



# 轨道交通 RAMS工程基础

孙帮成 主编

轨道交通的关键技术  
行业竞争的核心方向



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



孙帮成，  
1964年生于  
湖北仙桃，  
1984年7月

毕业于湖南大学，教授级高级工程师，享受国务院政府特殊津贴专家，中国北车股份有限公司动车组设计大师，现任唐山轨道客车有限责任公司总工程师，主持CRH3型动车组引进消化吸收再创新和系列高速列车设计工作，主持完成国家级和省部级科技课题20余项，获得专利50多项，发表学术论文20余篇，获得省部级科技成果奖励6项，曾获中国铁道学会铁道科技特等奖和河北省科技进步一等奖等奖项。



# 轨道交通 RAMS 工程基础

主 编 孙帮成

副主编 安 超 王贵国

参 编 谈立成 李 娜 傅振亮

田雪艳 郭云健 张荧驿

燕春光 于金朋 黄少东



机械工业出版社

本书详细介绍了轨道交通车辆 RAMS&LCC 技术的相关内容, RAMS 管理部分系统论述了轨道交通车辆的 RAMS 的影响因素、如何制定 RAMS 工作大纲以及 RAMS 工作项目的选择原则、如何进行供应商的 RAMS 验收、如何开展 RAMS 阶段评审; RAMS 工程技术部分结合典型案例分析详细介绍了各项 RAMS 工程技术在轨道交通车辆上的实施方法; LCC 部分结合多年的工程实践, 详细介绍了 LCC 分析方法及程序; RAMS 信息数据部分结合所开发的轨道交通车辆的 RAMS 数据库, 阐明了如何进行数据设计、分析及管理。本书可供从事轨道交通 RAMS 工作相关工程技术人员及高等院校教学使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

轨道交通 RAMS 工程基础/孙帮成主编. —北京: 机械工业出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-111-45384-0

I. ①轨… II. ①孙… III. ①轨道交通—研究 IV. ①U

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 004874 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 何月秋 责任编辑: 何月秋 王春雨

版式设计: 霍永明 责任校对: 姜 婷

封面设计: 马精明 责任印制: 李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·18.75 印张·1 插页·360 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-45384-0

定价: 69.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑电话:(010)88379732

社服务中心:(010)88361066

网络服务

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010)88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

# 序 言

可靠性工程作为一门独立的学科于 20 世纪 30 年代初率先在美国形成。1965 年国际电工委员会 (IEC) 可靠性专业委员会 TC56 成立, 使可靠性技术成为国际化的技术。随着工业和工程技术的发展及应用, 人们发现维修性、安全性和可用性与可靠性息息相关, 因此传统的可靠性技术得到拓展, 逐步构成了通常所说包含可靠性、可用性、可维修性和安全性技术在内的广义可靠性工程技术, 即 RAMS 技术。RAMS 工程技术首先应用于民航、核电、军工等领域, 从 20 世纪 80 年代被引入到轨道交通行业。1998 年, 欧洲电工标准化委员会批准了欧洲标准 EN50126, 2002 年, 该标准又上升为国际电工委员会标准 IEC62278, 2008 年, 该标准被引进中国转换为国家标准 GB/T 21562, 推动了 RAMS 工程技术在我国轨道交通系统中的应用和发展。

随着国民经济的发展, 我国铁路实现了“六次”大提速。随着铁路运营速度的提高, 对轨道交通产品的 RAMS 水平也提出了更高的要求。RAMS 工程技术在我国轨道交通领域发展很快, 部分制造企业初步建立了 RAMS 技术及管理体系。在部分产品全寿命周期开展了 RAMS 管理, 对系统、子系统和主要零部件等开展了 RAMS 分析工作, 例如故障模式影响分析、故障树分析、可靠性试验等。轨道交通 RAMS 工程技术得到了应用, 但需要进一步的深化和推广。轨道交通行业虽形成了一些 RAMS 技术团队, 但专业人才缺乏。在铁路“十二五”科技发展规划中, RAMS 技术被列为铁路科技发展的重要技术之一。深入开展 RAMS 工程理论和方法在轨道交通领域的应用研究, 建立产品全寿命周期系统评估和保障体系已势在必行。

本书编者具有丰富的轨道交通车辆产品设计经验, 在引进消化吸收国外高速动车组技术过程中, 认真总结我国铁路发展成果和经验, 在此基础上, 借鉴了发达国家先进管理思想和技术, 注重系统工程和 RAMS 工程技术在高速动车组研发设计中的应用, 强调理论技术与工程应用相结合, 在企业内部建立了覆盖产品全寿命周期的 RAMS 工程管理和技术体系, 并形成了企业的 RAMS 信息系统, 相关技术得到了推广和应用, 取得了很好的效果。本书是对技术研究和工程应用经验总结的基础上编制完成, 从技术和管理两方面深入浅出地阐明了 RAMS 工程技术, 内容系统完整, 具有很强的实用性, 便于工程应用参考, 有助于相关专业人员全面、系统地掌握和应用 RAMS 工程技术, 很值得大家借鉴。



现阶段，我国的铁路交通进入了新的发展时代，特别是高铁产业迅猛发展，对产品的技术先进、功能稳定、可靠性和安全性有了更高的要求。随着系统的复杂化，高技能化，系统价格也在上升。因此，一旦发生故障，就会造成巨大的经济损失。目前，轨道交通产品在 RAMS 方面面临着很多挑战，从外部来说，产品进入铁路市场所要求的各种安全评估和认证（如独立安全评估）、体系认证（如国际铁路行业标准 IRIS 认证）和国内外市场基本进入门槛（包括投标）的相关要求，是开展 RAMS 工作的外部驱动因素；从内部来说，切实提高产品的可靠性、可用性、维修性和安全性，进而提升服务质量以及合理地规避风险，是企业开展 RAMS 工作的内部驱动因素。

从 20 世纪 80 年代起，国外轨道交通行业就引入了 RAMS 工程技术，目前已形成了一套比较成熟且实用的 RAMS 技术体系，既包括顶层管理及技术规范，又包括各种工程应用的实施指南、试验与评价实施指南。我国铁路借鉴国外先进国家的铁路经验，结合自身发展需要，也制定了部分 RAMS 铁路相关标准，如 GB/T 21562—2008 等。但是从科学性和系统性来讲，我国铁路行业的 RAMS 工程在企业中尚未达到全面系统应用水平，在行业内没有形成相应的标准体系，在相关技术方法的应用过程中缺乏相应的规范和指导，轨道交通行业对可靠性的研究还比较滞后。

本书通过对 RAMS 工程技术在轨道交通车辆产品项目中应用的研究，从国内外轨道交通发展行业形势及轨道交通企业发展需求出发，从轨道交通车辆 RAMS 管理、RAMS 设计分析、RAMS 试验和 RAMS 信息以及 LCC 等方面创建轨道交通车辆 RAMS 工程体系，并在产品项目中进行了应用，取得了良好的效果。

本书由孙帮成组织并统稿，安超、王贵国协助组织并统稿。全书共分 6 章，第 1 章主要介绍了有关产品 RAMS 及 LCC 的基本概念（李娜编写）；第 2 章主要从轨道列车 RAMS 的影响因素、寿命周期、项目管理以及对供应商的监督与控制四个方面介绍 RAMS 工程管理的相关内容（王贵国、李娜编写）；第 3 章主要介绍了轨道列车 RAMS 工程技术，包括可靠性模型、可靠性分配和预计、故障模式影响分析、故障树分析、事件树分析、危害及风险管理以及维修性设计与分析（谈立成、张荧驿、于金朋编写）；第 4 章主要介绍了轨道列车产品的寿命周期阶段以及成本的构成、LCC 分析模型及流程等（田雪艳、黄少东编写）；第 5 章主要介绍了可靠性试验的基本概念、轨道列车产品可靠性试验的实施过程以及

典型可靠性试验的开展方法（傅振亮编写）；第6章主要介绍了轨道列车产品RAMS信息数据的收集、建立RAMS信息数据库的总体需求、数据的分析及管理等（郭云健、燕春光编写）。

在编写本书时参考了国内外发表的部分文章、资料和书籍，编者在此对有关作者表示诚挚的谢意。同时，对章国平、黄烈威、王立航、杜会谦、黄振晖、张晓军、廉有利、李明高、马纪军、王广明、王志海、康红军、王云飞等人给予该书的指导、支持和帮助表示感谢！

由于编者水平所限，遗漏、不足之处在所难免，欢迎广大读者批评指正，谨表谢意！

序言

前言

第 1 章	RAMS/LCC 的基本概念	1
1.1	RAMS/LCC 基本术语与定义	1
1.2	可靠性常用的三大指标	4
1.3	RAMS 的组成及其关系	5
1.3.1	可用性方面的关系	5
1.3.2	安全性方面的关系	8
1.4	RAMS 与 LCC 的关系	10
第 2 章	轨道列车产品 RAMS 工程及管理	11
2.1	概述	11
2.1.1	轨道列车产品 RAMS 管理的基本原则	11
2.1.2	RAMS 管理的基本方法	12
2.2	轨道列车产品 RAMS 的影响因素	13
2.2.1	概述	13
2.2.2	人为影响因素	13
2.2.3	其他 RAMS 影响因素	16
2.2.4	影响因素的管理	22
2.3	轨道列车产品 RAMS 寿命周期	23
2.3.1	轨道列车产品的寿命周期	23
2.3.2	系统寿命周期各阶段的关系	25
2.3.3	寿命周期 RAMS 责任	26
2.4	轨道列车产品 RAMS 工作项目管理	28
2.4.1	轨道列车产品 RAMS 工作项目	28
2.4.2	轨道列车产品 RAMS 工作项目选择原则	28
2.4.3	轨道列车产品 RAMS 工作项目基本要求	39

2.5	RAMS 大纲	46
2.5.1	制定 RAMS 大纲的步骤	46
2.5.2	RAMS 大纲示例	46
2.6	轨道列车产品供应商 RAMS 管理	48
2.6.1	验收评审组织管理	48
2.6.2	验收会议前准备	48
2.6.3	召开验收会议	48
2.6.4	验收意见的落实	48
2.6.5	验收文件管理	49
2.6.6	验收部门职责	49
2.6.7	轨道列车产品验收的类型和验收点的设置	49
2.6.8	轨道列车产品转阶段 RAMS 验收	50
2.6.9	轨道列车产品 RAMS 专题验收	51
2.6.10	供应商 RAMS 验收的注意事项	52
2.7	轨道列车产品 RAMS 阶段评审	52
2.7.1	RAMS 审核类型和评审点	52
2.7.2	阶段 RAMS 评审的主要内容	53
2.7.3	阶段 RAMS 评审的组织与实施	54
2.7.4	阶段 RAMS 评审的注意事项	55
<b>第 3 章</b>	<b>RAMS 工程技术</b>	<b>56</b>
3.1	RAMS 设计技术	56
3.1.1	冗余设计	56
3.1.2	健壮设计	57
3.1.3	热设计	59
3.1.4	电磁兼容设计	60
3.1.5	耐环境设计	61
3.1.6	标准化、互换性、通用性和模块化设计	61
3.2	可靠性模型	63
3.2.1	可靠性框图	63
3.2.2	可靠性模型	65
3.3	可靠性分配及预计	66
3.3.1	可靠性分配的目的	66

3.3.2	可靠性分配的原则	66
3.3.3	可靠性分配的方法	67
3.3.4	可靠性预计的目的	69
3.3.5	可靠性预计方法	69
3.3.6	可靠性分配与可靠性预计的关系	72
3.4	故障模式影响分析	72
3.4.1	概述	72
3.4.2	方法	73
3.4.3	过程与步骤	76
3.5	故障树分析	96
3.5.1	概述	96
3.5.2	方法	97
3.5.3	过程和步骤	103
3.6	事件树分析	115
3.6.1	概述	115
3.6.2	过程和步骤	116
3.6.3	事件树分析与故障树分析方法的综合应用	122
3.7	危害及风险管理	126
3.7.1	危害识别	126
3.7.2	危害分析	134
3.7.3	风险评估	145
3.7.4	安全原则和规范要求符合性评估 (DSA)	157
3.7.5	定量风险评估	158
3.8	维修性设计与分析	159
3.8.1	维修性要求	159
3.8.2	维修性模型	164
3.8.3	维修性分配	168
3.8.4	维修性预计	173
3.8.5	维修性设计准则	182
3.8.6	以可靠性为中心的维修 (RCM)	187
3.8.7	使用维修任务分析 O&MTA	203

<b>第 4 章 全寿命周期成本</b> .....	211
4.1 目的及意义 .....	211
4.2 产品的寿命周期阶段 .....	211
4.3 全寿命周期成本构成 .....	212
4.4 LCC 模型 .....	212
4.4.1 LCC 模型的特点 .....	212
4.4.2 LCC 模型要求 .....	212
4.4.3 LCC 分解 .....	213
4.4.4 REMAIN LCC 模型 .....	213
4.5 LCC 分析的一般步骤 .....	217
4.5.1 规定目标 .....	217
4.5.2 确定假设 .....	218
4.5.3 建立费用分解结构 .....	218
4.5.4 选择费用估算方法 .....	218
4.5.5 收集数据 .....	219
4.5.6 估算单元费用 .....	219
4.5.7 敏感性分析 .....	219
4.5.8 不确定性分析 .....	220
4.5.9 结果输出 .....	220
<b>第 5 章 可靠性试验</b> .....	222
5.1 基本概念 .....	222
5.2 可靠性试验的分类 .....	222
5.2.1 工程试验与统计试验 .....	222
5.2.2 实验室模拟试验与使用现场试验 .....	223
5.2.3 筛选试验与寿命试验 .....	224
5.2.4 全数试验与截尾试验 .....	224
5.3 可靠性试验的主要因素 .....	225
5.3.1 试验条件 .....	225
5.3.2 故障判据 .....	226
5.3.3 试验剖面 .....	226
5.4 可靠性试验前的条件 .....	227

5.4.1	试验计划 .....	227
5.4.2	试验程序 .....	227
5.4.3	可靠性预计 .....	228
5.4.4	故障模式、影响及危害分析 .....	228
5.4.5	环境试验 .....	229
5.4.6	温度试验 .....	229
5.4.7	振动试验 .....	230
5.4.8	试验质量控制和保证措施 .....	230
5.4.9	试验前准备工作评审 .....	231
5.5	环境应力筛选试验 .....	231
5.5.1	基本概念 .....	231
5.5.2	环境应力筛选的作用及应用 .....	232
5.5.3	环境应力筛选的基本特征 .....	232
5.5.4	环境应力筛选与有关工作的关系 .....	233
5.5.5	环境应力筛选的几种典型筛选应力 .....	234
5.5.6	典型应力的筛选效果比较 .....	237
5.6	可靠性增长试验 .....	237
5.6.1	基本概念 .....	237
5.6.2	可靠性增长的基本过程 .....	238
5.6.3	可靠性增长试验的基本方法 .....	239
5.6.4	可靠性增长模型 .....	240
5.6.5	可靠性增长试验计划 .....	243
5.6.6	可靠性增长试验的管理 .....	245
5.7	可靠性验证试验 .....	247
5.7.1	基本概念 .....	247
5.7.2	可靠性验证试验计划 .....	248
5.7.3	指数寿命型统计试验方案 .....	251
<b>第 6 章</b>	<b>RAMS 信息数据 .....</b>	<b>260</b>
6.1	数据设计 .....	260
6.1.1	数据收集的目的 .....	260
6.1.2	数据类型 .....	260
6.1.3	数据来源及特点 .....	262

6.1.4 数据收集要求和程序 .....	266
6.1.5 故障数据的判定和记录 .....	269
6.2 系统总体需求 .....	271
6.2.1 设计目标 .....	271
6.2.2 需求分析 .....	272
6.2.3 平台开发 .....	273
6.3 数据分析及管理 .....	273
6.3.1 数据加工处理 .....	273
6.3.2 数据分析 .....	275
6.3.3 数据管理 .....	282
参考文献 .....	284



# 第 1 章

## RAMS/LCC 的基本概念

RAMS 是可靠性 (Reliability)、可用性 (Availability)、维修性 (Maintainability)、安全性 (Safety) 的缩写, 是由其英文的第一个字母组成的。轨道列车的 RAMS 是列车经过长期运行所表现出来的特性; 是在系统的整个寿命周期中, 通过已有的工程概念、方法、工具和技术获得的。它反映出系统能够保证在指定的时间内, 安全达到轨道交通运输规定水平的置信度。

### 1.1 RAMS/LCC 基本术语与定义

与 RAMS 有关的术语和定义分别摘自国际标准化组织标准 ISO、国际电工委员会标准 IEC、国家标准 GB、国家军用标准 GJB。

(1) 可靠性 产品在给定的条件下和在给定的时间区间内能完成要求的功能的能力。(GB/T 2900.13—2008)

(2) 可用性 在所要求的外部资源得到提供的情况下, 产品在给定的条件下, 在给定的时刻或时间区间内处于能完成要求的功能的状态的能力。(GB/T 2900.13—2008)

(3) 维修性 产品在规定的条件下和规定的时间内, 按规定的程序和资源进行维修时, 能够完成规定维修工作的能力。(IEC 60050-191—1990)

(4) 安全性 免除不可接受的风险影响的特性。(EN CLC/TR 50126-3—2008)

(5) 测试性 产品能及时并准确地确定其状态 (可工作、不可工作或性能下降), 并隔离其内部故障的一种设计特性。(GJB 451—1990)

(6) 系统 能够完成某项工作任务的设备、人员及技术的组合。一个完整的系统应包括在规定的 work 环境下, 使系统的工作和保障可以达到自给所需的一切设备、有关的设施、器材、软件、服务和人员。(GJB 451—1990)

(7) 可修复产品 可通过修复性维修恢复其全部规定功能的产品。(GJB 451—1990)

(8) 不可修复产品 不能通过修复性维修恢复其全部规定功能或不值得修复的产品。(GJB 451—1990)

(9) 使用寿命 产品从制造完成到出现不可修复的故障或不能接受的故障率时的寿命单位数。(GJB 451—1990)

(10) 寿命剖面 产品从制造到寿命终结或退出使用这段时间内所经历的全部事件和环境的时序描述。它包括一个或几个任务剖面。(GJB 451—1990)

(11) 任务剖面 产品在完成规定任务这段时间内所经历的事件和环境的时序描述。其中包括任务成功或致命性故障的判断准则。(GJB 451—1990)

(12) 环境条件 所有外部和内部的条件(如温度、湿度、辐射、磁场、电场、冲击、振动等)或其组合。这些条件是自然的、人为的或自身引起的。它们影响产品的形态、性能、可靠性或生存力。(GJB 451—1990)

(13) 基本可靠性 产品在规定的条件下,无故障的持续时间或概率。(GJB 451—1990)

(14) 任务可靠性 产品在规定的任务剖面中完成规定功能的能力。(GJB 451—1990)

(15) 故障 产品不能完成要求的功能的状态。预防性维修或其他计划的行动或因缺乏外部资源的情况除外。故障通常是产品自身失效引起的,但即使失效未发生,故障也可能存在。(GB/T 2900.13—2008)

(16) 独立故障 不是由于另一个产品故障引起的故障。(GJB 451—1990)

(17) 从属故障 由于另一个产品故障而引起的故障。(GJB 451—1990)

(18) 系统性故障 由某一固定因素引起,以特定形式出现的故障。它只能通过修改设计、制造工艺、操作程序或其他关联因素来消除。(GJB 451—1990)

(19) 单点故障 引起产品故障的,且没有冗余或替代的工作程序作为补救的局部故障。(GJB 451—1990)

(20) 非关联故障 已经证实是未按规定的条件使用而引起的故障。或已经证实仅属某项将不采用的设计所引起的故障。(GJB 451—1990)

(21) 致命性故障 易于导致人员伤亡、重要物件损坏或其他不可接受后果的故障。(GB/T 2900.13—2008)

(22) 故障模式 相对于给定的规定功能,故障产品的一种可能的状态。(IEC 60050-191—1990)

(23) 故障分析 为确定和分析可能的故障的概率、原因及后果而对产品进行逻辑的、系统的检查。(GB/T 2900.13—2008)

(24) 故障影响 故障模式对产品的使用、功能或状态所导致的结果。故障影响一般分为局部的,高一层次的和最终影响三级。(GJB 451—1990)

(25) 故障安全保护 为使产品故障不致引起人和物的重大损失,在设计时所采取的安全防护措施。(GJB 451—1990)

(26) 耗损 产品由于老化、磨损、疲劳等原因,使其故障率随寿命单位数的增加而增加的过程。(GJB 451—1990)

(27) 失效机理 引起失效的物理、化学或其他的过程。(GB/T 2900.13—

2008)

(28) 危害 对人造成潜在伤害或对环境造成潜在损害的物理状况。(EN CLC/TR 50126-3—2008)

(29) 危害记录 所有安全管理活动、危害确定、作出的决定和解决方法的记录或参考文件,也可称为“安全记录”。(EN 50129—2003)

(30) 安全论据 产品符合规定安全要求的书面说明。(EN CLC/TR 50126-3—2008)

(31) 安全完整性 在所有规定的条件下系统在规定时间内实现所需安全功能的可能性。(EN CLC/TR 50126-3—2008)

(32) 安全完整性等级(SIL) 许多已规定的断续的数值之一,这些数值规定了分配给安全相关系统的安全功能的安全完整性要求。数值越大,安全完整性等级越高。(EN CLC/TR 50126-3—2008)

(33) 安全计划 一组适合于组织机构、责任、工序、活动、能力和资源实现的时间调度活动、资源和事件的文档,它们一起保证达到规定合同或工程关于安全性的要求。(EN CLC/TR 50126-3—2008)

(34) 安全规章主管部门 通常是有责任规定或同意这些安全要求且保证轨道交通符合这些要求的国家政府机关。(EN CLC/TR 50126-3—2008)

(35) 维修 为保持或恢复产品处于能执行规定功能的状态所进行的所有技术和管理工作,包括监督活动。(IEC 60050-191—1990)

(36) 预防性维修 为了防止功能降级、减少失效概率而实施的定期或根据预定判据进行的维修。(EN CLC/TR 50126-3—2008)

(37) 修复性维修 故障确认后,为使产品恢复到能完成要求的功能的状态所实施的维修。(GB/T 2900.13—2008)

(38) 维修活动等级 在规定的维修层次上实施维修的一组活动。(GB/T 2900.13—2008)

(39) 维修事件 由于故障、虚警或按预定的维修计划进行的一种或多种维修活动。(GB 451—1990)

(40) 故障隔离 把故障部分确定到必须进行修理范围的过程。(GB 451—1990)

(41) 维修时间 人工或自动对产品实施维修的时间区间,包括技术延迟和后勤延迟。(GB/T 2900.13—2008)

(42) 延误时间 由于保障资源补给或管理原因未能及时对产品进行维修所延误的时间,它是不能工作时间的一个组成部分。(GB 451—1990)

(43) 固有可用性 仅与工作时间和修复性维修时间有关的一种可用性参数。其一种度量方法为:产品的平均故障间隔时间与平均故障间隔时间、平均修复时间的和之比。(GB 451—1990)