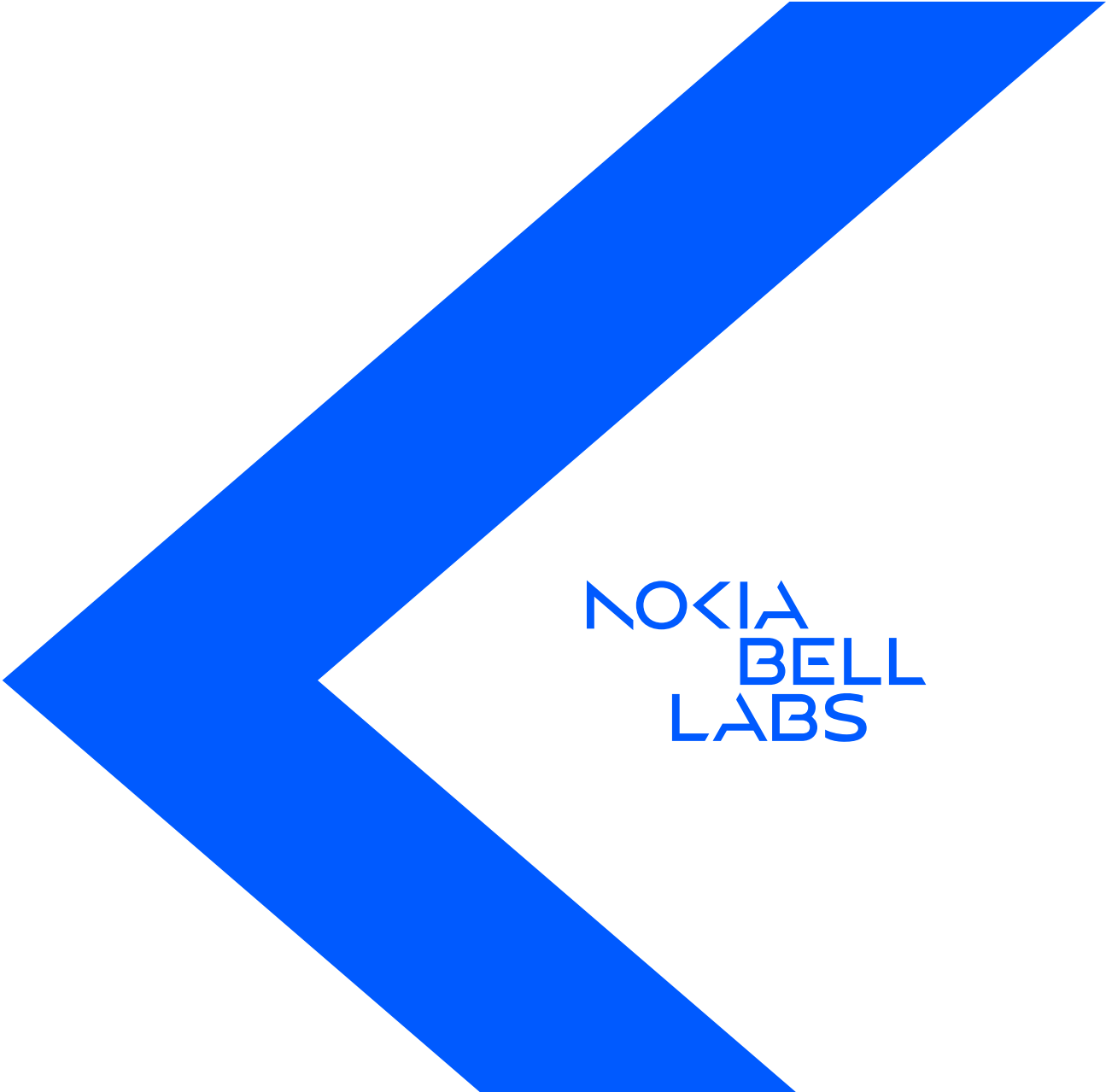


Bell Labs Consulting

数据中心网络架构 可靠性研究

与 Futurum 合作开展

应用指南



NOKIA
BELL
LABS

摘要

当前，作为关键任务枢纽的数据中心，必须承载需要即时处理和实时洞察的高强度人工智能（AI）驱动型工作负载。要支持传统应用和 AI 应用并确保数字交互不中断，卓越的网络可靠性必不可少。

诺基亚通过“零人为错误”策略满足这一可靠性需求，旨在消除由供应商软件缺陷或用户错误配置引发的网络层面错误。尽管业界一致认可可靠性至关重要，但对于数据中心传统交换解决方案与现代解决方案在硬件、软件和网络运维方面的可靠性影响，仍缺乏量化和对比信息。

本文所述的数据中心网络架构可靠性研究通过综合分析和模型填补了这一空白，找出对网络可靠性影响最大的因素。该研究由贝尔实验室咨询团队与 Futurum 合作完成，从运维和财务角度量化宕机影响，并提供可执行的可靠性提升建议：采用诺基亚数据中心网络架构解决方案，通过现代化和先进的网络运维实现网络弹性。

目录

1	执行摘要	4
1.1	研究范围与方法	4
1.2	主要发现	4
1.3	运维收益	5
2	目标	5
2.1	数据中心应用与网络可靠性	5
2.2	网络可靠性的定义	6
2.3	可靠性研究目标	7
3	方法	7
3.1	可靠性研究方法	7
3.2	传统基线与最佳实践基线对比	9
3.3	模型方法	10
3.4	模型参数与假设	11
3.5	网络运维生命周期用例建模	13
4	结果与发现	14
4.1	可用性提升与宕机时间缩短	14
4.2	PMO 可用性不足以满足关键网络需求	15
4.3	运维用例的宕机时间缩短	16
4.4	影响数据中心网络架构可靠性的关键领域	18
4.5	以质量优先的方法提升可靠性	19
4.6	诺基亚 SR Linux 如何提升可靠性	19
4.7	诺基亚 EDA 如何提升可靠性	20
4.8	财务评估	21
5	总结	24
6	了解更多	24
7	缩略语	25
8	附录 A: Nokia SR Linux 与诺基亚 EDA 的差异化优势	26

1 执行摘要

在当今数据驱动的经济中，每一笔交易、每一项决策和每一次客户互动都依赖始终在线的网络。数据中心网络必须提供无与伦比的可靠性，以支持传统企业应用和数据密集型 AI 工作负载。即使短暂中断也可能导致数据损坏、交易失败、收入损失以及客户信任受损。因此，高可用性是业务关键要求，而非可选特性。

1.1 研究范围与方法

本文所述的数据中心网络架构可靠性研究涉及：

- 帮助量化传统交换解决方案与现代一流数据中心网络架构在可靠性、运维和财务方面的影响。
- 采用贝尔实验室咨询团队开发的模型，评估数据中心 leaf-spine 架构中的硬件、软件、配置和运维因素如何影响网络可靠性。
- 将由过时硬件、手动流程和有限自动化构成的“传统”基线所代表的当前运作模式（PMO），与未来运作模式（FMO）进行比较。FMO 由基于[诺基亚数据中心网络架构解决方案](#)的“最佳实践”基线作为代表；该方案通过[诺基亚 SR Linux](#) 网络操作系统（NOS）和[诺基亚事件驱动自动化（EDA）](#) 平台实施“零人为错误”策略，以消除供应商缺陷和用户错误配置造成的问题。

1.2 主要发现

研究的主要发现表明，FMO 带来了四项显著的可靠性提升：

1 网络可用性大幅提升，宕机时间显著缩短

PMO 的可用性仅为 99.981736%（3.7 个 9），年度宕机时间为 96.1 分钟；采用诺基亚 SR Linux 和 EDA 的 FMO 可达到 99.999235%（5.1 个 9）的可用性，年度宕机时间仅为 4 分钟。

诺基亚数据中心网络架构解决方案可实现：

- 宕机时间**缩短至 1/23.9，即减少 96%**
- **每年宕机 4 分钟**，而传统 PMO **每年宕机 96 分钟**
- **可用性达到 5.1 个 9**，而传统 PMO **为 3.7 个 9**

2 数据中心网络架构运维生命周期各阶段的宕机时间均显著缩短

采用 SR Linux 和 EDA 的 FMO 通过支持先进自动化工具和能力，将宕机时间降至最低，包括集成数字孪生、基于意图的开通、事件处理系统（EHS）、变更前后检查以及增强型遥测。

诺基亚数据中心网络架构解决方案可实现：

- 配置和开通任务的宕机时间**最多减少 95%**
- 运维和监控任务的宕机时间**最多减少 99%**
- 维护任务的宕机时间**最多减少 99%**

3 可量化的成本下降

研究显示，财务收益虽然不是线性关系，但却十分显著。在温和和激进两种情景下，采用 SR Linux 和 EDA 的 FMO 均可大幅降低因服务指标劣化导致的罚款与运维成本、收入损失和对声誉的负面影响。

诺基亚数据中心网络架构解决方案可实现：

- **最多降低 60%** 的罚款和运维成本
- **最多降低 53%** 的宕机期间收入损失及受影响客户流失
- **最多降低 44%** 的品牌价值下降及品牌认知导致的客户流失

4 实际节省

一家中型金融机构的案例研究将这些降幅转换为美元节省金额。

如果该公司选择实施诺基亚 SR Linux 和 EDA 解决方案，可实现：

- **约挽回 9400 万美元**的罚款
- **约挽回 6600 万美元**的收入损失
- **约挽回 2.07 亿美元**的品牌价值损失

1.3 运维收益

研究表明，诺基亚数据中心网络架构解决方案可带来多项关键运维收益，包括：

- 帮助网络运维团队实现 MTIT (mean time to innocence) 目标，避免网络成为故障归因对象。
- 减少告警疲劳（因海量告警和错误而不堪重负）及压力，从而提升士气和工作满意度。
- 降低自动化门槛，实现更快速、更可预测的网络运维和更高敏捷性。

采用配备 SR Linux 和 EDA 的**诺基亚数据中心网络架构**解决方案，可将高可用性从愿景变为现实，减少人为错误、最大限度缩短宕机时间，并创造可量化的运维和财务收益。

2 目标

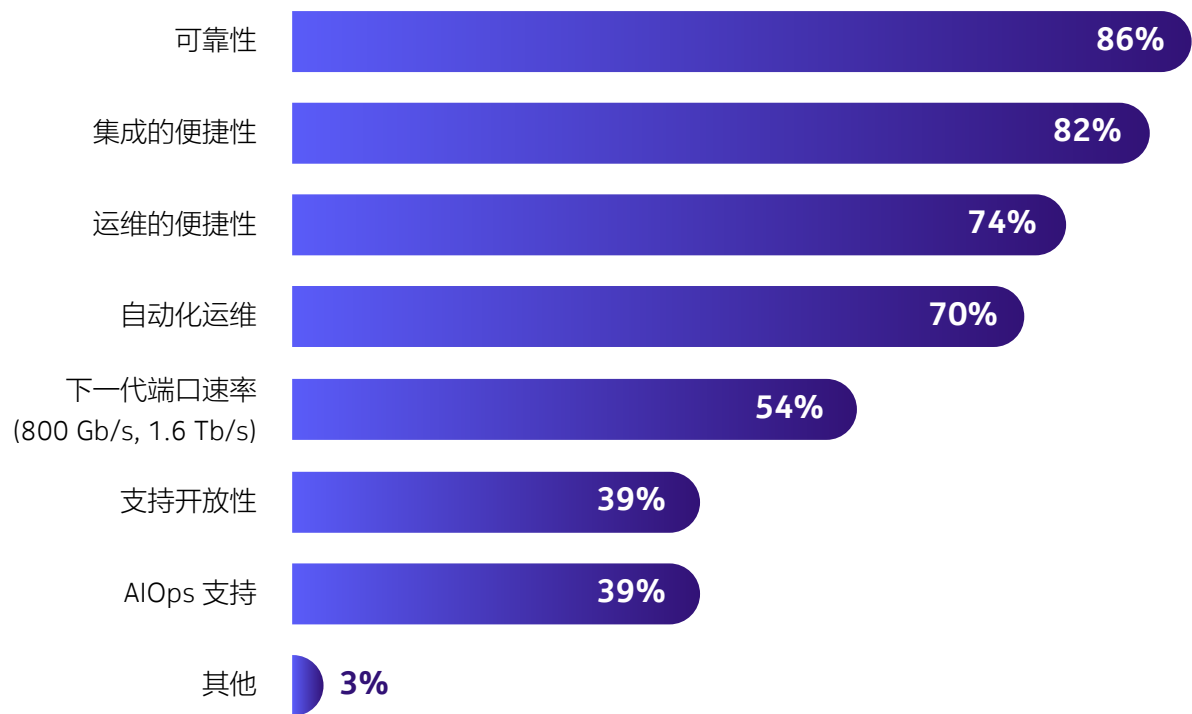
2.1 数据中心应用与网络可靠性

如今，数据中心需要支持多种工作负载，包括传统企业应用以及数据密集型 AI 和机器学习应用。尽管每类工作负载对网络都有特定要求，但它们都具有一项共同的基础需求：网络可靠性。

在近期的一项研究中，Futurum¹ 请各组织的领导者对建设下一代数据中心网络的决策标准进行评估。网络可靠性位居榜首，86% 的受访者将其视为最重要的因素（图 1）。

¹ “数据中心网络势在必行：推动下一代数据中心发展的关键趋势”。Futurum，2025 年。https://pages.nokia.com/t0212u-the-data-center-networking-imperative-key-trends-driving-the-next-era-of-data-centers.html#single-form-section-title（访问日期：2025 年 10 月 21 日）。

图 1：构建下一代数据中心网络的决策标准



Web 服务、数据库、ERP 系统、存储和虚拟化环境等传统应用，需要稳定的吞吐量、可预测的时延和持续访问，以确保面向最终用户和业务利益相关方的服务连续性。即使极小的网络中断也可能造成数据损坏和交易失败，进而导致失去客户信任。

AI 应用和工作负载为数据中心网络带来了更严格的新要求。AI 加速器（专用高性能计算处理器）需要跨数十至数千个节点实时处理海量数据。单个网络故障就可能严重影响 AI 系统学习信息以及作出决策和预测的训练过程，还会浪费宝贵的计算周期。如此规模下的网络可靠性必须提供确定性性能、快速故障隔离，并防止代价高昂的宕机。

简而言之，对于希望获得竞争优势的数据中心运营商而言，网络可靠性必不可少。

2.2 网络可靠性的定义

在数据中心语境中，可靠性这一概念通常指整个数据中心基础设施。本文档重点关注网络可靠性。

网络可靠性是指网络保持正常运行的能力。对于数据中心交换网络，可靠性与交换机所使用的硬件和软件以及网络的运维方式有关。与第 0 天设计、第 1 天部署和第 2 天及以后运维相关的网络运维任务，会直接且显著地影响网络可靠性。

可用性是最广泛使用的可靠性衡量指标之一，表示网络或系统正常运行并可供使用的时间比例。

宕机时间与可用性成反比：可用性越高，宕机时间越短。例如，99.999% 的可用性相当于每年约宕机 5 分钟，而 99% 的可用性相当于每年约宕机 3 天 15 小时（约 5,220 分钟）。

数据中心网络中的大多数计划外宕机都与运维原因有关，例如错误配置、人工操作失误、故障响应延迟、监控效率低下或维护任务不当。

因此，数据中心网络可靠性既与交换机硬件和软件的可靠性有关，也与网络的设计、部署和运维方式有关。

2.3 可靠性研究目标

数据中心网络架构由 leaf 交换机和 spine 交换机组成，它们协同工作，为连接服务器上部署的传统应用和 AI 应用提供具有弹性且可扩展的基础设施。每台交换机还运行 NOS 软件，为交换机运维提供所需的智能、路由能力、遥测及其他可编程能力。网络通常由数据中心网络架构管理与自动化工具或平台进行管理。

“零人为错误”是诺基亚的一项使命和战略，旨在消除数据中心网络中的错误，尤其是源自供应商失误（如软件缺陷）和用户失误（如错误配置）的问题。尽管数据中心网络可靠性的重要程度已被广泛认同，但仍有必要量化不同网络解决方案会在多大程度上提升或削弱整体可靠性。

本文介绍的数据中心网络架构可靠性研究通过聚焦可靠性在数据中心网络架构内部如何受到影响、如何衡量以及如何提升，来回应这一需求。贝尔实验室咨询团队开发了综合可靠性研究模型，该模型能够：

- 分析驱动数据中心网络架构可靠性的各个方面，对硬件、软件以及最重要的网络运维任务对网络可靠性的影响进行建模。
- 量化现代化运维和智能自动化如何减少人为错误与宕机时间。
- 就如何将宕机时间缩短转化为运维效率提升和潜在的财务上的节省提供关键指导。
- 验证如何通过实施最佳组合解决方案（即[诺基亚数据中心网络架构](#)）来增强现有数据中心交换基础设施，并通过现代化和自动化实现网络弹性。

3 方法

3.1 可靠性研究方法

可靠性研究模型对 PMO 与 FMO 进行比较。PMO 代表缺少网络可靠性关键能力的现有解决方案基线，而 FMO 代表推荐的解决方案基线，具备提升网络可靠性所需的能力。

除非另有明确说明，本文所列结果和发现均基于 PMO 的“传统”基线与 FMO 的“最佳实践”基线之间的比较（图 2）。下一节将说明各基线的标准及相关能力。

最佳实践基线代表诺基亚数据中心网络架构解决方案。该解决方案包括诺基亚数据中心交换机、开放、可扩展且具有弹性的诺基亚 SR Linux NOS，以及诺基亚事件驱动自动化（EDA）管理与运维平台。

贝尔实验室咨询团队的模型（以下简称“模型”）针对最佳实践基线采用两种 FMO 情景：FMO 1 基于部署 SR Linux；FMO 2 基于部署 SR Linux 和 EDA。如图 2 所示，每种 FMO 均支持一组有助于增强网络可靠性的能力。

图 2：可靠性研究方法



模型可使用传统基线或自定义基线作为 PMO。这意味着模型可根据特定客户当前供应商的产品与解决方案，结合其当前网络可靠性指标进行定制。

该可靠性研究对软硬件带来的贡献，以及使用更好的工具对提升网络可靠性的运维影响进行建模。不可靠的网络运维可能造成严重宕机。如图 2 底部所示，模型分析网络运维生命周期中影响可靠性的具体任务。它将典型的数据中心网络架构生命周期——设计、部署、配置、开通和持续运维（包括升级与维护）——映射为用例，再纳入模型。

这种方法有助于量化各领域对整体可用性和宕机时间的影响，使结果对网络运维人员更直观。例如，如果某项维护任务相关的宕机时间降低一定比例，运维团队可以立即理解其收益。模型随后比较 PMO、FMO 1 和 FMO 2 的计算网络可用性与宕机时间，以量化网络可靠性的提升。

3.2 传统基线与最佳实践基线对比

表 1 对比传统基线（PMO）与最佳实践基线（FMO），重点说明采用基于[诺基亚数据中心网络架构](#)的 FMO 所具备的优势：通过现代化和先进网络运维实现网络弹性。

- FMO 利用下一代数据中心交换解决方案，在硬件、NOS 和自动化平台方面采用前沿技术。与 PMO 依赖过时架构和协议不同，FMO 支持 Linux、Kubernetes 和云原生方法等现代技术。
- FMO 采用“零人为错误”方式，利用基于 IP/EVPN/VXLAN 网络架构的现代 leaf-spine 架构，尽量减少运维错误。它以质量为先，通过采用最新商用芯片的交换机、具有弹性且开放的 NOS，以及开发与测试工程师 1:1 的配置比例，确保高可靠性。
- FMO 提供全面的管理和自动化工具集，引入数字孪生等高级功能，以提升整个网络生命周期的可靠性、可预测性和运维效率。而 PMO 缺少可靠、有保障运维所需的能力，因而会对网络可靠性产生负面影响。

表 1：传统基线（PMO）与最佳实践基线（FMO）对比

标准	传统基线	最佳实践（诺基亚方法）
数据中心交换供应商概况	• 未能持续改进产品和解决方案的供应商 • 较旧的交换机架构和协议机制（如交换机堆叠） • 端口速率为 10 Gb/s 及以下，需要升级至 100 Gb/s 及以上 • 长期依赖临时方案和修补措施维护现有产品	• 下一代数据中心交换解决方案，在硬件、NOS 和自动化平台方面具备前沿创新 • 基于 Linux、云原生、微服务、数字孪生和 Kubernetes 等现代技术 • 端口速率可达 800 Gb/s 及以上，支持传统应用和 AI 应用 • 从零构建，解决数据中心网络团队和运维人员面临的挑战
设计方法与理念	• 早期源于以二层为中心的设计和生成树方法，主要面向中低端数据中心交换市场 • 很少或完全未考虑、采用三层数据中心网络拓扑 • 因收购和内部孵化而混合使用不同组件，导致管理和运维复杂	• “零人为错误”方式，旨在消除供应商产品问题和网络运维导致的人为错误 • 专为实施 IP/EVPN/VXLAN 网络架构的现代 leaf-spine 架构构建 • 全新起点使设计方法与现代技术和创新保持一致

标准	传统基线	最佳实践（诺基亚方法）
硬件和软件质量与可靠性	- 并非市场战略和理念的核心部分 - 依赖早期专有芯片和商用芯片 - NOS 已接近或超过生命周期终点 - 产品可靠性记录较差或一般 - 客户对质量问题不满 - 开发人员与测试工程师通常为 2.5-3.5:1	- 系统设计以质量为先，可靠性并非事后考虑 - 交换机采用最新一代商用芯片 - 全新、真正开放、可扩展且具有弹性的 NOS - 拥有 20 多年业务关键和任务关键软硬件产品经验 - 客户正面评价约 95%，负责销售与营销的客户正面评价约 98%² - 开发与测试团队协同工作，人员比例为 1:1
保障可靠性的网络运维能力	- 开通、监控、事件排障及所有运维高度依赖 CLI - NOS 告警能力有限（如仅支持 SNMP，不支持流式遥测） - 缺少支持关键自动化能力的管理解决方案 - 自动化工具有限和/或专有，过于复杂、封闭或不易使用	- 提供现代化管理与运维平台 - 内置数字孪生、事件处理系统等独特功能，专门用于提升可靠性和可预测性 - 为网络运维生命周期各阶段提供全面的管理和自动化工具集 - 保持开放的解决方案架构，可利用最佳开源工具

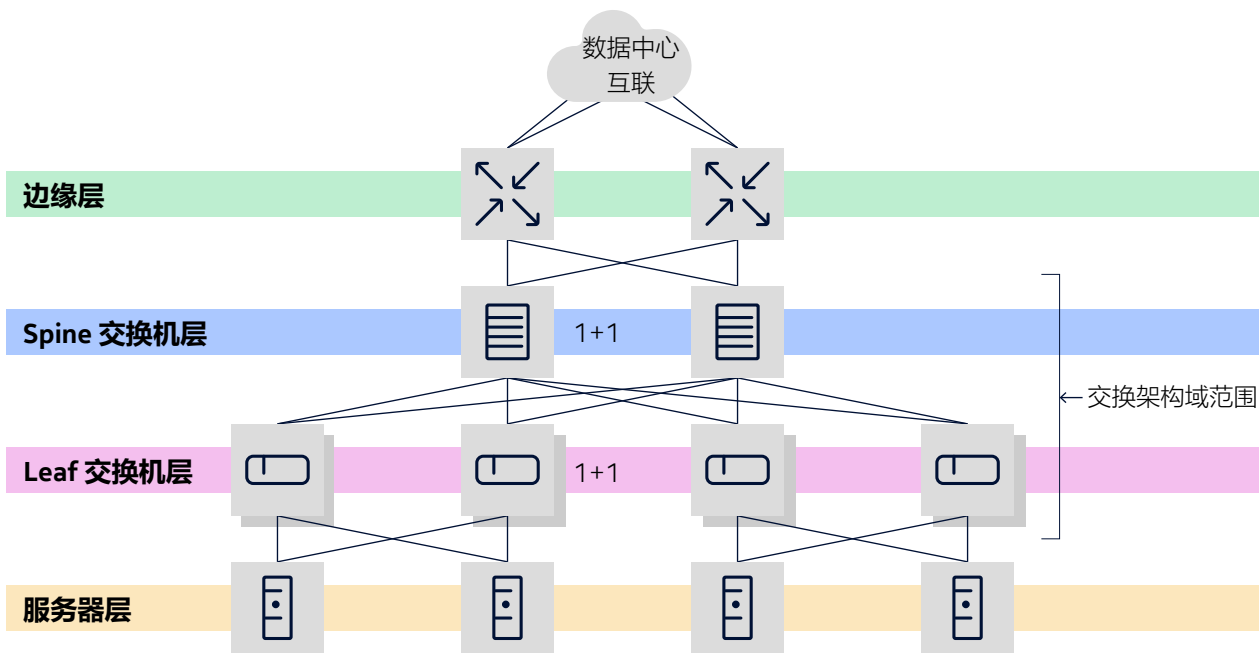
3.3 模型方法

网络可靠性研究分析最佳实践基线 SR Linux（FMO 1）和 SR Linux 与 EDA（FMO 2）解决方案，相较传统 PMO 对提升端到端数据中心网络架构可靠性的影响。

模型采用简化的 leaf-spine 架构（图 3），包含一对 spine 交换机和一对 leaf 交换机，均采用 1+1 双活冗余配置。该配置可实现负载均衡和快速故障切换。网络架构的可靠性目标设定为关键业务级可用性（约 99.999%）。

2 诺基亚客户调研项目报告（IP 网络事业部）

图 3：模型采用的参考配置



可靠性收益通过可用性和宕机时间数值进行量化与比较。可靠性针对数据中心网络架构（leaf 层、spine 层及其网络连接）计算，不包括边缘路由器及更广泛的数据中心组件。研究还将可靠性提升转化为对业务和财务指标的影响，便于直观看出传统 PMO 与两种 FMO 选项间的性能差异。

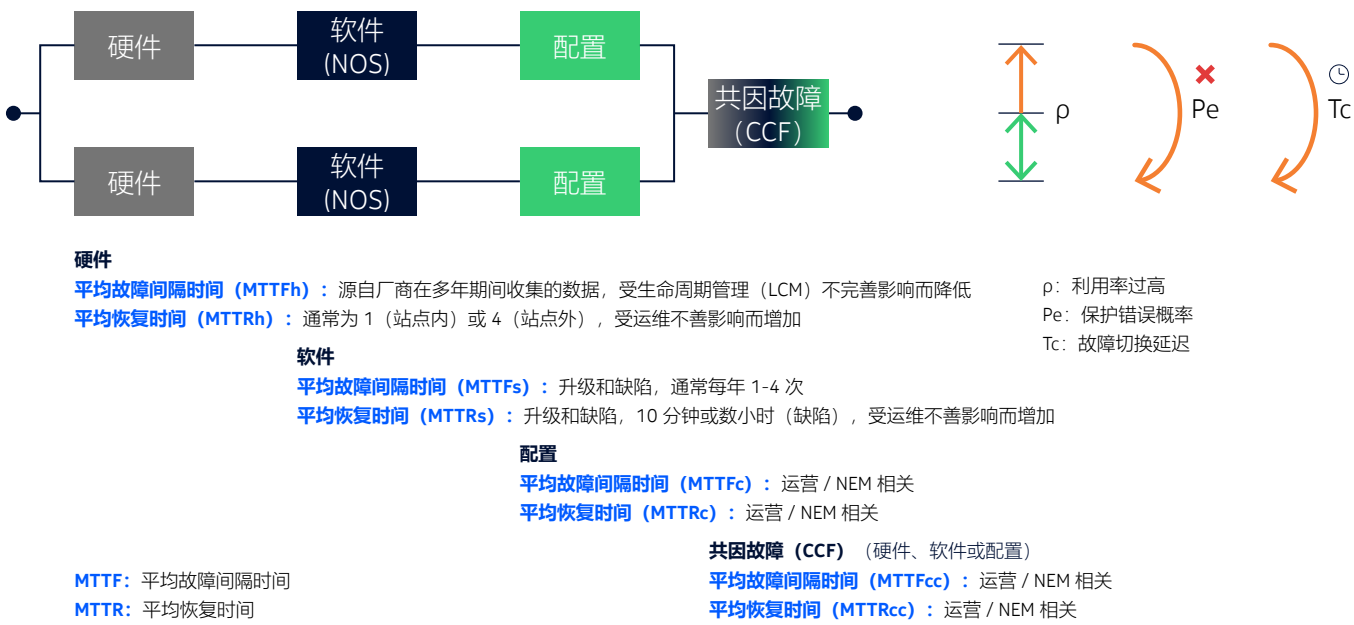
3.4 模型参数与假设

数据中心网络架构可靠性模型（图 4）将每台交换机表示为三个独立组件 —— 硬件、软件（NOS）和配置 —— 每个组件都可能独立发生故障。例如，软件缺陷或错误路由表可能使硬件完全正常的交换机受损。

模型针对 spine 交换机和 leaf 交换机纳入采用 1+1 双活冗余配置的主用与备用交换机，同时考虑共因故障（CCF），即软件缺陷或错误路由表等配置错误同时影响主用和备用交换机。

此外，模型接收宕机频率和持续时间等输入数据，并将其转换为平均故障间隔时间（MTTF，即两次故障之间的预期平均时间）和平均恢复时间（MTTR，即故障发生后恢复服务所需的平均时间）。

图 4：计算网络可靠性的模型参数



模型还纳入三个影响可靠性的运维因素：

- 1. 利用率过高：在双活配置中，交换机负载超过 50%，会导致故障切换时无法完全恢复流量。
- 2. 保护错误概率：错误配置导致备用交换机无法正常工作。
- 3. 故障切换延迟：重新初始化或重新认证导致的非零切换时间，即使仅数秒，也会降低可用性，尤其影响交换机等高可用组件。

所有这些因素——硬件、软件、配置和运维——均针对 spine 交换机和 leaf 交换机进行建模。硬件故障率数据来自诺基亚系统与网络可靠性工程团队；软件、配置和运维参数则来自过去十年观察到的匿名行业数据和最佳实践，从而确保对数据中心网络架构可靠性进行全面评估。

模型随后比较 PMO、FMO 1 和 FMO 2 量化后的网络可用性与宕机时间，以量化网络可靠性的提升，并按四个网络生命周期阶段细分相应改进。

FMO 1 衡量仅采用 SR Linux 时，相较 PMO 对端到端数据中心网络架构可靠性的提升。FMO 2 在 SR Linux 基础上增加 EDA，并量化相较 PMO 获得的额外可靠性收益。

诺基亚认为，FMO 的最佳实践基线将促使业界重新思考数据中心网络架构的设计、部署和运维方式。通过推进“零人为错误”愿景，并将可靠性融入数据中心网络设计，可显著降低中断频率，大幅提高可靠性和正常运行时间，使高可用性从愿景变为现实。先进网络运维工具可减少人工工作量、降低人为错误概率，并提高运维任务的可预测性和可靠性。因此，模型假设并采用 FMO 运维可靠性提升约 90%。

3.5 网络运维生命周期用例建模

数据中心网络生命周期包括第 0 天设计、第 1 天部署和第 2 天及以后运维阶段。每个阶段均包含相应的网络运维、岗位职能和任务。

- 第 0 天包括规划、架构设计和验证，以确保物理实施前网络符合意图。
- 第 1 天包括初始上线、设备开通、配置激活、零接触开通（ZTP）以及多厂商环境中的互操作。
- 第 2 天及以后包括持续日常运维、实时监控、问题检测和自适应响应，以维持性能。

可靠性研究模型分析影响可靠性的网络运维任务，将典型数据中心网络架构生命周期映射到具体用例，再映射到模型。

模型采用以下用例，分析并量化支持各用例的关键能力缺失或具备的情况下对网络宕机时间的影响。它通过比较传统运作模式与最佳实践运作模式中这些用例相关的能力，评估数据中心网络架构可靠性。

用于设计和部署的数字孪生

此方案中集成的数字孪生是与实时网络持续同步的虚拟副本。它可在不影响真实流量的情况下模拟变更、故障和性能状况，从而提升可靠性、减少人为错误并增强运维信心。

网络数字孪生通过以下能力帮助数据中心团队简化设计和部署：

- 拓扑建模与验证：构建 spine-leaf 或 super-spine-leaf 设计，并在硬件到位前验证可扩展性、时延和冗余。
- 策略与路由验证：在正常和故障切换条件下模拟以太网 VPN（EVPN）、边界网关协议（BGP）、服务质量（QoS）和安全策略。
- 弹性测试：注入链路故障、节点重启或分区，验证等价多路径（ECMP）路由、快速重路由等冗余机制。
- 加速上线：验证后，将模板和配置直接从数字孪生推送到生产环境，实现一次正确部署。

数字孪生验证完成后，相同的配置和模板可自动推送到生产环境，确保设计网络与部署网络保持一致。这可以缩短部署时间，并帮助团队及早发现和解决问题，从而提升网络可靠性。

用于配置和开通的数字孪生

网络数字孪生通过以下能力帮助数据中心团队完成配置和开通：

- 部署前验证：在将新配置应用到生产环境之前，先在数字孪生中进行测试。
- 变更影响模拟：直观查看新配置或固件升级将如何改变路由表、路径或服务。

- 由自动化确保一致性：持续比较预期状态与实际状态，检测漂移、错误配置或安全违规。
- 基础设施即代码（IaC）与持续集成/持续部署（CI/CD）集成：将数字孪生嵌入自动化流水线，使每项变更在上线前自动完成测试。

在此场景下，数字孪生可最大限度降低错误配置风险，减少变更相关中断，并确保整个网络架构保持一致。

用于运维和监控的事件处理系统

事件处理系统（EHS）可检测、解释并自动响应可能影响性能或可用性的网络事件，防止小问题演变为中断。它持续接收实时遥测数据（链路利用率、丢包、时延和接口错误），并在发现阈值越界或异常时（如端口饱和、链路抖动或高丢包率）自动触发预定义操作。

EHS 通过即时响应早期预警信号，防止服务质量下降，并将时延和丢包控制在服务等级协议（SLA）范围内。它以极少人工干预实现更快检测和修复，从而减少宕机时间；同时采用可重复的自动化响应替代不一致的人工判断，提升运维一致性。

用于维护的升级与流量预排空

升级与流量预排空能力可对计划维护和升级进行自动化编排，使服务持续在线并保持网络可靠性，消除通常存在的丢包、会话中断或配置漂移风险。

该能力可在任何操作开始前，自动将实时流量从目标设备或接口重新路由。完成排空的节点会进入受控状态，在保留控制平面可见性的同时与数据平面隔离，避免影响相邻设备。集中式自动化工作流仅在设备准备重启时才将其锁定，从而减少等待时间并缩短维护窗口。此外，如果每个升级步骤都能在集成网络数字孪生中模拟，就可在实际变更前识别不兼容或故障。

升级与流量预排空能力可实现零损耗维护，即升级期间无丢包或会话重置。它通过更快速、更可预测的维护窗口和更快的服务恢复来减少宕机时间。与数字孪生结合后，还能确保软件和配置更新按预期运行，实现安全、可预测的变更。

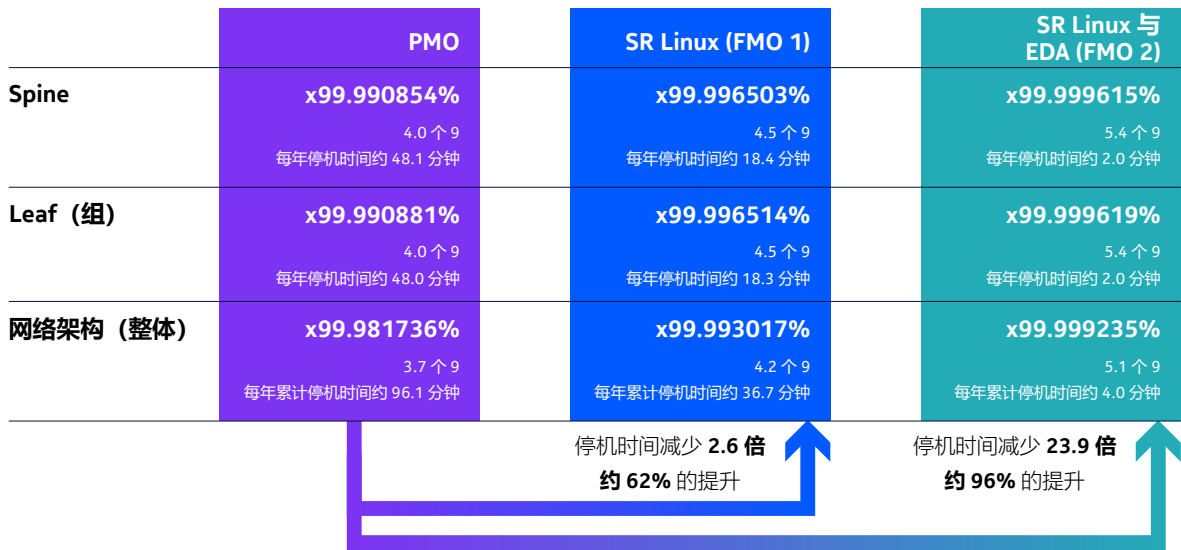
4 结果与发现

4.1 可用性提升与宕机时间缩短

图 5 展示了网络架构采用三种配置时的可用性指标：PMO、SR Linux（FMO 1），以及 SR Linux 与 EDA（FMO 2）。PMO 基于传统基线，而 FMO 1 和 FMO 2 基于最佳实践基线。（表 1 提供了这些基线的对比，供参考。）

图 5 中的可用性指标对应一对 spine 交换机和一对 leaf 交换机。在最左列，PMO 配置下的 spine 交换机和 leaf 交换机可用性均为 99.99%，在单设备层面分别相当于每年约 48 分钟宕机时间。合并到网络架构层面后，spine 层与 leaf 层可用性的乘法效应使整体可用性降至 99.981736%（3.7 个 9），即年度累计宕机时间约 96.1 分钟。

图 5：可用性提升与宕机时间缩短



采用 SR Linux 解决方案后，可用性显著提升。spine 交换机和 leaf 交换机的可用性均达到 99.9965%，年度宕机时间降至约 18.3–18.4 分钟，较 PMO 缩短 2.6 倍。在网络架构层面，这相当于 99.993017%（4.2 个 9）的可用性，即年度累计宕机时间约 36.7 分钟。

SR Linux 与 EDA 的组合进一步增强可靠性，使 spine 交换机和 leaf 交换机的可用性均达到 99.9996%，每台设备的年度宕机时间降至约 2 分钟。在网络架构层面，整体可用性达到 99.999235%（5.1 个 9），相当于年度累计宕机时间仅 4 分钟。与 PMO 基线相比，宕机时间缩短 23.9 倍，体现了 SR Linux 与 EDA 带来的显著可靠性增益。

FMO 可大幅提升可用性并显著缩短宕机时间

- 宕机时间缩短至原来的 1/23.9，即减少 96%
- 每年宕机时间仅为 4 分钟，而传统 PMO 为 96 分钟
- 可用性达到 99.999235%，而传统 PMO 为 99.981736%

4.2 PMO 可用性不足以满足关键网络需求

PMO 配置中 spine 路由器和 leaf 路由器达到 99.99% 的可用性，看似稳健，但这相当于每年约 48 分钟的宕机时间。此外，单个设备的可用性还必须考虑其在整个系统中的乘法效应；在本例中，即跨 leaf 层与 spine 层的叠加影响。

在 PMO 网络示例中，spine 交换机和 leaf 交换机可类比为必须协同工作的轨道与列车。虽然每台交换机单独看来都很可靠，但 99.99% 的正常运行概率仍相当于每年约 48 分钟宕机。两类交换机组合后，整个系统正常运行的概率降至 99.981736%，相当于每年约 96 分钟的显著宕机时间。

这种乘法效应表明，在 spine 交换机与 leaf 交换机必须协同运行的网络架构中，系统级宕机不可忽视。

当进一步计入边缘路由器、服务器、电源和空调等其他关键要素时，这一效应会进一步加剧，因为每个组件都有自身的宕机风险。假设每个新增组件的可用性也约为 99.99%，乘法效应将进一步降低系统整体可用性，年度宕机时间可能增至数小时。这表明 PMO 的可用性无法满足关键业务/任务环境的要求。

4.3 运维用例的宕机时间缩短

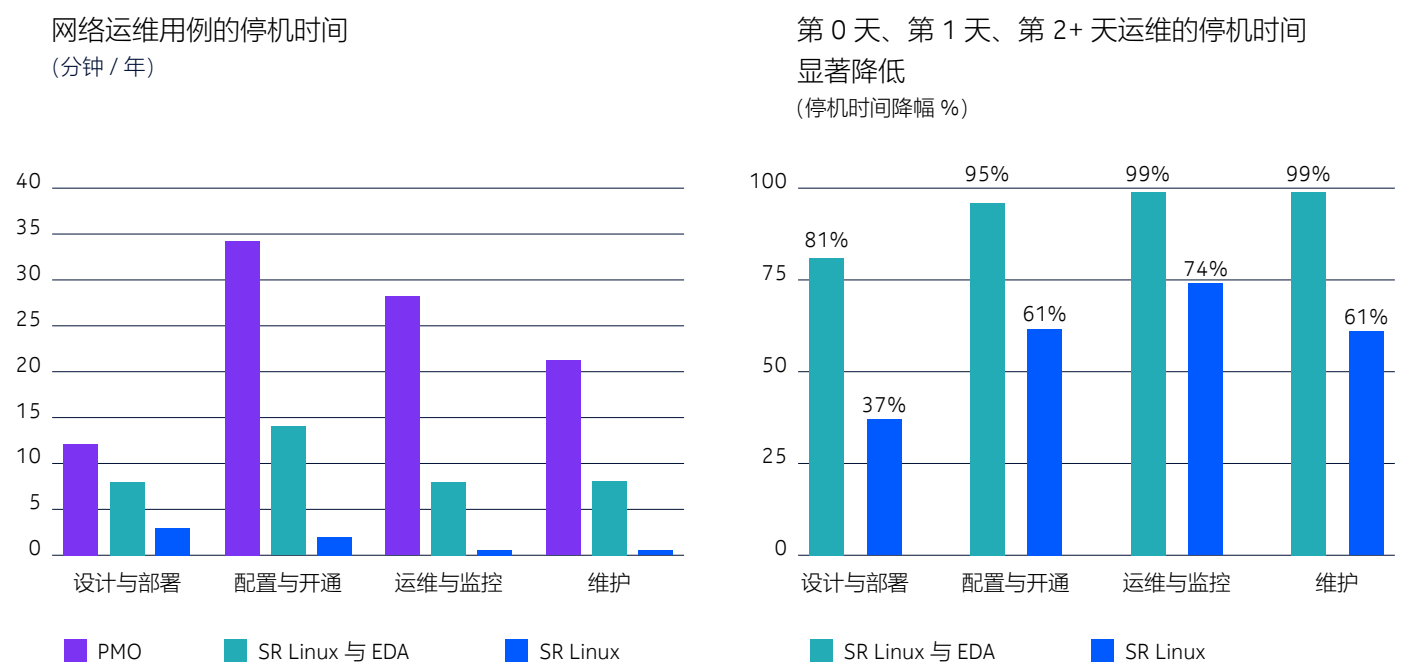
图 6 包含两张图表，对比 PMO、SR Linux 以及 SR Linux 与 EDA 配置在各网络运维用例中的宕机时间及其降幅。这些用例对应生命周期中的设计与部署、配置与开通、运维与监控以及维护阶段。

左图显示每年的宕机分钟数，右图则突出显示 SR Linux（蓝色）以及 SR Linux 与 EDA（蓝绿色）相较 PMO 的宕机时间降幅。

对于 PMO，配置与开通阶段的宕机时间最高（每年约 35 分钟），其次是运维与监控阶段（每年约 30 分钟）；设计与部署阶段较低（每年约 10 分钟），维护阶段约为每年 20 分钟。

SR Linux 可显著缩短各阶段的宕机时间。SR Linux 与 EDA 组合后可实现接近于零的宕机时间，提供更卓越的可靠性。

图 6：运维用例的宕机时间缩短



右图进一步量化了这些改进：采用 SR Linux 与 EDA 的 FMO 在设计与部署阶段将宕机时间缩短 81%，在配置与开通阶段缩短 95%，在运维与监控阶段缩短 99%，在维护阶段缩短 99%。网络生命周期各阶段均实现一致提升，凸显了 SR Linux 与 EDA 的优势。

表 2 对比 PMO 与 FMO（诺基亚 SR Linux 和 EDA 情景）在各运维生命周期阶段的可靠性提升，并汇总了 FMO 情景为实现这些改进所具备的能力。

表 2：各运维生命周期阶段的可靠性提升

生命周期阶段	PMO	FMO（诺基亚 SR Linux 和 EDA）
设计与部署	使用模板和图表进行手动、静态设计会导致配置漂移。生产网络偏离预期设计，从而引发异常行为和中断。	• EDA 数字孪生：与生产网络架构完全对应的虚拟副本，可在部署前使用真实意图作为输入进行完整设计验证。 • 基于意图的建模：工程师定义抽象网络状态（例如拓扑、策略和故障切换行为），系统自动将其转换为经过验证的配置。 • 无转换错误：在数字孪生中测试的配置可直接部署到生产环境，无需复制粘贴或手动修改。
配置与开通	逐设备手动编写脚本、模板不一致以及人为理解偏差会造成配置错误，而配置错误是宕机的主要原因之一。	• 可靠性提升：当设计阶段（规划与建模）和部署阶段（生产环境中的配置与开通）紧密衔接并高精度对应时，可靠性能显著提高。 • 每次变更前进行试运行验证：EDA 自动检查语法、策略冲突和拓扑一致性。 • 模块化、模型驱动架构（SR Linux）：通过开放 API 实现增量式、无中断更新。 • 基于组的开通：EDA 支持在网络架构节点间并行执行自动化配置。 • 闭环反馈：部署后遥测确保网络持续与意图保持一致。
运维与监控	监控以被动响应为主，工程师需手动关联日志、响应告警，并在性能下降开始后修复问题。	• 事件处理系统（EHS）：针对异常（例如端口饱和、丢包）提供预先编程的实时自动响应。 • 主动纠正：系统在产生影响前推送路由策略、重新均衡流量或禁用故障接口。 • 闭环自动化：系统支持持续遥测及模式检测，以帮助触发修复操作。
维护	手动排空流量、隔离设备和冗长的升级窗口会带来故障切换延迟、保护错误及服务中断。	• 平滑的流量排空与维护模式：以零丢包方式隔离设备。 • 最小化升级窗口：设备在准备重启前始终保持运行。 • 在数字孪生中预先测试：所有升级步骤均在与生产环境相同的环境中完成验证。 • 基于组的升级：系统支持在整个网络架构中并行执行自动化更新。

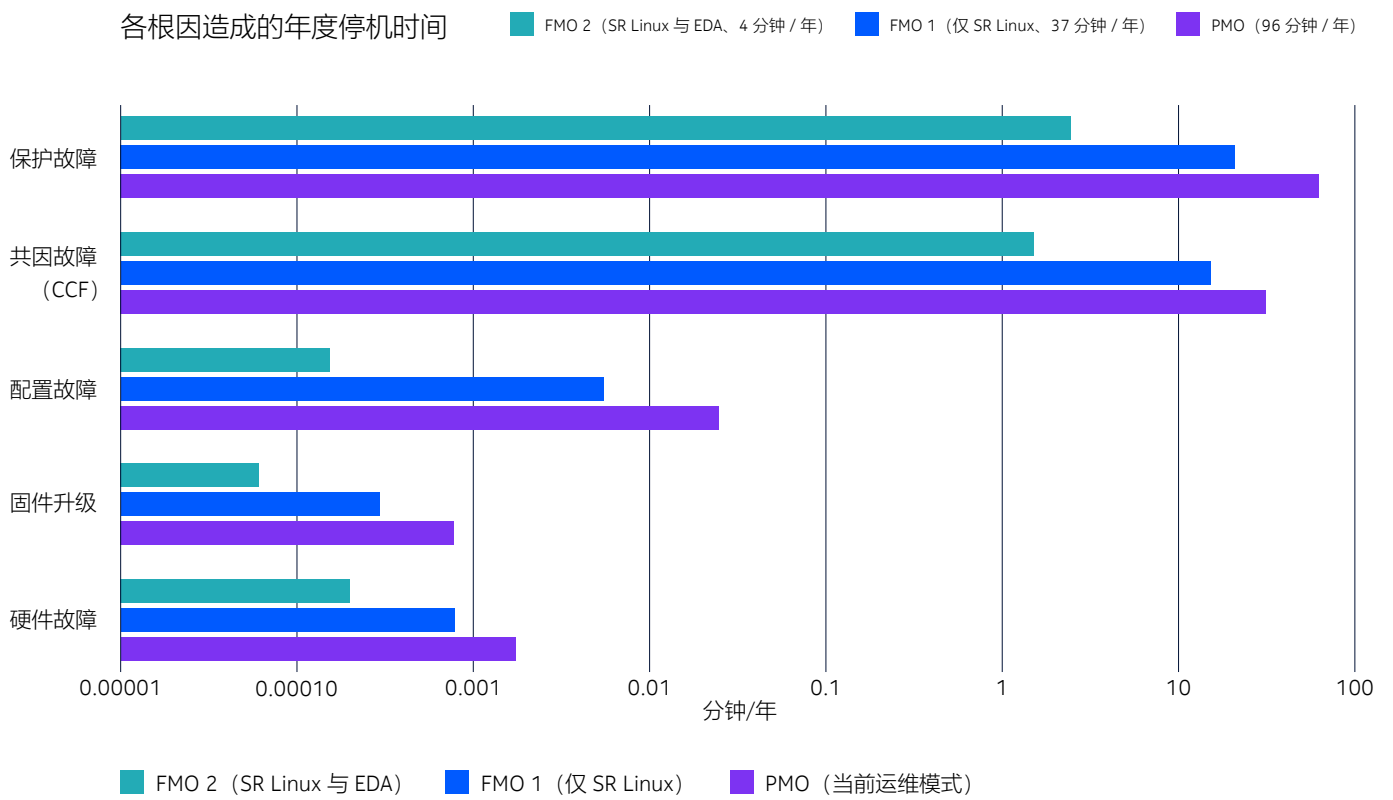
FMO 可在数据中心网络架构运维生命周期的各个阶段显著缩短宕机时间

- 配置与开通任务的宕机时间最多缩短 95%
- 运维与监控任务的宕机时间最多缩短 99%
- 维护任务的宕机时间最多缩短 99%

4.4 影响数据中心网络架构可靠性的关键领域

图 7 对比了 PMO、FMO 1 和 FMO 2 三种配置下，影响数据中心网络架构可靠性的五类故障根因所造成的年度宕机时间（分钟）：硬件故障、固件升级、配置故障、共因故障（CCF）和保护故障。

图 7：影响数据中心网络架构可靠性的关键领域



- 硬件故障由交换机组件（如电源、端口和处理器）的物理缺陷引起。这些故障主要源于制造质量和组件寿命，而非运维实践。
- 固件升级可能因重启周期、兼容性问题或升级错误而导致宕机。宕机时长和频率取决于规划与测试；准备不足会增加故障风险。

- 路由表、VLAN 或策略设置中的配置故障，可能使原本完全正常运行的交换机受损并导致宕机。人工失误或缺少验证会增加风险，而零接触开通（ZTP）等工具有助于降低风险。
- 共因故障（CCF）是指单一故障（例如软件缺陷或路由表错误配置）同时影响主用和备用交换机，使冗余机制失效并造成整个网络架构宕机。
- 当备用交换机无法在 1+1 双活冗余配置中顺利接管时，就会发生保护故障。其原因可能包括利用率过高（负载超过 50%）而无法完全恢复流量、备用交换机的错误配置或软件缺陷，以及故障切换延迟（重新初始化或重新认证）。

除硬件故障外，其他所有根因都与运维有关。网络运维对宕机时间具有关键影响，因为大多数故障（硬件故障除外）都源于配置错误、共因故障和保护问题等运维因素。

模型将传统 PMO 与 FMO 1（仅采用 SR Linux）及 FMO 2（采用 SR Linux 和 EDA）进行对比。结果显示，由于人为错误减少并采用先进工具，FMO 的运维可靠性最多可提升 90%。

硬件故障率数据来自诺基亚系统与网络可靠性工程团队。根据历史数据和可靠性分析，FMO 在硬件故障率方面的提升上限设定为 20%。对于利用率过高、保护错误和故障切换延迟等运维指标，提升幅度最高可达 90%，这是因为 FMO 配置所采用的诺基亚数据中心网络架构解决方案支持增强型运维实践。

4.5 以质量优先的方法提升可靠性

诺基亚数据中心交换解决方案通过现代化硬件、基于 Linux 的开放可扩展网络操作系统（NOS），以及利用微服务、数字孪生和 Kubernetes 的云原生自动化平台，提供前沿创新。该下一代解决方案支持高达 800 Gb/s 及以上的端口速率，并针对传统工作负载和 AI 工作负载进行了优化。

诺基亚解决方案从零开始，专为 leaf-spine IP/EVPN/VXLAN 网络架构而设计，并采用“零人为错误”理念，旨在消除供应商产品和运维中的错误。该解决方案从一开始便以质量优先的方法将可靠性融入其中，采用最新一代商用芯片，并在不影响其他方面的情况下开发高可靠性软件和系统。

凭借 20 多年关键任务系统的专业经验，诺基亚通过严格的开发流程确保质量，开发人员与测试工程师的比例为 1:1（相比之下，行业其他厂商的比例通常为 2.5:1 至 3.5:1）。

作为质量承诺的一部分，诺基亚经常收集客户反馈。其中两项关键指标分别是产品与服务以及销售与市场营销方面的正面反馈比例。诺基亚在这两项指标上的正面反馈率分别达到 95% 和 98%。

4.6 诺基亚 SR Linux 如何提升可靠性

SR Linux 通过开源底座与专用功能的结合提升网络可靠性。由于运行未经修改的 Linux 内核，SR Linux 可获得不受供应商限制的安全补丁，并利用全球 Linux 社区开展的大规模测试，从而降低已知漏洞带来的风险。

- 从零构建的模型驱动架构消除了转换层，降低了复杂性以及配置或转换错误的风险。
- 用于设置/获取操作和流式遥测的单一 gNMI API 进一步简化了运维，最大限度减少错误配置和人为错误。

- 所有进程间通信均采用 protobuf，提供与编程语言无关的结构化消息传递，可带来约 2 倍的性能提升，并使扩展功能更易于开发。
- 该平台还集成了经过现场验证的协议栈和可编程 CLI，从而降低供应商锁定程度、支持定制网络应用，并可通过诺基亚 EDA 平台实现网络架构级编排。这些能力增强了自动化水平和稳定性。
- SR Linux 中的事件处理系统（EHS）可根据端口饱和或丢包情况执行预编程操作。它会自动触发纠正措施，以防止网络性能下降并缓解问题，例如切换端口或下发路由策略。
- 增强型细粒度遥测提供高性能、可编程的监控能力，可在异常影响服务之前及早发现问题。

这些能力共同构建了更加稳健、稳定且易于管理的数据中心网络架构，可直接提高可用性并缩短宕机时间。

有关诺基亚 SR Linux 增值能力的完整列表及其提升数据中心网络架构可靠性的方式，请参阅[表 A1](#)。

4.7 诺基亚 EDA 如何提升可靠性

诺基亚 SR Linux 与 EDA 的组合通过对网络架构生命周期各阶段进行自动化和验证，显著提升网络可靠性。EDA 提供多项关键能力，可提高数据中心网络的可靠性：

- EDA 将变更前检查和变更后检查作为核心验证机制，通过在部署前后模拟并验证配置，确保变更安全且可预测。变更前检查有助于在将变更应用到实时网络之前识别潜在问题；变更后检查则确认所需的网络配置与状态，检测局部故障，并通过采用“atomic transactions”功能防止局部部署。该功能以“全部成功或全部不执行”的方式实施配置变更。
- EDA 的核心组件之一是集成的数字孪生，即生产网络的虚拟化、容器化副本。在任何变更进入实时网络之前，EDA 数字孪生可实现完整的设计验证，从而将资本支出（CAPEX）和运营支出（OPEX）风险降低 80%–90%，并防止配置相关故障。
- ZTP 抽象化能力支持基于意图的上线，并负责安全密钥的生成与分发，从而消除手动配置错误及其造成的宕机。
- 将基础设施视为代码，使运维人员能够以声明的方式定义网络架构意图。这些意图可重复执行、接受版本控制且易于比较，同时能够利用熟悉的 DevOps 工具和人才资源。
- 基于意图的网络架构自动化以 ZTP 为基础，实现零人为错误部署，确保上线过程一致且无差错。基于组的升级服务通过在最短维护窗口内编排并行、自动化的交换机升级，减少业务中断。
- SR Linux 中的事件处理系统（EHS）可根据端口饱和或丢包情况执行预编程操作。它会自动触发纠正措施，以防止网络性能下降并缓解问题，例如切换端口或下发路由策略。
- EDA 平台独特的运维可视性可实现精确的容量规划和快速根因分析，有助于防止过度配置并加快故障修复。这些能力共同构建了高度自动化、可重复且可观测的网络架构，从而最大限度减少人为错误、缩短宕机时间并提高整体网络可用性。

有关诺基亚 EDA 增值能力的完整列表及其提升数据中心网络架构可靠性的方式，请参阅[表 A2](#)。

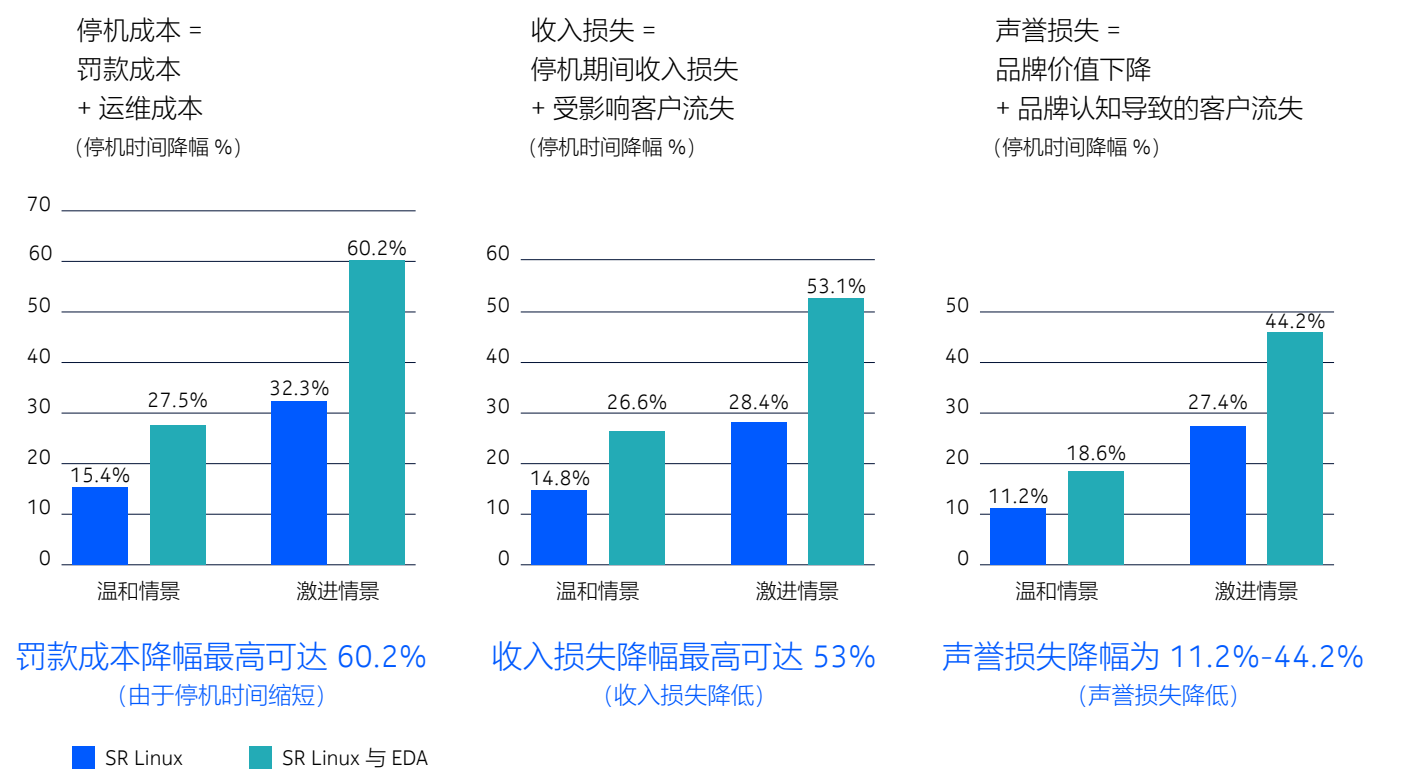
4.8 财务评估

财务影响分析

图 8 中的三张柱状图展示了实施诺基亚 SR Linux，以及 SR Linux 与 EDA，通过降低数据中心网络架构宕机相关损失所能带来的潜在财务收益。该分析基于经行业验证的假设，并纳入以下关键业务指标：

- 罚款，包括监管罚款或合规处罚。
- 中断恢复过程中产生的运维成本。
- 因服务或交易不可用导致的收入损失。
- 宕机造成的客户流失。
- 声誉损失，以品牌价值下降及获客困难等滞后影响进行量化。

图 8：财务收益评估 —— 成本下降



这些图表考虑了电子商务、医疗健康或金融等行业的特定差异。在这些行业中，多种因素会使宕机影响有所不同，但仍可能导致罚款。这些因素包括既定阈值、宕机发生在高峰还是非高峰时段、对消费者服务的连锁影响、监管要求以及交易敏感度。

为涵盖这一变化范围，图 8 展示了两种情景：“温和”（采用保守假设）和“激进”（采用更乐观的高影响假设）。宕机时间缩短与财务节省之间并非线性关系。例如，虽然部署 SR Linux 和 EDA 可使宕机时间最多缩短 96%，但由于基于阈值的监管规定、服务间依赖关系，以及即使短暂中断也会被放大的级联效应，财务成本的降幅相对较低。

宕机成本（罚款 + 运维成本）图以绝对值百分比显示降幅。在温和情景下，SR Linux 可降低约 15%，而 SR Linux 与 EDA 的组合可降低约 27%。在激进情景下，降幅分别提高至约 32% 和 60%；通过最大限度缩短宕机时间，罚款总体最多可降低 60.2%。

在收入损失（宕机期间收入损失 + 受影响客户流失）图中，温和情景下，SR Linux 可降低约 15%，SR Linux 与 EDA 可降低 27%。在激进情景下，降幅分别扩大至 28% 和 53%，表明通过增强可靠性，收入损失风险最多可降低 53%。

第三张图量化了声誉损失（品牌价值下降 + 品牌认知导致的客户流失）。在温和情景下，SR Linux 可降低约 11%，SR Linux 与 EDA 可降低约 18%。在激进情景下，降幅分别扩大至 27% 和 44%，使声誉相关财务影响降低 11.2%–44.2%。

SR Linux 和 EDA 可显著降低成本

- 罚款及运营成本最高可降低 60%
- 宕机期间的收入损失及受影响客户流失所带来的损失最高可降低 53%
- 品牌价值下降及品牌认知不佳导致的客户流失所带来的损失最高可降低 44%

对节省金额进行量化：对一家中型金融机构的影响

图 9 展示了一项案例研究，详细说明从传统数据中心解决方案迁移至诺基亚 SR Linux 和 EDA 所带来的财务收益。该研究基于一家真实中型金融机构的 2024 年数据。

之所以选择金融行业，是因为该行业高度依赖服务可用性，受到严格监管要求、直接消费者互动，以及网络连接对金融交易、收入创造和品牌声誉即时影响的驱动。

该公司的概况包括：市值 94 亿美元，品牌价值 4.7 亿美元，拥有 500,000 名存款客户（家庭 / 企业）、30,000 名健康储蓄账户（HSA）银行业务客户，年收入为 41.79 亿美元。其基础设施包括两个数据中心站点、1,200 名等效全职（FTE）IT 员工和 800 个应用；包含宕机成本在内的年度总拥有成本（TCO）为 1.56 亿美元。数据中心每年服务 3,530,000 名客户（零售和 HSA 账户）。

该公司当前的数据中心解决方案与传统（PMO）基线相当。评估显示，如果该公司选择从现有解决方案迁移至采用 SR Linux 和 EDA 的诺基亚解决方案，其网络可用性将从 3.7 个 9 显著提升至 5.1 个 9。

图 9 汇总了对这家中型金融机构的财务收益评估。

图 9：案例研究 —— 财务收益评估

公司

参考年份

中型金融机构

2024 年

财务详情

市值	94 亿美元
品牌价值	4.7 亿美元
存款客户（家庭 / 企业）	500,000
健康储蓄账户（HSA）银行账户持有者	3,000,000
健康储蓄账户（HSA）银行商业客户	30,000
年度收入	41.79 亿美元

数据中心详情

数据中心站点数量	2
IT 等效全职（FTE）员工数	1,200
应用数量（核心 + 非核心）	800
年度客户数（零售 + HSA 账户）	3,530,000
年度总拥有成本（包括宕机成本）	1.56 亿美元

年度财务影响

	SR Linux	SR Linux 和 EDA
罚款成本降低	~2,400 万 ~ 5,000 万美元	~4,300 万 ~ 9,400 万美元
收入损失降低	~1,800 万 ~ 3,300 万美元	~3,500 万 ~ 6,600 万美元
最大限度减少品牌价值损失	~3,400 万 ~ 7,800 万美元	~8,700 万 ~ 2.07 亿美元

该评估将两种情景 —— FMO 1（仅采用 SR Linux）和 FMO 2（采用 SR Linux 与 EDA）—— 与当前传统解决方案进行比较，后者对应 3.7 个 9 的可用性。迁移至 SR Linux 和 EDA 后，网络可用性可提升至 5.1 个 9，并带来显著财务收益。

如上一节所述，财务影响会因多种因素而异，因此案例研究采用温和和激进两种情景来反映节省金额的范围。以下所列节省区间对应这两种情景。

- 罚款可能包括监管罚款和运维恢复支出。预计采用 SR Linux（FMO 1）可减少 2,400 万至 5,000 万美元；采用 SR Linux 和 EDA（FMO 2）可减少 4,300 万至 9,400 万美元，即在激进情景下最多可降低 9,400 万美元。
- 由服务中断和客户流失造成的收入损失，预计采用 SR Linux 可减少 1,800 万至 3,300 万美元；采用 SR Linux 和 EDA 可减少 3,500 万至 6,600 万美元。由于宕机时间和客户流失减少，这相当于对公司 41.79 亿美元年收入产生 0.4%–1.6% 的正面影响。

- 最大限度减少品牌价值和声誉损失也十分重要，因为严重中断可能使此类损失攀升至数十亿美元（例如，既往案例研究曾记录数十亿美元的资产减记）。与品牌价值损失相关的节省金额，采用 SR Linux 时为 3,400 万至 7,800 万美元；采用 SR Linux 和 EDA 时为 8,700 万至 2.07 亿美元，体现了显著的风险缓解效果。

这些估算基于行业平均值，凸显了宕机时间缩短（例如采用 SR Linux 和 EDA 时缩短 96%）与财务节省之间的非线性关系；该关系受到监管阈值、交易敏感度和连锁效应影响。

尽管当前传统解决方案成本高昂，但 SR Linux 与 EDA 带来的可靠性提升，为中型企业提供了可参考的基准。要以精确金额全面量化收益，还需要结合客户当前的网络性能、成本和收入损失等专属数据，并根据其传统环境和计划迁移方案进行定制。

诺基亚 SR Linux 和 EDA 可为中型金融机构的网络带来切实的成本节省

- 与罚款成本相关的节省约为 4,300 万至 9,400 万美元
- 与收入损失相关的节省约为 3,500 万至 6,600 万美元
- 与品牌价值损失相关的节省约为 8,700 万至 2.07 亿美元

* 以上数据适用于温和情景和激进情景。

5 总结

在当今数据驱动、信息需求旺盛的世界中，可靠的网络是每一项数字交易和服务的基础。数据中心网络架构可靠性研究表明，从传统设备（可用性为 99.981736%）迁移到诺基亚现代化解决方案——仅采用 SR Linux（可用性为 99.993017%），或采用 SR Linux 与 EDA（可用性为 99.999235%）——可将年度宕机时间从 96 分钟缩短至仅 4 分钟，最高可减少约 23 倍。

可靠性的提升可转化为切实的财务收益：罚款和运维成本最多降低 60%，收入损失最多减少 53%，声誉损害最多降低 44%；同时还能赋能运维团队、减少告警疲劳并提升业务敏捷性。

借助诺基亚 SR Linux 和 EDA，运营商现在即可采用“零人为错误”方式，将高可用性从愿景转变为可衡量、可节省成本的现实。

6 了解更多

如需进一步了解 SR Linux 和 EDA 如何为数据中心交换和云基础设施带来更高水平的可靠性、简洁性与适应性，请访问[诺基亚数据中心网络架构页面](#)。

有关数据中心网络架构运维生命周期各阶段的运维职能、任务和工作量分析，请参阅贝尔实验室咨询白皮书《[数据中心网络架构商业案例分析（BCA）](#)》。

7 缩略语

AI	人工智能
BGP	边界网关协议
CAPEX	资本支出
CCF	共因故障
CI/CD	持续集成 / 持续部署
CLI	命令行界面
DCI	数据中心互连
ECMP	等价多路径
EDA	事件驱动自动化
EHS	事件处理系统
ERP	企业资源规划
EVPN	Ethernet VPN (以太网虚拟专用网络)
FMO	未来运作模式
GNMI	gRPC Network Management Interface (gRPC 网络管理接口)
IaC	基础设施即代码
IP	Internet Protocol (互联网协议)
IXR	Interconnect Router (互连路由器)
LCM	生命周期管理
MTTF	平均故障间隔时间
MTTR	平均恢复时间
NDK	NetOps Development Kit (网络运维开发工具包)
NEM	网元管理器
NOS	网络操作系统
OPEX	运营支出
PMO	当前运作模式
QoS	服务质量
SLA	服务等级协议
SNMP	Simple Network Management Protocol (简单网络管理协议)
VXLAN	Virtual Extensible LAN (虚拟可扩展局域网)
ZTP	零接触开通

8 附录 A:

Nokia SR Linux 与诺基亚 EDA 的差异化优势

表 A1：诺基亚 SR Linux 差异化优势

SR Linux 增值能力	功能说明	如何提升解决方案可靠性	适用阶段
未经修改的 Linux 内核	支持供应商中立的安全补丁，并复用现有 Linux 工具	由全球 Linux 社区持续开展测试	D0, D1, D2+
从零构建的模型驱动架构	无转换层	降低复杂性及转换错误	D0, D1, D2+
GNMI	用于设置 / 获取和流式遥测的单一 API	降低运维复杂性，并最大限度减少错误配置	D0, D1, D2+
Protobufs	由 protobuf 驱动的进程间通信实现核心开放架构，性能提升 2 倍，并支持开放的多语言扩展	实现系统组件之间高效、结构化且与语言无关的通信	D0, D1, D2+
经过现场验证的协议栈	- CLI 增强功能对供应商的依赖降至最低 - 优化且可重复的工作流 - 系统调优有助于调试 - 开放且熟悉的实现方式（Python） - 诺基亚 EDA 平台支持在网络架构层面编排 CLI 插件	确保稳健性、稳定性和互操作性，这些是可靠性的核心支柱	D0, D1, D2+
可编程 CLI 插件	- 开发网络应用时最大限度减少对供应商的依赖 - NDK 支持客户开发 NOS（SR Linux）及核心组件的扩展，包括新协议 - 诺基亚 EDA 平台支持在网络架构层面编排 NDK 应用	支持自动化	D1, D2+
增强型遥测	- 细粒度且可编程 - 高性能	支持及早发现问题	D0, D1, D2+
事件处理系统	根据指定条件执行预编程操作	确保更快检测和修复	D2+

表 A2：诺基亚 EDA 差异化优势

SR Linux 与 EDA 增值能力	功能说明	如何提升解决方案可靠性	适用阶段
ZTP	- 抽象化、基于意图的 ZTP - 自动生成并分发安全密钥	通过自动化最大限度降低宕机风险和配置错误	D0, D1
基础设施即代码 —— 声明式意图	- 以 IaC 形式表示基础设施，实现可重复且可靠的自动化 - 将基础设施（网络架构意图）作为代码，便于比较多个网络架构意图版本之间的差异 - 可复用广泛的开发工具和专业能力，便于招聘熟悉相关工具或通用 DevOps 的人才	可重复执行	D1, D2+
网络架构设计	客户可以创建多种网络架构设计方案，并通过详细的线缆连接和逐节点配置实现可视化	减少网络架构设计所需工时并改善运维	D0
使用数字孪生进行设计验证	客户可利用真实网络的数字孪生验证设计。由于 80%–90% 的情景无需真实硬件即可完成验证，因此可显著节省 CAPEX 和 OPEX	降低真实环境中发生配置错误和故障的风险	D0
基于意图的网络架构自动化	适配 ZTP 架构，无需深入的网络专业知识，实现零人为错误并减少工时	确保部署一致且无差错	D1
基于组的升级服务	- 可在较短维护窗口内升级网络架构中的所有交换机 - 并行、自动化升级可缩短维护窗口并减少宕机，从而将业务宕机时间降至最低	减少宕机时间	D2+
网络架构运维	- 独特的运维可视性支持精准容量规划，通过避免过度配置降低 CAPEX - 独特的运维洞察可加快根因分析，从而减少工时和宕机时间	错误防护	D2+
事件处理系统	根据指定条件执行预编程操作	加快检测和修复	D2+

贝尔实验室咨询业务简介

贝尔实验室咨询业务帮助客户运用未来技术，实现持久的商业成功。我们整合业务与服务战略、网络与云基础设施，以及运维与转型等领域的专业能力，打造以实证为基础、可立即应用的解决方案。

贝尔实验室咨询业务与全球领先客户合作，通过加速采用未来技术，启发并推动行业转型。贝尔实验室咨询业务构建可执行、面向特定客户且处于前沿的解决方案。我们利用深厚的行业知识、广泛的经验和分析工具，识别战略机遇、支持决策、优化部署与运维，并帮助客户在业务转型和数字化转型中取得成功。

贝尔实验室咨询业务隶属于诺基亚贝尔实验室，后者是诺基亚享誉全球的研究机构。诺基亚贝尔实验室发明了众多支撑信息与通信网络及相应数字生态系统的基础技术。这些研究成果已获得十项诺贝尔奖、五项图灵奖及众多其他奖项。

如需就可靠性或任何其他技术战略挑战联系贝尔实验室咨询业务，请访问：<https://www.nokia.com/bell-labs/bell-labs-consulting/>

Futurum 简介

Futurum Group 是一家领先的独立研究、咨询、媒体与分析机构，专注于分析新兴技术和颠覆市场的技术。通过旗下公司组合——包括 Futurum Research、Signal65、Six Five Media、Tech Field Day 和 Visible Impact——该机构提供数据驱动的洞察、市场情报和战略内容，帮助全球企业把握技术创新与业务转型的交汇点。

Futurum 与 Solutional 作为值得信赖的研究与内容合作伙伴开展合作，将 Futurum 的分析师资源、媒体能力和传播放大能力，与 Solutional 深厚的主题专业知识和卓越制作能力相结合。双方共同交付高影响力研究、创意资产和多渠道传播项目，将复杂的技术叙事生动呈现给技术受众与商业受众。

关于诺基亚

诺基亚是人工智能时代的全球连接领导者，为全球提供值得信赖的关键网络基础设施。每一天，我们通过卓越的固定、移动，及传输网络，为客户提供所需的性能与安全保障，以推动人工智能驱动的未来。