

专

铁路机车车辆电气检测技术的发展

陈高华¹, 丁荣军²

稿

(1. 铁道部产品质量监督检验中心牵引电气设备检验站, 湖南 株洲 412001;
2. 南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

作者简介：陈高华（1967-），男，高级工程师（教授级），长期从事铁路机车车辆牵引与控制技术开发及相关试验技术研究。

摘要：针对铁路机车车辆电气技术的研发需求，提出了构建“完整系统的完整工况的完整重现”试验系统的思路，介绍了其中的牵引动力试验系统、TCN网络测试系统、RAMS/LCC试验系统和软件RAMS测评的总体设计，在试验室内完成对系统产品和多系统组合的深度测评，为铁路机车车辆电气设备与系统的RAMS/LCC认证提供技术解决方案。

关键词：铁路；机车车辆；检测技术；牵引系统；TCN；RAMS/LCC；IRIS；SIL

中图分类号：U260.78；TM93 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2012)03-0001-05

Development of Electric Detection Technology for Railway Vehicle

CHEN Gao-hua¹, DING Rong-jun²

(1. Traction Electric Equipment Test Station, Products Quality Supervision and Test Center, Ministry of Railways, Zhuzhou, Hunan 412001, China; 2. CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: According R&D requirement of railway vehicle electric detection technology, the idea of constructing complete recurrence of complete conditions of complete system test system was presented. The overall design of traction power test system, TCN network test system, RAMS/LCC test system and software RAMS evaluation was introduced, which implemented deep evaluation of system products and multi-system combination in laboratory, and provided technical solutions for electric equipment and system RAMS/LCC certification of railway vehicle.

Key words: railway; railway vehicle; detection technology; traction system; TCN; RAMS/LCC; IRIS; SIL

0 引言

随着高速铁路和重载货运的发展，铁路运输的安全性越来越受到关注。机车车辆作为承载运输的移动装备，其牵引系统能否正常发挥功能和性能、网络控制系统能否实现关联系统的可靠协同，对运输组织和安全有很大的影响。特别是牵引系统、制动系统、信号系统和6A（6A：走行部检测ATDS、空气制动检测ABSM、防火报警AFSL、视频监视AVDR、车顶高压AGDR、机车接近预警AWSL这6项子系统的英文首字母的合称）等子系统已经不可避免地依赖网络来构成高度协同的车载系统，并通过无线网络与地面系统组网，网络已经与铁路的安全、舒适和正点紧密相关。各子系统的RAMS/LCC [(RAMS：可靠性(Reliability)、可用性(Availability)、可维修性(Maintainability)和安全性(Safety)这4个英文单词的首字母的缩写；LCC：life

cycle cost产品生命周期成本] 指标决定了铁路装备的品质。

1 铁路机车车辆电气设备的研发需求

目前，CRH系列动车组、HXD系列电力机车、HXN系列内燃机车、地铁车辆等都已经采用交流传动技术、网络技术和新型电力电子器件。在原型样车、小批量甚至批量车的研制、考核和运用中，经常会遇到一些技术难题，主要表现为设备故障、通信故障带来的连环影响，不明原因的器件烧损以及季节性的故障等，究其原因研发阶段缺乏深层的系统性的试验验证，缺乏试验室对系统环境、气候环境、力学环境、电磁环境以及边界条件的充分模拟重现，仍然依赖于在运用中发现和解决产品的性能和可靠性问题。然而，现场技术问题的重现是非常困难的，为此，提出了在试验室内实现动车组和机车的电气设备与系统的“完整系统的完整工况的完整重现”。从3个层面做试验验证：

收稿日期：2012-04-06

一是系统的原理、功能和性能参数的验证,目的是验证技术的成熟度;二是系统匹配综合指标的验证,目的是验证组合系统的优良度;三是以可靠性为代表的RAMS/LCC性能指标测评,包括器件和材料的选型,软件的功能测试和安全性评估,目的是确保产品生命周期内的品质。

现已建立了3个试验系统:一是1:1牵引动力试验系统,做到对牵引动力系统的原理、功能和性能指标的全测试覆盖,解决复杂工况的系统参数的匹配;二是在地面构建与车载系统完全对等的1:1网络试验系统,解决各子系统的技术问题以及基于网络的多子系统的匹配问题,真正从最底层的物理层开始确保各网络设备符合技术标准;三是建设面向电气设备的应用环境与可靠性的试验系统,重现雨、雾、冰、雪、雷电、风沙、低气压、高寒、空气含盐等气候环境,EMC电磁环境,多自由度力学环境等,以及配套的实时探测和记录设备,探测记录电气系统在环境应力下的反应,具备支持分析产品的RAMS/LCC指标的能力,在试验室里配置出高仿真的运营环境,解决产品在实际应用中出现的品质问题。

这些试验系统除满足既有技术标准外,还需要具有前瞻性,兼容技术发展的验证需求。在发展电气检测技术的同时,注重电气检测标准的进步,特别是推动技术标准的制修订,形成得到国内外用户和同行认可的铁路装备RAMS/LCC认证能力,从根本上提升铁路装备的品质保障能力。

2 1:1 牵引动力试验系统

牵引系统的试验验证需要满足的基础标准包括整车级的要求^[1]、系统级的要求^[2]、部件级的要求^[3-5]。为此,需要设计一套从供电到受流再到变压器、变流器、电动机、滚动轮的配套的被试系统以及试验控制系统和测试系统。该系统能模拟供电网的电网特性,能对包含牵引变压器在内的变流器供电的电动机及其控制系统开展组合试验,能为被试牵引系统提供1:1的功率负载,负载的调节方式满足轴控、架控和车控的不同控制模式,能模拟机车车辆在实际运行过程中的负载变化曲线。该系统通过与高低温环境、电磁干扰等环境的结合,用于试验和优化牵引系统,能在实际边界条件下及其整个功率范围内对牵引系统进行如下验证试验:覆盖全功率的牵引(制动)力—速度特性曲线测定,温升试验,动态特性试验,在各种不同线路上牵引运行试验,轮径差试验,轮轨接触处空转和打滑试验,短时供电中断试验,供电网电压突变及变化范围试验,电网软特性的匹配试验,谐波测试,短路试验,牵引变流器及牵引电动机的型式试验、研究性试验,极限的测量和监视,试验过程的重现。

牵引系统试验的基础原理如图1所示。其采用了2套对等系统的背靠背(Back-to-Back)能量传递模式,互

为动力和负载,动力和负载的转换取决于控制指令,可以无缝转换。在此基础上,设计并建设了可以适应变化为图2的1:1牵引动力综合试验系统。

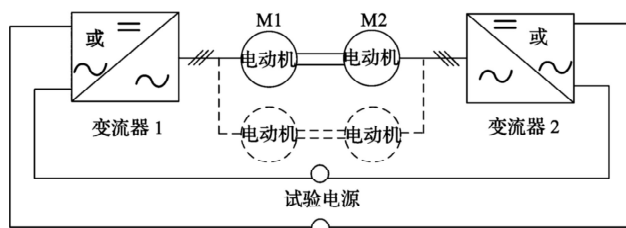


图1 牵引系统试验的基础原理

图2试验系统特点之一是,功能组合丰富、覆盖需求广、工况重现。适应电力机车、内燃机车、动车组、轻轨、地铁车辆及矿用机车等的组合试验需求,适应不同的电压制式、轴重、轴功率、运用速度等应用需求;既满足直接变流器供电的电动机及其控制系统的组合试验,又满足间接变流器供电的电动机及其控制系统的组合试验;可以组合为车控、架控和轴控,实现电网软特性、过分相、电压突变和短时电压中断模拟的系统集成;可以在试验室内重现各边界条件下的系统响应,尽可能地扩展了牵引系统试验的基础原理。

另外一个特点是采用能量回馈方式,而且回馈的路径直接,节能显著。以轮周功率9 600 kW的机车为例,常规的试验方法至少需要12 000 kW的电网配电功率和满功率能耗。采用能量回馈方法,实际试验时的满功率能耗仅2 900 kW。

3 TCN 网络测试系统

与牵引动力试验系统相比,对TCN列车通信网络一致性测试系统的需求更加迫切。国内企业忙于研发符合TCN技术标准^[6]的产品,依据标准^[7]对产品进行品质测试尚处于起步阶段,由TCN网络引发的列车故障时有发生,对行车安全带来负面影响。

依据技术标准和测试标准要求,所搭建的列车通信网络一致性测试系统以如图3的方式接入整车网络或地面1:1网络,可以选取任意接入节点。测试的基本原理是,测试系统向被测目标发送标准的和畸变的测试呼叫信号,被测目标依照协议回答,回答信号的畸变应在标准规定的范围内,确保TCN产品在6个等级上都符合一致性的要求,误码率在规定范围内。也就是说,要求被测的TCN产品具有对标准规定范围内畸变信号的解码能力,同时保证自身发出信号符合标准波形。测试覆盖网络中的各节点,覆盖列车的静态和动态工况,尤其是EMC复杂的工况。测试除包含标准规定的项目外,还包括临界值的测试。

在前期对标准和对测试电路原理的研究成果的基础上^[8],搭建了如图4所示的TCN列车通信网络一致性测试的系统。测试系统由专用计算机、仪器设备、路由器、测试板、标准测试设备、以太网集线器以及一些测

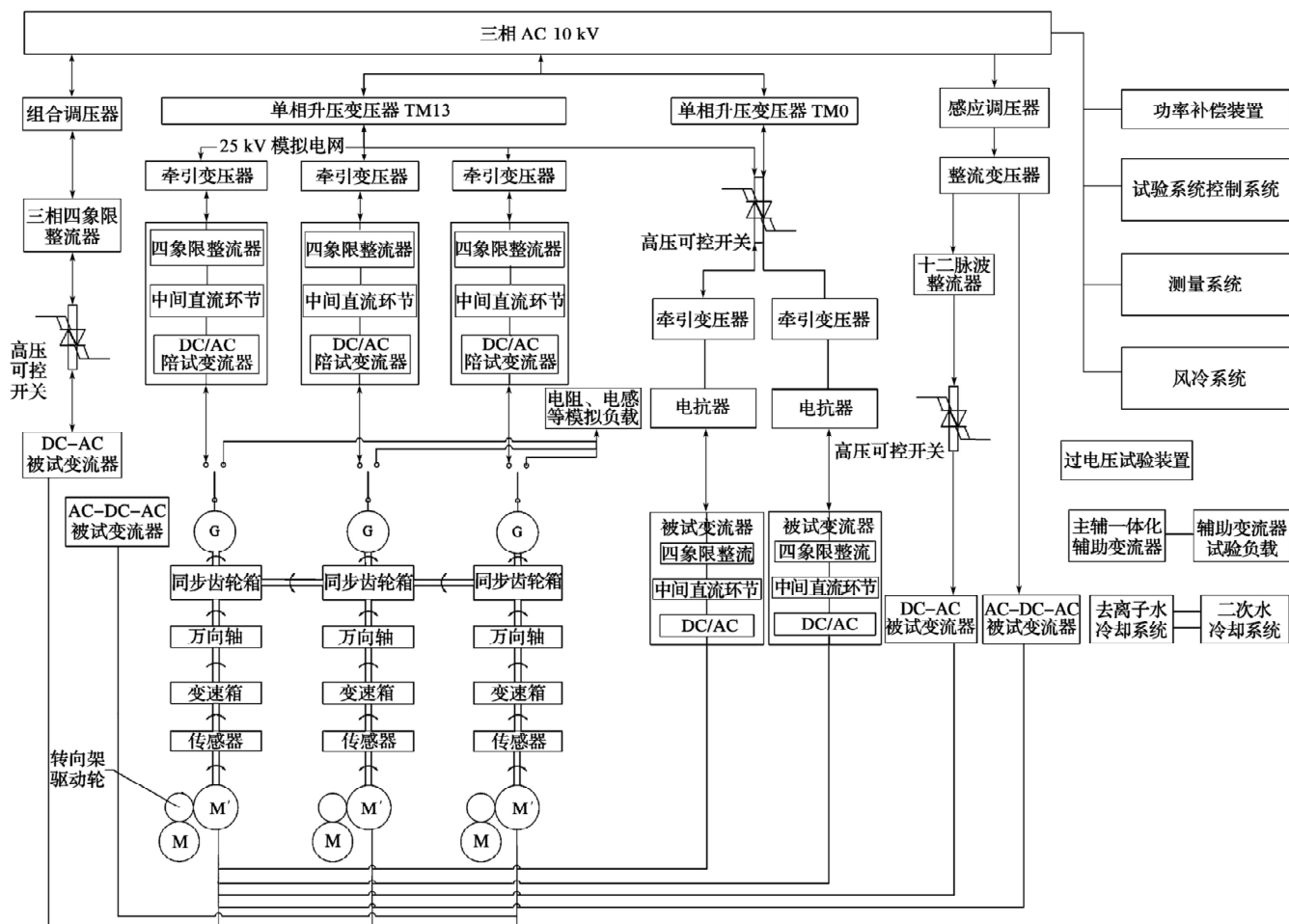


图2 牵引动力综合试验系统

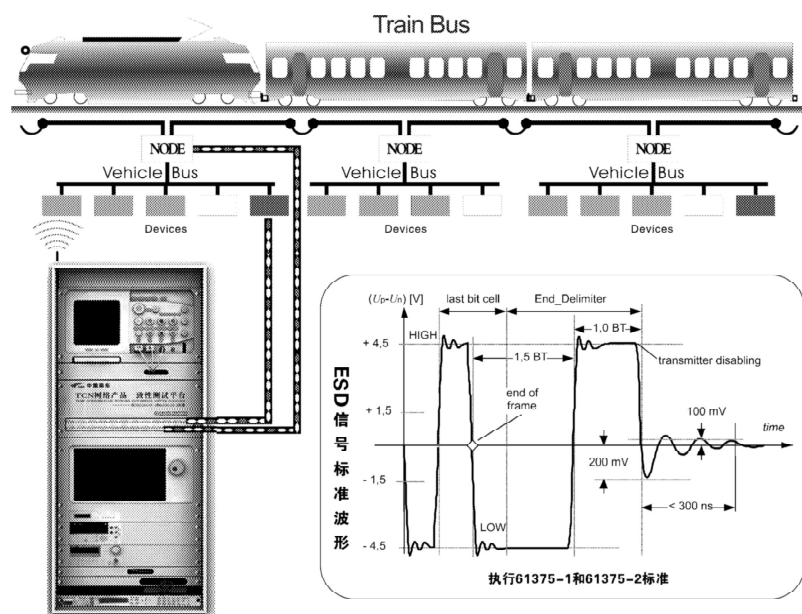


图3 TCN网络测试系统接入整车网络的方式

试附件组成。

测试系统各部分具体功能如下：

①专用计算机装有测试软件，具有以下功能：校准仪器和系统，远程控制仪器设备，控制函数发生器发出所需网络信号，控制路由器实现信号路由，控制示波器检测和记录网络信号，编辑和执行一致性测试项

目，整合检测结果，自动生成试验报告。

②仪器设备包括示波器、函数信号发生器、网络分析仪、逻辑分析仪、数字万用表、模块化电源。

③信号路由器通过切换信号路由器上的继电器开关的断开与闭合实现被测量信号的路由。

④测试板主要提供以下2项功能：

提供测试所需的小型测试电路，包括EMD的轻载、重载、空载测试电路以及WTB的轻载、重载、空载、短路测试电路；为被测设备与测试仪器提供测试的接入点。

⑤标准测试设备为一套已经通过了一致性测试验证的设备，用于执行协议一致性测试。

⑥集线器用于连接专用计算机和仪器设备、标准测试设备。

所搭建的TCN列车通信网络一致性测试系统，对TCN产品进行性能和行为测试，检验与所声明的能力的符合度，并对整个TCN网络内各终端间的互操作性进行评判。该测试系统于2011年通过了CNAS评审，成为动车组和机车牵引与控制国家重点实验室以及铁道

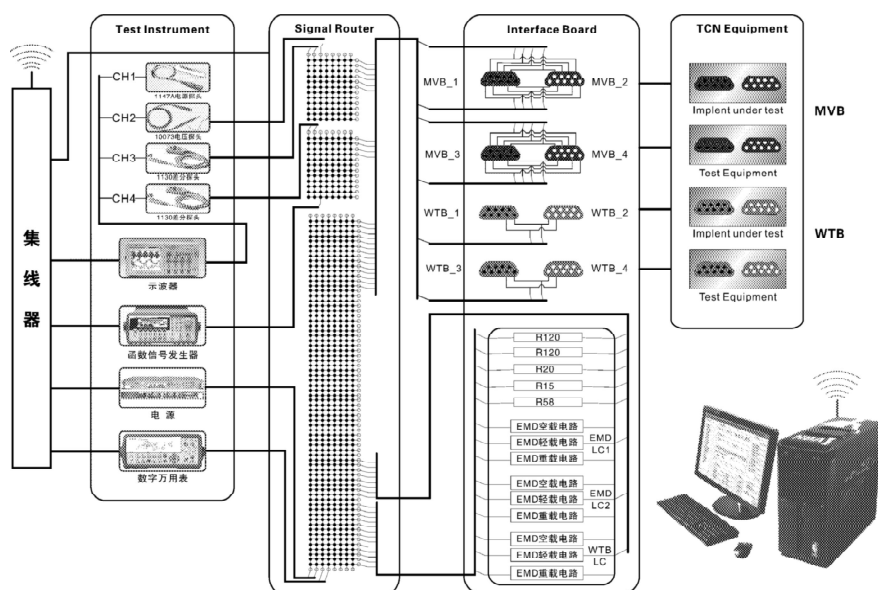


图4 TCN网络测试系统

部牵引电气设备检验站能力的一部分，改变了国内对TCN产品有技术标准无检验手段的局面。

4 RAMS/LCC 试验系统

牵引动力系统、制动系统、控制系统和车载ATO/ATP/ATC等设备通过网络相连通成为一个整体，设备的RAMS/LCC指标往往决定动车组和机车的品质。可靠性验证的焦点在于产品使用时不失去功能、不降低性能、不减少寿命和低故障率；可用性验证的焦点在于发生故障时功能和性能的降低程度；可维修性验证的焦点在于用多少时间、人工和设施去排除故障或更换零部件；安全性验证的焦点在于各种故障和故障组合都导向安全，全生命周期费用几乎就是RAMS的资金量化。

目前，产品的RAMS/LCC的试验标准有待完善，既有的标准停留在提出概念要求^[9]或非综合环境的考核^[5]。开展RAMS/LCC试验研究的关键在于建立成套的试验能力和方法，包括气候环境、力学环境、EMC环境和支持被试系统运行的系统环境，环境测试剖面，以及能够窥测被试系统内核的仪器。

气候环境试验系统包括用于模拟冰、雪、雨、雾、高寒酷暑季节的高低温湿热试验箱，模拟穿越隧道的快速温度变化箱，模拟雨季的水试验箱，模拟沙漠的沙尘试验箱，模拟沿海的盐雾试验箱。

力学环境试验系统包括面向牵引变压器、变流器和牵引电动机等大型试件的20 t试验台，以及面向电子装置的8 t和3 t中小型试验台，最高空载加速100g，冲击振动力和台面尺寸均满足标准要求的Ⅰ类和Ⅱ类

试验要求。

EMC环境试验系统包括10米法电波暗室，EMI试验范围9 kHz~18 GHz，EMS试验范围150 kHz~8 GHz，现场测试系统，一套雷击模拟器。

电子装置与电气设备实际使用的环境往往是多种环境的复杂综合体，真正意义上的完全重现几乎是不可能的。好在一些环境的作用力可以单独测评，只需要将几种综合关联度高而且有可能集成的环境试验能力集成在一起。综合试验系统就是依照这样的思路设计出来的。

牵引系统及其部件的综合试验系统包括“牵引动力试验系统+60 m³高低温湿热箱+电应力+TCN网络测试系统”，在试验室里营造出系统在严寒、酷暑、湿度和实际运行的各种工况。TCN网络测试系统接入被测系统，监测被测系统中各CPU的工作状态。

电子装置的综合试验系统包括“被测对象+TCN网络+10 m³高低温湿热箱+8 t振动冲击试验台+EMC浪涌设备与雷击模拟器+电应力+通断+TCN网络测试系统”，在试验室里营造出系统在严寒、酷暑、湿度、多维度振动冲击、合闸涌流、外部注入EMC干扰、遭受雷击、控制电压突变、控制电压短时中断和实际运行的各种工况。综合试验的剖面设计遵循图5所示方法。同

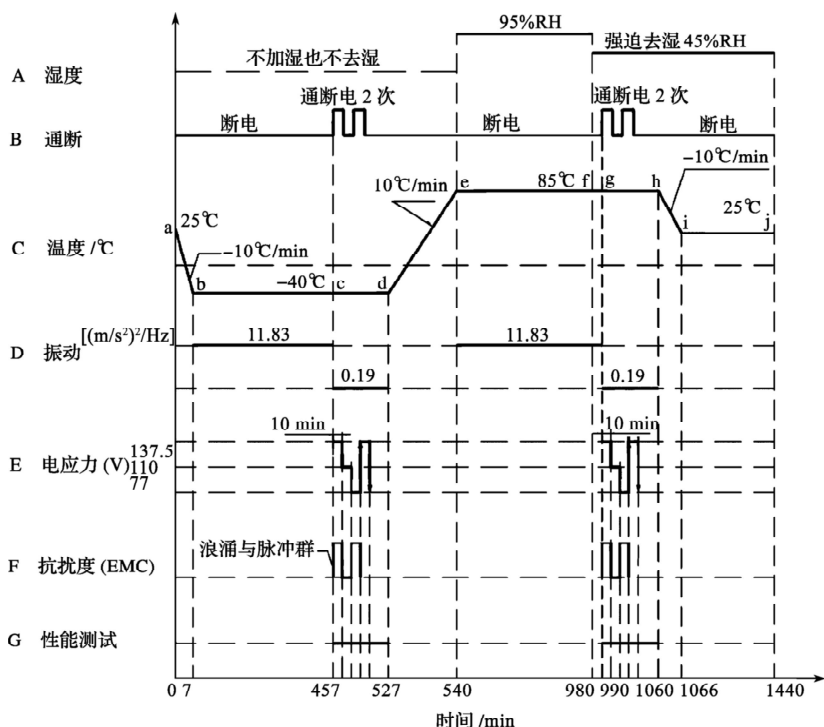


图5 典型机车电子产品可靠性试验剖面

样, TCN 网络测试系统接入被测系统, 监测被测系统中各 CPU 的工作状态。

针对样机研发阶段的器件与材料的选型、制造工艺的改进、设计改进和最终定型的目标, 综合试验系统设计为根据需要来制定合适的组合, 强化验证新需求 and 设计变化项, 一般按照图 6 的流程进行。

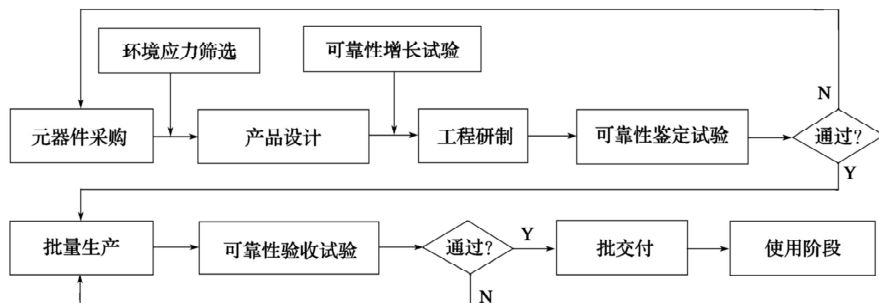


图 6 样机研发的可靠性试验验证流程

5 软件 RAMS 测评

根据标准^[10]的要求, 软件外部质量包括六大特性: 功能性、可靠性、易用性、效率、维护性、可移植性。软件 RAMS 中所涉及到的 RAM 在软件外部质量六大特性中已有所涵盖。针对软件安全性, 不能单纯地从软件自身来看安全性, 软件跟硬件不同, 自身不存在安全或不安全的说法, 必须将软件与软件应用到的系统/产品相结合来看, 才有其安全性识别和处理的必要。

软件可靠性测评, 主要关注在规定的环境和规定的时间软件不引起系统失效的概率。该概率是系统输入和系统使用的函数, 也是软件中存在的缺陷的函数。软件的 MTTF/MTBF 不套用硬件修复的概念, 理论上软件任何缺陷都是可以修复的, 因此采用 MTTF 更为适合。

软件的可用性测评, 主要关注软件的功能性、易用性、效率、可移植性等特性。软件的可维护性测评, 主要关注软件的升级/下载方式的便捷性、运行日志的合理及完备性、故障定位的准确性, 以及故障检测时间、故障修复时间、维修间隔时间等方面的内容。

软件安全性测评, 只有软件涉及到影响系统/产品的功能安全, 才须考虑软件安全性, 并结合系统/产品的安全等级要求及分配到软件的安全等级要求, 遵循合适的规范的软件开发流程, 按照规定的技术与方法进行软件的设计与实现。

在技术方法上, 软件 RAMS 与硬件 RAMS 有如下类似特征: 产品设计越简单越易保证其可靠性, 依靠设计与开发过程保证其可靠性, 利用概率论和数理统计学研究产品可靠性, 冗余性容错设计的某些分析技术的原理, FTA、FMEA、Petri 网等方法的基本思想, 软件硬件互补的思想, 采用系统工程的基本方法学。

在实际工程应用中, 软件 RAMS 与硬件 RAMS 的差异见表 1。

在上述几个试验系统内所开展的软件 RAMS 测评, 侧重于重现软件运行载体的环境, 特别是系统环境和边界环境。其中, TCN 网络测试系统充当了“生命探测仪”的角色, 实时监测由网络传输来的被测对象的各

CPU 的状态信号, 直接验证各 CPU 在各种环境下都运行在可控的工况, 通过各 CPU 监测执行层运行在设定工况的边界内。对于“故障导向安全”的要求, 测试系统可以发挥远远超出现场整车试验时的功效, 不但易于模拟单一的故障, 而易于模拟复杂的故障组合, 这些“故障”和“故障组合”可以方便地积累下来, 并可以重现。

表 1 软件 RAMS 与硬件 RAMS 差异一览表

硬件	软件
是物理实体, 有散差, 会自然老化, 会发生使用耗损	是逻辑表示, 无散差, 不会变化, 硬件载体可变
研制和生产过程的可见性好, 便于控制	设计和编码过程的可见性差, 难控制
产品故障不只是设计故障, 生产过程、使用过程和物料变化均能造成内部故障	产品缺陷均为“设计缺陷”, 通过载体或环境造成内部缺陷
若产品的零部件及其组合均无故障, 则产品无故障; 若有故障, 就会在运行中暴露	即使指令都正确, 也很难保证动态组合都正确, 故通常有缺陷, 条件具备时才暴露缺陷
系统行为通常可用连续函数描述, 故障有物理原因, 有失效前兆	程序运行状态变化是离散型的数学模型, 缺陷的形成无物理原因, 无失效前兆
研制、生产、使用、备料和管理过程都会产生缺陷, 均需加强控制	在开发过程中采取技术和管理措施来确保可靠性
同一品种规格的不同零部件的适当冗余可提高可靠性	容错设计中冗余程序不能相同, 必须保证设计相异性
可靠性参数估计有物理基础	可靠性参数估计无物理基础
产品维修通常是修复失效的零部件, 可靠性只能尽量保持, 不能提高	软件维护通常要修改软件, 产生新版本, 可以提高可靠性
维修适当一般不会影响到他处, 或受影响部位较明显, 易于确定	维护时常会影响到他处, 影响面不易分析; 若分析不清, 就不能保证修改结果
维修分级, 基层级快速维修是维修性要求所必须考虑的	维护过程复杂, 一般需由专业软件人员进行
产品本身可能有危险, 安全关键产品的安全性单独分析评估	产品本身无危险, 但对系统安全性可能有影响, 不能单独分析评估软件安全性

6 结语

牵引动力试验系统、TCN 网络测试系统、RAMS/LCC 试验系统和软件 RAMS 测评对铁路机车车辆设备的品质提升起到了重要作用。借助 (下转第 14 页)

横向振动性能和系统时滞的影响。

3.3 速度对半主动减振性能的影响

实际运行中,列车速度是不断变化的。为了比较不同速度等级下,半主动控制模式比被动模式对车辆振动性能改善的情况,在天棚阻尼系数取为 60 kN s/m,系统时滞为 80 ms 时,计算了列车速度从 200 km/h 变化到 350 km/h 时,车体横向振动性能改善情况,结果见表 2。

表 2 不同速度下被动模式与半主动模式振动改善

速度 / km.h ⁻¹	被动模式			半主动控制模式					
	横向平稳 性指标	最大 加速度	加速度 均方根	横向平稳 性指标	改善 率/%	最大加 速度	改善 率/%	加速度 均方根	改善 率/%
200	1.859	0.483	0.129	1.529	17.8	0.355	26.5	0.065	49.6
250	2.083	0.682	0.193	1.607	22.9	0.343	49.7	0.077	60.1
280	2.151	0.828	0.226	1.632	24.1	0.351	57.6	0.082	63.7
300	2.211	0.860	0.249	1.655	25.1	0.299	65.2	0.084	66.3
320	2.316	0.924	0.278	1.751	24.4	0.479	48.2	0.097	65.1
350	2.409	0.968	0.322	1.834	23.9	0.505	47.8	0.113	64.9

结果表明,在不同的列车速度等级下,与被动模式相比,半主动模式对车体横向振动的改善效果均比较明显,平均改善率超过 20%。随着速度的增加,横向平稳性指标和横向振动加速度的改善效果呈现先升后降的趋势,在速度 300 km/h 时,改善率取得最大值。

4 结论

①在半主动控制模式中,天棚阻尼系数越大,车体横向平稳性指标越小,轮轨横向力、轮轴横向力、脱轨系数等均变小,且趋势趋缓,但车体最大加速度会增大,横向振动性能会恶化,因此,对 CRH380A 动车组头车,天棚阻尼系数可在 50~100 kNs/m 范围内取值。

②随着半主动系统时滞增大,车体横向振动性能恶化,同时车辆轮轨横向力和脱轨系数增大,这是因为半主动控制实际上是把车体的振动转移到转向架上

的缘故。在天棚阻尼系数为 60 kN s/m 时,半主动悬挂系统允许时滞要控制在 100 ms 以内,此时横向振动性能较被动悬挂改善 16% 以上。

③随着天棚系数的增大,系统允许的最大时滞单调减小,因此,天棚阻尼系数的设计要同时考虑横向振动性能和系统时滞的影响。

④不同的列车速度等级下,半主动控制模式比被动模式对车体横向振动的改善效果均比较明显,平均改善率超过 20%,改善效果随列车速度呈先升后降趋势,在速度 300 km/h 时,改善率取得最大值。

参考文献:

- [1] 佐佐木 君章. 改善高速列车的横向乘坐舒适度——半主动悬挂减振装置的应用 [J]. 铁道学报, 2004, 26(1): 105-115.
- [2] Sasaki.Kimiaki Semi-Active Suspension System [J]. Railway Technology Avalanche, 2003(1): 5.
- [3] 小泉 智志. 日本住友金属主动控制技术 [J]. 国外铁道车辆, 2004(1): 34-37.
- [4] 姚建伟, 嘎 尼. 采用主动悬挂技术是改善机车横向动力学性能的有效途径之一 [J]. 铁道机车车辆, 2002 (S1): 177-179.
- [5] 陈 海. 日本 E2 系-1000 型新干线电动车组 [J]. 国外铁道车辆, 2005(5): 1-7.
- [6] 张耀宏. 500 系列动车的半主动悬挂系统 [J]. 国内外内燃机车, 1998(5): 8-12.
- [7] 陈 海. 日本新干线 N700 系电动车组 [J]. 国外铁道车辆, 2006(6): 1-9.
- [8] 周贤全. 九州新干线 800 系电动车组的开发 [J]. 国外铁道车辆, 2007(5): 1-3.
- [9] 张卫华. 高速转向架技术的创新研究 [J]. 中国工程科学, 2009, 11(10): 8-18.
- [10] 刘宏友, 等. 半主动悬挂系统动力学性能仿真分析 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 61-66.

(上接第 5 页) RAMS/LCC 试验系统和正在开展中的软件测评,在企业内部开展产品的 RAMS/LCC 测评的条件已经逐步具备,结合 IRIS 认证和 SIL 认证以及现有的质量管理体系和检测能力,可以为机车车辆的品质再提升提供有力的支撑。就新技术的研发而言,未来几年的设想是,以网络为纽带,将各 1:1 试验系统组合起来,配置半实物仿真系统,使得整车的电子装置的软硬件在 RAMS/LCC 试验室完成地面上的“完整系统的完整工况的完整重现”测试,建设机车车辆电气系统的数字化样机。

参考文献:

- [1] IEC 61133, 铁路应用—机车车辆制成后投入使用前的试

验 [S].

- [2] IEC 61377, 铁路应用—机车车辆组合试验 [S].
- [3] IEC 60310, 铁路应用—机车车辆牵引变压器和电抗器 [S].
- [4] IEC 60349, 电力牵引—铁路与道路车辆用旋转电机 [S].
- [5] IEC 60571, 铁路机车用电子设备 [S].
- [6] IEC 61375-1, 铁路电子设备—列车总线 第 1 部分: 列车通信网络 [S].
- [7] IEC 61375-2, 铁路电子设备—列车总线 第 2 部分: 列车通信网络一致性测试 [S].
- [8] 陈高华, 等. TCN 产品一致性测试技术的研究 [J]. 机车电传动, 2007(2).
- [9] EN 50126, 铁路应用 可靠性, 可用性, 可维护性和安全性技术条件和验证 [S].
- [10] ISO/IEC 9126-1, 软件工程产品质量第 1 部分: 质量模型 [S].