DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0139-05

# 基于 IPv6 的光纤通信网络中继节点部署优化模型

王　丰, 李梦琳, 马国柱, 李爱华

(湖北省电力规划设计研究院有限公司,武汉 430040)

**摘　要**:光纤通信网络在满足用户多样化需求的同时,也因其高带宽、低损耗等优势成为现代信息基础设施的重要组成部分。中继节点的合理部署对降低网络能耗、提升通信质量具有关键作用。然而,传统部署方法常因地址配置冲突、节点覆盖不均、网络延时长等问题,制约了光纤通信网络整体性能的进一步提升。为此,构建了基于 IPv6 的光纤通信网络中继节点部署优化模型。利用无线传感器网络应用控制协议(wireless sensor network application control protocol,WSNACP)完成无状态地址自动配置,避免出现地址配置冲突问题。采用移动 IPv6 协议,通过成员节点收取由簇头发出的路由器公告报文,观察其是否发生移动,完成光纤通信网络中继节点自组织成网,实现光纤通信网络中继节点部署优化。实验结果表明:所构建模型应用后可完成无状态地址自动配置,提升光纤通信网络的覆盖面积,降低光纤通信网络通信平均延时以及通信开销。

**关键词**:IPv6;光纤通信网络;中继节点;自组织成网;WSNACP 协议

**中图分类号**: TP18;TP393.04;TN925　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-7241(2026)07-0139-05

# Optimization model of relay node deployment in optical fiber communication network based on IPv6

Wang Feng, Li Menglin, Ma Guozhu, Li Aihua

( Powerchina Hubei Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China )

**Abstract**: Fiber optic communication networks become an important component of modern information infrastructure due to their advantages of high bandwidth and low loss, while meeting the diverse needs of users. The reasonable deployment of relay nodes plays a key role in reducing network energy consumption and improving communication quality. However, traditional deployment methods often suffer from issues such as address configuration conflicts, uneven node coverage, and long network latency, which hinder the further improvement of the overall performance of fiber optic communication networks. Therefore, an internet protocol version 6 (IPv6) based relay node deployment optimization model is built. Use the wireless sensor network application control protocol (WSNACP) protocol to complete the stateless address automatic configuration to avoid address configuration conflict. Using the mobile IPv6 protocol, the member node receives the router announcement message sent by the cluster, observes whether it moves, completes the self-organization of the optical fiber communication network relay node into a network, and realizes the deployment optimization of the optical fiber communication network relay node. The experimental results show that the model can complete the stateless address automatic configuration, improve the coverage area of the optical fiber communication network, and reduce the average communication delay and communication overhead of the optical fiber communication network.

**Keywords**: IPv6; optical fiber communication network; relay node; self organized network; WSNACP protocol

光纤通信网络可以在满足用户需求的同时,给用户带来便利。光纤网络中继节点的合理部署,对减少光纤通信网络节点能量消耗,提升网络通信性能具有重要意义[1]。

许多相关学者对光纤网络中继节点部署优化展开相关研究,如 Li 等[2]研究了一种双跳放大转发多输入多输出中继通信系统。通过分离协议,中继节点从源节点发送的信号中获取射频能量,并利用获取的能量将信号从源节点转发到目标节点。王鸿鹏等[3]用禁忌搜索算法合理部署网络节点,但是此算法对空间有要求,空间需求量大。孙环等[4]利用萤火虫算法优化无线网络节点部署,但是此算法无法跳出局部最优困局,且收敛速度慢,具有一定局限性。

光纤通信网络发展和互联网的广泛应用,使 IP 成为统一的规范协议[5]。IPv6 协议可以兼容其他协议,地址容量增大,地址空间实现无状态自动配置,减少路由器对包头的处理开销[6-7]。为此,本文构建基于 IPv6 的光纤通信网络中继节点部署优化模型,并通过实验验证了所构建模型可以有效提升光纤通信网络可靠性,使网络覆盖更广泛。

**收稿日期**:2025-03-03;**录用日期**:2025-04-06

**基金项目**:湖北省自然科学基金项目(2021JJ50402)

**作者简介**:王　丰(1985-),男,高级工程师,研究方向为电力通信设计、物联网。

**引用本文**:王丰, 李梦琳, 马国柱, 等. 基于 IPv6 的光纤通信网络中继节点部署优化模型[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):139-143. (Wang Feng, Li Menglin, Ma Guozhu, et al. Optimization model of relay node deployment in optical fiber communication network based on IPv6[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):139-143.)

# 1 光纤通信中继节点优化模型

## 1.1 光纤通信网络中继节点结构

光纤通信网络中继节点硬件结构如图1。

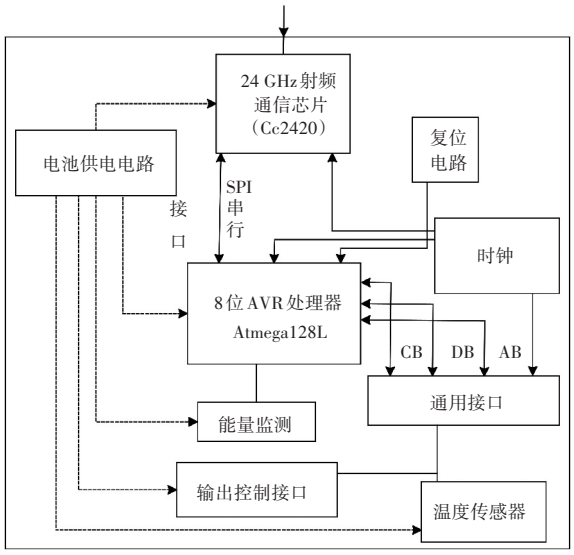



**图1 节点硬件系统结构**

Fig. 1 Node hardware system structure

由图1可知,所构建的节点硬件系统包括通信芯片、多种电路及接口、微处理器和传感器等构成。

微处理器本文选取的是AVR高端处理器,其芯片为ATMEAG128L-64I,电池规格为9 V。为了使不同参数硬件设备符合系统接入需求,模型配置了适配的电路通用接口,以方便接入各个节点的输出控制器。同时该接口与微控制单元(microcontroller unit,MCU)、数据采集模块相连。输入为模拟信号的部件同MCU之间的信号传输形式为通过总线形式接入,此方式可以节约能源,如控制器、电数据收集电路等。结合所有电路特点,设置不同的时间周期,到自己的时间周期时,才可和MCU完成通信,其他时间不工作,从而达到节省通信能耗的目的。

## 1.2 基于Ipv6的无状态地址自动配置

### 1.2.1 自动配置过程

基于IPv6自动配置无状态地址存在迁移简单,配置多变以及随插随用等优势,其配置包括链路本地址的配置及全球单播地址的配置两个阶段[8-10]。如果在重复地址检测(duplicate address detection,DAD)下发现产生地址错误现象,此时地址自动配置失效,导致接口不能正常运行,需要通过手动方式配置该接口的本地链路地址以确保其正常运行。

主机单播地址配置流程如下。

1) 光纤通信网络中继节点以链路地址成功配置为基础[11-12],向路由器传递推荐标准(recommended standard,RS)报文,批准获取的RS报文前缀信息用于无状态地址自动配置。

2) RS报文被路由器接收后,回传包含RS报文前缀信息的单播路由器通告(request advertisement,RA)报文,并每间隔一段时间回传一次组播形式RA报文。

3) RA报文被中继节点接收后,暂态单播地址依据配置详情和前缀信息产生。并应用DAD检测通过传输邻居请求(neighbor solicitation,NS)报文校验中继节点暂态地址唯一性。

4) 经过DAD检测的NS报文被剩余节点接收后,若该地址被应用,出现应对NS的邻居通告(neighbor advertisement,NA)报文,反之删除该报文。

5) 若中继节点未取得DAD检测获取的NA报文,表明该地址具有唯一性,需应用该暂态地址对接口进行重新设置,并转换暂态为常态。地址配置成功后,路由器每间隔固定时间传输一次NS报文,衡量该地址是否有效。

### 1.2.2 WSNACP网络配置协议

为避免无状态地址自动配置过程中产生的地址配置冲突问题,选取WSNACP作为网络配置协议。该冲突概率受无线传感器网络中继节点数量 $n$ 、地址空间大小 $d$ 影响,被挑选地址产生冲突的概率用 $p_c(d,n)$ 表示为

$$p_c(d,n) \approx 1 - e^{-n}\left[\frac{dn}{d^2}\right]^{n-d-\frac{1}{2}} \tag{1}$$

地址配置过程中,获取独一地址对第1、第2个节点的概率分别是1、$\frac{d-1}{d}$,可推出第 $n$ 个节点选取地址未发生冲突概率用 $p_n(d,n)$ 表示为

$$p_n(d,n) = \frac{d-1}{d}\cdot\frac{d-2}{d},\cdots,\frac{d-n+1}{d} \tag{2}$$

采用Stirling转换得到最终的冲突概率公式为

$$p_{c1}(d,n) = 1 - \left(1 - \frac{n}{d}\right)^{n-d-\frac{1}{2}}\cdot e^{-n} \tag{3}$$

从以上公式可得出概率 $n$ 和 $d$ 成反比关系,当 $d$ 数值越大时,产生冲突概率越小。通过应用WSNACP协议可降低网络配置后的地址冲突。

## 1.3 光纤通信中继节点自组织成网

移动IPv6协议的光纤通信网络中继节点自组织成网原理为成员节点收取由簇头发出的路由器公告报文,观察中继节点是否发生移动,从而进行组网运算[13-16]。移动IPv6协议的具体操作步骤如下。

移动的中继节点接收路由器通知,判断有无移动现象出现。连接于本地链路的移动中继节点没有出现移动。连接于外地链路上的移动中继节点,通过自动配置地址方式获取中转地址,并将其传输到原簇头及对端通信节点。针对未知对端通信节点传输的数据包,需经原簇头转发后通过隧道向中转地址传输,反之如了解的情况下,数据包到移动中继节点的输送通过IPv6目标地址的报头径直发送,基于移动IPv6的光纤通信网络中继节点自组织成网过程如图2所示。

移动的中继节点可在需要时发送绑定优化报文给对端通信节点,其流程与向原簇头发送相同,目的是告知原

簇头与通信对端当前的中转地址。原簇头及对端通信节点送到移动中继节点的绑定明确报文负责对绑定优化报文携带信息进行确认。二者可被动接受报文也可主动发送报文请求,以便快速完成最终转交地址顺利注册。

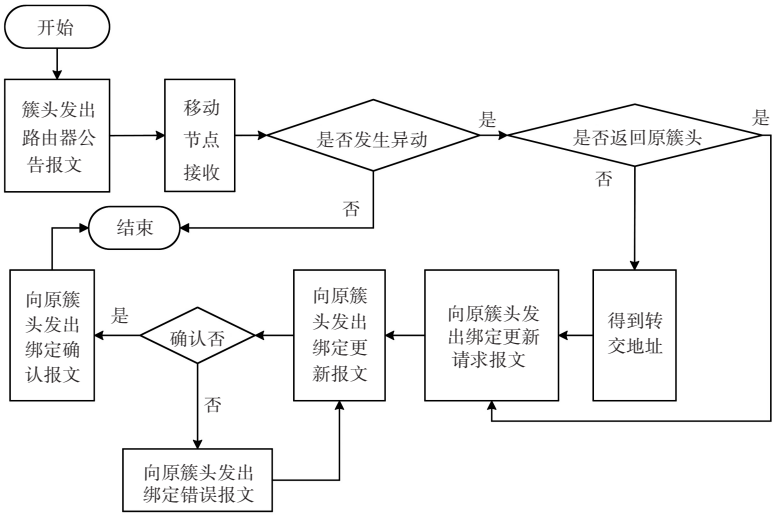


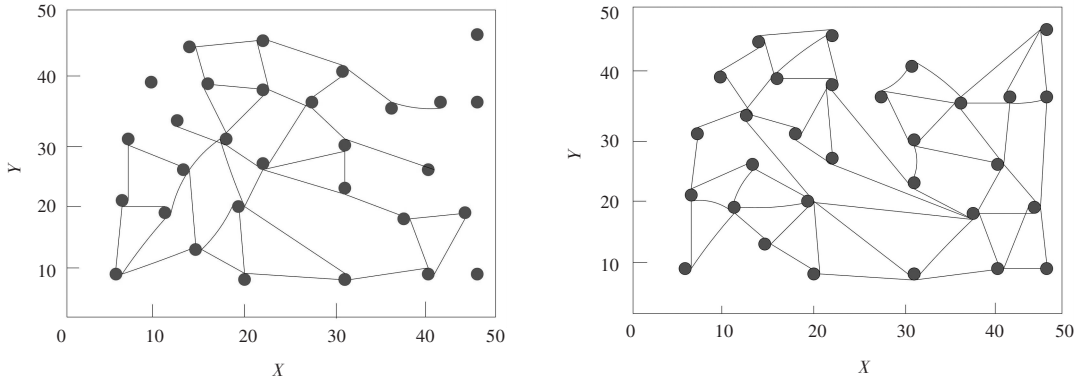

**图 2　基于 IPv6 的网络中继节点自组织成网**

Fig. 2　Network relay nodes self organizing into a network based on IPv6

## 2　实验分析

实验用 OPNET Modeler 仿真平台设置 2 个光纤通向网络场景,场景 1 设置 0.5 km×0.5 km 仿真区,中继节点数量为 30。场景 2 设置 2 km×2 km 仿真区,中继节点数量为 120。

以场景 1 为例,统计本模型应用前后光纤通信网络中继节点分布情况,结果如图 3 所示。




(a) 30 个中继节点的随机分布　　(b) 本文模型应用后中继节点分布

**图 3　光纤通信网络节点分布情况**

Fig. 3　Distribution of nodes in fiber optic communication network

由图 3 可看出,本模型应用后可显著优化光纤通信网络布局结果,使网络的覆盖面积更大,充分发挥各个节点的通信作用,不存在闲置中继节点,中继节点和节点之间具有稳定性,提升网络通信效果。

以场景 2 为例,通过自组织成网实验验证本模型应用后网络无状态地址自动配置情况,设定包括 2 个班,其中,2 班的成员节点为中继节点。实验过程中由 2 班节点移动到 1 班,IPv6 报文内容如下。

图 4 为 2 班成员节点收到 1 班发出的路由器报文,从而判定节点是否发生移动。按照路由器报文的前缀信息获取中转地址,发送绑定优化请求报文,IPv6 报文报头如图 5 所示。

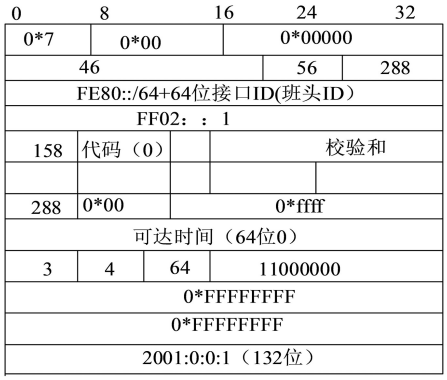



**图 4　1 班簇头发出路由器公告报文**

Fig. 4　Router announcement message issued by cluster head 1

| 0 | 8 | 16 | 24 | 32 |
|---|---|---|---|---|
| 0*6 | 0*00 | 0*00000 | | |
| 38 | | | 58 | TTL |
| 2001：：1/64+64位接口ID（转交地址） | | | | |
| 2001：：2/64+64位接口ID（2班簇头tID） | | | | |
| 159 | 3 | 2 | 3 | |
| 0*00 | 0*00 | 211 | 18 | |
| 2001：：2/64+64位接口ID（2班成员节点tID） | | | | |
| 62 | 0 | 0*00 | 0*00 | |
| 校验和 | | 0*0000 | | |

**图5 2班成员节点绑定更新报文**

Fig. 5 Binding update message for member nodes of class 2

2班接收绑定优化请求报文,报文内容如图6所示。

| 0 | 8 | 16 | 24 | 32 |
|---|---|---|---|---|
| 0*6 | 0*00 | 0*00000 | | |
| 42 | | | 58 | TTL |
| 2001：：1/64+64位接口ID（转交地址） | | | | |
| 2001：：2/64+64位接口ID（2班簇头tID） | | | | |
| 159 | 3 | 2 | 3 | |
| 0*00 | 0*00 | 211 | 18 | |
| 2001：：2/64+64位接口ID（2班成员节点tID） | | | | |
| 62 | 0 | 0*05 | 0*00 | |
| 校验和 | | 序列号 | | |
| 0*E0 | 0*00 | 0*FFFF（有效期） | | |
| 12 | 3 | 0*00 | 0*00 | |

**图6 绑定优化报文**

Fig. 6 Binding optimization message

如果外地回到原地,在有效期范围内字段值是0,0的含义是请求删除绑定记录。2班簇头接收绑定优化报文,并通过成员节点发出状态字段是8位且没有符号整数的绑定确认报文,移动中继节点利用此字段值评判绑定优化成功与否。此字段值比128小判定更新成功,反之则未成功。如果绑定优化未成功,则2班簇头发送绑定错误报文给节点,报文内容如图7所示。

| 0 | 8 | 16 | 24 | 32 |
|---|---|---|---|---|
| 0*6 | 0*00 | 0*00000 | | |
| 46 | | | 45 | TTL |
| 2001：：2/64+64位接口ID（2班簇头tID） | | | | |
| 2001：：1/64+64位接口ID（转交地址） | | | | |
| 135 | 3 | 3 | 2 | |
| 0*00000000 | | | | |
| 2001：：2/64+64位接口ID（2班成员节点tID） | | | | |
| 62 | 0 | 0*07 | 0*00 | |
| 校验和 | | 状态 | | 0*00 |
| 家乡地址 | | | | |

**图7 绑定错误报文**

Fig. 7 Binding error message

状态字段是8位及没有整数符号表示错误的原因。移动的中继节点可以有多个家乡地址,家乡地址有无问题是通过移动中继节点应用此字段内容判定。无论绑定成功与否,重新发出绑定更新请求报文,直到完成光纤通信网络中继节点自组织成网。综合上述实验内容可知,本模型应用后可以完成光纤通信网络中继节点自组织成网,实现网络无状态地址自动配置。

为验证本模型应用WSNACP协议进行光纤通信网络配置时的优势,选取互联网标准架构(internet standards architecture,ISA)、网络配置协议(network configuration protocol,MSNETconf)为对比,以场景2为试验场所对三种协议平均延时以及通信开销进行对比,结果如图8、图9所示。

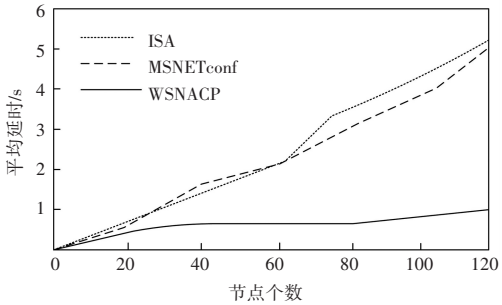



**图8 协议平均延时对比**

Fig. 8 Comparison of average protocol delay

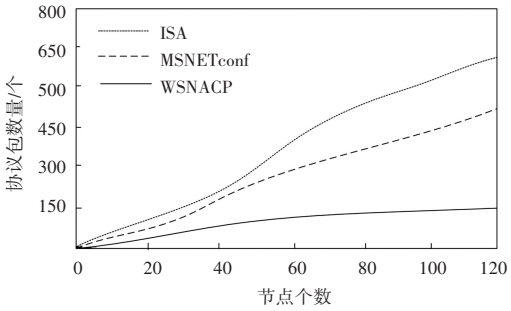



**图9 协议包数量**

Fig. 9 Number of protocol packages

分析图8、图9可知,随着节点数量的增多,WSNACP、ISA和MSNETconf 3种协议的平均延迟和协议包数量呈线性增长趋势。实验结果表明,本模型通过WSNACP协议实现的无状态地址自动配置,有效避免了地址冲突问题,使得网络配置的平均延时控制在1 s以内,同时协议交互所需的包数量低于150个,大幅降低了通信开销。与ISA和MSNETconf相比,本模型减少了网络初始化时间的同时,提升了地址分配效率,为光纤通信网络的快速部署提供了可靠保障。

以场景1为例,选取文献[3]禁忌搜索部署优化模型和文献[4]萤火虫算法部署优化模型作为本模型对比,统计3种模型应用后光纤通信网络各节点进行一次数据采集能耗以及不同网络节点数量下的网络平均寿命,结果如图10、11所示。

由图10可看出,本模型应用后光纤通信网络各节点的一次数据采集能耗显著低于文献[3]模型,虽然文献[4]模型应用后光纤通信网络部分节点的一次数据采集能耗略低于本模型,但网络各节点的负载存在失衡现象。由图11可看出,本模型应用后光纤通信网络的成本寿命

更高,原因在于本模型可以有效均衡各网络节点负载,进而提升网络成本寿命。综合分析可知,本模型的应用效果更好。

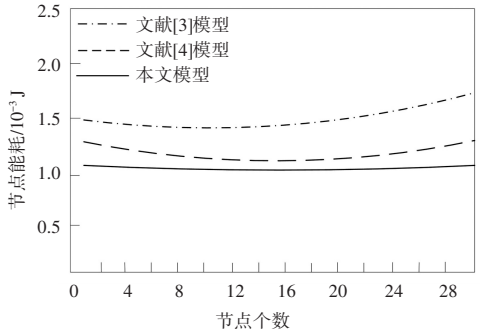



**图 10　节点一次采集的能量消耗**

Fig. 10　Energy consumption of a node during a single collection

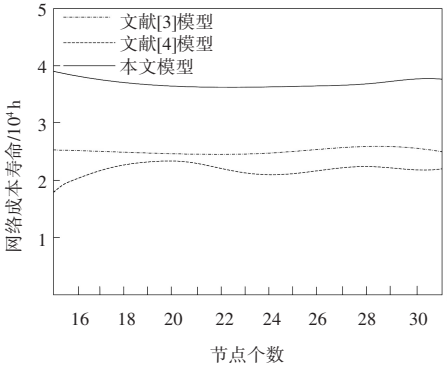



**图 11　光纤通信网络平均寿命**

Fig. 11　Average lifespan of fiber optic communication network

## 3　结论

本文研究基于 IPv6 的光纤通信网络中继节点部署优化模型,通过设计中继节点结构,结合无状态地址自动配置以及移动 IPv6 协议的节点自组织成网共同提升光纤通信网络通信性能。实验通过节点分布情况、耗能以及对网络成本消耗情况等多角度验证本文模型的应用效果。实验结果表明,本文模型可以减少网络延时,提高网络服务水平,延长网络寿命,本模型实现了光纤通信网络中继节点部署优化,简化网络管理者日常维护的工作。

## 参考文献

[1]徐洪敏, 肖丕强, 黄小燕. 光纤通信网络子信道快速动态分配方法[J]. 激光杂志, 2021, 42(11):128-132.
[2]Li B, Zhang M, Cao H, et al. Transceiver design for af mimo relay systems with a power splitting based energy harvesting relay node[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 2376-2388.
[3]王鸿鹏, 王前, 张晓阳, 等. 基于 3D-Tabu 禁忌搜索的广域环境 MESH 网络节点部署优化算法研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(2):261-267
[4]孙环, 陈宏滨. 基于萤火虫算法的无线传感器网络节点重部署策略[J]. 计算机应用, 2021, 41(2):492-497.
[5]查晶, 杨逸岳, 陈善锋. 电力工控网络私有通信协议安全性自动化测试方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8):121-124,171.
[6]王郁夫, 王兴伟, 易波, 等. IPv6 中一种基于卷积的 DDoS 攻击两阶段防御机制[J]. 软件学报, 2024, 35(5):2522-2542.
[7]夏文豪, 张连成, 郭毅, 等. NDP-FD6:一种 IPv6 网络 NDP 洪泛行为多分类检测框架[J]. 计算机应用研究, 2024, 41(10):3141-3148.
[8]刘琨, 张晓涵, 曹汝坤, 等. IPv6 远程监控网络下无状态通信数据的多尺度离群点挖掘算法[J]. 电信科学, 2023, 39(8): 118-126.
[9]张鹏程, 陶春华, 万欣, 等. 基于 IPv6 的对称动态数据流孪生计算模型[J]. 水力发电, 2024, 50(10):106-113.
[10]王吉昌, 张连成, 杨剑波, 等. 基于多类型威胁的 IPv6 安全防护有效性检测方法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2024, 56 (6):62-69.
[11]林初建, 焦宝臣, 梁哲龙, 等. IPv6 与 5G 融合的新型数字底座研究与构建[J]. 通信学报, 2024, 45(增刊 2):145-152.
[12]宋华茂, 高晓飞, 段霞, 等. IPv6+技术的安全风险与安全机制[J]. 信息系统工程, 2025(1):38-41.
[13]方亚开, 张连成, 郭毅, 等. 基于主机标识符关联的双栈节点 IPv6 地址快速扫描技术[J]. 计算机应用研究, 2024, 41(12):3772-3776.
[14]张焱, 陈峰, 谢泽堃, 等. 突发流量自适应的 6TiSCH 网络分布式 PID 调度[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9):142-148.
[15]陈毅龙. 基于多 Agent 强化学习的电力通信网跨层保护方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(10):112-115.
[16]吕国远, 陈博, 梁兴保, 等. IPv6+技术的电力通信数字化风险评估模型研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(1):79-83.

(上接第 104 页)

[4]钟玉华, 李冰, 代驭新, 等. 高铁车务仿真实训系统设计与实现[J]. 无线互联技术, 2023, 5(10):32-34.
[5]林炳跃, 张昕鹏, 付洁琴, 等. 动车段(所)控制集中仿真培训系统设计与实现[J]. 铁道通信信号, 2025, 61(6):102-108.
[6]夏进波, 王勇. 高速铁路联锁调度一体化实训方案研究与应用[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(4):93-98.
[7]宋俊福. 铁路车站值班员应急处置能力评价体系构建[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(1):112-119,133.
[8]赵志昊. 铁路车务系统接发列车风险评估[J]. 运输经理世界, 2025(8):160-162.
[9]张芳胜, 王妙龄, 季嘉辉, 林培佳, 吴鸿华. 基于语音识别的多资源组合应急调度指挥系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(3): 155-159.
[10]苏敏. 铁路车务调度语音识别技术的应用研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2024.
[11]王建军, 郭炬, 贾林平, 等. 数智赋能下铁路货运管理优化与提升探讨——以朔黄铁路为例[J]. 物流科技, 2025, 48(20):106-110, 123.
[12]王科鹏, 杨华昆, 丁士. 基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(2):89-93,114.
[13]黄友锐, 沈玉轩, 徐善永. 融合机器学习的永磁同步电机数字孪生故障诊断技术研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(2):181-187.
[14]程远瑶, 王昕怡, 陈逸, 等. 基于 Redis 的 ATS 缓存系统设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(7):111-115.
[15]潘鸿飞, 刑应春, 王喜银, 等. 基于 NET Web 开发技术的电网运营管理与自动化监测研究[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(1):171-175.
[16]张志刚. 基于深度学习的铁路通信继电保护测试异常诊断技术研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(8):98-101, 114.