

基于动车组自动导通测试系统的软件设计与实现

张洪月¹, 刘延迪², 杨海军¹, 黄召明¹, 苏建军²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 为了解动车组整车线缆自动化测试需求, 基于动车组自动导通测试系统设计自动导通测试软件; 首先介绍测试软件的总体设计思想; 然后详细介绍上位机软件、主控单元软件和开关单元软件的设计; 通过与标准动车组对接试验, 结果表明该测试软件运行稳定, 自动导通绝缘测试、导通表自动导入等功能完善, 可大大提高动车组生产过程中的整车线缆测试效率。

关键词: 导通测试; 绝缘测试; 导通表自动导入

Software Design and Implementation Based on the Automatic Test System of EMU

Zhang Hongyue¹, Liu Yandi², Yang Haijun¹, Huang Zhaoming¹, Su Jianjun²

(1. CRRC Qingdao SiFang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: In order to meet the requirement of automatic test for whole vehicle cables of EMU, the software based on the automatic test system of EMU is designed. Firstly, the overall design idea of test software is introduced. Then the design of PC software, main control unit software and switch unit software are introduced in detail. Through the docking test with the standard EMU, the results show that the test software runs steadily, the functions of automatic conduction insulation test, automatic import of conduction table are perfected, and the test efficiency of the whole vehicle cables in the production process of EMU can be greatly improved.

Keywords: conduction test; insulation test; automatic import of conduction table

0 引言

我国《铁路“十三五”发展规划》提出: 到 2020 年路网建设达到 15 万公里, 其中高速铁路 3 万公里, 动车组列车承担旅客运量比重达到 65%。未来我国将依靠科技进步与创新, 建成安全、高效、节能、环保、高度信息化的现代化铁路^[1-2]。

动车组整车线缆作为动车运行过程中电力输送和信号传输的重要载体, 其性能好坏直接关系到动车运行安全^[3]。因此, 在动车组生产、定期检修维护过程中, 整车线缆测试是整个电气测试过程中非常重要的环节。为了保证供电及信号的安全可靠, 需要对整车内部线缆进行导通绝缘测试, 并能对故障线缆进行快速定位, 满足整车生产和维修需求^[4-6]。

早期对整车线缆的导通绝缘测试主要依靠人工操作, 导通测试利用蜂鸣器单点对单点完成, 绝缘测试主要利用分立仪器通过短接线夹完成^[6]。人工测试存在测试效率低、测试精度差、易漏查、错查等问题。同时, 在进行绝缘测试时, 测试人员需操作 500 V 的高压设备, 存在安全隐患^[7]。

为推进我国线缆测试设备智能化、自动化的发展, 建

立标准化的在线检测流程, 实现安全、可靠、实时的动车组车内电气配线导通绝缘测试, 基于动车组自动导通测试系统开展测试软件的设计。

1 测试软件总体设计

动车组自动导通测试系统的软件设计包括三大部分: 上位机软件、主控单元软件、开关单元软件。上位机软件导入并解析 Excel 电缆导通表, 下发激励测量控制指令到主控单元软件; 主控单元软件接收并解析控制指令, 驱动主控单元进行激励控制、信号采集, 同时下发通道闭合断开控制指令到开关单元软件; 开关单元软件负责解析控制指令, 驱动开关单元完成通道闭合或断开, 并将开关状态上传给主控单元软件。主控单元完成测试后, 将测试数据上传到上位机软件, 上位机软件负责数据实时显示, 管理^[8-10]。软件总体组成如图 1 所示。

开发环境如表 1。

运行环境如表 2。

功能指标:

自动导通测试软件功能指标主要包括如下。

- 1) 功能测试: 实现导通测试、绝缘测试、二极管测试;
- 2) 自动生成测试流程: 通过导入 Excel 导通表, 解析生成测试流程;
- 3) 测试数据实时显示: 执行测试过程中, 实时显示测试结果;

收稿日期:2019-03-26; 修回日期:2019-05-05。

作者简介:张洪月(1987-),男,山东临清人,工程师,主要从事轨道车辆电气测试方向的研究。

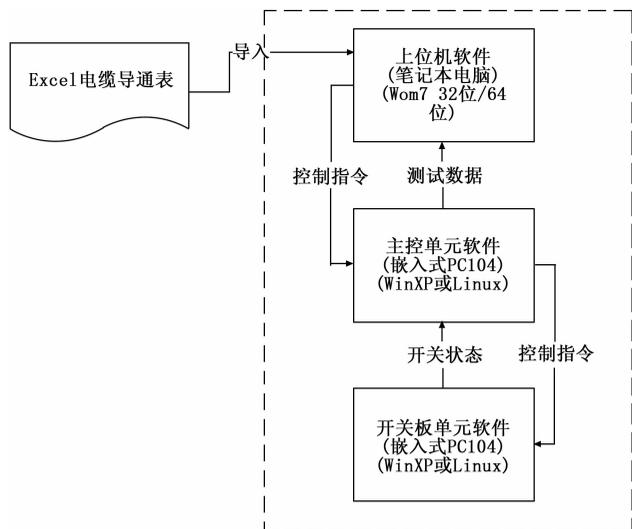


图 1 软件总体组成图

表 1 开发环境指标表

项	要求
操作系统	Win7、Win10、WinXP 任选一个
内存	2G
硬盘	250G
编辑及编译环境	Visual Studio 2010/2015
界面库	Visual Studio 自带
鼠标、键盘	普通
显示	1920 X 1080

表 2 运行环境指标表

项	要求
操作系统	上位机运行在 Win7 /Win10 系统上
主控单元采用 WinXP 系统上	
开关单元采用 WinXP 系统上	
内存	2G
硬盘	250G
鼠标、键盘	普通
显示	1920 X 1090(上位机), 下位机为无界面运行

- 4) 数据报表管理：测试数据本地存储、查找、报表导出、打印；
- 5) 系统自检：整机状态自检，系统通道自检；
- 6) 系统校准：导通阻值、绝缘阻值校准；
- 7) 用户管理：添加、删除、修改用户权限。

2 测试软件的具体实现

2.1 上位机软件

上位机软件运行在 Win7、Win10 等 32 位或 64 位中文版操作系统中，通过 LAN/WIFI 与主控单元通讯，远程控制主控单元。上位机软件作为用户交互界面，遵循模块化设计思想，便于后期功能扩展。上位机软件主要功能模块包括：用户管理、电缆表导入导出、流程解析引擎、数据显示、数据存储、LAN/WIFI 通信、报表管理和系统自

检校准。其主要功能框图如图 2 所示。

上位机软件主要职能是导入并解析 Excel 电缆表，生成测试程序 (.TPS)，再由流程解析引擎依据通讯协议形成导通及绝缘测试指令、二极管测试指令、并联测试指令等，经 LAN/WIFI 发送给主控单元，由主控单元执行相应测试。上位机软件接收主控单元上传的测试数据，并以列表形式显示每条测试结果。同时，上位机软件具有数据报表功能，可随时查看、检索、导出历史测试记录，支持 Excel、Word 和 PDF 三种报表格式。

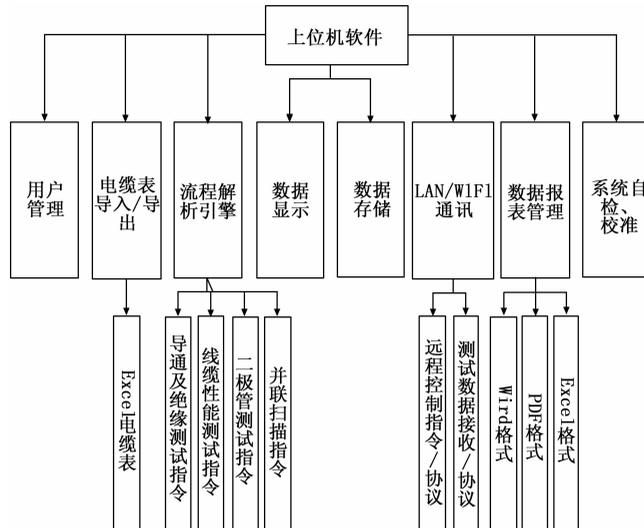


图 2 上位机软件功能框图

电缆表导入导出功能的核心是检验电缆表格式的正确性。主要的格式检验项包括：通道地址、激励参数、合格判据。

通道地址格式采用五位数字表示，如 01105。最左边两位表示箱号，箱号范围为 00~99；中间一位表示板号，板号范围为 0~9，分别表示第 1 块继电器板到第 10 块继电器板；最右边两位表示通道号，通道号范围为 00-49，表示每块继电器的通道号。通过对通道号的定义，保证每个测试通道都分配唯一的物理地址。通道地址格式检验代码如下：

```

Bool AddressChech (CString strAddr, CString &strErrMsg)
{
    CT2CA tempAddr(strAddr);
    string strAddress(tempAddr);
    //定义通道校验正则表达式
    regex regPattern("(0{0,3}[0-4][0-9])");
    if (regex_match(strAddress, regPattern))
        return true;
    strErrMsg = "通道地址格式错误";
    return false;
}
    
```

流程解析引擎模块作为上位机软件的核心，负责执行测试过程中将测试流程解析相应的测试指令，再通过网络发送给主控单元。在进行测试流程解析时采用多线程机制，提高解析速度，保障测试的实时性要求。流程解析关键代码如下。

```

CString m_strWorkpath = GetWorkPath();//获得文件
路径
CString tmp = m_strWorkpath + _T("Config\ChildHost.
ini");// * . ini 文件中包含 IP 地址和端口
//解析网络地址和端口
ReadNethostAddress(tmp,m_IpAddress,m_strPort);
//连接服务器
m_InstruSocket. Create();
if (! m_InstruSocket. Connect ( m_ IpAddress, atoi ( m_ str-
Port)) == TRUE)
AfxMessageBox(_T("主控单元网络连接失败"));
//读取通道列表信息
CString m_strCurWorkPath = GetWorkPath() + _T("Con-
fig\ChannelsList. ini");
pRunParam->m_pChannelsList->ReadCardList(m_str-
CurWorkPath);
//流程解析引擎循环执行解析任务
while (nCurStep <= nEndStep)
{
//取出当前步骤
pCurItem = pRunParam->m_pFlow->m_pItem[nCurSt-
ep];
//处理当前步骤数据,解析成规定的传输格式,发送给主控
单元
strCmd = parseItem(pCurItem);
if ( m_InstruSocket. Send(strCmd,len,0) != len) return
ERROR_FORCE_EXIT;
//接收并处理要采集的数据
m_InstruSocket. Receive(&RecBuf,sizeof(RecBuf),0);
if (pCurItem->DataProcess(&RecBuf,m_Error) == ER-
ROR_FORCE_EXIT)
return ERROR_FORCE_EXIT;
}

```

2.2 主控单元软件

主控单元软件无界面后台运行在 WinXP 系统中, 通过 LAN/WIFI 与上位机软件通讯, 通过 CAN 总线与开关单元通讯。主控单元软件作为整个系统软件最核心的部分, 主要功模块包括: 主控单元状态监测、LAN/WIFI 通讯、CAN 通讯、测量指令解析引擎和安全控制。其主要功能框图如图 3 所示。

主控单元软件接收上位机发送的测试指令, 由测量指令解析引擎调用主控单元中高压激励控制、恒流激励控制、电流/电压采集、二极管测试等模块的驱动, 并向开关单元发送开关动作指令(闭合或断开)。待采集完成, 将测量结果上传给上位机软件。

主控单元状态监测模块实时采集测试回路的电压和电流值、板卡的状态信息, 如果存在异常, 将调用安全控制模块。安全控制模块控制硬件实现过压过流保护, 确保测试系统安全。

测量指令解析引擎模块作为主控单元软件的核心, 负责高压激励控制、恒流激励控制、电压/电流采集、测量功能切换、并联扫描、二极管测试等。以导通测试为例, 展

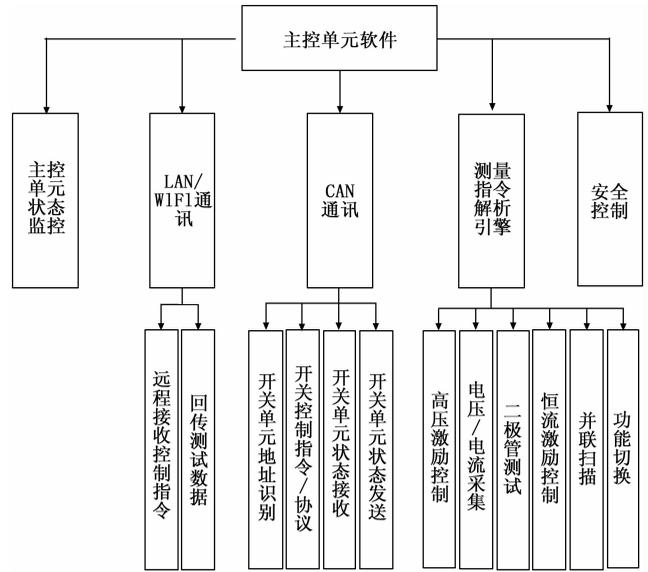


图 3 主控单元软件框图

开介绍导通测试软件实现方法。导通测试流程主要分为: ①测试系统初始化, 包括初始化 AD 采集, 初始化 CAN, 获取开关箱状态, 加载校准数据表; ②下发通道闭合指令, 闭合测试通道; ③控制恒流源, 施加激励, 并进行 AD 信号采集; ④下发通道复位指令; ⑤测试数据回传上位机。其关键代码如下。

```

// 测试系统初始化
if (! MakesureInstrumentHasInited(TF_FUNC_RS2, strEr-
rorInfo))
{
SetLastErrorInfo(_T("初始化相关设备失败:") + strError-
Info, session);
return false;
}
// 判断输入点地址和输出点地址是否在线。paramAry 表示
从上位机接收并解析的测试指令。
if (! CSwitchBoxStatus::GetInstance(). CanOperTargetS-
witch(paramAry. GetAt(0)) ||
! CSwitchBoxStatus::GetInstance(). CanOperTargetSwitch
(paramAry. GetAt(1)))
{
SetLastErrorInfo(_T("开关地址无效,所属开关箱不在线"),
session);
return false;
}
// 发送开关闭合指令到开关单元,闭合相应通道开关。
if (! ConnectSwitch(paramAry. GetAt(2),paramAry. GetAt
(0), paramAry. GetAt(1), strErrorInfo))
{
SetLastErrorInfo(_T("闭合开关失败:") + strErrorInfo,
session);
return false;
}
// 施加激励信号并采集,采集完成复位 AD 板卡

```

```

double fCurrent = 0,fVolt = 0;
if (! DoEncourage(paramAry. GetAt(3), fVolt, fCurrent,
strErrorInfo))
{
SetLastErrorInfo(_T("激励采集失败:") + strErrorInfo,
session);
return false;
}
// 开关箱开关复位
if (! ResetNeededSwitch( paramAry. GetAt(0), paramAry.
GetAt(1),strErrorInfo))
{
SetLastErrorInfo(_T("开关箱复位失败:") + strErrorInfo,
session);
return false;
}
//计算码值
fCodeValue = fVolt / fCurrent;
//码值转换为实际值
fRealValue = CCalibrationManager::GetInstance(). GetCal-
ibrationData(). GetDiandaoValue(fCodeValue, nCurr);
// 减去开关本身阻值
double fCorrectRes = 0;
SwitchCorrect:: GetInstance(). GetMinResistance( paramA-
ry. GetAt(0), paramAry. GetAt(1), fCorrectRes);
fRealValue -= fCorrectRes;
// 判断采集结果合格与否
if ((fRealValue <= _ttof( paramAry. GetAt(6))) &&
(fRealValue >= _ttof(paramAry. GetAt(5))))
{
nResult = 1;
}
// 把测试值和测试结果回传上位机
CString strInfoBack;
strInfoBack. Format(_T("%. 2fΩ, %d|"), fRealValue, nRe-
sult);
SendBackTestResult(strInfoBack, session);

```

CAN 通讯作为主控单元和开关单元数据交互的桥梁，需初始化 CAN 配置和定义数据帧格式，确保数据收发的可靠性。CAN 通讯的参数配置如下所示，其中波特率为 100 Kbps，可实现最大通讯距离 620 米。

```

include "ControlCan. h"//包含 CAN 头文件
VCI_INIT_CONFIG init_config;//定义 CAN 初始化结构体
DWORD code = 0,mask = 0xFFFFFFFF,timing0 = 0x04,
timing1 = 0x1C;
init_config. AccCode=code;//设置 CAN 的验证码
init_config. AccMask=mask;//设置 CAN 的掩码
init_config. Filter=0;//设置 CAN 的滤波方式,1 表示单滤
波,0 表示双滤波
init_config. Mode=0;//设置 CAN 的模式,0 表示正常模式,
1 表示只听模式
//设置 CAN 波特率,由 Timing0 和 Timing1 两个定时器
组成
init_config. Timing0=(UCHAR)timing0;

```

```

init_config. Timing1=(UCHAR)timing1;

```

本系统采用标准帧作为数据帧格式。CAN 标准帧信息为 11 个字节，包括两部分：信息和数据部分。前 3 个字节为信息部分，后 8 个字节为数据部分。CAN 数据帧格式定义如表 3 所示。通过该数据帧格式定义，可实现多路输入—多路输出通道控制。

表 3 CAN 数据帧格式定义表

数据帧字节	意义
Data[0]	输入通道区间下限高字节
Data[1]	输入通道区间下限低字节
Data[2]	输入通道区间上限高字节
Data[3]	输入通道区间上限低字节
Data[4]	输出通道区间下限高字节
Data[5]	输出通道区间下限低字节
Data[6]	输出通道区间上限高字节
Data[7]	输出通道区间上限低字节

2.3 开关单元软件

开关单元软件无界面运行在 WinXP 系统中。通过 CAN 总线与主控单元通讯，由指令解析引擎调用开关控制驱动，完成任意通道的闭合和断开，可同时闭合两路通道和多路通道。主要功能如图 4 所示。

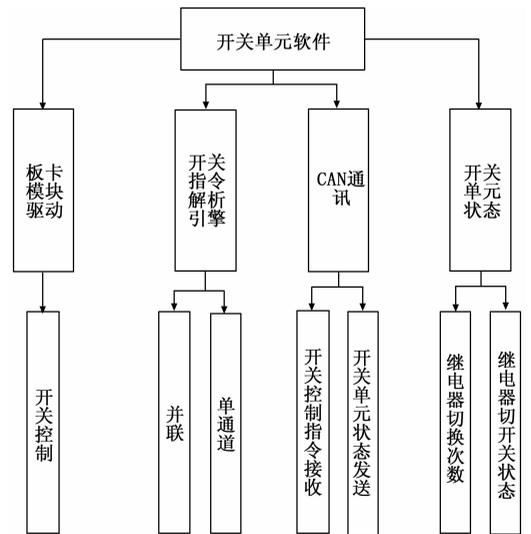


图 4 开关单元功能框图

由于开关单元由主控板和继电器板组成，每个继电器都被定义了唯一的驱动地址。开关指令解析引擎需将 CAN 接收到的通道地址解析成继电器地址，再下发给硬件板卡，实现任意通道的切换。在进行通道解析过程中，需先解析箱号信息，在解析板号信息，最后解析通道信息，根据通道地址的奇偶性，分别执行不同的控制程序。开关单元闭合任意通道关键代码如下。

```

//获取输入通道地址,strParamArray 为主控单元通过 CAN 发
送给开关单元的控制指令
m_strAddrIN = strParamArray. GetAt(1) + strParamArray.
GetAt(2);
//判断输入通道地址是否属于该箱号
if(theApp. m_oThisBox. Care(m_strAddrIN))

```

```

{
//解析通道的板号信息
int Box_id = m_strAddrIN.GetAt(0)-'0'+1;
_outp(Box_id << 12,0xFF);
if (_inp(0xFFFF) == 0x01)
{
//判断输入通道地址是偶地址还是奇地址
if ((atoi(m_strAddrIN)%2==0))
{
//偶地址,选择偶输入通道
InEVEN();
//闭合输入通道地址对应的继电器
int board_id = m_strAddrIN.GetAt(1)-'0';
int relay_id = atoi(m_strAddrIN.Right(2));
int tmp = (((board_id >> 1) + 1) + ((board_id > 5) << 1)) << 8 + (board_id &. 1) * 100 + ((relay_id >> 1) << 1);
_outp(tmp+1,0x01);
}
else
{
//奇地址,选择奇输入通道
InODD();
//闭合输入通道地址对应的继电器
int board_id = m_strAddrIN.GetAt(1)-'0';
int relay_id = atoi(m_strAddrIN.Right(2));
int tmp = (((board_id >> 1) + 1) + ((board_id > 5) << 1)) << 8 + (board_id &. 1) * 100 + ((relay_id >> 1) << 1);
_outp(tmp+1,0x01);
}
}
}
}

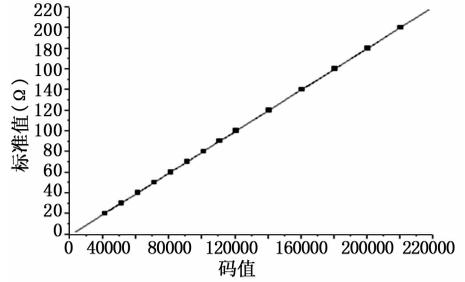
```

2.4 系统校准

为确保导通电阻与绝缘电阻的精度,需对导通测试和绝缘测试阻值进行校准。通过绘制 AD 采集到的码值与标准阻值的拟合曲线,得到不同激励量程下的拟合方程。将拟合方程的参数填入校准参数表中,每当进行相应功能测试时,校准程序自动调取拟合参数进行特性方程计算,换算成真值。

导通电阻校准按照恒流电流大小分 50、100、200、300、500 mA 等几个校准点进行校准,通过接入标准电阻箱(电阻范围 0 Ω~1 MΩ),改变标准电阻值,并记录测试系统采集到的码值,以码值作为自变量 x ,标准值作为因变量 y ,进行线性或者二次方程拟合,根据拟合方程: $y = y_0 + A_1 * x$,得到拟合参数 y_0 、 A_1 值。为获得更精确的导通电阻值,每个校准点下最多可分 10 段拟合曲线。导通电阻拟合曲线如图 5 (a) 所示,导通电阻校准参数界面如图 5 (b) 所示。

绝缘电阻校准按照高压直流电压大小分 50、100、250、400、500 V 等几个校准点进行校准,通过接入标准高阻箱(电阻范围 100 KΩ~1 GΩ),改变标准电阻值,并记录测试系统采集到的码值。以码值作为自变量 x ,标准值作为因变量 y ,根据绝缘电阻输入-输出特性,采用三阶指数衰减函



(a) 导通电阻拟合曲线



(b) 导通电阻校准参数界面
图 5 导通电阻校准设计

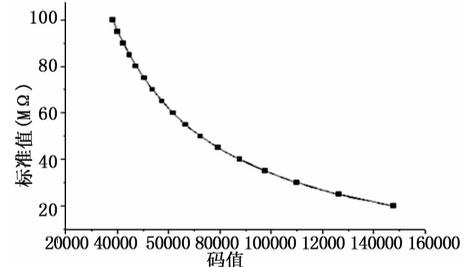
数进行拟合。

三阶指数衰减函数如下:

$$T = y_0 + A_1 e^{-\frac{x}{t_1}} + A_2 e^{-\frac{x}{t_2}} + A_3 e^{-\frac{x}{t_3}} \quad (1)$$

式中, x 为 AD 采集码值, T 为电阻真值。

由拟合曲线,得到拟合参数 y_0 、 A_1 、 t_1 、 A_2 、 t_2 、 A_3 、 t_3 值。为获得更精确的绝缘电阻值,每个校准点下最多可分 10 段拟合曲线,通常采取三、四段数据进行拟合。绝缘电阻拟合曲线如图 6 (a) 所示,绝缘电阻校准参数界面如图 6 (b) 所示。



(a) 绝缘电阻拟合曲线



(b) 绝缘电阻校准参数界面
图 6 绝缘电阻校准设计

3 实现结果

为验证测试软件功能的完好性及运行的可靠性,搭建动车组自动导通测试系统,并安装自动测试软件,以标准动车组整车线缆为被测对象开展测试软件的功能验证工作。

3.1 电缆表导入导出功能

上位机软件的“生成 TP”模块将实现电缆表自动导入导出。按照流程化操作步骤，上位机软件加载 Excel 电缆表文件，进行语法分析、解析配置、自动生成测试流程（TPS）。Excel 表如果有语法错误，在保存时弹出错误信息对话框。如果没有语法错误，则提示导入成功。同时，“生成 TP”模块具有新建、打开、编辑、删除、刷新测试流程功能，其中编辑流程具有追加步骤、删除步骤、插入步骤等操作。电缆表自动导入界面如图 7 所示。

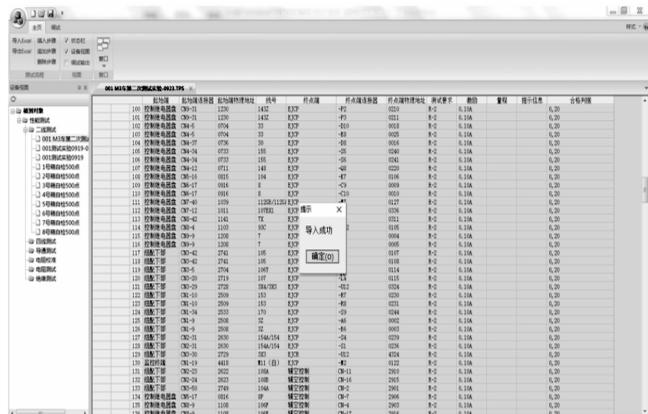


图 7 电缆表自动导入界面

通过新建测试流程，导入并解析 Excel 电缆表，保存生成测试流程等一系列操作，结果表明电缆表自动导入导出功能完善，语法解析正确，操作简单快捷。

3.2 自动导通测试功能

将自动导通测试系统推到整车线缆测试区域，根据整车线缆分布情况，配备 4000 路通道的 3 辆移动小车分别放在车头、车尾和中间 3 个位置。连接转接工装线缆，确保自动导通测试系统与整车内部被测线缆有效连接。

测试系统上电，主控单元软件和开关单元软件自启动，并执行初始化程序，检测自身状态，回传至上位机。上位机软件可根据收集到的状态信息，分析整个测试系统的健康状况。

启动“执行测试”模块，进入执行测试运行主界面，如图 8 所示。执行测试主界面分 3 个区域：功能区、状态区和测试结果显示区。

功能区包括运行、暂停、停止、导出 Excel、导出 Word、导出 PDF 等操作。状态显示区用于显示当前测试步骤、技术要求、测试数值、当前系统日期、当前系统时间、开始测试时间、测试累计时间等。测试结果显示区实时显示测试信息和测试结果。

通过执行测试流程（M3 车自动导通测试 TPS），上位机软件、主控单元软件和开关单元软件协调工作，驱动相应的板卡进行激励、采集、通道切换，快速完成整车线缆的导通性能测试。为确保验证的合理性，选择经过人工导通测试、线缆连接关系正确的车辆执行五次自动测试，从整个测试过程和测试结果可以看出，测试软件运行稳定，测试结果满足测试要求。



图 8 执行测试运行主界面

4 结论

为了解动车组整车线缆自动化测试需求，基于动车组自动导通测试系统展开测试软件的设计。该测试软件由上位机软件、主控单元软件和开关单元软件组成。上位机软件采用模块化设计思想，具有良好的通用性和可扩展性。上位机软件与主控单元软件采用 C/S 架构，可实现远程控制。主控单元与开关单元采用 CAN 通讯模式，可实现分布式管理。

通过与实车对接测试，验证了测试软件的电缆表导入导出功能和自动导通测试功能，表明该测试软件运行稳定，操作简单便捷，各模块功能完善，符合整车线缆自动化测试要求。

参考文献:

- [1] 王忠凯. 动车组运用检修计划优化方法的研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2012.
- [2] 张 犀, 杨 欣, 邵 军. 高速动车组制动性能测试系统 [J]. 铁道机车车辆, 2011 (5).
- [3] 李海磊, 石三宝. 如何做好动车组检修运用, 确保高铁动车组运行安全 [A]. 郑州铁路局“十百千”人才培养助推工程论文集 [C]. 2011
- [4] 乔小康. 高压电气设备的绝缘预防性试验方法及安全措施 [J]. 中小企业管理与科技 (下旬刊), 2018 (10): 125-126.
- [5] 曹新玲, 杨 刚, 秦 刚, 等. 电线电缆绝缘电阻的检测试验 [J]. 中国计量, 2018 (5): 111-112.
- [6] 苏建军, 郑永丰, 于功敬, 等. 便携式电缆测试仪的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (11)
- [7] 褚星明. 弹上电气导通测试系统的开发与应用 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [8] 王 勇, 陈春歌, 粘朋雷. 飞控计算机导通绝缘测试方法探索与实践 [J]. 现代防御技术, 2018, 46 (2): 180-185.
- [9] 郑培东, 闫 康. 多通道电连接器振动绝缘测试系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2018 (4): 64-67.
- [10] 项晟皓. 绝缘电阻测试的分析研究 [J]. 北京汽车, 2019 (1): 3-7.