

工业控制变送器系统防雷设计（第 193-198 页）： 包括冗余控制站（CPU、电源、通信模块）、现场 I/O 模块、压力/温度变送器、流量计（电磁/涡街）、电动调节阀、变频器、伺服驱动器、远程终端单元（RTU）、工业服务器等设备。围绕分层防护、等电位连接、信号与电源隔离三大核心，结合变送器（如 4-20mA、HART 协议、智能变送器）的信号特性（低电压、小电流、高精度）与环境风险（多雷区、强电磁干扰、危险区域），从 SPD 选型与安装、接地系统、电缆敷设、防爆设计、系统冗余等多维度构建防护体系，确保变送器在高雷击风险环境下的稳定性与安全性。



一、总体设计原则

- 1.1 **分层防护：**采用“外部防雷（接闪、引下）+ 内部防雷（屏蔽、接地、SPD）”的分层策略，形成“天面防直击雷—线路防传导雷—设备防感应雷”的多级屏障。
- 1.2 **等电位连接：**通过均压等电位连接减少电位差，避免反击雷对变送器的损害（如变送器外壳与金属电缆穿线管连接）。
- 1.3 **信号与电源隔离：**对变送器的信号线路（如 4-20mA）与电源线路分别设计防护，防止浪涌通过电源耦合干扰信号（如电源端加装 TVS 管，信号端串联 TVS 管）。
- 1.4 **防爆适配：**在氢气、乙炔等爆炸性危险区域，变送器需选用**隔爆型（Ex db Gb）**或**本安型（Ex ia Ga）**，并与安全栅配合使用，确保防雷设计符合防爆要求。

二、核心防雷措施

2.1 信号线路防护：SPD 选型与多级配置

变送器的信号线路（如 4-20mA、RS485、HART）是雷电感应的主要入侵途径，需采用**多级 SPD 防护**（电源端+信号端），确保浪涌能量在到达变送器前被有效衰减。

电源端 SPD 选型：

变送器的供电电源（通常为 24VDC）需加装**电源浪涌保护器**，参数要求：

最大持续运行电压（ U_c ）： $\geq 36\text{VDC}$ （覆盖 24VDC 电源的波动范围）；

标称放电电流（ I_n ）： $\geq 5\text{kA}$ （8/20 μs 波形，应对一般雷击浪涌）；

电压保护水平（ U_p ）： $\leq 60\text{V}$ （低于变送器的耐受电压，如 24VDC 变送器的耐受电压约为 30V）；

响应时间： $\leq 5\text{ns}$ （快速抑制瞬态过电压）。

例如，两线制变送器的电源端口可加装**压敏电阻（MOV）**或**TVS 管**，实现电源浪涌的初级防护。

信号端 SPD 选型：

变送器的信号线路（如 4-20mA、HART）需加装**信号浪涌保护器**，参数要求：

工作电压：匹配变送器的信号电压（如 4-20mA 信号的电压为 1-5V，RS485 信号的电压为 $\pm 5\text{V}$ ）；

钳位电压（ U_p ）： \leq 信号设备的耐受电压（如 HART 协议的耐受电压约为 $\pm 10\text{V}$ ）；

带宽：覆盖变送器的信号频率（如 4-20mA 信号的带宽为 0-10Hz，RS485 信号的带宽为 10MHz）；

插入损耗： $\leq 0.5\text{dB}$ （确保信号传输衰减在允许范围内）。

例如，4-20mA 信号的信号端口可串联**双向 TVS 管（如 P6KE 系列）**，钳位电压 $\leq 6\text{V}$ ，响应时间 $\leq 1\text{ns}$ ，有效抑制共模与差模浪涌；RS485 信号的信号端口可采用**三端 TVS 管**，实现 A、B 线的差模防护与屏蔽层的共模防护。

多级防护电路设计：

对于高雷击风险区域的变送器（如露天安装的压力变送器），需采用**三级防护**：

第一级：气体放电管（GDT），泄放高能量浪涌（通流容量 $\geq 10\text{kA}$ ），限制共模电压；

第二级：TVS 管，快速钳位差模电压（钳位电压 $\leq 30\text{V}$ ）；

第三级：安规电容+限流电阻，进一步抑制残压（残压 $\leq 20\text{V}$ ）。

例如，智能变送器的信号线路可设计为“GDT→TVS→安规电容”的三级防护，确保浪涌能量被逐

步衰减。

2.2 接地与屏蔽：等电位连接与浪涌泄放

接地是变送器防雷设计的关键，需实现**等电位连接**，确保浪涌电流通过接地系统快速泄放，避免反击雷。

接地系统设计：

变送器的**保护接地**：需接至厂区电气系统接地网，接地电阻 $\leq 4\Omega$ （若厂区接地网电阻较大，需独立设置仪表接地系统，电阻 $\leq 4\Omega$ ）；

变送器的**工作接地**（信号回路接地、屏蔽接地）：可采用单点接地（如在控制室侧接地），避免地环路干扰；

现场变送器的**防雷接地**：可采用“变送器本体连接到已接地的金属电缆穿线管”的方式，实现等电位连接（如金属电缆穿线管已接地，变送器外壳与穿线管连接，形成等电位）

屏蔽措施：

信号电缆：采用**双层屏蔽电缆**（如铠装屏蔽电缆），外屏蔽层（铠装层）穿钢管理地敷设，内屏蔽层（铜网）在控制室侧单点接地；

电源电缆：采用**带金属屏蔽层的电缆**，屏蔽层在电源端（如 MCC 侧）与控制室侧单点接地；

变送器外壳：采用**金属外壳**（如 316L 不锈钢），并与金属电缆穿线管连接，形成等电位。

2.3 电缆敷设：避免干扰与浪涌耦合

电缆敷设需遵循“**信号与电源分离、屏蔽与接地规范**”的原则，减少浪涌通过电缆传导至变送器。

电缆选型：

信号电缆：优先选用**双层屏蔽电缆**（如铠装屏蔽电缆），适用于室外或强电磁干扰环境；

电源电缆：选用**带金属屏蔽层的电缆**，或与信号电缆分开敷设（间距 $\geq 30\text{cm}$ ）；

电缆穿管：室外电缆需穿**钢管理地**敷设（埋深 $\geq 0.7\text{m}$ ），钢管两端接地（如与变送器的金属外壳连接）

敷设规范：

信号电缆与电源电缆：严禁混用同一根多芯电缆，需分别敷设或在同一槽架内用隔板严格分离（间距 $\geq 10\text{cm}$ ）；

电缆弯曲半径：信号电缆的弯曲半径 ≥ 10 倍外径（光缆 ≥ 15 倍外径），避免屏蔽层损坏；

电缆接头：中间接头需采用**防爆接线盒**，并做好防水与接地（如接头处与钢管连接）。

2.4 防爆设计：危险区域的特殊要求

在氢气、乙炔、氨气等爆炸性危险区域（0 区、1 区、2 区），变送器的防雷设计需符合**防爆标准**（如 IEC 60079、GB 3836），确保不会因防雷措施引发爆炸。

变送器选型：

0 区（连续或长期存在爆炸性气体）：选用**本安型变送器 (Ex ia Ga)**，配**隔离式安全栅 (Ex ia Ga)**；

1 区（正常运行时可能出现爆炸性气体）：选用**隔爆型变送器 (Ex db Gb)**，防爆等级 $\geq \text{Ex db II C T4 Gb}$ ；

2 区（正常运行时不太可能出现爆炸性气体）：选用**隔爆型或本安型变送器**，防爆等级 $\geq \text{Ex db IIB T4 Gb}$ 。

接线箱设计：

危险区域的变送器接线箱需选用**增安型 (Ex eb Gb)** 或**隔爆型 (Ex db Gb)**，并与安全栅配合使用（如安全栅安装在控制室，接线箱安装在现场，通过安全栅实现本安隔离）。

2.5 系统冗余与测试：确保防护有效性

SPD 冗余设计：对于关键变送器（如主工艺管道的压力变送器），可采用**双路 SPD 冗余**（如主 SPD 与备用 SPD 并联），确保一路 SPD 失效时，另一路仍能正常工作；

定期测试：每季度测试接地电阻（ $\leq 4\Omega$ ），每年雷雨季前检查 SPD 的状态（如失效指示灯是否亮起），累计 ≥ 3 次失效后强制更换 SPD；

模拟测试：采用**浪涌发生器**模拟雷击浪涌（如 $8/20\mu\text{s}$ 波形，电流 $\geq 5\text{kA}$ ），测试变送器的抗浪涌能

力（如输出信号是否稳定，是否损坏）。

三、实施与维护要点

3.1 施工规范：

SPD 安装位置：靠近变送器（距离 $\leq 0.5\text{m}$ ），减少连接线长度（ $\leq 0.5\text{m}$ ），避免浪涌电压叠加；

连接线要求：SPD 的连接线需采用**多股铜芯线**（截面积 $\geq 4\text{mm}^2$ ），颜色区分（如电源端用红色，信号端用蓝色），避免与电源线混淆；

接地标识：接地端子需标注“PE”（保护接地），便于维护。

3.2 检测与维护：

接地电阻测试：每季度用**接地电阻测试仪**测试接地电阻（ $\leq 4\Omega$ ），若电阻超过阈值，需检查接地极或接地线路；

SPD 状态检查：每年雷雨季前检查 SPD 的**失效指示灯**（如红灯亮表示失效），累计 ≥ 3 次失效后更换 SPD；

电缆绝缘测试：每半年用**兆欧表**测试电缆绝缘电阻（ $\geq 100\text{M}\Omega$ ），避免电缆老化导致漏电。

四、典型案例参考

案例 1：露天压力变送器的防雷改造：

某石化装置的露天压力变送器（4-20mA 输出）因雷击损坏，改造措施包括：

电源端加装**压敏电阻（MOV）**（ $U_c=36\text{VDC}$ ， $I_n=5\text{kA}$ ）；

信号端串联 **TVS 管**（钳位电压=6V，响应时间=1ns）；

电缆穿**钢管**埋地敷设（埋深=0.8m），钢管两端接地；

变送器外壳与钢管连接，形成等电位。

改造后，该变送器在后续雷雨季节未发生损坏。

案例 2：危险区域温度变送器的防雷设计：

某氢气装置的温度变送器（PT100 输入，4-20mA 输出）安装在 1 区（爆炸性气体环境），设计措

施包括：

选用**隔爆型温度变送器 (Ex db IIC T4 Gb)** ；

电源端与信号端均加装 **SPD**（电源端：MOV， $U_c=36VDC$ ；信号端：TVS，钳位电压=6V）；

电缆采用**双层屏蔽电缆**（铠装层穿钢管理地，内屏蔽层在控制室侧单点接地）；

接线箱选用**隔爆型 (Ex db Gb)**，并与安全栅配合使用。

改造后，该变送器运行至今未发生雷击损坏。