

EPICS 系统中的网络技术

丁建国^{1,2} 刘松强¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 介绍了实验物理及工业控制系统 (Experimental physics and industrial control system, EPICS) 基于“标准模型”的分布式控制体系结构、动态数据库及其基于 TCP/IP 的通道访问协议和构建 EPICS 控制系统的网络技术策略, 描述了一个支持 TCP/IP 网络设备的通用 EPICS 设备/驱动器支持程序及其在 SSRF 二期预研 100MeV 直线加速器控制系统中的应用。

关键词 实验物理及工业控制系统, TCP/IP, 网络技术, 设备/驱动器支持

中图分类号 TP273⁺.5, TP393

实验物理及工业控制系统 (Experimental physics and industrial control system, EPICS)^[1,2]是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室和阿贡国家实验室等联合开发的大型分布式控制系统, 已在世界数百个大型科学研究工程中成功应用。上海同步辐射工程 (Shanghai synchrotron radiation facility, SSRF)、北京正负电子对撞机二期 (Second phase of Beijing electron-positron collider, BEPCII) 等国家大型科学工程选用了 EPICS 系统作为控制系统开发的基本平台。本文将介绍 EPICS 系统的体系结构、基于 TCP/IP 的通道访问协议和建立 EPICS 系统的控制网络技术, 同时描述了笔者开发的支持 Ethernet 现场总线技术的 EPICS 网络设备/驱动器支持程序。

1 EPICS 控制系统

1.1 系统结构

EPICS 控制系统采用称为“标准模型”的分布式控制体系结构 (图 1), 具有分布式、开放、易扩充、多平台等特点。它由监控层、过程控制层和设备控制层三个层次组成, 分别称为操作员接口计算机 (Operator interface, OPI)、输入输出控制器 (I/O controller, IOC)、设备控制器 (Device controller)。

操作员接口计算机 (OPI) 位于控制系统的顶层, 具有访问整个控制系统的能力。通过人机交互界面监控系统的运行, 实现控制参数设置/回读、报警处理、数据存档等功能。

输入输出控制器 (IOC) 是控制系统的核心,

通过现场总线或直接 I/O 方式控制前端设备控制器, 实现数据的实时采集、控制量的设置、响应监控层或其他 IOC 的请求、处理来自设备控制层的外部事件等。IOC 一般为 VME、VXI、PCI 等总线的工业计算机。

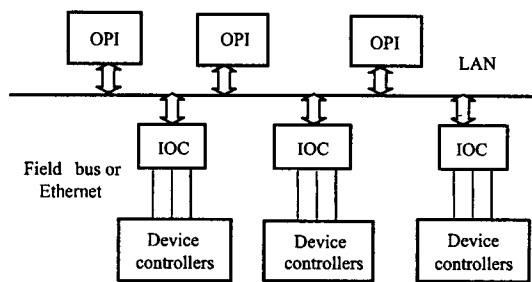


图 1 EPICS 系统结构
Fig.1 EPICS system architecture

设备控制器直接与受控设备接口, 负责模拟信号和数字信号的输入输出及信号调理等。设备控制器一般为 I/O 板卡, 可编程控制器等。

OPI 和 IOC 之间的通讯通过局域网 (LAN) 实现, 通常是交换式快速或千兆位以太网; IOC 与设备控制器之间的通讯一般为现场总线、Ethernet 网络接口等。

1.2 软件结构

EPICS 系统软件采用层次式结构, 包括两个主要部分: IOC 层和 OPI 层软件。IOC 层分为 7 层, OPI 层分为 2 层 (图 2)。EPICS 软件系统的核心是分布式动态数据库 (Runtime database) 和基于 TCP/IP 的通道访问协议 (Channel access, CA)。

第一作者: 丁建国, 男, 1964 年出生, 1984 年毕业于北京大学, 现为中国科学院应用物理研究所在职博士研究生, 从事加速器控制技术的研究, 副研究员

收稿日期: 2005-09-26, 修回日期: 2005-12-06

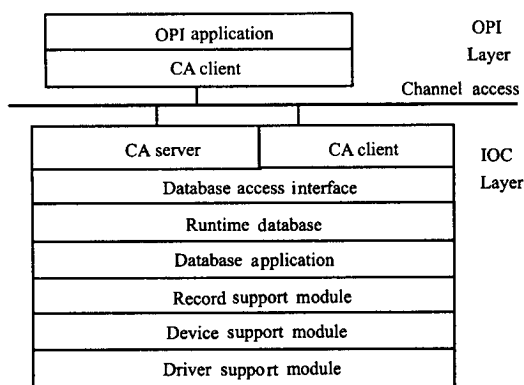


图2 EPICS 软件结构

Fig.2 EPICS software architecture

控制系统的 I/O 量是频繁变动的数据, 为了响应来自 OPI 的命令和来自设备控制器的各种操作状态变化, EPICS 采用动态数据库来记录 I/O 数据。数据库分布式地存放于现场运行的 IOC 中, 每个 I/O 量对应于数据库的一个记录事例。记录中的域 (Field) 值实时地反映 I/O 量的控制与运行属性。

数据库记录也被称为过程控制模块, EPICS 系统中所有过程控制功能也基本上是通过动态数据库实现的。EPICS 通过基础内核 (Ioc Core) 中的扫描器 (Scanner) 对数据库记录的扫描激发记录的 I/O 操作和记录处理, 扫描机制包括: 周期性扫描、事件触发扫描 (I/O 中断和事件触发) 和被动性扫描。

1.3 通道访问原理

在 EPICS 系统中, 过程变量 (Process variable, PV) 是控制的基本单元, 用数据库的记录名及其域名表示。当 PV 通过通道访问协议与 OPI 客户端建立起连接时就建立了一个通道 (Channel)。

CA 是 EPICS 系统依据客户-服务器模型建立在 TCP/IP 网络通讯协议之上的应用层协议^[3] (如图 3 所示)。CA 是连接 OPI 与 IOC 的一条软件总线, EPICS 中的各个组件通过这一总线交换数据。OPI 应用程序 (包括 IOC 中的部分线程) 通过 CA 客户接口发送请求, IOC 通过 CA 服务器响应 OPI 的请求。通道访问协议使得 CA 客户程序在不知道设备、通道的位置和 I/O 类型的情况下根据通道名称完全透明地访问系统 IOC 中的每条通道。

CA 提供的服务包括动态通道定位、数据读写、访问监控、连接监控和自动重接等。

通道定位: 客户程序通过 UDP 广播搜索目标机和过程变量。当客户程序请求一个 PV 连接, 一个 UDP 消息将被广播到子网或预先定义的地址列表, 拥有请求的 PV 的服务器将给出应答。

数据读写: 定位通道以后, 在客户程序与服务

器之间将建立 TCP 连接。TCP 连接是复用的, 如果在同一服务器上发现多个 PV, 则使用同一个连接通讯, 以避免服务器被大量的连接所淹没。连接建立后, 客户与服务器之间的数据交换通过 TCP 实现。

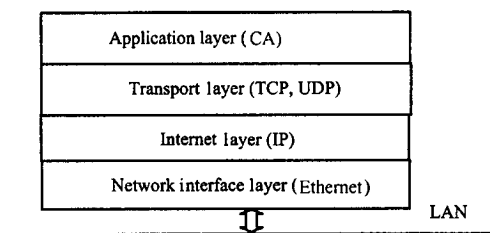


图3 基于 TCP/IP 的通道访问协议

Fig.3 Channel access protocol on TCP/IP

访问监控 (Monitor) 是建立在通道基础上对 PV 值变化同步告知的约定。CA 具有回叫 (Callback) 机制, 服务器根据客户的预先指定, 只有当 PV 值或报警状态发生一定变化时, 向客户端发送监控所得的信息, 以减轻网络负荷。

连接监控与自动重接: 对连接的监控是通过服务器节拍 (Beacon) 消息实现的。服务器定时地通过节拍广播表明其存在。客户程序如在约定时间内收不到服务器节拍, 表明服务器已经断开, 将断开 TCP 连接, 并监听节拍以自动恢复连接。IOC 重启时将发出不同节奏的节拍, 以通知客户重新建立连接。CA 通过消息中继器 (Repeater) 把得到的服务器节拍消息扇出到同一主机上的多个客户程序。当客户程序关闭或失效时, 客户与服务器之间的 TCP 连接及建立在 TCP 连接上的通道连接都将自动断开。

2 EPICS 控制网络^[4,5]

控制网络是现代加速器控制系统的重要组成部分。在诸如 SSRF 的大型加速器系统中, 将有数万个 I/O 控制通道, 几百个 IOC、OPI 及设备控制器节点。网络性能是直接影响控制系统运行效率的重要因素之一。拓扑结构、网络分段、主干网、冗余技术、VLAN 是 EPICS 系统控制网络的主要技术。

EPICS 控制网络采用星型的拓扑结构, 这是使用最广泛的网络结构。网络集线器采用完全交换式设备, 以减少网络“碰撞”的机会。采用 VLAN 技术, 通过网络管理技术进行网络分割, 同时减少对交换机的使用和网络电缆布线。

电缆使用 CAT-5 (E) 铜质双绞线, 在电磁干扰严重的地方使用光纤。主干网连接了各个控制室、数据中心与中央控制室, 而且距离较长, 环境也相对较差, 须使用光纤连接。在控制站到终端节点根

根据实际情况使用双绞线或光纤连接。

EPICS 普遍采用千兆 (Gigabit) 主干网设计, 以解决网络通讯瓶颈。主干网上的交换设备采用千兆位第二层和第三层交换机。交换机到网络节点使用 100BaseTX 或 100BaseFX。

大型 EPICS 的控制网络分为若干子网。为了安全 (如防止通道重名) 和减少通讯干扰, 束测系统和实验线站也应该采用单独的子网。

CA 子网是 EPICS 控制网络的核心部分。CA 协议中, UDP 广播方式被大量使用, 因此处于相同广播域的 IOC、OPI 以及直接通过 IOC 访问的网络设备等节点应置于同一个网段, 以支持 EPICS 通道访问广播。大型控制系统会有一个到多个 CA 子网。

维护子网也是普遍使用的, 方法是使用终端服务器与各个 IOC、PLC 等设备的控制台端口相连, 通过网络实现本地控制台功能, 监控设备的运行情况, 进行再编程维护等。维护子网流量和使用频率较低, 一般通过快速以太网已足够。

网络示波器、视频设备、语音设备等通过网络直接传送数据, 他们的特点是流量大, 会占有很大带宽, 一般使用专门的网络布线, 以防止影响 EPICS 控制系统的正常通讯。

研发系统应与运行的 CA 子网隔离。独立的研发子网是为了防止研发中的系统与运行中的 EPICS 控制系统通道重名, 引起系统混乱与不稳定。

冗余设计会大大增加设备投入, 对连续运行时间长、可靠性要求高的控制网络应采用冗余设计方案。包括: 核心交换机冗余: 对核心交换设备采用双交换机; 电源冗余: IOC 节点和交换机采用双电源供电; 连接冗余: 对关键节点 (如 IOC) 与交换机的连接采用双通道冗余连接法, 由冗余收发器自动切换选择连接线路。

采用何种 IP 地址策略决定于地址资源。从资源和系统安全角度考虑, 大型 EPICS 控制系统一般采用私有网络地址, 在数据库、文件服务器等节点上采用多网络接口, 分别与控制网络和外部网络相连。

通过防火墙使控制网络与外部网络隔离, 严格限制外部系统的访问。也可以选择使用 EPICS 的 PV Gateway^[6], 使得所有客户端对通道的访问都要通过 PV Gateway 实现, 没有权限的外部节点将无法访问内部通道。

要获得控制网络的高稳定性和高可靠性, 一方面是通过各种冗余设计、增加带宽来减少网络拥塞及连接故障的可能性; 另一个重要方面是使用成熟的商业化产品, 因为产品商业化程度越高, 系统稳定性与可靠性也越高。

3 EPICS 网络设备驱动程序^[2,7]

越来越多的智能设备带有以太网接口, 支持基于 TCP/IP 协议的网络通讯。由于网络通讯具有现场总线无法比拟的优势, Ethernet 作为现场总线成为一种发展趋势。

EPICS 系统具有统一的接口规范用来扩充系统的设备支持。根据 EPICS 的设备接口规范, 我们编写了一个 EPICS 设备/驱动器支持程序 (Device/driver support), 它们工作在 EPICS IOC 软件的第六和第七层 (见图 2), 用于支持基于 TCP/IP 协议的各种网络设备。程序在 Linux/PC 的 IOC 上开发运行, IOC 与设备控制器之间的数据交换采用多线程并发运行的端对端请求/应答异步通讯方式, 传输协议可以选择 TCP 和 UDP 两种传输层协议中的一种, 一台 IOC 可以同时连接多台同样类型的网络设备。

程序采用分层的模块化结构 (图 4), 设备支持模块包括设备相关模块层、设备独立模块层; 驱动器支持模块包含 TCP/IP 基本 I/O 程序库。程序的上层是 EPICS 数据库记录支持模块, 下端是 TCP/IP 套接字 (Socket) 接口 API。

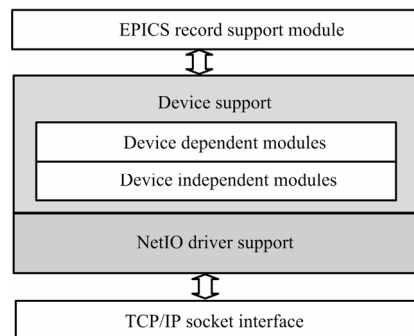


图 4 网络设备的 EPICS 设备/驱动器支持程序
Fig.4 EPICS device/driver support for network devices

由于不同的网络设备采用不同的数据包格式, 程序定义了专门的设备相关层 (Device dependent module, DDM), 用以处理设备支持程序与特定设备的接口。设备相关层模块包括: ①对记录的连接域 (INP、OUT) 分析得到网络设备 IP 地址、端口号、数据操作地址的连接域解析程序; ②记录处理时, 根据连接域解析结果产生对网络设备的读/写命令请求的消息生成程序; ③对网络设备的应答, 通过解析得到写请求确认或读请求数据的应答处理程序。

设备独立层模块 (Device independent module, DIM) 是设备支持程序中独立于具体设备的异步通讯程序模块, 包括记录初始化函数和记录读写函数等。初始化函数根据连接域解析结果建立 IOC 与网

络设备的连接、并发运行服务线程、设置运行参数,同时为记录设定相应的命令请求函数、应答解析函数、异步通讯完成回叫函数、超时处理函数等;读写操作函数在记录处理过程中进入两次,第一次,调用命令请求生成函数生成请求消息,并置于相应的 I/O 请求队列中;第二次,通知 I/O 操作完成。

网络 I/O (NetIO) 驱动器支持模块包括消息发送、接收线程及超时处理等基本网络通讯模块。对每个网络设备, NetIO 开启了各自的发送与接收线程。发送线程从请求队列中取出 I/O 请求消息,送出后休眠等待直到接收线程得到应答或等待超时转入超时处理。接收线程在应答收到以后,调用回叫函数,发起 EPICS 的记录处理。线程之间通过互斥 (Mutex) 和信号灯 (Semaphore) 技术实现线程间的协调与同步。

程序在 PC Linux RH 9.0 下开发, EPICS base 3.14.6 下运行。由于对 EPICS 库函数的调用全部使用了系统无关函数 (Operating system independent, OSI), 因此可以方便地实现到其他平台的移植。

程序已成功地在 SSRF 二期预研 100MeV 直线加速器离子泵电源控制系统中使用,用于替代原先离子泵电源扫描设备与 IOC 之间的 RS232 通讯,并同时使用 PC 运行多个仿真网络设备进行测试,证明可以长期稳定地运行,性能优于原先的方案。

4 结论

EPICS 是基于现代网络技术的分布式控制系统,通道访问协议实现了 OPI 程序对 IOC 中的数据

的透明访问。TCP/IP 协议的通用性和普及性,使得网络通讯被用于构建分布式控制系统的各个层面。网络具有现有的现场总线标准难以达到的优势,通用的网络设备 EPICS 支持程序提供了 EPICS 系统中 IOC 访问网络设备的基本手段。我们在网络作为现场总线方面作了一些探索,希望能对网络技术在分布式控制系统中的应用起到一定的推动作用。

参考文献

- 1 Epics home page: <http://www.aps.anl.gov/epics>
- 2 Kraimer M R, Anderson J, Johnson A, *et al.* EPICS Input/Output Controller Application Developer's Guide. ANL, Argonne, IL 60439, USA, 2004
- 3 Hill J O. EPICS 3.14 Channel Access Reference Manual. <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/6-docs/CAref.html>
- 4 Sidorowicz K V, Leibfritz D, McDowell W P. The APS control system network upgrade. Italy: ICALEPCS'1999: 179—181
- 5 Bill D V. SNS ICS network final design review. ORNL, Oak Ridge, TN 37831, USA, 2001
- 6 Evans K. Gateway users guide. ANL, Argonne, IL 60439, USA, 2004
- 7 Comer D E, Stevens D L. 用 TCP/IP 进行网际互联. 第三卷. 客户—服务器编程与应用. 北京: 电子工业出版社, 2001
Comer D E, Stevens D L. Internetworking with TCP/IP Vol III. Client-server programming and applications. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001

Network technologies applied in EPICS system

DING Jianguo^{1,2} LIU Songqiang¹

1 (Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

2 (Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049)

Abstract The Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) is a distributed control system based on "Standard Model". In this paper we introduce the EPICS architecture, Runtime database, Channel Access protocol on TCP/IP as well as the network technologies to construct an EPICS control network. A developed generic EPICS device/driver support for network devices is briefly described.

Key words EPICS, TCP/IP, Network technology, Device/driver support

CLC TP273⁺.5, TP393