

# 工业企业 CIMS 的网络电视监视系统的研究与实践

## 摘 要

在通信网络向 IP 协议融合的趋势下,工业电视系统采用多媒体数字技术和局域网技术,在适应企业的信息集成化管理方面具有压倒性的优势。本文称之为“网络电视监视系统”。本文主要研究内容为:在 CIMS 的支撑子系统——网络子系统内,应用传统以太网与现场总线技术相结合而产生的工业以太网技术、网络仿真技术、系统软件设计技术等。

工业以太网技术综述,内容包括 IP 网络性能参数,工业现场对硬件性能的要求,以及实时性的问题。该部分是研究网络电视监视系统的技术基础。

网络仿真技术是一种通过建立网络设备、链路和协议模型,并模拟网络流量的传输,从而获取网络设计或优化所需要的网络性能数据的仿真技术。NS2 是主流网络仿真工具之一,本文简要介绍了 NS2 的构成,以及使用 NS2 进行网络仿真的一般过程。作者使用 NS2 对所设计的网络电视监视系统的网络建立了仿真模型,详细论述了网络拓扑结构和仿真参数的选取方法,编写了仿真脚本。仿真的结果包括不同数目的监视节点的网络时延,时延抖动,丢包率,网络吞吐量的统计。

作者根据开放式和标准化的要求,设计了一个实验监视系统。作者选择了硬件产品,论述了软件系统的分布式结构,选择了系统开发平台。实验监视系统在简单的网络环境里进行了测试。测试内容包括基本的视频流传输性能,内置的网络状态统计,此外还运行了 ICMP 测试和 Echo 测试, Echo 测试结果与网络仿真结果基本一致。

关键词: CIMS, 工业以太网, 工业电视, 实时, 网络仿真, 实验

# **The Research and Practice on Internet Protocol Television Monitoring System in CIMS of Industrial Enterprises**

## **Abstract**

In the convergent tendency that communication networks followed Internet Protocols, the industrial TV system applying the digital multimedia technology and the local area network technology, has the overwhelming superiority accommodating to an enterprise's information integration managements. This dissertation calls it "Internet Protocol Television Monitoring System". This dissertation main research contents are: In the CIMS supporting subsystem -- network subsystem, the application for the industrial Ethernet technology which combines the traditional Ethernet technology and the field bus technology, the network simulation technology, the system software programming technology.

The summary of industrial Ethernet technology includes the IP network performance parameters, the performance requirements for hardwares in the industrial locale, and the real-time issue. This part is the technologic foundation of the research on IPTV monitoring system.

The network simulation technology is a kind of simulation technologies established the models of network devices, links and protocols, simulated transmission of the network flow, and obtained the network performance data for the network designs or optimizations. NS2 is one of mainstream network simulation tools. This dissertation introduces the constitution of NS2, and the general steps of simulation. By using NS2, the author establishes the simulation model for the IPTV monitoring system, elaborates the network topology and the simulation parameters selection method, programs the simulation scripts. The simulation results include the statistics on IPTD, IPDV, IPLR and IPOT by different numbers of monitoring nodes.

According to the open and standardization requirements, the author designs an experimental monitoring system. The author chooses the hardware system, elaborates the distributed architecture of the software system, and chooses the development system. The experimental monitoring system has been tested over a simple network environment. The test contents includes the basic video stream transmission performance, the in-built network statistics, the ICMP test and the Echo test in addition. Its results agree with the network simulation substantially.

**Keywords:** CIMS, Industrial Ethernet, Industrial TV, real time, network simulation, experiment

## 插图清单

图 1.1 简化的 CIMS 网络体系结构 .....	2
图 2.1 用管理型交换机实现环网连接 .....	15
图 2.2 用管理型交换机实现主干连接 .....	15
图 3.1 抖动对控制的影响 .....	17
图 3.2 实时级别划分 .....	18
图 3.3 在冲突域利用网络交换器分段 .....	19
图 4.1 仿真的过程 .....	28
图 4.2 10 监视节点模型 .....	30
图 4.3 1 节点的时延 .....	35
图 4.4 10 节点的时延 .....	35
图 4.5 100 节点的时延 .....	36
图 4.6 1 节点的时延抖动 .....	37
图 4.7 10 节点的时延抖动 .....	37
图 4.8 100 节点的时延抖动 .....	38
图 4.9 丢包率 .....	39
图 4.10 1 节点吞吐量 .....	39
图 4.11 10 节点吞吐量 .....	40
图 4.12 100 节点吞吐量 .....	40
图 5.1 网络电视监视实验系统示意图 .....	43
图 5.2 工业用 PC 主板 .....	45
图 5.3 网络摄像机服务程序的系统托盘图标菜单 .....	47
图 5.4 IP 地址选择界面 .....	48
图 5.5 监视画面 .....	48
图 5.6 网络统计界面 .....	49
图 5.7 ICMP 测试网络时延 .....	49
图 5.8 ICMP 测试网络时延结果 .....	50
图 5.9 Echo 测试网络时延 .....	52
图 5.10 Echo 测试网络时延结果 .....	52

## 表格清单

表 1.1 不同分辨率对比 .....	4
表 2.1 IEEE 802.3 系列部分标准 .....	7
表 2.2 IP 业务的业务质量等级 .....	9
表 2.3 IP 网络性能指标 .....	9
表 2.4 性能参数指标建议采用的测试方法 .....	10
表 2.5 工业以太网设备与商用以太网设备之间的区别 .....	12
表 2.6 冗余网络的方式对比 .....	15
表 4.1 Ns-allinone 的 2.29 源代码的集成包的内容 .....	26
表 4.2 主要用户节点设备 .....	29
表 4.3 丢包数量 .....	38

## 独创性声明

本人声明所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：尹松

签字日期：2006年12月5日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权合肥工业大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：尹松

导师签名：张帆

签字日期：2006年12月5日

签字日期：2006年12月5日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：安徽农业大学工学院

电话：0551-2823795

通讯地址：安徽农业大学工学院

邮编：230036

## 致 谢

历经一年的时间，我的论文终稿即将完成。在这个时刻，我感慨良多。首先要向我的导师王晓枫老师表示感谢。论文开始的时候，我根本不知如何下笔。王老师一次次地耐心讲解，使我终于能不断地写下去。王老师的平易近人，积极的精神状态，使我如沐春风。得良师教导，我感激无以言表。

我还得到许多师长、朋友的热情帮助。在此我还要感谢王继先院长，周杰敏老师，夏萍老师等。

我还要感谢家人的支持，感谢我的父母，特别感谢我的妻子。照料我们刚出世的孩子几乎占据了她的全部时间。

最后，我还要向所有阅读我的论文的老师、同行、朋友们致谢，感谢你们花时间审阅我的论文，感谢你们对我的错误的指正。

作者 印崧  
2006年11月

# 第一章 绪论

工业电视系统是指应用于工业生产的过程监视、调度管理等方面，从摄像到图像显示独立完整的电视系统。工业企业可根据生产管理需要，设置企业(车间)生产调度监视电视系统。工业电视系统主要供人们直接监视生产过程以及传递图像或书写文字信息<sup>[1]</sup>。

工业电视系统的特点主要是以电缆方式在特定的范围内形成电视信号的传输系统。工业电视系统一般指用于有线传输电视信号的闭路电视系统。在相关国家标准中，大量的是基带闭路系统，并不排斥采用调制信号的闭路及开路系统，即工业电视系统亦可采用先进的数字调制技术<sup>[1]</sup>。

从通信技术的发展趋势可以看出，以电话语音业务为主的传统电信网、以因特网业务为主的计算机网、以视像业务为主的有线电视网等通信网络向 IP 协议融合已经成为下一步发展的主导趋势。基于多媒体数字技术和局域网技术的“新”工业电视系统与基于模拟技术的传统工业电视系统存在巨大的差异，前者商业化的产品名称通常被称为“网络视频监控系統”，按照有关名词术语规范，本文以下称其为“网络电视监视系统”(Internet Protocol Television Monitoring System)。本文将从若干角度去研究其在应用中遇到的问题，探讨可能的解决方法。

CIMS 的哲理的核心是“信息集成”，其涉及范围当然包括工业电视系统。相对于传统工业电视系统，网络电视监视系统在适应企业的信息集成化管理方面具有压倒性的优势。通常认为工业电视系统隶属于 CIMS 的制造自动化子系统，作者认为它具有有一种“边缘化”的特征。它的大部分设备包括在制造自动化子系统之中，通过局域网传输数据时与其他设备竞争通讯线路，存在协同工作的关系。在运行维护方式上，尤其是软件部分与管理信息子系统使用的方式相近。在支撑子系统方面，主要涉及到网络子系统。与之相关的主要技术有：CIMS 网络及现场总线技术、网络仿真技术、视频压缩技术等。

## 1.1 CIMS 网络系统概述

### 1.1.1 CIMS 网络系统概念及特点

CIMS 网络系统是支持 CIMS 的其他各分系统的开放型网络通信系统。CIMS 网络是适合工厂自动化和办公自动化的开放式异构型计算机网络，是 CIMS 信息集成的基础<sup>[19]</sup>。

CIMS 网络具有以下结构特点<sup>[19]</sup>：

1. 以主机、多个局域网互连，并提供远程网接口。
2. CIMS 网络各子网和 CIMS 网络的通用技术应满足各个分系统具体要求，具有异构子网的特殊情况。

3. CIMS 网络中传递的信息包括作业计划、图纸、数据和代码等。在多媒体环境下, 传递信息还包括声音和图像, 传递信息量大。在单元层与设备层之间的控制信息和数据交换还要求一定的实时性能。

4. CIMS 网络技术既包含各个异种局域网或不同分系统的集成, 也包含对集成网络的管理。

### 1.1.2 CIMS 体系结构及网络层次划分

对于离散型制造企业, 如机械制造业, CIMS 采用递阶控制的结构, 其控制功能有明显的层次性, 一般可分为 5 层, 即企业层、车间层、单元层、工作站层和设备层。本文将其中的底 3 层作为制造自动化系统, 简化为 1 个抽象层。在一个现代化工厂环境的大规模的工业生产过程控制中, 工业数据结构同样分为这三个层次, 与简化的网络层次相对应。如图所示<sup>[47]</sup>:

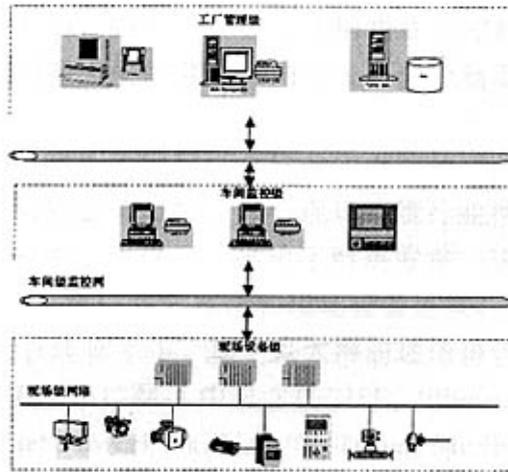


图 1.1 简化的 CIMS 网络体系结构

现场层与车间层自动化监控及信息集成系统主要完成底层设备单机控制、联机控制、通信联网、在线设备状态监测及现场设备运行、生产数据的采集、存储、统计等功能, 保证现场设备高质量完成生产任务, 并将现场设备生产及运行数据信息传送到工厂管理层, 向工厂级管理信息系统数据库提供数据。同时也可接受工厂管理层下达的生产管理及调度命令并执行。因此, 现场层与车间层监控及信息集成系统是实现工厂自动化及 CIMS 系统的基础<sup>[47]</sup>。

### 1.1.3 CIMS 网络局域网的类型

#### 1. 以太网

针对制造企业在厂房与办公室之间交换设计、制造数据的需求, 美国波音公司提出了适用于制造业工程技术和办公自动化的局域网协议标准(TOP)。该规范以开放式系统 OSI 参照模型为基础, 在 OSI 的第 1 层物理层上规定使用

ISO/IEC 8802-3 CSMA/CD 标准。办公自动化局域网采用的是商用以太网。

## 2. 令牌总线网

针对工业现场的恶劣环境、生产设备通信的高可靠性和实时响应等需求，美国通用汽车公司制定了适用于制造工厂自动化通信的局域网标准(MAP)。与 TOP 规范一致，MAP 也是以开放式系统 OSI 参照模型为基础，在 OSI 的第 1 层物理层上规定使用 ISO/IEC 8802-4 令牌总线标准，这是一种无冲突时间确定的介质存取协议。但是关于令牌总线网的我国国家标准已经废止，而且没有替代标准。

## 3. 现场总线

目前，公认的现场总线技术概念描述如下：现场总线是安装在生产过程区域的现场设备与控制室内的自动控制装置之间的一种串行、数字式、多点通信的数据总线。其中，“生产过程”包括断续生产过程和连续生产过程两类。或者，现场总线是以单个分散的、数字化、智能化的测量和控制设备作为网络节点，用总线相连接，实现相互交换信息，共同完成自动控制功能的网络系统与控制系统<sup>[47]</sup>。

现场总线具有与令牌总线网同样良好的实时性能，而成本低廉得多。为了解决现场总线与以太网的通信问题，多个现场总线行业性组织研究在各自的现场总线中采用以太网的通信协议，并推出了解决方案。这些研究不仅仅是将以太网用作高层网络，而且希望将它直接和现场设备连接，实现所谓“一网到底”。截至 2006 年，在现场总线体系中，基于以太网的通信协议有 9 种类型：现场总线应用行规国际标准 IEC 61784-1 中包含的 HSE, Ethernet/IP, PROFINet, 以及 EPA, EtherCAT, Ethernet PowerLink, Vnet/IP, TCnet, Modbus/TCP 等公共可用规范。

## 1.2 网络仿真技术概述

网络仿真技术有时也称为网络模拟技术或者网络预测技术。

网络仿真技术是一种通过建立网络设备、链路和协议模型，并模拟网络流量的传输，从而获取网络设计或优化所需要的网络性能数据的仿真技术。通常，网络仿真都是在计算机中构造虚拟的环境来反映现实的网络环境，通过数学方法或者动态蒙特卡罗方法来模拟现实中的网络行为，从而有效地提高网络规划和设计的可靠性和准确性，明显地降低网络投资风险，减少投资浪费<sup>[26]</sup>。

无论是建设新的网络，还是改造或升级现有网络，都需要对网络进行可靠的规划和设计。传统上，主要依靠经验来完成。这种方式不容易抓住问题的要害，尤其是对复杂的大型网络。网络仿真作为一种新的网络规划和设计技术，以其独有的方法为网络规划设计提供客观、可靠的定量依据，缩短网络建设周期，提高网络建设中决策的科学性，降低网络建设的投资风险。网络仿真技术

已经逐渐成为网络规划、设计和开发中的主流技术。

### 1.3 视频图像压缩技术概述

#### 1.3.1 视频图像清晰度的选择

电视系统传送图像细节的能力称为该系统的分解力。而人对图像细节清晰程度的感觉则称为清晰度。显然，扫描行数越多，分解成的图像像素数越多，原景物细节就呈现得越清楚，主观感觉的图像清晰度也就越高。所以通常就用扫描行数来表征电视系统的分解力。

垂直或水平分解力取决于系统沿图像垂直或水平方向所能分解的像素数。数字电视系统的分解力  $M$  计算公式<sup>[29]</sup>：

$$M = KZ$$

式中： $Z$ ——垂直或水平方向的样点数

$K$ ——凯尔(Kell)系数。不同的电视标准  $K$  取值不同，一般  $K$  值在 0.5~1 之间取值。逐行扫描可以取  $K=0.9$ 。

工业电视系统规范推荐采用黑白电视系统；在对监视目标有彩色要求时，可采用彩色电视系统。工业电视系统的图像质量指标，应符合下列规定<sup>[1]</sup>：

1. 图像信息传递用的黑白工业电视系统水平清晰度，不应低于 450 电视行；
2. 一般生产过程监视用的黑白工业电视系统水平清晰度，不应低于 350 电视行；
3. 环境条件恶劣情况下使用的黑白工业电视系统水平清晰度，不应低于 300 电视行；
4. 彩色工业电视水平清晰度，不应低于 250 电视行。

目前监视产品中主要使用以下分辨率：SQCIF, QCIF, CIF, 4CIF 和 DCIF。如下表：

表 1.1 不同分辨率对比

	像素结构(宽×高)	逐行扫描水平清晰度
SQCIF	128×96	115 线(电视行)
QCIF	176×144 (PAL), 176×120 (NTSC)	158 线(电视行)
CIF	352×288 (PAL), 352×240 (NTSC)	317 线(电视行)
4CIF	704×576 (TV PAL), 704×480 (TV NTSC)	634 线(电视行)
DCIF	528×384 (PAL)	475 线(电视行)

SQCIF 和 QCIF 的优点是存储量低，可以在窄带中使用；缺点是图像质量往往较差。这种分辨率通常被用于预览图像。应注意该分辨率达不到相关国家标准的要求。

CIF 是目前监视产品的主流分辨率，优点是存储量较低，能在普通宽带网络中传输，价格也相对低廉。缺点是图像质量仍然较低。

4CIF 是标清分辨率，优点是图像清晰。缺点是存储量高，网络传输带宽要求很高，价格也较高<sup>[36]</sup>。

DCIF(Double CIF)的来历是将 4CIF 经水平 3/4 缩小，垂直 2/3 缩小，转换成 528×384。像素数正好是 CIF 像素数的两倍。在当前的技术条件下，DCIF 是一个折中方案，能解决 CIF 清晰度较低和 4CIF 存储量高，价格高昂的缺点。特别是在 512Kbps—1Mbps 码率之间，能获得较高质量的图像。

### 1.3.2 视频编码的基本原理<sup>[36]</sup>

视频图像数据有极强的相关性，也就是说有大量的冗余信息。其中冗余信息可分为空域冗余信息和时域冗余信息。压缩技术就是将数据中的冗余信息去掉(去除数据之间的相关性)，压缩技术包含帧内图像数据压缩技术、帧间图像数据压缩技术和熵编码压缩技术。

#### 1. 去时域冗余信息

使用帧间编码技术可去除时域冗余信息，它包括运动补偿、运动表示、运动估计三部分。运动补偿是通过先前的局部图像来预测、补偿当前的局部图像，它是减少帧序列冗余信息的有效方法。不同区域的图像需要使用不同的运动矢量来描述运动信息。运动矢量通过熵编码进行压缩。运动估计是从视频序列中抽取运动信息的一整套技术。通用的压缩标准都使用基于块的运动估计和运动补偿。

#### 2. 去空域冗余信息

去空域冗余信息主要使用帧间编码技术和熵编码技术。帧内图像和预测差分信号都有很高的空域冗余信息。变换编码将空域信号变换到另一正交向量空间，使其相关性下降，数据冗余度减小。经过变换编码后，产生一批变换系数，对这些系数进行量化，使编码器的输出达到一定的位率。这一过程导致精度的降低。熵编码是无损编码。它对变换、量化后得到的系数和运动信息，进行进一步的压缩。

### 1.3.3 监视产品主要使用的视频编码技术<sup>[36]</sup>

目前监视产品中主要采用 MJPEG, MPEG1/2, MPEG4(SP/ASP), H.264/AVC 等几种视频编码技术。不同的压缩技术影响到的要素有：清晰度、存储量、带宽、稳定性和产品价格。

## 1.4 本文结构

本文主要工作如下：

1. 研究工业以太网的技术与应用，重点是与网络电视监视系统相关的技术。
2. 研究和分析工业以太网的实时性问题。
3. 使用 NS2 仿真工具建立网络电视监视系统的网络模型并进行仿真结果分析。
4. 设计了实验网络电视监视系统，实现对远程控制对象的实时图像监视。

本文的论文结构安排如下：

第一章 绪论，介绍 CIMS 网络及现场总线技术、网络仿真技术、视频压缩技术的发展现状。

第二章 工业以太网技术与应用，介绍以太网技术标准，网络性能参数，IP 网络性能考评和工业以太网的硬件性能指标要求。

第三章 工业以太网实时性的讨论，讨论了以太网实时性的问题，划分了实时级别，总结了解决以太网实时局限性的方法。实时性是以太网的重要问题，故该部分单独成章。

第四章 网络仿真，介绍了网络仿真的方法和一般过程，使用 NS2 仿真工具建立网络电视监视系统的网络模型并进行仿真结果分析。

第五章 实验系统，提出了实验网络电视监视系统的设计模型，应用网络编程技术进行了软件实现，并在简单的网络环境里进行了测试。

第六章 结论与展望。

## 第二章 工业以太网技术与应用

在 1990 年, IEEE 使用施乐(Xerox)等公司协作开发的传输速率达 10Mbps 的以太网作为 IEEE 802.3 规范的基础。IEEE 802.3 规范定义了以太网网络如何在 OSI 模型的物理层和数据链路层上工作<sup>[22]</sup>。后来该规范被接受为国际标准 ISO/IEC 8802-3 和我国国家标准 GB/T 15629.3。

工业以太网技术是普通以太网技术在工业控制网络延伸的产物。通常所说的工业以太网技术, 不仅包含了居于物理层与数据链路层的以太网规范, 而且包含了居于网络层及其以上层的 TCP/IP 协议组, 即包含网络层的网际协议 IP, 传输层的传输控制协议 TCP, 用户数据报协议 UDP 等。所谓的工业以太网技术是上述一系列技术的统称。

本文所研究的网络电视监视系统直接服务于工业生产, 有别于商品化的普通的民用安防系统。在工业控制领域的各个层次应用以太网, 不但要遵循通用以太网技术规范, 还要满足工业现场苛刻的要求。

### 2.1 以太网技术标准

以太网是最流行的网络体系结构。以太网通常较易于安装和使用, 并且比其他网络体系结构便宜。以太网流行的另一个原因是它支持许多不同类型的联网介质。其中每个体系结构, 例如 AppleTalk, ATM 和 FDDI 等, 共享类似的将数据封装成帧的方法, 并且使用基带信令。几乎所有的以太网版本都以 10Mbps 或者 100Mbps 的速率传输。最近的标准则支持 1Gbps 和 10Gbps 的传输<sup>[22]</sup>。

所有的以太网标准都使用 NIC 的硬件地址寻址分组。当创建这个硬件地址时, 就将它“烧”到了 NIC 上的只读存储器中, 并且它是绝对唯一的。当发送分组时, 将源和目的计算机的硬件(MAC)地址添加到分组报头中<sup>[22]</sup>。

IEEE 802.3 系列部分标准如表:

表 2.1 IEEE 802.3 系列部分标准

标准编号	内容
802.3	带碰撞检测的载波侦听多址访问 CSMA/CD
802.3i	10BaseT 在非屏蔽双绞(UTP)电缆上的以太网
802.3j	10BaseF 在光缆上的以太网
802.3u	100BaseT 在非屏蔽双绞(UTP)电缆上的快速以太网
802.3x	全双工标准
802.3z	1000BaseX 千兆以太网(光缆、铜跳线电缆)
802.3ab	1000BaseT 在非屏蔽双绞(UTP)电缆上的千兆以太网
802.3ae	10GBASE-R/W 10G 以太网(只在光缆上)

## 2.2 网络性能参数

### 2.2.1 网络性能的定义<sup>[7]</sup>

业务质量(QoS)是能够决定用户使用该种业务满意程度的业务性能的综合结果。

网络性能(NP), 从业务提供者的观点而言, 是一个网络可被定义、被测量及被控制以达到满意的业务质量的特征。

网络性能是从业务提供者角度制定的衡量网络实际运行状况的参数指标体系。网络性能反映网络元素的本质状况。网络性能可描述整个网络端到端的特性, 也可描述特定网段的特性。

### 2.2.2 IP 网络常用性能参数<sup>[11]</sup>

#### 1. IP 包传输时延(IPTD)

IP 包传输时延定义是 IP 包穿过一个基本段或网络段集合所经历的时间, 与该包传送成功与否无关。平均 IP 包传输时延是指一个数据流中所有 IP 包传送时延的算术平均值。

#### 2. IP 包时延变化(IPDV)

IP 包时延变化定义是端到端两点间 IP 包时延变化( $v_K$ )是 IP 包 K 通过源节点 SRC 和目的节点 DST 的实际时延( $x_K$ )与通过相同节点间定义的参考 IP 包传送时延( $d_{1,2}$ )的差, 即:  $v_K = x_K - d_{1,2}$ 。

替代定义 1: 在一段较短的测量时间间隔内, 最大 IPTD 与最小 IPTD 的差值。

$$IPDV = IPTD_{\max} - IPTD_{\min}$$

替代定义 2:

$$IPDV = IPTD_{\text{upper}} - IPTD_{\min}$$

其中:

$IPTD_{\text{upper}}$ ——评估间隔内 IPTD 的  $1-10^{-3}$  百分位值

$IPTD_{\min}$ ——评估间隔内 IPTD 的最小值

IP 包时延变化参数非常重要。在数据包传送应用中, 利用 IP 包时延变化范围的信息可以避免出现节点缓冲的溢出和读空; IP 包时延变化会引起 TCP 层重传定时器门限的增高, 也可能引起数据包重传的时延或造成没有必要的数据包重传。

#### 3. IP 包误差率(IPER)

IP 包误差率是错误 IP 包传送结果与成功 IP 包传送加错误 IP 包传送结果之和的比值。

#### 4. IP 包丢失率(IPLR)

IP 包丢失率是丢失的 IP 包传送结果与所有 IP 包的比值。

## 5. IP 网络吞吐量

出口节点的 IP 包吞吐量(IPPT)等于一个特定时间间隔内在该节点上观测到的所有成功 IP 包数量除以该时间间隔。

出口节点的基于字节的 IP 包吞吐量(IPOT)等于一个特定时间间隔内在该节点上观测到的成功 IP 包中所有字节数量除以该时间间隔。

### 2.2.3 IP 网络性能指标

#### 1. 业务质量等级说明<sup>[11]</sup>

一定范围的 IP 网性能参数组合构成一种业务质量等级。用户的业务质量等级与用户 IP 包的传送距离和网络的复杂度有关。根据不同业务和应用的需要，用户可以请求和得到不同等级的服务。

IP 业务的业务质量等级按应用、节点机制和网络技术可划分为 6 大类。不同的业务质量等级，对于 IP 网 NP 参数的指标要求也各有差异。

表 2.2 IP 业务的业务质量等级

QoS 等级	应用	节点机制	网络技术
0	实时，抖动敏感，高交互性	优先级队列 流量整形	约束路由/距离
1	实时，抖动敏感，一般交互性		轻度约束路由/距离
2	数据传送，高交互性， (带信令)	多队列 丢弃优先级	约束路由/距离
3	数据传送，一般交互性		轻度约束路由/距离
4	低丢失率	长队列 丢弃优先级	自由选路
5	传统应用	多队列 (最低优先级)	自由选路

#### 2. IP 网的端到端性能参数目标参考值<sup>[12]</sup>

以测量点为边界的端到端 IP 网络性能指标见下表。这是 ITU-T 所定义参考指标。从表中可得出结论，QoS 的最高等级并不能满足工业现场的苛刻要求。

表 2.3 IP 网络性能指标

网络性能指标	QoS 等级					
	0 级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级

						未指定
IPTD	100ms	400ms	100ms	400ms	1 s	-
IPDV	50ms	50ms	-	-	-	-
IPLR	$1 \times 10^{-3}$	-				
IPER	$1 \times 10^{-4}$					-

## 2.3 IP 网络性能考评

### 2.3.1 网络性能参数的选取<sup>[44]</sup>

网络性能参数的选取应考虑以下方面的因素：

1. 定义网络参数的真正出发点是通过观察和控制指标，满足用户对业务的需求，因此所选参数必须能和用户业务的业务质量相联系，反映用户业务的使用效果和感受；
2. 所选参数必须能通过一定的技术手段观测和控制，并且不能过于复杂，否则会加大维护工作的难度和工作量；
3. 所选参数应能够从整体上反映网络的实际运行效果，而不是仅反映某个特定阶段或特定网段的性能。

### 2.3.2 网络性能参数的测量与分析<sup>[44]</sup>

目前 IP 网络性能参数的测量方式有两种：主动测量和被动测量。

主动方式是插入测试包测试网络。这在一定程度上增加了网络负担，当网络发生拥塞时易加重拥塞，网络流量过低时又易造成数据采集不准确，测试结果往往受测试包长度和类型的影响。故在实际测试时，应慎重选取测试时间和 IP 包类型、长度，或者考虑多种测试包同时采用。

被动方式采用 MIB 监测的方式采集性能参数指标，这种方式可得到更为准确有效的测试结果。需要注意的是，采集时应对数据进行分析，建议只统计设备端口的 IP 数据包，这样采集的数据将更为真实。但对一些跨网业务来说，这种测试往往不能实现。

下表显示了对以上性能参数指标建议采用的测试方法。

表 2.4 性能参数指标建议采用的测试方法

	Intrusive	Non-intrusive
IPTD	×	
IPDV	×	
IPER	×	×
IPLR	×	×
IPDR		×

按照参数采集手段，参数的收集又可分为手工采集和自动采集。手工采集由网络管理员按照一定的工作流程和命令行收集网络性能的各项参数指标；自动采集则借助于专用工具（测试仪表、嵌入式程序等）对网络参数进行侦测。

## 2.4 影响 IP 网络性能的网络因素分析<sup>[45]</sup>

IP 网络基于 TCP/IP 协议进行数据包的分组交换，是面向无连接网络，其传输特性无法得到保证。每个分组包含源和目的 IP 地址，分组包既没有标记为属于某一个特定的流或者一个连接，也没有以任何方式进行编号。每个 IPv4 节点尽其最大的努力，对每个分组独立进行路由转发，并在网络中独立传递，达到同一目的地分组的路由不一定相同，到达时间也是不固定且非实时的，最后在目的节点缓冲区重新组成数据。

IP 网络主要由传输链路和设备构成，传输链路是指连接网络设备之间的物理媒介，设备主要指对不同网络之间的数据进行存储、分组和转发的路由器，交换机等。如果组成 IP 网络的这些网络资源(例如链路带宽，设备等)不足，或者在网络资源中流量分布不合理，都会影响到 IP 网络的性能指标。

传输链路带宽是某种业务应用能够正常工作的最基本要求，它是指在网上传输任何业务信息时每秒所能传输的字节数，每个业务的带宽需求取决于所涉及的各网络节点所能支持的最小带宽。首先信号在链路上传输时存在传播时延，另外因为数据传送的速度取决于链路的比特率(速率)，当链路速度低于数据发送速度时，便会产生链路速度时延。典型的例子是一个 100M 的以太网仅接了一条 2M 的出口链路。

当业务流量与可用网络资源之间的映射效率不高，流量分布不均匀时，就会导致一部分网络资源过度使用，而另一部分资源却未被充分利用，从而使过度使用的网络发生拥塞，导致 IP 网络性能的下降。

## 2.5 工业以太网的硬件

### 2.5.1 工业现场的硬件性能要求<sup>[43]</sup>

工业以太网在技术上与商用以太网兼容，遵循 ISO/IEC 8802-3 标准，但在产品设计时，在材质的选用、产品的强度和适用性方面应能满足工业现场的需要。即满足以下要求：

#### 1. 环境适应性

包括机械环境适应性(如耐振动、耐冲击)、气候环境适应性(工作温度要求为 -40~+85℃，至少为 -20~+70℃，并要耐腐蚀、防尘、防水)、电磁环境适应性或电磁兼容性 EMC 应符合标准。

#### 2. 可靠性

工业以太网产品要适应工业控制现场的恶劣环境。

### 3. 安全性

在易爆或可燃的场合，工业以太网产品还需要具有防爆要求，包括隔爆、本质安全两种方式。

### 4. 安装方便，适应工业环境的安装要求。

为了解决在不间断的工业应用领域，在极端条件下网络也能稳定地工作的问题，一些公司专门开发和生产了导轨式收发器、集线器和交换机系列产品，安装在标准 DIN 导轨上，并有冗余电源供电，接插件采用牢固的 DB-9 结构。另外一些公司还专门开发和生产了用于工业控制现场的加固型连接件，如加固的 RJ45 接头、具有加固 RJ45 接头的工业以太网交换机、加固型光纤转换器等，可以用于工业以太网变送器、执行机构等。工业以太网设备与商用以太网设备之间的区别如附表所示<sup>[38]</sup>：

表 2.5 工业以太网设备与商用以太网设备之间的区别

	工业以太网设备	商用以太网设备
元器件和设计	工业级	商用级
工作电压	24V DC	220V AC
电源冗余	双电源	一般没有
安装方式	DIN 轨道安装	桌面，机架
工作温度	-40~+85℃ / -20~+70℃	5~40℃
冷却方式	无风扇	有风扇
电磁兼容性标准	EN50081-2(EMC, 工业) EN50082-2(EMC, 工业)	EN50081-2(EMC, 办公室) EN50082-2(EMC, 办公室)
冗余环网切换时间	<500ms	30~60s
MTBF 值	至少 10 年	3~5 年
要求备品备件 供货时间	10 年	3~5 年

## 2.5.2 以太网网络常用设备<sup>[24]</sup>

网络常用的设备有中继器、集线器、网桥、路由器和交换机。

### 1. 中继器(Repeater)

中继器接收信号，以它们原来的强度和定义重新传输，这样增加了缆线的实际长度。如果不使用中继器，随着缆线长度的增加，信号减弱，最终变得不可识别。在缆线段之间安装一台中继器可以使信号传输更远。中继器不解释或过滤信号，但要注意连接到中继器的两段必须使用相同的访问方法，例如：中继器不能解释以太网数据包到令牌环数据包。中继器不能过滤来限制有问题的数据流。中继器工作在 OSI 模型的第一层。

### 2. 集线器(HUB)

集线器是以星型拓扑结构连接计算机的连接设备。集线器包括多个端口以连接网络组件。集线器的某一处中断不会影响整个网络；如果集线器损坏，将影响整个网络。集线器工作在 OSI 模型的第一层。

### 3. 网桥(Bridge)

网桥是在多个使用相同通信协议的网络段之间传输数据包的设备。如果一台计算机识别出目的地址的位置，网桥将数据包广播到该计算机。如果该计算机不能识别目的地址，则将数据包转发给连接到网桥的所有段。

网桥一次传递一个信号。如果数据包的目的地址在发送者自身的网络段内，网桥将该数据包保留在该段内。如果数据包的目的地址是另一段，则将该数据包传给那一段。网桥工作在 OSI 模型的第二层。

### 4. 路由器(Router)

路由器是另一种类型的网络连接设备，网桥是用来连接网络中的各个段，路由器则是用来连接不同的网络以及接入因特网。路由器工作在 OSI 第三层，路由器提供在不同的网络间传递数据包、路由数据流和提供端到端的路由。路由器在传递数据时可选择最短的路径，在不同网络段之间移动数据时，路由器检查数据包头来决定数据包传送的最佳路径。路由器的访问是通过路由表中的信息来决定路径。广播过量问题可以通过路由器来解决，路由器和网桥有以下区别：

首先，网桥在 OSI 第二层工作，而路由器在 OSI 第三层工作。

其次，网桥利用 MAC 地址来确定是否转送数据，路由器是利用第三层的不同寻址方法来确定是否转送数据，也就是说是通过 IP 地址或者逻辑地址，而不是 MAC 地址。

### 5. 交换机(Switch)

交换机是过滤，转发和涌出基于目的地址的网络设备，主要用来解决冲突域，普通交换机工作在 OSI 模型的第二层，故被称为第二层交换机。一个具有第三层交换功能的设备是一个带有第三层路由功能的第二层交换机。在第三层交换机中，与路由器有关的第三层路由硬件模块插接在高速背板/总线上，这种方式使得路由模块可以与需要路由的其他模块间高速的交换数据，从而突破了传统的外接路由器接口速率的限制。

## 2.5.3 分级网络设计模型<sup>[25]</sup>

分级网络设计模型把一个复杂的网络问题分解为多个小的、更易于管理的问题。分级结构中的每一级或层都负责可以解决一组不同的问题，这使得网络硬件和软件能够实现特定的任务而进行优化。分级中最低层的设备设计用于接收进入网络的通信，并将其传送给高层。

在 3 层网络设计模型中，网络设备按照 3 个层次进行分组：核心层、汇聚

层和接入层。同开放系统互连(OSI)参考模型类似, 3层设计模型是一个概念上的框架, 也就是一个抽象的网络图。

### 1. 核心层

网络的核心只有一个用途: 通过高速转发通信, 提供优化的, 可靠的传输结构。换句话说核心层应该尽可能快地交换分组。在该层中的设备不应该承担列表检查、数据加密、地址翻译或者其他影响最快速率交换分组的任务。

### 2. 汇聚层

汇聚层位于接入层和核心层之间, 它把核心层同网络的其他部分区分开来。该层的目的是通过使用访问列表和其他的过滤器限制进入核心层的通信以提供边界的定义。因而, 该层次定义了网络的策略。策略就是处理某些类型通信的一种方法, 这些通信的类型包括路由选择更新、路由汇总, VLAN 通信以及地址聚合。可以使用策略来保护网络, 并通过阻止不必要的通信来保留网络资源。

如果网络中有两种或多种路由选择协议, 比如路由选择信息协议(RIP)和内部网关路由选择协议(IGRP), 则各个路由选择域之间的信息共享, 或重分配是在汇聚层完成的。

### 3. 接入层

接入层为网络提供通信, 并且实现网络入口控制。最终用户通过接入层访问网络的。作为网络的“前门”, 接入层使用访问列表以阻止非授权的用户进入网络。通过广域网技术, 接入层也能为远程地点提供网络接入。

## 2.5.4 冗余网络结构<sup>[46]</sup>

构建冗余网络的主要方式主要有以下几种, 生成树算法、环网冗余以及主干冗余。

### 1. 生成树算法 STP 及 RSTP

STP(Spanning Tree Protocol, 生成树算法, IEEE 802.1D), 是一个链路层协议, 提供路径冗余和阻止网络循环发生。它强令备用数据路径为阻塞(blocked)状态。如果一条路径有故障, 该拓扑结构能借助激活备用路径重新配置及链路重构。网络中断恢复时间为 30-60s 之间。RSTP(快速生成树算法, IEEE 802.1w)作为 STP 的升级, 将网络中断恢复时间, 缩短到 1-2s。生成树算法网络结构灵活, 但也存在恢复速度慢的缺点。

### 2. 环网冗余

为了能满足工业控制网络实时性强的特点, 环网冗余孕育而生。这是在以太网网络中使用环网提供高速冗余的一种技术。这个技术可以使网络在中断后 300ms 之内自行恢复。并可以通过交换机的出错继电连接、状态显示灯和 SNMP 设置等方法来提醒用户出现的断网现象。这些都可以帮助诊断环网什么地方出现断开。

环网冗余也支持两个连接在一起的环网，使网络拓扑更为灵活多样。两个环通过双通道连接，这些连接可以是冗余的，避免单个线缆出错带来的问题。

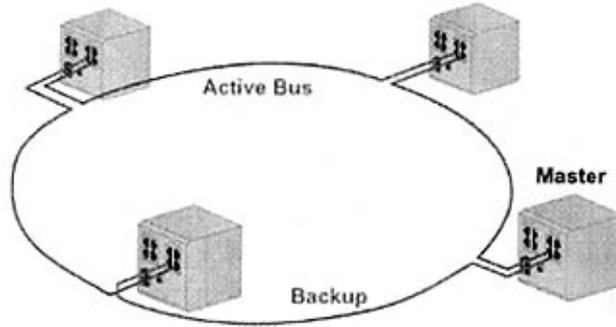


图 2.1 用管理型交换机实现环网连接

### 3. 主干冗余

将不同交换机的多个端口设置为主干端口，并建立连接，则这些交换机之间可以形成一个高速的骨干链接。不但成倍的提高了骨干链接的网络带宽，增强了网络吞吐量，而且还提供了另外一个功能，即冗余功能。如果网络中的骨干链接产生断线等问题，那么网络中的数据会通过剩下的链接进行传递，保证网络的通讯正常。主干网络采用总线型和星型网络结构，理论通讯距离可以无限延长。该技术由于采用了硬件侦测及数据平衡的方法，所以使网络中断恢复时间达到 10ms 以下。

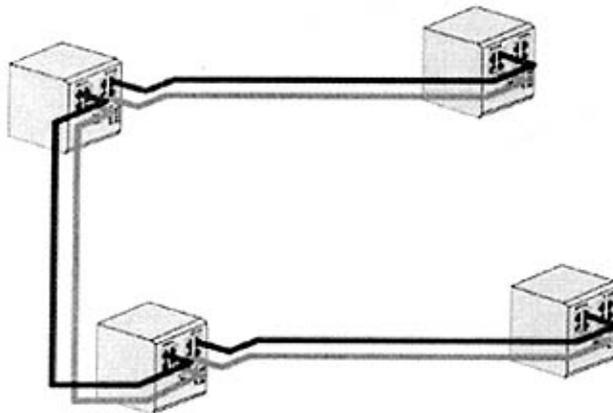


图 2.2 用管理型交换机实现主干连接

各种构建冗余网络的方式对比如下表：

表 2.6 冗余网络的方式对比

	STP	RSTP	环网冗余	主干冗余
恢复时间	30~60s	1~2s	<300ms	<10ms
配线弹性	高	高	中	低

协议	IEEE 802.1D	IEEE 802.1w	自有	自有
端口使用	中	中	低	高

## 2.6 本章小结

本章是关于工业以太网技术的综述，着重选取了与网络电视监视系统相关的方面。根据国际电信联盟建议文件，本章详细阐述了 IP 网络常用性能参数和性能指标，网络性能参数的选取、测量与分析原则，分析了影响 IP 网络性能的网络因素。这一部分是通用以太网技术，对于工业以太网同样具有指导意义。对于工业以太网技术，本章阐述了工业现场对硬件性能的要求，常用设备种类，分级网络设计模型和冗余网络结构。工业应用在各个方面对以太网都提出了严格的要求。

## 第三章 工业以太网实时性的讨论

### 3.1 网络传输实时性

#### 3.1.1 工业控制对实时性的要求<sup>[35]</sup>

##### 1. 实时性

在工业控制系统中，实时可定义为系统对某事件响应时间的可预测性。一个事件发生后，系统须在一个可准确预见的时间范围内作出反应。至于反应时间须有多快，由被控制过程决定。化工热化过程控制有秒级别的反应时间就足够，而在高动态传动控制中系统反应时间必须达到微秒级。

另外，还可把工控中的实时性分为硬实时和软实时两种不同类别(它们之间没有明显界线)。硬实时：控制中系统响应时间要求如达不到将导致致命后果(如汽车 ABS、飞机、工具机床等)。软实时：系统响应时间如达不到要求仅影响系统控制质量，而不会造成严重后果(如楼宇系统、电梯、仓库管理等)。

##### 2. 抖动

所谓抖动，是指同样过程每次完成或响应时间上的偏差，也就是时间精确度。抖动大小对一些过程控制如运动控制和一些高精度闭环控制非常关键。例如，无轴印刷机设印刷速度为 25m/s，也就是说每  $40\mu\text{s}$  印刷 1mm。轴间通信如果大于  $40\mu\text{s}$  抖动，就会有 1mm 以上的偏差，印刷质量肯定不能满足要求，如图：

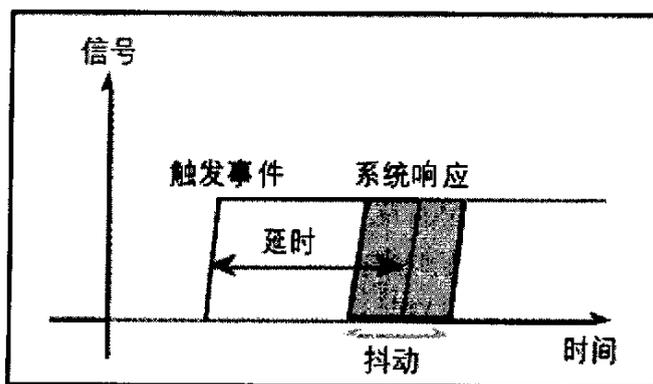


图 3.1 抖动对控制的影响

##### 3. 通信周期时间

控制系统中的程序以周期性循环的方式运行，一个周期内所有输入被刷新，完成计算任务后再被写入输出中，周期时间长短由控制对象决定。高动态传动控制周期往往要达到毫秒级。

系统联网后，网络数据交换速度应和系统运算周期时间相对应。在位置控制、电子齿轮、多轴联动的高精确度运动控制中，刷新时间越短越好。时间越

短控制精确度越高，能完成的动态性能也更高。多轴联动中，伺服系统如以  $400\mu\text{s}$  的周期进行位置控制，各轴间的信息交换当然也是以  $400\mu\text{s}$  周期为最佳，以达到轴间最精确的同步。

### 3.1.2 实时级别划分<sup>[35]</sup>

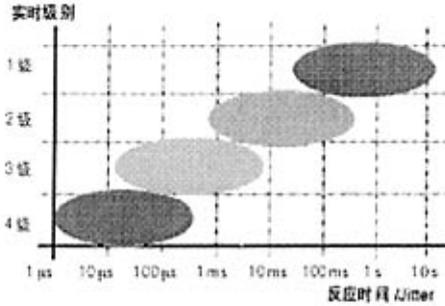


图 3.2 实时级别划分

按照不同过程对实时性要求的不同，可把实时性能划分为 4 个级别(如上图)。其中实时级别 4 是工控中对实时性能要求最苛刻的，主要是机械传动和运动控制中对实时性的要求。

针对这些实时要求对象可选用不同现场总线系统，如果工业以太网要成为全工控领域的标准，就须覆盖所有这些对实时性能和通信周期的需求，也就是须满足最苛刻的实时要求。

## 3.2 以太网实时性的讨论

### 3.2.1 标准以太网的实时局限性<sup>[35]</sup>

目前，标准以太网可达到 100Mbps 甚至 1000Mbps 的传输速度，远快于任何现场总线系统。但对于工业控制来说，比传输速率更重要的是实时性。实时性的一个重要标志是时间的确定性，通信时数据传输时间不是随机的，而是可事先准确预测的。

以太网虽有很高传输速率却不能保证实现控制设备间的实时通信。以太网具有载波侦听多路访问(CSMA/CD)的本质，其对“实时”信息传输造成延迟的随机性无法预测，因而不能满足实时系统的需要。因为两个或多个以太网节点同时访问共享的传输介质局域网时会造成数据冲突，此时所有冲突的节点会按退避算法随机延迟一定的时间，然后试图重新访问介质，以获得介质的访问权。这样就无法确切地估计冲突节点所需的随机等待时间。标准以太网 ISO/IEC 8802-3 的通信机制使数据传输时间可被任意推迟，因而有可能造成“实时”信息传输无效，也就谈不上实时性。而在工控领域中，特别是在对高动态过程的控制中，实时性却必不可少。

普通以太网产生这种通信时间不确定性的原因，是它对物理介质的访问机制 CSMA/CD。CSMA/CD 是以太网标准 ISO/IEC 8802-3 的核心，如在尽量不改变现有标准前提下想在工控领域中充分利用以太网优点，就须找到一种方法保证以太网中数据传输时间确定性，使其实现实时通信。

### 3.2.2 解决以太网实时局限性的传统方法<sup>[35]</sup>

目前，有几种解决以太网数据传输时间不确定问题的方案，其共同点是：都不改变现有以太网通信机制，协议也是直接使用 TCP/IP，有很多局限性。代表性方式有：

#### 1. 根据 IEEE 802.1Q/802.1p 定义数据包的优先级

按照 IEEE802.1Q/802.1p 的定义，设置优先级或在队列中临时储存了帧以后，就可以利用以太网头部的扩展范围进行流控制。这一过程通常由交换机处理。该方法的优点在于：高优先级的数据包定义了级别以后，以太网芯片本身就能处理这一功能——从而速度更快。不足之处在于只有新硬件才具备这一功能。该方案不再提供向下兼容性。而且，电子报文的顺序不再得到保证。而 TCP/IP 原本是具备这一特性的。

#### 2. 低冲突概率

如网络中没有太多数据，冲突概率会降低，它随数据通信的增加而呈指数级增长。当网络负载低于或等于 10% 时，可假设冲突可避免。

这种方法局限性：不能充分利用网络带宽，浪费带宽；且不能百分之百保证冲突不会发生。

#### 3. 在冲突域利用网络交换机分段

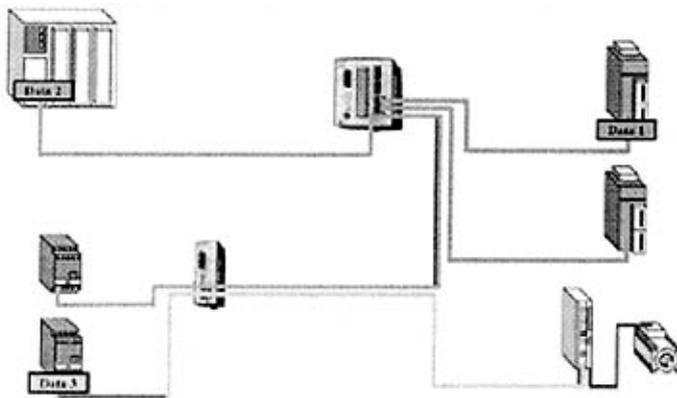


图 3.3 在冲突域利用网络交换机分段

如上图，利用网络交换机分段是一种完全不同的方案，能完全避免冲突发生。其原理是把可能发生冲突的网域用网络交换机隔开。它有些类似于一组点

对点连接。交换机是智能化的，进入的数据包在分析以后直接发送给目标站点。这一方案比单纯集线器方式的反应速度更快，抖动也更小。

这种方式局限性：数据通信被网络交换器的分配和缓冲过程所带来的延迟时间所影响，传输时间特性受制于网络交换器的配置而会有一些偏差。在高动态传动控制中，这种偏差是不允许的；且设置网络交换器需工作人员对网络技术十分了解；此外，其成本也相对高。

#### 4. 主—从方式

主从方式基于 TCP/IP 或 UDP/IP，具有避免冲突的优点，但仍有着这些协议的缺陷。另一种可能性是采用特殊协议而抛弃 TCP/IP。这种方案的优势在于由于几乎所有快速以太网的带宽都得到了利用，因此数据吞吐量得到了极大提高。但在主站之间的通信却是一个不足，即只有主—从—主的通信才是可能的。从站间的通信是不可能的。

#### 5. IEEE 1588 对时机制

该方法能较好克服以太网实时性不足。主要原理是对网络中所有站点进行对时同步。由一个同步信号周期性地对网络中所有站点的时钟进行校正同步。站点发送的每一帧数据都自带一个时间标志，告诉接收方必须执行任务的确切时间。根据时间精确度要求高低，可使用软件时钟或硬件系统时钟。如精确度要求很高，还要在网络中附加一个硬件装置来测量信号通信本身所需时间。

此方法优点：可达到很高传输时间确定性，也就是实时性；可直接使用 TCP/IP 协议。局限性是：所有站点须自带时钟，成本较高。目前还没有测量信号通信本身需时间的硬件装置来满足更高精确度要求。最大问题是，这种通信机制给系统编程带来很大影响，因控制任务须通过时间触发方式启动，提高了编程难度，且不符合工控工程人员编程习惯。

### 3.2.3 改进的实时以太网协议

实时以太网标准首先需要解决实时通信问题，同时，还需要定义应用层的服务与协议规范，以解决开放系统之间的信息互通问题。多个现场总线行业性组织与公司制订了各种标准或规范。有的标准或规范采用了上述的解决以太网实时局限性的传统方法的一种或数种，并提出完整的解决方案，并且在生产实践中应用。遗憾的是这些标准或规范之间不相兼容。

目前现场总线体系中，基于以太网的通信协议的现场总线类型处于多种标准并存的状态。国际电工委员会现行标准 IEC 61784-1 中包含 3 种类型：HSE, Ethernet/IP, PROFInet，公共可用规范中包括 EPA, EtherCAT, Ethernet PowerLink, Vnet/IP, TCnet, Modbus/TCP 等 6 个新的类型。其中 EPA 来自中国。以下对 9 种工业以太网协议作简介<sup>[43]</sup>：

#### 1. HSE(High Speed Ethernet, 高速以太网)<sup>[13]</sup>

现场总线基金会明确将 HSE 定位于实现控制网络与互联网 Internet 的集成。由 HSE 链接设备将 H1 网段信息传送到以太网的主干上并进一步送到企业的 ERP 和管理系统。操作员在主控室可以直接使用网络浏览器查看现场运行情况。现场设备同样也可以从网络获得控制信息。

HSE 在低四层直接采用以太网+TCP/IP, 在应用层和用户层直接采用 FF H1 的应用层服务和功能块应用进程规范, 并通过链接设备(Linking Device)将 FF H1 网络连接到 HSE 网段上, HSE 链接设备同时也具有网桥和网关的功能, 它的网桥功能能够用来连接多个 H1 总线网段, 使不同 H1 网段上面的 H1 设备之间能够进行对等通信而无需主机系统的干预。HSE 主机可以与所有的链接设备和链接设备上挂接的 H1 设备进行通信, 使操作数据能传送到远程的现场设备, 并接收来自现场设备的数据信息, 实现监控和报表功能。监视和控制参数可直接映射到标准功能块或者柔性功能块中。

## 2. PROFInet<sup>[14][15]</sup>

PROFInet 由西门子公司开发并由 Profibus International 支持, 目前它有 3 个版本。第一版定义了基于 TCP/UDP/IP 的自动化组件。采用标准 TCP/IP+以太网作为连接介质, 采用标准 TCP/IP 协议加上应用层的 RPC/DCOM 来完成节点之间的通信和网络寻址。它可以同时挂接传统 Profibus 系统和新型的智能现场设备。现有的 Profibus 网段可以通过一个代理设备(proxy)连接到 PROFInet 网络当中, 使整套 Profibus 设备和协议能够原封不动地在 PROFInet 中使用。传统的 Profibus 设备可通过代理与 PROFInet 上面的 COM 对象进行通信, 并通过 OLE 自动化接口实现 COM 对象之间的调用。它将以太网应用于非时间关键的通信, 用于高层设备和 Profibus-DP 现场设备技术之间, 以便将实时控制域通过代理集成到一个高层的水平上。

第二版中, PROFInet 在以太网上开辟了两个通道: 标准的使用 TCP/IP 协议的非实时通信通道, 另一个是实时通道, 旁路第三层和第四层, 提供精确通信能力。该协议减少了数据长度, 以减小通信栈的吞吐量。为优化通信功能, PROFInet 根据 IEEE 802.p 定义了报文的优先级。最多可用 7 级。

PROFInet 第三版采用了硬件方案以缩小基于软件的通道, 以进一步缩短通信栈软件的处理时间。为连接到集成的以太网交换机, PROFInet 第三版还开始解决基于 IEEE 1588 同步数据传输的运动控制解决方案。

## 3. Ethernet/IP<sup>[16][17]</sup>

Ethernet/IP(Ethernet/Industrial Protocol, 以太网/工业协议)由 Rockwell 公司定义, 并由 ODVA 和 ControlNet International 支持。EtherNet/IP 网络采用商业以太网通信芯片、物理介质和星形拓扑结构, 采用以太网交换机实现各设备间的点对点连接, 能同时支持 10Mbps 和 100Mbps 以太网商业产品, Ethernet/IP 协议由 ISO/IEC 8802-3 物理层和数据链路层标准、TCP/IP 协议组和控制与信息

协议(CIP)等三个部分组成,前面两部分为标准以太网技术,其特色就是被称作控制和信息协议的 CIP 部分。Ethernet/IP 为了提高设备间的互操作性,采用了 ControlNet 和 DeviceNet 控制网络中相同的 CIP,CIP 一方面提供实时 I/O 通信,一方面实现信息的对等传输,其控制部分用来实现实时 I/O 通信,信息部分则用来实现非实时的信息交换。

#### 4. EPA<sup>[18]</sup>

EPA 是在中国国家科技部 863 计划的支持下,由浙江中控技术股份有限公司联合众多高等院校、研究所起草。

EPA 系统中,将控制网络划分为若干个控制区域,每个控制区域即为一个微网段。每个微网段通过 EPA 网桥与其他网段进行分隔,该微网段内 EPA 设备间的通信被限制在本控制区域内进行,而不会占用其他网段的带宽资源。

处于不同微网段内的 EPA 设备间的通信,需由相应的 EPA 网桥进行转发控制。EPA 网桥至少有 2 个 EPA 接口,当它需要转发报文时,首先检查报文中的源 IP 地址与目的 IP 地址、EPA 服务标识等信息,以确认是否需要转发,并确定报文转发路径。因此,任何广播报文的转发也将受到控制,而不会发生采用一般交换机所出现的广播风暴。

而连接在每个微网段的 EPA 设备,通过其内置的通信栈软件,分时向网络上发送报文,以避免两个设备在同一时刻向网络上同时发送数据,避免报文碰撞,用户可以预知其发出的信息在可预知的时间内到达目的站点。

EPA 系统中,支持 IEEE 1588 的时间同步,还支持标准以太网帧与 EPA 实时以太网帧的并行传输。

#### 5. EtherCAT

EtherCAT 是由德国倍福公司开发,并由 EtherCAT 技术组支持。它采用以太网帧,并以特定的环状拓扑发送数据。网络上的每一个站均从以太网帧上取走与该站有关的数据,或并插入该站本身特定的输入/输出数据。网络内的最后一个模块向第一个模块发送一个帧以形成和创建一个物理和逻辑环。EtherCAT 还通过内部优先级系统,使实时以太网帧比其他的数据(如组态或诊断数据等)具有较高的优先级。组态数据只在传输实时数据的间隙中传输,或者通过特定的通道传输。EtherCAT 还保留标准以太网功能,并与传统 IP 协议兼容。为了实现这样的装置,需要专用 ASIC 芯片,以集成至少两个以太网端口,并采用基于 IEEE 1588 的时间同步机制,以支持运动控制中的实时应用。

#### 6. Ethernet PowerLink

Ethernet PowerLink 由贝加莱 B&R 公司开发,并由 Ethernet PowerLink 标准化组支持。

PowerLink 协议对第三、四层的 TCP(UDP)/IP 栈进行了扩展。它在共享式以太网网段上采用槽时间通信网络管理(SCNM)中间件控制网络上的数据流量。

SCNM 采用主从调度方式，每个站只有在收到主站请求的情况下，才能发送实时数据。因此，在一个特定的时间，只有一个站能够访问总线，所以没有冲突，从而确保了通信的实时性。为此，PowerLink 需采用基于 IEEE 1588 的时间同步。在其扩展的第二版中，包括了基于 CANopen 的通信与设备行规。

#### 7. VNET/IP

VNET/IP 由日本横河公司开发，该协议的实时扩展是实时可靠数据报协议 (RTP)，在传输层采用 UDP 协议，但在 IP 栈协议层进行了优化以实现冗余网络联结。

#### 8. TCnet

TCnet 是由日本东芝公司开发的，它在 MAC 进行了实时扩展，并基于标准以太网开辟了两个冗余通道连接。

#### 9. Modbus/TCP

Modbus/TCP 由施耐德电气定义，并由 Modbus-IDA 组织支持，它在 TCP/IP 网络上应用 Modbus 协议。其实时扩展采用了在 UDP 上的实时发布者预订 (RTPS)。

Modbus 串行链路、Modbus PLUS 和 Modbus/TCP 使用的是一种统一的应用协议，因而使得信息从一个网络传输到另一个网络而不需改变通讯协议成为了可能。Modbus/TCP 基于以太网和标准 TCP/IP 协议，直接应用第四层。它定义了一个结构简单的、开放和广泛应用的传输协议，用于主从式通信。

### 3.3 本章小结

工业以太网的实时性是一个重要的问题。本章阐述了工业控制对实时性的要求，进行了实时级别的划分。本章讨论了标准以太网的实时局限性，以及解决实时局限性的传统方法。本章特别对比了国际电工委员会现行标准及公用规范中基于实时以太网协议的现场总线，这些方案为解决实时性问题而对以太网所作的改进各有特色，但是相互之间并不兼容。

从本章得出的一个重要结论是网络电视监视系统的实时级别是 2~2+级。该级别高于普通视频点播(VOD)的要求，而低于各种加工设备的要求。

## 第四章 网络仿真

### 4.1 网络仿真的原理与应用

#### 4.1.1 网络仿真的技术原理<sup>[26]</sup>

网络仿真是一种利用数学建模和统计分析的方法模拟网络行为，从而获取特定的网络特性参数的技术。数学建模包括网络建模(网络设备、通信链路等)和流量建模两个部分。模拟网络行为是指模拟网络流量在实际网络中传输和交换的过程。网络模拟获取的网络特性参数包括网络全局性能统计量、网络节点的性能统计量、网络链路的流量和延迟等，由此既可以获取某些业务层的统计数据，也可以得到协议内部的某些特殊的参数的统计结果。

网络仿真采用基于包的建模机制来模拟实际物理网络中包的流动，包括在网络设备间的流动和网络设备内部的处理过程；模拟实际网络协议中的组包和拆包的过程，可以生成、编辑任何标准的或定义的包格式，利用调试功能，还可以在模拟过程中察看任何特定包的包头(Header)和净荷(Payload)等内容。

#### 4.1.2 网络仿真的应用<sup>[26]</sup>

1. 网络仿真能够为网络的规划、设计提供可靠的定量依据。

网络仿真技术能够迅速地建立起现有网络的模型，并能够方便地修改模型并进行仿真，这使得网络仿真非常适用于预测网络的性能，回答“what...if...”这样的问题。例如：“如果网络扩容，骨干中继链路带宽需要扩大多少”“如果网络上增设新的业务，对网络性能有什么影响，网络上的哪些链路或网络设备需要升级和改造”“如果网络拟采用新的技术升级，网络的性能会有多大幅度的改善；这种改善与投入相比是否值得；同时新技术的引进是否会带来负面影响”。

2. 网络仿真能够验证实际方案或比较多个不同的设计方案。

在网络规划设计过程中经常出现多个不同的设计方案，它们往往各有优缺点，很难作出正确的选择，因此如何进行科学的比较和取舍往往是网络设计者们感到头疼的事。网络仿真能够通过为不同的设计方案建立模型，进行模拟，获取定量的网络性能预测数据，为方案的验证和比较提供可靠的依据，这里所指的设计方案可以是网络拓扑结构、路由设计、业务配置以及流量规划等。

3. 网络仿真具有预测功能。

通过从网络管理软件获取网络拓扑结构，从现有的流量监控软件获取流量信息(若没有这类软件可人工生成流量数据)，可以得到现有网络的基本结构。在基本结构的基础上可根据网络结构的变化、网络流量的变化生成报告和图表，说明这些变化是如何影响网络性能的。网络仿真工具可以提供如下功能：根据预测的结果帮助用户及时升级网络，避免因关键设备超过利用阈值导致系统性能下降；判断哪个网络设备需要升级，这样可减少网络延迟、避免网络瓶颈；

根据预测的结果避免盲目的网络升级。

## 4.2 网络仿真工具

### 4.2.1 NS2(Network Simulator, version 2)简介<sup>[50]</sup>

NS 是一个网络仿真工具，是基于自由软件基金会(GNU)的通用公共授权(GPL)的开放源代码软件，其第 2 版由美国加州大学伯克利分校(UC Berkeley)的 MASH 研究组发布。NS 提供对多种的网络上的众多协议的强大的仿真支持，其支持的网络包括有线网络和无线网络，支持的协议如 TCP，路由，多播等协议。NS 是面向对象的网络仿真工具，它本身有一个虚拟时钟，所有的仿真都由离散事件驱动的。目前 NS2 可以用于仿真各种不同的 IP 网，已经实现的一些仿真有：

网络传输协议，比如 TCP 和 UDP。

业务源流量产生器，比如 FTP, Telnet, Web CBR 和 VBR。

路由队列管理机制，比如 Drop-tail, RED 和 CBQ。

路由算法，比如 Dijkstra 等。

NS2 也为进行局域网的仿真而实现了多播以及一些 MAC 子层协议。

NS2 使用 C++和 OTcl 作为开发语言。NS 可以说是 OTcl 的脚本解释器，它包含仿真事件调度器、网络组件对象库以及网络构建模型库等。事件调度器计算仿真时间，并且激活事件队列中的当前事件，执行一些相关的事件，网络组件通过传递分组来相互通信，但这并不耗费仿真时间。所有需要花费仿真时间来处理分组的网络组件都必须使用事件调度器。它先为这个分组发出一个事件，然后等待这个事件被调度回来之后，才能做下一步的处理工作。事件调度器的另一个用处就是计时。NS 是用 OTcl 和 C++编写的。由于效率的原因，NS 将数据通道和控制通道的实现相分离。为了减少分组和事件的处理时间，事件调度器和数据通道上的基本网络组件对象都使用 C++写出并编译的，这些对象通过映射对 OTcl 解释器可见。

当仿真完成以后，NS 将会产生一个或多个基于文本的跟踪文件。只要在 Tcl 脚本中加入一些简单的语句，这些文件中就会包含详细的跟踪信息。这些数据可以用于下一步的分析处理，也可以使用 Nam 将整个仿真过程展示出来。

### 4.2.2 NS2 的软件构成<sup>[50]</sup>

NS2 包含 Tcl/Tk, OTcl, NS, Tclcl。其中

Tcl 是一个开放脚本语言，用来对 NS2 进行编程；

Tk 是 Tcl 的图形界面开发工具，可帮助用户在图形环境下开发图形界面；

OTcl 是基于 Tcl/Tk 的面向对象扩展，有自己的类层次结构；

NS2 为本软件包的核心，是面向对象的仿真器，用 C++编写，以 OTcl 解释

器作为前端；Tclcl 则提供 NS 和 OTcl 的接口，使对象和变量出现在两种语言中。

为了直观的观察和分析仿真结果,NS2 提供了可选的图形绘制工具 Xgraph, 可选的动画演示工具 Nam。

NS2 是采用 GNU 公共授权的开放源代码软件。源代码从其官方网站下载之后，经过编译和连接生成执行代码后使用。

Ns-allinone 的 2.29 版源代码的集成包里包含内容如下：

表 4.1 Ns-allinone 的 2.29 版源代码的集成包的内容

组件	版本	备注
Tcl	Tcl release 8.4.11	需要的组件
Tk	Tk release 8.4.11	需要的组件
Otcl	otcl release 1.11	需要的组件
TclCL	tclcl release 1.17	需要的组件
Ns	ns release 2.29	需要的组件
TclDebug	tcl-debug relase 1.9	可选择的组件
Nam	Nam release 1.11	可选择的组件
Xgraph	xgraph version 12	可选择的组件
GT-ITM	Georgia Tech Internetwork Topology Modeler	可选择的组件
SGB	Stanford GraphBase package	可选择的组件
CWEB	Cweb	可选择的组件
ZLib	zlib version 1.2.3	可选择的组件

上述组件中最重要的是 Ns，整个仿真软件中对网络协议、算法的实现源代码在其目录下。

#### 4.2.3 NS2 的功能模块<sup>[50]</sup>

NS2 仿真器封装了许多功能模块，最基本的是节点、链路、代理、数据包格式等。

1. 事件调度器：目前 NS2 提供了四种具有不同数据结构的调度器，分别是链表、堆、日历表和实时调度器。

2. 节点(node)：是由 TclObject 对象组成的复合组件，在 NS2 中可以表示端节点和路由器。

3. 链路(link)：由多个组件复合而成，用来连接网络节点。所有的链路都是以队列的形式来管理分组的到达、离开和丢弃。

4. 代理(agent)：负责网络层分组的产生和接收，也可以用在各个层次的协议实现中。每个代理连接到一个网络节点上，由该节点给它分配一个端口号。

5. 包(packet): 由头部和数据两部分组成。一般情况下, 包对象结构只有头部、没有数据部分。

#### 4.2.4 NS 的仿真元素<sup>[50]</sup>

从网络拓扑仿真、协议仿真和通信量仿真等方面介绍 NS 的相应元素:

1. 网络拓扑主要包括节点、链路。NS 的节点由一系列的分类器(Classifier, 如地址分类器等)组成, 而链路由一系列的连接器(Connector)组成。

2. 在节点上, 配置不同的代理可以实现相应的协议或其它模型仿真。NS 的 TCP 代理实现了基本的拥塞算法和差错控制机制, 类型众多, 如发送代理有: TCP(任何损耗下 cwnd=1), TCP/Reno(快速修复)等, 接收代理有 TCPSink 等。此外, 还提供有 UDP 代理及接收代理 Null(负责通信量接收), Loss Monitor(通信量接收并维护一些接收数据的统计)。

3. 网络的路由配置通过对节点附加路由协议而实现。NS 中有三种单播路由策略: 静态、会话、动态。

4. 在链路上, 可以配置带宽、时延和丢弃模型。NS 支持: 丢弃队尾 Drop-tail(先进先出 FIFO)队列、RED 缓冲区管理、CBQ(包括优先权和轮换调度)。各种公平队列包括: 公平排队, 随即公平排队, 赤字轮换等。

5. 通信量仿真方面, NS 提供了许多通信应用, 如:

FTP, 它产生较大的峰值数据传输;

Telnet 则根据相应文件随机选取传输数据的大小。

此外, NS 提供了四种类型的通信量产生器:

EXPOO, 根据指数分布(On/Off)产生通信量, 在 On 阶段分组以固定速率发送, Off 阶段不发送分组, On/Off 的分布符合指数分布, 分组尺寸固定。

POO, 根据 Pareto 分布(On/Off)产生通信量, 它能用来产生长范围相关的急剧通信量。

CBR, 以确定的速率产生通信量, 分组尺寸固定, 可在分组间隔之间产生随机抖动。

Traffic Trace, 根据追踪文件产生通信量。

#### 4.2.5 使用 NS 进行网络仿真的方法和一般过程<sup>[27]</sup>

进行网络仿真前, 首先分析仿真涉及哪个层次, NS 仿真分两个层次: 一个是基于 OTcl 编程的层次。利用 NS 已有的网络元素实现仿真, 无需修改 NS 本身, 只需编写 OTcl 脚本。另一个是基于 C++和 OTcl 编程的层次。如果 NS 中没有所需的网络元素, 则需要对 NS 进行扩展, 添加所需网络元素, 即添加新的 C++和 OTcl 类, 编写新的 OTcl 脚本。整个仿真的过程简图如图所示:

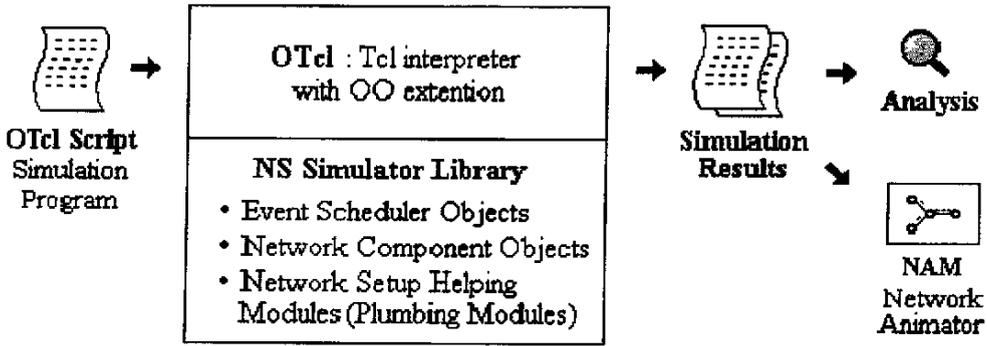


图 4.1 仿真的过程

假设用户已经完成了对 NS 的扩展,或者 NS 所包含的构件已经满足了要求,那么进行一次仿真的步骤大致如下:

1. 开始编写 OTcl 脚本。首先配置模拟网络拓扑结构,此时可以确定链路的基本特性,如延迟、带宽和丢失策略等。
2. 建立协议代理,包括端设备的协议绑定和通信业务量模型的建立。
3. 配置业务量模型的参数,从而确定网络上的业务量分布。
4. 设置 Trace 对象。NS 通过 Trace 文件来保存整个模拟过程。仿真完后,用户可以对 Trace 文件进行分析研究。
5. 编写其他的辅助过程,设定模拟结束时间,至此 OTcl 脚本编写完成。
6. 用 NS 解释执行刚才编写的 OTcl 脚本。
7. 对 Trace 文件进行分析,得出有用的数据。
8. 调整配置拓扑结构和业务量模型,重新进行上述模拟过程。

NS2 采用两级体系结构,为了提高代码的执行效率,NS2 将数据操作与控制部分的实现相分离,事件调度器和大部分基本的网络组件对象后台使用 C++ 实现和编译,称为编译层,主要功能是实现对数据包的处理;NS2 的前端是一个 OTcl 解释器,称为解释层,主要功能是对模拟环境的配置、建立。从用户角度看,NS2 是一个具有仿真事件驱动、网络构件对象库和网络配置模块库的 OTcl 脚本解释器。NS2 中编译类对象通过 OTcl 连接建立了与之对应的解释类对象,这样用户间能够方便地对 C++ 对象的函数进行修改与配置,充分体现了仿真器的一致性和灵活性。

### 4.3 使用 NS2 对 CIMS 网络进行仿真

#### 4.3.1 典型的企业网络系统结构

**核心层:**网络交换核心共配置两台全模块化骨干级千兆以太网路由交换机,客户端设备与应用服务器通过中心的第二、三层网络实现数据交换。

**接入层:**在接入层配置千兆以太网交换机,提供客户端设备第二层交换

10M/100Mbps 以太网端口。

链路交换带宽：核心交换机到接入交换机的数据链路为双工 2Gbps，实现千兆园区网络主干。配置两台核心交换机，交换链路采用全冗余结构。

外联网：采用普通以太网交换机连接由电信运营商提供的专线，如 ADSL 或 FTTx+LAN，通过 VPN 连接到企业园区内部网。

制造自动化子网：采用现场总线(包括工业以太网)与以太网异构结构，配置工业级网络设备。

#### 4.3.2 拓扑结构

某企业拥有数台加工中心、10 数条 PLC 生产线(结构件涂装生产线、壳体生产线等)、数台焊接机器人和数台基于 PC 的控制器等生产设备。该类设备的实时级别要求在 3~4 级，单独划分入一至数个网段。

网络电视监视设备是另一类重要的设备，占据大量网络资源，并网工作时，具有显著的影响作用。该类设备的实时级别要求在 2~2+级，单独划分入一个网段。

各类办公室，诸如销售、财务、设计和行政部门等，各自划分入一个网段。

以下给出企业内部网络的示例。该例使用 A 类私有 IP 地址 10.0.0.0/8，并且划分若干子网，各地址范围用途分配如下：

10.0.0.0/16 为骨干设备专用；

10.128.0.0/16~10.159.0.0/16 为办公室使用；

10.192.0.0/16 为网络电视监视前端设备使用；

10.224.0.0/16~10.255.0.0/16 为生产设备使用。

下表列出部分主要用户节点设备：

表 4.2 主要用户节点设备

设备类别	IP 地址	数量	Ns 节点号	备注
网络摄像机	10.192.0.10~10.192.0.19	10	45~54	
PLC 生产线等	10.224.0.10~10.224.0.49	40		本模型未编入
服务器	10.0.0.10~10.0.0.19	10	25~34	
办公室	10.128.0.10~10.128.0.29	20		本模型未编入
总计		80		可增加设备

原本 10.0.0.0/8 的子网掩码是 255.0.0.0。划分子网之后，各子网的掩码设为 255.255.0.0，子网之间的通信不再直接相连，在逻辑上的拓扑结构如图所示：

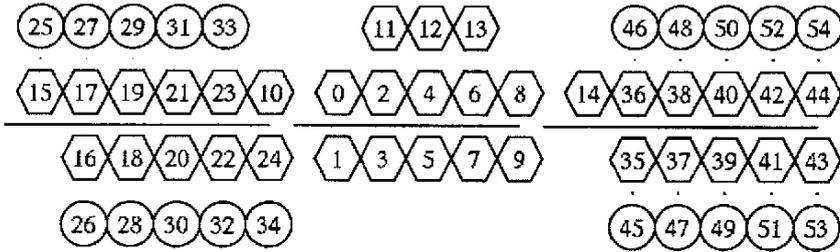


图 4.2 10 监视节点模型

Ns 中的一个节点代表源、主机或路由器。上图中标记为圆形的节点设备名称见表 4.2。标记为六边形的节点是作用说明如下：

节点 0~9 是核心层路由交换节点。

节点 10~14 是连接各子网进入核心层的节点，拟安排：节点 10 连接服务器子网，节点 11 连接无线基站子网，节点 12 连接办公室子网，节点 13 连接车间子网，节点 14 连接网络摄像机子网，等等。

节点 15~24 是服务器子网交换节点。

节点 35~44 是网络摄像机子网交换节点。

主干网带宽 1000MB，延迟 40 $\mu$ s，各子网均为带宽 100MB，延迟 120 $\mu$ s，普通接入链路带宽 100MB，线缆延迟 5 $\mu$ s，网络摄像机到交换机延迟 450 $\mu$ s，服务器到交换机延迟 100 $\mu$ s。

相关部分 Tcl 脚本如下：

```
.set bandwidth_trunk 1000Mb
set bandwidth_subnet(servers) 1000Mb
set bandwidth_subnet(cameras) 100Mb
set bandwidth_subnet(machinetools) 100Mb
set bandwidth_subnet(office) 100Mb
set bandwidth_router 100Mb
set delay_trunk 40us
set delay_subnet(servers) 40us
set delay_subnet(cameras) 120us
set delay_subnet(machinetools) 120us
set delay_subnet(office) 120us
set delay_misc(server) 100us
set delay_misc(camera) 450us
set delay_misc(machinetool) 400us
```

```

set delay_cable(to_servers) 0us
set delay_cable(to_cameras) 5us
set delay_cable(to_machinetools) 5us
set delay_cable(to_office) 5us
set delay_cable(general) 5us
#设定网络摄像机数量
global argv arg0
set num_camera $argv
#Create Nodes
set num 10
for {set i 1} {$i <= $num} {incr i} {
    set Trunk_Node($i) [$ns node]
    $Trunk_Node($i) shape hexagon
    lappend nodelist0 $Trunk_Node($i)
}
set num 5
for {set i 1} {$i <= $num} {incr i} {
    set router($i) [$ns node]
    $router($i) shape hexagon
}
set num 10
for {set i 0} {$i < $num} {incr i} {
    set subnet1($i) [$ns node]
    $subnet1($i) shape hexagon
    lappend nodelist1 $subnet1($i)
}
lappend nodelist1 $router(1)
for {set i 0} {$i < $num} {incr i} {
    set backserver($i) [$ns node]
}
lappend nodelist5 $router(5)
for {set i 0} {$i < $num_camera} {incr i} {
    set subnet5($i) [$ns node]
    $subnet5($i) shape hexagon
    lappend nodelist5 $subnet5($i)
}

```

```

for {set i 0} {$i < $num_camera} {incr i} {
    set netcamera($i) [$ns node]
}
#Create Lans
set LAN0 [$ns newLan $nodelist0 $bandwidth_trunk $delay_trunk
-llType LL -ifqType Queue/DropTail -macType Mac/802_3 -chanType
Channel ]
puts "LAN0: [$LAN0 id]"
set LAN1 [$ns newLan $nodelist1 $bandwidth_subnet(servers)
$delay_subnet(servers) -llType LL -ifqType Queue/DropTail -macType
Mac/802_3 -chanType Channel ]
puts "LAN1: [$LAN1 id]"
set LAN5 [$ns newLan $nodelist5 $bandwidth_subnet(cameras)
$delay_subnet(cameras) -llType LL -ifqType Queue/DropTail -macType
Mac/802_3 -chanType Channel ]
puts "LAN5: [$LAN5 id]"

```

### 4.3.3 关键业务流量配置

企业内部网络存在多种业务，流量大小状态差异很大。作者进行配置业务流量时，首先重点选择对整个网络性能起着决定作用的关键业务，再增添其他流量种类，使仿真模型尽量接近实际网络。

CIMS 网络必须为企业管理、设计、制造等活动提供各类应用服务，应用程序接口以及底层的通信服务，这些服务常见的有以下几类<sup>[19]</sup>：

1. 文件传送服务。网络用户通过文件传送命令在网上传送 ASCII、二进制等文件。

2. 虚拟终端服务。网络用户可以用虚拟终端服务命令登录到主机，并作为该主机的虚拟终端使用。

3. 制造报文规范(MMS)。它是 CIMS 环境下对设备实施自动控制的信息服务。MMS 标准把制造设备抽象为虚拟的制造设备(VMD)，并用其来统一各种设备的操作。MMS 为用户提供 80 多种服务，用以定义制造系统中所需的报文，用户不必关心报文编码的过程。

4. 进程通信。在 CIMS 环境下，报文通信的频度很大。所谓报文(Message)是信息传递的逻辑单位。把报文从一台设备通过通信系统传送到另一台设备即称报文通信。例如从工厂层计算机将作业单、NC 代码、工艺文件传送到车间层计算机或设备级控制器；或者把设备状态报文从 CNC, PLC 反馈给上层计算机，通过报文交换达到自动控制的目的。由于报文通信是加工过程中发生在计

计算机系统之间和设备之间，因此是一种进程通信，一般 CIMS 是异种机环境，因而要求网络提供异种机进程间的通信服务。

5. 远程过程调用。远程过程调用基于远程分布计算。在客户机/服务器体系中，客户方像调用本地过程一样，可以方便地调用网上远程服务机，在服务器方执行，并把结果通过网络返回给客户方。

6. 电子邮件 E-mail。CIMS 还可以把电子邮件作为传送 ASCII 文本的通信工具。

综上所述，在制造自动化子网中，应用程序有：

文件传送(FTP)：包括作业单，NC 代码文件，工艺文件等。文件传送造成短时峰值流量。

其他制造报文：如设备运行状态报文等。这一类通信流量较小、持续、时间上分布不规则。作者认为大多数亦可用 On-Off model with exponential 类型流量。

在办公室子网中，应用程序丰富，日常办公应用的类型可以归类为 Web 客户端。

在该仿真模型中，关键业务之一是 IPTV 的视频流，特性比较接近多媒体流。NS2 并没有提供一个比较适合的应用程序类型。有些学者使用 On-Off model with exponential distribution 来仿真多媒体流的传输，有些学者则认为这样的模型还是有点粗糙，而使用多媒体传输软件制造的实际网络的流量。作者认为这两种方法各有利弊，倾向于使用前者。

参数计算：

所需网络带宽=视频路数×视频位流。视频位流和画面质量成正比，即画面质量越好，视频位流越大。

未经压缩的视频位流大小计算公式：

$$Band = Width \times Height \times BitsPerPixel \times FramesPerSec$$

式中：*Width, Height* – 视频图像解析度（宽度，高度）

*BitsPerPixel* – 每像素位数，RGB格式 = 24

*FramesPerSec* – 每秒帧数

以达到国标清晰度要求的 DCIF(528×384)25 帧/秒的视频为例，未经压缩的视频位流大小：

$$Band = 528 \times 384 \times 24 \times 25 = 121651200 = 116 \text{Mbps} (14.5 \text{MB/s})$$

如果使用 H.264 编码方式，可将传输位流降低到 6 Mbps 以下。实验系统使用性能较低的 MJPEG 编码方式，在 CIF 分辨率下，传输位流接近该数值。故 EXPOO 的带宽参数取 6 Mbps，On 阶段 8.333ms，Off 阶段 8.333ms。

相关部分 Tcl 脚本如下：

```
#Set up Transportation Level Connections
```

```

for {set i 0} {$i < $num_camera} {incr i} {
    set netcamera_udp($i) [new Agent/UDP]
    netcamera_udp($i) set dst_addr_ Unicast
    netcamera_udp($i) set packetSize_ 1500
    $ns attach-agent $netcamera($i) $netcamera_udp($i)
}
set num 10
for {set i 0} {$i < $num} {incr i} {
    set backserver_null($i) [new Agent/Null]
    $ns attach-agent $backserver($i) $backserver_null($i)
}
#Setup traffic sources
set num 10
for {set i 0} {$i < $num_camera} {incr i} {
set netcamera_video($i) [new Application/Traffic/Exponential]
    netcamera_video($i) attach-agent $netcamera_udp($i)
    netcamera_video($i) set idle_time_ 8.333ms
    netcamera_video($i) set burst_time_ 8.333ms
    netcamera_video($i) set rate_ 6Mb
    netcamera_video($i) set packetSize_ 7500
}
for {set i 0} {$i < $num_camera} {incr i} {
    $ns connect $netcamera_udp($i) $backserver_null(9)
}

```

#### 4.3.4 仿真结果分析

##### 1. 时延(IPTD)

排除所谓的“早到的”数据包，最小时延值是 1.376ms，而最大延迟时间因节点数目而异。当只有一个节点发送数据时，最大延迟时间 1.865ms；10 个节点同时发送数据时，最大延迟时间 21.97ms；100 个节点同时发送数据时，最大延迟时间达 0.75s，此时网络已经失去传送数据的能力。各个数据包的延迟时间是由传输时的冲突，交换机队列，存储转发造成的。在数据包互相的抢夺网络的资源的时刻，端到端延迟时间变得不固定。

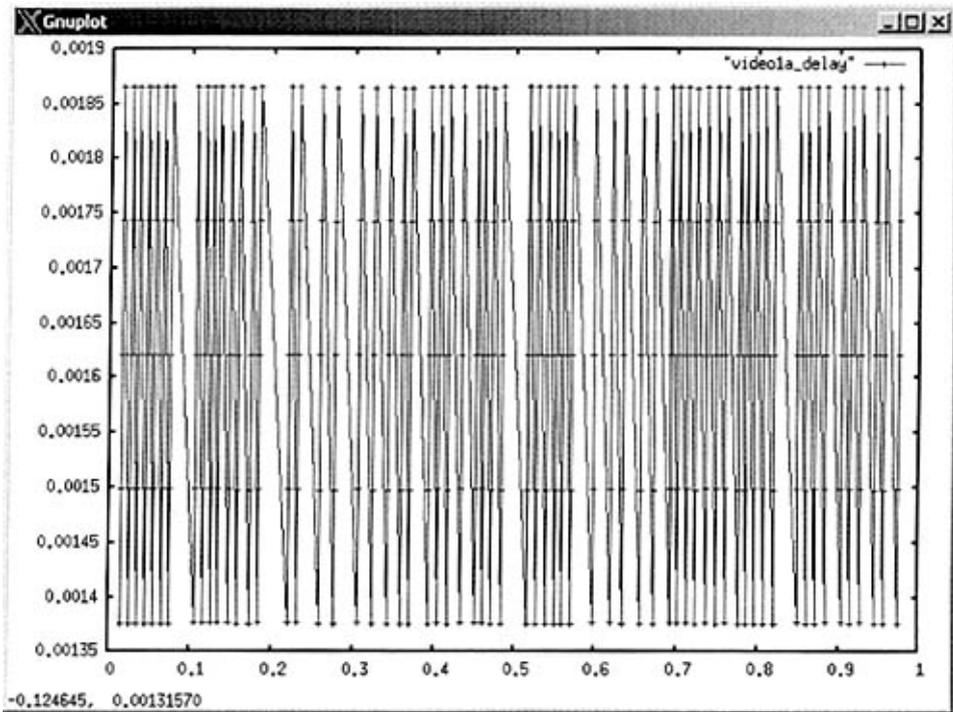


图 4.3 1 节点的时延

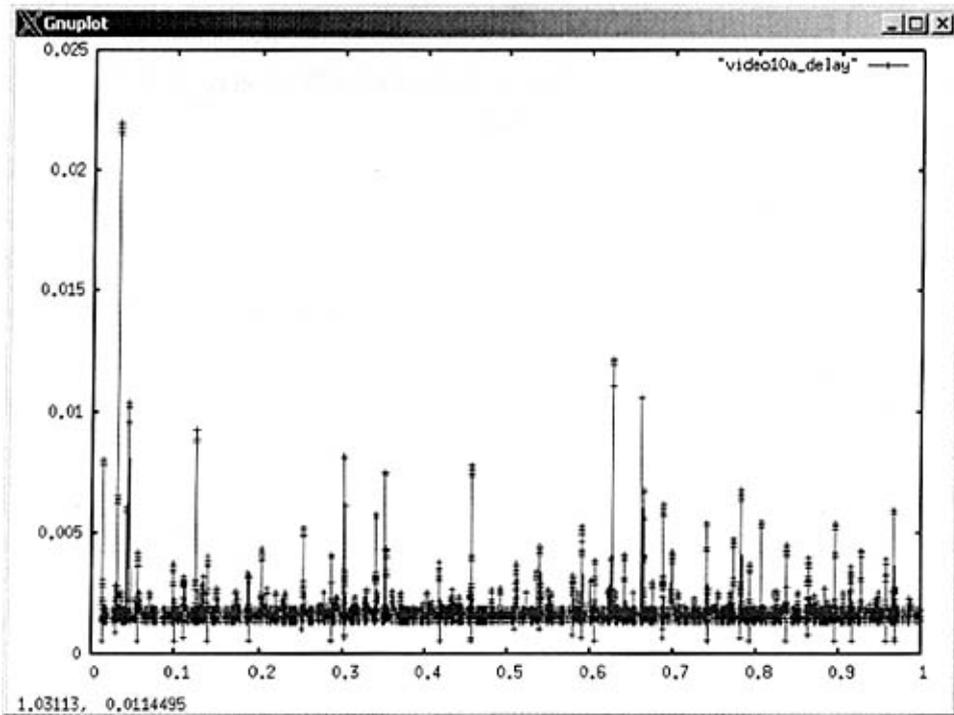


图 4.4 10 节点的时延

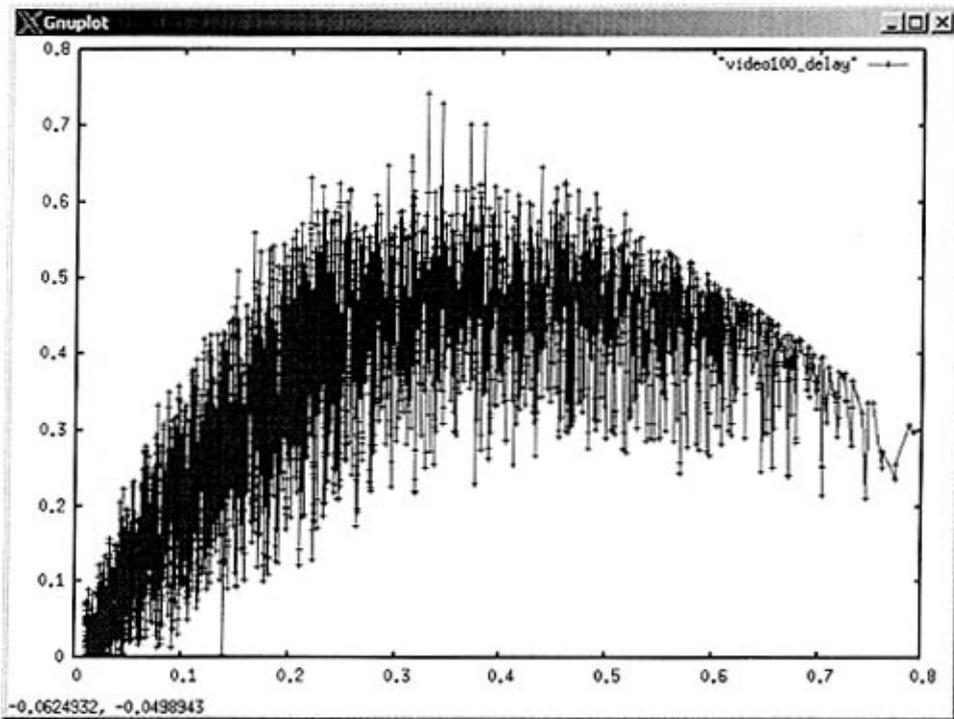


图 4.5 100 节点的时延

## 2. 时延抖动(IPDV)

IPDV 的变化情况与端到端延迟时间变化的原因是相同的。由于网络的状态随时都在变化，有时候流量大，有时候流量小，当流量大的时候，许多封包就必需在节点的队列中等待被传送，因此每个封包从传送端到目的地端的时间不一定会相同，而这个不同的差异就是所谓的时延抖动。时延抖动越大，则表示网络越不稳定。IPDV 的特点与时延最大的不同在于，负荷越重抖动却越小。

下图是节点 14-8 的链路的统计数据。当只有一个节点发送数据时，大部分数据包的时延抖动在 10ms 以下，最大时延抖动 35ms；10 个节点同时发送数据时，90% 以上的数据包的时延抖动在 0.5ms 以下，最大时延抖动 6.5ms；100 个节点同时发送数据时，时延抖动在 -0.35~0.4ms 之间，但此时网络已经失去传送数据的能力，该数据并没有实用价值，仅仅表明网络物理介质的性能。时延抖动 < 300ms 达到实时 2 级，< 10ms 达到实时 3 级。时延抖动制约着传统以太网的实时级别。结果表明，100MB 快速以太网有充分的能力承载 10 节点的实时 2 级视频流。

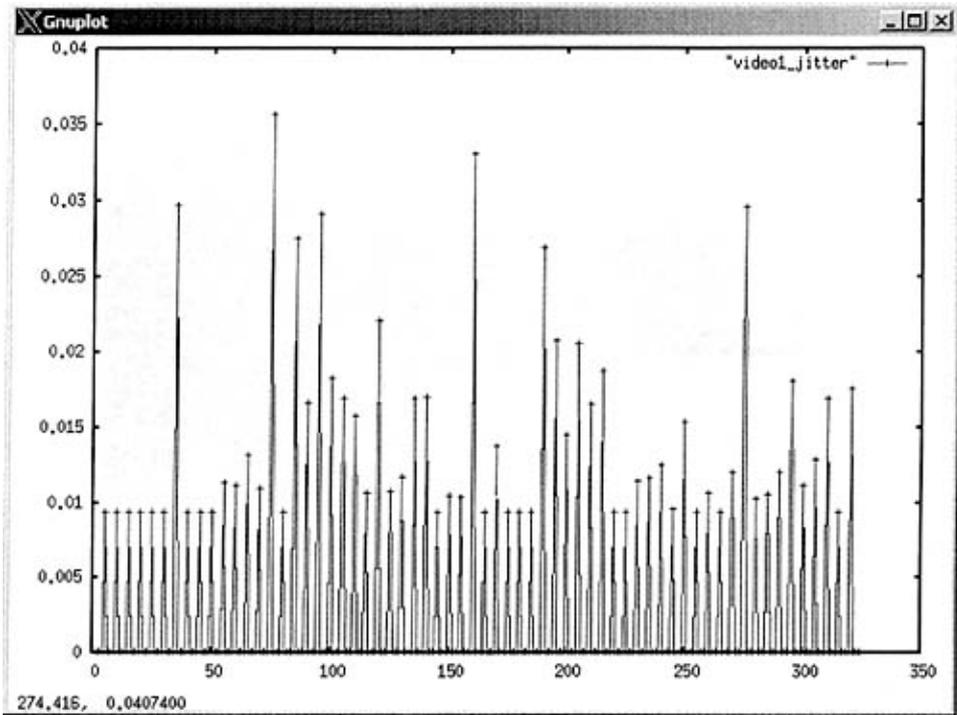


图 4.6 1 节点的时延抖动

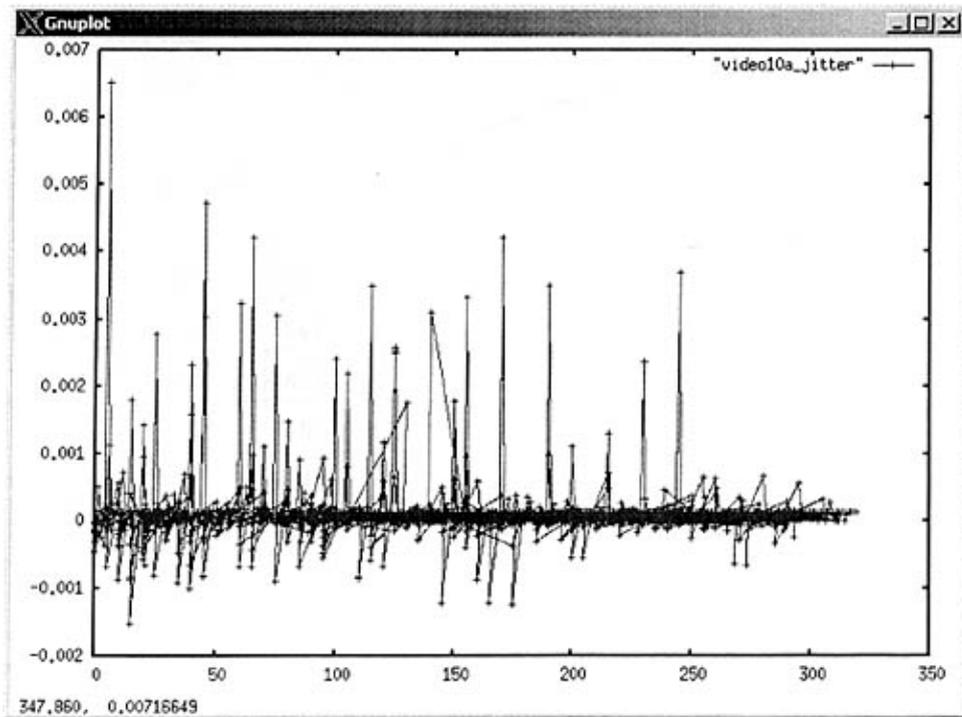


图 4.7 10 节点的时延抖动

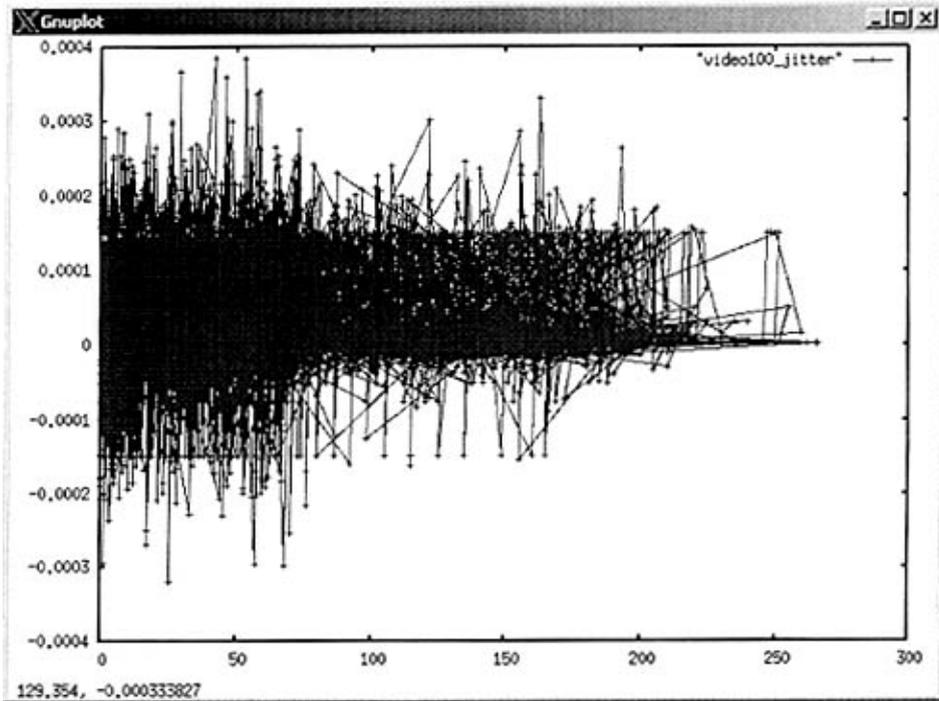


图 4.8 100 节点的时延抖动

### 3. 丢包(IPLR)

在仿真中被观察到的网络内出现的丢包数量列表如下：

表 4.3 丢包数量

节点数	发送包数量(包)	丢包数量(包)	丢包率(%)
1	325	0	0
10	3025	0	0
13	3860	0	0
16	4825	1	0.02%
18	5480	18	0.33%
20	6045	108	1.79%
25	7400	845	11.4%
32	9595	2454	25.6%
100	29905	19758	66.1%

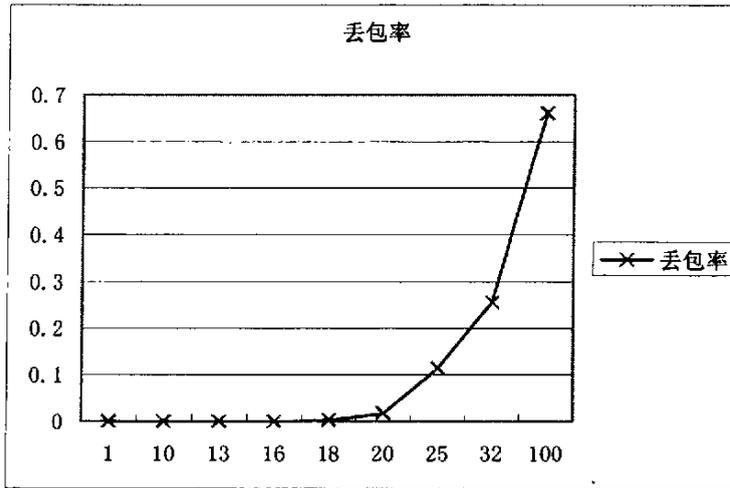


图 4.9 丢包率

当节点数目增加到 16 时，出现 1 个丢包，出现不可靠现象。节点数目超过 20，网络性能急剧下降。

#### 4. 网络吞吐量

从图可以很清楚地看出，10 节点，EXPOO 的传输速率在维持状态下是 5Mbps，每路图像带宽平均约为 500kbps。100 节点的吞吐量已接近饱和。

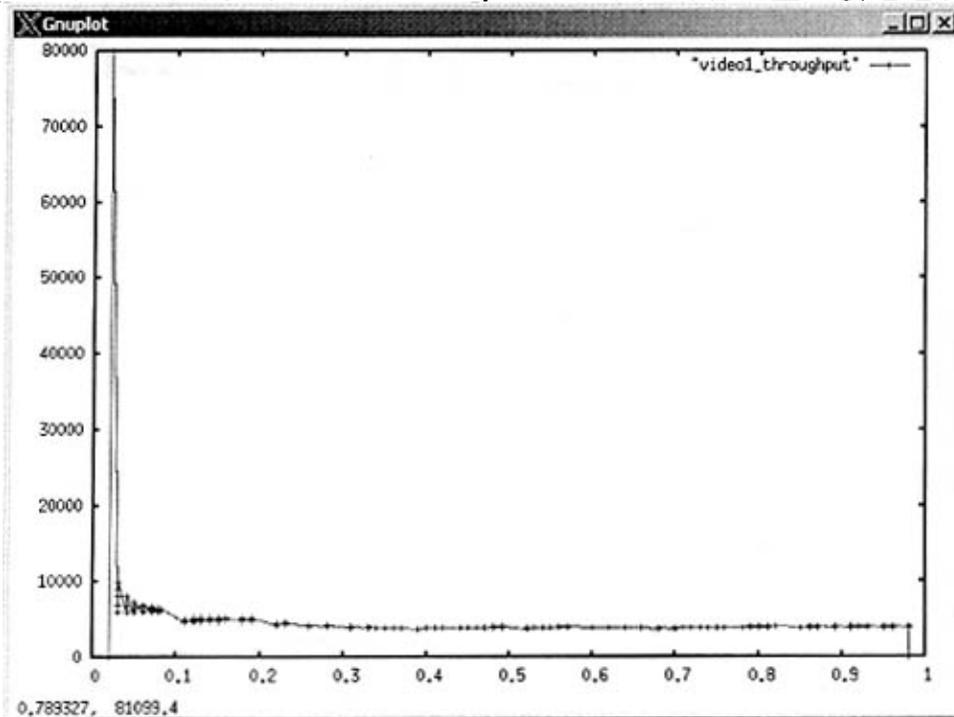


图 4.10 1 节点吞吐量

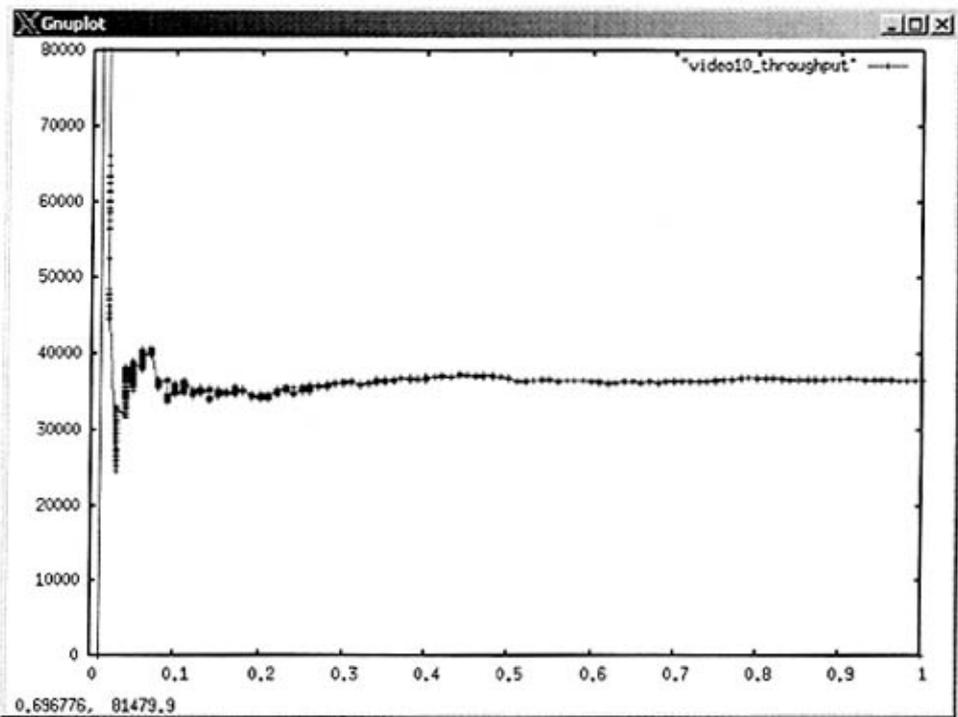


图 4.11 10 节点吞吐量

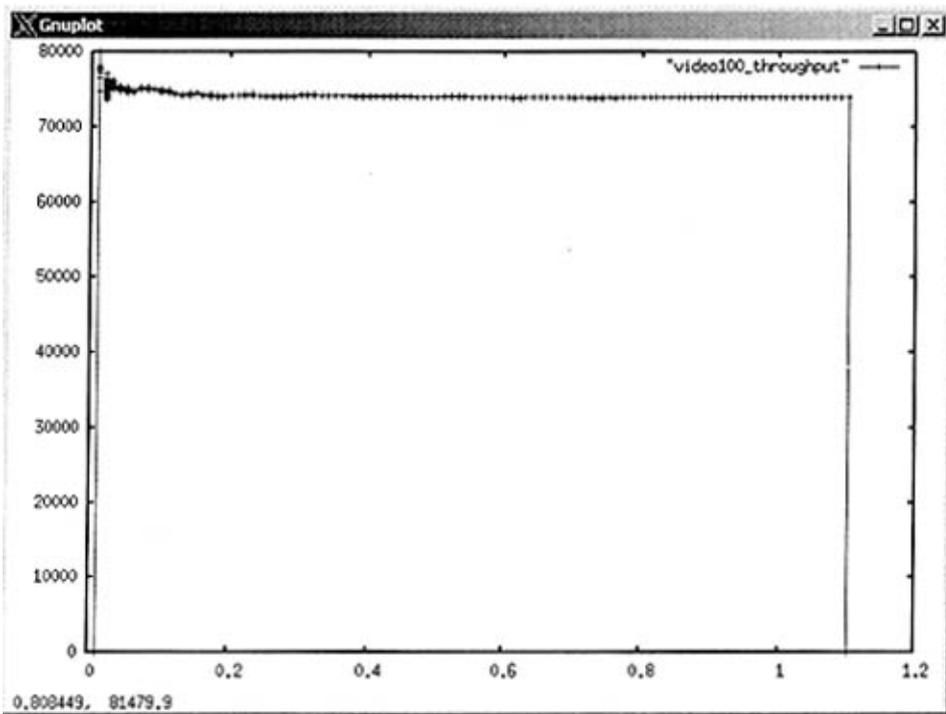


图 4.12 100 节点吞吐量

#### 4.4 本章小结

在本章中，作者简要阐述了网络仿真的技术原理、应用范围。NS2 是主流网络仿真工具之一，作者介绍了 NS2 的背景，软件构成，功能模块，仿真元素，以及使用 NS 进行网络仿真的方法和一般过程。

作者使用 NS2 对所设计的网络电视监视系统的网络建立了仿真模型，详细论述了网络拓扑结构和仿真参数的选取方法，提供了关键的仿真脚本。仿真的结果包括不同数目的监视节点的网络时延，时延抖动，丢包率，网络吞吐量的统计，对实验监视系统的研制提供了预测与指导。

## 第五章 实验系统

### 5.1 概述

在前文所述中，作者按照当前的技术条件建立了一个可行的网络模型。以下就按照网络仿真的预测的数据建立网络电视监视的实验系统。本实验系统包括一个由作者选择的特定的硬件系统，和一套软件程序。如果通过实用性测试，则可以进一步开发用于生产。

#### 5.1.1 系统设计要求

为了提高实验系统的通用性，系统设计遵循如下两个方面的要求：

开放式平台——开放的概念首先是要搭建一个开放式平台，从而创造了一个“plug-and-play”的环境，对第三方的软硬件提供支持。

标准化模块——使用标准化模块的结果是，只要是符合系统要求的硬件即可以替换原有的硬件，给予客户更多的选择；软件系统可以按模块升级或替换，便于功能维护。对于客制化系统的搭建，应该尽可能多的采用经过测试的成熟标准化模块，或对标准化模块进行尽可能少的改动，来保证客制化系统的可靠性。

#### 5.1.2 软件结构

常见的分布式软件系统体系结构有客户机/服务器结构、浏览器/服务器结构等。使用客户机(Client)和服务器(Server)结构可以充分利用两端硬件环境的优势，将任务合理分配到客户端和服务器端来实现，降低了系统的通讯开销。目前大多数应用软件系统都是客户机/服务器形式的两层结构。在浏览器(Browser)和服务器结构下，用户工作界面是通过浏览器来实现，极少部分事务逻辑在前端浏览器实现，但是主要事务逻辑在服务器端实现，形成所谓三层结构。客观的说，在单独的网络电视监视系统中，两种结构相互之间没有绝对的优势。在CIMS之中，应该与系统所使用的结构相匹配，以达到无缝的集成。

该实验监视系统，除了常规的网络分布结构之外，有几处特殊设计：

首先，为了降低图像数据传输对其他数据，尤其是实时级别要求更高的数据的影响，将所有网络摄像机单独划分在一个子网内，实现上可以是一个真正的物理子网，也可以是一个虚拟子网。

第二，网络摄像机持续将数据上传至服务器。管理状态下，浏览某个节点的实时图像，通过服务器转发；浏览历史图像，由服务器的检索服务功能实现。主要服务器放置于远程机房，浏览产生的网络流量均不在网络摄像机的子网内。因而网络摄像机的子网内稳定，有助于提高性能。

第三，提供功能扩展接口，如报警联动。

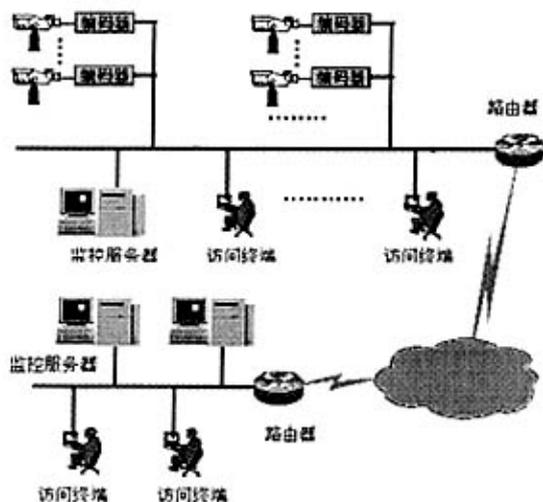


图 5.1 网络电视监视实验系统示意图

### 5.1.3 操作系统的选择原则

操作系统是最基本的系统软件，是硬件机器的第一级扩充。操作系统统一管理计算机资源，合理地组织计算机的工作流程，协调系统各部分之间的关系，充分发挥计算机的利用率，方便用户以及提高计算机响应时间。

操作系统有实时操作系统与非实时操作系统之分，两者并存于 CIMS 中。在本实验系统中，以微软公司的 Windows 2000 作为基本实验条件。微软公司的 Windows 操作系统是一种图形化的非实时操作系统，对于本实验系统而言并不是唯一的选择，可以根据客户需求，更换或者迁移到其他操作系统。

### 5.1.4 开发工具的选择

实验系统软件所用的开发工具根据软件架构与操作系统选择。对于实验系统而言，开发工具需要支持客户机/服务器结构或者浏览器/服务器结构的软件开发，亦被希望提供快速开发能力。

作者选择 Turbo C++ 2006 Explorer 版作为开发工具。Turbo C++ 2006 是 Windows 平台下的可视化集成开发环境，提供符合 ANSI/ISO 标准的 C++ 编译器，提供 ASM 编译器和集成 Delphi 编译器，采用获得市场验证的可视化组件 (VCL) 结构，适宜快速开发原生 Windows 应用程序，具有开发多种架构网络软件的能力，并且可以向其他操作系统移植。

Borland 公司网站提供 Turbo C++ 2006 Explorer 版的下载，免费授权给个人用户使用。

本实验系统软件的开发工具包(SDK)包括以下几个部分：

- Windows SDK
- Visual Component Library(VCL)

- 第三方控件 Indy Sockets
- 第三方控件 Video-Capture

Windows SDK 及其 VCL 是随开发工具发行的。第三方控件受到 Explorer 版的限制不允许在集成开发环境中使用，但是可以使用人工编制的代码编译与连接。

Indy Sockets 是一套实现众多流行的因特网协议的控件，是开放源码第三方控件，双重许可。

Video-Capture 是基于 Video for Windows 的视频捕捉和回放控件，是开放源码第三方控件。

## 5.2 实验网络摄像机

### 5.2.1 网络摄像机及其相关概念

网络摄像机是一种结合传统摄像机与网络技术所产生的新一代摄像机，它可以将影像通过网络传送到远端，而且远端的浏览者不需用任何专业软件，只要标准的网络浏览器(如 Microsoft IE 或 Netscape)，即可监视其影像。网络摄像机是传统摄像机与网络视频技术相结合的新一代产品，除了具备一般传统摄像机所有的图像捕捉功能外，机内还内置了数字化压缩控制器和基于 Web 的操作系统，使得视频数据经压缩加密后，通过局域网，Internet 或无线网络传送。而远端用户可在 PC 上使用标准的网络浏览器，根据网络摄像机的 IP 地址，对网络摄像机进行访问，实时监控目标现场的情况，并可对图像资料实时编辑和存储，同时还可以控制摄像机的云台和镜头，进行全方位地监控。

网络视频服务器是另一种网络视频设备。它是安装在网络上传送影像及监视的一体型视频服务器，不需要另外的电脑，在因特网上利用标准网络浏览器可以实时看到高画质影像的网络监视装备。从某种角度上说，视频服务器可以看作是不带镜头的网络摄像机，或是不带硬盘的 DVR，它的结构也大体上与网络摄像机相似，是由一个或多个模拟视频输入口、图像数字处理器、压缩芯片和一个具有网络连接功能的服务器所构成。视频服务器将输入的模拟视频信号数字化处理后，以数字信号的模式传送至网络上，从而实现远程监控的目的。由于视频服务器能够将模拟摄像机转化为网络摄像机，是网络系统与闭路电视模拟系统整合的最佳途经。

### 5.2.2 基于 x86 架构的网络摄像机硬件

商品网络摄像机选用专用的 32 位精简指令 CPU，而实验系统基于开放性、标准化的原则使用 x86 兼容的 CPU。选择 x86 架构的重要原因是可连接的兼容硬件种类丰富，价格低廉，而且可以保护用户原先的投资和使用数以百万计应用软件。

## 1. 工业用 PC 主板

工业用 PC 是发展成熟的系统，构建在苛刻的操作条件下(如工业自动化)极其可靠地工作。有专业厂商供应工业用 PC 主板。作者选择的是台湾威盛电子公司的 Mini-ITX 系列主板。Mini-ITX 主板规范由台湾威盛电子公司提出，被广泛应用于包括工业用 PC 等方面。威盛 Mini-ITX 超微型主板是高集成的原生 x86 主板，尺寸只有 170mm×170mm。以型号为 EPIA 的主板为例，图示如下：

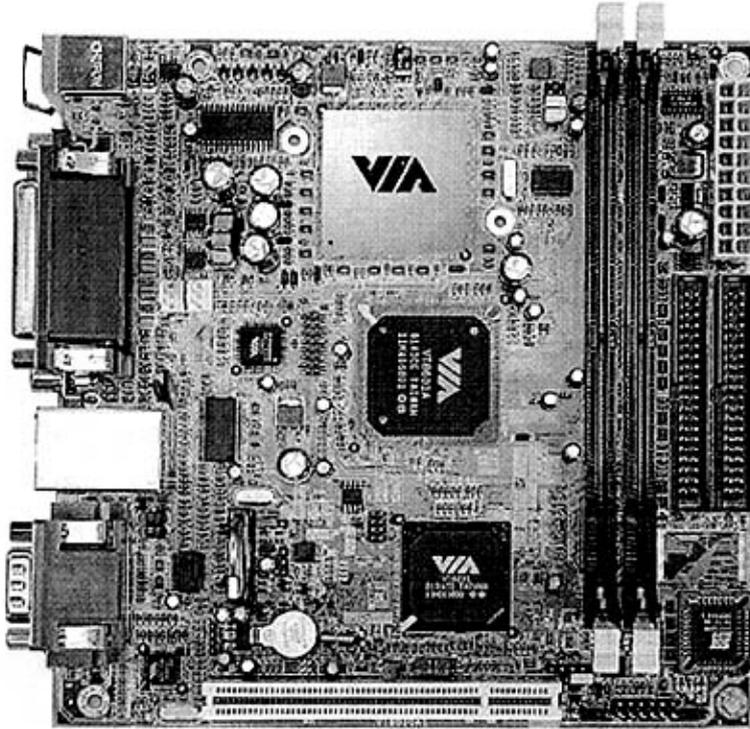


图 5.2 工业用 PC 主板

该系列主板提供了最小发热量的处理器环境，包括可选的无风扇配置。北桥芯片提供了集成的拥有 2D/3D 加速能力显示卡。板载兼容声卡，提供了最重要的多媒体性能。板载 10/100 兆网卡，电视输出，和附加的 PCI 插槽，以及完全的 I/O 特性提供了充足的连接和扩展空间。I/O 接口列表如下：

- 3 个声音插口 - 线路输出，麦克风输入 和线路输入；
- 四个 USB 接口 (两个 USB 接口在后面板)；
- 1 个 EPP/ECP 并口；
- 1 个 16C550 兼容串口；
- 2 个外部 PS/2 兼容鼠标/键盘口；
- 2 个 电视输出端口 (S-Video or optional RCA TV out)；

- 1 个 S/PDIF 输出 (optional and multiplex with RCA TV out);
- 1 个 RJ-45 局域网接口;
- 1 个 PCI 插槽 (支持两个 PCI 设备)。

## 2. 摄像元件以及镜头、云台

摄像元件的选择的依据是需要监控的场景及重要性, 这将决定摄像元件所应具备的一些特性, 例如视频质量、光感度和镜头类型等。一般而言, 根据车间较低的光照条件选择摄像元件的感光度级别, 根据摄像机至被监控目标位置的距离、需要的视角选择镜头的类型: 标准镜头、远景镜头、广角镜头、可变焦镜头等。

为连接方便, 优先选用配置即插即用接口的摄像元件。大多数镜头、云台产品使用串口接收控制信息。

## 3. 其他

电源应符合工业现场要求, 实验系统的替代品是通用的 PC 电源。

系统还应该有一个电子盘装载固化的操作系统等软件, 实验系统的替代品是普通硬盘。

与大多数后台工作的工业 PC 一样, 没有配置显示器、键盘等标准输入输出设备。在调试状态时连接了一台显示器。

## 4. 装配方法

实验系统的网络摄像机使用普通的摄像头通过 USB 接口与主板连接, 通过 RJ-45 局域网接口连接进入实验网络。

### 5.2.3 网络摄像机的软件

#### 1. 操作系统

商品化的网络摄像机, 既有采用嵌入式实时操作系统的产品, 也有采用非实时操作系统的产品。在本实验系统采用了 Windows 2000 操作系统。

#### 2. 服务程序

实验系统的网络摄像机服务程序实现在 Windows 操作系统下将摄像元件输出的信号进行压缩、再发送到网络上的功能, 执行文件名是 Camera.exe。运行时, 打开本机 UDP/10000 端口监听。当程序接收到指令后, 向远程用户终端以点对点的 UDP 单播方式发送连续的监视画面, 未接摄像头时, 发送电视测试圆画面。

程序内置 http 服务, 在 TCP/80 端口监听(可更改), 能够使用与商品网络摄像机相同的方式访问。

另外, 程序内置 Echo 和 EchoUDP 服务, 分别在 TCP/7 和 UDP/7 端口监听, 提供 TCP 和 UDP 传输速度的测量服务。

调试状态下, 网络摄像机服务程序的系统托盘图标菜单如下图所示:

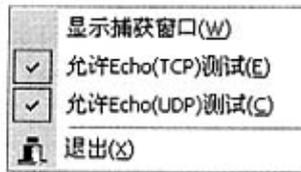


图 5.3 网络摄像机服务程序的系统托盘图标菜单

## 5.3 存储、转播服务器

### 5.3.1 分布式存储体系

目前企业的管理信息系统都趋向集中管理和建设的方式，但这并不意味着录像文件的存储必须集中在某一台服务器上，可以充分发挥网络分布式计算的能力，将录像文件的存储任务分担到数个就近的节点，从而优化网络，减少不必要的流量。

随之带来的问题是，如何均布这些存储节点，如何检索到这些存储的内容，录像时间的校正等。为数不少的网络监控产品亦存在上述问题。

### 5.3.2 检索服务

作为安全系统，提供历史信息的浏览是必要功能之一。在系统设计时，首先计算存储需求：

每秒存储量(kB/s)=图像大小(kB)×帧数/s

设计存储时间(s)=3600s×每天操作小时数×期望存储天数

存储需求(MB)=每秒存储量(kB/s)×设计存储时间(s)/1000

再根据存储需求确定服务器外存储器容量。例如服务器始终保存有 60 天的历史图像，如果遇到意外事件(火灾、盗窃等)，可以给相关单位提供检索资料。

### 5.3.3 转播服务

本系统的特别设计了某个节点的实时图像通过服务器转发的模式。这种方式受到争议的地方在于会因服务器产生额外的延迟和某些管理状态下增加了流量。

中央监控系统监视作业过程，收集和显示系统执行状况数据。中央监控系统提供必要的现场图像信息的记录与回放。在中央管理室集中监视的画面通常使用多画面中低分辨率循环监视方式。作者认为网络流量从网络摄像机汇集到存储服务器，再汇集到中央管理室，信息基本上是点到点的单向流动，是完全可控制的，不存在广播与多播时的性能问题。

## 5.4 客户端软件

### 5.4.1 概述

用户终端上的控制程序具有的功能如下，可以通过 IP 地址，接收选定的网络摄像机监视画面，统计网络带宽使用情况，测量 ICMP 包延迟时间，测量 TCP 或 UDP 包延迟时间等。

### 5.4.2 终端监视程序

用户终端上的控制程序 monitor.exe 运行时，可以通过 IP 地址选择网络摄像机，接收监视画面。



图 5.4 IP 地址选择界面

下图显示，选择 IP 地址为 10.192.0.10 的实验网络摄像机(未接摄像头)的画面。

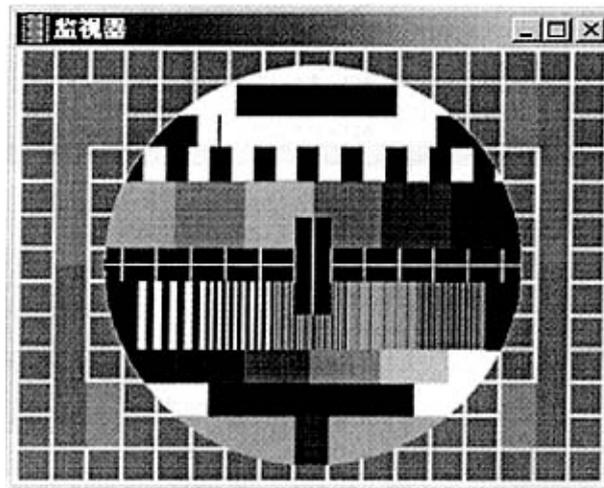


图 5.5 监视画面

下图是网络统计结果，测试圆信号带宽使用 369kps.

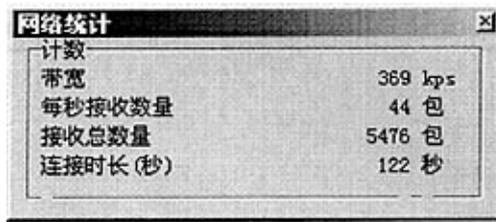


图 5.6 网络统计界面

### 5.4.3 延迟时间的测试方法——ICMP 测试

ICMP 协议工作在 IP 协议的底层，ICMP 包的传输速度快于 UDP 包和 TCP 包。使用 ICMP 的测试结果，与网络交换设备、发送主机性能相关。测量时，取 ICMP 包返回和发送的间隔时间的 1/2 作为该次测量的单程传输时间。在同一台计算机上，分别使用本地计算机和远程计算机作为目的主机，测量差值反映网络交换机的时延。在作为存储服务器和网络摄像机的计算机上分别测量，得到两类源节点的处理延迟。

Indy Sockets 的控件 TIdIcmpClient 返回毫秒级精度的时间，需要修改代码以获得高于毫秒级精度的时间。修改方法参见“Echo 测试”部分。

下图是 ICMP 测试网络时延的画面。



图 5.7 ICMP 测试网络时延

测试结果图形如下：  
服务器(本地-本地)

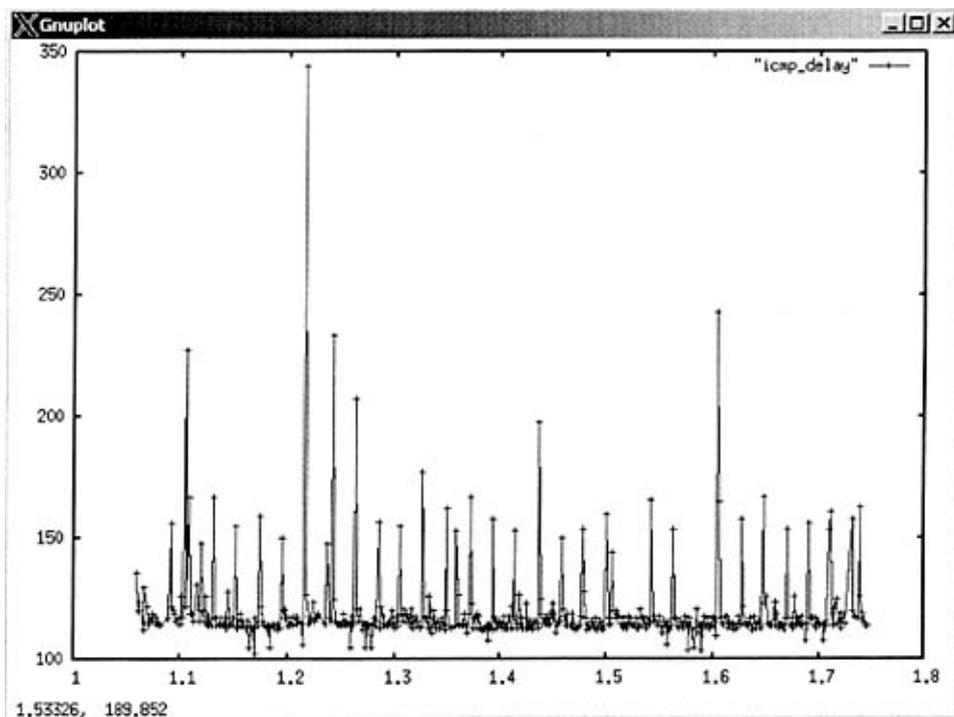


图 5.8 ICMP 测试网络时延结果

测试结果说明：

在作为网络摄像机的计算机上，以本地计算机作为目的主机，ICMP 单程时延最小值 430 微秒。对于 127.0.0.1 这类地址，操作系统将其“短路”，这个时间与网络交换机没有关系，因为数据甚至没有经过网卡。在同一台计算机上，以远程计算机作为目的主机，ICMP 单程时延最小值 490 微秒。在“第四章 网络仿真”里，网络电视监视系统前端设备的子网物理延迟就是取两者之差的 2 倍。

在作为存储服务器的计算机上，以本地计算机作为目的主机，ICMP 单程时延最小值 99 微秒。在“第四章 网络仿真”里，服务器节点的处理延迟取值为 100 微秒，而网络摄像机节点的处理延迟取值为 450 微秒。

#### 5.4.4 延迟时间的测试方法——Echo 测试

Echo 协议基于 TCP 或 UDP，在服务开启时，它简单地将 TCP 或 UDP 数据包返还给发送者。使用 Echo 的测试结果，与网络交换设备、发送主机和目标主机性能相关，故反映网络综合传输的速度。测量时，取 Echo 包返回和发送的间隔时间的 1/2 作为该次测量的单程传输时间。

Indy Sockets 的控件 TIdEchoUDP 返回毫秒级精度的时间。TIdEchoUDP.Echo 函数完整的代码如下<sup>[49]</sup>：

```
function TIdEchoUDP.Echo(AText: String): String;
```

```

var
    StartTime: Cardinal;
begin
    StartTime := GetTickCount;
    Send(AText);
    Result := ReceiveString;
    {This is just in case the TickCount rolled back to zero}
    FEchoTime := GetTickCountDiff(StartTime, IdGlobal.GetTickCount);
end;

```

可见 FEchoTime 仅仅具有毫秒级精度的原因是使用 GetTickCount, GetTickCountDiff 等时间函数。用更高精度的时间函数替代有关的测时过程就可以获得高于毫秒级精度的时间。修改方法如下：

从 Indy9 的 TIdEchoUDP 继承得到新的类 TIdEchoUDPEX, 重载 Echo 函数。

```

type
    TIdEchoUDPEX = class(TIdEchoUDP)
    public
        Function Echo(AText: String): String; overload;
    end;

```

TIdEchoUDPEX.Echo 函数完整的代码如下：

```

function TIdEchoUDPEX.Echo(AText: String): String;
var
    RTTime: Int64;
    RTTimeReply: Int64;
    Frequency: Int64;
begin
    QueryPerformanceFrequency(Frequency);
    QueryPerformanceCounter(RTTime);
    Send(AText);
    Result := ReceiveString;
    QueryPerformanceCounter(RTTimeReply);
    FEchoTime := (RTTimeReply - RTTime) * 1000000 div Frequency;
end;

```

下图是 Echo 测试网络时延的初始画面。

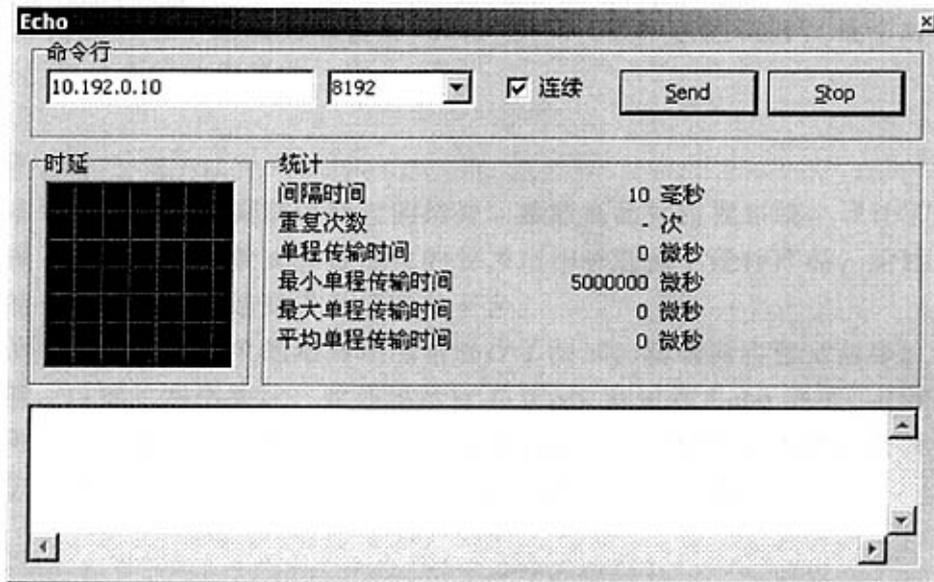


图 5.9 Echo 测试网络时延

测量参数配置如下：UDP 包大小 8192 字节，间隔时间 10ms。该参数与实验网络摄像机软件接近。测试结果如下：

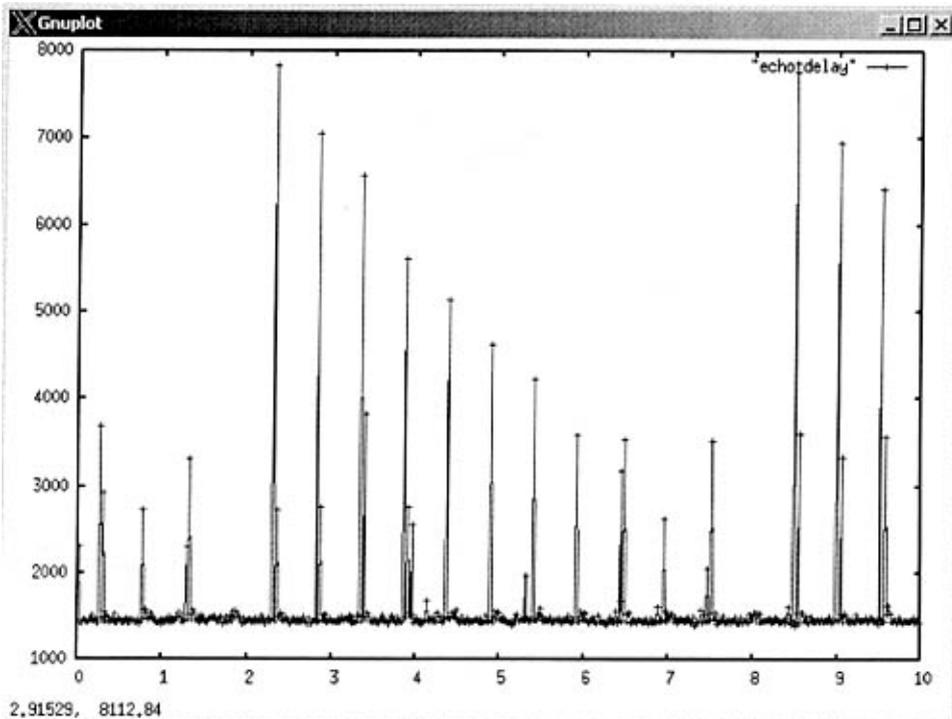


图 5.10 Echo 测试网络时延结果

测试结果说明：

Echo 测试反映综合的时延。对比 ICMP 测试，可见当网络拥塞时排队延迟

占很大的比重。当单路端到端使用 8192 字节 UDP 包测试时，最小时延是 1.399ms，与仿真的结果基本一致。

## 5.5 本章小结

在本章中，作者根据前述研究的结果，参照商品化监视系统，设计了一个实验监视系统。基于开放式和标准化的要求，作者选择了硬件产品，论述了软件系统的分布式结构，选择了系统开发平台。

实验监视系统在简单的网络环境里进行了测试。测试内容包括基本的图像传输性能，内置的网络统计，此外还运行了 ICMP 测试和 Echo 测试。ICMP 测试结果得出网络交换设备的物理延迟、发送主机的处理延迟，本文正是以其作为网络仿真的条件。Echo 测试结果与网络仿真结果基本一致。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 结论

作者在研究 CIMS 企业的工业电视系统的信息集成化课题时，认识到：在各种通信网络向 IP 协议融合的趋势下，原本采用模拟技术的工业电视系统应该向着采用多媒体数字技术和局域网技术的网络电视系统方向发展。

网络电视的国家标准虽然正在制定中，多项技术性问题尚待解决，但是发展趋势是明显的。网络电视应该采用 ITU-T H.264 或者与之类似的编码技术，故作者在进行研究时，编码流主要参数比照 H.264 确定。

作者在本文中明确指出了网络电视监视系统的被量化的实时级别，该级别高于普通视频点播(VOD)的要求，而低于各种加工设备的要求。

由于目前市场上存在的各种网络监视类解决方案，在涉及到网络传输的问题上，技术指标比较模糊。对于一个给定条件的网络环境，诸如可传送的最大监视流数目等参数，往往是通过经验或者试验的方式获得的。作者在 CIMS 网络系统方面的研究工作目的之一是解决该问题。本文使用网络仿真工具，建立了一种通用方法，可以比较准确地得出结果，并由此推算了在一个制造业企业的千兆城域网的某个子网内实际可用的监视节点数目。

作者编制了一套实验性软件系统，并且在所选择的硬件系统上测试运行，说明了本网络电视监视系统的设计的可行性。

作者在建立仿真模型时，网络设备的延迟参数是在实际网络中使用自编的 ICMP 测试程序得出的，并非按照经验选取。Echo 测试结果与网络仿真结果基本一致。

### 6.2 尚待解决的问题

在 CIMS 企业之中，网络电视监视系统应该与整个企业的管理信息系统的软件结构相匹配，以达到无缝的集成。在后续开发过程中，就必须考虑标准化应用程序接口，以适应客户机/服务器结构或者浏览器/服务器结构等，提供功能扩展接口，如报警联动等等。

设计系统时还应当做到可以根据客户需求，更换或者迁移到除了微软公司的 Windows 操作系统之外的其他操作系统。对于本文的实验系统，一个有效的降低成本的途径就是：网络摄像机采用嵌入式操作系统。

存储、转播服务器的软件本文没有完成。将录像文件的存储任务分担到就近的节点，可以优化网络。存在问题有：如何均布这些存储节点，如何检索到这些存储的内容，录像时间的校正等。解决这些问题的方法尚待研究。

在通常情况下，网络电视监视系统的流量大于 CIMS 企业网络中原有的流量。作者在研究的时候，按照网络分段的方法，没有过多的考虑制造自动化报

文对监视流的影响。实际上，两者之间的互相影响是存在的，需要进一步修改仿真模型进行研究。

由于子网容量的限制，每个子网内的监视节点数目是有限制的。如果需要增加监视节点，可以使用增加子网的方法。但是这样，增加的监视节点数量还是有限的。能够增加多少监视节点，或者找到一种监视节点数目没有限制的方法，尚待进一步研究。

作者所设计的传输方案相对比较平稳，没有对可变传输帧数或者可变图像解析度而导致网络流量不规则变化的情况加以研究。此外，作者没有研究紧急状态下可能出现的问题。继续研究以上这些问题，将促进网络电视监视系统技术的发展。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准. 工业电视系统工程设计规范. GBJ115-87 施行日期: 1988年8月1日 现行有效
- [2] 中华人民共和国国家标准. 民用闭路监视电视系统工程技术规范. GB50198-94 施行日期: 1994年11月1日 现行有效
- [3] 中华人民共和国国家标准. 信息技术 系统间远程通信和信息交换局域网和城域网 特定要求 第1部分: 局域网标准综述. GB/Z 15629.1-2000. ISO/IEC TR 8802-1. 施行日期: 2000年8月1日 现行有效
- [4] 中华人民共和国国家标准. 信息处理系统 局域网 第3部分: 带碰撞检测的载波侦听多址访问(CSMA/CD)的访问方法和物理层规范. GB/T 15629.3-1995. ISO/IEC 8802-3. 施行日期: 1995年2月1日 现行有效
- [5] 中华人民共和国行业标准. IP 网络技术要求——网络性能参数与指标. YD/T 1171-2001. 施行日期: 2001年12月11日 现行有效
- [6] IEC standard. Information technology - Coding of audio-visual objects - Part 5: Reference software; Amendment 6: Advanced Video Coding (AVC) and High Efficiency Advanced Audio Coding (HE AAC) reference software. ISO/IEC 14496-5 AMD 6-2005. 发布日期: 2005年6月1日 现行有效
- [7] 国际电信联盟电信标准. 有关业务质量和网路性能包括可信性的术语和定义. ITU-T E.800. 发布日期: 1994年8月1日 现行有效
- [8] 国际电信联盟电信标准. 业务的通信质量: A 框架和定义. ITU-T G.1000. 发布日期: 2001年11月1日 现行有效
- [9] 国际电信联盟电信标准. 一般视听业务的高级视频编码. ITU-T H.264. 发布日期: 2005年3月1日 现行有效
- [10] 国际电信联盟电信标准. 基于 IP 网络的供应和维护的性能目标和规程. ITU-T M.2301. 发布日期: 2002年7月1日 现行有效
- [11] 国际电信联盟电信标准. 因特网协议数据通信业务 - IP 分组转移和有效性参数. ITU-T Y.1540. 发布日期: 2002年12月1日 现行有效
- [12] ITU-T Recommendation. Network performance objectives for IP-based services. ITU-T Y.1541. 发布日期: 2006年2月1日 现行有效
- [13] David A. Glanzer. HSE: AN OPEN, HIGH-SPEED SOLUTION FOR PLANTWIDE AUTOMATION. Fieldbus Foundation. [www.fieldbus.org](http://www.fieldbus.org)
- [14] PROFINET Specification. PROFINET CBA Architecture Description and Specification. PROFIBUS International. 2004年5月. 2.02版. [www.profibus.com](http://www.profibus.com)
- [15] PROFIBUS International. PROFINet 技术和应用 系统描述. 中文版. 2003

年 11 月. [www.profibus.com](http://www.profibus.com)

- [16] Rockwell Automation. EtherNet/IP: Industrial Protocol White Paper. 2001 年 10 月. [literature.rockwellautomation.com](http://literature.rockwellautomation.com)
- [17] Rockwell Automation. EtherNet/IP 网络 在工业控制领域应用以太网. Rockwell Automation Inc. 2006 年. [www.rockwellautomation.com.cn](http://www.rockwellautomation.com.cn)
- [18] IEC/SC65C. Real-time Ethernet for Plant Automation (EPA)(R) . IEC/PAS 62409. 发布日期: 2005 年 6 月 28 日
- [19] 孙志挥, 陈伟达, 丁莲编著. 计算机集成制造技术. 南京: 东南大学出版社, 1997
- [20] 常本英, 黎建强, 徐祺编著. 计算机集成制造系统(CIMS)导论. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1997
- [21] 冯冬芹, 黄文君等编著. 工业通信网络与系统集成. 北京: 科学出版社, 2005
- [22] (美)Greg Tomsho, Ed Tittel, David Johnson 编著 冉晓旻, 郭炎 等译. 计算机网络教程(第 4 版). 北京: 清华大学出版社, 2005
- [23] 郭向勇, 吴光斌, 赵怡滨编著. 千兆位以太网组网技术. 北京: 电子工业出版社, 2002
- [24] (美)Cisco Systems 公司, Cisco Networking Academy Program 著. 清华大学, 北京大学, 北京邮电大学, 华南理工大学, 思科网络技术学院译. 思科网络技术学院教程(第一、二学期)(第三版). 北京: 人民邮电出版社, 2004
- [25] (美)Cisco Systems 公司, Cisco Networking Academy Program 著. 天津大学, 电子科技大学, 中山大学, 思科网络技术学院译. 思科网络技术学院教程(第三、四学期)(第三版). 北京: 人民邮电出版社, 2004
- [26] 柳纯录主编, 黄子河, 陈淦萍副主编. 软件评测师教程. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [27] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀编著. NS 与网络模拟. 北京: 人民邮电出版社, 2003
- [28] 柯志亨, 程荣祥, 谢锡堃, 黄文祥编著. 计算机网络实验—以 NS2 仿真工具实作. 台北: 学贯行销股份有限公司, 2005
- [29] 冯淑芬, 郭福云等编著. 电视技术与应用. 北京: 兵器工业出版社, 1995
- [30] 赵汝嘉主编. 先进制造系统导论. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [31] 王建新, 杨世凤, 史永江, 童官军. 远程监控技术的发展现状和趋势. 国外电子测量技术, 2005, 4
- [32] 张延鸿. 通信网络仿真技术. 电信交换, 2005, 2
- [33] 杨宏宇, 谢丽霞, 王兴隆. 网络仿真软件的应用与实践. 计算机工程与应用, 2005, 10:118~121,218
- [34] 陈磊, 冯冬芹, 金建祥, 褚健. 以太网在工业应用中的实时特性研究. 浙

江大学学报(工学版), 2004, 38(6):670~675

- [35] 叶莘. Ethernet Powerlink-实时的工业以太网. 自动化博览, 2004, 4
- [36] 贾永华. 监控中的视频压缩技术. 中国公共安全(资讯版), 2004, 12
- [37] 郝晓弘. 工业控制网络与 Ethernet 和 TCP/IP 技术. 网络与通信技术, 2003, 10
- [38] 胡俊, 方健. 工业以太网和基于 Internet 的远程监控系统. 世界仪表与自动化, 2002, 6(2):43~45
- [39] 毕永军, 尹传平, 林孝康. 通信网的现状及发展趋势. 电力系统自动化, 2001, 25(1):71~74
- [40] 倪炎榕, 刘溪涓, 马登哲. 敏捷制造中的多媒体技术. 计算机应用研究, 2000, 17(3): 4~6
- [41] 李方敏, 李仁发, 叶澄清. 网络仿真软件 ns 的结果输出和分析. 计算机工程, 2000, 9
- [42] 石瑛, 石坚. 园区网络设计、模拟与性能分析系统设计. 中国学术期刊文摘, 1999, 5(5)
- [43] 冯冬芹, 金建祥, 褚健. 工业以太网与实时以太网协议剖析. 中国工业设备网, 2006 年 3 月. [www.ieicn.com](http://www.ieicn.com)
- [44] 林啸. IP 网性能分析与考评指标. 泰尔网, 2004 年 6 月. [www.cttl.cn](http://www.cttl.cn)
- [45] 何宝弘. IP 网络以电信级质量取胜. 通信产业报, 2004 年 3 月 1 日
- [46] (美)科动控制系统公司. 工业以太网联网设备基本知识. 科动控制系统公司中文网站. [www.ctrlink.com.cn](http://www.ctrlink.com.cn)
- [47] PROFIBUS International. 现场总线(PROFIBUS)技术简介. 中国机电一体化技术网. [www.cameta.org.cn](http://www.cameta.org.cn)
- [48] A. A. Akintola, G. A. Aderounmu, A. A. Owojori, M. O. Adigun. Performance Modeling of UDP over IP-Based Wireline and Wireless Networks. Issues in Informing Science and Information Technology, 2006, 3
- [49] Open source. Internet Direct (Indy) Project's Indy Sockets sources. Version 9. 2004. [www.indyproject.org](http://www.indyproject.org)
- [50] The VINT Project, A Collaboration between researchers at UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC. The ns Manual(formerly ns Notes and Documentation). 2006. [www.isi.edu/nsnam/ns/](http://www.isi.edu/nsnam/ns/)

## 在读期间发表的论文

- [1] 印崧, 王晓枫, 夏萍. 联合收割机往复式切割器运动特性研究. 农业装备技术. 2006, 5