

## 服务器 RJ45 网口常见电磁兼容问题分析

崔杰<sup>1</sup> 鲍乐梅<sup>1</sup> 王武军<sup>1</sup>

CUI Jie BAO Lemei WANG Wujun

## 摘要

服务器 RJ45 网口涉及 GB/T9254.1-2021 和 GB/T9254.1-2021 电磁兼容要求的多个测试项目。其中，电磁辐射、静电、浪涌等测试为常见容易出现问题的项目，在产品研发后期进行电磁兼容问题整改，所花费的时间和成本要比其他问题更昂贵。如果能在产品设计前期规避问题，则后期整改要更容易。结合服务器 RJ45 网口的拓扑结构，在通信链路中加入或预留足够的设计方案，能够使产品更好地通过电磁兼容测试。电磁辐射的共模噪声和时钟噪声可以通过网络变压器中的共模线圈进行抑制。静电问题则可以借助于连接器良好的多点搭接进行解决。雷击则涉及硬件电路上的防护设计以及 PCB 设计的优化进行防护。多种良好的设计方案共同施加，保证了服务器产品的顺利上市。

## 关键词

服务器；RJ45 网口；电磁兼容；电磁辐射；网口 PCB 设计

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.01.030

## 0 引言

随着大数据、人工智能、云计算等技术的普及和应用，越来越考验着数据中心服务器的性能。电磁兼容测试是 CCC 认证（中国强制认证）、CE 欧盟认证中的规定测试项目。服务器通过电磁兼容测试不仅可以获得 CCC 认证证书、CE 欧盟认证证书，也意味着服务器本身能够经受住静电、雷击、电磁辐射等多重考核。其中，服务器 RJ45 接口又是涉及电磁兼容测试要求最多的一类接口。RJ45 接口的电磁兼容设计要点多，遇到的电磁兼容问题也较难分析，如何在服务器设计流程的前期规避掉电磁兼容问题的隐患，是整个设计流程的重中之重。

## 1 服务器 RJ45 以太网链路介绍

服务器 RJ45 以太网链路如图 1 所示，CPU 为服务器核心数据处理单元，由服务器 CPU 连接到 BMC 芯片，BMC 芯片后端连接到 PHY 芯片，PHY 芯片与 RJ45 连接器之间由网络变压器进行隔离。

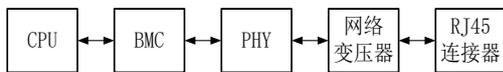


图 1 服务器 RJ45 以太网链路

## 1.1 BMC 芯片

BMC (baseboard management controller) 芯片是基板管理控制器，通过 PCIe Gen2 X1 协议连接到 CPU。BMC 芯片

内部集成 MAC (media access control) 芯片模块。

MAC 芯片为媒体访问控制层协议部分，MAC 协议位于 OSI 七层协议中数据链路层，负责控制与连接物理层的物理介质。

## 1.2 PHY 芯片

PHY (physical layer) 芯片是物理接口收发器，通过 RGMII (reduced gigabit media independent interface) 接口与 BMC 芯片互连。接口通信定义参照表 1。

表 1 PHY 芯片信号线定义

信号名称	描述	方向
TXC	发送时钟	MAC → PHY
TX_CTL	发送数据控制	MAC → PHY
TXD[3:0]	发送数据 4 bit	MAC → PHY
RXC	接收时钟	PHY → MAC
RX_CTL	接收数据控制	PHY → MAC
RXD[3:0]	接收数据 4 bit	PHY → MAC
MDIO	管理数据	双向
MDC	管理数据时钟	MAC → PHY

## 1.3 网络变压器

服务器 RJ45 网口网络变压器原理如图 2 所示，网络变压器由两部分组成，1:1 的隔离变压线圈和共模滤波线圈。此网络变压器为千兆网络变压器。隔离变压线圈能够隔离外接网线连接到的网络设备间的不同信号电平，使数据信号能够 1:1 进行传输，但是网线或设备上的高电压不会损坏 PHY 芯片。共模滤波线圈则可以抑制网线或芯片端的共模电磁噪声，不会因为共模电磁噪声导致电磁辐射超出规定限值。

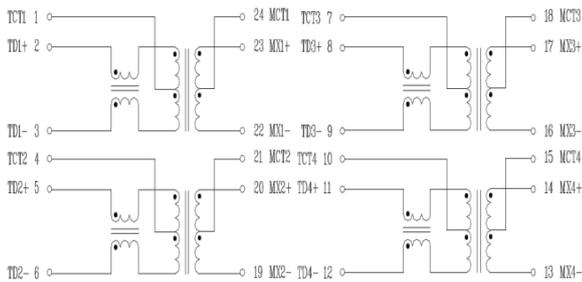


图2 服务器RJ45网络变压器原理图

网络变压器要满足一定的规格参数：（1）30 MHz 的线间串扰要小于 -45 dB，60 MHz 的线间串扰要小于 -40 dB，100 MHz 的线间串扰要小于 -35 dB；（2）高压测试要能满足 1500 V；（3）1 ~ 100 MHz 频率范围内的插入损耗要大于 -1 dB；（4）1 ~ 30 MHz 频率范围内的回波损耗要小于 -18 dB，40 MHz 的回波损耗要小于 -14.4 dB，50 MHz 的回波损耗要小于 -13.1 dB，60 ~ 80 MHz 频率范围内的回波损耗要小于 -12 dB，100 MHz 的回波损耗要小于 -10 dB。

## 2 服务器 RJ45 网口常见电磁兼容问题分析

### 2.1 网口静电测试问题

#### 2.1.1 服务器网口静电测试要求

静电问题是在服务器设计过程中极具挑战的电磁兼容测试项目之一，RJ45 网口测试静电时需要进行数据通信的状态下进行，因此，静电测试时常见问题为数据丢失、PHY 芯片宕机、指示灯显示异常等。服务器机箱需要满足足够的支撑作用，且通常需要安装在服务器机柜上使用，所以服务器机箱通常使用厚度为 1.2 mm 的镀锌钢板来进行设计。

服务器归属于信息技术类设备，静电测试的法规需要采用整机测试标准《GB/T17626.2—2018 静电放电抗扰度试验》。法规要求的实验等级共分为四个规定电压等级和一个开放电压等级，如表 2 所示。服务器整机测试结果的判定等级及测试要求则需要采用《GB/T9254.2—2021 信息技术设备、多媒体设备和接收机 电磁兼容 第 2 部分：抗扰度要求》的规定。标准要求“静电放电应仅对设备在正常使用期间可能被触及的点或面施加，包括在用户手册中说明的用户可能触及的部分，例如，在 EUT 通电时清理或添加耗材可能触及的部位”。在标准第 5 章抗扰度要求部分，规定了壳体端口应满足静电放电接触放电 4 kV，空气放电 8 kV，性能判据的判定等级为 B。性能判据 B，“在施加骚扰期间，允许性能降低，但在试验后，不应出现实际运行状态或存储的数据非预期改变。试验后，无需操作人员介入，设备应能按预期持续运行，当按预期使用设备时，不应出现低于制造商规定的性能水平的性能降低或功能损失，可以用允许的性能降低来代替性能水平”。

表 2 静电测试试验等级

接触放电		空气放电	
等级	试验电压 /kV	等级	试验电压 /kV
1	2	1	2
2	3	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
*	特定	*	特定

“\*”可以是高于、低于或在其他等级之间的任何等级。该等级应在专用设备的规范中加以规定，如果规定了高于表格中的电压，则可能需要专用的试验设备。

服务器机箱为镀锌钢板，通常表面不进行喷涂，RJ45 连接器同样是无喷涂铁件，如图 3 所示，因此静电测试需要采用接触放电的方式，判定等级需要满足性能判据 B 的要求<sup>[1]</sup>。



图3 服务器RJ45千兆网络接口

#### 2.1.2 服务器网口静电问题规避措施

（1）加强 RJ45 连接器 GND 与服务器机箱之间搭接作用

服务器 RJ45 连接器顶部和左右两边均设计有搭接弹片（图 4 所示），弹片的设计能够保证组装到服务器机箱以后可以和机箱良好的搭接，RJ45 连接器与服务器机箱之间的搭接阻抗可以满足小于 1 Ω 的要求。如图 3 所示，当 RJ45 组装到服务器机箱上以后，与服务器机箱之间必然存在一定的间隙，此间隙是保证产线生产组装顺利存在，RJ45 连接器的弹片则弥补了缝隙导致搭接不良的缺陷。

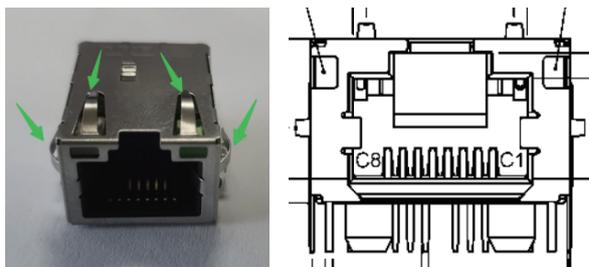


图4 RJ45连接器

静电泄放测试时，静电枪枪头必须顶住 RJ45 连接器金属件进行接触放电，放电电压为 4 kV 高压。图 5 所示为 4 kV 理想的接触放电电流波形，放电第一个峰值电流可以达到 15 A，上升时间为 0.8 ns。在第 30 ns 时的电流为 8 A，在第 60 ns 时的电流为 4 A。静电放电持续时间总体在 100 ns 之内。所以，静电放电是持续时间极短的一个自然现象。静电接触放电的电流主要是靠系统进行疏导，最终通过服务器机箱回流到安全地带。但是由于静电放电时间短、放电瞬间电流大，如果 RJ45 连接器的静电放电泄放点与服务器机箱之间阻抗过大（例如大于 1 Ω），就会大概率存在静电二次放电的现象，造成不可控的电子元件损坏。

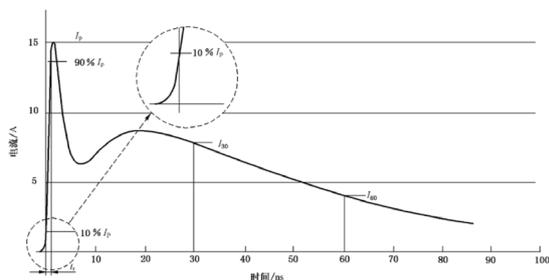


图 5 4 kV 理想的接触放电电流波形

(2) RJ45 连接器的 GND 与主板 GND 进行分割

服务器机箱是静电泄放疏导的主要途径，服务器机箱作为电源漏电安全防护的一部分，要求与安全地面进行连接，且要求与安全地面之间的连接阻抗要保证小于  $0.1 \Omega$ 。静电干扰途径有两条：空间辐射和传导干扰。由于静电放电时间极短（ns 级），放电瞬间会形成高频成分极为丰富的电磁场，服务器主板上的敏感信号很容易受到干扰。但 RJ45 连接器接口静电放电方式为接触放电，所以主要以传导干扰为主。切割“壕沟”的方式即为针对于静电传导途径进行干预，使静电按照设计途径进行泄放。

“壕沟”的切割方式，是将 RJ45 连接器的 GND 定义为 Chassis GND，与服务器主板 GND 进行分割，如图 6 所示。为了保证网络变压器的隔离作用，网络变压器下方各层需要挖空，即网络变压器下方各层铜皮均切除处理。这样 Chassis GND 与 GND 之间通过“壕沟”的设置，可以实现彻底的物理分离，分隔距离至少要保证  $1.5 \text{ mm}$ 。但为了保证网口 MDI 信号完整性参考 GND 的需要，在 Chassis GND 与 GND 之间增加两个  $0 \Omega$  电阻以及两个  $0.1 \mu\text{F}$  电容进行跨接。RJ45 连接器的铁件焊接到 Chassis GND 上，当  $4 \text{ kV}$  的静电电压泄放到 RJ45 连接器上时，静电电流通过 Chassis GND 回流到了服务器机箱，通过服务器机箱最终回流到安全地面。服务器电子系统受到静电干扰的影响最小化。

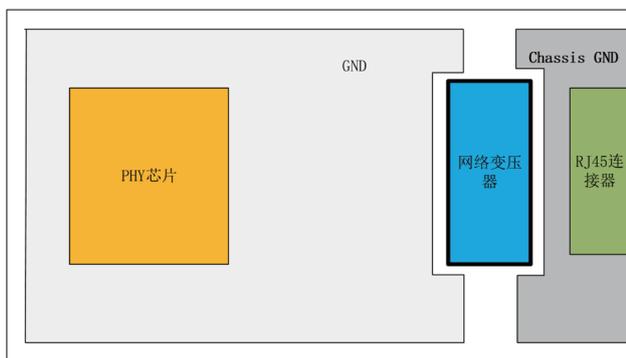


图 6 服务器 RJ45 接口 Chassis GND 与 GND 分割示意图

2.2 网口雷击测试问题

服务器 RJ45 网口雷击浪涌测试适用标准是 GB/

T17626.5—2019《电磁兼容 试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验》。服务器典型应用于数据中心机房，RJ45 网口与数据中心机房内的交换机相连，浪涌测试波形采用输出端  $1.2/50 \mu\text{s}$  开路电压波形（图 7 所示）。若服务器网口直接与户外电信网络相连接通信，而户外通信网络的电缆长度通常超过  $300 \text{ m}$  并可能达到数千米，根据实际场景则需采用浪涌测试波形采用输出端  $10/700 \mu\text{s}$  开路电压波形（图 8 所示）。如果用于  $10/700 \mu\text{s}$  波形的浪涌耦合网络影响高速数据端口的功能，试验应采用  $1.2/50 \mu\text{s}$  波形以及合适的耦合网络。依据《GB/T9254.2—2021 信息技术设备、多媒体设备和接收机 电磁兼容 第 2 部分：抗扰度要求》的规定，网口雷击浪涌测试电压为  $1 \text{ kV}$  [2]。

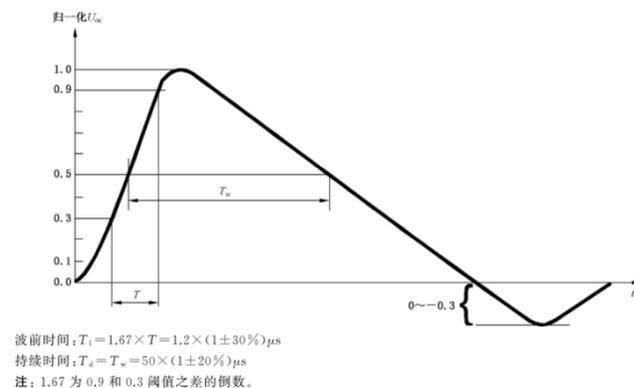


图 7 浪涌发生器输出端的开路电压波形 ( $1.2/50 \mu\text{s}$ )

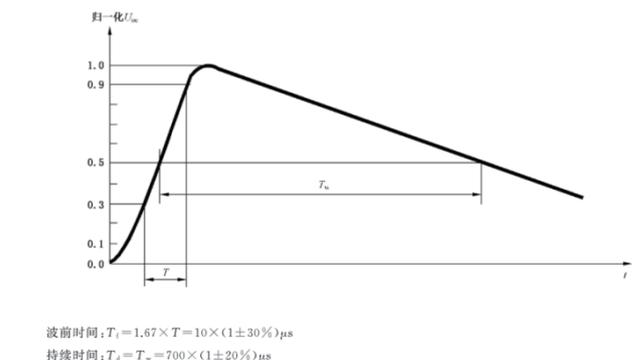


图 8 浪涌发生器输出端的开路电压波形 ( $10/700 \mu\text{s}$ )

雷击浪涌测试对于网口网络变压器外接线缆一侧的中心抽头 Bob Smith 电路（图 9 所示）以及网络变压器线圈的耐压等级都存在严重考验。Bob Smith 电路能够为网口任意两对差分信号线之间提供  $150 \Omega$  的阻抗匹配，同时对于网口差分信号线上的共模电磁噪声提供一个回流路径。Bob Smith 电路滤波电容需要采用 1206 封装或更大封装，绝缘耐压  $2 \text{ kV}$  或  $3 \text{ kV}$  的  $1000 \text{ pF}$  电容。Bob Smith 电路的  $75 \Omega$  电阻则应采用 0805 或更大封装的电阻。若 Bob Smith 电路电阻过小或电容绝缘耐压值小于测试电压值，则会出现中心抽头电阻击穿问题。

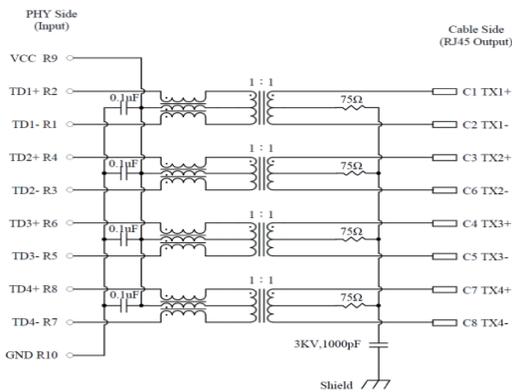


图9 服务器千兆以太网网络变压器中心抽头设计

### 2.3 网口时钟电磁辐射问题

电磁辐射问题是服务器电磁兼容设计的难点之一。原因在于网口外接网线线缆较长，很容易耦合到共模噪声，与此同时也很容易作为天线将服务器主板的共模电磁噪声对外辐射到空间场。图10所示电磁辐射发射测试结果的频谱数据就是典型的服务器网口时钟信号导致的辐射发射测试结果失败现象<sup>[3]</sup>。

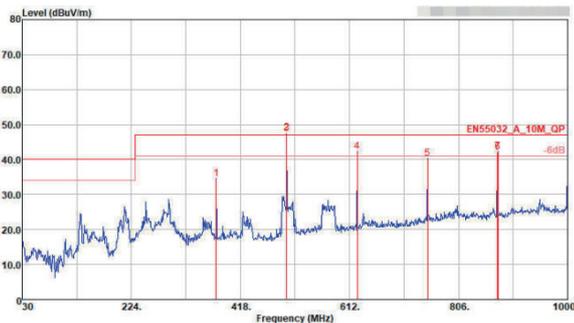


图10 网口时钟电磁辐射发射测试失败

仔细研究频谱数据上的问题点可以发现，频谱间隔为明显的125 MHz，而问题点的频谱也均为125 MHz的倍频。所以，可以断定造成最终电磁辐射发射测试结果失败的原因在于服务器主板上的125 MHz时钟信号或相关信号。而且在排查过程中发现，只要将外接的网线拔出，问题频率点就会在频谱图上消失，这就说明外接网线被时钟信号利用为天线对外发射电磁波。

通过逆向排查网口通信链路，网口信号是经过网络变压器后连接到PHY芯片，而PHY芯片存在内部及对外输出的125 MHz时钟。PHY芯片对外输出的125 MHz时钟，可以反馈到MAC芯片使用，但服务器设计上将MAC芯片集成到了BMC芯片内部。BMC芯片内部集成的MAC模块所需要的125 MHz时钟可以BMC芯片内部时钟模块提供。因此，PHY芯片对外输出的125 MHz时钟，虽然未加利用，但却一直输出时钟信号，最终导致了125 MHz频率的电磁辐射超出法规限值的问题。利用BMC芯片设置PHY芯片对应寄存器值后，将外部输出125 MHz时钟关闭，最后测试结果通过，

125 MHz的倍频问题彻底在频谱图上消失，如图11所示。

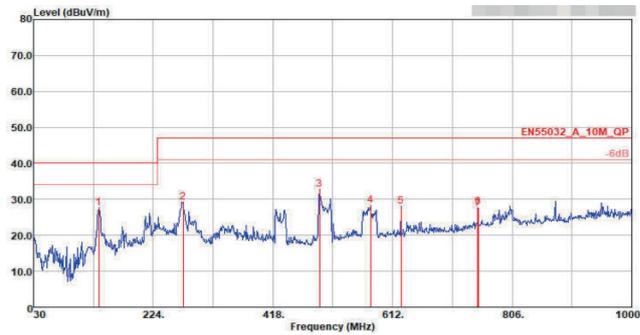


图11 关闭PHY芯片125 MHz时钟后电磁辐射发射测试结果

未加利用的时钟信号是极强的电磁辐射干扰源，极易通过线缆这样的良好媒介作为天线辐射电磁波到空间，造成最终的电磁辐射测试结果超出法规限值的要求。因此，在服务器主板设计的原理图阶段就需要仔细地对待未使用的时钟信号进行排查甄别，并对其进行关闭或接地处理<sup>[4]</sup>。

### 3 结语

网口电磁兼容测试是服务器电磁兼容研发过程中面临的问题最多也是极具挑战性的项目。随着时间的推移，服务器无论在形态还是性能上都会优化和进步，但是最基本的设计理念，最基础的电磁兼容设计知识需要积累和传承。本文通过静电、雷击浪涌和电磁辐射发射三个重点领域举例分析，可以提前规避服务器设计上的风险点，保证服务器顺利通过电磁兼容测试，取得认证证书，为产品顺利上市提供保障。

#### 参考文献：

- [1] 上海工业自动化仪表研究院有限公司,上海市计量测试技术研究院,上海电器科学研究所,等. 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验 GB/T17626.2—2018[S].2018.
- [2] 中国电子技术标准化研究院,北京福测电子仪器有限公司,中国计量科学研究院,等. 北京电磁兼容(EMC)第4-5部分: 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验: GB/T 17626.5—2019[S/OL].[2023-04-30].<https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=8AA1F5D36ED3A8D-BE-05397BE0A0AB19B>.
- [3] 党杰. 高密度服务器的传导骚扰溯源及整改[J]. 安全与电磁兼容,2021(2):95-98
- [4] 田立良,党杰. GB 4943.1—2022对服务器机箱外壳影响分析以及改善对策[J]. 安全与电磁兼容,2023,182(3):77-81.

#### 【作者简介】

崔杰(1986—),男,山东济南人,大学本科,工程师,研究方向:电磁兼容与安规。

鲍乐梅(1986—),女,山东济南人,大学本科,工程师,研究方向:电磁兼容与安规、产品数据。

(收稿日期:2023-07-21)