卫星授时－时间同步性能检测研究

着重指出卫星授时业务不仅仅指本地时钟与卫星时间之间需要高品质同步，以智能变电站的授时应用为例，所有被授时同步设备之间及其与本地时钟之间也需要高品质同步；通过研究设计智能变电站的时间同步性能检测系统，介绍时间同步信号的仿真、输出、检测以及对同步过程与性能的检测、分析；设计的检测系统能检测卫星授时信号、时钟输出的同步信号和被同步设备的反馈信号，达到进行全链路信号闭环检测。

王长瑞／华北电力科学研究院有限责任公司

王长瑞／高级工程师

关键词／Keywords
卫星授时·
同步特性检测·
同步链路·
信号完整性·

标准时间源提供的标准时间参考通常由高准确度的标志脉冲（如1PPS）和标识该脉冲的TOD时刻/日期信息编码（时间码）的方式构成。一个完整的授时过程，除时间参考源外，一般还包含发、传、收和用4个主体部分，构成广义的“授时系统”。授时（系统）的目的在于使用，离开“用”、“使用”或“应用”，授时“过程”或“授时系统”就失去意义和价值。而“用”时的结果或效果，可以通过使用后对授时信号服务的质量进行统计评估。随着电子自动化技术发展，军事业务和工交产业自动化、智能化程度不断提升，不仅应用授时－时间同步的场合越来越多，要求的准确度越来越高，而且要求对授时－用时系统的可靠性、鲁棒性也越来越严格，不仅需要事后评估改进授时应用结果，更需进一步提出实时检测、监测以致监控整个“授时同步过程”的性能和效果，规避因时间同步故障引发的意外事故，以保证被服务、被同步的用户设备系统能安全运行。

针对电网同步研究设计高准确度同步特性检测系统，解决与电网运行安全密切相关的、高准确度卫星授时－时间同步过程与性能的检验、检测和监控问题，举一反三，说明授时－同步系统的“过程（性能）检测”对改进授时系统的完好性、鲁棒性的重要意义。

电网卫星授时－时间同步过程

智能变电站、智能电网技术是电网发展的大趋势，其特征为一次设备智能化、二次设备网络化和运行管理自动化等。时间同步在智能电网中的作用正从事后的动作顺序分析走向事前过程顺序控制。时间同步准确度和可靠性是提高线路故障测距、相量和功角动态监测、机组和电网参数校验准确性的关键因素， 直接关系到电网稳定控制和事故分析，电力行业标准DL/T 1100.1—2009中对于电网常用设备时间同步准确度的要求[1]如表1所示。

在电网的各级调度机构、变电站和发电厂都配备时间同步装置。该装置通过卫星授时（无线时间基准）和接收上级时钟的有线传输时间基准信号，上级时钟、与其他同级时钟同步，并对下级同步系统、装置提供有线授时参考信号，其组网时间同步过程如图1所示。卫星授时信号正常时，作为同步系统的优先授时源；异常时，自动切换到有线信号授时源。为提升电网运行可靠性，各级调度机构、发电厂和变电站大多采用主备式时间同步系统，如图2所示。

根据2013年电网时间同步装置运行调查统计，厂站内同步装置本身对时不

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1　电力系统常用设备和系统对时间同步准确度的要求

电力系统常用设备或系统	时间同步准确度	时间同步信号
合并单元	＜1 μs	IRIG－B
线路行波故障测距装置	＜1 μs	IRIG－B 1PPS＋串口对时
同步相量测量装置	＜1 μs	IRIG－B 1PPS＋串口对时
雷电定位系统	＜1 μs	IRIG－B 1PPS＋串口对时
故障录波器	＜1 ms	IRIG－B 1PPS＋串口对时
SOE事件顺序记录装置	＜1 ms	IRIG－B 1PPS＋串口对时
测控装置、远方终端	＜1 ms	IRIG－B 1PPS＋串口对时
微机保护装置	＜10 ms	IRIG－B 1PPS＋串口对时
安全自动装置	＜10 ms	IRIG－B 1PPS＋串口对时
配电网终端	＜10 ms	串口对时
计算机监控系统主站	＜1 s	网络对时NTP 串口对时
配电网自动化/管理系统主站	＜1 s	网络对时NTP 串口对时报文
调度生产和企业管理系统	＜1 s	网络对时NTP 串口对时报文
电子挂钟	＜1 s	串口对时报文 网络对时NTP

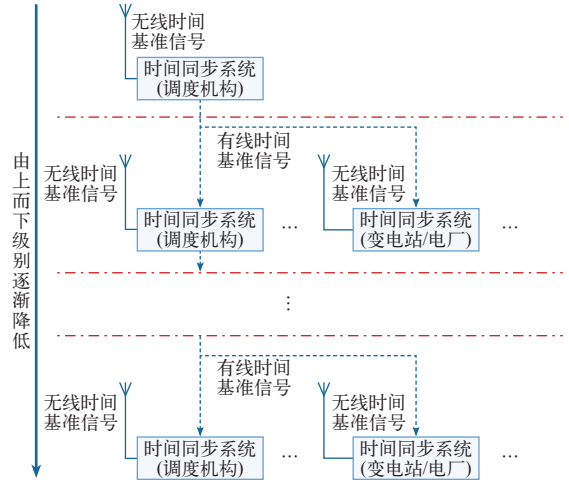

图1　电力时间同步网的组成

准确率达5%以上，厂站内被同步装置（或系统）被授时－时间同步导致的不准确率达9%以上[2]。

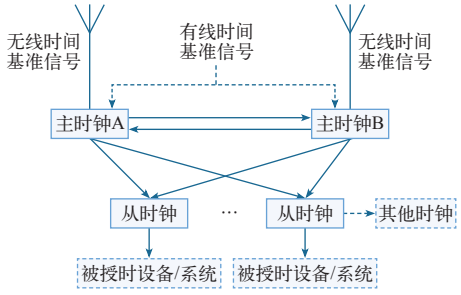

图2　主备式时间同步系统的组成

经验表明，时间同步过程存在的问题，会影响智能变电站运行，甚至威胁生产安全，尤其对过程层设备来说，比如GOOSE的输出延迟就会引发延迟跳闸问题，带来严重后果。为解决电网授时－时间同步过程存在的接口类型不规范、同步过程时间长、同步信号稳定性差、自守时能力差、负载能力不足以及投运后缺乏有效监控以致失步等问题，避免因时间不同步影响事故时序判断分析，使电网故障由事后的动作顺序分析向事前过程顺序监控转变，有必要研究如何对电网卫星授时－时间同步全过程进行监测、监控，设计检测系统监测每一种入网的授时－同步装置、被同步装置及其同步过程，进行全面的时间同步特性检测和实时在线监测，及时掌握系统运行状态并进行快速故障分析，对同步系统进行全寿命周期管理[3]。

电网时间同步检测系统设计

目前检测/监测电网卫星授时－时间同步过程与特性，需要同步测试仪、网络报文分析仪等多种测试设备，通过复杂的互连、配置和手动记录分析才能完成；存在操作复杂、测试手段不全、测试结果判定偏于主观等种种不足。在系统综合分析影响高准确度卫星授时－时间同步特性及其检测的诸多因素基础上，研究设计智能电网/变电站“高准确度同步特性检测系统”。该系统能接收、测试和分析变电站授时系统输出给被（授时）同步装置的通用同步信号；并受控模拟产生正常、异常的同步信号和带误码的时间码信号，仿真输出给被同步装置，用以测试被同步装置对

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

同步信号的响应能力、同步性能、守时能力及其同步的完整性、鲁棒性。该检测系统由GPS/北斗信号接收定时单元、高准确度时间基准源单元、同步信号测试单元、同步信号模拟/输出单元、接收被同步装置的反馈数据记录/分析单元和智能系统主控单元组成，如图3所示。

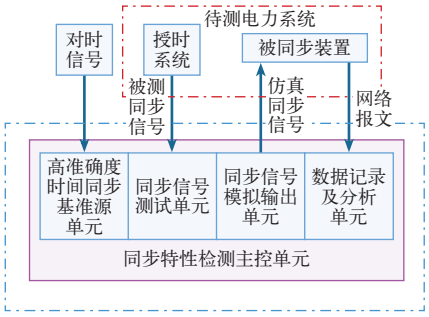

图3 高准确度同步特性检测系统示意图

一组完整的高准确度授时信息由高准确度的标志脉冲和标识该脉冲的TOD时刻/日期信息（以时间编码的方式）联合构成。因此，讨论或评估某授时系统或装置的授时准确度（以误差大小表示）时，不仅要关注授时标志脉冲的有无及其前（后）沿的斜率与抖动，更要重视在电气噪声环境下的时（间）码信号的异常、误码导致的TOD时刻/日期的差错对授时同步质量的影响。有鉴于此，设计检测系统的研究思路和技术路线，即在研究影响高准确度时间同步过程及其检测的共性支撑技术，包括网络化软件平台、时间同信号特性测量技术、时间码信号特性/误码类型分析、解码技术以及通用测试软件平台开发等基础上，分析研究各个特征技术模块及其集成，统筹研制检测系统的主控单元及其软件系统，实现协调控制，使之具备完整的时间同步过程与特性的检测功能。

电网检测系统共性支撑技术研究

智能高准确度时间同步过程与特性检测系统是由多种共性技术支撑的，为此开展相关共性支撑技术研究。

1. 面向测试的网络化软硬件平台

基于高准确度同步过程与特性检测技术的要求，选择高性能的多核嵌入式PowerPC微处理器、大规模可编程逻辑电路FPGA模块，完成基于多核PowerPC微处理器核心硬件平台的研发。在此基础上，研发基于嵌入式实时多任务操作系统底层驱动软件（BSP），实现硬件软件支撑平台。

2. 时间同步测试技术

研究并实现各种通用的时间同步信号（共性）测量技术，包括IRIG－B码、1pps、NTP、IEC 61588（IEEE 1588）和串口对时报文等时间同步信号。

3. 同步信号误码类型、特性及输出方法分析

对目前各种时间同步信号的原理、技术指标进行系统地研究，统计、分析各种时间码同步信号可能出现误码的条件、特性，用于仿真授时系统及其输出同步信号的异常状态。

4. 基于网络报文硬件时标的报文同步分析技术

通过FPGA硬件逻辑，实现网络报文的准确时间标签记录，可以准确测量网络报文的同步时延，实现智能设备网络通信的时延特性测试。

5. 基于硬件的网络报文编码、解码技术

研究采用FPGA硬件逻辑实现接收报文的解码分析和对“待发送报文”的编码发送，提高测试平台的网络报文吞吐能力和发送时延准确性。

电网检测系统特征技术与集成

1. 检测系统的主控单元及软件系统

针对变电站授时系统及其被同步装置的工况特点，除研究共性支撑技术外，还就智能主控单元以及被其监控的子单元的软硬件接口技术开展研究。采用仿真技术实现可控的同步/误码时间同步信号输出，实时模拟授时系统的各种运行工况，并监测其运行、动作反馈信息，通过与其他测试单元的交互通信，完成二次设备系统的特性测试，以此考核二次系统行为的选择性、正确性和可靠性。

主控单元软件系统主要采用分步式、跨平台开发技术，可以运行在Linux/UNIX/Windows等操作系统上，包括测试工程管理、测试仪配置参数管理、变更测试项目及流程管理、测试报告生成

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

及管理、设备缺陷管理等。主控单元还具有协调管控以下特征单元的功能。

2. GPS/北斗信号接收定时单元

由GPS/北斗（双系统）接收定时模块和接收天线、馈线及相关管控软件构成定时单元，用于接收卫星授时信号，输出TOD时间和1 pps，准确度优于50 ns，用于驯服、校准检测系统的时钟，并作为与其他电网变电站实现时间同步的主要参考。

3. 时间同步基准源单元

准确稳定的时间参考基准是测控系统的基础。鉴于成本上能予以接收的高稳晶振、铷钟的短稳较好而长稳、老化特性较差，会随时间累积频偏，而GPS/BD授时信号的短稳较差而长稳较好，可与铯原子钟媲美。检测系统的基准参考源取长补短，采用现代闭环控制守时理论和卡尔曼数字滤波技术设计数字锁相环，用外参考GPS/BD授时信号锁定本地铷钟/晶振的驯钟技术。数字锁相环设计如图4所示，用FPGA接收外参考1 pps及状态信息，判断是否有效，当外参考有效时，开始测量本地秒脉冲LOCAL_1pps与外参考秒脉冲REF_1pps之间的相位差，测量准确度可达300 ps，将差值送给NIOS软核，NIOS通过大数剔除、滑动平均和卡尔曼滤波等算法，对秒差数据进行处理，根据秒差变化趋势，用最小二乘法测算出当前铷钟/晶振的频偏，通过DA将数字压差转换为VCO补偿，得到精准的10 MHz输出，并通过相位锁定，使输出1 pps与GPS/BD_pps相位保持一致，同步准确度可达到50 ns，复现“UTC时间基准”，其稳定度优于如图5所示的8×10^{-13}，作为整个检测系统的时间同步基准源。

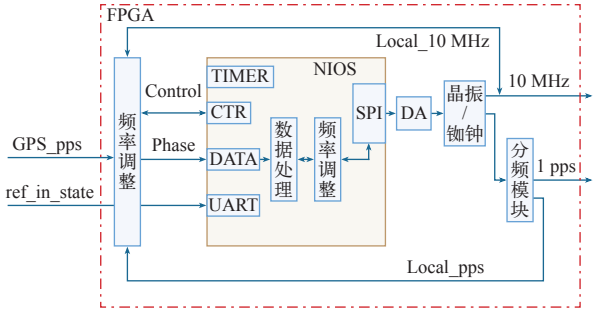

图4　同步基准的数字锁相环框图

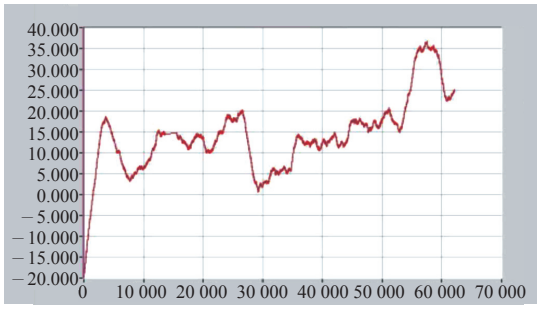

图5　时间同步基准输出锁相环的相位（时差）变化

4. 时间同步信号测试单元

测试单元以基准源输出的1 pps为参考，准确测量并显示输入的被测时间信号与基准源的偏差；同时管控多路接入的被测时间同步信号，自动识别被测信号类型，支持多种时间信号不同参数的高准确度测量，并可实现对各种被同步装置/智能设备的时延特性的测试，分析判定同步信号的质量，包括以下几个方面。

1）检测脉冲信号、IRIG系列时间报文、串口对时报文的准确度及相关参数，包括脉冲的上升沿宽度、时间准确度、脉冲宽度、脉冲信号幅值与调制比、频率抖动和时间质量位等，其实现的方法和手段如下。

由FPGA模块和PowerPC模块获取并解析卫星授时信号，测量其统计平均值，驯服本地铷钟，保证其输出的1 pps准确度优于50 ns[4-6]，作为监测系统各种检验测量判定的参考基准。

由采样电路及FPGA模块对待测信号进行高准确度采样，FPGA获取该信号由低电平到高电平的上升时间（上升沿宽度）。

FPGA通过比较待测信号上升沿相对于基准源内部时钟分频的1 pps前沿的时刻偏差，得到待测信号（相对于时间基准）的时间准确度。

由FPGA和PowerPC模块获取待测信号的上升时刻及下降时刻，计算出脉冲宽度。

采样电路获取采样值后，由FPGA将其传递到CPU，由CPU计算出信号幅值；CPU也可获取IRIG－B（AC）码的码元周期，计算出编码信号的调制比。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

PowerPC模块对IRIG系列时间报文内容进行解析，获取时间质量位、校验位等码元信息，依据标准要求，进行正、误判断。

系统同时支持待测信号的单次测量或连续测量，其每次测量结果可由PowerPC模块实时存储到外挂存储器中，达到长时间不间断测试和累计统计分析的目的。

2）对于TTL、RS 232、RS 485和空接点等各类不同（类型）电平的待测信号，进行电平自动识别及输入电路切换；此法也适用于测试光纤信号。

3）FPGA模块对待测的PTP－1588及NTP/SNTP报文可以加盖硬件时间戳，实时发出响应报文并加盖发送时间戳，从而测量时标的准确度以及报文时间的准确度[7-9]，并显示待测信号的MAC地址、路径延迟、端口编号和准确度等信息。

4）监测系统的液晶显示屏可实时显示多通道待测信号的波形、检测结果，飞梭和按键可进行界面操作，根据外界指令控制界面的切换及显示，进行有效的实时人机互动。

5. 时间同步信号仿真单元

鉴于被同步装置在收到错误或者偏移的同步信号的情况下，不同设备会采取不同的响应策略，而其所采取的策略是否合理即会影响其自身甚至下游链路其他设备的同步特性。因此，检测系统的仿真单元既有模拟授时系统输出正确的时间同步信号，又可模拟运行工况、仿真输出可调控的、异常的（包括或失步的、误码的）时间同步信号，用以测量被同步装置的响应特性和鲁棒性。该单元可有具体功能如下。

1）收到授时系统输出的同步信号后，解析之，仿真模拟，并据以修改本检测系统装置输出同步信号的时间参数，用于对被同步装置检测；也可控制、修改输出同步信号的时间间隔，支持手动控制和自动控制。

2）由FPGA控制输出的pps/ppm/pph脉冲的波形，调整脉冲在时间轴上的位置，使其偏离技术标准允许的偏差；调整脉冲的间隔时间，如图6所示；调高或调低脉冲的电平，或延展/压缩脉冲宽度达到指定的脉宽，如图7所示；改变脉冲上升沿的斜率，调整上升沿时间，使爬升速率变陡或变缓，如图8所示。

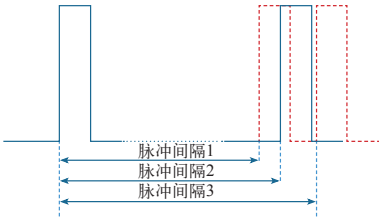

图6　脉冲间隔时间调整示意图

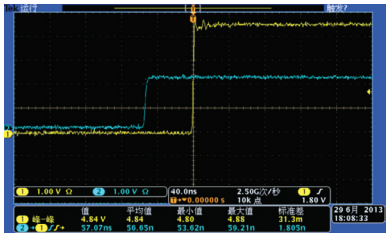

图7　示波器所示脉冲宽度、电平调整

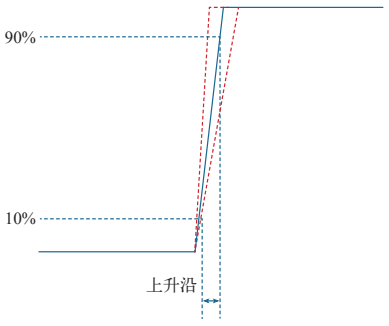

图8　脉冲上升沿斜率调整示意图

由FPGA调整此类脉冲特性，用以测试被同步装置在各种输入条件下的响应性能。可控模拟输出IRIG系列时间报文特性及报文内容，既可按标准缺省输出IRIG－B（DC）码，包含100个码元，每个码元10 ms[10-11]，脉冲上升时间≤100 ns，秒准时沿的时间准确度优于0.2 μs等相关参数；也可修改码元宽度和速率，对此类参数实现手动设置，相对标准值设定若干偏移值，输出可控的其他IRIG系列时间报文。

针对目前使用的网络对时报文存在对时协议有多个选择、测试数据不直观和解析复杂等问题[12]，本系统不但可以检测网络报文，进行同步准确度及报文时标的准确度测试；同时，还能够作为时间服务器，输出多种网络对时报文，对输出报文的格式、内容与同步特性进行人为设定，用以检

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

测测试，进行同步性能分析评估。

6. 网络报文记录及分析单元

由于授时同步信号与被同步装置之间的链路通常是单向的或主从方式，被同步装置在接收到同步信号后如何响应，对于发出同步信号的主动方来说往往是不可知的。因此，如何验证被同步装置的动作和响应的正确性也是重点研究对象。为此，设计了反馈数据记录分析单元，用于检测被同步装置在收到正确（同步）、偏移（误同步）和错误（误码）的同步信号的情况下，可能采取的响应策略；并通过输出模拟信号可控，同时监测、分析被同步装置的反馈的报文，获得其响应特性。该单元主要功能包括网络报文采集、网络报文记录、异常报警、数据统计、数据检索和提取；进行在线监听/监测、记录涉及到时间同步特性的网络通信报文，并对记录的网络报文进行分析，准确定位和分析各种同步/异步工作状态改变事件，检测在误码输出的情况下被同步装置的响应特性、信号的完整性及其鲁棒性，为监测系统和设备的设计、改进提供有效手段。

7. 被同步装置自守时能力检测

被同步装置接收到同步信号并校正其内置时钟后，撤除同步信号，装置依靠内置时钟继续运行。在此情况下，各个被同步装置的自守时能力会存在差异。检测系统通过对被同步装置被授时和不予授时的对比测试，检测其自守时能力；对各被同步装置的自守时能力同时进行多路比对，检测各装置之间的同步性。

结束语

通过上述分析研究，高准确度同步特性检测系统可用以检测、监控电网和智能变电站的卫星授时－时间同步过程与性能，对同步系统完整的链路进行全面检测评估，支持智能电网同步系统特性检测与工况监测实现分层管理，集中监测，提升同步系统品质和电网运行安全。这种对卫星授时－时间同步应用系统进行发、传、收、用全过程的分布式网络监控管理模式，不但在电力系统以标准化的形式列入技术规范，而且在电信、金融、高速交通以及诸多涉及计算机网络精密时间同步的场合，都开展研究和应用。这种检测/监控技术和设备正在不断的改进与完善之中。

参考文献

[1] DL/T 1100.1—2009 电力系统的时间同步系统第1部分技术规范 [S]. 北京：中国电力出版社，2009.

[2] 陈辉，包亚卓．时间同步系统在智能变电站中的应用研究 [J]. 经验交流，2014，26 (7)：84-89.

[3] 刘浩，郑建勇．应用于电力系统中的GPS同步时钟 [J]. 继电器，2012，30 (1)：47-49.

[4] 于跃海，张道农，胡永辉，等．电力系统时间同步方案 [J]. 电力系统自动化，2008，32 (7)：82-86.

[5] 王立辉，许扬，陆于平，等．数字化变电站过程层采样值时间同步性分析及应用 [J]. 电力自动化设备，2010，30 (8)：37-40.

[6] 楚鹰军，陈同辉．基于硬件时间戳的IEEE1588 时间同步技术的一种实现方法设计与应用 [J]. 中国科技信息，2006 (24)：134，160.

[7] 邴志光，束坤，顾燕飞．IRIG_B码在时间同步系统中的应用 [J]. 现在电子技术，2012，35 (7)：16-18.

[8] 杨松，王恩东，黄鑫，等．变电站时间同步装置存在问题分析及对策 [J]. 吉林电力，2013，41 (6)：12-14.

[9] 申屠刚，钱钢，杨贵玉，等．基于时间同步技术的新型远方终端单元设计 [J]. 电力系统自动化，2008，32 (15)：45-48，107.

[10] 陈宁，李洪涛，俞刚．电力系统中基于SDH的时间同步系统研究 [J]. 科学技术与工程，2011，11 (16)：3672-3674，3678.

[11] 童伟．基于北斗II代/GPS的电力系统双模时间同步时钟的研制 [J]. 电力建设，2014，35 (4)：81-85.

[12] 陈班贤，黄琦，井实，等．一种用于电力系统的可控同步时钟测试仪的研制 [J]. 电测与仪表，2013，50 (7)：96-100，122.

（收稿日期：2015－04－01）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net