DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)08-0151-05

一种基于关键链法的低成本电力通信安全自动监控系统设计

付薇薇，顾 思，刘 健，门宝霞
（国网冀北电力有限公司承德供电公司，河北 承德 067000）

摘 要：为解决传统通信安全自动监控系统在使用中的问题，提出一种基于关键链法的低成本电力通信安全自动监控系统，并对系统硬件和软件进行详细设计。硬件设计中，设计包括传感器模块、信号采集模块、数据处理模块和人机交互模块等功能模块在内的硬件结构框架；软件设计中，建立低成本电力通信信道模型，通过关键链法寻找关键路径，设置合理的资源调度顺序，并结合电力通信网络中的各层通信协议，实现对电力通信网络的实时监控，并将其应用于实际工程。系统性能测试结果显示，在改变自干扰链路信道增益、干扰链路信道增益、可疑链路信道不确定性关系等参数下，设计的基于关键链法的低成本电力通信安全自动监控系统与理想监控方案的窃听非中断概率曲线一致，验证了系统在应用中的有效性。

关键词：电力通信；自动监控；系统设计；关键链法；低成本通信
中图分类号：TP277 **文献标识码：**A **文章编号：**1003-7241(2025)08-0151-05

A Design of Low-cost Automatic Monitoring System for Power Communication Security Based on the Critical Chain Method

FU Weiwei, GU Si, LIU Jian, MEN Baoxia
(Chengde Power Supply Company, State Grid Northern Hebei Electric Power Co., Ltd., Chengde 067000, China)

Abstract: To solve the problems of traditional communication security automatic monitoring systems in use, a low-cost power communication security automatic monitoring system based on the critical chain method is proposed, and the system hardware and software are designed in detail. In hardware design, a hardware structure framework is designed that includes functional modules such as sensor module, signal acquisition module, data processing module, and human-machine interaction module. In software design, a low-cost power communication channel model is established, critical paths are found through the critical chain method, reasonable resource scheduling sequence is set, and real-time monitoring of the power communication network is achieved by combining various communication protocols in the power communication network, and it applies it to practical engineering. The system performance test results show that the designed low-cost power communication security automatic monitoring system based on the critical chain method has consistent eavesdropping non interruption probability curves with the ideal monitoring scheme under changing parameters such as self interference link channel gain, interference link channel gain, and suspicious link channel uncertainty relationship, verifying the effectiveness of the system in application.

Keywords: power communication; automatic monitoring; system design; critical chain method; low cost communication

0 引言

随着电网规模的不断扩大和电网智能化程度的不断提高，电力通信网络越来越多地应用于电力生产调度、控制管理和负荷控制等各个环节[1]。在当前智能电网发展背景下，为满足电网调度需求，需要建立一个灵活、可靠、安全的电力通信网络。电力通信网络是由分布在不同地理位置的电力设备组成，具有良好的可扩展性和灵活性，能够满足电网通信的需求[2]。为了保障电力通信网络安全可靠运行，需要对电力通信网络中的各设备进行安全自动监控，通过实时监测电力通信网络中的设备运行状态，并对异常情况做出预警，及时排除潜在的安全隐患。然而，在实际应用中发现，目前对电力通信网络安全自动监控系统的研究还比较少，特别是针对低成本电力通信网络的监控研究还比较少。为了保证通信过程中的成本较低，因此经常会更改信道的参数。目前应用于电力通信网络中的监控系统一般都采用传统方法进行监控，传统的针对低成本电力通信安全自动监控系统中，在信道参数改变的情况下，通信安全自动监控系统的监控性能会受到影响，降低监控系统能够成功解码可疑用户信息的概率[3]。为解决传统的电力通信安全自动监控系统环境适应性差、监控性能低的问题，本文提出一种基于关键链法的低成本电力通信安全自动监控系统，详细介绍了该系统的硬件和软件设计，并对该系统进行设计实现。

*基金项目：工信部2022年产业基础和制造业高质量发展专项(TC220H07F)
收稿日期：2023-10-24

1 低成本电力通信安全自动监控系统设计

1.1 硬件设计

为实现电力通信网络的实时监控，需完成系统硬件架构设计。该硬件架构主要由传感器模块、信号采集模块、数据处理模块和人机交互模块构成。

传感器模块负责采集通信网络中的电压、电流和温度等信号，对这些信号进行调理后传输至信号采集模块[4]。信号采集模块对接收到的信号进行处理，通过串口或控制器局域网（controller area network，CAN）总线将数据传送至数据处理模块。数据处理模块的主要功能是对接收到的数据进行存储和计算，计算完成后，通过串口将结果发送至人机交互模块[5]。人机交互模块接收数据处理模块发送的结果，并在屏幕上进行显示。

传感器模块、信号采集模块与数据处理模块之间通过现场总线相互连接，这种连接方式为系统硬件架构的各部分提供了必要的接口，同时也为整个系统提供了坚实的硬件支持[6]。硬件总体架构如图1所示。

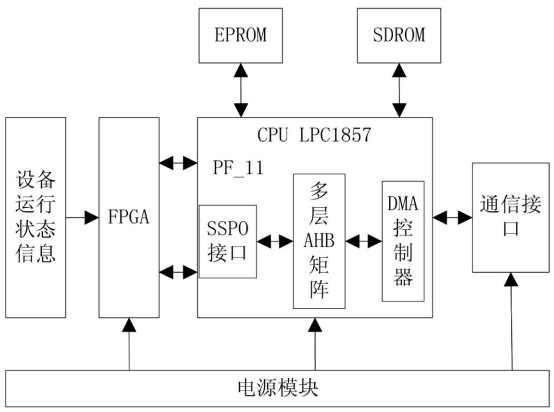


图1 硬件总体架构

传感器模块与信号采集模块通过RS232串口与PC机相连，PC机再通过USB接口与计算机连接。传感器和信号采集模块接收数据后，将其送入信号处理模块进行处理，从而得到有效数据[7]。信号采集模块将有效数据传输至数据处理单元，数据处理单元依据系统预设的通信协议对有效数据进行处理，之后通过串口将处理结果发送给人机交互芯片。人机交互芯片通过CAN总线与计算机连接，并通过USB接口接收计算机传输的各种信息，进而实现人机交互。

在上述硬件架构中，传感器和信号采集模块、信号采集与处理单元以及人机交互芯片均是支撑系统正常运行的重要组成部分。为实现对电力通信网络中各节点设备的安全自动监控，系统还需对各节点设备进行实时监测，并评估其安全状态。

1.2 软件设计

1.2.1 建立低成本电力通信信道模型

电力通信信道是以电力通信网络为载体传输信息的通道，主要分为有线信道和无线信道。有线信道主要用于传输电话、电报等；无线信道主要用于传输广播、电视信号等[8]。在实际应用中，电力通信网络的链路较长，因此为了提高信息传输的效率和安全性，在设计时需要建立一种低成本的通信信道模型。在建立通信信道模型时，需结合电力通信网络的结构和特点，建立一种基于数据包时延、传输效率等特性的数据包模型。在建立数据包模型时，需要对数据包进行过滤，过滤掉具有安全隐患和错误信息的数据包。此外，还需对传输效率和可靠性进行考虑，通过一定的算法来选择最优的通信路径[9]。在本文的系统中，假设监控系统中可疑接收者是通过MMSE来估计可疑通信链路的状态，那么在此过程中，信道增益与信道误差之间存在下述关系，为

$$h_{A,B}=\hat{h}_{A,B}+\tilde{h}_{A,B} \tag{1}$$

式中，$\hat{h}_{A,B}$表示独立的零均值圆对称复高斯随机变量，$\tilde{h}_{A,B}$表示对应的方差。对于可疑的接收者来说，通信过程中的状态信息实时获取难度较大，因此需要借助隐藏节点来估计信道瞬时状态信息。但是信道是存在一定参数误差的，因此将通信信道分为物理层、数据链路层和网络层三个部分[10]。其中物理层是系统与外界进行信息传输的媒介；数据链路层负责对物理层提供的信息进行处理；网络层负责在物理层与网络层之间传递信息[11]。通过将不同层级间的通信数据进行分析处理，即可建立电力通信网络中传输效率高、安全性强、可靠性高、性能稳定的通信信道模型。

1.2.2 基于关键链法安全自动监控进度管理

根据电力通信网络的拓扑结构，为保证系统对安全自动监控的准确性，需要对各个节点的资源进行合理的调度。在传统的计划方法中，当项目出现较大资源调整时，由于未考虑到资源之间的相互影响关系，导致资源紧张情况下，出现任务不能按时完成的情况[12]。而在基于关键链法的安全自动监控系统中，可以根据电力通信网络中节点资源间的相互影响关系，建立合理的资源调度顺序。根据系统监测任务WBS分解的要求，对监控任务进行逐层分解，分解结构如图2所示。

首先，依据电力通信网络中节点设备的物理位置，将其划分为不同的簇。在此基础上，结合各簇节点之间的物理距离以及负载能力，制定合理的资源调度顺序[13]。例如，若某一节点设备具备较高且较多的负载能力，则可赋予其优先处理权限。

其次，构建关键链法中的关键路径模型。鉴于电力通信网络中节点设备之间存在相互影响的关系，在关键链模型里，按照这种相互影响关系，将各节点设备划分为

若干关键路径[14]。

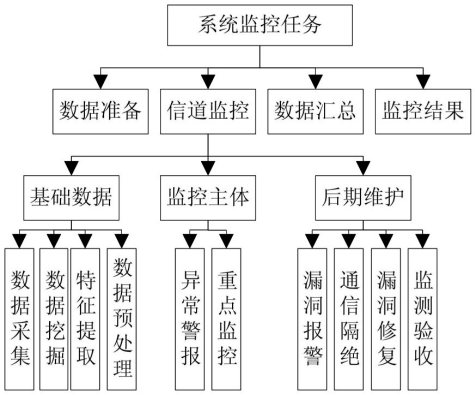


图2 关键链法监控分解结构

由于系统监控过程各环节衔接紧密,对监控耗时有一定要求[15]。同时,监控过程中的各项活动和程序也相互关联、环环相扣。因此,需要对监控系统中的各个工序和活动进行科学合理的规划,并准确识别其中的关键路径,具体内容如表1所示。

表1 监控过程中关键路径逻辑表

工作代码	工作名称	紧前工作	紧后工作
A	数据采集	/	B
B	数据挖掘	A	E、G、H
C	特征提取	B	D
D	数据预处理	B	F
E	异常警报	D	G
F	重点监控	E	G
G	漏洞报警	E、F	H、I
H	通信隔绝	E、F	J
I	漏洞修复	G	J
J	监测验收	I	/

当某个节点设备发生故障时,可以将该节点设备作为关键路径进行处理。最后将各个关键路径上的所有任务进行优化处理,在满足工作持续时间和资源限制条件下,使所有任务按照一定的优先级顺序进行处理。在本文设计的基于关键链法安全自动监控系统中,利用关键链法可以实现对电力通信网络安全自动监控过程中各个任务的调度与管理。根据实际情况设置合理的调度顺序,使整个电力通信网络中各任务按照一定优先级顺序进行处理,保证整个过程能有效进行。至此完成基于关键链法的低成本电力通信安全自动监控系统设计。

2 系统性能测试

2.1 测试设计

为了验证本文设计的基于关键链法的低成本电力通信安全自动监控系统在实际电网算例中的有效性,对系统的使用环境进行搭建。本文选择某风电机作为研究实例,在风电机运行的过程中,远程维护与调度运行,都需以风电机组作为控制对象进行操作。测试风电机组的结构如图3所示。

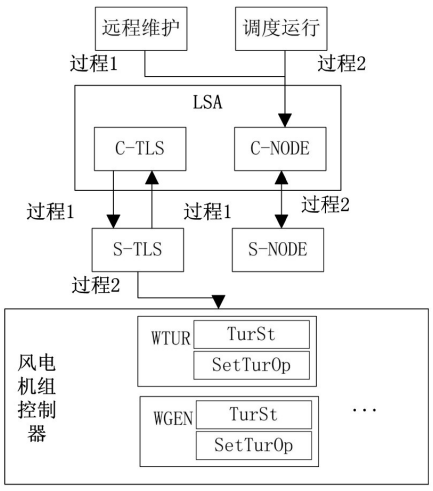


图3 测试风电机组结构示意图

在图3中的风电机组中,过程1表示为通信访问控制策略的实现过程。图3的风电机组中,包含较多的逻辑节点,因此通信安全自动监控系统在运行过程中,对于数据信息具有不同的访问权限。具体的权限分配如表2所示。

表2 测试过程中电力通信权限分配

权限分配	远程维护	监控系统
WTUR.Turst	View/Get	View/Get
WTUR.SetTurOp	-	Set
WGEN.GnOpMod	View	Get/ Set
WGEN. GnSpd	View	Get/ Set

本文设计的通信安全自动监控系统中,监控通信信息在交互过程中的示意图如图4所示。

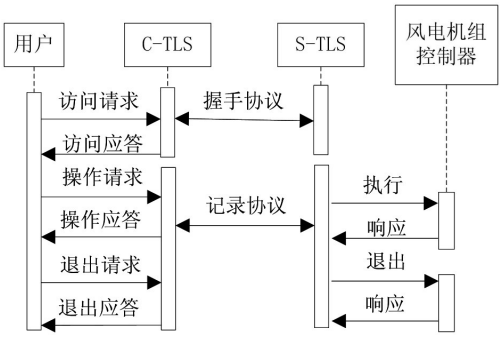


图4 电力通信安全监控监护过程示意图

电力通信受到监控系统的监控,其中的远程控制中心以及内部运营系统等都能够向监控系统提供内部的监控信息。上述的信息是控制电力通信安全的重要依据。在以上的系统测试环境下,分别使用本文设计的基于关键链法的自动监控系统和传统的监控系统共同进行测试,选择窃听非中断概率作为评估指标,该指标表示自动监控系统从通信可疑攻击窃听的信噪比大于等于可疑接收者获取的信噪比,表示监控系统能够成功解码可疑用

户信息。以该指标作为测试结果，分别使用本文设计的基于关键链法的低成本电力通信安全自动监控系统、基于DNP的监控系统、基于ARM的监控系统共同进行测试，并将测试结果进行对比与分析。

2.2 实验结果对比与分析

在以上的实验设计下，改变自干扰链路信道的增益，分析不同监控系统下的窃听非中断概率。得到的结果如图5所示。

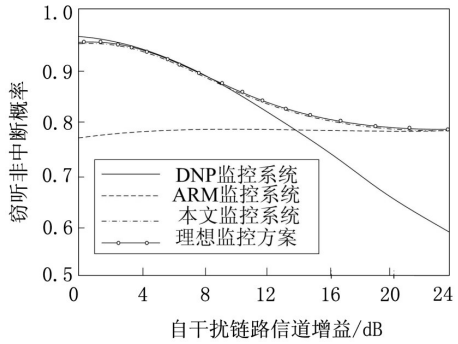


图5 不同自干扰链路信道增益下系统测试结果对比

从图5中的测试结果可以看出，自干扰链路信道增益情况对于高级精简指令集机器（advanced risc machines，ARM）监控系统的影响较小，对于分布式网络协议（distributed network protocol，DNP）监控系统的影响较大。随着自干扰链路信道增益不断在增加，DNP监控系统的窃听非中断概率减小，主要是由于自干扰现象逐步严重，影响了DNP监控系统的监控性能。在自干扰链路信道增益较小时，监控系统的人工噪声对可疑接收者的影响远高于自干扰对自己的影响。因此在理想的监控方案中，人工噪声以全功率发送的效果最好。从图5中可以看出，本文设计的基于关键链法的低成本电力通信安全自动监控系统在实际应用中，与理想的监控方案曲线重合度最高。验证了本文系统的有效性。

在相同的实验环境下，改变干扰链路信道的增益，分析不同自动监控系统下的窃听非中断概率。得到的结果如图6所示。

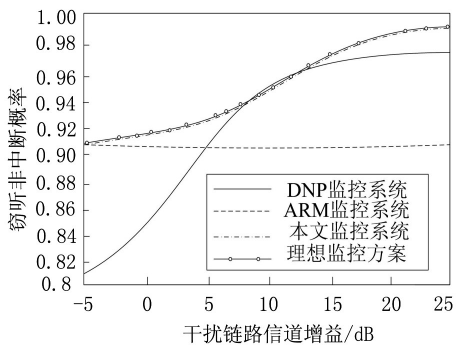


图6 不同干扰链路信道增益下系统测试结果对比

从图6可以看出，随着干扰链路信道增益的增加，除了ARM监控系统外，其他两种系统的窃听非中断概率都有一定程度的提升。本文设计的监控系统仍然与理想监控方案的曲线重合度最高，说明监控性能最好。

改变可疑链路信道的不确定性关系，分析不同自动监控系统下的窃听非中断概率。得到的结果如图7所示。

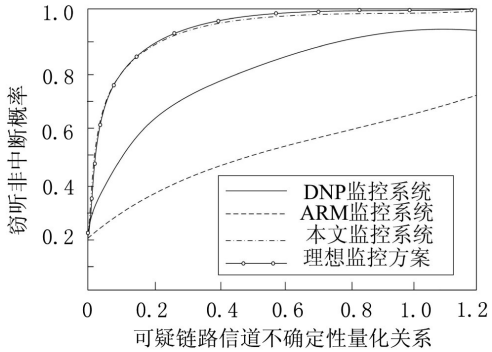


图7 不同可疑链路信道不确定性关系下系统测试结果对比

从图7中可以得知，在改变可疑链路信道不确定性量化关系的情况下，可以看出，仍然是本文系统的监控结果与理想的监控方案曲线重合度最高。

综上所述，对比两种传统的通信安全自动监控系统，本文所设计的基于关键链法的低成本电力通信安全自动监控系统在实际的通信信道变化应用中，其监控性能能够达到较理想状态。

3 结束语

本文提出了一种基于关键链法的低成本电力通信安全自动监控系统，在理论层面上详细阐述了该系统的工作原理与主要功能，并对其进行了仿真分析。仿真结果表明，该系统具有较高的监测精度、较快的响应速度以及较高的可靠性，可以有效地实现对电力通信网络安全自动监控，具有较强的应用价值。然而，由于目前技术水平和条件限制，该系统在实际工程中仍有一定的局限性。例如，在资源调度顺序方面，需要根据通信节点数进行合理的设置，以避免出现资源冲突。另外，由于该系统所使用的数据包类型相对较少，因此还需要进一步研究如何提高该系统在实际工程中的应用价值。

参考文献：

[1] 张亮，屈刚，李慧星，等. 智能电网电力监控系统网络安全态势感知平台关键技术研究及应用[J]. 上海交通大学学报，2021，55(S2)：103-109.

[2] 龚伟. 电力通信光纤线路状态自动化监测系统设计[J]. 激光杂志，2021，42(10)：152-156.

[3] 朱介北，邱威，孙宁，等. 基于序贯蒙特卡洛法的安全稳定控制系统架构可靠性分析[J]. 电力系统自动化，2021，45(15)：21-27.

[4] 陈向飞. 煤矿安全监控系统逻辑控制自动检测装置设计[J]. 工矿自动化，2022，48(6)：154-158.

[5] 吴悦，王海云，萨妮耶·麦合木提，等. 基于启发算法的含大规模新能源电力系统静态安全域分析[J]. 科学技术与工程，2022，22(11)：4375-4380.

[6] 孙万峰，李维波，李齐，等. 基于DMA与中断方式的组态监控系统容错通信技术[J]. 中国舰船研究，2021，16(4)：199-207.

[7] 李满礼，倪明，颜云松，等. 面向恶意攻击的安全稳定控制系统信息物理协调防御方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(18)：113-121.

[8] 吕新荣，李有明，吴永清，等. 基于稀疏贝叶斯学习的MIMO-OFDM电力线通信系统接收机设计[J]. 电信科学，2022，38(2)：25-34.

[9] 庞凯元，王一铮，文福拴，等. 计及通信失效的输电系统信息物理协同恢复策略[J]. 电力系统自动化，2021，45(3)：58-67.

[10] 陈佟，黄文雯，夏小萌，等. 基于RSA算法的电力通信工程环境安全监测方法[J]. 微电子学与计算机，2023(4)：63-71. .

[11] 罗华峰，许艾，陆承宇，等. 基于MMS替代协议的变电站安全通信技术研究及应用[J]. 电力自动化设备，2021，41(12)：206-211.

[12] 王梓宇，王镜毓，谢俊，等. 面向数据可用性的电力通信系统静态分层建模方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(20)：9-17.

[13] 单瑞卿，盛阳，苏盛，等. 考虑攻击方身份的电力监控系统网络安全风险分析[J]. 电力科学与技术学报，2022，37(5)：3-16.

[14] 张捷，陈生海，赵闻，等. 混合电力线-自由空间光通信系统解码转发协议下的性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2022，49(2)：143-148.

[15] 俞学豪，赵子岩，马应龙，等. 基于BR和GBDT的电力信息通信客服系统多标签文本分类[J]. 电力系统自动化，2021，45(11)：144-151.

作者简介：付薇薇(1989—)，女，硕士，中级工程师，研究方向：电力系统自动化及通信技术。

(上接第97页)

方法进行图像处理，并且对图像进行了倾斜校正，结合针对机械式仪表设计的检测以及对应的识别方法进行了程序设计，经过刻度线的提取预计表盘中的指针检测，实现机械式仪表指针读数的准确识别。本文完成了不同表盘的实验，可计算得到指针仪表的实际数值，验证了算法的合理性。该方法能有效去除人工观测所引起的误差并有效提高识别精度以及速度，有效提升机械式仪表读取以及检定的智能化水平。

参考文献：

[1] 董亮，王宾，徐旭东. 基于旧电表机械自动化分拣及检测技术研究[J]. 自动化技术与应用，2023，42(4)：130-133.

[2] 刘金海，祝忠钲，范旭，等. 基于BSRGAN的集气站仪表读数识别[J]. 自动化仪表，2023，44(8)：7-14.

[3] 张银，吕彦明，钱云杰. 基于OpenCV的数字仪表字符提取及快速识别研究[J]. 自动化仪表，2023，44(5)：46-50，55.

[4] 虞健，陈凯迪，施展，等. 基于深度学习的指针式仪表的读数检测方法[J]. 自动化与仪表，2023，38(7)：91-94，114.

[5] 侯卓成，欧阳华，胡鑫，等. 基于深度学习的模糊指针式仪表矫正读数方法[J]. 电子测量技术，2023，46(9)：158-165.

[6] 王明吉，倪子颜，李玉爽，等. 基于Python语言的HITRAN数据库接口可视化工具的开发与应用[J]. 化工自动化及仪表，2021，48(1)：79-84.

[7] 孟子尧，陈斯佳，吕天予，等. 基于深度学习的肾小球病理图像识别与分类[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2021，33(6)：947-955.

[8] 徐发兵，吴怀宇，陈志环，等. 基于深度学习的指针式仪表检测与识别研究[J]. 高技术通讯，2019，29(12)：1206-1215.

[9] 刘葵. 基于深度学习的指针式仪表示数识别[D]. 武汉：华中科技大学，2017.

[10] 何月，王丽颖，包霞，等. 多指针水表读数识别算法研究与实现[J]. 自动化与仪器仪表，2023(8)：313-316.

[11] 王艺达，肖遥，余慧敏，等. 基于Hough变换的指针仪表特征提取[J]. 现代电子技术，2022，45(24)：176-180.

[12] 毛同松，王维，金文杰. 变电站内指针式仪表自动测试装置研究[J]. 自动化技术与应用，2022，41(2)：111-114，129.

[13] 孙绍祖，刘今越，史宝军. 基于改进PSF参数估计的仪表模糊图像复原与识别[J]. 传感器与微系统，2022，41(9)：109-112，120.

[14] 彭道刚，黄孟俊，戚尔江，等. 基于YOLOv4的火电厂指针仪表识别方法研究[J]. 计算机应用与软件，2023，40(6)：166-172，222.

作者简介：刘岩(1983—)，女，硕士，副教授，研究方向：人工智能，自动化仪表。