空间运载器的可靠性保证

〔苏〕A. A. 卓洛托夫
M. И. 季托夫 著
王迺斌 译
潘绍珍 校

宇航出版社

主要缩略语表

авт.(отр.)——单元试验

бр——废品

БЦВМ——航天器载数字计算机

гр——边界

гр.в——上限

гр.н——下限

ГОСТ——全苏国家标准

д——实际的

"Д"——进行修正区

доп——容许的

ДУ——动力装置

зад——给定的

"И"——继续试验区

изг——生产

ин——惯性的

им——模拟

исп——试验

кон——结构

кор——壳体

КПЭО——综合试验计划

КР——极限，临界

кс——燃烧室

лев——左

ЛКИ——设计飞行试验
МТКС——重复使用空间运输系统
НАИ——地面单元试验
неустр——未排除的
НКИ——地面综合试验
ном——额定的
об——设备
обесп.пусков——保证发射
ОЛС——最终飞行试验
ост——余下的
отс——截断的
отр——试验
п——发射
“П”——可靠性试验区
пд——固体发动机
пк——质量指标
ПЛС——预先飞行试验
ПОН——可靠性保证计划
пр——产品
прекр.отр——停止试验
р——备份的
расч——计算的
ркс——视速度调整
соб——贮箱排空系统
сов.отр——联合试验
ср——平均
ств——整流罩舱门
су——控制系统
Т——推进剂

TA——运载器

THA——涡轮泵机组

усл——条件的

усл.ед——标准单位

уст——疲劳度

ут——加载

э——有效的

экспл——使用

эл——元件，部件

ЗО——试验

opt——最佳

序　言

现阶段开发宇宙空间的特点，是靠宇航器解决科学和国民经济各种需求的范围越来越大。实现空间远景计划要求进一步完善空间运载器试验工作的组织与规划。

本书探讨了运载器的可靠性保证方法。由于试验量的缩减和试验计划的最优化，这些方法可以提高试验的效率。

工程系统试验理论中所用的数理统计，是进行具体计算的理论基础。在介绍可靠性试验验证问题时，着重介绍在试验量有限情况下的可靠性验证方法。

本书对试验过程的数学模型进行了分析，并根据这些模型给出建立预测试验时可靠性变化的方法。除建立在统计模型基础上的试验方法外，书中还描述了建立在逻辑概率模型基础上的方法。这些方法可在试验规划阶段计算要采纳的设计方案对运载器试验性质的影响。

本书探讨了对运载器及其系统进行试验的方法。计算公式可定量估算试验过程的特性（试验量、可达到的可靠性）与工程系统参数(冗余度等)的相互联系。与传统试验方法相比，这种方法可以大大缩小试验量。

书中还列举了确定最佳试验策略的方法，以及运载器系统可靠性的标准算法；研究了在资金消耗最少情况下，确定在保证要求可靠性条件下，运载器各系统的最佳冗余度和试验量问题，以及运载器各个研制阶段的可靠性保证和试验原理，列出了可用于工程计算的算法。

导 言

可靠性保证是各种工程系统制造中的最重要组成部分。

传统试验方法要求对复杂技术装备进行大量试验，也就是要耗费大量资金和时间，这种方法实不可取，必须研究新的试验方法和试验组织。因此，运载器可靠性保证计划的技术经济分析具有很大意义，它能指出试验的最合理方案。解决现代运载器可靠性保证问题的特点，是必须大大缩减试验费。

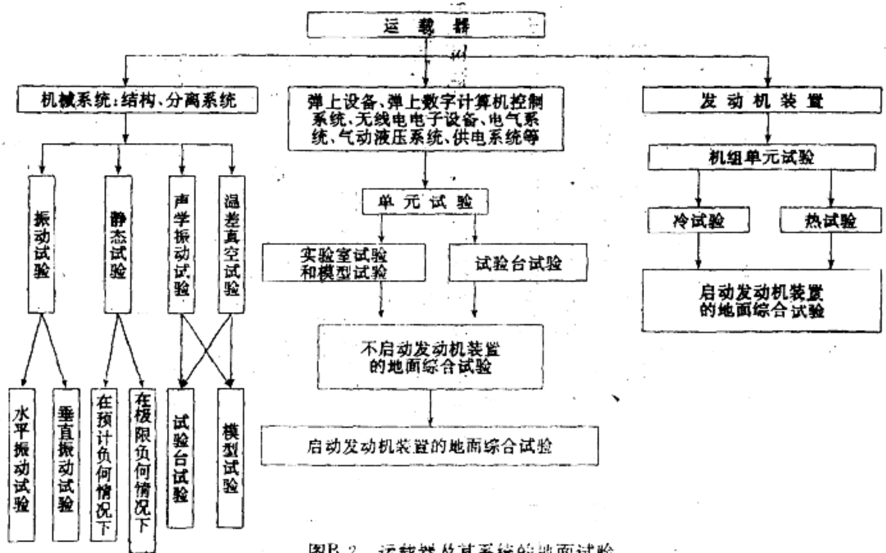
根据国内外积累的制造大型运载火箭的经验，可归纳出作为试验基础的下列原则。

1. 从各个部件和系统的单元试验开始，逐步转到系统和部件连在一起的联合试验，直至整个产品的试验。图B.1列出了多次使用空间运载器美国“航天飞机”主发动机的试验计划[18]。

2. 应十分重视地面试验(图B.2)。在“阿波罗”计划范围内建有一个试验基地，包括运载器与部件的专门试验台。这种方法在制造飞行样机之前便能保证达到较高的可靠性。当按“阿波罗”计划试验登月飞船的主要部件时，每月更改设计达千次之多，故飞行中出现的故障就比较少。在制定多次使用运载器的地面试验计划时，首次发射即为载人飞行，并获得了成功；但在继续使用过程中，却出现了机毁人亡的严重事故。这一事实再次证明了对运载器可靠性保证进行地面试验的重要性。

3. 应采用有高信息量的试验，例如，某些液体火箭发动机地面点火试验时，测量参数达575个之多[18]。这样便可获得一个最完整的产品效能概念。

4. 对设计产品的各个部分和机组进行试验时，必须力求采



图B.2　运载器及其系统的地面试验

用最经济的手段。按“阿波罗”计划，用“小兵-2”和“土星-1”型火箭对大型运载火箭“土星-5”的各个系统进行试验，就属于这种例子。

5. 对各个系统和机组的验证(特别是在研究热过程和气动过程时)，最好采用模拟试验。

6. 为了提高试验效率，必须采用危险故障早期检测系统，以使故障不至发展为事故。

遵循上述原则，可在规定期限内，以最少的经费实现所定的计划。显然，这些原则是制定空间运载器可靠性保证计划时的总原则。但这些原则的采用与许多具体条件有关，即由待制产品的特点、技术发展的总体水平、试验基地的现有储备品和积累的设计经验决定。不仅要得出定性关系，而且要得出定量关系，即在制定设计产品可靠性保证时要设计出所需的试验规划算法。

研究可靠性保证问题的书籍和文章很多。在文献[45]中研究了工程系统可靠性保证的一般问题。解决这类问题与可靠性保证计划规定的组织和技术措施有关。这个计划可确定在系统寿命周期各阶段内，为达到要求的可靠性而进行的工作表。根据综合试验计划进行的试验，是可靠性保证计划最重要的组成部分。待建运载器的新颖、复杂、试验样机很少、也没有模拟物和原型，这一切均要求采用系统分析方法和研究在不定条件下解决复杂优化问题的方法。

解决这类问题，首先要在设计阶段采用技术装备可靠性计算方法[1,5,10,11,15,17,22,26,31,33,34,42,45]。

试验时，用建立在试验理论方法基础上的工程系统，进行质量估计的方法见文献[16,18,22,27,30,32,39]。提高试验效率的主要方法是采用加速试验、危险故障早期检测系统，以及引入各种冗余[11,19,34,40]。为了暴露和排除故障(进行修正)必须进行试验，根据工程系统采用的条件和方式的变化，修正原始数据。采取上述措施能提高设备的可靠性。为了在综合试验范围内拟定运载器

可靠性保证措施，要求具有能预测试验时可靠性变化情况的模型。文献[10,11,42,43]介绍了试验过程中可靠性变化性质的各种估计方法。利用这些模型可解决试验规划问题。试验规划问题在文献[10]中有介绍。适用于运载器发动机装置的多因素试验规划方法见文献[22]。

尽管涉及运载器可靠性保证问题的文献很多，可它们却不能包罗制定未来空间计划实践中出现的许多问题。这决定了必须进一步完善运载器可靠性保证的方法原理。

本书专门研究在原始数据不精确和模型有误差造成不确定性条件下，运载器的试验规划方法。当保证给定可靠性和限制运载器及其系统试验量方面的要求满足时，问题的解决建立在制造和使用运载器的经费最优化基础上。可把运载器无故障工作概率作为可靠性指标。

在模拟实际试验过程的基础上，制定试验规划。本书提出的方法建立在详细分析运载器及其系统运行情况的基础上，它能暴露可能的潜在故障源，并指出发现和排除这些故障的合理途径。通过测量影响运载器系统效能参数的办法来增加试验信息量，对于提高试验效率和缩小试验量具有重大意义。

上述办法可以在制造运载器的早期阶段得到综合试验计划各个阶段的合理试验策略、试验量方面的具体建议，明确必要的试验基地的组成和特点。利用本书提出的方法也可解决运载器试验特性及其设计参数的协调问题，例如确定运载器的合理冗余度问题。

本书采用的以下主要术语，大都符合ГОСТ16504-81。

试验——实验确定受试体的定量与(或)定性特性，作为受试体上的作用结果。

书中所述一次试验可理解为，在该试验过程中，只能观察一次表征设备效能的每个因素的(随机过程的)随机事件，或者随机量的实现情况。

故障源——故障原因的物质载体。

冗余度——用以保持个体效能的补充手段和(或)条件的总和。

试验计划——必须执行的组织-方法文件，它规定了试验个体和目的、试验的类型、顺序和工作量、试验的方式、条件、地点和时间，试验的保障和报表，以及保障和进行试验的责任。

试验预测——借助能预测试验过程中系统质量指标变化的模型，在进行试验之前，估计与试验结果有关的工程系统质量指标。

试验方法——必须执行的组织-方法文件，包括试验方法、试验设备和条件、抽样、确定个体一个或几个相关特性的算法、数据表达和精度估计的形式、结果的置信度、安全性技术要求和环境保护。

试验量——由试验个体和类型的数量，以及总的试验时间所确定的试验特性。

运载器计划用量——完成指定任务所需的运载器数量。

地面单元试验——在试验台条件下，确定运载器各个机组试验样机的定量和定性特性。

地面综合试验——在试验台条件下，确定试验样机联合运行时的定量和定性特性。

飞行试验——在实际运行条件下，确定运载器样机所有系统的定量和定性特性。书中的设计飞行试验和地面综合试验统称为联合试验。

加速试验——试验方法和条件，能保证在比正常试验更短的时间内，获得有关个体特性必要信息的试验。

临界条件试验——为确定受试体参数的容许极值与运行状态之间的关系进行的试验。

目　录

第 一 章

工程系统试验理论的数理统计基础

1.1. 随机量数值特性点估计的性质

数学统计采用抽样法，用此法可从总体中抽出n个个体，组成样本。显然，任何样本都是随机的，因此根据样本获得的数值特性也是随机的，而且仅仅是构成总体的随机量数值特性的估计。这些估计可能是点估计和区间估计。

点估计的公式：

统计均值——数学期望估计

$$\hat{m}_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

统计方差

$$\hat{D}_x^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \hat{m}_x)^2}{n}$$

方差估计

$$\hat{D}_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \hat{m}_x)^2}{n-1}$$

任意阶统计的原点矩和中心矩

$$\hat{\alpha}_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^s}{n}$$

$$\hat{\mu}_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \hat{m}_x)^s}{n}$$

对统计估计提出有理性、无偏性、有效性和不变性要求。

如果随着观察数n的增大，Q的估计趋于被估理论值，即当$\lim_{n\to\infty} \hat{Q} = Q$，则参数$Q$的估计$\hat{Q} = \Psi(x_1, x_2, \cdots, x_n)$叫做有理估计。

这种情况指的是概率收敛，因此，在有理估计情况下，随着样本单位数的增大估计精度也会提高。

当观察数n为任意值时，估计的数学期望$\mathbf{M}\{\hat{Q}\}$准确地等于Q的被估参数值，即如果$\mathbf{M}\{\hat{Q}\} = Q$，则参数$Q$的估计$\hat{Q}$称为无偏估计。于是无偏样本估计可以估计参数$Q$而没有系统误差。

如果在同一参数的其它估计中，参数Q的估计$\hat{Q}$的方差最小，则这个估计叫有效估计。对有理估计的有效性，要求保证被估参数真值的估计随机波动的程度最小。

如果对单值的任意特定函数来说，$\varphi(\hat{Q})$的表达式是参数$\varphi(Q)$的估计，则参数Q的估计$\hat{Q}$具有不变性。

估计的不变性具有很大的实际意义。例如，如果已知母体的方差估计，且该估计具有不变性质，则可从方差估计求出平方根后，得到母体的均方根差估计。

1.2. 最大似然法

似然函数是与最大似然法有关的基本概念。假设$x_1, x_2, \cdots, x_n$是样本中可观察到的随机变量X的值。变量X可能是断续变量或

者连续变量。为明确起见，将研究连续随机量。设$f(x,Q)$——概率密度。这时如果个别的统计观察是独立的，则表达式$L=f(x_1,Q)\cdots f(x_n,Q)$就叫做似然函数。因此，似然函数正好等于抽样结果的概率密度。

当按最大似然原理估计参数Q时，可把$\hat{Q}$值看成是参数Q；当将它代入函数L的公式中，取代Q时，它可使函数值最大。

已证明，如果待观察随机变量X的变化范围与参数Q无关，则用最大似然法求得的估计$\hat{Q}$：1）是有理的；2）具有不变性；3）当$n\to\infty$时，Q的数学期望和有限方差值的估计值趋于正态分布；4）是渐近有效的[21]。而且，如果在包括Q的真值区间内，似然函数有2次对Q的导数，此外如果

$$\mathbf{M}\left\{\frac{\partial \log L(x/Q)}{\partial Q}\right\}=0 \tag{1.1}$$

且有数学期望

$$R^2(Q)=-\mathbf{M}\left\{\frac{\partial^2 \log L(x/Q)}{\partial Q^2}\right\}=\mathbf{M}\left\{\left(\frac{\partial \log L}{\partial Q}\right)^2\right\} \tag{1.2}$$

并与零有区别，则均值Q_0和方差$1/R^2(Q)$的最大似然估计$\hat{Q}$趋于正态分布。

当条件范围足够宽时，关系式(1.1)和(1.2)得到满足。实际上，因为L是联合观察密度，所以

$$\int\cdots\int L\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2\cdots\mathrm{d}x_{n-1}\mathrm{d}x_n=1 \tag{1.3}$$

将等式(1.3)的两个部分微分。这时如果微积分的次序可以改变（即积分限与Q无关），则得到

$$\int\cdots\int\frac{\partial L}{\partial Q}\mathrm{d}x_1\cdots\mathrm{d}x_n=0$$

可以写成

$$\mathbf{M}\left\{\frac{\partial \log L}{\partial Q}\right\}=\int\cdots\int\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial Q}\right)L\,\mathrm{d}\bar{x}=0 \tag{1.4}$$

将(1.4)微分，并改变微积分次序，得到

$$\int\cdots\int\left\{\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial Q}\right)^2+\frac{\partial^2\log L}{\partial Q^2}\right\}L\,\mathrm{d}\bar{x}=0$$

由此得

$$\mathbf{M}\left\{\left(\frac{\partial \log L}{\partial Q}\right)^2\right\}=-\mathbf{M}\left\{\frac{\partial^2\log L}{\partial Q^2}\right\}$$

因此，在一般条件下关系式(1.1) 和(1.2) 可以满足。这时按台劳公式得到

$$\left(\frac{\partial \log L}{\partial Q}\right)\hat{Q}=\left(\frac{\partial \log L}{\partial Q}\right)Q_0+(\hat{Q}-Q_0)\left(\frac{\partial^2\log L}{\partial Q^2}\right)Q^* \tag{1.5}$$

式中 $\hat{Q}<Q^*<Q_0$

因为根据条件，$\hat{Q}$是方程 $\frac{\partial \log L}{\partial Q}=0$的根，所以(1.5)的左部等于0，可写成

$$(\hat{Q}-Q_0)R(Q_0)=\frac{\left(\frac{\partial \log L}{\partial Q}\right)Q_0}{R(Q_0)}\left[\frac{\left(\frac{\partial^2\log L}{\partial Q^2}\right)Q^*}{[-R^2(Q_0)]}\right]^{-1} \tag{1.6}$$

因为$\hat{Q}$——Q_0有理估计，而Q^*在$\hat{Q}$和Q_0之间，所以

$$\frac{\left(\frac{\partial^2\log L}{\partial Q^2}\right)Q^*}{[-R^2(Q_0)]}\to 1。$$

第一个因数是用$R(Q_0)$除相同独立分布随机量

$$\frac{\partial \log f(x_i/Q_0)}{\partial Q}$$

的总和n。这个总和有一个均值，按(1.1)等于零，且根据(1.2)有方差$R^2(Q_0)$。因而，按中心极限定理，分子将是有均值0和方差1的渐近正态分布。因此，(1.6) 的左部渐近地为正态值，而$\hat{Q}$的最大似然估计，为有均值Q_0和方差$1/R^2(R_0)$的渐近正态分布。

1.3 置信区间概念

参数Q的置信区间 $(\underline{Q},\bar{Q})$ 是能以概率γ证实它含有参数Q的未知值。

参数Q——固定非随机量，这时确定置信区间界限的$\underline{Q}$和$\bar{Q}$是随机变量，是某些抽样结果的函数。

概率γ叫做置信度，表示不允许估计误差的概率。

置信区间的界限满足关系式

$$P\{|\hat{Q}-Q|<\epsilon\}=\gamma \tag{1.7}$$

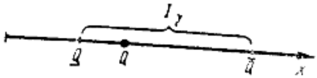


图1.1 参数Q的置信区间

方程 (1.7) 可改写为：

$$P\{\hat{Q}-\epsilon<Q<\hat{Q}+\epsilon\}=\gamma$$

因而，Q的未知值以概率γ落入区间（图1.1）。

$$I_\gamma=(\hat{Q}-\epsilon;\ \hat{Q}+\epsilon)$$

将数学期望区间估计作为例子

$$m_x=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$$

根据中心极限定理，独立相同分布随机量X的总和n具有分布