

文章编号: 1005-8451 (2011) 08-0050-05

CBTC 系统仿真测试平台设计

陈祥献, 王 东, 黄 海

(浙江大学 生物医学工程与仪器科学学院, 杭州 310027)

摘 要: 本文介绍一种基于通信的列车控制系统 (CBTC) 的仿真测试方法, 并将其应用于 CBTC 系统仿真测试平台。从平台的系统结构、模型建立等方面对平台系统进行了分析, 就其中的建模方法和系统仿真的软件实现等进行研究。搭建了功能完善的 CBTC 系统仿真测试平台, 在 CBTC 仿真测试过程中发挥了重要作用。

关键词: 仿真; CBTC; 轨道交通; 建模; 测试

中图分类号: U28 : TP39 **文献标识码:** A

Design of simulation testing platform for CBTC System

CHEN Xiang-xian, WANG Dong, HUANG Hai

(Department of Instrumentation Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A method of simulation testing for the Communication based Train Control (CBTC) System was introduced and applied to the simulation testing platform for CBTC. The architecture and the simulation modeling of the platform were analyzed, and the modeling method and the implementation of simulation systems were studied in the paper. Based on the above work the simulation testing platform with whole functions for CBTC was developed. The results of testing in laboratories show that the platform could be used for simulating and testing of CBTC.

Key words: simulation; CBTC; railway transit; modeling; testing

随着城市规模的快速增长, 城市轨道交通正向着高运输密度和高运输效率方向发展。在计算机技术、网络通信技术的推动下, 基于通信的列车控制系统 (Communication Based Train Control, CBTC) 成为必然的发展趋势^[1]。

CBTC 系统设计工程规模巨大, 仅依靠现场验证工程设计的正确性, 工作量将是不可估量的, 开发的质量也难以到保证^[2]。应用计算机仿真测试技术就能很好地解决这些问题。一套通用的 CBTC 仿真测试平台, 可以在帮助工程人员在实验室环境下进行工程验证, 对提高工程实施质量、缩短工期、降低工程成本有着重大意义。

本文根据 CBTC 系统原理和我国的实际需求, 对 CBTC 系统的结构划分、各个子系统之间的耦合关系进行了研究, 对各个子系统进行建模, 用计算机仿真方法搭建了整套 CBTC 系统仿真测试平台。该平台可对故障情况进行模拟、回放, 提供丰富的测试和诊断手段, 可以快速定位出现的故障, 尽可能的发现并解决 CBTC 研发过程中出现的问

题。此外, 为实现对部分真实系统设备的测试, 本仿真测试平台还支持真实设备与虚拟设备共存, 二者相互替代、无缝接入。

1 系统结构

CBTC 仿真测试平台需要满足对列车自动控制系统、数据通信子系统 (Data Communication Subsystem, DCS)、计算机联锁系统 (Compute Based Interlocking, CBI)、现场设备、列车运行模型、列车自动监控 (Automatic Train Supervision, ATS) 系统的仿真^[3], 以及故障注入和诊断接口的实现。仿真测试系统可以划分为 CBTC 列车控制系统、联锁系统、DCS、轨旁设备仿真、列车仿真、ATS 仿真、测试及诊断接口模块。系统框图如图 1。

列车自动防护系统 (Automatic Train Protection, ATP) 包括车载控制器 (Carborne Controller, CC) 以及区域控制器 (Zone Controller, ZC)。图中所有灰色双箭头表示存在网络通信, 黑色实线箭头表示离线的文件生成或文件读取。

为实现仿真子系统与真实系统无缝连接, 相

收稿日期: 2010-10-08

作者简介: 陈祥献, 副教授; 王 东, 在读硕士研究生。

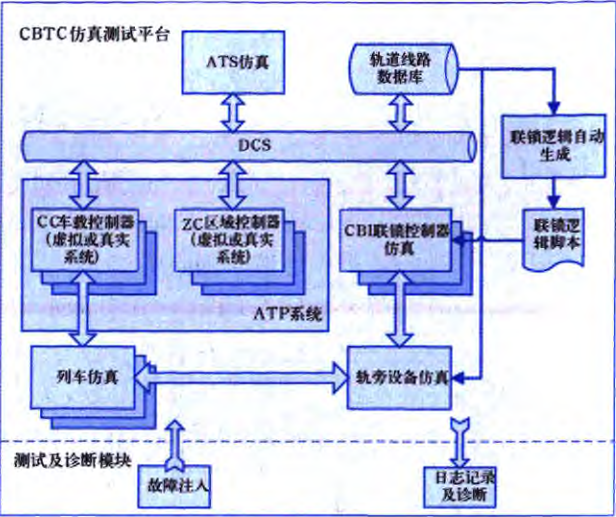


图 1 CBTC 仿真测试系统结构框图

互替代。各子系统之间的主要的接口和协议按照真实系统的标准设计,使得整个仿真测试系统(除少数硬件设备仿真,如轨旁设备仿真)可以运行在虚拟设备和真实设备共存的状态下,为在 CBTC 运行环境测试实际设备的性能指标提供了必要手段。

由于平台中各个模块间的数据交换都由以太网通信实现,因此在平台硬件部署方案的选择上有很大的自由度,各个模块可以运行在同一台计算机或不同的计算机上。

2 平台模块设计及功能

CBTC 仿真测试平台涵盖的模块众多,为合理规划模块,本仿真测试平台的子模块的划分遵循了以下 2 个原则:(1)有实际系统参照的按照实际子系统范畴划分,这样有利于仿真子系统与实际系统的相互替代;(2)没有实际系统参照的全仿真系统按照功能划分。被仿真对象要方便抽象成能够提供该仿真功能的类。各个子系统和模块功能如表 1。

2.1 模块间联系分析

在模块间数据交互的分析过程中本系统不仅考虑了真实系统中的各种直接的信息连接方式,还考虑到客观世界中依赖作用力与反作用力、光线等媒介在 2 个模块间传递的信息,建立了一套完整的物理信息传播机制。

举例来说,列车司机在驾驶机车时,可以凭借肉眼看到前方信号机的颜色,从而对列车进行操

表 1 子系统和模块功能表

模块名称	主要功能
ATS 仿真	监控所有站场设备和列车发送 ATS 操作指令;接收来自联锁、ZC、CC 的设备状态报告;时刻表编辑,计划列车运行
DCS	为所有 CBTC 设备提供网络服务
CC 仿真	速度曲线计算;列车超速防护;列车车门防护;列车定位
ZC 仿真	列车跟踪;移动授权计算
CBI 仿真	采集轨旁设备状态,向 ATS 报告轨旁状态;解析并执行联锁逻辑脚本;操作轨旁设备,实现设备联锁
逻辑脚本生成	根据轨道线路数据文件离线生成对应的联锁执行脚本
列车仿真	模拟列车 TOD,提供驾驶接口;列车运行动力学仿真;车辆设备(如车门)动作仿真
轨旁设备仿真	信号机、道岔、区段、屏蔽门、按钮等轨旁设备仿真;显示动态站场图;设备故障仿真
测试及诊断模块	提供接口实现故障注入,对常见故障作出自动诊断和记录

纵。这一类信息的传递在仿真系统中必须实体化,并通过数据交换的方式传递给对应的数据接收方。本文所设计的仿真测试平台中,上述类型信息均以网络通信的方式在各个模块间传递。运用这样的物理信息传播机制,仿真测试系统可以更加逼真地反映客观世界,对提升使用者的真实感有很大帮助。

2.2 轨旁设备仿真设计与实现

要测试完整的 CBTC 功能必须有一个可供测试的现场环境,包含众多信号机、轨道、道岔、屏蔽门、按钮等设备。在本文设计的仿真测试平台中,轨旁设备仿真模块便提供了这样一个虚拟设备环境。采用面向对象的建模技术,可以封装各个设备实体的行为和数据,将轨旁设备信息以对象群的方式表示出来。本文在轨旁设备仿真模块中,将所有轨旁设备按照共性抽象成设备基类,又根据不同设备的特性,派生出不同的设备子类。这种设计方案可使得复杂系统标准化,并具有良好的可扩展性。

通过分析轨旁设备的共性,本模块中设计所有设备的基类 CElement 类,该类封装了设备最基本的数据,如:设备名称、设备类型、设备 ID 等。由设备基类派生出若干设备子类,如:信号机类(CSignal 类)、道岔类(CSw 类)、直股区段类(CTrkSgmnt 类)、道岔区段类(CSwSgmnt 类)等,并在其中封装了设备各自的数据结构和相关操作。具体的类继承与依赖关系如图 2。

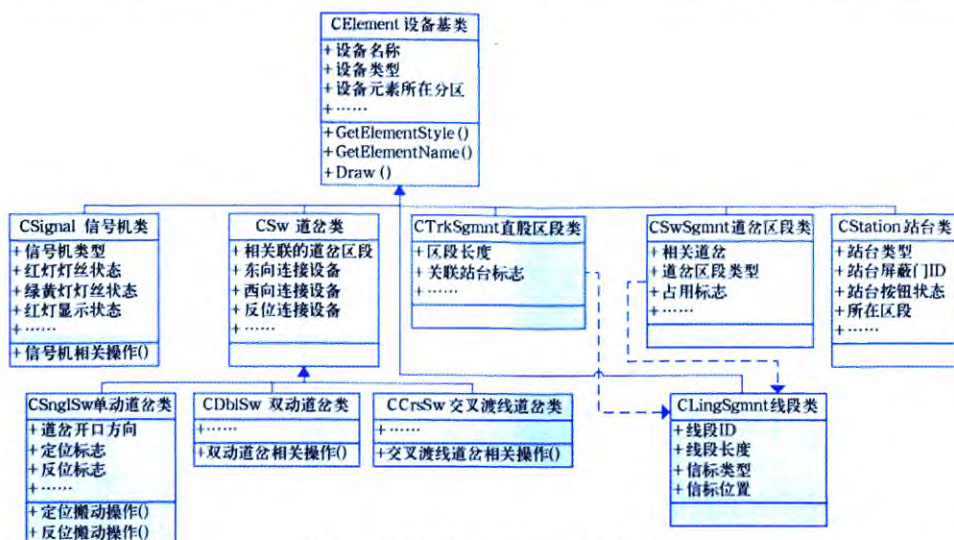


图2 轨旁设备仿真各个类的设计

轨旁设备仿真在 Visual C++6.0 平台上开发, 建立可视化站场图显示, 动态显示信号机、道岔状态、区段占用状态等。还提供图形化接口供操作人员对具体设备进行设置或操作, 对正常或故障情况进行模拟。

2.3 列车动力学仿真设计

列车仿真子系统提供列车运行仿真, 其中大量涉及列车动力学仿真内容。动力学仿真模块可以对列车的牵引力、制动力、阻力、速度、加速度、位置等列车运动参数进行模拟。其中, 列车的阻力仿真是列车动力学仿真中的重点。为使列车仿真的效果尽可能接近真实情况, 本文采用多质点运动模型为列车建模。根据经典物理运动定律分析, 列车运行阻力通常可分为常规阻力和附加阻力^[4]。

2 种阻力模型及其相关公式如下。

列车的常规阻力模型:

单位基本阻力运算公式:

$$w = A + Bv + Cv^2 \text{ (N/KN)} \quad (1)$$

式中 v 为车辆速度, A 、 B 、 C 为车辆参数 (随车辆类型的不同而不同)。在仿真系统中, 应提供列车基本阻力参数配置功能。动车基本阻力和拖车基本阻力的 A 、 B 、 C 参数各不相同。

列车的附加阻力模型:

列车的附加阻力的计算采用多质点计算方法, 考虑列车长度, 按列车实际每节车厢所在线路位置来计算附加阻力的平均值, 达到精确计算的效果。

列车各节车厢的单位坡道附加阻力计算

公式:

$$w_j' = \frac{\sum_{i=1}^m i_l l_i}{L_j} \text{ (N/KN)} \quad (2)$$

其中, w_j' 表示列车的第 j 节车厢所受的单位坡道附加阻力值, L_j 表示列车的第 j 节车厢的长度, m 表示列车的第 j 节车厢所在坡的个数, i_l 表示第 j 节车厢所在的第 t 个坡的坡度值, l_i 表示第 j 节车厢对应第 t 个坡的长度。上坡时, i_l 取正值; 下

坡时, i_l 取负值。

列车各节车厢的单位曲线附加阻力计算公式:

$$w_j'' = \frac{600 \sum_{i=1}^p \frac{l_i}{R_i}}{L_j} \text{ (N/KN)} \quad (3)$$

其中, w_j'' 表示列车的第 j 节车厢所受的单位曲线附加阻力值, L_j 表示列车的第 j 节车厢的长度, p 表示列车的第 j 节车厢所在曲线的个数, l_i 表示第 j 节车厢对应第 t 个曲线的长度, R_i 表示第 j 节车厢所在的第 t 个曲线的半径。由此可得, 列车附加阻力的计算公式如下:

$$f_w = \left[\sum_{j=1}^n (w_j' + w_j'') m_j \right] / 1000 \text{ (KN)} \quad (4)$$

其中: n 为列车编组车厢的个数, w_j' 为各节车厢所受的单位曲线附加阻力值, w_j'' 为各节车厢所受的单位曲线附加阻力值, m_j 为第 j 节车厢的重量, 单位: t , g 为重力加速度, 取 9.8 N/Kg 。

2.4 速度曲线计算

按照 CBTC 的设计需求, 在仿真测试平台的 CC 仿真子系统中实现了列车超速防护和车门防护。其中列车超速防护中速度曲线的计算是 CC 仿真子系统的设计核心。实时、精确的速度曲线计算为 CBTC 列车速度防护仿真提供了必要条件。ATP 速度防护的原理如图 3。

CC 仿真接收来自 ZC 发送的移动授权以及 ZC 广播的轨旁设备状态, 选取较为苛刻的条件数据计算安全速度, 即 ATP 防护曲线。

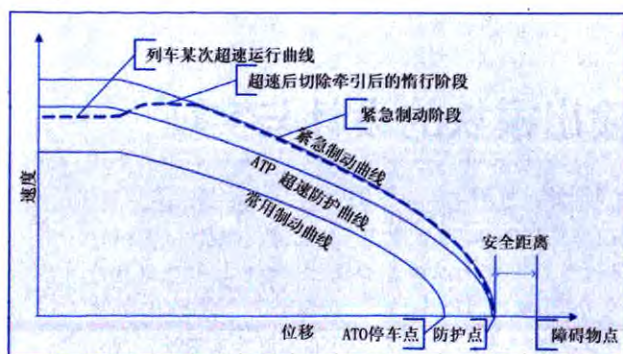


图3 ATP速度曲线及列车超速防护示意图

ATP防护曲线的计算方法，根据列车与障碍物间的关系，由物理运动定律推得：

$$V_{MAL} = \sqrt{V_R^2 + 2as} \quad (5)$$

其中， s 表示列车与前方障碍（或限速点）的距离，即移动授权的一部分， V_{MAL} 表示列车距离前方障碍（或限速点）距离为 s 时的安全速度， V_R 表示前方障碍点（或限速点）处的限速值，如果为障碍点（前方车尾、轨道尽头、红色信号机等），则 $V_R = 0$ ， a 表示列车启用紧急制动后的制动加速度。 a 的大小根据不同的车辆编组可以人工配置。

2.5 真实系统设备测试接口的设计

本文设计的CBTC系统仿真测试平台中各个子系统间的接口按照实际CBTC系统接口规范设计，可以轻松将一部分仿真子系统用真实系统替代。将真实系统接入平台后，就可以通过向平台注入一定数量的测试脚本，让真实子系统在仿真的环境中运行，以达到测试研发产品的目的。

本平台主要采用“黑盒”测试方法对接入平台的真实系统进行测试。即仿真测试平台通过系统仿真，将一部分必要的仿真数据提供给接入平台的真实系统，作为被测真实系统输入数据。再将真实系统的输出采回仿真测试平台，与相应的功能需求作对比，以判断被测系统的是否完成需求包含的所有功能。以ATP系统为例，真实系统黑盒测试框图如图4。

3 系统实现与讨论

以国内某城市一条地铁线路的工程数据为基础，本文设计的CBTC仿真平台在实验室环境下，完成了对整条线路的仿真运行，并接入正在开发

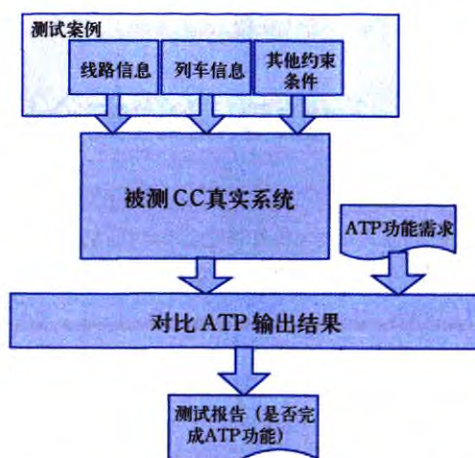


图4 对CC真实系统进行黑盒测试框图

的真实ATP设备，对其进行了测试。

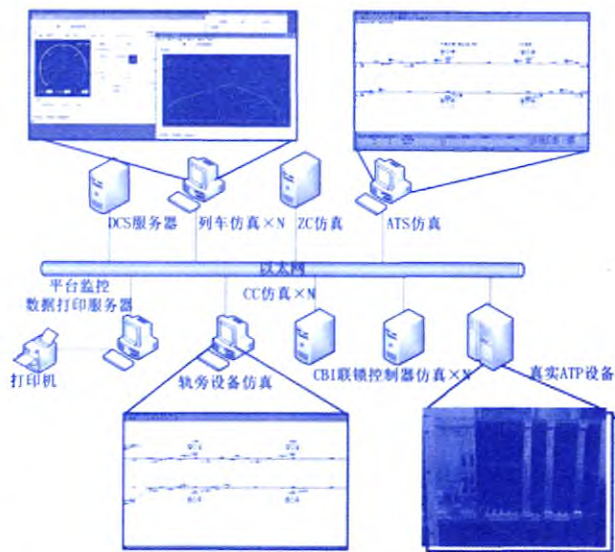


图5 CBTC仿真测试平台部署图

本仿真测试平台在轨旁设备仿真、ATS仿真、列车仿真中都设计有友好的图形界面，显示直观，操作方便。图5中分别显示了正在仿真运行的列车仿真程序界面、轨旁设备仿真程序界面、ATS仿真程序界面以及一套接入仿真测试平台的真实ATP设备的实物图。

在仿真运行的过程中，本平台体现出以下特点：

易接入性，平台轻松实现了虚拟设备和真实设备的互联，且配置简单。

精确性，平台对列车运行的仿真具有很高的仿真精度，并提供精确的列车运行曲线图表，能够

(下转 P56)

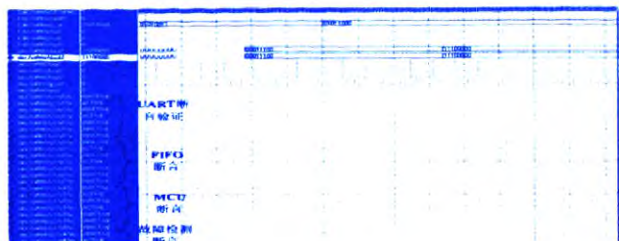


图3 验证结果

3组串口数据通过串口调试助手发送给FPGA, FPGA经过逻辑处理, 最终输出2组动态信号和2组并行数据。如果FPGA判断串口调试助手输入的3组数据为安全数据, 则FPGA输出的周期性脉冲信号驱动外部继电器工作。

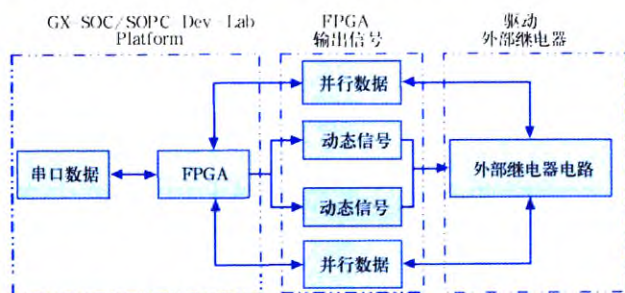


图4 安全I/O硬件实现原理

责任编辑 方圆

(上接P53)

满足CBTC测试需求。

直观性, 平台拥有丰富的图形界面, 可提供测试人员直观友好的测试环境。

可扩展性, 平台提供完善的配置系统以及充足的扩展接口, 对线路设备的增加和扩容有很好的支持。

4 结束语

本文在深入分析CBTC系统仿真平台的工作原理和系统需求的基础上, 利用面向对象的分析和建模方法, 对CBTC系统中各个模块功能、对象模型建立、模块间依赖关系以及数据交互进行了研究。在PC机平台上构建了CBTC系统仿真测试平台, 通过实际线路数据在实验室环境下对平台功能特性进行测试与验证。实验结果表明本平台可用性好、易于扩展、配置灵活、测试与仿真相结

长时间稳定性测试表明安全I/O模块的正确性和安全性。安全性测试时, 人为使安全I/O模块中的模块A、B输出的比较数据不一致, 安全I/O模块能够正确地使输出导向安全侧。

2 结束语

本文对可扩展安全计算机的I/O模块进行了专门的设计, 完成了基于可编程逻辑时钟级同步安全I/O模块的设计、仿真、验证和实现。该模块能够保证安全计算机输入输出的数据和外部设备交互的高可靠性和高安全性, 所付出的硬件和软件成本较低, 具有较好的实用性, 能推广到其它安全系统。

参考文献:

- [1] 马连川, 高倍力. 一种高安全容错控制计算机的设计与实现[J]. 中国安全科学学报, 2004 (8): 101-105.
- [2] 页春欣. 铁路信号容错技术[M]. 中国铁道出版社, 1997.

合, 能很好应用于CBTC系统的设计与开发。

参考文献:

- [1] IEEE standard for Communications-Based Train Control(CBTC) performance and functional requirements. Rail Transit Vehicle Interface Standards Committee of the IEEE Vehicular Technology Society.1999: 135-137
- [2] 陈卫华. 适用于ATS测试及培训的CBTC仿真系统[J]. 铁道通信信号, 2010 (3).
- [3] 王成, 唐涛. CBTC仿真系统中数据库的设计与实现[J]. 计算机仿真, 2007 (9).
- [4] 中华人民共和国铁道部. 列车牵引计算规程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [5] 孙玉鹏. CTCS3级列控系统仿真测试平台[D]. 北京交通大学, 2006 (12).
- [6] 王婷, 唐涛. 基于UML的城市轨道交通列车控制系统分析与建模[J]. 系统仿真学报, 2005 (8).

责任编辑 方圆