

列车驾驶仿真器及其关键技术

苏 虎, 金炜东

西南交通大学电气工程学院, 成都 610031

[摘要] 列车驾驶仿真器通过列车运行性能仿真、驾驶环境仿真来建构一个具有高度真实感的虚拟驾驶环境。以列车驾驶仿真器为平台, 可进行驾驶培训和列车动力学仿真、优化操纵等研究工作。介绍了列车驾驶仿真器的不同构成形式, 给出了全功能分布式列车驾驶仿真器的典型结构, 并在此基础上进一步讨论了列车驾驶仿真器的关键技术。

[关键字] 列车驾驶仿真器; 列车动力学; 视景仿真; 运动系统

[中图分类号] TP391.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)12-0012-06

Train Driving Simulator and Its Key Techniques

SU Hu, JIN Weidong

School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: In a train driving simulator, the performance simulation and the environment simulation are used to create a high fidelity virtual driving environment. Driving training, optimized operating and related researches (such as vehicle dynamics simulation) can be carried out on the train driving simulator. Assortment of train driving simulators is discussed. A typical architecture of a full mission simulator is introduced, based on which, key techniques of a train driving simulator are discussed.

Key Words: train driving simulator; vehicle dynamics; scene simulation; motion system

CLC Number: TP391.9

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)12-0012-06

0 引言

轨道交通在我国国民生活中发挥着至关重要的作用。列车司机作为轨道交通行业的一线岗位, 对安全运营起着非常重要的作用。列车司机不但需要精通基本的驾驶技能, 还需要懂得如何处理各类突发事件, 掌握列车在非正常情况下的处理等高级驾驶技能。2001年, 在日本举办的国际铁路列车司机培训研讨会上, 国际铁路联盟(UIC)成员一致认为: 列车司机及指导员、铁路员工的知识、技能和素质培训教育在轨道交通发展中必须具有最高的优先性。

列车驾驶仿真器通过仿真列车运行性能、列车驾驶环境来建构一个具有高度真实感的虚拟驾驶环境。在这样的环境中, 既能够进行驾驶技能的培训, 也可对司机进行心理素质的训练。列车驾驶仿真器具有安全、经济、节能、高效等特点。国外经验表明, 采用列车驾驶仿真器

对司机进行培训可提高培训效率 30%~50%^[1], 可为列车动力学、优化操纵、舒适度评价、安全驾驶行为等领域的研究工作提供实验平台。

20 世纪 80 年代, 美、中、澳等国的铁路科研机构开始研制机车模拟装置, 这些早期的列车驾驶仿真器主要用于动力学分析等领域。西南交通大学孙翔教授领导的“重载列车动力学”国家“七五”攻关课题组研制了我国第一台列车驾驶仿真器。在大秦线万吨重载列车开行前, 利用该仿真器分析了万吨列车的操纵技术, 提出了合理的操纵方案, 确保了大秦线万吨重载列车的安全开行^[2]。随着计算机技术的发展, 列车驾驶仿真器中驾驶环境仿真的逼真度得到了很大的提高, 其应用也扩展到以列车驾驶培训为主的相关领域。目前, 列车驾驶仿真器已成为各国铁路、城市轨道交通部门进行列车司机培训考核和进行各类相关研究的重要工具。

收稿日期: 2007-05-25

作者简介: 苏 虎, 成都市二环路北一段 111 号 3 号楼西南交通大学电气工程学院, 副研究员, 主要从事计算机仿真技术、虚拟现实、列车驾驶仿真器等领域的研究; E-mail: suhu@home.swjtu.edu.cn

金炜东(通讯作者), 成都市二环路北一段 111 号 3 号楼西南交通大学电气工程学院, 教授, 主要从事优化与系统仿真、智能信息处理、控制与检测技术等领域的研究; E-mail: wdjin@home.swjtu.edu.cn

1 列车驾驶仿真器

1.1 列车驾驶仿真器基本类型

列车驾驶仿真器需要完成两类仿真任务: 列车运行性能仿真和驾驶环境仿真。性能仿真部分主要实现列车牵引及制动系统、列车控制系统、列车动力学、车载信号系统等与列车运行内容相关的仿真; 驾驶环境仿真则从视觉、听觉、触觉、运动感受等方面模拟列车真实运行时的驾驶环境, 令使用者能够身临其境, 达到最佳培训效果。

根据列车驾驶仿真器的规模与仿真程度, 可将其分为 3 种基本类型: 部分任务训练仿真器 (Part Task Training Simulator, PTTS)、多功能仿真器 (Multi-function

Simulator, MFS) 和全功能仿真器 (Full Mission Simulator, FMS)。图 1 给出了西南交通大学研制的 3 种不同类型的列车驾驶仿真器。PTTS 是为解决基本驾驶技能的培训而设计的一种结构简单、经济实用的初级训练仿真器, 可采用纯软件方式实现, 也可配备最基本的操纵设备。但由于 PTTS 配备的硬件资源有限, 一般仅能满足运行环境仿真的最低要求, 真实感较差。MFS 能够满足中、高级驾驶培训的主要需求, 根据配置的不同, 会删减部分次要功能以降低系统造价, 如在多数的 MFS 中不包含运动系统等。FMS 结构复杂、功能完备, 可满足几乎所有的驾驶训练需求, 无论在性能仿真方面, 还是驾驶环境仿真方面, 逼真度都最高。



图 1 不同类型的列车驾驶仿真器

Fig. 1 Assortments of train driving simulators

1.2 系统结构

列车驾驶仿真器是一种人在回路 (Human-in-the-Loop) 的仿真系统, 通常由列车性能仿真系统、输入输出系统、视景仿真系统、声音仿真系统、运动仿真系统以及司机室、操纵台等组成, 在培训应用中, 一般还配备有教员监控及操纵评价系统、观摩系统等辅助系统。

由于 PTTS 和 MFS 这两类列车驾驶仿真器可通过对 FMS 的结构简化得到, 这里以 FMS 为例介绍系统结构。典型的 FMS 基本结构如图 2 所示。FMS 通常采用分布式体系结构, 由多个仿真计算节点组成, 分别完成列车性能仿真、数据采集及输出控制、视景仿真、声音仿真、运动控制等功能。这些节点通过快速/高速以太网连接, 采用基于 TCP 或 UDP 的通讯协议进行实时数据交换。

2 列车性能仿真

2.1 列车控制系统仿真

对于传统的列车而言, 列车控制系统仿真主要是

针对机车控制电路而言的。根据不同需求, 可采用半实物仿真和数字仿真的方式来实现。机车电路的半实物仿真系统将经过改造的机车电器柜作为回路中的一个环节参与仿真。改造后的电器柜, 除可实现正常的机车控制逻辑外, 还可进行各类故障设置仿真, 以满足培训要

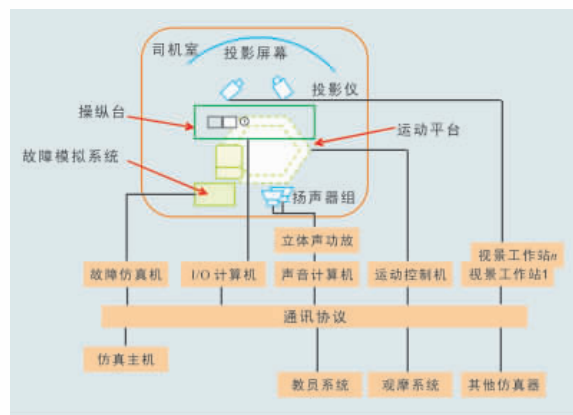


图 2 全功能列车仿真器结构

Fig. 2 Architecture of full mission train driving simulator

求。数字仿真系统则建立在机车电路的数字仿真模型的基础上,可采用软件的方式实现。

在机车控制系统的数字仿真模型中,为实现电路、器件的故障设置,包含了所有的器件、电路。器件的当前状态由上一时刻状态、其他关联器件或电路的状态、相关的输入及对应的逻辑计算式决定。完整的机车电路仿真系统会包含数百、乃至上千状态变量及逻辑计算式。每个仿真周期中,仿真程序读取输入信号,并按电路的顺序根据逻辑计算式对所有器件状态进行逐一计算,部分状态被输出作为其他系统的输入或驱动仪表、指示灯等设备。状态变量之间的关系以及逻辑计算式被存放在机车逻辑数据表中,供仿真程序调用。逻辑数据表可以根据机车电路图进行调整,对于不同类型的机车,只需重新定义逻辑表即可。状态变量的选取决定了机车控制电路仿真中可设置故障的种类与数量。

随着列车控制新技术在高速列车、动车组、城轨列车中的应用,列车仿真器需要对诸如列车自动驾驶(Automatic Train Operation, ATO)^[3]、列车自动保护(Automatic Train Protect, ATP)、车载网络、各类分布式数据采集、控制系统等进行仿真。对于这些系统,一般无法完全获知其内部的原理与实现方式。需要根据先验知识、系统/模块的外部特性对其进行辨识,并建立相应的仿真模型。通过试验对仿真模型进行验证与改进,使之能够满足驾驶仿真的需要。

2.2 列车动力学仿真

列车动力学问题是轨道交通领域重要的研究课题之一。西南交通大学、铁道部科技研究院等科研机构在该领域作了大量的研究工作^[4-8],取得了很多有价值的成果。

列车在线路上运行时,列车与线路一起构成了一个极其复杂的多自由度振动系统。对于列车驾驶仿真器而言,需要对速度、加速度、冲动、车钩力等运行参数进行实时计算。这些计算结果是仿真器正确运行的基础,也是对司机操纵平稳性进行评价的依据,计算结果被输出到运动系统,还可使受训司机直观感受到列车当前的运行状态,提高训练的真实感。在列车驾驶仿真器中,主要考虑列车的纵向动力学模型。将列车中的每一机车、车辆视为一个质点,每个质点的运动可用一个二阶微分方程描述。对于机车车辆总数为 n 的一列列车,求解 $2n$ 阶非线性微分方程组即可求出每一个机车和车辆的加速度、速度、位移及前后车钩所受的力。列车驾驶仿真器是一个实时仿真系统,需要采用快速算法对列车动力学模型进行实时计算。

随着速度的提高,空气动力对列车的作用越来越

重要,成为影响高速列车能耗、安全、噪音以及舒适度的一个重要因素。资料表明:车速 200 km/h 时,空气阻力占到列车总阻力的 70%~75%;300 km/h 时,占 80%~90%^[8]。轻量化和速度的提高,增加了列车在侧风作用下的不稳定性;同时,高速列车在会车、经由隧道时,都会受到空气动力的影响。在高速列车仿真器中,必须建立高速列车空气动力学实时仿真模型,对空气动力的作用进行仿真。

2.3 列车空气制动系统仿真

列车空气制动系统是列车的重要组成部分,直接关系到列车的运行安全。国内外研究者采用仿真与试验研究相结合的方法对列车空气制动问题进行了大量研究^[9]。

列车空气制动系统一般由主副风缸、制动风缸、空气管路系统、各类阀门等组成。在列车仿真器中,需要对空气制动系统的工作过程进行实时仿真,同时还要能够模拟出设备故障对这些动态过程的影响。列车仿真器可采用半实物仿真和数字仿真两种方式进行。半实物仿真系统部分采用列车上的真实设备,如大小闸、空气管路系统、电空阀、风缸等。在司机的操纵和控制下,实物系统做出相应的响应,其中的管路压力等参数被采样送往仿真计算机,参与空气制动系统的实时仿真计算。数字仿真的方法则是采用纯软件进行空气制动系统的仿真。

空气制动系统仿真的关键是根据气体动力学原理,求解空气制动系统内气体的动态流动过程。气体在管路内的流动状态用气体流动连续方程、动量守恒方程和能量守恒方程进行描述^[10]。对于大长列车而言,其车长往往超过 1 km。只有准确描述压力波的传递过程,才能较好地仿真大长列车的制动特性。对于半永久性连接的城市轨道交通列车而言,由于其编组小、车长短,空气制动系统及其控制系统的结构也有别于传统铁路列车。在对其空气制动系统进行仿真时,管路内气体流动的动态过程可进行简化处理。

3 驾驶环境仿真

3.1 视景仿真系统

人类 70% 的信息来源于视觉。视景仿真系统为受训司机提供了轨道及周边场景的动态图像。列车视景仿真系统经历了可控录像播放、可控影碟播放、数字视频、计算机图像生成(Computer Generate Image, CGI)等几代技术的发展。随着计算机技术的发展,昂贵的图形工作站已经被 PC 图形工作站所取代,CGI 技术在列车仿真器中得到了广泛的应用^[11]。CGI 技术建立在计算机

图形学的基础上,通过对所建立的轨道、车站、周边环境等三维几何模型的实时渲染生成动态、可交互的运行场景画面,具有精度高、生成的图像质量高、便于表现各类动态过程等优点。CGI 方式视景仿真系统的基本结构如图 3 所示。

逼真、流畅的画面会获得更好的训练效果。计算机图形学、虚拟现实领域中的很多成果被用于增加场景的逼真度、提高渲染的速度、表现各类与驾驶相关的复杂过程,如:层次细节(Level of Detail, LOD)技术被用于提高大规模场景的渲染速度;基于图像的建模(Image Based Modeling, IBM) 技术被用于自动生成场景模型;粒子系统(Particle System)技术被用来模拟下雨、下雪等自然现象^[12];边缘融合、几何校正等多通道

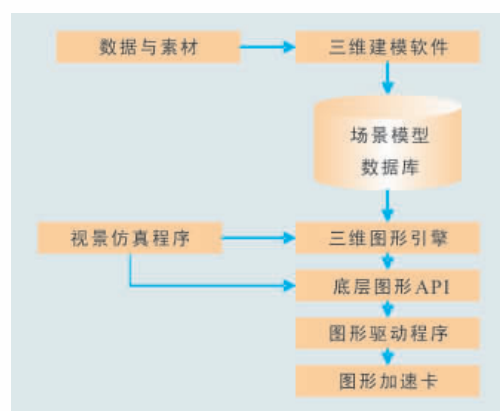


图 3 列车视景仿真软件的结构

Fig. 3 Architecture of scene simulation software in a train simulator



图 4 CGI 方式的列车视景仿真

Fig. 4 Results of CGI system in train simulator

显示技术被用来构建多通道的沉浸式视景显示环境。图 4 给出了一些视景仿真的结果。

3.2 声音仿真系统

列车仿真器中,声音仿真系统需仿真环境音效、列车设备声效、轮轨声、风噪等驾驶环境中的各类声音。这些声音一般具有位置与方向属性,有的还与列车运行状态相关。

声音仿真的基本步骤是:通过录制或合成的方法获得音源;分析各类声音,获得频宽、幅值及变化规律;

仿真运行时,根据不同的条件对音源进行频率幅值的变换与叠加处理,并通过功放进行播放。

硬件声音仿真系统采用硬件的方式实现声音的发生、调整、合成、输出。录制的声音被数字化后存储在 EPROM 或其他存储器件中,由硬件电路完成声音的发生、声音频率与幅度的调制,并经混音器合成后通过功放进行输出。驾驶仿真中的声音环境复杂多变,硬件合成的方式由于响应速度慢、通用性差,难以达到较好仿真效果。

软件声音仿真系统采用软、硬件结合的方式,音源被数字化后以文件的方式存储在计算机中,由声音仿真软件进行调整、合成、播放。软件声音仿真系统灵活、方便,且成本较低,普遍为各类列车仿真器所采用。常用的音频软件开发包有 Microsoft Direct Sound, OpenAL 等。这些开发包能充分利用声效卡的加速功能,实现声音播放、调整、混音、3D 定位以及多普勒效应等各类功能。

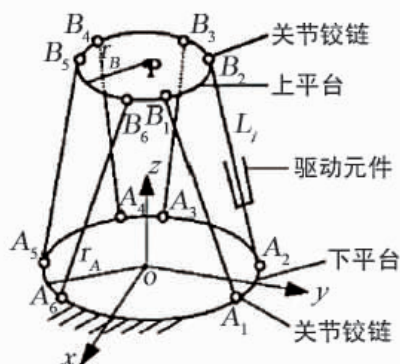
列车仿真器中,根据音源的特点可将其分为单次播放、循环播放、单次-循环播放、变频率、变幅值等类型。驾驶环境中各类音源种类众多,而声效卡的存储器资源有限,可根据铁路成带状分布的特点,确定音源文件的动态管理机制,保证仿真的实时性。

3.3 运动感仿真系统

列车运行过程中,线路、操纵、气候(如:大风)、列

车故障等因素都会造成列车的振动、冲动或其他方式的加速度变化。运动感受与视觉、听觉都是司机对列车状态的重要判断依据,尤其在大长重载列车、高速列车的驾驶中,运动感受尤为重要。要提高驾驶环境的真实感,列车驾驶仿真器需配备运动平台为受训司机提供振动、纵向加速度及冲动、离心加速度、蛇形、侧滚等运动感受。

运动平台有多种形式,如 3 自由度运动平台、5 自由度运动平台^[12]、基于 Stewart 模型的 6 自由度运动平台^[13]等;驱动方式包括液压、电动、气动等。通常,在全功能列车驾驶仿真器中一般选择易于维护的电动 6 自由度 Stewart 平台。Stewart 平台是一种并联结构,能够产生升降、纵向、侧向 3 种运动及俯仰、摇头、横滚 3 种姿态角运动。运动平台由 6 个电动作动器、6 个虎克铰、上下平台组成,如图 5(a)所示^[13]。



(a) Stewart 平台简图
(a) Diagram of Stewart platform



(b) 6 自由度电动运动平台
(b) Photo of dynamoelectric Stewart platform

图 5 Stewart 平台
Fig. 5 Stewart platform

列车动力学实时仿真计算获得的结果作为输入控制运动平台的运动,受作动器行程限制,运动平台无法完全再现列车的运行轨迹。采用体感模拟算法可在运动平台的工作空间内复现真实环境中司机感受的力与角速度。主要的几种体感模拟算法包括经典滤波算法、最优控制滤波算法、自适应控制滤波算法等。由于列车仿真器司机室的质心常与运动平台上平台的质心不一致,需进行质心变换方能获得正确的运动感受。

6 自由度运动平台的位移和姿态闭环控制需要用到运动学反解和正解。并联机构的位置反解较简单,而由于平台的位置量与各分支的伸缩量间具有非线性关系,且具有多解性^[14],因此正解求解较为困难。目前,对 6

自由度并联平台正解求解的代表性方法主要有数字迭代法、代数法与数字迭代法的结合、基于附加位移传感器的纯代数法等。

4 结论

将列车动力学、空气动力学、列车控制技术等学科与计算机仿真技术、计算机图形学、数字音频技术、多媒体技术、网络技术、数据库技术相结合,可实现列车运行性能与驾驶环境的仿真。列车驾驶仿真器通过构建逼真的虚拟驾驶环境,实现了司机培训与考核功能,并为列车动力学、列车舒适度等相关研究提供平台。作为一种先进的司机培训工具,列车驾驶仿真器具有传统培训手

段无法比拟的优点,在安全、经济、节能的基础上,可有效地提高培训的效率与质量。

在今后的发展中,列车性能仿真、驾驶环境仿真将会更加逼真。现代轨道交通科学的最新研究成果将不断被应用于列车驾驶仿真器,如列车-线路-接触网耦合动力学模型、隧道-列车耦合空气动力学模型、高速列车乘客舒适度评价模型等等,相应的仿真算法也将得到进一步的发展与完善。在列车性能仿真的研究中,驾驶仿真器的仿真置信度仍将是一个值得特别关注的问题。相关领域研究成果的应用将会不断提高列车驾驶仿真器的技术性能,如,模式识别、人工智能等新技术的应用,将有助于建立更为智能化的更准确的列车操纵客观评价系统;分布式交互仿真技术将列车驾驶仿真器与铁路信号仿真系统、调度仿真系统、车站值班仿真系统构成轨道交通综合仿真系统,完成更复杂、更大规模的仿真任务等。随着研究的进一步深入,列车驾驶仿真器的应用领域将可能被扩大到列车设计、铁路选线与设计、列车舒适度评价、驾驶行为/心理研究等领域。

参考文献 (References)

- [1] 何鸿云, 周美玉. 机车模拟装置发展综述及建议 [J]. 中国铁路, 1998(12): 31-35.
HE Hongyun, ZHOU Meiyu. Review and advice of train simulator[J]. Chinese Railways, 1998(12): 31-35.
- [2] 周美玉, 孙翔. 机车驾驶模拟装置 [J]. 中国铁路, 1991(5): 25-27.
ZHOU Meiyu, SUN Xiang. Train driving simulator [J]. Chinese Railways, 1991(5): 25-27.
- [3] 卢衍丹, 唐涛. 面向对象的列车自动驾驶仿真系统建模[J]. 系统仿真报, 2002, 14(1): 8-10.
LU Yandan, TANG Tao. Object-oriented modeling of automatic train operation simulation system [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(1): 8-10.
- [4] 孙翔, 林金表, 单立军. 重载列车制动操纵技术的列车动力学分析[J]. 铁道学报, 1989, 11(6): 1-9.
SUN Xiang, LIN Jinbiao, SHAN Lijun. Dynamic analysis of the brake handling technique of heavy trains [J]. Journal of the China Railway Society, 1989, 11(6): 1-9.
- [5] 翟婉明. 车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理[J]. 铁道学报, 1992, 14(9): 10-21.
ZHAI Wanming. The vertical model of vehicle-track system and its coupling dynamics [J]. Journal of the China Railway Society, 1992, 14(9): 10-21.
- [6] 刘宏友. 高速列车中的关键动力学问题研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- LIU Hongyu. Study of the key dynamic problem in high-speed train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [7] 张曙光, 池茂瀾, 刘丽. 机车车辆动力学研究及发展[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(1): 56-62.
ZHANG Shuguang, CHI Maoru, LIU Li. The dynamics study of railway vehicle and its development [J]. China Railway Science, 2007, 28(1): 56-62.
- [8] 王卫东, 贺后庸. 高速铁路列车系统中的动力学问题[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 134-143.
WANG Weidong, HE Qiyong. Dynamics of high-speed railway vehicle system[J]. Advances in Mechanics, 1995, 25(1): 134-143.
- [9] 刘金朝, 王成国, 马大伟, 等. 大长列车空气管系充气特征数值仿真研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(1): 13-19.
LIU Jinchao, WAN Chengguo, MA Dawei, et al. Numerical simulation on charging characteristics of heavy haul train air brake pipe system [J]. China Railway Science, 2004, 25(1): 13-19.
- [10] 魏伟, 李文辉. 列车空气制动系统数值仿真 [J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 38-42.
WEI Wei, LI Wenhui. Simulation model of train brake system [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 38-42.
- [11] 苏虎. 分布式列车仿真系统中视景实时生成算法的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
SU Hu. Research of real-time algorithm of viewing scene in distributed train simulation system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [12] 苏虎, 周美玉. 列车驾驶视景仿真中自然现象的模拟[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(1): 19-22.
SU Hu, ZHOU Meiyu. Simulation of natural view by train simulator[J]. China Railway Science, 2003, 24(1): 19-22.
- [13] 谭喜堂, 李广俊. 城市轨道交通列车驾驶仿真器研究 [J]. 中国铁道科学, 2006, 26(2): 10-115.
TAN Xitang, LI Guangjun. Research on driving simulator of urban mass transit train [J]. China Railway Science, 2006, 26(2): 10-115.
- [14] 杨灏泉, 赵克定, 吴盛林, 等. 飞行模拟器六自由度运动系统的关键技术及研究现状 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(1): 84-87.
YANG Haoquan, ZHAO Keding, WU Shenglin, et al. Key technologies and developing state of 6-DOF motion system for flight simulator [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(1): 84-87.
- [15] YANG Jun, GENG Z J. Closed form forward kinematics solution to a class of hexapod robots [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998(6): 503-508.

(责任编辑 冯峰)