文章编号:1671-4598(2020)08-0260-05　DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2020.08.053　中图分类号:TL326　文献标识码:A

反应堆物理启动试验设备信息共享系统研究

代航阳，邓　圣，黄礼渊，崔　璨，付国恩，李　翔
（中国核动力研究设计院，成都　610213）

摘要： 为了解决反应堆物理启动试验设备获取物理参数的准确性和实时性问题，提出建立一种物理启动试验设备信息共享系统，实现物理参数和试验数据的信息共享；利用以太网通讯技术，建立数据采集系统、物理启动监控平台和远程可视化系统之间的以太网通讯结构，形成客户端/服务器通讯模式，并采用 Modbus TCP/IP 通讯协议实现在监控平台实时共享物理参数的功能；利用局域网构建技术，构建物理启动监控平台与物理启动试验各个设备之间的星状网络结构，形成一个中心节点和若干分节点组合的方式，并采用 RS-485 串行通讯协议使得每个节点能在线显示反应堆物理参数和物理试验结果，实现反应堆操作人员、物理启动试验人员和远程监控人员同时共享启动试验数据的功能。

关键词： 物理启动；信息共享；以太网；星状网络

Information Sharing System of Reactor Physical Startup Experiment Devices

Dai Hangyang, Deng Sheng, Huang Liyuan, Cui Can, Fu Guoen, Li Xiang
(China Nuclear Power Institute, Chengdu　610213, China)

Abstract: Information sharing system is proposed in order to solve the problem about the accuracy and real-time of physical parameters obtained from reactor physical startup experiment devices. Ethernet communication structure is established among data acquisition system, physical startup monitoring platform and remote visualization system by using Ethernet communication technology, meanwhile, the client-server paradigm is established, and the physical parameters sharing function of the monitoring platform is realized by using Modbus TCP/IP protocol. By using LAN construction technology, star-shaped network structure among physical startup monitoring platform and physical startup experiment devices is established. The physical parameters and experiment results are displayed in each device by using RS-485 serial communication protocol, and the experiment data are shared among reactor operator, physical startup tester and remote monitor.

Keywords: physical startup; information sharing; Ethernet; star-shaped network

0　引言

反应堆物理启动试验设备[1-4]运用在反应堆正式运行前，对反应堆装料、充水、临界状态进行监督，并对启动后的反应堆进行零功率物理试验。该套设备是保障反应堆首次启动成功的必要手段，是确保核安全的重要手段。

反应堆物理启动试验设备功能包括中子计数监督、临界外推、停堆深度测量、控制棒微积分价值测量、温度系统及压力系数测量及反应堆功率测量等。这些功能都需要及时获取反应堆相关物理参数来实现，目前，反应堆在物理启动期间主要依靠试验人员手动记录的方式获取物理参数，即手动输入相关数据到对应物理启动试验设备中进行计算和分析。这种物理参数获取方式具有以下问题：反应堆整个物理启动试验[5-6]需要一两个月时间，需要手动记录的物理参数成百上千个，容易出现记录错误，影响了物理参数获取的准确性；从数据采集系统物理参数显示到物理启动试验设备计算分析这个过程时间较长，物理分析实时性较差。

因此，准确实时地实现反应堆工作状态的信息共享显得尤为重要。本文提供一种反应堆物理启动试验设备信息共享系统，解决了物理启动设备的物理参数获取准确性和实时性问题，实现物理启动试验各设备数据的及时计算与分析，提高了整个物理启动试验的效率。

1　系统总体设计

1.1　系统结构

反应堆物理启动试验设备信息共享系统由数据采集系统、物理参数监控平台、远程可视化系统、物理启动试验设备四部分组成，系统结构如图 1 所示。设计原理上，采用局域网拓扑结构方式，以物理启动监控平台为核心，通过以太网[7]通讯方式实时接收和显示反应堆堆芯物理参数，并利用现场总线方式把数据发送给各个物理启动试验设备进行数据计算与分析，数据处理结果返回物理启动监控平台及远程可视化系统显示，实现物理启动监控平台、远程可视化系统及物理启动试验设备之间的信息共享。

1.2　系统主要功能

系统主要功能如下：

1）数据采集系统、物理启动监控平台和远程可视化系统的以太网通讯数据传输。

2）物理启动监控平台物理参数的实时显示与试验结果的动态更新。

3）物理启动监控平台与物理启动试验设备间的现场总

收稿日期：2019-12-26；　**修回日期：**2020-01-15。

作者简介：代航阳(1981-)，男，四川夹江县人，工学博士，副研究员，主要从事核电子学与核技术应用方向的研究。

线数据传输。

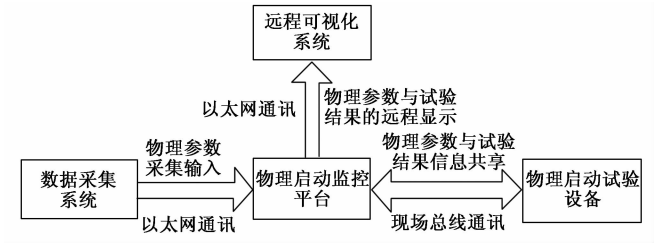


图 1　系统结构原理图

4）物理启动监控平台与物理启动试验设备的信息共享。

基于系统主要功能要求，整个系统的研究工作包括两个部分：

1）基于以太网通讯协议的反应堆物理参数的远程传输技术。数据采集系统把反应堆堆芯传感器采集的物理参数模拟信号转换为数字信号，并通过点对点的以太网通讯形式发送给物理启动监控平台及远程可视化系统显示，实现数据的快速实时显示与低误码率。

2）基于局域网拓扑结构[8]的信息共享技术。物理启动监控平台与物理启动试验设备之间构建星状结构模式，数据通讯采用现场总线通讯形式，实现物理参数与物理启动试验数据的双向通讯功能。

2　基于以太网通讯协议的反应堆物理参数的远程传输技术研究

2.1　以太网通讯结构

数据采集系统、物理启动监控平台和远程可视化系统通过以太网通讯实现反应堆物理参数的信息共享。物理启动监控平台是信息共享系统的核心装置，完成物理参数和试验结果的实时显示，完成信息向可视化系统和物理启动试验设备的定时发送。在以太网通讯链路上，三套设备实现客户端/服务器通讯模式，物理启动监控平台为服务器端，分别连接数据采集系统和远程可视化系统这两个客户端。以太网通讯连接如图 2 所示。

通讯连接按照以下方式进行：首先，通过光纤电缆分别连接客户端与服务器端的以太网接口（RJ45）；接着，设置数据采集系统的 IP 地址为 192.168.1.66，远程可视化系统 IP 地址为 192.168.1.88，设置物理启动监控平台的 IP 地址为 192.168.1.99，统一的端口号为 502；最后，注册服务器端并成功，客户端建立与服务器通讯并成功。根据反应堆物理参数安全性和可靠性要求，数据传输采用单向传输模式，即根据约定的数据帧协议，从数据采集系统到物理启动监控平台，再从物理启动监控平台到远程可视化系统单向发送数据包。

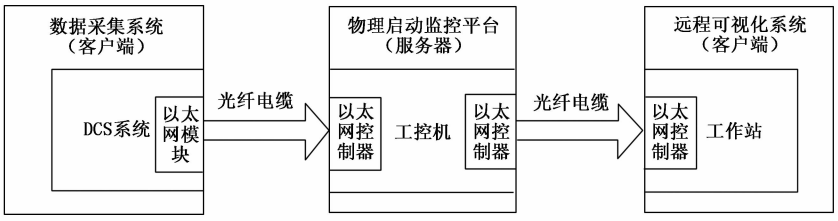


图 2　以太网通讯连接图

2.2　通讯协议

通讯协议采用 Modbus TCP/IP 协议[9]，其数据帧协议格式包括 MBAP 报文头、功能码和数据 3 个部分。反应堆物理参数的数据传输类型分为两类：模拟量数据和开关量数据。数据帧协议根据传输标志和功能码进行区分，分为模拟量数据帧协议和开关量数据帧协议。

模拟量数据帧传输的数据包括反应堆冷却剂出口和入口温度、稳压器压力、2 路功率水平和 21 组控制棒棒位，每个数据都是 32 位浮点数（4 字节）。该数据帧的 MBAP 报文头的传输标志字段指定每个数据帧的标识，数值从 0000H 开始，每个帧自动加 1；协议标志指定为 Modbus 协议，值为 0000H；后续长度字段包含数据帧后续字节数，包括单元标志 1 字节，功能代码 1 字节，寄存器起始地址 5 字节，模拟量物理参数 104 个字节，该字段值为 006FH；单元标志字段指定客户端和服务器端都有独立的 IP 地址，值为 FFH。该数据帧的功能码标识模拟量数据传输，值为 10H。该数据帧的数据寄存器起始地址定义为 07000000H，物理参数共 26 个，每个参数占用 4 字节，共计字节数 104 个。模拟量数据帧协议详细定义见表 1 所示。

表 1　模拟量数据帧协议

类别	字段名	数值	字节数
MBAP 报文头	传输标志	0000H	2
	协议标志	0000H	2
	后续长度	006FH	2
	单元标志	FFH	1
功能码	功能码	10H	1
数据	寄存器起始地址	07000000H	5
	反应堆冷却剂出口温度	32 位浮点数	4
	反应堆冷却剂入口温度	32 位浮点数	4
	稳压器压力	32 位浮点数	4
	功率水平 1	32 位浮点数	4
	功率水平 2	32 位浮点数	4
	1－21 号控制棒棒位	32 位浮点数	84

84 开关量数据帧传输的数据包括 21 组控制棒到顶状态和到底状态，每个开关量状态占用 1 位（1 bit）。该数据帧的 MBAP 报文头的传输标志字段指定每个数据帧的标识，数值从 0000H 开始，每个帧自动加 1；协议标志指定为 Modbus 协议，值为 0000H；后续长度字段包含数据帧后续字节数，包括单元标志 1 字节，功能代码 1 字节，寄存器起始地址 5 字节，开关量物理参数 6 个字节，该字段值为 000DH；单元标志字段指定客户端和服务器端都有独立的 IP 地址，值为 FFH。该数据帧的功能码标识开关量数据传输，值为 0FH。该数据帧的数据寄存器起始

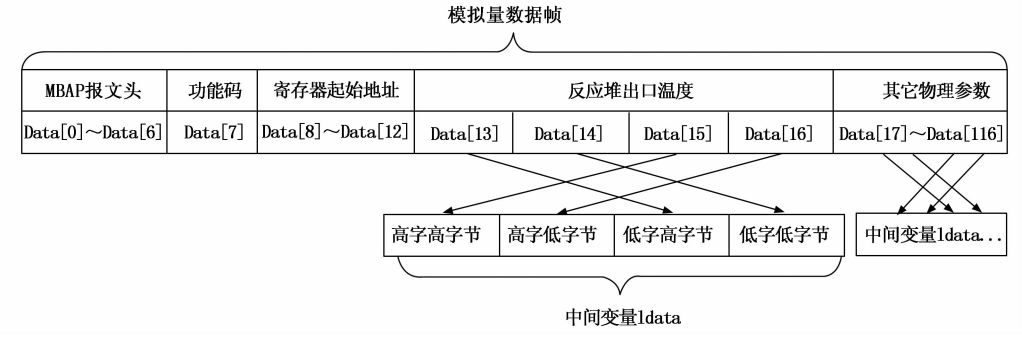


图 3 模拟量数据读取示意图

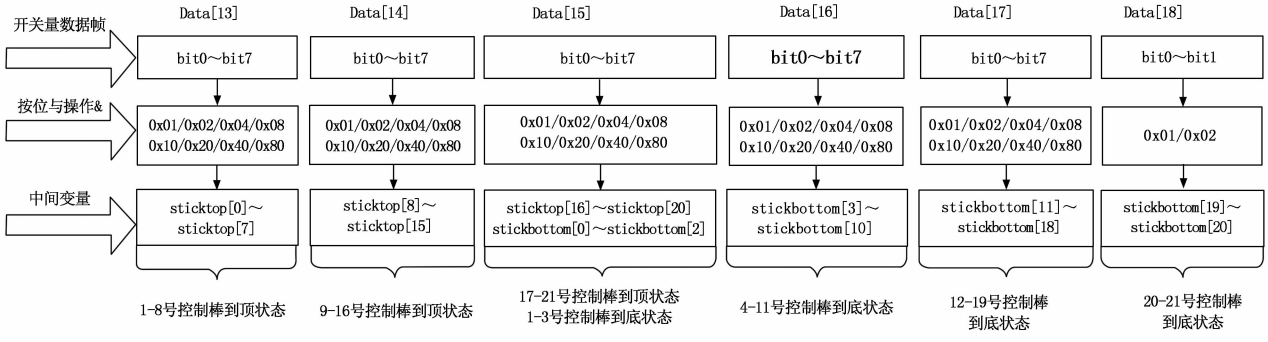


图 4 开关量数据读取示意

地址定义为 07001000H，物理参数共 42 个，占用 42 位（6 个字节）。开关量数据帧协议详细定义见表 2 所示。

表 2 开关量数据帧协议

类别	字段名	数值	字节数	字节的位定义
MBAP 报文头	传输标志	0000H	2	
	协议标志	0000H	2	
	后续长度	000DH	2	
	单元标志	FFH	1	
功能码	功能码	0FH	1	
数据	寄存器起始地址	07001000H	5	
	1－8 号控制棒到顶状态	1 表示“到顶”，0 表示“未到顶”	1	bit0－bit7 分别对应 1－8 号到顶
	9－16 号控制棒到顶状态	1 表示“到顶”，0 表示“未到顶”	1	bit0－bit7 分别对应 9－16 号到顶
	17－21 号控制棒到顶状态 &1－3 号控制棒到底状态	1 表示“到顶”或“到底”，0 表示“未到顶”或“未到底”	1	bit0－bit4 分别对应 17－21 号到顶 bit5－bit7 分别对应 1－3 号到底
	4－11 号控制棒到底状态	1 表示“到底”，0 表示“未到底”	1	bit0－bit7 分别对应 4－11 号到底
	12－19 号控制棒到底状态	1 表示“到底”，0 表示“未到底”	1	bit0－bit7 分别对应 12－19 号到底
	20－21 号控制棒到底状态	1 表示“到底”，0 表示“未到底”	1	bit0－bit1 分别对应 20－21 号到底

2.3 数据转换与显示

Modbus TCP/IP 通讯协议格式规定的数据传输顺序和数据类型与人机界面显示软件控件要求不一致，本文采用两种不同的数据转换方法，实现模拟量和开关量数据的显示。

1）模拟量数据采用联合体形式进行类型转换

首先，定义一个联合体 floatlongtype：

```
typedef union
{
  float fdata;
  unsigned long ldata;
}floatlongtype;
```

其中，ldata 为 4 字节的整形变量，对应通讯协议中的 4 字节字符型数据；fdata 为 4 字节的浮点型变量，对应人机界面显示浮点型数据。

接着，数据的赋值与转换。模拟量数据帧从第 14 字节开始为物理参数数据，每 4 个字节（1 个物理参数）按照图 3 的顺序赋值给变量 ldata，同时在联合体内部转换为浮点型变量 fdata。

最后，数据的显示。变量 fdata 赋值给人机界面中对应的数字控件进行显示。

2）开关量数据采用取位的方式进行控制棒状态取值

开关量数据帧的物理参数每个字节的每 1 位代表 1 根控制棒到顶或到底状态，本文通过按位与操作获取每根控制棒的状态并赋值给中间变量 sticktop 和 stickbottom。21 组控制棒的 42 个状态共占用 6 个字节，其中前 5 个字节占用全部 8 个位，第 6 个字节占用低 2 位，具体实施过程见图 4 所示。取值完成以后，中间变量赋值给人机界面中对应的

指示灯控件进行显示。

3　基于局域网拓扑结构的信息共享技术

3.1　局域网拓扑结构

物理启动监控平台和物理启动试验设备采用基于星状结构的局域网络拓扑构架形式实现信息的共享。星状结构采用一个中心节点和若干分节点组合的方式，其中，物理启动监控平台为中心节点，物理启动试验设备为分节点。节点间通讯采用 RS－485 串行通讯模式，每个节点能在线显示反应堆物理参数和物理试验结果，实现物理启动值班长、物理试验人员和操纵人员同时共享启动数据的功能。

基于星状结构的局域网络拓扑构架的信息系统硬件布局采用机柜式安装模式。物理启动监控平台作为中心节点安装在反应堆主控台，物理启动试验设备作为分节点分别安装在机柜 A 和机柜 B 中，每个节点设备均包括主机、显示器、RS485 串行通讯卡。中心节点通过机柜 A 端子排分别与分节点的通讯接口连接，具体的结构如图 5 所示。

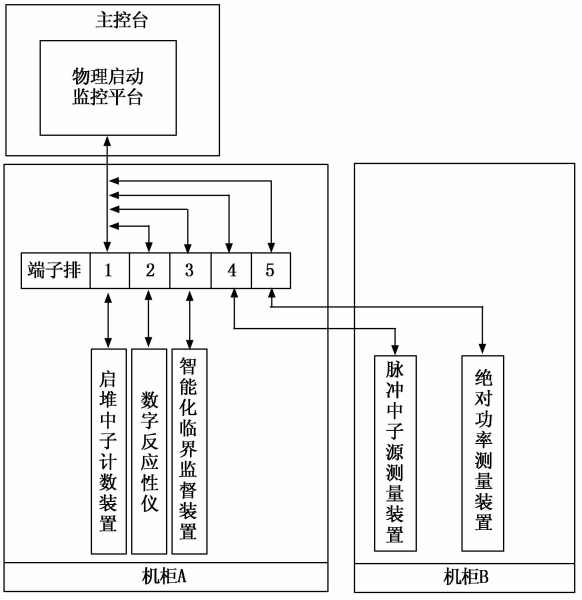


图 5　物理启动监控平台和试验设备的结构连接示意图

物理启动监控平台作为人机界面显示装置，主要完成数据显示功能，包括反应堆物理参数显示和物理启动试验结果显示两部分。反应物理参数显示内容包括反应堆出口和入口温度、稳压器压力、功率水平、控制棒棒位，以及控制棒到顶和底状态；显示的格式包括数值显示、条状图显示以及指示灯显示。物理启动试验结果按照图 5 分为 5 个子模块显示。启堆中子计数装置显示两个通道的瞬时计数率和平均计数率。数字反应性仪显示：在不同控制棒棒位下，利用小反应性跟踪测量法获得的反应性数值，周期法获得的数值，以及两个数值的偏差；在不同临界棒位下，利用控制棒积分价值测量法的反应性数值。智能化临界监督装置显示包括两个通道的瞬时计数率和平均计数率，以及两通道的临界外推结果。脉冲中子源测量装置显示：在同一堆芯状态下的不同两根控制棒的积分价值，以及它们的偏差：在同一堆芯状态下两次测量停堆深度数值，以及它们的偏差。绝对功率测量装置显示三组不同功率台阶下对应的 3 个绝对功率数值。

3.2　通讯方式及协议

物理启动监控平台和物理启动试验设备间的串行通讯采用基于 Modbus 协议[10]的主从通讯方式。其中，物理启动监控平台为主机，5 台物理启动试验设备为从机。主机和从机间的通讯包括：主机向从机发送反应堆物理参数采用广播方式，从机向主机发送物理启动试验结果采用应答方式。具体通讯实施如下：

1）主机向从机发送数据。主机以广播的形式定时向五台从机发送物理参数，从机不应答。主机发送的命令帧包括从机地址、功能码、数据（物理参数）和效验码。广播形式的通讯从机地址均为 0；根据数据类型的不同，功能码分为 10H 和 0FH，分别对应模拟量数据和开关量数据；模拟量数据包括反应堆出口和入口温度、稳压器压力、功率水平、控制棒棒位，开关量数据包括控制棒到顶和底状态。根据功能码不同，主机广播形式发送的命令帧包括模拟量发送命令帧和开关量发送命令帧。

2）从机应答主机发送数据。主机以询问的方式向每台从机发送不同的询问帧，从机根据询问帧中从机地址来确定是否询问本从机，从功能码来确定发送数据的内容，并最终向主机发送应答帧，完成物理启动试验结果的发送。主机发送的询问帧包括从机地址、功能码、寄存器和效验码，从机发送的应答帧包括从机地址、功能码、数据（试验结果）和效验码。由于五台物理启动试验设备发送五套不同的试验结果数据，主机会询问帧有 5 种，对应的从机应答帧也有 5 种。应答帧主要字段详细说明如表 3 所示。

表 3　应答模式中应答帧主要字段详细说明

编号	物理启动设备	从机地址	功能码	数据内容
1	启堆计数装置	01H	41H	两通道瞬时计数率和平均计数率
2	数字反应性仪	02H	42H	控制棒棒位、反应性值 1(小反应性跟踪法)、反应性值 2(周期法)，两个数值的偏差；临界棒位、反应性值 3
3	智能化临界监督装置	03H	43H	两通道的瞬时计数率和平均计数率，以及两通道的临界外推结果
4	脉冲中子源测量装置	04H	44H	控制棒 1 积分价值、控制棒 2 积分价值以及它们的偏差；停堆深度 1，停堆深度 2 以及它们的偏差
5	绝对功率测量装置	05H	45H	功率台阶 1、绝对功率 1、功率台阶 2、绝对功率 2、功率台阶 3、绝对功率 3

4 结束语

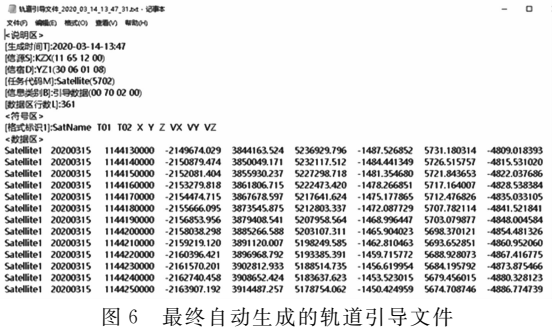
本文提出一种反应堆物理启动试验设备信息共享系统，并开展了两个关键技术研究：

1）通过基于 Modbus TCP/IP 以太网通讯技术的研究，实现数据采集系统、物理启动监控平台和远程监控平台的反应堆物理参数数据共享。通讯连接是系统间的点对点通讯，通讯结构采用客户端和服务端模式，其中，物理启动监控平台为服务器端，数据采集系统和远程可视化系统为客户端；数据采集系统定时发送物理参数数据给物理启动监控平台显示，该平台同时共享物理参数给远程可视化系统显示。

2）通过基于星状结构的局域网络拓扑构架信息共享技术研究，实现物理启动监控平台与物理启动试验各设备的星状网络结构布局，以及数据的共享。其中，物理启动监控平台为中心节点，物理启动试验设备为分节点，节点间通讯采用 RS－485 串行通讯模式；中心节点向从节点发送反应堆物理参数采用广播方式，从节点向中心节点发送物理启动试验结果采用应答方式。

通过构建不同种类设备数据共享的信息系统，提高了物理参数获取的准确性和实时性，实现了物理启动试验结果的多平台监控与共享功能，提高了整个物理启动试验的效率。

（上接第 249 页）



轨道引导文件_2020_03_14_13_47_37.txt - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

<说明区>
[生成时间T]:2020-03-14-13:47
[信源S]:KZX(11 65 12 00)
[信宿D]:YZ1(30 06 01 08)
[任务代码M]:Satellite(5702)
[信息类型R]:导航数据(00 70 02 00)
[数据区行数L]:361
<符号区>
[格式标识I]:SatName T01 T02 X Y Z VX VY VZ
<数据区>

Satellite1	20200315	1144130000	-2149674.029	3844163.524	5236929.796	-1487.526852	5731.180314	-4809.018393
Satellite1	20200315	1144140000	-2150879.474	3850049.171	5232117.512	-1484.441349	5726.515757	-4815.531020
Satellite1	20200315	1144150000	-2152081.404	3855930.237	5227298.718	-1481.354680	5721.843653	-4822.037686
Satellite1	20200315	1144160000	-2153279.818	3861806.715	5222473.420	-1478.266851	5717.164007	-4828.538384
Satellite1	20200315	1144170000	-2154474.715	3867678.597	5217641.624	-1475.177865	5712.476826	-4835.033105
Satellite1	20200315	1144180000	-2155666.095	3873545.875	5212803.337	-1472.087729	5707.782114	-4841.521841
Satellite1	20200315	1144190000	-2156853.956	3879408.541	5207958.564	-1468.996447	5703.079877	-4848.004584
Satellite1	20200315	1144200000	-2158038.298	3885266.588	5203107.311	-1465.904023	5698.370121	-4854.481326
Satellite1	20200315	1144210000	-2159219.120	3891120.007	5198249.585	-1462.810463	5693.652851	-4860.952060
Satellite1	20200315	1144220000	-2160396.421	3896968.792	5193385.391	-1459.715772	5688.928073	-4867.416775
Satellite1	20200315	1144230000	-2161570.201	3902812.933	5188514.735	-1456.619954	5684.195792	-4873.875466
Satellite1	20200315	1144240000	-2162740.458	3908652.424	5183637.623	-1453.523015	5679.456015	-4880.328123
Satellite1	20200315	1144250000	-2163907.192	3914487.257	5178754.062	-1450.424959	5674.708746	-4886.774739

图 6 最终自动生成的轨道引导文件

经对比，自动获取的轨道引导文件与单独操作 STK 软件得到的文件数据一致，用户还可以通过点击主界面中的“保存场景”按键将 WPF 集成开发的 STK 场景保存，方便日后查阅。如果需要获取其它时间段的轨道预报文件，直接在时间窗口中重新输入即可。

主程序可以根据特定测控任务需求特别定制，界面简洁明了，省去了繁琐的操作步骤，操作简单快捷的同时还保证了更高的正确率，大大提高了获取轨道引导文件的效率。由于 WPF 有可以使图形界面和程序界面分开设计的特性，本文的案例中设计的主程序窗口还可以添加更多的控件，从而满足用户比如更改测站位置等更多样化的需求，所以功能还有很大的可扩展性。综上所述，运行结果基本满足了设计要求。

6 结束语

通过实际应用案例，表明了 WPF 与 STK 集成仿真的优越性。在获取卫星轨道预报文件的仿真中，若仅使用 STK，会面临操作步骤繁琐，重复工作较多和容易出错等现实问题。如果通过 WPF 与 STK 集成仿真，就可以把 WPF 完善的界面开发框架、丰富的控件模型和多媒体交互支持等优点简化任务流程，极大地提高获取轨道引导文件的速度和准确率。上述介绍的具体集成开发方法还可以根据实际情况拓展至其他相应的航天任务领域，具有较强的实用性。

参考文献：

[1] 曲荣红，李保祥，徐小琳. 数字化的核反应堆物理启动系统的研制和应用［J］. 原子能科学与技术，2004，38（2）：189－192.

[2] 洪景彦，李义国，张金花，等. 数字化反应堆物理启动仪器研制［J］. 核动力工程，2014，35（12）：218－220.

[3] 王璨辉，李 翔，黄礼渊等. 智能化反应堆物理启动装置的研制［J］. 核电子学与探测技术，2008，28（5）：925－927.

[4] 代航阳，邓 圣，崔 璨. 数字化反应堆集中数据采集系统研制［J］. 核动力工程，2013，34（2）：56－59.

[5] 周 荣，王忠海. 核电子学实验［M］. 北京：科学出版社，2016.

[6] 黄礼渊. 反应堆启堆用智能化外推临界装置堆上考验试验［J］. 核电子学与探测技术，2011，31（10）：1171－1174.

[7] Spurgeon C E，Zimmerman J. 以太网权威指南（第 2 版）［M］. 蔡仁君 译. 北京：人民邮电出版社，2015.

[8] 王春明，康子明，张占新，等. 局域网拓扑结构优化的探讨［J］. 电脑编程技巧与维护，2010，4：55－57.

[9] 张明月，孙进生. 基于 Modbus/TCP 协议的智能家居系统的设计［J］. 工业控制计算机，2015，28（8）：13－14.

[10] 丁海大. 基于 MODBUS 的发电厂数据采集系统的研究［D］. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2008：6－15.

参考文献：

[1] 刘铁猛. 深入浅出 WPF［M］. 北京：中国水利水电出版社，2017.

[2] 张永革. 基于 WPF 的 UI 自动化测试［J］. 软件世界，2007：39－40.

[3] 赖 力. WPF 应用的 GUI 自动化性能测试框架［D］. 杭州：浙江大学，2011.

[4] 周李春. 基于 STK 的侦察卫星系统效能仿真［J］. 电讯技术，2012，4：595－599.

[5] 戴俊. 基于 STK 的空间目标飞行可视化仿真［D］. 西安：西安电子科技大学，2014.

[6] 张彩娟. STK 及其在卫星系统仿真中的应用［J］. 无线电通信技术，2007，33（4）：45－46.

[7] 黄 洁，党同心，赵拥军. VC 和 STK 集成的途径及其在仿真中的应用［J］. 计算机仿真，2007，24（1）：291.

[8] 杜 增. 基于 STK 软件包的应用开［J］. 软件，2015，36（4）：102－106.

[9] 王天祥. STK 与 C# 的集成开发研究［J］. 电脑编程技巧与维护，2013（2）：6.

[10] 张雅声，樊鹏山，刘海洋. 掌握和精通卫星工具箱 STK［M］. 北京：国防工业出版社，2011，9.