



可靠性分析 · 技术文章

# 东南亚EV充电桩

## 可靠性设计指南

面向东南亚地区EV充电站的高温、高湿和盐雾环境下磁性元件可靠性设计要求

市场：泰国 · 越南 · 印度尼西亚 · 马来西亚 · 菲律宾 · 新加坡

发布方	深圳市谱磁科技有限公司 (PROMAGTECH)
文件类型	可靠性分析——EV充电桩区域系列
适用读者	功率电子工程师 · 硬件研发 · 产品经理 · 采购工程师
网址	www.promagtech.com
邮件	zyong@promagtech.cn

## 一、核心结论

**核心结论：**在东南亚部署的EV充电桩中，高环境温度、高湿度和盐雾迫使工程师在确定电感量之前先解决三个设计决策：①高温环境下的电流降额；②绝缘等级至少升至H级；③具有防腐意识的材料和涂层选择。按欧洲或温带气候规格设计的充电桩，在东南亚现场条件下通常在服役的前两年内即出现故障。

## 二、东南亚市场环境特征

东南亚——涵盖泰国、越南、印度尼西亚、马来西亚、菲律宾和新加坡——是全球EV市场增速最快的区域之一。该地区快速城镇化、政府EV激励政策和汽车保有量提升，正在推动交流慢充桩和直流快充桩的大规模部署。

与欧洲或北美的EV充电桩部署不同，东南亚安装场所经常面临超出温带气候产品设计包络的极端环境条件。为东南亚充电桩项目规格化磁性元件的工程师，在选型或批准元件之前必须充分理解这些环境条件及其影响。

### 2.1 温度

国家/地区	年平均气温	极端最高气温	典型充电桩安装环境
泰国	28–34°C	42–45°C	户外停车场，无遮阳；沿海地区
越南	25–33°C	40–43°C	城市户外；屋顶停车场
印度尼西亚	25–32°C	38–41°C	户外；赤道高湿环境
马来西亚	26–33°C	38–40°C	户外；热带雨林气候
菲律宾	25–32°C	38–42°C	台风季；沿海盐雾
新加坡	26–32°C	35–38°C	城市热岛效应；夜间高湿度

对热设计的关键影响：在45°C环境温度下，额定温升 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 的电感在额定电流下绕组温度将达到85°C。如果设计时使用的环境温度是25°C（欧洲标准），相同元件在45°C环境下运行温度将比设计值高20°C——在不做任何设计改动的情况下，接近甚至超过F级绝缘的限值。

### 2.2 湿度

东南亚相对湿度从旱季70%到雨季接近饱和（>95%）。在炎热白天之后的夜间降温，或冷藏设备进入潮湿环境时，经常发生冷凝。对磁性元件的影响：

- 绕组绝缘吸湿：长期降低介电强度，PET（聚酯）薄膜尤其严重，因其亲水性强；聚酰亚胺（PI）薄膜的耐潮湿性远优于PET

- 暴露金属表面腐蚀：铜绕组端头、钢磁芯安装件和铝外壳在高湿度下腐蚀加速，沿海安装点有盐雾气溶胶时更为严重
- 生物生长：相对湿度高于80%时霉菌和真菌迅速繁殖；PCB和绕组表面的真菌生长可形成导电通路，降低绝缘电阻
- 冷表面冷凝：安装在夜间温度显著下降的户外沿海地区时，内部表面冷凝可导致即时漏电流事件

## 2.3 盐雾

泰国、越南、菲律宾和印度尼西亚沿海安装点的盐雾气溶胶浓度，可达内陆工业环境的10–100倍。盐雾对磁性元件有两个主要影响：

- 铜端头和绕组引线腐蚀加速：沉积在裸铜上的盐分形成伽伐尼电池，加速氧化。未做防护的铜端头在户外沿海暴露12–18个月内，即可形成高阻氧化层，造成接触电阻升高并在接头处产生过热。
- PCB爬电路径污染：沉积在高压走线之间PCB表面的盐分，在潮湿时可形成导电膜，有效缩短导体间的功能爬电距离。对于800V母线系统，在IEC 60664-1清洁条件下刚刚满足的爬电距离在此条件下将产生安全风险。

## 三、东南亚条件下的热设计

### 3.1 高温环境下的电流降额

所有面向东南亚部署的磁性元件规格，必须在最高预期环境温度下进行电流降额分析。该关系不是线性的：绕组到环境的热阻固定，因此更高的环境温度在相同损耗功率下直接提高工作温度。

$$T_{\text{绕组}} = T_{\text{环境}} + (P_{\text{损耗}} \times R_{\text{th\_绕组到环境}})$$

对于按 $T_{\text{环境}}=25^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T=55^{\circ}\text{C}$ 设计（额定电流下 $T_{\text{绕组}}=80^{\circ}\text{C}$ ）的元件：在 $T_{\text{环境}}=45^{\circ}\text{C}$ 时，相同的 $55^{\circ}\text{C}$ 温升使 $T_{\text{绕组}}=100^{\circ}\text{C}$ 。若绝缘等级为F级（额定 $155^{\circ}\text{C}$ ），表面上看仍然安全，但额外的 $20^{\circ}\text{C}$ 热应力按Arrhenius模型将绝缘寿命减少约一半。

设计环境温度	$\Delta T=55^{\circ}\text{C}$ 时的额定电流	绕组温度	绝缘寿命影响
25°C（欧洲标准）	100%（基准）	80°C	全额定寿命
35°C（轻度热带）	约92%额定值	90°C	寿命减少约50%
40°C（热带）	约85%额定值	95°C	寿命减少约75%
45°C（极端热带）	约78%额定值	100°C	寿命减少约87%

**设计要求：**对于东南亚部署，额定电流需相对温带气候额定值降额15–22%，或改用额定电流比所需值高15–22%的元件。两种方案都必须针对安装地点的实际机箱、气流和环境温度进行热设计验证。

### 3.2 绝缘等级选择

欧洲或美国市场的标准电感设计通常使用E级（120°C）或B级（130°C）绝缘——对于25–35°C环境温度的温带气候已经足够。对于东南亚部署，F级（155°C）是最低要求，强烈推荐H级（180°C），原因如下：

- 更高的环境温度基线：45°C环境温度加55°C温升已达到100°C绕组温度，距B级绝缘额定值仅剩30°C裕量
- 湿度加速老化：绝缘薄膜的吸湿性增加了介电损耗并降低了击穿电压，在潮湿环境中随时间推移相当于将功能绝缘等级降低了一级
- 循环热应力：凉夜（25–28°C）与炎热下午（40–45°C）之间的每日温度循环，加上变换器本身的热循环，在绕组绝缘中产生加速开裂的机械疲劳
- 更长的服务寿命预期：东南亚EV充电基础设施通常按10年设计寿命部署，要求绝缘系统在比5年欧洲部署更多的热循环次数下保持性能

绝缘等级	最高连续温度	东南亚部署适用性	备注
E级（120°C）	120°C	不推荐	45°C环境温度裕量不足
B级（130°C）	130°C	不推荐	仅比100°C绕组温度高30°C
F级（155°C）	155°C	最低可接受	55°C裕量；需密切监测老化
H级（180°C）	180°C	推荐	80°C裕量；可承受湿度老化降额
N级（200°C）	200°C	最高可靠性	100°C裕量；用于沿海/恶劣环境

### 3.3 磁芯材料温度稳定性

并非所有磁芯材料都能在东南亚部署遇到的25–100°C绕组温度范围内保持一致的磁性性能：

磁芯材料	100°C vs 25°C的 Bsat	100°C的磁导率	东南亚推荐
铁硅铝（KoolMu/Sendust）	约为25°C值的85–90%	稳定±5%	优——东南亚PFC电感首选
铁粉芯（羰基铁粉）	约为25°C值的75–80%	中等下降	可接受——须在100°C时核查Isat裕量
铁氧体MnZn	约为25°C值的80–85%	约70°C峰值后下降	注意——需额外Isat裕量
纳米晶合金	约为25°C值的90–95%	极稳定	优秀——最佳温度稳定性
High Flux（铁镍）	约为25°C值的90%	极稳定	优秀——适合大电流东南亚储能

## 四、湿度与冷凝防护

### 4.1 高湿环境绝缘材料选型

绕组绝缘薄膜的选择对潮湿环境下的长期可靠性有重大影响。主要机制是吸湿，吸湿会增大介电常数和介电损耗因子，并降低击穿电压。

绝缘材料	吸湿率	耐湿性	东南亚推荐
PET（聚酯）薄膜	高（0.3–0.5%）	差——亲水性	沿海/高湿环境避免使用
PI（聚酰亚胺，如Kapton）	极低（<0.03%）	优秀——疏水性	强烈推荐用于东南亚部署
PPS薄膜	极低（<0.05%）	优秀	推荐——良好尺寸稳定性
Nomex（芳纶纸）	中等（1.5–2.5%）	中等	仅用于机械保护；不作主绝缘
玻纤增强PI胶带	极低	优秀	用于高应力端接部位

### 4.2 灌封和覆形涂层

对于东南亚的户外或半户外充电桩安装，对磁性元件组件进行灌封或覆形涂层，是应对湿度、冷凝和盐雾损害最有效的防护手段。

#### 东南亚EV充电桩磁性元件灌封与涂层推荐：

- 环氧灌封（导热系数0.5–2.0 W/m·K）：完全密封绕组，隔绝湿气；同时改善绕组到外壳的热路径。最适合全封闭户外充电桩。
- 聚氨酯覆形涂层（IPC-CC-830）：涂覆在PCB组件表面的耐湿薄膜；适合半封闭充电桩，磁性元件可部分接触检查。热效益低于灌封。
- 硅酮覆形涂层：耐湿和耐高温优良；低温下柔性好（温度循环时不开裂）。适合昼夜温差>15°C的安装地点。
- 无空洞灌封：对于户外沿海应用至关重要——灌封料中的任何气孔都会成为水分聚集点。靠近海岸的元件须采用真空辅助灌封。
- 端接点检查：绕组导体与PCB焊点的连接界面是腐蚀风险最高的位置。确保灌封或涂层完整覆盖导体到端子的连接处。

### 4.3 外壳IP防护等级

充电桩外壳的IP（防护等级）直接决定所有内部元件（包括磁性元件）的湿度和污染防护水平。东南亚推荐的最低等级：

安装位置	最低IP等级	理由
室内（商场、有顶停车场）	IP54	防尘防溅水；低湿度暴露
户外城区（有遮阳结构）	IP65	全防尘；抗水喷射
户外无遮阳（露天停车场）	IP65	全防护；直接雨淋和日晒
沿海（距海1公里以内）	IP66或IP67	强海雾；潜在积水
路边/高速公路充电	至少IP65	维护时高压水洗

## 五、腐蚀防护设计

### 5.1 绕组端接保护

绕组导体端接点——扁平铜线或圆线与DIP引脚、汇流排或PCB焊盘的连接位置——是沿海和高湿环境中腐蚀失效风险最高的点。该位置的腐蚀会增大接触电阻，在负载下产生额外热量，进一步加速腐蚀，形成自我强化的恶性循环。

- 铜端头镀锡：标准表面处理提供基本防腐保护。沿海应用镀层厚度应 $\geq 8 \mu\text{m}$ （温带气候标准值为 $5 \mu\text{m}$ ）。
- 镍阻挡层：铜与锡之间的镍底镀层（ $2-3 \mu\text{m}$ ）可防止铜扩散到锡中形成脆性金属间化合物，避免产生允许水分渗入的微裂纹。
- 焊点上的覆形涂层：即使元件主体已灌封，PCB上的暴露焊点也应施加覆形涂层，防止盐分沿焊点锡角渗入。
- 避免异种金属接触：铝外壳与铜汇流排直接接触，在有水分时会形成伽伐尼电池加速腐蚀。使用兼容金属或提供绝缘隔离层。

### 5.2 磁芯和安装件的腐蚀

磁芯本身通常不受水分腐蚀的影响（铁氧体和粉芯是陶瓷或聚合物粘合结构），但安装件——螺钉、压片和支架——可能腐蚀，并对磁芯产生机械应力。面向东南亚部署的磁性元件组件中，所有安装件须规格化不锈钢或镀锌钢。铝制安装件可用于非承载支架，但在沿海地区须进行阳极氧化处理。

## 六、东南亚条件下的电气设计调整

### 6.1 湿度条件下的绝缘电压

绕组绝缘和PCB爬电间隙在潮湿条件下的有效绝缘强度会降低。IEC 60664-1通过污染等级分类来处理这个问题：

污染等级	环境描述	东南亚适用性	对爬电距离的影响
PD 1	无污染；密封环境	仅适用于实验室；非现场充电桩	最小爬电距离
PD 2	非导电性污染；偶尔冷凝	室内清洁环境充电桩	标准爬电距离计算
PD 3	导电性污染或预期冷凝	户外充电桩；沿海/高湿地点	爬电距离×1.5–2倍
PD 4	持续导电性；持续冷凝	沿海；重工业；积水风险	最高爬电距离要求

对于东南亚户外安装，污染等级3 (PD3) 是多数地点的正确分类。这要求爬电距离约为在相同工作电压下温带室内设备的1.5–2倍。对于沿海地点（菲律宾、越南东部、印度尼西亚群岛），应考虑使用污染等级4 (PD4)。

### 6.2 高温下饱和电流的重新验证

所有磁芯材料的饱和磁通密度 ( $B_{sat}$ ) 随温度升高而下降。对于东南亚的PFC电感：

- 铁硅铝 (KoolMu) :  $B_{sat}$ 从25°C到100°C下降约10–15%。若室温设计裕量低于30%，须在100°C下验证 $I_{sat}$ 。
- 铁粉芯:  $B_{sat}$ 从25°C到100°C下降约20–25%，需要更积极的降额，100°C下的 $I_{sat}$ 验证为必须项。
- 铁氧体MnZn:  $B_{sat}$ 通常在70°C前略有增加，然后在100°C以上急剧下降。下降的急剧性使任何接近饱和的铁氧体设计都必须在100°C下验证 $I_{sat}$ 。
- 纳米晶:  $B_{sat}$ 极稳定 (25°C到125°C变化<5%)。在温度不确定性较高的应用中为首选。

## 七、东南亚认证的加速寿命测试

在东南亚部署的充电桩制造商，应要求磁性元件供应商在代表实际现场环境的加速寿命测试条件下证明可靠性。以下测试序列适合东南亚认证：

测试	标准参考	东南亚特定条件	合格判据
湿热	IEC 60068-2-78	40°C / 93% RH / 1000小时	无击穿；DCR变化<5%；电感量变化<10%
温度循环	IEC 60068-2-14	-25°C至+85°C / 500次循环 (每端保温30分钟)	无开裂；无分层；电气参数在规格内
盐雾	IEC 60068-2-52	5% NaCl / 35°C / 96小时 (沿海规格)	端接点无影响性能的腐蚀
热冲击	IEC 60068-2-11	-25°C至+85°C / 100次循环 (快速转移)	无磁芯开裂；绕组完整性保持
绝缘电阻	IEC 60068-2-78后测	500 VDC / 湿热后测量	IR > 10 MΩ (处理后)

测试	标准参考	东南亚特定条件	合格判据
耐压后条件	项目专属	完整耐压测试（盐雾+湿热后）	初始耐压电压80%下无击穿

## 八、东南亚EV充电桩磁性元件规格清单

### 东南亚部署必须规格化的参数：

- 安装地点的最高环境温度——注明40°C、43°C或45°C；不使用欧洲标准25°C
- 外壳IP防护等级——户外最低IP65；沿海IP66/IP67
- 最高环境温度下的额定电流——计算降额后的电流，而非铭牌25°C额定值
- 绝缘等级——户外热带部署至少规格化H级（180°C）
- 绝缘薄膜类型——规格化PI或PPS；拒绝用于潮湿暴露应用的PET
- 灌封要求——沿海和户外安装规格化无空洞环氧灌封
- 端接表面处理——沿海须规格化镀锡 $\geq 8 \mu\text{m}$ 加镍阻挡层；焊点上覆形涂层
- 爬电距离计算的污染等级——户外取PD3；沿海/岛屿地点取PD4
- 磁芯材料及100°C时的 $I_{\text{sat}}$ ——须验证，不能仅在25°C室温下验证
- 盐雾测试——距海1公里以内的安装须规格化IEC 60068-2-52沿海级测试
- 湿热测试——至少规格化IEC 60068-2-78 / 40°C / 93% RH / 1000小时

## 九、常见问题

### Q1：能否将欧洲或美国产品的磁性元件规格直接用于东南亚部署？

不能。欧洲和美国规格通常假设最高环境温度25–35°C、中等湿度（<70% RH）和低污染程度。东南亚户外部署需要：最高环境温度40–45°C、湿度至95% RH、沿海地区盐雾，以及PD3或PD4爬电距离。这些条件要求绝缘等级升级（至少H级）、电流降额、PI或PPS薄膜（不能用PET），以及灌封或覆形涂层。直接复用温带规格是东南亚充电桩项目中最常见的现场失效原因之一。

### Q2：45°C环境温度安装时，电感电流应该降额多少？

所需降额取决于元件的热阻（绕组到环境的 $R_{\text{th}}$ ）和绝缘等级。作为初步估算，相对于25°C环境、 $\Delta T=55^\circ\text{C}$ 的额定电流，降额15–22%可维持相同的绕组温度。正确方法是重新计算热预算： $T_{\text{绕组}}=T_{\text{环境}}+P_{\text{损耗}} \times R_{\text{th}}$ 。向供应商索取元件的 $R_{\text{th}}$ 值，计算拟降额电流下的 $P_{\text{损耗}}$ ，并验证 $T_{\text{绕组}}$ 在绝缘等级温度限值以下留有足够裕量。

**Q3: 东南亚EV充电桩磁性元件最常见的失效模式是什么?**

根据该地区的现场经验，三种最常见的失效模式是：①高温与高湿共同作用导致的绝缘降解——表现为绝缘电阻降低，继而出现绕组对磁芯漏电或短路；②沿海地点绕组端接腐蚀——表现为间歇性高阻连接和局部过热；③高温下磁芯饱和——表现为纹波电流增大和变换器不稳定，因为磁芯在80–100°C工作温度下的B<sub>sat</sub>低于规格化时25°C测试温度下的值。

**Q4: 本指南中的数值可以直接用于量产吗?**

不可以。本指南中的所有数值均为工程参考。量产值必须通过在实际东南亚工作条件下的批准样品和认证测试来确认：高温环境下的测试、湿热后的电气验证、盐雾后的端接检查，以及在适当污染等级爬电距离下的耐压测试，在量产发布前逐一完成。

## 十、联系与相关资源

资源	链接
20–60 kW PFC电感设计指南	<a href="http://promagtech.com/technical-resources/20-60kw-pfc-inductor-selection-guide.html">promagtech.com/technical-resources/20-60kw-pfc-inductor-selection-guide.html</a>
800V EV平台电感选型指南	<a href="http://promagtech.com/technical-resources/800v-ev-platform-inductor-selection.html">promagtech.com/technical-resources/800v-ev-platform-inductor-selection.html</a>
充电站PFC电感产品	<a href="http://promagtech.com/products/charging-pile-pfc.html">promagtech.com/products/charging-pile-pfc.html</a>
PFC升压扁平线电感产品	<a href="http://promagtech.com/products/pfc-boost-inductor.html">promagtech.com/products/pfc-boost-inductor.html</a>
扁平线vs圆线电感选型指南	<a href="http://promagtech.com/technical-resources/flat-wire-vs-round-wire-inductors.html">promagtech.com/technical-resources/flat-wire-vs-round-wire-inductors.html</a>
AIDC与储能PCS大电流设计指南	<a href="http://promagtech.com/technical-resources/aidc-energy-storage-pcs-high-current-inductor-design.html">promagtech.com/technical-resources/aidc-energy-storage-pcs-high-current-inductor-design.html</a>

<p><b>深圳市谱磁科技有限公司</b></p> <p>zyong@promagtech.cn</p> <p>WhatsApp: +86 135 3765 8938</p> <p>www.promagtech.com</p>	<p><b>响应承诺</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>收到完整规格后24小时内给出初步设计评估</li> <li>3个工作日内提供正式报价</li> <li>标准定制样品5–7个工作日可交付</li> </ul>
---	---