

基于以太网双向环路的动车组列车人机界面 多重冗余设计

许杰 杨川

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心,130062,长春//第一作者,工程师)

摘要 HMI(人机界面)是列车网络控制系统的显示终端,是司机和维护人员监控列车运行状态的重要平台,可实现列车运行状态监视、故障诊断和警报、数据配置和车辆控制等功能,是保证列车运行安全的关键部件。因此,动车组列车HMI多重冗余设计显得尤为重要。介绍了基于以太网双向环路通信的列车HMI多重冗余功能的设计和实现方法,包括硬件设备、车辆拓扑结构及HMI软件控制策略等冗余设计。全方面的冗余设计能有效保证列车运行安全,降低列车维修维护成本,提高列车运行的可靠性。

关键词 动车组列车;人机界面;多重冗余技术;以太网双向环路

中图分类号 U298; U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.02.004

Multi-redundancy Design of EMU Train Human Machine Interface Based on Bidirectional Ethernet Loop

XU Jie, YANG Chuan

Abstract HMI (Human Machine Interface) is the display terminal of the TCMS system, and it is an important platform for drivers and maintenance personnel to monitor the running status of trains. It can realize functions of train running status monitoring, fault diagnosis and alarm, data configuration and vehicle control, therefore HMI is a key component ensuring the safety of train operation, and multi-redundancy design of EMU HMI is evidently significant. The design and implementation of the multi-redundancy function of train HMI based on Ethernet bidirectional loop communication are introduced, including redundancy design of hardware equipment, vehicle topology, and HMI software control strategy. Redundancy design of full aspects can effectively ensure the safety of train operation, as well as reduce maintenance costs, and improve the reliability of train operation.

Key words EMU train; HMI; multi-redundancy technology; bidirectional ethernet loop

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles

Co., Ltd., 130062, Changchun, China

HMI(人机界面)是轨道交通列车监控管理系统(TCMS)的重要组成部分,是司机和维修维护人员监视和控制列车运行状态的重要平台^[1]。HMI的可靠性直接影响着TCMS的可用性,对整个列车的安全行驶发挥着至关重要的作用。列车运行途中偶发黑屏等显示器硬件设备故障以及通信故障等紧急问题,按照相关操作规程需停车进行处理,因此易形成临停、列车晚点等重大安全责任。鉴于此,本文从硬件配置和软件控制策略两方面详细介绍了动车组列车HMI冗余设计方法^[2],以提高列车运行的安全系数。HMI多重冗余设计将大大提高列车监控系统的整体稳定性和可靠性,增强其应急处理能力,从而更好地保障列车行车安全。

1 动车组列车HMI功能

动车组列车HMI可对连接到总线上的子系统状态,以及列车的基本运行数据、状态信息和故障诊断信息进行监视和存储,是列车司机、乘务员和其他工作人员与列车交互的主要渠道,也是列车诊断系统的重要组成部分^[3]。列车HMI主要具备列车状态显示、故障报警与提示、数据配置、列车运行控制、视频信息显示等功能,具体描述如下:

1) 列车状态显示:对各子系统工作状态、故障信息和操作维修提示信息进行集中显示。显示内容包含但不限于牵引、制动、辅助、高压、车门、空调等系统的状态,以及连接至MVB(多功能车辆总线)的软件版本信息。

2) 故障相关数据提示、记录、操作策略:故障报警信息包含故障代码、故障描述、故障发生(恢复)时间、故障发生车辆位置、应急处理措施等,故

障报警提示同时可有蜂鸣器提示音。

3) 数据设置: 在 HMI 上显示各动车和拖车的重要运行数据、所有车辆的故障信息以及建议的故障处理对策。维修人员可在 HMI 上查看各车发生的历史故障。

4) 控制命令: 可通过 HMI 发布部分控制操作指令, 根据 HMI 的不同工作模式可以发布不同的操作控制指令。

5) 视频信息显示: 通过以太网数据, 将需要进行显示的视频信息进行播放, 如弓网监测信息、乘客报警信息等。

HMI 在整个车辆上发挥的作用如图 1 所示。

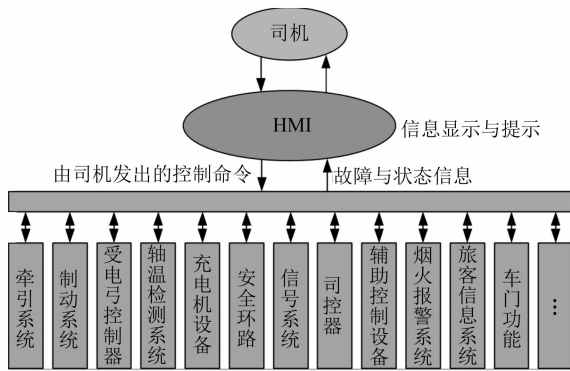


图 1 HMI 与其它电气系统的连接关系图

2 显示器硬件及通信环路冗余设计

2.1 触摸屏与按键互为冗余设计

HMI 由开关电源板、液晶显示屏、触摸屏、主板、通信板等组成, 如图 2 所示。

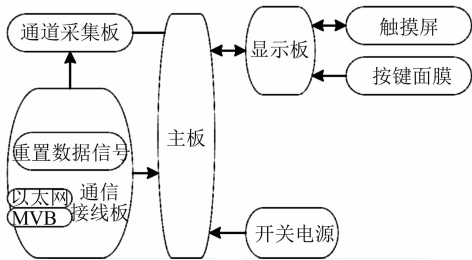


图 2 显示屏的硬件组成结构图

针对动车组列车显示屏在修改参数和查看数据时操作复杂、电磁环境复杂、可靠性不高的问题, 采用触摸屏与按键互为冗余的显示屏硬件设计方式^[4], 触摸屏和按键配合使用或独立使用完成显示屏各种操作的功能, 提高了显示屏在各种复杂使用环境下的可靠性和简洁性。

显示屏采用嵌入式实时操作系统来实现其各

项具体功能。嵌入式实时操作系统的核心是 CPU (中央处理器) 和任务, 触摸屏和按键各使用一个独立的线程来完成键值和触摸位置的采集及后续处理工作。

在按键面膜上采用有形有感按键: ①数字键有 1、2、3、4、5、6、7、8、9、0 等; ②鼠标选择键有 C、←、→、↑、↓、E 等; ③功能键有电源键、语言切换键、帮助建、故障查询键、故障提示键、亮度调节键、昼夜模式切换键、左右切换键等。

仪表的触摸屏和按键既可以配合使用, 亦可以独立使用, 完成显示屏的各种操作, 简化了用户的操作, 降低了维护成本, 能够有效克服由于按键或触摸屏任一方故障无法使用的问题, 延长了使用寿命, 提高了网络控制和诊断系统的可靠性^[5]。

2.2 以太网双向环路冗余通信设计

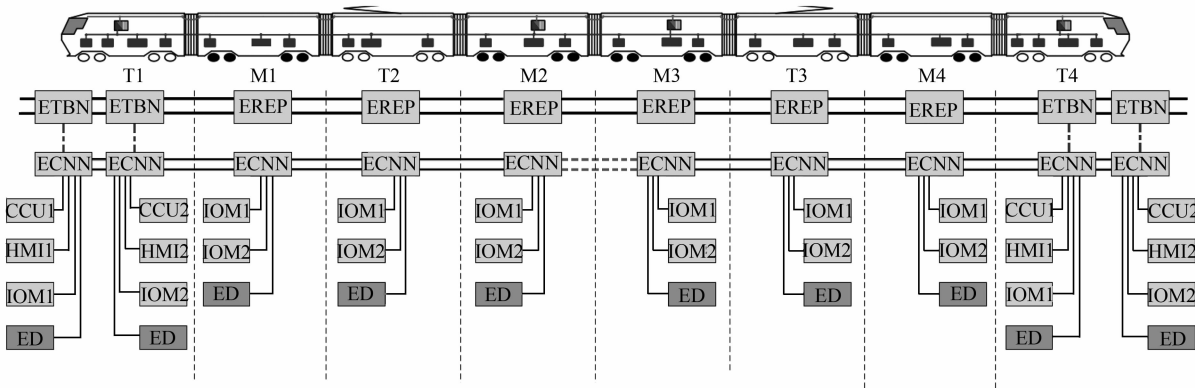
列车显示屏作为列车控制和诊断系统的显示终端, 需要与 TCMS 保持良好通信。为保证列车设备状态和故障数据的及时更新, 以及控制指令的及时和准确传输, 本文采用传输速率高 (100 Mbit/s)、软硬件产品丰富的工业以太网作为通信传输介质。

基于实时以太网的列车网络系统采用 ETB (以太列车骨干网) 和 ECN (以太网组网) 两层架构^[6-8]。其中, ETB 用于列车级网络通信, ECN 用于车辆级网络通信。列车级采用总线结构, 车辆级采用环网结构。该系统具备骨干网络的传输速率 (100 Mbit/s)、网络单点故障恢复时间不大于 50 ms、骨干设备实现毫秒级同步 3 大优点。列车以太网双向环路冗余通信设计拓扑结构如图 3 所示。

为提高显示器的通信质量和可用性, 避免通信故障的出现, 在以太网骨干网络拓扑结构中, 主干路和与 HMI 相连的重要设备部件均采用冗余设计, 具体方案如下:

1) 列车级 ETBN (以太骨干网交换机) 布置于两端的头车, 其中同一端的 ETBN 间为相互冗余关系, ETBN 间通过两路独立的以太网线相连, 两个头车之间的 ETBN 通过以太网中继器进行信号强度补偿。

2) 骨干网络和编组网络均具有链路汇聚功能^[9]。ETBN 具有端口聚合和旁路功能, 当其发生故障或不上电时, 能保持以太网总线的连续性, 不会影响线路两端节点的通信, 保证了线路的冗余。聚合线路标志为 A、B, 分别表示 A 线、B 线。即在方向 1 上采用 A1、B1 标注线路信息, 在方向 2 上



注：——代表ETB；---代表背板线；——代表ECN；---代表ECN(控车时可断开)；T1、T2、T3、T4代表拖车；M1、M2、M3、M4代表无受电弓的动车；ETBN代表以太网骨干网交换机；EREP代表以太网中继模块；IOM代表输入输出模块；CCU代表中央控制单元；ED代表子系统终端设备统称。

图3 列车以太网双向环路冗余通信设计

采用A2、B2标注线路信息。A1线路与A2线路间以及B1线路与B2线路间为掉电导通。链路汇聚功能空间关系如图4所示。

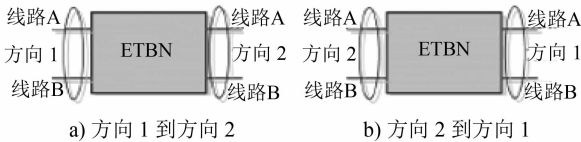


图4 链路汇聚功能空间关系

3) CCU、RIOM(列车远程输入输出模块)等双网口设备可以同时连接到这2台ETBN交换机上,实现设备链路的冗余。头车的CCU可实现互为热备冗余,通过对全列车的子系统进行控制和诊断,保证HMI的数据来源的准确性^[10]。

4) 车辆级ECN布置于1车至8车中,可对本编组内的以太网数据进行高速转发。

5) 同一司机室内的TD_HMI(主控显示屏,默认为HMI1)、TS_HMI(从控显示屏,默认为HMI2)之间有直连的以太网回路,可进行数据同步和备份,TS_HMI可对TD_HMI的心跳信号进行时时监测。

3 基于以太网通信的HMI软件冗余设计

3.1 界面软件冗余设计原理

动车组HMI软件控制策略采用主从式冗余设计。为了提高HMI的使用性,在每个头车设置两个HMI相互冗余,这两个HMI在硬件和软件配置上完全相同(相同的硬件设备、控制功能、数据端口配置表以及同一套应用层控制逻辑软件),且两个显示屏分别担任不同的功能任务。两个显示屏采用

左右式布局初始化上电时,通过读取不同的配置文件,人为地将显示器划分为主、从显示屏,其设置流程如图5所示。

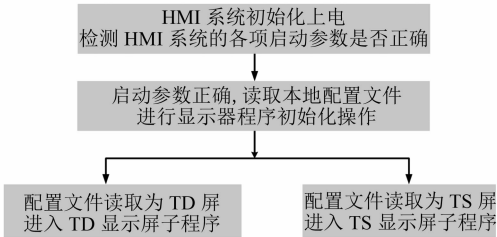


图5 显示器默认主从设置流程

TD_HMI是列车的控制台,负责列车控制命令信号的发送,可进行制动试验、联挂解编、自检测试、数据修改等操作,同时其具备所有与HMI相连的设备状态的显示功能,可对系统状态数据进行融合,实现整车的综合诊断。TS_HMI是列车的辅助显示屏,仅具备监视功能,可辅助TD_HMI进行整车设备状态的诊断和显示,便于司机在不退出当前操作的情况下,查看列车各子系统状态。主从显示器设备功能如表1所示。

TD_HMI、TS_HMI的界面冗余设计,可实现TS_HMI发生故障时,列车操作和控制完全不受故障影响;TD_HMI发生故障时,TS_HMI辅助司机,显示重要设备信息,完成紧急操作。两个显示屏的界面冗余设计使显示屏不可用故障发生的可能性大大降低。

3.2 HMI主从冗余控制模块设计

3.2.1 基本原理和功能

同一司机室内的两个HMI互为冗余设备,上电启动时,HMI1先以主设备模式工作,HMI2以从

表 1 主从显示器设备功能列表

功能模块	子模块	TD_HMI	TS_HMI
列车设备状态	设备状态显示及警报	●	●
	故障信息提示	●	●
	故障弹屏提示	●	○
	测试试验结果	●	●
	界面结构树切换	●	●
人机交互	电气系统控制、测试、试验等	●	○
	列车限速、解编联挂操作	●	○
	数据输入和修改	●	○
车辆状态调节	车辆初始状态配置	●	●
	显示器调节(亮度、界面校准等)	●	●

注：●——具备该功能；○——不具备该功能。

设备模式工作,两个 HMI 间通过特定端口相互通信,检测对方的状态。当两个 HMI 有主从切换的必要时,将进行主从切换。主从设备相互配合,TS_HMI 是列车的辅助显示屏,始终监测主屏 TD_HMI 的心跳信号,在 TD_HMI 正常运行的情况下,TS_HMI 仅具备监视功能。而当 TD_HMI 发生故障时,通过 HMI 主从冗余控制模块,实现 TD_HMI 的所有功能;当 TD_HMI 恢复时,TS_HMI 会自动恢复到辅助显示屏模式。此外,HMI 主从冗余控制模块还能够对主从控制数据的交换端口进行定义和监视。

HMI 冗余控制模块主要包括:

- 1) 模块配置:模块版本,发送/接收端口配置,发送/接收控制信息。
- 2) 主从请求:设置主从请求,清除主从请求,抑制主从请求。

表 2 辅助传输的输入输出全局变量表

接收信号列表			发送信号列表		
信号名称	含义	类型	信号名称	含义	类型
SNK_currentHMI	HMI 的位置号	UNSIGNED8	SCR_HMIDSfault	监视端口 HMIDS 没收到故障(0 表示无故障,1 表示有故障)	BOOLEAN1
SNK_HMIsta	HMI 设备状态(0 表示无故障,1 表示有故障)	BOOLEAN1	SCR_HMImasterflag	接收对方 HMI 的主从设备标志位(0 表示对方 HMI 不为主或者未收到;1 则表示对方 HMI 为主)	BOOLEAN1
SNK_Ethernetsta	以太网通讯端口故障监视(0 表示无故障,1 表示有故障)	BOOLEAN1	SCR_HMIOK	接收到对方 HMI 无故障(0 表示对方 HMI 有故障或者未收到;1 则表示对方 HMI 无故障)	BOOLEAN1
SNK_REQTDTS	更换主从请求	BOOLEAN1	SCR_masterchange	主切换有效(显示主从切换的执行情况。0 表示主切换无效;1 表示主切换有效)	BOOLEAN1
SNK_HMIheart	HMI 的心跳信号	UNSIGNED16	SCR_EtherneReset	以太网复位信号,用来执行主从端口交换。0 表示没有复位;1 表示进行了复位	BOOLEAN1

3) 主从切换:通信协议复位,分析主从切换请求模块,监控主从切换模块。

3.2.2 软件冗余主从监视端口设计

为了通过以太网发送过程数据及处理 TD_HMI、TS_HMI 的主从选择和主从切换请求,特对 TD_HMI、TS_HMI 设计了两个相互独立的主从通信端口(简为“HMIDS 端口”)。

HMIDS1 端口传输从 TD_HMI 到 TS_HMI 之间的通信数据,HMIDS2 端口传输从 TS_HMI 到 TD_HMI 之间的通信数据。HMIDS1 和 HMIDS2 的参数设置相同,且通信端口有 4 个。端口数据的传输方向与这 2 个 HMI 的主从状态无关,由 HMI 的设备位置决定。通过这 2 个 HMIDS 在 HMI 程序软件中的端口类型固定配置来确定数据的传输方向。HMIDS 端口配置及传输方向如图 6 所示。

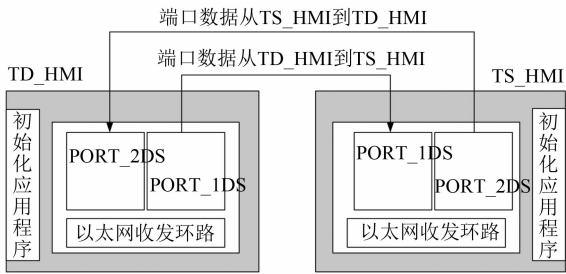


图 6 HMIDS 端口配置及传输方向

在 4 个 HMIDS 端口中定义 3 个端口用于主从切换的信号,分别是 D_REQ(主设备标志)、MASTER_STA(主从状态)和 TDHMIOK_STA(主显示器正常状态)。辅助传输的输入输出全局变量如表 2 所示。

以太网多端口监视的方法可有效限制和避免 2 个从 HMI 的出现。当 1 个或 1 个以上以太网通信端口在接收过程数据时,可以认为以太网通信网络正常。仅当所有被监视的以太网端口均不接收数据时,才可以判定以太网通信网络发生故障。此时可通过增加或减少以太网监视端口的数量,使以太网通信状态监视仅在与一定数量的端口或者与一定的端口通信受阻时才做出响应。

3.2.3 参数设置

3.2.3.1 延时参数设置

由于相互监视的 HMIDS 端口数据通过以太网总线进行传输,因此 HMI 软件设计中包括多个延时单元,部分延时单元的参数(* D_REQDALY、* D_2REQDALY、* D_RESCLEAR)由 HMIDS 端口的总线循环时间和为功能包选择的主程序扫描时间决定,即这些参数可借助设计数值进行精确调整。一般按照 32 ms 的 HMIDS 端口循环时间和 200 ms 的主程序扫描时间来确定上述参数取值。具体的参数设置如表 3 所示。

表 3 延时参数设置			
参数名称	说明	默认值/ms	推荐参数设置
* D_REQDALY	主设备标志等待时间	400	HMIDS 端口总线的 5 个循环周期时间 + 选择 HMIDS 事件等级的扫描时间 2 个主设备标志等待时间 设置时间使得最新状态通过多个总线循环在应用程序内至少能被读取 2 次
* D_2REQDALY	响应和主设备标志等待时间	800	
* D_RESCLEAR	复位清除等待时间	400	

3.2.3.2 预设的主从配置文件

将预先设定的显示屏类型配置文件,以 .txt 的形式下载到目标机中。在 HMI 程序启动初始化的过程中,通过读取显示屏类型的配置文件 HMI-TYPE.txt,将显示屏的物理位置 currentHMI 锁定,具体参数见表 4。该方法能够有效地避免主从轮流切换现象,以保持显示屏主从切换的稳定性,具体的

表 4 预设显示器位置参数定义		
CurrentHMI	说明	备注
等于 1	司机室 T1 左侧显示屏	默认为 T1 主显示屏
等于 2	司机室 T1 右侧显示屏	默认为 T1 从显示屏
等于 3	司机室 T2 左侧显示屏	默认为 T2 主显示屏
等于 4	司机室 T2 右侧显示屏	默认为 T2 从显示屏

读取方法如图 7 所示。

```
//显示屏的类型-----
fp_hmi tpe=fopen("HMITYPE.txt", "r+");
fread(current HMI buffer,2,1,fp_hmi type);
fclose(fp_hmi type);
current HMI=atoi(current HMI buffer)
```

图 7 配置文件 HMITYPE.txt 读取

3.2.4 软件冗余控制流程开发

3.2.4.1 HMI1 优先,主从配置流程

HMI 上电,主程序初始化启动,同一司机室内的两个显示屏 HMI1 和 HMI2 通过预先设定的配置文件,判断自身所在位置,再分别配置 HMIDS 端口。

若 HMI1 设备状态正常,HMI1 将被默认认为是主显示屏设备。HMI1 判断自身为主设备并接收到 HMI2 为从设备的信号时,HMI1 将正式成为主设备,即 TD_HMI,HMI2 成为从设备,即 TS_HMI。此时 HMI1 调用主节点监控端口协议表,HMI2 调用从节点监控端口协议表,进行 HMIDS 端口信息配置。配置完成后开始发送接收过程数据,包括 D_REQ(主设备标志)、MASTER_STA(主从状态)和 TDHMIOK_STA(主显示器正常状态)。程序正常运行时,HMI1 主设备标志激活并执行主设备功能,HMI2 将执行从设备的功能且 HMI2 的主设备标志将被抑制。

特殊的情况简述如下:

1) 如果仅 HMI2 通信板卡出现故障,HMI1 接收不到 HMI2 的从设备信号,在等待 * D_REQDALY 后确定自身为主设备,故障的 HMI2 自动成为从设备。

2) 如果 HMI1 通信板卡出现故障,HMI2 未接收到 HMI1 正常信号 TDHMIOK_STA,且 HMI2 通信板卡正常,则要求进行主从切换,激活自身主设备标志,在等待 * D_REQDALY 后确认自己为主设备,此时 HMI1 将自动降级为从设备。

3) 如果以太网通信环路网络或 CCU 设备出现故障,则网络系统不可用,传输的数据和命令将不被信任,两个 HMI 将分别删除主设备标志信号且均成为从设备,此时网络进入降级模式。

HMI1 优先,主从配置流程如图 8 所示。

3.2.4.2 运行过程中 2 个 HMI 主从切换流程

当 TD_HMI 运行中遇到如检测到自身板卡出现故障、HMI 状态不正常或收到强制切换信号等情况时,则将抑制自己的主状态标志,TS_HMI 将激活

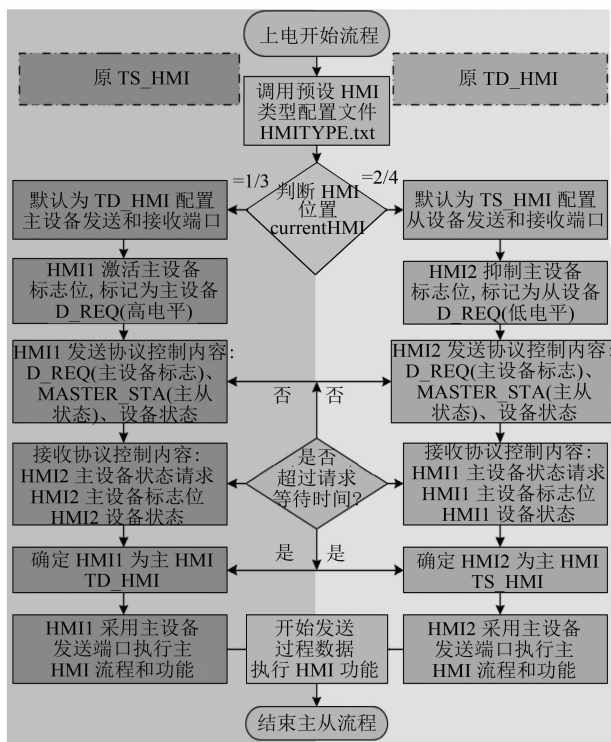


图8 HMI1 优先,主从配置流程

主设备标志,重新进入主从配置流程(与HMI1优先时启动主从配置流程相同)。如果以太网通信环路网络或CCU设备出现故障,则两个HMI的主设备标志位均将被抑制而进入降级模式,成为从设备。

运行过程中2个HMI主从切换流程如图9所示。

4 结语

本文针对动车组列车在运行过程中显示屏出现的一些实际问题,采用冗余设计和故障导向安全设计理念,以及采用传输速率更高、可靠性更好的以太网双向冗余通信,实现了基于以太网双向环路通信的列车HMI多重冗余。充分的冗余设计能够满足设备故障冗余切换的要求,能够有效保证动车组列车运行的可靠性和稳定性,可广泛应用于轨道交通列车的显示屏冗余设计。同时,软件控制策略的开发可使HMI的冗余控制不单纯依赖硬件设备,在很大程度上降低了成本,保障了人机交互系统的可靠性和可用性。采用以太网技术骨干通信环路设计,为动车组智能化、信息化的发展预留了空间,符合下一代网络控制技术发展趋势。

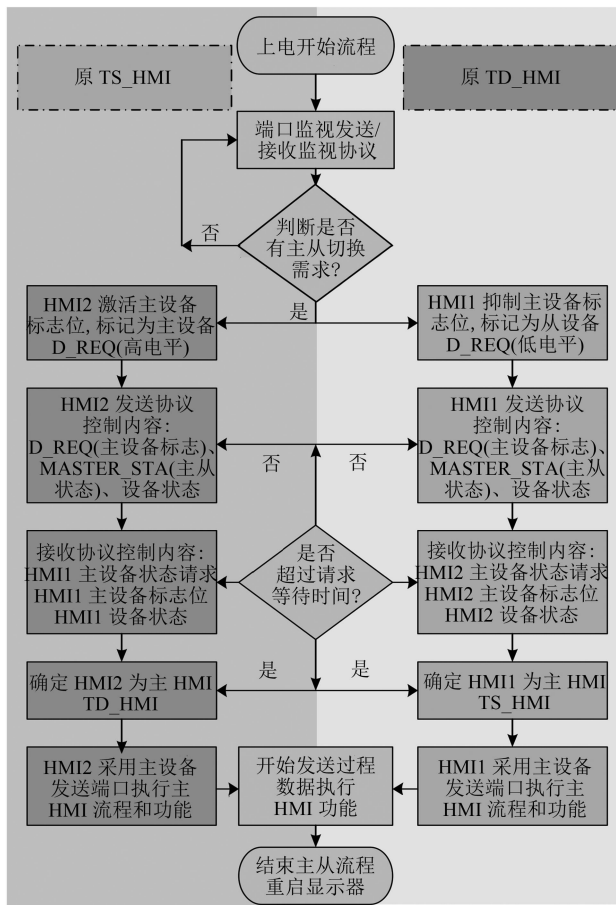


图9 运行过程中2个HMI主从切换流程

参考文献

- [1] 许杰,杨川.基于Linux-FLTK的动车组人机界面软件设计[J].铁路计算机应用,2017(4):15.
- [2] 邓家龙,刘可安.基于MVB通信的VCU软冗余功能研究与开发[J].铁道车辆,2009(11):23.
- [3] 常振臣,沙森.高速铁路列车网络控制系统原理与应用[M].北京:中国铁道出版社,2016:30.
- [4] 王伟,朱鹏,英崔学,等.触摸屏与按键互为冗余设计在整车动态称重仪表中的应用[J].科技应用,2018(2):12.
- [5] 周晓明.长沙市轨道交通1号线列车自动广播的功能及实现[J].电力机车与城轨车辆,2016(5):17.
- [6] 罗晶,王炼红,刘庆娜,等.动车双冗余远程维护系统设计与实现[J].电源技术,2015(9):1989.
- [7] 蔡志伟.机车实时以太网ETB与ECN交换技术研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [8] 潘林杰,王朝,黄崇玺.列车车载以太网冗余技术的分析[J].数字通信世界,2017(9):58.
- [9] 匡昌武,方厚辉.冗余链路技术在工业以太网中的应用分析[J].工业控制计算机,2007(3):18.
- [10] 薛百华.分布式网络冗余技术对高可用性网络的贡献[J].仪器仪表标准化与计量,2011(1):31.

(收稿日期:2020-09-05)