



SHENZHEN PROMAGTECH CO.,LTD. | 深圳市谱磁科技有限公司

Engineering Reference · www.promagtech.com · PMT-DOC-2026-0729-10 · Rev A/0

## 绝缘设计与部分放电(PD)测试方法论

800V 平台专篇——爬电间隙、PDIV 测试与绕组结构,磁件怎么真正过绝缘协调

| 项目        | 内容                                                         |
|-----------|------------------------------------------------------------|
| 文件编号 / 版本 | PMT-DOC-2026-0729-10 · Rev A/0 · 首次发布                      |
| 文件名称      | 绝缘设计与部分放电(PD)测试方法论——800V 平台专篇                              |
| 适用范围      | 800V 级磁性元件的爬电/电气间隙协调、PDIV 测试与绝缘结构设计                        |
| 作者 / 审阅   | 张勇 — 电子工程师、谱磁科技创始人                                         |
| 日期        | CN-1.0 / 2026-07-29                                        |
| 网站 / 联系   | www.promagtech.com · +86 13267069291 · zyong@promagtech.cn |

修订记录:A/0 2026-07-29 首次发布。谱磁工程参考图谱 — 非官方行业标准。

**数据声明** 本文数值为典型/示意的设计参考,最终以样品实测数据与双方承认书为准。



## 摘要与关键点

### 一句话结论

**800V 平台的磁件不是“绝缘做厚一点”就安全,而是三件事分开算:①爬电距离按工作电压+污染等级+材料组算(IEC 60664-1),②电气间隙按冲击耐压+过电压类别+海拔修正算,③局部放电(PD)是绝缘寿命的隐形杀手——哪怕耐压测试通过,PD 长期作用下绝缘会被电树/电蚀穿。三者任一漏项,800V 磁件在现场都可能提前失效。**

### 关键点:

- **爬电与间隙是两件事:**爬电距离防表面闪络,按工作电压/污染等级/材料组(CTI)算;电气间隙防空气击穿,按冲击耐压/过电压类别/海拔算。两者互不替代。
- **耐压测试≠绝缘寿命验证:**Hipot 只测瞬时是否击穿;PD 测的是绝缘内部微观缺陷(气泡/空隙)在工作电压下是否已经在放电——这才是长期失效的根因。
- **PDIV 是关键判据:**局部放电起始电压(PDIV)需要显著高于系统工作电压才有安全裕量;工厂验收判据通常为规定电压下 PD 量 <某 pC 阈值(按项目定,常见范围数十至数百 pC,车规/高可靠场景更严)。
- **工艺决定 PD,不只是材料:**真空浸渍去除绕组内气泡、灌封无空洞、绝缘层无褶皱/尖角——工艺缺陷比材料选择对 PD 的影响更直接。
- **800V 平台要按增强绝缘设计:**一次侧到二次侧(或到磁芯/地)按“基本绝缘”还是“增强绝缘”设计,直接决定爬电/间隙裕量要乘的安全系数。
- **海拔要修正:**电气间隙的耐受能力随海拔升高而下降(空气稀薄、绝缘能力降),高海拔应用(高原基站/山地电站)要额外修正电气间隙。

**说明** 本文是谱磁的工程参考(非官方标准);与《800V 总纲》《CLLC 双向变压器选型》《AEC-Q200》互为姊妹篇,专门补齐绝缘/PD 这一环的方法论深度。

## 1. 为什么 800V 磁件需要单独一篇讲绝缘

400V 平台切到 800V 平台,工作电压翻倍,但爬电/间隙裕量不是线性翻倍那么简单——IEC 60664-1 的查表是分段非线性的,而且局部放电风险会随电压升高显著加剧(电场强度更高,微观缺陷更容易起晕)。800V 平台的磁件(OBC PFC 电感、CLLC 变压器、母线滤波共模电感)如果照搬 400V 平台的绝缘裕量,大概率不够;而单纯“加厚绝缘”又会牺牲窗口面积、增加漏感、推高成本。这篇把绝缘协调和 PD 测试的方法论讲清楚,目的是让工程师能自己算裕量、看懂 PD 报告,而不是被动等供应商一句“我们过了耐压”就签字。



## 2. 电气间隙与爬电距离:两套完全不同的算法

| 维度                           | 电气间隙(Clearance)    | 爬电距离(Creepage)             |
|------------------------------|--------------------|----------------------------|
| 防止什么                         | 空气中被击穿(电弧)         | 沿绝缘表面被闪络(污染/湿气导电通路)        |
| 决定因素                         | 冲击耐压、过电压类别、海拔      | 工作电压(RMS/DC)、污染等级、材料组(CTI) |
| 典型来源标准                       | IEC 60664-1 表 2~4  | IEC 60664-1 表 F.4~F.8      |
| 800V 典型量级(污染等级2,材料组 IIIa,示意) | 约 2~3mm 量级(经海拔修正后) | 约 8mm 量级(未叠加安全裕量前)         |
| 常见误区                         | 只查间隙就以为绝缘够         | 只加大爬电、不修正海拔                |

表 1 — 电气间隙与爬电距离对照(数值为示意量级,以实测/查表结果为准)

换句话说:电气间隙管的是“空气会不会被电死”,爬电距离管的是“表面会不会被慢慢导通”。800V 平台两者都要单独查表计算,不能用其中一个替代另一个。

## 3. 电气间隙怎么算:从冲击耐压到海拔修正

步骤 1 由系统电压 + 过电压类别(如 CAT II/III) → 查额定冲击耐压(kV)

步骤 2 由冲击耐压 + 污染等级 → 查基础电气间隙(mm,IEC 60664-1 表)

步骤 3 海拔修正:海拔 > 2000m 时,按海拔修正系数放大间隙

示例(仅示意,非设计值):冲击耐压 2.5kV、基础间隙 1.5mm、某海拔修正系数 1.48 → 修正后间隙 ≈ 2.22mm

**关键** 冲击耐压由系统电压和过电压类别决定,不是拍脑袋定;800V 平台常见过电压类别为 CAT II/III,要和整机安规工程师对齐,不能磁件单独定义。

## 4. 爬电距离怎么算:工作电压 × 污染等级 × 材料组

| 污染等级       | 环境描述                 | 典型场景            | 对爬电的影响   |
|------------|----------------------|-----------------|----------|
| PD1(污染等级1) | 无污染或仅干燥非导电污染         | 密闭灌封、无尘         | 爬电要求最低   |
| PD2(污染等级2) | 一般只有非导电污染,偶尔因结露而导电   | 车规磁件常按此假设(未灌封时) | 中等,最常用假设 |
| PD3(污染等级3) | 有导电污染,或干燥非导电污染因结露而导电 | 户外/工业未防护环境      | 爬电要求显著提高 |

表 2 — 污染等级定义与典型场景(简化自 IEC 60664-1;项目应按实际环境重新核定等级)

材料组(CTI,耐漏电起痕指数)也影响爬电距离——材料组 IIIa/IIIb(CTI 较低)比材料组 I(CTI ≥600)需要更大的爬电距离。绕组绝缘材料、骨架材料、灌封材料的 CTI 都要在设计输入阶段确认,不能等到样品阶段才发现材料组不达标。



爬电距离 = f(工作电压, 污染等级, 材料组) ——查 IEC 60664-1 表,不是线性公式

示例(仅示意):DC 800V、污染等级 2、材料组 IIIa → 爬电距离下限量级 ≈ 8mm(叠加设计裕量前)

## 5. 基本绝缘 vs 增强绝缘:800V 平台怎么选

| 绝缘等级 | 定义                   | 800V 平台典型应用                       |
|------|----------------------|-----------------------------------|
| 功能绝缘 | 仅保证电路正常工作,不承担安全防护    | 不适用于人身安全相关界面                      |
| 基本绝缘 | 提供基本的电击防护(单一绝缘)      | 内部低风险节点,或已有其他防护层                  |
| 附加绝缘 | 在基本绝缘基础上的独立第二层       | 与基本绝缘组合构成双重绝缘                     |
| 增强绝缘 | 单一绝缘系统提供等同于双重绝缘的防护水平 | 一次侧-二次侧隔离(CLLC/LLC 变压器)、母线到人可触及部分 |

表 3 — 绝缘等级定义(简化自 IEC 62368-1/60664-1 体系;具体判定以适用产品标准为准)

**提醒** CLLC/LLC 隔离变压器的一次-二次绕组之间,几乎总是要按增强绝缘设计——这意味着爬电/间隙裕量、绝缘材料 CTI 等级、绕组间隔离结构都要按更高标准执行,不能按基本绝缘估算 BOM。

## 6. 局部放电(PD):耐压测试测不出来的隐形杀手

局部放电(Partial Discharge, PD)是绝缘系统内部(通常在气泡、空隙或绝缘/导体界面处)局部区域先于整体击穿而发生的微小放电。PD 本身不会立刻导致绝缘击穿,但长期的 PD 会通过电树(electrical treeing)、电蚀(erosion)逐步破坏绝缘,是变压器、电感长期在线失效的主要机理之一——而这恰恰是常规耐压测试(Hipot)测不出来的:Hipot 只判断“当前是否被击穿”,不判断“绝缘内部是否已经在慢性放电”。

| 测试项             | 测什么                        | 局限性                  |
|-----------------|----------------------------|----------------------|
| 耐压测试(Hipot)     | 加压后是否发生击穿/漏电流超限            | 不能发现绝缘内部空隙引起的局部放电    |
| 绝缘电阻(IR)        | 绝缘的直流电阻水平                  | 反映不了交流工作条件下的 PD 行为   |
| 局部放电测试(PD/PDIV) | 起始放电电压(PDIV)与规定电压下的放电量(pC) | 设备要求更高,通常用于关键界面抽检或全检 |

表 4 — 三类绝缘测试的定位与局限

PD 测试方法(简化自 IEC 60270 体系):在被测件两端施加交流电压并逐步升高,同时用高灵敏度检测电路测量视在放电量(单位 pC);记录放电量随电压上升的曲线,取放电量首次超过规定阈值(如 10pC)对应的电压,即为局部放电起始电压(PDIV)。



PDIV(局部放电起始电压)应显著高于系统最高工作电压,留出安全裕量

验收判据示例(仅示意,需按项目/适用标准确定):在  $1.5\times$  工作电压下,放电量  $<$  规定阈值(常见量级为数十 pC,高可靠性场景更严于 10pC)

**关键** PD 测试的判据不是通用值——干式变压器、车规磁件、消费电子磁件的阈值和测试电压倍数都不同;必须依据项目适用的产品标准或客户规范确定,不能照搬其他行业的经验数值。

## 7. 工艺怎么控制 PD:比选材料更重要的是消除空洞

- **真空浸渍(VPI):**绕组内部气泡是 PD 最常见的起源地;真空浸渍工艺能显著降低绕组内部空隙率,是控制 PD 的第一道工序。
- **灌封无空洞:**灌封胶固化过程中如果有气泡未排出,会在高压工作时成为放电起始点;灌封工艺需要真空脱泡,并对关键批次做切片/CT 抽检。
- **绝缘层无尖角/褶皱:**绝缘材料(如三层绝缘线 TIW、绝缘膜)在绕制过程中若产生褶皱、尖角,会导致局部电场集中,PDIV 显著下降。
- **爬电结构设计:**骨架上增加挡墙、凹槽可以有效增大有效爬电路径而不增加外形尺寸——这是紧凑设计和绝缘裕量之间的主要平衡手段。
- **三层绝缘线(TIW):**对小尺寸、高集成度的场景,三层绝缘线可以省去外加绝缘层、直接满足增强绝缘要求,是 CLLC/LLC 变压器的常用选择。

## 8. 验证与品质基线(DVP)

| 验证项            | 方法 / 设备                  | 判据(示例,以项目定为准)                      |
|----------------|--------------------------|------------------------------------|
| 电气间隙 / 爬电距离    | 量具 / 3D 扫描测量             | 按 IEC 60664-1 查表值 + 设计裕量           |
| 耐压测试(Hipot)    | 耐压测试仪                    | 加压下无击穿、漏电流 $\leq$ 规定值              |
| 绝缘电阻           | 兆欧表                      | $\geq$ 规定值(常温/高温高湿后)               |
| 局部放电(PDIV/PD量) | 局部放电测试仪(参照 IEC 60270 方法) | $PDIV \geq$ 规定裕量;规定电压下 PD 量 $<$ 阈值 |
| 温湿度循环后复测       | 环境试验箱 + 复测 Hipot/PD      | 循环后指标仍满足初始判据                       |
| 切片/CT 抽检       | 金相切片或 CT 扫描              | 绕组/灌封无可见空洞、绝缘层无损伤                  |
| 批间一致性          | 抽样 PD 测试                 | PDIV 离散 $<$ 规定范围                   |

表 5 — 800V 平台绝缘与 PD 统一验证基线(判据随项目/适用标准确定)

**提醒** PD 测试设备和场地要求高于常规电性能测试(屏蔽环境、背景噪声抑制),很多中小供应商并不具备量产级 PD 测试能力——采购时应明确要求提供 PD 测试报告,而不只是耐压测试报告。



## 9. 常见问题(FAQ)

### 问 耐压测试通过了,为什么还要做 PD 测试?

答 耐压测试只回答“现在会不会被击穿”,不回答“绝缘内部是否已经在慢性放电”。PD 是电树/电蚀的起点,长期运行后才会表现为绝缘失效——这正是很多现场失效在出厂检验阶段测不出来的原因。

### 问 爬电距离和电气间隙,为什么不能互相替代?

答 两者防的是不同的物理机制:电气间隙防空气被击穿(电弧,取决于冲击耐压和海拔),爬电距离防表面被闪络(取决于工作电压、污染等级和材料 CTI)。同一结构里,间隙够但爬电不够(或反过来)都会导致绝缘失效。

### 问 800V 平台的绝缘裕量,能直接套用 400V 平台乘以2吗?

答 不能。IEC 60664-1 的查表关系是分段非线性的,而且局部放电风险随电压升高非线性加剧;800V 平台必须重新查表计算,不能用简单倍数外推400V平台的设计。

### 问 CLLC/LLC 变压器的一次-二次绝缘,该按什么等级设计?

答 隔离级 DC-DC 变压器的一次-二次之间,几乎总是需要按增强绝缘(或基本绝缘+附加绝缘的双重绝缘组合)设计,因为它跨越了通常意义上的安全隔离边界——这需要在设计输入阶段就明确,不能等结构定型后再补救。

### 问 PD 测试的验收阈值该定多少 pC?

答 没有放之四海而皆准的数值——阈值和测试电压倍数取决于产品适用标准(如干式变压器、车规磁件、消费电子)和客户规范。工程上常见做法是先参照最接近的适用标准定初始阈值,再通过失效模式分析和现场数据反馈迭代收紧。

### 问 高海拔应用(如高原基站、山地光伏电站)绝缘设计要注意什么?

答 电气间隙的有效耐受能力随海拔升高而下降(空气稀薄、绝缘能力降低),需要按海拔修正系数放大电气间隙设计值;爬电距离本身不直接随海拔修正,但结露风险(污染等级可能上调)需要重新评估。

### 问 谱磁在绝缘/PD 方面的交付能力?

答 按项目适用标准执行爬电/间隙设计核算、真空浸渍/无空洞灌封工艺,并可提供 Hipot、绝缘电阻与局部放电(PDIV/PD量)测试数据;具体判据与测试方案在项目设计评审阶段与客户共同确认。

## 10. 术语

- **电气间隙(Clearance)** — 两导体间空气中的最短距离,防止空气击穿。
- **爬电距离(Creepage)** — 两导体间沿绝缘表面的最短距离,防止表面闪络。
- **污染等级(Pollution Degree)** — 描述使用环境导电污染程度的等级,影响爬电距离要求。



- **材料组 / CTI** — 绝缘材料耐漏电起痕能力的分级指标,CTI 越高材料组越优。
- **局部放电(PD)** — 绝缘系统内部局部区域先于整体击穿发生的微小放电现象。
- **PDIV** — 局部放电起始电压,放电量首次超过规定阈值对应的电压。
- **增强绝缘** — 单一绝缘系统提供等同于双重绝缘防护水平的绝缘等级。
- **真空浸渍(VPI)** — 在真空环境下用绝缘树脂浸渍绕组、排除内部气泡的工艺。
- **三层绝缘线(TIW)** — 具有三层挤出绝缘、可直接满足增强绝缘要求的漆包线。

## 11. 延伸阅读

本页聚焦 800V 平台绝缘设计与 PD 测试方法论,以下为相关深度文与姊妹总纲:

- [800V OBC CLLC 双向变压器选型\(一次-二次增强绝缘的典型场景\)](#)
- [OBC PFC Boost 电感选型\(800V 平台\)](#)
- [AEC-Q200 与车规可靠性:EV/OBC 磁件怎么过](#)
- [800V EV 充电系统白皮书](#)
- [高电流磁件热设计与温升实测](#)
- [800V 高压功率磁件选型总纲\(EV 与 AI 数据中心\)](#)
- [AIDC 磁性元件全链路应用图谱](#)

## 12. 关于谱磁

深圳市谱磁科技有限公司(成立于 2013 年,深圳光明区)研发制造扁平线电感、平面变压器、共模电感与 PFC 电感,广泛用于 800V EV OBC、光伏逆变、储能 PCS、AI 数据中心电源与工业电源。

作者 / 审阅:张勇,电子工程师、谱磁科技创始人。

联系方式: 张勇 · +86 13267069291 · zyoung@promagtech.cn · www.promagtech.com

最后更新:2026-07-29 · PMT-DOC-2026-0729-10 · Rev A/0

**数据声明** 本文数值为典型/示意的设计参考,最终以样品实测数据与双方承认书为准。

© 2026 深圳市谱磁科技有限公司 版权所有。