

柴油机

可靠性分析及风险评价

古莹奎 著

Reliability Analysis
and Risk Assessment
for Diesel Engine

清华大学出版社

本学术专著获江西理工大学优秀学术著作出版基金资助

Reliability Analysis and Risk Assessment
for Diesel Engine

柴油机

可靠性分析及风险评估

古莹奎 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了作者近年来在柴油机可靠性方面的科研实践,具有针对性、学术性和实用性较强的特点。全书共10章,第1章介绍柴油机可靠性及其风险评价的研究现状和实施的必要性;第2章介绍柴油机可靠性数据处理与统计分析;第3章介绍柴油发动机故障模式与影响分析;第4章介绍基于模糊概率重要度的柴油机可靠性分析;第5章介绍基于模糊理论的柴油机风险分析方法;第6章介绍基于知识的柴油机模糊可靠性分配方法;第7章介绍柴油机燃油供给系统模糊多状态分配方法;第8章介绍柴油机零部件的有限元分析方法;第9章介绍存在潜在失效的柴油机多状态可靠性分析;第10章介绍柴油机质量控制先期策划与控制计划。本书可供从事可靠性领域研究以及发动机相关专业师生和科研工作者阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

柴油机可靠性分析及风险评价/古莹奎著.--北京:清华大学出版社,2012.11
ISBN 978-7-302-30140-0

I. ①柴… II. ①古… III. ①柴油机—可靠性—分析 ②柴油机—可靠性—风险评价 IV. ①TK421

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第222533号

责任编辑:杨倩 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:15.25 字 数:277千字

版 次:2012年11月第1版 印 次:2012年11月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:42.00元

产品编号:046362-01

前 言

柴油机作为汽车、工程机械、船舶和电站机组的动力来源,在国民经济中占有重要地位。其耐久性、燃油经济性及其他社会公益性使得柴油机的发展已经成为无法争辩的事实。由于当前各种柴油机系统日趋复杂,容量参数不断提高,环境条件更加苛刻,日益朝着大型化、高速化、精密化方向发展,工作性能不断改善,自动化程度越来越高,其可靠性及由此而带来的风险等问题日益突出。可靠性是设计出来的、生产制造出来的、管理出来的,它涉及计划质量、设计质量、制造质量、市场质量的全过程,是当代的质量观。它强调的是产品质量不仅要满足固有性能规定,还要满足长期使用的可靠性、维修性、安全性、保障性和经济性等特性的总和,是产品在全寿命周期内的系统质量。必须从可靠性工程的角度,将可靠性学科的先进理论和方法贯穿运用到柴油机从研发、试验、生产、制造、使用、保养、维修到报废等全寿命周期的各个环节中去,切实保证产品的可靠性。

依据上述思想,本书针对柴油机产品全寿命周期中的若干环节,探讨柴油机可靠性工程及风险评价的若干理论方法,并给出了一些示例。具体内容包括可靠性工程以及柴油机产品实施可靠性工程和进行概率风险评价的必要性分析;柴油机可靠性数据处理与统计分析方法;传统与模糊柴油机故障模式与影响分析方法;柴油机故障模式影响分析系统设计与实现方法以及柴油机故障编码方法;基于模糊概率重要度的柴油机可靠性分析方法;基于模糊理论的柴油机风险分析方法;基于知识的系统级与子系统级柴油机模糊可靠性分配方法;含多状态部件的柴油机燃油供给系统模糊状态分配方法;柴油机零部件的有限元分析方法;存在潜在失效的柴油机多状态系统可靠性分析方法;为保证产品研发的进度与质量,对柴油机产品质量控制先期策划框架及设计开发控制程序等内容进行了具体的论述。

本书一些内容取材于作者课题组在柴油机可靠性研究方面的科研成果,以及笔者学生的研究生学位论文。感谢硕士生杨振宇、唐淑云、蔡俊峰、周志博、汪峰、仝翔翔、葛德亮等在完成相关研究课题时付出的辛勤劳动,衷心地感谢曾一起进行项目研究的电子科技大学刘宇博士和宋巍硕士等。

感谢国家自然科学基金、江西省自然科学基金、江西省科技支撑计划-工

业支撑计划项目以及玉柴机器等的支持与资助。

课题研究以及本书的撰写过程中参考引用了许多文献资料,在此向其作者一并致谢!

由于笔者学识有限,书中存在的疏漏、不妥乃至错误之处,敬请批评指正。

古莹奎
2012年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工程背景	1
1.2 可靠性技术发展的现状与趋势	2
1.3 可靠性风险评价的研究现状与发展趋势	5
1.4 柴油机可靠性发展的现状与发展趋势	9
1.5 柴油机寿命周期各阶段的主要可靠性工作	14
1.6 本章小结	16
第 2 章 柴油机可靠性数据处理与统计分析	17
2.1 引言	17
2.2 柴油机故障数据的来源及预处理	17
2.3 柴油机故障数据的统计分析	20
2.4 柴油机整机可靠性指标	22
2.5 威布尔分析	25
2.5.1 回归分析计算方法	26
2.5.2 线性相关性检验	27
2.5.3 假设检验	28
2.5.4 某型机机油泵威布尔分析案例	28
2.6 威布尔分布并联模型	31
2.6.1 曲轴止推片的失效数据统计	32
2.6.2 曲轴止推片失效数据的威布尔分析	32
2.7 其他威布尔分布模型	37
2.7.1 混合威布尔分布模型	37
2.7.2 分段威布尔分布模型	38
2.7.3 威布尔竞争风险模型	38
2.8 同一零件不同故障模式故障分布统计分析	39
2.9 可靠性试验数据分析	45
2.9.1 柴油机可靠性试验报告	45
2.9.2 柴油机行驶无故障检测	49
2.9.3 故障件的失效机理分析	55

2.10 本章小结	58
第3章 柴油发动机故障模式与影响分析	59
3.1 引言	59
3.2 FMEA 的分类及要点	59
3.3 设计 FMEA 的流程分析	60
3.4 设计 FMEA 的关键要素	61
3.5 FMEA 的评价准则	64
3.6 柴油机寿命周期各阶段的 FMEA 分类	67
3.7 柴油机 FMEA 分析要素	69
3.8 实例分析	72
3.9 FMEA 的缺点和不足	79
3.10 发动机故障模式影响分析系统设计与实现	79
3.11 故障模式影响的模糊综合评判模型	101
3.11.1 建立因素集和因素等级集	102
3.11.2 因素权重的确定	102
3.11.3 构造模糊评判矩阵	104
3.11.4 模糊综合评判	105
3.11.5 评判结果的去模糊化	106
3.11.6 案例分析	107
3.12 柴油机故障编码方法分析	113
3.12.1 编码方法分析	113
3.12.2 柴油机故障编码方法的实施	114
3.12.3 应用实例	118
3.13 本章小结	119
第4章 基于模糊概率重要度的柴油机可靠性分析	120
4.1 引言	120
4.2 故障树分析的模糊算子	120
4.3 模糊数归一化	121
4.4 底事件的概率重要度	122
4.5 模糊故障树分析的步骤	123
4.6 实例分析	123
4.6.1 故障树的定性分析	124
4.6.2 故障树的定量分析	124
4.7 本章小结	131

第 5 章 基于模糊理论的柴油机风险分析方法	132
5.1 引言	132
5.2 基于加权几何平均值的模糊 FMEA	132
5.2.1 模糊 FMEA 中发生度、严重度和检测度的模糊评判 准则	132
5.2.2 权重的确定方法	133
5.2.3 去模糊化方法	134
5.2.4 基于模糊加权几何平均值的 FMEA 的模糊风险优 先度	135
5.2.5 计算 FMEA 的模糊风险优先度	137
5.3 实例分析	138
5.3.1 运用传统 FMEA 评价方法的分析	139
5.3.2 运用模糊 FMEA 评价方法的分析	140
5.4 本章小结	144
第 6 章 基于知识的柴油机模糊可靠性分配方法	146
6.1 引言	146
6.2 基于专家知识的发动机系统级模糊可靠性分配方法	146
6.2.1 建立影响发动机子系统可靠性的因素集	146
6.2.2 建立因素等级集和相应的分值集	147
6.2.3 确定各影响因素的权重	147
6.2.4 构造评判矩阵	149
6.2.5 产品开发过程的风险评估	151
6.2.6 可靠性分配	152
6.2.7 实例分析	152
6.3 基于知识的发动机子系统级模糊可靠性分配方法	161
6.3.1 影响发动机零部件可靠性的因素分析	161
6.3.2 确定影响因素权重的模糊层次分析法	163
6.3.3 基于专家知识的发动机子系统模糊可靠性 分配模型	165
6.3.4 实例分析	168
6.4 相似系列机型的柴油机可靠性分配方法	171
6.5 基于新老系统变化量的柴油机可靠性分配方法	172
6.6 本章小结	173
第 7 章 柴油机燃油供给系统模糊多状态分配方法	174
7.1 引言	174

7.2	系统模糊状态的描述	174
7.3	系统模糊状态的等同集	175
7.4	系统模糊状态分配模型	176
7.4.1	系统状态分配的过程	176
7.4.2	系统状态分配的优化模型	177
7.5	柴油机燃油供给系统状态分配	178
7.6	本章小结	181
第 8 章	柴油机零部件的有限元分析方法	182
8.1	引言	182
8.2	柴油机曲轴的有限元强度分析	182
8.2.1	有限元模型的建立	182
8.2.2	约束条件	183
8.2.3	载荷简化	184
8.2.4	曲轴整体模型有限元计算结果分析	185
8.3	发动机主轴承座的有限元分析	188
8.3.1	发动机主轴承座故障现象描述	188
8.3.2	建立主轴承座的有限元模型	188
8.3.3	材料特性	189
8.3.4	边界条件	190
8.3.5	计算结果及分析	190
8.3.6	分析讨论	196
8.4	本章小结	196
第 9 章	存在潜在失效的柴油机多状态可靠性分析	197
9.1	引言	197
9.2	多状态可靠性结构图法简介	197
9.3	通用生成函数法简介	199
9.4	分析潜在失效的多状态系统可靠性	200
9.4.1	基于生成函数法的可靠性结构图法	200
9.4.2	串并联多状态系统的可靠性结构图法	202
9.4.3	将可靠性结构图法应用于存在潜在失效的多状态 系统中	203
9.5	实例分析	203
9.6	本章小结	206
第 10 章	柴油机质量控制先期策划与控制计划	207
10.1	引言	207

10.2	产品质量先期策划与控制计划	207
10.2.1	产品质量策划的基本原则	208
10.2.2	产品质量策划责任矩阵图	210
10.2.3	产品质量策划进度	210
10.3	某柴油机企业产品质量先期策划及设计开发控制工作 流程	214
10.3.1	实施产品质量先期策划的目的	215
10.3.2	所涉及的部门及其职责	215
10.3.3	定制产品质量先期策划及设计开发控制 工作流程	216
10.3.4	产品质量先期策划及设计开发控制工作 流程说明	220
10.4	本章小结	227
参考文献	228

第 1 章 绪论

1.1 工程背景

柴油机作为汽车、工程机械、船舶和电站机组等的动力来源,在国民经济中占有重要地位。随着技术水平的提高,柴油机日益朝着大型化、高速化和精密化方向发展,工作性能不断改善,自动化程度越来越高。一方面它将大大提高劳动生产率,提高产品质量,降低生产成本和能耗;但另一方面一旦其中某一部分或某一环节发生故障,往往会造成停工停产,直接或间接造成巨大的经济损失,甚至造成关键设备损坏,危及人身安全。可靠性技术作为一种重要的保障技术,是衡量和提高柴油机在规定的条件和时间内实现规定功能能力的技术,对保证柴油机的正常使用具有重大意义。

随着国家宏观调控政策的持续、国内燃油价格的不断上涨、环境问题日益突出,节能与环保成了全球性的经济课题,柴油机行业已经进入了调整时期和微利时代。柴油机的优越性(耐久性、燃油经济及其他社会公益性)使其发展已经成为无法争辩的事实。目前,国内生产柴油机的企业近 300 家,柴油机年产量在 720 万台左右。但长期以来,对柴油机动力认识的不足以及柴油机本身技术水平的不足使得我国柴油机的发展无法跟上世界汽车工业发展的步伐。

面对市场的多变和激烈竞争,中国柴油机企业必须实现从以引进技术为主转变到联合开发和自主开发为主,实现多途径的技术创新,大幅度提高产品质量,降低全寿命周期成本,树立自己的品牌,从而确保在同行业中占有优势,跟上时代发展的步伐并在市场中占有一席之地。而随着汽车排放新标准即将在全国实施,各大企业更加重视柴油机的质量、经济和环保性能。在新一轮竞争中,谁赢得了先机,谁生产出的产品在质量、时间、成本、服务、环保等方面领先于对手,谁就会多一分胜算,而这一分胜算在某种意义上可以决定企业的生死存亡。

对柴油机来说,其质量主要体现在可靠性方面。传统的产品质量只涉及制造质量和部分设计质量,注重产品的符合性,强调产品符合生产图纸和工艺规定的要求。而可靠性则涉及计划质量、设计质量、制造质量、市场质量的

全过程,是当代的质量观,强调的是产品质量不仅要满足固有性能规定,还要满足长期使用的可靠性、维修性、安全性、保障性和经济性等特性的总和,是产品在全寿命周期内的系统质量,是成本和信誉的承诺和保障。从用户的角度来看,全寿命周期费用不仅包括采购费用,还包括使用、保养、维修、报废等费用;从生产企业的角度来看,全寿命周期费用不但包括开发和制造成本,还包括保修期内的索赔费用和风险成本等。一般来说,在可靠性方面的投资会增加开发和制造成本,但是由于可靠性的提高和故障率的降低,将大幅度减少后期的维护、维修和保障费用,从而降低全寿命周期费用。

柴油机的可靠性是指柴油机在规定条件下和规定的里程(使用时间)内,完成规定功能的能力。可靠性包括4个主要因素,即对象、规定条件、规定时间和规定功能。柴油机可靠性是一种工程技术,它包含设计、试验和验证等。柴油机又是一个复杂的可维修系统,一旦出了故障可通过维修使其恢复功能,故维修性能的优劣也同样影响着柴油机是否处于完好状态。因此,柴油机可靠性必须从设计阶段开始考虑,并且贯穿于设计、研制、制造、调试、运输、存放、使用、维修直到报废的全寿命周期过程。将保障需求前伸到设计研制阶段,即在设计时,强调综合保障性指标,包括可用性、可靠性、维修性指标等。“三性”指标和要求是设计出来的,是固有属性。据分析,这一部分费用占全寿命周期费用的2%,却对70%的保障费用产生直接影响。产品的可靠性是设计、制造和管理出来的。产品的可靠性取决于产品设计、研制、生产、销售和售后服务等全寿命周期中的每一个环节。把可靠性工作有机地融入到产品开发和制造过程中去,可以极大地提高可靠性工作效率,尽最大努力地保证产品的可靠性水平。

柴油机的可靠性问题涉及各个部门,贯穿于柴油机的设计、试验、制造、检验、销售以及售后服务的全过程,是一项系统工程。在进行柴油机可靠性设计时,不仅要考虑柴油机系统的可靠性,还应该考虑到质量指标、经济性指标、外观形貌、生产和开发能力等方面的限制,权衡利弊,综合平衡,从而将柴油机的可靠性科学地分配于各子系统、总成及零部件。

1.2 可靠性技术发展的现状与趋势

国外可靠性技术的发展,是以需求为导向,以管理为中心,以工程为目的,以专业为推动的。20世纪40年代和50年代是可靠性技术发展的摇篮期和奠基期,在这一阶段,一些工程技术人员和数学家们开始应用概率论和数理统计学对产品的可靠性问题进行定量研究。美国最先成立了可靠性咨询委员会,制订了军用规格、标准及可靠性标准体系,为世界范围可靠性研究的

发展奠定了基础。从20世纪60年代开始,可靠性技术得到了全面的发展。70年代可靠性发展步入成熟期,其主要特点是:建立了集中统一的可靠性管理机构,成立了国家可靠性数据网,对产品可靠性的分配、预计、可靠性设计、可靠性分析、可靠性试验和数据交换等进行系统化管理,形成了线条状的管理方式。进入80年代后,可靠性技术向更深、更广的方向发展,美国开始把可靠性放在与产品性能、成本和开发周期同等重要的位置,并颁发了一系列管理措施,推动可靠性技术的研究与应用。在管理上,加强集中统一管理,强调可靠性与维修性管理制度化;在技术上,深入开展软件可靠性、机械可靠性研究,全面推广计算机辅助设计技术在可靠性工程中的应用,并积极开展模块化设计、集成化设计、容错设计、防错设计和动态设计等可靠性设计方法。日本从美国引进并进一步发展了可靠性技术,目前在民用电子产品的高可靠性方面已处于世界领先地位,如日本的汽车、家用电器、数控机床等产品,就是凭借高质量优势而在国际市场上占据大的份额的。进入90年代以后,在可靠性研究方面,美国开始大力推行健壮设计、并行工程和 IPPD(integrated product and process development)管理。另外,国外在进行可靠性研究过程中,十分重视可靠性技术的基础、应用和开发三个方面的协调发展。美国、日本及西欧国家为抢占国际市场竞争的制高点,都把可靠性作为其产品最为重要的质量特征。

随着知识经济的快速发展,可靠性理论及其管理模式也从传统型向广义型发展。1995年,欧洲开始对传统可靠性定义提出质疑,用无维修期(MFOP)取代原来的平均故障间隔时间(MTBF),打破了故障率浴盆曲线分布规律,从而摒弃了随机失效无法避免的现象。国际上开始推行在可靠性工程中开展失效物理方法的研究,旨在设计出不存在随机失效的产品。在可靠性管理模式上,先后经历了单点式管理、线条式管理、矩阵式管理发展到今天的网络化管理。

我国的可靠性研究起于20世纪50年代,但发展比较缓慢,直到70年代,可靠性技术才开始迅速发展。至今,我国在可靠性数学和可靠性理论方面的研究已达到一定的水平,如提出了机械可靠性设计中的当量理论和设计方法、广义可靠性和模糊可靠性理论等。在组织机构方面,我国先后成立了可靠性与质量管理专业学会、中国电子元器件质量认证委员会、全国电工电子产品可靠性与维修性标准化技术委员会等可靠性认证与管理机构。机械电子工业部于1990年颁布了《加强机电产品设计工作的规定》,明确指出可靠性、适应性、经济性三性统筹作为机电产品设计的原则。在新产品鉴定定型时,对可靠性设计和试验报告进行评审;对正在生产的产品,要在试验和现场调查的基础上,进行分析处理,改进设计,以提高产品的可靠性。当前,可靠

性技术已由简单系统的分析进入机电、人机等复杂物理和非物理系统的可靠性分析；由图表法、手算法进入计算机辅助、模拟仿真、专家系统及软件商品化的研究与开发；由单一的物理研究阶段发展到以产品可靠性保证为核心的全面质量管理和可靠性保证阶段；由过去的以数据处理和绘图功能为主发展到现在还继续发展的以知识处理为主的集成化、智能 CAD(计算机辅助设计)方向发展阶段；从纯粹的追求功能机构设计转入综合效能和费用平衡优化的新时期。

可靠性问题的特点是产品的可靠性与其设计、制造、使用和管理等各个阶段紧密相连,各个阶段在产品整体可靠性水平中的作用是不同的。设计阶段为产品的可靠性水平奠定基础；制造和使用阶段是保证产品可靠性设计指标能否实现的关键阶段。因而为了提高产品的可靠性,必须在设计上满足可靠性要求。

机械可靠性研究中,材料疲劳强度方面的研究成果为其提供了重要的理论和试验基础,主要包括:①提出了疲劳试验数据的统计处理方法,能够做出材料的全概率疲劳曲线;②提出了“薄弱环节”强度模型,明确了材料疲劳寿命的分布函数,将疲劳过程作为随机过程,证明了损伤累计是非线性的;③发展了概率断裂力学。

经过近几十年的发展,机械可靠性研究的模式已基本确定,即借鉴材料的疲劳特性,对零部件进行特征参数修正,运用强度-应力干涉模型,计算和确定其可靠度。在国内,可靠性研究的起步虽比国外晚,但发展很快,研究水平和应用领域在迅速扩大。例如在理论研究方面,以航天航空领域为代表,推动了概率断裂力学得到前所未有的发展,总结出多种适用不同场合和零部件的强度-应力概率分布模型,并在工程中推广应用。

可靠性基础理论的发展使可靠性分析技术的精度和适用范围日趋扩大。可靠性理论的成熟及其在电子和航空航天领域的成功应用,使机械领域传统的静强度设计理论逐渐退出历史的舞台。可靠性理论的应用也使设计思想发生了根本的变化。尽管可靠性指标是产品质量指标的一个具体体现,但它却不同于传统的产品质量。传统的质量管理是从制造阶段开始的,而现代质量管理则要求从设计开始,将可靠性的指标贯穿于从设计到报废的整个寿命周期过程。另外,大量的工程实践也表明,零件的材料强度、结构尺寸及其所承受的载荷等参数均是服从一定分布规律的随机量,这与可靠性概率计算中的计算前提是完全吻合的,而传统的静强度设计则不涉及参数的随机性,仅仅用安全系数来校核零件的可靠性。

从国内外可靠性技术发展的趋势来看,可靠性技术的研究主要从以下几个方面进行。

(1) 开拓可靠性设计的新思路。由于可靠性设计具有过程性、添加性、隐含性和遍布性的特点,因此应该摒弃从传统的可靠性定义出发来进行研究的思路,以进行无维修期的设计为出发点来进行产品的可靠性设计。

(2) “软硬兼施”。机电产品是软件与硬件的集成,软件可靠性对系统的正常运行起着重要的作用,因此,设计过程中必须同时对软件与硬件的可靠性给予考虑。

(3) 开展失效物理分析、应用与研究。进行可靠性试验,以尽早暴露设计的缺陷;开展高加速应力试验(HAST),尽早暴露产品的薄弱环节。

(4) 实施集成化结构设计。无故障设计与耐久性设计相结合;系统整体设计与零部件设计相结合;定性分析与定量分析相结合;产品可靠性设计与成本设计相结合;产品机械组件与电子组件设计相结合;动态可靠性与静态可靠性设计相结合。

(5) 可靠性工程与质量工程相结合。

(6) 可靠性设计技术与全寿命周期设计技术相结合。

(7) 开辟可靠性管理的新模式,实施网络化管理,严格可靠性评审制度。

1.3 可靠性风险评价的研究现状与发展趋势

风险评价,也称安全评价或危险评价,是对系统发生事故的危险性进行定性或定量分析,依据现存的专业经验、评价标准和准则,对危害分析结果得出系统发生危险的可能性及其后果严重程度的评价,通过评价以寻求最低的事故率、最少的损失和最优的安全投资效益。风险评价包括风险分析和风险评定在内的全过程。风险分析包括机器限制的确定、危险识别和风险评估;风险评定以风险分析为基础,判断是否已达到减小风险的目标。

近年来,机械安全风险评价方法作为一种技术,在工业发达国家已有较为成熟的应用,我国在这方面开展专题研究和使用的滞后,严重影响我国机械安全设计水平和机械产品的本质安全。据不完全统计,机械工业大型企业中,由于机械安全防护不完备而引起的人身伤亡事故每年就达数百起。据统计,在1949—1982年的33年间发生的工业事故中,事故发生起数中占比例较大的前三位是机械伤害(27.23%)、高处坠落(12.32%)、物体打击(10.67%)。又如1991年机械工业部所属重点骨干企业就因机械故障发生死亡事故10起。机械产品安全水平的高低不仅会危及人的安全与健康,而且会产生一些贸易壁垒。有些国产设备,尤其是一些大型成套设备,由于安全方面的原因,国内用户不愿使用,反而花费大量资金从国外进口。同样,由于安全性不好,国内机械产品进入国际市场就非常困难。同时,我国装备制造业

的发展及机电产品的国际贸易都对机械产品的风险评价提出了迫切要求。因此,风险评价既是一种科学的方法,也是实现机械本质安全的一种手段。

危险是客观存在、无法改变的,而风险却在很大程度上随着人们的意志而改变,亦即按照人们的意志可以改变危险出现或事故发生的概率和一旦出现危险,由于改进防范措施从而改变损失的程度。

关于风险评价,主要有三种方法:一是概率风险评价,它是在事故发生前,预测某设施可能发生什么事及其可能造成环境(或健康)风险;二是实时(real time)后果评价,主要是在事故发生期间给出实时的有毒物质的迁移轨迹及实时浓度分布,以便做出正确的防护措施决策,减少事故的危害;三是事故后果(over-event 或 past accident)评价,主要研究事故停止后对环境(或健康)的影响。从这个意义上说,我们所研究的机械设备风险评价则偏重于概率风险评价。概率风险评价方法是根据零部件或子系统的事故发生概率,求取整个系统的事故发生概率。

概率风险评价(probability risk assessment, PRA),也称为定量风险分析,该技术源于可靠性学科。“二战”期间,由于科学技术的进步,国防工业和军事工业中的设备系统越来越复杂,产品的可用性直接决定于产品的可靠性和维修性,由此可靠性工程这一学科逐渐发展起来。至今,可靠性工程已经从调查研究、制定规范、统计试验发展到全面实现以可靠性为中心的质量管理阶段。

概率风险评价技术通过综合分析单个元件的设计和操作性能来估算整个系统发生事故的概率。自 20 世纪 60 年代末以来,主要服务于三个方面:

- (1) 提供某种技术的危险分析情况,用于制定政策,答复公众咨询,评价环境影响;
- (2) 提供危险定量分析值及减少危险的措施,帮助建立有关法律和操作系统;
- (3) 在工厂设计、运行、质量管理、改造及维修时提出安全改进措施。

概率风险评价最早运用于核工业。1972 年美国麻省理工学院拉姆森(Rasmussen)教授等 14 名专家用了两年的时间,耗资近 300 万美元,完成了核电站评估,并于 1975 年正式发表了《商用核电站轻水反应堆风险评价》报告,即著名的 WASH-1400 报告。该报告的目的是估计美国商用核电站的潜在事故对社会造成的风险,它第一次成功地运用了事件树和故障树的方法对核电站的风险作了定量分析,并与已经存在的社会风险作了比较,这在核能安全分析上是一个重要的里程碑。实践证明,概率风险评价技术有助于核电站的设计、运行和管理安全性的改进,它的作用在世界各国产生了广泛而深远的影响,同时也说明了概率风险评价是对系统进行风险评价的重要方法。

虽然第一个概率安全评估报告 WASH-1400 得到了专家小组的支持,但核工业对概率安全评估方法的实际应用仍持观望态度。1979 年 3 月,美国的三哩岛核电站 2 号机组发生了严重的事故,事故的进展过程正是 WASH-1400 中所预示的。三哩岛核电站事故使人们认识到,概率安全评估为全面了解核电站发生事故的可能性提供了最完整、最清晰的图像。美国核管理委员会(NRC)于 1981 年发布了《故障树手册》(NUREG-0492),大力推动了故障树在核电站概率安全评估中的应用。该手册经过多次修订之后,目前已成为核工业和航空航天工业重要的技术资料。三哩岛事故之后,概率安全评价得到了多个核电站的广泛关注。此后,巴西采用大事件树/小故障树方法研究了 ANGRAI 核电站的安全运行问题,并专门编制了能考虑不确定性传播的分析程序,对能引起堆芯熔化的 16 个主要事件序列进行了不确定性分析,找到了系统和人因方面的薄弱环节。日本采用小事件树/大故障树方法分析了钠冷快中子反应堆,得到了堆芯熔化的概率。截至 1983 年,主要的核工业国家已对 22 个核电站进行了概率安全评估。

1985 年 3 月,国际原子能机构(IAEA)在英国召开了“概率安全评估含义”学术会议,会议反映了各国概率安全评估的发展现状。从会议讨论的结果看出:许多国家已制定了规划,要求对核电站进行概率风险安全评估。一些国家已制定或即将制定法规,要求核电站同时进行确定论方法和概率安全评估方法的评审,并要求将评审结果作为发放许可证的必需工作。1989 年,世界核电站运营者协会(WANO)在莫斯科成立,该组织通过分享全世界核电站运行专家的经验结果来最大限度地提高核电站的安全性。到目前为止,几乎所有的核电站都加入了该组织。

现在,IAEA 的核安全评审组(OSART)经常性地检查各国核电站的运行和管理情况,定期到 WANO 的成员核电站进行运行安全评估。

由于概率安全评估在核领域取得了巨大的成功,加之 1986 年的“挑战者”号事故,美国宇航局(NASA)逐渐认识到采用定量方法对航天系统进行风险评估的重要性。在航空航天行业,1988 年 1 月,NASA 在《“挑战者”事故后航天飞机的安全性评估与管理》报告中指出:概率安全评估应尽早应用于航天飞机安全风险管理中,航空系统的失效数据、飞行测试数据及相关的分析技术应系统化地应用于支撑概率安全评估、趋势分析及其他安全性定量分析。1993 年,NASA 开始采用概率安全评估方法对航天任务进行分析。1996 年 6 月,NASA 领导开发了定量风险评估系统(QRAS),用来对航天飞机设计改进提供决策支持。

从“挑战者”号事故中得到警示,欧洲航天局(ESA)的安全评估也从定性转向定量,并开发了多目标决策支持系统来支持技术和计划的评估。而且