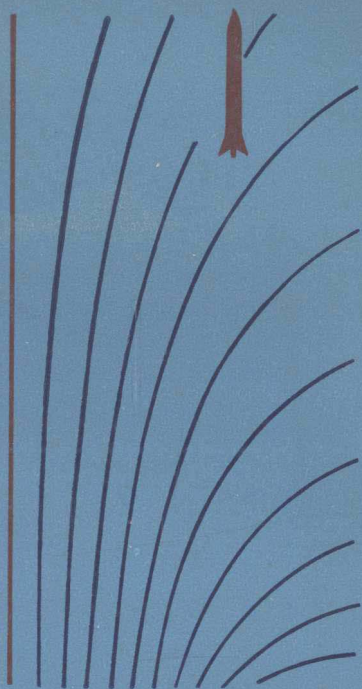




火箭发动机可靠性 理论基础

国防工业出版社

火箭发动机可靠性理论基础

〔苏〕E. B. 伏尔科夫 P. C. 苏达科夫

T. A. 舍里津 著

华 棣 顾明初 译



国防工业出版社

火箭发动机可靠性理论基础

内 容 简 介

书中阐明了不可复原系统可靠性理论的某些问题，并在此基础上叙述了液体和固体火箭发动机可靠性的一系列问题。叙述了在设计 and 试制阶段上液体火箭发动机和固体火箭发动机主要组件的可靠性指标的计算方法。讨论了火箭发动机的故障状态及其预测和监测的方法，并且分析了用其元件备份的方法提高发动机可靠性的可能。

本书适用于在火箭技术领域及在相邻领域中工作的专业人员，对于相应专业的高等学校教师和工农兵学员也是有用的。

Основы Теории Надежности
Ракетных Двигателей
Е.Б.Волков Р.С.Судаков
Т.А.Сырины
《Машиностроение》1974

*

火箭发动机可靠性理论基础

[苏]Е. Б. 伏尔科夫 Р. С. 苏达科夫 Т. А. 舍里津 著
华 棣 顾明初 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 13³/₄ 352 千字

1977年4月第一版 1977年4月第一次印刷 印数：0,001—2,700 册

统一书号：15034·1522 定价：1.70元

目 录

原序	7
----------	---

第一部分 不可复原系统的可靠性理论基础

第一章 概率论与数理统计学的初步概念	9
1.1 概率论的初步概念	9
1.2 数理统计学的初步概念	50
第二章 不可复原系统在设计阶段上的可靠性	74
2.1 系统工作的物理模型	74
2.2 系统元件的可靠性指标	83
2.3 不超限方法	95
第三章 不可复原系统在试制和批生产阶段上的可靠性	127
3.1 潜力试验和验证可靠性要求的问题	128
3.2 额定试验及考虑事前信息问题	135
3.3 批生产条件下产品抽检时的编组	143
3.4 串联系统可靠性指标的置信区间	154
3.5 在不同条件下进行试验时,对事前信息的考虑。允许作 改进的试验模型	168
3.6 通过试验以核实可靠性指标的要求	176

第二部分 火箭发动机的可靠性

第四章 火箭发动机的可靠性指标及其评定问题	187
4.1 火箭发动机可靠性的一般问题	187
4.2 火箭发动机的可靠性指标	192
第五章 计算火箭发动机组合件可靠性指标的几个问题	199
5.1 液体火箭发动机组合件的可靠性指标	199
5.2 固体火箭发动机部件的可靠性指标	222

5.3 关于火箭发动机设计的几个统计问题	257
----------------------------	-----

第三部分 预测和提高发动机可靠性的方法

第六章 发动机的故障状态及其监测方法	264
--------------------------	-----

6.1 故障状态的特点	264
-------------------	-----

6.2 状态的预测	271
-----------------	-----

6.3 故障状态的模拟	282
-------------------	-----

6.4 监测参数	296
----------------	-----

6.5 故障状态的识别	306
-------------------	-----

第七章 工作能力的自动监测系统	325
-----------------------	-----

7.1 监测方法和系统分类	325
---------------------	-----

7.2 二维分布密度的关系式	331
----------------------	-----

7.3 监测系统的误差	333
-------------------	-----

7.4 减少监测误差的方法	343
---------------------	-----

7.5 监测系统传感器的调整	349
----------------------	-----

7.6 监测系统和对象的相互作用	352
------------------------	-----

7.7 在独立的发动机中采用故障保护系统的效率	369
-------------------------------	-----

第八章 用备份作为提高发动机可靠性的方法	375
----------------------------	-----

8.1 备份方法	375
----------------	-----

8.2 大型动力装置的备份方法	390
-----------------------	-----

8.3 有备份系统的概率模型	395
----------------------	-----

8.4 备份参数对保护对象正常工作概率的影响	409
------------------------------	-----

8.5 备份的效率	420
-----------------	-----

附录	425
----------	-----

参考文献	436
------------	-----

火箭发动机可靠性理论基础

〔苏〕E. B. 伏尔科夫 P. C. 苏达科夫

T. A. 舍里津 著

华 棣 顾明初 译

国防工业出版社

译 者 的 话

发动机是运载火箭的三大分系统(弹体、控制系统和发动机)之一。显而易见,发动机的可靠性对火箭能否完成其飞行任务有着极为重要的意义。

随着导弹武器和空间技术的不断发展,对火箭性能的要求也在日益提高。这就促使发动机必须强化工况和减轻结构重量。同时,对发动机也提出了许多新的使用要求。例如实现全天候机动发射,在外层空间多次起动等等。此外,现代火箭发动机,特别是大型发动机,其研制周期和费用均是很可观的。所有这些都强调表明必须十分重视发动机可靠性的研究工作。

概率论和数理统计是研究可靠性的有力工具,并在此基础上形成了可靠性理论。目前,许多国家都在这方面做了很多工作,也有不少著作论述。但是,就火箭发动机可靠性理论而言,发表的著作尚很少。本书比较系统地叙述了火箭发动机的可靠性理论,是这方面的一个初步尝试。该书的可取之处就在于此。当然,书中叙述的内容都是偏重于理论的,与工程中的实际应用尚有一定距离。因此,火箭发动机可靠性理论中的许多具体问题还有待于从事这方面工作的人员通过自己的实践来解决。

本书第二、三部分介绍计算、监测和提高火箭发动机可靠性的方法,是全书的重点。第一部分则是关于概率论和数理统计基础知识的一些介绍。为了更好地了解书中的内容,建议读者参阅一些其它的概率论、数理统计和可靠性理论方面的书籍。

原书在公式、符号、图表以及文字方面都有不少错误,在翻

火箭发动机可靠性理论基础

内 容 简 介

书中阐明了不可复原系统可靠性理论的某些问题，并在此基础上叙述了液体和固体火箭发动机可靠性的一系列问题。叙述了在设计 and 试制阶段上液体火箭发动机和固体火箭发动机主要组件的可靠性指标的计算方法。讨论了火箭发动机的故障状态及其预测和监测的方法，并且分析了用其元件备份的方法提高发动机可靠性的可能。

本书适用于在火箭技术领域及在相邻领域中工作的专业人员，对于相应专业的高等学校教师和工农兵学员也是有用的。

Основы Теории Надежности
Ракетных Двигателей
Е.Б.Волков Р.С.Судаков
Т.А.Сырицын
《Машиностроение》1974

*

火箭发动机可靠性理论基础

[苏]Е. Б. 伏尔科夫 Р. С. 苏达科夫 Т. А. 舍里津 著
华 棣 顾明初 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 13³/₄ 352 千字

1977年4月第一版 1977年4月第一次印刷 印数：0,001—2,700 册

统一书号：15034·1522 定价：1.70元

目 录

原序	7
----------	---

第一部分 不可复原系统的可靠性理论基础

第一章 概率论与数理统计学的初步概念	9
1.1 概率论的初步概念	9
1.2 数理统计学的初步概念	50
第二章 不可复原系统在设计阶段上的可靠性	74
2.1 系统工作的物理模型	74
2.2 系统元件的可靠性指标	83
2.3 不超限方法	95
第三章 不可复原系统在试制和批生产阶段上的可靠性	127
3.1 潜力试验和验证可靠性要求的问题	128
3.2 额定试验及考虑事前信息问题	135
3.3 批生产条件下产品抽检时的编组	143
3.4 串联系统可靠性指标的置信区间	154
3.5 在不同条件下进行试验时, 对事前信息的考虑。允许作 改进的试验模型	168
3.6 通过试验以核实可靠性指标的要求	176

第二部分 火箭发动机的可靠性

第四章 火箭发动机的可靠性指标及其评定问题	187
4.1 火箭发动机可靠性的一般问题	187
4.2 火箭发动机的可靠性指标	192
第五章 计算火箭发动机组件可靠性指标的几个问题	199
5.1 液体火箭发动机组件的可靠性指标	199
5.2 固体火箭发动机部件的可靠性指标	222

5.3 关于火箭发动机设计的几个统计问题	257
----------------------------	-----

第三部分 预测和提高发动机可靠性的方法

第六章 发动机的故障状态及其监测方法	264
--------------------------	-----

6.1 故障状态的特点	264
6.2 状态的预测	271
6.3 故障状态的模拟	282
6.4 监测参数	296
6.5 故障状态的识别	306

第七章 工作能力的自动监测系统	325
-----------------------	-----

7.1 监测方法和系统分类	325
7.2 二维分布密度的关系式	331
7.3 监测系统的误差	333
7.4 减少监测误差的方法	343
7.5 监测系统传感器的调整	349
7.6 监测系统和对象的相互作用	352
7.7 在独立的发动机中采用故障保护系统的效率	369

第八章 用备份作为提高发动机可靠性的方法	375
----------------------------	-----

8.1 备份方法	375
8.2 大型动力装置的备份方法	390
8.3 有备份系统的概率模型	395
8.4 备份参数对保护对象正常工作概率的影响	409
8.5 备份的效率	420

附录	425
----------	-----

参考文献	436
------------	-----

原 序

近几十年来在火箭制造方面所取得的一切主要成就，在很大程度上与发动机特性的改善及工作可靠性的提高有关。

发动机可靠性是指在给定的使用条件下，发动机能将其参数保持在允许范围内的特性。在设计和试制阶段上就应为发动机可靠性打下基础，在生产中应予以保证，而在装上火箭后的使用过程中则应将它保持在必需的水平上。在火箭发动机《生存周期》的所有阶段，可采取一系列提高和保证其可靠性的措施。大部分措施是在火箭发动机可靠性理论的基础上制定的。

近年来发表了许多关于火箭系统可靠性的文章，但是，至今还没有关于火箭发动机可靠性理论基础的全面而系统的阐述。

本书试图阐述液体和固体火箭发动机的可靠性问题。但仅讨论火箭发动机设计和研制工作者所感兴趣的那些问题。

由于火箭发动机是抽样可能性有限的不可复原系统，所以书中从统计数学角度着重研究不可复原系统的可靠性理论的一般问题。这项内容安排在 P. C. 苏达科夫编写的本书第一部分中。

在 E. B. 伏尔科夫和 P. C. 苏达科夫编写的第二部分中讨论了液体和固体火箭发动机各主要组件的可靠性指标的计算和评定问题（液体火箭发动机的燃烧室、贮箱、涡轮泵组件、自动器；固体火箭发动机的壳体、药柱、防热保护层）。

T. A. 舍里津编写的第三部分涉及提高火箭发动机可靠性的构思。分析了发动机的故障状态，监测发动机工作能力的方法和系统，叙述了大型火箭发动机的故障状态的出现和识别方式，用故障保护系统来防止工作中某些不正常现象的可能性。作为提高

发动机可靠性的手段，在这一部分中还讨论了发动机零、组件的备份方法。

各公式和发动机参数值采用国际单位制。发动机的参数和系统取自国外所公布的材料。

第一部分 不可复原系统的 可靠性理论基础

第一章 概率论与数理统计学的初步概念

1.1 概率论的初步概念

1.1.1 事 件

随机事件（或简称事件）的概念是最基本的概念之一。给出该概念的两种定义。

定义一^[19] 在同样条件下进行试验的结果，任何一件可能出现或可能不出现的事实，称为事件 A 。

不难通过一系列实例来理解这个定义。例如，在系统试验时可能出现或可能不出现系统故障，这就是随机事件。但是，这个定义不够模式化，因而不便于研究对于各种不同的事件进行运算。下面给出的定义二^[23]比较全面，它用到了《抽样点》、《抽样空间》和《集合》的概念。

设 R 是某些元素 e 的集合。把 e 属于 R 这一事实记为： $e \in R$ 。可以把元素 $e \in R$ 看作是实验或某项工序的可能结果，并称之为抽样点。点的数目可以是有限的或无限的。在给定的一组条件下进行一项实验时，它的一切可能结果的集合称为抽样空间，并记作 R 。这些结果中至少有一个是一定（无论如何）会出现的。

定义二 事件 A 是一些抽样点的集合，这些点是 R 的某个子集（部分）。

用符号写出来就是： $A \subset R$ 。

定义二的优点在于，它强调了这一事实，即 A 是抽样的集合。这样就可把概率论建立在集合论和测度论的牢固基础上^(23,34)。今后将用到的集合论和数理逻辑的一些符号列在表 1.1 中。

表1.1 文中用到的集合论和数理逻辑的符号

符 号	符 号 的 意 义
$\in (\notin)$	属于(不属于)
$A \subset R$	A 是 R 的子集
$\bigcap_{i=1}^N A_i$	集的交，即既属于 A_1 又属于 A_2 ，又属于 $A_3, \dots$ ，又属于 A_N 的点的集合 (集 $A_1, \dots, A_N$ 的公共部分)
$A_1 \cap A_2$	两个集 A_1 和 A_2 的交
$\bigcup_{i=1}^N A_i$	集 $A_1, \dots, A_N$ 的并，即至少属于 A_1 或 A_2 或 $A_3 \dots$ 或 A_N 诸集之中某一个集的点的集合
$A_1 \cup A_2$	两个集 A_1 和 A_2 的并
$\emptyset$	空集，即不含任何点的集，它是任何集 A 的子集
$A = A_1 - A_2$	集 A_1 与 A_2 之差，即集 A 由集 A_1 中所有不属于集 A_2 的点所组成
$\forall$	逻辑记号：对于每一个，对于任何一个 (表示普遍性的量词)
$\exists$	存在着 (表示存在性的量词)
$\Rightarrow$	由此可得
$\Leftrightarrow$	相当于

熟悉表 1.1 后，可以确信集合论中的下列关系式：

$$A_1 \cup A_2 = A_2 \cup A_1; \quad A_1 \cap A_2 = A_2 \cap A_1; \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} (A_1 \cup A_2) \cup A_3 &= A_1 \cup (A_2 \cup A_3); \\ (A_1 \cap A_2) \cap A_3 &= A_1 \cap (A_2 \cap A_3); \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} A_1 \cap \bar{A}_2 &= A_1 - A_1 \cap A_2; \\ A_1 \cup A_2 &= A_1 \cup [A_2 - (A_1 \cap A_2)], \\ \text{而且} \quad A_1 \cap [A_2 - (A_1 \cap A_2)] &= \emptyset; \end{aligned} \quad (1.3)$$

此处 $\bar{A} = R - A$ ， $\bar{A}$ 称为 A 在 R 中的补集。

$$\bigcup_{i=1}^N A_i = A_1 \cup [A_2 - (A_2 \cap A_1)] \cup [A_3 - A_3 \cap (A_2 \cup A_1)] \cdots \cdots \bigcup_{i=1}^{N-1} [A_N - A_N \cap (\bigcup_{i=1}^{N-1} A_i)] \quad (1.4)$$

式 (1.4) 右方的集 $A_1, [A_2 - (A_2 \cap A_1)], \cdots, [A_N - A_N \cap (\bigcup_{i=1}^{N-1} A_i)]$ 互不相交。

$$\text{此外还有} \quad A_1 \subset A_2 \implies \bar{A}_2 \subset \bar{A}_1; \quad (1.5)$$

$$\left(\bigcap_{i=1}^N A_i \right) \cap \left(\bigcup_{i=1}^M A_i \right) = \bigcup_{i=1}^M A_i \cap \left(\bigcap_{i=1}^N A_i \right);$$

$$\bigcap_{i=1}^N A_i = R - \bigcup_{i=1}^N \bar{A}_i. \quad (1.6)$$

对照定义二，将集合论的符号用于事件的《语言》，则有：

$A_1 \subset A_2$ ——表示事件 A_1 的出现意味着事件 A_2 的出现 (因
在此情况下 $A_1 \cap A_2 = A_1$)；

$A = \emptyset$ ——表示事件 A 不可能发生 (不可能事件)；

$A = R$ ——表示事件 A 一定发生 (必然事件)；

$A = A_1 \cup A_2$ ——只要事件 A_1 或 A_2 中有一个出现，或者 A_1 和
 A_2 一起出现时，就会发生的事件；

$A = A_1 - A_2$ ——只出现 A_1 ，而不会同时出现 A_2 的事件；

$\bar{A} = R - A$ ——与 A 相对立的事件 (若 A 是系统试验成功，则
 $\bar{A}$ 就是失败)；

$A = A_1 \cap A_2$ ——在同一次试验中 A_1 和 A_2 都出现的事件 (或者
说，事件 A 由那些既属于事件 A_1 ，又属于事件
 A_2 的试验结果所组成)。

如果

$$\bigcup_{i=1}^N A_i = R, \quad (1.7)$$

则事件 $A_1, A_2, \dots, A_N$ 的综合称为完备群 (例如, 若 A 是成功, $\bar{A}$ 是失败, 则 $A \cup \bar{A} = R$, 即事件 A 和 $\bar{A}$ 组成完备群)。

如果集合 A_i, A_j 的所有两两之交是空集, 即

$$(1.1) \quad A_1 \cap A_2 = \emptyset, A_1 \cap A_3 = \emptyset, \dots, A_i \cap A_j = \emptyset \quad (1.8)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N; i \neq j),$$

则事件 $A_1, A_2, \dots, A_N$ 称为互不相容事件。今后我们将把 $i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N$ 简写为:

$$\forall i \in \{1, N\}; \forall j \in \{1, N\}$$

$$\text{或} \quad i = \overline{1, N}; j = \overline{1, N}.$$

如果根据某种对称条件或其它理由, 不能认为几件事件中某一件比任何别的一件更可能些, 则称它们为等可能事件。

如果几个事件: (1) 组成完备群; (2) 互不相容; (3) 等可能, 则称它们为基本事件。下面将称这种情况为基本事件概型⁽¹⁹⁾。

由于事件 $A \subset R$ 是抽样点的集合 (在特殊情况下 A 可以只含一个点, 这时 $A \in R$), 因此, 今后将研究 R 中诸集合 A 的各种总体 (各种族)。满足某些条件的诸集合构成的族称为集合域。

概率论中最常研究的是两类集合域。

1. 布尔域 F (布尔代数)。在该域内, 加于集合族的条件是:

$$\text{如果 } A \in F, \text{ 则 } \bar{A} \in F; \quad (1.9)$$

$$\text{如果 } A_1 \in F \text{ 和 } A_2 \in F, \text{ 则 } A_1 \cup A_2 \in F. \quad (1.10)$$

2. 波累尔域 B (σ -代数)。该域 B 是这样的集合族, 即除了条件 (1.9) 和 (1.10) 外, 它还满足附加条件, 也就是: 若 $A_1, A_2, \dots$ 是属于 B 的一些集合的可数序列 (即自然数系的项可与该序列的元素排列成一一对应), 则这些集合的并

$$\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i \in B. \quad (1.11)$$

条件 (1.10) 是式 (1.11) 的特殊情况。若 R 包含着有限个抽样点, 则一切可能事件的族就是布尔域。显然, 波累尔域是从