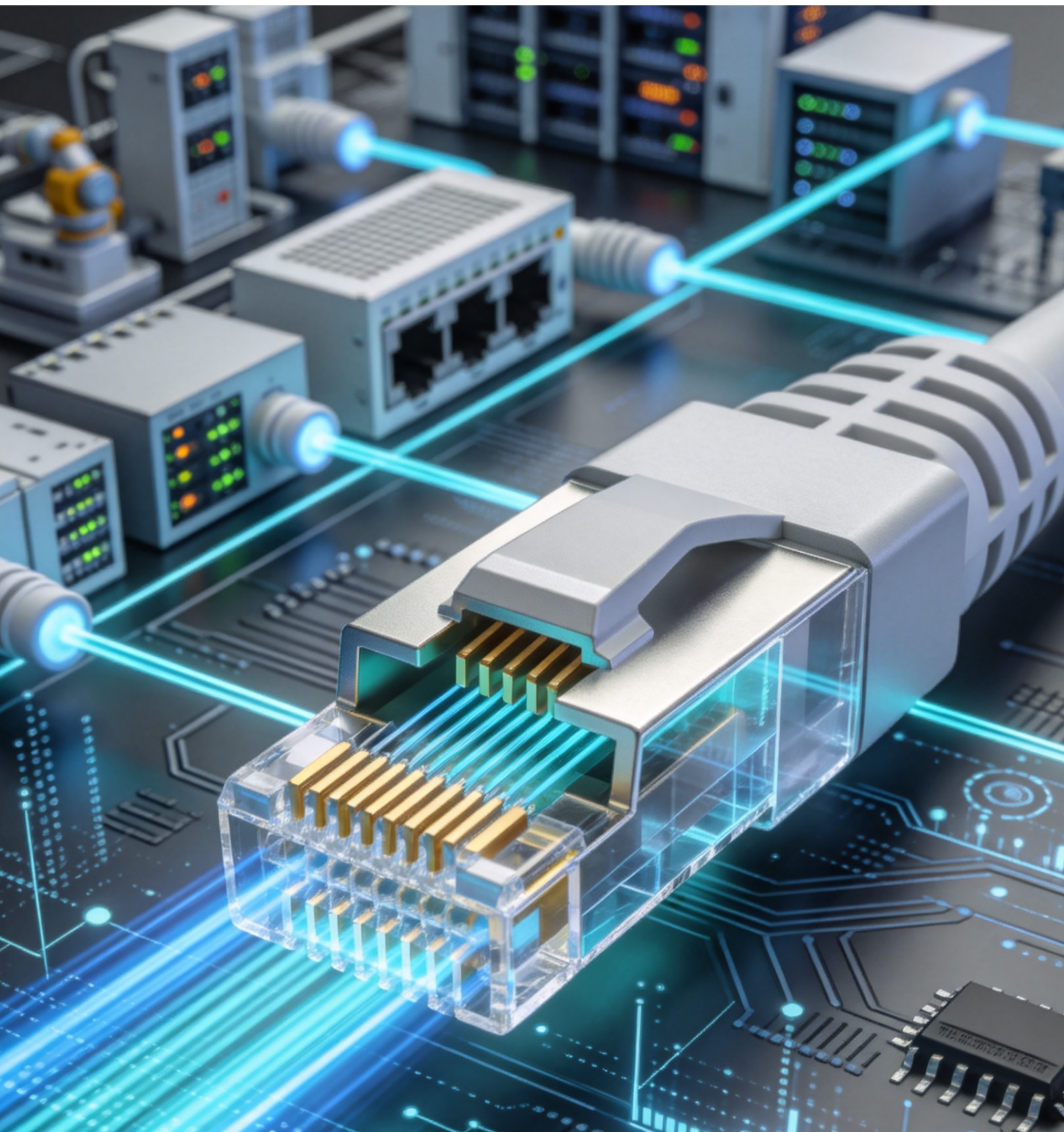


以太网端口耐受标准与半导体放电管保护方案

Ethernet port tolerance standards and semiconductor discharge tube protection schemes

基于 ITU-T K.21、IEEE 802.3 与 IEC 61000-4-5 的技术说明



第一部分：以太网端口标准的要求与相关条款要求

1.1 ITU-T K.21: 客户侧通信设备耐过压/过流要求

ITU-T K.21 的全称为“Resistibility of telecommunication equipment installed in customer premises to overvoltages and overcurrents”，该标准面向安装在客户场所的通信设备，关注通信线受到雷击浪涌、邻近交流电力线感应、地电位升高、通信线与电力线直接接触以及静电放电等异常事件时，设备应具备的耐受能力

对于以太网端口，K.21 的价值在于：它不是只讨论传统电话线，而是已经把 Ethernet unshielded twisted pair (UTPE)、Ethernet shielded twisted pair (STPE)、Power over Ethernet (PoE) 以及 STPE shield testing 纳入通信端口耐受测试体系

序号	K.21 关注点	与以太网端口相关的要求	对器件设计的意义
1	电力线搭接 / mains power contact	外部对称线缆端口可按 230VAC、50Hz、15min，并通过不同限流电阻进行测试	解释为什么以太网线要考虑 220/230VAC 搭接，器件不能在交流峰值附近误导通
2	UTPE/STPE 以太网端口	K.21 已覆盖以太网非屏蔽/屏蔽双绞线端口以及 PoE	以太网保护不能只看 IEEE 802.3 链路，还要看客户侧通信端口耐受
3	Port-to-earth / simultaneous port to earth	以太网端口对地浪涌可使用组合波进行测试，基本等级和增强等级由具体表格定义	中心抽头到 PE/Chassis 的半导体放电管承担共模泄放路径
4	Transverse / differential	可能存在端口内部横向/差模类冲击，例如不同线对之间的浪涌	两个中心抽头各接一颗器件时，组间路径可能表现为两颗器件串联
5	STPE shield to earth	屏蔽以太网线的屏蔽层对地也有测试要求	Shield-to-PE 泄放路径需要单独设计，不能与信号线 ESD 混为一谈
6	测试后绝缘判断	部分 K.21 测试后可用 500VDC 检查绝缘电阻，例如至少 2MΩ 的判据	解释为什么 420V/880V 等级更合理

1.2 IEEE 802.3: 以太网物理层与 MDI 隔离要求

IEEE 802.3 是以太网物理层和 MAC 层的基础标准,对于经典以太网端口，如 10BASE-T、100BASE-TX、1000BASE-T，标准重点之一是 MDI (Medium Dependent Interface) 端口与设备侧物理层电路/机壳地之间的电气隔离

标准资料中对 IEEE 802.3 端口隔离的典型表达是:DTE Physical Layer circuits including frame ground 与所有 MDI leads 之间应提供电气隔离，并能承受 1500Vrms、50/60Hz、60s，或 2250VDC、60s，或相应的冲击测试

序号	IEEE 802.3	典型要求及说明
1	MDI 隔离	所有 MDI 线缆侧引脚与设备侧物理层电路/Frame Ground 之间保持电气隔离，这是网络变压器/隔离器的核心职责
2	电气强度	典型为 1500Vrms 60s，或 2250VDC 60s，或规定冲击测试，主要解释初级-次级隔离，不直接等同于输入线对 PE 浪涌
3	信号完整性	100BASE-TX、1000BASE-T 等接口需满足相应的发射、接收、回波损耗等电气指标，保护器件不能破坏链路眼图、回损、插损和模式转换
4	TX/RX 线对关系	IEEE 802.3 重点不是定义“1/2 线对与 3/6 线对之间低压耐压测试”，如果客户测试 1/2 对 3/6，通常更接近 EMC 浪涌或客户自定义测试，而不是 IEEE 802.3 主线条款

1.3 IEC 61000-4-5: 浪涌抗扰度测试方法

IEC 61000-4-5 是电磁兼容领域的浪涌抗扰度测试标准，它关注的是设备端口在实验室条件下承受浪涌冲击时的抗扰能力，标准定义了发生器、波形、耦合/去耦网络、测试配置和试验程序

序号	关注点	典型内容及端口意义
1	1.2/50 μ s - 8/20 μ s 组合波	常用于电源线、部分互连线、工业端口的浪涌抗扰度测试，以太网端口对地/对线浪涌常会在客户规范中引用该组合波
2	10/700 μ s - 5/320 μ s 组合波	用于连接对称通信线的端口，尤其是户外/长线通信端口，通信线、以太网线或 PoE 端口在部分标准体系中可能引用
3	c. Line-to-line /line-to-ground	标准测试配置中可体现线-线、线-地/PE 的浪涌耦合方式，对应 1/2 线对对 PE、3/6 线对对 PE、所有线对共模对 PE 等场景
4	系统级抗扰度	IEC 61000-4-5 不是单颗器件认证标准，而是整机/端口级测试方法，半导体放电管需结合线路阻抗、中心抽头、CMC、变压器、PE 路径一起验证

第二部分：三份标准的适用范围与区分

这三份标准经常会在以太网/EtherCAT 端口保护设计中同时出现，但它们解决的问题不同，若混用标准边界，容易导致器件电压等级解释不清，甚至把网络变压器隔离要求误用于中心抽头对 PE 保护

序号	标准	主要适用范围	适合解释的问题	不适合直接解释的问题
1	ITU-T K.21	客户侧通信设备对过电压、过电流的耐受要求；包括以太网 UTPE/STPE、PoE、电力线搭接、端口对地、屏蔽层对地等	为什么以太网线要考虑 230VAC 搭接；为什么要做端口对地浪涌，为什么测试后可能用 500VDC 检查绝缘	不主要定义以太网 PHY 速率、编码、链路信号完整性
2	IEEE 802.3	以太网 MAC/PHY/MDI 接口标准，定义链路物理层、电气隔离和相关电气特性	为什么以太网端口需要网络变压器/隔离，为什么 MDI 对设备侧有 1500Vrms/2250VDC 隔离边界，保护器件不能影响链路	不直接定义电力线搭接 230VAC 15min，不主要定义 IEC 浪涌等级
3	IEC 61000-4-5	EMC 浪涌抗扰度测试方法，定义组合波、发生器、耦合/去耦和试验程序	如何做输入信号线对 PE、线对线、共模浪涌测试，如何选择 1.2/50-8/20 或 10/700-5/320 波形	不规定以太网协议，不单独认证某颗器件，具体等级需由产品标准/客户标准定义

2.1 对图中中心抽头保护位置的标准映射

图中半导体放电管位于网络变压器输入侧中心抽头/共模节点到 PE 或 Chassis 之间，该位置的主要任务不是保护差分信号本身，而是在输入线缆出现共模浪涌、ESD、EFT 或电力线搭接时，提供受控泄放路径

序号	测试/异常场景	可能参考的标准	保护路径理解
1	1/2 线对共模对 PE	ITU-T K.21、IEC 61000-4-5	1/2 线对 → 中心抽头 → P4200D/P8800V → PE。通常主要一颗器件动作
2	3/6 线对共模对 PE	ITU-T K.21、IEC 61000-4-5	3/6 线对 → 中心抽头 → P4200D/P8800V → PE。通常主要另一颗器件动作
3	1/2 线对对 3/6 线对	K.21 transverse/differential 思路, 或客户自定义浪涌	可能形成“中心抽头 → 器件 → PE → 器件 → 中心抽头”的串联路径, 等效触发阈值约为两颗器件之和
4	同一差分对内部 1 对 2	IEC 61000-4-5 或客户自定义	中心抽头保护不是最直接路径, 需评估线间保护、变压器、PHY 侧保护和寄生参数
5	MDI 线缆侧对设备侧 PHY	IEEE 802.3	主要由网络变压器/隔离器承担 1500Vrms/2250VDC 等级隔离

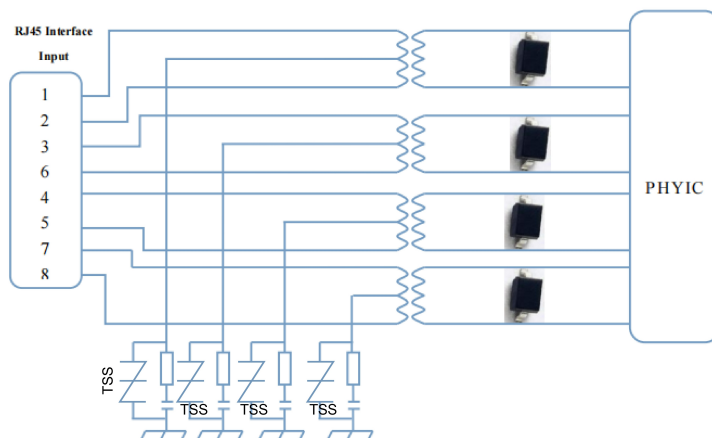
2.2 220/230VAC 与 380/400VAC 搭接下的电压等级逻辑

序号	交流搭接电压	峰值估算	对放电管电压等级的建议合理性
1	220VAC	约 311Vpk	420V 等级有足够高于峰值的空间, 利于避免误导通, P4200D 适合 220VAC 搭接场景
2	230VAC	约 325Vpk	K.21 中 mains power contact 典型条件为 230VAC、50Hz、15min, P4200D 适合 230VAC 搭接设计目标
3	380VAC	约 537Vpk	420V 等级可能在交流峰值附近误导通或承受过高断态应力, 建议 P8800V 或 800/880V 等级
4	400VAC	约 566Vpk	对 420V 等级风险更明显, 建议 P8800V, 具体按 VDRM/VBO/漏电流和热稳定验证

第三部分：音特电子解决方案：P4200D 与 P8800V 半导体放电管规划

基于上述标准边界，技术团队建议将以太网中心抽头/共模节点到 PE/Chassis 的保护器件定义为“高阻共模浪涌泄放器件”，而不是低压差分信号钳位器，该位置的器件需要兼顾正常通信、绝缘/耐压测试、电力线搭接和 IEC 61000-4-5 浪涌泄放。

3.1 推荐拓扑



3.2 P4200D: 面向 220/230VAC 搭接与 K.21 通信线要求

P4200D 建议作为面向 230VAC/220VAC 电力线搭接场景的以太网中心抽头保护器件,其定位不是在几十伏电压下提前钳位,而是在 230VAC 峰值附近保持高阻,避免通信端口在电力线搭接测试中持续误导通,在雷击浪涌、ESD、EFT 等高压瞬态事件中再导通泄放

序号	项目	P4200D 设计目标/优势
1	标准适配方向	匹配 ITU-T K.21 中 230VAC mains power contact、以太网 UTPE/STPE、端口对地浪涌等思路
2	交流搭接兼容性	220/230VAC 峰值约 311/325V, 420V 等级可降低交流峰值误触发风险
3	中心抽头保护	适合放在 1/2 线对与 3/6 线对的中心抽头到 PE/Chassis 路径
4	实用价值	帮助客户实现以太网输入端共模浪涌泄放、电力线误搭接耐受和端口绝缘要求之间的平衡

3.3 P8800V: 面向 380/400VAC 搭接与更高共模耐受场景

当客户系统需要考虑 380VAC 或 400VAC 电力线搭接时,420V 等级器件可能不足,380VAC 峰值约 537V,400VAC 峰值约 566V,若仍使用 420V 等级,器件可能在交流峰值附近进入导通区,导致发热、误动作或测试失败;因此建议规划 P8800V 等级半导体放电管。

序号	项目	P8800V 设计目标/优势
1	标准适配方向	面向更高交流电力线搭接、电力系统误接触、工业现场更高共模电位差
2	380/400VAC 兼容性	800/880V 等级可高于 380/400VAC 峰值,降低长期搭接误导通风险
3	浪涌泄放	在 IEC 61000-4-5 端口对地浪涌时提供较高门槛的共模泄放路径
4	应用市场	适合三相交流环境、工业自动化柜、港口/矿山/户外设备、强电邻近布线等高风险场景
5	产品组合价值	与 P4200D 形成 230VAC 与 380/400VAC 两级平台化覆盖

3.4 设计工程师角度理解

Ethernet/EtherCAT 端口的中心抽头到 PE/Chassis 保护,不是低压差分信号钳位,而是通信线对地共模浪涌和电力线误搭接的泄放路径,ITU-T K.21 已覆盖以太网 UTPE/STPE、PoE、电力线搭接和端口对地测试,IEC 61000-4-5 提供浪涌抗扰度试验方法,IEEE 802.3 则定义以太网物理层与 MDI 隔离边界,基于 220/230VAC 搭接,音特推荐 P4200D,基于 380/400VAC 搭接或更高工业共模电压场景,音特推荐 P8800

第四部分：总结

IEEE 802.3 解释以太网物理层与 MDI 隔离边界，典型隔离能力为 1500Vrms 或 2250VDC 等级，但它不是直接定义中心抽头对 PE 电力线搭接保护的标准

IEC 61000-4-5 解释端口浪涌抗扰度测试方法，适合说明输入线对 PE、线对线、共模浪涌等测试路径，但具体等级通常由产品标准或客户规范确定

ITU-T K.21 最适合解释客户侧通信设备的电力线搭接、以太网 UTPE/STPE 端口、PoE、STPE 屏蔽层对地、端口对地浪涌和测试后 500VDC 绝缘判断

P4200D 适合 230VAC/220VAC 搭接场景，因为 230VAC 峰值约 325V，420V 等级有利于避免交流峰值误导通，同时能在高压瞬态时提供泄放

P8800V 适合 380VAC/400VAC 搭接或更高工业共模耐受场景，因为 380/400VAC 峰值已经超过 420V 等级的安全解释空间

对以太网中心抽头保护，应坚持“正常通信不动作、绝缘测试不误导通、浪涌时快速泄放、能量路径不穿过 PHY”的系统级设计原则

参考资料

[1] ITU-T K.21 (2022) 官方出版页面：客户侧通信设备过电压/过电流耐受要求

<https://www.itu.int/epublications/zh/publication/itu-t-k-21-2022-08-resistibility-of-telecommunication-equipment-installed-in-customer-premises-to-overvoltages-and-overcurrents/en>

[2] ITU-T K.21 (2019) 公开 PDF 条目：包含 230VAC、15min、多档限流电阻的 mains power contact 测试条件

https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?id=T-REC-K.21-201907-S%21%21PDF-E&lang=e&type=items

[3] IEEE 802.3 PoE/以太网隔离资料：1500Vrms 60s、2250VDC 60s 等 MDI 电气隔离要求

https://www.ieee802.org/3/poep_study/public/may05/law_1_0505.pdf

[4] TI PoE 浪涌资料：引用 IEEE 802.3 隔离要求，并讨论以太网端口浪涌保护 <https://www.ti.com/lit/pdf/slva736>

[5] IEC 61000-4-5 公开 PDF 资料：说明 1.2/50-8/20 与 10/700 组合波，10/700 用于对称通信线端口

<https://rtpcorp.com/wp-content/uploads/2021/04/IEC61000-4-5.pdf>

[6] Noiseken IEC 61000-4-5 Ed.3 概述：说明两类组合波及其应用场景

<https://www.noiseken.com/products/related/iec61000-4-5-ed-3-test-standard-overview/>

免责声明：

本文内容系基于音特电子在特定应用场景下的工程实践经验、测试数据及历史客户案例进行整理与总结，主要用于技术交流、方案参考与设计思路说明，鉴于不同项目在系统架构、应用环境、器件选型、PCB 布局、接地方式、线缆条件、EMC 等级要求及整机约束等方面存在差异，本文所述方案、参数及建议不构成对任何具体项目性能、合规结果或最终适配性的直接承诺。

在实际导入过程中，建议使用方结合项目的真实工况与客观条件，开展二次评估、参数校核及针对性优化，并以样机测试、边界工况验证及相关标准测试结果作为最终判定依据。