

doi: 10.7690/bgzd.2023.02.006

PRP 协议在实时测控专网中的初步应用

邢锐锋, 唐 建

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司特种计算机事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对实时测控专网通信协议在应对单点故障时通信可靠性较低的问题, 介绍 IEC62439-3 发布的并行冗余协议 (parallel redundancy protocol, PRP)。分析该协议在实时测控专网中实现的可行性, 使用 Verilog 编程语言, 在数据链路层将 PRP 协议与仪表控制系统总线 (bus for instrument control system, BICS) 通信协议结合, 实现 BICS 总线的双冗余可靠低延时数据传输, 达到单点故障时网络无缝切换和零恢复时间的效果。结果表明, 该协议可为提高测控系统网络的通信可靠性提供参考方式和实现思路。

关键词: 实时测控; 并行冗余协议; 可靠性; 传输低延时

中图分类号: TP277 **文献标志码:** A

Preliminary Application of PRP in Real-time Measurement and Control Network

Xing Ruifeng, Tang Jian

(Department of Special Computer, Automation Research Institute Co., Ltd. of
China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: The parallel redundancy protocol (PRP) issued by IEC62439-3 is introduced to solve the problem that the communication reliability of real-time measurement and control private network is low when dealing with single point of failure. The feasibility of the protocol in the real-time measurement and control network is analyzed, and the PRP is combined with the BICS (bus for instrument control system) bus communication protocol in the data link layer by using Verilog programming language to realize the dual redundant reliable and low-latency data transmission of the BICS bus. Achieve the effect of seamless network switching and 0 recovery time in case of a single point of failure. The results show that the protocol provides a reference way and implementation idea for improving the communication reliability of the measurement and control system network.

Keywords: real-time measurement and control; parallel redundancy protocol (PRP); reliability; low transmission delay

0 引言

测控系统作为工业控制系统的神经中枢, 事关工业生产安全、经济发展、社会稳定和国家安全^[1]。系统能否安全、可靠地运行, 很大程度上取决于控制网络的通信能力是否强大, 因为通信网络故障而导致采集数据、控制信息不能及时、准确、可靠地完成传递, 将会严重影响工业生产和社会安定, 甚至危及人类的生命^[2]。目前, 实时测控专网领域还没有权威机构将控制网络的冗余技术标准化, 笔者只能借鉴其他对实时性和可靠性要求较高的控制领域 (如智能变电站^[3]、核电产业^[4-5]) 中的相应标准和

技术。保证实时测控系统冗余控制网络的安全可靠, 对测控系统的安全运行具有重要意义。工控领域常把单点故障发生后网络恢复通信的自愈时间, 以及

在自愈过程中是否伴随丢包现象作为衡量网络可靠性的表征性指标^[6]。现在国内实时测控通信网络主要使用基于以太网的通信协议, 板卡之间采用总线通信技术, 传统技术优化或者网络冗余研究的侧重点在于提高数据传输过程中的准确性和实时性, 但在应对物理层故障时过于依赖软件处理, 导致故障发生后的恢复时间具有不确定性, 缺少传输线路故障时通信可靠的完备设计, 不能满足长时间实时测控领域对控制网络高可靠性的要求^[7-8]。2008年, IEC SC65 WG15 发布了 IEC62439——高可用性自动化网络协议标准, 其中并行冗余协议 (PRP) 采用 2 个对等的网络并行运行, 一旦出现单点故障, 终端设备双端口可以实现无缝切换, 从理论上实现了零自愈时间、零丢包率, 是理想的可靠通信网络冗余方案。目前, PRP 主要应用于智能变电站领域^[9-11], 且将冗余技术实现于以太网协议之上的应用层^[12],

收稿日期: 2022-10-07; 修回日期: 2022-11-28

作者简介: 邢锐锋 (1998—), 女, 山西人, 硕士, 从事计算机控制技术研究。E-mail: 15110694963@163.com。

在数据链路层支持板卡之间总线通信协议的技术还比较匮乏,为探索 PRP 在实时测控领域中应用的可行性,笔者借助 Xilinx 旗下的 Vivado 集成开发环境,搭建仿真测试平台,对 PRP 在数据链路层的实现做原理性探究。

1 BICS 总线

该总线是基于海军某型号艇用仪控设备的通信需求,定制化设计的一套用于完成板卡间数据通信的高实时高可靠性自定义通信协议,实时性和可靠性可满足实施测控领域对通信高实时高可靠的要求,移植性良好,便于调试和实现。目前仪表控制系统总线(BICS)协议已成熟应用于核电反应堆及中间回路控制柜等多个项目产品,通信性能有很好的保障。

2 PRP 协议

工业控制网络中要提高通信可靠性,通常有系统关键组件冗余和网络节点冗余 2 种方式。

系统关键组件冗余是指通过双机热备来提高系统的可靠性和可用性,其主要实现方式是在系统或者设备中起关键作用的地方,配置 2 套完成相同功能的功能通道、工作元件或者部件,当工作的部分出现问题时,系统可以通过特殊的软件或硬件自动切换到备份上,从而保证了系统不间断工作。这种方式的冗余切换时间最小可达到毫秒级。

IEC62439-3 标准中提出的 PRP 协议采用了网络节点冗余方式,终端通过双连接节点(doubly attached node with PRP, DANP)的 2 个并行端口,连接到 2 个独立运行的局域网。由于 2 个局域网相互独立且并行运行,所以一个网络发生故障时不会影响到另一个,面对单点故障可做到零切换时间恢复通信,为长时间实时测控领域通信低延时和高可靠需求提供了解决思路和实现方法,该项研究对其他传输延时和可靠性要求高的测控领域也具有重要意义和实践价值。

PRP 网络拓扑结构和 DANP 节点内部结构如图 1 所示。

DANP 同时与 2 个局域网(子网 A,子网 B)建立物理连接,以实现数据帧的“双发双收”,这 2 个局域网之间相互独立,网络拓扑结构和运行的网络协议没有直接关联。

DANP 节点通过链路冗余体(link redundancy entity, LRE)将 2 个并行冗余的端口与上位机相连,LRE 的主要功能是通过冗余报文丢弃算法对重复报

文进行丢弃,对上层应用屏蔽网络节点的冗余。LRE 的功能可通过应用层软件、驱动程序或者硬件来实现。笔者将探讨 PRP 协议在数据链路层实现的可行性,使用 Verilog 硬件描述语言实现 LRE 的功能,给出 PRP 在长时间实时测控专网中的应用方案。

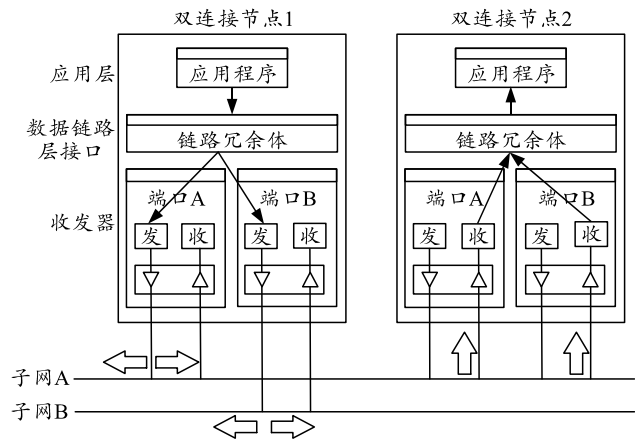


图 1 PRP 网络拓扑和 DANP 节点结构

3 在数据链路层实现 PRP 协议方案

在数据链路层实现 PRP 的 DANP 节点如图 2 所示。

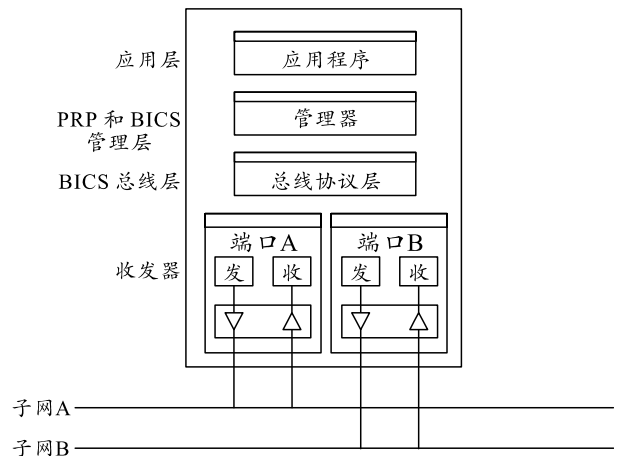


图 2 DANP 节点结构

不同于主流 PRP 技术的实现,实时测控专网中 PRP 协议将不再运行于 TCP/IP 之上的应用层,而是在数据链路层与总线技术相结合,笔者使用的 DANP 节点将为 BICS 总线提供 PRP 冗余功能,由 Manager Layer 和 Bus Protocol Layer 来实现 LRE 冗余报文丢弃的功能。

3.1 数据帧格式

PRP 协议本身不支持 BICS 专用数据协议,因此需要对帧格式进行改造,使数据帧既符合 PRP 协议要求,又符合 BICS 总线传输协议要求,达到为 BICS 总线提供 PRP 冗余功能的效果。数据帧的封

装格式和流程如图 3 所示。笔者重新定义了通信协议中数据帧的字段位置和长度,将 BICS 封装成 PRP 帧,方便 BICS 总线协议和 PRP 协议对数据帧进行识别和处理。其中,冗余控制字段 (redundancy control tag, RCT) 包含 3 个参数:序列号、子网 ID 和数据总长度。双连接节点将数据帧复制成 2 份后,具有相同序列号和数据长度的报文同时被发往 2 个并行独立运行的子网。接收端收到一对逻辑上重复的报文,根据序列号和到达时间进行冗余报文丢弃,序列号相同时,先到达的报文被上传,后到达的报文被当作重复报文进行丢弃。

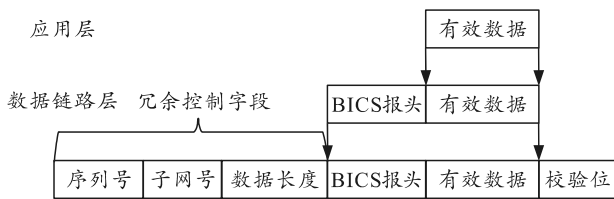


图 3 数据帧封装格式和流程

3.2 冗余丢弃算法

主流 PRP 协议均实现在以太网之上的应用层,消息在传输过程中会经过多段路由和交换机,无法忽视不确定的传输时延,因此在接收端需对消息重新排序。而实时测控网络中各个物理节点之间通过传输线直接连接,不需考虑并行冗余的双网对时及消息在传输中乱序的情况,可考虑使用帧序列号和异步先进先出 (first in first out, FIFO) 队列实现冗余报文丢弃算法,减少额外的开销,提高冗余报文丢弃算法的效率。算法的大致思想为:

- 1) 若 FIFO 队列为空,第 1 个到达的消息直接入队,并将消息递交上层应用。
- 2) 若队列不为空,对于新到达的消息,比较队列中是否有相同的队列号:若没有,该消息入队,并将消息递交上层应用。若有,同序列号的消息是否处于队头,若是,队头消息出队,该消息丢弃;若不是,记录队头消息的序列号和子网 id,队头消息出队,重复 1)。
- 3) 若队列已满,说明某一子网瘫痪或者伴随严重丢帧现象,需人工修复断开的网络并对队列进行初始化,子网修复期间将完备网络的数据直接递交上层,修复完成后重复 1)。

上述丢弃算法可以对报文进行有效的上传和丢弃,实现 PRP 协议的冗余功能。

4 PRP 协议 FPGA 系统方案

按照 Verilog 语言自顶向下的设计思路,将 PRP

模块的全部功能划分为 4 大模块:接收模块、组帧/校验模块、冗余丢弃模块、发送模块。具体功能框架如图 4 所示。

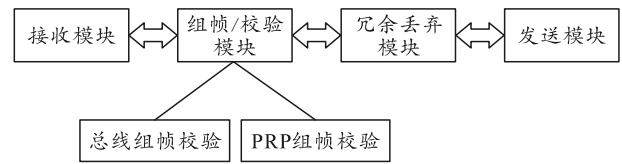


图 4 PRP 模块功能框架

5 PRP 协议在实现方式上的特点

笔者参照 IEC62439-3 协议标准在数据链路层实现了 PRP 冗余功能,由于 PRP 双网并行冗余的概念和实时测控网络中节点通过物理链路直接连接的特殊性,理论上能够达到自愈时间为零、丢包率为零的效果。本方案的特点:

1) 在实时测控领域将总线通信技术与 PRP 技术进行创新性结合。

实时测控领域没有使用 PRP 技术的先例,并且主流 PRP 均实现在以太网之上,没有提供 PRP 与背板总线技术相结合的实现方法。本课题通过采用总线通信技术与 PRP 技术结合的方法,提高测控系统的通信可靠性,降低传输延时,使信息能够准确、及时、有效地传输。

2) 在数据链路层实现 PRP 协议。

参照 IEC62439-3 发布的 PRP 协议标准和相关文献,使 PRP 技术的实现层次从主流的应用层下降到数据链路层,充分利用硬件性能,减少软件开发资源的浪费,同时达到网络中单点故障零时间恢复通信的效果,满足项目对通信传输低延时和可靠性的需求。

3) 对上层应用协议透明。

冗余报文丢弃算法会对重复的报文进行有序上传和丢弃,这一过程对上层应用是透明的。

6 测试

笔者在 Xilinx Vivado 集成环境中搭建如图 5 所示的实时测控网络实验测试模型,对本文中 PRP 协议在数据链路层实现的可靠性进行功能仿真和验证,结果如图 6—8 所示。

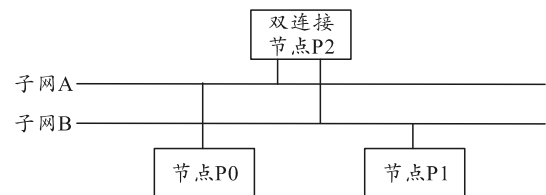


图 5 PRP 功能仿真模型

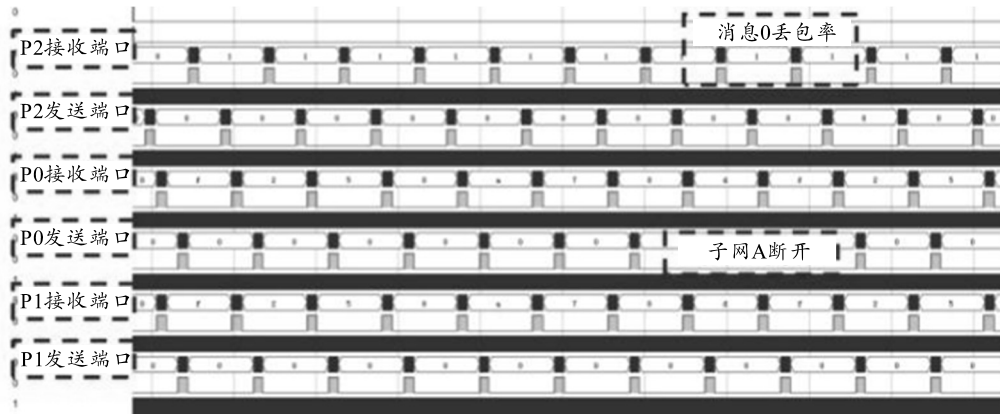


图 6 PRP 仿真结果

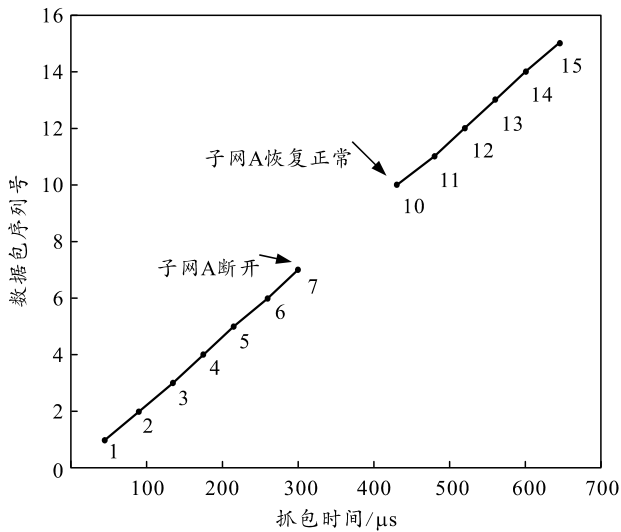


图 7 P0 节点测试结果

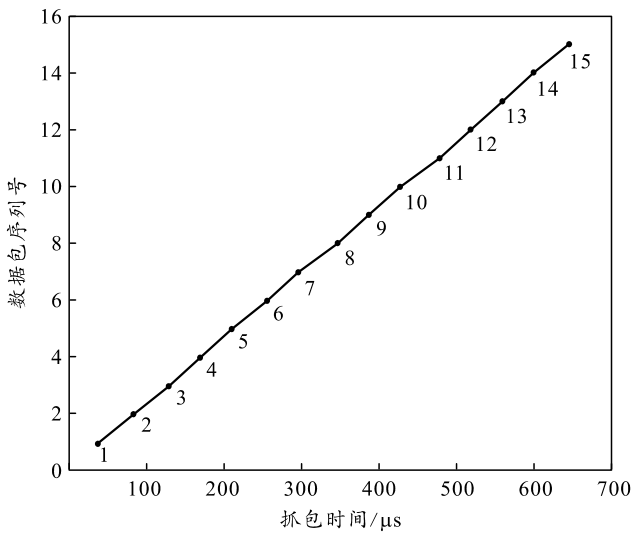


图 8 P1 节点测试结果

子网 A 和 B 分别为 2 个独立运行的局域网，P2 是一个双连接节点，同时连接在 A 和 B 2 个局域网上，可对报文进行双发双收；P0 和 P1 分别运行在子网 A 和 B 上。每次使 P2 以 40~50 μs 的周期，以点对点的方式向 P0 和 P1 发送数据，P0 和 P1 收到消

息后对 P2 进行回复，期间使子网 A 的通信中断后再恢复，记录 P2 节点在子网 A 通信中断期间收到的回复报文的序列号和捕捉时间。

测试结果表明：当一个局域网断开时，该局域网部分报文丢失，但另一个局域网的数据传输没有受到影响；因此，单个局域网断开期间，对 P2 节点来说通信恢复时间和丢包率为 0。所以本方案可满足长时间实时测控领域对通信的高可靠性要求。

7 结束语

笔者基于 IEC62439-3 协议标准中 PRP 部分，对 PRP 在数据链路层的设计和实现进行原理性探究和双网冗余仿真测试。测试结果表明，该方案可实现 IEC62439-3 协议中 PRP 网络冗余的功能标准，即做到单点故障时通信网络零自愈和零丢包率，为长时间实时测控领域通信低延时和高可靠性需求提供了有效的解决思路和实现方法，对其他传输延时和可靠性要求高的测控领域也具有重要的理论意义和实践价值。

标准 PRP 协议移植性良好，可适用于不同领域的工控网络，但笔者实现的 PRP 协议与定制化总线协议相结合，与其他网络协议存在兼容性问题，需进一步探索移植性良好的实现方式，以实现在不同拓扑结构、不同网络协议的工业控制网络中的可行性应用方式。

参考文献：

- [1] 李俊. 我国工业信息安全政策解读[J]. 保密科学技术, 2018(12): 49-51.
- [2] 刘蔚棣, 郭乔进, 产院东, 等. 工业控制系统安全发展综述[J]. 信息化研究, 2021, 47(1): 1-9, 24.
- [3] 谢黎. 并行冗余和高可靠无缝环网冗余技术在智能变电站中的应用[J]. 电气技术, 2021, 22(9): 103-108.
- [4] 侯军委. 核电站安全级控制系统通信研究[D]. 北京:

- 华北电力大学, 2014.
- [5] 刘少海. 并行冗余协议在反应堆仪控系统控制网络中的应用研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海应用物理研究所), 2015.
- [6] 刘少海, 陈永忠, 韩利锋, 等. PRP 协议在反应堆仪控系统控制网络中的初步应用[J]. 核技术, 2014, 37(11): 62-67.
- [7] 刘锡朋, 石义官, 肖漪帆. 延期部件自动装压药生产线控制系统设计[J]. 兵工自动化, 2022, 41(2): 32-34.
- [8] 韩松岳, 苗恺, 田春元, 等. 5G 移动通信技术军事应用研究[J]. 兵工自动化, 2022, 41(4): 53-59.
- [9] 师康, 谷传国, 朱春红, 等. 智能变电站并行冗余协议系统测试方案探讨[J]. 电力与能源, 2018, 3(5): 624-628.
- [10] 张卅, 张惠刚, 李忠安. 智能变电站并行冗余网络的研究与实现[J]. 电气技术, 2018, 19(8): 109-113.
- [11] 李俊刚, 宋小会, 狄军峰, 等. 基于 IEC 62439-3 的智能变电站通信网络冗余设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 70-73.
- [12] 资瑶, 宋亚男, 徐荣华. 基于并行冗余协议的工业以太网冗余实现方法[J]. 电脑编程技巧与维护, 2015(9): 30-31, 36.
- *****
- (上接第 12 页)
- [9] YU X, LAM W. Jointly identifying entities and extracting relations in encyclopedia text via a graphical model approach[C]//Coling 2010: Posters. 2010: 1399-1407.
- [10] LI Q, JI H. Incremental joint extraction of entity mentions and relations[C]//Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers). 2014: 402-412.
- [11] MIWA M, Sasaki Y. Modeling joint entity and relation extraction with table representation[C]//Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). 2014: 1858-1869.
- [12] REN X, WU Z, HE W, et al. Cotype: Joint extraction of typed entities and relations with knowledge bases[C]//Proceedings of the 26th International Conference on World Wide Web. 2017: 1015-1024.
- [13] GUPTA P, SCHÜTZE H, ANDRASSY B. Table filling multi-task recurrent neural network for joint entity and relation extraction[C]//Proceedings of COLING 2016, the 26th International Conference on Computational Linguistics: Technical Papers. 2016: 2537-2547.
- [14] KATIYAR A, CARDIE C. Going out on a limb: Joint extraction of entity mentions and relations without dependency trees[C]//Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers). 2017: 917-928.
- [15] ZHENG S C, WANG F, BAO H Y, et al. Joint extraction of entities and relations based on a novel tagging scheme[C]//Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers). 2017.
- [16] ZENG X, ZENG D, HE S, et al. Extracting relational facts by an end-to-end neural model with copy mechanism[C]//Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers). 2018: 506-514.
- [17] FU T J, LI P H, MA W Y. GraphRel: Modeling text as relational graphs for joint entity and relation extraction[C]//Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2019: 1409-1418.
- [18] WEI Z P, SU J L, WANG Y, et al. A novel cascade binary tagging framework for relational triple extraction[J]. Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2019.
- [19] 代婷婷, 周乐, 余泰勇, 等. 基于需求评估响应的循环迭代本体构建方法[J]. 计算机应用, 2020, 40(9): 2712-2718.
- [20] 王雪梅, 张春海. 一种改进的软件开发模型—组合模型研究[J]. 软件导刊, 2018, 17(11): 52-55.
- [21] 岳丽欣, 刘文云. 国内外领域本体构建方法的比较研究[J]. 情报理论与实践, 2016, 39(8): 119-125.
- [22] LINDBERG D A B, HUMPHREYS B L, MCCRAY A T. The unified medical language system[J]. Yearbook of Medical Informatics, 1993, 2(1): 41-51.
- [23] 李江华, 时鹏, 郑剑. 一种基于语料的本体评价方法[J]. 情报杂志, 2012, 31(7): 187-190.
- [24] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[J]. ArXiv preprint arXiv: 1810.04805, 2018.
- [25] LIU Y, OTT M, GOYAL N, et al. Roberta: A robustly optimized bert pretraining approach[J]. ArXiv preprint arXiv: 1907.11692, 2019.