WHITE PAPER

INSIGHTS THAT POWER INNOVATION

LITEON®

承载型以太网（Load-Bearing Ethernet）

802.3bt 标准、成本与安全规范指南

网络、设施管理及实体安全团队适用

Version 2.0 — 八月 2026

读者指南与声明

本节快速说明本白皮书的目的、使用方式、研究方法与相关揭露事项。

关于本白皮书

本白皮书整合并取代 LITEON 先前发表的 PoE 策略系列文章（2026 年 7 月），该系列分别探讨新兴应用、部署成本、安全性以及标准选型等议题。本文作为整合版本，汇集其中最具价值的内容，并淘汰部分已不再适用的章节，将相关资讯统一整理为参考文件。

如何使用本白皮书

- 若您正在规划设备更新或撰写采购规范，可先阅读第三章。
- 若您正在建立预算规划或商业案例，可参考第四章。
- 若系统可用性对您至关重要，第五章将是最值得关注的内容。
- 若您重视安全性与风险管理，可阅读第六章。

附录提供依部署阶段整理的实务检查清单，可作为导入指南。

利害关系揭露

本白皮书由 LITEON 发布。LITEON 的产品线涵盖电源供应器与 LED 照明元件，其中有两项建议与这些产品类别相关：

第五章主要探讨网络基础设施电力需求，而非额外加购项目；第二项则讨论了 PoE 照明。上述观点皆依据产业通用的讨论方式提出，但阅读时仍应了解其背景来源。

本文在第三章中指出，不应在预算情况下直接选择较高等级的交换器。该观点所批评的是 LITEON 并未参与竞争的产品类别，因此在某种程度上较具客观性，与其读者自行察觉，不如在此直接说明。

资料来源与研究方法

所所有参考资料均以编纂方式列于文末，涉及 IEEE 标准技术文件及直接引用的相关规范，包括：

- IEEE 802.3af-2003
- IEEE 802.3at-2009
- IEEE 802.3bt-2018

以及 Ethernet Alliance 所發布的標準概要文件。文中標示為廠商提供的數據均反映製造商宣稱值，而非第三方獨立測量結果。全文採用的 20% 至 25% 緩衝裕度為 LITEON 自身的設計建議，因此明確標示為 LITEON 建議值，而非產業標準。對於部分無法找到可引用原始來源的論述，文末亦提供補充說明。市場採用程度相關判斷則反映截至 2026 年中期的市場狀況。

目录

读者指南与声明 2
执行摘要 4
一、从便利性走向基础设施 5
二、真正推动需求的是什么 6
三、选择标准：双时钟问题 9
四、部署成本估算 14
五、故障影响范围 19
六、保护您所建设的系统 21
七、结论 25
附录：PoE 部署整合检查清单 26

执行摘要

乙以太网供电（Power over Ethernet，PoE）作为一项幕后技术已经存在二十多年。长期以来，它默默地为桌面电话和无线接入点提供电力，几乎没有引起人们的特别关注。然而，这个时代正在结束。

IEEE 802.3bt-2018 将供电设备的输出功率提升至 90W，并通过结构化布线系统的全部四对线缆，将受电设备的保证供电功率提升至 71.3W。与 2003 年最初发布的标准相比，供电能力约提高了六倍。这意味着一个重要门槛已经被跨越。PoE 如今已能够真正取代，而不仅仅是补充传统 AC 电路，并可应用于越来越多类型的建筑系统，包括 Wi-Fi 7 无线接入点、无风扇边缘计算设备、照明、大型显示器以及销售点终端设备（POS）。

本白皮书旨在为这一转变提供系统性的规划方法，并按照部署生命周期进行组织，包括标准选择、部署成本估算、故障影响范围规划，以及已建系统的保护策略。

以下四项内容通常不会出现在厂商比较表中：

- 双时钟问题（第三章）

  您的布线系统与交换机具有不同的生命周期。布线保修期可达 25 年，而交换机更新周期通常为 5 至 10 年。因此，“未来可扩展性”实际上是两个具有相反经济逻辑的决策。将两者混为一谈，往往会导致组织同时在交换机上投入过多，却在布线上投入不足。

- 透明的 TCO 模型（第四章）

  许多资料宣称 PoE 的部署成本低于建设 AC 电路；然而，几乎没有资料真正展示其计算方式。本文则提供完整的计算过程，以每个设备安装位置为单位，并明确列出每一项假设条件，包括那些对 PoE 不利的假设。

- 故障影响范围（第五章）

  当摄像机、门禁控制系统和电话系统共享同一个供电域时，单台交换机故障究竟会导致多少设备同时中断运行？本文提供一种分析方法，帮助读者判断自己能够接受何种程度的集中化。

- 电力作为安全控制手段及其局限性（第六章）

  在 PoE 基础设施中，交换机既是网络设备，也是供电设备。这使应急响应人员拥有一种在传统笔记本电脑环境中所不具备的控制手段。然而，这同时也是一个潜在陷阱，因为电力供应状态与端口状态可以彼此分离，而大多数管理人员往往默认两者是同步且一致的。

在上述四个主题中，有一项原则反复出现：应依据设备的实际需求，而非铭牌标示的最大额定值来制定规格，并预留合理余量。这一原则同样适用于两个方向，并且本文刻意将两者区分开来。对于已知即将部署的设备，如果配置不足，最终可能获得一个表面上符合规格、实际上却只能以降级模式运行的系统；相反，如果为了某些可能永远不会出现的设备而过度配置，则需要为额外容量支付更高成本，而这些容量原本可能在下一轮设备更新时以更低成本获得。第三章的重点，正是帮助读者区分这两种截然不同的情况。

一、 从便利性走向基础设施

当 PoE 于 2003 年完成标准化时，它解决的是一个相对狭窄的问题：让 VoIP 电话无需在每张办公桌旁配置由电工安装的电源插座即可供电。IEEE 802.3af-2003 可通过 Cat5e 线缆的两对线对提供最高 15.4W 的功率，而无线接入点则在数年后开始采用这项技术。在此后近二十年的大部分时间里，PoE 都是一种便利功能，用来避免额外再铺设一条电源线。

802.3bt 改变了这一定位。将 PSE 输出功率提升至 90W，并将设备端的保证供电功率提升至 71.3W，其意义不只是扩展既有应用场景，而是让一类过去必须依赖专用电力回路的设备得以导入 PoE。无风扇迷你电脑、运行三组无线电的 Wi-Fi 7 无线接入点、LED 照明区域，以及轻薄型一体式显示器，这些都是建筑系统，而非网络外围设备，如今它们都可以通过以太网线缆供电。换句话说，这条线缆已经成为承载负载的基础设施。

这项转变带来了一个多数规划流程尚未充分吸收的结果：交换机机柜已悄悄变成一套电力公用系统。它仍然以网络设备的方式进行预算编制、采购与更新，但越来越多依赖其运行的设备，在过去原本属于电力工程人员所负责的范畴。

接下来的章节将围绕着四个因这项改变而产生的新问题展开：应该采购哪一种标准、实际成本是多少、故障发生时有哪些东西会受到影响，以及如何保护一个同时承载电力与数据的端口。

二、真正推动需求的是什么

无线网络是需求最高的使用者

无线网络基础设施正在迫使人们重新思考什么才算是“足够的” PoE 供电配置，而这也是组织最有可能发现其电力预算不足的地方。802.3bt Type 3 每端口可提供最高 60W 功率，定位于高性能无线接入点，包括 Wi-Fi 7；Type 4 则可提供最高 90W 功率，目标应用为功耗最高的设备。这种差异直接反映在设备的实际行为上。Juniper AP47 需要约 29W 功率，并且“需要 IEEE 802.3bt 供电才能提供完整功能”；若使用 802.3at，则“AP 将以降级功能模式运行”，三个 Wi-Fi 无线电将降为 2x2:2，或仅启用两个无线电的 4x4:4 模式。Zyxel 的 WBE660S 则在其官方支持文件中，直接将天线配置与供电来源进行对应：使用 802.3bt 时为 4T4R，使用 802.3at 时为 2T4R，而使用 802.3af 时则会完全关闭 Wi-Fi。这形成了一个特定的规划陷阱：网络在纸面上可能已经具备 Wi-Fi 7 就绪能力，但实际上却只能提供接近 Wi-Fi 6 等级的性能，原因纯粹是交换机机房的供电预算仍按照上一代设备的功耗需求进行规划。不同设备的需求各不相同，因此在多厂商混合部署环境中，套用统一的假设并不安全。

> **限制：**变异性本身就是风险。“查阅特定设备的数据表”这种做法，并不适用于跨多个站点的更新项目。支持 Type 4 的交换机通常具有较高的成本溢价，而且随着端口数量增加，这项成本会持续累积。此外，即使一台 60W 交换机的功率看似足够，若不符合 802.3bt 规范，无线接入点仍可能无法正确上电。决定兼容性的，是是否符合标准，而不是功率数值本身。

边缘计算进入 Type 4 时代

到达设备端的大约 71.3W 功率，已足以驱动无风扇迷你电脑、销售点终端（POS）以及纤薄型一体式显示器，而不再只是摄像机与电话。

这在下列情境中特别重要：

- 零售与餐饮业，其中 POS 终端与边缘分析设备可共享原本就服务于摄像机与无线接入点的交换机
- 工业与仓储环境，其中基于视觉的检测节点可以部署及重新配置，而无需安排电工到场
- 分布式分支机构或自助服务终端（Kiosk）环境

> **限制：**长时间以高功率运行的无风扇设备，必须面对真实的散热权衡问题。在通风不良的设备间中，一个持续消耗接近 71W 功率的机箱，其可靠性条件与同一机箱处于空闲状态时并不相同。此外，还存在跨厂商验证缺口。边缘计算设备供应商与 PoE 交换机供应商，并不一定会共同验证彼此的硬件。因此，规格表上标示的“支持 Type 4”，并不等同于已经通过与您的交换机进行互操作性验证。若设备是按照 Type 4 规格设计，却部署于 Type 3 基础设施上，则可能出现性能下降或无法启动的情况。

照明：部署历史最长的应用

通过以太网供电与控制的 LED 照明设备，是本节所有应用中部署历史最长的一类。早在 2019 年，Panduit 就已发布专门的设计指南，将 PoE 视为智能建筑固定网络基础层的一部分，其中包括照明应用。照明也是最能体现本文核心观点的应用，因为在这个领域中，PoE 明确是在取代电力回路，而不只是为网络连接提供补充。

> **限制：**我们无法找到具有充分依据的数据来说明其实际采用程度。许多资料宣称 PoE 照明已成为“新建筑中的主流方案”，但我们无法将这些说法追溯至独立测量数据，因此本文不采用这一主张。我们可以更有把握地提出一个范围较小、但也更有用的结论：设计指南已经存在且相当成熟；许多 PoE 照明部署确实与较高功率的 Type 3 或 Type 4 基础设施相关，虽然实际需求仍取决于灯具设计与照明架构。此外，预算通常由设施部门负责，而基础设施

则由 IT 部门管理。因此，从设计阶段开始建立共同负责机制，是最重要的规划步骤，同时也是最常被忽略的一步。不同司法管辖区对于较高功率等级在电气法规下的适用方式也有所不同，因此应在项目早期便与主管机关进行讨论，而非等到后期才处理。

列入观察名单，而非路线图

单对以太网（Single Pair Ethernet）IEEE 802.3bu-2016 为 100BASE-T1 与 1000BASE-T1 引入了单对线数据供电，使传感器能够通过单根细线同时获得数据与电力，而这类环境原本并不适合使用四对线缆。然而，该技术仍处于相对早期的采用阶段。互操作性相关工作仍在进行中；相较于四对线缆生态系统，多厂商测试仍然较少；除了汽车产业与部分工业应用之外，大规模部署数据也较为有限。除非目前已经展开工业自动化或高密度传感器项目，否则建议采取“观察与试点”策略。

离网与太阳能 PoE

结合太阳能与电池的 PoE 系统已发展成为具备完整能力的工业设备：太阳能板产生可变化的输出，最大功率点跟踪（MPPT）优化能源获取，直流升压器将其转换为稳定的 48V PoE，而电池组则在日照不足时提供支持。商用设备进一步加入了每端口调度功能，并可在电池电量低于特定阈值时，切断优先级较低的端口。应谨慎看待其中的具体细节。极端低温环境下的电池性能是一项已知限制，但供应商的营销资料很少详细说明；远程维护是一项前期报价通常未纳入的持续性成本；而位于偏远闸门旁无人值守的机柜，也比设置于受保护建筑物内的设备更容易成为物理攻击目标（第六章）。

此类领域流传的性能数据，多来自制造商推广其自身产品，因此应视为针对特定 SKU 的宣称，而非该产品类别的普遍事实。对于任何远程资产，在部署之前必须回答的问题是：在连续数天日照不足的情况下，各端口的供电预算为何，以及当必须进行负载卸除时，各端口的优先级应如何安排。

三、 选择标准：双时钟问题

每一家交换机供应商都会发布 802.3af、802.3at 与 802.3bt 的比较表，而且大多数内容都是正确的。他们很少提供的是一套决策方法。而当答案不明确时，他们往往会给出相同的建议：购买规格更高的交换机。这项建议并不完整，而且值得注意的是，提出这项建议的人是谁。

各标准概览：

标准	类型	PSE 输出功率（最大值）	设备端功率（保证最小值）	线对数	典型设备
802.3af (2003), “PoE”	Type 1	15.4W	~12.95W	2	IP 电话、基础型摄像机、门禁卡读卡器
802.3at (2009), “PoE+”	Type 2	30W	~25.5W	2	PTZ 摄影机、Wi-Fi 5/6 无线接入点、视频电话
802.3bt (2018), “PoE++”	Type 3	60W	~51W	2 or 4	Wi-Fi 6E/7 无线接入点、瘦客户端、显示器
802.3bt (2018), “PoE++”	Type 4	90W	~71.3W	4	PoE 照明、边缘运算设备、大型显示器

表格中的四个细节会影响决策，而其中有两个正是市场经常误解的地方。应该拿来比较的是“设备端功率”这一栏。PSE 输出功率与实际送达设备的功率之间的差异来自线缆损耗，而供应商对这两种数值的引用方式并不一致。

此外，每一项标准都具备向下兼容性：802.3bt 交换机可通过标准的检测与分类机制，安全地为 802.3af 设备供电，因此采购更高等级的设备不会使现有设备失去支持。相反，真正会出现问题的是将仅支持 bt 的设备连接到 af 交换机上。

理解 “90W” 与 “100W 级 PoE” 术语

行业营销资料经常提及 “100W 级 PoE（100W-class PoE）” ，而 IEEE 802.3bt Class 8 所规范的则是 90W 连续 PSE 输出功率。在实际应用中，这两种说法都经常出现在供应商文件中。两者的差异主要是术语上的差异，而非部署规划上的差异，因为采购决策应根据 IEEE 分类以及实际设备功率需求来进行。就规格定义而言，IEEE 802.3bt Type 4 / Class 8 所定义的最大连续 PSE 输出功率为 90W，而 PD 端的最低保证功率约为 71.3W。因此，在采购文件中，应引用 IEEE 分类及经过验证的功率预算，而不应仅依赖营销用语。

Type 3 不一定是四对供电

Type 3 PSE“可能仅具备 2 对供电能力，在这种情况下最多支持 Class 4（25.5W PD）；也可能具备 4 对供电能力，此时则可支持最高 Class 6 PD（51W）。虽然在企业部署中较不常见，但 IEEE 802.3bt 确实允许仅支持 2 对供电的 Type 3 实现。因此，采购规格应明确确认是否具备 4 对供电能力，而不应仅根据 Type 等级进行判断。线对供电能力应与 Type 等级一同列入采购规格之中。这是最容易避免、却也最常发生的情况之一，也就是买了 “bt”，却没有真正获得预期的 bt 能力。

最后，Type 与 Class 是两个不同的概念。Type 代表标准世代；Class（0 至 8）则代表交换机与设备之间协商实际功率配置的方式。这也是为什么一台总功率预算不算特别高的交换机，仍然能够同时服务低功耗与高功耗设备，而不需要在每个端口预留最大功率。802.3bt 新增了 Auto Class 功能。这是一项可选功能，PSE 会在设备启动时测量其实际功耗，并据此调整所分配的功率。当交换机与设备双方都支持此功能时，它相当实用。不过，是否支持应事先确认，而不应直接假设一定具备。

标准与设备的对应方式

有一个实用的经验法则可以涵盖大部分设备对应问题：如果设备具有屏幕、加热器、电机，或超过一个无线电模块，就可以假设它已超出 802.3af 的适用范围。一般桌面电话可以使用 af；但配备视频屏幕的同款电话则需要 at。固定式室内摄像机可以使用 af；但若增加红外补光灯、适用于户外环境的加热器，或具备水平旋转、垂直倾斜与变焦（PTZ）电机，则需要 at 或更高等级的供电。Wi-Fi 6 无线接入点通常以 802.3at 作为常见默认配置；而 Wi-Fi 7 无线接入点在需要完整功能与最高性能时，则经常受益于 802.3bt，不过实际需求仍会因供应商及平台架构而有所不同，如第二章所述。这项经验法则是一种初步筛选工具，而非规格依据。规划时应以数据表中的需求数值为准，而非以标准所允许的最大功率上限作为依据。

两类需要特别处理的情况

供应商专有的高功率版本，例如 Cisco 的 UPoE（60W）与 UPoE+（90W），通过 Cisco 自有的发现协议进行协商，其出现时间早于 802.3bt 或与之并行发展。这些技术通常可以与 802.3bt 共存，但也意味着线缆两端都必须使用兼容的同品牌设备。因此，应将此限制纳入采购考量之中。被动式 PoE（Passive PoE）则属于完全不同的类别：固定电压直接施加在线路上，没有检测、分类或协商机制，常见于低成本无线设备及监控设备。由于它无论连接设备是否进行协商，甚至是否支持 PoE，都会持续供电，因此不兼容的被动式 PoE 注入器可能直接损坏设备；而符合 IEEE 标准的设备则会先进行检测，正是为了避免此类情况发生。被动式 PoE 并不是一种可供选择的标准，而是一项应予以排除的兼容性风险。

双时钟

以下是每份比较指南都会提及、却很少深入分析的问题：是否应该购买超出当前需求的标准等级？供应商的标准答案通常是：当无法确定时，倾向选择更高功率等级。这个答案并非错误，而是不够完整，因为它将整个部署视为一次采购行为。实际上，这是两项具有不同生命周期的采购，而未来扩展的逻辑在两者之间恰好相反。

线缆基础设施是长时钟

结构化布线厂商提供分级系统保修，最长可达 25 年。以 Panduit 的 Certification Plus 计划为例，即提供“15 年、20 年或 25 年，基于标准的性能保修”。这是保修期限，而非经过测量验证的实际使用寿命，但它反映了行业进行设计时所依据的时间尺度。更换线缆具有高度干扰性，而且成本主要来自人工施工。相比之下，达到“足够”与达到“优秀”之间的材料成本差异并不大：第四章的基准数据表明，每个布线点从 Cat6 升级至 Cat6A 的成本差异约为 75 美元。今天部署的线缆，很可能横跨三代交换机与两代终端设备。因此，在新建工程或大型改造项目中，只要能够真正利用其完整使用年限，从经济角度来看，线缆配置偏向超前部署是合理的。若在 2026 年的新建筑中选择 Cat6 而非 Cat6A，只为节省每个点位 75 美元，那么到了 2036 年，组织将为这一决定付出数倍代价。

交换机是短时钟

企业级 PoE 交换机通常以 7 至 10 年作为规划使用年限，而较低端产品则通常在 5 至 7 年之间。这使得超前配置的经济逻辑完全颠倒。如果组织未来五年的设备路线图中并不包含 Type 4 负载，那么今天购买 Type 4 能力，意味着为一项未来才可能出现的需求支付 802.3bt 溢价。即使这一需求最终出现，很可能也是在下一次设备更新周期附近。届时，您可以用当代的价格，购买当代的功能与规格。只有当该需求很可能会在当前交换机的使用寿命内，也就是更新周期中途出现时，超前配置交换机才算是一种成本合理的保险。

用一句话概括这一原则：对不易更换的资产进行超前配置，对本来就会更换的资产按实际需求配置。这正是供应商内容中很少提供的另一面观点。对于未来五年的部署计划，如果只包含电话、门禁读卡器、固定式摄像机以及标准无线接入点，那么 802.3at 并不是一种妥协方案。它就是正确答案。而这种情况其实相当常见，只是支持它的人比较少而已。

> **限制：**这套分析框架假设设备更新遵循一般的经济模式，同时也假设 bt 的价格溢价高到足以成为考量因素。我们无法取得能够充分佐证该溢价程度的数据（详见第四章），因此，是否采用“按需求配置”的建议，应以贵组织实际取得的报价为准，而非以本文的分析作为证明。此外，在以下情况下，这套分析框架的适用性也会降低：

- 设备更新周期远超过十年
- 已知的中期设备转换计划已经排定执行
- 组织进行第二次采购周期的成本，相较于硬件成本本身特别高

例如，若在一台预计使用七年的交换机部署后第二年便规划导入 Wi-Fi 7，则采用 802.3bt 的理由可能会更加充分，但仍需视所选无线接入点的架构以及其整个使用期间所需提供的功能而定。

决策框架

本框架采用三项输入条件：设备路线图的明确程度、现有布线系统状况，以及交换机更新时间安排，并刻意将线缆决策与交换机决策分开进行。

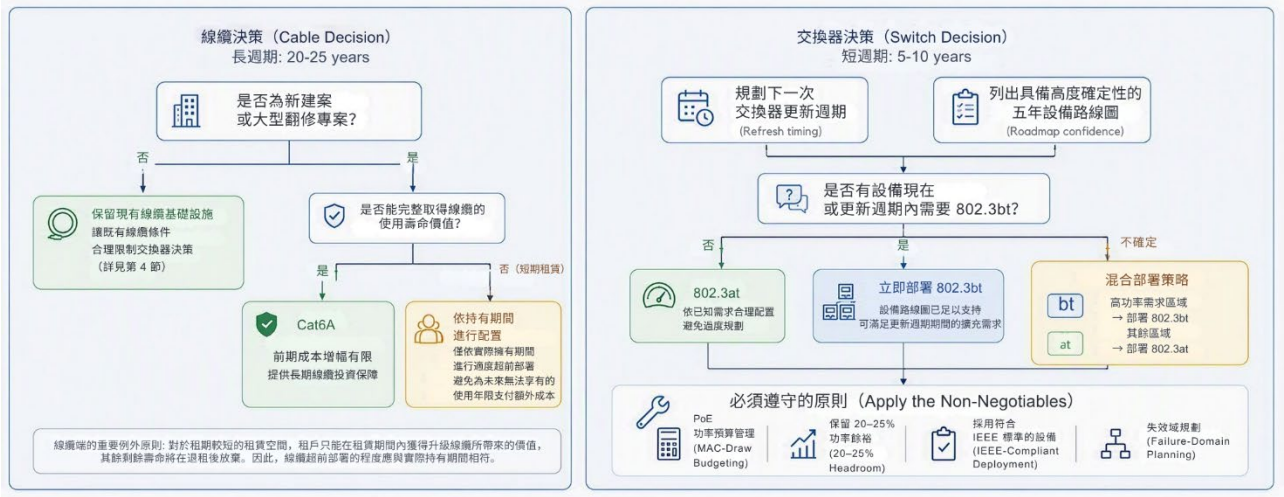


图 1. 双轨决策框架

—线缆决策与交换机决策遵循不同的时钟，因此应分别做出决策

在线缆端有一个值得特别说明的例外情况：如果租户是在租赁空间内进行改善工程，且预计使用期限较短，则无法真正享有高阶布线方案所提供的二十年以上保障。他们实际获得的只是租赁期间的效益，而在租约结束时便会放弃剩余价值。

因此，线缆超前配置的程度，应与您实际拥有其使用年限的比例相对应。至于交换机端，若经过规划后仍存在真正的不确定性，则可采用混合部署方式：在可能需要高功率供电的区域

配置 bt，在其他区域采用 at。这种做法是为不确定性定价，而不是将不确定性全面买进整栋建筑。

三个实际案例：

- 小型办公室，40 个端点（电话、固定式摄像机、Wi-Fi 6 无线接入点；无扩展计划）：保留现有 Cat6 布线系统，采购 802.3at 交换机。
- 企业园区，预计于第 2 年进行 Wi-Fi 7 升级，且摄像机与门禁系统持续扩展：所有新增布线采用 Cat6A；为无线接入点服务的机柜配置 bt Type 3（具备四对供电能力，如表格注释所述）；其他区域采用 at。
- 新建物流中心，设计范围包含 PoE 照明与边缘计算设备：依据新建工程原则，全区采用 Cat6A；指定机柜配置 Type 4 的 bt 交换机；由于照明与计算设备现在共用交换机供电影响域，因此需依照第五章进行故障影响范围规划。

> **限制：**此框架假设的是单一建筑物，且所有设备皆遵循相同的更新时钟。对于多站点环境而言，各站点的交换机机柜可能处于不同的更新周期，因此应按站点分别套用此框架，而不是在整个组织层级统一套用一次。

四、 部署成本估算

曾经大规模部署 PoE 的工程师，往往会描述相同的失效模式：测试时一切正常，但几个月后设备开始间歇性重启、交换机机柜的运行温度高于预期，或者在预算讨论时才发现，原本看似较便宜的部署方案，在将布线和冗余纳入考量后其实并没有更便宜。

几乎没有人事先计算的电力预算

PoE 预算应以每台设备的最大额定功耗来规划，而不是典型功耗，因为峰值情况，例如夜间红外补光灯启动、寒冷天气下加热器运行，或电机启动时，正是供电不足的设备最容易发生

故障的时候。每端口功率预算与交换机总功率预算应视为两项独立限制，而且两者都必须满足。

LITEON 的建议是保留 20% 至 25% 的缓冲裕量：将计算出的峰值负载控制在交换机额定总 PoE 预算的 75% 至 80% 以下。这是一项设计建议，而非 802.3bt 任何条文所规定的要求，因此我们将其表述为我们自身的建议，而非归因于我们无法证明存在的行业共识。这是在权衡启动浪涌、季节性峰值需求以及未来增长空间，与闲置容量成本之后所采取的做法，并且位于实践人员最常引用的范围之内。

如何在此范围内做选择

当设备组成稳定且特性明确、环境具备空调控制，且五年设备路线图已经明确时，可采用较接近 20% 的设置。如果上述条件有任何一项不成立，则应向 25% 靠拢，例如具有加热器与照明设备的户外设备、未来新增设备仍不确定的路线图、协商行为尚未经过大规模验证的多厂商设备组合，或可能在交换机生命周期中途导入新设备的机柜。如果某项部署在不升级容量的情况下无法达到 20% 的裕量，那表示应该重新调整交换机容量，而不是缩减裕量。

示例说明

一台具备 740W 总 PoE 预算的 48 端口交换机，连接了无线接入点、固定式摄像机、PTZ 摄像机以及门禁控制器等设备，其计算出的峰值总功耗为 628W，约使用了 85% 的容量。这仍在标示规格范围内，因为尚有 112W 余量，但已超出我们建议范围的两个界限：20% 裕量下的设计目标上限为 592W，而 25% 裕量下的设计目标上限为 555W。这项部署在尚未增加任何设备之前，就已经超出其自身的安全裕量，而且没有空间容纳会使户外摄像机接近额定功耗的季节性峰值需求。

超额配置不一定会以明显的方式失效。依交换机而定，超出功率预算可能代表设备被直接拒绝供电、被悄悄降速，或是整台交换机依照端口优先顺序进行负载卸除。而如果从未设定端口优先顺序，这种卸载实际上就是任意的。这属于超额配置下的优雅降级，与第 5 节所讨论的交换机硬件故障不同。

线缆长度、电压降与降额使用

电压降与热降额其实是同一现象的两种症状，也就是线缆在持续电流下产生的电阻与热，而且最好一并处理。100 米通道长度限制仍然是设计边界，但在较高功率的 PoE++ 环境下，线缆结构与线束密度会影响该通道有多少比例能够在全功率下使用。Cat6A 导体通常为 23 AWG，而 Cat5e 为 24 AWG；此外，Cat6A 较大的整体结构在成束布线时具有更好的散热能力，因此即使每个端点成本较高，它仍是新建 PoE++ 部署及高密度线槽环境中较常见的建议方案。需要注意的是，标准 Cat6 也常见为 23 AWG，因此 Cat6A 相较于 Cat6 的优势，主要来自其结构设计及屏蔽选项，而非导体线径。通风不良的天花板线槽中出现大量紧密捆绑的线缆，是本文特别指出的失效模式：热量无法散发，电阻增加，而信号完整性与供电能力会一同下降。

互通性陷阱

旧式 802.3af / at 设备通常可以在较新的 802.3bt 交换机上安全完成协商，因为向下兼容性已内建于标准中。问题通常出现在反方向：当高功率的 802.3bt 设备连接到较旧或不符合标准的硬件时，可能完全无法上电，因为决定检测与分类是否成功的是标准兼容性，而不是额定瓦数。请注意，这与第二节所提到的 Wi-Fi 7 无线电降级模式不同。在第二节中，协商成功，但设备会依照实际分配到的功率进行降载；而在这里，协商失败，因此设备完全无法启动。这两种情况都说明应明确验证 PSE 与 PD 之间的兼容性，但在现场呈现出的现象截然不同：一种看起来像性能不足，另一种则看起来像硬件故障。

基础设施升级成本：真正的 TCO 问题

許许多资料声称 PoE 比部署 AC 电路更便宜；但几乎没有资料真正展示其计算方式。以下提供一个透明的模型，并标示每一项假设，包括一项对 PoE 不利的假设。

架构说明： 本比较是针对以两种方式将服务延伸至单一设备位置所产生的增量成本。它不是整栋建筑的比较，也未纳入 PoE 除布线之外所带来的效益，例如集中式冗余电源、远程重启，以及减少电工回访等因素；若将这些因素纳入，PoE 的相对优势还会进一步提高。

限制：此模型假設交換器基礎設施、PoE 電力預算、UPS 容量以及機櫃空間都已經存在。這些成本可能對 PoE 部署的經濟性產生實質影響，因此應另外評估。

基準輸入條件（2026 年美國商業環境）

成本项目	一般范围	计算中间值
Cat6 网络点位，标准商业安装	$150–$250	$200
Cat6A 网络点位，标准商业安装	$200–$350	$275
专用 120V 电路加标准插座，由商业电工安装	$250–$900	$575
电气许可（每回路，如有要求）	$50–$350	$200

上述区间系根据美国商业建筑常见成本指引整理而成，仅供方向性参考。我们未引用单一权威来源，因为并不存在以相同"每点位成本"形式呈现的权威资料。应将此表视为一个可填入当地报价的模型架构，而非价格表。

- PoE 路径： 一条 Cat6A 网络线路（约 $275），同时传输电力与数据，连接至已具备可用 PoE 预算的交换机。
- 传统 AC 路径： 本文所讨论的各类设备本质上都是网络设备，因此此路径仍需要网络连接。一个数据点位（约 $200，采用 Cat6，因为不承载供电）加上一条专用电力回路与插座（约 $575），再加上许多地区要求的电气许可（约 $200）。在尚未考虑配电盘扩容的情况下，每个设备位置约为 $975；若现有配电盘已无可用容量，则可能还需额外支付配电盘升级费用（约 $850–$4,000）。

朝相反方向运作的排除项目 - 上述 PoE 路径假设交换机已具备可用的 PoE 端口与功率预算，因此将 PoE 交换机的每端口成本溢价视为零。这项溢价实际上是存在的，但我们无法取得可靠数据来源（详见下文）。因此，应将 275 美元视为 PoE 路径的最低成本，而非完整成本。PoE 确实经常能够降低部署成本，但实际节省幅度高度取决于交换机基础设施、现

有布线系统、冗余需求，以及整体电力环境。组织应根据个别场域的实际报价来验证项目经济效益，而非仅依靠一般化模型。

哪些情况适用，哪些情况不适用

- 对于建筑物中的单一独立设备，且现有配电盘仍有剩余容量时，两者的成本差距约为 275 美元对 975 美元。
- 对于高密度、多设备部署，这个每设备成本差距会直接放大。40 个设备位置约相当于 28,000 美元的差异，而且尚未包含任何配电盘工程。真正会随规模累积的是传统 AC 路径的风险：每增加一条回路，都会提高触发配电盘升级的可能性。这是一项 PoE 没有对应项目的阶梯式成本，而 PoE 的交换机成本则可由多个设备共同分摊。
- 当现有布线系统原本就需要全面升级为 Cat6A、交换机因新增负载而必须进行非计划性的容量升级，或仅有少量高功率设备且无法享受到共享基础设施的经济效益时，两者的成本差距会缩小，甚至可能反转。

关于交换机升级成本 - 企业级 802.3bt 交换机相对于 802.3at 的价格，并没有以明确且可比较的每端口形式公开发布。各家供应商的产品定位资料普遍将 PoE+ 级产品置于 802.3bt 级产品之下，但并未公开具体百分比差异或每端口溢价。我们刻意不编造一个数字。请针对实际需要的端口数量及功率等级向供应商获取报价，并将这部分视为与供应商有关的成本，而非能够从公开基准资料中建立模型的项目。由于第三章关于“按需求配置（right-sizing）”的建议，是建立在这项溢价具有实质影响的前提之上，因此该建议是否成立，取决于您的实际报价是否证明这项溢价确实存在。

各地区的人力成本差异相当明显，因此上述中间值应视为模型起点，而非正式报价。最能影响结果的变量包括每台交换机所连接的设备密度、现有配电盘状况，以及现有布线系统条件。

五、 故障影响范围

第四节讨论的是超额配置下的优雅降级。这里讨论的是另一种故障模式：无论功率预算管理得多么完善，当交换机本身完全故障时，会发生什么事。在传统架构下，摄像机的供电来自本地插座或专用的低压供电系统，并独立于其所连接的网络交换机。如果交换机故障，摄像机会失去网络连接，但仍可能继续在本地进行录像；如果供电回路故障，则只有该回路上的设备会受到影响。在 PoE 整合架构下，单台交换机故障可能同时使所有连接至该交换机的摄像机、门禁读卡器以及电话停止运行，因为供电与数据现在共用同一个故障域。

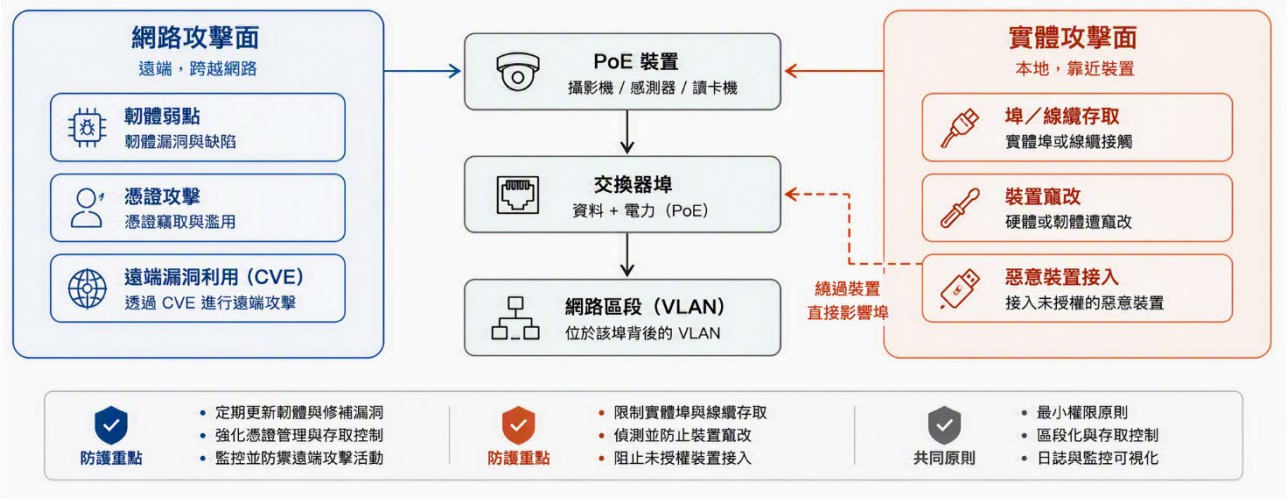


图 2. 故障影响范围

— 传统独立供电系统与单台交换机上的 PoE 整合系统比较

明确地说，传统架构拥有较多彼此独立的故障点，而每个故障点的影响范围较小；PoE 整合则拥有较少的独立供电系统，但每次故障的影响范围较大。这是在故障频率与故障严重程度之间进行取舍，而非单纯的退步。这并不是避免采用 PoE 的理由，而是提醒我们应该有意识地设计故障域，而不是等到发生停机事件后才发现其边界。

一种规划故障域的方法

这项取舍很容易描述，但不容易解决，因此应从后果出发反向思考，而不是从网络拓扑正向推导。

四个步骤：

- 定义不可接受的停机场景。 不要只说“摄像机很重要”，而应提出一个具体且可验证的陈述，例如：“北校区所有门禁读卡器不能同时失效”，或“任何时候都不能有超过一个装卸码头失去监控覆盖”。如果没有人愿意对这类表述做出承诺，那么故障域就没有设计限制，任何拓扑都能被合理化，而这正是区域最终因偶然因素被集中到同一台交换机上的原因。

- 反向推算每台交换机可承载的关键设备上限。 如果四个装卸码头中最多只能有一个失去监控，那么任何一台交换机都不应承载超过一个装卸码头的摄像机。决定布线规划的应是这个数字，而不是端口密度或配线架配置的便利性。

- 将两种冗余问题分开处理。 双电源供应器保护的是 PSU 故障；交换机级 UPS 保护的是建筑供电中断；将设备分散至不同交换机机箱则能降低其他故障风险，包括软件故障与线卡故障。这些机制彼此不能互相替代。一台具备双 PSU 的交换机，若只连接到单一且未受保护的电源来源，当该供电来源故障时，交换机仍会完全停摆。

- 根据恢复目标设定 UPS 备用时间，而非根据机柜规格。 真正重要的数字，是组织在停电后需要让门禁系统及与生命安全相关的系统维持运行多久，以等待人员介入处理。这是设施与安全部门需要回答的问题，而不是网络部门需要决定的问题。

在实际应用中，这通常意味着不应将所有重要设备随意接到同一台交换机上最先可用的端口。这种做法不但容易形成散热热点，也意味着单台交换机或线卡故障就能使整个区域停摆。对于任何承载门禁控制或与生命安全相关设备的交换机而言，冗余电源应被视为设计需求，而非可选项。

六、保护您所建设的系统

一般的 IoT 网络安全指引通常将 PoE 供电设备视为另一种类型的联网端点，并建议对其进行网络分区、验证与监控。这些建议本身并没有问题，而且其他资料已经有充分说明，因此本文仅简要提及而不重复论述。然而，这些指引忽略了一项 PoE 特有的因素：供电本身就是一个与安全相关的层面。范围说明。 本节针对网络安全规划对象说明漏洞模式与防御架构，不提供任何攻击手法。文中提及的所有漏洞均为公开信息，并记录于供应商或政府机构公告中；其修补状态各不相同，其中有一个案例被纳入讨论的原因正是因为它没有任何修补方案。

为什么这些设备不同

PoE 受电设备与大多数企业网络安全实践所围绕的笔记本电脑与服务器相比，具有三项不同特征。它们通常没有用户界面，因此不会有人立即发现异常；它们在安装完成后经常被遗忘，而网络安全团队往往缺乏完整的设备清单；而且它们的使用寿命往往超过供应商提供安全修补支持的期限，本节后段将讨论这种不匹配问题。然而，最重要的特征是实体可接触性：建筑物外墙上的摄像机或仓库天花板上的传感器，其可接近程度远高于放置在上锁机房中的机架式服务器。

漏洞模式

CISA 针对 AVTECH IP 摄像机发布的安全公告（CVE-2024-7029）描述了一项漏洞，允许未经验证的攻击者远程注入并执行命令，其 CVSS v3.1 评分为 8.8。之所以特别值得关注，不只是因为漏洞本身，而是因为 CISA 记录指出： “AVTECH SECURITY Corporation 未回应 CISA 关于修补这些漏洞的合作请求” ，并且已知存在公开利用案例。该漏洞没有修补程序，而建议的缓解措施是网络隔离。这并不是一个可以绕开的例外案例，而是本节所讨论生命周期问题的提前出现形式：设备仍安装在现场、仍持续供电，但已经没有修补方案。

另外两个案例则说明了其他常见漏洞类型。Bitdefender 研究人员在 Dahua 摄像机中发现 ONVIF 请求处理程序中的栈缓冲区溢出，以及文件上传处理程序中的第二个溢出漏洞

（CVE-2025-31700、CVE-2025-31701），两者均可能导致未经验证的远程代码执行。研究团队于 2025 年 3 月 28 日通知供应商，修补程序于 7 月 7 日发布，并于 7 月 30 日公开披露。另一份 CISA 公告涉及 ValueHD、PTZOptics、multiCAM 与 SMTAV 的 PTZ 摄像机，其中记录了一项 CVSS v3 评分 9.1 的认证绕过漏洞，以及一项评分 7.2 的命令注入漏洞（CVE-2024-8956、CVE-2024-8957）。截至本文撰写时，尚未发现公开利用案例。

列举这些案例并不是因为这些厂商特别不安全，而是因为这些漏洞均已公开且有完整记录。相同类型的漏洞其实广泛存在于整个 IP 摄像机与传感器产业。此外，相较于公告中的漏洞，更常见且更容易发生的风险其实是默认账号密码以及未受管理的影子 IoT 设备，也就是 IT 部门从未建立清单的设备，因此也从未接受任何安全评估。

网络分区与监控简介

这方面的共识已经相当明确，无须在此详述：将不同设备类型隔离至不同 VLAN、在设备支持的情况下导入基于端口的 802.1X 认证，并将 MAC Authentication Bypass（MAB）视为明显较弱的控制机制，因为 MAC 地址很容易被伪造，而且无法提供任何基于密码学的身份认证保证。网络分区并非毫无代价的升级措施。它会增加需要管理的 VLAN 数量、需要维护的规则，以及当设备合法跨越边界时可能产生的新故障模式。同样地，要在大规模环境中进行完整的行为基线异常检测，往往需要专用的 NAC 平台，或拥有足够人力进行持续调校的团队。对于中型 IT 团队而言，更实际且可执行的做法是：维持准确的设备清单，并对出现在 PoE 指定端口上的未知 MAC 地址发出警报。

电力作为安全控制手段，以及其失效情况

通过管理方式停用交换机端口，是隔离受感染设备的标准做法。而在 PoE 端口上，它还能做到一般笔记本电脑无法做到的事情：切断设备电源，而不只是切断网络连接。在大多数平台上，情况确实如此。Cisco 的故障排除文件指出：“大多数 Cisco 交换机在端口被停用时会关闭该端口的供电。” 但这句话真正关键的是“大多数”。PoE 供电本身运行于一个独立于接口管理状态的状态机，而部分实际出货的功能刻意将两者分离。Cisco 的 Perpetual PoE 能够在 PSE 交换机重新启动期间持续为 PD 供电，而 Fast PoE 则会记住该端口先前的供电

需求，并在交流电恢复后立即供电，而无须等待 IOS 完成启动。因此，一个被事件响应人员停用的端口，在下一次冷启动时，可能会在停用配置重新应用之前先恢复供电。其他供应商也提供类似的常时供电功能，而且其中某些功能甚至默认启用。

因此，正确的理解应比表面上更精确：在 PoE 基础设施中，交换机同时扮演两种公用设施，而两者并不共用同一套控制平面。电源中断是否真正发生，必须依据各平台进行验证，而不能假设停用端口就一定会切断供电。目前市面上确实存在两种真正属于 PoE 特有的控制工具：个别端口的远程断电 / 重启，以及每端口供电调度。供电调度虽然用途有限，但确实具有一定价值：如果某设备只在上班时间供电，其暴露风险窗口就会缩小。不过，这并不适用于必须全天候运行的设备。目前尚未广泛普及的是直接将供电与 802.1X 认证状态绑定的机制，也就是设备未完成认证便无法获得供电。这类概念曾出现在专利文件中，但我们并未发现其作为标准交换机功能进行商品化销售。因此，应将其视为行业未来可能发展的方向，而非现阶段可依赖的控制机制。

现在应评估的事项

确认您的 NAC 或 802.1X 认证失败策略，是否真的会使高风险设备类别所在的端口完全关闭，而不只是被重新分配至另一个 VLAN。这项确认非常重要，因为 PoE 供电协商发生在物理层，而且早于认证流程，因此即使端口处于 802.1X 未授权状态，通常仍会向已连接设备提供电力。

接着确认停用端口是否真的会使设备失去电力：检查管理员停用端口后的 PoE 供电状态，并在将“切断供电”作为安全控制手段的端口上停用 Perpetual PoE、Fast PoE 或 Always-On PoE 等功能，因为这些功能的设计目的正是避免供电中断。若平台提供独立的 PoE Disable 指令，应优先使用该指令，而非仅依赖接口管理状态。

实体安全

PoE 设备同时是网络端点与电力端点，而且通常安装在为了监控效果而非安全性所选择的位置，例如建筑物外墙、停车场结构、仓库天花板或公共大厅。

暴露在外的网络线路或可接触的设备外壳，都可能成为通往其所连接系统的实体入口。若有人在停车场摄像机旁获得数分钟无人监督的接触时间，便可能拔除摄像机并将自己的设备接入该端口，从而取得该端口所提供的网络访问权限。

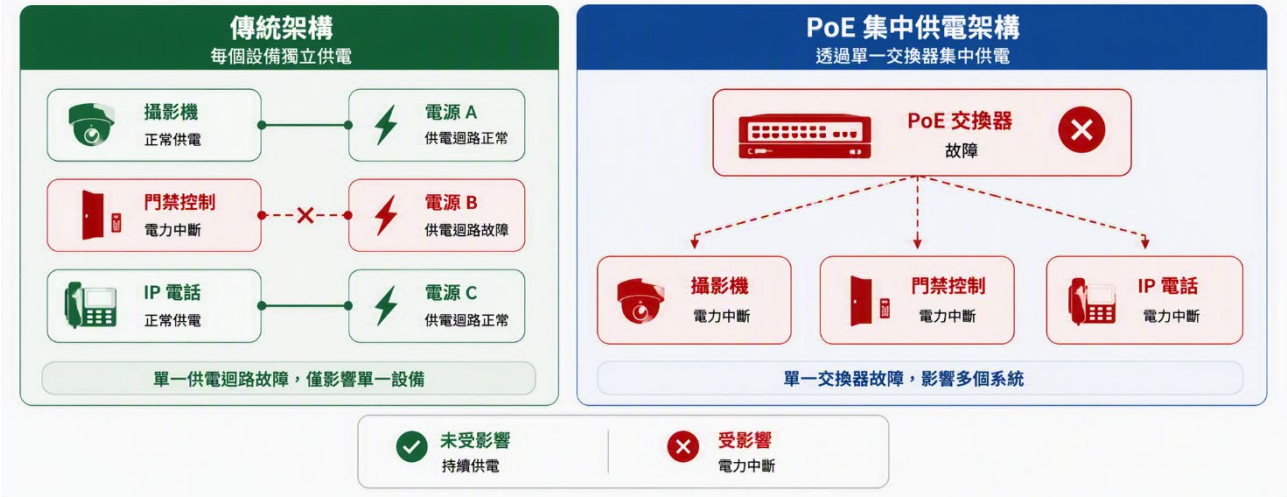


图 3. 实体攻击面与网络攻击面

— 攻击者若能实体接触设备，可通过将恶意设备接入同一交换机端口的方式完全绕过固件与凭证防护机制

这正是网络分区与端口级认证发挥作用的地方：接入该线路的未经认证恶意设备不应获得任何权限，既不应获得 VLAN 访问权限，理想情况下也不应获得电力供应。

这些措施应被视为标准做法，而非可选项目：完全停用未使用的交换机端口，而不是让其保持启用且未受保护；对所有服务于可实体接触设备的端口启用 Port Security（端口安全）；在设备支持的情况下启用防拆检测；并对所有暴露在外的配线架、接线盒或 PoE 注入器机柜采取实体防护措施。

必须说明的一项但书

这些措施是威慑手段，而非保证。具备足够时间与基本工具的攻击者，仍然能够绕过大多数防拆机制与实体锁具。实体防护措施的作用在于提高攻击所需的时间与成本；它们必须与网络分区及端口认证共同运作，而不是作为独立的解决方案。

大规模环境下的固件与生命周期管理

你无法修补你不知道存在的设备，而影子 IoT 至今仍是大多数组织在资产盘点上的持续缺口。设备支持周期与使用寿命之间的不匹配值得仔细说明。商用级安全摄像机的实际运行寿命通常被认为在 5 至 10 年之间，而至少有一家以企业市场为主的供应商公开承诺，在产品停产后仍提供五年的安全更新支持。这意味着，一台在产品生命周期后期采购、并按一般使用年限运行的设备，即使在相对宽松的支持政策下，也可能在仍正常运行时超出供应商的支持期限。这项推论来自一个有充分文档记录的案例，而非整个行业的测量结果；我们并未获得涵盖全行业的调查资料。不过，若供应商提供的支持承诺更短或记录透明度较低，设备生命周期与安全支持周期之间的落差很可能会更大。

前面提到的 AVTECH 案例则属于更严重的情况：问题不在于支持期限已经结束，而在于供应商根本未参与漏洞处理。其实际含义是：固件支持期限应被纳入采购评估条件，而非被视为理所当然的存在；在生命周期管理上，也应将“设备仍可正常运行”与“设备仍持续获得安全更新”视为两项独立事实，并分别追踪每一项设备的状态。

七、结论

PoE 在过去二十年的发展故事是便利性。而未来十年的故事，则是它成为一套电力与控制基础设施，支撑无线网络密集化、边缘计算、照明以及远程资产等应用类别，而这些应用在十年前几乎与网络毫无关联。本文所讨论的各个领域，其实都能在其他地方找到各自独立的说明。缺乏的是将它们视为一套彼此关联的实践方法：选择标准是一项双时钟的经济决策，而不是单纯查阅瓦数；部署成本是一项真正的总拥有成本评估，而不只是主张；当电力与数据整合之后，可靠性就成为故障域设计问题；而安全性则多了一个新的控制手段，也就是电力

层，同时也多了一种大多数管理人员并不了解的失效模式。简单来说：将两个时钟分开考虑，对不容易更换的资产进行超额配置，对原本就会更换的资产按需求配置。使用自己的数据来计算成本。在网络拓扑替您做出决定之前，先决定哪些停机情况是不可接受的。并且验证您所依赖的控制机制是否真的如其表现般运作，而不是直接假设如此。

最后谈谈本文所反对的那项建议。当不确定时选择更高规格，并不总是错误的；有些情况下，更高规格的交换机确实是正确答案，而第二章与第三章也说明了推动这种选择的真实因素。但这是一项带有立场的建议，而正如前言所说，本文中的部分建议同样也带有立场。真正对预算负责的人所需要的纪律，不是默认向上升级，而是了解每一笔支出属于哪一个时钟，并思考每一项建议的受益者是谁，包括本文的建议在内。

附录：PoE 部署整合检查清单

按部署阶段汇总，可作为独立参考文件使用

阶段 1：选择标准

- 列出明确的五年设备路线图；功率需求应采用设备数据表中的最大额定功耗，而非标准上限。
- 将线缆决策与交换机决策分开处理（第三章的双时钟概念）。
- 对于新的 PoE++ 部署与长期基础设施项目，可考虑采用 Cat6A，特别是在关注线束密度或热性能的情况下。
- 明确验证 PSE / PD 兼容性；对于 Type 3 部署，应确认四对线供电能力与支持的功率等级，而不应仅依赖 Type 分类。部分实现可能无法提供四对线 Type 3 系统通常具备的完整供电能力。
- 任何 "每端口 100W" 的宣称，都应视为营销描述，除非其 IEEE 分类与连续供电功率已被明确说明。

- 排除被动式 PoE 注入器；将 UPoE / UPoE+ 视为需要两端设备共同配合的采购限制。
- 持续跟踪 Single Pair Ethernet 的互操作性发展；除非已经启动工业自动化或高密度传感器项目，否则以试点验证为主。

阶段 2：规划功率与预算

以每台设备的最大额定功耗进行汇总，而非典型功耗或待机功耗。

- 确认结果不超过交换机额定 PoE 预算的 75% 至 80%，也就是 LITEON 建议的 20% 至 25% 缓冲裕量，并依第四章原则决定实际比例。
- 将每端口功率限制与交换机总功率预算视为两项独立限制条件。
- 检查线束密度与线槽、导管内的散热条件；确认所有布线均在 100 米通道限制内，并保留适当余量。
- 使用自己的成本与设备密度数据执行第四章的 TCO 分析，包括 AC 方案中的数据线成本。
- 取得 802.3bt 相对于 802.3at 的实际供应商报价。这项成本无法通过公开基准建立模型，而第三章的建议也以此为前提。容量升级应在部署前编列预算，而非在项目进行中追加。

在进行任何无线网络升级前，确认每个 AP 的实际功率需求与交换机端口功率预算相符。对于 PoE 照明项目，从设计阶段开始建立设施部门与 IT 部门的共同预算责任，同时确认主管机关（AHJ）对相关法规的认定。

阶段 3：规划故障域

- 以具体且可验证的句子写下不可接受的停机场景。
- 由此推导每个关键设备类别每台交换机可承载的最大设备数量，并据此规划布线。

- 将高优先级设备（如门禁控制与生命安全相关设备）分散至多台交换机。
- 将双电源供应器、交换机级 UPS 与跨机箱分散部署视为三种不同的保护措施，而非彼此替代。
- UPS 备用时间应根据组织的恢复目标设定，而非根据机柜配置便利性决定。
- 明确设定端口优先级，避免超额配置时的负载卸除变成任意行为；对于大规模离网部署，需定义电池供电下的负载卸除策略。

阶段 4：保护部署环境

- 维护最新设备清单，包括品牌、型号、固件版本与启用日期。
- 对出现在 PoE 指定端口上的未知 MAC 地址产生警报。
- 将不同类型的 PoE 设备隔离于不同 VLAN；支持时使用 802.1X，并将 MAB 视为较弱的替代方案。
- 确认 NAC / 802.1X 认证失败策略对高风险设备类别会造成真正的端口关闭，包括数据与供电。
- 实际验证管理员停用的端口是否已失电；若以切断供电作为控制手段，应停用 Perpetual PoE、Fast PoE 或 Always-On PoE 功能。
- 确认事件响应流程中已纳入远程电源重启程序；对于不需持续运行的设备，可评估每端口供电调度。
- 停用所有未使用的端口；对所有可实体接触设备所使用的端口启用 Port Security。
- 在设备支持时启用防拆检测；对暴露在外的配线架、接线盒及 PoE 注入器机柜实施实体防护。

- 将固件支持终止日期与设备功能寿命分开追踪；以安全更新终止作为更换条件，而非等到设备故障。
- 评估采购对象的公开安全公告记录，包括供应商是否实际参与漏洞披露与修补流程。

> **限制：**完成所有项目能够降低风险，但无法消除风险。各场域的特殊条件，例如电气噪声、特定型号的固件特性、布线路径限制，以及供应商默认设置等因素，仍可能导致一般性检查清单无法预见的问题。因此，应将本清单视为尽职调查的最低要求，而非正式风险评估的替代品。

Published by LITEON — Version 2.0, August 2026
取代（Supersedes）2026 年 7 月发布的四部曲《PoE Strategic Series》