

广域测量系统的延迟分析及其测试

胡志祥, 谢小荣, 肖晋宇, 童陆园

(清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 简要介绍了电力系统中基于全球定位系统/相量测量单元的广域测量/监视系统(WAMS)的体系结构, 分析了延迟产生的机制并指出了影响实时性的主要因素, 提出广域测量系统的延迟评估模型; 根据评估模型建立了基于 TCP/IP 协议广域网络下的 WAMS 通信延迟测试方法; 通过实测获得了基于国家电力数据网(SPDNet) 的 WAMS 的通信延迟特性。根据该延迟评估模型和测试体系, 能够有效、合理地进行 WAMS 的相量测量单元优化选点和通信布局的权衡, 并进一步为广域实时动态监测和控制奠定基础。

关键词: 广域测量系统; 通信延迟; 国家电力数据网; TCP/IP; 评估模型

中图分类号: TM73

0 引言

电力系统地域广阔、设备众多, 其运行变量变化也十分迅速, 获取系统运行点的状态信息须依赖于统一的、高精度的时间基准和快速的数据采集及通信技术。基于全球定位系统(GPS)的相量测量单元(PMU)的成功研制, 可以很好地解决高精度相量同步测量问题, 并形成了新型的电网广域测量/监视系统(WAMS——wide-area measurement/monitoring system), 而如何提高数据通信的速度和可靠性已成为 WAMS 性能的决定性因素。

实际的电力系统通信网络组成复杂, 传输介质多样化, 节点多, 使得准确获得 WAMS 的通信延迟存在较大困难。文献[1]分析了 WAMS 在极端情况下的数据延迟, 估计了不同媒介下的通信延迟和理想情况下的分析, 未考虑扰动因素等的影响, 因而显得粗略和保守; 文献[2, 3]分别给出了实验室情况下的通信延迟和利用异步传输模式(ATM)、以太网实现电网的实时监测, 但缺乏通信延迟的特征分析, 网络适应性差。

较早作为区域稳定控制系统附属功能设计的 PMU 应用于黑龙江东部电网^[4], 采用低速的 Modem 通信(1 200 bit/s)。而以同步数字序列(SDH)技术为骨干传输的电力通信网络, 已经从单一的通信电缆和电力线载波通信手段发展到包含光纤、数字微波、卫星等各种通信手段并用的多种网络介质的体系。国家电力数据网(SPDNet) 是基于此的窄带应用, 成为调度实时数据、监测数据等包括 WAMS 在内的网络通信平台^[5, 6]。

本文根据 WAMS 应用的通信网络特点进行了

通信延迟的机理分析, 提出了 WAMS 的延迟计算公式、评估模型和测试方法; 获得了基于 SPDNet 实测的通信延迟数据, 并对延迟的分布特性和数字特征进行了分析; 对后续工程通信网络的构架和提高 WAMS 实时性措施的设计, 以及进一步设计有效的广域控制系统具有十分重要的意义。

1 广域测量系统的体系结构

图 1 所示是 WAMS 的体系结构。子站分布在广域电网各运行节点(电站、厂), 负责接收 GPS 同步时钟、数据采样和处理, 并将获得的相量数据通过广域通信网络发送到主站。主站是系统的数据处理和监控中心, 同步处理子站上传的带时标的相量数据, 并进行系统分析和辅助决策。目前国内 WAMS 应用的通信网络大多采用统一的 IP 协议, 以屏蔽各种物理网络技术(如以太网、ATM 及 SDH 等)的差异性, 实现异种网络互联。由于子站到中心站之间存在着延迟的差异, 使得广域测量技术的应用对数据通信网络的性能提出了更高的要求。

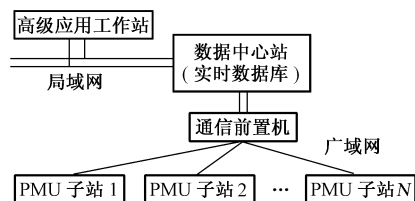


图 1 广域测量系统框架

Fig. 1 Framework of wide-area measurement system

2 延迟分析

广域测量系统的电压、电流在传送到主站数据处理中心之前, 先后需要经过传感器(电流/电压互

感器)、同步采样、相量计算和数据封装、子站通信模块、通信链路、主站通信前置机等环节,每一环节都会产生延迟。

电流/电压互感器需要将实际的工频电量幅值变换成采样模块能接收的信号量程范围,其工频相移小于 1° ,测量延迟记为 τ_1 ,为微秒级。

数据同步采样装置接收 GPS 时钟信号并同步进行 A/D 采样。其延迟很小,为微秒级,可忽略不计。

相量计算中采用较多的算法是离散傅里叶变换(DFT)。对于 N 点的标准 DFT 算法,基频需要 N 次复数计算,时间复杂度为 $O(N)$;实际应用改进的 DFT 算法能够将计算量大大降低,如文献[7]中循环 DFT 算法的单次相量的计算量为 1 次复数乘法和加法。算法确定后,计算耗费的时间是一个固定值,记为 τ_2 ,为微秒级。

数据封装是 PMU 数据包报文构造和通信协议栈调用的过程。数据包采用 IEEE 1344(C37)数据格式,包括数据帧、头帧和配置帧 3 种帧类型[8]。在进行数据传输过程中,PMU 数据需要进行数据包重组,调用协议驱动模块并通过链路发送。这部分延迟的大小决定于测量量的多少和数据处理单元的效率,延迟记为 τ_3 ,为微秒级。

在广域 IP 网络中的链路和节点之间进行的数据传输均产生分组延迟。本文 WAMS 链路延迟按照边缘到边缘(edge-to-edge)的原则定义为一个数据分组从子站通信模块发送经过通信链路到达主站通信前置机所需的时间,记为 τ_4 。相邻节点及其之间的链路定义为一个中继段。每一个中继段内,分组延迟包括串行化延迟、传播延迟和交换延迟。串行化延迟又称传输延迟,是指在输出速率一定的情况下,同步一个分组所需要的时间,记为 α 。该延迟取决于链路的带宽以及分组的大小。一个数据位从发送方到达接收方所需的时间称为传播延迟,记做 β ,取决于距离和链路传输介质,与带宽无关。节点设备从收到分组到开始传输的时间称为交换延迟,记为 γ [9]。

假定一个 PMU 数据包从子站通信模块传输到主站通信前置机,经过 j 个节点和 k 条链路,则有:

$$\tau_4 = \sum_{i=1}^j (\alpha_i + \gamma_i) + \sum_{i=1}^k \beta_i \quad (1)$$

网络中的分组延迟随中转网络的情况而异。当网络无拥塞时,交换延迟可以忽略。总的分组延迟由每个中继段的串行化延迟和传播延迟组成。这是链路最小延迟,式(1)可改写为:

$$\tau_4' = \sum_{i=1}^j \alpha_i + \sum_{i=1}^k \beta_i \quad (2)$$

如果网络发生拥塞,通过同一连接传输的分组延迟各不相同,分组延迟变化产生抖动,该抖动可以估算最大的链路延迟[10]。

通信前置机和数据中心站通常位于高速局域网内,它们之间的数据传输延迟极小,可忽略不计。

由此,WAMS 总延迟公式为:

$$T = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 \quad (3)$$

T 值与 τ_4 相关,后者是延迟抖动的最重要因素,直接反映延迟的分布特征。

3 延迟评估模型

以 $D_0(t, L)$ 表示 PMU 子站 t 时刻大小为 L 的数据集, $D(t, L)$ 表示主站 t 时刻大小为 L 的数据集,有

$$D(t, L) = D_0(t - T, L) \quad (4)$$

式(4)表明 PMU 子站和主站的数据传递是一个迟滞环节。延迟 T 即为式(3)中的 WAMS 总延迟。令 $T_1 = \tau_1 + \tau_2$,并考虑分组延迟 β 和 γ 与带宽无关,由串行化延迟定义可知, α 与带宽成反比,与分组大小成正比,即 $\sum_{i=1}^l \alpha_i = L_0/R$,其中 L_0 表示一个数据分组大小, R 表示带宽。

引入 $T_2 = \tau_3 + \sum_{i=1}^j \gamma_i + \sum_{i=1}^k \beta_i$,结合式(3)得式(4)中的延迟 T 的近似公式为:

$$T = T_1 + \frac{L}{R} + T_2 \quad (5)$$

式中: T_1 为包括传感器、采样及 DFT 计算延迟之和; L 为要传送的数据大小,可能包括 1 个或多个数据分组; R 为线路基本速率,广域网端到端连接由多条速率不同的链路级联而成, R 取其中的最小速率值,一般取接入端网络速率,一旦网络结构和测量技术确定, T_1 和 L/R 不变,都属于恒定延迟; T_2 为链路延迟和子站与主站数据封装及处理机和前置机协议栈调用延迟总和,属于可变延迟。

根据以上分析,可变延迟的大小受到链路状况、介质、网络流量等因素的影响。这里用最小延迟、最大延迟、平均延迟、延迟期望和延迟样本方差考察延迟特性。这 5 项指标反映延迟的好坏和网络的动态特性,构成 WAMS 通信延迟的评估参数,不同时段、不同数据包发送情况下的评估参数的比较,形成 WAMS 通信延迟的评估模型。

4 通信延迟的测试方法

为了有效评估 WAMS 的延迟特性,我们根据

式(5)设计了 WAMS 延迟测试方法。由于延迟 T_1 基本恒定且很小,误差可估计^[11],在测试中忽略此部分,只测试 $T_2 + L/R$ 延迟部分。

已有相关文献针对 TCP 协议和 UDP 协议在实时监测应用中进行了比较研究^[2]。基于连接的 TCP 协议为保证可靠性而牺牲了快速性;对专用信道,没有带宽竞争,数据重传等可靠性机制被避免,因而可以满足实时性的要求。无连接方式的 UDP 协议则不保证可靠的传输,仅负责数据的发送和接收。因此,采用 UDP 协议时不必考虑为保证可靠性造成的额外时延,但对于网络的性能提出了严格的要求。目前的 SPDNet 是一个多节点、多种介质的异构广域网络,并不能保证数据传送的可靠性,同时,对于实时监测这种对数据要求很高的场合,数据发送和接收端全程采用专用信道难以实现,因此仍然采用基于 TCP 方式的延迟测试,这也符合大部分的 WAMS 应用。

WAMS 延迟测试框架采用端到端的原则。我们可以概率统计的方式获得 WAMS 中主站和子站之间的通信延迟 $T_2 + L/R$ 。直接以子站和主站为基点,模拟实际运行状况,构造 PMU 数据包的发送和接收情况并计算通信延迟损耗。

在构造过程中需要解决 2 个问题:一是测试的时间基准问题;二是时间精度问题。目前, WAMS 中作为精确授时的 GPS 时钟一般仅存在 PMU 子站端。考虑到目前 SPDNet 中,上行和下行的传输速率是一样的,在实时监测和控制中,不仅存在数据上传,还存在着控制反馈需要的数据回送。上传与回送时间共同决定了电力系统的实时监控的通信延迟。因此,我们以单端计算机的时钟为基准进行数据包的发送,同时接收来自受端的回送数据并计算耗费的延迟时间,这是符合工程实际的。

计时的时间精度是测试准确的保障。x86 体系基于 Windows 平台的计算机能够提供毫秒级的定时服务,但显得太粗糙。而 Windows 的消息机制受进程执行和资源的影响较大,实时处理性能不好。从 Windows 95 开始,Windows 平台就提供了与硬件和操作系统相关的精确定时器,通过 API 函数获取该定时器的频率和周期计算时间,能精确到 10^{-3} ms,以满足测试的时间精度要求。

另外,作为延迟测试程序,其目的就是为了测试主站与子站之间的通信延迟,如果禁止其他因素的干扰,阻塞模式是理想的延迟测试网络连接模式。

子站部分设计的是一个 Socket 阻塞式数据包回应程序。采用标准 C 语言编写并遵循 Berkeley 规范,运行于 QNX 4.5 实时 Unix 微内核操作系统

平台上。

图 2 和图 3 分别为主站、子站测试流程中关于数据发送部分的流程。数据发送、接收和等待连接函数均为阻塞操作。为了从统计概率上进行延迟测试和数据分析,测试流程使用循环方式获取样本数据。

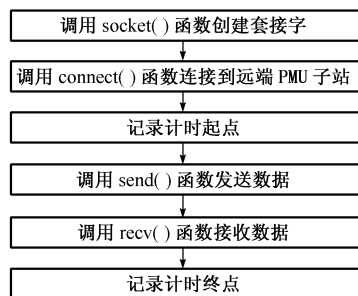


图 2 采用阻塞方式的主站测试流程
Fig. 2 Testing flow chart of communication using blocking mode in PMU main-station

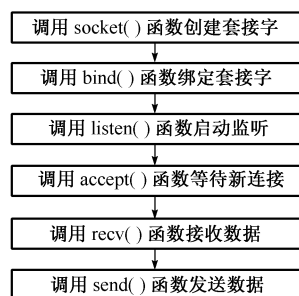


图 3 采用阻塞方式的 PMU 子站测试流程
Fig. 3 Testing flow chart of communication using blocking mode in PMU sub-station

5 实测结果及分析

首先在 100 Mbit/s 以太网内进行了测试,子站模拟端和主站模拟端均在同一个网关以内,进行 4 万次延迟测试,以最小延迟作为 $T_2 + L/R$ 的基准值进行计算。结合实际应用,以 800 B 作为 1 个数据包,在 100 Mbit/s 以太网中进行测试,结果如下:最大延迟 1.2 ms,最小延迟 0.7 ms,平均延迟 0.8 ms,期望延迟 0.8 ms,样本方差 0.2。

根据评估公式(5), L/R 理论计算值为 0.06 ms。与测试结果的差值在于 T_2 。一方面,对于通信延迟非常小的情况,协议栈调用等系统开销比重增大;另一方面,网络中存在着干扰因素,包括吞吐量的影响。延迟最大 1.2 ms、最小 0.7 ms,方差 0.2,具有相当好的延迟品质。

在江苏 WAMS 中进行了测试。早期江苏省电力通信网以 3 条省级准同步数字序列(PDH)数字微波电路为骨干,随后建设了全省 13 个地(市)的 155 Mbit/s 的 SDH 数字微波电路和以光纤为媒介

的省级 ATM 交换网(核心网 622 Mbit/s,骨干网 155 Mbit/s),按照就近原则以 2 Mbit/s 的带宽连接全省 64 个变电站、电厂的实时运行信息和历史状况。部分电厂、站与骨干网之间分别通过 SDH 光纤电路、Harris 微波支线等数字/模拟微波与骨干电路相连,并采用多协议标签交换(MPLS)和虚拟专用网络(VPN)等技术来提高网络传输效率和安全性。省调则是 100 Mbit/s 的以太网通过网关/转换器连接骨干微波网络和光纤电路^[12]。

图 4 所示江苏二期 WAMS 以南京为主站,共分布 9 个子站,分别为扬州二厂、上河、斗山 3 个变电站以及徐州、徐塘、彭城、新海、华能淮阴、华能南通 6 个电厂。

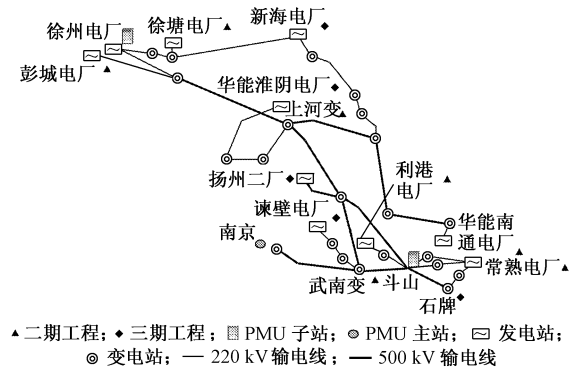


图 4 江苏电网 WAMS 工程的站点布置
Fig. 4 Station placement of WAMS in Jiangsu power system

实际测量 PMU 子站数为 6 个。图 5 为接入端网络繁忙和业务空闲时段测试得到的延迟图形,横坐标 T 表示测试的子站和主站之间的通信延迟,纵坐标 P 表示在样本数据中该延迟次数占所有延迟次数的百分比。

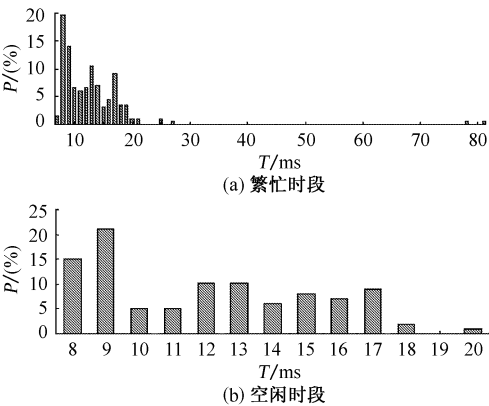


图 5 通信延迟
Fig. 5 Communication delay

表 1 数据说明,在网络流量增大时,延迟特性明显变差,最主要体现在延迟最大值和方差增大。这

是由于 SPDNet 是包括 EMS 等多种业务在内的通信网络平台,通信链路不能独享。传输过程中可变延迟大小受数据量变化的影响,延迟聚集度下降,抖动增加,并且延迟呈现近似均匀分布。

表 1 1 个 PMU 子站和 1 个主站的延迟特性
Table 1 Delay performance between main-station and sub-station

测试条件	最大值/ ms	最小值/ ms	平均值/ ms	期望值/ ms	样本方差
繁忙时段	81	7	14	14	62
空闲时段	20	8	13	13	12

模拟实际运行情况,6 个 PMU 子站和主站进行同步通信延迟测试,其他条件不变,数据如表 2。

表 2 6 个 PMU 子站和主站的延迟特性
Table 2 Delay performance between main-station and six sub-stations

通道序号	最大值/ ms	最小值/ ms	平均值/ ms	期望值/ ms	样本方差
1	49	23	38	39	29
2	21	8	12	13	10
3	22	9	12	13	9
4	27	11	13	14	6
5	39	17	19	20	8
6	81	7	13	14	62

序号为 1 和 6 的通道明显显示比较差的延迟特性,从实际的网络状况就可知道,这两个通道分别对应新海和彭城 PMU 子站。因此,需要结合子站网络接入端模式,包括网络介质、带宽等情况进行改造,以满足 WAMS 实时通信的要求。不同数据量的测试反映出了延迟大小的阶跃性,限于篇幅,这里不再罗列。

对以上 6 个通道的实际测试表明,由于不同通道的延迟特性的差异,使得在建的江苏电网广域实时监测与稳定预决策系统的监控刷新频率受到了延迟性能最差通道的限制,并且成为实时决策系统的通信瓶颈。但是通过以上的延迟特性分析,为我们进一步进行聚类分析、结合 PMU 布局模式构造 WAMS 的通信模型提供了理论和工程数据基础。

6 结语

本文通过对 WAMS 延迟机理的分析,得出延迟的基本评估公式。根据该公式建立的延迟测试框架能够比较准确地得到广域网的延迟统计分布;对江苏 WAMS 工程的实测结果表明,基于 SPDNet 三级网络下的 WAMS 基本延迟在 20 ms 到 80 ms 之间,延迟的分布跨度主要集中在 20 ms 到 40 ms 之间。这对于同步相量技术的在线应用、克服通信

速率带来的瓶颈、评估延迟产生的测量误差与监测控制误差及提高广域实时动态监测与实时决策系统的通信性能奠定了基础。

参考文献

- 1 Naduvathuparambil B, Valenti M C, Feliachi A. Communication Delays in Wide Area Measurement Systems. In: Proceedings of the Thirty-fourth Southeastern Symposium on System Theory. Piscataway (NJ): IEEE, 2002. 118~122
- 2 Cui Yuan, Cheng Lin, Sun Yuanzhang. Design of ATM Networks in Real-time Distributed Control System. 见: IEEE-PES/CSEE 电力系统技术国际会议论文集, 第 2 卷 (In: Proceedings of 2002 International Conference on Power System Technology, Vol 2). 昆明: 云南科技出版社 (Kunming: Yunnan Science and Technology Press), 2002. 1275~1279
- 3 严登俊, 袁洪, 高维忠, 等 (Yan Dengjun, Yuan Hong, Gao Weizhong, et al). 用以太网和 ATM 技术实现电网运行状态实时监测 (Real-time Monitoring System for the States of Power Network over Ethernet and ATM). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(10): 67~70
- 4 吴京涛, 闵勇, 丁仁杰, 等 (Wu Jingtao, Min Yong, Ding Renjie, et al). 黑龙江省东部电网区域稳定控制系统的二期开发 (Development of the Area Stability Control System in the East Part of Heilongjiang Power System). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(11): 52~54
- 5 辛耀中, 卢长燕 (Xin Yaozhong, Lu Changyan). 电力系统数据网络技术体制分析 (Analysis of Data Network Technology Architecture for Power Systems). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(11): 1~6
- 6 国家电力通信中心 (State Grid Telecommunications Center). <http://www.sptc.com.cn/>
- 7 吴京涛, 黄志刚, 韩英铎, 等 (Wu Jingtao, Huang Zhigang, Han

- Yingduo, et al). 同步相量测量算法与实测误差估计 (Synthetic Algorithm of Phasor Calculation and Its Validation in Real Network). 清华大学学报 (自然科学版) (Journal of Tsinghua Univ (Sci& Tech)), 2001, 41(4): 147~150
- 8 IEEE Std 1344—1997 (2001R). IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems. 1997
- 9 维格斯纳·S (Vegesna S). IP 服务质量 (IP Quality of Service). 信达工作室, 译 (Xinda Working Room, trans). 北京: 人民邮电出版社 (Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House), 2001
- 10 Verma D C, Zhang H, Ferrari D. Delay Jitter Control for Real-time Communication in a Packet Switching Network Communications Software. In: Proceedings of IEEE Conference on Communications for Distributed Applications and Systems. Piscataway (NJ): IEEE, 1991. 35~43
- 11 Luque J, Escudero J I, Perez F. Analytic Model of the Measurement Errors Caused by Communications Delay. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2): 334~337
- 12 鲁庭瑞, 李斌, 崔恒志, 等 (Lu Tingrui, Li Bin, Cui Hengzhi, et al). 江苏电力数据网络及其应用 (Application of Jiangsu Power Data Network). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(1): 78~79

胡志祥(1975—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统广域动态监测与控制及电力通信。E-mail: huzx02@mails.tsinghua.edu.cn

谢小荣(1975—), 男, 助理研究员, 目前研究方向为同步相量技术及其应用、FACTS 技术及其应用、电力系统稳定控制。

肖晋宇(1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统广域动态监测与控制。

ANALYSIS AND TEST ON DELAYS IN THE WIDE AREA MEASURING SYSTEM

Hu Zhixiang, Xie Xiaorong, Xiao Jinyu, Tong Luyuan

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper is concerned with the basic architecture of GPS/PMU-based WAMS and an analysis and test on the delays of synchro-phasors, including its generation mechanism, influencing factors and mathematical model. A delay evaluation model is proposed, for which the authors present an approach to testing the communication delays of WAMS operating on TCP/IP-based WAN. The approach is applied to the recently commissioned Jiangsu Provincial WAMS, which is based on China's State Power Data Network or SPDNet. The characteristics of communication delays of an actual WAMS have been obtained and analyzed. The evaluation model proposed, the testing approach and the field test results can provide basic and important information for optimal placement of PMUs and arrangement of the communication infrastructure of WAMS, laying a solid foundation for wide-area system monitoring and control.

Key words: wide-area measurement system (WAMS); communication delay; state power data network (SPDNet); TCP/IP; evaluation mode