

导弹武器系统可靠性设计

谢 洪 编

国防工业出版社

导弹武器系统可靠性设计

谢 洪 编

国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

导弹武器系统是一个复杂而庞大的系统，提高和保证该系统的可靠性是所有设计和使用人员极其关注的。本书从工程设计和实际应用出发，系统地论述了导弹武器系统可靠性设计的主要问题。其中包括：导弹武器系统的可靠性预计和分配的原则和方法；系统可靠性设计与评审的程序、方法步骤和一般准则；并对如何提高系统的可靠性进行了全面地阐述。

本书可供导弹武器系统的研制和设计人员、生产和使用单位的质量控制人员、导弹部队技术人员以及高等学校有关专业师生学习使用；同时也可供从事质量与可靠性工作的其他人员参考。

导弹武器系统可靠性设计

谢 洪 编

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张5¹/₂ 117千字

1992年5月第一版 1992年5月北京第一次印刷 印数：001—800册

ISBN 7-118-00802-8/TJ·58 定价：4.55元

前 言

导弹武器系统 (MWS) 的复杂性及其特定的作战任务, 为系统的高可靠性设计技术提出了一个研究的课题。

导弹武器系统的高可靠性指标, 是通过良好的可靠性设计而不是通过其它任何途径获得的。可靠性设计已成为导弹武器系统可靠性工程乃至整个系统设计和研制工作的核心内容。可靠性设计技术在国内外导弹武器系统设计和研制部门正得到越来越广泛的重视和应用。近年来, 我国可靠性研究和应用得到了迅速的发展。但与其它发达国家相比, 仍存在着很大差距。特别是导弹武器系统可靠性研究及应用方面, 更应迎头赶上。为此, 我们参阅了国内外有关导弹武器系统可靠性设计资料, 编写了本书, 起抛砖引玉之作用, 并希望广大读者作深入地研究。

本书包括 MWS 可靠性预计和分配、MWS 可靠性设计和 MWS 可靠性设计评审等内容。MWS 可靠性预计和分配主要介绍工程实践中系统可靠性预计和分配的方法; 在 MWS 可靠性设计中, 提出了可靠性设计的指导思想、设计指南、设计程序和步骤、各种设计技术及设计准则等; MWS 可靠性设计评审则提出评审的方法和内容及其实施步骤。本书侧重于工程应用, 可供导弹武器系统研制和设计的人员、部队质量控制人员和部队导弹技术人员以及高等院校师生参考使用。

书中主要设计资料及数据均取自国外有关设计文本, 对

IV

国内导弹武器系统可靠性设计具有一定的参考价值。

本书在编写过程中，航空航天工业部刘建同研究员、孙汉佐高级工程师惠予了赐教；朱定安、吴仿春对书稿进行了审阅；南海舰队司令部监用科技处梁中富、卢汉奴，南海舰队司令部训练处史祖圣，38001部队司令部科技处郑湛坚，以及海军航空工程学院科研处和101教研室有关人员给予了大力支持和帮助，在此一并致谢！

由于水平有限，书中错误定当不少，望读者不吝批评指正。

编 者

1989年12月

目 录

常用符号与缩写字	1
第一章 概述	5
第二章 MWS 可靠性预计	8
2.1 可靠度预计的概念	8
2.2 可靠度预计的步骤及程序	10
2.3 元器件的失效率预计	12
2.4 设备、整机的可靠度预计	13
2.4.1 元器件计数法	13
2.4.2 相似法	15
2.4.3 有源器件法	18
2.4.4 简单枚举归纳推理预计法	20
2.5 系统的可靠度预计	24
2.5.1 数学模型法	24
2.5.2 上下界限法	26
2.5.3 逐级综合法	30
2.5.4 蒙特卡洛法	35
2.6 小结	36
第三章 MWS 可靠性分配	38
3.1 可靠度分配的方法和步骤	38
3.2 可靠度分配的基本原则及应考虑的因素	39
3.3 可靠度分配方法	44
3.3.1 系统到分系统的可靠度分配	44
3.3.2 分系统到整机或部件的可靠度分配	51
3.3.3 整机、部件到元器件的可靠度分配	54

VI

3.4 小结	60
第四章 MWS 可靠性设计技术	62
4.1 MWS 可靠性设计的指导思想	62
4.2 MWS 可靠性设计主要指南	63
4.2.1 可靠性设计中必须考虑的主要因素	63
4.2.2 可靠性设计中应注意的要点	64
4.2.3 保证系统可靠性的措施	64
4.2.4 可靠性设计检查	65
4.2.5 设计规范	67
4.2.6 设计评审	67
4.3 MWS 可靠性设计程序和方法	68
4.4 MWS 可靠性设计的一般准则	70
4.5 MWS 可靠性设计技术	75
4.5.1 最大限度提高系统固有可靠度的设计	75
4.5.2 防止系统可靠性退化的设计	99
4.6 小结	121
第五章 MWS 可靠性设计评审	122
5.1 概述	122
5.2 设计评审的内容及组织	123
5.2.1 设计评审的内容	123
5.2.2 设计评审的组织	126
5.2.3 设计评审的准备	126
5.2.4 设计评审与结论	128
5.3 FMEA 和 FMECA 方法	129
5.3.1 FMEA 和 FMECA 所需资料及步骤	129
5.3.2 系统失效模式与危害度	130
5.3.3 FMEA 和 FMECA 实施步骤	132
5.3.4 示例	133
附录一 正态分布表	137
附录二 $\chi^2(f)$ 分布下侧分位点 $\chi^2_{\alpha}(f)$ 表	138

附录三	在 0.95 置信度下由试验数 n 和失效数 f 确定的可靠度	142
附录四	厄尔斯(Earles)元器件失效率及期望寿命表	143
附录五	美国 RCA 公司可靠性设计评审检查提纲	146
参考文献	166

常用符号与缩写字

R ——可靠度

R_s ——系统可靠度

R_i, R_j, R_{ij} ——分系统可靠度

R_e ——部件、整机可靠度

R_{r,t_1} ——系统可靠度一级近似上限

R_{r,t_2} ——系统可靠度二级近似上限

R_{r,l_1} ——系统可靠度一级近似下限

R_{r,l_2} ——系统可靠度二级近似下限

$R_{r,p}$ ——系统可靠度预计值

$R_{r,a}$ ——系统可靠度分配值

$R_{i,p}$ ——分系统可靠度预计值

$R_{i,a}$ ——分系统可靠度分配值

R_{mm} ——人-机系统可靠度

$R_{r,t}$ ——纯技术系统可靠度

λ ——失效率

λ_s ——系统失效率

λ_i ——分系统失效率

λ_b ——元器件基本失效率

λ_0 ——元器件平均基本失效率

λ_p ——元器件应用失效率

λ_g ——元器件通用失效率

λ_e ——设备、整机失效率

- λ_{sp} ——系统失效率预计值
 λ_{sa} ——系统失效率分配值
 λ_{ip} ——分系统失效率预计值
 λ_{ia} ——分系统失效率分配值
 λ_d ——参考失效率
 λ_k —— k 类有源元器件的失效率
 λ_{ac} ——功能块失效率
 λ_{ps} ——无源元件失效率
 λ_{as} ——单元分配失效率
 λ_{rr} ——冗余系统失效率
 γ_k ——失效率比值
 W_i ——相对失效率
 π_w ——电压降额因子
 π_e ——环境因子
 π_{ee} ——整机单元的环境因子
 π_a ——应力因子
 π_q ——质量因子
 π_c ——复杂度因子
 π_i ——重要度因子
 π_i^p ——概率重要度因子
 π_j^s ——结构重要度因子
 π_d ——老练筛选因子
 π_r ——机械结构因子
 π_k ——制造工艺因子
 π_s ——标准化因子
 π_m ——维修性因子
 π_p ——加权因子

- π_f ——电路应用因子
 π_{fj} —— j 类功能电路应用因子
 π_r ——经验系数
 π_{ed} ——电子干扰影响系数
 π_{am} ——目标机动影响系数
 π_{bd} ——火力干扰影响系数
 d_r ——新设备缺陷总数
 d_i ——旧设备缺陷总数
 d_n ——新设备引进的缺陷预计数目
 d_e ——已排除的设备缺陷预计数目
 d_{ua} ——设备修改设计前产生的缺陷
 C_n ——新设备的复杂度
 C_e ——修改设计后设备的复杂度
 F_r ——系统不可靠度
 F_i ——分系统的不可靠度
 F_s ——并联部分 n 单元的不可靠度
 z ——系统任务次数
 η ——系统等效任务次数
 A_r ——系统的综合评定值
 A_i ——分系统的综合评定值
 A_{ij} —— i 分系统 j 个项目的评定值
 B_i ——综合因子评定值的加权因子
 μ_i —— i 部件平均寿命
 L ——标准期望寿命
 T ——工作时间
 P_1 ——单发杀伤概率
 C ——成本

F_s ——结构安全系数

E ——加工精度

σ_b ——强度极限

$(CR)_{cm}$ ——元件的第 m 种失效模式的危害度

F_{cm} ——元件的第 m 种失效模式的概率

P_{cm} ——元件的第 m 种失效模式的损害程度

AEG——有源元件组合

MWS——导弹武器系统

MTBF——平均无故障时间

FT——故障树

FTA——故障树分析法

FMEA——失效模式、效能分析

FMECA——失效模式、效能与危害度分析

第一章 概 述

导弹武器系统（MWS）的可靠度定义为：“在规定的贮存、使用期内和在规定的贮存、使用条件下，在规定的发射时间内，将导弹发射出去，安全飞行，命中目标，完成规定战斗任务的概率。”实现 MWS 高可靠性指标的关键在于系统的可靠性设计。

MWS 可靠性设计的基本任务是：在现有的物质（即我国的原材料、元器件和零部件）基础上，充分发挥技术水平（设计水平和工艺水平）和使用设计手段，使所设计系统的可靠性指标达到军方或预期的要求。

MWS 可靠性设计的主要依据和出发点是经过论证的可靠性指标。

MWS 可靠性设计包括可靠性预计、可靠性分配、可靠性设计方法和技术、可靠性设计评审等一系列工作。

MWS 可靠性预计是系统可靠性设计的重要内容之一。其目的是对导弹武器系统的各种设计方案进行评价，确定所提出的设计方案是否满足系统可靠性要求；或者从可靠性观点出发，找出系统设计中的薄弱环节，以便加以改进。可靠性预计的一般程序为：元器件→设备、整机→系统，这是一个自下而上的过程。

MWS 可靠性指标分配是将经过论证后确定的系统可靠性指标按照一定的原则或方法合理地分配给组成该系统的各个分系统，再将分配给分系统的可靠性指标合理地分配给组

成分系统的设备或部件。如此按照系统→分系统→设备或部件→元器件的程序自上而下地细分下去，一直分配到组成这个系统的最小单元为止，使参与系统设计和制造的人员都能明确自己所负责的部分应该达到的预期可靠性指标。系统可靠性分配是保证系统可靠性达到预期指标的一个重要步骤，因此，它是可靠性设计中的一个重要环节。从另一方面讲，可靠性分配又可进一步论证所规定的系统可靠性指标是否合理。若通过分配，各个分系统均难以达到分配给它的可靠性指标，则说明确定的系统可靠性指标过高。反之，若通过分配，分系统很容易达到分配给它的可靠性指标，则说明还可进一步提高该分系统的可靠性指标。所以，可靠性分配是系统可靠性指标论证的继续，也是系统可靠性指标是否合理的检验方法。

可靠性预计与分配有着密切的关系。预计是分配的基础。对于导弹武器系统这样一个复杂系统，往往是在预计的基础上进行分配。但在分配过程中可以发现设计中的薄弱环节，修改原设计。这样必然会有一个再预计、再分配的过程，有时要重复几次。这种过程实际上是把设计、生产水平的客观现实和对系统的高可靠性要求统一起来的过程。在方案论证和设计阶段，预计和分配组成反馈闭路系统，一般要经过多次反复综合。其基本模式是：分配-预计-比较-调整-方案改进-分配-预计……

MWS 可靠性设计技术是可靠性设计的主要内容。如何进行系统的可靠性设计，如何采取各种可靠性设计技术提高系统的固有可靠度，防止使用阶段和维修过程中造成的可靠性退化，都是可靠性设计技术所涉及的内容。

MWS 可靠性设计评审贯串于可靠性设计的各个环节。

评价系统是否达到可靠性指标，是否满足可靠性设计要求，系统还存在哪些可靠性设计缺陷，采取怎样的措施进一步修改设计等，则是设计评审所要完成的任务。

MWS 可靠性预计、分配、技术设计和评审，构成了反复循环的 MWS 可靠性设计程序，并贯串于整个可靠性设计的全过程。

第二章 MWS 可靠性预计

2.1 可靠度预计的概念

MWS 可靠度预计是在系统的整个设计过程中，根据系统的组成（包括元件、部件、分机、分系统等）、系统的功能、系统的作战使用环境、系统的降额使用情况、系统的工作时间等，估算出分机、分系统和系统的可靠度，并与总体设计部门分配的可靠性指标相比较，判断整个系统是否满足了军方提出或预期的可靠性指标要求的工程方法。它是一个由局部到整体，由小到大，由下到上的综合过程，是 MWS 可靠性设计的重要环节之一。

进行 MWS 可靠度预计的目的是：

（1）预计各分系统的可靠度，作出能否满足总体设计部门分配给各分系统的可靠性指标要求的判断。

（2）通过预计，了解分系统及其部件或元器件可靠性之间的关系，以便提出改进分系统可靠性的措施。

（3）预计的最主要作用是找出对系统失效率影响最大的部件或元器件，以便采取必要的改进办法，并把设计精力集中在对改进系统可靠性最有利的地方。

（4）如果经过可靠度预计证明，按一般设计和选用一般的部件或元器件能达到可靠性要求，则可以节省不必要的重新设计和节省研制费用。

预计系统可靠度的方法有很多种。对于不同的研制对象和不同的研制阶段，其所采用的方法也不同。对于元器件的

失效率预计，一般采用应力分析法；对于设备、整机的可靠度预计，可以用元器件计数法、相似设备法、相似功能法、相似电路法、有源器件法等；对于系统的可靠度预计，一般可采用数学分析法（上下界限法、状态空间法、网络图法、故障树法、相似法和综合法等）和模拟法（蒙特卡洛法）。数学分析法需要建立系统的数学模型，然后对数学模型的方程式求解。当系统很复杂，不能建立精确的数学模型时，就要采用模拟方法，一般为蒙特卡洛法。

可靠度预计方法如图 2.1 所示。

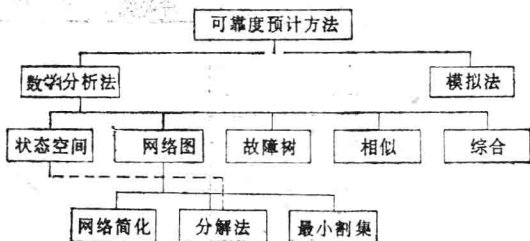


图 2.1 可靠度预计方法

上述提及，在系统研制的不同阶段，所采用的可靠度预计方法也各不相同。在方案论证阶段，对具体采用哪些元器件，详细数量、型号等并不很清楚，这时，只能采用元器件计数法，根据估计出的元器件总数进行快速预计，以便进行不同设计方法的对比。在具体的设计完成后，还要利用数学模拟法，进行精确预计。在设计各个阶段，应用各种预计方法逐级预计。由此可见，在整个系统研制过程中，可靠度预计是要进行多次，才能得到比较满意的结果。但是，不管对系统、分系统、设备或元器件，若要进行精确预计，都必须应用应力分析法来预计元器件的应用失效率。