

企业 SDWAN 边缘设备 IPv6 双栈过渡方案的工程实践

卢健壕¹ 柯义民¹ 吴迪¹
LU Jianhao KE Yimin WU Di

摘要

随着 IPv4 地址资源的日益枯竭和 IPv6 技术的不断更新,企业网络在向 IPv6 迁移过程中面临设备兼容性和业务连续性等挑战,文章围绕企业 SDWAN 边缘设备的部署现状,提出一种面向工程实践的 IPv6 双栈过渡方案,方案从地址规划及控制策略和安全配置等方面展开,设计并实施适配多业务场景的过渡机制,进一步保证 IPv4 与 IPv6 网络的平滑协同。该方案借助在典型企业场景中的验证,实现边缘网络的无中断升级并提升网络灵活性和可持续性,研究结果为企业开展 IPv6 演进提供技术路径和工程参考,具有良好的实用价值和推广意义。

关键词

IPv6 双栈; SDWAN 边缘设备; 过渡方案; 网络部署

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.044

0 引言

IPv6 已成为国家网络发展战略的重要组成部分,企业网络面临从 IPv4 向 IPv6 逐步演进的现实需求,当前大量企业依赖 SDWAN 构建分支互联与业务接入,边缘设备作为网络连接与策略控制的关键节点,在过渡过程中承担着承前启后的重要角色。受限于历史架构以及业务系统兼容性和地址策略差异,直接切换 IPv6 可能导致业务中断或性能下降,逐步部署 IPv6 双栈已成为更为可控的选择,本文立足企业典型网络结构从边缘设备实际部署角度出发,探索一套可复制且可落地的 IPv6 双栈过渡方案,为企业网络升级提供可行路径与实施经验。

1 现网环境与过渡动因

1.1 企业现有 IPv4 网络结构

多数企业当前构建的广域网络仍以 IPv4 地址体系为基础,核心与边缘设备普遍部署静态 IPv4 地址,地址段划分方式以子网掩码固定策略为主,缺乏灵活性与可扩展能力。以一个拥有 20 个分支机构的中型企业为例,其 IPv4 地址池接近耗尽,新增终端设备与分支节点的地址分配已面临严重瓶颈。在现有架构中,IPv4 地址在内外系统之间映射依赖 NAT 策略,企业防火墙与流控策略均围绕 IPv4 地址空间构建,导致网络结构高度依赖地址状态。部分网络依赖私有地址与公网地址双重映射,导致网络路径判断复杂,运维人员在故障排查与路径追踪中常常受到限制。内部网络采用静态路由与区域动态协议并存的模式,在一定程度上维持了业务通信的稳定性,但同时也增加了跨地域管理的复杂度。当业务系

统跨区域部署时,现有的 IPv4 结构在连接可靠性与路径最优性方面已暴露出架构上的瓶颈。

1.2 IPv6 过渡的业务与运维压力

随着各类业务系统云化进程的加快以及 IoT 终端数量的增长,IPv6 接入能力已逐步成为新型业务平台与运营系统的默认要求。一些上游供应链平台与云服务商已开始限定 IPv6 地址作为默认通信协议,部分公共 SaaS 服务仅开放 IPv6 白名单策略接入,企业内部系统在访问外部平台时受到地址兼容性约束。在运维层面,网络管理平台在 IPv6 地址规划与监控支持方面尚不完备,传统 IPv4 的基于子网与地址段的管理方式不再适用,IPv6 的分层结构与地址自动生成机制为资产识别与安全管理带来新的挑战。部分 IT 部门在早期测试阶段已经部署了 IPv6 通道,然而在涉及访问控制、日志审计与双协议环境切换时缺乏统一标准,导致网络事件定位不精准。以某大型企业为例,其数据中心出口每日 IPv6 访问流量已超过 IPv4 访问的 1/3,运维团队需要在现有监控工具中手动补充 IPv6 规则模板,增加了事件响应时长与配置失误风险。

1.3 SD-WAN 边缘设备的部署现状

在广域网连接需求日益复杂的背景下,越来越多企业采用 SD-WAN 技术对分支网络进行统一编排与策略管控,边缘设备作为数据面与控制面连接的核心节点,其部署数量在三年内已增长超过 3 倍。当前大多数企业在全国范围内部署超过 50 台 SD-WAN 边缘设备,这些设备承担着分支到总部与云平台的互联任务,同时集成了路由、VPN、QoS 与链路冗余等功能。部分设备已具备 IPv6 协议栈基础功能,但在策略转发、地址优选与隧道加密方面尚未全面支持 IPv6 双栈环境。设备厂商的版本迭代节奏与企业自身的升级窗口存在错配,

1. 中广核智能科技(深圳)有限责任公司 广东深圳 518026

导致软件与硬件之间出现兼容性不一致的现象。部分机型仍以 IPv4 地址配置为默认参数，启用 IPv6 需手动调整系统级设置，且部分管理接口在启用 IPv6 后存在稳定性问题，在实际部署中多数企业采用本地转发策略结合中心控制策略协同部署，IPv6 策略在分支下发过程中面临地址自动生成与静态策略冲突的实际障碍^[1]。

2 双栈过渡方案设计

2.1 IPv6 地址分配与路由策略

企业网络部署 IPv6 双栈时，地址分配策略决定了后续网络结构的可维护性与可扩展性。在现有 IPv4 网络中，地址分配多依赖 DHCP 服务器或静态地址配置，而 IPv6 环境支持 SLAAC 与 DHCPv6 两种机制，二者在边缘设备部署中具有不同适用场景。结合企业分支数量增长趋势以及管理效率需求，SLAAC 方式更适用于轻量型边缘接入节点，其地址前缀由路由器通告自动下发，配置简洁但缺乏集中控制。对于涉及策略匹配与安全审计的核心分支，应采用 DHCPv6 模式结合前缀代理机制进行地址分配，并在中心控制器中统一记录设备地址映射信息。在一项多站点部署项目中，核心节点使用静态 IPv6 地址与 DHCPv6 保留绑定相结合方式，边缘节点采用前缀推送与接口自动生成机制，稳定运行超过 18 个月。路由策略方面，现网中已部署 OSPF 或静态策略的 IPv4 结构在引入 IPv6 后需设计独立路由域，建议采用 OSPFv3 或 BGPv6 进行路径控制，并在双栈结构中引入策略路由对流量进行分发。

2.2 双栈环境下 DNS 与安全配置

在双栈架构中 DNS 系统需同步支持 AAAA 记录解析，并维持 A 记录服务的正常运行。企业自建 DNS 平台若长期仅支持 IPv4 解析，需升级解析服务端以支持 IPv6 解析请求，并统一优化 DNS 转发路径与递归查询行为。在过渡阶段，客户端解析优先级受操作系统与浏览器策略影响，部分终端默认优先使用 AAAA 记录接入外部服务，而部分服务器侧 DNS 返回顺序对客户端行为产生干扰。DNS 中转策略需在 SD-WAN 控制器中配置统一的分支转发规则，保证跨协议环境下的域名解析行为可控。在一次项目中，部署在总部的数据中心 DNS 集群迁移至双协议架构后，边缘设备需配合新增 IPv6 ACL 策略，对外部递归 DNS 请求端口进行限制，避免安全域泄露与异常回环。安全策略层面，现有防火墙、IPS 与 ACL 均基于 IPv4 策略构建，IPv6 协议的引入要求设备支持扩展 IPv6 地址匹配与报文识别能力。由于 IPv6 地址段长度较长且结构更复杂，策略配置过程需结合地址前缀与子网归属进行逐条校验，并引入基于接口的区域匹配机制替代传统地址段白名单。

2.3 控制面与数据面协议兼容方案

SD-WAN 系统的控制面协议构成了整个网络策略与编排

的基础，在双栈环境中需要对控制链路的可达性与稳定性进行专项设计。大多数 SD-WAN 控制器在部署时依赖 IPv4 地址进行注册与隧道建立，部分设备支持静态配置 IPv6 控制地址但不支持双地址自动切换。为避免因地址不一致导致控制隧道断链，建议统一将控制面隧道配置为主用 IPv4 与备用 IPv6，采用优先级判定机制进行状态选择。在实际部署案例中，有企业在全部边缘设备中激活了 IPv6 控制路径测试功能，发现部分链路在跨运营商场景下 IPv6 连接延迟超过 IPv4 路径的两倍，需结合物理链路情况动态优化路由优选策略。数据面协议中，VPN 隧道的双栈支持需特别关注 MTU、封装类型与端点地址兼容性，GRE 与 IPsec 两类隧道在不同厂商设备中对 IPv6 封装行为存在差异，建议在隧道建立前完成协商参数对齐，并配置明确的 keepalive 机制以确保隧道状态可实时上报^[2]。

3 工程实施与优化实践

3.1 边缘设备配置与升级流程

在 IPv6 双栈过渡项目中，边缘设备的配置与版本升级是决定方案落地效果的核心环节。现网中的 SD-WAN 设备大多以 IPv4 参数为基础模板构建配置文件，新版本固件支持 IPv6 功能后需要重新梳理接口绑定逻辑与策略模板结构。在实施阶段需明确设备的支持范围与协议栈能力，对不同型号与厂商设备进行功能对比与差异化配置。在一组跨地域部署中，共涉及 64 台边缘设备，其中有 12 台设备需完成操作系统升级以启用 IPv6 数据面能力。升级操作采用分批滚动方式进行，每批次不超过 10 台设备，升级完成后需进行接口状态回查、控制链路连通性检测以及隧道恢复测试。在配置实施方面，需在原有模板中引入 IPv6 地址变量，并对 DNS、NTP、GRE/IPsec 等基础服务进行 IPv6 地址同步替换。配置模板同步采用集中编排与分支节点局部覆盖相结合方式，防止因统一下发策略导致本地接口失联。在配置应用前，对关键路径如总部出口与公网访问链路进行独立验证，避免升级过程中发生策略冲突或地址解析异常。为保持原有业务不中断，升级过程中优先启用 IPv6 备用路径验证机制，逐步引导部分业务流量切换至 IPv6 路径，为后续验证与调整留出缓冲空间。

3.2 联调验证与问题处理机制

在边缘设备完成配置并具备 IPv6 通达能力后，系统需要进入端到端联调与验证阶段，该阶段主要集中在控制面注册状态、数据面转发路径以及业务系统访问能力等方面的全面验证。在一次典型部署项目中，从总部到异地分支共建立 42 条 VPN 隧道，其中有 9 条在启用 IPv6 地址后出现注册异常，经排查发现部分设备启用了自动 MTU 协商机制，在 IPv6 链路上触发报文截断行为导致隧道协商失败。问题处理过程中需结合报文抓取与控制日志进行逐层分析，使用设备内置诊

断命令对转发状态、策略匹配与接口健康情况进行溯源。DNS 解析异常是双栈环境中较为常见的问题之一，一些应用在访问外部系统时默认请求 AAAA 记录，但实际网络路径未开放对应出口通道，需调整边缘防火墙策略并同步升级 DNS 代理转发配置。为提升问题响应效率，在控制平台中构建了 IPv6 链路健康监测模板，包含链路时延、丢包率与路径变化趋势图表，定时采样分析故障前后的链路状态变化。在分支现场部署人员完成本地验证后，调度远程运维团队完成回归测试并记录日志指标，对未达到预期性能的节点进行回退处理或参数调整，最终形成完整的过渡期问题清单与处理记录，为后续批量部署积累复用经验^[3]。

3.3 过渡过程中的性能调优策略

在 IPv6 双栈正式部署后，网络性能表现直接影响业务系统的响应速度与稳定性。过渡期内由于双协议并存，部分链路在解析、转发或协议封装阶段产生附加开销，需对链路性能进行精细调优。以总部出口链路为例，在激活 IPv6 策略后平均访问延迟上升约 30 ms，初步定位为策略路由未能覆盖完整地址段导致回源路径跳数增加。针对这一情况，更新中心路由器的 BGPv6 策略过滤规则并对静态路由表执行收敛优化，将部分低频访问前缀迁移至备用路径以减少主链路压力。在边缘设备转发层，部分设备在 IPv6 数据包处理时启用深度包检测模块，引发 CPU 资源异常波动，经调整检测粒度与事件采样频率后资源占用趋于稳定。在数据传输过程中，引入链路优选模块对 IPv4 与 IPv6 路径进行实时对比，并根据网络状态动态调整主备顺序，在某一分支站点实测中，切换主路由后丢包率下降 2%。在控制面调度机制方面，优化策略更新频率与下发间隔可显著降低策略抖动频率，在测试网络中减少 1/3 的配置重传次数。过渡阶段对性能波动需设置阈值告警机制，借助异常值触发链路重测流程并结合业务负载分析进行比对，提升整体过渡期间的网络稳定性与业务连续性^[4]。

4 效果评估与经验总结

4.1 双栈环境下的网络稳定性评估

双栈环境的网络稳定性评估覆盖控制链路连通性、数据路径转发表现与隧道建立流程等关键层面。监测周期为连续 10 天，监测对象为总部与 8 个典型分支之间的通信路径。每 2 h 采集一次性能数据，评估项目包括控制隧道时延、数据访问时延与隧道建立时长。测量过程中分别对 IPv4 与 IPv6 进行对照取样，确保评估结果覆盖全部部署协议路径。在 DNS、BGP 更新、策略下发与流量转发等方面，同步记录异常事件数量与日志完整性状态，评估协议栈稳定程度及其对上层业务的影响。

从表 1 中的数据可以看到，IPv6 在控制隧道中增加了 6 ms 的往返时延，相比 IPv4 路径略高，其原因主要集中在

路径跳数多于 IPv4，并且部分运营商链路中未启用本地转发优化策略。数据面访问时延的差距为 5 ms，在业务系统表现中未引起明显访问缓慢现象。隧道建立时长在 IPv6 环境下比 IPv4 多 1 ms，这与协议头部处理开销及设备端缓存策略有关。在进行双栈环境下的网络稳定性评估时，还需要关注不同协议栈对网络负载和拥塞控制机制的影响。在 IPv6 环境下，由于 IPv6 的地址空间较大，路由器需要处理更多的路由信息，这可能会导致在高流量情况下的网络拥堵问题。因此，评估中要进一步对不同流量负载下的控制链路时延变化进行详细记录。在网络高峰期，可能会出现 IPv6 路径的时延增幅高于 IPv4 的现象，尤其是在运营商链路的异构环境中，部分链路尚未完全支持 IPv6 的转发优化策略，这就要求在评估过程中要定期检查链路优化方案，并根据实际情况调整负载均衡和流量优先级设置，确保 IPv6 流量能够平稳地分配到网络中。

表 1 双栈运行稳定性评估数据

指标项目	IPv4 平均值 /ms	IPv6 平均值 /ms
控制隧道往返时延	38	44
数据面访问时延	52	57
隧道建立时长	6	7

4.2 工程实施中的关键经验

双栈部署过程中的关键经验涵盖了设备配置优化、版本匹配协调与策略模板重构等多个方面。在部署任务中共涉及 64 台边缘设备，其中有 17 台设备存在 IPv6 固件版本缺失问题，需统一完成升级操作。升级过程中采用控制器批次推送机制，并配置自动回滚策略以应对中断风险。在策略模板处理方面，原有 IPv4 地址策略共计 23 条，其中 11 条在转换为双栈后出现了匹配失败的问题。为解决该问题，使用接口绑定与地址范围划分结合方式，将 IPv6 策略以逻辑分组方式合并入策略集合。控制面注册策略在异地链路上遭遇不一致情况时，利用 3 级联动日志机制定位路径抖动位置并优化转发优选策略。在一项验证操作中，启用了静态 IPv6 路由后，1 台核心节点的配置下发速度提升 26 s 以上，减少了整体同步时间窗口。联调阶段的经验显示，IPv6 报文调试需使用专属路径回溯功能进行逐包分析，并结合 ICMPv6 测试对链路中断进行精确判定^[5]。在双栈部署过程中，针对设备的版本升级和固件支持的差异性问题的，企业必须有针对性地制定升级计划和实施方案。例如，在升级过程中，部分设备可能因固件版本不匹配而无法支持 IPv6 完整功能，导致功能异常或网络中断。因此，建议在部署前对设备厂商提供的技术文档进行详细审核，确认设备的 IPv6 支持范围，并制定相应的升级策略。对于出现 IPv6 固件版本缺失的问题，需通过与厂商沟通，争取固件升级支持，避免使用过时或不兼容的设备。此外，部署过程中要严格控制升级顺序和节奏，尤其是对不同型号设备的兼容性测试要提前做好规划。在设

一种分布式可重构电池组同步控制技术

马海峰¹ 张一童¹ 李文番¹ 王焱雄¹ 王军雄¹
MA Haifeng ZHANG Yitong LI Wenfan WANG Yaoxiong WANG Junxiong

摘要

针对高压电池组普遍采用电芯串联技术存在的安全性、可靠性、维修性等方面的弊端，文章提出了一种分布式可重构高压电池组控制技术。首先，论述了分布式可重构高压电池组微系统组成及工作原理，分布式同步控制技术为该可重构电池组系统稳定、可靠工作的核心；然后，重点从高压电池组系统延时分析、同步控制硬件设计、系统软件流程设计等几方面详细阐述了一种分布式强制同步控制技术；最后，通过对典型试验数据分析，验证了该分布式可重构高压电池组控制技术切实可行，可以解决实际工程问题。该电池组微系统具有灵活性、可靠性、稳定性等优势，故分布式可重构电池组控制技术具有较高研究价值。

关键词

高压电池组；可重构技术；分布式系统；强制同步技术

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.045

0 引言

随着新能源汽车和储能市场的快速发展，作为核心的电池管理技术愈发重要^[1]。对于某些特定应用场景，要求大功率输出，长时间不间断工作，通常采用高压母线方式，需要大量电池单体串并联使用^[2]。串联高压电池组依赖各级电芯正常工作，当中间某电芯出现故障，整个电池组将无法工作，

从而降低了电池组可靠性；由于制造工艺问题，各电芯之间存在内阻、储能容量、放电特性等差异，这无疑增加了电池均衡难度；同时传统单体高压电池体积大，电压高、产品重，为系统维护带来困难^[3]。为克服上述单体式串联高压电池组弊端，本文论述了一种分布式可重构高压电池组设计方法，利用高精度同步控制技术将分布式低压储能单元构建为高压电池组微系统。该分布式储能单元采用模块化、标准化设计，具有低电压、小体积、轻量化、安全性高等特点，从而为系

1. 西北机电工程研究所 陕西咸阳 712099

备配置和策略模板的更新中，应特别注意 IPv6 的地址分配规则与 IPv4 策略之间的匹配问题，避免因地址冲突或规则不一致导致的策略失效。

5 结语

本方案结合企业现网结构与 SDWAN 边缘架构特性，设计出可落地的 IPv6 双栈过渡路径，并在工程实践中完成配置与调优等关键环节，可以进一步验证方案的可行性与稳定性，部署结果表明双栈架构在保障业务连续性的同时具备良好的扩展基础，面向未来网络演进 IPv6-only 将成为重要方向，相关部署经验为后续规模化迁移提供技术支撑与策略参考。

参考文献：

[1] 王殿铭. 支持 IPv4/IPv6 双栈的 5G 通信网络可靠性组网部署分析[J]. 长江信息通信,2025,38(9):189-191.
[2] 顾留锁. 基于等保 2.0 的校园区域边界双栈 IPv4/IPv6 网络

升级策略分析[J]. 集成电路应用,2025,42(9):236-237.
[3] 那刚, 杨静, 胡海旭, 等. 敦煌研究院 IPv6 过渡方案的双栈技术模拟实验[J]. 自动化应用,2025,66(10):287-290.
[4] 艾武. IPv6 和 IPv4 双栈技术在铁路综合视频监控系统的 应用[J]. 中国铁路,2025(3):120-125.
[5] 黄琳, 黄劼, 蒋平. 支持 IPv4/IPv6 双栈的 5G 通信网络可靠性组网部署研究[J]. 现代电子技术,2025,48(1):102-106.

【作者简介】

卢健壕（1988—），男，广东深圳人，硕士，中级工程师，研究方向：网络技术。
柯义民（1990—），男，广东深圳人，本科，中级工程师，研究方向：网络技术。
吴迪（1982—），女，广东深圳人，本科，中级工程师，研究方向：网络技术。

（收稿日期：2025-12-02 修回日期：2026-03-12）