

# 陕西省科学技术进步奖公示

**项目名称：**基于全可编程微系统平台的高可靠并行冗余网络技术

**提名者：**中共陕西省委军民融合发展委员会办公室

## 提名意见：

基于全可编程微系统平台的高可靠并行冗余网络技术为七七一所自主研发，项目组成员有：仇新亮、赵海婷、刘泽响、唐金锋、李灏、郑欣、王瑞晓。项目基于全可编程微系统平台的高可靠并行冗余网络技术适用于电子系统的新型高可靠网络互连，围绕电子系统以太网通信系统可靠性不足、冗余切换易失效实时性差等新需求，开展并行冗余网络协议在电子系统中应用。该技术支持冗余帧生成和去重机制，具备单点网络故障后数据零丢失和切换零延时，高吞吐量、低处理转发延迟、兼容性强、支持多扩展节点等特点，保障网络通信的可靠性和实时性，产品多项指标达到了国内先进水平。

该项目突破了基于三层协议的 PRP 网络数据处理技术、高吞吐协议处理电路微结构设计技术、网络节点信息自学习管理技术、复杂拓扑场景及动态时序冗余网络验证技术、软件定义协议软硬件适配技术、全自主协议处理微电路设计技术，实现了单点网络故障后数据零丢失和切换零延时、数十微秒级冗余数据处理转发延迟、具备高吞吐量、兼容性强、支持多扩展节点等特点。研究团队基于全正向自主研发并行冗余网络控制器 IP 核，实现了并行冗余网络协议控制器产品的全国产化电路研制，填补国内并行冗余协议控制电路产品的空白，实现了核心关键电路产品的完全自主可控，在性能上达到国内先进水平，为电子系统的高可靠、高带宽、强实时互联提供有力技术支撑。

本单位认真审阅了该项目的提名书及附件材料，对照陕西省科学技术进步奖授奖条件，相关栏目填写符合科技奖励要求，材料内容真实有效，候选人、候选

单位、知识产权和应用单位经公示无异议。

提名该项目为陕西省科学技术进步**三等奖**。

## 项目简介：

基于全可编程微系统平台的高可靠并行冗余网络（简称“PRP”）技术适用于电子系统的新型高可靠网络互连，依托型号任务技术指标要求，开展并行冗余网络协议在型号装备电子系统中应用。提出了基于“MAC+IP 地址”的三层并行网络协议通信技术，实现电子系统跨网段通信；基于虚拟动态表项窗口的冗余通信去重方法，将去重算法处理中信息查表次数降低 50%，实现网络单点故障的零延时双网切换；构建 HASH-CAM 并行流表站点管理方法，解决了网络规模扩大导致的节点表膨胀问题，站点管理数量提升至 1024。该技术支持以太网数据帧的冗余帧生成和去重机制，可实现单点网络故障后数据零丢失和切换零延时，最大支持 950Mbps 以上高吞吐量、处理转发延迟低（协议处理延迟 30us 级）、兼容性强、支持多扩展节点等特点，保障电子系统设备间网络通信的可靠性和实时性，产品多项指标达到了国内先进水平。

研制成果主要应用于对网络通信的可靠性、实时性有较高要求的电子系统中。产品形式包括微电路、软件、单板、单机和网络系统等多种软硬件产品。

本项目研制难度大、协议复杂，拥有多项自主知识产权，关键核心技术自主可控，研制的全自主协议处理专用 SiP 微电路填补了国内该类产品空白，达到三层并行冗余协议组网通信、高吞吐数据传输、网络通信可靠性提升的工程应用目标，技术国内领先，具有广泛的应用前景，产生了显著的军事、经济和社会效益。

### 1. 主要技术内容

围绕主干网的传输速率、实时性和可靠性的越来越高的需求，突破并行冗余网络协议通信技术研究，为航天及军用装备电子系统互联组网提供一整套高可靠系统解决方案。该研究目标将分阶段完成：

第一阶段，采用全正向设计方法，在遵循国际电工协会 IEC SC65 发布的 IEC 62439 高可用性自动化网络标准协议的基础上，对协议进行改进，满足三层网络通信协议，研制包括开展基于软件定义的并行网络协议适配器等产品。

第二阶段，实现一款完全自主协议处理微电路产品的研制，将 PSoC、DDR 内存颗粒、FLASH、复位电路和内存基准电源等进行一体化集成，形成具备高性能处理器、可编程逻辑单元、高速收发通道及软件自定义的并行冗余网络协议的 SiP 微电路，该微电路基于通用化、产品化的设计理念，依托先进的高可靠塑封工艺技术，实现异构可编程协议处理微电路产品，可面向高可靠、高实时、高集成度应用场景。通过本项目的研制工作，实现并行冗余网络技术及产品的核心自主可控，增强网络数据传输的可靠性和容错能力，从而满足扩展并行冗余协议网络接口的多种复杂应用场景。

#### (1) 并行冗余网络协议技术研究

该协议依托于国际电工发布的 IEC62439-3 高可用性自动化网络标准协议，通过在标准通信协议栈数据链路层的基础上额外引入一层链路冗余实体（Link Redundancy Entity, LRE），构建出一种既支持双链路冗余组网，也支持每条链路连接的局域网中任意结构的网络拓扑。其中主要包括 PRP 协议帧格式、PRP 网络架构、PRP 网络去重机制、PRP 节点维护和网络管理等。

##### a) PRP 网络去重机制

每个 PRP 节点拥有两个并行运行的端口，通过节点内的链路冗余实体 LRE 实现报文的“双发双收”功能。LRE 位于数据链路层，是连接底层网络适配器和上层网络接口的桥梁。LRE 承担冗余管理和数据帧的收发处理任务，工作流程依次为：冗余帧生成、双重发送、帧选择机制、消除重复帧。

##### b) PRP 节点维护和网络管理

PRP 通过维护精细化的节点表，记录本地节点与发生过通信关系的远程节点之间的通信信息。这些节点表不仅是链路冗余实体 LRE 识别和丢弃冗余帧的基础，也是网络检测和管理的重要数据来源。节点表的数量和其内部存储的参数会随着网络中设备数量及其复杂的通信关系而动态调整，这种灵活性使得系统能够应对各种规模的网络环境。节点表中存储的信息不仅包括基本的通信记录，还扩展了涵盖了节点的状态信息、网络收发地址等。同时 PRP 网络通过监控帧的

形式，完成对每个局域网以及它连接的设备的健康状态检测。监控功能依靠 PRP 节点周期性地发送监控帧，获取各节点的通信记录信息、单双节点信息以及错误状态记录，为网络运行提供监测手段。

#### （2）并行冗余网络协议控制器电路设计

在对并行冗余网络协议、网络架构、去重算法、通信原理等方面深入研究的基础上，PRP 项目团队基于 Verilog 数字逻辑电路设计语言采用全正向自主的研发途径，通过自顶向下的设计方法完成并行冗余网络协议控制器设计。该控制器结合硬件在流水线处理和并行计算方面的优势，实现控制信息和数据信息流水线协同处理结构，在对三层网络通信协议解析的基础上，优化了冗余控制尾的添加和删除、数据的丢弃及保留，以及不同接口间的数据转换操作，实现了并行冗余网络中混合流量共网的传输调度，同时通过维护精细化的节点表，记录本地节点与发生过通信关系的远程节点之间的通信信息，实时分析和记录每个数据包的传输状态，实现对网络运行的连续性监测，解决传统网络的冗余机制中故障恢复时间不确定问题。

#### （3）并行冗余网络协议栈软件适配技术

并行冗余网络协议栈的软件适配研究内容主要包括协议栈的组成与功能分析、操作系统适配、应用程序支持、硬件优化、性能测试与优化、兼容性测试、安全性与稳定性评估以及文档与技术支持。通过这些研究，确保并行冗余协议栈能够在不同软件环境中高效运行，兼容现有系统和设备，为各种应用场景提供可靠的网络通信解决方案。

#### （4）全自主协议处理微电路研制

协议处理微电路采用先进的系统级封装技术，将 PSOC、DDR、FLASH 等核心芯片封装在一起，具备高性能处理器、可编程逻辑单元、高速收发通道及软件自定义的并行冗余网络协议等功能；全自主体现在微电路的 IP 核设计、软件设计、电路设计、工艺实现、组装封装、测试验证等全流程所产化，形成了具有完全自主知识产权的微系统级电路产品。

基于全可编程微系统平台的高可靠并行冗余网络技术突破了基于三层协议的 PRP 网络数据处理技术、高吞吐协议处理电路微结构设计技术、网络节点信息自学习管理技术、复杂拓扑场景及动态时序冗余网络验证技术、软件定义协议软硬件适配技术、全自主协议处理微电路设计技术，实现了单点网络故障后数据零丢失和切换零延时、数十微秒级冗余数据处理转发延迟、具备高吞吐量、兼容性强、支持多扩展节点等特点，达到国内先进水平。研究团队基于全正向自主研发并行冗余网络控制器 IP 核，实现了并行冗余网络协议控制器产品的全国产化电路研制，填补国内并行冗余协议控制电路产品的空白，实现了核心关键电路产品的完全自主可控，在性能上达到国内先进水平，为电子系统的高可靠、高带宽、强实时互联提供有力技术支撑。

## 2. 知识产权情况

该项目研制过程中，申请国家发明专利 17 项（授权 16 项，已受理 1 项）、公开发表学术论文 9 篇、航天科技成果鉴定证书 1 份。

## 3. 主要技术指标

- (1) 提出了基于“MAC+IP 地址”的三层并行网络协议通信技术，实现武器装备电子系统跨网段通信。
- (2) 提出了基于虚拟动态表项窗口的冗余通信去重方法，将去重算法处理中信息查表次数降低 50%，实现网络单点故障的零延时双网切换。
- (3) 提出了一种构建 HASH-CAM 并行流表站点管理方法，解决了网络规模扩大导致的节点表膨胀问题，站点管理数量提升至 1024。

## 4. 应用推广及效益情况

基于全可编程微系统平台的高可靠并行冗余网络技术适用于电子系统的新型高可靠网络互连，围绕型号装备电子系统以太网通信系统可靠性不足、冗余切换易失效实时性差等新需求，开展并行冗余网络协议在型号装备电子系统中应用。项目研制的产品形式包括标准微电路、定制化软件、定制化单板、单机和网络系统等多种软硬件产品，相关产品已经稳定供货，已在众多项目中成熟应用，具有

良好的应用前景。

在应用推广方面，国内 PRP 研究方向主要在智能制造和电力系统方面进行攻关，可在智能制造系统中引入 PRP，通过构建实际的生产线网络环境，验证了 PRP 在提高系统可靠性和减少停机时间方面的优势。综上所述，各项研究成果不仅提升了 PRP 协议在实际应用中的效果，也为其在更多领域的推广奠定了基础。

## 客观评价：

基于全可编程微系统平台的高可靠并行冗余网络技术突破了基于三层协议的 PRP 网络数据处理技术、高吞吐协议处理电路微结构设计技术、网络节点信息自学习管理技术、复杂拓扑场景及动态时序冗余网络验证技术、软件定义协议软硬件适配技术、全自主协议处理微电路设计技术，实现了单点网络故障后数据零丢失和切换零延时、数十微秒级冗余数据处理转发延迟、具备高吞吐量、兼容性强、支持多扩展节点等特点，研究团队基于全正向自主研发并行冗余网络控制器 IP 核，实现了并行冗余网络协议控制器产品的全国产化电路研制，填补国内并行冗余协议控制电路产品的空白，实现了并行冗余网络技术核心关键电路产品的完全自主可控，达到国内先进水平。

## 应用情况和效益：

### 1. 应用情况

本项目的三层并行冗余网络协议处理技术、高吞吐协议处理电路微结构设计技术、网络节点信息自学习管理技术、仿真测试技术、软件定义协议软硬件适配技术等，目前已应用于航天万源科技、中物院 905 研究院等多家工程总体的电子系统互联总线产品中。研制成果主要应用于对网络通信的可靠性、实时性有较高要求的军用装备中，可用于雷达系统、车载系统、大型船舰等控制系统的互联网络系统设备研制。基于该协议技术的产品，已在众多装备项目中成熟应用。

### 2. 经济效益和社会效益

#### （1）经济效益

该项目适用于电子系统的新型高可靠网络互连，产品形式包括标准微电路、定制化软件、定制化单板、单机和网络系统等多种软硬件产品，相关产品已经稳定供货，其中微电路及单板类产品累积数量 231 块、产值 3291 万元；单机类产品累积数量 270 台、产值 12760.4 万元，总计 16051.4 万元。

#### （2）社会效益

该技术支持以太网数据帧的冗余帧生成和去重机制，可实现单点网络故障后数据零丢失和切换零延时，最大支持 950Mbps 以上高吞吐量、处理转发延迟低（协议处理延迟 30us 级）、兼容性强、支持多扩展节点等特点，保障电子系统设备间网络通信的可靠性和实时性。本项目应用中，实现了三层并行冗余协议组网通信、高吞吐数据传输、网络通信可靠性提升的工程应用目标，为高可靠以太网技术在型号装备电子系统中应用提供了有力支撑。

研究团队注重在特定应用场景下对 PRP 性能的分析，对 PRP 协议在工业物联网中的应用进行了深入研究，通过实物测试，探讨了不同网络拓扑结构和设备节点数目对 PRP 性能的影响。

在应用推广方面，国内 PRP 研究方向主要在智能制造和电力系统方面进行攻关，可在智能制造系统中引入 PRP，通过构建实际的生产线网络环境，验证了

**PRP** 在提高系统可靠性和减少停机时间方面的优势。

综上所述，各项关于 **PRP** 协议的研究成果不仅提升了 **PRP** 协议在实际应用中的效果，也为其在更多领域的推广奠定了基础。

## 主要知识产权和标准规范等目录：

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称                          | 国家（地区） | 授权号              | 授权日期             | 证书编号    | 权利人        | 发明人                    |
|----|--------|-----------------------------------|--------|------------------|------------------|---------|------------|------------------------|
| 1  | 发明专利   | 一种面向 PRP 网络的单窗口动态滑动与冗余管理系统与方法     | 中国     | ZL201910146105.0 | 2022 年 6 月 28 日  | 5262956 | 西安微电子技术研究所 | 赵海婷、卢飞、王瑞晓             |
| 2  | 发明专利   | 一种并行冗余以太网通信控制器及其控制方法              | 中国     | ZL201910741535.7 | 2022 年 7 月 29 日  | 5344880 | 西安微电子技术研究所 | 王瑞晓、赵海婷、卢飞             |
| 3  | 发明专利   | 一种 MAC 地址路由管理控制器、系统及控制方法          | 中国     | ZL202111277184.2 | 2022 年 11 月 15 日 | 5580519 | 西安微电子技术研究所 | 王瑞晓、唐金锋、刘泽响、张晓琳、哈云雪    |
| 4  | 发明专利   | 一种基于硬件快速自主切换的多冗余以太网控制器            | 中国     | ZL201710453480.0 | 2020 年 11 月 06 日 | 4080416 | 西安微电子技术研究所 | 刘露、唐金锋、赵海婷、唐雷雷         |
| 5  | 发明专利   | 一种基于请求响应式实时以太网载荷数据传输控制系统和方法       | 中国     | ZL202111007774.3 | 2023 年 09 月 19 日 | 6337679 | 西安微电子技术研究所 | 唐金锋、刘泽响、哈云雪、张晓琳、曾宇涛    |
| 6  | 发明专利   | 网络同步方法、系统、节点设备及可读存储介质             | 中国     | ZL202010568538.8 | 2022 年 02 月 11 日 | 4931104 | 西安微电子技术研究所 | 徐丹妮、唐金锋、刘露、王瑞晓、赵海婷、哈云雪 |
| 7  | 发明专利   | 一种基于描述符的 PCIE 总线 DMA 控制器及数据传输控制方法 | 中国     | ZL201811314380.0 | 2021 年 07 月 06 日 | 4529649 | 西安微电子技术研究所 | 唐金锋、刘扬、哈云雪、徐丹妮         |
| 8  | 发明专利   | 一种不同网络之间的跨网时钟同步通信装置及方             | 中国     | ZL201710454733.0 | 2019 年 04 月 16 日 | 3335690 | 西安微电子技术研究所 | 徐丹妮、郝淼、刘露、唐金           |

|    |      |                                         |    |                  |             |         |            |                        |
|----|------|-----------------------------------------|----|------------------|-------------|---------|------------|------------------------|
|    |      | 法                                       |    |                  |             |         |            | 锋                      |
| 9  | 发明专利 | 一种周期通信网络的链路延时测量方法、系统及FPGA               | 中国 | ZL202010568541.X | 2021年06月29日 | 4513848 | 西安微电子技术研究所 | 徐丹妮、唐金锋、王瑞晓、刘露、哈云雪、赵海婷 |
| 10 | 发明专利 | 一种计算机接口雷电电磁脉冲与抗电强度防护装置                  | 中国 | ZL202310144648.5 | 2026年04月07日 | 8848159 | 西安微电子技术研究所 | 刘丹、仇新亮、康明魁、程丹丹、张琳暄     |
| 11 | 发明专利 | 一种基于HASH和LRU算法的Linux模块化的并行冗余协议系统及数据处理方法 | 中国 | ZL202110655624.7 | 2022年06月11日 | 5935661 | 西安微电子技术研究所 | 郑欣、杭欣静                 |
| 12 | 发明专利 | 一种多协议数据总线适配器引擎架构设计方法                    | 中国 | ZL202110523236.3 | 2021年05月13日 | 5769679 | 西安微电子技术研究所 | 郑欣                     |
| 13 | 发明专利 | 一种基于REST和RPC的分布式集群系统及方法                 | 中国 | ZL201910208829.3 | 2019年03月19日 | 4532549 | 西安微电子技术研究所 | 郑欣、安鹏                  |
| 14 | 发明专利 | 一种双网冗余以太网控制器Linux网卡驱动控制器                | 中国 | ZL201910198907.6 | 2019年03月15日 | 5552593 | 西安微电子技术研究所 | 郑欣                     |
| 15 | 发明专利 | 一种多设备兼容的DMA数据传输引擎设计方法                   | 中国 | ZL202110524492.4 | 2021年05月13日 | 5783206 | 西安微电子技术研究所 | 郑欣                     |
| 16 | 发明专利 | 一种Linux模块化PRP协议栈系统                      | 中国 | ZL202210636702.3 | 2022年06月11日 | 6089617 | 西安微电子技术研究所 | 郑欣、杭欣静、范捷、杨敏跃          |
| 17 | 发明专利 | 一种高精度守时设备的多时钟源无缝切换电路及方法                 | 中国 | ZL202110055998.5 | 2023年8月4日   | 6202596 | 西安微电子技术研究所 | 唐金锋、王瑞晓、秦臻、姜甜、郑堃       |

|    |    |                                    |    |   |        |                                                      |                    |                           |
|----|----|------------------------------------|----|---|--------|------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| 18 | 论文 | 一种 LINUX 内核<br>高效并行冗余协<br>议栈设计     | 中国 | / | 2022 年 | 集团公司<br>信息化与<br>软件技术<br>专业组学<br>术交流会                 | 西安微电<br>子技术研<br>究所 | 郑欣、高<br>洪宇                |
| 19 | 论文 | 多种时间确定性<br>网络冗余路径技<br>术研究          | 中国 | / | 2025 年 | 集团公司<br>信息化与<br>软件技术<br>专业组技<br>术交流会                 | 西安微电<br>子技术研<br>究所 | 赵海婷、<br>李成蹊、<br>姜甜、田<br>鸽 |
| 20 | 论文 | 时间触发网络交<br>机控制器实现方<br>式            | 中国 | / | 2025 年 | 集团公司<br>信息化与<br>软件技术<br>专业组技<br>术交流会                 | 西安微电<br>子技术研<br>究所 | 赵海婷、<br>钟依林、<br>郑堃、刘<br>露 |
| 21 | 论文 | 面向空间应用的<br>大容量实时网络<br>总线架构         | 中国 | / | 2018 年 | 南京航空<br>航天大学<br>学报                                   | 西安微电<br>子技术研<br>究所 | 唐金锋、<br>哈云雪               |
| 22 | 论文 | 一种基于二级队<br>列调度的时间敏<br>感网络帧抢占机<br>制 | 中国 | / | 2024 年 | 微电子学<br>与计算机                                         | 西安微电<br>子技术研<br>究所 | 王紫涵、<br>刘泽响、<br>徐丹妮       |
| 23 | 论文 | 一种基于 SOC 架<br>构的实时网络通<br>信控制器设计    | 中国 | / | 2017 年 | 航天科技<br>集团航天<br>计算机、<br>微电子及<br>元器件应<br>用专业组<br>学术年会 | 西安微电<br>子技术研<br>究所 | 刘露、<br>徐丹妮、<br>唐金锋        |
| 24 | 论文 | 一种面向空间应<br>用的高可靠实时<br>网络技术         | 中国 | / | 2019 年 | 航天科技<br>集团航天<br>计算机、<br>微电子及<br>元器件应<br>用专业组<br>学术年会 | 西安微电<br>子技术研<br>究所 | 刘露、<br>徐丹妮、<br>王瑞晓        |
| 25 | 论文 | 面向空间应用的<br>多协议融合总线<br>架构研究         | 中国 | / | 2019 年 | 航天科技<br>集团航天<br>计算机、                                 | 西安微电<br>子技术研<br>究所 | 赵海婷、<br>王瑞晓               |

|    |    |                      |    |   |        |                          |            |            |
|----|----|----------------------|----|---|--------|--------------------------|------------|------------|
|    |    |                      |    |   |        | 微电子及<br>元器件应用专业组<br>学术年会 |            |            |
| 26 | 论文 | 基于多链表的虚拟输出队列共享缓存管理方法 | 中国 | / | 2024 年 | 航天科技集团航天计算机专业组学术年会       | 西安微电子技术研究所 | 冀海燕、王瑞晓、张鹏 |

主要完成人情况：

| 姓名  | 排名 | 行政职务  | 技术职称  | 工作单位       | 对本项目贡献                                                     | 专业    |
|-----|----|-------|-------|------------|------------------------------------------------------------|-------|
| 仇新亮 | 1  | 无     | 研究员   | 西安微电子技术研究所 | 项目负责人，总体方案设计，全自主协议处理专用 SiP 微电路开发                           | 计算机硬件 |
| 赵海婷 | 2  | 无     | 高级工程师 | 西安微电子技术研究所 | 协议设计负责人，协议方案策划                                             | 电子通信  |
| 刘泽响 | 3  | 副所长   | 研究员   | 西安微电子技术研究所 | 牵头论证，策划确定研究技术路线，参与总体技术方案和核心软硬件架构设计，关键技术攻关与系统应用提供指导         | 计算机硬件 |
| 唐金锋 | 4  | 副总工程师 | 研究员   | 西安微电子技术研究所 | 参与项目立项论证、方案论证和项目实施方案策划，产品定义与体系结构设计，全过程的技术方案制定和技术问题排查解决     | 电子通信  |
| 李灏  | 5  | 总工程师  | 研究员   | 西安微电子技术研究所 | 参与项目立项论证、方案论证和项目实施方案进行审定，全过程技术方案的研究与攻关，全过程的技术方案制定和技术问题排查解决 | 计算机硬件 |
| 郑欣  | 6  | 无     | 高级工程师 | 西安微电子技术研究所 | 软件负责人，PRP 桥阶层协议栈实现                                         | 计算机软件 |
| 王瑞晓 | 7  | 无     | 研究员   | 西安微电子技术研究所 | MAC 地址模块及节点识别机制负责人，参与协议方案设计                                | 电子通信  |

完成人合作关系说明：

基于全可编程微系统平台的高可靠并行冗余网络技术由西安微电子技术研究所独立开发研制，项目组成员有：仇新亮、赵海婷、刘泽响、唐金锋、李灏、郑欣、王瑞晓。仇新亮作为项目负责人，负责项目的总体方案制定、设计研制、研产把控以及产品推广工作，对产品的需求分析及全自主协议处理专用 SiP 微电路开发做出突出贡献。赵海婷作为协议设计负责人，主持该项目协议相关的内容策划、总体方案设计与 4 项关键技术的攻关。刘泽响牵头论证启动并行冗余网络技术方向研发，策划确定项目研究技术路线，参与总体技术方案和核心软硬件架

构设计，并为关键技术攻关与系统应用提供指导。唐金锋参与项目立项论证、方案论证和项目实施方案策划，参与项目研制全过程技术方案及关键技术点的研究与攻关，完成产品定义与体系结构设计，支持产品全过程的技术方案制定和技术问题排查解决，对项目完成起到关键性作用。李灏对项目立项论证、方案论证和项目实施方案进行审定，参与项目研制全过程技术方案的研究与攻关，支持产品全过程的技术方案制定和技术问题排查解决。郑欣作为软件负责人，实现 PRP 桥阶层协议栈及 PRP 三层交换能力。王瑞晓作为 MAC 地址模块及节点识别机制负责人，参与协议方案设计。该项目在各主要完成人的合作下，保证了项目的成功研制，并形成了多项发明专利、论文。

## **1、 主要完成单位及创新推广贡献：**

西安微电子技术研究所是本项目的主承单位，项目参与人员均为本单位职工。物联网是西安微电子技术研究所军民融合产业化的重点发展方向，推进航天技术向民用领域融合发展。为保障项目顺利实施，组建了一支包含系统设计、软硬件设计、结构设计、市场运营等多方面技术领域的物联网技术研发团队及专业的管理团队，并成立由所级领导、技术总师牵头的指挥线，为项目研制提供人员保障。此外，为本项目的研究提供了必要的研究设备、空间、经费支持等，对课题立项、设计及顺利完成提供了全生命周期的保障。

该项目的研究成果得到用户单位的肯定和大力推广。单位积极向用户企业推广，目前已应用于航天万源科技、中物院 905 研究院等多家工程总体的电子系统互联总线产品中。本项目研制成果主要应用于对网络通信的可靠性、实时性有较高要求的军用装备中，可用于雷达系统、车载系统、大型船舰等控制系统的互联网络系统设备研制。产品形式包括标准微电路、定制化软件、定制化的单板、单机和网络系统等多种软硬件产品，相关产品已经稳定供货，已经在众多装备项目中成熟应用，具有良好的应用前景。