



装备寿命周期使用保障的 理论模型和设计技术

RMS参数组合分析的最新进展

丁定浩 陆军 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

装备寿命周期使用保障的 理论模型和设计技术

RMS 参数组合分析的最新进展

丁定浩 陆军 著

电子工业出版社
Publishing House of
北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书充实和创建了系列可靠性、维修性、备件保障性理论模型，并综合归纳成装备寿命周期使用保障的理论模型和设计技术。内容包括创建了能执行任务率、任务成功率模型，完善了战备完好率和使用可用度模型，给出了从顶层参数到现场更换模块可靠性、维修性、备件保障性的系列分析设计模型。

本书为系统和电路设计师进行可靠性、维修性、备件保障性设计提供指导，为高等学校电子信息技术相关专业的研究生和高年级本科生学习提供参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

装备寿命周期使用保障的理论模型和设计技术 / 丁定浩，陆军著. —北京：电子工业出版社，2011.10

ISBN 978-7-121-14625-1

I. ①装… II. ①丁… ②陆… III. ①电气设备—设备时间利用率—研究 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 190980 号

策划编辑：刘宪兰

责任编辑：徐云鹏 特约编辑：张燕虹

印 刷：涿州市京南印刷厂

装 订：涿州市桃园装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：44 字数：1126 千字

印 次：2011 年 10 月第 1 次印刷

印 数：2000 册 定价：105.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

Preface

前言

本书是作者长期从事可靠性、维修性、备件保障性（RMS）理论研究和产品可靠性、维修性、备件保障性系统设计成果的总结。

本书的目的是，把原本相互关联的可靠性、维修性和备件保障性归并为一体，使用“寿命周期使用保障的理论模型和设计技术”来表达。在等同采用美国 MIL 标准中对装备的使用保障定义为“系统设计特性和计划的保障资源能满足平时战备及战时使用要求的能力”的 GJB 1371—92《装备保障性分析》军用标准的基础上，提出了定义为“整个寿命周期内持续保持成功使用的概率”作为可靠性、维修性、备件保障性的顶层参数指标。

任务成功率、能执行任务率和使用可用度就是顶层参数指标的具体体现。

任务成功率是新定义的参数，它不同于任务可靠度，任务可靠度是单次任务持续时间内完成规定功能的概率，任务成功率是整个寿命周期内持续保持实现规定功能的概率。

能执行任务率是平均实际工作时间与规定工作之比，实际上应该是整个寿命周期内实际工作时间与要求工作时间之比，也就是要求工作时间的能利用率。但这一顶层参数至今仅有定义，未见数学理论模型。作者导出了这一参数的数学模型，使之由原来局限于试验评估作用转向系统分析和工程设计。

适用于任务剖面为间断工作状态的任务成功率和能执行任务率，在整个寿命周期内持续保障任务成功概率和要求工作时间的利用率，基础是系统的战备完好率。仅涉及维修保障的早期的战备完好率模型，无法适应装备现场更换单元模块化的当今，作者已经导出包含维修和备件保障的新的战备完好率模型，为任务成功率和能执行任务率模型做了铺垫。

使用可用度是公认的可靠性、维修性、保障性的顶层参数之一，它也是实际工作时间与要求工作时间之比，与能执行任务率相当；不同之处是，它要求的工作时间是日历时间，因而适用于任务剖面为连续工作状态之中。

作者认为，现行的使用可用度模型适用于可靠性串联结构和停机检修的冗余结构，对联机检修的冗余结构要做相应修正，而且，在使用可用度

中,对冗余结构通常适用的是联机检修,因为停机检修,可用度不升反降,而联机检修的速度不仅是故障定位、拆卸安装、参数调校,首先要有备件保障。因此,书中对任务可靠度和使用可用度模型中的联机检修冗余结构的传统模型均做出相应的修正。

书中重点之一是对备件保障的阐述。首先要说明为什么在资源保障中只列入电子、机电功能更换模块备件,而没有列入电、气、油、液能源和建筑、运输、设备、工具、资料、消耗器材、人员培训等保障资源。原因在于前者是寿命离散显著的随机变量,后者是离散性可以忽略的非随机变量,这些资源与装备使用保障性之间是 0、1 关系或确定性的关系,在概率模型中无须体现。例如,装备缺少能源,装备使用保障概率为零,能源充足,这一因素的装备使用保障概率为 1,在一定的工作周期中能源只备一半,则装备在此期间装备使用保障概率等于 50%。这些都是按照常规的简单计算就能得到,无须列入复杂的随机变量函数之中。不列入装备使用保障概率模型之中,根本不是这些资源对使用保障不须考虑,恰好相反,没有这些资源,装备的使用保障等于零,也就是说,这些资源及其数量的保障,是装备使用保障的必备条件。反之,上述更换功能模块备件及其在规定周期中的数量,是装备使用保障概率高低的决定因素之一。当某种更换功能模块在规定的工作周期中备有 n 块,装备在规定的工作周期中这一模块发生故障次数大于 n ,则现场缺少这一备件,装备只能停止使用,直到备件到达现场,才能恢复使用。由于装备发生故障是随机的,因而 n 块模块能否保障使用也是随机的。这就是资源保障中只列入电子和机电更换模块的原由。

迄今为止,除了明确部件的保障概率采用泊松分布外,在使用可用度模型中的停机时间中给出了一个以 $MLDT$ 表示的平均保障延误时间参数,在系统备件保障与部件备件保障关系中,国军标 $GJB 4355-2002$ 中明确系统的备件保障概率等于包含的部件中量值最低的备件保障概率,以及美国海军给出了计算备件延误时间的图示方法,但图中参数没有交代来源,尚未见到可以实际进行分析、设计的可操作的系统备件保障概率的系列模型。在这方面,只有国外开发的计算机辅助仿真软件,只给结果,不交代仿真模型,合理性、正确性难辨。

本书首次给出了可以实际操作的备件不同供应体制、备件不同补充方式的备件延误时间系列理论模型,可以用于任务成功率、能执行任务率、使用可用度、战备完好率模型之中,为备件最优配置,降低装备的使用维修费用奠定基础 and 创造了优化设计的条件。

同时,在可靠性、维修性和备件保障性的专项领域中,针对实际工程的需求,也导出了新的理论设计模型。下面就主要的理论模型列举如下。

在可靠性领域中,提出了权联结构模型。它反映了除可靠性 0、1 状态外实际存在的第三种状态。0 态表示可靠状态,1 态表示故障状态,第三态表示功能降级状态,权联结构就是定量描述了存在第三状态的概率。

另一类是反映电路结构性能与可靠性相关联的模型。例如射频收发相控阵天线可靠性模型,国内外使用表决结构模型描述,这与实际工程的可靠性有较大的差距,书中导出了两类相控阵天线阵模型:一类是一般性的相控天线阵模型,另一类是描述超低副瓣的相控天线阵模型。这些模型更加符合对实际结构可靠性的描述。

在信息传输网络中,对链路信息传输容量有限的条件下,导出了新的计及链路信息传输容量有限条件下的可靠性和可用性模型。这一模型把信息受限的定量转化为可靠性和可用性的定量降低,从而规避了两个极端的处理方式:一是不计传输信息受限的影响,二是传输信息容量程度不同的下降,均作为系统发生失效来处理。

在使用可用性领域中，创建了三个重要的模型。

(1) 网络最小割集直接生成模型。最早生成最小割集的模型，都是由最小路集或最小树集转化生成，当网络复杂性上升、转化生成不可能时，唯一途径是直接生成。但迄今为止，历史上多次发表过直接生成最小割集的文献，最后发现大量最小割集被遗漏。

(2) 定期预防维修的无人值守的使用可用度模型。它填补了可靠性或可用性在无人值守领域中的空白。

(3) 在节点分割集基础之上创建了多次节点分割集的模型。这对提升复杂网络的分析计算速度有重要意义，有助于解决复杂网络的“组合爆炸”难题。

在维修性领域中，提出和建立了平均维修延误时间模型，修正了同时检修多个单元条件下的修复概率和平均修复时间模型，导出了有限维修设施条件下多单元逐一检修的修复概率和平均修复时间模型。

在备件保障性领域中，提出和创建了新的平均备件保障概率模型，它真实反映了在使用可用度和战备完好率模型中备件得到保障的概率。这是建立消耗性备件的延误时间模型的基础；同时指出可修复备件保障传统模型的局限性，建立了可修复备件延误时间的系列模型。

除了各种理论模型以外，为了各种复杂模型的实际使用，本书还给出了一批计算机辅助分析设计的通用程序。可以实际用于计算或设计，以大大减轻设计师的负担。

书中列举了一批示例，以利于在实际设计工作中提供启示。

本书为系统和电路设计师进行可靠性、维修性、备件保障性设计提供指导，为高等学校电子信息技术相关专业的研究生和高年级本科生学习提供参考。

关于本书的顺利出版，对中国电子科学院的大力支持，王小谟院士对本书的审阅，参与本书著作工作的骆少泽、朱金兰、丁捷、傅杰、丁蕾、陈斌斌、曹晨、徐山峰一并表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，成书时间仓促，缺点、错误在所难免，恳请读者批评指正。

丁定浩 陆军
2011年春

CONTENTS

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 可靠性理论及其工程的发展进程.....	2
1.2 可靠性、维修性和保障性工程发展过程的特点.....	2
1.3 建立机电模块整件可靠性设计文档是巩固可靠性工程管理的关键.....	4
1.4 开发计算机辅助可靠性设计分析软件.....	5
1.5 收集、使用现场可靠性数据信息的极端重要性.....	5
1.6 创建装备使用保障的新模型以适应装备的发展更新.....	6
1.7 降低寿命周期费用是可靠性设计的目标.....	6
第 2 章 可靠性、维修性、保障性参数指标体系	9
2.1 建立可靠性、维修性、保障性参数指标体系的意义.....	10
2.2 可靠性、维修性、备件保障性参数指标的框架体系.....	10
2.3 可靠性、维修性、备件保障性参数指标的统计定义.....	12
2.4 可靠性、维修性、备件保障性主要参数的数学模型.....	14
2.5 可靠性、维修性、保障性顶层参数指标的正确选择.....	16
第 3 章 相关的基础数学	27
3.1 集合的基本概念.....	28
3.1.1 集合的表示方法.....	28
3.1.2 集合间的关系.....	28
3.2 布尔代数.....	29
3.3 概率论基础.....	30
3.3.1 事件与概率.....	31
3.3.2 事件之间的关系.....	31
3.3.3 事件的频率和概率.....	32
3.3.4 排列与组合.....	33
3.3.5 古典概率模型与概率的性质.....	33
3.3.6 条件概率与事件的独立性.....	36

3.4	随机变量及其分布函数	39
3.4.1	随机变量及其分布函数	39
3.4.2	离散型随机变量的分布率	40
3.4.3	连续型随机变量的分布函数	42
3.4.4	二元随机变量及其分布函数	44
3.4.5	随机变量函数的分布	46
3.5	随机变量的数字特征	50
3.5.1	随机变量的数学期望	51
3.5.2	随机变量的方差	52
3.5.3	切比雪夫不等式	54
3.6	卷积和积分变换	54
3.6.1	卷积	54
3.6.2	拉普拉斯变换和 LS 变换	55
3.6.3	指数函数与幂函数相乘的不定积分	57
3.6.4	指数函数与幂函数相乘的定积分	57
3.7	回归分析	58
3.7.1	一元线性回归	58
3.7.2	化曲线为直线回归	60
3.7.3	多元线性回归	62
3.8	矩阵代数	63
3.8.1	矩阵的代数运算	63
3.8.2	矩阵特殊形式	65
3.8.3	矩阵求逆	66
3.9	马尔柯夫随机过程	66
3.9.1	状态的随机转移及其转移概率	67
3.9.2	马尔柯夫随机过程的转移概率矩阵	69
3.9.3	马尔柯夫随机过程的状态概率	70
3.9.4	马尔柯夫随机过程稳态概率的求解	73
3.10	非马尔柯夫随机过程	74
3.10.1	更新过程	75
3.10.2	补充变量法	80
3.10.3	马氏更新过程	86
3.11	排队论	101
3.11.1	消失制服务与空闲状态的排列的相互关系	102
3.11.2	消失制的服务与空闲状态的概率	103
3.11.3	消失制服务系统的效率指标	105
3.11.4	有限等待制服务与空闲状态的排列和相互关系	108
3.11.5	有限等待制排队系统的稳态解	110
3.11.6	队长有限等待制服务系统的主要参数	111

3.11.7	等待制服务系统的主要参数	116
3.12	可靠性数字仿真	118
3.12.1	数字仿真的优点与预防陷阱	118
3.12.2	可靠性、维修性和保障性中时间参数的数字仿真	118
3.12.3	可靠性、维修性和保障性的数字仿真	119
第4章	可靠性理论模型	129
4.1	引言	130
4.1.1	可靠性、维修性和备件保障性的相互关系	130
4.1.2	可靠性函数	130
4.1.3	基本可靠性与任务可靠性	132
4.1.4	可靠性框图	133
4.2	停机检修的可靠性模型	134
4.2.1	可靠性串联结构模型	134
4.2.2	可靠性并联结构模型	135
4.2.3	可靠性表决结构模型	138
4.2.4	可靠性复杂结构模型	139
4.2.5	可靠性旁待冗余结构模型	141
4.2.6	可靠性非独立冗余结构模型	145
4.2.7	多态失效的可靠性模型	148
4.2.8	可靠性与电路结构的组合模型	150
4.2.9	可靠性权联结构模型	155
4.2.10	可靠性特殊结构模型	163
4.3	定期检修的可靠性模型	166
4.3.1	定期检修的含义	166
4.3.2	定期检修的并联结构可靠度模型	167
4.3.3	定期检修的表决结构可靠度模型	168
4.3.4	定期检修的非独立冗余结构的可靠性模型	169
4.3.5	定期检修的旁待冗余结构的可靠性模型	170
4.4	联机检修的可靠性模型	171
4.4.1	联机检修并联结构的可靠性模型	171
4.4.2	联机检修表决结构的可靠度模型	174
4.4.3	联机检修旁待冗余结构的可靠度模型	175
4.4.4	计及备件保障联机检修冗余结构的可靠度模型	177
第5章	网络结构的可靠性模型	179
5.1	最小树集与最小割集分析法	180
5.1.1	最小树集模型	180
5.1.2	最小割集模型	181

5.1.3	变相交和为不交和算法	182
5.2	节点分割集	191
5.2.1	节点分割集模型	191
5.2.2	节点分割集的计算方法	191
5.2.3	多次节点分割集模型	196
5.3	直接生成割集的新方法	207
第 6 章	可靠性系统设计	215
6.1	系统可靠性方案的权衡和择优	216
6.1.1	系统方案可靠性基础设计	216
6.1.2	多种方案的权衡和择优	216
6.1.3	采用性能与可靠性兼容体制	218
6.2	可靠性指标的预计和分配	219
6.2.1	可靠性预计	219
6.2.2	可靠性分配	220
6.3	系统简化设计	229
6.3.1	编制软件实现硬件功能	229
6.3.2	一种电路实现多种功能	230
6.3.3	一种电路多次使用取代同时使用多种电路	230
6.3.4	数字逻辑电路的化简	232
6.4	故障软化设计	233
6.4.1	功能转换设计	233
6.4.2	性能退化设计	234
6.4.3	规避主要失效模式的设计	234
6.5	系统冗余设计	236
6.5.1	整体冗余与单元冗余	237
6.5.2	工作冗余与旁待冗余	238
6.5.3	冗余结构的停机检修与联机检修	238
第 7 章	可靠性工程设计	239
7.1	元器件的正确选型	240
7.1.1	元器件型号的环境适应性	240
7.1.2	元器件性能的适应性	240
7.1.3	元器件用途的适应性	240
7.2	热电应力的一体化设计	244
7.3	应力负荷降额设计	245
7.4	热设计的核查分析	248
7.4.1	传导散热模型	248
7.4.2	自然冷却的对流散热模型	252

7.4.3	强制风冷的对流散热模型	253
7.4.4	液冷散热模型	258
7.4.5	辐射散热模型	263
7.5	核查电磁兼容设计	263
7.5.1	电路的接地	263
7.5.2	电路的电磁屏蔽	264
7.5.3	电路的滤波	264
7.5.4	屏蔽电缆的接地	264
7.6	参数容差设计	266
7.6.1	参数偏差的对消设计	266
7.6.2	最坏情况分析设计	267
7.6.3	矩法分析设计	270
7.6.4	蒙特卡罗试验设计	273
7.7	接插可靠性和电路接口匹配性设计	274
7.7.1	接插可靠性设计	275
7.7.2	电路接口匹配设计	276
7.8	失效模式效应分析与故障安全设计	280
7.8.1	失效模式效应分析的重点	280
7.8.2	失效模式效应分析的主要方法	282
7.8.3	故障安全设计的途径	288
7.9	抗暂态效应设计	291
7.9.1	暂态效应引起的失效现象	291
7.9.2	暂态效应的检查方法	291
7.9.3	半导体器件瞬态过载的防护	292
7.10	潜在通路分析	294
第 8 章	可靠性试验设计和数据分析	297
8.1	失效信息的积累和分析	298
8.1.1	可靠性试验的作用和目的	298
8.1.2	可靠性实验信息的分析和处理	298
8.1.3	根据实验信息确定失效率的方法	299
8.2	可靠性增长试验	313
8.2.1	可靠性增长的基本概念	313
8.2.2	失效性质的鉴别	313
8.2.3	增长潜力的判别	314
8.3	大型整机可靠性鉴定的分步试验	319
8.3.1	整机分步试验的含义和条件	319
8.3.2	整机分步、整机整体试验时间与故障计数的关系	320
8.3.3	整机分步试验方案的优化组合	320

8.4	任务可靠度的鉴定试验方法	321
8.4.1	基本可靠性符合要求不能保证任务可靠性达标	322
8.4.2	任务可靠度的验证试验方案	323
8.4.3	成功率与基本可靠度同时验证的试验规则和失效计数方法	323
8.4.4	说明试验方案的示例	325
第9章	维修性理论模型和工程设计	329
9.1	引言	330
9.2	维修性参数及其相互关系	330
9.2.1	修复概率	330
9.2.2	维修密度	331
9.2.3	修复率	331
9.2.4	平均修复时间	332
9.2.5	平均维修延误时间因子	333
9.2.6	修复率为常数条件下的维修性参数	333
9.3	同时检修多个单元的维修性模型	334
9.3.1	同时检修多个失效单元的修复概率	334
9.3.2	同时检修多个失效单元的维修密度	335
9.3.3	同时检修多个失效单元的修复率	335
9.3.4	同时检修多个失效单元的平均修复时间	336
9.3.5	同时检修多个失效单元的平均维修延误时间因子	336
9.3.6	修复率为常数时同时检修多个失效单元的维修性参数	337
9.4	多单元等待检修的维修性模型	339
9.4.1	引言	340
9.4.2	建立反映动态维修过程的状态方程	340
9.4.3	多单元等待维修的通用模型	343
9.4.4	多个不同单元等待维修模型	344
9.4.5	多单元的平均维修延误时间因子的仿真计算	350
9.5	维修性系统设计	353
9.5.1	引言	353
9.5.2	维修性指标优化分配	353
9.5.3	机内检测设计	355
9.5.4	检测点优化设计	359
9.5.5	安装场所和设备外部可达性设计	366
9.5.6	预防维修对象的鉴别和预防维修的内容	367
9.6	维修性工程设计	377
9.6.1	引言	377
9.6.2	故障检测定位时间设计	378
9.6.3	拆卸更换安装时间设计	383

9.6.4	参数调整校核时间设计	383
第 10 章	备件保障理论模型和工程设计	385
10.1	电子和机电功能更换模块备件保障的基础概念	386
10.2	初始备件保障理论和配置优化的工程设计	387
10.2.1	初始备件保障概率模型	387
10.2.2	系统初始备件保障概率模型	390
10.2.3	系统初始备件保障的优化设计	391
10.3	备件平均保障概率的理论模型	396
10.3.1	引言	396
10.3.2	单个部件的备件平均保障概率模型	397
10.3.3	系统备件平均保障概率模型	398
10.4	平均备件延误时间模型	402
10.4.1	引言	402
10.4.2	部件平均备件延误时间	403
10.4.3	系统平均备件延误时间	404
10.4.4	现场与备件供应站两站点的平均备件延误时间	407
10.4.5	近距离备件库房与备件供应站两站点的平均备件延误时间	408
10.4.6	现场、备件库房与备件供应站三站点的平均备件延误时间	410
10.4.7	现场、中继站与备件供应站三站点的平均备件延误时间	412
10.4.8	检修设施有限的备件维修延误时间	420
10.5	消耗性备件的配置方案设计	422
10.5.1	引言	422
10.5.2	备件定期补充方式的平均备件延误时间	423
10.5.3	备件实时补充方式的平均备件延误时间	426
10.5.4	备件定数补充方式的平均备件延误时间	432
10.6	可修复备件的配置方案设计	438
10.6.1	引言	438
10.6.2	现行可修复备件保障概率模型的局限性	439
10.6.3	可修复备件的平均备件延误时间模型	441
10.6.4	可修复备件不同供应体制和不同补充方式下的平均备件延误时间模型	442
10.7	寿命周期备件保障的优化设计	448
10.7.1	寿命周期备件使用保障优化设计的目标和内容	448
10.7.2	寿命周期备件保障费用分析	449
10.7.3	系统备件保障方案的优化设计	456
第 11 章	战备完好率系列理论模型	473
11.1	战备完好率的基本概念	474
11.2	战备完好率的基本理论模型	474

11.3	整机与整机群体的战备完好率模型	477
11.3.1	整机就位维修的战备完好率模型	477
11.3.2	整机即时维修的战备完好率模型	481
11.3.3	任务持续时间或(和)再次出动时间不同的整机战备完好率模型	482
11.3.4	多机群体的战备完好率模型	483
11.3.5	多机群体系统中存在冗余单机的战备完好率模型	484
11.4	串联结构的系统战备完好率模型	488
11.4.1	串联结构的系统与组成单元的平均延误时间之间的相互关系	488
11.4.2	现场、备件供应站两站点体制的串联结构的系统战备完好率模型	488
11.4.3	近距离备件库、备件供应点两站点的串联系统战备完好率模型	489
11.4.4	现场、备件库房与备件供应站三站点体制的串联结构的系统战备完好率模型	496
11.4.5	现场、中继站、备件供应站三站点体制的串联结构的系统战备完好率模型	498
11.5	冗余结构的系统战备完好率模型	502
11.5.1	冗余结构中单元失效状态的分析	502
11.5.2	冗余结构的平均备件延误时间	503
11.5.3	冗余结构的平均维修延误时间	504
11.5.4	冗余结构的战备完好率模型	505
11.6	单元由串并联合成的串联系统战备完好率模型	507
11.6.1	最简串并联结构的失效状态模型	507
11.6.2	最简串并联结构各失效状态下的平均维修和备件延误时间模型	512
11.6.3	包含冗余结构作为等效串联单元的系统战备完好率近似模型	515
11.7	由复杂单元组成的系统战备完好率模型	518
11.7.1	功能层次之间战备完好率的综合	518
11.7.2	由复杂单元组成的串联结构的系统战备完好率模型	518
11.7.3	由复杂单元组成的冗余结构的系统战备完好率模型	539
第 12 章	战备完好率的工程设计	543
12.1	引言	544
12.2	同步进行任务可靠度和战备完好率设计	544
12.3	战备完好率和再次出动时间指标的论证	545
12.4	平均延误时间的分配	545
12.5	平均维修与备件延误时间的分配	550
12.6	更换模块划分与更换模块分级的权衡设计	550
12.6.1	基础更换模块划分与分级权衡设计的基本概念	550
12.6.2	不同基础更换模块的平均数量设计	551
12.6.3	维修能力和基础更换模块维修性设计	555
12.7	现场备件优化配置	560
12.8	LRU 转化 SRU 设计	566
12.9	战备完好率的设计步骤	572

第 13 章 能执行任务率和任务成功率模型	579
13.1 引言	580
13.2 任务成功率模型	580
13.2.1 任务成功率定义	580
13.2.2 任务成功率模型	581
13.2.3 停机检修的复杂系统任务成功率模型	584
13.2.4 联机检修的复杂系统任务成功率模型	585
13.3 能执行任务率的基础模型	590
13.3.1 能执行任务率的定义和它的适用性	590
13.3.2 能执行任务率的基础模型	591
13.4 能执行任务率的单一结构模型	596
13.4.1 单一串联结构的能执行任务率模型	597
13.4.2 单一并联结构的能执行任务率模型	599
13.4.3 单一表决结构的能执行任务率模型	601
13.5 能执行任务率的复杂结构模型	604
13.5.1 串联复杂结构的能执行任务率模型	604
13.5.2 并联复杂结构的能执行任务率模型	607
13.5.3 表决复杂结构的能执行任务率模型	613
13.5.4 旁待冷备表决复杂结构的能执行任务率模型	617
13.5.5 高层复杂结构能执行任务率模型	623
第 14 章 使用可用度的理论模型和设计技术	629
14.1 使用可用度的基本概念	630
14.1.1 引言	630
14.1.2 瞬态可用度和稳态可用度	630
14.1.3 停机检修使用可用度和联机检修使用可用度	632
14.2 使用可用度的基本参数	633
14.2.1 引言	633
14.2.2 平均预防维修时间	634
14.2.3 平均备件延误时间和平均修复时间	634
14.2.4 联机检修冗余结构的平均致命故障间隔时间参数	635
14.3 单一串联和单一冗余结构的使用可用度模型	638
14.3.1 单一串联和单一冗余结构的使用可用度的含义	638
14.3.2 单一串联结构的使用可用度模型	638
14.3.3 单一并联冗余结构的使用可用度模型	642
14.3.4 单一表决冗余结构的使用可用度模型	643
14.4 复杂结构的使用可用度模型	644
14.4.1 复杂结构的含义	645
14.4.2 复杂结构的稳态固有可用度的精确模型	645

14.4.3	复杂结构的稳态固有可用度的近似模型	649
14.4.4	复杂结构的使用可用度的近似模型	652
14.5	网络结构的使用可用度模型	660
14.5.1	网络结构的含义和定义	660
14.5.2	网络整体的使用可用度模型	660
14.5.3	节点脱网加权网络结构的使用可用度模型	666
14.5.4	计及链路容量的网络使用可用度模型	667
14.6	无人值守系统的使用可用度	673
14.6.1	引言	673
14.6.2	整机冗余体制的预防维修使用可用度	673
14.6.3	分机冗余体制的预防维修使用可用度	676
	参考文献	681

第1章

CHAPTER ONE

绪论