



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104950878 B

(45)授权公告日 2017.10.13

(21)申请号 201510362521.6

(56)对比文件

(22)申请日 2015.06.26

CN 1944146 A, 2007.04.11,

(65)同一申请的已公布的文献号

CN 102023575 A, 2011.04.20,

申请公布号 CN 104950878 A

KR 20050061036 A, 2005.06.22,

(43)申请公布日 2015.09.30

审查员 聂莹莹

(73)专利权人 中南大学

地址 410000 湖南省长沙市岳麓区岳麓山
左家垅

(72)发明人 阳春华 冯江华 彭涛 尚敬

杨笑悦 张宇 杨超 徐立恩

(74)专利代理机构 长沙联扬知识产权代理事务

所(普通合伙) 43213

代理人 周志中

(51)Int.Cl.

G05B 23/02(2006.01)

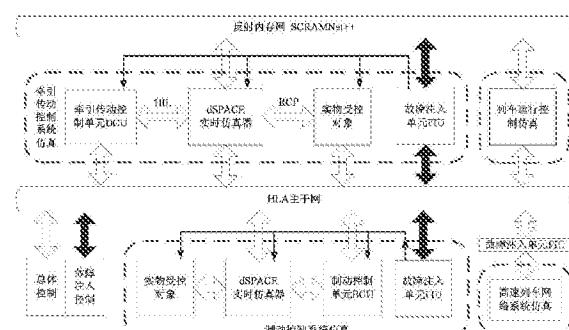
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

一种高速列车信息控制系统协同故障仿真
系统

(57)摘要

本发明公开了一种高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，采用基于HLA-RIT与反射内存网的混合分布式仿真结构，包括实时仿真计算机、实时仿真控制网络、系统物理效应模拟设备，所述实时仿真计算机包括总体控制台、故障注入控制台和各系统的仿真计算机；所述实时仿真控制网络主要包括列车总线与HLA-反射内存网混合式仿真网络；所述物理效应模拟设备主要包括各系统的实物设备、dSACE实时仿真器、仿真模型、接口调理板与故障注入单元FIU，用于模拟高速列车信息控制系统中的主要元部件实物、抽象模型与常见故障。本系统可为高速列车信息控制系统的功能验证提供安全可靠的故障注入/模拟/仿真与测试，具有较强的适用性。



1. 一种高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，所述高速列车信息控制系统包括牵引传动控制系统、网络控制系统、制动控制系统、列车运行控制系统，其特征在于，协同故障仿真系统采用基于HLA-RIT与反射内存网的混合分布式仿真结构，包括实时仿真计算机、实时仿真控制网络、系统物理效应模拟设备，所述实时仿真计算机包括总体控制台、故障注入控制台和各系统的仿真计算机，用于对总系统和各系统的仿真监控和故障注入监控，记录仿真数据；所述实时仿真控制网络主要包括列车总线与HLA-反射内存网混合式仿真网络，用于各系统之间通信和数据传输；所述物理效应模拟设备主要包括各系统的实物设备、dSACE实时仿真器、仿真模型、接口调理板与故障注入单元FIU，用于模拟高速列车信息控制系统中的主要元部件实物、抽象模型与常见故障。

2. 根据权利要求1所述的高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，其特征在于，在牵引传动控制系统、网络控制系统和制动控制系统中分别设置故障注入单元FIU，实现对元件→部件→子系统→系统各层级的故障注入控制。

3. 根据权利要求1所述的高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，其特征在于，故障注入单元FIU不仅实现协议层的故障注入，还实现物理层与电气层的故障注入，并实现覆盖全故障模式的注入。

4. 根据权利要求1所述的高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，其特征在于，通过HLA主干网与反射内存网进行通信和数据传输，并将故障注入控制接入反射内存网与HLA主干网，通过对牵引传动控制系统、网络控制系统和制动控制系统故障注入单元FIU的控制，达到对各系统各层级进行故障注入的分布式控制目的；并能对列车运行控制系统以及整个高速列车信息控制系统进行故障注入/模拟/仿真。

5. 根据权利要求1所述的高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，其特征在于，利用HLA提供的通用、相对独立的支撑服务程序RTI，将具体的仿真功能实现、仿真运行管理和底层通信三者分开。

6. 根据权利要求1所述的高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，其特征在于，利用HLA的互操作性和可重用性，把分布式异构型的仿真应用有效地整合在一起共同完成一个仿真任务，实现仿真应用程序的互操作和重用。

7. 根据权利要求1所述的高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，其特征在于，由实时仿真器和硬连线保证实时性要求最高的部分，采用反射内存网实现实时性要求几毫秒级的部分，其余数据交互采用HLA实现。

8. 根据权利要求1所述的高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，其特征在于，采用MATLAB环境，MATLAB的仿真模型通过适配器以一个联邦成员的身份加入仿真联邦，并发布和订购所需要对象类与交互类，适配器将获得的MATLAB所需的对象类和交互类数据根据相关信息映射为MATLAB的仿真模型中的输入输出变量，并根据仿真运行管理器的控制指令，通过MATLAB的API对MATLAB引擎进行相应的控制。

9. 根据权利要求8所述的高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，其特征在于，HLA-RTI中提供的RTI接口在仿真开始时，管理dSPACE成员的初始化；成员仿真时间推进时，控制基于联邦时间的dSPACE时间；成员创建和发送交互时，把由进程模型产生的交互进行转换和发送；其他成员接受交互时，把接受进来的交互进行转换并发到进程模型；在其他成员发现对象实例时，对HLA对象与相应的dSPACE对象进行映射；在成员更新其属性时，把dSPACE

的更新数据转换成HLA的更新数据；在其他成员得到更新时，使接收到的更新的属性生效。

10. 根据权利要求9所述的高速列车信息控制系统协同故障仿真系统，其特征在于，dSPACE实时仿真器以联邦成员的形式加入仿真联邦，作为半实物仿真中虚拟控制器与虚拟控制对象，并利用接口调理板实现不同类型信号之间的转换与通信。

一种高速列车信息控制系统协同故障仿真系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种协同故障仿真系统，尤其涉及高速列车信息控制系统的协同故障仿真系统。

背景技术

[0002] 高速列车的安全运行是高铁运行与发展的首要问题，关乎国计民生，牵动全国人民的心。我国高速铁路发展迅速，形成了具有中国特色的高铁技术体系，总体技术水平和应用水平居世界领先，但由于高速列车运行时速高、运行环境恶劣以及长期运行可能导致的元器件老化等为高铁的安全运行带来严重的安全隐患。

[0003] 高速列车信息控制系统由牵引传动控制系统、网络控制系统、制动控制系统和列车运行控制系统等构成，是高速列车的心脏（牵引传动控制）、大脑（列车运行控制）和神经（网络控制），高速列车正是在这些系统的共同作用下实现整车安全运行，属于高速列车运行安全的关键系统之一，也是高速列车高发故障的主要来源之一。为保证真实运营系统的安全可靠运行，同时降低研发成本、缩短研制周期和车上调试时间、减少验证时间，所有车载技术在投入运行使用之前，都必须通过实验室的仿真实验和现场运行的测试与试验验证。

[0004] 通过搭建半实物仿真测试体系架构，能够避免在真实环境中进行测试，从而降低测试成本。国内现有的各种高速列车半实物仿真平台，可离线、手动、简单模拟仿真某些子系统内或功能模块内的异常工况，以及“故障导向安全”机制下的故障-停车行为，但缺乏系统级在线故障测试/注入和协同仿真/试验机制。高速列车信息控制系统运行时故障的时空变迁特性，以及系统冗余、模块化或插件化封装带来的隔离特性等，使得在以实现正常运行行为为主要目标的传统半实物仿真平台上，无法仅仅通过简单地设置故障注入环节或增加故障诊断功能来构建规模庞大、结构复杂故障诊断应用验证平台的体系架构；也无法逼近真实地模拟故障注入模式下系统故障的演变环境及其发生、发展、演变的复杂时空变迁特性，因而实现故障测试/注入行为、影响及隔离之间的有效控制十分困难，无法满足系统级故障注入及故障诊断实现技术应用验证研究的要求，同时还会给平台设备带来破坏性、给试验人员带来危害性等隐患。

[0005] 现有的高速列车仿真平台大多以模拟、仿真、验证高速列车正常运行行为为主要目标，仅可离线、手动简单模拟仿真某些子系统内或功能模块内的异常工况，以及“故障导向安全”机制下的故障-停车行为。

[0006] 因此，如何建立故障注入/模拟模式下应用验证平台的协同仿真（试验）机制，包括如何构建适于实现故障注入/模拟行为、影响与隔离有效控制的应用验证平台体系结构，如何可靠、安全、逼近真实地模拟故障演变环境及症状变迁的时空特性及其如何在线实现，是本发明拟解决的关键问题。

发明内容

[0007] 本发明提供一种能可靠、安全、逼近真实地模拟故障的高速列车信息控制系统协同故障仿真系统。

[0008] 为实现上述目的,本发明的技术方案如下:

[0009] 一种高速列车信息控制系统协同故障仿真系统,所述高速列车信息控制系统包括牵引传动控制系统、网络控制系统、制动控制系统、列车运行控制系统等各系统,协同故障仿真系统采用基于HLA-RTI与反射内存网的混合分布式仿真结构,包括实时仿真计算机、实时仿真控制网络、系统物理效应模拟设备,所述实时仿真计算机包括总体控制台、故障注入控制台和各系统的仿真计算机,用于对总系统和各系统的仿真监控和故障注入监控,记录仿真数据;所述实时仿真控制网络主要包括列车总线与HLA-反射内存网混合式仿真网络,用于各系统之间通信和数据传输;所述物理效应模拟设备主要包括各系统的实物设备、dSACE实时仿真器、仿真模型、接口调理板与故障注入单元FIU,用于模拟高速列车信息控制系统中的主要元部件实物、抽象模型与常见故障。

[0010] 优选地,在牵引传动控制系统、网络控制系统和制动控制系统中分别设置故障注入单元FIU,实现对元件→部件→子系统→系统各层级的故障注入控制。

[0011] 优选地,故障注入单元FIU不仅实现协议层的故障注入,还实现物理层与电气层的故障注入,并实现覆盖全故障模式的注入。

[0012] 优选地,通过HLA主干网与反射内存网进行通信和数据传输,并将故障注入控制接入反射内存网与HLA主干网,通过对牵引传动控制系统、网络控制系统和制动控制系统故障注入单元FIU的控制,达到对各系统各层级进行故障注入的分布式控制目的;并能对列车运行控制系统以及整个高速列车信息控制系统进行故障注入/模拟/仿真。

[0013] 优选地,利用HLA提供的通用、相对独立的支撑服务程序RTI,将具体的仿真功能实现、仿真运行管理和底层通信三者分开。

[0014] 优选地,利用HLA的互操作性和可重用性,把分布式异构型的仿真应用有效地整合在一起共同完成一个仿真任务,实现仿真应用程序的互操作和重用。

[0015] 优选地,由实时仿真器和硬连线保证实时性要求最高的部分,采用反射内存网实现实时性要求几毫秒级的部分,其余数据交互采用HLA实现。

[0016] 优选地,采用MATLAB环境,MATLAB的仿真模型通过适配器以一个联邦成员的身份加入仿真联邦,并发布和订购所需要对象类与交互类,适配器将获得的MATLAB所需的对象类和交互类数据根据相关信息映射为MATLAB的仿真模型中的输入输出变量,并根据仿真运行管理器的控制指令,通过MATLAB的API对MATLAB引擎进行相应的控制。

[0017] 优选地,HLA-RTI中提供的RTI接口在仿真开始时,管理dSPACE成员的初始化;成员仿真时间推进时,控制基于联邦时间的dSPACE时间;成员创建和发送交互时,把由进程模型产生的交互进行转换和发送;其他成员接受交互时,把接受进来的交互进行转换并发到进程模型;在其他成员发现对象实例时,对HLA对象与相应的dSPACE对象进行映射;在成员更新其属性时,把dSPACE的更新数据转换成HLA的更新数据;在其他成员得到更新时,使接收到的更新的属性生效。

[0018] 优选地,dSPACE实时仿真器以联邦成员的形式加入仿真联邦,作为半实物仿真中虚拟控制器与虚拟控制对象,并利用接口调理板实现不同类型信号之间的转换与通信。

[0019] 本发明系统的故障仿真以模拟高速列车信息控制系统运行过程中的故障发生、

传播和影响为目的，并以高速列车信息控制系统的结构、设备和逻辑为基础，融合多年来测试过程中的故障统计数据，进行故障注入/模拟/仿真，其本质是模拟现有的设备逻辑和故障模式、故障逻辑，不涉及产品设计。故障仿真包括对牵引传动控制、网络控制、制动控制、列车运行控制等系统从元件→部件→子系统→系统各层级的涉及物理层、电气层和协议层的故障注入/模拟/仿真。可为高速列车信息控制系统的功能验证提供安全可靠的故障注入/模拟/仿真与测试，具有较强的适用性。

附图说明

- [0020] 图1为本发明实施例高速列车信息控制系统协同故障仿真系统示意图。
- [0021] 图2为本发明实施例基于HLA-RTI的仿真系统分布式结构示意图。
- [0022] 图3为本发明实施例基于dSPASE的牵引传动控制半实物故障仿真系统框图。
- [0023] 图4为本发明实施例基于dSPACE的牵引传动控制系统故障注入的接口配置图。

具体实施方式

- [0024] 下面结合附图及实例，对本发明做进一步说明。
- [0025] 高速列车信息控制系统包括牵引传动控制系统、网络控制系统、制动控制系统、列车运行控制系统等各系统。协同故障仿真系统可实现对高速列车信息控制系统的故障建模、故障注入/模拟、故障传播影响与隔离、故障诊断及仿真可信度评估等的仿真分析与验证。图1给出了高速列车信息控制系统协同故障仿真系统示意图，协同故障仿真系统包括实时仿真计算机、实时仿真控制网络、系统物理效应模拟设备。
- [0026] 实时仿真计算机包括总体控制台、故障注入控制台和各系统的仿真计算机，用于对总系统和各系统的仿真监控和故障注入监控，记录仿真数据。
- [0027] 实时仿真控制网络主要包括列车总线与HLA-反射内存网混合式仿真网络，用于各系统之间通信和数据传输。
- [0028] 物理效应模拟设备主要包括各系统的实物设备、dSACE实时仿真器、仿真模型、接口调理板与故障注入单元FIU，用于模拟高速列车信息控制系统中的主要元部件实物、抽象模型与常见故障。
- [0029] 图2给出了基于HLA-RTI (High Level Architecture-Run Time Infrastructure，高层体系结构-运行时间支撑系统) 的仿真系统分布式结构，在牵引传动控制系统、网络控制系统、制动控制系统中分别设置故障注入单元FIU、实物控制器、dSPACE实时仿真器、实物受控对象(物理效应模拟设备)，故障注入单元FIU不仅能实现协议层的故障注入，还能实现物理层与电气层的故障注入，并能通过对元件→部件→子系统→系统(牵引传动控制系统、网络控制系统和制动控制系统) 各层级的故障注入控制，实现覆盖全故障模式的故障注入。系统中各个部分根据不同的实时性与硬线连接要求，通过HLA主干网与反射内存网进行通信和数据传输，并将故障注入控制接入反射内存网与HLA主干网，达到对系统各层级和部件进行故障注入的分布式控制目的，并能对列车运行控制系统以及整个高速列车信息控制系统进行故障注入/模拟/仿真。
- [0030] 利用HLA提供的通用、相对独立的支撑服务程序RTI，将具体的仿真功能实现、仿真运行管理和底层通信三者分开；利用HLA的互操作性和可重用性，把分布式异构型的仿真应

用有效地整合在一起共同完成一个仿真任务,实现仿真应用程序的互操作和重用;由实时仿真器和硬连线保证实时性要求最高的部分,采用反射内存网实现实时性要求几毫秒级的部分,其余数据交互采用HLA实现。

[0031] 本实施例采用MATLAB环境,MATLAB的仿真模型通过适配器以一个联邦成员的身份加入仿真联邦,并发布和订购所需要对象类与交互类。适配器将获得的MATLAB所需的对象类和交互类数据根据相关信息映射为MATLAB的仿真模型中的输入输出变量,还要根据仿真运行管理器的控制指令(以交互类的形式发送),通过MATLAB的API对MATLAB引擎进行相应的控制(如启动、暂停、继续和终止等)。

[0032] 具体地,适配器的主要功能包括两个部分:1) 通用RTI服务(包括联邦管理、声明管理、所有权管理、数据发布管理、时间管理、对象管理);2) MATLAB通用API服务(包括MATLAB引擎管理、MATLAB数据空间管理、数据映射、MATLAB仿真模块管理)。

[0033] 具体地,RTI接口的主要作用是:仿真开始时,管理dSPACE成员的初始化;成员仿真时间推进时,控制基于联邦时间的dSPACE时间;成员创建和发送交互时,把由进程模型产生的交互进行转换和发送;其他成员接受交互时,把接受进来的交互进行转换并发到进程模型;在其他成员发现对象实例时,对HLA对象与相应的dSPACE对象进行映射;在成员更新其属性时,把dSPACE的更新数据转换成HLA的更新数据;在其他成员得到更新时,使接收到的更新的属性生效。

[0034] 如图3所示,基于dSPASE的牵引传动控制半实物故障仿真系统包括dSPACE实时仿真器、故障注入系统FIS和实物DCU。

[0035] 以牵引传动控制系统为例,dSPACE实时仿真器中除了包含牵引传动控制系统中的设备模型(变压器、整流器、中间回路、辅助交流器、辅助逆变器、逆变器和电机等模型),还包含故障注入所需要的故障模型。

[0036] FIS包括故障注入单元FIU、接口调理板和上位机。FIS系统用于故障注入控制,由上位机控制仿真对象模型、故障模型的选取,通过FIU单元,经过接口调理板,分别对与各个仿真对象进行物理层与电气层的故障注入;用dSPACE仿真器模拟传动系统;上位机模拟中央控制单元;上位机安装有Matlab/Simulink,用于牵引传动系统数学模型的搭建、编译和下载;上位机同时配备有dSPACE专属监控软件ControlDesk,该监控软件可实时监测并记录仿真系统的数据。

[0037] 具体地,dSPACE仿真器的主要输入为IGBT开关控制信号,主要输出为牵引电机的电压、电流和速度信号以及故障反馈信号;

[0038] 具体地,为了缩小仿真计算周期,dSPACE仿真器选用双核处理器配置并行计算,主频为2.0GHz;

[0039] 具体地,2个CPU仅交换直流端电压和电流等数据,为了减少2个CPU之间数据的交换,主CPU用于牵引变压器和四象限整流模型的计算,slave CPU用于中间直流回路、PWM逆变器和牵引电机模型的计算。

[0040] 如图4所示,基于dSPACE的牵引传动控制系统故障注入的接口配置,包括dSPACE实时仿真器、实物DCU、故障注入系统FIS。

[0041] 具体地,dSPACE实时仿真器包括DS1007处理器板、DS4004数字I/O板、DS2103多通道高精度的D/A板、DS5203FPGA板;

[0042] 具体地,DS1007处理器板通过20Mb/s传输速率PHS高速总线与外围接口板卡进行数据交换、控制信号采集或系统状态变量输出,对I/O接口板提供30Mb/s传输速率,多至64个PHS总线中断,2个处理器板同时进行模型解算,通过高速光纤接口进行数据交换,传输速率>1.25Gbit/S;

[0043] 具体地,DS4004板为数字I/O板,具有96路双向数字I/O口,输入电压为TTL电平;

[0044] DS2103板为多通道高精度的D/A板,具有32路并行的D/A和14位的分辨率,其输出电压范围可通过编程设定为±5V;

[0045] DS5203板为FPGA板,由Xilinx的Virtex-5系列新品构成,它提供了6路AD,6路DA及16路数字IO通道;

[0046] FIS包括故障注入单元FIU、接口调理板和上位机。接口调理板负责dSPACE仿真器与故障注入单元FIU或实物DCU以及与I/O操作面板之间信号的转换和调理;

[0047] 以上接口板通过PHS总线与处理器板卡连接,产生一系列不同频率的脉冲信号,包括增量编码器信号以及脉宽调制信号,能在线调节信号的占空比,并能评测不同信号的频率和相位等参数。接口通道的数量可通过背板进行扩增。

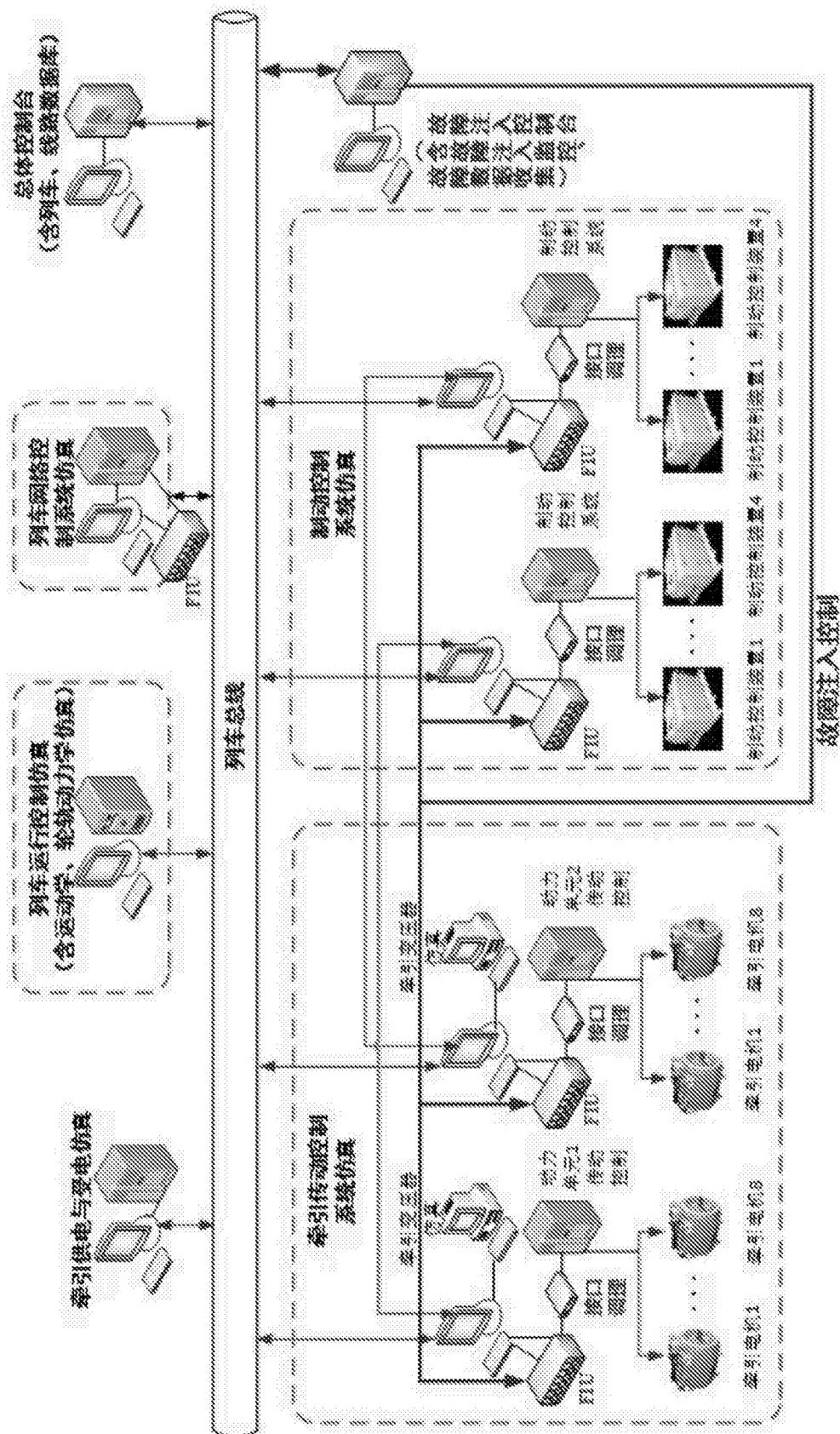


图1

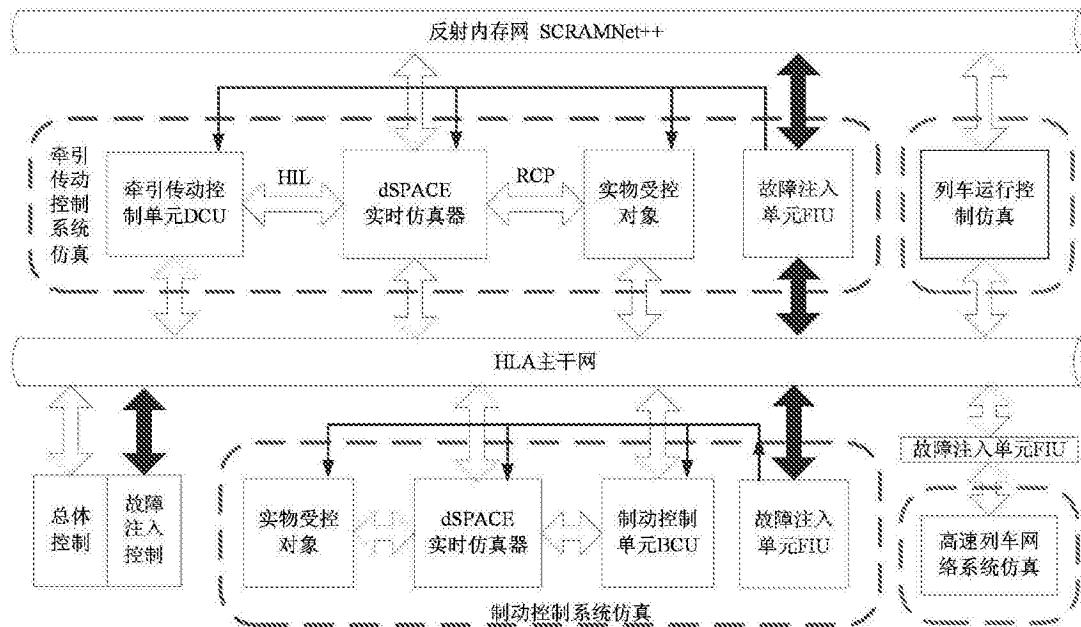


图2

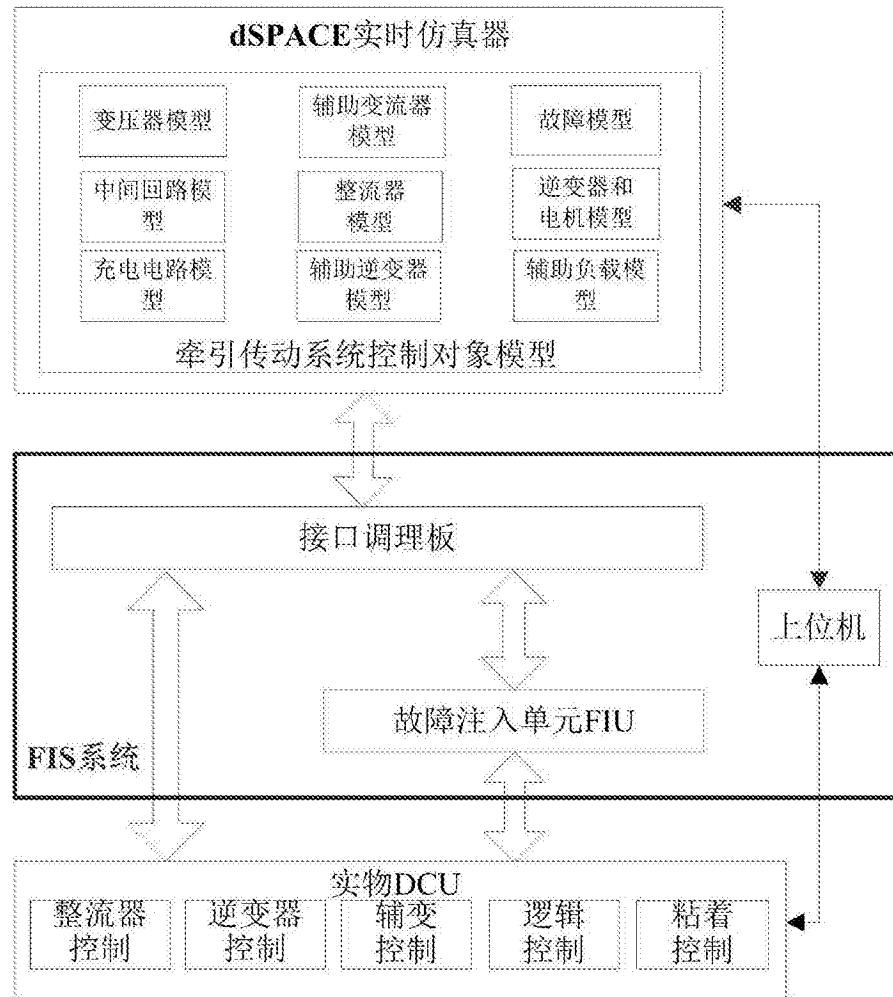


图3

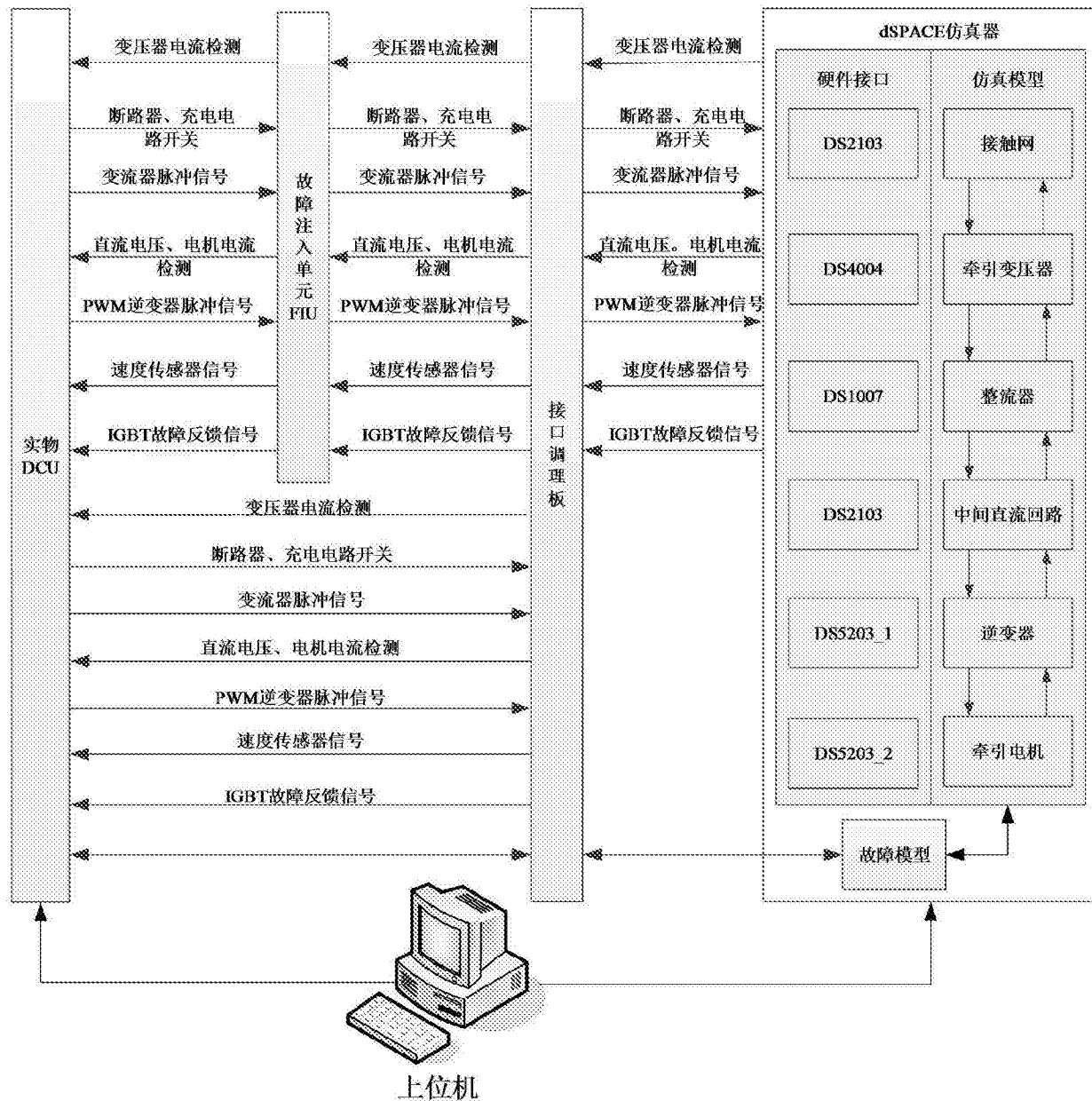


图4