

基于绝对延时的网络化采样技术研究

目前的智能变电站继电保护采样值多数采用点对点传输模式,但点对点模式制约了智能变电站网络技术的应用,由点对点传输过渡到网络化传输是发展趋势。网络交换机的数据帧交换延迟时间会受到数据帧长、网络拓扑结构、网络负载和广播风暴等因素的影响,数据帧交换延迟时间不确定是制约采样值网络化传输应用的最大技术障碍。针对现有的点对点采样技术和基于同步信号的网络采样技术进行分析,提出一种基于绝对延时的网络化同步采样技术,将数字量网络传递过程的时间进行准确测量并标定,以解决网络化采样由于时域的离散所带来的同步误差,并针对这种技术提出了完善的测试方案,通过实际测试系统验证了这种技术的实用性。

黄东山 周 卫 王晓明/广西电网有限责任公司电力科学研究院
汤汉松 罗 强/江苏凌创电气自动化股份有限公司



黄东山/高级工程师

关键词/Keywords

绝对延时时间 ·
网络化传输 ·
同步采样 ·
交换机时标标定 ·
网络传输测试 ·

智能变电站同步问题一直是网络化采样保护的最大难题。当前,智能变电站继电保护采样多采用点对点模式,但点对点采样模式加重了合并单元(MU)和继电保护设备的硬件难度,严重制约了智能变电站网络技术的应用,智能变电站的数字共享的效果未能得到充分的发挥。

目前,电子式互感器以及合并单元按照点对点采样技术的实施已经可以很好地控制输出报文的时间特性,绝对延时时间稳定且不大于2 ms,报文离散度小于10 μs,时间特性可以满足现有继电保护同步采样的技术要求^[1]。但由于网络化采样过程中交换机的传输时间不确定,制约了采样值网络化传输应用^[2-4]。

数字化传输的本质是一种基于时域的离散数字量传输,其区别于模拟量传输之处在于数字化传输是值域固定而时域离散,模拟量传输是时域连续值域存在误差的传输。本文针对现有的点对点

采样并基于同步信号的网络采样技术进行分析,提出一种基于绝对延时的网络化同步采样技术,将数字量网络传递过程的时间进行准确测量并标定,以解决网络化采样由于时域的离散所带来的同步误差,并提出一套针对这种应用方式的测试方案,对网络传输的各种时间特性进行测试,并通过实际测试系统验证了这一技术的实用性。

智能变电站过程层采样系统分析

1. 点对点采样系统

点对点采样是指电子式互感器MU输出通过光纤直接连接到接收装置,中间无任何外加中转和网络设备。电子式互感器在我国发展早期采用的是点对点传输方案^[5-6],单间隔MU以IEC 61850-9-1协议点对点传输采样值给IED, MU已经完成了本间隔内所有互感器的同步, IED无需考虑同步问题。对于跨间隔IED,通过IEC 60044 FT3串行协议进行点对点接收,对各异步MU报文精确标定时标,通过插值算法来实现多MU的同步,不采用IEC 61850-9-1以太网协议是因为同步插值算法要求采样值报文的延时时间和发送时序稳定,抖动时间小,而早期的IEC 61850-9-1难以达到这个要求。图1、图2为国内早期的一个电子式互感器厂家的报文抖动时间值,从中可以看出IEC 61850-9-1的报文抖动值达到了 $[-12.89 \mu\text{s}, 52.75 \mu\text{s}]$,对于额定50 Hz工频信号,对应的相位抖动为 $[-13.92^\circ, 56.97^\circ]$,对于0.2S/5TPE级的互感器而言误差过大,而IEC 60044 FT3协议的报文

抖动值明显较小, $[-0.34 \mu\text{s}, 0.34 \mu\text{s}]$ 对应相位抖动为 $[-0.37', 0.37']$, 可以很好地满足各种不同插值算法的要求。

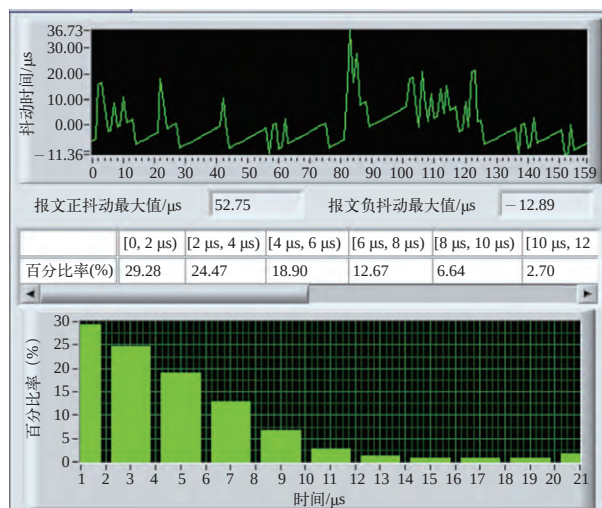


图1 IEC 61850-9-1报文抖动时间特性

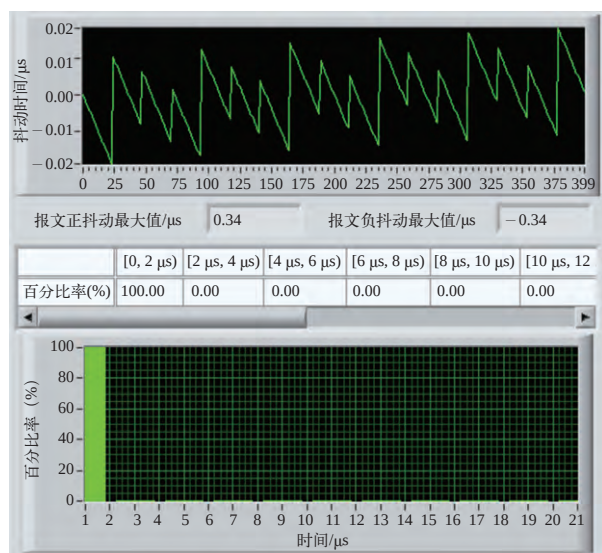


图2 IEC 60044 FT3报文抖动时间特性

虽然FT3报文的时间特性明显好于以太网, 但是FT3是基于FPGA来实现的, 协议自身有局限性, 通用性和功能扩展性均较差, 数据带宽绝大部分不超过20 Mbit/s, 调试、监测和检测都很困难, 严重制约了其广泛应用^[7]。

随着智能变电站的大面积工程应用, 行业焦点又回到了以太网的点对点实现, 用IEC 61850-9-2LE协议替换IEC 61850-9-1^[8-10], 硬件采用FPGA来实现以太网的发送, 由FPGA完成以太网

的MAC子层、MAC子层与以太网控制器的接口设计, 实现了优良的以太网数据发送时间特性^[11], 绝对延时时间控制在2 ms以内, 报文抖动时间不超过2 μs 。表1为目前国内3个主要厂家的模拟量输入IEC 61850-9-2LE输出间隔MU的时间特性指标。从表1中可以看出, 时间指标可以满足跨间隔设备点对点同步采样的应用需求。

表1 IEC 61850-9-2LE点对点传输MU时间特性

时间指标	厂家1	厂家2	厂家3
延时时间最大值/ms	1.503 9	1.345 2	0.752 0
延时时间最小值/ms	1.501 6	1.344 7	0.751 3
延时时间均值/ms	1.502 8	1.345 0	0.751 7
报文抖动值/ μs	-0.59~0.16	-0.04~0.05	-0.20~0.20

2. 基于同步信号的网络化采样系统

点对点传输过渡到网络化传输是发展趋势, 但交换机的数据交换延迟时间不确定严重制约了其应用。如图3所示, 传输延迟时间 Δt 主要包含了数据接收和转发的处理时间 T_p 、数据帧队列等待时间 T_q 和数据帧发送时间 T_t 。采样值报文数据帧长的改变、网络负载的变化、广播风暴的影响以及交换机自身任务处理的快慢都会造成数据帧网络交换延迟时间的变化。

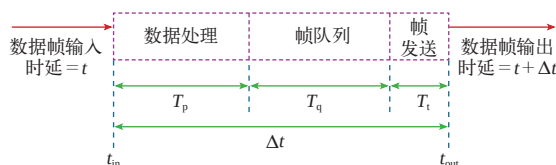


图3 交换延迟时间示意图

网络化传输如何实现跨间隔MU的采样同步是关键, 目前有一种方案是基于同步信号来实现, 让所有MU接收同一个同步信号, 需要接收多个MU采样值的IED, 通过报文中的采样计数器(SmpCtr, 16位无符号整数)来实现同步, 这种方案严格依赖于同步信号的稳定性, 一旦同步信号出现异常或个别MU同步过程出现异常, 则会对IED设备的同步处理造成影响^[12-13]。

国内某110 kV智能变电站, 两台三绕组变压器高压侧配置A公司的电子式互感器和合并单元, 中低压侧配置B公司的电子式互感器和合并单元,

使用双同步时钟装置，GPS/北斗主备。高压侧同步方式为光纤B码同步，中低压侧同步方式为光纤秒脉冲同步，整站已投入运行。运行过程中，GPS突然失去，同步时钟切换到北斗时钟。此时A公司的合并单元将对时信号立刻切换到北斗上，B公司发现两个时钟差距太大，于是不进行切换，而是等待一段时间之后再进行切换，暂时利用守时继续跟随GPS时钟，此时双方合并单元均正常工作，且都没有报同步丢失，但事实上双方的时钟已拉开176 ms。此时主变压器保护装置认为双方是同步的，继续差动保护的运行，高低压侧相位角拉开了70多度的角差，造成了差动保护的误动作，主变压器保护录波如图4所示。

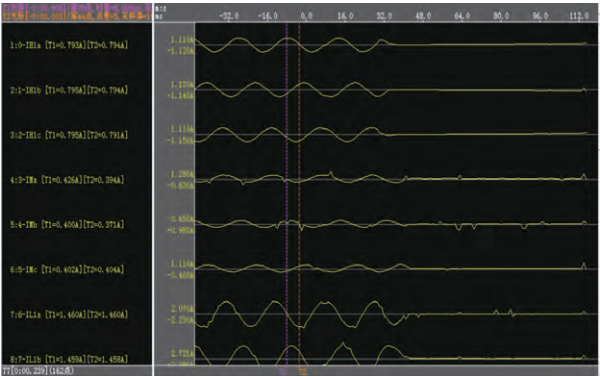


图4 主变压器保护录波图

在这个案例中，从电子式互感器、MU和继电保护的表现来看，大家都是按照正常逻辑在运行的，就单个设备本身而言并没有什么错误，但当这些组合在一起，同步时钟出现异常以后就出现上述问题，可见基于同步信号的网络化采样对同步信号的依赖性过强，系统内部逻辑功能的耦合性过大，且缺乏统一的异常处理机制，存在一定的安全隐患。

3. 基于绝对延时的网络化采样系统

既然不依赖于同步信号的以太网点对点传输时间特性可以满足时间要求，故基于绝对延时时间的网络传输思路被提出。采样值组网示意图如图5所示，以二级星形拓扑结构为例，一次侧模拟量层记为L₁，MU输出层记为L₂，第一级交换机输出层记为L₃，中央交换机输出层记为L₄，每一个数据帧从L₂层到L₃层会带来一个额外的网络传输延迟

时间，记为 Δt_1 ，从L₃层到L₄层同样会带来网络传输延迟时间 Δt_2 。

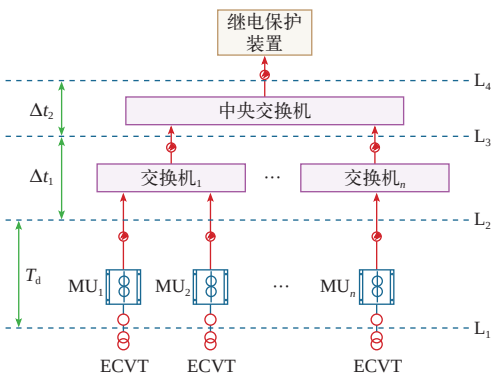


图5 基于绝对延时的网络化传输示意图

采样值网络传输后，原本在L₂层可以满足时间要求的数据帧，经过了 Δt_1 和 Δt_2 时间后变得不再满足。针对这一问题，在每一个数据帧通过交换机时，由各个交换机对每一帧进行传输延迟时间的准确测量，得到每一帧数据最后一个字节进入交换机到最后一个字节从交换机输出端口发出的总延迟时间，即测量出 Δt_1 和 Δt_2 的大小，并将这一延迟时间值填入到每一个数据帧中去。

采样值以太网报文PDU结构如图6所示。

8位位组	8	7	6	5	4	3	2	1
1	以太网类型 PDU	Ethernettype						
2								
3		APPID						
4								
5		Length						
6								
7		Reserved ₁						
8								
9		Reserved ₂						
10								
11								
...		APDU						
$m+2$								

图6 采样值以太网报文PDU结构

将未被定义数据含义的保留字节reserved₁启用，将交换机传输延迟时间存储到该字节，以微秒为单位，可表示时间范围为[0, 65 535 μs]，范围足够。当MU发送采样值报文时，该值默认赋0，每一级交换机将自身的延迟时间 Δt 累加到该值中。当最后一级交换机将报文输出时，该字节段包含了采样数据帧经过整个网络传输链路的总延迟时间 Δt ，图5中， $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ 。继电保护设备便可以知道当前这一帧在网络传输环节的总延迟时间。

继电保护设备对接收到的每一数据帧在时域上基于自身的时钟进行时标标定, 记为 t_1 。 t_1 时刻是包含了网络化传输环节的时间不确定因素, 继电保护设备的处理办法是从数据帧中提取出当前帧网络传输总延迟时间 Δt , 对 t_1 时刻进行修正, $t_2 = t_1 - \Delta t$, 修正后的 t_2 时刻即为数据帧从MU输出的时刻, 即数据帧到达 L_2 层的时刻, 而该时刻的时间特性是可以满足同步插值要求的。

基于绝对延时的网络化采样测试技术

从基于绝对延时的网络化采样技术方案中可以看出, 经过网络后电子式互感器对一次侧工频信号传变的绝对延时时间(群延时)是否满足快速性要求, 是否足够稳定, 交换机输出的每个采样值报文在时域上的抖动是否在一个可以接受的合理范围, 交换机对每个采样值报文的网络传输额外延时时间(帧延时)的测量和标定是否准确, 这些都是此方案能否正确应用的关键, 为此展开针对性的严格测试至关重要。

测试系统的原理图如图7所示, 测试系统中分3类信号的接收, 第1路信号从电子式互感器的一次侧取模拟信号, 作为标准源信号, 是测试试品信号的参考基准。采用高准确度标准电流互感器或标准电压互感器将一次侧的高电压大电流转换成额定 $100/\sqrt{3}$ V和5 A的信号, 标准互感器的准确度可达0.01级, 能够保证信号传变中的幅值和相位误差足够小。模拟信号进入测试系统后, 经过信号调理模块, 将信号转换成可供A-D采集的小电压信号, 并设置抗混叠低通滤波器, 低通截止频率设置在8 kHz左右, 以保证具有足够的带宽, 利于后期的数据分析。高准确度A-D转换环节完成误差控制在0.02%、不低于40 kHz的高频采样, A-D转换的采样节拍基于高准确度的时钟模块, 由FPGA来控制ADC的转换和数据的读取, 并由FPGA对每一个采样点标定时标, 记为 T_{r1} 。

电子式互感器MU输出的光纤回路通过光纤分路器, 将一路信号分成多路信号, 其中一路接入到测试系统, 构成测试系统的第2路信号。该路信号是数字信号, 作为测试系统的第2路标准源信

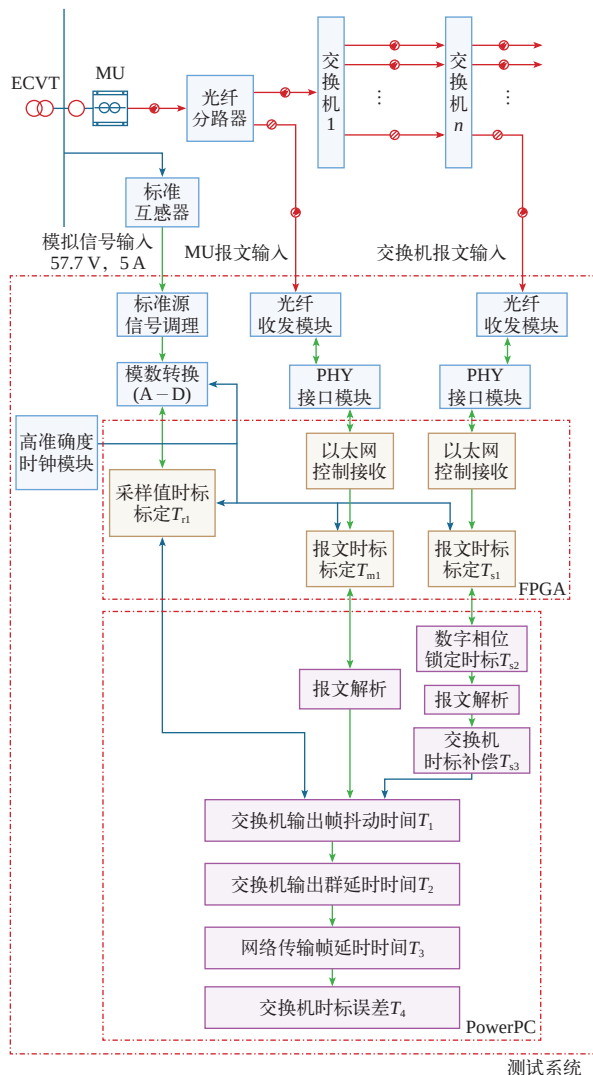


图7 网络化传输测试原理示意图

号, 也是测试试品的参考基准源。MU的采样值报文首先经过光纤以太网收发器, 再经过以太网PHY模块的控制与FPGA相连。由FPGA完成以太网的MAC子层设计, MAC子层与PHY芯片的MII接口设计。FPGA对接收到的每一帧MU数据打上时标, 记为 T_{m1} , 时标的基准来源于测试系统的同一个时钟模块。

网络交换机最终输出的采样值报文也接入到本测试系统, 作为第3路信号, 该路信号是被测试的网络化传输的电子式互感器输出信号。该路信号同样经过光纤以太网收发模块和PHY接口模块接入到FPGA, FPGA同样基于同一个高准确度时钟模块对每一帧采样值报文进行准确时标标定, 记为 T_{s1} 。

上述3路信号同步实时接收，并基于同一时间轴进行了时标标定之后，开始进行数据的处理工作。对被测试的第3路信号采样值报文， T_{s1} 时标存在较大时间抖动，为此设置了数字式相位锁定器（DPLL）以达到消除抖动的目的^[14]，得到消抖后的时标 T_{s2} ，则交换机输出的帧抖动时间 $T_1 = T_{s2} - T_{s1}$ 。

在同一时间轴上，以时标 T_{r1} 绘制出第一路模拟量标准源信号波形，同时以时标 T_{s2} 绘制出被测交换机输出的试品波形，在同一时刻提取标准源信号和试品信号时间窗为80 ms的波形，以加Hanning窗的傅里叶滤波提取出标准源基波相位 φ_1 、试品基波相位 φ_2 ^[15]，并测出标准源信号当前频率 f ，则经交换机输出的电子式互感器总绝对延时时间，即群延时 $T_2 = (\varphi_1 - \varphi_2) / 2\pi f$ 。

对接收到的第3路被测报文进行解析，提取出交换机标定的当前帧网络传输额外延时时间 Δt ，当前帧的时标为 T_{s1} 。通过采样计数器可以搜索出本帧在第2路数字标准源信号中的对应时标 T_{m1} ，则本帧经过网络传输的实际额外延时时间（帧延时） $T_3 = T_{s1} - T_{m1}$ ，同时得出交换机标定时标的误差 $T_4 = \Delta t - T_3$ 。

测试验证

在实验室中搭建测试试验系统，如图8所示。模拟信号源采用一台继电保护测试仪，合并单元选用表1中试验所用的同一时间间隔MU，交换机采用两台国产的新型可标定时标交换机。

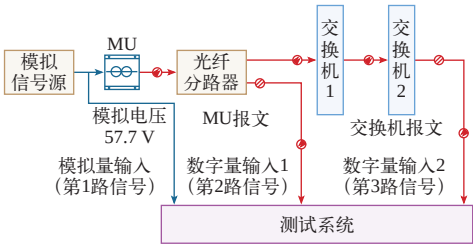


图8 测试系统接线图

继电保护测试仪输出57.7 V模拟电压同时接入MU和测试系统的模拟量输入通道，将MU的一路光纤输出回路通过光纤分路器一分为二，分别进

入网络交换机1和测试系统的数字量输入通道1，光纤分路器作为无源器件对采样值报文的时间特性不产生附加影响，且两路信号可保持一致。交换机1的输出接入到交换机2，交换机2作为最终的采样值网络化输出接入到测试系统的数字量输入通道2。依次对3个厂家的MU展开测试，测试结果如表2所示。从表2中可以看出，经过网络交换环节后，3个厂家的MU群延时额外增加了47.5~48.1 μs，该时间和实测的帧延时是吻合的，交换机自行标定的延时标误差误差不超过1 μs。

表2 网络化传输测试结果数据

时间指标/μs	厂家1	厂家2	厂家3
交换机抖动 T_1	-9~8	-10~9	-7~8
群延时均值 T_2	1 550.9	1 392.8	799.2
帧延时 T_3	49.2	47.5	47.3
交换机标定 Δt	48.9	48.1	48.0
交换机误差 T_4	-0.3	0.6	-0.3

为了模拟实际智能变电站工程中一个交换机同一VLAN下接入多个MU的情况，在图7所示的厂家3测试中，在交换机1的输入端增加厂家3的MU输入台数，所有新增MU均为同一硬件软件和配置版本，且MU模拟工程现场接收同一GPS时钟信号。在不同MU输入台数情况下，针对同一台MU的测试结果如表3所示。从表3中可以看出，随着交换机上MU输入台数的增加，交换机报文抖动时间 T_1 随之增加，交换机群延时 T_2 也随之增加，但交换机所标定的 Δt 依然很准确，误差不大于1 μs。

表3 不同MU输入数量下的测试结果数据

时间指标/μs	总输入台数4	总输入台数8
交换机抖动 T_1	-46~47	-84~82
群延时均值 T_2	838.4	878.0
帧延时 T_3	86.5	125.9
交换机标定 Δt	87.3	126.9
交换机误差 T_4	0.8	1.0

结束语

合并单元采样值输出基于绝对延时进行组网传输，只需要在现有的已经可以满足间隔层应用对时间特性指标要求的基础上，在网络交换环节

对报文的额外延时进行准确测量,并在报文的固定位置对该时间进行累加标定。跨间隔接收方解析该时间值并做出相应的时标修正便能很好地实现采样的同步,克服网络交换环节所带来的时间不确定性影响。该方案可以不依赖于任何同步源和同步网络,大大提高了采样系统运行的可靠性和安全性。通过构建一套完整的测试系统并进行对比试验,可以看出基于绝对延时的网络传输是可行、可测试和可实用的。

参考文献

- [1] 国家电网公司. Q/GDW 441—2010 智能变电站继电保护技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[2] 朱来强, 陈新之, 高志勇. 数字化变电站中广播风暴的防治[J]. 电力自动化设备, 2010, 34(11): 98-101.

[3] 王海柱, 张延旭, 蔡泽祥, 等. 智能变电站过程层网络信息流潮流模型与计算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 22-26.

[4] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于动态故障树的变电站通信系统可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 135-141.

[5] 汤汉松, 孙志杰, 徐大可. 数字化变电站的现状与未来[J]. 江苏电机工程, 2007, 37(1): 5-7.

[6] 张志鹏, 胡君慧, 刘国平, 等. 基于点对点技术的数字化变电站工程实践[J]. 电力自动化设备, 2009, 33(4): 139-142.

[11] 龚坚, 彭晖, 乔庐峰, 等. 标准802.3以太网MAC控制器的FPGA设计与实现[J]. 军事通信技术, 2005(4): 21-24.

[12] 李仲青, 周泽昕, 黄毅, 等. 数字化变电站继电保护适应性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 210-215.

[13] 罗彦, 段雄英, 张明志, 等. IEC 61850-9-2过程总线上的同步技术研究[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 229-234.

[14] 李澄, 袁宇波, 罗强. 基于电子式互感器的数字保护接口技术研究[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 84-87.

[15] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值FFT动态谐波分析算法及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 26(12): 270-277.

(收稿日期: 2014-09-05) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告