

OCTC BA05—2026



开放计算标准
工作委员会
Open Compute Technology
Committee

NPO 通用技术标准

（技术报告）

（2026年9月）

开放计算标准工作委员会 发布



开放计算标准 工作委员会

Open Compute Technology
Committee



开放计算标准 工作委员会

Open Compute Technology
Committee



版权保护文件

版权所有归属于该标准的发布机构，除非有其他规定，否则未经许可，此发行物及其章节不得以其他形式或任何手段进行复制、再版或使用，包括电子版，影印件，或发布在互联网及内部网络等。使用许可可于发布机构获取。

目 次

前 言.....	III
1 范围.....	1
2 背景.....	1
3 术语和定义.....	2
4 缩略语.....	3
5 NPO 通用技术架构与接口规范	3
5.1 NPO 系统参考架构	3
5.2 光电接口规范.....	7
5.3 外部光源（ELS）子系统规范.....	12
5.4 供电与功耗模型.....	15
5.5 信号完整性（SI）与电磁兼容性（EMC）	17
6 数据中心适配与集成要求.....	19
6.1 机械结构与面板定义.....	19
6.2 热设计规范.....	23
7 智能化管理接口与运维规范	28
7.1 管理通信接口定义.....	28
7.2 NPO 数字诊断与监控数据模型	30
8 光学性能指标与测试方法.....	34
8.1 发射端参数规范.....	34
8.2 接收端参数规范.....	37
8.3 光路无连接器测试和非接触式测试.....	38
9 质量与可靠性要求.....	39
9.1 可靠性验证试验项.....	40
9.2 失效判定标准.....	41
10 未来展望.....	42
参考文献.....	44



前 言

本文件由光为科技（广州）有限公司和浪潮电子信息产业股份有限公司提出。

本文件由中国电子工业标准化技术协会开放计算标准工作委员会归口。

本文件起草单位：光为科技（广州）有限公司、中国电子技术标准化研究院、浪潮电子信息产业股份有限公司、新华三技术有限公司、烽火通信科技股份有限公司、香港科技大学（广州）、清华大学深圳国际研究生院、广东省连接器协会、东莞骅国电子有限公司、粤芯半导体技术股份有限公司、安捷利美维电子（厦门）有限责任公司、中航光电科技股份有限公司、深圳博升光电科技有限公司、常州熹联光芯微电子科技有限公司、深圳市联芯光子技术有限公司、启东乾朔电子有限公司、软通计算机有限公司、苏州盛科通信股份有限公司、四川华丰科技股份有限公司、玢芯科技（广州）有限公司、上海思朗科技股份有限公司。

本文件主要起草人：黄愚、陈海、吕宣涛、李天睿、王兴隆、慈潭龙、陈曦、张德胜、朱欢来、蔡利东、阮祖亮、崔瑜、王建甫、刘博、须江、付红岩、梁宇彤、肖志洋、胡强龙、赵斌、伍斌、王宏业、李湘云、王嘉星、王根成、童业煜、张志伟、何仲祺、李亚军、杨勇涛、王俊杰、肖艾佑、陈旺、张元佳。



开放计算标准 工作委员会

Open Compute Technology
Committee



开放计算标准 工作委员会

Open Compute Technology
Committee

NPO 通用技术标准

1 范围

本技术报告旨在定义近封装光学（Near-Packaged Optics, NPO）技术的通用设计规范与技术要求。

本技术报告所定义的NPO技术，主要适用于对带宽密度、功耗、时延和成本有极致要求的特定数据中心应用场景，具体包括：

AI训练与推理集群的Scale-up网络：在大规模智算集群（如千卡至十万卡级）中，专家并行（EP）、张量并行（TP）等模式需要GPU/NPU之间进行频繁、无收敛的高带宽数据交互。NPO技术能够提供百纳秒级的超低时延和TB/s级的超高带宽，有效克服传统电互连和可插拔光模块的瓶颈。例如，阿里云的UPN512架构明确将NPO作为其主要光互连选择，以实现512节点单层全光互连。

高性能计算（HPC）：HPC集群中的并行计算任务对通信时延和带宽敏感。NPO提供的低时延、高带宽密度特性，能够有效加速节点间的数据交换，提升集群整体计算效率。

超节点内的GPU/NPU卡间互连：在将数十甚至上千颗GPU集成于单个或多个机柜的“超节点”架构中，NPO技术下探至GPU算力芯片，是实现板上/柜内高密度直连、构建更高效端到端光互连链路的重要选项。

大型数据中心内的高密度背板互连：在需要高端口密度的核心交换机和路由器中，NPO通过将高密度光接口部署在设备内部，解决了面板空间的带宽瓶颈，是实现1.6Tbps甚至更高端口速率设备的关键技术。

2 背景

NPO 技术是指一种通过高速基板或极短引线，将完成封装的光引擎（OE）与计算/交换芯片（如 GPU、NPU、Switch ASIC 等）相邻布局于同一块高性能 PCB 板上，使电气互连距离缩短至厘米级甚至毫米级的光互连方案。其核心特征是在实现高集成度、高带宽密度的同时，保持光引擎与主芯片的物理可分离性。

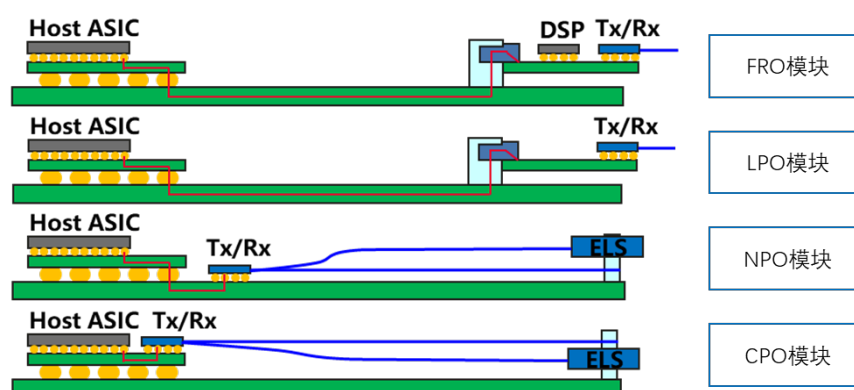


图 2.1 NPO 与 FR0、LP0、CPO 示意图

如上图所示，NPO 模块与传统 FR0 模块、LP0 模块、CPO 模块的区别如下。

与传统可插拔光模块（FRO）的区分：传统 FRO 光模块（如 QSFP-DD、OSFP）集成了 DSP 或 CDR 芯片以补偿电通道损耗，导致模块功耗高、时延大，且带宽密度受限于面板空间。NPO 采用线性直驱架构，移除模块内的 DSP，实现功耗与成本的降低，且通过高密光接口，面板带宽密度远超传统可插拔模块。

与线性直驱可插拔光模块（LP0）的区分：LP0 保持标准可插拔外形（如 QSFP、OSFP），通过前部面板连接器与主机相连，电气路径较长，对 ASIC SerDes 的驱动和均衡能力要求高。NPO 则移除光引擎（OE）与主芯片之间的长距离面板走线，将 OE 置于 ASIC 附近，缩短了高速电信号路径，降低了对 ASIC SerDes 的性能依赖，同时实现了比 LP0 更高的带宽密度和更优的成本结构。

与共封装光学（CPO）的区分：CPO 技术将 OE 与电芯片（如 Switch ASIC）共同封装在同一芯片基板或中介层上，电气路径缩短至毫米级，集成度最高，但这也导致 OE 与 ASIC 强耦合，良率和可维护性面临挑战。目前限制 CPO 技术发展的主要因素，包括先进封装工艺、散热问题、维修难度、可靠性等。NPO 是 CPO 的过渡和互补形态，它通过可拆卸的设计实现了 OE 与 ASIC 的解耦，在获得接近 CPO 的电气性能优势的同时，保留了更好的可维护性、标准化和多源供应生态。

综上，本技术报告的技术范围涵盖：基于线性直驱架构、采用可拆卸连接器与主芯片解耦、并利用近芯片布局实现高带宽密度的 NPO 模块和系统。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 近封装光学模块 near-packaged optics module

将光引擎集成到主机专用集成电路芯片（Host ASIC）周边的光收发器。

3.2 时钟数据恢复 clock data recovery

从接收到的信号中提取出数据序列，并且恢复出与数据序列相对应的时钟时序信号，从而还原接收到的具体信息的通信技术。

3.3 光子集成芯片 photonics integrated circuit

利用大规模集成电路工艺将多个光学器件集成所形成的芯片。

3.4 电子集成芯片 electronic integrated circuit

利用大规模集成电路工艺将多个驱动与放大电路集成所形成的芯片。

3.5 脉冲幅度调制 pulse amplitude modulation

载波脉冲的幅度随调制信号而变化的信号调制方式。

3.6 外部激光源 external laser source

被设计置于系统外围工作的激光器光源。

3.7 多光纤压入连接器 multi-fiber push on connector

多芯多通道的插拔式光纤连接器。

3.8 多源协议 multi source agreement

多供应商之间协商形成的、用于制造跨供应商兼容的产品规范。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

ASIC交换机专用集成电路 (Application Specific Integrated Circuit)
 CCSA中国通信标准化协会 (China Communications Standards Association)
 CDR时钟数据恢复 (Clock Data Recovery)
 CMIS通用管理接口规范 (Common Management Interface Specification)
 DR8 8通道单模光纤 500m 传输 (Datacenter Reach 8)
 DSP数字信号处理器 (Digital Signal Processor)
 EIC 电子集成芯片 (Electronic Integrated Circuit)
 ELS外部激光源 (External Laser Source)
 ELSFP外部光源 (小尺寸可插拔) (External Laser Small Form Factor Pluggable)
 I2C内部集成电路 (一种串行通信总线) (Inter-Integrated Circuit)
 IEEE电气电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
 IL 插入损耗 (Insertion Loss)
 LGA 平面网格阵列封装 (一种电子封装及连接方式) (Land Grid Array)
 MPO connector 多光纤压入连接器 (Multi-Fiber Push On Connector)
 MSA 多源协议 (Multi Source Agreement)
 MT 机械式 (Mechanical Type)
 MZM马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder modulator)
 NPO近封装光学 (Near-Packaged Optics)
 OE光引擎 (Optical Engine)
 OIF光互联网论坛 (Optical Internetworking Forum)
 PAM 脉冲幅度调制 (Pulse Amplitude Modulation)
 PIC 光子集成芯片 (Photonics Integrated Circuit)
 QSFP四通道小封装可插拔收发器 (Quad Small Form Factor Pluggable)
 RL 回波损耗 (Return Loss)
 RX 接收单元机 (Receiver)
 SerDes串行器/解串器 (Serializer/Deserializer)
 SMSR 边模抑制比 (Side-Mode Suppression Ratio)
 TDECQ发射色散眼闭合度四阶 (Transmitter and Dispersion Eye Closure Quaternary)
 TIA跨阻放大器 (Transimpedance Amplifier)
 TX 发射单元机 (Transmitter)
 VCSEL垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)
 xPU各类处理器的统称 (XPU (Processing Unit, E.g., CPU, GPU, NPU))
 XSR 极短距离 (Extra Short Reach)

5 NPO 通用技术架构与接口规范

5.1 NPO 系统参考架构

5.1.1 功能框图

NPO系统的核心设计理念是通过将光引擎（Optical Engine, OE）物理上靠近主处理芯片（如xPU、Switch ASIC），从而将高速电信号的传输距离缩短至厘米级以下，以克服传统板级电互连和可插拔光模块面临的带宽密度、功耗和信号完整性瓶颈。

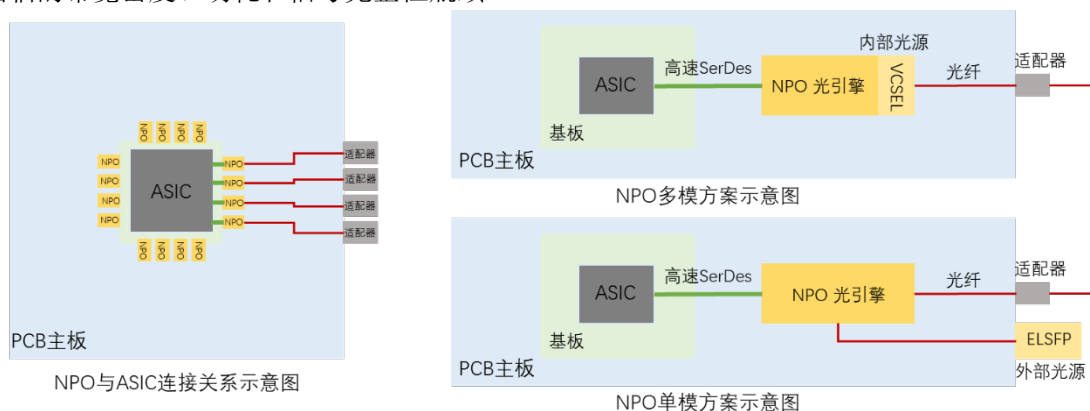


图5.1 NPO系统参考架构示意图

NPO 系统架构根据光源来源的不同可分为两类方案：NPO 多模方案和 NPO 单模方案。如图 5.1 所示。

（1）NPO 多模方案

NPO 多模方案是指 NPO 模块采用 VCSEL 阵列作为内部光源，即光源集成到 NPO OE 内部。其光源类型为垂直腔面发射激光器（VCSEL）阵列。

技术原理：VCSEL 本身作为光源，通过直接调制（注入电流变化）产生高速光信号；无需独立的硅光调制器，VCSEL 直接输出已调光信号；光引擎基于 VCSEL 阵列，通过光纤阵列耦合至 NPO 模块的输出接口。

NPO 多模方案的核心特点如下。

结构简单、成本低：VCSEL 在短距（百米级）互连中已有成熟应用，产业链成熟。

低功耗：直接调制，无需额外的调制器驱动功耗。

主要挑战：VCSEL 阵列本身高温稳定性要求较高，目前 VCSEL 带宽密度较成熟方案为 100Gbps/lane。

适用场景：智算集群柜内/间的短距传输（几十米内），对成本敏感且带宽需求适中的 Scale-Up/Scale-Out 场景。

（2）NPO 单模方案

NPO 单模方案是指 NPO 模块采用外部激光源（ELS）的方式，将激光光源封装为单独的基于 OIF 标准定义的 ELSFP 模块，再为 NPO OE 提供连续激光光源。

技术原理：ELSFP 提供连续的、高品质 CW（连续波）激光，通过保偏光纤（PMF）输入至 NPO 光引擎；NPO 光引擎内部集成硅光调制器（如 MZM 或 MRM），将电信号调制到 CW 光上；光引擎通常为硅基光电子（Silicon Photonics）集成方案，可实现调制、复用、解复用、探测等功能。

NPO 单模方案的核心特点如下。

高带宽密度：基于硅光技术，支持多波长（CWDM/LWDM）复用，单纤带宽高。

热稳定性好：光源（ELSFP）与光引擎（OE）物理分离，激光器热量不影响对温度敏感的光引擎，散热设计更简单。

可维护性好：ELSFP 支持面板热插拔，若激光器故障，只需更换 ELSFP 模块，无需拆卸 NPO 整体组件。

标准化程度高：ELSFP 遵循 OIF-ELSFP-02.0 等标准，多源供应。

适用场景：大规模智算集群的 Scale-Up 域（单层全光互连），对带宽密度、时延、可靠性要求高。

表 5.1 NPO 两种方案对比

对比维度	NPO 多模方案	NPO 单模方案
光源	VCSEL 阵列（直接调制）	ELSFP 模块（外置连续波激光器）
调制方式	直接调制（电流调制 VCSEL）	外调制（硅光 MZM/MRM 调制器）
光引擎材料	VCSEL（砷化镓）+ 硅光/聚合物波导	硅光（SOI 平台）集成调制器/探测器
主要优势	成本低、功耗低、短距应用成熟	高带宽密度、高可靠性、热稳定性好、维护性好
主要挑战	高温稳定性、带宽密度受限	耦合损耗高、需要 ELSFP 标准化、成本前期较高
推荐应用场景	小规模、低成本、短距	大规模、高性能、高可靠

NPO 架构的核心是：

各类 xPU 计算芯片与高基数交换芯片（High-Radix Switch ASIC）通过高速 SerDes 接口与 NPO 光引擎直连；多个 NPO 光引擎（NPO OE）阵列紧密布局在主芯片周围。

每个 NPO OE 内部集成了调制器、光电探测器、线性驱动器和 TIA，负责完成电信号到光信号（E/O）以及光信号到电信号（O/E）的线性转换。NPO 光引擎内部不包含 DSP 或 CDR 芯片，其线性直驱架构是实现低功耗（相比传统可插拔模块可减少约 50% 功耗）和低时延（相比可插拔模块可降低约 110ns 时延）的关键。

采用高密光接口（如 MT/FAU 插芯），将来自 NPO 光引擎的光信号汇聚并路由至外部光纤链路，从而消除面板空间对带宽密度的限制。分析表明，在 1U 前面板空间内，NPO 方案最高可容纳 2000~3000 根纤芯，理论接入带宽可达 200T~300T，远超可插拔光模块方案。通过合理的设备内部布线设计，NPO 方案无需外部 Shuffle Box，可简化布线并提高链路稳定性。

管理接口平面层负责对整个 NPO 系统进行统一监控、配置与维护。管理主控通过 I2C/MDIO 管理总线与各组件通信，其核心管理协议遵循 OIF-CMIS-05.4 规范。管理对象主要包括：NPO 光引擎的工作状态、温度、偏置电流、光功率等数字诊断信息；外部光源模块（ELSFP）的功率、波长、稳定性及冗余切换逻辑。

5.1.2 物理布局与走线拓扑建议

1. 物理布局原则

NPO 系统的物理布局应以“最短高速电通道”为第一原则。光引擎应紧密环绕在主机 ASIC（xPU/Switch）的四周，与其毗邻放置，将两者之间的高速 SerDes 走线长度控制在极短距离内。这种做法能够显著降低高频信号的衰减和抖动，有效降低对主机芯片 SerDes 驱动和均衡能力的要求。

2. NPO 模块的封装与可更换性

NPO 光引擎通常采用标准化的封装形式，以促进多源供应和生态兼容。建议 NPO 模块采用基于成熟的 QSFP-DD / OSFP-XD / OSFP 等标准金手指连接器的封装方式，如下图所示。

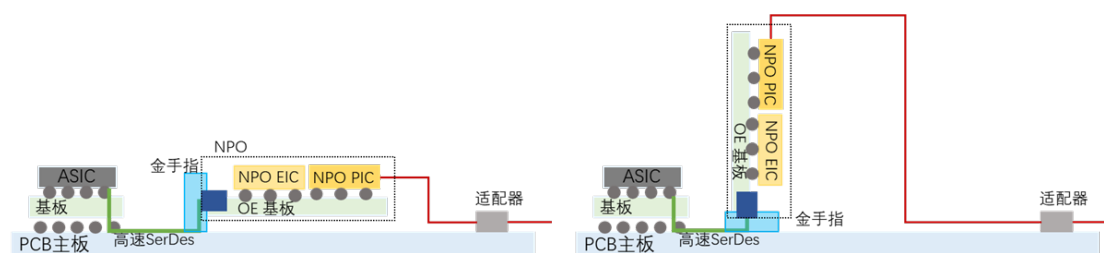


图 5.2 基于标准金手指连接器的 NPO 封装示意图

NPO 模块架构在保持 NPO“近封装”核心理念的同时，复用现有成熟 QSFP-DD/OSFP-XD/OSFP 等标准金手指连接器笼座，将 NPO 光引擎封装为传统可插拔光模块形态，完全沿用现有插拔式光模块产业链、测试、运维体系。

电信号从 ASIC 出发，经过一小段 PCB 走线到达模块底座，再通过金手指进入 NPO 模块内部完成光电转换。通过 OIF 定义的 XSR（极短距）或 XSR+电气标准，能有效控制损耗。

NPO 架构的硬件连接结构为：PCB 主板预留标准光模块笼座插座，位于 ASIC 主芯片四周，距离上尽量靠近主芯片；NPO 光引擎（EIC+PIC+OE 基板）做成标准化前插式模块，通过成熟金手指标准连接器（QSFP-DD/OSFP-XD/OSFP 等标准）插入笼座；高速 SerDes、I2C 管理、电源全部通过行业成熟金手指接口传输；光路输出为：PIC 右侧引出光纤，经适配器汇聚至外部光纤链路。

其与主板的连接方式有两种，如上图所示。第一种为传统的水平布局方式，即 NPO 模块通过传统的金手指连接器水平布局在主芯片周边。第二种为垂直布局方式，即 NPO 模块通过垂直金手指连接器，与主板垂直相连，以节省主芯片周边的布局空间，但对垂直高度有一定要求。

标准依据：复用现有 QSFP-DD、OSFP 等系列成熟 MSA 行业规范标准，无需全新接口标准开发。完全遵循 OIF CMIS、IEEE 802.3dj、CEI 高速电气规范，可直接对接现有交换机 ASIC、上位机网管、自动化测试平台，无新标准适配成本。

NPO 架构的主要优势如下：

高可靠性与成熟度：QSFP-DD/OSFP-XD/OSFP 等金手指接口在数据中心已有十年以上的大规模商用历史。其接触弹片设计、盲插防呆机制、散热风道兼容性均已通过市场验证，热插拔、高低温、振动、ESD 全套可靠性标准完善。相比于裸露焊盘的 LGA（Land Grid Array），金手指接口的机械寿命和抗恶劣环境能力更强。

可扩展性更强：标准连接器 OSFP-XD/OSFP 的最大宽度为 22.93mm，现有 3.2T NPO 基于 LGA 连接器的模块宽度为 23.94mm，两者占用宽度接近。按照在 ASIC 主芯片四周每个边放 4 块 NPO 估算，单层最多放置 16 个 NPO 模块。对基于标准金手指连接器的 NPO 架构，因其不需要与主板直接贴合，而是通过标准金手指笼座相连，可采用可插拔光模块中已成熟应用的双层连接器形态，在高度方向上扩展密度。理论上可通过双层叠加方式，在不增加模块所占宽度的情况下，实现光通道数量 2 倍扩展。双层连接既可采用分立叠加式，也可采用一体集成式进行扩展。

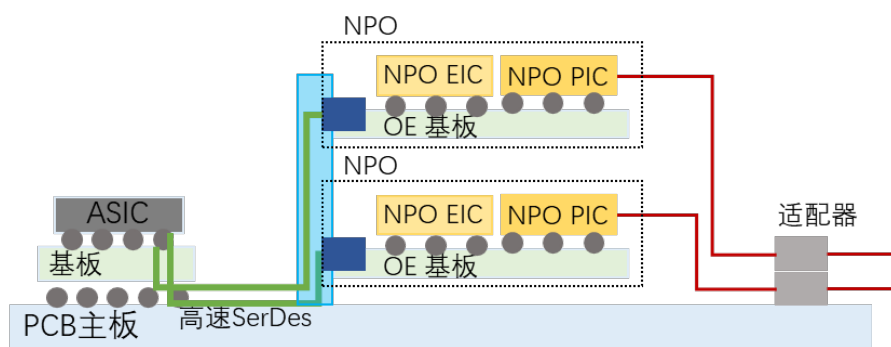


图 5.3 基于双层连接器扩展的 NPO 连接方案示意图

模块内部布局更灵活：基于标准金手指连接器的 NPO 架构方案，由于不需要底面与 PCB 主板相连，在 NPO 模块内部可双面布局，沿用传统工艺，封装工艺更成熟，产品良率大幅提升。并且由于 NPO 的双面布局，可双面散热，相比于单面散热，可更快地将热量传导出去，大幅降低模块内部芯片温度。

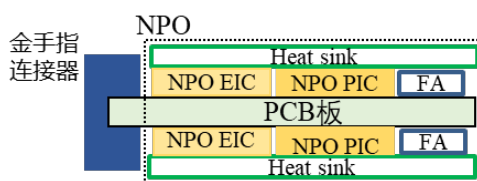


图 5.4 NPO 模块内部双面布局和双面散热方案示意图

运维便利性与多源供应：NPO 模块完全沿用了传统光模块的维护习惯，工程师可以使用通用助拔器完成热插拔操作。同时，由于接口标准化，市场上多家光模块厂商均可按同一规范供货，有效避免了供应风险。

平滑过渡与兼容性：完整复用现有产业链生态，对于已经习惯了传统可插拔光模块运维体系的数据中心来说，NPO 是一种阻力最小的升级方案。它不需要对现有机箱内部结构进行大规模改造，也不需要运维人员进行大规模培训。

3. 外部光源（ELSFP）的物理布局

NPO 单模方案采用相对独立的外部光源模块（ELSFP），由其提供 NPO 光引擎所需的连续波（CW）光。其主要遵循 OIF-ELSFP-02.0 规范。物理布局建议如下。

模块形态：ELSFP 本身是标准可插拔模块，通常放置在交换机或服务器设备的前面板或背板，以便于维护和更换。

光纤连接：ELSFP 通过单模光纤跳线，将 CW 光传输至设备内部的 NPO 光引擎。由于光引擎位于板卡内部，应明确规划该光纤连接路径，利用设备内部的线缆槽或光纤管理结构牵引并固定，避免光纤弯曲半径过小导致额外的损耗。

高集成性：ELSFP 模块最多可提供 16 路激光光源通道。按照每路光源在 NPO 光引擎内进行 4 路分光计算，对于 32 路通道的 NPO 模块（ $32 \times 200\text{G}/\text{lane} = 6.4\text{Tbps}$ ），仅需 8 路激光光源。即一个 ELSFP 模块可用于支持两个 32 通道的 6.4T NPO 模块。

4. 高速走线拓扑建议

NPO 的物理组件定义为“近封装”，意味着光引擎与主芯片的封装体（Package）在 PCB 上的物理距离通常在毫米至厘米量级。

阻抗控制与等长设计：所有高速差分走线（如 SerDes TX/RX 对）必须严格控制差模特征阻抗（通常为 $90 \sim 100\Omega \pm 10\%$ ）和共模阻抗。在 NPO 设计中，由于走线极短，相对而言对线间等长（Skew）的控制更容易实现，但仍是保证信号质量的必要设计规范。

参考平面连续：所有高速走线下方必须有连续、无空洞的参考地平面（Ground Plane），以确保信号回路面积最小，并控制特性阻抗的连续性。在 NPO 布局中，应重点关注 ASIC 下方至 OE 下方区域的电源完整性（PI）与信号完整性（SI）协同设计。

5.2 光电接口规范

5.2.1 电气接口

NPO 系统的电气接口定义了主机 ASIC（xPU/Switch）SerDes 与 NPO 光引擎之间的高速信号互连规范。由于 NPO 采用线性直驱架构，模块内部不包含用于信号重定时和均衡的 DSP 或 CDR，因此该电气接口的性能直接决定了整个链路的信号完整性和误码率表现。

1. SerDes 速率系列

NPO 电气接口所支持的 SerDes 速率应与当前及下一代主流数据中心速率系列对齐。根据 OIF-CEI-05.3 规范中定义的通用电气 I/O 速率系列，建议 NPO 系统支持以下速率等级：

112Gbps PAM4 系列: 这是当前 NPO 系统的主要速率接口。基于 CEI-112G 系列标准, 支持 IEEE 802.3 定义的 100GBASE-R/200GBASE-R/400GBASE-R/800GBASE-R 速率族的电气层承载。典型符号率 53.125 GBd PAM4。

224Gbps /448Gbps PAM4 系列: 面向 3.2T/6.4T 及以上 NPO 系统, 224Gbps/lane SerDes 正在标准化中。根据 OIF-FD-CEI-448G-01.0 白皮书框架, 业界正积极研究 448Gbps 技术方向, 以识别下一代每通道 448Gbps 系统的挑战和技术方案。

2. 电气参数规范

NPO 电气接口的关键电气参数应符合以下规范。引用自 OIF-CEI-05.3 中的通用电气规范, 并结合了 NPO 极短通道的优化空间。

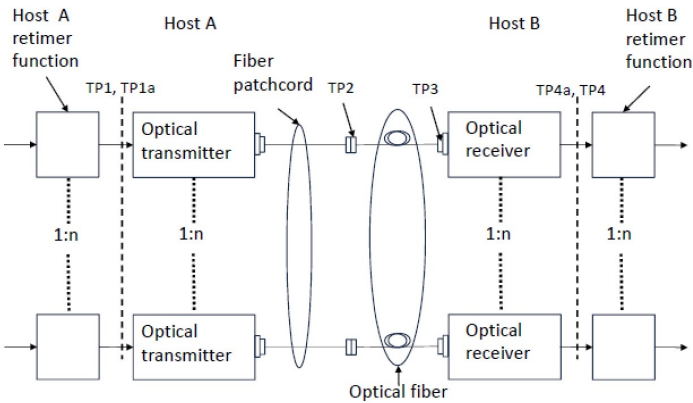


图 5.5 NPO 系统中电气参数测试点示意图（来源 OIF-CEI-05.3）

表 5.2 模块输入（Host-to-Module）参数（测试点 TP1a）

参数	最小值	最大值	单位
差分电压, 峰峰值	—	525	mV
VMA 电压调制幅度	200	450	mV
低频峰峰值交流共模电压 ($V_{CM_{LF}}$)	—	30	mV
全频段峰峰值交流共模电压 ($V_{CM_{FB}}$)	—	80	mV
共模电压	-300	2800	mV
差分端接电阻失配	—	10	%
共模到差模转换 (SDC22)	—	$SDC22 \leq -25 + 22 \times (f/f_b) \text{ dB}$ ($0.05 \text{ GHz} \leq f \leq f_b/2$) $SDC22 \leq -19 + 10 \times (f/f_b) \text{ dB}$ ($f_b/2 < f \leq 0.8 f_b$)	dB
共模回波损耗 (SCC22)	—	-2 dB ($0.25 \leq f \leq 4 \text{ GHz}$) -1.6 - 0.1 · f dB ($4 < f \leq 30 \text{ GHz}$) -8.5 + 0.13 · f dB ($30 < f \leq \min(0.8 \cdot f_b, 43 \text{ GHz})$)	dB
有效回波损耗 (ERL)	8.5	—	dB
转换时间	10	—	ps
EECQ	—	3	dB
Ceeq_db	-0.5	0.5	dB
过冲/下冲	—	25	%

表 5.3 主机到模块电气规格参数

参数	测试点	最小值	最大值	单位
过载差分电压，峰峰值	TP1a	550	—	mV
共模电压（V _{cm} ）	TP1	—350	2850	mV
差分端接电阻失配	TP1	—	10	%
差模到共模转换（SCD11）	TP1	—	SCD11 ≤ -22 + 16 × (f/f _b) dB (0.05 GHz ≤ f ≤ f _b /2) SCD11 ≤ -19 + 10 × (f/f _b) dB (f _b /2 < f ≤ 0.8 f _b)	dB
有效回波损耗（ERL）	TP1	10	—	dB

表 5.4 模块输出（Module-to-Host）参数（测试点 TP4）

参数	最小值	最大值	单位
差分电压，峰峰值	300	620	mV
VMA	300	720	mV
直流共模电压容差（V _{cm} ）	250	500	mV
低频峰峰值交流共模电压（VCMLF）	—350	2850	mV
全频段峰峰值交流共模电压（VCMFB）	—	30	mV
差分端接电阻失配	—	80	mV
共模到差模转换（SDC22）	—	10	%
有效回波损耗（ERL）	—	SDC22 ≤ -25 + 22 × (f/f _b) dB (0.05 GHz ≤ f ≤ f _b /2) SDC22 ≤ -19 + 10 × (f/f _b) dB (f _b /2 < f ≤ 0.8 f _b)	dB
共模回波损耗（SCC22）	10	2	dB
EECQ（SMF）	—	(0.25 ≤ f ≤ min(0.8 · f _b , 43 GHz))	dB
EECQ（MMF）	—	8	dB
EECQ（MMF）	—	10	dB

表 5.5 模块到主机电气规格

参数	测试点	最小值	最大值	单位
过载差分电压，峰峰值	TP4	720	—	mV
差分端接电阻失配	TP4a	—	10	%
有效回波损耗（ERL）	TP4a	8.5	—	dB
差模到共模转换（SCD11）	TP4a	—	SCD11 ≤ -22 + 16 × (f/f _b) dB (0.05 GHz ≤ f ≤ f _b /2) SCD11 ≤ -19 + 10 × (f/f _b) dB (f _b /2 < f ≤ 0.8 f _b)	dB
共模电压（V _{cm} ）	TP4a	—300	2800	mV

3. 眼图模板要求

眼图模板是评估信号质量的核心指标。针对 PAM4 调制，NPO 的电气接口眼图模板应符合

OIF-CEI-05.3 定义的 PAM4 眼图参数，以及 IEEE 802.3dj 中的相应规范。

在 PAM4 三电平眼图（Upper Eye, Middle Eye, Lower Eye）的掩蔽区域内，应无不通过点。具体的眼宽/眼高数值应根据具体速率和管理目标在标准中给出明确的量化限值。

表 5.6 发射端眼图模板参考参数

参数名称	符号	参考值	单位
电眼闭合度（PAM4）	EECQ	≤ 9	dB
眼宽	EW	≥ 0.24	UI
眼高	EH	≥ 16	mV
眼幅度	AV	≥ 48	mV
垂直眼闭合度	VEC	≤ 5.5	dB
非相关有界高概率抖动	UBHPJ	≤ 0.15	UIpp
总抖动	TJ	≤ 0.30	UIpp

表 5.7 接收端眼图模板参考参数

参数名称	符号	参考值	单位
电眼闭合度（PAM4）	EECQ	≤ 9	dB
眼宽	EW	≥ 0.47	UI
眼高	EH	≥ 34	mV
眼幅度	AV	≥ 80	mV
垂直眼闭合度	VEC	≤ 5.5	dB
高概率抖动	ACJ	≤ 0.28	UIpp
正弦抖动	SI	≤ 0.08	UIpp

4. NPO 线性直驱架构的特殊性与电链路总预算

由于 NPO 模块内部无 DSP/CDR，电气接口必须满足以下额外要求：

链路训练（Link Training）：主机 ASIC SerDes 应通过链路训练协议，在初始上电或链路重建时与 NPO 模块内的线性驱动器和 TIA 进行均衡系数的协商，以实现最佳的信号补偿。

极短通道的优势：NPO 的极短电通道对 SerDes 的驱动和均衡能力要求远低于可插拔 LPO，因此其电气参数裕量相对更大。

总通道损耗预算：在奈奎斯特频率（ $f = f_b/2$ ）处，NPO 系统的总电通道损耗预算最大为 13dB（包括 PCB 主板走线损耗 9dB，对应的 PCB 走线典型值 90mm-100mm；连接器损耗 2dB，NPO 内部 PCB 损耗 2dB）。NPO 系统设计时必须严格遵守这一损耗预算，并尽可能减小链路损耗，预期 NPO 高速电链路总损耗可以做到<10dB，以确保链路的可靠性和性能，实现降低功耗、减少时延、提高信号完整性的目标。

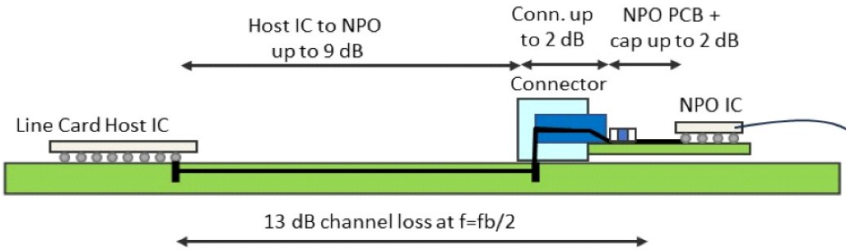


图 5.6 NPO 通道损耗预算示意图（来源 OIF-CEI-05.3）

5.2.2 光学接口

NPO 系统的光学接口负责将光引擎（OE）的发射/接收光信号耦合至外部光纤链路。其核心是采用高密度多芯插芯进行阵列光互连，以实现光纤的高效扇出和对接。NPO 模块光输出端与系统接口：采用标准 MT/MPO 插芯实现高密度、可插拔的光纤连接。其规格遵循 OIF 或 MSA 中对 MT 插芯的定义。

1. 插芯规格

NPO 光学接口主要采用 MT（Mechanical Transfer）兼容的高密度插芯系列，应遵循 OIF 中相关规范。

（1）插芯类型：

12 芯 MT 插芯：符合 TIA-604-5 (MPO), IEC 61754-7-1 标准。

16 芯 MT 插芯：符合 TIA-604-18 (FOCIS 18 MPO16), IEC 61754-7-3 标准。

24 芯 MT 插芯：符合 TIA-604-5, IEC 61754-7-2 标准。

36 芯 MT 插芯：符合 TIA-604-5 标准。

（2）插芯斜面：所有 MT 插芯应采用 $8^\circ \pm 0.2^\circ$ 的角度抛光（APC, Angled Physical Contact），以降低回波损耗（RL 至更低水平，如优于 -60dB）。

（3）物理接触方式：

光引擎侧（模块侧）：应采用物理接触（Physical Contact）MT 插芯，无抗反射（AR）涂层。

光纤跳线侧（主机面板侧）：可以采用物理接触 MT 插芯，也可以采用空气间隙（Air-gap）型 MT 兼容插芯（带间隔垫片）。空气间隙方式可以进一步降低耦合损耗，但增加了对机械对准精度的要求。

2. 对准定位与公差

MT 插芯的精确对准依赖于导向销（Pin）和导向孔（Hole）系统，以及对插芯端面物理参数的严格控制。

导向销与导向孔：导向销应安装在主机侧（光纤跳线侧）的插芯上，与模块侧插芯的导向孔配合。

表 5.8 关键尺寸公差

参数类别	12 芯 MT 规格	24 芯 MT 规格	备注
导向销直径	参考 TIA-604-5 表 3, Option t=1; IEC 61754-7-1 表 4 Dimension A	参考 TIA-604-5 表 3, Option t=1; IEC 61754-7-2 表 5 Dimension A	典型值为 0.698~0.700 mm
导向孔直径	参考 TIA-604-5 表 3, Option t=1; IEC 61754-7-1 表 1 Dimension A	参考 TIA-604-5 表 3, Option t=1; IEC 61754-7-2 表 2 Dimension A	典型值为 0.700~0.702 mm
导向销/孔间距	参考 TIA-604-5 表 5 & 12, Dimension C; IEC 61754-7-1 表 1 & 4, Dimension C	参考 TIA-604-5 表 5 & 12, Dimension C; IEC 61754-7-2 表 2 & 5, Dimension C	典型 4.6 mm（中心距）
光纤间距	0.250 mm (250 μ m)	0.250 mm (250 μ m)	基于标准 MT 插芯

3. 耦合对准公差与互配要求

NPO 的盲插光学连接器需要精确控制对准公差，以确保低插入损耗和稳定的性能。

插入损耗（IL）目标：建议单次光学连接（Engine $\leftrightarrow$ Fiber Jumper）的插入损耗 ≤ 0.35 dB（典型值），系统全链路累积 IL 应在链路预算内。

回波损耗（RL）目标：由于采用 8° APC 抛光，光学接口回波损耗应 ≥ 60 dB（典型值）。

配合力要求：盲插连接器的光引擎插芯在插入过程中，需要施加足够的力以确保端面接触，但应控制在安全范围内。根据 OIF-ELSFP-02.0：对于 12 芯物理接触，当插芯行程使端面位移至特定位置时，配合力应在 7.8 N 至 11.8 N 之间；对于空气间隙型及 24/36 芯物理接触，对应配合力要求在 4 N 至 6 N（气隙型）和 18 N 至 22 N（24/36 芯物理接触型）之间。

寿命与耐久性：盲插连接器应支持不少于 500 次的插拔，并在全生命周期内保持光学和机械性能稳定。

4. 光纤类型与通道映射

光纤类型：建议采用单模光纤（如 G.652.D 型光纤）进行 NPO 系统内部的光信号传输，以支持未来更高速率和更远距离的扩展。

通道映射：应遵循 OIF-ELSFP-02.0 中的频率和偏振分配规范。对于波分复用（WDM）应用，如 CWDM4，应在 MT-12 或 MT-24 插芯上明确每个光纤芯的波长分配（如 1311nm 波段），并定义对应的偏振态。对于多光纤并行（如 SR8/DR8）应用，应明确电通道到光通道的物理映射关系。

5.3 外部光源（ELS）子系统规范

NPO 系统采用外部激光源（External Laser Source, ELS）模块，将连续的激光（CW）光信号通过保偏光纤（PMF）馈入光引擎（OE）内部完成调制和复用。ELS 子系统是 NPO 架构区别于集成光源方案的关键组成部分。

5.3.1 ELS 光学性能要求

ELS 的光学性能直接决定了 NPO 系统光链路的预算、信号质量和系统可靠性。根据 OIF-ELSFP-02.0 的定义，ELS 光学性能应符合以下要求。

1 光功率等级

表 5.9 ELSFP 模块光功率等级

功率等级	等级代号	最小光功率	典型光功率	最大光功率	单位	条件说明
标准功率	HP	+13	+16	+17.5	dBm	每根 PMF 光纤输出
甚高功率	VHP	+16	+19	+20.5	dBm	每根 PMF 光纤输出
超高功率	UHP	+19	+22	+24	dBm	每根 PMF 光纤输出

2 波长与偏振分配

表 5.10 DR 类型（1311nm）和 FR 类型（CWDM4）波长分配

应用类型	波长范围	通道数	通道间距	每通道波长（示例）	参考标准
DR Type（1311nm）	1295 ~ 1325 nm	4	—	4 路 CW（1311nm 附近）	IEEE 802.3 400GBASE-DR4
FR Type（CWDM4）	1271 ~ 1331 nm	4	20 nm	1271, 1291, 1311, 1331 nm	IEEE 802.3 400GBASE-FR4

偏振分配与保偏要求：

偏振态定义：ELS 输出的偏振态（E 场方向）应相对于 MT 插芯两个导向孔中心连线的水平（或垂直）方向对齐。

偏振消光比（PER）：在 TP_L2 测试点测量的 PER 应满足应用特定要求（通常 ≥ 10 dB）。

PMF 类型：输出光纤为保偏光纤（PMF），其慢轴/快轴应与光引擎芯片的偏振方向对齐，以确保最佳的调制效率。

3 稳定性与关键光学参数

表 5.11 ELSFP 模块关键光学参数

参数名称	符号	最小值	典型值	最大值	单位	条件说明
每通道光功率能力 (4PMF)	P_EL4PMF	22	—	—	dBm	每根 PMF 光纤
工作功率最小设定点 (4PMF)	P_MINEL4PMF	—	—	18	dBm	每根 PMF 光纤
光功率控制粒度	P_CELS	—	1	—	dB	可通过管理接口调整
激光器 RIN	RINc	—	—	-141.5	dB/Hz	最大光回损条件下
激光器 SMSR	SMSR	30	—	—	dB	边模抑制比
激光器线宽	$\Delta\nu$	—	—	2	MHz	-3dB 全宽 (自外差法, 3.5 μ s 时延)
偏振消光比 (PER)	r_ex	10	—	—	dB	在 TP_L2 测量
输出反射	Rx_Ref	—	—	-26	dB	ELS 输出端反射系数
ELS 光回损容限	Rtol_ELS	28.2	—	—	dB	假设 ELS 与 OE 之间最多 3 个连接器 (各 ORL=45dB)
ELS 反射率 (TP_L2)	Ref_ELS	—	—	-26	dB	匹配 IEEE Tx 反射率要求

4 光学测试点定义

表 5.12 ELSFP 模块光学测试点

测试点	定义位置	测量目的	测量方法
TP_L1	ELS 模块输出端 (光连接器接口)	ELS 模块的直接光学性能 (功率、波长、PER)	使用测试级 MT 跳线直接连接至 ELS 输出
TP_L2	2~5 米测试级光跳线的输出端	ELS 的最终光学性能 (IL 已去除)	使用短测试跳线 (2~5m) 连接, 去除跳线本身 IL、旋转和偏移容差的影响

5.3.2 ELS 管理接口与冗余备份机制

5.3.2.1 CMIS 协议兼容性

根据 OIF-ELSFP-02.0 和 OIF-CMIS-05.4 的定义, ELSFP 模块的管理接口应符合 CMIS 规范。

1. 管理协议与物理层

表 5.13 ELSFP 模块管理协议参数要求

参数	要求
通用管理接口规范	应符合 CMIS 5.3 或更高版本
通信接口	两线接口 (TWI, I2C 兼容)
最小引脚数	5 个功能引脚: SCL (时钟线)、SDA (数据线)、ResetL (复位)、IntL (中断)、LPModeL (低功耗模式)
SCL/SDA 上拉	主机提供 4.7k Ω [1%] 的上拉电阻, 模块提供 $\geq 10k\Omega$ [1%] 的上拉电阻 (配合使用)

2. 模块类型声明

根据 OIF-CMIS-05.4 的定义, ELSFP 属于资源模块 (Resource Module) 中的外部激光源模块 (External Laser Source Module)。

3. 寄存器访问与 CDB 命令

主机通过 I2C 读写相关寄存器（符合 CMIS 内存映射），以控制、监控 ELSFP 并更新固件。

支持 CDB（命令数据块）命令，用于执行高级操作（如密码管理、功能查询、时间同步等）。

5.3.2.2 电源分类与电流限制

根据 OIF-ELSFP-02.0 的定义，ELSFP 模块的电源通过 6 对 3.3V 电源/地引脚传输。每个电源/地引脚支持 $\leq 1.5\text{A}$ DC 的电流，最大额定电压为 30V DC。ELSFP 模块的总功耗等级和电流限制如下表所示，其中 V_{cc_min} 为 ELSFP 模块的供电电压最小值。

表 5.14 ELSFP 模块总功耗分类

功耗等级	最大功耗 (W)	瞬时峰值电流 (mA)	持续峰值电流 (mA)	稳态电流 (mA)
低功耗模式 (LP)	1.5	600	500	478
Class 1（高功耗模式 1）	1.5	600	500	478
Class 2（高功耗模式 2）	5	2000	1667	1595
Class 3（高功耗模式 3）	10	4000	3333	3190
Class 4（高功耗模式 4）	15	6000	5000	4785
Class 5（高功耗模式 5）	20	8000	6666	6380
Class 6（高功耗模式 6）	30	12000	9999	9569
Class 7（高功耗模式 7）	40	16000	13332	12759
Class 8（高功耗模式 8）	$P_{8>40}$	$P_{8\times 400P}$	$P_{8\times 333.3}$	$P_{8/V_{cc_min}}$

5.3.2.3 冗余备份机制

1. 激光器冗余设计

根据 OIF-ELSFP-02.0 的定义，ELSFP 模块支持常规模式 (Conventional) 和直通模式 (Pass-Through) 两种配置。

常规模式配置：每个 PMF 激光器端口对应一个物理激光器。模块内部包含 N 个激光器（如 16 个），每个激光器输出通过单根 PMF 直接或通过内部分路器（1:2, 1:4 等）分发给光引擎的多个通道。

直通模式配置：部分光纤接口“直通”，允许外部光信号直接穿过 ELSFP 模块，供其他系统使用。这种设计支持更灵活的光学架构，允许在系统层面实现光源的冗余备份。

2. 基于硬件键控的模块级冗余

根据 OIF-ELSFP-02.0 的定义，ELSFP 提供了硬件键控 (Hard Keying) 机制来区分不同配置的模块。

常规 ELSFP 键控方案：针对激光器光纤数和功率级别进行分类。

直通 ELSFP 键控方案：针对同时含激光器和直通光纤的复合模块进行标识。

当主机系统检测到 ELSFP 模块的光纤数量与端口预期不匹配时（如将一个 8PMF 模块插入一个 4PMF 端口的槽位），“硬键”不会阻止物理配对，但主机可通过 CMIS 读取 ELSFP 的能力声明，将其与端口需求进行比较，选择性地启用或禁用部分激光器（例如一个 8PMF 模块插入 4PMF 端口时，仅启用 4 根激光光纤），并通知用户部分功能可用或不匹配。

3. 基于 CMIS 的智能功率管理冗余

根据 OIF-ELSFP-02.0 的定义，ELSFP 与光引擎 (OE) 之间的链路损耗测量机制也支持冗余监控。

链路损耗监控：主机通过 CMIS 读取 ELSFP 的输出功率 (P_0) 和 OE 接收端的输入功率 (P_1)，实时计算 ELS 到 OE 的链路插入损耗 ($\Delta P = P_0 - P_1$)。

健康检测：如果系统检测到某一根光纤链路的插入损耗异常（超出预期范围），主机会发出告警，

提示用户检查对应连接器的洁净度，并自动降低或关闭相应激光器以防止损坏（即“烧毁”防护）。

表 5.15 ELSFP 模块各层级冗余机制

冗余层级	机制与实现
电源级	6 对 3.3V 电源/地引脚（单引脚最大 1.5A）
链路级	光链路损耗实时监控与自动功率调整
接口级	硬件键控防止完全不可用的配对
管理级	CMIS 状态机+CDB 命令实现智能切换

5.4 供电与功耗模型

NPO 系统的供电与功耗模型定义了模块的电压容差范围要求，以及不同运行模式下的功耗分解与热设计目标。合理的供电设计是确保 NPO 模块可靠运行、实现低功耗目标的基础。

5.4.1 电压容差

5.4.1.1 供电电压要求

表 5.16 NPO 模块供电电压参数要求

电源轨	最小值 (V)	标称值 (V)	最大值 (V)	容差范围
3.3V	3.135	3.3	3.465	±5%

5.4.1.2 绝对最大额定值

根据 OIF 规范，NPO 模块电源轨的绝对最大额定值如下，超出这些值可能造成永久性损坏。

表 5.17 NPO 模块各电源轨的绝对最大额定值

参数	额定值	单位
3.3V 电源电压	-0.3 ~ +4.0	V
I/O 引脚电压	-0.3 ~ VCC _{1P2} + 0.3	V

5.4.2 典型功耗分解与热设计功耗（TDP）定义

5.4.2.1 最大功耗等级

表 5.18 NPO 模块最大功耗等级

运行模式	最大功耗 (W)	条件说明
满功率运行模式（NPO 多模）	11	T _c =最大值，寿命末期（End of Life）
满功率运行模式（NPO 单模，不含集成激光器）	23	T _c =最大值，寿命末期（End of Life）
低功耗模式	2	

5.4.2.2 典型功耗分解

基于典型 OIF 3.2T 架构的估算分解模块功耗，实际功耗分解取决于具体 OE 工艺节点、驱动芯片设计和工作温度。NPO 模块的功耗主要来自以下组件分解。

表 5.19 NPO 多模模块典型功耗分解

功耗组成	预估占比	预估功耗	备注
光引擎（OE）	约 75%~85%	6~9.5 W	包括：调制器驱动、TIA、MZI 调谐
· 调制器驱动	约 35%~45%	3~5 W	PAM4 线性驱动
· TIA + 接收端均衡	约 25%~35%	2.5~3.5 W	跨阻放大器与线性均衡
· 光器件	约 5%~10%	0.5~1 W	VCSEL/PD
电源管理（PMU/DC-DC）	约 5%~10%	0.5~1 W	多路 DC-DC 转换器效率损失
管理电路（MCU/CMIS）	约 3%~5%	0.2~0.5 W	I ² C 管理、监控、VDM
合计	100%	≤ 11 W	

表 5.20 NPO 单模模块典型功耗分解

功耗组成	预估占比	预估功耗	备注
光引擎（OE）	约 75%~90%	13.5~19 W	包括：调制器驱动、TIA、MZI 调谐
· 调制器驱动	约 40%~50%	8~11 W	PAM4 线性驱动
· TIA + 接收端均衡+PD	约 15%~20%	3~4 W	跨阻放大器、线性均衡及 PD
· MZI 调谐与偏置控制	约 15%~20%	3~4 W	Mach-Zehnder 调制器
电源管理（PMU/DC-DC）	约 7%~10%	1.5~2 W	多路 DC-DC 转换器效率损失
管理电路（MCU/CMIS）	约 3%~5%	0.5~1 W	I ² C 管理、监控、VDM
辅助电路	约 3%~5%	0.5~1 W	ADC/DAC
合计	100%	≤ 23 W	

5.4.2.3 热设计功耗（TDP）

热设计功耗（Thermal Design Power, TDP）是系统散热方案设计的核心指标。根据 OIF 和 ODCC 448G/lane 需求白皮书的定义，给出 NPO 模块的热设计功耗定义。

1. TDP 定义

NPO 模块的热设计功耗（TDP）定义为在最恶劣工作条件（最大壳温、寿命末期、最高输入电压、最大业务负载）下，模块消耗的最大功率上限。

表 5.21 NPO 模块的 TDP

参数	数值	单位	条件说明
TDP（NPO 多模，满功率运行）	≤ 11	W	参考 OIF 规范，寿命末期最恶劣条件
TDP（NPO 单模，满功率运行）	≤ 23	W	参考 OIF 规范，寿命末期最恶劣条件
TDP（低功耗模式）	≤ 2	W	

2. 功耗与散热设计要求

表 5.22 NPO 模块的功耗与散热设计要求参考

设计环节	要求	参考说明
散热器（Heatsink）设计	热阻 $< X \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ （根据系统允许温升计算）	需基于 TDP=11W/23W 和最大壳温 70°C 计算
气流方向	模块纵向方向的气流流速 $> Y \text{ m/s}$	根据系统散热设计确定
导热界面材料（TIM）	热导率 $> Z \text{ W/m}\cdot\text{K}$	推荐使用导热硅脂或导热凝胶
热监控与降频	当壳温接近上限时，系统应实施动态降功耗措施	如降频、降低摆幅、关闭部分通道等
辅助散热	若被动散热不满足，应采用主动液冷或强制风冷	参考 ODCC 448G 白皮书

5.4.2.4 功耗优化技术

根据 ODCC 448G/lane 需求白皮书的描述，NPO 系统可采用以下功耗优化技术。

表 5.23 NPO 模块可采用的功耗优化技术

技术	描述
动态精度调节	基于实时负载动态优化传输精度，空闲时降低驱动摆幅和均衡器系数
FlexLane 弹性通道	业务较轻时，关闭部分通道，使剩余通道运行在更优的能效点
NPO 近封装	将光引擎置于 ASIC 附近，缩短电通道长度，减少 SerDes 驱动强度，系统级功耗降低 30%以上

5.5 信号完整性（SI）与电磁兼容性（EMC）

NPO 系统通过将光引擎（OE）靠近交换芯片（ASIC）设计，显著缩短了高速电信号的传输距离。然而，这种高密度、高带宽的互连架构也对电路板级互连的信号完整性（SI）和系统整体的电磁兼容性（EMC）提出了严峻挑战。

5.5.1 极短距信道插损与回损预算

在 NPO 架构中，高速电信号从 ASIC SerDes 到光引擎（OE）的驱动器或从 OE 的跨阻放大器（TIA）到 ASIC SerDes 的路径被称为极短距信道。该信道通常包括芯片封装（基板）、BGA 焊球、PCB 走线（极短段）、标准金手指接口以及模块电芯片与光引擎之间的微凸块（micro-bump）或中介层（interposer）。由于信道距离极短（通常为厘米级甚至更短），其损耗预算与传统模块信道不同。NPO 系统的信道插损与回损预算主要参考 OIF-CEI-05.3 以及 OIF-EEI 的相关分析。

1. 信道插入损耗（Insertion Loss, IL）预算

NPO 系统的极短距信道插入损耗主要包括：ASIC 封装损耗、BGA 过孔损耗、极短 PCB 走线损耗、金手指接口损耗以及 OE 封装损耗。

根据 OIF-CEI-05.3 的信息性信道插入损耗图，在奈奎斯特频率处，NPO 系统的总插入损耗预算最大为 13dB。NPO 系统设计时必须尽可能减小链路损耗，预期 NPO 高速电链路总损耗可以做到 <10dB，以确保链路的可靠性和性能，实现降低功耗、减少时延、提高信号完整性的目标。

表 5.24 NPO 极短距信道插损预算分解建议

损耗组成部分	典型预算 (dB)	说明
ASIC 封装&BGA 扇出	2.5	包括基板走线和过孔损耗
PCB 走线 (< 5cm)	3.5	采用低损耗 PCB 材料
金手指连接器	1.5	标准金手指
OE 封装&微凸块	2.5	光引擎衬底和互连损耗
总信道插损 (max)	10.0	在奈奎斯特频率下, 低于传统可插拔模块

2. 信道回波损耗 (Return Loss, RL) 预算

在 NPO 系统的高速电接口设计中, 回波损耗是衡量信号完整性的核心指标之一。它与阻抗连续性直接相关。在高密度封装中, 阻抗不连续性主要由 BGA 过孔、封装基板走线、以及 OE 与 ASIC 的连接点 (如 micro-bump) 引起。控制回波损耗 RL 对保持信号质量至关重要。

信道回波损耗是衡量差分信号在传输路径中因阻抗不匹配而产生反射能量的直接频域度量。它通过差分 S 参数 SDD11 (输入回波损耗) 和 SDD22 (输出回波损耗) 来表征。其数值 (dB) 表示反射功率与入射功率之比, 数值为负, 其值越小代表反射越小, 阻抗越匹配。

对于 NPO 模块, 根据 OIF-CEI-05.3 相关规范, 对差分回波损耗的限值通常以频率相关的掩模曲线的形式给出。在奈奎斯特频率附近, 典型的设计目标为信道回波损耗 $RL < -8$ dB。

有效回波损耗 (Effective Return Loss, ERL) 是一种系统级时域指标。它通过将信道的脉冲响应与参考接收机均衡器模型 (包含 CTLE 和 DFE) 相结合, 计算出在接收机实际均衡能力下, 反射造成的剩余有效信号能量。根据 OIF-CEI-05.3 相关规范, 对于 NPO 模块, 模块输入的有效回波损耗 (ERL) ≥ 8.5 dB, 模块输出的有效回波损耗 (ERL) ≥ 10 dB, 这是 NPO 电接口设计的重要参考。

5.5.2 系统级电磁干扰 EMI 抑制措施与测试限值

随着 NPO 系统单通道速率达 112 Gb/s PAM4 甚至更高, 系统级电磁干扰 (EMI) 的控制变得极具挑战。EMI 的抑制应从屏蔽结构设计、PCB 布局优化以及滤波与接地管理等多方面入手。

1. EMI 抑制硬件结构与设计措施

NPO 系统 (包含 ELSFP 模块、OE、ASIC 及面板接口) 的 EMI 设计主要参考 OSFP 和 OSFP-XD MSA 规范中的成熟机制。

EMI 弹簧指 (EMI Fingers): OSFP-XD Specification Rev1.11 给出了用于笼子内部顶面和底面的 EMI 弹簧指详细尺寸。它要求笼子左侧、右侧和外部的弹簧指应适当设计以确保有效屏蔽, 且推荐弹簧指与 PCB GND 保持良好接触。NPO 模块和 ELSFP 笼子亦应沿袭此设计, 在面板开口处使用高弹性、低阻抗的金属簧片, 实现笼子与面板之间的低阻抗搭接, 防止缝隙泄漏。

壳体接地与电路接地隔离: OSFP 和 OSFP-XD 相关规范均明确指出, 模块的机壳地 (case common) 应与模块的电路地 (GND) 隔离。这为设备设计者提供了灵活性, 可以选择如何连接外部电磁干扰屏蔽与模块内部 GND。

PCB 布局与叠层优化: 根据 OIF-EEI 和 OSFP 相关规范与建议, 使用丰富的地过孔 (GND stitching vias), 保持差分信号线等长、对称, 并尽量将高速信号布设在靠近参考平面的内层。

2. 测试标准与限值

NPO 系统的 EMC 测试应遵循行业通用的射频发射和抗扰度标准。NPO 模块的电磁兼容试验应符合下表的要求。

表 5.25 NPO 模块电磁兼容试验要求

试验项目	引用标准	试验条件	抽样方案		
			LTPD	SS	C
射频电磁场辐射抗扰度试验	IEC 61000-4-3	80MHz~6000MHz, 10V/m, 80%幅度调制 (1kHz 正弦波)	-	1	0
射频电磁场辐射发射试验	FCC PART 15 B 级信息技术设备要求	30MHz~40GHz	-	3	0

LTPD 为批内允许不合格品率, SS 为最小样品数, C 为合格判定数;
 测量频率上限的选择如下: 频率低于 108MHz, 则测量频率上限为 1GHz; 频率在 108MHz~500MHz 之间, 则测量频率上限为 2GHz; 频率在 500MHz~1GHz, 则测量频率上限为 5GHz; 频率高于 1GHz, 则测量频率上限为 40GHz。

NPO 模块系统的高频信号 (>30GHz) 泄漏主要通过笼子与面板的缝隙以及高速连接器本身。因此, OSFP-XD 和 QSFP-DD 规范中强调的 EMI 弹簧指设计对于满足 FCC Part 15 在更高频率的限值至关重要。

NPO 系统在系统级射频电磁场辐射抗扰度试验中, 应确保光链路不会将干扰信号耦合进系统。光接口作为非导电介质, 在抗扰度方面具有天然优势, 但系统仍应保持金属壳体的完整性。

NPO 模块系统中, 特别是对于 ELSFP 等可触及部分, 设计应满足静电放电 ESD 耐受要求。由于 NPO 系统结构紧凑, 放电路径更短, 对 ESD 防护器件的响应速度和钳位电压要求更高。

NPO 模块的射频电磁场辐射发射试验限值应符合下表的规定。

表 5.26 射频电磁场辐射发射试验限值

频率范围 (MHz)	测量距离 10m 处 (B 级设备)		测量距离 3m 处 (B 级设备)	
	准峰值 / 平均值限值 (dBμV/m)	峰值限值 (dBμV/m)	准峰值 / 平均值限值 (dBμV/m)	峰值限值 (dBμV/m)
30~88	30	-	40	-
88~216	33.5	-	43.5	-
216~960	36	-	46	-
960~3000	-	-	50	70
3000~40000	-	-	54	74

6 数据中心适配与集成要求

主要参考 OIF-ELSFP-02.0、OIF-Co-Packaging-3.2T-Module-01.0、OIF-EEI-COI-WP-01.0 及 ODCC 448G/lane 需求白皮书中的相关内容。

6.1 机械结构与面板定义

NPO 系统的机械结构设计与传统可插拔光模块存在较大差异。NPO 架构将高速光引擎 (OE) 置于机框内部, 通过将 NPO OE 放置于 ASIC 周边, 再通过光纤将光信号引至面板的光纤适配接口, 从而改变了机框面板的设计范式。

6.1.1 封装尺寸与 1RU/2RU 面板密度建议

NPO 系统中交换机面板无需承载整个 NPO 模块, 仅需为外部光源 (ELSFP) 及主干光纤适配器提

供物理接口，使得面板布局从“端口密集型”向“光源出线型”演进。

1. NPO 光引擎模块和光纤适配器封装尺寸

根据 OIF 3.2T 模块规范和 MSA 标准，基于 OSFP-XD 连接器的 NPO 光引擎模块的典型封装尺寸如下。

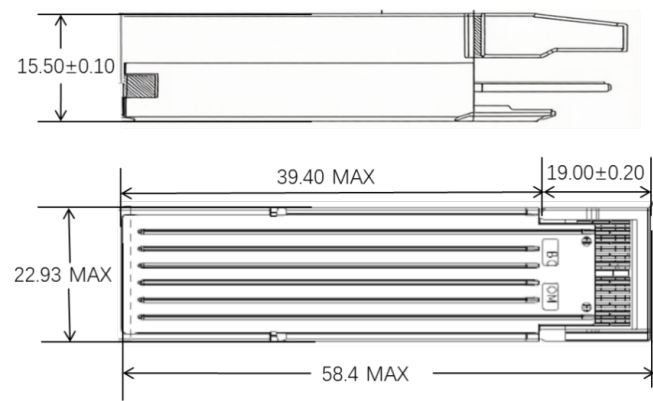


图 6.1 基于 OSFP-XD 金手指连接器的 NPO 模块典型尺寸示意图

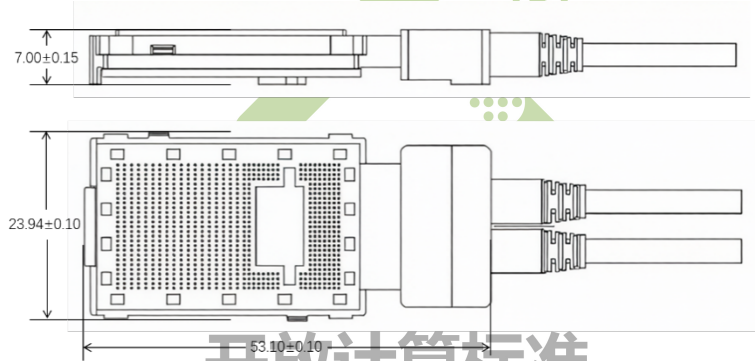


图 6.2 基于焊盘网格阵列 LGA 连接器的 NPO 模块典型尺寸示意图

表 6.1 NPO 模块的典型封装尺寸示例

NPO 封装形式	宽度（mm）	长度（mm）	高度（mm）
OSFP-XD 金手指	22.93 MAX	58.4 MAX	15.50±0.10（含散热器结构）
LGA 连接器	23.94±0.10	53.10±0.10	7.00±0.15（不含散热器结构）

以基于 OSFP-XD 标准连接器的 NPO 架构为例，封装尺寸为 22.93mm*58.40mm*15.50mm（含散热器结构）；基于 LGA 接口的 3.2T NPO 模块典型尺寸为 23.94mm*53.10 mm*7.00 mm（不含散热器结构）。总体而言，基于 OSFP-XD 金手指接口的 NPO 模块，与基于 LGA 连接器的模块相比，占用宽度和长度相近。高度方面，基于 OSFP-XD 金手指接口的 NPO 模块一般不需要额外的散热器，特别是对于 NPO 多模模块。

NPO 系统通常采用结构化的高密度光纤配线架，NPO 系统所需的光纤适配器主要有以下类型，其体积主要取决于占用的前板开口尺寸。

表 6.2 光纤适配器主要开口尺寸参数

适配器类型	占用面板宽度 (mm)	占用面板高度 (mm)	占用面板面积 (mm ²)	备注与适用场景
MTP/MPO-12	约 12.0	约 8.5	约 102	单排 12 芯。常用于 1RU 面板直连光模块。
MTP/MPO-16	约 12.0	约 8.5	约 102	16 芯，密度较高。常用于 1RU 面板直连光模块。
MTP/MPO-24（双排 2*12）	约 12.0	约 17.0	约 204	双排 24 芯，高密度。用于 2RU 或更高面板。
LC Duplex	约 8.5	约 6.5	约 55	双纤双向，用于维护测试或预留管理通道。
CS（Compact Small）	约 7.0	约 5.5	约 39	双通道，用于 400G/800G PSM 分路。
SN（Senko Very Small）	约 7.0	约 5.5	约 39	双通道，与 CS 类似，机械标准不同。

2. 外部光源（ELSFP）封装尺寸与面板布局

表 6.3 ELSFP 模块的封装尺寸（参考 OIF-ELSFP-02.0 的定义）

参数	数值（单位：mm）
模块宽度（主体）	22.58 ± 0.1
模块深度（长度）	100.00 MAX
模块高度（含散热基座）	10.51 ± 0.1
单排布局密度（18 英寸机架）	16 个模块/排

3. 1RU/2RU 面板密度建议方案

以 32 通道的 6.4T NPO 模块为例，NPO 单模方案仅需 8 路激光光源，需要 4 个 MTP-16 适配器；即一个 ELSFP 模块支持 2 个 NPO，匹配 8 个 MTP-16 适配器。而 NPO 多模方案，由于不需要外部光源，1 个 NPO 模块的外部接口仅需 4 个 MTP-16 适配器。

基于上述封装要素，NPO 交换机面板的典型密度建议如下表所示。

表 6.4 NPO 交换机面板的典型密度建议

机框高度	NPO 方案	面板配置示例	等价数据带宽	与传统方案对比（传统 OSFP 1.6T/port）
1RU(432mm × 44.45mm)	NPO 单模	8xELSFP 模块 + 64 x MTP-16 适配器	102.4Tb/s	传统 1RU OSFP 面板极限为 32 端口（51.2T）；NPO 实现双倍带宽，但面板散热压力大幅下降，且信号均由板上光路承载
	NPO 多模	128xMTP-16 适配器	204.8Tb/s	NPO 多模方案不需要外部光源 ELSFP 模块，能节省至少一半面板空间
2RU(432mm × 88.9mm)	NPO 单模	16xELSFP 模块 + 128xMTP-16 适配器	204.8Tb/s	传统 2RU 因面板面积受限，难以翻倍简单堆叠；NPO 通过增加光源密度即可实现翻倍带宽，不受端口物理热插拔机构限制
	NPO 多模	256 x MTP-16 适配器	409.6Tb/s	NPO 多模方案只需要光适配器接口，可实现翻倍带宽

4. 面板密度提升的行业背景

根据 ODCC 448G/lane 需求白皮书的描述：“行业对于面板侧的 IO 连接器能保持可插拔的‘plug-and-play’功能有着强烈的诉求，但对于界面是否前向兼容延续 OSFP/QSFP 的形态并没有要求。考虑到当前 IO 连接器形态难以优化至 100GHz 以上的带宽，行业需考虑产生新的 IO 连接器界面标准”。NPO 架构正是顺应了这一趋势，将高频 IO 界面从面板移到了芯片封装基板之上（芯片侧连接器），从而彻底解除了面板对于高速信号密度的物理限制。

6.1.2 光纤管理规范

NPO 系统的可靠性依赖于内部光链路（ELSFP→OE→前面板）的物理完整性。光纤管理设计直接影响链路预算（Insertion Loss）、偏振稳定性及系统长期部署的可靠性。

1. 光纤分区定义

表 6.5 NPO 设备内部的两类关键光链路

链路类型	光纤类型	功能描述	长度范围
ELSFP 至 OE 的供光链路	保偏光纤（PMF）	传输高功率 CW 连续激光（>15dBm）至光调制器	300~800 mm
OE 至面板的主干链路	G.657.A2/B3 单模光纤或 OM3/OM4 多模光纤	承载已调制的 PAM4 光信号，从 OE 光口路由至前面板 MTP/MPO 适配器	100~500 mm

2. 弯曲半径要求

根据 OIF-ELSFP-02.0 及行业通用光纤机械特性标准，建议的最小弯曲半径规范如下。

表 6.6 NPO 系统光纤最小弯曲半径规范参数

光纤类型	静载最小弯曲半径	动态最小弯曲半径	弯曲半径限制原因
OM3/OM4 多模光纤	≥10D（D 为光缆外径）	≥20D（D 为光缆外径）	弯曲半径过小会导致宏弯损耗急剧增加，引起信号衰减超标。IEC 60793-2-10。
PMF 保偏光纤（PANDA 型）	≥ 15 mm	≥ 15 mm	弯折引入残余应力，导致偏振消光比（PER）退化（要求 PER ≥ 10dB），影响光调制器的调制效率
G.657.A2 单模光纤（主干链路）	≥ 7.5 mm	≥ 7.5 mm	宏弯损耗随弯曲半径减小呈指数增加，500nm 弯折损耗≤0.5dB（100 圈），应控制单点弯折
G.657.B3 单模光纤（外部跳线）	≥ 5mm	≥ 5 mm	标准数据中心结构化布线要求，参照 ITU-T G.657 规范
G.652.D 单模光纤（外部跳线）	≥ 30 mm	≥ 30 mm	标准数据中心结构化布线要求，参照 ITU-T G.652 规范

3. 路由引导设计原则

根据 OIF-ELSFP-02.0 及 OIF-EEI-COI-WP-01.0 的定义，NPO 系统光纤路由引导应遵循以下规范：

(a) 面板突出限制

根据 OIF-ELSFP-02.0 的明确规定：ELSFP 模块的拉环以及从面板中突出的任何其他固定附件（包括热辅助功能件、光纤连接器及带有自有光纤的尾纤）不得突出面板表面超过 127 mm（5 英寸），以确保兼容绝大多数机柜设计。

在系统设计中，应确保 ELSFP 的 PMF 尾纤及 MPO 主干跳线的物理走线均在上述面板突出距离限制以内。

(b) 冗余长度预留与插拔维护

由于 ELSFP 模块支持热插拔（依据 IPEC-Reliability-IA-V1.0-2025 及 OIF-ELSFP-02.0，模块与连接器的额定插拔周期为 50 次/100 次），其机框内部的尾纤应预留 200 ~ 300 mm 的冗余长度，以满足模块拔出、更换维护时不引起光纤过度弯折（导致永久性应力疲劳或断裂）的机械余量要求。

(c) 物理隔离与路由引导

专属理线通道：光纤路由必须与高速数据线（SerDes 差分线、电源线）及高噪声信号保持物理隔离（间距建议 $\geq 5\text{ mm}$ ），建议采用独立的光纤理线托盘或集成风道夹层实现有序引导。

免工具理线：机框内部应采用磁吸式或卡扣式的理线槽，避免使用绑扎带过力压紧光纤（PMF 光纤对侧向挤压力敏感）。

配线架整合：参考 OIF-EEI-COI-WP-01.0 的高密度配线架构，NPO 交换机的主干出线应接入机框顶部的光纤配线架（Fiber Shuffle / Patch Panel），通过结构化布线实现机柜层级的整备。

(d) 清洁与连接器端面保护

防尘帽：NPO 内部所有未插拔光接口（MMI 耦合面、MTP/MT 适配器）必须配备防尘帽。

防尘门：面板侧的 MTP/MPO 适配器应装配被动式防尘门（Spring-loaded door），仅在插入跳线连接器时打开。

污染控制：根据 OIF-ELSFP-02.0，ELSFP 在首次上电到满功率运行前，必须执行“连接器清洁度光学检查”的强制步骤，以避免高功率 CW 激光照射污染端面导致的热损伤。

6.2 热设计规范

NPO 系统将高速光引擎（OE）置于交换 ASIC 附近，同时将高功耗的电 DSP 功能替代为低功耗的线性直驱架构，使得系统热源分布从传统可插拔模块的“面板集中热源”转变为“板内均匀热源”。此转变对热设计提出了新的挑战，也带来了更大的散热设计灵活性。

NPO 系统的热设计应遵循“分层级、多技术协同”的立体化散热体系架构，通过芯片级微观优化、模块级精准控温、系统级全局协同的三层架构，系统性解决高带宽互连带来的散热挑战。

6.2.1 风冷环境下的散热器接触压力与 TIM 材料要求

主要参考 OIF 规范的相关定义，以及 ODCC 448G/lane 需求白皮书的描述。

6.2.1.1 光引擎（OE）风冷散热设计要求

表 6.7 NPO 风冷系统的散热接触压力要求

组件	推荐接触压力范围	备注
OE 芯片至散热器	50 ~ 150 psi	确保 TIM 材料充分填充界面微间隙，同时避免芯片封装机械损伤
ELSPF 至系统散热器	依厂商规格，典型值 $\geq 100\text{ N}$	基于模块的锁紧机构设计，保持稳定的热接触

表 6.8 NPO 风冷系统的 TIM 材料选型与性能要求

TIM 参数	推荐值	条件说明
体积热导率 (Bulk Thermal Conductivity)	$\geq 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	针对芯片-散热器界面
界面热阻 (Interface Resistance)	$\leq 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$	包括接触热阻和材料体热阻
厚度 (BLT, Bond Line Thickness)	推荐 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ (取决于材料类型)	过厚增加热阻, 过薄影响界面填充
材料类型建议	导热凝胶 (Thermal Gel) / 导热垫片 (PAD) / 导热硅脂 (Thermal Grease)	导热凝胶: 可压缩, 适应不平整表面, 寿命优于硅脂 导热垫片: 方便返工, 但热导率较低 导热硅脂: 热阻最低, 但泵出效应应评估
三维氮化硼气凝胶 (前沿材料)	极低热阻	作为芯片-散热器界面材料的未来备选方案

表 6.9 NPO 风冷系统的散热器表面平面度与粗糙度

参数	要求	参考来源	备注
表面平面度	$\leq 0.05 \text{ mm}$	OSFP Rev5.22	对于热流密度 $>50\text{W}/\text{cm}^2$ 的高功率区域, 平面度要求更严格
表面粗糙度 (Ra)	$\leq 1.6 \text{ }\mu\text{m}$	OSFP Rev5.22	表面粗糙度直接影响 TIM 接触热阻的分量
接触压力范围	参照系统散热器受力设计	OIF-ELSFP-02.0	压力过低导致热阻过高; 压力过高可能导致 OE 模块机械损伤

6.2.1.2 ELSFP 模块风冷散热设计要求

主要参考 OIF-ELSFP-02.0 的相关内容。

表 6.10 ELSFP 模块风冷系统的散热器与 TIM 要求

参数	要求
定轨道散热器设计 (Riding Heatsink)	系统供应商提供
弹性导热垫片 (Compression Pad)	可选, 安放在 ELSFP 模块顶部与定轨道散热器之间
TIM 材料	同样适用于导热凝胶/导热垫片/导热硅脂
最大气动阻力	应满足系统级风道设计目标

表 6.11 ELSFP 模块风冷系统的气流方向与风道设计要求

参数	要求	备注
气流方向	沿模块长度方向 (从面板前端流向背板)	与可插拔模块标准一致, 确保与现有系统兼容
最小系统风速	$\geq 2 \text{ m/s}$	建议设计目标风速为 3 m/s 以提供余量
最大风压	取决于系统风机功率, 应保证冷却气流量	应同时满足: 模块散热需求 + 系统总功耗的散热需求

表 6.12 ELSFP 模块风冷系统的模块典型热阻

温度等级	模块壳温范围	典型应用场景
标准 (Standard)	0°C ~ 70°C	标准数据中心（一般机房）
扩展 (Extended)	-5°C ~ 85°C	部分户外/带制冷机柜
工业 (Industrial)	-40°C ~ 85°C	工业/严峻环境

6.2.2 液冷环境下的冷板适配与漏液防护

根据 OIF-EEI-COI-WP-01.0 和 ODCC 448G/lane 需求白皮书的描述，当 NPO 系统的功耗密度进一步增加，风冷可能不足以满足散热需求，需要引入液冷方案。

6.2.2.1 液冷冷板适配设计

表 6.13 NPO 系统的液冷方案应用场景

液冷层级	方案描述	适用场景
模块级液冷	通过 OSFP 2x1 笼子新增右侧液冷接口设计，实现光模块直接液体冷却	高密度光模块区（功耗>30W/端口）
铜缆密集区液冷	针对 448G 铜缆密集区域（如 GPU 集群背板），采用“线背板模块+液冷冷板”集成方案，通过冷板间接控温将局部热点稳定在 70°C 以内	GPU 集群背板/高速铜缆区
系统级风液混合	机柜级采用“冷板液冷+风冷”的混合冷却模式，同时基于 CFD 仿真优化机柜进风口布局	高密度机柜（>20kW/柜）

表 6.14 NPO 液冷系统的冷板设计要求

参数	推荐值	条件说明
冷板热阻 (Thermal Resistance)	$\leq 0.05\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ （对于热源面积 1cm^2 ）	针对高功率 OE 芯片（功耗>25W）
冷却液进液温度	推荐 $25^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$	取决于冷却液分配单元设置，避免冷凝
冷却液流量	1~2 L/min/kW	应根据冷板结构和热流密度微调
接口类型	快速接头 (Blind-mate / Dripless)	支持热插拔，避免冷却液泄漏

表 6.15 冷板与 NPO 模块的集成方式

集成方式	描述	优势	挑战
直接冷板	冷板直接贴合在 NPO 光引擎模块（OE）的顶面，通过 TIM 传导热量	热阻低，散热效率高	应保证良好的接触压力均匀性；增加机械接口复杂度
间接冷板	冷板贴合在机框的结构件或散热器基座上，通过热量传递至冷板	不直接接触 OE，机械设计更灵活；冷板可靠性更高	热阻路径增加，散热效率略低于直接冷板

6.2.2.2 漏液防护设计

表 6.16 NPO 液冷系统的漏液检测机制

检测方法	实施方式	灵敏度	响应时间	建议部署位置
漏液检测线 (Leak Detection Cable)	在冷板、管路接口下方铺设感应线缆，遇液体后电阻/电容变化	高（可检测微量泄漏）	秒级	冷板底座、快速接头下方、机柜底部
液体传感器 (Liquid Sensor)	采用光电或导电感应探头，布置在冷板/模块接口附近	中高	秒级	冷板接口、管路接头、模块面板
视觉检测	在液冷系统关键接口附近设置观察窗或摄像头	低	分钟级	系统维护窗口、交接界面

表 6.17 NPO 液冷系统的主动防护设计

防护等级	措施	适用场景
一级防护（设计级）	冷板连接采用无滴漏快速接头 (Dry-break Connectors)；管路布局避开敏感电子元件	所有液冷系统
二级防护（结构级）	在冷板下方安装导流挡板或引流槽，将泄漏液体定向排出（不与 PCB 直接接触）	高价值机柜（交换机/GPU 服务器）
三级防护（监控级）	当泄漏监测系统检测到异常时，自动关闭对应冷板区域的电磁阀，停止冷却液供应，并发出系统告警（SNMP/IPMI）	数据中心级、高可靠性系统

表 6.18 NPO 液冷系统的冷却液选型要求

参数	推荐值/要求	条件说明
介电强度	0.1~1 kV/mm	间接冷板系统
腐蚀性	对铜、铝及常用 PCB 材料无腐蚀	避免长期使用导致冷板腐蚀
粘度	低粘度（水基 > 乙二醇基 > 丙二醇基）	高粘度增加泵功耗，降低散热效率
生物兼容性	抑制细菌和藻类滋生	延长冷却液更换周期

6.2.3 热阻模型与结温监控点定义

6.2.3.1 三层热阻模型设计

NPO 系统的散热体系应建立“分层级、多技术协同”的立体化散热架构，热阻模型分为三个层级。

1. 芯片级热阻（R_chip）

表 6.19 NPO 系统的芯片级热阻

参数	符号	参考值	单位	备注
芯片结-壳热阻	R _{jc}	≤ 0.5	°C/W	针对 OE 芯片（DSP、调制器驱动等）
芯片结-板热阻	R _{jb}	≤ 0.3	°C/W	通过基底/中介层传导至 PCB
微凸点+硅通孔垂直互连三维堆叠技术目标	—	封装热阻降至 0.5°C/W 下	°C/W	未来 3D 封装方向

2. 模块级热阻（R_module）

表 6.20 NPO 系统的模块级热阻

参数	符号	参考值	单位	备注
散热器热阻	R_heatsink	$\leq 0.2 \sim 0.5$	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	应与 TIM 热阻串联计算
导热界面材料 (TIM) 热阻	R_TIM	≤ 0.1	$^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$	高导率导热凝胶或垫片
风道空气对流热阻	R_conv	取决于风速	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	风速 2~3 m/s 时, 电阻可忽略

3. 系统级热阻 (R_system)

表 6.21 NPO 系统的系统级热阻

参数	符号	参考值	单位	备注
机柜级气流热阻	R_case_airflow	< 0.05	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	高效风道+导流罩设计, 确保气流均匀覆盖热源
风液混合冷却 / 冷板液冷+风冷等效热阻	R_hybrid	< 0.02	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	液冷作为补充散热路径, 等效热阻更低

6.2.3.2 结温监控点定义

1. 核心温度监控点

表 6.22 NPO 系统的核心温度监控点

监控点编号	名称	定义位置	监控用途	参考规格值
T _{j_core}	OE 核心结温	光芯片 /DSP 芯片的结温 (Junction) 温度	判断芯片是否工作在可靠寿命范围内	最大结温 $\leq 105^{\circ}\text{C}$ (驱动器); TIA 结温 $\leq 90^{\circ}\text{C}$
T _{case}	模块壳温	ELSFP/OSFP 模块外壳指定测量点 (通常最靠近激光器)	系统监控的通用指标; 用于触发降频/关机	标准等级: $0\sim 70^{\circ}\text{C}$; 警告阈值: 75°C ; 关机阈值: 80°C
T _{laser}	激光器结温	激光器芯片 (Laser Diode) 有源区 (Active Region)	确保激光器性能稳定, 寿命不退化	参考供应商规格 (通常 $< 85^{\circ}\text{C}$)
T _{hotspot}	局部热点温度	高功耗组件 (如调制器驱动 TIA、DSP) 的金属/PCB 表面	判断是否存在局部过热风险	温度 $> 90^{\circ}\text{C}$ 时, 相邻组件温升 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$, 寿命显著退化

2. 温度监控的实现方式

表 6.23 NPO 系统的温度监控实现方式

监控点	实现方式	精度要求	采样频率	通过管理接口上报
壳温 (T _{case})	在 ELSFP/模块外壳指定点安装热电偶或片上温度传感器	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	1 Hz	通过 CMIS 寄存器 (支持告警/警告阈值上报)
结温 (T _j)	裸片内建温度传感器 (bandgap); 通常放置在芯片最热区域附近	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	0.1 ~ 1 Hz	通过 CMIS VDM (多功能诊断监测) 页上报
热点温度 (T _{hotspot})	外接热电偶或通过热仿真模型推断	作为结构设计验证	初始设计阶段	告警或警告标志, 用于系统级别的热管理
高温监视器 (HTM)	单一单调递增/递减值, 是所有传感器点的合并领先指标	—	视模块设计而定	通过 CMIS 监视器实现

7 智能化管理接口与运维规范

NPO 系统的智能化管理接口与运维规范旨在构建一套标准化的监控、配置与诊断体系，确保 NPO 光模块在设计、生产和部署中具备与现有生态系统互通的能力。相关内容主要沿用并兼容当前行业主流的模块管理接口与运维标准。核心参考标准包括：由光互联网论坛（OIF）发布的 OIF-CMIS-05.4（通用管理接口规范，CMIS Rev 5.4）；以及由中国通信标准化协会（CCSA）发布的 YD/T 4377.3-2024（光收发合一模块软件管理接口）。通过这些标准，NPO 管理接口能够复用现有广泛的模块管理生态，实现从传统可插拔模块到 NPO 形态的平滑过渡与协同运维。

7.1 管理通信接口定义

NPO 系统的管理通信接口遵循 OIF-CMIS-05.4 定义的 CMIS（Common Management Interface Specification）架构。CMIS 采用分层协议栈模型，从底层的物理信号层到顶层的管理应用层，为系统提供标准化的寄存器访问与消息交换能力。

在 NPO 系统中，管理通信接口主要服务于两类实体：ELSFP（外部光源模块），通常采用 I2C-based MCI（I2CMCI）实现管理通信。OE（光引擎），可通过 SPI-based MCI（SPIMCI）或 I2CMCI 实现管理通信。

7.1.1 I2C/SPI 总线速率与地址分配

1. 总线速率

表 7.1 NPO 系统管理总线的速率分配

管理接口类型	总线类型	时钟速率	参考标准	适用模块
I2CMCI	I ² C 两线接口（SCL/SDA）	标准模式：100 kHz	OIF-CMIS-05.4; OIF-ELSFP-02.0	ELSFP、OE（常规管理读写）
I2CMCI	I ² C 两线接口（SCL/SDA）	快速模式：400 kHz	OIF-CMIS-05.4;	ELSFP、OE（批量数据传输，如 CDB）
I2CMCI	I ² C 两线接口（SCL/SDA）	高速模式：1 MHz	可选，基于 CMIS Rev.5.4 扩展	高带宽管理
SPIMCI	SPI 四线接口（CS/SCLK/MOSI/MISO）	Up to 20 MHz	OIF-CMIS-05.4	OE 光引擎（需高速配置与监控）

2. 地址分配

I2C 设备地址：

地址值：CMIS 规范定义 I²C 设备的默认读/写地址为 A0h（写地址）和 A1h（读地址）。主机通过发送设备地址来选定模块进行通信。

多通道选择：NPO 系统中可能存在多个子芯片模块，每个子芯片模块通过硬件引脚（如 Module Address pin）来区分，或通过管理接口的独立 I²C 通道访问。具体地址分配由系统硬件设计决定，主机软件应支持动态枚举。

内存映射寻址：

Lower Memory（低位内存）：字节地址 00h~7Fh（128 字节），可直接访问，包含核心控制和状态字段（如模块状态、中断标志、电源控制等）。

Upper Memory（高位内存）：字节地址 80h~FFh（128 字节），通过 页面选择寄存器（如 Byte 7Fh）动态映射到更大的内存空间（Page 00h~FFh），涵盖管理内存中的详细配置、监控、告警等字段。

SPI 设备寻址：

SPI 协议中，每个从机设备通过独立的片选信号（CS_N）进行选择。NPO 系统中的 OE 通常作为 SPI 从机，通过系统分配的 CS_N 线访问。内存映射结构与 I2C 相同，遵循 CMIS 的标准页面地址规范。

7.1.2 中断上报与事件通知机制

1. 硬件中断信号（MSL 管理信号）

NPO 系统通过管理信号层（MSL）提供一组直接分配的硬件信号，用于快速上报状态变化，如下表所示。

表 7.2 NPO 系统管理信号层（MSL）

信号名称	方向	功能描述	标准参考
IntL	模块→主机	中断请求信号（低电平有效）。模块检测到特定事件（如温度超限、光功率降低、链路故障）时，将 IntL 拉低，通知主机读取寄存器。主机通过轮询或外部中断控制器响应。	OIF-CMIS-05.4
ResetL	主机→模块	复位信号（低电平有效）。主机通过拉低该信号强制模块硬件复位。	OIF-CMIS-05.4
LPMode	主机→模块	低功耗模式控制信号。主机通过该信号控制模块进入或退出低功耗模式。	OIF-CMIS-05.4

中断工作流程：

事件发生：模块内部检测到异常（如发射光功率低于锁定阈值、温度超过告警线）。模块在对应的事件标志寄存器中设置位，同时通过 MSL 将 IntL 信号驱动为低电平。

主机响应：主机通过外部中断引脚或轮询检测到 IntL 下降沿后，通过 I²C/SPI 读取 Lower Memory（字节地址 02h~06h）的 Flag 汇总寄存器，判断中断源类型。

软件响应：主机根据 Flag 信息，读取相应的高阶详情寄存器（如告警类型、通道号），并清除中断标志。只有当所有中断标志被清零后，模块才会释放 IntL 信号（恢复为高电平）。

2. 软件中断与事件通知机制

CMIS 定义了基于寄存器的轮询和事件通知机制，支持 Flags（标志位）、Masks（掩码）和 CDB 命令。

标志位（Flags）：提供模块、通道和告警级别的实时事件锁定状态。主机通过读取 Flag 汇总寄存器（如 Byte 02h~06h）来识别全局事件，再通过读取详细的通道/告警页面区分具体事件。

掩码（Masks）：通过 Mask 寄存器控制哪些事件可以触发硬件中断（即 IntL 信号）。主机可动态 Mask/Unmask 特定的告警，避免不必要的软件中断处理。

CDB（Command Data Block）消息通知：CMIS 的 CDB 层支持命令-响应消息交换。主机可通过 CDB 命令 CMD 0201h（Get Data Path PM Statistics）或 CMD 0290h（Temperature Histogram）等主动轮询系统健康状态，实现更灵活的运维监控。

VDM 告警（Versatile Diagnostic Monitoring）：CMIS 的 Pages 20h-2Fh 支持 VDM 告警。模块可锁定 VDM 告警/警告标志，并在 Page 2Ch 的 VDM Alarm/Warning Flags 中呈现异常事件。

3. NPO 系统特定事件通知场景

ELSFP 激光器光源劣化：ELSFP 模块通过 CMIS 寄存器（如 Page 00h 的“Laser Low Power”或厂

商自定义寄存器)上报光源输出功率衰减。当功率低于预设阈值时,IntL 被触发,主机软件根据 FMEA 标准做出响应。

OE 硅光调制器状态变化: OE 通过 SPI 管理接口动态上报其工作状态(如 MZI 偏压锁定状态、微环谐振点漂移)。主机通过 CDB 命令轮询或等待硬件中断来及时发现并处理。

盲配连接器连接状态: 若 ELSFP 或 OE 支持盲配连接器的在位检测功能(例如通过系统管理总线读取连接器插损变化或光回路检测结果),当检测到连接器松动或污染时,模块会触发告警,通知主机进行清洁/重连操作。

7.2 NPO 数字诊断与监控数据模型

7.2.1 必须监控的模拟量

NPO 系统(含 ELSFP 和 OE)必须监控的核心模拟量如下表所示。

表 7.3 NPO 系统监控的核心模拟量

监控参数类别	具体参数	适用组件	读取位置 (CMIS 地址)	调节精度/要求
温度	模块内部温度 (TEMP)	模块级 (用于 ELSFP 或 OE 封装)	Lower Memory Byte 14h-15h (00h-7Fh)	$\pm 3^{\circ}\text{C}$
温度	激光器发射光接口温度 (可选, 用于 NPO 热源监控)	ELSFP 激光器/OE 调制器	Page 0Eh (厂商自定义或高级监控)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
电压	模块供电电压 (Vcc)	模块级	Lower Memory Byte 16h-17h	11 bit ADC / $\pm 10\%$
电压	发射偏置电压 (VccTx)、接收电压 (VccRx)	通道级	Lower Memory Byte 18h-19h (VccTx); Pages 20h-2Fh (VDM)	11 bit ADC / $\pm 5\%$
偏置电流	激光器偏置电流 (Tx Bias Current)	ELSFP 光源	Lower Memory Byte 12h-13h (Ch1 ~ Ch8); Page 0Fh 扩展	16 μA 精度
偏置电流	MZI 偏置电流 / 电压 (OEMZI Bias)	OE 调制器	Page 2Eh (VDM 自定义)	固件可配置
发射光功率	平均发射光功率 (Tx Power)	ELSFP、OE 向外发射	Lower Memory Byte 10h-11h (Ch1 ~ Ch8); Page 0Fh 扩展	$\pm 3\text{ dB}$ (绝对值) / $\pm 1\text{ dB}$ (相对变化)
接收光功率	接收光功率 (Rx Power) (对于 ELSFP 可能为内部监控 PD)	OE 接收端或 ELSFP 内置监控 PD	Lower Memory Byte 1Ch-1Dh (Ch1 ~ Ch8); Page 0Fh 扩展	$\pm 3\text{ dB}$
光功率衰减	盲配连接器前后光功率对比 (用于诊断连接器是否洁净)	ELSFP $\leftrightarrow$ OE 链路	Page 0Eh (厂商自定义 LUT)	0.1 dB 分辨率
误码率指标	Pre-FEC BER, Post-FEC Error Count	OE 接收机	Page 01h Byte 160h-16Fh (BER); CDB CMD 0216h/0217h (PM Stats)	统计精确度 $1\text{e-}6 \sim 1\text{e-}3$
温度/电压历史	温度/电压 Histogram (可选)	模块级	CDB CMD 0290h;	支持告警和诊断

根据 OIF-CMIS-05.4 建议,监控采样周期方差应尽可能低(以提升测量精度),建议标准监控通道

（温度、电压、偏置电流、光功率）的刷新率不慢于每 1 秒一次，高精度用户监控（如 VDM 的实时值）可降低至每 100ms 一次。

7.2.2 基于 CMIS 扩展的 NPO 寄存器映射表

CMIS 管理内存通过 Lower Memory（00h-7Fh）和 Upper Memory（通过页面寄存器动态切换，Page 00h~FFh）构成。NPO 系统在遵循 CMIS Rev.5.4 基本字段定义的基础上，通过预留页面（如 Page 0Eh, 0Fh, 40h-5Fh）进行厂商特定/NPO 通用扩展，用于支持 ELSFP 和 OE 的独特功能与监控。CMIS Rev.5.4 标准字段及 NPO 系统扩展字段的寄存器映射概况如下表所示。

表 7.4 基于 CMIS 扩展的 NPO 寄存器映射表

地址/页面	描述/用途	NPO 扩展用途/备注
LowMem	控制/状态核心 (Lower Memory)	NPO 必须字段（模块状态、中断、电源控制）
00h	管理信息 (Administrative Information)	模块标识、固件版本，NPO 必须
01h	声明 (Advertising)	支持的功能、页面广告，NPO 必须
02h	监测阈值信息 (Supervision Thresholds)	告警/警告阈值，NPO 必须
03h	用户 EEPROM	可存储 NPO 配置参数
04h	激光器能力广告 (Laser Capabilities)	NPO 光源能力声明
05h	CMIS-FF 寄存器	可用于 NPO 特定 Form-Factor 功能
06h-07h	资源模块寄存器 (Resource Module)	NPO 资源模块（如外部光源）扩展
08h-0Bh	CMIS-LT 寄存器（链路训练）	NPO 链路训练与状态报告
0Ch	模块管理 (Module Management)	模块级控制，NPO 必须
0Dh	固件管理 (Firmware Management)	固件升级，NPO 必须
0Eh-0Fh	预留 (Reserved)	NPO 扩展预留：可用于 ELSFP/OE 特定配置
10h	Lane & Data Path 配置	NPO 数据路径核心配置
11h	Lane & Data Path 状态	NPO 数据路径状态读取
12h	可调激光器控制与状态	NPO 可调波长光源
13h	模块性能诊断控制	NPO 诊断控制
14h	模块性能诊断结果	NPO 诊断结果
15h	时序特性 (Timing Characteristics)	NPO 时序参数
16h	网络路径控制与状态 (Network Path)	NPO 网络路径管理 (NP)
17h	标志与掩码扩展 (Flags & Masks)	NPO 扩展中断掩码
18h	Lane & Data Path 配置扩展	NPO 扩展配置
19h	Lane & Data Path 状态扩展	NPO 扩展状态
1Ah-1Bh	资源模块寄存器 (Resource Module)	NPO 资源模块扩展
1Ch	归一化应用描述符 (NAD)	NPO 应用描述（速率、接口）
1Dh	主机 Lane 切换	NPO 主机侧 Lane 重映射
1Eh-1Fh	自定义页 (Custom Pages)	NPO 厂商扩展：OE 状态、自定义监控
20h-23h	VDM 实例描述符 [1..4][64]	NPO 扩展诊断：定义额外监控参数 ID
24h-27h	VDM 实例值 [1..4][64]	NPO 扩展诊断：实时值（温度/电压/BER 等）

地址/页面	描述/用途	NPO 扩展用途/备注
28h-2Bh	VDM 告警阈值四元组 [1..4][16]	NPO 扩展阈值：告警/警告门限
2Ch	VDM 标志四元组 (256 flags)	NPO 扩展告警状态
2Dh	VDM 掩码四元组 (256 masks)	NPO 扩展告警掩码
2Eh	VDM 预留	VDM 扩展预留
2Fh	VDM 广告与动态控制	NPO VDM 配置：启用/禁用实例
30h-3Fh	C-CMIS 寄存器 [7]	高级配置，NPO 可选
40h-4Fh	C-CMIS 寄存器 [7]	同上
50h-5Fh	CMIS-LT 寄存器 [9]	NPO 链路训练参数
60h	Lane & Datapath 广告扩展	NPO 扩展能力广告
61h	Lane & Datapath 监控	NPO 扩展通道监控
62h	Lane 监测阈值	NPO 通道级阈值
63h-6Ch	预留 (10 pages)	NPO 扩展预留
6Dh	Media Lane 切换	NPO 媒体侧 Lane 重映射
6Eh-6Fh	预留 (2 pages)	NPO 扩展预留
70h-7Fh	预留 (16 pages)	NPO 扩展预留
80h-8Fh	预留 (16 pages)	NPO 扩展预留
90h-9Eh	预留 (15 pages)	NPO 扩展预留
9Fh	CDB 命令/响应 (局部载荷)	NPO 高级命令交互
A0h	CDB 扩展载荷 EPL[1] (128B)	NPO 批量数据读写
A1h	CDB 扩展载荷 EPL[2] (128B)	同上
A3h-AEh	CDB 扩展载荷 EPL[3..15] (13×128B)	同上
AFh	CDB 扩展载荷 EPL[16] (128B)	同上 (标准为 16 页 A0h-AFh)
B0h-FFh	自定义页 (80 pages)	NPO 厂商特定：OE 调谐、算法参数

此外，NPO 模块可利用 CMIS-VCS 定义的通用控制集，向主机报告其专有的控制参数，由主机侧的 SerDes 配合完成信号补偿与配置。

根据 OIF-CMIS-VCS-01.0 规范，通用控制集（VCS）的内存映射机制打破了传统 CMIS 基础规范中“控制参数与寄存器地址固定绑定”的限制，采用动态描述与顺序映射的方式实现灵活的控制。VCS 参数控制到寄存器的映射不再固定，而是由模块通过 CDB 命令组（IDs 4000h 到 40FFh）宣告其描述符。主机下载 VCS 后，通过计算已宣告的先前字段的累积长度，得出每个字段在内存映射中的偏移量。字段的顺序与 VCS 宣告的参数顺序一致。如果 Page 10h/11h 中的寄存器空间不足以容纳所有 VCS 参数，可使用溢出页（Page 18h 字节 144-255，Page 19h 字节 152-207）。在 VCS 参数描述符中，其包含的关键属性如表 7.5 所示，主机将依赖这些属性完成内存映射的计算。NPO 模块可采用的通用控制集（VCS）参数及其功能描述如表 7.6 所示。

表 7.5 通用控制集（VCS）参数描述符关键属性表

属性名称	类型	定义与映射作用
VCS Parameter ID	U8	参数的唯一数字标识符。
VCS Parameter Length	U8	该描述符的字节总长度（包含 ID、Length 本身及所有属性），用于主机顺序解析 CDB 回复。
ApplicationMask	Ux	应用掩码，指示该参数在哪些 AppSel 下生效。注意：内存布局不依赖于 AppSel，仅依赖 VCS Descriptor。
MemoryLength	U8	内存映射核心字段。指示该参数在 Control Set 内存空间中占用的字节长度，主机据此计算下一个参数的偏移地址。

表 7.6 NPO 模块可采用的通用控制集（VCS）参数列表

VCS 参数名称	寄存器格式	功能描述	适用性
预留空间指示符 (ReservedSpaceIndicator)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-2	当 NPO 模块不支持基础 CMIS 定义的参数时，在控制集内存空间中预留相应长度，以保证兼容性。	必须支持（兼容性占位）
每参数显式控制 (ExplicitControlPerParam)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-5	允许主机通过位掩码显式接管特定 VCS 参数的控制权。第 N 位对应 VCS Descriptor 的第 N 个参数。	可选（精细化管理控制权）
Tx 自适应输入均衡使能 (AdaptiveInputEqEnableTx)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-8	启用/禁用模块 Tx 端（接收主机电信号）的模拟自适应输入均衡器。	关键参数（NPO Tx 侧调测）
Tx 自适应输入均衡重调 (AdaptiveInputEqRecallTx)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-10	命令模块重调（恢复）此前存储的 Tx 输入均衡器自适应设置。	可选（配合自适应功能）
Tx 主机控制输入均衡目标 (HostControlledInputEqTargetTx)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-13	主机通过 4 位控制字段直接下发特定的 Tx 输入均衡目标代码值。若启用了自适应均衡则此项被忽略。	关键参数（主机手动补偿通道损耗）
Tx CDR 使能 (CDREnableTx)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-15	控制 Tx 方向时钟数据恢复（CDR）的使能或旁路。	NPO 通常不支持（应使用预留符占位）
Rx CDR 使能 (CDREnableRx)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-17	控制 Rx 方向时钟数据恢复（CDR）的使能或旁路。	NPO 通常不支持（应使用预留符占位）
Rx 输出均衡预/后加重目标 (OutputEqPrePostCursorTargetRx)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-20	设置 Rx 输出均衡器的预/后加重系数。用于模块向主机发送电信号时的发送侧加重调测。	关键参数（NPO Rx 侧调测）

VCS 参数名称	寄存器格式	功能描述	适用性
Rx 输出幅度目标 (<i>OutputAmplitudeTargetRx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-23	控制模块 Rx 侧输出电信号的幅度目标值。	关键参数 (NPO Rx 侧调测)
Tx 主机控制数值化输入均衡 (<i>HostControlledInputEqTargetNumericTx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-25	采用 8 位 (S8) 数值化格式设置 Tx 输入均衡目标。提供了更灵活的数值范围 (带最小/最大值宣告)，允许主机指定非自适应 Tx 输入均衡目标。	关键参数 (精细化的主机手动补偿)
Rx 输出数值化均衡目标 (<i>OutputEqTargetNumericRx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-27	采用数值化格式设置 Rx 输出均衡目标，提供比基础 CMIS 参数更灵活控制范围	可选 (精细化的 Rx 侧调测)
Rx 输出预编码使能 (<i>OutputPrecodingEnableRx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-29	启用/禁用 Rx 输出方向的预编码功能。	可选
Tx 输入预编码使能 (<i>InputPrecodingEnableTx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-31	启用/禁用 Tx 输入方向的预编码解码器功能。	可选
Rx 输出均衡器预/后加重系数 (<i>OutputEqPrePostCursorCoeffRx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-34	针对 Rx 输出均衡器预/后加重进一步控制。	可选
Rx 输出精细幅度设置 (<i>OutputAmplitudeSettingRx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-37	对 Rx 输出幅度进行更精细化的设置。	可选
Rx 主机通道损耗 (<i>HostChannelLossRx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-39	主机向模块宣告其 Rx 侧 (模块输出到主机接收端) 的物理通道损耗值。	NPO 核心参数 (协同主机补偿)
Tx 主机通道损耗 (<i>HostChannelLossTx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-41	主机向模块宣告其 Tx 侧 (主机发送端到模块输入口) 的物理通道损耗值。	NPO 核心参数 (协同主机补偿)
Tx 非线性补偿 (<i>NonLinearCompensationTx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-43	(只读) 模块 Tx 侧的非线性补偿状态宣告。	可选 (只读状态监测)
Tx 输入预均衡器预/后加重 (<i>InputEqPrePostCursorCoeffTx</i>)	OIF-CMIS-VCS-01.0 Table 5-46	(只读) 模块推荐的 Tx 输入预均衡 FIR 系数	可选 (只读状态监测)

8 光学性能指标与测试方法

NPO 光引擎 (OE) 的光学性能指标定义及其对应的测试验证方法旨在建立一套与 IEEE 高速以太网标准体系严格对齐的光接口规范，确保 NPO 系统在不同厂商模块与设备间实现可互操作。因此与光学性能指标测试相关的内容以 IEEE 相关标准为核心参考依据，主要包括：由 IEEE 发布的 IEEE Std 802.3-2022、IEEE Std 802.3df 及目前正在修订的 IEEE Std 802.3dj，定义了 PAM4 信号体制下的核心发射端参数和接收端参数。通过参考这些主流标准，可为 NPO 光学性能的精确表征与一致性验证提供完整的可执行规范，覆盖从发射眼图质量到接收灵敏度的全链路测试流程。

8.1 发射端参数规范

NPO 系统的发射端光学参数规范是确保光信号在芯片间、芯片到模块间以及模块到光纤链路中高质量传输的核心依据。由于 NPO 光引擎（OE）通常采用外部光源（ELSFP）+ 硅光调制器（SiPh MZM/MRM）或 VCSEL 直接调制两种技术路线,其发射端参数定义需兼容不同方案,同时与 IEEE 802.3 和 OIF 标准保持严格一致。

本节所有参数规范和测试方法以 IEEE Std 802.3df 和 IEEE Std 802.3-2022 为核心参考，并辅以 IPEC-400G-eSR4 & 800G eSR8-IA V1.0 和 CCSA YD/T 6086.1-2024 中的多模/单模光模块发射端规范，确保 NPO 系统在多模/单模应用场景下的互操作性与性能一致性。

表 8.1 NPO 单模与多模发射端参数规范

参数	NPO 单模	NPO 多模	单位
中心波长范围	1304.5 ~ 1317.5	844 ~ 863	nm
平均发射光功率（最大）	+4	+4	dBm
平均发射光功率（最小）	-2.9	-4.6	dBm
OMA _{outer} （最大）	4.2	3.5	dBm
OMA _{outer} （最小）	-0.8 (TDECQ<1.4) -2.2+TDECQ (1.4≤TDECQ≤3.4)	-2.6 (TDECQ≤1.8) -4.4+TDECQ (1.8<TDECQ≤4.4)	dBm
发射光功率偏差（最大）	5	2.3	dBm
过冲/欠冲（最大）	22	29	%
消光比（最小）	3.5	2.5	dB
TDECQ（最大）	3.4	4.4	dB
TECQ（最大）	3.4	4.4	dB
RIN _x OMA（最大）	-136 (RIN _{21.4} OMA)	-132 (RIN ₁₄ OMA)	dB/Hz
光回波损耗容限（最大）	21.4	14	dB

表 8.2 NPO 模块发射端参数测试模式

测试模式编号/名称	模式描述	主要用途
Square wave	Square wave	测试 RIN（相对强度噪声）和 光回波损耗容限
3	PRBS31Q（31 阶伪随机序列）	测试平均发射光功率、接收灵敏度
4	PRBS13Q（13 阶伪随机序列）	测试 OMA _{outer} （外眼光调制幅度）、消光比（ER）
5	Scrambled idle（加扰空闲序列）	测试平均发射光功率、接收灵敏度
6	SSPRQ（Short Stress Pattern Random Quaternary, 短应力随机四进制序列）	测试 TDECQ、TECQ、过冲/欠冲、发射光功率偏差、消光比（ER）

8.1.1 平均发射光功率与光调制幅度

平均发射光功率（Average Launch Power）：指每个通道在调制状态下，光输出的时间平均功率。对于 NPO 光引擎，该功率在光接口（如 MT 插芯端面）处测量。

外眼光调制幅度（OMA_{outer}）：指 PAM4 信号眼图最外层（即 PAM4 的 3 级与 0 级）之间的光功率幅度差，反映信号的有效幅度，与消光比直接相关。

根据 IEEE Std 802.3 的定义，参数取值见表 8.1。

测试方法参考：平均发射光功率遵循 IEC 61280-1-1 标准，在 NPO 系统的光输出接口测量，发射

端通过测试跳线连接至经过校准的光功率计，在调制状态下输出有效的测试模式（模式 3 PRBS31Q、模式 5 长伪随机序列、模式 6 SSPRQ 序列）。OMaouter 按 IEEE 802.3-2022 测量，在 NPO 光引擎的输出光接口处进行测量，将信号输出至具备 PAM4 眼图分析功能的高速采样示波器，在调制状态下输出有效的测试模式（模式 4 PRBS13Q、模式 6 SSPRQ 序列）。

8.1.2 消光比（Extinction Ratio, ER）

消光比（ER）定义为 PAM4 信号眼图最外层（光功率最高电平与最低电平）的比值，以 dB 为单位表示。公式： $ER = 10 \times \log_{10}(P_3 / P_0)$ ，其中 P_3 和 P_0 分别对应 OMaouter 定义中最外部眼图的平均光功率水平。ER 的限值如表 8.1 所示。

消光比的测试方法遵循 IEEE 802.3-2022 和 IEC 61280-1-1。具体过程为：使用测试模式 4 (PRBS13Q) 或 6 (SSPRQ) 驱动发射端；在光接口输出测试点使用高速光电探测器 (O/E) 和示波器捕获 PAM4 眼图；根据 PAM4 信号的眼图统计分布（最外层上下眼图的中点）计算 P_3 和 P_0 ；从而计算得到 ER。

8.1.3 发送色散眼闭合度（TDECQ）与发送眼闭合度（TECQ）

TDECQ（Transmitter and Dispersion Eye Closure for PAM4）：衡量 PAM4 光发射机信号经过一个“最差情况”的光通道（包括光纤色散和偏振效应）和参考均衡器补偿后，垂直眼图的闭合程度。TDECQ 是评估发射机信号质量的核心指标，近似等效于信号在光通道传输后的信噪比退化（即功率代价）。

TECQ（Transmitter Eye Closure for PAM4）：衡量不经过光纤色散（即无测试光纤，直接测量测试点）时，经参考均衡器补偿后的发射机眼图闭合度。TECQ 反映了发射机本身（不含光纤通道）的固有信号质量。

TDECQ 和 TECQ 的限值如表 8.1 所示。

TDECQ 和 TECQ 的测量需要使用参考均衡器（Reference Equalizer），其配置因发射机种类而异，如下表所示。

表 8.3 TDECQ 参考均衡器配置示例

方案类型	TDECQ 参考均衡器配置
单模（SMF，如 DR8/FR4）	5 抽头（5-tap FFE），符号间距，不带 DFE。参考均衡器系数自动优化，基于最小均方误差（MMSE）准则。
多模（MMF，如 SR8/VR8）	9 抽头（9-tap FFE），符号间距，不带 DFE。眼图应先经过一个光纤模拟滤波器（Fiber Emulation Filter）以模拟多模光纤的模式色散。

眼图的测试步骤如下：使用测试模式 6（SSPRQ）驱动发射端；连接待测 NPO 光引擎的发射端到测试系统（例如具备 PAM4 眼图分析功能的高速采样示波器）；以恢复时钟为基准，形成 PAM4 信号眼图；使用参考均衡器对眼图进行均衡补偿，计算 TDECQ 值（对于 TECQ，直接使用回送线代替测试光纤，不经过色散通道）。

8.1.4 相对强度噪声 RIN

相对强度噪声（RIN，Relative Intensity Noise）是归一化到 OMA（即 $RIN_x OMA$ ，单位为 dB/Hz）后，衡量光发射机在测量带宽内功率波动相对于信号调制幅度噪声程度的指标。RIN 值越低（负值越大），表示激光器噪声越小，信号质量越好。

RIN 的限值范围如表 8.1 所示。其中 $RIN_{21.4 OMA}$ 表示测量带宽为 21.4 GHz， $RIN_{14 OMA}$ 表示测量带宽为 14 GHz。

RIN 的测试步骤为：将待测 NPO 发射调至 Square Wave 方波模式；使用光电探测器接收光信号，

转换至频谱仪,测量电噪声功率谱密度(PSD);计算总 RIN 值($RIN = 10 \times \log_{10}(\text{积分噪声功率} / \text{OMA}^2)$),其中积分噪声功率为在指定带宽内积分的噪声功率);归一化到 OMA,得到 $RIN_x \text{OMA}$ (dB/Hz)。

8.2 接收端参数规范

NPO 系统的接收端光学参数规范是确保光信号经光纤链路传输后,能被光引擎(OE)接收并正确恢复数据的关键依据。由于 NPO 系统通常采用外部光源(ELSFP)+硅光探测器或 VCSEL 方案中的集成探测器,其接收端参数定义需兼容不同技术路线,并与 IEEE 802.3、IPEC 及 OIF 标准保持严格对齐。

本节所有参数规范和测试方法以 IEEE Std 802.3df 和 IEEE Std 802.3-2022 为核心参考,并辅以 IPEC-400G-eSR4 & 800G eSR8-IA V1.0、CCSA YD/T 6086.1-2024 以及 OIF-800LR-01.0 中的接收端规范,确保 NPO 系统在多模/单模应用场景下的互操作性与性能一致性。

表 8.4 NPO 单模与多模接收端参数规范

参数	NPO 单模	NPO 多模	单位
波长范围	1304.5 ~ 1317.5	842 ~ 948	nm
光功率损伤阈值(最小)	5	5	dBm
平均接收光功率(最大)	4	4	dBm
平均接收光功率(最小)	-5.9	-6.4	dBm
接收 OMA _{outer} (最大)	4.2	3.5	dBm
接收光反射(最大)	-26	-15	dB
接收灵敏度(OMA _{outer})	-3.9 (TECQ<1.4dB) -5.3+TECQ (1.4dB≤TECQ≤3.4dB)	-4.6 (TECQ≤1.8dB) -6.4+TECQ (1.8dB<TECQ≤4.4dB)	dBm
加压接收灵敏度(OMA _{outer})	-1.9	-2.0	dBm

8.2.1 接收灵敏度(OMA_{outer})

接收灵敏度是接收端最重要的性能指标之一,指在特定误码率(BER)下能够正确接收信号所需的最小 OMA_{outer}。根据 IEEE Std 802.3df 和 IPEC 的定义,灵敏度限值随 TECQ(发送眼闭合度)动态变化,如表 8.4 所示。

测试步骤为:采用合规发射机作为信号源,校准发射机信号质量,确保其 TECQ 值已知;发送信号采用的测试模式为模式 3 (PRBS31Q)或模式 5 (Scrambled idle)或模式 6 (SSPRQ);逐步增大可变光衰减器的衰减(降低接收光功率),直至误码率接近目标 BER($2.4\text{E-}4$);记录此时接收端的 OMA_{outer}(通过光功率计和眼图测量计算出);根据 TECQ 值核对接收灵敏度是否满足限值要求;在目标 BER 条件下,测量得到的接收灵敏度(OMA_{outer})应不超过规定的最大值(随 TECQ 动态变化)。

8.2.2 加压接收灵敏度(Stressed Receiver Sensitivity)

加压接收灵敏度测试用于模拟在最差链路条件下的接收性能,包括色散、偏振模式色散、串扰和噪声的综合影响。加压接收灵敏度测试的目的是确保接收端在存在明显信号失真(由 SECQ 压力眼闭合度模拟)的情况下,仍能维持目标 BER。测试时,压力眼图的 SECQ 应精确校准至规定值。

加压接收灵敏度测试条件:单模测试时,SECQ(压力眼闭合度)为 3.4dB,每个干扰通道的 OMA_{outer}为 4.2dBm。多模测试时,SECQ(压力眼闭合度)为 4.4dB,每个干扰通道的 OMA_{outer}为 3.5dBm。测试误码率为 $2.4\text{E-}4$,测试模式为模式 6 (SSPRQ)。

测试方法为:使用加压发射机(Stressed Transmitter),其输出眼图的 SECQ 已校准至规定值(如

3.4 dB 或 4.4 dB)；测试信号采用测试模式 6 (SSPRQ)；将加压信号通过可变光衰减器调至加压接收灵敏度限值（如-1.9 dBm 或-2.0dBm）；监测目标误码率，确认 $BER \leq 2.4E-4$ ；若误码率达标，则接收端通过加压灵敏度测试。

8.2.3 过载特性

光功率损伤阈值 (Damage Threshold) 的定义参考 IEEE Std 802.3df 以及 IPEC 的相关描述，NPO 模块接收端应能承受+5dBm 的连续光照射 1 分钟而不发生物理损坏，即接收端不需要在此光功率下正常工作，仅需保证不损坏。因此 NPO 模块的光功率损伤阈值为 5dBm。

光功率损伤阈值测试：将待测接收端暴露在+5dBm 的连续光照射下，持续 1 分钟；移除光信号后，确认接收端功能正常，未发生物理损坏。

8.2.4 接收光反射

接收光反射 (Receiver Reflectance) 是指从接收端光接口反射回去的光功率与入射光功率之比的最大允许值。参考 IEEE Std 802.3d 以及 IPEC 的定义，NPO 单模的接收光反射 (最大) 为-26dB，表示反射光功率最大仅为入射光功率的 0.25%；NPO 多模的接收光反射 (最大) 为-15dB，表示反射光功率最大为入射光功率的 3.2%。

NPO 单模系统采用外部光源 (ELSFP)+硅光调制器方案时，光源与接收端之间的光波导路径短、耦合点少，反射点距离激光器更近，反射对激光器 RIN 的增强效应比传统可插拔模块更显著。

接收光反射的测试应使用连续波光源和光反射计 (或光功率计配合分光器) 组成的测试系统，在基准校准后，将待测接收端的光接口连接至测试端口，施加指定波长和功率的连续光信号 (如 CW 光源)，通过光反射计测量从接收端接口反射回来的光功率，计算接收光反射值，并在工作波长范围的低端、中心、高端及不同温度条件下多次测量，取最差值作为最终结果，判定准则为单模接收端应 $\leq$ -26dB、多模接收端应 $\leq$ -15dB。

8.3 光路无连接器测试和非接触式测试

8.3.1 光路无连接器测试

在 NPO 模块系统中，光路无连接器测试是指对光路上不存在标准可插拔连接器 (如 MPO、LC) 的光引擎或光路板进行的性能验证。NPO 光引擎的光学接口通常采用 FAU (光纤阵列单元) 直接与主板波导或裸光纤阵列永久耦合，并用耦合胶或微透镜固定，因此不具备传统可插拔模块那样的分离式光接口。该测试的核心挑战在于：无法像传统模块那样直接将仪表跳线插入被测件。

主要测试目标包括：

验证光路耦合质量：确认 FAU 与硅光波导或光纤阵列之间的对准耦合损耗是否满足设计要求 (通常目标 $<1.5\sim 2\text{dB/点}$)。

评估光学传输性能：包括插入损耗、回波损耗、通道间均匀性、偏振相关损耗等。

确认多通道一致性：NPO 光引擎通常包含 32 通道甚至更多，应确保各通道的性能差异在可接受范围内。

支持产线快速筛选：在不破坏永久耦合的前提下，实现高效、可重复的批量测试。

具体的测试方法包括：面图像传感器法、探针台+FAU 主动对准法、光环路回+内置监测法。相关测试标准主要参考 IEC 62496-2-4、TIA FOTP-179、YD/T 3156，适用于对板载裸端面光组件的固有光学性能测试。

8.3.2 非接触式测试

在 NPO 模块系统中，非接触式测试是指在测量过程中测量端不与光引擎的光端面发生物理接触的测试方法。包含两层含义：光路对接非接触（Air-Gap 空气间隙对接）；端面检测非接触，探头不接触光纤端面，无物理触碰，无损检测端面划痕、曲率、顶点偏移等几何参数。其核心目的是避免因接触导致的端面污染、微米级对准偏差、机械磨损等问题。NPO 光引擎的光端面（如 FAU 端面或波导耦合面）一旦受损或污染，几乎无法返修，因此非接触式测试在该场景下具有重要作用。

主要测试目标包括：

避免端面损伤与污染：防止探针或光纤直接刮擦微米级光耦合界面。

实现无损原位测量：在光引擎已封装固化后，仍能对其光学性能进行表征。

评估光场分布与耦合效率：通过远场/近场扫描等手段，诊断模场失配或对准偏移。

支持实时监测与预警：利用内置监测元件，在不中断业务的情况下持续跟踪光链路健康度。

具体的测试方法包括：背光监测法、远场/近场扫描法、面图像传感器扫描法等。相关测试标准可参考 ANSI/TIA-604-5、ANSI/TIA-604-18-A（MPO-16）、IEC 61754-7、IEC 61300-3-35。

9 质量与可靠性要求

NPO 系统在量产、部署及长期运维中的质量保障与可靠性验证旨在建立一套覆盖器件级、模块级及系统级的多层次质量评估体系。本部分内容主要沿用并继承当前行业成熟的光模块与光电子器件可靠性标准，确保 NPO 产品在可靠性验证方法论上与传统可插拔模块无缝衔接。核心参考标准包括：由 Telcordia 发布的 GR-468-CORE: 2004，该标准是全球电信级光器件可靠性认证的权威基准；以及由国际光电委员会（IPEC）发布的 IPEC-Reliability-IA V1.0（运营商级光模块可靠性实施协议）。为 NPO 系统在智算集群高可靠、高可用场景下的规模化部署提供坚实的质量依据。

表 9.1 NPO 模块可靠性试验要求

试验项目		引用标准	试验条件	抽样方案		
				LTPD	SS	C
物理特性试验	ESD 等级	ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2023	人体放电模型； 高速信号脚不小于 1000V，非高速信号脚不小于 2000V	-	6	0
	ESD 抗扰度	IEC 61000-4-2	空气放电：±15kV，10 次放电； 接触放电：±8kV，10 次放电	-	3	0
机械完整性试验	机械冲击	Telcordia GR-468- CORE: 2004 3.3.1.1.1	加速度 500g，脉冲持续时间 1.0ms，冲击次数：每方向 5 次，方向 X1、X2、Y1、Y2、Z1、Z2	20	11	0
	变频振动	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.1.1.2	加速度：20g，频率：20Hz~2000Hz，扫频速率：4min/循环，循环次数：4 循环/轴向，方向 X、Y、Z	20	11	0
	热冲击	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.1.2	Condition A（0℃ 和 100℃），循环次数 15 次	20	11	0
	光纤扭转	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.1.3.1	0.5kg/1.0kg，10 次循环，距离装置外壳或应变板 3cm	20	11	0
	光纤侧拉	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.1.3.2	90 度，0.25kg/0.5kg，距离设备外壳 22cm~28cm	20	11	0

	光纤保持	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.1.3.3	直线方向 0.5 kg/1.0 kg, 1 分钟	20	11	0
	光接口插拔重复性	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.1.4.1	插拔次数: 200 次	20	11	0
非工作环境试验	高温贮存	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.2.1	Tstg=85°C, t=2000h	20	11	0
	低温贮存	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.2.1	Tstg=-40°C, t=72h	20	11	0
	温度循环	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.2.2	温度范围-40°C~+85°C, 温度变化速率大于 10°C/min, 极限温度下的停留时间不小于 10 min, 循环次数: 500 次 (UNC)、100 次 (CO)	20	11	0
	恒定湿热	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.2.3	温度 85°C, 相对湿度 85%, 时间 500h	20	11	0
工作环境试验	寿命 (高温)	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.3.1	最高工作温度 (按产品的工作温度来定), 正常工作条件下, 时间 2000h	20	11	0
	湿热循环 (工作)	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.3.2	温度范围+65°C~+25°C~-10°C, 高温时湿度 90%, 低温湿度不控制, 循环 10 次	20	11	0
	恒定湿热 (工作)	Telcordia GR-468-CORE: 2004 3.3.3.3	最高工作温度 (按产品的工作温度来定), 相对湿度 85%, 正常工作条件下, 时间 1000h	20	11	0
LTPD 为批内允许不合格品率, SS 为最小样品数, C 为合格判定数; 试验气候条件相对湿度为 30%~60%; 试验室的电磁环境不应影响试验结果; UNC 为非可控环境, CO 为可控环境; 湿热循环仅适用于非可控环境 (UNC)。						

9.1 可靠性验证试验项

NPO 模块在可靠性验证方面主要参考表 9.1 可靠性试验要求与规范。

9.1.1 高温工作寿命 (HTOL)

NPO 模块的 HTOL 主要验证 NPO 系统 (含 ELSFP 光源和 OE 光引擎) 在最高工作温度下的长期工作可靠性, 评估其磨损失效机制并确定器件的使用寿命。

测试 NPO 模块的高温工作寿命 (HTOL) 时, 最高工作温度按产品的工作温度等级确定 (如 70°C / 85°C), 模块持续正常工作时间应达到 2000 小时 (标准要求)。

9.1.2 温度循环与热冲击 (TC/TS)

温度循环 (Temperature Cycling) 与热冲击 (Thermal Shock) 主要评估 NPO 系统在经历温度急剧变化时的结构完整性和光/电性能稳定性。不同应用场景 (非可控环境 UNC、可控环境 CO) 采用不同的循环次数。

温度循环试验的温度范围为-40°C~+85°C, 温度变化速率大于 10°C/min, 极限温度下的停留时间不小于 10 min, 循环次数: 500 次 (非可控环境 UNC)、100 次 (可控环境 CO)

热冲击试验的温度条件为 Condition A (0°C 和 100°C), 循环次数 15 次, 引用标准为 Telcordia

GR-468-CORE: 2004 3.3.1.2。

9.1.3 带电高加速应力试验（HAST）

带电高加速应力试验（HAST）用于评估 NPO 系统在高温、高湿且带电的加速老化条件下的抗湿气侵蚀能力和电化学迁移（如锡须生长、漏电）的抵抗能力。此测试特别适用于非气密性（Non-Hermetic）封装器件。

NPO 模块的 HAST 测试的温度采用最高工作温度（按产品的工作温度来定，例如 70°C / 85°C），相对湿度为 85%，要求 NPO 模块在正常工作条件（带电状态）下，持续时间 1000h。

9.1.4 振动与冲击试验

振动与冲击试验主要目的是验证 NPO 系统（含 ELSFP 模块、OE 光引擎及盲配连接器）在经受运输和日常使用中的机械冲击和振动时，是否会出现物理损坏或性能退化。

机械冲击（Mechanical Shock）试验的加速度为 500g，脉冲持续时间 1.0ms，冲击次数为每方向 5 次，共 6 个方向 X1、X2、Y1、Y2、Z1、Z2。

振动（Vibration）试验的加速度为 20g，振动频率变化范围 20Hz~2000Hz，扫频速率为 4min/循环，循环次数为 4 循环/轴向，共 3 个方向 X、Y、Z。

9.1.5 光纤拉力与侧拉测试

光纤拉力与侧拉测试用于验证 NPO 系统光接口（含跳线、尾纤）及其与模块/光引擎连接点的抗拉伸、抗侧拉及抗扭转能力。

光纤扭转测试（Twist Test）试验条件为 0.5kg/1.0kg，10 次循环，距离装置外壳或应变板 3cm，每个循环周期是指光纤顺时针旋转一圈，逆时针旋转一圈。

光纤侧拉测试（Side Pull Test）试验条件为 90 度，0.25kg/0.5kg，距离设备外壳 22cm~28cm。

光纤保持测试（Cable Retention Test）试验条件为直线方向，0.5 kg/1.0 kg，1 分钟。测试后，壳体和光纤应无裂纹或断裂，且光功率变化量不应超过 1.0 dB。

9.2 失效判定标准

NPO 模块的各项可靠性试验完成后，在相同测试条件下出现下列任一情况即判定为不合格：

外壳破裂或有裂纹，内部元器件发生脱落；

发射和接收的光学性能指标不满足第 8 章的要求；

在相同测试条件和测试方法下，试验前后，每通道平均发送光功率、消光比、每通道 OMA_{outer} 接收灵敏度等任何一项变化量超过 1.0dB。

ESD 抗扰度试验失效判定为：功能或性能暂时性丧失或降低，但需操作者干预才能恢复；因设备硬件或软件损坏或数据丢失而造成不可恢复的功能丧失或性能下降；出现上述任一情况时，判定为不合格。

9.2.1 光功率衰退阈值

光功率衰退阈值是判定 NPO 系统（特别是激光器光源）在长期工作后是否出现不可逆退化的定量依据。该参数直接与可靠性试验的失效判定相关联。

参考相关标准，对于 NPO 模块可靠性试验后，相关光参数出现以下情形时，判定为不合格：

绝对阈值：光学性能参数（如每通道平均发送光功率、消光比、每通道 OMA_{outer} 接收灵敏度等）不满足性能规范要求时。

相对衰退阈值：在相同测试条件和测试方法下，试验前后，每通道平均发送光功率、消光比、每通

道 OMAouter 接收灵敏度等任何一项变化量超过 1.0dB，此即为衰退阈值。

9.2.2 链路误码率突变判定

链路误码率（BER）的突变是评估 NPO 系统在可靠性试验过程中是否出现瞬时失效或性能突变的主要判据。该指标用于判定 NPO 系统是否出现随机性硬件失效（如连接器微动断开、激光器跳模）或环境应力导致的间歇性失效。主要有两个维度的判定：绝对阈值、突变斜率。

误码率绝对阈值：在 NPO 可靠性试验中，若实时 BER 超过 $2.4E-4$ （PAM4 KP4 RS pre-FEC 极限），且持续时间超过 1 秒，则判定为链路失效。

误码率突变斜率：在一定时间窗口内（如 10 秒），如果平均 BER 从稳定的基值突增超过一个数量级，即使未达到 FEC 极限，也视为“性能降级”，系统应触发告警。误码率突变失效判定的等级响应如下表所示。

表 9.2 误码率突变失效等级响应

等级	现象	判定	响应行为
a	在规定的限值内，BER 无变化或变化可忽略。	通过	继续运行。
b	BER 短暂升高，但在骚扰停止后（如振动结束）能自行恢复，不需要操作者干预。	可接受	系统自动恢复，记录日志。
c	BER 升高后不能自行恢复，或 BER 持续劣化，需要操作者干预（如重启模块、重新插拔）。	不合格	应更换相应子模块。
d	因硬件损坏（如激光器烧毁、芯片破裂）导致功能完全丧失。	不合格	应更换硬件。

10 未来展望

NPO（近封装光学）技术正处于从“技术验证”迈向“规模部署”的关键转折期。站在当前时点审视，未来三到五年，NPO 将在技术迭代、标准统一、产业生态三个维度迎来深刻变革，最终成为 AI 超节点和智算中心高速互连的核心底座。

技术演进：从 224G 到 448G，从 NPO 到 CPO 的平滑过渡

当前 NPO 技术主要面向 112G/224G 每通道速率，以 3.2T 光引擎形态初步落地。未来两年，随着 448G/lane SerDes 技术的成熟，NPO 光引擎将向 6.4T 乃至 12.8T 演进。这一过程中，NPO 将扮演“桥梁”角色——它既保留了可插拔模块的维护便利性，又将光引擎与 ASIC 的电学距离压缩至厘米级，为最终走向 CPO（共封装光学）积累工程经验。

值得关注的是，VLC（垂直线卡）架构的普及将与 NPO 形成深度协同。VLC 将 ASIC 到光模块的走线从 9 英寸缩短至 3-4 英寸，而 NPO 进一步将光引擎移至 ASIC 周边 1-2 英寸范围内。两者结合，将使 224G/448G 信号的完整性不再是系统瓶颈，从而让可插拔光模块的生命周期再延续至少两代。

标准统一：从多组织并行到全球共识

当前 NPO 相关的标准化工作分散在 IPEC、OIF、IEEE、CCSA 等多个组织。IPEC 已发布 3.2T VCSEL NPO 光引擎动态性能演示，OIF 正在推进 224G/448G 电气接口与共封装光学规范，CCSA 和 CESA 也在国内推动 T/CCSA 和 T/CESA 团体标准。未来一到两年，这些组织将通过联合工作组或互认机制，逐步收敛为统一的全球 NPO 标准体系。

这一过程将解决当前最突出的“碎片化”问题。不同厂商的 NPO 光引擎在机械接口、管理协议、测试方法上的不一致，是规模部署的最大障碍。预计 2027 年前后将出现首个被广泛采纳的 NPO MSA 规范，涵盖光引擎尺寸、金手指定义、管理接口、可靠性测试等核心要素。

产业生态：从单点突破到全链协同

NPO 的规模化离不开上游芯片、中游制造、下游应用的协同进化。在芯片侧，VCSEL 阵列、硅光调制器、Driver/TIA 的集成度将持续提升，单通道速率从 112G 向 224G、448G 迈进，功耗持续降低。在制造侧，高精度耦合封装、晶圆级测试、自动化贴片等工艺将趋于成熟，推动 NPO 光引擎的成本逼近甚至低于同等速率传统可插拔模块。在应用侧，AI 超节点和智算中心将成为 NPO 的首要落地场景——柜间 Scale-out 互连从 400G 向 800G、1.6T 演进的过程中，NPO 凭借低功耗、高密度、短走线的优势，将成为替代传统可插拔模块的主流选择。

未来五年，NPO 将从今天的小批量验证走向百万端口级别的规模部署，成为 AI 基础设施不可或缺的一环。它不仅是光互连技术的演进方向，更是中国光通信产业在全球竞争中确立优势的历史性机遇。产业各方应协同推进标准统一、技术攻关与生态共建，迎接 NPO 时代的全面到来。



参考文献

- [1] OIF-CMIS-05.4, Common Management Interface Specification (CMIS), Revision 5.4, Optical Internetworking Forum (OIF), 2026年5月.
- [2] OIF-CEI-05.3, Common Electrical I/O (CEI) – Implementation Agreement, OIF, 2025年7月.
- [3] OIF-ELSFP-02.0-1, External Laser Small Form Factor Pluggable (ELSFP) Implementation Agreement, OIF, 2025年1月.
- [4] OIF-Co-Packaging-3.2T-Module-01.0, Implementation Agreement for 3.2T Co-Packaged Optics Module, OIF, 2023年3月.
- [5] OIF-FLEXE-03.0a, Implementation Agreement for Flexible Ethernet (FlexE), OIF, 2026年2月.
- [6] OIF-EEL-COI-WP-01.0, Compute Optics Interface (COI): Energy Efficient Photonic Interconnects for AI Compute Scale-up, OIF, 2026年3月.
- [7] IEEE Std 802.3-2022, IEEE Standard for Ethernet, 2022年.
- [8] IEEE Std 802.3df-2024, IEEE Standard for Ethernet—Amendment 9: Media Access Control Parameters for 800 Gb/s and Physical Layers and Management Parameters for 400 Gb/s and 800 Gb/s Operation, 2024年3月.
- [9] QSFP-DD Hardware Specification Rev. 7.1, QSFP-DD/QSFP-DD800/QSFP-DD1600 Hardware Specification for QSFP Double Density 8X Pluggable Transceivers, QSFP-DD MSA, 2024年6月.
- [10] OSFP Module Specification Rev 5.22, Specification for OSFP Octal Small Form Factor Pluggable Module, OSFP MSA, 2025年8月.
- [11] IPEC-400G-eSR8_800G-eSR8-IA-V1.0, 400G eSR4 / 800G eSR8 Implementation Agreement, IPEC, 2026年4月.
- [12] IPEC-Reliability-IA-V1.0-2025, IPEC Reliability Implementation Agreement, IPEC, 2025年1月.
- [13] ITU-T G.657, Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable, ITU, 2024年8月.
- [14] ITU-T G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, ITU, 2024年8月.
- [15] YD/T 6086.1-2024, 800Gb/s强度调制可插拔光收发合一模块 第1部分: 8×100Gb/s, 中国通信标准化协会CCSA, 2024年.
- [16] YD/T 4377.1-2023, 光收发合一模块软件管理接口 第1部分: SFP/SFP+/SFP28, 中国通信标准化协会CCSA, 2023年.
- [17] YD/T 4377.2-2024, 光收发合一模块软件管理接口 第2部分: QSFP+/QSFP28, 中国通信标准化协会CCSA, 2024年.
- [18] YD/T 4377.3-2024, 光收发合一模块软件管理接口 第3部分: QSFP-DD/OSFP, 中国通信标准化协会CCSA, 2024年.
- [19] ODCC 2503008-2025, 400G BR4 光模块技术规范, ODCC, 2025年9月.
- [20] ODCC 2503009-2025, 以太网智算集群互联技术白皮书, ODCC, 2025年9月.