

技术白皮书

工业级 LED 选型手册

PLC / 充电桩 / 仪器仪表应用指南

东莞市弘呈光电有限公司

应用工程团队

版本 v1.3 | 2026 年 9 月 | www.hc-led168.com

撰写： 东莞市弘呈光电有限公司——资深应用工程团队 **经验：** 工业 LED 封装与光电系统设计 20 余年
版本： v1.3 | 2026 年 9 月

本手册中的应用说明与参数建议反映行业通行做法及我司应用工程经验。关键参数请通过项目专项可靠性验证予以确认。

摘要

工业级 LED 并不是给消费级 LED 贴上一个更宽的温度标签。两者的差异贯穿材料体系的每一层：固晶材料、键合线冶金、封装胶化学体系、支架镀层。多年来，我们见过太多工程师从分销商目录里抓一颗便宜的 0805 LED，塞进 PLC 前面板或充电桩显示屏，然后纳闷为什么两个冬天过后有 15% 的单元已经失效。

本手册写给周一早上就要做选型决策、没时间成为 LED 博士的工程师。我们覆盖三个代表我司工业业务主体的应用方向：可编程逻辑控制器（PLC）、电动汽车（EV）充电基础设施、过程仪器仪表。对每个方向，我们讲清环境应力、相关行业标准，以及真正重要的 LED 参数——而不是那些只在规格书上好看的参数。

成本问题我们也直说。是的，工业级 LED 的价格是玩具级的 2~4 倍。但替代方案是凌晨两点派维修车去造纸厂换一块失效的 HMI，或者充电桩因为状态指示灯暗到看不清而“黑站”。这笔账并不难算。

第一章 工业环境——什么在杀死 LED

1.1 极端温度与温度循环

工业设备不住在客厅里。铸造车间的 PLC 周围空气温度可达 55°C；凤凰城的充电桩黑色外壳内部温度可达 70°C；北极管线的仪表必须扛住 -40°C 冷启动。LED 封装必须经受这一切而不开裂、不分层、不掉亮度。

比稳态高温更具破坏性的是温度循环。钢厂里的一台 PLC 可能随炉子启停每班循环 20°C→60°C 两次，五年下来就是 3000 次以上循环。PCB（FR-4：约 14 ppm/°C）、焊料（SAC305：约 21 ppm/°C）、LED 支架（铜：17 ppm/°C）、芯片（GaN：约 5.6 ppm/°C）之间的热膨胀系数（CTE）失配，在每一个界面上产生剪切应力。最终总有一处先撑不住——通常是键合线根部或焊点。

设计准则： 指定按 JEDEC JESD22-A104 通过至少 1000 次 -40°C~+125°C 循环的 LED。若应用每天温度循环超过一次，要求 1500 次以上循环，或改用更粗线径的金线键合（20~25μm）和增强型支架设计。

1.2 湿度与凝露

户外充电桩和沿海仪表经常面对 100% RH。更糟的是凝露——夜间外壳降温时液态水在 PCB 上凝结。水加偏压等于电解，驱动离子迁移、腐蚀和枝晶生长。

标准消费级 LED 做 85°C/85%RH 168 小时就算完事，这对工业远远不够。我们建议至少要求 1000 小时 85°C/85%RH 加偏压试验（JEDEC JESD22-A101）作为基线，并以 96 小时

HAST (130°C/85%RH, JESD22-A110) 作为加速筛查。过不了 HAST 的 LED, 也撑不过佛罗里达停车场的五年。

1.3 振动与机械冲击

装在冲压机上的 PLC、压缩机撬块上的仪表、停车场里会被卡车倒车撞到的充电桩。LED 必须按 IEC 60068-2-6 抗振动(正弦, 10~500 Hz, 5G)、按 IEC 60068-2-27 抗冲击(50G, 11 ms 半正弦)。长引脚直插 LED 尤其容易疲劳失效; 引脚短、重心低的 SMD 封装表现更好。

1.4 化学暴露

硫化问题我们在白皮书—《LED 指示灯失效分析》中已详述, 但工业 LED 还面对盐雾(沿海和道路撒盐环境)、油类、切削液和清洗溶剂。按 ASTM B117 做盐雾试验(5% NaCl, 35°C, 96 小时)是沿海充电桩的良好筛查手段。油类暴露方面, 我们见过标准环氧封装胶在 60°C 液压油中浸泡 500 小时后溶胀软化。硅胶和 PCT 基封装的耐受性要好得多。

第二章 PLC 应用——可靠性优先于亮度

2.1 真实需求

PLC 状态指示灯的活儿很简单: 告诉维修技师继电器是否吸合。它不需要 1000 mcd, 需要的是在可能 55°C、充满电机驱动器臭氧的柜子里活过 10 年以上。

我们见的最常见错误是亮度超配、可靠性欠配。200 mcd 的红光 LED 在昏暗柜子里已经足够醒目; 1000 mcd 的 LED 跑在 20 mA 只是多发热、死得更快。我们的建议: 按 10 mA 下 100~300 mcd 选型, 电流上有 2 倍降额裕量, 结温也低。

2.2 颜色编码与波长稳定性

工业 HMI 依赖颜色编码: 红=故障, 绿=运行, 黄=警告。如果红光 LED 因荧光粉劣化向橙色漂移, 或绿光 LED 因芯片波长漂移偏向青色, 操作员就会误判。这是安全问题, 不只是美观问题。

指定严格分档: 单色 LED (红、绿、黄) ± 2 nm, 白光 3 阶麦亚当椭圆。要求供应商保证分档随温度稳定——一些廉价 LED 结温从 25°C 升到 85°C 时漂移 5 nm, 足以把"停止"红变成"警示"橙。

2.3 电气隔离与 EMI

PLC 与变频器、接触器为邻, EMI 环境恶劣。LED 引脚会像天线一样拾取噪声, 造成误指示或闪烁。LED 走线要短; 引出 PCB 时用双绞线; 在 PCB 上 LED 两端并一颗 100 nF 陶瓷电容。LED 线缆超过 30 cm 要屏蔽。

对 24V PLC 逻辑, 不要不加限流电阻直接从逻辑轨驱动 LED。内置限流的 24V LED 模组更好——它能在附近感性负载切换时抵御瞬态过压。

2.4 PLC 用 LED 推荐规格

参数	最低规格	优选规格	说明
封装	3mm 圆头或 0805 SMD	3mm 圆头带定位柱	定位柱利于清洗并减小焊点应力
光强	100 mcd @ 10 mA	200 mcd @ 10 mA	不要为亮度过驱动
视角	60°	30°（窄角）	窄角在明亮柜体中更易辨识
工作温度	-25°C~+85°C	-40°C~+105°C	上限比下限更重要
ESD HBM	2,000V	4,000V	手工维修装配必备
封装胶	硅胶	硅胶	环氧在 PLC 淘汰前早就黄变了
支架	PPA 或 EMC	PPA 或 EMC	工业气氛中避免镀银
温度循环考核	500 次	1000 次	-40°C / +125°C
HAST	96 小时	168 小时	130°C / 85%RH

第三章 充电桩——户外酷刑

3.1 热问题

充电桩本质上是装着电子设备的烤箱。功率模块往壳内排热，夏季阳光直射黑色钢柜，内部空气可达 70°C。LED 显示屏和状态指示灯就泡在这团空气里，往往几乎没有气流。

更糟的是 LED 全天候点亮。一个"充电中"指示灯在车辆充电的 8 小时里持续工作，累积可观的热应力。若结温达到 120°C，光衰速度比 80°C 时快一个数量级。

热设计准则：

- 用高亮 LED 低电流驱动（5~10 mA），而不是标准 LED 跑 20 mA。同样体感亮度，发热减半。
- 若用白光 LED 做背光 Logo 或显示，结温始终控制在 85°C 以下。通常意味着 LED 下加热过孔，必要时 PCB 背面加小型铝散热片。
- 数码管选每段低电流（2 mA）的型号并做动态扫描，不要直流驱动。100 Hz、1:4 占空比扫描可将平均功耗降低 75%，且无可见闪烁。

3.2 抗紫外

户外 LED 直面阳光。UV-B（280~315 nm）和 UV-A（315~400 nm）光子的能量足以打断标准环氧封装胶的化学键，加速黄变和表面龟裂。添加紫外稳定剂（受阻胺光稳定剂，HALS）的硅胶封装表现好得多。我们也见过在 LED 前方加一片独立紫外滤光 PC 透镜的良好效果，代价是成本和光损。

3.3 防护等级（IP）

充电桩至少需要 IP54（防尘、防溅水），通常要 IP65（尘密、防喷水）。LED 本身不是密封难点——难在 LED 透镜与前面板之间的界面，密封垫圈设计至关重要。

我们建议使用带一体式硅胶垫圈的面板安装 LED 灯座（如 VCC CNX 系列或同类），而不是指望 LED 引脚去堵孔。灯座提供机械保持、密封面板开孔，还允许不拆整机就更换 LED。

3.4 浪涌抗扰

充电桩连着电网，而电网瞬态极其残酷。两英里外的一次雷击可在 AC 线上感应出 2 kV 瞬态，经电源耦合到 12V 或 5V 的 LED 供电轨。曾有整排状态指示灯被单次浪涌事件全灭——就因为设计者以为开关电源能吸收一切。

防护策略：

- 在 LED 供电轨上加 TVS 二极管（如 SMAJ15A），尽量靠近连接器。
- 每路 LED 串加 100Ω 串联电阻，限浪涌电流，成本几乎为零。
- 若指示灯在与主控分离的 PCB 上，用光耦驱动，实现电气隔离并消除地环路。

第四章 过程仪表——精度与长寿命

4.1 标定问题

过程仪表——流量计、压力变送器、分析探头——服役寿命往往 15~20 年。其上的 LED 指示灯必须在整个寿命期内保持可辨，因为重新标定和状态指示是安全论证的一部分。不能允许“故障”灯在午夜检修时暗到看不见。

这意味着光通维持率不是“加分项”，而是规格。我们建议要求 LM-80 测试数据并用 TM-21 推算 L70（光通维持 70% 的时间）。对 20 年寿命的仪表，需要在工作温度下推算 L70 > 50,000 小时的 LED。只有少数硅胶封装、高等级芯片的产品能满足。

4.2 防爆与本安环境

油气与化工厂中，LED 可能用于隔爆型（Ex d）或本安型（Ex i）回路。Ex i 回路限制能量 <1.2W、<30V，对 LED 来说很容易。但若封装失效露出高温芯片或键合线，LED 绝不能成为点火源。

指定封装胶满足 UL 94 V-0 阻燃等级。真正严苛的化学环境中，考虑玻璃透镜金属壳的气密封装 LED。单价 2~5 美元，对比标准指示灯的 0.20 美元——但当气氛中含硫化氢、苯等可燃气体时，这是唯一选项。

4.3 低光量级可靠性

一些分析仪器把 LED 用作光源（光度计、浊度传感器）而不仅是指示灯。此时光强稳定性直接影响测量精度：LED 输出漂移 5%，分析结果就误差 5%。

此类应用建议：

- 用精密恒流源驱动 LED，而不是简单电阻限流。
- 用反馈光电二极管实时监测 LED 输出并补偿老化。
- 选择每 1000 小时光衰 <1%（工作温度下实测）的 LED。
- 避免白光 LED；单色 LED（典型 660 nm 红光或 880 nm 红外）没有荧光粉劣化问题，长期稳定性好得多。

第五章 标准符合性核查清单

标准	范围	核查要点
IEC 62717	通用照明 LED 模块	不直接针对指示灯，但可作为光通维持率声明的基线
IEC 60068-2-6	振动（正弦）	LED 及组件须承受 10~500 Hz、5G、每轴 2 小时
IEC 60068-2-27	机械冲击	50G、11 ms、半正弦、每方向 3 次
IEC 60068-2-78	稳态湿热	户外应用至少 40°C / 93%RH、56 天
IEC 61000-4-5	浪涌抗扰	电源端口线-线 ±1 kV、线-地 ±2 kV
IEC 61000-4-2	ESD 抗扰	外壳接触放电 ±8 kV、空气放电 ±15 kV
UL 94	阻燃	密闭空间内封装胶 V-0 级
AEC-Q102	车规	工业应用想要"超规格"时可采用；覆盖以上全部且更多

第六章 供应商审核——该问什么

为工业用途审核 LED 供应商时，不要只看规格书。以下是我司应用工程团队建议核查的内容：

- 1. 芯片可追溯性** 供应商能否告诉你外延片来自哪家外延厂？能否提供晶圆批号？如果不能，你买的不是元器件，是彩票。
- 2. 键合机校准记录** 要求提供最近三个月的键合拉力测试数据。18~20μm 金线第一焊点拉力应 >5 gf，25μm 纯金线 >8 gf。供应商不愿分享，就走人。
- 3. 封装胶分析证书** 索取当批封装胶的 Tg、CTE 和光谱透过率数据。我们见过供应商在生产中途为省钱更换封装胶配方，六个月后引发一波分层失效。
- 4. 含原始数据的可靠性报告** 不接受一页纸的"通过"总结。要求提供 HTOL、温度循环、HAST 的单颗器件原始数据。留意离群值——几颗勉强通过的样品是工艺漂移的预警信号。
- 5. 变更通知协议** 工业产品生命周期长。需要正式的 PCN（产品变更通知）协议，保证任何材料或工艺变更提前 90 天通知。关键应用我们建议 180 天。