

DONGCHEZU JIEGOU
KEKAOXING YU DONGLIXUE

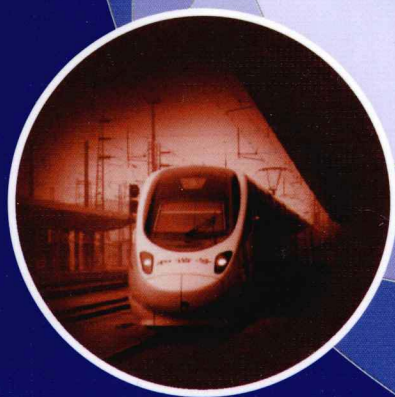


高速铁路新技术系列教材

机车车辆

动车组结构 可靠性与动力学

卜继玲 傅茂海 主编
李 芾 主审



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高速铁路新技术系列教材——机车车辆

动车组结构可靠性与动力学

卜继玲 傅茂海 主编

李 蒂 主审

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

动车组结构可靠性与动力学 / 卜继玲, 傅茂海主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2009.5

(高速铁路新技术系列教材. 机车车辆)

ISBN 978-7-5643-0138-5

I. 动… II. ①卜…②傅… III. ①高速列车—动车—结构可靠性②高速列车—动车—动力学 IV. U266

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 210190 号

高速铁路新技术系列教材——机车车辆

动车组结构可靠性与动力学

卜继玲 傅茂海 主编

*

责任编辑 孟苏成

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 12.375

字数: 311 千字

2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0138-5

定价: 30.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

交通运输是国民经济和社会发展的命脉。铁路运输因其安全、快捷、低能耗、环保等特点,是我国中长距离、大运量交通运输的主要运输模式,是整个交通体系中的重要组成部分。高速动车组由于其高速、安全、可靠、平稳、舒适、全天候运行,更是得到了广大旅客的一致赞誉。但同时动车组也是一个集机械、电气、计算机、信息系统等多学科技术为一体的高新科技运输工具,其结构可靠性和运行性能直接关系到动车组的运行安全性、舒适性、运用效率和维修费用等。

我国铁路按照“引进先进技术、联合设计生产、打造中国品牌”的总体要求和“先进、成熟、经济、适用、可靠”的技术方针,全面组织实施了时速 200 km 动车组技术引进和国产化项目。随着我国铁路对 200 km/h 的高速动车组技术的引进、吸收和消化,以及 300 km/h 高速动车组项目的逐步实施,如何提高高速动车组的结构可靠性、运行稳定性和安全性成为高速动车组的核心技术之一。为了使动车组专业方向的本科学生具有专业的动车组结构可靠性和系统动力学知识,适应动车组技术发展对人才培养的要求,西南交通大学组织编写了这本《动车组结构可靠性与动力学》教材。

本书从高速动车组的两个关键技术——结构可靠性和动力学性能着手,分别介绍了可靠性工程技术和铁道车辆系统动力学在高速动车组中的应用情况。本书涉及的专业知识面广泛,融合了多个学科领域的基础知识。因此,在结构编排上,以动车组运行安全性为主线,以动车组结构可靠性为依托,从可靠性工程的专业基础知识出发,引出机械强度理论和疲劳强度理论基础知识,并介绍动车组结构强度设计的仿真分析有限元基础理论。从动车组承受随机振动载荷出发,引出影响车辆振动的因素,从车辆系统动力学和空气动力学的角度阐述动车组车辆系统动力学的相关理论基础。最后教材落脚于动车组结构可靠性、强度和动力学的试验,介绍其标准及试验方法。

本书共分五章:第一章首先介绍高速动车组结构可靠性工程技术。从可靠性工程的技术发展历程开始,介绍了可靠性工程的相关基础知识,描述了高速动车组结构可靠性的研究意义与特点。进而在第二章引入了可靠性工程的随机概率论与数理统计的基础知识,并针对高速动车组结构可靠性的特点,着重介绍了动车组结构可靠性的概率分布形式。接着在第三章从机械结构强度理论出发,介绍了动车组结构强度的经典设计方法和现代设计方法,简述了结构有限元分析的基本理论和结构疲劳设计方法。第四章主要介绍高速动车组的系统动力学性能问题。从引起动车组车辆振动的线路原因和车辆结构原因影响开始,引入了动车组车辆蛇行运动稳定性、垂向随机振动响应、横向随机振动响应、动车组动力学问题中的非线性因素和高速动车组空气动力学的基本知识,进而介绍了高速动车组动力学仿真分析的基础知识。最后,针对我国高速动车组的结构可靠性和动力学性能的评定条件,在第五章介绍了可靠性试验的基本情况、高速动车组结构强度试验鉴定规范、动力学性能试验鉴定规范和空气动力学试验鉴定规范。

本书由卜继玲副教授和傅茂海研究员共同编撰完成。在整个编撰过程中，李芾教授对本书的总体编排和具体内容提出了许多建议，并认真审阅了文稿；米彩盈教授、黄运华副研究员、安琪博士和李貌硕士为本书的编写提供了大量素材；沈继强硕士和廖永亮硕士为本书的文字输入和插图制作做了大量工作；西南交通大学教务处和铁道部司机考试培训中心的有关老师也给予了大力支持，在此一并表示衷心感谢。

本书主要供车辆工程专业动车组专业方向的本科学生和动车组相关技术人员培训使用，也可作为铁道机车车辆专业方向技术人员的参考资料。

由于编者的水平有限，书中不可避免地存在一些不妥当和需要进一步修改之处，恳请各位读者提出宝贵的意见和建议。

编 者

2009年3月于成都

目 录

第一章 动车组结构可靠性概述	1
第一节 可靠性基本概念	1
第二节 可靠性工程学科的发展简史	6
第三节 动车组结构可靠性研究的意义	14
复习题	16
第二章 可靠性理论基础	17
第一节 可靠性概率基础	17
第二节 可靠性常用概率分布	23
第三节 可靠性数理统计基础	37
第四节 可靠性特征量基础	53
复习题	67
第三章 动车组结构强度理论基础	68
第一节 有限元理论基础	68
第二节 机械结构强度设计理论基础	82
第三节 动车组结构强度设计理论基础	87
第四节 有限元分析软件应用基础	92
复习题	100
第四章 高速动车组动力学理论基础	101
第一节 车辆系统动力学概述	101
第二节 引起车辆振动的原因	105
第三节 车辆的蛇行运动	115
第四节 车辆的垂向随机响应	125
第五节 车辆的横向随机振动	130
第六节 非线性车辆系统的随机振动	134
第七节 动车组的曲线通过性能	138
第八节 高速动车组空气动力学基础	149
第九节 动车组系统动力学仿真分析基础	157
复习题	159

第五章 高速动车组试验鉴定规范	161
第一节 可靠性试验概述	161
第二节 动力学性能试验概述	166
第三节 高速动车组结构强度试验标准	169
第四节 高速动车组动力学性能试验标准	178
第五节 高速动车组空气动力学性能试验标准	185
复习题	189
参考文献	190

第一章 动车组结构可靠性概述

铁路动车组由于其运行速度高、安全可靠、平稳舒适、全天候运行而得到了广大旅客的一致好评。同时动车组也是一个集机械、电气、计算机、信息系统等多学科技术为一体的高新科技产品，其结构可靠性和动力学性能直接关系到动车组运行的安全性、舒适性、运用效率和成本，并影响到整个铁路运输的社会和经济效益。

第一节 可靠性基本概念

一、可靠性定义

可靠性包括狭义可靠性和广义可靠性，通常我们所说的可靠性是指狭义可靠性。

1. 狭义可靠性

根据 GB/T 3187—1994，所谓可靠性是指“产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的能力”。在这个定义中，说明了可靠性研究的 5 个要素。

(1) 产品：这里所说的“产品”是指研究对象。产品可以是具体的一个一个的动车组结构零部件或者整个动车组系统，也可以是一些看不见的软件系统，如动车组信息系统，等等。

但是在可靠性工程研究中，一般把产品分为不可修复产品和可修复产品两种类型。产品在使用中发生失效，其寿命即告终结的，称为不可修复产品。当然，没有绝对的不可修复产品，实际中不可修复产品多指没有修理价值和修理后不能完全恢复其功能的产品，如动车组内的电灯、弹簧、齿轮、轴承等。产品发生故障后，可以通过维修恢复其规定功能的，称之为可修复产品。结构复杂、价格昂贵的产品一般设计成可维修的，可以通过更换其中的零部件和重新调整、加工处理等措施恢复其原来的功能。动车组整个系统本身就是一个可修复产品，尤其是动车组的机械结构，经过一段时间的运行后需要进行厂修等维修。

不可修复产品和可修复产品在可靠性评价理论和方法上有显著差别。例如，不可修复产品是通过寿命统计对其可靠性进行评价，而可修复产品是用两次故障间隔时间的随机变化情况及维修过程的统计量对其可靠性进行评价的。在可靠性工程中，两者共性的问题在讨论时不予特殊说明，但对于一些特殊性问题，两者必须区别对待。

(2) 规定条件：是指产品在使用中所处的环境条件（温度、压力、湿度、风沙和辐射等）、工作条件（功能模式、负荷条件、冲击振动情况等）、维修条件和操作方式等。所规定的条件对可靠性有着直接的影响。例如，在我国东北等高寒地区服役的动车组如果放在南方高温、高湿环境下使用，其可靠性是不一样的。

(3) 规定时间：是指产品完成规定任务或功能所需要的时间，可以用运行时间、走行公

里或循环次数等来表示。例如,目前我国干线机车一般用走行公里数来表示,调车机车和车辆用运行时间来表示。对于我国的高速动车组而言,一般采用走行公里数与运行时间相结合的形式进行考虑。其他国家表示机车车辆运行时间的方法也不尽相同,德国、法国、俄罗斯是以机车走行公里数来表示,英国的内燃机车是以柴油机工作时间(h)来表示,美国则以运行天数来表示。受循环负荷的零部件如曲轴、轴承等,多用循环次数来表示。一般来说,产品可靠性是时间的递减函数,时间越长,可靠性越差。

(4) 规定功能:通常是指产品在技术文件中所规定的工作能力。对高速动车组而言,规定功能指的是,动车组的设计任务书、技术条件、使用说明书、订货合同、国家标准及相关技术文件中所规定的各种功能与性能要求。产品不同所规定的功能也不一样,完成规定的功能就是保持规定的工作能力;反之,丧失规定的功能则称为失效(故障)。按照 GB/T 3187—1994 的规定,失效(故障)的概念是:“产品丧失规定的功能。”对于可修复产品通常称为“故障”;对于不可修复产品则称为“失效”。一个产品应按规定完成它的功能,一方面性能不能低于规定的范围,另一方面在结构上不得发生断裂破损,两者不可偏废。在我国机车车辆研制初期,当时人们只注重产品的性能而忽略了结构和系统可靠性,国产机车车辆在运用中频出故障,带来了巨大的经济和社会效益方面的损失,教训是沉痛的。

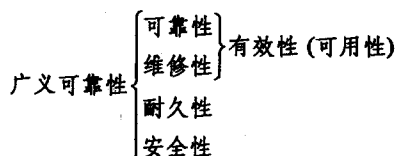
(5) 能力:常用概率来度量这一“能力”,称为可靠度。由于产品的故障是随机事件,产品寿命是随机变量,因此产品在规定的寿命周期内完成规定功能的能力也是随机性的,要用概率才能定量地表示产品的可靠性程度。

因此,可以把动车组的结构可靠性定义为:“动车组结构在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。”

2. 广义可靠性

前述可靠性定义是对不可修复产品而言的,因而称为“狭义可靠性”(简称可靠性)。对于机车车辆类的可修复产品,除了应考虑产品的狭义可靠性外,还要考虑其发生故障后维修的难易程度,也就是它的维修性问题。通常将可靠性和维修性综合考虑的可靠性概念称为“广义可靠性”。对于可修复产品来说,可靠性和维修性都好的产品,有效工作时间就长;可靠性和维修性差的产品,有效工作时间就短。所以用有效性(可用性)来综合考虑可靠性和维修性,对产品的广义可靠性进行评定。从扩大的意义上来说,广义可靠性还有更丰富的内涵,除可靠性、维修性外,主要还有耐久性和安全性,如表 1.1 所示。

表 1.1 广义可靠性



1) 维修性

维修性的定义:“在规定的条件下,并按规定的程序和手段实施维修时,产品在规定的使用条件下保持或恢复能执行规定功能状态的能力。”(GB/T 3187—1994)

由上述定义可知,维修性具有如下特点:

(1) 维修性不是指具体的维修技术和故障的排除方法,而是和可靠性一样,是产品本身的一种特性,是可维修产品广义可靠性的属性之一,是通过设计而赋予产品的一种固有属性。维修性的度量是随机变量,只具有统计上的意义,因此要用概率表示,称为维修度。

(2) 规定条件:包括维修人员的熟练程度,维修设备、工具、备件是否有保障,甚至还包括技术数据是否齐全,操作是否方便,维修规范是否合理,后勤保障是否充分等。

(3) 规定时间:是指维修时间。维修时间规定得越长,维修度越大。正常产品的维修时间与其寿命相比应该是短暂的,也就是说维修度具有快速性,只有这样,产品故障能及时诊断和排除,并尽快投入使用。

(4) 规定的程序和手段:按照预定的程序和手段进行维修是十分必要的,不仅可以提高维修度,还可以降低维修费用,延长产品寿命,减少故障发生频率,否则维修之后反而会降低其可靠性。因此,为了提高维修度应当制订详细的维修规程和规范,规定和明确维修性的技术要求,还要考虑使用故障检测装置,设定检测点,使检查程序标准化。

2) 有效性(可用性)

有效性是反映产品效能的主要特性之一。有效性的定义:“可以维修的产品在某时刻具有或维持规定功能的能力。”(GB/T 3187—1994)

由上述定义可知,有效性有如下特征:

(1) 有效性是产品可靠性和维修性的综合表征。对可修复产品而言,总是希望其工作时间要长,非工作时间要短。因此不仅要关心产品的可靠性,即不易出现故障的可能性如何,而且还要关心产品一旦出现故障应能尽快修复,使其早日投入正常运行。因此,综合考虑可靠性和维修性的广义可靠性就是有效性。

(2) 和可靠性、维修性一样,有效性也可用概率表达,称为有效度(可用度),即在任意随机时刻,当任务需要时,产品可投入使用状态的概率。

(3) 这里要强调的是,有效性定义是针对“某一时刻”的,而不是“某一时间间隔”,因此它表征某一特定时刻要进行该项工作产品的完好程度。

(4) 有效性不但与工作时间有关,而且还是维修时间的函数,随着工作时间和维修时间的不同,有效性也不相同。

3) 耐久性

所谓耐久性是指“产品在规定的使用和维修条件下,达到某种技术或经济指标极限时,完成规定功能的能力”(GB/T 3187—1994)。机车车辆、汽车、船舶等运输行业常用耐久性作为表征产品技术水平的一个重要特性,一般采用产品的大修周期和报废寿命(使用寿命)作为衡量产品耐久性的指标。

对于耐久性应做如下说明:

(1) 耐久性和可靠性概念不完全相同。耐久性是表示产品工作的持久能力,是一种持续时间的概念,表征产品的寿命。而可靠性则是表示产品完成任务的能力,除与时间有关外,还具有更广的内涵。严格来说,耐久性应该属于可靠性范畴中的寿命特性,只不过为了强调而将其独立阐述罢了。

(2) 耐久性定义是针对“时间间隔”,而不是过程的某一时刻的特性,因此它不表示产品使用过程中某个瞬间的状态,而是表示产品运用某一阶段或整个过程结束时的期限(寿命)。

(3) 产品的极限技术状态系指产品继续使用在安全上不允许或由于规定参数超出了使用指标,而又不能排除的状态;或由于使用效率降低到不允许的程度的状态;或由于零件磨损,修理费用过大,再使用则不经济的状态。

4) 安全性

安全性的定义:“产品在一定的功能、时间、成本等制约条件下,使人员和设备蒙受伤害和损失最小的能力。”

对安全性应说明的几点:

(1) 与安全性相对应的概念是危险性。所谓安全性评价就是对产品的危险性进行定性和定量分析,得出产品发生危险的可能性及其程度的评价,以寻求最低事故率、最少损失和最优的安全投资效益。

(2) 产品发生故障往往会引起程度不等的事故,造成人身伤亡或财产损失,影响产品安全性,因此人机系统的可靠性包括产品的可靠性,也关系到人体的安全性。所以安全性和可靠性是息息相关的,提高产品的可靠性也有助于提高整个系统的安全性。

(3) 对人机系统的安全性评价内容是非常广泛的,其评价指标也是多方面的,主要有事故造成的最大人员伤亡数,事故造成的最大财产损失数,事故发生的概率,人员暴露于危险环境中的频率以及安全投资水平等。目前已经形成了一门新学科——安全工程学。本书只讨论与产品可靠性有关的安全性,其相应的评价指标是产品事故发生的概率,相应的评价方法是故障模式、影响和危害度分析(Failure Mode Effect Compromise Analyze, FMECA)以及故障树分析(Failure Tree Analyze, FTA)。

3. 运用可靠性

从产品可靠性的形成过程来看,可以将可靠性划分为固有可靠性和运用可靠性。通过设计、制造形成的可靠性称为固有可靠性;而产品在使用条件下(包括保管、运输、操作和维修等),保证固有可靠性发挥的程度称为运用可靠性。

由上述运用可靠性和固有可靠性定义可以看出:

(1) 固有可靠性所关心的中心问题是产品由于设计、制造所形成的可靠性,不包括使用、维修中所形成的可靠性,因此属于狭义可靠性问题。而运用可靠性所考虑的主要问题除固有可靠性的内容外,还有运用维修中所形成的可靠性问题,因此它属于广义可靠性。

(2) 某一机车运用可靠性的各种影响因素及其影响程度如表 1.2 所示。由表可见,运用可靠性的范畴大于固有可靠性。为了保证产品在使用中有高的可靠性,首先要做到设计质量高,制造质量好,然后尽量保证合理正确的使用和维修方法。

表 1.2 各种因素对运用可靠性的影响程度

影响因素	影响程度 / %
运用可靠性 { 设计 } 固有可靠性	40
	20
	30
	10

(3) 要想取得高水平的运用可靠性, 关键在于设计和寿命周期内的所有活动。如图 1.1 所示, 产品可靠性上限是由设计确定的。随着产品投入制造, 可靠性就会降低; 制造的进展, 工艺的改善, 经验的积累, 将使可靠性增长。图中还表明, 当产品投入使用, 其可靠性将再次降低, 随着现场运用经验的丰富, 操作人员熟练程度的增加, 维修水平的提高, 可靠性将进一步增长, 但使用可靠性指标永远不会大于固有可靠性指标。

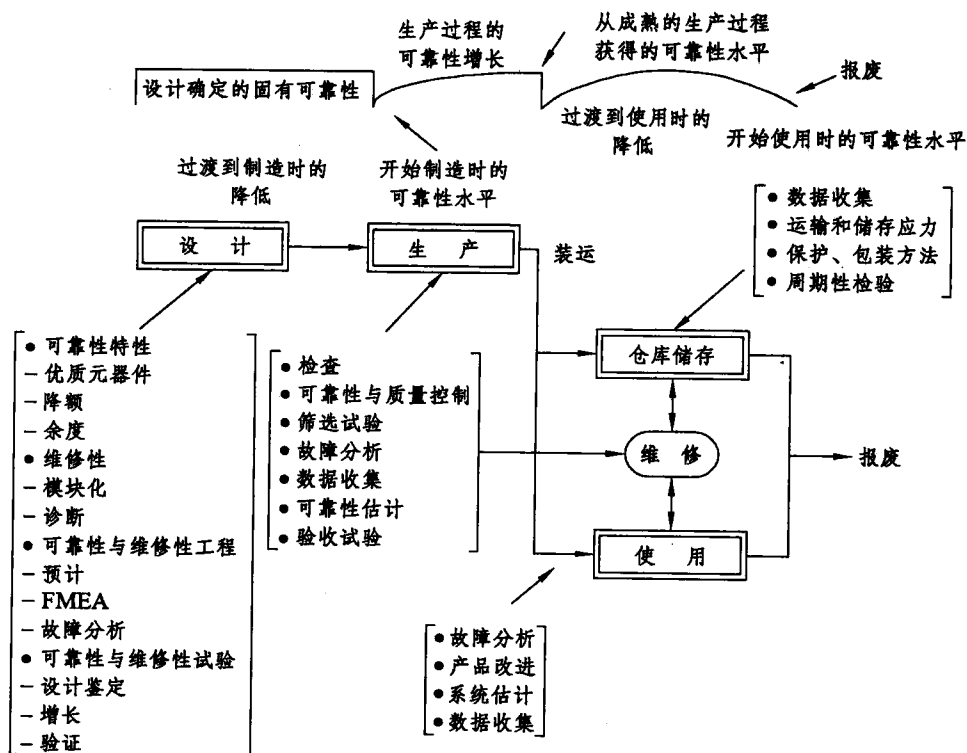


图 1.1 产品寿命周期内运用可靠性的变化

二、可靠性与质量

人们关于产品的质量观念也在变革, 由传统狭隘的质量观念转向现代化的全面质量观念。现代的质量观念认为, 产品的质量特性是满足用户使用要求的特性总和。如图 1.2 所示, 质量是性能、可靠性和时间性的综合。对机车车辆而言, 评价质量的好坏, 一方面要看其基本技术性能, 如机车的牵引性能、经济性、动力学性能、操纵稳定性等; 另一方面还要重视其可靠性。这里说的可靠性是广义的, 一般要求性能稳定, 经久耐用, 不出故障, 利于维修。至于时间性, 是指在

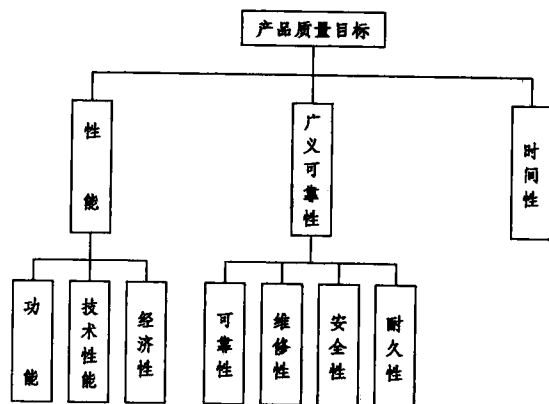


图 1.2 产品质量基本目标

一定期间内应满足用户对产品交货期和数量的要求,它反映了产品的竞争能力。由此可见,可靠性是产品的基本质量目标之一,是产品质量的重要组成部分。

但是,人们长期以来往往忽视了可靠性对保证产品全面质量的重要作用。传统的质量管理一般只关心产品制造、生产、安装调试直至出厂的质量;而可靠性管理所关心的是产品投入运用以后的质量。如按产品运用过程时间 t 来计,传统质量管理只关心 $t=0$ 时的质量,而可靠性管理则为 $t>0$ 时的质量。表 1.3 所示为传统质量管理和可靠性质量管理的比较。20 世纪 70 年代以来,随着产品的复杂化和市场竞争的需要,人们的质量意识也在发生变化,可靠性已经成为影响质量的主要因素。过去仅着眼于生产制造过程的质量管理已不能保证产品的高质量,于是美、日等国提出了全面质量管理,把可靠性作为质量管理的一项主要内容,逐渐将可靠性和质量保证融合为一体。

表 1.3 传统质量管理与可靠性质量管理比较

对比项目	传统质量管理	可靠性质量管理
发生故障的项目	由于生产次品,工艺不稳定,性能不稳定	运用中发生故障,寿命短,维修性差,安全性差
故障发生场合	大多在工厂内	一般在使用现场
故障发生时间	在制造和性能试验时	制造后数月或数年
数据的数量 n	一般 $n \geq 10$ 才能进行分析	$n = 1 \sim 10$, 有些场合 $n = 0$
故障分析方法	管理图, 试验计划, 巴列特分析	FMECA, FTA, 失效分析
分布规律	正态分布	指数分布, 威布尔分布

第二节 可靠性工程学科的发展简史

自古以来,人们就已经有了“可靠性”概念。在制造工具时,就知道工具应该可靠耐用,少出毛病,容易修理。以后人们广泛采用“可靠性”这一概念来定性评价产品的质量,人们凭经验来评定某一产品可靠或不可靠,但没有一个定量评价标准。可靠性工程作为一门学科应用于工业生产则是近代的事。从提出可靠性定量指标至今大约经历了 60 年左右的历史,在此期间,可靠性工程不仅在航空、电子、军工、核工业中得到了很大的发展,而且从 20 世纪 60 年代起,也逐渐应用到机械、电气、冶金、石化、造船、铁路、公路交通、医疗、食品加工等各个民用工业部门,其发展之迅速,应用之广泛,确非一般应用科学所能比拟。

一、可靠性工程的历史与发展

将可靠性工程发展史上一些重大事件罗列如下,以表征可靠性工程的发展进程。

(1) 1939 年英国航空委员会出版的《适航性统计学注释》中,第一次将概率的概念引入飞机可靠性和安全性的评估中,提出了飞机故障造成的事故率不应超过 0.000 01 次/h,相当于飞行可靠度为 0.999 99,可以认为这是最早的飞机安全性和可靠性指标。1942 年,美国麻省理工学院首次提出可靠性定义,并开始对真空电子管的可靠性进行研究。

(2) 第二次世界大战期间,德国在研制 V-I 型火箭时屡遭失败。1942 年数学家鲁塞尔(R. Lusser)等人利用概率论对故障进行分析后,提出了可靠性概率乘法法则,并计算出 V-II 火箭诱导装置的可靠度为 75%,开创了可靠性指标定量化的先例。同期,美国因飞机故障而损失的飞机约 2.1 万架,比被击落的飞机多 1.5 倍。美国运往远东的作战飞机上的电子设备有 60% 不能使用;在储备期间有 50% 的电子设备失效;海军舰艇上的电子设备有 70% 因故障而失效。这些惊人的数字引起了人们对可靠性的高度重视。以美国军方为主组织、扶植了一系列研究机构和组织,如 VTDC (1943 年)、PET (1946 年)、AR-INC (1946 年)、AMC (1949 年)、ARD (1950 年)等,首先在电子领域内进行可靠性研究工作。

(3) 朝鲜战争中,美国军用设备的可靠性问题极为严重,军用雷达故障时间占 84%,陆军电子设备在规定时间内有 65%~75% 因故障而不能使用。空军在 5 年内的电子设备维修费用超过其购置费 10 倍。海军潜艇声呐设备有 48% 无法工作。鉴于军用设备的严重可靠性问题,从 1950 年起由美国三军参谋长联席会议讨论决定成立“电子设备可靠性调查委员会”,调查总结美国三军电子产品的可靠性问题,并制定可靠性规划。1952 年又将该组织升格为“电子设备可靠性咨询委员会 (AGREE)”,负责对电子设备从设计直至使用维修的各个方面进行可靠性监督。

(4) 1957 年 6 月,AGREE 发表了有名的《军用电子设备可靠性报告》(AGREE 报告),明确提出了可靠性指标,评定可靠性的试验程序和方法,保证可靠性的有关问题及措施等。可以说,这个报告建立了可靠性工程的框架,是开展可靠性工程研究工作的指导性文件。

(5) 1954 年,在美国纽约召开了第一届国际质量及可靠性学术会议;1962 年,第一届国际可靠性及维修性学术会议在美国召开;1965 年,国际电工委员会 (IEC) 可靠性专业委员会 TC56 成立,使可靠性研究工作国际化,并制定了一系列可靠性标准。

(6) 1959 年,美国空军颁布 MIDM-26512 规范,首次提出有关装备维修性要求的正式规范。

(7) 20 世纪 50 年代初,美国首先将故障模式及影响分析 (FMEA) 应用于战斗机操纵系统的设计分析上,取得了较好的效果。这种方法被美国军用标准规定为合同承包商必须提供的文件,作为设计及其审查的指导性文件。以后美国汽车协会 (SAE) 提出危害度分析 (CA),对那些直接损害整个系统和导致人员伤亡的故障进行危害度分析,从而发展出了 FMECA,称为故障模式、影响及危害度分析,这种方法已经成为产品可靠性和安全性研究中的一项重要内容。

(8) 1961—1962 年,美国贝尔电话研究室的沃森 (Watson) 和默恩斯 (Mearns) 在民兵式导弹发射控制系统的设计中,首先使用故障树分析法 (FTA),其后波音公司发展了 FTA 法,并用计算机进行定量分析,使其在宇航领域得到推广。1974 年,美国原子能委员会发表了麻省理工学院拉斯默森 (Rasmussen) 教授为首的安全小组所写的“商用轻水堆核电站事故危险性评价”报告,该报告应用 FTA 法分析了核电站可能发生各种事故的概率。这一报告引起了很大的反响,使 FTA 法成为各个行业中分析可靠性、安全性的一种简单、有效的方法。

(9) 20 世纪 60 年代,可靠性工程进入全面发展阶段,以可靠性为主题的各种军用标准、规范和手册陆续出版。1962 年颁布的 MIL-HDBK-217《电子设备可靠性手册》,1963 年颁布的 MIL-STD-781《可靠性试验指数分布》和 1965 年颁布的 MIL-STD-785《系统与设备的可靠性大纲要求》等,都成为今天可靠性标准体系的基础。维修性工程也进入发展阶段。1966 年 MIL-STD-470A《系统及设备维修性管理大纲》、MIL-STD-471A《维修性检验/验证/评价》、

MIL-HDBK-472《维修性预计》等标准手册相继出版,为维修性奠定了一整套理论基础。

(10) 1960年,日本提出了全面质量管理(TQC)方法,拓宽了美国提出的统计质量管理(SQC)概念,将可靠性作为质量管理的重要内容。在1969年召开的第一届国际质量会议上,日本的TQC方法得到了国外专家的一致好评。

(11) 从1961年美国将可靠性技术应用到“阿波罗”号飞船上,到1969年“阿波罗”号飞船在月球上着陆成功,显示了可靠性技术的巨大成效。

(12) 1968年7月,美国波音公司发布了《波音747维修指导小组手册》,对维修评估大纲的制定(MSG-1)提出了以可靠性为中心的维修(RCM)概念。1970年3月发布了《航空公司/制造商维修大纲计划文件(MSG-2)》,1980年9月又发布了《航空公司/制造商维修大纲计划文件(MSG-3)》。这些文件的维修思想自20世纪70年代以来为美国民用飞机所采用,并陆续用于美国军用飞机上。美国军用标准MIDSTD-1843《以可靠性为中心的维修》和MIL-STD-2173《以可靠性为中心的维修要求》分别于1985、1986年陆续颁布。目前RCM法正推广应用于其他方面的大型复杂设备上。

(13) 1980年7月,美国国防部首次发布命令DoDD5000.40《可靠性及维修性》,规定了发展各种武器系统的可靠性和维修性政策、职责及采购中应达到的目标;1982年2月又发布指令DoDD3235.1《系统可靠性、可用性和维修性试验与评价》。为适应可靠性、维修性新政策的需要,美国国防部又继续颁布、修改有关命令、指令、标准及手册等文件50多个。

(14) 1984年美国空军着手制订2000年的可靠性和维修性行动计划,并于1985年2月签署公布实施。该行动计划从管理入手,改变传统观念及方法,提出通过可靠性及维修性的改善来提高部队战斗力,增加生存力,减少部署运输量,节省人力和降低费用。为达到上述目标,美国空军采取了以下各项措施:制定明确的方针政策,设立相应的管理机构,建立计划体系,建立评审及反馈系统,制定宣传及奖励政策,取得工业部门支持,等等。

(15) 1983年1月,美国国防部颁布MIL-STD-470A《系统及设备维修性管理大纲》以取代MIL-STD-470,强调将测试性作为维修性大纲的一个组成部分,并认为机内及外部测试不仅对维修性设计特性产生重大影响,而且还影响到整个系统的采购及寿命周期费用;1985年1月又颁布了MIL-STD-2165《电子系统及设备的测试性大纲》,将测试性列为与可靠性、维修性同等重要的特性。

(16) 1984年9月,美国国防部成立了可靠性及维修性计算机辅助设计(RAMCAD)小组,以此来协调RAMCAD的研究工作,并大力进行计算机软件可靠性、维修性的研究和系统最优参数的组合工作,开发了系统可靠性、维修性、可用性分析及权衡研究等程序,并将这些程序综合在一起,根据用户要求自动计算,将RAMCAD和制造及辅助后勤保障分析结合起来,使系统的性能、可靠性、维修性、生产及保障性达到最优化组合的目的。

二、国外铁道机车车辆可靠性工程发展状况

英国铁路对机车车辆的可靠性和运行质量非常重视,早在20世纪60年代就规定了机车的可靠性定量指标,规定发生故障前走行公里不足24 000 km的机车为不良机车,不低于24 000 km的机车为合格机车,发生故障前走行公里大于48 000 km的机车才是良好机车。英国铁路曾对17种2 500台内燃机车的故障进行了统计,计算出它们的可靠性指标(见表1.4),通过分析对比找出主要故障部位及其原因,采取了改进措施,提高了机车可靠性。

表 1.4 英国内燃机车可靠性状况

内燃 机车 系列	制造厂商	功率 /马力	年度走 行距离 / km	完好率 /%	两次故 障间走 行距离 / km	年度技术保养费用 /万英镑		内燃机车 造价/英镑	修理费用 /英镑·千 公里 ⁻¹	年度修理 费用与机 车造价的 百分比	每百万公 里的故障 次数	不良率 /%
						内燃机车	柴油机车					
55	英国电气公司	3 300	231 700	75.0	22 530	40.0	22.0	173 250	172.6	23.1	44.4	25.0
52	英国铁路公司	2 700	168 950	75.0	24 140	25.0	11.0	153 900	148.0	16.2	41.4	25.0
50	英国电气公司	2 700	165 700	70.0	14 480	16.0	7.0	153 900	96.9	10.4	69.1	30.0
47	布拉希电气工程公司	2 750	115 800	78.0	19 310	14.0	5.5	155 400	120.9	9.0	51.8	22.0
46	英国铁路公司	2 500	117 500	75.0	16 100	15.0	6.0	146 200	127.7	10.25	62.1	25.0
45	英国铁路公司	2 500	114 200	77.0	17 700	15.0	6.0	146 200	131.3	10.25	56.5	23.0
44	英国铁路公司	2 300	80 450	80.0	48 270	13.0	5.0	138 000	161.6	9.4	20.7	20.0
40	英国电气公司	2 000	91 700	80.0	20 920	13.0	5.0	124 000	141.8	10.5	47.8	20.0
37	英语电气公司	1 750	83 700	88.0	64 360	11.0	4.0	111 100	131.4	9.9	15.5	12.0
35	比耶·皮科克公司	1 700	96 500	80.0	40 230	14.0	6.0	108 800	145.1	12.9	24.9	20.0
33	伯明翰机车车辆工厂	1 550	94 900	80.0	32 180	14.0	4.0	100 800	147.5	13.9	31.1	20.0
31	布拉希电气工程公司	1 470	75 600	86.0	30 570	12.0	4.0	96 300	158.7	12.5	32.7	14.0
27	伯明翰机车车辆工厂	1 250	99 800	75.0	41 830	15.0	4.0	83 800	150.3	17.9	23.9	25.0
26	伯明翰机车车辆工厂	1 160	83 700	75.0	43 440	10.0	3.0	78 900	119.5	12.7	23.0	25.0
25	英国铁路公司	1 250	54 700	85.0	30 570	9.0	3.0	83 750	164.5	10.75	32.7	15.0
24	英国铁路公司	1 160	57 900	80.0	27 350	9.0	3.0	78 900	155.4	11.4	36.6	20.0
20	英国电气公司	1 000	49 900	90.0	64 360	9.0	3.0	69 000	180.4	13.0	15.5	10.0
平均值			104 900	79.35	32 850	14.94	5.97	117 800	144.3	12.7	30.44	20.65

日本原国铁于 20 世纪 70 年代对新干线高速铁路及机车车辆大力开展了可靠性工程方面的研究工作,以保证高速铁路运行的安全性和可靠性。1980—1982 年,该机构利用电力机车及动车在干线上发生的故障数据进行了威布尔 (Weibull) 解析分析,并推测出电力机车和动车的可靠度,所得结论证明当时电力机车和动车的故障皆处于初期故障和偶发故障阶段,从而为延长检修周期找到了依据。另外,他们还根据可靠性工程理论和现场实际损坏数据来确定机车车辆主要零部件的寿命。例如,日本国铁确定出车轴滚动轴承寿命为 250 万 km,从日本机车车辆最佳全寿命周期费用的角度来检验维修工作的正确性,计算分析表明,目前的检修工作量可以减少 15%~20%。日本国铁还利用机车车辆监测系统和信息系统对发生的各种故障形式随走行公里或运行时间的变化进行分析,分析结果可供可靠性设计时参考;用故障树分析法 (FTA) 和故障模式及影响分析法 (Failure Mode Effect Analyze, FMEA) 对机车车辆故障及其影响进行了分析,找出系统薄弱环节,通过改进设计来提高机车车辆及其主要零部件的可靠性和安全性;对机车车辆维修制度进行改革,找出最佳的检修程序和方式,确定何时、何部位,采用什么方式进行检修可达到最好的效果。

美国各大铁路公司广泛开展了可靠性工程的研究,例如美国联合太平洋铁路公司 (UP) 建立了完善的可靠性信息系统,利用可靠性工程理论对数据进行处理分析,从而使机车及其零部件的可靠性评价由定性分析提高到定量分析的阶段,并制订出可靠性定量指标,通过全公司各个环节的努力来实现这个目标。表 1.5 列出了该公司每个月的可靠性指标,其中有制订的目标值和实际完成的情况。另外该公司还有各种表征零部件状况的统计报表及图形,例如热轴、断轴清单,润滑效果图表,各种主要大部件 (柴油机、牵引电动机等) 故障图表,平均无故障工作时间、完好率、检修率图表等。这些图表和数据为机车及其主要零部件的可靠性状况和故障原因分析、需要采取的措施及要达到的目标的制定等提供了定量依据。这些定量分析的完成要依靠大批可靠性工程软件的支持。

表 1.5 UP 公司机车的可靠性指标 (1992.10—1993.10)

日 期		货运机车的完好率/%		调车机车的完好率/%		平均无故障工作时间/天		每百万英里故障数/次	
年	月份	实际值	目标值	实际值	目标值	实际值	目标值	实际值	目标值
1992	10	92.5	93.25	90.2	90.76	95		46	
	11	93.1	93.25	93.1	90.75	99		45	
	12	93	93.25	93.3	90.75	94		48	
1993	1	92.6	92.65	91.4	91.3	89	95	53	47
	2	92.5	92.65	89.9	91.3	90	95	53	47
	3	93	92.5	91.7	91.3	92	95	46	47
	4	93.29	92.5	90.5	91.3	92	95	48	47
	5	93.54	92.5	92.66	91.4	101	95	42	47
	6	93.67	92.9	92.59	91.4	100	95	46	47
	7	93.59	92.9	92.52	91.4	100	95	46	47
	8	93.57	93	93.21	91.4	97	95	48	47
	9	93.54	93.1	94.03	91.5	114	95	39	47
	10	93.79	93.1	93.35	91.5	110	95	39	47