

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200937

# 调度自动化主站局域网冗余可靠性风险分析

吴坡<sup>1</sup>, 张江南<sup>1</sup>, 王丹<sup>2</sup>, 宫灿锋<sup>1</sup>, 贺勇<sup>1</sup>, 任鹏凌<sup>1</sup>

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450087)

**摘要:** 电力调度依赖可靠的调度自动化主站, 因此主站广泛采纳冗余技术。提出一种调度自动化主站局域网冗余可靠性测试方法。根据网卡绑定、虚拟路由器冗余协议、交换机堆叠等冗余测试结果, 确定了地址解析协议轮询时间、虚拟路由器冗余协议抢占延时等配置参数的合理范围, 揭示出生成树协议在链路频繁中断时对网络故障的放大作用。研究发现: 在网卡主备模式下备用网卡状态难以得到实时监视, 在网卡负载均衡模式下侦测不到非直连链路异常。在交换机堆叠后增加了非冗余潜在故障点, 冗余多主检测机制可降低堆叠分裂风险。提出了冗余可靠性推荐方案, 以指导局域网的设计、建设和运维。

**关键词:** 调度自动化; 局域网; 冗余; 可靠性; 交换机

## Risk analysis on redundancy reliability of a local area network in the master station of a dispatching automation system

WU Po<sup>1</sup>, ZHANG Jiangnan<sup>1</sup>, WANG Dan<sup>2</sup>, GONG Canfeng<sup>1</sup>, HE Yong<sup>1</sup>, REN Pengling<sup>1</sup>

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450087, China)

**Abstract:** Power dispatch depends on a reliable master station of a dispatching automation system. To assist with reliability, redundancy technologies have been widely adopted. In this paper, a test method of redundancy reliability for a Local Area Network (LAN) in the master station of a dispatching automation system is proposed. From test results with such as Network Interface Card (NIC) bonding, Virtual Router Redundancy Protocol (VRRP), and switch stacking, the reasonable ranges of key parameters such as the polling period of Address Resolution Protocol (ARP) and the preemption delay of VRRP are determined. The amplification effect of the Spanning Tree Protocol (STP) on network abnormality is revealed when the link is frequently interrupted. It is found that the status of standby NIC is difficult to monitor in real time under the main-standby mode of NIC bonding, and the abnormality of non-directly connected links cannot be detected in the load-balance mode of NIC bonding. After the switches are stacked, non-redundant potential fault points are added, and redundant Multi-Active Detection (MAD) can reduce the risk of stack splitting. Redundancy reliability recommendations for different network configurations are proposed to guide the design, construction, operation and maintenance of an LAN.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5108-202040024A-0-0-00).

**Key words:** dispatching automation; local area network (LAN); redundancy; reliability; switcher

## 0 引言

能源互联网建设的稳步推进和电网规模的不断发展, 对调度自动化系统提出了更高的要求。通信网络的不可靠因素直接影响所涉及的调度控制业务

正常运行<sup>[1-2]</sup>, 甚至可能导致严重的电网安全事件。为提高主站局域网的可靠性, 借鉴其他领域的应用实践<sup>[3-8]</sup>, 调度自动化系统也采纳了从设备、链路、协议等层面发展起来的冗余技术<sup>[9-12]</sup>。设备层面, 网络核心通常配置两台高性能交换机进行级联或堆叠, 每台交换机各配置两个主控板和电源模块, 应用主机至少配置两个网卡, 应用主机直接(或者通过接入交换机间接)接入核心交换机; 链路层面, 通过

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (5108-202040024A-0-0-00)

设备之间交叉互联或者链路聚合方式实现冗余互备; 协议层面, 通过虚拟路由器冗余协议(Virtual Router Redundancy Protocol, VRRP)或热备份路由协议(Hot Standby Router Protocol, HSRP)实现对外路由的冗余<sup>[13-14]</sup>, 多生成树协议(Multiple Spanning Tree Protocol, MSTP)解决冗余链路产生的环路问题<sup>[15-16]</sup>, 协议无关组播协议(Protocol Independent Multicast, PIM)避免相同组播报文的重复发送<sup>[17]</sup>, 链路聚合控制协议(Link Aggregation Control Protocol, LACP)实现链路动态汇聚<sup>[18]</sup>, 双向转发检测(Bidirectional Forwarding Detection, BFD)机制快速检测链路故障<sup>[19]</sup>, 网卡绑定实现主机网卡对外通信的冗余<sup>[20-21]</sup>。这些冗余技术虽然可以从功能上实现主备切换、负载分担、故障识别、数据流转移等, 但也存在一些安全风险。文献[22]从生成树拓扑控制机制上分析了生成树拓扑控制存在的安全隐患, 并提出了相应的安全防范措施; 文献[23]着重对VRRP 协议的网络抖动、负载均衡、初始状态转换机制和 STP 协议的根桥选举机制、收敛速度慢等问题进行分析和改进。在系统层面, 存在冗余技术的“木桶效应”, 网络的复杂性可能掩盖潜在的非冗余单点故障, 过于追求交换机端口密度和交换能力可能降低系统的可靠性, 不合理的冗余配置可能导致网络风暴和网络阻塞, 冗余技术间的配合尚未引起较多关注, 缺少系统的测试和分析, 致使主站在实际运行过程中存在网络中断风险。

本文针对主站局域网典型拓扑分析后提出了用于主站局域网冗余可靠性分析的测试方法。基于该方法搭建测试系统, 从网卡主备、网卡负载均衡、冗余路由、交换机堆叠四种组网方式开展系统的测试, 重点对测试过程中发现的问题开展机制分析和研究, 最后提出主站局域网冗余可靠性推荐方案。

## 1 局域网冗余可靠性测试方法

基于某调度自动化主站局域网中提炼的典型网络拓扑, 开展冗余可靠性测试, 如图 1 所示。

主机 PC1 和 PC2(联想 ThinkStation P720, kylin3.2)使用双网卡绑定模式, 可在 mode0-mode6 之间进行切换; 主机 PC1 与两台接入交换机(H3C S5100-48P-EI)直连, 主机 PC2 与两台核心交换机(H3C S7506)直连, 接入交换机与核心交换机之间的链路可以变换; 核心交换机之间使用两根光纤实现链路聚合, 所有交换机与交换机之间使用 Trunk 口互联; 两台核心交换机分别通过两台防火墙(天融信 NGFW4000-U)接入用来模拟其他安全区网络的交换机(H3C S2126), 两台防火墙间配置双机热备模

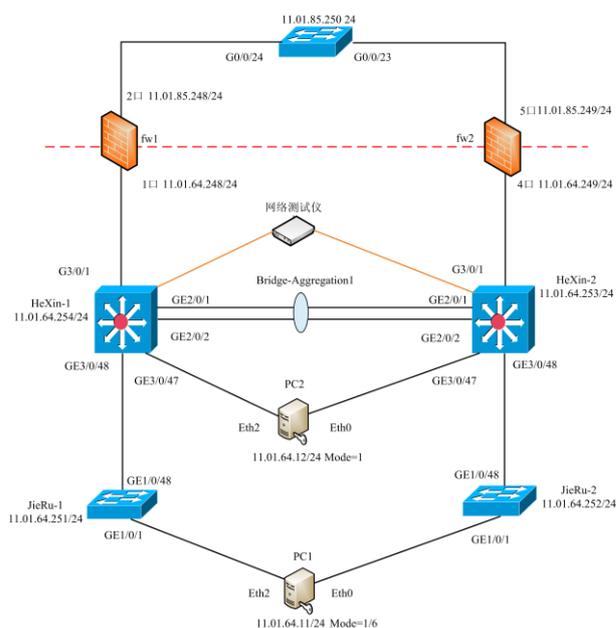


图 1 无环路双核心局域网典型组网结构  
Fig. 1 Typical network configuration of dual-core LAN without loop

式; 为了模拟在运网络流量, 通过网络测试仪(IXIA Optixia XM2)向核心交换机发送 50%速率的 ARP (Address Resolution Protocol)广播, 并测试网络性能; 在主机命令行终端中通过 ping、ARP、ifconfig、netstat、sar 等命令实时监视网络通信状态。网络中统一划分 VLAN(Virtual Local Area Network), 各网络设备的 IP 地址根据需要设置。为保证测试结果更接近生产环境, 在测试前对所有交换机进行重置或版本升级。除了搭建上述实验环境进行测试外, 也采用 HCL、eNSP 等仿真软件搭建网络测试仿真环境进一步验证测试结果。

局域网冗余技术的可靠性测试项如表 1 中所示, 可依照该表依次开展测试。

## 2 局域网冗余可靠性问题及分析

按照上述测试方法, 在底层网卡绑定模式上, 分别从网卡主备、负载均衡两个方面开展测试; 在顶层核心交换机配置方式上, 分别从 VRRP、堆叠两个方面开展测试。从测试结果发现, 网络冗余机制多数能发挥作用, 在异常工况下网络状态能够自动调整, 诸如主机的单网卡故障、冗余交换机中的一台交换机故障、双机热备防火墙中的一台防火墙故障、交换机单主控板故障、交换机单电源故障、部分链路中断等。本节重点对不同网络配置模式在测试过程中发现的主要问题进行分析。



表 1 局域网冗余可靠性测试项

Table 1 Test items for judging the redundancy reliability of LAN

项目	内容	评价
核心节点故障	关闭一台核心交换机	是否切换、切换时间
接入节点故障	关闭一台接入交换机	是否切换、切换时间
中间链路中断	依次拔出各交换机间的连接网线或光纤	是否切换、切换时间
聚合链路部分中断	断开两核心交换机之间的某一条聚合链路	通信正常否
光纤收发单向	断开光纤收发对的其中一芯	端口状态是否中断
光纤收发自环	单芯光纤在同一光端口收发打环	通信正常否
链路频繁中断	按不同的时间间隔模拟链路时断时续	路径变化、稳定时间
单网口关闭	1、关闭各交换机的某一在运网口 2、关闭主机的一个在运网卡	是否切换、切换时间
主控板失效	1、拔出某交换机的主控板 2、通过命令实现主控板主备切换	是否切换、切换时间
单电源断电	断开交换机一路电源	交换机是否断电
环路故障 (启用或不启用 MSTP)	1、使用一根网线把两台交换机互联，使交换机间形成环路 2、使用一根网线把同一台交换机的两个网口互联 3、在核心交换机或接入交换机上再连一台测试交换机，在测试交换机上构建环路	通信是否正常、生成树是否生效及其收敛时间
拓扑变化	变换网络拓扑或协议	通信是否正常
参数配置	改变影响冗余可靠性的相关参数，如 ARP 轮询时间、VRRP 抢占延时等	参数合理范围
地址冲突	为交换机、主机配合相同的 IP 地址	通信是否正常
报文异常	向局域网某交换机注入广播风暴、畸形报文等	通信是否正常
路由切换	将担负对外路由功能的一台防火墙或三层交换机断电	与外界通信是否正常
关联故障	故障负载转移后单一交换机承载能力	可承载流量极限、关联因素
共因故障	测试可能导致冗余交换机同时失效的因素	共因失效因素

## 2.1 网卡主备模式

其网络拓扑如图 1 所示，该拓扑配置简单、功能独立、不存在物理环网。在主备模式(mode1)下，将多块网卡绑定成一块逻辑网卡来提高网卡冗余，当主用网卡一侧发生网络异常时，通过主机 ARP 轮询可以侦测到链路中断，立即切换到备用网卡运行。经测试，发现该模式存在如下问题。

1) 主机网卡 ARP 轮询时间设置不合理导致网卡频繁切换或者网络长时间中断。当 ARP 轮询时间过短时，交换机响应不及时，引起网卡频繁切换；当 ARP 轮询时间过长时，主机侦测不及时，导致网络长时间中断。因此，需将 ARP 轮询时间设置在合理范围内，根据测试结果，建议设置为 20~5 000 ms。

2) 当备用网卡故障不能被及时发现时，若主网卡故障或主网卡对应链路中断，则网卡切换后，也不能正常通信。因此，故障的备用网卡严重影响网卡冗余可靠性，可以通过网管平台或主机系统监视模块实时监视网卡故障，发现故障及时告警；也可以定期进行主备网卡、主备链路切换测试，以便发现潜在问题。

3) 核心交换机间互联链路中断导致主机至其中一台核心交换机(及其所接主机)的网络中断。每台接入交换机至核心交换机只有一条链路时，每台主机只能与一台核心交换机相连，通过核心交换机间互联链路才能到达另一台核心交换机。添加接入交换机至核心交换机的冗余链路，可部分解决这一问题。应尽量避免核心交换机间互联链路中断。

4) 在不开启 MSTP 的网络中若存在环路，主机间网络时断时续或者持续中断。网络环路会引起广播风暴，导致 ARP 与 MAC 地址表错乱，影响交换机的数据转发。因此，应尽量避免网络产生环路，并在环路网络中开启 MSTP。

5) MSTP 收敛导致业务短暂中断，频繁收敛导致持续中断。网络拓扑变化触发 MSTP 拓扑收敛，收敛时间为 30 s 左右。因此，应尽量保持网络拓扑稳定，避免网口接触不良引起的 MSTP 频繁收敛。

6) IP 地址冲突导致网络中断。不同设备设置相同的 IP 地址时，产生 IP 冲突，影响 ARP 表建立，引起网络异常。因此，应规范 IP 唯一配置，避免 IP 冲突。

7) 防火墙主备切换会导致对外路由短暂中断；

防火墙配置未保存可能引起网络异常。在配置防火墙的双机热备模式后未保存, 重启防火墙会引起热备状态不能自动建立, 从而因两防火墙 IP、路由等配置信息相同而引起网络异常。因此, 建议选用性能稳定的防火墙, 配置防火墙时及时保存, 尽量减少防火墙主备切换。

## 2.2 网卡负载均衡模式

其网络拓扑也如图 1 所示。在网卡负载均衡模式(mode6)下, 正常情况下主机的多块网卡同时工作, 单一网卡故障时其他网卡自动备援。经测试, 发现该模式存在如下问题。

1) 负载均衡模式下网卡侦测不到非直连链路中断, 继续从中断侧链路转发数据, 引起业务中断。例如, 接入交换机 2 到核心交换机 2 的链路中断时, PC1 不能侦测到该问题而继续从接入交换机 2 向 PC2 发送数据, 导致数据不能到达 PC2; 另外, 核心交换机间链路中断时, 只有同一主机的发送网卡和接收网卡相同且两主机在用网卡在同侧时, 才不会引起业务中断。因此, 需建立核心交换机和接入交换机间的冗余链路, 配置核心交换机间冗余链路聚合, 保持网络稳定, 避免链路中断。

2) 其他问题与 2.1 节中的问题 4) 至问题 7) 相同。

## 2.3 VRRP

VRRP 将多个三层网络设备加入到备份组中, 形成一台虚拟路由器, 为局域网提供路由冗余。两台核心交换机可以配置多个 VRRP 组, 形成多台虚拟路由器<sup>[24]</sup>, 常见的 VRRP 配置方式如图 2 所示。配置两个 VRRP 组: 虚拟接口 1 对应 vrid1, 虚拟接口 2 对应 vrid2; 核心交换机 1 为 vrid1 的 Master,

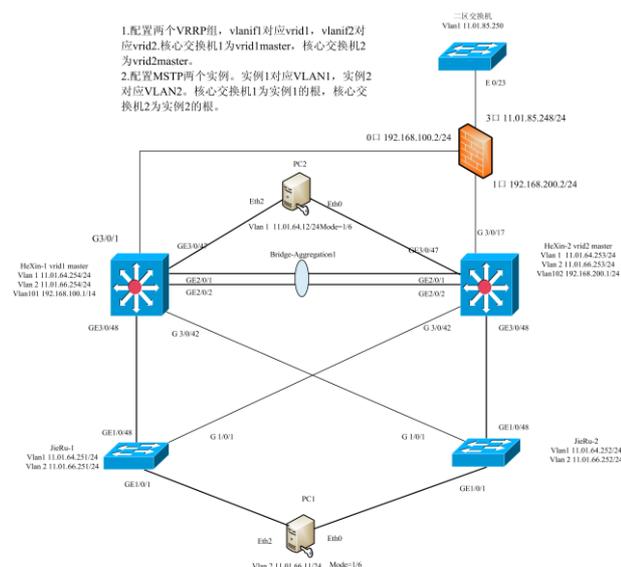


图 2 配置 VRRP 的双核心局域网典型组网结构

Fig. 2 Typical network configuration of dual-core LAN with VRRP

核心交换机 2 为 vrid2 的 Master。配置两个 MSTP 实例: 实例 1 对应 VLAN1, 实例 2 对应 VLAN2; 核心交换机 1 为实例 1 的根, 核心交换机 2 为实例 2 的根。经测试, 发现 VRRP 存在如下问题。

1) VRRP 配置参数不合理导致网络中断。(a) 优先级(0~255)决定两台网络设备是否为主路由设备(Master), 当 reduce 值设置过小不能使链路发生中断的交换机降为备路由设备(Backup)时, 会使网络持续中断; VRRP Master 选举的优先顺序依次为: VRRP 组中 IP 拥有者, 比较优先级, 比较 IP 地址; 因此, 需合理配置优先级, 侦测到故障后三层网络设备优先级自动降低或升高的数值要合理, 需使得 VRRP 组中各设备优先级高低顺序发生变化, 保证链路故障时能够可靠切换主备。(b) VRRP 抢占延时影响 VRRP 主备切换时间。在性能不稳定的网络中, 网络阻塞可能导致 Backup 设备在一定时间内没有收到 Master 设备的报文, Backup 设备则会主动切换为 Master; 如果此时原 Master 设备的报文又到达了, 新 Master 设备将再次切换回 Backup; 如此则会出现 VRRP 备份组成员状态频繁切换的现象; 为了缓解这种现象, 可以配置抢占延时, 使得抢占前再等待足够的抢占延时(0~254 s)。

2) VRRP 虚拟地址与本地 IP 一致导致主备切换失败。例如, 配置 VRRP 的虚拟 IP 与核心交换机 1 本地 IP 一致时, 当断开核心交换机 1 所侦测的上联链路后, 核心交换机 1 优先级仍然为 255, 主备状态仍然为 Master。因此, 不建议将虚拟 IP 设置为与某物理设备的本地 IP 一致。

3) VRRP 主备频繁切换导致网络时断时续。VRRP 侦测到上联链路中断时会进行主备切换, 当该上联链路频繁中断时, 会导致 VRRP 主备频繁切换。因此, 需保障网络稳定, 避免链路中断。

4) VRRP 主备切换导致业务短暂中断。VRRP 主备切换中断时间受 VRRP 抢占延时、VRRP 通告报文时间等参数影响。因此, 需根据业务应用情况合理设置 VRRP 抢占延时、VRRP 通告报文时间。另外, 通过 BFD 机制快速检测网络中链路或者路由状况, 可以实现主备快速切换。

5) 其他问题与 2.1 节中的问题 4) 至问题 7 相同。

## 2.4 交换机堆叠

为了提高交换机端口密度和背板交换能力, 交换机堆叠将多台物理交换机通过专用端口连在一起, 在逻辑上作为一台设备进行管理, 常见的交换机堆叠配置方式如图 3 所示。不同厂商的实现机制不同, 如 H3C 的 IRF、华为的 iStack 和 CSS 等<sup>[25-26]</sup>。以 IRF 为例, 由多台成员设备形成堆叠, Master 设

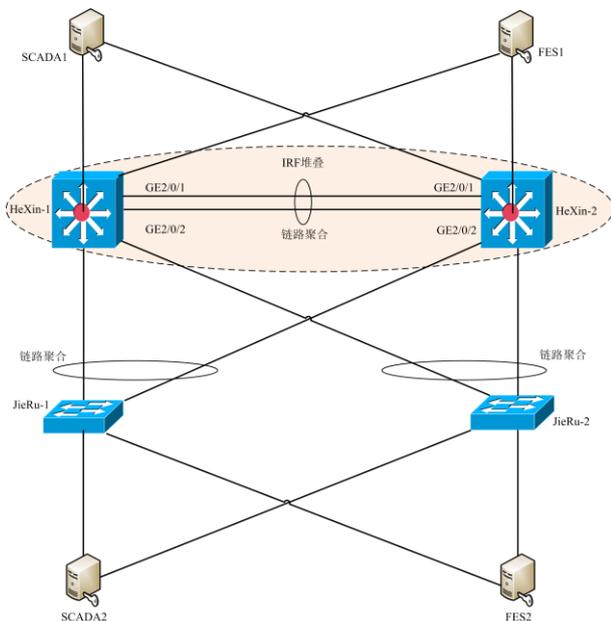


图 3 含堆叠交换机的双核心局域网典型组网结构  
Fig. 3 Typical network configuration of dual-core LAN with virtual stack system

备负责 IRF 的运行、管理和维护, Slave 设备在作为备用的同时也可以处理业务。一旦 Master 设备故障, 系统会迅速自动选举新的 Master, 以保证业务不中断; 此外, 成员设备之间的堆叠链路支持聚合功能, 堆叠设备和上、下层设备之间的物理链路也支持聚合功能, 多条链路之间可以互为备用也可以进行负载分担。通过多主检测(Multi-Active Detection, MAD)机制实现堆叠分裂检测、冲突处理和故障恢复, 尽量降低堆叠分裂对业务的影响, 主要有 LACP、BFD 等模式。经测试, 发现交换机堆叠存在如下问题。

1) 堆叠链路中断且 MAD 失效引起堆叠分裂, 导致网络中多主冲突和网络中断。堆叠分裂且 MAD 失效后, 网络中存在两个相同配置的三层网络设备, 引起地址冲突, 导致故障在网络中扩大。因此, 需适当增加堆叠链路聚合的端口数量, 确保堆叠正常运行。建议配置冗余 MAD 方式或链路: 同时使用 BFD 和 LACP 模式的 MAD, 或至少配置两个 LACP 检测链路。另外, 接入交换机与堆叠核心交换机间配置链路聚合, 可以部分抑制该问题。

2) BFD 模式 MAD 与 MSTP 功能互斥导致网络中断。堆叠交换机开启 MSTP, 且使用 BFD 模式 MAD 时, MSTP 会认为堆叠交换机之间存在环路, 因此关闭某一 BFD 检测端口, 导致 BFD 检测失效。若此时堆叠链路中断, 则会引起地址冲突, 导致网

络中断。因此, 需在 BFD 检测端口关闭 MSTP 功能, 在不必要的情况下(不存在环路)可不开启 MSTP。

3) 链路频繁中断导致备(standby)交换机频繁重启, 引起业务中断。standby 交换机必须重启才可以加入堆叠, 频繁中断堆叠链路导致交换机在堆叠组中频繁分裂、加入和重启。另外, 频繁中断 MSTP 中的 forwarding 链路导致 MSTP 持续收敛, 接入交换机上联链路在 discarding 与 leaning 状态之间不断切换。因此, 需保障网络稳定, 避免链路中断。另外, 可以在接入交换机与堆叠核心交换机间配置链路聚合, 取代 MSTP 功能。

4) 堆叠 active 主控板硬件故障引发堆叠机制异常, 导致网络中断。多个交换机在堆叠后作为一个逻辑设备, 相当于增加了一处故障点, 这个故障点并无冗余, 其可靠性仅由设备厂商私有的堆叠机制来保证; 若堆叠本身判定异常, 会直接导致逻辑设备不可用。因此, 为保证业务的连续性, 建议将冗余互备配置的关键业务主机分别接入核心交换机和接入交换机; 如图 3 所示, 将前置服务器 1、SCADA 服务器 1 与核心交换机直连, 将前置服务器 2、SCADA 服务器 2 与接入交换机直连(前置服务器 1 与前置服务器 2 冗余互备, SCADA1 与 SCADA2 冗余互备)。

5) 其他问题与 2.1 节中的问题 4) 至问题 6) 相同。

### 3 典型案例分析

按照上述测试方法, 对某调度自动化主站局域网进行在线冗余可靠性测试。为了避免对在运系统造成不必要的影响, 并未开展环路故障、地址冲突、报文异常等测试。在线测试不仅能验证上述测试方法的有效性, 也能及时发现运系统存在的隐性问题。下面对两个典型案例进行说明。

#### 3.1 备用网卡及其链路故障不能被及时发现

对在运调度自动化主站系统的 96 台服务器和 workstation 进行测试, 发现 5 例主机冗余网卡缺陷, 主要包括: (GW2 服务器和 PLAN2 服务器)备用网卡故障、(DTSWEB 服务器)冗余网卡网线连接错误、(备用 workstation 和维护 workstation)单网卡上联。这些问题只有在进行冗余可靠性测试时才能被事前主动发现和纠正, 否则将大幅延长故障时的问题排查时间和业务恢复时间。

当 GW2 服务器备用网卡故障时, 不能被及时发现, 因为主网卡正常工作, 业务正常运行。测试过程中将主网卡对应的链路中断, ARP 轮询侦测到该链路中断, 立即切换到备用网卡运行, 又因为备

用网卡故障, 所以也不能正常通信, 引起 GW2 服务器部分业务中断。发现问题后, 立即恢复主网卡链路, 业务恢复正常, 并检查备用网卡故障原因。

DTSWEB 服务器冗余网卡的网线连接至同一交换机 DTSSW1, 该交换机对应的冗余交换机为 DTSSW2, 测试前业务正常。测试过程中将交换机 DTSSW1 关机时, DTSWEB 服务器的部分应用中断。发现问题后, 立即开启交换机 DTSSW1, 业务恢复正常, 并将 DTSWEB 服务器的其中一个网卡与交换机 DTSSW2 相连。

测试过程中, 将维护工作站上联链路中断时, 发现该工作站网络中断, 检查发现该工作站只有一个网卡上联。发现问题后, 恢复其上联链路, 并将该工作站的另一个网卡接入冗余链路。

### 3.2 负载均衡模式下网卡侦测不到非直连链路异常

两台前置服务器网卡采用负载均衡绑定模式, 均通过如图 1 所示的方式上联, 上联的双网卡分别与接入交换机连接, 两台接入交换机分别与两台核心交换机连接, 交换机之间没有物理环路、交叉连接或链路聚合。

SCADA 服务器通过核心交换机与前置服务器进行业务交互。

测试过程中, 将一台核心交换机 Hexin1 关停, 发现 SCADA 服务器中的部分量测数据间断性地与前置服务器中的相应数据不一致, 状态估计无法收敛。开启核心交换机 Hexin1 后, 业务恢复正常。经分析, 在负载均衡模式下, 双网卡同时转发数据, 只侦测网卡物理状态及其直连链路状态; 当关停核心交换机 Hexin1 时, 网卡不能发现核心交换机与接入交换机之间的链路中断, 继续从两个网卡转发数据, 但其中一个网卡上传的数据已经无法到达核心交换机, 因此 SCADA 服务器只能通过核心交换机接收到部分数据, 引起业务异常。

针对此缺陷, 将前置服务器双网卡绑定模式修改为主备模式。

## 4 局域网冗余可靠性推荐方案

基于上述问题和分析, 提出不同组网方式下的推荐方案, 以提高主站局域网的冗余可靠性。

### 4.1 网卡主备模式

1) 采用双核心交换机级联时, 核心交换机分别配置局域网地址, 主机用 ARP 轮询方式诊断网络状态, 作为网卡切换判定条件。

2) 绑定网卡的 ARP 轮询时间宜在 20~5 000 ms 范围内, 默认 100 ms, 对性能较差的交换机可适当延长 ARP 轮询时间。

3) 两台核心交换机可以不启用 VRRP, 局域网

对外通信由不同安全区之间的防火墙实现, 防火墙采用双机热备方式; 防火墙热备开启后要及时保存配置, 避免重启防火墙后热备状态不能自动建立;

4) 除了采用图 1 所示的组网方式外, 也可以采用如图 4 所示的方式: 每台接入交换机双上联至两核心交换机, 确保在主机只有一个网卡工作时有冗余链路, 也避免核心交换机级联线全中断时可能引起的业务异常; 但是, 该拓扑存在明显的物理环路, 需开启 MSTP, 存在因网线接触不良引起的业务频繁中断问题。

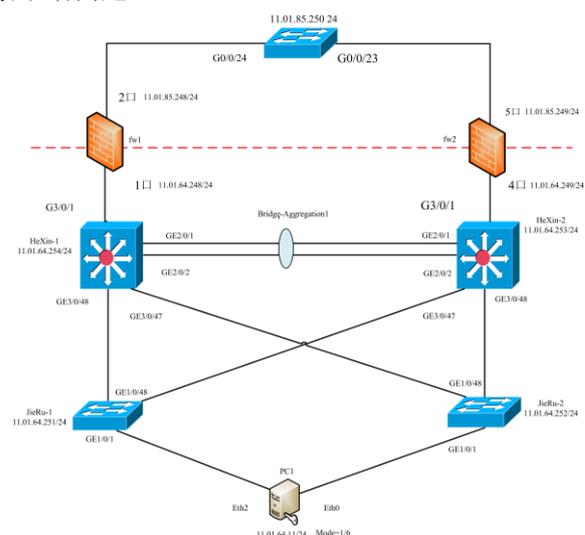


图 4 含层间冗余链路的双核心局域网典型组网结构

Fig. 4 Typical network configuration of LAN with redundant inter-layer links

### 4.2 网卡负载均衡模式

1) 通过合理地分配业务主机接入网络或改变交换机端口 cost 值等方式使负载在冗余交换机间均衡, 避免所有负载走同一核心交换机。

2) 两台核心交换机可以不启用 VRRP, 局域网对外通信由不同安全区之间的防火墙实现, 防火墙采用双机热备方式; 防火墙热备开启后要及时保存配置, 避免重启防火墙后热备状态不能自动建立。

3) 可以采用如图 4 所示网络拓扑, 配置接入交换机至核心交换机的冗余链路, 避免因网卡检测到非直连链路故障而影响业务; 另外, 不同层交换机间的链路冗余方式对比如图 5 所示, 组网时可根据实际需求而定: (a) 网络链路不构成环路, 可通过主机双网卡绑定方式实现网络冗余; (b) “口字形”结构, 组网简单, 易于维护, 故障收敛较慢, 当一台接入交换机故障后另一台接入交换机的负载加重; (c) “倒三角”式组网适合对网络延迟较敏感、故障收敛速度要求较高的场景, 网络复杂度和维护

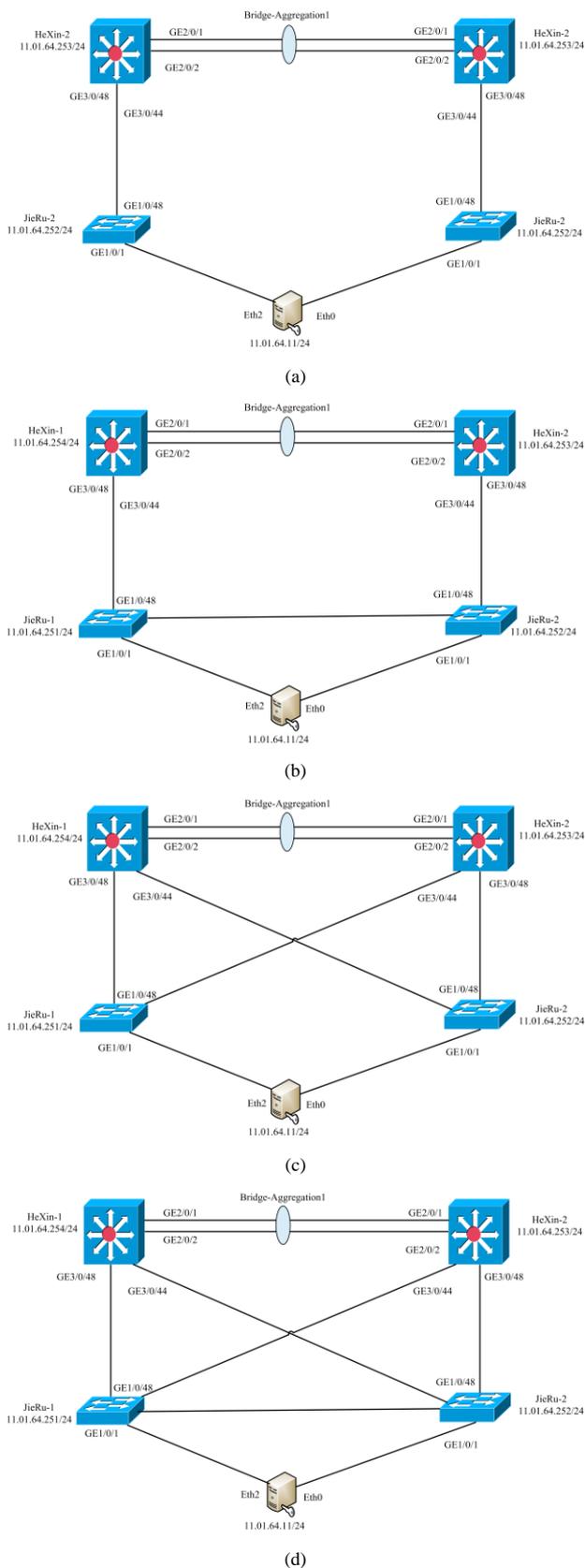


图 5 层间不同的链路冗余方式

Fig. 5 Different link redundancy methods between layers

难度较高; (d) 全连接方式, 一般不推荐使用该方式, 过度冗余会增加组网设计的复杂度和排障难度。

### 4.3 VRRP

- 1) 避免设置 VRRP 组中 IP 拥有者, 即将三层网络设备的 IP 设置为虚拟 IP;
- 2) 设置合理的优先级和 reduce 值, 避免出现两台设备初始优先级一致或其中一台设备的优先级经过 reduce 之后仍不低于另一台;
- 3) 设置合理的故障侦测间隔(如 300 ms), 保证在毫秒级就能侦测到链路故障;
- 4) 设置合理的抢占延时(如 4 s)和 VRRP 通告报文时间间隔(如 1 s), 避免出现因链路不稳定而频繁切换主备;
- 5) 设置 MSTP 实例的根交换机与 VRRP 中的 Master 一致, 确保流量最优路径;
- 6) 通过 BFD 机制实现 VRRP 快速切换。

### 4.4 交换机堆叠

- 1) 同一堆叠域的堆叠交换机通过偶数个端口采用链路聚合方式形成可靠的堆叠链路, 堆叠光纤走不同的路径。
- 2) 可同时部署 BFD 模式和 LACP 模式的 MAD, 也可部署多组 LACP 模式的 MAD; 配置 BFD 模式的 MAD 时需将 BFD 检测端口的 MSTP 功能关闭。
- 3) 采用如图 3 或图 6 所示网络拓扑, 接入层交换机与堆叠核心交换机间配置链路聚合。

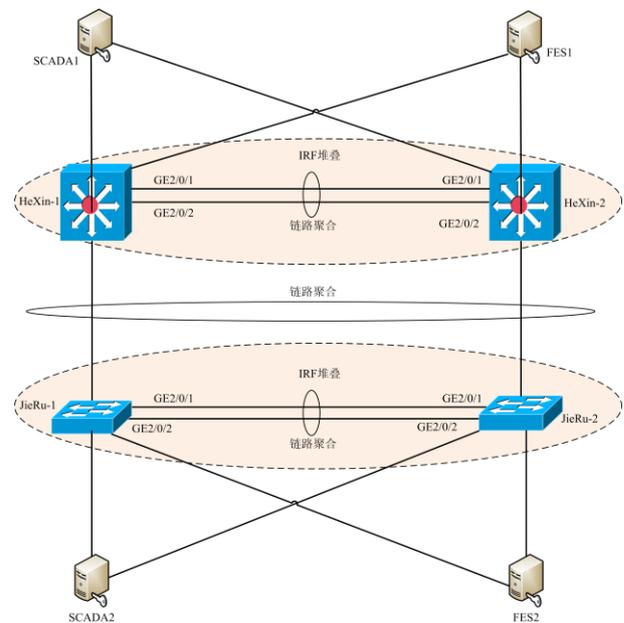


图 6 含多层堆叠的局域网典型组网结构

Fig. 6 Typical network configuration of LAN with multi-layer virtual stack systems

#### 4.5 其他建议

1) 冗余网络设备宜具有相同型号、版本和配置, 以确保网络兼容性; 网络设备宜配置双电源, 且两路电源来自不同的供电单元; 冗余互备的设备部署在不同机柜。

2) 采用双核心交换机级联时, 级联线从不同板卡的不同端口配置链路聚合; 建议用双光口、双电口共四个端口组成聚合链路, 级联线按不同物理路径进行敷设, 可有效防止板卡、端口及级联线故障情况下级联失败。

3) 所有交换机开启 MSTP, 防止产生网络环路; 对与主机直连的交换机端口开启 edg-port 功能, 使 MSTP 快速收敛。

4) 合理规划 IP 地址和路由, 避免出现冲突。

5) 为了避免两台核心交换机同时故障时影响关键业务, 将冗余互备配置的关键业务主机分别接入核心交换机和接入交换机。

6) 完善交换机和网卡的网络异常监视功能, 及时发现故障, 采取声音、短信等方式告警; 通过网管系统监视交换机状态, 当负载率超过 50% 时要及时告警; 通过 dbi 数据库、alarm-query 告警查询等方式监视主机网卡状态。

7) 定期进行冗余设备切换测试, 发现潜在问题; 考虑网络异常情况, 编制应急预案。

8) 加强备品备件管理, 特别是堆叠交换机对设备硬件要求较高, 避免备品备件的缺失影响网络应急处理和业务及时恢复。

9) 消除冗余设备的共因故障, 诸如共用电源故障、广播风暴、负载过重、环境恶劣(温度、湿度、灰尘等)等。

## 5 结论

本文提出了调度自动化主站局域网冗余可靠性测试方法, 在测试中发现网卡绑定、VRRP、交换机堆叠等冗余技术在系统集成后存在可能影响主站可靠运行的问题, 并通过在线网络冗余可靠性测试发现了在运系统局域网的隐性缺陷, 分析了缺陷原因并提出有针对性的改进措施, 进而形成主站局域网冗余可靠性推荐方案, 有利于提高调度自动化主站的安全可靠运行水平, 也对其他领域的局域网可靠性提升有指导意义。在本文研究成果基础上, 后续可着手建立局域网冗余可靠性评价模型, 拓展网络异常在线智能监测功能, 快速定位局域网故障原因, 并推广到云计算网络、调控系统灾备等冗余可靠性问题研究。

### 参考文献

[1] 程紫运, 吕明卉, 田云飞, 等. 基于结构熵的电力骨干

- 通信网抗毁性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 112-118.
- CHENG Ziyun, LÜ Minghui, TIAN Yunfei, et al. Research on invulnerability for electric power backbone communication network based on structural entropy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 112-118.
- [2] 李旻菊, 黄宏光, 舒勤. 相依网络理论下电力通信网节点重要度评价[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 143-150.
- LI Guiju, HUANG Hongguang, SHU Qin. Evaluation method for node importance in power telecommunication network based on interdependent network theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 143-150.
- [3] 王一茗, 张可, 陈龙. 一种高可靠可控双冗余以太网的设计与实现[J]. 计算机科学, 2014, 41(5): 97-101.
- WANG Yiming, ZHANG Ke, CHEN Long. Design and realization of high-available controlling integrated double-redundant Ethernet scheme[J]. Computer Science, 2014, 41(5): 97-101.
- [4] 王威. 舰载双冗余以太网的安全性定量分析模型[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(6): 169-171.
- WANG Wei. Quantitative security analysis model of shipborne dual redundant Ethernet[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(6): 169-171.
- [5] 张乃禄, 盛小洋, 孙国鹏, 等. 基于双机冗余的兰炭生产过程监控系统[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(2): 98-101, 123.
- ZHANG Nailu, SHENG Xiaoyang, SUN Guopeng, et al. Monitoring system of semi-coke production process based on redundancy double computers[J]. Journal of Xi'an Shiyou University, 2012, 27(2): 98-101, 123.
- [6] 尤冬青. 油气管道 SCADA 系统高可靠冗余网络设计与实现[J]. 油气储运, 2020, 39(1): 1-6.
- YOU Dongqing. Design and implementation of high-reliability redundant network for SCADA system of oil and gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 1-6.
- [7] 周健, 李骏, 金华锋, 等. 基于 HSR 冗余网络系统的故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 171-177.
- ZHOU Jian, LI Jun, JIN Huafeng, et al. Fault location method based on an HSR redundant network system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 171-177.
- [8] 王智勇, 裘愉涛, 董新涛, 等. 基于冗余通信的就地化分布式母线保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 158-164.
- WANG Zhiyong, QIU Yutao, DONG Xintao, et al. Research on outdoor installation distributed busbar protection based on redundant communication[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 158-164.
- [9] 陈原子, 徐习东. 基于并行冗余网络的数字化变电站通信网络构架[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 105-108.
- CHEN Yuanzi, XU Xidong. Communication network

- structure of digital substation based on parallel redundancy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 105-108.
- [10] 葛以踊, 彭晖, 郭海龙, 等. 调度自动化系统消息总线双网模式交叉故障的解决方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 165-168.
- GE Yiyong, PENG Hui, GUO Hailong, et al. Solutions for Cross failure of message bus with dual network in dispatching automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 165-168.
- [11] 邓博仁, 唐良瑞, 郝建红, 等. 电力 SDH 传输网的风险评价[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 133-139.
- DENG Boren, TANG Liangrui, HAO Jianhong, et al. Risk assessment on electric power SDH transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 133-139.
- [12] 谢黎, 周华良, 于同伟, 等. 一种智能变电站新型双网冗余设备及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 151-156.
- XIE Li, ZHOU Hualiang, YU Tongwei, et al. A new network redundancy device for smart substation and its implementation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 151-156.
- [13] 孙光懿, 郭建忠. VRRP 和 SLA 协议在校园网中的应用[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2019, 38(2): 12-18.
- SUN Guangyi, GUO Jianzhong. Application of VRRP and SLA protocols in campus network[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2019, 38(2): 12-18.
- [14] 刘晓胜, 海天翔, 郑检, 等. 基于虚拟局域网的智能变电站热备份通信[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 132-139.
- LIU Xiaosheng, HAI Tianxiang, ZHENG Jian, et al. Hot-standby communication of VLAN-based smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 132-139.
- [15] 彭太翀, 梁建青, 王海峰, 等. 生成树实例在西气东输一线 SCADA 系统中的应用[J]. 自动化仪表, 2012, 33(8): 27-30.
- PENG Taichong, LIANG Jianqing, WANG Haifeng, et al. Application of the spanning-tree instance in the SCADA system of west-east natural gas line I[J]. Process Automation Instrumentation, 2012, 33(8): 27-30.
- [16] 李元龙, 邱玉祥. 基于生成树协议的交换域拓扑发现算法[J]. 计算机科学, 2012, 39(增刊 3): 288-290.
- LI Yuanlong, QIU Yuxiang. Switched domain topology discovery algorithm based on spanning tree protocol[J]. Computer Science, 2012, 39(S3): 288-290.
- [17] 李钟辉. 基于 QoS 策略的 PIM-SM 协议的扩充[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(5): 1084-1088.
- LI Zhonghui. QoS policy-based extension for PIM-SM protocol[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(5): 1084-1088.
- [18] 王培英, 肖志辉, 李本源. 基于 LACP 多激活检测方法和处理机制的研究[J]. 电信科学, 2013, 29(5): 95-99.
- WANG Peiying, XIAO Zhihui, LI Benyuan. Research on LACP multi-active detection and processing method[J]. Telecommunications Science, 2013, 29(5): 95-99.
- [19] 李军, 李光, 邸永强, 等. 基于虚拟路由冗余协议和双向转发检测的基层气象通信网络设计和实现[J]. 气象科技, 2017, 45(2): 281-284.
- LI Jun, LI Guang, DI Yongqiang, et al. Design and implementation of Xi'an meteorological communication network based on VRRP and BFD[J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(2): 281-284.
- [20] 胡修林, 王运鹏, 郭辉. 多网卡链路绑定策略的研究与实现[J]. 小型微型计算机系统, 2005(2): 165-168.
- HU Xiulin, WANG Yunpeng, GUO Hui. Research and implementation of link binding strategy for multiple network cards[J]. Journal of Chinese Mini-Micro Computer Systems, 2005(2): 165-168.
- [21] 张士民. 基于 TCP/IP 网络环境下网卡冗余热备的实现[J]. 信息技术与信息化, 2016(11): 26-28.
- ZHANG Shimin. Under the TCP/IP the design of NIC redundant and hot-standby[J]. Information Technology and Informatization, 2016(11): 26-28.
- [22] 张国庆. 工业以太网交换机数据链路层安全分析与设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- ZHANG Guoqing. On security analysis and design of data link layer for industrial Ethernet switch[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [23] 林杰. 基于改进 VRRP 与 STP 协议的银行网络系统[D]. 泉州: 华侨大学, 2016.
- LIN Jie. Network system of bank based on VRRP and STP protocol[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2016.
- [24] 苗云龙, 陆彦辉, 左明阳, 等. 基于链路非对称网闸的双机热备系统研究及实现[J]. 现代电子技术, 2019, 42(3): 73-77.
- MIAO Yunlong, LU Yanhui, ZUO Mingyang, et al. Study and implementation of hot standby system based on link asymmetric netgap[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(3): 73-77.
- [25] 鲍磊磊, 唐红昇, 姜淑杨, 等. 基于 IRF2 和 LACP MAD 的气象网络设计研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(1): 137-141.
- BAO Leilei, TANG Hongsheng, JIANG Shuyang, et al. Design and research of meteorological network based on IRF2 and LACP MAD[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(1): 137-141.
- [26] 袁鸣骁, 戴锦友. 虚拟化堆叠系统实时数据同步实现方法[J]. 现代电子技术, 2015, 38(3): 9-12.
- YUAN Mingxiao, DAI Jinyou. Method of real-time data synchronization for virtual stack system[J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(3): 9-12.

收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-10-22

作者简介:

吴 坡(1987—), 男, 通信作者, 博士研究生, 工程师, 研究方向为调度自动化、热工自动化。E-mail: wup\_19@163.com

(编辑 魏小丽)