

基于以太网的列车通信网络及交换机开发

张 军, 贺德强, 苗 剑

(广西大学 机械工程学院, 南宁 530004)

摘要: 随着列车中大容量设备的增加, 高带宽的工业以太网用于列车通信网络已成为一种趋势; 生成树冗余与 VLAN 技术应用在基于以太网的列车通信网络中能有效地保证该通信网络的可靠性、稳定性和实时性, 为了支持生成树协议 (STP) 和 VLAN 相关协议, 设计了一款基于 KSZ8995MA 的交换机, 介绍了其硬件设计和软件实现的关键部分; 利用 OPNET 软件建立生成树冗余链路和冗余链路模型并进行时延仿真, 仿真结果表明生成树冗余链路的时延小于冗余链路的时延, 有效地提高通信网络的稳定性和实时性。

关键词: 工业以太网; 交换机; 生成树冗余; 虚拟局域网

Research on Train Communication Network and Managed Switch Based on Ethernet

Zhang Jun, He Deqiang, Miao Jian

(Mechanical Engineering College, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: It has been a trend that the industrial Ethernet with high bandwidth is used for Train Communication Network with the increase of the voluminous device. The reliability, stability and real-time ability of the Train Communication Network based on Ethernet could be effectively guaranteed with the application of the Spanning Tree Redundant and VLAN to it. In order to support the Spanning Tree Protocol (STP) and VLAN related protocols, a switch based on KSZ8995MA is designed. The key parts of hardware design and software implementation are introduced. Meanwhile, the Spanning Tree Redundant Link and Redundant Link are modeled with OPNET. The simulation of time-delay is conducted and the results show that the delay-time of spanning tree redundant links is less than the redundant link and the spanning tree redundant links effectively improve the network's stability and real-time.

Key words: industrial Ethernet; switch; spanning tree redundant; VLAN

0 引言

随着列车速度大幅度提高和车厢内设备的增加, 列车中所传输的视频、音频和故障诊断信息等数据剧增, 把高带宽的工业以太网运用于列车通信网络已成为主要的研究方向。当列车高速运行时, 振动幅度较大、频率较快, 通信网络容易出现故障^[1], 生成树冗余技术应用在基于以太网的列车通信网络中能较快地恢复其正常通信。同时引入虚拟局域网有效地减少了大容量数据在该冗余链路中传输时产生的碰撞概率, 防止了网络的堵塞甚至瘫痪。为支持生树和虚拟局域网相关协议, 本文设计了一款基于 KSZ8995MA 的交换机, 该交换机具有较多的网络管理功能, 应用在基于以太网的列车通信网络中是一种较好的选择。

1 基于以太网的列车通信网络结构设计

1.1 生成树冗余网络

在基于以太网的列车通信网络中, 一个链路的故障很可能导致整个列车通信系统瘫痪, 生成树冗余网络有效地消除了该

故障带来的危害, 其冗余网络结构如图 1 所示。

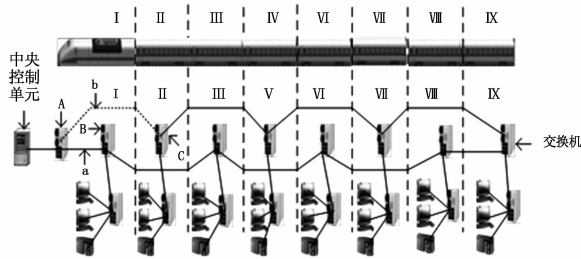


图 1 生成树冗余网络

生成树协议 (STP) 是依据 IEEE 制定的 IEEE802.1D 标准, 为消除冗余网络环路中的广播风暴和 MAC 表的不稳定性提供了有效途径^[2]。如图 1 生成的树冗余网络所示, 设置交换机 A 的优先级值为 4096; 设置交换机 B 的优先级值为 8192, 其第 5 个端口为指定端口; 交换机 C 使用默认优先级值 32768, 其第 4 个端口被设置为阻塞端口。交换机之间通过交换 BPDU 信息, 并依据 STA 算法, 选取 BID (交换机优先级 + MAC 地址) 最小的交换机 A 为根交换机, B、C 为非根交换机, 然后选举 Root Path Cost (路径值) 最小的路径成为通信路径, 另一条为备用路径。假设 a 为通信路径, b 为备用路径, 当 a 路径出现故障时, 交换机自动启用备用路径 b, 确保通信网络恢复正常工作。

为保证大容量数据在上述冗余网络中正常传输, 则每秒钟传输的数据量不能大于 36 Mbps。以太网总线上每秒钟传输的数据量 W 由公式 (1) 决定。

收稿日期: 2013-10-11; 修回日期: 2013-12-25。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51165001); 广西自然科学基金项目 (2013GXNSFAA019297)。

作者简介: 张 军 (1985-), 男, 湖南湘乡人, 在读硕士研究生, 主要从事先进制造及智能检测方向的研究。

贺德强 (1973-), 男, 湖南桃江人, 博士, 教授, 主要从事列车故障诊断与智能维护、列车信息系统方向的研究。

$(i, j) = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 表示网络中的交换机, $n+1$ 表示中央控制单元, 该以太网中每秒钟传输的数据量矩阵 A 如下所示。

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,i} & \dots & a_{1,n} & a_{1,n+1} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,i} & \dots & a_{2,n} & a_{2,n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_{j,1} & a_{j,2} & \dots & a_{j,i} & \dots & a_{j,n} & a_{j,n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,i} & \dots & a_{n,n} & a_{n,n+1} \\ a_{n+1,1} & a_{n+1,2} & \dots & a_{n+1,i} & \dots & a_{n+1,n} & a_{n+1,n+1} \end{bmatrix}$$

矩阵中的 a_{ij} 表示从第 i 台交换机发送到第 j 台交换机的数据量, 根据列车中信息传输的实际情况, 挂载在同一台交换机上面的设备不会互相发送数据^[3], 所以当 $i=j$ 时, $a_{ij}=0$ 。

$$\text{则 } W = \sum_{j=1, j \neq i}^{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} a_{ij} \quad (1)$$

为保证高速以太网正常工作, 则 $W < 36 \text{ Mbps}$ 。

1.2 基于生成树冗余网络的 VLAN 划分

列车的运行安全与信息传输的实时性、准确性关系极为密切。当大容量数据在整个局域网中进行 MAC 寻址通信时, 每台交换机都能监听到所有数据, 从而增加了交换机的工作负担和数据的冲突概率, 将可能造成通信网络的堵塞甚至瘫痪。VLAN 应用于该网络能较大程度地减少这类问题出现的概率, 整个局域网从逻辑上被划分为若干个 VLAN, 每个 VLAN 之间不进行数据的交换, 数据在 VLAN 中广播通讯不会占用更多的带宽。

在整个列车通信局域网情况下, 数据将进行 MAC 寻址通讯, 假设所有车厢视频设备接收相同的数据量 k , 列车由 m 节车厢构成, 每节车厢中设有 2 台视频设备。则其总线中数据量 W_1 为:

$$W_1 = \sum_{j=1, j \neq i}^{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} a_{ij} = 2m \times k$$

将该局域网划分为若干个 VLAN, 所有视频设备划分至同一个 VLAN, 在该 VLAN 中, 数据进行广播通讯, 则总线中的数据量 W_2 为:

$$W_2 = \sum_{j=1, j \neq i}^{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} = k$$

通过计算得出 $W_1 = 2mW_2$, 所以 VLAN 技术的应用能成倍地减少主干线中的数据量, 有利于网络的正常工作。

(1) VLAN 划分模式

VLAN 划分模式主要是: 基于端口的 VLAN、基于 MAC 地址的 VLAN、基于网络层的 VLAN 和基于 IP 组播的 VLAN。基于以太网的列车通信网络是一个局域网, 所以 VLAN 在 OSI 模型的第二层工作; 列车通信网络布局不会频繁改变, 而列车中的设备经常要进行维修和更换。综上所述, 本文选择基于端口的 VLAN, 该种划分模式是最简单有效的方法。

(2) VLAN 划分方法

在局域网中, 把具有共同需求的设备划分至同一个 VLAN 是划分 VLAN 的一般原则。在列车中, 把视频设备、音频设备、故障诊断设备等分别划分在同一个 VLAN, 在同一个 VLAN 内, 数据可以进行广播通讯、组播通讯和单播通讯。KSZ8995MA 只支持 16 个 VLAN ID, 如果列车通信网络中划分的 VLAN 比较多, 则可把几种小容量设备划分至同一

个 VLAN 中, 以满足该交换机的参数要求^[4-5]。

2 交换机的设计

2.1 交换机硬件部分设计

该交换机核心部分由 KSZ8995MA 和 NUC140VE3CN 微控制器构成。KSZ8995MA 是该系列芯片中能实现功能较多的一款芯片, 例如支持生成树、组播通讯、端口镜像及虚拟局域网等功能, 本交换机实现了该芯片的支持生成树和虚拟局域网功能, 所需模块主要是: 电源模块、25 MHz 晶振模块、存储模块、复位模块、SPI 模块及 LED 模块。NUC140VE3CN 是新唐科技 32 位 Cortex-M0 微控制器, 运行效率高, 外设丰富, 适用于读写从机寄存器地址值及其相关程序运行场合, 通过 SPI 对 KSZ8995MA 寄存器地址值进行配置, 实现本交换机的相关功能, 该微控制器所需模块主要是: 电源模块、12 MHz 晶振模块、复位模块及 SPI 模块。上述两款芯片的 SPI 接口有 4 根信号线, 分别为: 设备选择线、时钟线、串行输出数据线及串行输入数据线, 在 SPI 信号线连接时, 为提高数据在传输过程中抗干扰能力, 在 4 根信号线中各串联一个 50Ω 的电阻, 电阻与相应管脚输入电容构成低通滤波器, 滤除信号线上的干扰, 其连接原理如图 2 所示。PS1 和 PS0 是 KSZ8995MA 的 SPI 模式选择管脚, 当 PS1 接通 3.3 V 电压, PS0 悬空时, 该芯片处于 SPI 模式, 即完成了该芯片的 SPI 初始化操作; ICE-CLK 与 ICK-DAT 管脚主要实现 NUC140VE3CN 微控制器程序的烧写。

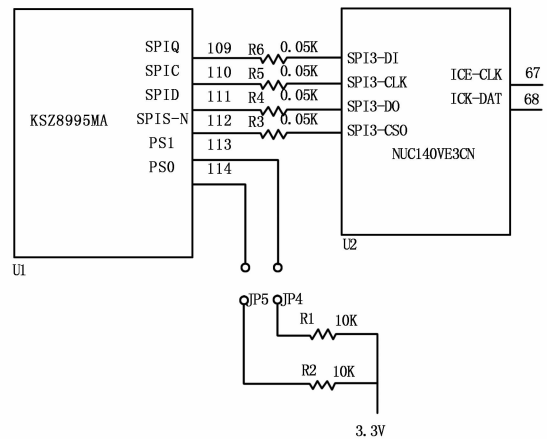


图 2 SPI 模块原理图

2.2 交换机相关软件的研究与实现

KSZ8995MA 内有 128 个寄存器, 每个寄存器由 8 位地址组成, 每位地址分别控制交换机的相应功能, 例如支持生成树与支持 VLAN 功能, 外设可以通过 SPI 接口对任意寄存器进行写操作和读操作。写操作时, 命令长度为 24 位, 高 8 位为写操作识别命令, 中间 8 位为寄存器地址, 低 8 位为写入的数据, 数据在上升沿输出; 读操作时, 命令长度为 16 位, 高 8 位为读操作识别命令, 低 8 位为寄存器地址, 数据在下降沿输出。

在程序编写过程中, 写数据函数与读数据函数为两个主要函数。SPI_PageProgram () 是写数据函数, NUC140VE3CN 把数据写入 SPI_TX0 缓存, 当 FIFO 使能时, 存储在 SPI_TX0 缓存中的数据被载入到 Tx0 缓存并立即开始发送到 KSZ8995MA 的相应寄存器; SPI_ReadDate () 是读数据函

数，其数据传送过程是写数据时的逆过程。

(1) 支持生成树的交换机实现

支持生成树的交换机端口有 5 种状态，分别为禁止状态、阻塞状态、侦听状态、学习状态及转发状态。阻塞状态不接收或转发数据，接收但不发送 BPDU，不进行地址学习；转发状态不仅接收并转发数据，而且接收发送 BPDU，进行地址学习。BPDU 中包括了交换机的 Root ID、BID、Root Path Cost、Port ID 信息。KSZ8995MA 的端口 5 是支持生成树的指定端口 (Designated port)，该端口与根交换机之间的路径开销最低，处于转发状态，数据包经指定端口转发到网段。假设端口 4 为阻塞端口，则 KSZ8995MA 的相关寄存器配置如表 1 所示。

表 1 实现支持生成树的 KSZ8995MA 寄存器配置

寄存器	地址位	功能名称	功能描述	默认值	配置值
11	0	特殊 TIPD 模式	1, 使能特殊标记模式 0, 不使能特殊标记模式	0	1
66	0	学习不使能	1, 不使能交换机地址学习功能 0, 使能交换机地址学习	0	1
66	1	接受使能	1, 端口接收数据包使能 0, 端口接收数据包不使能	1	0
66	2	传输使能	1, 端口传输数据包使能 0, 端口传输数据包不使能	1	0
80	2	标记插入	1, 插入标记使能 0, 标记插入不使能	0	1
114	6	实现生成树	1, 生成树使能 0, 生成树不使能	0	1

对寄存器 11 与 80 进行相应配置后，该交换机能运行生成树协议，能发送本交换机的 BPDU 信息；对寄存器 66 相应配置后，端口 4 处于阻塞状态，只有当指定桥的路径出现故障时，该交换机的阻塞状态自动转为转发状态，备用路径被启用，及时修复通信网络连接。

(2) 支持基于端口 VLAN 的交换机实现

IEEE802.1Q 是虚拟局域网标记 (VID) 的标准，VID 是对 VLAN 协议的识别字段，该字段为 12 位，支持 4096 个 VLAN ID。KSZ8995MA 寄存器中用于设置端口 VID 的字段只有 4 位，因此 VID 只能在 VLAN1 ~ VLAN15 中选取，VLAN1 是该芯片默认的 VLAN ID，所以 VID 取的范围为 VLAN2 ~ VLAN15。假设端口 1、2 挂接视频设备，划分至 VLAN2；端口 3 挂接音频设备，划分至 VLAN3。则 KSZ8995MA 相关寄存器配置如表 2 所示。

上述寄存器经配置后，该交换机具备了支持 VLAN 的功能，并且端口被划分为 2 个虚拟局域网。当标记 VLAN2 的数据帧进入交换机后，数据将在 1、2 端口广播，标记 VLAN3 的数据帧只能发送到端口 3。

3 网络拓扑模型及其时延仿真

生成树冗余链路消除了冗余链路网络中的数据广播风暴，减少了数据之间的冲突，从而减小网络时延。为进一步得到验证，利用 OPNET 网络仿真软件，对 8 节列车车厢建立生成树冗余链路和冗余链路模型，对比分析这两种网络的时间延迟。

表 2 实现支持 VLAN 的 KSZ8995MA 寄存器配置

寄存器	地址位	功能名称	功能描述	默认值	配置值
5	7	802.1Q VLAN 使能	1, 使能 VLAN 模式 0, 不使能 VLAN 模式	0	1
49	4-0	端口 VLAN 成员	1, VLNA 包括该端口 0, VLAN 不包括该端口	0×1f	0×04
51	3-0	配置端口 VID	3-0bit 表示端口 VID 名	0	0×03
17	4-0	端口 VLAN 成员	1, VLNA 包括该端口 0, VLAN 不包括该端口	0×1f	0×03
19	3-0	配置端口 VID	3-0bit 表示端口 VID 名	0	0×02
18	34	丢掉没有 PVID 的数据包	1, 不属于任何端口的数据包丢失 0, 所有数据包都不丢失	0	1
50	5				
66	6				
82	6				

3.1 网络拓扑结构建模

在物理连接上，生成树冗余链路为环形网络，而在逻辑连接上，生成树冗余链路为总线形网络，其逻辑网络模型如图 3 所示；在物理和逻辑连接上，冗余链路都为环形，其网络模型如图 4 所示。上述两种网络均采用带宽为 100 Mbps 的基带双绞线，网络应用业务流量设置为 3 Mbps，对这两种网络进行 30 min 的网络时延仿真，仿真结果如图 5 所示，横坐标为仿真时间，纵坐标为不同仿真时刻的网络延迟。

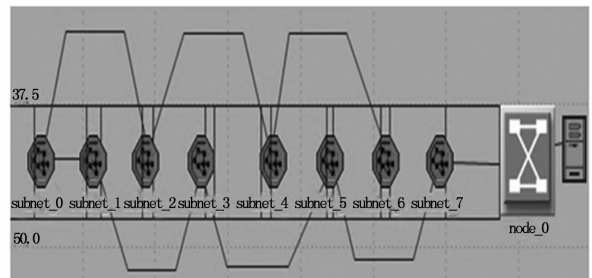


图 3 生成树冗余链路逻辑图

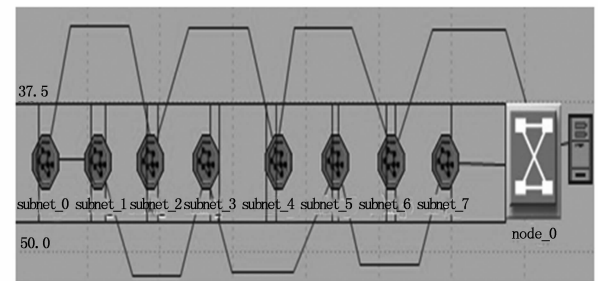


图 4 冗余链路图

3.2 结果分析

以太网时延对比图如图 6 所示，绿色曲线代表冗余链路的网络延迟时间，红色曲线代表生成树冗余链路的网络延迟时间，对比可以得出前者比后者的网络延迟时间长，说明了生成树冗余链路的网络性能比冗余链路的性能优越，同时验证了生成树冗余链路能减少数据之间的冲突，从而减小网络时延。

(下转第 1895 页)

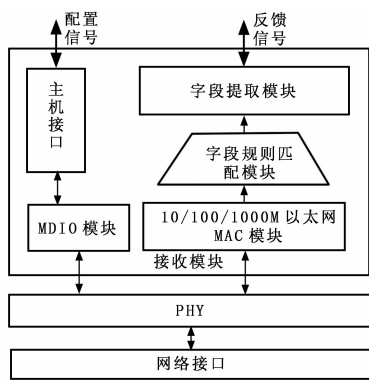


图 3 接收匹配过滤模块功能框图

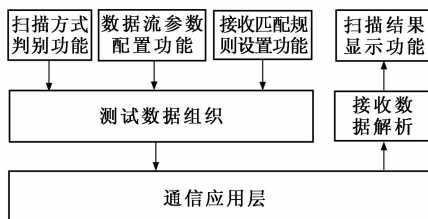


图 4 终端应用软件组织框图

当对给定或指定 IP 段进行主机扫描时, 测试数据流目标 IP 字段变化字节初始值设为 1, 变化方式设为递增, 步进设为 1; 其他字段设置初始值 (协议值设为 ICMP), 且变化方式设为固定。匹配字段和规则设置如下: 目的 MAC 地址字段设为与测试流源 MAC 一致, 规则设为 AND; 协议字段设为 ICMP, 规则设为 AND; 其他可忽略。测试发起前, 接收端口 B 应先对交换机进行地址学习, 发送端口 A 再进行测试流发送, 当测试流遇到与其 IP 字段一致的活动主机时, 该主机将回应相应的数据流, 并被传输至接收端口 B, 接收模块匹配后进行源 IP 字段提取, 反馈给主控系统进行显示。

当对未知网段进行主机扫描时, 需要对全网段进行扫描, 设置同上。最糟糕的情况需进行 2^{32} 次测试流发送, 在此以

1 000 Mbps 的线速进行发送, IPG 设为 8 字节, 帧长设为 64 字节, 则 1 s 大约可发送 1.56×10^6 帧, 因此发送 2^{32} 帧需耗时约 45 min, 可见扫描效率是非常高的。

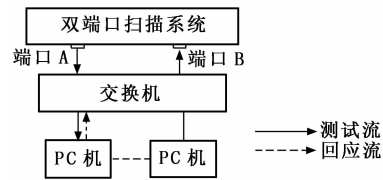


图 5 应用连接图

5 结束语

本文在分析扫描原理的基础上, 针对各种应用场景提出了一种新的扫描系统, 并详细阐述了各部分的设计思路。研究表明, 该扫描系统具有如下特点: (1) 扫描效率高, 远远高于常用扫描软件或系统的扫描效率; (2) 扫描效果好, 基于高扫描效率, 可根据情况实现重复扫描, 大大降低漏扫率; (3) 应用灵活, 可根据需求配置实现更多的扫描方法。基于该种扫描系统, 经过后续研究还可以开发出更多的扫描应用, 如漏洞扫描、密码扫描、服务扫描和系统扫描等。因此, 该扫描系统设计方法具有一定的实用性和推广价值。

参考文献:

- [1] 洪 宏, 张玉清, 胡子濮, 等. 网络安全扫描技术研究 [J]. 计算机工程, 2004, 30 (10): 54-56.
- [2] 李继容, 曾爱国. 一种改进的端口扫描器的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (7): 1664-1666, 1679.
- [3] 张登银, 许芳颂. 端口扫描与反扫描技术研究 [J]. 南京邮电学院学报. 2005, 25 (6): 54-58.
- [4] 曾光裕, 薛莹莹, 徐 冰, 李清宝. 基于 ARP 协议的网络监听技术研究 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30 (14): 3269-3271.
- [5] 罗 莎, 朱 威, 王培源, 等. 网络数据流分析方法 [J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31 (s): 146-148.
- [6] 柳利军, 熊良芳. 基于 FPGA 的千兆以太网交换芯片的设计 [J]. 微电子学与计算机, 2006, 23 (3): 80-82, 84.

(上接第 1892 页)

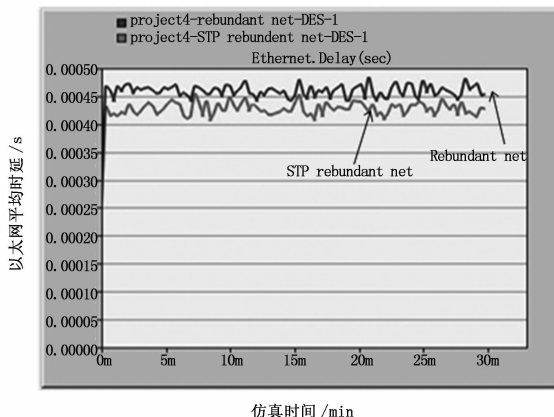


图 5 以太网时延对比图

4 结论

本文把生成树冗余和 VLAN 技术应用在基于以太网的列

车通信网络中, 有效地保证了通信网络的可靠性和稳定性, 为消除环网广播风暴提供了有效途径, 同时数据在 VLAN 中广播通讯不会占用更多的带宽, 减少了数据的冲突机率。为了该通信网络实现生成树冗余和划分 VLAN, 本文设计并制作了基于 KSZ8995MA 的交换机, 经过测试, 本交换机完全符合设计要求, 已经成功地运用于基于以太网的列车通信网络。本文对其他同类网络的设计具有极大参考价值。

参考文献:

- [1] 苗 剑, 贺德强, 丁超义. 基于工业以太网的列车通信网络及其仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (10): 2417-2420.
- [2] 姜立群, 徐皓冬, 宋 岩, 等. 基于以太网现场总线冗余技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29 (4): 712-715.
- [3] Zhang Q Z, Zhang W D. Network partition for switched industrial Ethernet using genetic algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007, (20): 79-88.
- [4] 马素刚. VLAN 技术的研究与仿真 [J]. 制造业自动化, 2011, 11 (33): 78-80.
- [5] 牛占平. VLAN 技术在智能化变电站网络中的应用探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (23): 75-78.