

# 拖曳式地震勘探系统数据传输技术研究\*

于连河 周 严

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

**摘要:**介绍了拖曳式地震勘探仪器数据传输方案及传输系统硬件接口电路,硬件系统以STM32F103ZET为核心处理器,针对拖曳式地震勘探系统的数据高速、可靠传输的核心问题,以既有的TCP协议为基础,提出了帧重校验机制、数据包批量确认机制、优化拷贝次数机制和自适应拥塞控制算法。最后对改进后系统传输性能进行测试。测试结果表明,提出的改善方案在地震勘探传输系统中运行可靠稳定,数据传输速度和有效率基本满足拖曳式地震数据传输的性能需求。

**关键词:** 帧重校验;批量确认;优化拷贝次数;拥塞控制

**中图分类号:** TP393.06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Research of towed seismic exploration data transmission technology

Yu Lianhe Zhou Yan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The data transmission scheme and interface circuit for towed seismic exploration instrument are introduced in this paper. The STM32F103ZET are used as the core processor in the circuit system, which is based on TCP/IP protocols. According to the requirement of high speed and reliability transmission of the measured data in the scheme, the batched packets acknowledge mechanism and the frame re-check mechanism are proposed. The technology of optimization of the number of copies and adaptive congestion control algorithm are improved. Finally, the performance of the system is evaluated and the results show that the improved scheme is running stably and reliably in the real system, the data transmission speed and effectiveness can satisfy the requirement of the towed seismic exploration system well.

**Keywords:** frame re-check; the batched packets acknowledge; optimization of the number of copies; congestion control

## 1 引言

地震勘探法是目前陆地资源勘探的主要方法,地震勘探系统由震源、地震波采集器阵列、数据传输系统和数据处理系统组成<sup>[1]</sup>,其中数据传输系统是地震勘探设备中采集数据集中收集的核心环节。地震勘探数据传输的特点是数据量大,要求高速、高可靠,在拖曳式地震资源勘探系统中,检波器插置的密度高且由履带拖曳移动,采集的数据在检波器拖曳移动过程中上传至车载中央控制工作站。该系统采集的数据量大于传统地震勘探系统,对数据传输速率的要求高于传统地震勘探系统。由于要求传输速率高,可靠性下降的概率将提高,因此,拖曳式地震勘探系统的数据高速、可靠传输是系统需要解决的核心问题。

传统的数据传输是应用RS485串行总线实现<sup>[2]</sup>,其理论传输速率是1Mbps,传输距离是1km,高速485总线因其传输速率理论值可达50Mbps,近年也被应用于地震勘探系统

的数据传输<sup>[3]</sup>。串行总线传输在采集道数少、数据量小的情况下能够适用,最大的优点是线缆少,硬件成本低,缺点是数据可靠传输的保障机制不够完善。随着地震勘探系统日趋高密度、大道数、大数据量化,其缺陷日益凸显,主要问题在于传输速率低、可靠性低,且采集道数越多问题越严重。

以太网具有多节点连接和宽范围传送、高速传输、全面化冲突/错误避免机制和多样化传输介质的特点,具备实现地震勘探仪器大数据高速可靠传输的条件<sup>[4]</sup>。为了提高以太网在拖曳式地震勘探系统中的运行效率及可靠性,需要进行传输控制协议的优化。通过增加帧重校验确认机制和优化确认重发机制保证大数据量数据传输的可靠性;通过优化拷贝次数技术和数据包批量确认机制,提高系统数据传输效率;通过自适应的拥塞控制算法提高大数据量传输的稳定性。各种机制的有机配合实现了拖曳式地震勘探系统数据的高速可靠传输<sup>[5-7]</sup>。

## 2 拖曳式地震勘探仪器数据传输方案

拖曳式地震勘探仪器是由车载中央控制系统、网络汇聚节点、交换机阵列及采集传输控制站四部分构成,其传输系统拓扑结构图如图 1 所示。

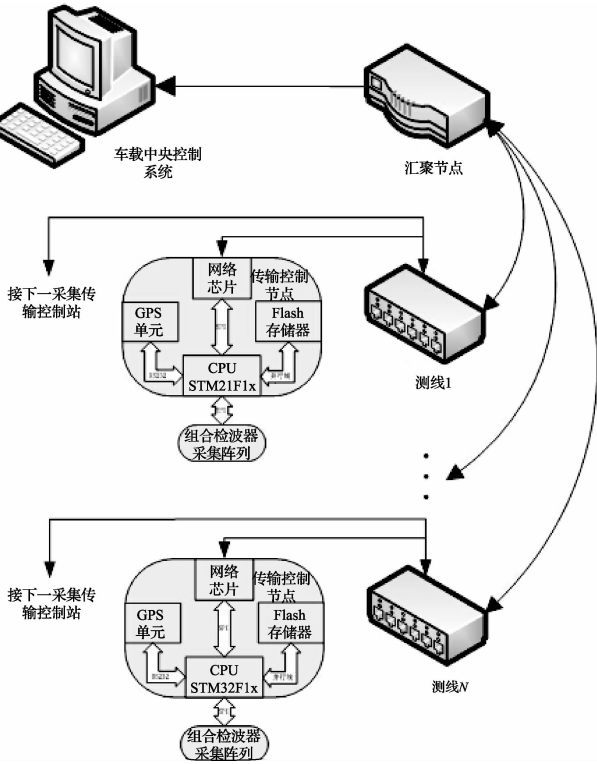


图 1 拖曳式地震勘探仪器传输系统拓扑结构

网络芯片采用的是具备超低功耗模式的单芯片快速以太网控制器 DM9000CIEP 主芯片,其集成 10/100 M 自适应收发器并支持背压模式和半双工流量控制模式。网络芯片配合 STM32F103ZET 核心处理器,经过 Socket 编程与中央控制系统实现链路连接,采集传输控制站作为客户端与中央控制系统进行数据和命令交互。

## 3 传输协议机制的优化及实现

### 3.1 帧重校验机制

#### 3.1.1 帧重校验机制的构架

地震勘探系统中,错误和短缺数据的收取会对后续的数据分析产生极大地影响。为了保证数据的有效性,系统数据传输增加了帧重校验确认机制、超时机制和误码/丢包重传机制。

帧重校验确认机制:每一个数据包发送前会对其进行精准数据帧校验 CRC-CCITT-16/N,并在数据包预留段添加该校验序列(FCS)R,同时对接收的数据包有效字段采用同样的 CRC-CCITT-16/N 校验,得到新的校验序列  $R_0$ 。在中央控制系统对该数据包进行接收后,解析出  $R$ ,若  $R$  不等于  $R_0$ ,则在误码/丢包编号表中记录该数据包编号并抛

弃该数据包,同时在数据库误码/丢包编号地址表中记录此时数据库存储地址,并把当前数据库存储点指针移位一个数据包长度,等待所有数据包传输完成。

帧重校验超时机制:与 TCP 的等待超时机制类似,中央控制系统对一个包进行接收,如果在一定时间内无法获取数据包,则判定该数据包丢失,记录数据包号和数据库存储地址,并把当前数据库存储点指针移位一个数据包长度。

帧重校验误码/丢包重传机制:等待所有数据包传输完成后,中央控制系统根据误码/丢包编号表向下位传输节点发送已丢弃数据包重传命令包,该命令包包含误码和丢包的数据包编号,接收此次重传数据包,并相应写入数据库误码/丢包编号地址表对应的数据库空间。

#### 3.1.2 帧重校验机制中的优化报文格式

传输协议中命令的数据流也是属于数据包的一种。根据需求,数据包分为数据帧和命令帧 2 种格式。数据帧主要用于传输数据,命令帧主要用于下位节点的操作指令,上位基站 GPS 的 RTCM 格式导航电文,数据完整性验证等。数据帧报文格式和命令帧报文格式如表 1 和 2 所示。

表 1 数据帧格式

子类型	Length	功能码		FCS
		TYPE	PAYLOAD	
1 byte/1	2 bytes	2 bytes	0~1023 bytes	2 bytes

表 2 命令帧格式

子类型	Length	功能码		FCS
		TYPE	PAYLOAD	
1 byte/0	2 bytes	2 bytes	0~200 bytes	2 bytes

如上表中所示,子类型是用来区分数据包是数据帧还是命令帧,Length 表示了除去 FCS 字段之外的帧长度,功能码的 TYPE 和 PAYLOAD 分别代表了数据包类型和数据包内容,FCS 为 CRC-CCITT-16/N 校验序列,其多项式为  $G(x)=x^{16}+x^{15}+x^{13}+1$ 。

#### 3.2 数据包批量确认机制

系统采用了序列号机制和优化的确认重发机制来保证数据传输的可靠性。序列号机制的思路就是待发送的每个数据块中的数据包均被分配唯一的序列号,且数据包序列号和等待传输的数据包序号在排列顺序上具有一致性。确认重发技术是保证可靠性的基本技术。

发送-确认机制中的每一个数据包的发送与接收都伴随着请求-等待-确认的过程,该机制因频繁的认可消息以及频繁的超时,造成了对数据传输效率的极大损耗。针对这个矛盾,提出数据包批量确认的方法。每  $N$  个数据包(图例为  $N=5$ )为一个数据块<sup>[8]</sup>。发送端发送完一个数据块发送确认请求,并且等待含有丢失数据包信息的确认消息返回,随即发送端根据丢失数据信息重新发送该数据包,并进行再次确认,完成发送。数据包批量确认机制流程如图 2 所示。

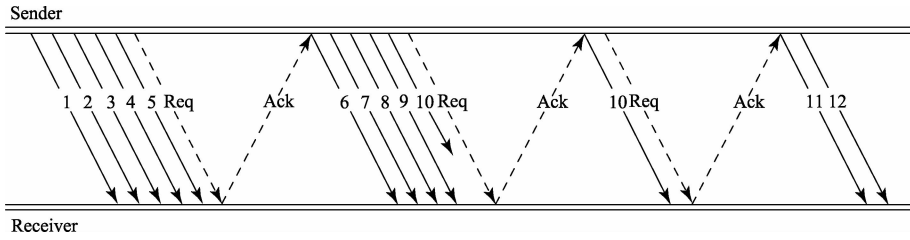


图2 数据包批量确认机制示意

### 3.3 优化拷贝次数机制

网络的主要性能之一就是数据吞吐量。通过对 TCP/IP 协议的实现过程进行分析可知<sup>[9]</sup>,缓冲区数据拷贝和校验和的计算是影响网络性能的两个最主要的因素。校验和的计算在协议的实现过程中不可避免,而通信路径中存在应用程序到系统内核、系统内核到网卡数据缓冲区、网卡驱动程序和网络协议之间、网络层对数据包进行分片及分片重组 4 种数据拷贝现象。因此提高 TCP/IP 网络协议传输速率的有效途径就是通过减少或消除如上所述的关键的通信路径中缓冲区数据拷贝过程,降低数据传输中的系统开销和协议处理开销。

对于一般 TCP/IP 协议栈的实现中,由于用户进程缓存和网络内核缓存结构的不同,用户应用程序中存放数据的缓冲区不适合于在数据传输过程中进行共享,故发送和接收数据都要经过用户进程缓存和网络内核缓存之间的数据拷贝,降低了数据传输效率。本协议采用共享缓存区的方法避免了用户进程缓存和网络内核缓存之间数据拷贝的过程。由于数据需要在网络协议中传输,原来的协议栈调用是把拷贝后放在网络内核缓存中的数据作为参数传递给下层协议的。缓冲区的共享就是利用网络协议内核缓存中的指针结构,即 Mbuf 指向 Mcluster 的指针,在各协议层中把需要发送的数据的地址作为参数进行传输。缓冲区共享机制如图 3 所示。

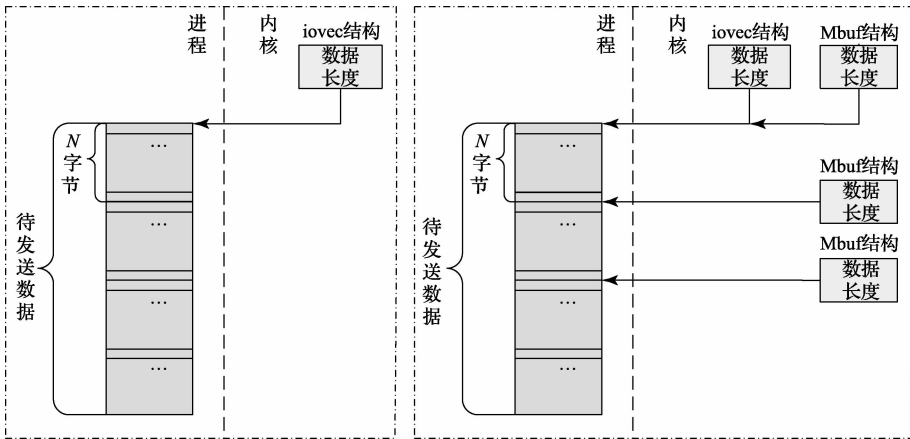


图3 改进的缓冲区共享机制

改进的缓冲区共享机制要求被发送的数据是页面对齐的,并且存放发送数据的缓存必须向系统申请。为了匹配该要求,系统初始化的空闲簇 Mcluster 和 Mbuf 应作如下改进:在已分配的 Mcluster 块中,使原协议中指向最大地址的指针 Mclfree 与指向最小地址的指针 Mbutl 同时指向 Mcluster 块的最小地址,低地址的 Mcluster 块通过指针 Mcl\_next 指向相邻的高地址的 Mcluster 块,如图 4 所示。待发送数据存放在用户程序从 Mclfree 所指向的空闲 Mcluster 链中选取的一段连续的 Mcluster 块组中。当数据发送完毕之后释放这些 Mcluster 块。修改系统调用函数,取消从用户发送数据缓存到网络协议内核缓存的拷贝,而是利用 Mbuf 指向外部簇 Mcluster 的指针来完成从该系统调用到下层协议的参数的传递。该方法的实现,减少了数据在网络中传输的开销,提高了网络协议传输速率的有效性,缩短了网络的输出时间。

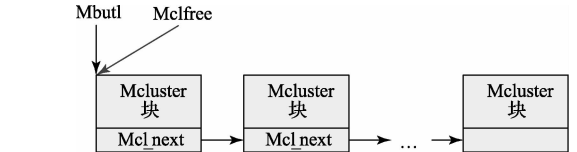


图4 改进的空闲 Mcluster 链

### 3.4 自适应的拥塞控制算法

目前在 Internet 上主要的传输层协议大都以 AIMD 拥塞控制算法为基础,本系统采用改进的 AIMD 算法<sup>[10]</sup>,结合流量控制算法,消除了 TCP 由于网络包峰值碰撞或瓶颈带来的带宽振荡,并且具有带宽使用的公平性。AIMD 的窗口调节机制算法用数学公式表示为:

$$I: W_{t+R} = W_t + \alpha, \alpha > 0;$$

$$D: W_{t+R} = \beta \times W_t, 0 < \beta < 1$$

式中:  $I$  表示加性增速算法,  $W_t$  为  $t$  时刻窗口的大小,  $R$  代表

回路响应时间  $RTT$ ,  $\alpha$  是加性增加因子;  $D$  表示乘性减速算法,  $\beta$  是乘性减少因子。

TCP 的发送速率公式如下:

$$S(\alpha, \beta) =$$

$$\frac{1}{R\sqrt{\frac{2bp(1-\beta)}{\alpha(1+\beta)}} + T_0 \text{MIN}\left(1, 3\sqrt{\frac{bp(1-\beta^2)}{2\alpha}}\right)p(1+32p^2)}$$

该式表达出了发送速率  $S$  与  $\alpha$ 、 $\beta$  的函数关系。其中  $R$  值是平均往返时延;  $p$  值是在假定该轮 (Round) 的第一个包或随后的包没有丢失的前提下的平均丢包率;  $T_0$  代表超时时限;  $b$  代表每个 ACK 确认的应答数据包个数。

由上式可以看到  $\alpha$  值得大小与拥塞窗口增速呈同相比例; 在遇到网络拥塞时,  $\beta$  值的大小发送窗口减小度呈反相比例。在传统 TCP 中采用的 AIMD 算法为  $\alpha=1, \beta=0.5$ 。此算法能较快速地使用网络中的有用资源, 但由于网络带宽是固定的, 当发送速率变快, 可用带宽就会变小, 导致拥塞, 而当网络拥塞程度加大时, 又能较为急剧地降低数据发送速率, 减弱网络拥塞, 致使其数据发送速率波动较大、平均发送速率不是很高, 可能会导致网络带宽的巨大振荡, 得不到优化使用, 另外, 当高速数据流变得越来越快, 系统不能得到公平性的平衡, 这已经成为了其主要缺陷。

为使网络能够达到多连接目的, 并快速、公平的达到最大带宽, 使传输带宽具有更好的稳定性, 系统提出一种

自适应的 AIMD 拥塞控制算法<sup>[11]</sup>, 该算法设计一个非递增阶梯性的加性增加因子  $\alpha(x)$  和一个自适应的乘性减小因子  $\beta(x)$ , 其中

$$\alpha(x) = 10^{\lceil \lg(B-x) \rceil} \cdot C$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{8}{9}\right)^n$$

式中:  $\lim_{x \rightarrow B} \alpha(x) = 0$ ,  $\lceil \lg(B-x) \rceil$  为向上取整,  $B$  为网络链路带宽,  $C$  为一个常量, 增速周期  $SYN$  为一个常量  $0.01s$ ,  $n$  为拥塞事件产生的  $M$  次丢包事件的  $1 \sim M$  均匀分布的随机数。

自适应的乘性减小因子  $\beta(x)$  由于  $n$  为与网络链路状态有关联性的标准随机化选择结果, 因此能更好的适用于避免网络带宽震荡的状况。同时, 对于偶然丢包状况设置了简易的检测机制: 如果第一个丢包并不判定为拥塞丢包, 如果持续丢包才判定为拥塞丢包, 这样就保证了算法不会因偶然丢包而降低发送速率。

阶梯性的加性增加因子  $\alpha(x)$  和自适应的乘性减小因子  $\beta(x)$  的相互配合, 就保证了当开始发送数据流速率很慢时, 速率会很快增长逼近网络可用带宽, 而当发送数据流速率较高导致链路带宽减少时, 它会缓慢增长, 防止带宽振荡。同时, 当检测到拥塞时则会缓慢降低发送速率, 对网络链路带宽的变动有一个缓慢的适应, 不至于产生振荡。

### 3.5 传输协议机制的实施流程

本文以数据输出为例, 实施流程如图 5 所示。

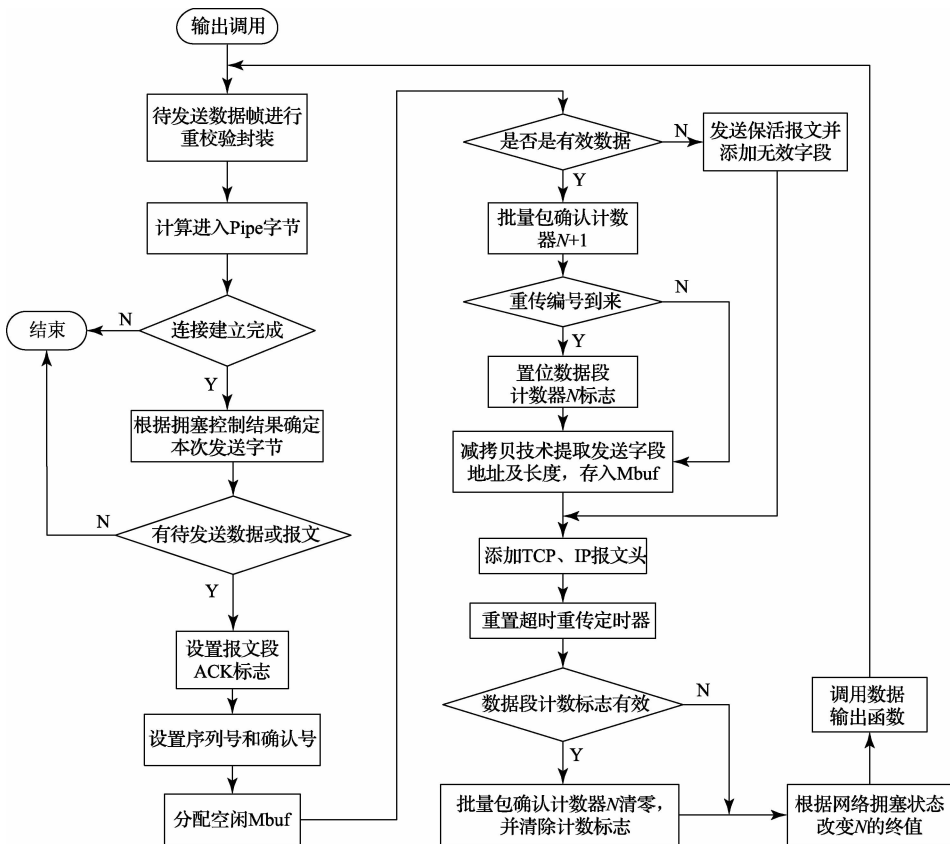


图 5 数据输出实施流程

系统首先对待发送数据段进行重校验封装,送入传输通道;根据接收窗口和拥塞窗口对待发送的字节数进行限制,并监测网络状态;对于数据的协议栈传送过程的拷贝,使用缓冲区共享,传递字段的地址及字段长度,节约了缓冲区占用空间及传输时间;使能批量包确认标志并计数,以确保批量确认机制的实施,最后调用数据输出协议栈函数进行字段输出。

#### 4 系统测试

使用 10 个地震采集传输控制道通过工业交换机与中央控制工控机连接,采用连续数据同步采集模式,采样点编码数  $K$  为 3(即为 24 位的采样精度),采样速率  $f$ 。采用 4 kHz 采集速率。地震数据采集完成后,针对使用原始的网络协议和优化的网络协议的对数据传输速度进行网络抓包测试,优化前后网络测速曲线对比如图 6 所示。

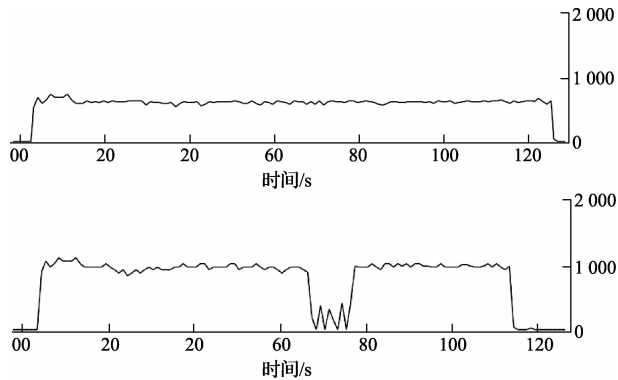


图 6 改进前后网络测速曲线对比

图中横坐标为以秒为单位的时间轴,纵坐标是以 kB/s 为单位的传输速度标尺。据图 6 所示,优化后的传输协议机制的网络传输速度约为 1 MB/s,较未优化网络传输速度提升度达 40%,曲线中间凹陷部分代表的是传输链路中断重连的过程,对重连后的网络传输速度几乎不产生影响,网络测速结果比较理想。

#### 5 结论

系统针对地震勘探海量地震数据的高效可靠稳定的数据传输问题,对传输系统硬件结构进行了简单的描述,并在成熟的 TCP/IP 协议的基础上,增加了帧重校验确认机制和优化确认重发机制以保证大数据量数据传输的可靠性;通过优化缓存拷贝次数机制和数据包批量确认机制,

提高系统数据传输效率;通过自适应的拥塞控制算法提高大数据量传输的稳定性,并进行了系统性能测试,实际运行结果表明,本文提出的改善方案在地震勘探传输系统中运行可靠稳定,数据传输速度和有效率满足系统需求,应用前景良好。

#### 参考文献

- [1] 张平安,周严.履带拖曳式陆用地震勘探数据采集系统[J].电子测量技术,2014,37(5):116-120.
- [2] 江贤志,刘华章,张教育,等.基于 C8051F020 单片机的 RS485 串行通信设计[J].电子测量技术,2014,37(3):121-124.
- [3] 李成,王鹏,丁天怀,等.RS485 总线的高速串行远距离数据传输方法[J].清华大学学报:自然科学版,2009,49(5):684-687.
- [4] 卢亚普,伍红成,陈强,等.用以太网实现对 Elgar 电源的控制[J].电子测量技术,2014,37(3):134-137.
- [5] 李彦,李镔.基于嵌入式 Linux 系统的双网卡大数据传输[J].电子测量与仪器学报,2014,28(9):1027-1032.
- [6] 雷恒伟.高速多通道大容量数据采集与传输系统研究[J].国外电子测量技术,2013,32(7):34-37.
- [7] 王兵,武杰,孔阳,等.数字传感网络的高速数据传输协议设计[J].仪器仪表学报,2010,31(7):1644-1649.
- [8] LEI Z, QIWEI S, CHUN W, et al. Block Data Transfer protocol for communication over high-speed long-distance networks [C]. Information and Communications Technology 2013, National Doctoral Academic Forum on IET, 2013: 1-5.
- [9] 鲁力,张波.嵌入式 TCP/IP 协议的高速电网络数据采集系统[J].仪器仪表学报,2009,30(2):405-409.
- [10] 陈琳,双雪芹. TCP 网络拥塞控制算法比较研究[J].长江大学学报自然科学版(理工卷),2010(1):60-62.
- [11] 刘清,葛万成.混合网络下的 TCP 拥塞控制跨层优化算法[J].信息技术,2014,38(2):36-40.

#### 作者简介

于连河,1988 年出生,在读硕士研究生。主要研究方向为嵌入式开发和以太网数据传输的研究。

E-mail:dream\_yuer@sina.cn