



国防特色学术专著·兵器科学与技术

西北工业大学研究生高水平课程体系建设丛书

National Defense Monograph



鱼雷系统可靠性理论与方法

宋保维 等编著

西北工业大学出版社



国防特色学术专著·兵器科学与技术

西北工业大学研究生高水平课程体系建设丛书

鱼雷系统可靠性 理论与方法

宋保维 等编著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了鱼雷系统可靠性的基础知识、理论、方法及应用。全书共 11 章, 主要内容包括鱼雷系统可靠性指标分配方法、鱼雷系统模糊可靠性分析方法、鱼雷结构模糊可靠性优化设计、鱼雷机械振动模糊可靠性分析技术、鱼雷可靠性增长试验与分析方法、鱼雷可靠性抽样检验方法、鱼雷可靠性试验数据融合技术研究、鱼雷系统可靠性综合评定方法、鱼雷系统储存可靠性与装载可靠性等最新研究成果。全书内容体现了全面性、系统性、逻辑性、先进性和工程实用性的特点。

本书不仅可以作为从事水中兵器、水下航行器等领域可靠性研究和应用的科技工作者、管理人员、高等院校教师使用参考, 还可以作为兵器科学与技术、船舶与海洋工程、机械工程等学科专业研究生培养的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

鱼雷系统可靠性理论与方法/宋保维等编著. —西安:西北工业大学出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-5612-4229-2

I. ①鱼… II. ①宋… III. ①鱼雷—系统可靠性—研究 IV. ①TJ63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 004042 号

鱼雷系统可靠性理论与方法

宋保维 等编著

责任编辑 孙倩

*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88491147

<http://www.nwpup.com> E-mail: fxb@nwpup.com

兴平市博闻印务有限公司 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:14.375 字数:346 千字

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5612-4229-2 定价:42.00 元

前 言

本书是原国防科学技术工业委员会“十一五”重点规划专著,并为西北工业大学研究生高水平课程体系建设丛书之一。它是以2001年全国优秀博士学位论文“鱼雷系统可靠性理论与方法研究”为基础框架编著而成的。原博士学位论文的内容主要包括鱼雷系统可靠性指标分配方法、鱼雷结构模糊可靠性优化理论与方法、鱼雷系统可靠性综合评定方法、鱼雷小子样产品可靠性抽样检验方法等研究成果。而本书补充了编著者和国内同行专家关于系统模糊可靠性分析技术、机械振动可靠性分析技术、可靠性增长试验与分析方法、可靠性试验数据融合技术研究、系统储存与装载可靠性等最新研究成果,较为全面地讲述了鱼雷系统可靠性理论与方法及工程应用技术。

全书共11章。第1章阐述了鱼雷可靠性工程的主要研究内容、可靠性特征量、工作程序;第2章论述了鱼雷系统可靠性分配方法;第3章论述了串联、并联、 k/n 系统可靠性以及故障树模糊分析技术;第4章论述了模糊可靠性优化设计基本理论和鱼雷典型结构模糊可靠性优化设计;第5章论述了鱼雷机械振动模糊可靠性分析技术;第6章论述了鱼雷可靠性增长模型、可靠性增长试验方法、产品的整机可靠性增长分析方法;第7章论述了小子样鱼雷可靠性计数抽样检验方法、序贯抽样检验方法、分层抽样检验方法及基于分系统折合的小子样鱼雷抽样方法;第8章论述了鱼雷可靠性试验同一状态条件的鱼雷可靠性试验数据融合技术、不同环境的试验数据融合技术及不同研制阶段的试验数据融合技术;第9章论述了鱼雷系统可靠性综合评定的一般方法、信息熵法、渐近正态法、Bayes修正法及典型鱼雷可靠性评定与分析;第10章论述了鱼雷储存环境因素的确定、定期检测及测试效率、系统储存可靠性评定方法及系统储存可靠性预计方法;第11章论述了鱼雷装载可靠性。

在本书编写过程中,坚持“理论联系实际、便于工程应用”的原则,注重反映鱼雷可靠性理论与方法的新发展、新成果,内容力求全面性、逻辑性、系统性及实用性。

本书由宋保维教授编著,并编写了第1,2,4,7,9章;毛昭勇副教授编写了第3,6,8章,参编了第7章;李正副教授编写了第10章;梁庆卫副教授编写了第11

章；皮德福讲师、郑珂工程师共同编写了第 5 章；康春华研究员参编了第 1 章。海军大连舰艇学院赵晓哲院士和中国船舶重工集团第七〇五研究所博士生导师王志杰研究员主审本书，并提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

由于水平有限，书中难免存在错误和不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

2014 年 5 月

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 可靠性含义 | 1 |
| 1.2 可靠性特征量 | 2 |
| 1.3 鱼雷可靠性参数和工作程序 | 8 |
| 参考文献 | 12 |
| 第 2 章 鱼雷系统可靠性分配方法 | 13 |
| 2.1 系统可靠性分配原则和常用方法 | 13 |
| 2.2 系统可靠性分配的模糊数学方法 | 19 |
| 2.3 基于系统造价的可靠性指标分配的模糊优化方法 | 23 |
| 2.4 系统可靠性优化分配的分解协调方法 | 26 |
| 参考文献 | 32 |
| 第 3 章 鱼雷系统模糊可靠性分析技术 | 33 |
| 3.1 串联系统模糊可靠性 | 33 |
| 3.2 并联系统模糊可靠性 | 34 |
| 3.3 k/n 系统模糊可靠性 | 36 |
| 3.4 故障树模糊分析方法 | 38 |
| 参考文献 | 43 |
| 第 4 章 鱼雷结构模糊可靠性优化设计 | 45 |
| 4.1 模糊可靠性优化设计的基本理论 | 45 |
| 4.2 模糊可靠性优化设计最优水平值的确定方法 | 50 |
| 4.3 鱼雷典型结构模糊可靠性优化设计 | 58 |
| 参考文献 | 74 |
| 第 5 章 鱼雷机械振动模糊可靠性分析技术 | 76 |
| 5.1 机械振动可靠性分析基本模型 | 76 |
| 5.2 单自由度振动模糊可靠性分析 | 82 |
| 5.3 多自由度振动模糊可靠性分析 | 88 |
| 5.4 噪声约束条件下结构振动模糊可靠性分析方法 | 89 |

| | | |
|---------------|------------------------|------------|
| 5.5 | 鱼雷典型结构振动模糊可靠性分析 | 93 |
| | 参考文献 | 99 |
| 第 6 章 | 鱼雷可靠性增长试验与分析方法 | 100 |
| 6.1 | 可靠性增长基本模型 | 100 |
| 6.2 | 鱼雷可靠性增长试验方法 | 104 |
| 6.3 | 鱼雷产品可靠性增长分析 | 115 |
| | 参考文献 | 119 |
| 第 7 章 | 鱼雷可靠性抽样检验方法 | 120 |
| 7.1 | 计数抽样检验方法研究 | 120 |
| 7.2 | 分层抽样检验方法研究 | 128 |
| 7.3 | 基于序贯验后加权检验的计数抽样方法研究 | 130 |
| 7.4 | 基于分系统折合的小子样鱼雷抽样方法研究 | 135 |
| | 参考文献 | 138 |
| 第 8 章 | 鱼雷可靠性试验数据融合技术研究 | 140 |
| 8.1 | 同一状态条件的鱼雷可靠性试验数据融合技术 | 140 |
| 8.2 | 不同环境的鱼雷可靠性试验数据融合技术 | 147 |
| 8.3 | 不同研制阶段的鱼雷可靠性试验数据融合技术 | 153 |
| | 参考文献 | 161 |
| 第 9 章 | 鱼雷系统可靠性综合评定方法 | 163 |
| 9.1 | 系统可靠性综合评定的一般方法 | 163 |
| 9.2 | 系统可靠性综合评定的信息熵法 | 165 |
| 9.3 | 系统可靠性综合评定的矩拟合法 | 168 |
| 9.4 | 系统可靠性综合评定的渐近正态法 | 170 |
| 9.5 | 系统可靠性综合评定的 Bayes 方法修正法 | 172 |
| 9.6 | 典型系统可靠性综合评定与分析 | 176 |
| | 参考文献 | 182 |
| 第 10 章 | 鱼雷系统储存可靠性 | 184 |
| 10.1 | 部署阶段的可靠性问题 | 184 |
| 10.2 | 储存环境因素的确定 | 185 |
| 10.3 | 定期检测及测试效率 | 188 |
| 10.4 | 系统储存可靠性评定方法 | 195 |
| | 参考文献 | 213 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 第 11 章 鱼雷装载可靠性 | 215 |
| 11.1 装载失效率特征曲线 | 215 |
| 11.2 鱼雷装载可靠度与工作可靠度的关系研究 | 216 |
| 11.3 实例仿真分析 | 219 |
| 参考文献 | 222 |

第1章 绪 论

鱼雷可靠性是衡量产品质量的一个重要指标。高科技的发展要以可靠性技术为基础,科学技术的发展又推动了产品可靠性水平的不断提高。

鱼雷可靠性理论与方法主要以产品的寿命特征为研究对象,它与基础科学、系统工程、环境工程、价值工程、工程心理学、质量控制技术、维修技术、生产管理与使用管理技术以及计算机技术等密切相关,因此,它具有学科专业的综合性。近年来,鱼雷工程领域提出了诸多关于复杂系统或小子样产品的可靠性理论问题,尤其是关于系统可靠性指标分配、结构可靠性优化设计、机械振动模糊可靠性分析技术、系统可靠性增长试验与综合评定、小子样产品可靠性抽样检验、系统储存可靠性以及产品装载可靠性等方面的理论与方法已成为专家学者的重要研究方向。

1.1 可靠性含义

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力^[1]。此定义中包含了产品、规定的条件、规定的时间以及规定的功能等四个要素,并指明可靠性的特点是产品的一种能力,而不是一种性能。下面分别对各要素给予解释和说明。

①“产品”。它可以是一个系统,也可以是组成这个系统的分系统、装置、组件,甚至是一个电子元器件或机械零部件。

②“规定的条件”。它常指的是使用条件、维护条件、环境条件、操作条件等,这些条件都会对整个系统的可靠性产生直接的影响。同一系统在不同的条件下,会有不同的可靠性要求。例如实验室条件和现场条件就相差很大,所以不在规定的条件下,研究可靠性即失去了实际意义。

③“规定的时间”。这是可靠性定义中的核心。因为不谈时间就无可靠性可言,而规定时间的长短又随产品对象和使用目的不同而异。产品可靠性只有在规定的时间内才有具体的度量意义。规定的时间是指产品使用(储存)中的某一给定时间或与时间相当的动作次数、发射次数、实航次数、行驶里程等。

④“规定的功能”。这一要素常用系统的各种性能指标来反映。通过试验或检验,系统若达到规定的性能指标,则称该系统能完成规定的功能,否则称该系统丧失规定的功能。一般把系统丧失规定功能的状态称作系统发生“故障”或“失效”,相应的各项性能指标就称为“故障判据”或“失效判据”。在具体研究一个系统的可靠性时,应合理、明确地给出“失效判据”,否则就会对可靠性问题争论不休。

⑤“能力”。只是定性地理解它是不够的,应对其进行量化,以便清楚地说明系统可靠性的程度。由于系统是多种多样、千姿百态的,因此用来度量系统可靠性的“能力”也是多种多样的。“能力”实际上是各种可靠性指标,由于系统中发生故障带有偶然性,因而可靠性指

标一般都具有统计学的意义。常用的可靠性指标有“可靠度”“失效率”“平均寿命”等。这些可靠性指标构成了可靠性工程中的基本概念。

可靠性工程的主要任务是在一个系统或设备的设计、生产、使用和维护的各个阶段,定性与定量地分析、控制、评估和改善系统或设备的可靠性,在实践中达到可靠性与经济性、适用性的和谐统一。它不仅直接反映了系统的质量指标,而且还关系到整个系统运转过程的成败^[2]。

可靠性工程的主要研究内容包括可靠性管理、可靠性预计、可靠性指标分配、可靠性设计、可靠性增长、可靠性评定、可靠性检验、软件可靠性等等。

可靠性设计是可靠性工程的核心,主宰着产品或工程系统的固有可靠性。产品在生产、使用、维修各阶段中所出现的许多可靠性问题均取决于设计阶段的可靠性工作。

可靠性设计就是要使产品在规定的研制费用、时间进度、质量体积等条件限制之下达到最佳的可靠性;或使产品在满足规定的可靠性指标前提下,尽量减少其体积质量、节省费用和缩短研制时间。产品在整个寿命周期中的总费用与可靠性的关系如图 1.1 所示,即当可靠性不高时,产品的研制费用 C_p 随可靠性 R 的增长而缓慢增长,但当可靠性较高时,要提高可靠性就会使研制费用剧增,而维修费用 C_m 却随着可靠性 R 的增长而逐步降低。各项费用的总和 C_t 随着可靠性的不同将出现一谷点,与此对应的可靠性 $R_{C,\min}$ 即为确定产品可靠性指标的最佳选择点。

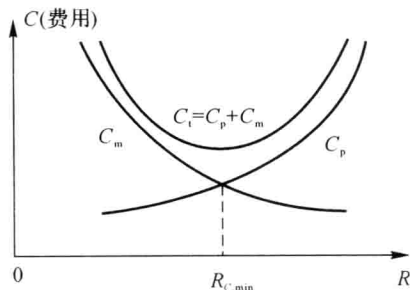


图 1.1 费用与可靠性关系图

1.2 可靠性特征量^[3]

1.2.1 可靠度与不可靠度

可靠度(reliability)的定义为产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率,通常以 R 表示。考虑到它是时间的函数,又可表示为 $R=R(t)$,称为可靠度函数。它表示在规定的使用条件下和规定的时间内,无故障地发挥规定功能而工作的产品占全部工作产品(累积起来)的百分率。因此,可靠度 $R(t)$ 的取值范围是

$$0 \leq R(t) \leq 1 \quad (1.1)$$

若“产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能”的这一事件(E)的概率以 $P(E)$ 表示,则可靠度作为描述产品正常工作时间(寿命)这一随机变量(T)的概率分布可写为

$$R(t) = P(E) = P(T \geq t), \quad 0 \leq t < \infty \quad (1.2)$$

与可靠度相对应的有不可靠度,表示产品在规定的条件下和规定的时间内不能完成规定功能的概率,记为 $F(t)$ 。显然,它与可靠度呈互补关系,即

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.3)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T < t) \quad (1.4)$$

可靠度函数 $R(t)$ 在 $[0, +\infty)$ 时间区间内为递减函数,而 $F(t)$ 为递增函数,如图 1.2(a)

所示, $F(t)$ 与 $R(t)$ 的形状正好相反。

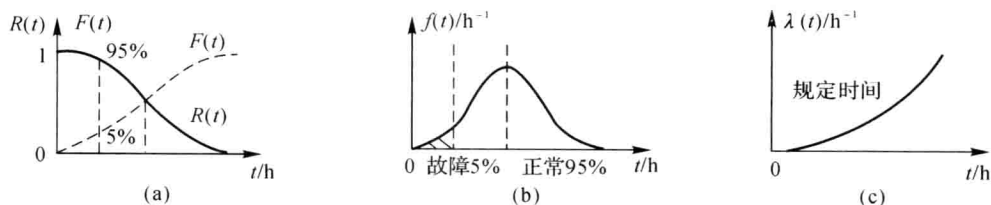


图 1.2 可靠度函数、失效密度函数与失效率(当失效率递增时)

对不可靠函数 $F(t)$ 求导, 则得失效密度函数 $f(t)$, 即

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1.5)$$

失效密度函数又称为故障密度函数。在可靠度函数和不可靠度函数如图 1.2(a) 所示的情况下, 失效密度函数 $f(t)$ 如图 1.2(b) 所示。由式(1.5)可得

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.6)$$

将式(1.6)代入式(1.3), 得

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1.7)$$

1.2.2 失效率

失效率(failure rate)又称为故障率,其定义为工作到某时刻 t 时尚未失效(故障)的产品,在 t 时刻以后的下一个单位时间内发生失效(故障)的概率。失效率的观测值即为在某时刻 t 以后的下一个单位时间内失效的产品数与工作到该时刻尚未失效的产品数之比。

设有 N 个产品,从 $t=0$ 开始工作,到时刻 t 时产品的失效数为 $n(t)$,而到时刻 $(t + \Delta t)$ 时产品的失效数为 $n(t + \Delta t)$,即在 $[t, t + \Delta t]$ 时间区间内有 $\Delta n(t) = n(t + \Delta t) - n(t)$ 个产品失效,则定义该产品在 $[t, t + \Delta t]$ 时间区间内的平均失效率为

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)] \Delta t} = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \Delta t} \quad (1.8)$$

而当产品数 $N \rightarrow \infty$, 时间区间 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,有瞬时失效率或简称失效率(故障率)的表达式为

$$\lambda(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{\lambda}(t) = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \Delta t} \quad (1.9)$$

因失效率 $\lambda(t)$ 是时间区间 t 的函数,故又称 $\lambda(t)$ 为失效率函数,也称为风险函数(记作 $h(t)$)。失效率是产品可靠性常用的数量特征之一,失效率愈高,则可靠性愈低。

失效率的单位多用时间的倒数表示,如用 $10^{-5}/h$ 表示。对于可靠度高、失效率低的产品,则采用 $\text{Fit}(\text{failure unit}) = 10^{-9}/h = 10^{-6}/(10^3 h)$ 为单位。有时不用时间的倒数而用与其相当的“动作次数”“转数”“距离”等的倒数更适宜些。

例 1.1 今有某种零件 100 个,已工作了 6 年,工作满 5 年时共有 3 个失效,工作满 6 年时共有 6 个失效。试计算这批零件工作满 5 年时的失效率。

解 按式(1.8),时间以年(a)为单位,则

$$\bar{\lambda}(5) = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \Delta t} = \frac{6 - 3}{(100 - 3) \times 1} = 0.0309/a = (3.09\%) / a$$

如果时间以 10^3 h 为单位,则 $\Delta t = 1a = 8.76 \times 10^3$ h,因此

$$\bar{\lambda}(5) = \frac{6 - 3}{(100 - 3) \times 8.76 \times 10^3} = (0.35\%) / (10^3 \text{ h}) = 3.5 / (10^6 \text{ h})$$

如果对这批零件测得多年的失效数据并按上法求出 $\bar{\lambda}(1), \bar{\lambda}(2), \bar{\lambda}(3), \dots$, 则可绘出 $\bar{\lambda}(t)$ 随时间 t 的变化曲线,称为该批零件的失效率曲线。

失效率 $\lambda(t)$ 是系统、机器、设备等产品一直到某一时刻 t 为止尚未发生故障的可靠度 $R(t)$ 下一单位时间内可能发生故障的条件概率。换句话说, $\lambda(t)$ 表示在某段时间 t 内圆满工作的百分率 $R(t)$ 在下一个瞬间将以何种比率发生失效或故障。因此,失效率的表达式为

$$\lambda(t) = \frac{dF(t)/dt}{R(t)} = \frac{-dR(t)/dt}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.10)$$

或

$$\lambda(t) = \frac{-d \ln R(t)}{dt} \quad (1.11)$$

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (1.12)$$

即可靠度函数 $R(t)$ 是把 $\lambda(t)$ 由 0 至 t 进行积分之后作为指数的指数型函数。

失效率函数有三种表达形式,即随时间的增长而增长的,随时间的增长而下降的和与时间无关而保持一定值的。

当 $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ 时,式(1.12)变为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.13)$$

对应于上述三种失效率函数的形态,失效率曲线一般可分为递减型失效率 DFR(Decreasing Failure Rate) 曲线、恒定型失效率 CFR(Constant Failure Rate) 曲线、递增型失效率 IFR(Increasing Failure Rate) 曲线。

由许多零件构成的机器、设备或系统,在不进行预防性维修时,或者对于不可修复的产品,其失效率曲线的典型形态如图 1.3 所示。由于它的形状与浴盆的剖面相似,因而又称为浴盆曲线(bath-tub curve)。它由上述三种形态的失效率曲线组成,反映了产品在其全部工作过程中的三个不同阶段或时期。

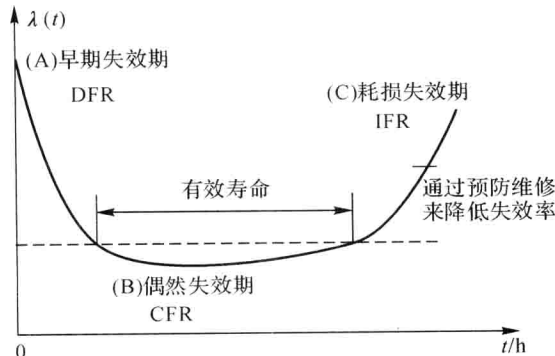


图 1.3 不进行维修的机器、设备或系统的典型失效率曲线

(1) 早期失效期(DFR 型)

早期失效期出现在产品投入使用的初期,其特点是开始时失效率较高,但随着使用时间的增加失效率将较快地下降,但呈递减型,如图 1.3 中的(A)所示。这个时期的失效或故障是由于设计上的疏忽、材料有缺陷、工艺质量问题,检查错误而混进了不合格品,不适应外部环境等缺点及设备中寿命短的部件等因素引起的。这个时期的长短随设备或系统的规模和上述情况的不同而异。为了缩短这一阶段的时间,产品应在投入运行前进行试运转,以便及早发现、修正和排除缺陷;或通过实验进行筛选,剔除不合格品;或进行规定的跑合和调整,以便改善其技术状况。

(2) 偶然失效期(CFR 型)

在早期失效期之后期,早期失效的产品暴露无遗,失效率就会大体趋于稳定状态并降至最低,且在相当一段时间内大致维持不变,呈恒定型,如图 1.3 的(B)所示。这时期故障的发生是偶然的或随机的,故称为偶然失效期。偶然失效期是设备或系统等产品的最佳状态期,在规定的失效率下其持续时间称为使用寿命或有效寿命。人们总是希望延长这一时期,既希望在允许的费用内延长使用寿命。台架寿命实验、可靠性实验,一般都是在消除了早期故障之后针对偶然失效期而进行的。

(3) 耗损失效期(IFR 型)

耗损失效期出现在设备、系统等产品投入使用的后期,其特点是失效率随时间的增加而上升,呈递增型,如图 1.3 中的(C)所示。这是因为构成设备、系统的某些零件已过度磨损、疲劳、老化,寿命衰竭所致。若能预计到损耗失效期到来的时间,并在这个时间稍前一点将要损坏的零件更换下来,就可以把本来上升的失效率拉下来,延长可维护的设备或系统的使用寿命。当然,是否值得采用这种措施需要权衡,因为有时把它报废反而更为合算。

可靠性研究虽涉及上述三种失效类型或三种失效期,但着重研究的是随机失效,因为它发生在设备的正常使用期间。

这里需特别指出,浴盆曲线观点反映的是不可修复且较为复杂的设备或系统在投入使用后失效率的变化情况。一般情况下,凡是由于单一的失效机理而引起失效的零件、部件,应归于 DFR 型;而固有寿命集中的多属于 IFR 型。只有在稍复杂的设备或系统中,由于零件繁多且对它们的设计、使用材料、制造工艺、工作(应力)条件、使用方法等不同,失效因素各异,才形成包含有上述三种失效类型的浴盆曲线。

1.2.3 平均寿命

平均寿命这个词对于不可修复(指失效后无法修复或不修复,仅进行更换)的产品和可修复(指发生故障后经修理或更换零件即恢复功能)的产品,含义是有区别的。

对于不可修复的产品,其寿命是指它失效前的工作时间。因此,平均寿命就是指该产品从开始使用到失效前工作时间(或工作次数)的平均值,或称为失效前平均时间,记为 MTTF(Mean Time To Failure)

$$MTTF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1.14)$$

式中 N ——测试的产品总数;

t_i ——第 i 个产品失效前的工作时间, h。

对于可修复的产品,其寿命是指相邻两次故障间的工作时间。因此,它的平均寿命即为平均无故障工作时间或称平均故障间隔,记为 MTBF (Mean Time Between Failures)。

$$\text{MTBF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{ij} \quad (1.15)$$

式中 N ——测试的产品总数;

n_i ——第 i 个测试产品的故障数;

t_{ij} ——第 i 个产品的第 $j-1$ 次故障到第 j 次故障的工作时间, h。

MTTF 与 MTBF 的理论意义和数学表达式的实际内容都是一样的,故通称为平均寿命。这样,如果从一批产品中任意取 N 个产品进行寿命试验,得到第 i 个产品的寿命数据为 t_i ,则该产品的平均寿命 θ 为

$$\theta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1.16)$$

或表达式为

$$\theta = \frac{\text{所有产品总的工作时间}}{\text{总的故障数}} \quad (1.17)$$

若产品总体的失效密度函数 $f(t)$ 已知,则根据概率论与数理统计关于均值(数学期望) $E(X)$ 的定义 $[E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x) dx]$,考虑到时间的积分范围应为 $0 \leq t < +\infty$,故有

$$\theta = E(T) = \int_0^{+\infty} tf(t) dt \quad (1.18)$$

将式(1.5)代入式(1.18),得

$$\begin{aligned} \theta &= \int_0^{+\infty} t \left(-\frac{dR(t)}{dt} \right) dt = -\int_0^{+\infty} t dR(t) = -\int_0^{+\infty} d[tR(t)] + \int_0^{+\infty} R(t) dt = \\ &= -[tR(t)] \Big|_0^{+\infty} + \int_0^{+\infty} R(t) dt = \int_0^{+\infty} R(t) dt \end{aligned} \quad (1.19)$$

式(1.19)中的 θ 就是 MTTF 或 MTBF。由此可见,在一般情况下,对可靠度函数 $R(t)$ 在从 0 到 $+\infty$ 的时间区间上进行积分计算,就可以求出产品的平均寿命。

当 $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ 时, $R(t) = e^{-\lambda t}$, 则

$$\theta = \int_0^{+\infty} R(t) dt = \int_0^{+\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{-1}{\lambda} \int_0^{+\infty} e^{-\lambda t} d(-\lambda t) = -\frac{1}{\lambda} [e^{-\lambda t}] \Big|_0^{+\infty} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.20)$$

即当可靠度函数 $R(t)$ 为指数分布时,平均寿命 θ 等于失效率 λ 的倒数。当 $t = \theta = \frac{1}{\lambda}$ 时,由式(1.18)知 $R(t) = e^{-1} = 0.3679$,即能够工作到平均工作寿命的产品仅有 36.79% 左右。就是说,在这种简单指数分布的情况下,约有 63.21% 的产品将在达到平均寿命前失效,这是它的特征。

1.2.4 寿命方差和寿命均方差(标准差)

平均寿命是一批产品中各个产品寿命的算术平均值,它只能反映这批产品寿命分布的中心位置,而不能反映各产品的寿命 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 与此中心位置的偏离程度。寿命方差和均方

差(或称标准差、标准离差、标准偏差)就是用来反映产品寿命离散程度的特征值。

当产品的寿命数据 $t_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为离散型变量时,平均寿命 θ 可按式(1.16)计算。由于产品寿命的偏差 $(t_i - \theta)$ 有正有负,因而采用其二次方值 $(t_i - \theta)^2$ 来反映。因此,一批数量为 N 的产品(母体)的寿命方差为

$$D(t) = [\sigma(t)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - \theta)^2 \quad (1.21)$$

寿命均方差(标准差)为

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - \theta)^2} \quad (1.22)$$

式中 N ——该母体取值的总体次数, $N \rightarrow +\infty$ 或是个相当大的数;

θ ——测试产品的平均寿命, h;

t_i ——第 i 个测试产品的实际寿命, h。

当 N 为不大的数时,或对于子样(即对于某一数组)来说,其寿命方差和均方差(标准差)分别为

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \theta)^2 \quad (1.23)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \theta)^2} \quad (1.24)$$

连续型变量的总体寿命方差可由失效密度函数 $f(t)$ 直接求得

$$D(t) = [\sigma(t)]^2 = \int_0^{+\infty} (t - \theta)^2 f(t) dt \quad (1.25)$$

式中, $\sigma(t)$ 为寿命均方差或标准差。

将式(1.25)的二次方展开并将式(1.24)代入,得

$$[\sigma(t)]^2 = \int_0^{+\infty} t^2 f(t) dt - \theta^2 \quad (1.26)$$

1.2.5 可靠寿命、中位寿命和特征寿命

当 $R(t)$ 为已知时,就可以求得任意时间 t 的可靠度。反之,若确定了可靠度,也可以求出相应的工作时间寿命(时间)。可靠寿命(可靠度寿命)就是指可靠度为给定值 R 时的工作寿命,并以 t_R 表示。

可靠度 $R=50\%$ 的可靠寿命,称为中位寿命,用 $t_{0.5}$ 表示。当产品工作到中位寿命 $t_{0.5}$ 时,产品中将有半数失效,即可靠度与累积失效概率均等于 0.5。

可靠度 $R=e^{-1}$ 的可靠寿命称为特征寿命,用 $T_{e^{-1}}$ 表示。

例 1.2 若已知某产品的失效率为常数, $\lambda(t) = \lambda = 0.25 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$,可靠度函数 $R(t) = e^{-\lambda t}$,试求可靠度 $R=99\%$ 的相应可靠寿命 $t_{0.99}$,中位寿命 $t_{0.5}$ 和特征寿命 $T_{e^{-1}}$ 。

解 因 $R(t) = e^{-\lambda t}$,故有 $R(t_R) = e^{-\lambda t_R}$,两边取对数,即

$$\ln R(t_R) = -\lambda t_R$$

得可靠寿命

$$t_R = -\frac{\ln R(t_R)}{\lambda} = -\frac{\ln(0.99)}{0.25 \times 10^{-4}} = 402 \text{ h}$$

中位寿命

$$t_{0.5} = -\frac{\ln R(t_{0.5})}{\lambda} = -\frac{\ln(0.5)}{0.25 \times 10^{-4}} = 27\,725.6 \text{ h}$$

特征寿命

$$T_{e^{-1}} = -\frac{\ln e^{-1}}{\lambda} = -\frac{\ln(0.3679)}{0.25 \times 10^{-4}} = 40\,000 \text{ h}$$

可靠性的各个特征量都与寿命分布函数有密切的关系,因此在研究可靠性问题时,常常需要找出它的寿命分布函数。表 1.1 和表 1.2 分别给出了常用的几种寿命分布类型、适用范围以及函数表达式。

表 1.1 常用的几种寿命分布类型及其适用范围

| 寿命分布类型 | 适用范围 |
|--------|--|
| 指数分布 | 具有恒定故障率的部件、无冗余度的复杂系统、在耗损故障前进行定时维修的产品、由随机高应力导致故障的部件、使用寿命期内出现的故障为弱耗损型的部件 |
| 威布尔分布 | 滚珠轴承、继电器、开关、断路器、某些电容器、电子管、磁控管、电位计、陀螺、电动机、发电机、蓄电池、机械液压恒速传动装置、液压泵、齿轮、材料疲劳等 |
| 对数正态分布 | 电动绕组绝缘、半导体器件、硅晶体管、旋翼叶片、结构、金属疲劳等 |
| 正态分布 | 动密封圈磨损、机械产品尺寸误差、强度误差等 |

表 1.2 不同寿命分布的密度函数、可靠度函数及故障率函数的表达式

| 分布形式 | 故障密度函数 $f(t)$ | 可靠度函数 $R(t)$ | 故障率函数 $\lambda(t)$ |
|-----------------------|--|--|---|
| 指数分布 | $\lambda e^{-\lambda t}$ | $e^{-\lambda t}$ | λ |
| 正态分布 | $\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\theta)^2}{2\sigma^2}}$ | $\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\theta)^2}{2\sigma^2}} d\tau$ | $\frac{e^{-\frac{(t-\theta)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\theta)^2}{2\sigma^2}} d\tau}$ |
| 对数正态分布 | $\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \theta)^2}{2\sigma^2}}$ | $\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \frac{1}{\tau} e^{-\frac{(\ln \tau - \theta)^2}{2\sigma^2}} d\tau$ | $\frac{\frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \theta)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^{\infty} \frac{1}{\tau} e^{-\frac{(\ln \tau - \theta)^2}{2\sigma^2}} d\tau}$ |
| 威布尔分布 $\gamma = 0$ | $\frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-\frac{t^m}{t_0^m}}$ | $e^{-\frac{t^m}{t_0^m}}$ | $\frac{m}{t_0} t^{m-1}$ |

1.3 鱼雷可靠性参数和工作程序

1.3.1 鱼雷常用可靠性参数

鱼雷常用可靠性参数一般包括下述 4 个。

(1) 实航工作可靠度

实航工作可靠度是指鱼雷在规定的入水实航条件和规定实航次数内,完成规定功能的

概率。

(2) 装载可靠度

装载可靠度是指鱼雷从装舰(潜)艇或飞机之日起,在规定的装载条件和装载时间内,保持规定功能的概率。

(3) 储存可靠度

储存可靠度是指鱼雷从验收合格包装储存之日起,在规定的仓库储存条件和规定储存时间内,保持规定功能的概率。

(4) 平均故障间隔储存时间

该时间是指在规定的储存条件下,鱼雷从开始储存到发生故障,或连续故障间隔储存时间的平均值。

1.3.2 鱼雷可靠性工作主要程序

1. 论证阶段

可行性论证阶段主要完成鱼雷系统的战术技术指标的论证,可靠性指标作为鱼雷系统战术技术指标的重要组成部分应由使用部门会同研制部门,从保证装备作战效能和降低寿命周期费用出发,对其必要性和可行性进行充分论证。这阶段的工作主要包括以下内容。

①确定可靠性要求:目的是为了获得可靠的且易保障的装备,以实现规定的系统战备完好性和任务成功性的要求。提出和确定可靠性定量定性要求是获得可靠装备的第一步,只有提出和确定了可靠性要求才有可能获得可靠的装备,才有可能实现将可靠性与作战性能、费用同等对待。订购方确定的可靠性要求必须纳入研制总要求,并以最清晰的表述和最恰当的术语规定可靠性定量定性要求。

②确定可靠性工作项目要求:目的是为了通过实施最少且最有效的工作项目,实现规定的可靠性要求。可靠性工作项目的选取取决于产品要求的可靠性水平、产品的复杂程度和关键性、产品的新技术含量、产品类型和特点、所处阶段以及费用、进度等。订购方应将要求的工作项目纳入合同文件,并在合同中明确对每个工作项目要求的细节。

③制定可靠性计划:通过该计划的实施来组织、指挥、协调、控制与监督装备寿命周期中全部可靠性工作。计划中应明确订购方完成的工作项目及其要求、主要工作内容、进度安排以及实施单位等。

④可靠性评审:对可靠性定量、定性要求和可靠性工作项目要求进行订购方内部的可靠性评审,一般与相关特性的要求评审结合进行,并尽可能与系统要求审查结合进行。

2. 方案阶段

方案设计阶段的基本任务是根据已批准的“战术技术指标”,论证满足可靠性指标要求的可行的总体方案,提出可靠性设计要求。主要工作包括以下内容。

①承制方协助订购方确定可靠性使用要求的目标研制门限值,并转化为合同指标。

②制定可靠性工作计划:根据合同要求,制定可靠性工作计划,作为开展可靠性工作的依据。计划中应明确为实现可靠性目标应做什么、何时做,谁去做和如何做等。