

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.016

# 基于 Netty 和 Marshalling 的青饲机工况远程监测系统研究

毛文华<sup>1</sup> 韩少云<sup>1</sup> 赵 博<sup>1</sup> 王丽丽<sup>1</sup> 汪凤珠<sup>1</sup> 汪 洋<sup>2</sup>

(1. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083;  
2. 中机华丰(北京)科技有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 针对青饲机工况信息数据的采样频率、并发量不断增大时,会造成 I/O 速度降低和数据丢包率上升等问题,研究了车载终端与云服务的数据通信协议和长字符串编解码方法,分析了 Netty 框架和传统 NIO 框架对并发量的影响,比较分析了 Java 序列化、Protobuf 和 Marshalling 等 3 种编解码方法,提出数据采集、数据传输、Web 应用三者分开的技术方案,设计了基于 CAN 总线技术、Netty 自定义通信协议的青饲机工况信息远程监测系统。模拟试验结果表明,在 500 ms 发送周期下,本系统比传统的数据采集系统在并发总量上提高了 0.8 倍;在 200、100、50 ms 发送周期下,采用 Marshalling 的系统性能比采用 Java 序列化的系统,在 I/O 速度上分别提高 0.4、3.9、1.5 倍。田间试验结果表明,系统运行平稳,具有很好的稳定性和可靠性。对青饲机主要部件的工况数据统计分析表明,数据对工况诊断具有参考性,系统基本满足对青饲机主要部件工况的监测需求。该系统能够在高频次、高并发量下提高 I/O 速度,保证稳定的数据接入量。

**关键词:** 青饲机; 信息化; 智能监测; Netty; Marshalling; 自定义通信协议

中图分类号: TP277; S817.1      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2020)08-0145-07      **OSID:** 

## Study of Remote Monitoring System for Silage Harvester Working Condition Based on Netty and Marshalling

MAO Wenhua<sup>1</sup> HAN Shaoyun<sup>1</sup> ZHAO Bo<sup>1</sup> WANG Lili<sup>1</sup> WANG Fengzhu<sup>1</sup> WANG Yang<sup>2</sup>

(1. *The State Key Laboratory of Soil - Plant - Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China*  
2. *MAE Wellful Industries Co., Ltd., Beijing 100083, China*)

**Abstract:** The problems of decrease in I/O speed and increase in data packet loss rate were caused by the increase of sampling frequency and concurrency of information data under the working condition of the silage harvester. Therefore, the data communication protocol and long string Codec methods of the vehicle terminals and cloud services were studied, the impact of Netty framework and traditional NIO framework on concurrency was analyzed, and three Codec methods such as Java serialization, Protobuf and Marshalling were compared and analyzed. The technical schemes of data collection, data transmission and Web application were put forward separately, and a remote monitoring system for working condition information of silage harvester was designed by use of CAN technology and Netty custom communication protocol. The simulation test showed that the system had a 0.8 times increase in concurrency, compared with the traditional data acquisition system, under the sending cycle of 500 ms. At 200 ms, 100 ms, and 50 ms transmission frequencies, the I/O speed of using Marshalling code was increased by 0.4 times, 3.9 times and 1.5 times compared with Java serialization, respectively. The 15 days of continuous field trials showed that the system run smoothly with good stability and reliability. The statistical analysis of the working condition data from the main components of the silage harvester showed that the data can be reference to the diagnosis of the working condition, and the system basically met the monitoring requirements of main components of silage harvester. The developed system can increase the I/O speed and ensure stable data access volume at high frequency and high concurrency. It had a great significance to promote the informatization and intelligent development of silage harvester mechanical equipment.

**Key words:** silage harvester; informatization; intelligent monitoring; Netty; Marshalling; custom communication protocol

0 引言

联合收获机作业环境复杂,连续作业时间长,负荷大,作业故障率高<sup>[1-4]</sup>。实时准确获取联合收获机主要工作部件信息,对提高农机作业品质和经济效益具有重要意义。目前,我国联合收获机多数产品存在产品同质化严重、竞争力不强、信息化水平相对落后、故障率高等问题。《全国农业机械化发展第十三个五年规划》明确指出,实施“互联网+”农业机械化,加快机械化信息化融合,支持在联合收获机、深松机等重点机具上装配智能信息装备。提升联合收获机信息收集、智能决策和精准作业能力,促进我国由农机制造大国向强国转变<sup>[1]</sup>。国外关于联合收获机的研究和应用较早,软硬件技术和产品相对成熟,已将人工智能、物联网等新技术运用到联合收获机的开发中,推出了一些信息化、智能化的产品。如美国 John Deere (约翰迪尔) 公司研发的 Harvest Smart 智能喂入量控制系统与 GreenStar2 Harvest Doc 产量监控系统,实现了联合收获机生产效率最大化,通过农业生产管理系统(AMS)实现高效率、高品质的精准收获<sup>[5-7]</sup>。英国福格森公司开发的 FieldStar 系统具有强大的系统诊断功能,用户利用诊断工具实现故障原因的快速查找<sup>[8]</sup>。

我国对联合收获机的智能化研究起步较晚,文献[2]指出,信息技术是提升中国农业机械化水平的核心。现有研究<sup>[2,9-12]</sup>大多数系统是针对单车作业,其中信息采集、处理、分析都由车载终端完成。随着全国大型农场数量的增加,车载终端的应用规模不断扩大,在作业季,车载终端向服务器高频次发送的数据量也急剧增加。在农机集群作业时,数据的采样频率与车载终端的并发量远高于单机作业,在这种情况下保证系统性能的可靠性和稳定性是急需解决的问题。传统的数据采集服务系统采用 NIO(Non-blocked IO) 框架<sup>[14-15]</sup>实现,NIO 线程模型是同步非堵塞,在作业的间隙,如果大量待机状态的车载终端依然和服务器保持同步数据连接状态,则会出现 epoll(一种 I/O 多路复用技术) bug 导致 Selector(选择器)空轮询<sup>[16]</sup>,大量的空轮询将占用宝贵的线程资源,使 CPU 一直处于高负荷状态。

本文设计一种基于 Netty<sup>[17-18]</sup>和 Marshalling 的青饲机工况远程监测系统,借助网络应用程序框架 Netty 的异步非堵塞<sup>[19]</sup>、事件驱动等特性,并结合自定义通信协议和 Marshalling 编解码方法,进一步提高监测系统的高并发处理能力和系统稳定性。

1 系统设计与构建

1.1 系统总体设计

青饲机工况远程监测系统利用 CAN 总线技术、Netty 的 Socket 自定义通信协议、Marshalling 编解码方法,实现多机协同作业的工况信息监测。系统将物联网、互联网通信开发框架(Netty)、第三方的编解码方式(Marshalling)等技术进行深度融合,将青饲机的数据采集、数据传输、Web 应用三者剥离开,实现工况数据的高频率采集、可靠性网络传输和信息的高效管理。对集群节点的消息进行分区管理,降低节点间的耦合度,实现信息的高效管理。系统采用 4 层架构,主要包括感知层、网络层、中间层和应用层,系统总体架构如图 1 所示。

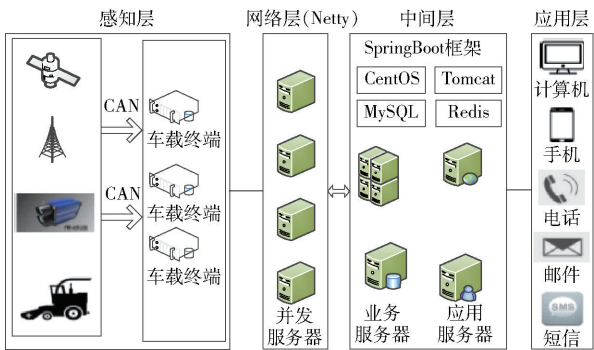


图 1 系统总体架构  
Fig. 1 Overall system architecture

1.2 监测系统硬件构成

系统硬件主要包括传感器、车载终端、云服务器 3 部分,如图 2 所示。青饲机上安装的传感器类型主要有扭矩、转速、定位和位移等传感器,扭矩传感器采集的参数主要有切碎辊扭矩、割台扭矩等;转速传感器采集的参数主要有上下喂入辊转速、风机转速、切碎辊转速、籽粒破碎辊转速、割台转速、发动机转速、切碎辊转速、籽粒破碎辊转速、割台转速、发动机

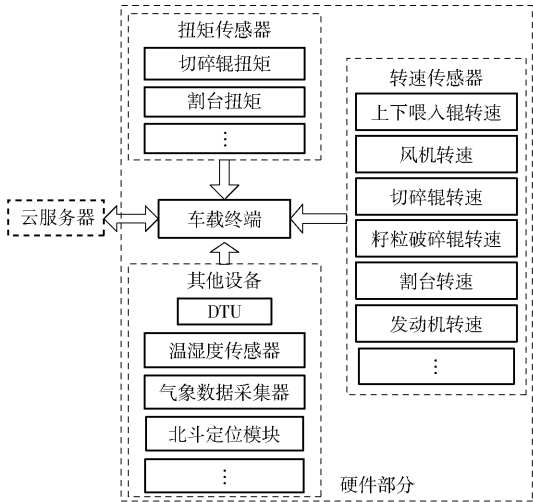


图 2 系统硬件组成  
Fig. 2 Hardware composition of system

转速等;位移传感器采集的参数主要有上下喂入辊位移、割台液压缸伸长量、喂入辊开度等;其他参数还包括北斗定位模块采集的经度和纬度、发动机油耗、液压马达压力、作物含水率、气象数据和田块信息等。

1.3 监测系统软件构成

1.3.1 车载终端系统

车载终端系统基于 LabVIEW 平台开发,主要具备青饲机工况信息采集、数据预处理、数据传输和信息实时显示等功能。

(1)数据采集

数据采集模块的控制器为工业平板电脑(PPC DL104E 型,SSD 64 GB,DDR3 2 GB),其通过 CAN 总线实现与各种传感器之间的数据传输。显示器采用 8 英寸高亮度 TFT 显示屏,带有蜂鸣器,在强光下仍然可以清晰显示工况数据。通过 DTU 实现与云服务器之间的无线数据传输。所采集的青饲机工况数据主要有车速、经纬度、割台扭矩、割台转速、时间、燃油量等 29 项,系统作业数据如表 1 所示。

表 1 系统作业数据  
Tab.1 System operation information

| 信号名称     | 数据库字段名           | 数据样例           | 注释              |
|----------|------------------|----------------|-----------------|
| 设备号      | eid              | 10359740396    |                 |
| 是否定位成功标志 | location_status  | A              | A 成功、V 失败       |
| 日期       | g_date           | 190925         | 2019 年 9 月 25 日 |
| 时间       | g_time           | 071801         | 7 时 18 分 1 秒    |
| 纬度       | g_latitude       | 3 601. 009 76  | (°)             |
| 经度       | g_longitude      | 11 933. 463 88 | (°)             |
| 速度       | g_speed          | 8. 965         | km/h            |
| 割台外侧转速   | header1_speed    | 3. 666 667     | r/s             |
| 割台外侧扭矩   | header1_torque   | 10 080         | N·m             |
| 割台内侧转速   | header2_speed    | 3. 688 867     | r/s             |
| 割台内侧扭矩   | header2_torque   | 10 075         | N·m             |
| ⋮        | ⋮                | ⋮              | ⋮               |
| 发动机转速    | engine_speed     | 1 769. 5       | r/s             |
| 发动机扭矩    | engine_torque    | 384. 71        | N·m             |
| 燃油量      | fuel_consumption | 14. 1          | L/h             |

(2)数据预处理

青饲机结构复杂、传感器多样,数据格式和采样频率差异大,所以在 一个数据采集的周期内,有些传感参数值浮动较大,且有乱码的异常情况,需对数据采用归一化、平均值、最大值、字符校正等处理方法进行标准化处理。例如:由于青饲机作业所产生的电磁波有时会影响定位信号,导致定位模块的经纬度产生乱码,一旦发现乱码则采用最近邻点的正常数据作为此次的数据。同一个周期  $T$  内,割台扭矩

取最大值,割台转速取均值。

(3)数据处理与显示

车载终端对传感器采集的电压、电流、频率等脉冲信号进行加工处理,变成统一的数字格式,并将这 29 个信号进行排序、分析校验、保存后,通过串口发送给数据传输模块。车载终端安装在青饲机驾驶室内的右侧梁上,如图 3 所示。所采集的青饲机实时工况信息在车载终端屏上以图表的形式显示,为驾驶员提供实时参考,如图 4 所示。



图 3 车载终端的安装位置

Fig. 3 Installation location of vehicle terminal



图 4 车载终端的主监控图

Fig. 4 Master monitor diagram of vehicle terminal

(4)数据传输

为了保证数据无线传输的稳定性,本文采用 USR - G780 型 4G LTE DTU 作为传输工具,在 USR - G780 v2. 0. 1 调试软件中配置如下参数:波特率为 38 400、连接服务器的 IP 地址和端口号、连接类型为 TCP 长连接。针对长时间没有数据传输的通信状态下,形成 CPU 空轮询的问题,Netty 框架下的心跳机制可以有效解决上述问题,提高 CPU 的利用率。

1.3.2 云端系统

云端系统采用嵌入式操作系统 (CentOS7),并搭建数据存储服务器系统和业务逻辑处理系统。

(1)数据库

青饲机信息存储的高并发:青饲机集群作业时,每台车载终端都向云服务器发送所采集的工况信息,形成高频率、高并发的数据,云服务器要进行可靠高效的数据存储。因此,系统使用 MySQL 数据库,并用 MyBatis 持久层框架对数据库映射,实现车载终端和云服务器的可靠性通信。

用户访问量的高并发:青饲机集群作业时,会有大量的用户访问服务器,对业务逻辑的处理也会形成高并发量。因此,使用 Redis 数据库解决用户高访问问题。Redis 采用 NoSQL 技术,是一种基于内存的数据库,将用户操作频率高的数据直接存到内存中,提高数据读写性能,有效提升系统对业务逻辑数据的处理速度。

(2) Web 管理系统

云端数据分析系统采用基于 SpringBoot 框架开发的 Web 服务器,包括表现层、业务逻辑层、持久层 3 层架构。为了缓解青饲机车载终端数据采集系统的压力,提高数据运算的能力,系统将 Web 应用都在云服务器上完成,服务器把数据处理分析结果实时推送给客户端和车载终端,实现车载终端、云端、客户端的数据共享、任务协同。

系统后台管理员通过数据库管理工具( Navicat Premium)直接对云服务器中的数据进行操作。开发者可以管理数据,运用机器学习、AI 等各种方式进行数据处理和分析。

2 传输协议和编解码方法设计

为满足青饲机车载终端与云端传输中对通信服务器高并发、高性能、高可靠性的要求,设计了基于 Netty 框架的 Socket 通信协议,实现车载终端和云服务器的全双工数据通信。

Codec(编解码器)有两个组成部分:Decoder(解码器)和 Encoder(编码器)。Encoder 负责把业务数据转换成字节码数据,Decoder 负责把字节码数据转换成业务数据。Netty 本身带有 Java 序列化方法,该方法可以作为 Codec 使用,但存在无法跨语言、序列化后的体积太大(是二进制编码的 5 倍多)、序列化性能太低等缺点。而 Netty 本身提供 Codec 的同时也支持第三方 Codec。因此,针对青饲机工况信息采集的长字符串,对比研究了 Java 序列化、Protobuf 和 Marhsalling 等 3 种编解码方法对系统性能的影响,优选系统的编解码方法。

2.1 基于 Netty 框架的网络通信协议设计

Netty 是一个异步事件驱动的网络应用程序框架,支持 TCP 长连接,支持快速、简单地开发协议服务器和客户端等<sup>[20]</sup>。Netty 实现对 NIO 的封装,比传统的 NIO 具有更好的并发性。

(1) 提高并发性

Netty 是异步非阻塞,先声明 bossGroup 和 workerGroup 两个线程池:

```
EventLoopGroup bossGroup = new NioEventLoopGroup();
```

```
EventLoopGroup workerGroup = new NioEventLoopGroup();
```

bossGroup(业务线程池)负责车载终端与云服务器之间的连接,用来处理 TCP 连接请求,workerGroup(I/O 线程池)用来处理 I/O 事件。使用线程池解决了线程阻塞的情况。因为 CPU 的速度是网络速度的  $1 \times 10^5$  倍以上,所以 bossGroup 中的一个线程就能解决  $N$  个客户端连接服务器的操作(理论上)。在服务器满负荷的情况下,若并发量不断增大,系统容易出现数据丢包问题。workerGroup 将溢出的数据先缓存在消息队列,再依次 I/O 处理,可提高通信的并发性、稳定性。

(2) 提高 I/O 速度

Netty 通过对 Socket 读写零拷贝模式,使 I/O 速度得到有效提高。通过 DefaultFileRegion 方法中的 transferTo() 函数,直接使用内存 ByteBuffer(字节缓冲区)进行收发操作,避免使用 JVM(Java virtual machine,Java 虚拟机)的堆内存进行 Socket 收发,也就避免了一次堆内存和直接内存的拷贝过程。直接在内核空间完成数据操作,不消耗 CPU 资源来控制数据拷贝。

2.2 Protobuf 编解码

Protobuf 全称 Google Protocol Buffers,由谷歌开源而来,是一个灵活、高效、结构化的数据序列化框架。它将数据结构以 .proto 文件进行描述,通过代码生成工具可以生成对应数据结构的 POJO 对象和 Protobuf 相关的方法和属性,其具有结构化数据存储格式(XML、JSON 等)、编解码性能高效、扩展性好等特点。

2.3 Marhsalling 编解码

Marhsalling 是 JBoss(一种 Web 服务器)内部使用的序列化框架,是 Java 对象序列化包,对 JDK 默认的序列化框架进行了优化,但又保持与 java.io.Serializable 接口的兼容性,同时增加了一些可调参数和附加特性,这些参数和特性需要通过工厂类进行配置。

每个新的 Channel(通道),都会创建一个新的 ChannelPipeline(链),ChannelPipeline 链是 ChannelHandler(接口)实例对象的链表,用于处理或截获通道的接收和发送数据。ChannelPipeline 链式操作的过程如图 5 所示,主要负责消息的读取、解码、处理、编码、发送。

Marhsalling 解决了 Java 本身序列化造成的后字节码流太大,以及序列化程度太低等问题。用 MarhsallingDecoder()方法对一个长字符串数据进行解码,用 MarhsallingEncoder()方法代替 Java 序列化

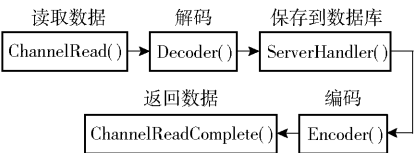


图5 链式操作流程图

Fig. 5 Chain operation flowchart

的StringDecoder() (字符串解码器)和StringEncoder() (字符串编码器)方法。

3 测试与分析

系统测试包括两部分：编写测试用例进行系统压力测试和青饲机实际田间作业测试。

服务器配置为：1核CPU, 2GB内存, CentOS 7.3 64位操作系统, 1Mb/s带宽, 40GB硬盘容量, 青饲机车载终端发送一个TCP通信的字符串长度为182。

3.1 系统压力测试

(1)使用for循环开启2000个模拟的车载终端,新的车载终端向服务器发起连接请求并发送数据,每个车载终端发送周期 $T$ 为500ms,每个车载终端发送1000次,编写ConnectionCountHandler()函数统计服务器连接车载终端的数量,记录模拟周期(50s)内最大统计值。进行20次试验取平均值,基于NIO开发的系统最大青饲机并发总量为972台,以Netty框架为底层,分别采用Java序列化、Protobuf和Marshalling编解方法开发的系统最大青饲机并发总量分别为1811、1811、1813台。试验结果表明,基于Netty框架下采用不同的编解码方法,对并发总量影响较小;基于Netty的系统比基于NIO的系统在并发总量上提高了0.8倍左右。

(2)为了验证不同编解码方法对青饲机工况数据I/O速度的影响,模拟50个车载终端,每个车载终端发送周期为 $T$ ,每个车载终端发送1000次,分别采用Java序列化、Protobuf和Marshalling3种编解码方法进行对比试验,通过每秒TCP的接入量(数据库存储TCP数量)来衡量I/O速度。 $T$ 设置了5组,分别为600、400、200、100、50ms。

每组模拟发送50000条数据,统计数据库中每组保存成功的TCP总数,试验结果如图6所示。试验结果表明,在传输频率不断增加的情况下,Java序列化和Protobuf数据库接入的TCP总数基本呈下降趋势,采用Marshalling方法的青饲机工况监测系统在TCP接入量上基本保持稳定。

统计每次试验中数据库接入的TCP总数和花费总时间(s),计算每秒TCP的接入数,试验结果如图7所示。试验结果表明,在发送频率不断增加的

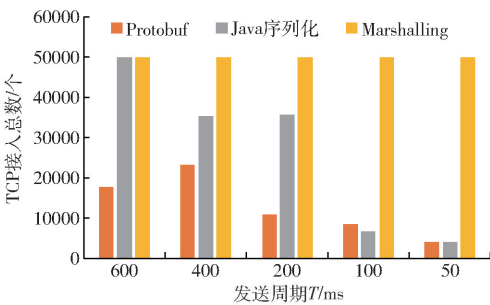


图6 每组TCP接入总数

Fig. 6 Total number of TCP access per group

情况下,数据库中每秒存储成功的TCP总数不断增大,且传输频率越高,Marshalling方法的优势越明显。在200、100、50ms发送周期下,每秒存储成功的TCP总数分别提高了0.4、3.9、1.5倍,数据I/O速度也相应提高。

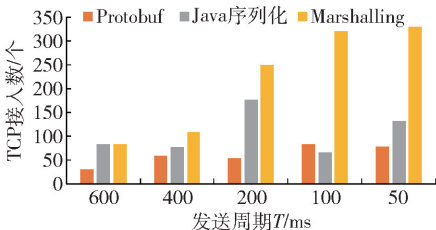


图7 每秒TCP接入数

Fig. 7 TCP access per second

3.2 系统田间性能测试

2019年9月,以五征集团生产的4QZ-350型自走式青饲料收获机为试验样机进行青贮饲料收获试验。试验时,车载终端数据的发送周期为400ms,数据字符串长度为182。青饲机连续作业15d,共产生 $1 \times 10^6$ 条数据。在割台为中速挡位时,青饲机工作中的车速、割台外侧转速和扭矩的数据分析如图8所示。由数据id 175320~175626所记录的主要部件参数数据可知,青饲机在田间开始作业时,割台先于机器启动,割台转速先于车速由零上升至作业转速4.5r/s;青饲机在田间正常作业时,割台转速和扭矩在一个范围内上下波动;青饲机在田间停止作业时,先停车再停割台,车速先于割台转速降为

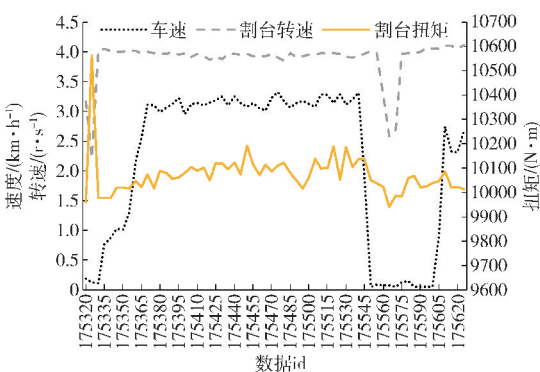


图8 部分数据变化情况

Fig. 8 Partial data change diagram

零。图8说明青饲机上的传感器能正常工作,达到了系统预期的目标。

为了进一步验证青饲机工况远程监测系统中数据的可靠性,用统计学的方法单独对参数中的割台转速进行数据验证分析。割台高档位时转速工况如图9所示。由图9可知,选择数据id 300846 ~ 300930的记录进行分析,运用总体标准偏差方程计算出控制上限和控制下限,工作中转速在稳定数值

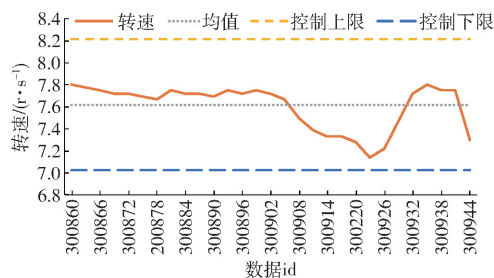


图9 割台转速变化曲线

Fig.9 Chart of cutting table speed

区间内,也进一步验证了系统采集数据的可靠性。

## 4 结论

(1)设计的青饲机工况远程监测系统将数据传输、Web应用从车载终端系统中剥离,减轻了车载终端系统对数据处理的压力,增加了系统稳定性与可靠性。

(2)通过采用第三方 Marshalling 编解码方法和 Netty 框架对系统进行优化,解决了在并发量和数据量突然增大时 I/O 速度降低的问题。发送周期为 500 ms,基于 Netty 的系统比 NIO 的系统在并发量总量上提高了 0.8 倍;发送周期为 200、100、50 ms,采用 Marshalling 的系统性能比 Java 序列化方法的系统在 I/O 速度上分别提高了 0.4、3.9、1.5 倍。

(3)青饲机工况远程监测系统移植了目前互联网流行的 Netty 网络通信框架,降低了软件开发的耦合度;采用通用接口设计,增强了系统可移植性。

## 参 考 文 献

- [1] 杜岳峰,傅生辉,毛恩荣,等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):1-17.  
DU Yuefeng, FU Shenghui, MAO Enrong, et al. Development situation and prospects of intelligent design for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 1-17. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190901&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190901&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.001. (in Chinese)
- [2] 罗锡文,廖娟,邹湘军,等. 信息技术提升农业机械化水平[J]. 农业工程学报,2016,32(20):1-14.  
LUO Xiwen, LIAO Juan, ZOU Xiangjun, et al. Enhancing agricultural mechanization level through information technology[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 1-14. (in Chinese)
- [3] 介战,刘红俊,侯风云. 中国精准农业联合收割机研究现状与前景展望[J]. 农业工程学报,2005,21(2):179-182.  
JIE Zhan, LIU Hongjun, HOU Fengyun. Research advances and prospects of combine on precision agriculture in China[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 179-182. (in Chinese)
- [4] 陈进,吕世杰,李耀明,等. 基于 PLC 的联合收获机作业流程故障诊断方法研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):112-116,121.  
CHEN Jin, LÜ Shijie, LI Yaoming, et al. Fault diagnosis of combine harvester based on PLC [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 112-116, 121. (in Chinese)
- [5] CHANDRAJITH U G, GUNATHILAKE D M C C, BANDARA B D M P, et al. Effects of combine harvesting on head rice yield and chaff content of long and short grain paddy harvest in Sri Lanka[J]. Procedia Food Science, 2016, 6: 242-245.
- [6] HASSANI H S, JAFARI A, MOHTASEBI S S, et al. Investigation on grain losses of the JD 1165 combine harvester equipped with variable pulley and belt for forward travel[J]. American Journal of Food Technology, 2011, 6(4):314-321.
- [7] 李哲. 联合收割机远程监测平台及故障分析研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.  
LI Zhe. Study on remote monitoring platform and fault analysis of combine harvester [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [8] 高飞. 联合收割机主要工作部件监测装置研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.  
GAO Fei. Research on monitoring device of main working parts of combine harvester [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [9] 陈进,杨广静,徐凯,等. 基于 ARM 的联合收割机远程监测系统设计[J]. 电子科技, 2016, 29(1): 131-135, 141.  
CHEN Jin, YANG Guangjing, XU Kai, et al. Design of remote monitoring system for combine harvester based on ARM [J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(1): 131-135, 141. (in Chinese)
- [10] 陈进,王学磊,王一帆. 基于 Android 手机的联合收获机主要部件工况监测系统[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):203-207.  
CHEN Jin, WANG Xuelei, WANG Yifan. Main components working condition monitoring system of union harvester based on Android mobile phone [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 203-207. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s031&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s031&journal_id=jcsam). DOI:

- 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.031. (in Chinese)
- [11] 李新成,李民赞,王锡九,等. 谷物联合收割机远程测产系统开发及降噪试验[J]. 农业工程学报,2014,30(2):1-8.  
LI Xincheng, LI Minzan, WANG Xijiu, et al. Development and denoising test of grain combine with remote yield monitoring system[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 1-8. (in Chinese)
- [12] 马志艳,余昌舜,杨磊,等. 基于LabVIEW的联合收割机远程作业数据采集系统[J]. 中国农机化学报,2019,40(2):135-139.  
MA Zhiyan, YU Changshun, YANG Lei, et al. Remote operation data acquisition system of combine harvester based on LabVIEW [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 135-139. (in Chinese)
- [13] 刘阳春,苑严伟,张俊宁,等. 深松作业远程管理系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):43-48.  
LIU Yangchun, YUAN Yanwei, ZHANG Junning, et al. Design and experiment of remote management system for subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 43-48. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2016s007&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s007&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.007. (in Chinese)
- [14] GEOFFREY F. High-performance file I/O in Java: existing approaches and bulk I/O extensions[J]. Concurrency and Computation Practice and Experience, 2010, 13(8-9): 713-736.
- [15] AWAN A A, AYUB M S, SHAFI A, et al. Towards efficient support for parallel I/O in Java HPC[C]//International Conference on Parallel and Distributed Computing. IEEE, 2012: 137-143.
- [16] 顾振德,刘子辰,龙隆,等. 基于Netty的IoT终端通信服务系统设计[J]. 计算机应用与软件,2019,36(4):135-139.  
GU Zhende, LIU Zichen, LONG Long, et al. Design of IoT terminal communication service system based on Netty[J]. Computer Application and Software, 2019, 36(4): 135-139. (in Chinese)
- [17] 李林峰. Netty权威指南[M]. 北京:电子工业出版社,2014:11-45.
- [18] 李培殿. 基于Netty框架的性能测试系统的设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2019.  
LI Peidian. Design and implementation of performance test system based on Netty framework[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [19] ZHANG S H, ZHU S N. Server structure based on netty framework for internet-based laboratory[C]//IEEE International Conference on Control and Automation. IEEE, Hangzhou, China, 2013: 538-541.
- [20] 苏锦. 基于Netty的高性能RPC服务器的研究与实现[D]. 南京:南京邮电大学,2018.  
SU Jin. Research and implementation of high performance RPC server based on Netty[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)

(上接第125页)

- [22] 彭俊杰. 间接式质量流量测量中的技术问题[J]. 航空计测技术,1994,14(1):20-22.  
PENG Junjie. Technical problems about indirect mass flow measurement[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 1994, 14(1): 20-22. (in Chinese)
- [23] 茆康前. 茶园防霜风机叶型优化设计与性能试验篇[D]. 镇江:江苏大学,2013.
- [24] 韩占忠. Fluent:流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009.
- [25] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part II: Validation for different sprayer types[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2): 137-147.
- [26] 吴崇友,丁为民,石磊,等. 油菜分段收获捡拾脱粒机捡拾损失响应面分析[J]. 农业机械学报,2011,42(8):89-93.  
WU Chongyou, DING Weimin, SHI Lei, et al. Response surface analysis of pickup losses in two-stage harvesting for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 89-93. (in Chinese)
- [27] 杜哲,胡永光,王升. 便携式采茶机切割器运动仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):221-226.  
DU Zhe, HU Yongguang, WANG Sheng. Simulation and experiment of reciprocating cutter kinematic of portable tea picking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 48(Supp.): 221-226. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s029&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s029&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.029. (in Chinese)
- [28] 程演演,祁力钧,吴亚奎,等. 矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):22-29.  
CHENG Zhenzhen, QI Lijun, WU Yalei, et al. Parameter optimization on swing variable sprayer of orchard based on RSM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 22-29. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2017s004&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s004&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004. (in Chinese)