

doi: 10.7690/bgzdh.2020.12.013

基于 ZigBee 的加油机输油管收放试验模拟系统

车兵辉, 张 鹏, 尹欣繁

(中国空气动力研究与发展中心低速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为在风洞中模拟空中加油机收放油管过程, 评估加油管和锥套的安全性, 根据试验任务的要求研制加油管收放模拟系统。给出收放系统的设计与实现, 介绍基于 Zigbee 无线控制的收放系统硬件组成和软件设计。详细论述系统中 Zigbee 无线网络的组网及 ModbusRTU 通信协议等关键技术的设计与实现。结果表明: 该系统结构简单, 性能稳定可靠, 满足试验要求, 能解决风洞中加油管收放模拟问题。

关键词: ZigBee; 加油机; 模拟系统

中图分类号: V211.73 **文献标志码:** A

Simulation System of Test of Tanker Aircraft Refueling Pipeline Retracting and Releasing Based on ZigBee

Che Binghui, Zhang Peng, Yin Xinfan

(Low Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to simulate the process of pipeline retracting and releasing of refueling aircraft in the wind tunnel, evaluate the safety of the pipeline and cone sleeve. According to the test requirements, developed the simulation system of the refueling pipeline. Presents the design and implementation of the system, introduces the hardware composition and software design of the retracting and releasing control system based on ZigBee. The design and implementation of Zigbee wireless network and ModbusRTU communication protocol are discussed in detail. The results show that the system has simple structure, stable and reliable performance, meets the test requirements. The system can realize simulation of pipeline retracting and releasing in wind tunnel.

Keywords: ZigBee; tanker aircraft; simulation system

0 引言

空中加油可以加大飞机作战半径, 有效提高飞机作战效能。软管-锥管式空中加油是目前世界上应用最广泛的空中加油方式^[1]。在进行软式空中加油时, 首先需要将空中加油软管和锥套从加油吊舱的尾部拖曳至全拖曳位置, 然后受油机和加油锥套进行对接和空中加油, 最后需要将空中加油软管及锥套回绕至加油吊舱内^[2]。在整个加油过程中, 软管和锥套会在加油机尾流场的影响下出现摆动。在软管和锥套的回绕过程中, 尤其是靠近机身时, 软管和锥套的摆动, 会使锥套和机身或发动机舱发生碰撞, 影响锥套安全性^[3]。

在加油软管锥套稳定性研究中, 国外主要采用数值模拟和实验手段。在数值计算中多采用加油机尾流场模型以及软管锥套的动力学模型相结合的模拟方法。采用飞机实物飞行试验直接验证软管锥套稳定性。国内加油软管锥套稳定性研究开展较晚^[4], 主要采用数值计算和飞行试验进行研究, 数值模拟

无法保证准确性, 飞行试验成本高、风险大; 因此, 在风洞中模拟软管收放过程, 探究和评估输油管收放过程稳定性, 对空中加油安全性评估具有十分重要的意义。2017年, 中国空气动力研究与发展中心低速所在国内首次开展加油软管锥套稳定性风洞试验, 采用航模舵机驱动绕线盘, 通过遥控器控制舵机旋转实现加油软管的收放模拟。该套系统只能定性地模拟软管收放过程, 无法精确模拟收放的速度和长度^[5]。

笔者设计一种基于 Zigbee 的无线通信的输油管收放系统, 通过计算机控制, 能够精确模拟软管锥套收放过程的速度和长度, 定量研究软管锥套在各种速度、长度等参数下的稳定性。

1 系统总体设计

输油管收放系统是风洞中模拟空中加油过程的关键试验设备, 根据试验要求, 收放系统必须满足以下条件:

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-08-30

作者简介: 车兵辉(1982—), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 从事风洞试验测控技术研究与应用研究。E-mail: che1982@163.com。

- 1) 收放系统锥套阻力大于 3 kg, 确保试验过程中油管顺利收放;
- 2) 最大收放速度不低于 1.32 m/s;
- 3) 能够实现油管收放无级变速, 收放速度控制精度不小于 0.1 m/s;
- 4) 确保 2 套收放机构能够安装于模型内部, 互不干扰, 独立控制;
- 5) 系统采用无线控制方式, 减少线缆连接, 使用简单方便。

输油管收放模拟系统, 通过洞外控制部分控制模型内部执行机构, 实现输油软管的收放。为便于使用, 系统采用无线控制的方式实现, 主要由驱动部件、绞盘和控制系统等部件组成, 原理如图 1 所示, 主要功能包括加油前软管的拖曳和加油结束后软管的回绕等。

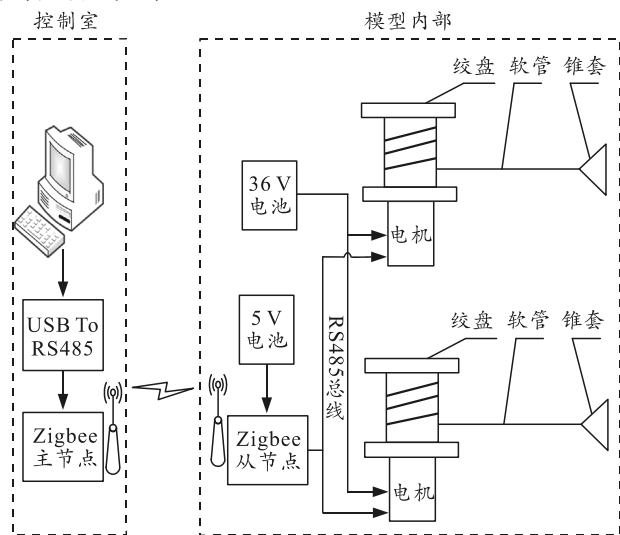


图 1 系统总体方案

系统主要由模型内部和洞外部分组成。洞外部分由计算机通过无线终端, 输出控制信号给无线信号发射器, 无线信号发射器对控制信号进行编码, 通过无线信号发送给模型内部无线信号接收机, 接收机收到控制信号后对信号进行解码, 通过 RS485 总线控制电机按照给定速度运转到指定位置, 电机带动绞盘实现输油管的收放。

2 控制系统设计与实现

2.1 驱动电机选择

输油管的收放由电机带动绞盘实现。如图 2 所示, 考虑模型内部空间有限, 电机和绞盘采用直接连接的结构。绞盘所受的力矩和转速与电机相同, 控制电机按照给定的速度运转即可实现所要求的油管收放速度。

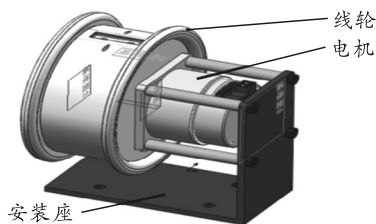


图 2 电机与绞盘结构

驱动电机必须满足收放速度要求, 绞盘半径 $R=0.03\text{ m}$, 收放速度 $v_s=1.32\text{ m/s}$, 电机转速 v_r 为

$$v_r = v_s \times 60 / 2\pi R = 420\text{ r/min}.$$

驱动电机的力矩满足油管收放保持力矩, $F=3\text{ kg}$, 则

$$M = FR = 3 \times 0.03 = 0.9\text{ N}\cdot\text{m}.$$

根据以上指标要求, 选择 60AIM25 型无刷力矩电机作为驱动电机, 电源 36 VDC, 转矩 $2\text{ N}\cdot\text{m}$, 额定转速 1000 r/min , 15 位绝对编码器, 一圈脉冲高达 32 768, 满足试验要求。该电机为控制电机一体化设计、体积小、接线简单、低噪声, 支持位置/速度闭环控制, 特别是在位置模式下支持 RS485 总线的 ModbusRTU 通信协议^[6]。

2.2 Zigbee 无线通信网络

收放系统采用无线信号遥控的方式控制。为了使用方便和简化系统结构, 无线通信网络采用 Zigbee 协议的无线网络。

ZigBee 是近距离、低复杂度、低功耗的双向无线通信技术, 基于 IEEE802.15.4 标准, 工作频段为 2.4 GHz, 采用 QPSK 调制技术, 传输速率达到 250 kb/s, 传输距离标准为 $10\sim 75\text{ m}$ ^[7]。ZigBee 无线网络有星型、树状和网状 3 种组网结构^[8]。由于系统中节点较少, 采用最简单的星型网络结构。系统中有洞外控制和模型内部节点。如图 3 所示, 将洞外控制节点设为协调器作为中心节点, 模型内部节点设为终端, 即该网络为最简单的点对点网络。

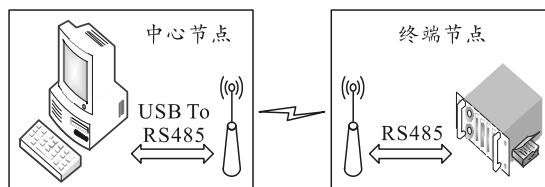


图 3 点对点网络结构

控制计算机通过 USB 转 RS485 模块与洞外节点连接, 控制计算机将控制指令发送至中心节点, 中心节点通过无线芯片发送至终端节点, 终端节点接收控制信号, 通过 RS485 总线传输控制指令到电机, 电机根据控制指令运行到指定位置。

2.3 Modbus 通信协议

控制系统以 PC 机作为主机，以单片机为核心的驱动电机作为从机，主机和从机之间采用 Modbus 通信协议，通过 Zigbee 无线串行总线进行连接和通信，构成分布式控制系统。

Modbus 通信协议是应用于工业控制网络的主从式通信协议，主设备可以和从设备点对点通信，也能以广播的方式和所有从设备通信。系统中需要获取点击运动的实际位置，因此，用点对点的通信。如图 4 所示，当主机发送访问请求时，从设备根据功能代码返回相应的应答消息作为回应。

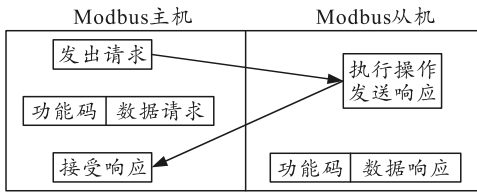


图 4 点对点通信原理

系统中 Modbus 通信协议通过 RS485 串行总线传输，2 个电机挂载到 RS485 总线上，通过设备地址确定主机与从机通信。Modbus 通信协议有 ASCII 和 RTU 2 种串行传输模式。系统中需要实时获取电机运动位置，要求数据传输率高、数据量大；因此，采用 RTU 模式进行通信。Modbus 协议以 RTU 模式通信时，在消息中的每个 8 bit 字节包含 2 个 4 bit 的十六进制字符。该方式优点是在同样的波特率下，可比 ASCII 方式传送更多的数据^[9]。

3 软件设计与实现

试验要求收放系统具备 2 路油管的收放，可单独收放每路油管，也可同时收放 2 路油管，2 路油管的收放速度和长度独立设定，互不影响。控制软件应具备控制模式选择、控制参数设定、调试等功能。在试验过程中，软件根据设定的收放速度和收放长度，发送控制指令，实现油管收放的位置控制，软件主界面如图 5 所示。

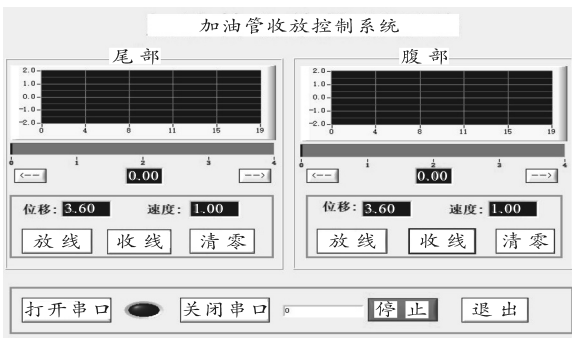


图 5 软件主界面

控制软件采用 LabWindows/CVI 开发平台，以 ANSIC 为核心，将功能强大、使用灵活 C 语言平台与用于数据采集分析和显示的测控专业工具有机地结合起来，利用集成化的开发环境、交互式编程方法、丰富的功能面板和库函数，大大增加了 C 语言的功能，为开发设计人员建立自动化检测系统、数据采集系统、过程控制系统等应用软件提供了一个理想的软件开发环境。

3.1 ModbusRTU 通信协议

ModbusRTU 通信协议中协议帧的定义是核心，通信设备在接收和发送消息时都要以帧的定义为依据。如图 6 所示，ModbusRTU 协议帧包含地址码、功能码、数据段和 CRC 校验^[10]。主站通过将从站地址放置在报文地址域中来寻址从站。从站响应报文中将自己的地址放到响应地址域中，以便主站知道哪个从站正在响应。

地址码	功能码	数据段	CRC高位	CRC低位
8位	8位	N个8位	8位	8位

图 6 ModbusRTU 协议帧结构

功能代码定义了读/写从机寄存器等动作，当主机发送特定功能码给从机，从机根据功能码的定义做出相应的响应。如果从机响应的功能代码与主机发送的功能代码相同，则表明从机已执行所要求的功能；否，则表明从机没有执行所要求的功能，返回了一个错误信息。驱动器支持的功能码为 0x3(读寄存器)、0x6(写寄存器)和 0x10(写脉冲数)等。

数据域由 N 个十六进制数集合构成，数据段所包含的内容由功能码决定，不同的功能码所包含的信息不同。以系统中采用的电机控制协议为例，主设备写从设备的寄存器(功能代码 6 十六进制)，数据域则包括要写的起始寄存器以及要写的寄存器数量、数据域的数据字节数、要写入寄存器的数据。如果主设备需要从从设备读取寄存器(功能代码 03)，数据域应该包含起始寄存器以及要读的寄存器数量。

CRC 校验检测整个消息的内容。CRC 域是 2 个字节，包含一个 16 位的二进制值，由传输设备计算后加入到消息中。接收设备重新计算收到消息的 CRC，与接收到的 CRC 域中的值比较，如果两值不同，则有误。

根据以上分析，要实现 ModbusRTU 通信协议，首先要将需要传输的消息根据协议帧的结构进行组

装，以写数据为例，协议帧结构如图 7 所示；然后通过串口发送，ModbusRTU 通信协议实现流程如图 8。

主机写双字节数据(写PU脉冲数)						
设备地址	功能码	第1个寄存器的高位地址	第1个寄存器的低位地址	寄存器个数高位	寄存器个数低位	数据长度
0x01	0x10	0x00	0x0c	0x00	0x02	0x04
PU:8~15位	PU:0~7位	PU:24~31位	PU:16~23位	CRC高位	CRC低位	
0x27	0x10	0x00	0x00	0xf8	0x8b	

图 7 主机写驱动器脉冲数协议帧

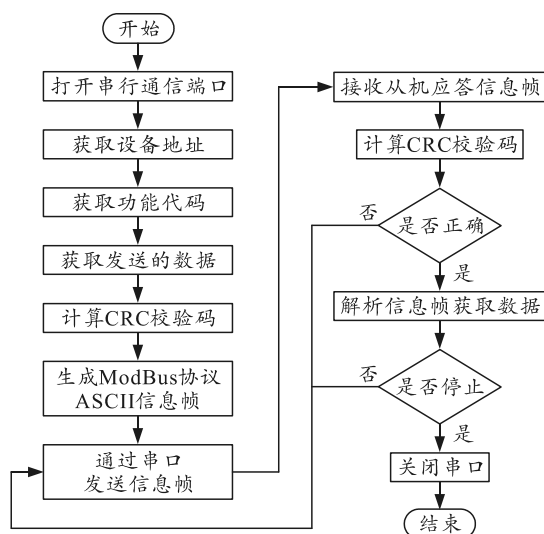


图 8 ModbusRTU 通信流程

3.2 CRC 算法实现

为了保证通信的可靠性，接收方接收到数据后需要校验数据，检查数据是否正确。ModbusRTU 通信协议采用 CRC 校验方法。CRC 是循环冗余码校验，能通过多项式生成校验码，计算方法如下：

- 1) 预置 1 个 16 位的寄存器，初始值为 0xFFFF，此寄存器称为 CRC 寄存器；
- 2) 把信息帧的第一个 8 位二进制数据与 16 位的 CRC 寄存器的低 8 位相异或，把结果放入 CRC 寄存器，高 8 位数据不变；
- 3) 把 CRC 寄存器的内容右移一位，用 0 填补最高位，并检查移出位；
- 4) 如果移出位为 0，重复 3)，否，则 CRC 寄存器与 0xA001 进行异或；
- 5) 重复 3)和 4)，直到右移 8 次，这样整个 8 位数据全部处理完毕；

6) 重复 2)–5)，进行信息帧下一个 8 位二进制数据处理；

7) 将该信息帧所有字节按上述步骤处理完毕，将得到的 16 位 CRC 寄存器的高、低位字节交换，得到的 CRC 寄存器内容即为 CRC 校验码。

接收方接收到信息后按照上述同样的方法计算 CRC 码，对比接收到的实际 CRC 校验码，如果相同则信息正确，不相同则信息错误。

4 结束语

为了在风洞中模拟空中加油机收放油管过程，评估加油管和锥套的安全性。笔者研制了基于 Zigbee 的遥控控制的加油管收放模拟系统，可实现各种工况条件油管收放模拟，成功应用于某型加油机输油软管和锥套安全性评估试验，获得了不同状态下的油管和锥套的运动状态，为锥套的优化设计和安全评估提供支撑。该系统还可应用于空中无人机、水中无人系统的投放与回收模拟试验，为同类模拟系统的研制提供参考。

参考文献：

- [1] 王海涛, 董新民. 空中加油动力学与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 127-156.
- [2] 喻振华, 周倩, 李伟. 空中加油电驱动响应技术研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(12): 18-22.
- [3] 郝毓雅, 张志强. 空中加油吊舱尾流场计算分析[J]. 飞行力学, 2018, 36(5): 16-19.
- [4] 张仕明. 软式空中加油管收放过程动力学分析与优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [5] 黄霞, 卢静, 张海酉, 等. 空中加油机加油软管锥套气动稳定性风洞试验技术[J]. 空气动力学报, 2019, 37(1): 140-146.
- [6] 杭州翼志科技有限公司. 一体式力矩伺服电机选型手册[S]. 杭州: 杭州翼志科技有限公司, 2018.
- [7] 董世林, 刘承桥, 王振. 基于 ZigBee 校园智能灌溉系统的设计[J]. 物联网技术, 2019(10): 78-81.
- [8] 陈星宇. 基于 ZigBee 的计量检测环境温湿度监测无线传感系统[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [9] 王新, 王凤翔, 王燕, 等. 浅谈 Modbus 协议在智能仪表中的实现路径[J]. 中国设备工程, 2019(10): 210-211.
- [10] 汤泽锋, 盛强, 陆波. 基于 Modbus-RTU 通信的温室环境智能监控系统设计[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(2): 75-76.