



国家出版基金资助项目

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



国家自然科学基金委员会
中国铁路总公司

高速铁路基础研究联合基金资助项目(U1234205)

中国高速铁路基础研究论丛

中国高速动车组列车 电磁兼容技术

闻映红 著



创新点

- 首次证明**动车组列车**最重要的**电磁骚扰源**是**弓网离线**放电骚扰
- 首次实现了高速铁路**瞬态脉冲骚扰**的**时域统计**参量测量
- 提出了动车组列车**整车**面向对象的**模块化建模**方法
- **创新性地**提出了基于动车组整车接地系统的**在线运营**车辆车载设备的**电磁干扰防护技术**

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



国家出版基金资助项目

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



国家自然科学基金委员会
中国铁路总公司 高速铁路基础研究联合基金资助项目(U1234205)

中国高速铁路基础研究论丛

中国高速动车组列车电磁兼容技术

闻映红 著

中国铁道出版社

2018年·北京

内 容 简 介

本书为国家出版基金资助项目、“十三五”国家重点出版物出版规划项目、国家自然科学基金委员会-中国铁路总公司高速铁路基础研究联合基金资助项目,同时,还是中国高速铁路基础研究论丛之一。全书理论结合工程应用案例,系统总结了中国高速动车组列车的电磁兼容特性和工程应用技术,主要包括:中国高速动车组列车供电系统的瞬态骚扰特性、牵引系统的谐波骚扰特性、电磁骚扰的传输耦合特性、瞬态脉冲骚扰的统计参量测量技术和动车组列车整车电磁兼容性预测建模方法。

本书可供轨道交通行业的电子电气工程师、电磁兼容工程领域的研究人员参考,也可供高等院校交通信息工程及控制学科、电子科学与技术学科、通信与信息系统学科的研究生学习及使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国高速动车组列车电磁兼容技术/闻映红著. —北京:
中国铁道出版社, 2018. 12

(中国高速铁路基础研究论丛)

国家出版基金资助项目 “十三五”国家重点出版物出版
规划项目 国家自然科学基金委员会-中国铁路总公司
高速铁路基础研究联合基金资助项目

ISBN 978-7-113-22868-2

I. ①中… II. ①闻… III. ①高速铁路-列车-电磁兼容性-研究
IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 253351 号

书 名: 中国高速铁路基础研究论丛
中国高速动车组列车电磁兼容技术
作 者: 闻映红 著

策划编辑: 金 锋 崔忠文

责任编辑: 吕继函

编辑部电话: 010-51873205

电子邮箱: 312705696@qq.com

封面设计: 崔丽芳

责任校对: 王 杰

责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 中煤(北京)印务有限公司

版 次: 2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 13.25 字数: 340 千

书 号: ISBN 978-7-113-22868-2

定 价: 98.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010) 51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010) 51873659,路电(021) 73659,传真(010) 63549480

前言

中国高速动车组列车电磁兼容技术 *Preface*

我国高速铁路经过近二十年的发展历程,其投入运营里程位居世界第一,已具备了世界其他国家所无法比拟的规模优势和后发优势。高速铁路的快速发展是在能源和环境约束下解决我国交通运输能力供给不足矛盾,并带动形成一大批高新技术和相关产业及制造业提升与发展的必由之路和必然选择。但发展高速铁路的重中之重是确保其运输的安全性和可靠性,而高速铁路系统的电磁环境和高速铁路装备的电磁兼容性能则是涉及整个高速铁路网络运行安全性和可靠性的重要要素之一,其中,尤其以高速铁路动车组列车的电磁兼容技术最为关键。

我国高速铁路成功应用的技术引进、消化吸收、集成创新再到全面自主创新的技术发展路线,让我国高速铁路取得了飞跃式的发展,但同时也给高速铁路系统的电磁环境和高速铁路装备的电磁兼容性能带来了极大的挑战。

首先,我国高速铁路系统的自然环境和电磁环境与其他国家的自然环境和电磁环境存在很大差异,使得各个国家高速铁路装备的电磁兼容设计理念不同,解决电磁干扰问题的难易程度也相差巨大。比如,日本是海洋性气候,静电放电问题不突出,所以高速铁路装备通常是“浮地”设计,可以从最大程度上避免系统内的接地环路干扰问题。德国和法国是大陆气候,必须考虑静电放电问题,所以高速铁路装备通常都是“接地”设计。这在系统集成时就必须考虑系统的整体接地问题,以避免和改善接地带来的干扰问题。而在我国高速铁路建设的初期,同时引进了日本、法国和德国等不同国家和公司的高速铁路装备,具备不同电磁兼容设计理念的装备集成到同一个复杂系统中时,会带来意想不到的电磁兼容问题。

其次,各国高速铁路线路的设计各具特点,比如,日本高速铁路的特点是各条线路单独运行;欧洲即使开通了“EURO EXPRESS”,但依然尚未形成高速铁路洲际网络。而我国的高速铁路与国外相比,率先已形成了“四纵四横”的网络,其突出特点是高速铁路线路分布广泛、运行交路很长。高速动车组列车在跨线运行中将经历更为复杂且高速动态变化的电磁环境,客观上加剧了高速铁路系统所面临的电磁干扰故障风险。同时,也给电磁兼容的传统测量评估手段和干扰故障诊断带来了不小的挑战。



还有,我国高速铁路的技术特点也给电磁环境和电磁干扰防护带来了不小的挑战。我国高速铁路采用的单相交流供电方式和高速动车组采用的“交—直—交”传动牵引技术,虽然可靠性高、维修简便,但在动车组列车的行驶过程中,考虑供电系统的负载平衡性,列车每行驶一段距离,就必须“换相”,经历一个“过分相”的过程,从三相交流电的另一相继续受电。在列车过分相的过程中,主断路器会动作,受电弓与接触网会经历一次分离的过程。在此过程中,会不可避免地产生瞬态电磁骚扰。就高速动车组列车的牵引传动系统而言,我国高速动车组“交—直—交”牵引传动系统中包含了牵引变压器、整流器、逆变器和交流牵引电机。牵引变压器用于将受电弓获得的 25 kV 单相交流电降压,然后,由整流器将交流电转换成直流电,再由逆变器将直流电转换成可调频调压的三相交流电,以驱动交流牵引电机,牵引列车前进。在这个过程中,由于大功率牵引电流的变换将产生大量的牵引谐波电流,一方面,会在车体导致过电压而破坏整车的接地系统,从而大大降低车载设备电磁干扰防护措施的应有效果;另一方面,在难以做到绝对平衡的钢轨上,直接干扰以轨道电路为代表的轨旁设备,会对高速列车的安全行驶造成威胁。

从抗电磁干扰的角度而言,我国目前批量生产制造的动车组都是动力分散式动车组,也就是将动力装置分布于整个列车。这使得我国高速动车组系统内的电磁骚扰耦合途径非常复杂,解决电磁干扰问题时,难度大、代价大,并且无法避免“按下葫芦浮起瓢”的现象。

本书基于解决高速铁路实际运营线路上所遇到的电磁干扰故障问题的实践经验,结合复杂系统的电磁兼容基础理论,围绕系统级电磁兼容的三要素,详细阐述了高速铁路系统内的电磁骚扰源特性,包括受电弓与接触网分离时产生的瞬态脉冲骚扰和动车组列车牵引传动系统产生的谐波骚扰;阐述了动车组列车电磁骚扰的传输耦合特性,包括辐射耦合、地环路耦合及线间串扰;给出了基于电磁场理论和电路理论的线间串扰等效多端口网络模型;研究分析了高速动车组列车车内的线间串扰特性,对新型动车组车底线缆的布线方案进行了优化;以动车组列车车载信号系统发生的电磁干扰故障为例,阐述了干扰车载信号系统的电磁骚扰地环路耦合机理。

电磁兼容的研究离不开测试,传统的电磁兼容测试方法为检波测量法。最初提出检波测量方法主要是因为当时电子设备和通信系统多为模拟系统,电磁骚扰信号也多为连续波,因此,采用连续波骚扰信号的检波测量值去评估骚扰信号对



模拟电子设备的干扰效应是非常有效的。但是,对于高速铁路而言,系统内的电磁骚扰主要为脉冲型骚扰,随着电子技术的发展,敏感设备也多为数字设备,所以,传统的基于能量的电磁干扰评估方法不再全面有效。为了提高评估脉冲骚扰对数字设备干扰效应的有效性,需要提出更合理的方法。因此,本书介绍了瞬态脉冲骚扰的统计参量表征法和统计参量的测量技术。

电磁兼容研究的最高层次是电磁兼容预测和顶层设计。高速动车组列车是一非常复杂的电气巨系统,因此,其电磁兼容的预测建模也是一个难题。本书最后一章给出了高速动车组列车电磁兼容性预测建模的一种方法,以供探讨。

本书研究和探讨的内容可解决高速铁路系统的电磁干扰问题,同时也能为高速动车组列车的电磁兼容最优化设计提供参考。

本书为北京交通大学电磁兼容实验室全体老师和多位研究生多年的研究积累成果,其出版也得益于多位同行专家的指导和支持,在此一并表示最诚挚的感谢!

由于著者水平有限,书中难免存在不当之处,敬请各位同行指正!

闻映红

2018年3月

目 录

中国高速动车组列车电磁兼容技术 Contents

第 1 章 绪 论	1
第 1 节 中国高速动车组列车技术体系带来的电磁兼容特点	1
第 2 节 高速动车组列车电磁兼容基础理论和技术研究现状	3
第 3 节 高速动车组列车现场电磁兼容试验方法与测量技术研究现状	6
第 4 节 高速动车组列车电磁兼容仿真建模和预测分析研究现状	8
第 5 节 高速动车组列车电磁兼容标准化现状	9
第 2 章 中国高速动车组列车供电系统的瞬态骚扰特性	12
第 1 节 高速动车组列车供电系统产生的电磁骚扰特点	12
第 2 节 高速铁路受电弓接触网离线放电骚扰	12
第 3 节 高速动车组列车过电分相区时弓网产生的瞬态骚扰	39
第 4 节 高速动车组列车牵引供电回路的共模骚扰	49
第 3 章 中国高速动车组列车牵引系统的谐波骚扰特性	56
第 1 节 高速动车组列车牵引系统产生的电磁骚扰特点	56
第 2 节 高速动车组列车牵引变压器系统的谐波骚扰	57
第 3 节 高速动车组列车牵引变流器系统的谐波骚扰	66
第 4 节 不平衡牵引电流谐波对轨道电路的干扰特性	88
第 4 章 中国高速动车组列车电磁骚扰的传输耦合特性	96
第 1 节 高速动车组列车电磁骚扰的传输耦合特点	96
第 2 节 高速动车组列车电磁骚扰的线间串扰耦合	97
第 3 节 高速动车组列车电磁骚扰的地环路耦合	128
第 4 节 高速动车组列车电磁骚扰的空间辐射耦合	137
第 5 章 中国高速动车组列车瞬态脉冲骚扰统计参量测量技术	147
第 1 节 高速动车组列车瞬态脉冲骚扰的统计参量	147



第2节	瞬态脉冲骚扰统计参量的测量技术	149
第3节	瞬态脉冲骚扰统计参量测量值与检波测量值之间的转换	163
第4节	瞬态脉冲骚扰不同测量带宽测量值之间的转换	168
第6章	高速动车组列车电磁兼容性预测建模方法	176
第1节	高速动车组列车面向对象的模块化建模方法	176
第2节	高速动车组列车电磁兼容性预测模型对象的抽象	178
第3节	高速动车组列车电磁兼容性预测模型模块的构建	180
第4节	高速动车组列车电磁兼容性预测模型层的构建	182
第5节	高速动车组列车电磁兼容性预测模型	183
参考文献		198

第1章 绪 论

高速铁路已成为我国人民生活中最受欢迎、受益最大的交通方式。目前,我国高速铁路的运营里程已超过 2.5 万 km,居全球高速铁路运营总里程之首,已具备了其他各国所无法比拟的规模优势和后发优势。中国已成为目前世界上高速铁路系统技术最全、集成能力最强、运营里程最长、运行速度最高、在建规模最大的国家。在高速铁路的建设过程中,确保高速铁路系统的安全性和可靠性,是必须面对的重要课题,而高速铁路的电磁环境和高速动车组列车的电磁兼容性能是涉及整个高速铁路运输安全的关键要素之一,是我国高速铁路在技术自主创新过程中不可缺少的一项关键核心技术。

高速铁路的核心技术涉及了工程建设、动车组制造、牵引供电和列车运行控制技术。其中,以牵引供电和列车运行控制技术为主的用电、用频设备的有意和无意发射构成了整个高速铁路系统的电磁环境。

高速动车组列车的电磁兼容性是指适应我国高速铁路发展需求的高速动车组列车装备在我国高速铁路的复杂电磁环境中可以正常工作,又不对该环境中任何其他设备(包括生物体)造成不应有的电磁干扰的能力,即在高速铁路电磁环境中,在可用的频谱资源条件下,高速动车组列车及其车载设备可以共存,而不致引起性能降级。

为了从系统性能角度出发保障高速铁路运输的安全性,我国铁路行业对铁路关键装备采取了强制性认证措施,但某些高速铁路上依然存在动车组列车因车载设备受到电磁干扰而出现故障的问题,这说明认证检测所依据的我国高速铁路的电磁兼容标准规范不能照搬国际标准和欧洲标准,因为各国高速铁路的电磁环境不同,符合现行国际标准或欧洲标准并不意味着动车组列车装备的电磁兼容性能完全满足我国高速铁路的电磁环境要求。长期在现场解决电磁干扰故障问题而总结的实践经验及相应的理论研究使我们认识到,高速动车组列车的电磁兼容问题不能单纯靠提高车载设备的抗干扰性能来解决。在我国高速铁路实际运营过程中所遇到的电磁兼容问题需要通过进一步系统化地研究高速动车组列车及其车载设备的电磁兼容理论和工程应用技术来解决,即从系统的角度出发,研究可实施的、可从根本上解决干扰问题的防护措施和抗干扰技术,探讨适合我国高速铁路电磁环境的电磁兼容标准规范,提高我国高速铁路运输的安全性和高效性,为高速动车组列车技术的全面自主创新提供电磁兼容理论依据和技术应用基础。

第1节 中国高速动车组列车技术体系带来的电磁兼容特点

我国高速铁路的发展经历了技术引进、消化吸收、集成创新到自主创新的历程。首先,立足全球的先进成果进行技术引进,然后,汇聚几十年功力底蕴,通过消化吸收先进技术,立足本



国国情,实现了自主创新。然而,我国成功应用的高速铁路技术发展模式也给高速铁路的电磁环境和高速动车组列车的电磁兼容性能带来了很大的挑战。

首先,各个国家的自然环境和电磁环境存在很大差异,由此导致各个国家高速铁路装备的电磁兼容设计理念不同,解决电磁干扰问题的难易程度也差异巨大。比如,日本是海洋性气候,静电放电问题不突出,所以高速铁路装备通常是“浮地”设计,这样可以最大程度地避免系统内的接地环路干扰问题。德国和法国是大陆性气候,必须考虑静电放电问题,所以高速铁路装备通常都是“接地”设计,这时在系统集成时就必须考虑系统的整体接地问题,以避免和改善接地带来的干扰问题。我国高速铁路网络覆盖区域广阔,从东北、西北的高寒低温环境至东部、南方的潮湿炎热环境,对静电防护有完全不同的要求,并且在我国高速铁路建设初期,同时引进了日本、法国、德国等不同国家、不同公司的高速铁路装备,具备不同电磁兼容及静电防护设计理念的装备集成到同一个复杂系统中,这为我国高速铁路系统的电磁兼容设计提出了很大的挑战。

其次,各国高速铁路线路的设计各具特点,比如,日本高速铁路的特点是各条线路单独运行;欧洲虽然开通了“EURO EXPRESS”,但依然尚未形成高速铁路洲际网络。我国的高速铁路与国外相比,率先形成了“四纵四横”的网络,其突出特点是高速铁路线路分布广泛、运行交路很长。高速动车组列车在跨线运行中将经历更为复杂且高速动态变化的电磁环境,客观上加剧了高速铁路系统所面临的电磁干扰故障风险,同时,也给电磁兼容的传统测量评估手段和干扰故障诊断带来了不小的挑战。

此外,我国高速铁路的技术体系也给高速铁路的电磁环境和高速动车组列车的电磁兼容带来了完全不同的特点。我国高速铁路采用的单相交流供电方式和高速动车组采用的“交—直—交”传动牵引技术,虽然可靠性高、维修简便,但给整个高速铁路系统带来了系统内难以消除的瞬态电磁骚扰。

就供电系统而言,动车组列车在行驶过程中,由受电弓从接触网获得 25 kV 的单相交流电。考虑供电系统的负载平衡性,列车每行驶一段距离,就必须换相,经历一个过电分相的过程。在该过程中,会产生与列车的运行速度、线路状况和弓网的材质均有关的瞬态电磁骚扰。业已证明,目前运行中的高速铁路无论是车载设备还是轨旁设备,所发生的电磁干扰故障问题,大多由此瞬态电磁骚扰导致。

就牵引传动系统而言,我国高速动车组列车“交—直—交”牵引传动系统中包含了牵引变压器、整流器、逆变器和交流牵引电机。由于大功率牵引电流的变换将产生大量的牵引谐波电流,这一方面会在车体产生过电压而破坏整车的接地系统,从而大大降低车载设备电磁干扰防护措施的应有效果;另一方面,在难以做到牵引电流绝对平衡的钢轨上,可能会直接干扰轨道电路等轨旁信号系统,对高速列车的安全行驶造成威胁。

最后,我国目前批量生产制造的动车组列车都是动力分散式动车组,将动力装置分布于整个列车。动力分散式动车组虽然有很多优越之处,但系统内电磁骚扰耦合途径的复杂性成倍增长,使得解决电磁干扰的难度大、代价大,敏感设备抗干扰性能的提高受限。

由此可见,我国高速铁路特有的电磁环境和技术特点使得我国高速铁路系统的电磁兼容不同于世界上任何一个国家,高速动车组列车的电磁兼容技术也将随着其他领域技术的发展而发展。



第2节 高速动车组列车电磁兼容基础理论和技术研究现状

高速动车组列车由于系统本身的复杂性,给高速动车组列车电磁兼容技术的研究也带来了极大的挑战。

首先,高速动车组列车整车可以称为复杂的巨系统,列车狭小的封闭空间内密布强电设备和弱电设备,并外接多根电缆和信号线,电磁环境极端复杂。

其次,高速动车组列车的主要电磁骚扰源是脉冲型瞬态骚扰,传统的准峰值检波和平均值检波测量和评价已不再是最佳的选择。这意味着寻求新的电磁骚扰测量和评估方法是很有必要的,并且新的测量方法必须既能克服传统测量方法的不足,又可同时反映出脉冲型瞬态骚扰对列车车载敏感设备的干扰效应。

第三,高速动车组列车的运行速度远远高于常规运输工具,其电磁环境始终处于快速、剧烈变化的状态中,给研究和分析带来极大的困难。

最后,为了能在设计阶段以最小的代价获得系统最好的电磁兼容性能,必须研究系统的仿真建模和电磁兼容预测分析。高速动车组列车作为一个电大尺寸的复杂系统,为了从理论上分析与预测动车组列车整车及车载设备的电磁兼容性能,必须研究建立高速动车组列车的电磁兼容仿真预测模型。动车组列车的车体属于电大尺寸物体,而车内不同的屏蔽壳体内含有大量的金属导线,对此类问题的求解计算,将面对大量的感应面电流及其相应的面积分运算和不同的边界条件约束,即使使用目前性能很高的计算机,都无法实现快速、全面、有效的计算。此外,动车组列车电磁骚扰的传输耦合主要是在特定空间内的线间耦合、场线耦合、缝隙耦合或传导耦合的综合,而不是全空间内的单一耦合。所以,如果采用目前的数值计算方法,如有限元法、时域有限差分法等,由于是在整个空间上通过网格划分来进行计算,很有可能由于误差的累积而导致计算结果不收敛。

我国对高速铁路电磁兼容基础理论和工程应用技术的研究主要集中在北京交通大学、西南交通大学等高校和中国铁道科学研究院集团有限公司等科研院所。这些研究机构在电气化铁路供电系统中的骚扰源、牵引供电等强电设备对通信信号系统等弱电设备的干扰及防护等方面取得了较多的研究成果。

北京交通大学电磁兼容实验室在国内最早开展了电气化铁路及高速铁路电磁兼容基础理论和工程技术的研究。在1990~2006年期间,针对普速电气化铁路,开展了电气化铁路系统间电磁兼容分析与研究、电气化铁路电磁骚扰源的分析、预测和建模、电气化铁路对周围设备的干扰影响等研究工作,对电气化铁路电磁骚扰源的特点、种类及危害程度有了较全面地理解和掌握,建立了电气化铁路骚扰源、敏感设备和耦合途径的数学模型,研究成果也应用于当时的电气化铁路电磁兼容设计中,取得了一定的成果。

自2007年以来,随着我国铁路第六次大提速和CRH系列动车组列车的纷纷“上马”,我国铁路发展揭开了崭新的高速铁路篇章。高速铁路对高速动车组列车车辆、牵引供电技术、列车控制系统、轨道等都提出了更高的要求。相应地,高速铁路系统和高速动车组列车的电磁环境和电磁兼容问题也成了保障高速铁路安全运行所需要考虑的越来越重要的因素。由此,北京交通大学电磁兼容实验室针对高速铁路系统的电磁兼容问题展开了深入而系统的研究工作,形成了动车组列车整车电磁兼容理论的基本框架,为高速动车组列车整车电磁兼容性预测



仿真、建模技术及整车电磁兼容性优化设计提供了很好的理论基础,同时也研究建立了干扰试验和故障模拟平台,提出了有效的适用于解决高速铁路现场干扰故障的抗干扰技术。与此同时,国内一些其他研究机构和学者也对高速铁路的电磁兼容技术进行了研究,包括高速铁路系统对雷达的干扰、高速铁路接触网的辐射对机场导航设备的干扰、高速铁路电磁辐射发射的预测等。

国际上在铁路运输行业就电磁兼容方面的研究主要是从电气化铁路开始的,其电气化铁路电磁兼容的研究可以追溯到 20 世纪 60 年代,当时电气化铁路出现的主要电磁兼容问题是由直流牵引系统的牵引回流对铁路沿线的输气管、输水管等埋地金属管道造成的。随着电气化铁路的发展,铁路沿线环境中的电子设备和电气系统对电气化铁路的电磁环境越来越敏感,电气化铁路系统内的轨旁信号电缆和信号设备也可能受到射频电磁骚扰能量的干扰和损毁。比如,早期在电气化铁路周边的居民生活区内,电视、电话等电信设备会被电气化铁路系统产生的电磁骚扰所干扰。随着世界上铁路牵引供电技术的发展,一些新的电磁兼容问题也随之产生。例如,在瑞典,列车的牵引供电采用了当时比较先进的变流牵引系统,而这套系统在列车运行过程中会产生传导瞬态骚扰和直流分量,并在整个供电系统和列车信号系统中传输,导致列车运行故障。在丹麦的哥本哈根,当时已有的直流供电铁路会对邻近的交流供电铁路产生干扰,直流供电系统中的直流分量会使交流变电站中的升压变压器饱和而无法正常工作。

随着国际和国内高速铁路的发展,电磁兼容问题日趋突显并逐渐被各国铁路管理部门、运营单位及业内专家所意识到。所以,包括我国、日本和欧洲各国在内的许多国家的研究机构都对铁路系统的电磁兼容技术展开了长期而深入的研究。目前研究主要集中在以下几个方面:

(1) 轨道电路的电磁兼容问题

从世界范围来看,基本上各个国家的普速铁路都采用轨道电路来检测轨道是否被列车占用,沿轨道连续传送车地信息,以控制信号装置或转辙装置,保证行车安全。轨道电路中信号是通过钢轨来传输的,即钢轨是轨道电路信号的传输导体,而铁路系统中的钢轨又是牵引电流的回路,即牵引回流的地导体,所以这两个不同系统之间必然会存在兼容性问题。因此,轨道电路的抗电磁干扰研究是铁路行业中最早的电磁兼容研究方向。1990 年 Hill 等学者在文献中讨论了轨道电路所采用的同步数字编码的安全性和可靠性,并提出了轨道电路信号避免被干扰的编码措施。Joos 等学者研究得到轨道电路中的下行信号比上行信号对电磁干扰更加敏感的结论。White 讨论了音频轨道电路系统中可能存在的电磁骚扰特性。Hill 和 Konefal 等研究了斩波器产生的谐波骚扰对轨道电路信号的影响。

(2) 应答器传输系统的电磁兼容问题

标准应答器系统由车载设备和地面设备两部分组成。车载设备包括车载查询天线(Antenna Unit, AU)、天线电缆、车载解码器和应答器传输模块(Balise Transmission Module, BTM)。地面设备包括有源应答器、无源应答器和地面电子单元(Lineside Electronic Unit, LEU)。其中,安装在列车底部的车载天线,通过同轴电缆信号线与列车上应答器传输模块相连接;通过电磁波的发射和接收,实现车载天线与地面应答器天线之间的数据传输。应答器系统所处电磁环境极其复杂,除了高速铁路系统内的电磁骚扰外,也很容易受到铁路系统外的电磁骚扰源的干扰。因此,这方面的研究一直是国内外的研究热点。

Pozzobon 等学者通过对车载应答器天线结构及周围电子电气设备的研究,指出车载应答器天线对垂直极化的磁场更加敏感。而列车底部因存在很多大功率牵引供电设备,正好构成



了车载应答器天线周围以低频磁场为主的电磁环境,增加了车载应答器天线被干扰的可能性。列车运行过程中偶发的短周期脉冲也会对应答器系统造成干扰,影响应答器报文的解码,造成较高的误码率,从而影响列车的运行。此外,Stemmler, Jahns 和 Blasko 等学者通过研究指出,用于控制列车运行速度的电气传动模块和电子开关模块会产生上升沿陡峭的快速脉冲骚扰,该骚扰的频谱可达到 GHz,会对车载应答器系统造成干扰。

(3) 制动控制系统的电磁兼容问题

Kroger 等学者通过研究指出,由于列车制动控制系统中的各种传感器分布在列车各个位置上,所以,整个系统很容易遭受电磁干扰,尤其是监测轴温的温度传感器和监测列车运行速度的速度传感器对电磁骚扰非常敏感。很多实例表明,列车制动控制系统的电磁干扰故障会造成列车无故停车,影响列车运行安全。

(4) 弓网火花放电产生的电磁骚扰

弓网的火花放电是高速铁路系统内最重要的电磁骚扰源之一,该骚扰源可能对车载弱电系统和无线通信系统造成干扰。此外,由于弓网火花放电骚扰能量的频谱很宽,它不仅会影响铁路系统内的设备和系统,还可能对铁路沿线的其他敏感设施造成干扰。

有关人员对于弓网离线产生的火花放电从实验和数值仿真两个方面进行了比较深入的研究,研究了电火花的物理特性、弓网离线距离的变化规律、弓网离线周期的变化规律、骚扰电平与速度的关系等。2008年, Midya 等学者研究指出,弓网离线放电产生的电磁骚扰会影响整个车载电气、电子设备的供电电源质量,甚至影响通信信号系统的正常工作。他提出了一种实验方法,在实验室中模拟了离线放电的过程,主要研究了弧根(Arc Root)的移动方向、列车运行速度,以及等效电感、电容等参数对放电电压波形和放电极性的影响。Midya 等学者也模拟了 25 kV 交流供电系统的弓网离线过程,得出了弓网离线放电产生的骚扰电压、骚扰电流主要与接触线的线速度、供电电流和电压、回路中的感性负载、受电弓材料等参数有关的结论。Giannetti 等学者在屏蔽室内用缩短尺寸的接触线和正常尺寸的受电弓模拟了直流供电系统的弓网离线过程,通过不同的实验配置分析了不同参数对弓网离线产生的辐射骚扰的影响,为该骚扰源的建模研究提供了实验基础。Tellini 等学者同样在屏蔽室内用缩短尺寸的接触线和正常尺寸的受电弓模拟了直流供电系统的弓网离线过程,提出了弓网离线过程的电路模型。通过对大量实验结果的分析,总结出受电弓在即将离开接触线的瞬间产生的骚扰幅度要大于受电弓即将与接触线接触瞬间所产生的骚扰幅度的结论。这与我们在实测中记录的整个动车组列车过分相过程中弓网产生的电磁骚扰特性非常吻合。

(5) 牵引逆变器产生的电磁骚扰

许多学者研究对比了在不同输入电压、负载电流、驱动电阻及开关频率等条件下,逆变器产生的共模电磁骚扰。通过理论和实验得出结论,开关管对地的寄生电容及快速的电压变化(du/dt)共同导致了逆变器的共模电磁骚扰问题。Mark. J. Nave 等学者对占空比为 50% 的开关电源装置中的共模电磁骚扰的产生机理及传播耦合特性进行了分析,提出了简单的共模电磁骚扰等效电路模型。经研究发现,该共模电磁骚扰与占空比、电压上升时间无关,与开关管对地寄生电容、开关频率和直流电压有关。此外,西门子公司 K. Frank 等人对 5~10 kV·A 的绝缘栅双极型晶体管变换器(Insulated Gate Bipolar Translator, IGBT)的共模传导骚扰特性进行了研究,分别计算分析了在不同工作电流、工作电压和接地情况下该共模传导骚扰的特性,得出该共模骚扰的频谱与开关管对地电容有直接关系的结论。Chingchi Chen 则研究比较



了不同驱动情况对电力电子变换器产生的共模电磁骚扰的影响,得到了绝缘栅双极型晶体管变换器和二极管的对地杂散电容是共模电磁骚扰的主要传播途径。

目前,学术界普遍认为传导电磁骚扰是伴随着功率半导体器件的开关过程产生的,并且这些骚扰会借助系统的元器件及信号传输媒质,以电压和电流的形式耦合到敏感设备形成电磁干扰。因此,抑制传导电磁干扰的方法主要归结为两种:基于减小脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)功率变换器骚扰源发射强度的电磁干扰抑制技术和基于切断电磁骚扰传导耦合途径的电磁干扰抑制技术。

(6)其他方面的研究

Buccella 等学者通过仿真软件计算了在交流系统供电条件下的高速列车车厢内的三维磁场分布,并与实际测试结果进行了比较,验证了仿真模型的正确性和有效性。Alonso 等学者提出了一种解决 25 kV、50 Hz 电气化铁路及设备与铁路周边医院中的敏感设备间电磁兼容问题的方案。此电磁兼容解决方案完全基于敏感设备的接地方式。为了证明这种解决方案的有效性,Alonso 等学者建立了系统的电磁仿真模型,并基于现有的铁路运行环境进行了实际测试。最后,采用有限元法对模拟实际环境下系统的电磁兼容性进行了计算及评估。此外,Alonso 等学者对 25 kV、50 Hz 的电气化铁路供电系统产生的电磁骚扰对周围的电信电缆产生的影响进行了测试,并将测试结果与电路模型的计算结果进行了比较分析。由于在计算中一些输入参数存在不确定性,而且也没有考虑周围环境的影响,所以测试结果和计算结果之间存在一定的差异,但总体趋势相同。

从上述目前高速铁路系统电磁兼容的研究总结可见,由于国外发达国家在高速铁路电磁兼容方面的系统研究起步较早,并且投入了较大的精力和经费,因此,国外发达国家针对铁路系统电磁兼容技术的研究取得了较多的研究成果。但这些国家对高速铁路和普速铁路电磁兼容技术的研究主要是基于本国现有的铁路线路及车辆,虽然对我们在理论上的研究有一定的参考价值,但由于牵引供电系统、信号设备、列车车辆及高速铁路电磁环境的不同,其研究结果对我国高速铁路电磁兼容问题的解决缺乏直接的指导意义。

第3节 高速动车组列车现场电磁兼容试验方法与测量技术研究现状

动车组列车电磁兼容理论和关键技术的研究依赖于对电磁骚扰信号及其传输耦合特性的测量、分析和试验。电磁骚扰信号一般以空间电磁波或导线中电压、电流的形式存在,其开放式地分布于电磁波所能传输到的整个空间中或传输到有导线、传输线连接的任何地方。以空间场的形式进行传输耦合的辐射骚扰信号一定会受到介入的任意导电物质的影响,以电压、电流形式沿导电回路传输的传导骚扰信号,其传输耦合路径则会随着传输线、设备及检测系统接地方式的改变而改变。所以,要对电磁骚扰信号进行精确测量,首先必须在专门的测量场地进行测量,如开阔场、电波暗室、混响室和横电磁波小室等。其次,必须选配合适的测量仪器、正确的测量配置和测量步骤进行测量。目前现有的电磁兼容测量,尤其是符合性测量多是按照国际标准或国家标准的规定在符合要求的实验室中进行的。

高速动车组列车可以称得上是复杂的巨大型电气系统,其电磁兼容性能不仅由本身的系统结构和电气设计所决定,还受到诸如车载设备的种类、安装位置、接地方式、超长高压电缆和



低压电缆的布线、屏蔽和接地等众多因素的影响。因此,按照现行标准的规定对动车组列车车载设备进行电磁兼容标准测试的结果并不能完全反映被测设备在实际运行时的电磁兼容性能,尤其是当动车组列车车载设备发生由电磁干扰引发的故障时。所以,有必要在高速铁路现场环境中对高速动车组列车及其车载设备的电磁兼容性能进行测量或当电磁干扰故障发生时,能对电磁干扰故障进行现场试验和分析。但对于高速铁路这样的复杂应用电磁环境,在现场的测量会遇到很多困难。一方面,从测量本身来看,测量仪器和测量天线的介入会对被测的辐射骚扰场产生影响;另一方面,在现场环境中,被测骚扰信号不可避免地叠加了环境中的所有噪声信号。此外,在现场环境中,测量仪器和测量系统本身还会受到环境中电磁骚扰的干扰。所有这些因素均导致了在非专用电磁兼容测量场地中很难对电磁骚扰信号进行有效提取和精确测量。所以,国内外很多学者都对电磁兼容的现场测量技术进行了研究。

关于现场环境非专用电磁兼容测量场地条件下对大型电气系统的辐射骚扰场强进行的测量,目前有的国家提出了“虚拟暗室”的概念,并对相关的测量技术和实验手段进行了研究。“虚拟暗室”的概念最早由美国军方在不晚于20世纪80年代提出的,在1994年的一篇学术会议论文《Feasibility of a Virtual Anechoic Chamber; The Ultimate E3 Test Facility》中有所提及。该文的第一作者 David L. Schoch 供职于美国空军发展测试中心,论文中分析了在大型电波暗室中进行大型集成系统如飞机和直升机的电磁发射和电磁兼容测试都存在固有的局限性,包括尺寸、安全和其他技术问题。因此,他提出对于诸如要求飞机发动机工作或旋转直升机旋翼转动的试验,需要在室外采用“虚拟暗室”技术进行。该论文还对在一个露天场地中采用虚拟暗室技术以满足电磁发射测量和电磁兼容试验的要求进行了可行性分析,并以佛罗里达州埃格林空军基地的集成弹药和电子系统预检场(PRIMES)为例进行了应用介绍。

关于虚拟暗室技术比较完整的理论是由 Marino, Jr 和 Michael, A 于2000年在其专利申请“System and method for measuring RF radiated emissions in the presence of strong ambient signals”(US patent 6980611)中所提出并公开的,该理论克服了以双通道的方式进行单通道测试时带来的时间差问题,从而提高了虚拟暗室技术的测试精度和应用范围。迄今为止,公开资料中该理论的实际应用只有美国 SARA 公司的名为 CASSPER 的商用测试系统。

根据公开资料,CASSPER 系统不仅能进行精确的电磁兼容试验,还能精确定位电磁骚扰源,是一个兼具远场测试和近场定位的测量设备。虚拟暗室理论的应用,使得即使是被研究设备工作在具有大背景噪声的环境中,如飞机中,也能快速精确测得系统的电磁辐射场。该系统能够滤除背景噪声,创建出一个近似电波暗室的虚拟环境,既能进行电磁兼容性能的预兼容测试,也能进行全兼容测试。该系统最大的优势就是可以用来对大型分布式系统的屏蔽效能等进行实验验证。该系统的接收机使用两套时间与频率都同步的通道同时去接收一个复杂系统中的信号,以同时获得电磁环境电平和混合信号电平,再通过信号处理算法滤除背景噪声,从而有效地抑制测试时间差产生的误差,得到被测设备实际、精确的电磁辐射场。采用相干算法不仅能滤除一般的背景噪声,还能精确提取与背景噪声相同频率的信号,即使背景噪声的幅度或频率被调制了,背景噪声滤除性能也不会下降。

但是,CASSPER 系统存在原理上无法克服的缺陷。首先,CASSPER 系统基于虚拟暗室技术的信号提取方法需要三个前提和假设:

- (1)背景噪声同时被两个接收机天线捕获且背景噪声是相关的。
- (2)背景噪声与设备的辐射信号不相关。



(3)被测设备的辐射信号只被一个接收机捕获,即只是被主测量天线通道所接收。

其次,该系统是基于差分法实现的,要求背景环境中的电磁骚扰源少于3个,并且在试验过程中背景环境要保持静态恒定。但在高速铁路环境的实际测量中,背景环境中的电磁骚扰源数量不明确且是动态变化着的,这就极大地限制了该系统的应用。

由于试验方法、测量技术和测量仪器的限制,目前针对高速动车组列车的现场电磁兼容试验,虽然得到了许多有价值的实测数据,但在实际研究中还是对测量做了不同程度的简化。因此,在本领域的研究中,现场测量技术和测量装备也是值得进一步深入研究和发展的方向。

此外,经过多年的研究和实践可知,我国高速铁路系统最重要的电磁骚扰源是瞬态脉冲型骚扰,而传统的电磁骚扰测量方法是基于频域扫描的幅度测量,无论是采用峰值、准峰值、平均值还是有效值检波测量方式,所测得的信息都只是骚扰信号的幅频信息,不能完全反映高速铁路瞬态骚扰信号的脉冲特性,也无法准确判断骚扰信号对敏感设备所造成的干扰效应。因为时域特性完全不同的脉冲型骚扰信号,频域测量结果却有可能相同。因此,可以说电磁兼容领域传统的频域测量方法及现行标准规定的限值对目前我国高速铁路系统电磁骚扰的测量和评估并不是最科学的,所以,需进一步研究更适用的针对高速铁路瞬态骚扰信号的时域统计特性及其相应的测量技术。

第4节 高速动车组列车电磁兼容仿真建模和预测 分析研究现状

通过建立电路模型、数值模型等方法预测分析系统的电磁兼容是电磁兼容研究领域的最高阶段。这也是从设计阶段以最小的代价解决电磁干扰问题必不可少的方法和手段。高速动车组列车是非常复杂的电大系统,其电磁兼容建模预测方法比器件和设备的电磁兼容建模预测要复杂得多。

一般而言,电磁兼容仿真建模和预测分析的方法概括起来主要有解析法、经验法和数值算法。所谓解析法是指对被研究对象进行简化和假设,利用矢量场计算方法或电路分析方法,建立电磁场发射或电路等效模型,用解析方法得到近似解;经验法是指通过实验或现场测量,从大量实测数据中提取被研究对象的特性参数,对被研究对象进行详细分析的方法;数值计算法是指基于电磁场的数值计算方法建立被研究对象的电磁兼容性数值仿真模型,利用数值计算软件计算得到被研究对象的特性。数值仿真模型以其相对简单直观且较为精确的计算分析特点在工程实践中得到了广泛应用。目前常用的电磁场数值分析方法有频域有限元法(Finite Element Method, FEM)、矩量法(Method of Moment, MoM)、时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)、物理光学法(Physical Optics, PO)、时域传输线法(Transmission Line Matrix method, TLM)等。各种数值计算方法适用的分析对象不同,因此,每种方法也都有它的使用局限性。

针对系统级的电磁兼容建模预测研究,C. E. Baum于1974年首先提出了电磁拓扑的概念。1978年C. E. Baum, T. K. Liu和F. M. Tesche在多导体传输线网络模型的基础上,提出了建立电磁拓扑的基本方法——BLT电报方程。电磁拓扑将图论、电磁场理论、数学矩阵等概念融为一体,在充分考虑系统内各部分之间相互关系的基础上,利用场路相结合的方法分析系统的复杂电磁兼容问题,这种方法被称为系统级电磁兼容预测分析的经典方法。但随着系



统复杂性的增加,所建立的拓扑结构越来越复杂,节点及骚扰耦合途径数量迅速增加,使得电磁拓扑法已无法对复杂系统的电磁兼容进行准确的定量分析。因此,不少学者在电磁拓扑法的基础上,提出了层次分析的概念。例如田锦建立了通信系统电磁兼容指标体系的分层结构,用于对通信系统的电磁兼容进行分析和评估。国内有学者利用层次分析的概念搭建了复杂系统的电磁兼容故障分析模型。层次分析法虽然从一定程度上简化了模型的复杂度,但仍无法完全解决实质性的电磁兼容预测分析问题,复杂系统的电磁兼容预测分析仍停留在定性分析的层面。为了达到定量分析的目的,目前已有学者利用故障树、蒙特卡罗法、贝叶斯网络对系统的电磁兼容进行预测评估。例如,Emmanuelle Garcia 使用概率统计方法建立了电子设备全生命周期的安全性量化分析模型,并以雷击场中的同轴线耦合为例,利用雷电骚扰信号的概率密度函数(Probability Distribution Function, PDF)和累计概率分布函数(Cumulative probability Distribution Function, CDF)分析了雷电骚扰信号对同轴线内有用信号传输的影响,最终给出了系统受雷影响的概率。Evgeni Genender 等人在器件敏感性的统计模型和电磁骚扰耦合评估结果的基础上建立了基于故障树的系统级电磁干扰故障率统计模型。Congguang Mao 等人提出了故障树与贝叶斯网络相结合的方法,分析了强电磁脉冲对系统敏感性的影响。

综上所述,目前国内外系统级电磁兼容预测评估与定量分析研究的突出特点在于研究对象的针对性较强,模型缺乏可扩展性。

针对复杂大型系统的电磁兼容仿真建模和预测分析,进一步的研究方向是如何增加模型的灵活性和可扩展性,同时克服由于系统的复杂性所带来的系统各部分的状态组合过于复杂、计算量呈“爆炸”式增长的现象及计算不收敛等问题。

第5节 高速动车组列车电磁兼容标准化现状

目前制定电子电气设备电磁兼容国际标准的重要国际组织有:国际无线电干扰特别委员会(International Special Committee on Radio Interference, CISPR)、国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)、国际电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)和欧洲电工标准化技术委员会(European Committee for Electrotechnical Standardization, CENELEC)。

CISPR 于 1934 年在法国巴黎成立,其宗旨是研究并制定有关电磁干扰的限值和测量方法等,从而指导各个国家电磁兼容标准的制定。现在 CISPR 为 IEC 的组成部分。

IEC 成立于 1906 年,是世界上最早的国际性电工标准化机构,总部设在日内瓦。1947 年国际标准化组织(International Standardization Organization, ISO)成立后,IEC 曾作为电工部门并入 ISO,但在技术上、财务上仍保持独立。根据 1976 年 ISO 与 IEC 的新协议,两组织都是法律上独立的组织,IEC 负责有关电工、电子领域的国际标准化工作,其他领域则由 ISO 负责。IEC 的第 77 技术委员会(TC-77)的名称为“电磁兼容”,是与 CISPR 并列的涉及电磁兼容标准制定的组织。中国于 1957 年成为 IEC 的正式成员,并于 1976 年正式加入 CISPR。1986 年成立了“全国无线电干扰标准化技术委员会”,2000 年成立了“全国电磁兼容标准化技术委员会”,均由国家标准化管理委员会领导。

IEEE 成立于 1963 年,总部设在美国纽约市,是全球最大的专业学术组织,致力于推动电