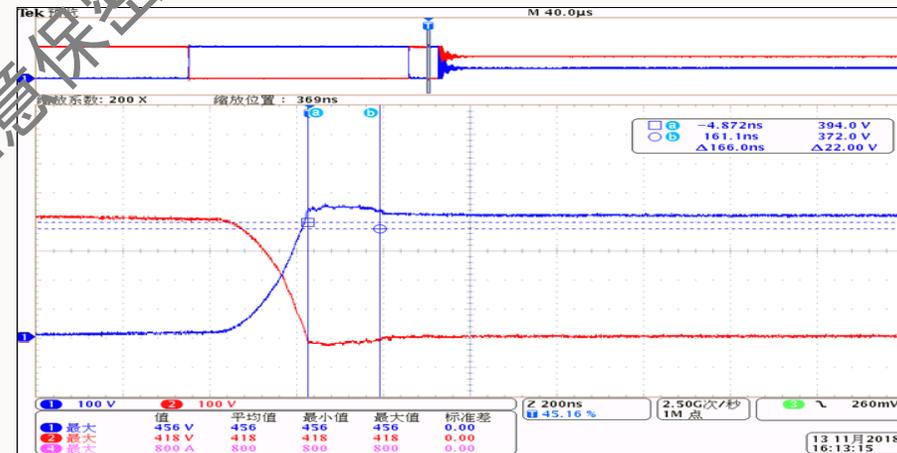
理由三：分立器件+层叠母排，总杂散电感 < 4 nH，高EMC性能



层叠母排



IGBT开关尖峰电压谐振现象

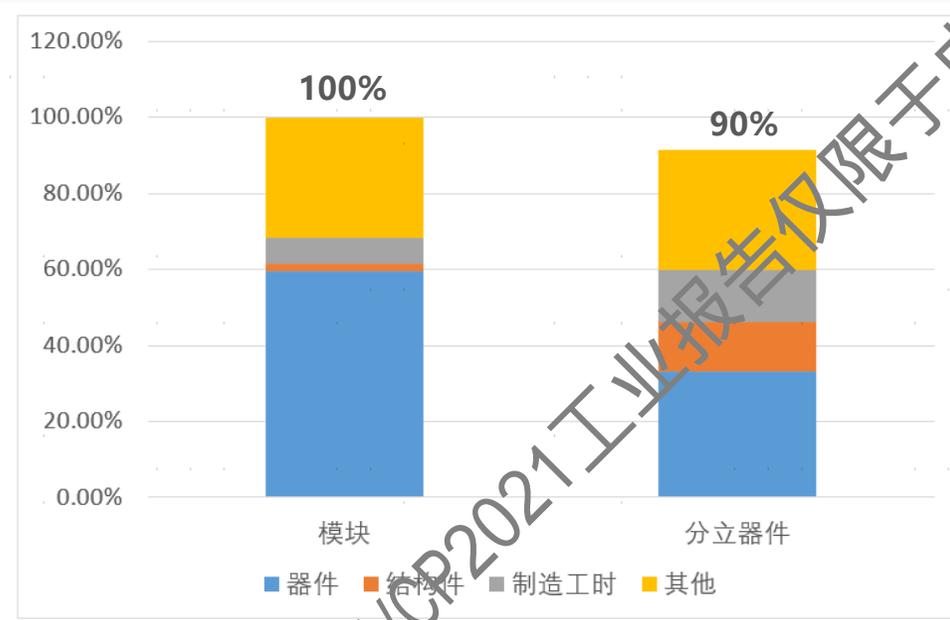


IGBT尖峰电压 $\Delta V < 40V$

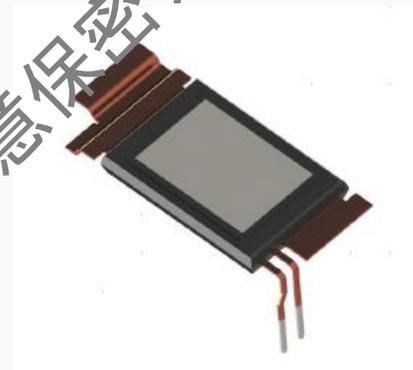
- 分立器件+层叠母排设计可以使得杂散电感 < 4 nH，高频振荡幅值小，高频EMC性能优异。
- 已批量分立器件并联产品全部通过带载EMC Class 3，部分达指标达到 Class 5。

理由四：分立器件并联长期具备成本优势

1. 无含金属的白色外壳
2. 无大面积的铜基板
3. DBC面积小，无需做复杂的电路，良率高
4. 封测过程比模块简单，良率高，工时少，制造成本低



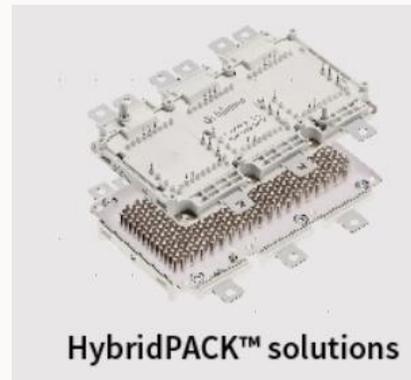
Si 模块 VS Si 单管整机成本对比



TPAK



TO247



HPD



HP1

目录

01 Why-为什么选择分立器件并联

02 How- 怎么做好的

03 What-我们的产品

EVCP2021工业报告仅限于内部交流，注意保密勿外传！

阳光电源23年电力电子技术的沉淀为高可靠产品设计奠定了坚实的基础



功率半导体应用能力

- 器件导入流程、驱动、均流、热设计、EMC



生产制造能力

- MES、50万台/年、500万片PCBA/年



供应链协同能力

- 100亿+采购额/年



试验验证能力

- 器件级可靠性验证、整机可靠性、10m法暗室

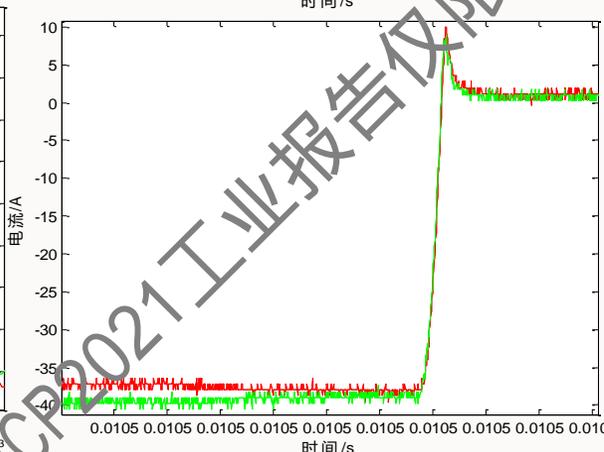
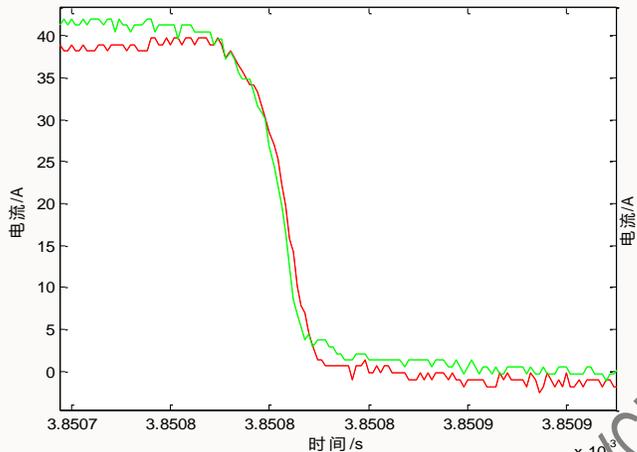
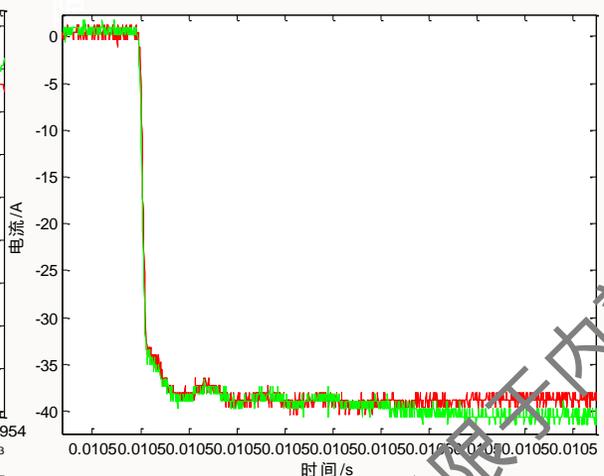
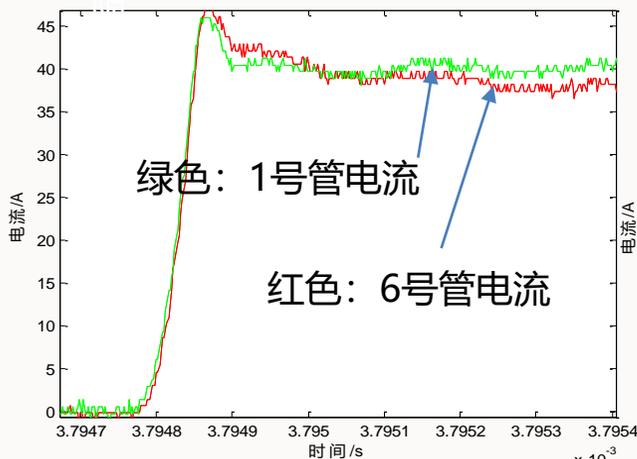
- 阳光电源多个细分领域产品领先：光伏逆变器、储能变流器、风电变流器、电驱、车载电源、充电桩等
- 电力电子技术协同

可靠性措施一：应用的一致性保证

均流测试

60°C水温，W相上桥臂第一象

60°C水温，W相上桥臂第三象



均温测试：

测试项	模块	器件	实测值 (°C)	标准和限值 (°C)	结论
关键器件温度应力	MOS功率器件	母线电容_前	N/A	105	N/A
		母线电容_中	N/A	105	N/A
		W_UP_01	90.133	105	Pass
		W_UP_02	92.296	105	Pass
		W_UP_03	91.466	105	Pass
		W_UP_04	89.903	105	Pass
		W_UP_05	87.159	105	Pass
		W_UP_06	89.012	105	Pass
		W_DW_01	89.013	105	Pass
		W_DW_02	91.326	105	Pass
		W_DW_03	85.017	105	Pass
		W_DW_04	87.32	105	Pass
W_DW_05	81.392	105	Pass		
W_DW_06	89.277	105	Pass		

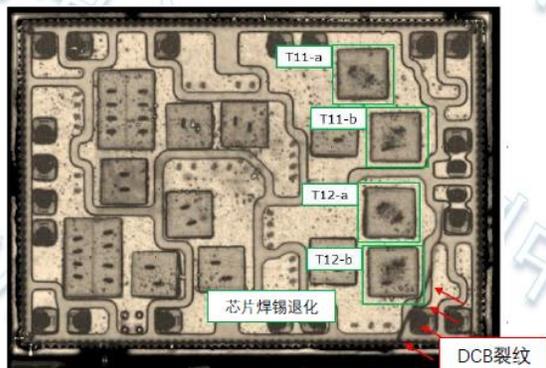
在研发阶段进行均流，均温测试验证单管并联的均流，均温设计

注意：此报告仅限内部交流，严禁保密勿外传！

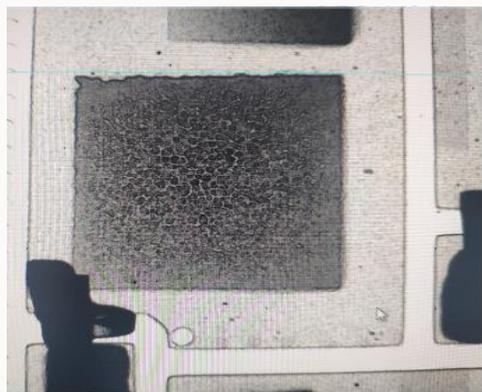
高可靠性设计措施二：严谨的功率半导体器件导入流程保障产品高可靠性

- 阳光器件导入认证测试，确认参数和规格书一致，一个批次内的参数分布数据，确保并联时参数一致性

C-SAM超声扫描图像



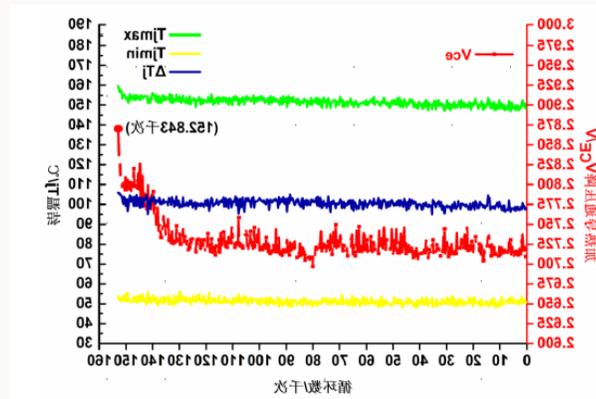
超声波扫描图像分析



X-RAY分析



体式/金相显微镜分析



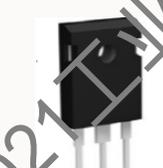
导通压降/热阻记录分析

- 晶圆和器件的筛选，确认并联的分立器件参数一致，保障整机可靠性



晶圆

静态参数测试



封装单管

动态参数测试



单管出厂

出厂筛选分组



电控生产



高可靠性设计措施二：严谨的功率半导体器件导入流程保障产品高可靠性



高压反偏&高温门极
应力试验装置



(高压)高温高湿
反偏试验装置



功率循环&温度循环
试验装置



高加速寿命试验装置



温度冲击试验装置



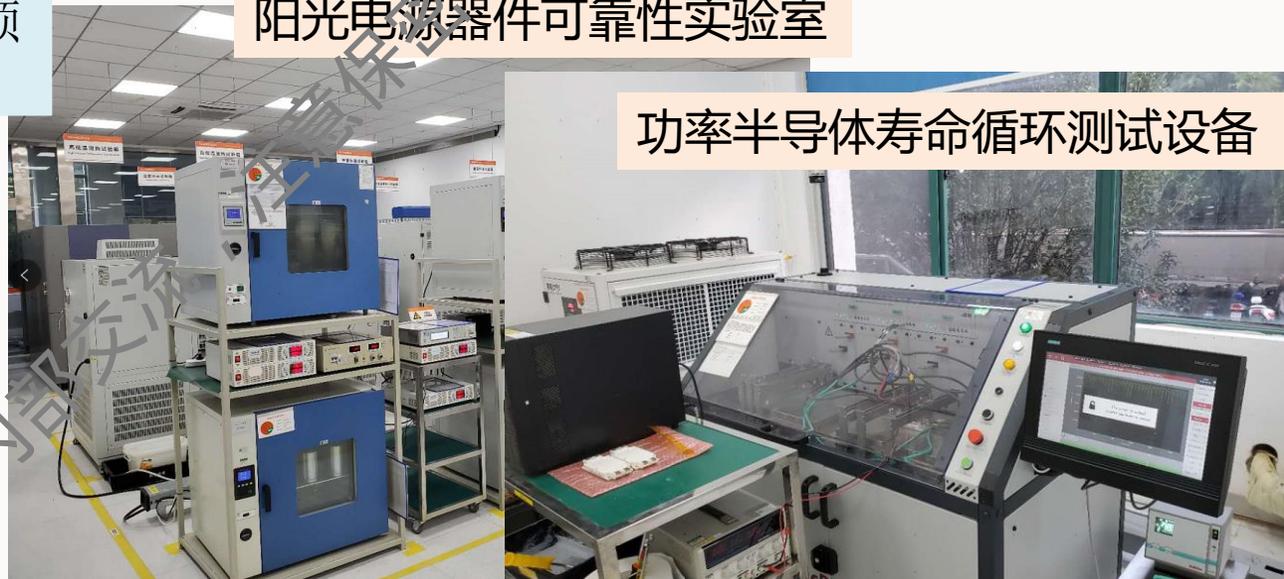
盐雾试验装置

高可靠性设计措施二：严谨的功率半导体器件导入流程保障产品高可靠性

新导入器件均需要完成器件认证测试 - 确保引入器件各项指标/寿命符合规格书

阳光电源器件可靠性实验室

功率半导体寿命循环测试设备



4.1 认证测试项目

试验项目	检查或测试项	参考细则	分级实验			认证结果
			I	II	III	
初始检查	质量规格书	47.5.1	√	√	√	通过
	外观	47.5.1	√	√	√	通过
	尺寸	47.5.1	√	√	√	通过
基本额定值及特性	集电极截止电流 I_{CES}	47.5.2.1	√	√	√	通过
试验	栅极漏电流 I_{GES}	47.5.2.2	√	√	√	通过
	集电极-发射极饱和电压 V_{CEsat}	47.5.2.3	√	√	√	通过
	栅极-发射极阈值电压 $V_{GE(th)}$	47.5.2.4	√	√	√	通过
	结-壳热阻 R_{th-jc}	47.5.2.5	√	√	√	通过
	I_{CES} - V_{CES} 曲线	47.5.2.7	√	√	√	通过
	绝缘耐压测试	47.5.2.8	√	√	√	通过
可靠性试验	高温阻断 HTRB	47.5.3.1	√	×	×	通过
	高温栅极偏置 HTGB	47.5.3.2	√	×	×	通过
	高温高湿阻断 H3TRB	47.5.3.3	√	×	×	通过
	加强型高温高湿阻断 HV-H3TRB	47.5.3.4	√	×	×	通过
	温度冲击试验 TS	47.5.3.5	√	√	×	通过
	功率循环 PCsec	47.5.3.6	√	√	×	通过
	热循环 PCmin	47.5.3.7	√	×	×	不适用
其他试验	可焊性及耐焊接热试验	47.5.4.1	×	×	×	通过
	PIM 拆解分析	47.5.4.2	√	√	√	通过

并联应用器件要求供应商提供批次内的关键参数分布数据

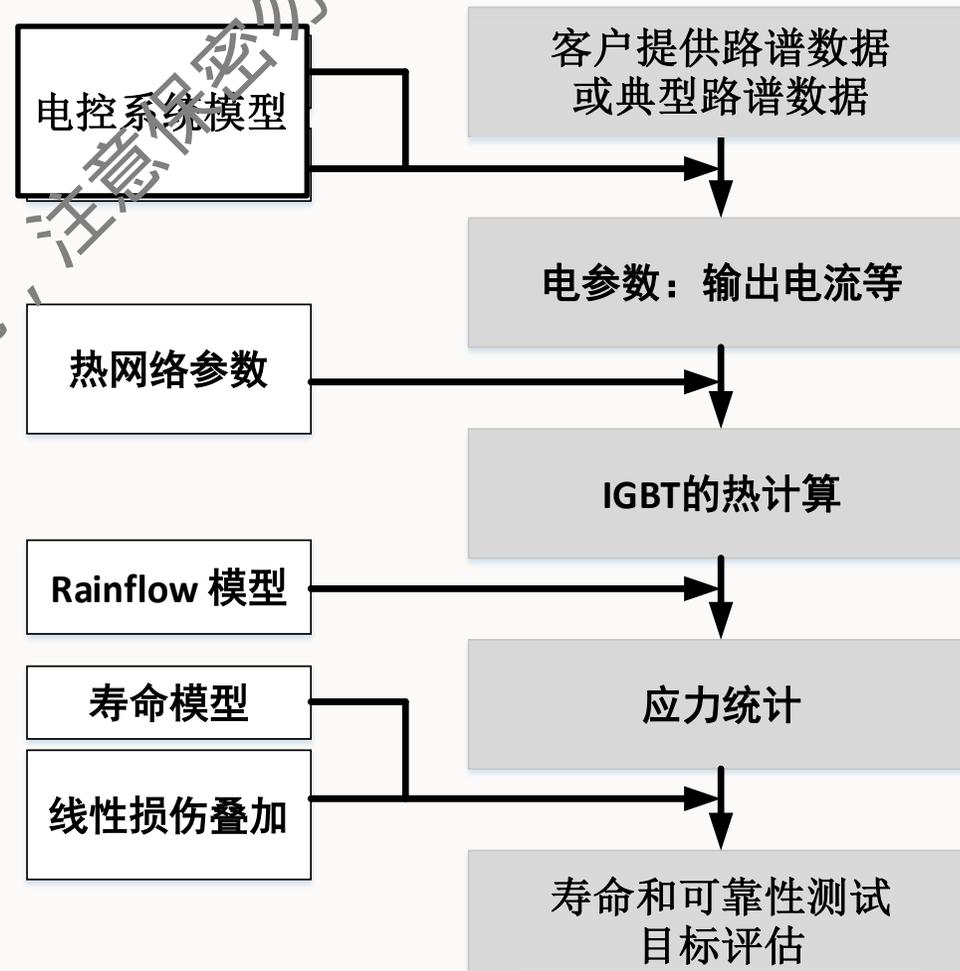
Item	Test Condition	Test Spec				Lot					
		Min	Typ.	Max	Units	Min	Average	Typ	Max	Stdev	Cpk
BVdss	$I_d=1.00mA$	1.2	-	1.8	kV	1.35	1.51	1.52	1.55	0.044	2.20
IGSS	$V_{gs}=25.0V, V_{ds}=0V$	-	-	999	nA	1.00	1.39	1.36	1.79	0.295	1129
ICSSR	$V_{gs}=15.0V, V_{ds}=0V$	-	-	999	nA	0	1.15	0.155	10.00	3.01	111
Rds(on)	$I_d=60.0A, V_{gs}=20.0V$	-	20	28	mΩ	19.4	20.6	20.6	22.3	0.773	3.173
VfSD-	$I_{AK}=30.0A$	-	3.7	-	V	3.48	3.54	3.53	3.69	0.050	NA
gFS	$V_{ds}=20.0V, I_d=60A$	-	36	-	S	34.3	35.8	35.8	37.5	0.864	NA
IDSS	$V_{ds}=1.20kV, V_{gs}=0V$	-	-	-	-	0.044	0.187	0.107	1.09	0.230	NA
Vth	$I_d=20.0mA$	1.8	-	4.3	V	2.47	2.68	2.70	2.80	0.099	2.95

高可靠性设计措施二：严谨的功率半导体器件导入流程保障产品高可靠性

器件可靠性测试 - 以更加严酷的测试标准放大失效概率，更加贴近应用确保采用器件在其应用场景内满足寿命要求（参考AQG-324/英飞凌标准）

项目编号	试验项目	简称	试验目标
1	高温反偏试验	HTRB	芯片耐高温高压性能
2	高温门极应力试验	HTGB	芯片门极稳定性
3	高温高湿反偏试验	H3TRB	芯片耐潮热性能
4	功率循环	PC-sec	长期工作寿命
5	温度循环	PC-min/TC	封装耐温变性能
6	快温变循环	FTC	封装耐温变性能
7	温度冲击	TST	封装耐温变性能
8	高(低)温存储	H(L)ST	可存储能力
9	高应力加速寿命试验	HAST	芯片耐潮热性能
10	高加速寿命试验	HALT	封装耐温变耐振动性能
11	盐雾试验	SFT	封装耐盐雾腐蚀能力
12	机械振动	VIB	坚固度
13	机械冲击	MS	坚固度
14	耐压绝缘	ISO	绝缘性能
15	静电等级	HBM	防静电能力

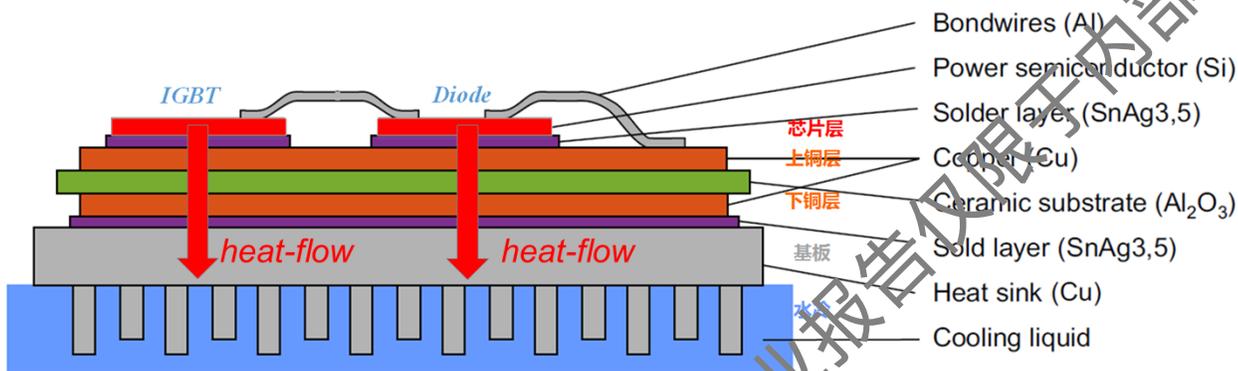
英飞凌可靠性测试项目
 高加速综合应力试验项目
 特定应用测试项目



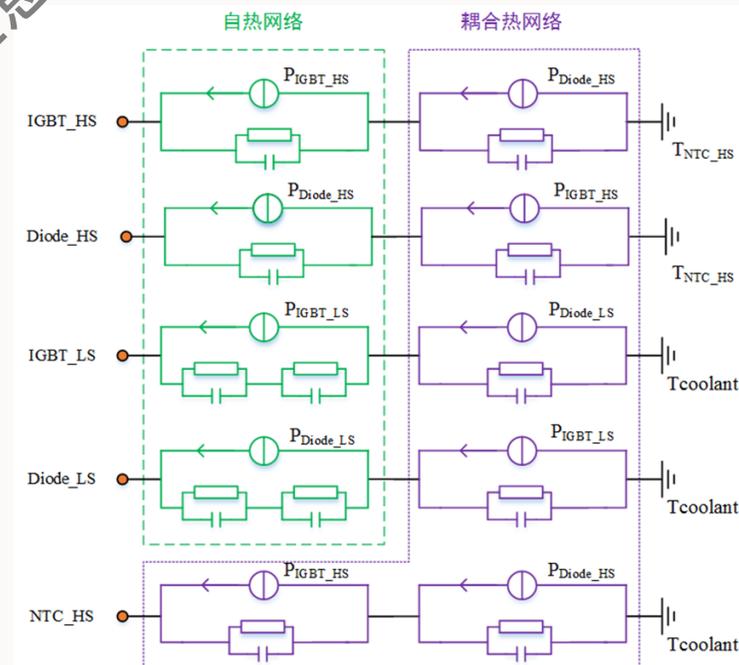
根据器件的实际应用场景获得功率循环测试目标数据，更加真实的反映实际应用场景中的器件寿命

高可靠性设计措施三：采用基于Foster模型的结温估算算法，保障器件结温在安全工作区

- 动态结温估算精度： $< \pm 10^{\circ}\text{C}$
- 静态结温估算精度： $< \pm 3^{\circ}\text{C}$



结构与主要热流路径示意图

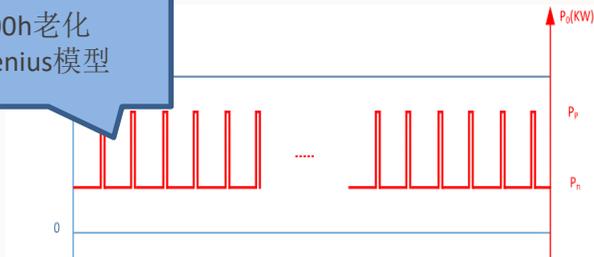


热网络模型

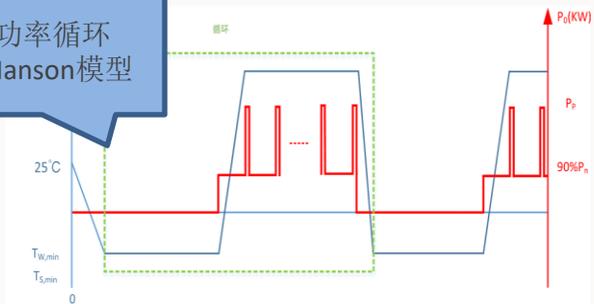
高可靠性设计措施四：整机高加速耐久、可靠性测试保障产品的可靠性

量化质保指标，基于模型推算，严格执行基于寿命目标的老化、温度/功率循环、温度冲击、HALT试验

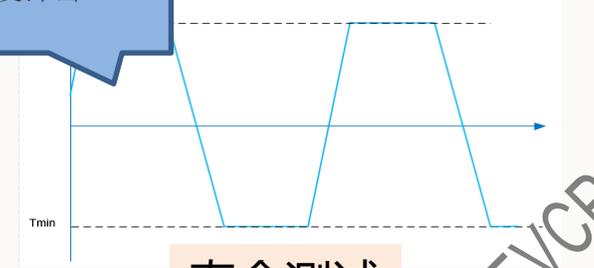
1000h老化
Arrhenius模型



温度/功率循环
Coffin Manson模型



温度冲击



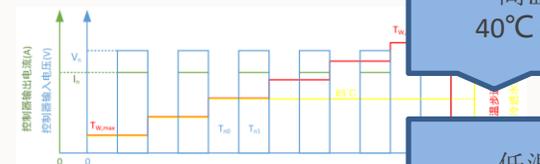
寿命测试

电机控制器可靠性指标 6Y/60W公里

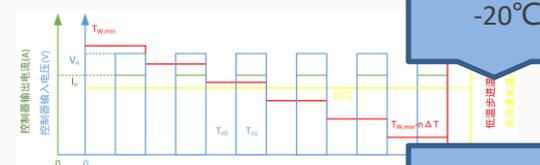
电机控制器典型环境应力条件

参数	符号	参数值
寿命	t_0	6Y=52560 h
工作时间	t_{ON}	10h/D=21900 h
工作时环温	T_{ON}	40°C
非工作时间	t_{off}	14h/D=30660 h
非工作时环温	T_{off}	20°C
温度循环	ΔT_{use}	20°C, 每天2次
总循环次数	N_{use}	4380
随机振动	W_{use}	2.78 g (振动8h等效9180h)
相对湿度	RH_{use}	50%

EVCP2021 内部交流，仅限于内部交流，注意保密勿外传！



高温步进
40°C ~ 160°C



低温步进
-20°C ~ -90°C



快速温变循环
-90°C~ 160°C *5次



振动步进
10Grms~ 90Grms



综合环境应力循环

极限工况测试

可靠性、一致性保证/ 总览

产品研发

器件导入

- 器件导入和认证测试
- 基于应用场景的器件可靠性测试

产品设计

- 均流，均温正向系统设计
- 均流测试，均温测试验证设计

产品测试

- 完善的研发阶段可靠性测试：
 - 温度循环测试
 - 老化测试
 - HALT测试
 - 震动测试
 - 三综合测试
- 内部第三方TR5测试

量产一致性，可靠性等同于模块产品

产品量产

器件入库

- 供应商端芯片/器件级别的静态/动态测试
- 基于均流敏感参数的器件出厂筛选*

生产工艺

- 并联单管的批次控制
- 并联单管的分类管控*
- 关键工艺的流程管控
 - 母排电阻焊
 - 驱动电阻焊接
 - 导热硅脂/银烧结*

出厂检测

- 100%出厂产品峰值电流冲击，筛选均流不佳

* 正在导入中

小结

价值高

- 多家供方，供应链安全
- 电流扩展灵活，易于实现不同动力配置，减少整车开发周期。
- 高EMC性能

高可靠性

- 器件参数一致性
- 功率对称布局实现均流
- 严酷的耐久测试
- 筛选+批次管控
- 强化老化

阳光做得好

- 23年专注电力电子
- 功率半导体应用能力
- 试验验证能力
- 生产制造能力
- 供应链协同能力

注意保密勿外传！

EVCP2021工业报告

分立器件并联技术路线的发展趋势

高密度晶胞技术

- 270A分立器件
- IFX IGBT 7代技术

SIC分立器件大批量使用

- 良率高、封装大，升级快、可获得性强
- 低损耗、高耐温、高开关频率

内绝缘封装技术

减少一层硅脂，降低热阻，

银浆烧结工艺

- 减少一层硅脂，减少压接措施、降低热阻，减小体积

目录

01 Why-为什么选择分立器件并联

02 How- 怎么做好的

03 What-我们的产品

EVCP2021工业报告仅限于内部交流，注意保密勿外传！

A00级乘用车：EC11、EC31、EM31



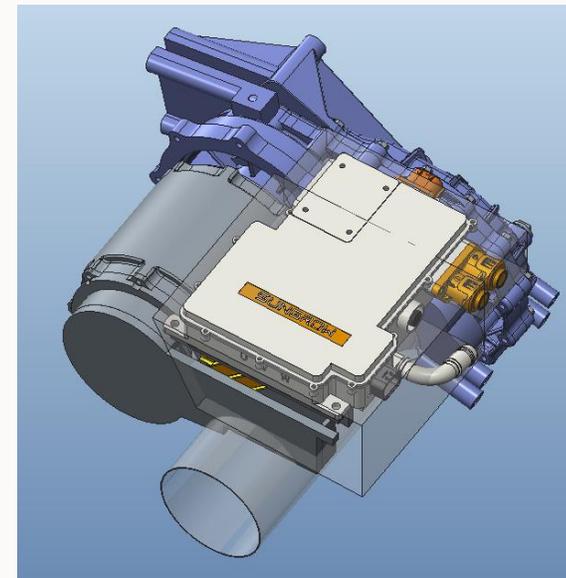
EC11:

- MOS并联
- 电压范围：72V~135V
- 峰值电流范围：350A~450A
- 峰值功率范围：20kW~35kW



EC31:

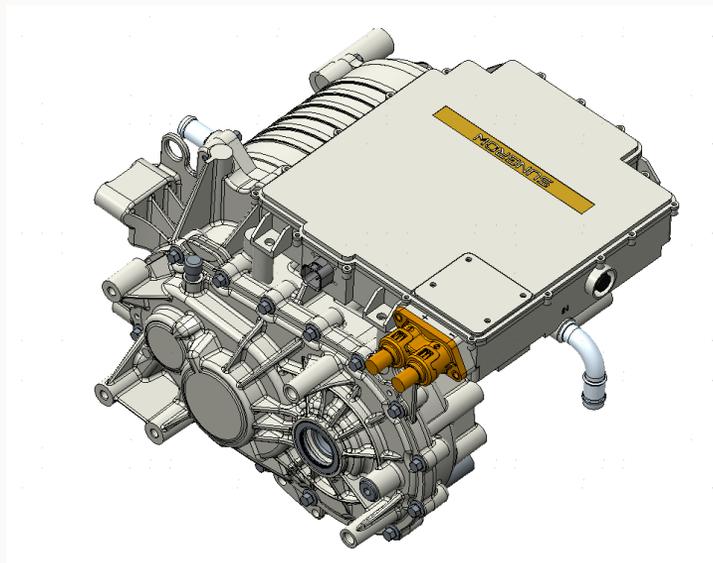
- IGBT并联
- 电压范围：250V~420V
- 峰值电流范围：170A~230A
- 峰值功率范围：35kW~60kW



EM31:

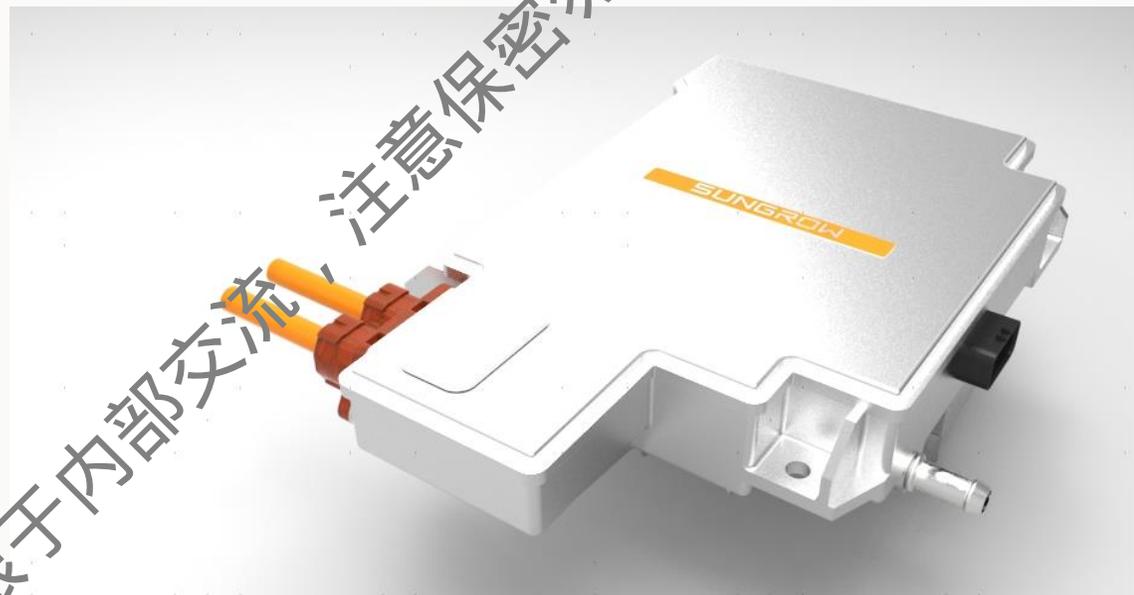
- IGBT并联
- 电压范围：250V~420V
- 峰值电流范围：170A~230A
- 峰值功率范围：35kW~60kW

A/B级乘用车：EM32、EM60



EM32:

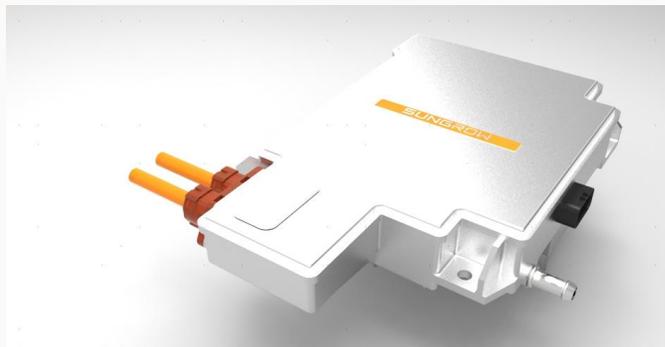
- IGBT并联
- 电压范围：250V~450V
- 峰值电流范围：300A~400A
- 峰值功率范围：70kW~120kW



EM60:

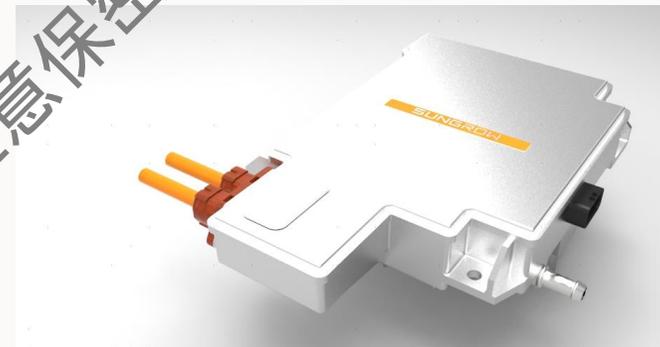
- SIC并联
- 电压范围：400V~**800V**
- 峰值电流范围：330A~400A
- 峰值功率范围：150kW~200kW

A/B级乘用车混动双电机控制器：EM33、EM34



EM33:

- TPAK-IGBT并联：P1：1并+P2：2并
- 电压范围：250V~450V
- 峰值电流范围：P1：170A~P2：300A
- 峰值功率范围：P1：25kW~P2：80kW



EM34:

- TPAK-IGBT并联：P1：2并+P3：3并
- 电压范围：250V~450V
- 峰值电流范围：P1：260A~P2：500A
- 峰值功率范围：P1：70kW~P2：150kW

微面海狮类专用车：EC31、EC30



EC31:

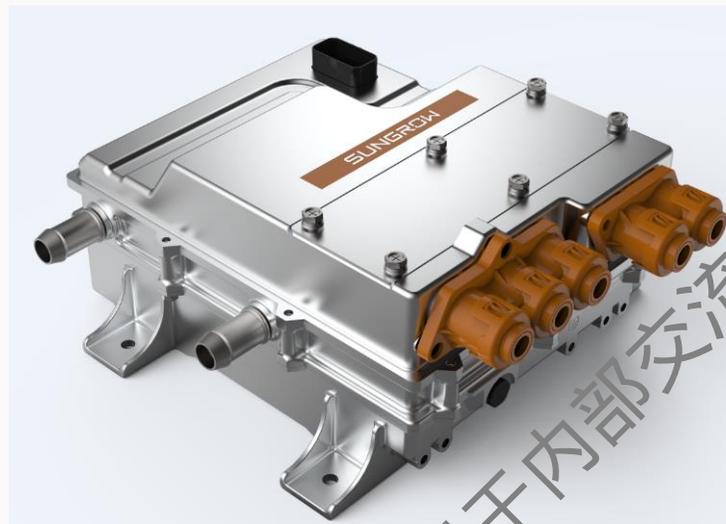
- IGBT并联
- 电压范围：250V~420V
- 峰值电流范围：170A~230A
- 峰值功率范围：35kW~60kW



EC30:

- IGBT并联
- 电压范围：250V~420V
- 峰值电流范围：230A~450A
- 峰值功率范围：50kW~110kW

客车/重卡: EC60



EC60:

- SIC并联
- 电压范围: 400V~**800V**
- 峰值电流范围: 400A~750A
- 峰值功率范围: 180kW~350kW

THANK YOU!

EVCP2021工业报告仅限于内部交流，注意保密勿外传！