



飞机的使用可靠性和维护制度

[苏]H.H.斯米尔诺夫 主编

中国人民解放军空军第一研究所

V267/1004

飞机的使用可靠性 和维护制度

(苏) H. H. 斯米尔诺夫 主编

刘 云 译

郑吉庆、李意起 校



一九八三年五月 北京

481098

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ
И РЕЖИМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ САМОЛЕТОВ

Смирнов Н.Н.,

Андронов А.М., Владимирев Н.И.,

Лемин Ю.И.



МОСКВА «ТРАНСПОРТ»

1974

译 序

在空军的现代化、正规化建设中，如何把航空技术装备的使用、维护和修理工作建立在现代科学技术的基础上，是一个亟需研究解决的问题。这个问题正日益受到空军航空工程部门的重视，并且已开始进行了一些理论的研究和实践。为了配合进一步开展这方面的学习和研究的需要，我们本着“洋为中用”的原则，全文译出了苏联一九七四年出版的这本《飞机的使用可靠性和维护制度》，供空军的航空工程机务干部、工程院校教学人员和有关工程技术人员研究参考。

从目前世界上一些航空事业比较发达的国家的情况来看，组织实施飞机的使用和维修所应用的现代科学技术理论，除了专业的航空工程技术理论以外，主要的理论和方法是以运筹学为基础的系统工程的理论和方法，而其中应用得最广泛的理论是可靠性理论。在我国，这些方面的理论及其应用问题已经在国防和国民经济的许多不同领域进行了比较深入的研究，并出版了不少书刊资料，但是直接联系飞机的使用维修实践对这些理论问题作比较系统阐述的材料却很少。这本书在一定程度上概括了苏联在七十年代初期，对可靠性理论和其他有关理论在飞机使用和维修工作各方面具体应用的研究成果。虽然它是以在民航企业中的应用问题为研究对象的，但是书中所阐述的基本原理和方法，对于空军装备的使用和维修大都是适用的，而且理论与实际联系比较好，因此有较大的参考价值。

与美国等西方国家类似的材料相比，苏联的这本书在飞机的使用可靠性与固有可靠性的关系，飞机维修性和维修的经济性，以至故障的动态分析、维修方式、维修质量等问题上，都有它独特的观点和分析方法。特别是它对运筹学中其他一些领域（如对策论、排队论、搜索论等）在飞机使用和维修工作中的应用，以及数学规划方法（网络规划、线性规划、动态规划）在实现飞机技术使用过程最优化方面的应用，在其他材料中是少见的。当然，这样不免要使用较多的数学工具，不仅是概率论和统计数学，而且还包括泛函分析的一些基础知识（如集合论）；特别是由于飞机是属于“准单次系统”而使这些分析较为复杂。但是，由于书中有不少应用实例和实用表格，将能减少在学习中的困难。

以译者在理论和外语方面的水平，翻译这样一本书是困难的。肯定有不少错误和不当之处。原稿承空军工程学院李意起同志着重在数学方面进行了细致的校勘，有些公式和有怀疑的地方作了重新推导；最后由空军第一研究所郑吉庆同志对全文进行了校对。此外，空军第一研究所王立群同志曾阅读了原稿，指出了一些翻译上的错误；个别章节过去曾由王福龄、王利亚同志译出过，这次翻译时曾参考了他们的译稿，在此一并致谢。

译者

1982年2月

序 言

运输机的使用可靠性水平和维护制度，在很大程度上决定着运输机的使用效率和维修费用。在飞机的构造日趋复杂和使用强度不断提高的条件下，改善飞机技术使用的一些基本问题，如果不运用现代科学方法，是不可能顺利解决的。

在解决技术使用领域内的某些问题时，要采用在其他技术领域内已经广泛应用的可靠性理论的方法。但是，由于航空运输的特殊性，这些方法不能简单地搬到飞机技术使用实践中来。而且，在民航飞机上机械的、电气机械的、液压气动机械的各种系统和部件、附件的使用方面适用的，应该运用可靠性理论的方法来解决的那些问题的范围，还没有最后定型；而许多科学的方向和任务，与其说已经确定和作了详细的研究，不如说正处于提出问题的阶段。不仅如此，提高飞机使用可靠性的问题虽然迫切，但由于问题本身涉及面较广，最近几年内还难于彻底解决。因此，即使在所分析的领域内问题的局部解决，和适合于实际应用的有限研究成果，也都有很大的意义。

改善飞机技术使用的另一部分问题，要运用运筹学理论的方法来解决。这里主要涉及关于生产过程的调整和最优化的概率论的一些概念（网络规划和管理，线性规划，动态规划，等等）。这些问题也受到实际工作者的注意。

最近几年来，民航在把可靠性理论和运筹学理论运用

于改善飞机的技术使用过程和维修方式方面，进行了一系列的研究，并取得一定的成绩。但是，这些研究成果还没有被各航空企业的广大专业人员、工程师和飞行人员所了解。这是因为在航空技术装备的使用可靠性、技术使用过程的最优化和维护制度等的保障方面，至今还没有总结推广性的著作。

作者并不希图这本书所包含的全部内容都十分完整和无可争议。只是试图把民航对这一问题的研究成果加以系统化，以使基于现代科学方法解决提高航空技术装备的使用可靠性和改善使用过程的问题，能引起民航和工业部门的工作人员的注意，以及明确这一学科最近几年应当解决的问题的范围。本书的素材，都来自作者们亲自完成的或直接参与的调查和研究。

可靠性理论包括数学的、组织体系的、情报资料的、技术设备的和定性的这样一些不同的方面。

可靠性在数学方面的任务是：为预测机件使用可靠性和使用效率的指标而拟定可靠性的数学模型；为评估可靠性指标和数学模型的未知参数而拟制有关可靠性的统计资料的分析方法；为确定机件最优的维护制度而提出计算公式。

可靠性在组织体系方面的问题包括：拟定机件维修的组织结构体制；提出关于查找故障和失常现象等工作的组织实施建议。

可靠性在情报资料方面的问题包括：拟定收集可靠性情报资料的组织体系（包括可靠性服务组织）；拟制故障和失常现象统计报表的格式；拟制运用计算机的情报资料

处理系统；确定航空技术装备各种检查的内容和 实施期限；拟定分析故障和失常现象的统计方法。

可靠性在技术设备保障方面的问题包括，研制能预测、发现和排除故障和失常现象的成套技术设备。其中包括机件技术状况自动监控装置和探伤设备等。

可靠性在定性分析保障方面的任务包括，对每一个故障或失常现象进行定性的（逻辑的、工程的）分析，并提出排除和今后预防的建议。

本书对以上列举的各个方面，除了最后两个方面（技术设备方面和定性方面）以外，全都作了阐述。技术设备方面是一个专门的具体的学科，将由专门文献来讨论。定性方面的问题，在所有关于飞行器技术使用的教科书中都已经给予足够的注意。

本书按可靠性的不同方面把有关的各章编排在一起。头三章是讲可靠性理论的数学工具。第一章包含概率论的一些基本知识，在这个题目下进一步阐述了可靠性理论的一些最重要的概念，还论述了广泛使用的可靠性分析方法。第二章研究故障和失常现象的发生和发展的数学模型。利用这些模型，能根据现有的统计情报资料来估算可靠性，并提出关于提高可靠性的最有效的方法的建议。第三章是为达到上述目的而处理和应用情报资料的方法。

第四章专门讨论可靠性情报资料保障方面的问题。这一章阐述了民航现有的有关飞机使用可靠性的情报资料的收集和处理系统。第五章的内容是对提高使用可靠性的途径的定性分析。

第六章至第九章研究可靠性的组织体制问题。第六章

阐述关于飞机技术使用的理论的基本原理。第七章是维护规程的编写和修订的方法。第八章主要讲查找故障和失常现象的组织问题。第九章是机件的视情维护和视情更换。全书章节安排的顺序是，把开始就必须了解而在以后章节中又要用到的材料放在前面。

本书第一章至第三章是由 A.M. 安得罗诺夫编写的，其中第一章第四节、第二章第四节、第三章的第三和第六节是与 H.И. 符拉基米洛夫共同编写的；第四章、第五章和第八章是由 Ю.И. 列明编写的；第六章和第九章是由 H.H. 斯米尔诺夫编写的；第七章是由 H.И. 符拉基米洛夫编写的；参加编写的还有 И.Н. 柯斯托哥多夫（第四章），С.С. 阿斯塔菲耶夫（第七章）和 А.А. 依茨柯维奇（第九章）。全书的总编辑是 H.H. 斯米尔诺夫。

作者对提出批评、意见和要求的读者谨表谢意。

目 录

序言

第一章 使用可靠性的理论基础..... 1

- 第一节 概率论的一些知识..... 1
- 第二节 可靠性理论的基本概念..... 19
- 第三节 不可修机件可靠性分析的一般方法..... 29
- 第四节 可修机件可靠性分析的一般方法..... 44

第二章 故障与失常模型..... 50

- 第一节 故障与失常模型的分类..... 50
- 第二节 故障与失常的简单模型..... 55
- 第三节 可维护机件的可靠性模型..... 61
- 第四节 故障的广义模型..... 68
- 第五节 随机工作时间内的可靠性..... 72
- 第六节 用统计模拟法研究航空技术装备的可靠性... 76

第三章 使用可靠性的分析和估计方法 86

- 第一节 数理统计的基本原理..... 86
- 第二节 不可修机件可靠性模型参数的估计..... 92

第三节	可维护机件可靠性指标的估计	108
第四节	特殊情况下可靠性指标的估计	111
第五节	可修机件故障数据的统计分析	118
第六节	渐发性故障条件下的可靠性估计	144

第四章 航空技术装备使用可靠性的 情报收集与处理系统153

第一节	情报的收集与处理对评定航空技术装备可靠性的意义	153
第二节	情报的来源和对情报的要求	155
第三节	情报的收集程序	157
第四节	使用企业中航空技术装备失常现象统计工作的组织	160
第五节	失常现象统计卡片的处理	162
第六节	根据失常情报分析航空技术装备的可靠性	166

第五章 提高使用可靠性的途径 ...168

第一节	航空技术装备的可靠性和使用条件	168
第二节	飞机及其系统、附件的修理间寿命的根据问题	172
第三节	在非设计的气候条件下航空技术装备可靠性的保持	176
第四节	空勤组对熟练使用航空技术装备的保证 ...	178
第五节	维护制度的完善	182

第六节	飞机维护过程的组织和保障	182
第七节	提高维护质量的问题	199
第八节	对保持和提高航空技术装备可靠性的各种 工作的组织方法	207

第六章 飞机技术使用过程的分析 和最优化的方法211

第一节	飞机使用过程模型	211
第二节	飞机技术使用过程结构	216
第三节	飞机技术使用各种状态的持续时间的特性	227
第四节	飞机各系统机件的恰当更换概率与无故障 性的统计估计	237
第五节	飞机最优技术使用对策的确定	243
第六节	在研制飞机中改善维修工艺性用的合理附 加费用的确定	256

第七章 飞机维护规程的编写与修订264

第一节	维护规程的基本知识	264
第二节	对维护规程的要求	266
第三节	维护规程的编写程序	267
第四节	维护规程修订方法的基本规则	283

第八章 查找故障与失常现象的概率 法.....299

第一节	在飞机维护过程中合理组织查找故障与失常现象的意义	299
第二节	查找失常现象的典型概率法的应用	318
第三节	航空技术装备失常现象的特殊查找程序	339

第九章 飞机各系统机件维护和更换的视情方式352

第一节	视情方式的特点及拟定与实施的基本步骤	352
第二节	诊断制度与飞机成套机件的视情更换模型	359
第三节	机件维护作业的分组和组合成规程的最优型式	368
第四节	视情更换的机件可靠性的运算估计方法	374
第五节	机件视情更换方式的技术经济效果	379
第六节	机件视情更换方式的实验研究与使用检查	386

附录 1	标准正态分布函数 $\Phi(Z)$ 表	394
------	----------------------------	-----

附录 2	函数 $\varphi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}Z^2}$ 数值表	395
------	---	-----

附录 3	函数 e^{-x} 数值表	396
------	-----------------------	-----

附录 4	函数 $\frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}$ 表	397
------	--	-----

附录 5	函数 $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{\lambda_i}{i!} e^{-\lambda}$ 表	398
------	--	-----

附录 6	χ^2 分布分位数表	400
附录 7	航空技术装备失常现象统计卡片	401
附录 8	飞行中发现的故障和失常现象报告表	406
附录 9	故障检查派工单	407
附录10	飞机周期型维护派工单	408
附录11	飞机作业型维护派工单	409
附录12	伊尔-18飞机机体与着陆襟翼飞行 200 小 时后维护作业单	410
附录13	消除航空技术装备维护中造成差错和废品 原因的建议书	412
附录14	重新查验记录单	413
参考文献		414

第一章 使用可靠性的理论基础

第一节 概率论的一些知识

航空技术装备可靠性的保证问题，是在出现空中运输的同时产生的。当前，由于现代航空技术装备的高度复杂性和空中运输的巨大规模，这个问题已经成为特别迫切的问题。在航空事业发展最初的几个阶段，可靠性是用定性的方法来保证的，即根据工程分析的结果判明不可靠的原因，并确定排除的办法。

当前，在研究保证可靠性的各种可能方案时，还要估计每种方案涉及的经济费用。同时，必须对保证可靠性的一些方法进行定量分析。这种分析在于，建立航空技术装备失常现象发生和发展过程的数学模型，并借助这些模型来研究保证可靠性的措施的有效性。

例如，数学模型能确定某个机件发生失常现象的频率对该机件维护周期的依赖关系。有了这种关系，就便于决定在经济上最优的维护周期。这个例子说明，在保证航空技术装备的可靠性与规定航空技术装备的维护制度之间存在的联系。

可靠性的定量分析，是借助于研究随机变数和随机事件的概率论和数理统计的方法实现的。随机性正是在研究可靠性中所出现的问题的本质特性。失常现象发生的时刻，机件正常工作的持续时间等等，都是随机的。具体地

说, 假如某个机件, 不论是安装在试验台上还是在使用中, 都工作到发生故障为止, 则该机件的无故障工作持续时间 (寿命) 就可以理解为随机变数。

通常, 我们用符号 X 表示随机变数。如果这种变数有若干个, 则加上脚标, 用 $X_1, X_2, \dots$ 表示。随机变数 X 所取的或可能取的具体数值用 x 表示 (在有若干个随机变数时, 则分别用 $x_1, x_2, \dots$ 表示)。随机变数的本质特性是, 事先并不知道它取它所可能取的哪一个值。随机变数 X 从微元区间 $(x, x+dx)$ 取值 [通常说, 随机变数 X 落在区间 $(x, x+dx)$ 的可能性, 是用概率

$$P\{x < X \leq x+dx\} = f(x)dx \quad (1.1)$$

定量估计的。

式中, $P\{x < X \leq x+dx\}$ 是指给定事件 $\{x < X \leq x+dx\}$ 的概率。

$f(x)$ 是随机变数的分布密度。

分布密度 $f(x)$ 是给出随机变数分布的最重要的特征。分布密度必须满足两个条件: 它是非负的; 而且它对自变量 x 在整个数轴上的积分等于 1, 即

$$f(x) \geq 0; \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (1.2)$$

另一个最重要的特征是分布函数 $F(x)$ 在 x 点的值等于随机变数 X 取值不超过 x 的概率, 也就是随机变数 X 落在区间 $(-\infty, x)$ 内的概率。从 (1.1) 式可以看出, 分布函数 $F(x)$ 可以通过概率密度 $f(x)$ 表示为

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(y)dy \quad (1.3)$$

在上式的积分号后面, 我们把 x 换成 y , 是为了不致

于使自变量与积分上限混淆起来。另一方面, 如果分布密度 $f(x)$ 在 x 点是连续的, 则 $f(x)$ 在该点的值等于分布函数的导数。

$$f(x) = F'(x) \quad (1.4)$$

从分布密度 $f(x)$ 的性质和分布函数 $F(x)$ 的定义推出,

(x) 非负、不减、而且当自变量为 $-\infty$ 和 ∞ 时, 其值分别为 0 和 1, 即

$$F(x) \geq 0; F(x_1) \geq F(x_2), \text{ 当 } x_1 \geq x_2;$$

$$F(-\infty) = 0; F(\infty) = 1$$

如果把随机变数 X 理解为某一对象无故障工作的持续时间, 那么, 乘积 $f(x)dx$ 就是该对象在时间间隔 $(x, x+dx)$ 内的故障概率; 分布函数 $F(x)$ 的值, 就等于该对象在时刻 x 之前发生故障的概率。在可靠性理论中, 通常用**无故障工作概率** $P(x)$ 这个概念作为分布函数 $F(x)$ 的补充。无故障工作概率在 x 点的值, 等于随机变数超过 x 的概率, 即机件在时刻 x 以前无故障工作的概率

$$P(x) = 1 - F(x) = P\{X > x\}$$

函数 $P(x)$ 称为可靠性函数。分布函数 $F(x)$ 和可靠性函数 $P(x)$ 的典型图形如图 1 所示。

实际上, 常常拥有随机变数超过某个 x 值的补充信息 (其中包括机件工作到了 x 时刻而没发生故障)。当然, 这样的信息就使得随机变数取值的可能性有了变化。因此, 我们引出一个特殊的函数 $\lambda(x)$, 称为故障率。故障率在 x 点的值乘以 dx , 等于随机变数在大于 x 的条件下取值于微元区间 $(x, x+dx)$ 的概率

$$\lambda(x)dx = P\{x < X \leq x+dx / X > x\}$$