DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.06.015

电力牵引与控制

TTDP协议骨干网节点故障恢复方法研究

许　丽[1]，邓　珩[2]，张　晨[2]

（1.湖南铁路科技职业技术学院，湖南 株洲　412006；
2.中铁检验认证株洲牵引电气设备检验站有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：由于列车拓扑发现协议TTDP（Train Topology Discovery Protocol）自身机制，在列车初运行禁止状态下，网络节点不能满足所有故障恢复场景的应用需求，包括多个中间节点丢失或多个丢失的相邻节点中包含1个端节点的多节点故障恢复应用场景。因此，文章设计了一种新的节点故障恢复方法来解决该问题，并实现与标准TTDP协议的完全兼容。通过增加独立供电的特殊存储单元来实现对网络配置信息的存储；通过设立节点的故障预备（初始化时将网络配置信息写入特殊存储单元）、识别（进行相邻节点拓扑计数值匹配）、恢复（调用特殊存储单元的网络配置信息）流程，对节点设备进行改进，实现了以太网列车骨干网ETB（Ethernet Train Backbone）节点在特殊场景下的故障恢复。针对本文提出的故障恢复方案，通过模拟测试的方式进行了验证，确认了方法的有效性和可行性。

关键词：列车拓扑发现协议（TTDP）；以太网列车骨干网（ETB）；初运行禁止；故障恢复

中图分类号：TP393；U270　　**文献标识码：**A

文章编号：1000-128X(2022)06-0103-06

A study on fault recovery method of TTDP backbone network node

XU Li[1], DENG Heng[2], ZHANG Chen[2]

(1. Hunan Vocational College of Railway Technology, Zhuzhou, Hunan 412006, China;
2. CRRC Zhuzhou Traction Electrical Equipment Testing Station Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Due to the mechanism of the TTDP (Train Topology Discovery Protocol), network nodes cannot meet the application requirements of all fault recovery scenarios in the status of inauguration inhibition, including multi-node fault recovery scenarios when multiple intermediate nodes are lost or one end node is included in multiple lost adjacent nodes. Therefore, in this paper, a new node fault recovery method was designed to solve this problem and achieve full compatibility with the standard TTDP. The storage of network configuration information was realized by adding a special storage unit with an independent power supply. The node equipment was improved by setting up the node fault preparation (writing the network configuration information to the special storage unit during the initialization), identification (matching the topology count values of adjacent nodes), and recovery (calling the network configuration information of the special storage unit) processes, so as to realize the fault recovery of the Ethernet train backbone (ETB) node in the special scenario. The proposed fault recovery scheme was verified by simulation test, which confirms the effectiveness and feasibility of the method.

Keywords: train topology discovery protocol (TTDP); Ethernet train backbone (ETB); inauguration inhibition; fault recovery

收稿日期：2021-12-10；修回日期：2022-10-08

通信作者：许　丽（1979—），女，硕士，讲师，主要研究方向为轨道交通信号自动化、列车运行控制及其检测技术；
E-mail: xuli309@qq.com

0 引言

国际电工委员会在2014年发布的IEC 61375-2-5标准[1]中规定了列车总线使用以太网列车骨干（ETB）技术，该标准广泛应用于动车、城轨、机车车辆的车载以太网络中。列车以太网可分为2层，一层为列车级以太网骨干ETB，一层为车辆级编组网ECN。ETB主要实现列车动态配置和编组报文路由功能[2]，由一条ETB连接整列车的通信网络，其拓扑采用线性结构，通常情况下会通过冗余方案来确保列车网络的可靠和安全。ECN主要负责车载设备的连接，传输过程数据、消息数据、监视数据，确保列车子系统相应功能的正常使用。

TTDP协议是列车骨干网的专有协议[3]，位于OSI（Open System Interconnection）模型第2层的数据链路层，专门用于各骨干网节点的组网。在TTDP协议中，初运行是ETB技术的核心，是各个网络节点统一的拓扑识别行为[4]。理论上，网络在启动时会发生一次初运行，使所有节点形成统一拓扑。在初运行不被禁止的情况下，网络拓扑变更时（即某些节点增加或减少）会再次触发初运行。但是为了列车运行安全，在网络初始化完成后，系统会向所有节点发送禁止初运行的命令，防止拓扑随意变更[5]。依据文献[1]的规定，当列车处于初运行禁止状态，部分骨干网节点出现故障后再次恢复时，应可以通过一定机制重新加入原有网络[6]。然而，TTDP协议定义的重新加入机制不能应对所有节点故障恢复场景，在列车实际运行中存在节点故障后无法恢复的情况[7]。因此，需要一种新的节点故障恢复方法，实现在“初运行禁止”条件下节点故障恢复后快速重新加入网络的功能，并且该方法应与原有TTDP标准通信机制有较好的兼容性。

1 TTDP协议机制分析

1.1 初运行

列车以太网组网拓扑如图1所示，由于列车运营有增编、解编、重联等需求，列车的拓扑可能会发生变化。

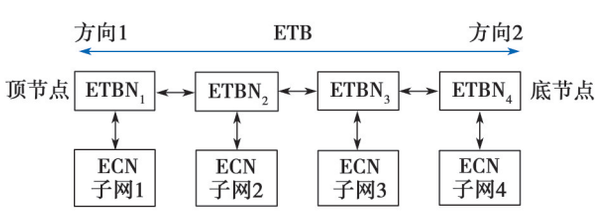


图 1 列车以太网拓扑

Fig. 1 Train Ethernet topology

依据TTDP协议，各网络设备启动后执行初运行，使骨干网的各节点能发现网络中的其他节点并识别全网拓扑，实现自组网和IP地址的分配与映射[8]。如图2所示，配置有TTDP协议的骨干以太网设备初运行的流程如下：①所有节点收集相邻节点信息；②所有节点在方向1和方向2默认转发；③所有节点收集全网节点信息；④所有节点各自计算网络拓扑，并将网络拓扑计数值（ETB Topology Counter）发送给其他节点；⑤当所有节点确认网络拓扑计数值一致时，各节点组网成功，之后根据网络拓扑和TTDP的规则开展IP分配；⑥初运行完成且列车进入运行状态后，上层应用层发出“禁止初运行”指令实现对拓扑变更的禁止；⑦将两端节点端口设置为丢弃（Discarding）模式，关闭转发通道，不再接受新的节点信息。

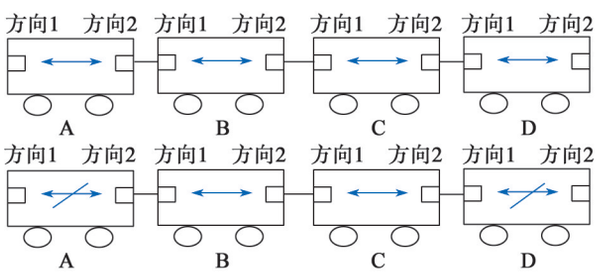


图 2 初运行场景

Fig. 2 Inauguration scenario

在列车运行的过程中，为保证网络稳定，通常采用“禁止初运行”命令使网络拓扑强制固定，防止因拓扑变更带来的网络中断[9]。在禁止初运行状态下，如果其中的部分节点出现故障，TTDP同样具备一定的机制，在优先保证网络通信的前提下等待故障节点的加入[10]。由于TTDP设备的特殊性，故障节点恢复有端节点恢复和中间节点恢复2种模式。

1.2 故障恢复

如图3所示，配置有TTDP协议的以太网列车骨干网设备在禁止初运行时，端节点故障恢复的流程如下：①节点A在故障发生时触发旁路中继功能，方向1和方向2物理导通以确保其他节点通信正常；②非故障节点B在检测到节点A丢失后成为端节点，设置Discarding

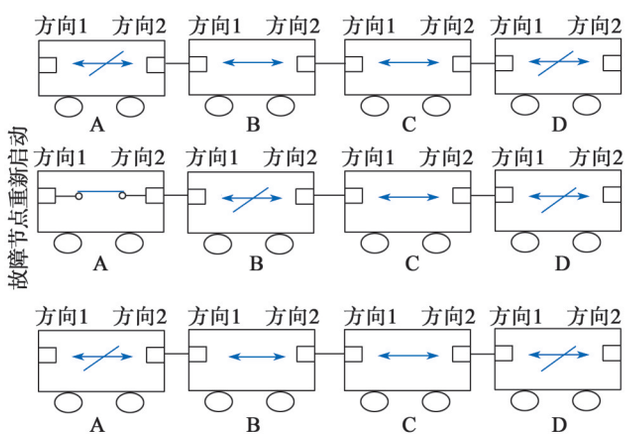


图 3 端节点故障恢复场景

Fig. 3 Fault recovery scenario of end node

模式，并为丢失节点计算“丢失部分拓扑计数值（Partial Topology Counter）”作为备用凭据；③故障节点 A 恢复正常后，由于节点 B 不转发数据，因此无法获取其他节点信息，只能自行组网；④节点 A 自行组网成功后，节点 B 获取到节点 A 发送的拓扑计数值，并与之前计算的“丢失部分拓扑计数值”匹配；⑤匹配成功后，丢失的节点 A 恢复，相邻节点 B 转发数据，节点 A 获取到全网信息，节点 B 断开之前的自组网加入到原有网络中，端节点故障恢复正常。

如图 4 所示，配置有 TTDP 协议的骨干以太网设备的中间节点故障恢复流程如下：①节点 B 在故障发生时，触发旁路中继功能，方向 1 和方向 2 物理导通，确保其他节点通信正常；②故障节点 B 恢复正常后，由于处于中间位置，因此可以获取到原网络的所有节点信息；③节点 B 根据收集到的节点信息计算网络拓扑和拓扑计数值，并发送给其他节点；④其他节点与节点 B 的拓扑计数值进行匹配，若匹配成功，则加入网络；若匹配不成功，则节点 B 自行组网，使用自身组网的拓扑计数值继续匹配，其过程与端节点加入流程相同。

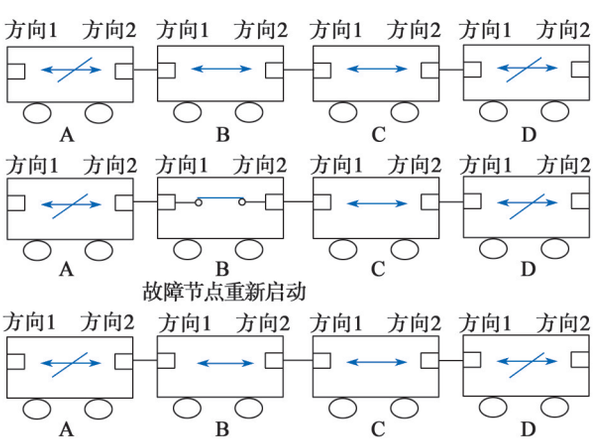


图 4　中间节点故障恢复场景

Fig. 4　Fault recovery scenario of intermediate node

由上述流程可以看出，在初运行禁止的情况下，遇到故障又恢复的节点重新加入网络必须满足下列 2 个条件之一：①端节点故障恢复后必须自行组网成功，原有网络通过匹配“丢失部分拓扑计数值”将其加入网络。②中间节点故障恢复后必须获取到原有网络的全部节点信息，计算出正确的拓扑计数值。

在特定网络状态下，存在某些节点故障恢复后无法加入原有网络的问题，主要包括以下 2 种情况：

①如图 5 所示，在初运行禁止状态下，若出现多个中间节点丢失，先恢复的节点由于无法获取到未恢复节点的信息，无法通过获取全网节点信息计算拓扑计数值以加入原有网络。

②如图 6 所示，在初运行禁止状态下，多个丢失的相邻节点中如果包含 1 个端节点，则该端节点恢复后，由于原有的中间节点成为新的端节点并停止转发信息，因此恢复的端节点无法获取其他节点的信息，无法与其他丢失的节点自组网，也无法生成匹配的丢失拓扑计数值。在该情况下，所有的丢失节点将永远被排除在网络外，直到禁止初运行状态被解除。

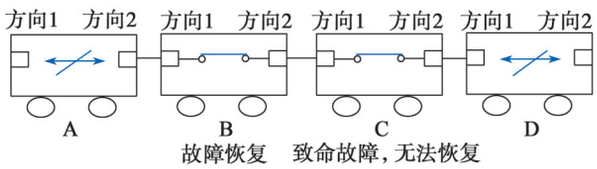


图 5　多中间节点的故障恢复失败场景

Fig. 5　Fault recovery scenario of multiple intermediate nodes

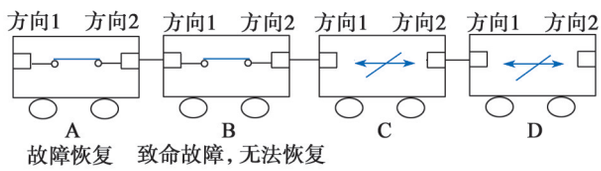


图 6　端节点的故障恢复失败场景

Fig. 6　Fault recovery failure scenario of end node

在列车实际运营过程中，上述故障场景有可能发生，这类故障将造成部分车辆的网络不可用，甚至导致列车降级运行。因此，本文设计了一种 TTDP 协议骨干网节点故障恢复方法，以解决多节点故障可能导致的网络无法恢复的问题。

2　故障恢复方法设计

2.1　硬件设计

由故障恢复场景分析可知，多个节点发生故障时，先恢复的节点能及时加入网络的关键是节点在恢复的第一时间能获取完整的网络拓扑（即发生故障前留存的网络配置信息）。因此，对节点设备进行了改进，为协议处理器增设了额外的小容量易失存储器（即特殊存储单元），并采用可充电电容或电池之类的独立供电方式供电，通过该特殊存储单元实现对网络配置信息的存储。硬件设计方案如图 7 所示。

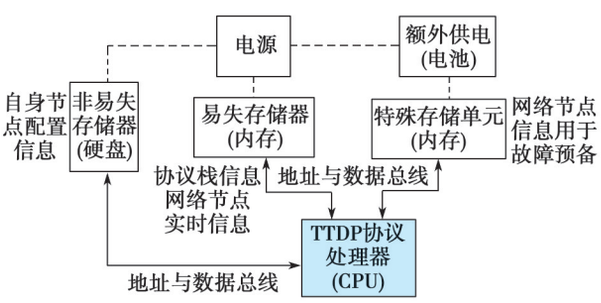


图 7　特殊存储单元的硬件设计方案

Fig. 7　Hardware design scheme of special storage unit

2.2　机制设计

在不影响 TTDP 现有机制的前提下，为增设的特殊

存储单元设计针对全骨干网节点信息的故障预备、识别和恢复流程，确保节点故障重启后，可以直接使用原有的网络信息加入网络。

2.2.1 节点的故障预备流程

首先，在节点的TTDP协议每次初始化时，都针对特殊存储单元的信息执行1次循环冗余校验（CRC），如存储信息的校验和不匹配，则对特殊存储单元进行擦除处理，否则不做存储器操作，将特殊存储单元设置为只读。当网络初运行完成后，初运行禁止命令下达，节点处理器先对特殊存储单元进行擦除，而后将初运行过程中获取到的其他节点信息、物理及逻辑拓扑、拓扑计数值、IP地址设置信息、网络中丢失的节点信息和丢失部分的拓扑计数值等网络配置信息写入特殊存储单元，并将其CRC校验和附加在信息末尾，之后再将特殊存储单元设置为只读。这样，当节点出现故障（断电、重启、CPU死循环、复位中断等）使得原有网络信息丢失时，重新初始化网络进程，此时特殊存储单元由于有额外供电的保护，存储的信息均得以短暂留存。相关流程如图8所示。

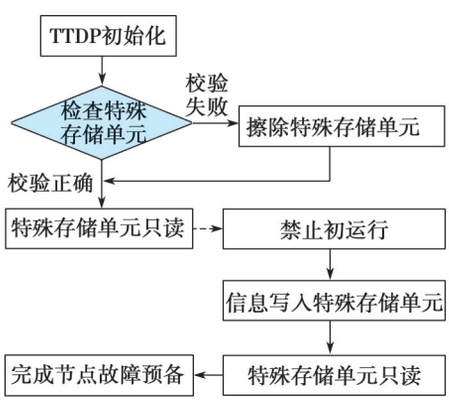


图 8 新方案的故障预备流程

Fig. 8 Fault preparation process in a new scheme

2.2.2 节点的故障识别流程

和故障预备流程一样，节点的TTDP协议每次初始化时，都执行1次特殊存储单元信息的CRC校验，如存储的信息校验和不匹配，则对特殊存储单元进行擦除，否则不做存储器操作，并将特殊存储单元设置为只读。当初运行执行到“收集相邻节点信息”这一步时，先确认相邻节点是否为禁止状态，若相邻节点均非禁止状态，则认为本节点是正常启动，此时结束故障识别流程。若有相邻节点处于禁止状态，则进一步匹配该禁止的相邻节点发送的拓扑计数值与特殊存储单元中的拓扑计数值是否一致，若拓扑计数值一致，则认为本节点故障恢复，结束故障识别流程，节点进入故障恢复流程。若拓扑计数值不一致，则认为本节点为非常规的故障恢复（如节点故障期间网络再次允许并发生了初运行），无法按新方案加入网络，因此结束故障识别流程。相关流程如图9所示。

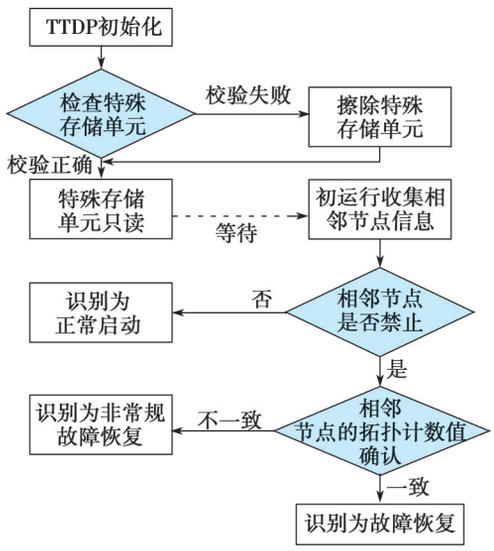


图 9 新方案的故障识别流程

Fig. 9 Fault identification process in a new scheme

2.2.3 节点的故障恢复流程

当故障识别机制识别出本节点是正常启动，则该节点按标准的正常流程运行。当故障识别机制确认本节点为故障恢复时，TTDP协议栈直接调用特殊存储单元的网络信息，进入节点故障前的网络状态，并使用该拓扑计数值直接加入网络。当故障识别机制确认本节点为非常规的故障恢复，则对特殊存储单元进行擦除处理，并再次设置为只读，而该节点则按标准流程开展自组网或执行等待加入网络的操作。相关流程如图10所示。

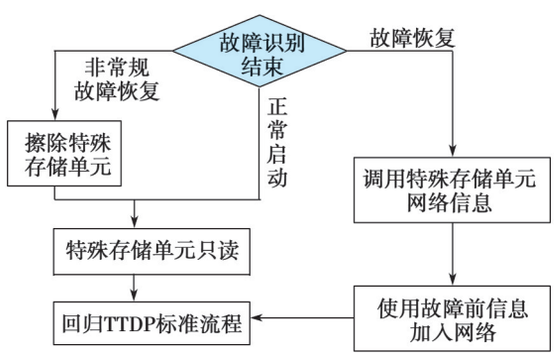


图 10 新方案的故障恢复流程

Fig. 10 Fault recovery process in a new scheme

3 故障恢复方案验证

本文使用自主设计的ETBN模拟软件，针对初运行禁止情况下5个节点中1个端节点和1个中间节点同时丢失的故障恢复场景进行模拟。软件模拟的列车以太网拓扑结构如图11所示。

5个节点依次设置为A、B、C、D、E，每个节点处于1个独立编组。初运行完成后，每个设备都计算出相同的拓扑计数值，从模拟软件上读取的各节点状态信息如表1所示。

表 1　各节点状态信息

Table 1　Status information of each node

节点	列车静态拓扑序列	组网 Id	子网 Id	骨干网 Id	编组方向	车辆识别号
节点 A	0x5ab782a8	01	01	01	01	00112233-4455-6677-8899-aabbccddee0a
节点 B	0x5ab782a8	01	02	02	01	00112233-4455-6677-8899-aabbccddee0b
节点 C	0x5ab782a8	01	03	03	01	00112233-4455-6677-8899-aabbccddee0c
节点 D	0x5ab782a8	01	04	04	01	00112233-4455-6677-8899-aabbccddee0d
节点 E	0x5ab782a8	01	05	05	01	00112233-4455-6677-8899-aabbccddee0e

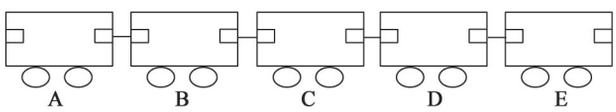


图 11　模拟的列车以太网拓扑结构

Fig. 11　Simulated train Ethernet topology

在 5 个节点上均设置“禁止初运行”状态，然后通过以下 2 种方式对故障恢复效果进行验证和对比。方式 1：所有节点均不采用本文所提新方案的前提下，节点 A 和节点 B 丢失，且 A、B 先后重新启动；方式 2：节点 A 采用新方案而其他节点不采用新方案的前提下，节点 A 和节点 B 丢失，且 A、B 先后重新启动。

3.1　方式 1 的故障恢复流程

将节点 A、B 设置为离线状态用于故障模拟。此时，节点 C、D、E 检测到节点 A、B 丢失后节点 C 成为端节点。重新启动节点 A，由于此时节点 B 不在网络中，节点 A 无法与节点 B 组网，无法加入网络。在模拟软件上读取节点 A 的状态信息如表 2 所示。

表 2　节点 A 状态信息

Table 2　Status information of node A

列车静态拓扑序列	组网 Id	子网 Id	骨干网 Id	编组方向	车辆识别号
0xeb1d1154	01	01	01	01	00112233-4455-6677-8899-aabbccddee0a

由表 2 可知，节点 A 形成了独立的逻辑拓扑，且与原有网络不一致；对于节点 C 而言，匹配的丢失部分的拓扑计数值应同时包含节点 A 和节点 B，因此无法让节点 A 单独加入。此时，再启动节点 B，节点 B 与节点 A 组网成功后，再与节点 C、D、E 融合，网络最终成功恢复。

因此，基于文献[1]定义的禁止初运行条件下的故障恢复机制，如果节点 B 无法成功恢复，那么节点 A 将无法加入网络。

3.2　方式 2 的故障恢复流程

验证时通过 ETBN 模拟软件的文件写入功能实现本方案特殊存储单元的节点信息储存。将节点 A 和节点 B 设置为离线状态，节点 A 和 B 同时丢失。

首先重新启动节点 A，此时节点 A 将保存网络信息，具体如图 12 所示。



图 12　节点 A 在初运行禁止时留存的网络信息(部分)

Fig. 12　Network information(partial) retained by node A at the time of inauguration inhibition

节点 A 启动后，检测到节点 C 为初运行禁止状态，先读取留存的网络配置信息文件，对比特殊存储单元内的拓扑计数与节点 C 中的拓扑计数，核对一致后确认自身故障恢复，根据读取的信息重新加入网络。同时，相邻的节点 C 检测到节点 A 加入后，将自身设置为中间节点；检测到节点 A 恢复后，将节点 A 端口设置为 Forwarding（转发模式），并将其纳入网络。

启动节点 B，节点 B 作为中间节点，可以通过其他 4 个节点的信息重新计算出正确的拓扑计数，成功加入网络。至此，所有节点全部恢复通信，验证完成。

由此可知，节点 A 在使用本文所提新方案后，可以适应本不能加入网络的故障场景，故障恢复后成功加入了网络；而且，节点 A 作为 5 个节点中唯一使用新方案的设备，可以与其他设备保持良好兼容性。

3.3　验证结论

在本次验证中，新方案解决了多节点故障导致网络无法恢复的问题，在初运行禁止状态下，采用新方案的任意位置节点在故障恢复后，无论是否仍存在其他故障节点，都能直接加入网络，维持原有的网络通信功能。新方案不改变标准通信机制，可与标准 TTDP 协议完全兼容，同时由于标准的拓扑计数值匹配机制，

采用新方案的节点在故障恢复后，无论网络中其他设备是否采用新方案，都可以成功恢复通信并互联。新方案有充分的安全性策略，在故障恢复的流程中可以确保非常规的故障恢复流程最终回归至标准规定的原有的恢复流程。

4 结语

本文概述了列车骨干网和列车拓扑发现协议，阐述了以太网列车骨干网设备初运行的流程。分析了列车初运行禁止状态下2种节点故障恢复的方式，和部分多节点故障恢复后无法加入原有网络的缺陷。针对TTDP协议自身机制不能应对所有节点故障恢复场景的问题，本文设计了一种新的节点故障恢复方法，并完全兼容标准流程。通过验证，在2种故障恢复流程中，使用新方案的故障节点能成功恢复通信并实现互联。

本文对TTDP协议骨干网节点故障恢复方法研究和设计成果可为以太网在列车网络系统中的应用提供参考，具有一定的工程应用价值。在后期的研究中，本文设计的新方案在与标准流程节点的适配性方面可做出进一步验证；同时不同应用场景下安全策略的设置和数据管理需要进一步深入研究。

参考文献：

[1] IEC/TC9. Electronic railway equipment - Train communication network (TCN)-Part 2-5: Ethernet train back-bone: IEC 61375-2-5: 2014[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014.

[2] IEC/TC9. Electronic railway equipment - Train communication network (TCN) - Part 2-3: TCN communication profile: IEC 61375-2-3: 2015[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2015.

[3] 岳丽全, 戴小文, 谭克利. 基于ETB的列车通信网编址和寻址方法[J]. 计算机应用, 2013, 33(增刊1): 4-7.
YUE Liquan, DAI Xiaowen, TAN Keli. Addressing of train communication network based on ETB[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(Suppl 1): 4-7.

[4] 刘悦宇. 基于IEC 61375-2-5的列车网络仿真及冗余切换软件设计与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
LIU Yueyu. The software design and implementation of train network simulation and redundancy switch based on IEC 61375-2-5[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[5] 蔡志伟. 机车实时以太网ETB与ECN交换技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
CAI Zhiwei. Research on the exchange technology of locomotive real-time Ethernet ETB and ECN[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[6] 曾陆洋. 基于以太网的列车通信网络节点设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
ZENG Luyang. Design and implement of TCN node based on Ethernet[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

[7] 李常贤, 杨慕晨, 刘洋. ETB初运行研究[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(5): 32-34.
LI Changxian, YANG Muchen, LIU Yang. Research on ETB inauguration[J]. Industrial Control Computer, 2018, 31(5): 32-34.

[8] 刘义山. 城轨列车以太网控车技术[J]. 机车电传动, 2020(3): 85-88.
LIU Yishan. Research on Ethernet-based train control technology for urban railway system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 85-88.

[9] 熊艳, 黄赫, 李思源, 等. 基于以太网的高速列车控制系统研究[J]. 机车电传动, 2019(4): 41-44.
XIONG Yan, HUANG He, LI Siyuan, et al. Research on high-speed train control system based on Ethernet[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(4): 41-44.

[10] 吴正中, 唐才荣. 基于IEC 61375规范在列车解编重联应用[J]. 电子技术与软件工程, 2020(11): 27-29.
WU Zhengzhong, TANG Cairong. Application of train demarshalling and reconnection based on IEC 61375 specification[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(11): 27-29.