

基于 PRP 协议的 EPICS 冗余技术

刘少海^{1,2} 陈永忠^{1,3} 韩利峰^{1,3}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

3 (中国科学院核辐射与核能技术重点实验室 上海 201800)

摘要 冗余技术是提高 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) 在核电领域应用可靠性的有效解决方案。不同于当前采用的“热备用”冗余模式, 本文借鉴 IEC 62439-3 标准所发布的并行冗余协议(Parallel Redundancy Protocol, PRP)阐述的“并行”冗余模式, 分析了该协议的应用层实现方案用于 EPICS 系统的可行性, 并参照 EPICS 的通道访问协议(Channel Access, CA), 在 Linux 系统下开发了基于 PRP 的 EPICS CA 协议软件。测试表明, 基于 PRP 应用层协议方案的 EPICS CA 协议, 在网络单点故障时可以实现无缝切换的高可靠性要求, 为提高核电领域 EPICS 系统的通信网络可靠性, 提供了实现方式。

关键词 并行冗余协议, 核电, EPICS, 网络冗余, 可靠性

中图分类号 TL362⁺.5

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.040401

由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)和阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)等联合开发的大型分布式实时控制软件系统 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)^[1-2], 以其易扩展、开源、高可靠性、高性能以及对多平台的支持, 已被应用到核电领域的大科学实验装置中。如国际热核聚变实验反应堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)^[3]、中国科学院钍基熔盐核能项目前期研发中的反应堆功率控制系统^[4]等。由于核电的特殊性, 对 EPICS 系统网络通信的可靠性提出了更高的要求, 而冗余技术恰是提高 EPICS 系统通信网络的稳定性、可靠性的有效方法之一。

当前, EPICS 控制系统的冗余技术主要采用 IOC (Input/Output Controller) “热备用”的模式, 通过备用、切换的方式使系统在产生故障时仍然能正常运行。如文献[4-6]提出采用德国电子同步加速器(Deutsches Elektronen Synchrotron, DESY)实验室的 IOC 冗余方法和采用 Linux-HA 的 Heartbeat 软件来实现 EPICS IOC 的冗余切换, 热备切换时间小于 1 s^[4]。

为进一步提高可靠性, 本文借鉴了其他工控领域(如智能变电站)的先进冗余技术, 参考 IEC

62439-3^[7]发布的并行冗余协议(Parallel Redundancy Protocol, PRP), 以及文献[8]提出的 PRP 在应用层实现的协议方案, 探索用“并行”冗余模式来实现 EPICS 通信网络的冗余。

1 EPICS 系统软件结构

基于分布式标准的 EPICS 结构如图 1^[2]。EPICS 是基于客户端/服务器模型的软件工具集, 主要包括两部分: OPI (Operator Interface)层和 IOC 层。OPI 分两层: 通道访问 CA 客户端接口和应用软件; IOC 分 6 层: 通道访问 CA 服务端和客户端接口、数据库访问接口、动态数据库、记录支持模块、设备支持模块、设备驱动器。EPICS 软件系统的核心机制是分布式动态数据库(Runtime database)和通道访问协议(Channel Access, CA)。

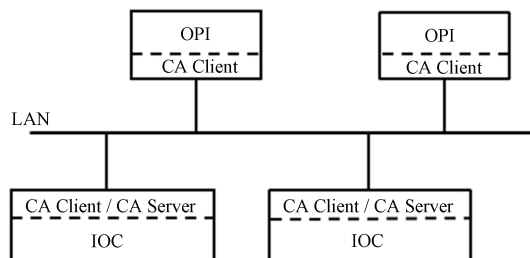


图1 EPICS 系统结构
Fig.1 Structure of EPICS.

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02010300)资助

第一作者: 刘少海, 男, 1988 年出生, 2012 年毕业于三峡大学, 现为硕士研究生, 核技术及应用专业

通讯作者: 陈永忠, E-mail: chen Yongzhong@sinap.ac.cn

收稿日期: 2015-01-19, 修回日期: 2015-03-02

分布式动态数据库中记录的数据单元称为过程变量(Process Variable, PV), 它实时地反映 I/O 量的控制与运行属性。

EPICS 软件中的各个组件通过 CA 交换数据。CA 是 EPICS 依据客户端/服务端模型, 建立在 UDP/IP 与 TCP/IP 网络通讯协议之上的应用层协议, 是连接 OPI 与 IOC 的一条软件总线, 为 OPI 和 IOC 分别提供应用接口子程序库^[9]。

2 PRP 应用层协议方案

IEC 62439-3 发布的 PRP 采用网络节点冗余的方式^[7,10], 以“并行”的冗余模式, 从理论上实现了零自愈时间(切换时间为 0)的无缝切换效果。PRP 协议可以通过驱动层软件、应用层软件或硬件来实现^[7-8,11]。本文根据 EPICS CA 是基于 TCP/IP 的应用层协议且采用客户端/服务端模型这一特性, 选择将 PRP 应用层协议方案作为研究对象。在应用层实现的 PRP 协议的节点结构与网络拓扑如图 2^[8]。

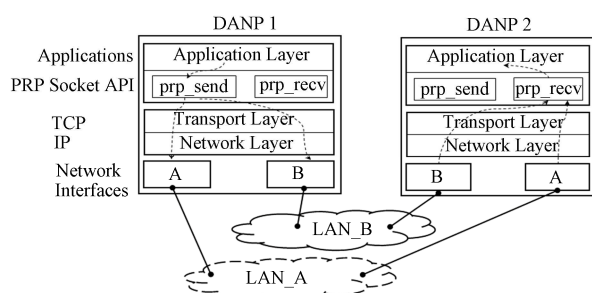


图 2 应用层的 PRP 节点结构与网络拓扑
Fig.2 Node structure and network topology of PRP on the application layer.

网络中的节点用双端口分别连接到两个独立的、并列运行的、拓扑结构无关联的局域网中。且节点的两个以太网卡的 MAC 地址不同, IP 地址处于不同网段。因此, 其中一个局域网发生单点故障时, 不会影响到另一个正常局域网的通信。对两节点间通信, 单点故障并不会干扰正常通信; 因为没有切换, 故自愈时间为 0。

图 2 中, PRP Socket API (Application Programming Interface)是协议中额外一层, 它对系统 Socket 的接口函数 `recv()`和 `send()`分别进行处理, 并封装成新的接口函数 `prp_recv()`和 `prp_send()`。应用软件可通过调用 PRP Socket API 来实现冗余功能——调用重复报文丢弃算法来实现对报文的“双发双收”。

2.1 重复报文处理

在发送节点中, PRP Socket API 收到来自应用上层的数据后, 复制成两份; 根据两个网卡 IP 的不同, 分别给数据帧加上 4 字节的冗余控制标签 (Redundancy Control Tag, RCT), 然后经 TCP/IP 层层封装后, 将其分别从对应的网卡同时发送出去。

RCT 的封装格式见图 3。由三个参数组成: 占 16 位的序列号 (Sequence)、占 4 位的局域网标识符 (LAN) 和占 12 位的用户数据总长度 (Size)。

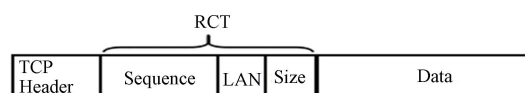


图 3 PRP 封装格式
Fig.3 Format of PRP encapsulation.

接收节点收到一对逻辑上的“重复”报文后, 通过提取 RCT 参数, 配合各自对应的局域网建立的重复报文丢弃算法, 即可实现对冗余报文的处理。使先到的报文上传, 后到达的报文被丢弃。

根据 IEC 62439 发布的 PRP 协议标准以及其扩展协议 HSR 标准。重复报文丢弃算法可以采用丢弃窗口算法、基于查阅表的算法等^[7,12]。本文采用丢弃窗口算法, 如图 4 所示。丢弃窗口由三个参数组成: 本局域网丢弃的最小序列号 `startSeq`、保存在数据帧 RCT 中的 `currentSeq` 以及期望序列号 `expectedSeq`, 且 `expectedSeq = currentSeq + 1`。

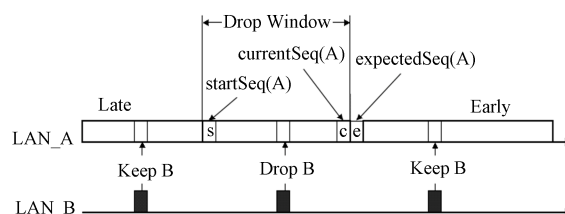


图 4 丢弃窗口算法
Fig.4 Drop window algorithm.

若来自局域网 B 的报文的 `currentSeq` 落入网 A 的丢弃窗口内, 则将其丢弃。若 `currentSeq` 落在网 A 的丢弃窗口外, 则该报文上传。

3 基于 PRP 的 EPICS CA 协议软件构架

EPICS 的各个组件间 (OPI 与 IOC, IOC 与 IOC) 的通信, 必须通过 CA 进行。CA 协议和 PRP 应用层协议方案均采用客户端/服务端模式, 且都基于 TCP/IP, 有良好的兼容性。本文将研究 CA 协议调用 PRP Socket API, 使 CA 协议具备并行冗余功能, 以提高 EPICS 通信的可靠性。

冗余 EPICS 系统软件结构如图 5 所示。

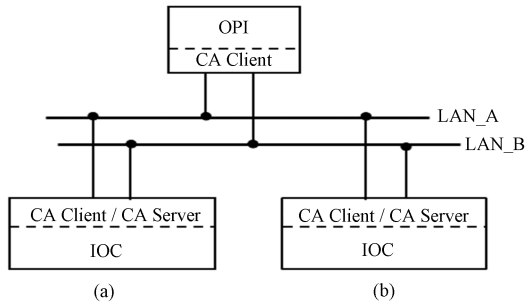


图 5 冗余的 EPICS 系统结构
Fig.5 Structure of redundant EPICS.

CA client 要实现与 CA server 的通信，基本上要完成两个步骤：通道的定位和数据的读写。

3.1 通道定位

CA client 通过向子网或预先定义的地址列表发送 UDP 广播包搜索目标机和过程变量 PV。网络中的 IOC 的 CA server 在收到 UDP 广播消息后，将在本地运行的数据库中检索。拥有请求的 PV 的 IOC 也将通过向 CA client 发送 UDP 包给出应答，没有请求的 PV 的 IOC 将会忽略这一广播消息。

由于 PV 在整个 EPICS 控制系统中必须是唯一标识，这要求 EPICS 系统中的所有记录必须具有不同的名称。在非冗余情况下，若出现多个 IOC 对客户端的 PV 广播搜索给出应答，CA client 将只接受第一个到达的 UDP 消息，后面的应答消息将会被忽略。这说明 CA 协议在基于 UDP/IP 协议的通道定位过程中，具备良好的并行冗余数据处理功能。

3.2 数据读写

定位通道以后，CA client 将会获得给出应答的 IOC 的 IP 地址和通信端口号等信息，然后 CA client 就会与此 IOC 的 CA server 之间建立可靠的、可复用的 TCP 连接，实现数据的读写。如果在同一 IOC 上发现多个 PV，将使用同一个 TCP 连接完成通信。

于是，要使 EPICS 的实现并行冗余通信，必须解决 CA 协议基于 TCP/IP 的并行冗余的问题。即必须使 CA 协议客户端在获得冗余 IOC 其中一个的 IP 地址及通信端口以后，再在推导出另一冗余网络对应的 IOC 的 IP 及通信端口，然后通过两个局域网分别建立 TCP 连接，并让 OPI（或 IOC）的应用程序调用 PRP Socket API，即 `prp_rcv()` 和 `prp_send()` 来完成通信数据的“双发双收”。

原 CA 协议的 CA sever 基于 TCP 的程序模块，主要采用“单客户端多线程、统一 `accept()` 的 TCP 并发服务器模型”^[13]。当客户端连接到来后，`accept()` 新生成的 socket 将会放入 client 结构体中，程序以后的操作将以 client 为操作对象。然后使用 `epicsThreadCreate()` 函数建立一个线程来进行客户端请求的处理。

为增强 PRP Socket API 与 CA 协议的兼容性，本文只在其创建、调用 socket 函数的时候，同时创建和调用了相同的 socket 函数，并用 `prp_rcv()` 和 `prp_send()` 替代 `recv()` 和 `send()` 等 IO 接口。如此，就在原协议基础上建立了第二条并行的 TCP 通道。

基于 PRP 应用层协议方案的 EPICS CA 协议软件构架如图 6 和图 7。

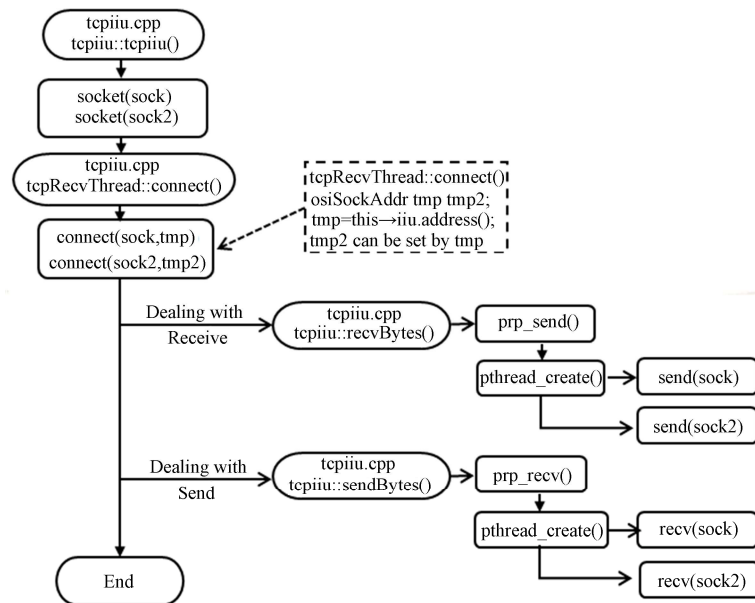


图 6 双网卡 CA client 的 TCP 客户端模型
Fig.6 TCP client model of CA client with dual network interface cards.

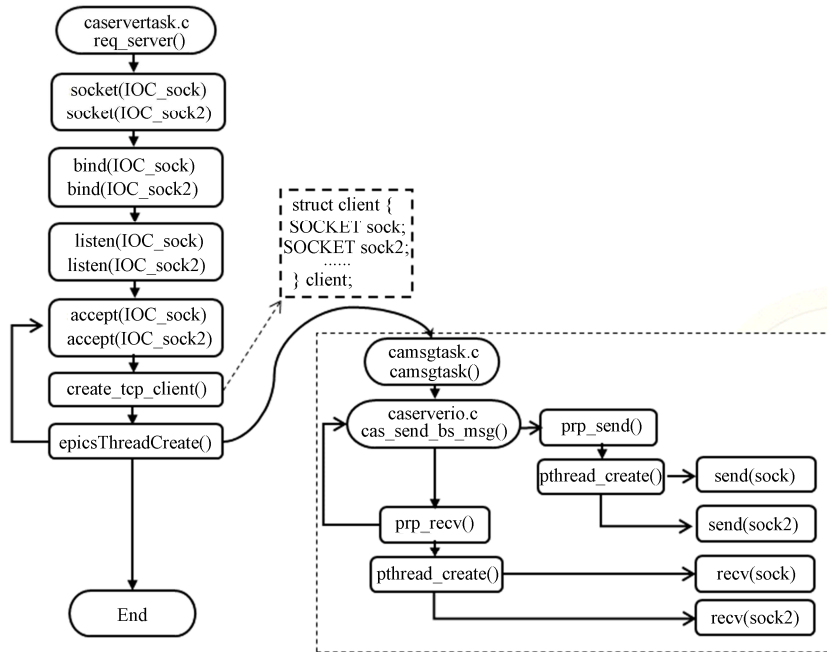


图 7 双网卡 CA server 的 TCP 并发服务器模型
Fig.7 TCP concurrent server model of CA server with dual network interface cards.

4 测试

本文在凌华科技 ATCA 的两台刀片服务器 aTCA-6900 上分别安装操作系统 Red Hat Enterprise Linux 6 和 EPICS Base R3.14.12, 用实验室局域网搭建了如图 5 所示的 EPICS 并行冗余性能平台。其中, 节点(a)将作为 Soft IOC, 节点(b)将在 Linux 终端通过 EPICS 命令行工具(caget、caput、camonitor 等)调用 CA client 作为客户端, 读取和显示节点(a)中 Soft IOC 的 PV 值。IOC 数据库中的部分记录如下:

```

record(calc, "$(user):calcExample")
{
    field(DESC, "Counter")
    field(SCAN, "1 second")
    field(FLNK, "$(user):aiExample")
    field(CALC, "(A<B)?(A+C):D")
    field(INPA, "$(user):calcExample.VAL    NPP
NMS")
    field(INPB, "9")
    field(INPC, "1")
    field(INPD, "0")
    field(EGU, "Counts")
    field(HOPR, "10")
    field(HIHL, "8")
    field(HIGH, "6")
    field(LOW, "4")
    field(LOLO, "2")
  
```

```

    field(HHSV, "MAJOR")
    field(HSV, "MINOR")
    field(LSV, "MINOR")
    field(LLSV, "MAJOR")
  }
  
```

节点(a)上启动 IOC 后, 在节点(b)上通过 camonitor 监测过程变量 shawn:calcExample。其中节点间的通信间隔时间 t 为扫描时间 SCAN。SCAN= 500 ms 时 camonitor 的运行结果见图 8。

在运行期间, 使网络 B (或网络 A) 发生单点故障。记录在不同 SCAN= {1 s, 500 ms, 200 ms, 100 ms, 80 ms, 50 ms} 下, 包括故障点的节点通信间隔时间 T (T =切换时间+SCAN) 在内的故障发生前后的 80 个通信间隔时间 t 。图 9 为扫描时间 (SCAN)=100 ms 的三次测试结果散点图。

由图 8 可知, EPICS 的冗余 CA 协议在“通道定位”过程中, 能够从冗余的 IOC 中选择其中一个作为 TCP 连接的对象。

由图 9 可知, “数据读写”过程中出现单点故障 (如 LAN_B 断开) 时, 故障点的通信间隔时间 t (横坐标 $X=40$ 的点) 与正常通信间隔时间 t 在误差允许的范围内相等, 即无明显的切换时间, 单点故障并不会影响节点间的通信。基于“并行”模式的冗余方法可以为提高 EPICS 通信的可靠性提供一种很好的思路和实现方式。

```

[node6@localhost base-3.14.12.4]$ camonitor shawn:calcExample
CA.Client.Exception.....
Warning: "Identical process variable names on multiple servers"
Context: "Channel: "shawn:calcExample", Connecting to: 192.168.1.211:
5064, Ignored: 192.168.0.211:5064"
Source File: ../cac.cpp line 1298
Current Time: Wed Jan 14 2015 19:10:13.711289845
.....
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=1
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=1
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=2
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=2
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:16.820509 6 HIGH MINOR
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=3
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=3
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:17.320508 7 HIGH MINOR
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=4
2015-01-13 19:14:17.820509 8 HIHI MAJOR
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=4
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:18.320508 9 HIHI MAJOR
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=5
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=5
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:18.820509 0 LOLO MAJOR
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=6
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=6
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:19.320509 1 LOLO MAJOR
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=7
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=7
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:19.820509 2 LOLO MAJOR
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=8
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=8
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:20.320508 3 LOW MINOR
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:20.820509 4 LOW MINOR
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=9
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=9
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:21.320509 5
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:21.820509 6 HIGH MINOR
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=10
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:22.320508 7 HIGH MINOR
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=10
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:22.820509 8 HIHI MAJOR
--pthread a handle rcv():up_a=1,seq_a=11
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:23.320508 9 HIHI MAJOR
--pthread b handle rcv():up_b=0,seq_b=11
shawn:calcExample 2015-01-13 19:14:23.820509 0 LOLO MAJOR

```

图 8 SCAN=500 ms 时 camonitor 运行结果
Fig.8 Result of running camonitor by SCAN=500 ms.

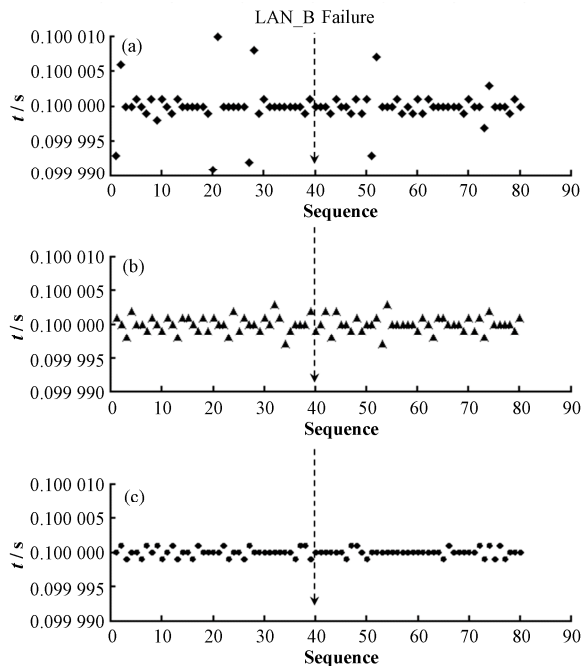


图 9 SCAN=100 ms 时测试结果
Fig.9 Result of test by SCAN=100 ms.

5 结语

本文对基于 PRP 应用层协议方案的 EPICS 网络冗余技术进行了原理性探究。用 EPICS 的通道访问协议 CA 调用 PRP Socket API, 使 CA 协议基于 TCP/IP 的模块具备了并行冗余数据处理功能。测试

结果表明, 基于 PRP 的 CA 协议可以实现网络无缝切换的高可靠性要求。当然, PRP 技术还可以用网络驱动或者链路层硬件的形式与 EPICS 相结合, 这可以做进一步的研究。对特别注重可靠性、稳定性的核反应堆工控领域而言, 基于 PRP 技术的 EPICS 网络冗余方式存在很高的应用价值。

参考文献

- 1 EPICS home page[EB/OL]. <http://www.aps.anl.gov/epics>, 2014-7-9
- 2 Kraimer M R, Anderson J B, Johnson A N, *et al.* EPICS application developer's guide[EB/OL]. <http://www.Aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12.php>, 2014-12-5
- 3 Wallander A, Abadie L, Maio F D, *et al.* News from ITER controls-a status report[C]. Proceedings of IC-ALEPCS, 2011: 1-4
- 4 张宁, 尹聪聪, 韩利峰, 等. 基于 EPICS 的冗余方法在反应堆控制系统中的应用研究[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(11): 1350-1353
- 5 ZHANG Ning, YIN Congcong, HAN Lifeng, *et al.* Application study of EPICS-based redundant method for reactor control system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(11): 1350-1353
- 5 尹聪聪, 韩利峰, 李勇平, 等. EPICS IOC 冗余技术研究[J]. 自动化仪, 2013, 34(12): 73-75
- YIN Congcong, HAN Lifeng, LI Yongping, *et al.*

- Research on EPICS IOC redundant technology[J]. Process Automation Instrumentation, 2013, **34**(12): 73–75
- 6 李刚, 赵籍九, 雷革, 等. 基于 ATCA 平台的 EPICS/IOC 冗余技术研究[J]. 核电子学与探测技, 2010, **30**(7): 879–884
 - LI Gang, ZHAO Jijiu, LI Ge, *et al.* Research of redundant EPICS/IOC based on the ATCA platform[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, **30**(7): 879–884
 - 7 International Electrotechnical Commission. IEC 62439 SC 65C high availability automation networks[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2008
 - 8 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): 110603
 - LIU Shaohai, CHEN Yongzhong, HAN Lifeng, *et al.* Research on application of PRP to the control network for digital I&C of nuclear reactor[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(11): 110603
 - 9 丁建国, 刘松强. EPICS 系统中的网络技术[J]. 核技术, 2006, **29**(5): 380–383
 - DING Jianguo, LIU Songqiang. Network technologies applied in EPICS system[J]. Nuclear Techniques, 2006, **29**(5): 380–383
 - 10 Araujo J A, Lazaro J, Astarloa A, *et al.* High availability automation networks: PRP and HSR ring implementations[C]. Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium, Hangzhou, CN, 2012
 - 11 谢志迅, 邓素碧, 臧德扬. 数字化变电站通信网络冗余技术[J]. 电力自动化设备, 2011, **31**(9): 100–103, 120
 - XIE Zhixun, DENG Subi, ZANG Deyang. Redundancy technique of digital substation communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, **31**(9): 100–103, 120
 - 12 Jiang X Z. High availability seamless ring protocol implementation in FPGA[D]. Switzerland: ETH Zurich, 2009
 - 13 宋敬彬, 孙海滨. Linux 网络编程[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2014
 - SONG Jingbin, SUN Haibin. Linux network programming[M]. 2nd Ed. Beijing: Tsinghua University, 2014

EPICS redundancy technology based on PRP

LIU Shaohai^{1,2} CHEN Yongzhong^{1,3} HAN Lifeng^{1,3}

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Background: Redundancy technology can be used as an effective solution to improve the reliability of Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) applied to nuclear reactor, and the most popular redundancy method is a standby mode with the switching time less than 1 s. Meanwhile, the Parallel Redundancy Protocol (PRP) released in standard IEC62439-3 is proposed as a possible solution to provide zero switching time in case of a single-point failure. **Purpose:** In order to further improve the reliability of EPICS to fulfill the high-reliability requirements of the redundancy control network in nuclear reactor, the "parallel" redundancy mode elaborated in PRP is applied to the nuclear reactor. **Methods:** The feasibility of EPICS achieving a high reliability based on PRP technology is analyzed, and a software implementation example of Channel Access (CA) protocol of EPICS has been developed over Linux based on PRP which implemented on the application layer. **Results:** Test results show that the high-reliability requirements of completely seamless switchover can be realized when a single-point failure occurs in the redundant network. **Conclusion:** With the proposed implementation plan, the redundant EPICS can be employed to achieve a high-reliability network for nuclear reactor.

Key words Parallel Redundancy Protocol (PRP), Nuclear reactor, Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS), Network redundancy, Reliability

CLC TL362⁺.5