



021359

液体火箭发动机 试验研制 的理论基础

国防工业出版社

液体火箭发动机试验 研制的理论基础

B. A. 马 欣

〔苏〕H. II. 米连柯 著

J. B. 普罗尼

王迺琦 译

华 棣、顾明初 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍了液体火箭发动机试验研制的一些理论问题。对试验研制作了总的阐述,讲述了试验项目与阶段,试验计划与结果分析,试验大纲的编制以及有关的可靠性理论的实用方法。书中还分析了一些故障情况并用发动机各组件在工作过程中的动力学方程表示出了一些故障现象。对在发动机各系统与组件的试验中遇到的各物理过程的模拟问题也作了简单介绍。

本书可供有关方面的工程技术人员参考。它对高等学校师生亦有所裨益。

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ЖРД

В. А. Махин, Н. П. Миленко, Л. В. Пронь

Машиностроение 1973

*

液体火箭发动机试验研制的理论基础

В. А. 马 欣

[苏] Н. П. 米连柯 著

Л. В. 普罗尼

王迺琦 译

华 棣、顾明初 校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可証出字第 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

*

850×1168 1/32 印张 8 3/8 213 千字

1978 年 11 月第一版 1978 年 1 月第一次印刷 印数: 0,001—2,300 册

统一书号: 15034·1597 定价: 1.10 元

目 录

引言	7
第一章 保证液体火箭发动机可靠性的一般要求	11
§ 1 发动机研制的技术任务书	11
§ 2 技术设计	12
§ 3 发动机装置的系统和组件的分类	13
§ 4 对试验大纲和试验的一般要求	15
§ 5 对试车台设备的要求	19
§ 6 试验信息	22
§ 7 试验计划的编制	26
第二章 液体火箭发动机的试验研制、试验的阶段与类型	30
§ 1 试验的一般特性	30
§ 2 评定设计方案的试验	32
§ 3 考虑各种内外因素影响的环境试验	35
§ 4 鉴定试验	41
§ 5 飞行试验	43
§ 6 批生产中的试验类型、质量与可靠性检查	45
第三章 试验计划的拟定与试验结果分析	49
§ 1 复杂技术系统试验计划的特点	49
§ 2 因素计划在复杂技术系统试验中的应用	54
§ 3 复杂物理过程的数学模型研究	60
§ 4 重要因素的排队和其数量的选择。模型的相符性	74
§ 5 在系统和组件研制中的消极和积极试验	79
§ 6 复杂过程数学模型的求解方法	81
§ 7 试验结果的预报	84
§ 8 关于变化水平数大于 2 的因素计划	87
§ 9 用于处理试验数据的方差分析的一般方法	94
§ 10 用方差分析解几个例题	97

第四章 可靠性试验	105
§ 1 概况, 目的和任务	105
§ 2 试验的组织和进行方法	107
§ 3 加速试验	111
§ 4 一次使用组件可靠性试验的特点	116
§ 5 不稳定条件下的可靠性试验。可靠性试验计划的拟定	118
§ 6 超载试验的方法	121
第五章 在一次使用系统中可靠性理论的实用方法	125
§ 1 基本准则和可靠性的统计模型	125
§ 2 在确定可靠性的定量指标时估计值的置信度分析	133
§ 3 在定性信息基础上确定可靠性指标。统计数据的处理方法	137
§ 4 在定量信息基础上确定可靠性指标。统计数据的处理方法	141
§ 5 在正态分布情况下一一次和多次作用产品试验结果的处理	150
§ 6 在可靠性试验中产品最小样本量的确定	155
§ 7 复杂技术系统可靠性的方块图。根据其元件估计系统可靠性	158
第六章 液体火箭发动机主要组件的动力学方程	169
§ 1 液体火箭发动机中的动力学过程	169
§ 2 燃烧室的动力学方程	170
§ 3 液体管路的动力学方程	175
§ 4 离心泵的动力学方程	178
§ 5 涡轮泵组件的动力学方程	186
§ 6 涡轮和泵的功率方程	187
§ 7 液体火箭发动机自动器的动力学方程	189
§ 8 出现故障时液体火箭发动机的故障模型	192
第七章 液体火箭发动机故障状态的研究	197
§ 1 液体火箭发动机试验故障的原因分析	197
§ 2 在故障状态下液体火箭发动机稳态参数的计算方法	202
§ 3 在故障状态下液体火箭发动机中过渡过程的计算方法	216
§ 4 液路阻塞时的过渡过程	226
§ 5 液路泄漏时的过渡过程	233
§ 6 燃气腔或管路泄漏时的过渡过程	238
§ 7 泵出现故障时的过渡过程	239

§ 8 液体火箭发动机的调节系统对故障状态下的过渡过程特性的影响	243
第八章 发动机装置各系统和组合件试验中对物理过程的模拟	249
§ 1 相似理论在试验中的应用	249
§ 2 发动机装置各组件及系统试验的物理模拟	252
§ 3 动态过程的相似保证	257
参考文献	265

液体火箭发动机试验 研制的理论基础

B. A. 马 欣

〔苏〕 H. II. 米连柯 著

J. B. 普罗尼

王迺琦 译

华 棣、顾明初 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍了液体火箭发动机试验研制的一些理论问题。对试验研制作了总的阐述,讲述了试验项目与阶段,试验计划与结果分析,试验大纲的编制以及有关的可靠性理论的实用方法。书中还分析了一些故障情况并用发动机各组件在工作过程中的动力学方程表示出了一些故障现象。对在发动机各系统与组件的试验中遇到的各物理过程的模拟问题也作了简单介绍。

本书可供有关方面的工程技术人员参考。它对高等学校师生亦有所裨益。

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ЖРД

В. А. Махин, Н. П. Миленко, Л. В. Пронь

Машиностроение 1973

*

液体火箭发动机试验研制的理论基础

В. А. 马 欣

[苏] Н. П. 米连柯 著

Л. В. 普罗尼

王迺琦 译

华 棣、顾明初 校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可証出字第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

*

850×1168 1/32 印张8 3/8 213千字

1978年11月第一版 1978年1月第一次印刷 印数: 0,001—2,300册

统一书号: 15034·1597 定价: 1.10元

目 录

引言	7
第一章 保证液体火箭发动机可靠性的一般要求	11
§ 1 发动机研制的技术任务书	11
§ 2 技术设计	12
§ 3 发动机装置的系统和组件的分类	13
§ 4 对试验大纲和试验的一般要求	15
§ 5 对试车台设备的要求	19
§ 6 试验信息	22
§ 7 试验计划的编制	26
第二章 液体火箭发动机的试验研制、试验的阶段与类型	30
§ 1 试验的一般特性	30
§ 2 评定设计方案的试验	32
§ 3 考虑各种内外因素影响的环境试验	35
§ 4 鉴定试验	41
§ 5 飞行试验	43
§ 6 批生产中的试验类型、质量与可靠性检查	45
第三章 试验计划的拟定与试验结果分析	49
§ 1 复杂技术系统试验计划的特点	49
§ 2 因素计划在复杂技术系统试验中的应用	54
§ 3 复杂物理过程的数学模型研究	60
§ 4 重要因素的排队和其数量的选择。模型的相符性	74
§ 5 在系统和组件研制中的消极和积极试验	79
§ 6 复杂过程数学模型的求解方法	81
§ 7 试验结果的预报	84
§ 8 关于变化水平数大于 2 的因素计划	87
§ 9 用于处理试验数据的方差分析的一般方法	94
§ 10 用方差分析解几个例题	97

第四章 可靠性试验	105
§ 1 概况, 目的和任务	105
§ 2 试验的组织和进行方法	107
§ 3 加速试验	111
§ 4 一次使用组件可靠性试验的特点	116
§ 5 不稳定条件下的可靠性试验。可靠性试验计划的拟定	118
§ 6 超载试验的方法	121
第五章 在一次使用系统中可靠性理论的实用方法	125
§ 1 基本准则和可靠性的统计模型	125
§ 2 在确定可靠性的定量指标时估计值的置信度分析	133
§ 3 在定性信息基础上确定可靠性指标。统计数据的处理方法	137
§ 4 在定量信息基础上确定可靠性指标。统计数据的处理方法	141
§ 5 在正态分布情况下一一次和多次作用产品试验结果的处理	150
§ 6 在可靠性试验中产品最小样本量的确定	155
§ 7 复杂技术系统可靠性的方块图。根据其元件估计系统可靠性	158
第六章 液体火箭发动机主要组件的动力学方程	169
§ 1 液体火箭发动机中的动力学过程	169
§ 2 燃烧室的动力学方程	170
§ 3 液体管路的动力学方程	175
§ 4 离心泵的动力学方程	178
§ 5 涡轮泵组件的动力学方程	186
§ 6 涡轮和泵的功率方程	187
§ 7 液体火箭发动机自动器的动力学方程	189
§ 8 出现故障时液体火箭发动机的故障模型	192
第七章 液体火箭发动机故障状态的研究	197
§ 1 液体火箭发动机试验故障的原因分析	197
§ 2 在故障状态下液体火箭发动机稳态参数的计算方法	202
§ 3 在故障状态下液体火箭发动机中过渡过程的计算方法	216
§ 4 液路阻塞时的过渡过程	226
§ 5 液路泄漏时的过渡过程	233
§ 6 燃气腔或管路泄漏时的过渡过程	238
§ 7 泵出现故障时的过渡过程	239

§ 8 液体火箭发动机的调节系统对故障状态下的过渡过程特性的影响	243
第八章 发动机装置各系统和组合件试验中对物理过程的模拟	249
§ 1 相似理论在试验中的应用	249
§ 2 发动机装置各组件及系统试验的物理模拟	252
§ 3 动态过程的相似保证	257
参考文献	265

引 言

在运载火箭和空间飞行器方面所以达到高水平，在很大程度上取决于功率强大而工作可靠的液体火箭发动机和发动机装置的研制成功。同时也产生了一些新的问题，首先是发动机工作的可靠性问题，这是为保证火箭-空间系统可靠性和保证飞行安全而提出的。

当然，可靠性问题总是以不同形式摆在火箭发动机研制者面前的。但在技术发展的早期在这方面只有定性的材料，现在却要求对可靠性大小作定量的估计。

这种要求在发动机的试验研制阶段显得特别突出，因为各项试验的数量、试验大纲的目的以及研制成功的标志等均取决于所能达到的可靠性指标，这一指标应当满足研制火箭发动机的技术任务书的要求。

尽管可靠性理论成为一门独立学科还为时不久(近二十年内)，但它却明显的朝着两个方向发展。

第一个方向，即概率统计方向，它以大量事件和现象的统计规律为基础，要求对试验结果进行数据整理及系统化处理。这时所采用的数理统计和概率论的方法没有直接考虑所研究过程的物理特性。

第二个方向是以可靠性问题的物理分析为基础的。它要求发现故障、查找原因、并提出相应的改进措施以消除故障。

第一个方向主要是靠数学工作者发展，第二个方向则主要是靠直接研制液体火箭发动机的工程技术人员。这两个方向虽然不久前还在激烈的争论，但它们是互为补充、目标一致的 [5, 11, 21, 37, 54, 76, 81, 87, 103]。

为了弄清问题的实质，应当看到，仅以定性材料(分为成功—

失败两类)为基础的估计可靠性的概率统计方法不能满足现代液体火箭发动机这种复杂技术装置的可靠性评定的要求(在大多数情况下,对液体火箭发动机不能采用以确定工作寿命为主的方法)。

这是因为尽管在试验中可得到相当多的数据资料,用遥测设备可以获得数以十计、百计的动态特性,但是在计算可靠性时只用到《成功》或《失败》这一结果。所以需要大量的试验来验证高可靠性指标。以定性材料为基础的评定液体火箭发动机可靠性的古典方法不适用的原因主要有三:

- 1) 液体火箭发动机的高可靠性要求;
- 2) 结构复杂、制造和试验费用巨大;
- 3) 研制和生产周期有限。

所以只能提供少量产品作可靠性试验,因而不可能发现所有故障以及工艺和设计中的薄弱环节。

由于种种原因,非常不希望在使用阶段出现设计和工艺上的故障,从而需要进行更改的情况。所以必需在研制结束阶段作出根据充分的结论。而且这种结论只能以少量产品的试验为基础。这意味着必须充分利用试验信息。

根据定性材料用概率论方法估计可靠性时,将各次试验结果均看作简单事件,其可靠性的评定建立在假定试验结果频率稳定的基础上。这种假定要求切实地达到各被试产品的一致性及不变的试验条件。但是这些要求与发动机研制的探索性特点相矛盾,而且它们排除了将相当大部分的试验资料用于可靠性评定的可能性。

因此,以定性资料为基础的概率统计方法不可能适应(没有严重歪曲)液体火箭发动机的试验研制大纲,并且使技术任务书中的可靠性要求没有实现的实际可能性。由于这种方法不能确定故障的具体形式,所以在研制过程中不能用它来研究结构特性。

在设计研制过程中,试验结果并不是被试发动机质量的唯一指标,而且有时还不是主要指标。在设计研制阶段发现的故障愈

多,所作的改进措施愈有效,则发动机在使用过程中愈可靠。要考虑发动机工作性能问题,研究者不应仅限于判断试验结果,而必须注意各项反映物理过程的参数测量数据,出现缺陷和故障的试验状态和试验条件以及各部分材料状况等。

只有这种利用了全部试验信息的统计方法才能对发动机工作性能做出论据充分的可靠性评定。

近年来,可靠性理论已开始朝着上述两种方向(物理的和统计的)相结合的途径发展。任务就在于把进行工程分析的物理依据用数学式子表示出来,并对试验结果作定量的评定。于是就提出了提高试验信息的利用率,减少试件数量,尽早发现薄弱环节与故障,评定及预测长期使用中的可靠性指标等问题。对于所有情况,这种可靠性评定结果必须与在使用阶段根据大量实物试验所作的统计分析结果相一致。

为了保证发动机的可靠性必需做到:

1. 检查发动机在各种内外因素的可能组合下的工作能力,这些组合使发动机工况不同;
2. 确定发动机的使用特性和各种参数是否与所提要求相符。

在试验的各阶段中要解决这些问题,关键在于尽早发现和预测各种故障。不久以前这方面只用了些依靠经验摸索的方法。但是,按照现代对液体火箭发动机试验要求,就需要提出有科学根据的规划,把工作建立在各种课题研究计划和一定量的试验计划的基础上。

为此需要的一些理论,即试验理论,数学模拟,相似理论与量纲分析等,基本上都已具备。可是,遗憾的是这些方法的综合运用,除极少数情况外,基本上都分散在各种不同学科的文献中。

因为液体火箭发动机是由各种复杂组件和系统组合而成的,这些组件和系统的物理过程具有不同的性质和机理,因此在制订试验计划时只局限于某一种方法是错误的。为了做到这点,在研

究和查找发动机故障的实践中就需引入判断技术。

试验理论与数学模拟、物理模拟和结构模拟等理论密切相关。

这些理论和方法的基本原理的综合利用应成为复杂技术系统试验研制的理论基础。将这一理论用于液体火箭发动机就可能实现符合现代要求的可靠性水平。

第一章 保证液体火箭发动机可靠性的一般要求

§1 发动机研制的技术任务书

由订户提出的技术任务书是一份原始的主要文件，其中规定了研制发动机所需达到的综合战术技术要求、设计特点及使用指标。在技术任务书中提供了一系列依据，由它们可确定发动机的研制目的、发动机的用途和使用情况，包括推进剂品种在内的主要参数表、某些设计特点、研制周期及研制费用等^[62]。

在主要参数中包括推力和重量参数，其中有：发动机比推力和总推力、燃烧室压力和燃气发生器压力、推进剂组元混合比、秒流量、涡轮泵组特性、可调范围、累计工作时间、启动和关机的工作程序、轮廓尺寸、重量、对接尺寸等。

使用条件取决于所指定的用途（发动机用于弹道火箭、空间飞行器运载工具等）。

设计特点就是某些给定的（或是订货方提出的）设计方案，它考虑了科技的新成就和在本领域内的技术发展。由此，在技术任务书中可以规定发动机的系统（“开回路”的还是“闭回路”的）、燃烧室固定形式、用涡轮泵还是用挤压式系统供应推进剂、燃烧室冷却方式、推进剂点火方法、主要参数可调范围以及其它特点，如重复使用的可能性和与总体其它系统的关系等。

发动机的使用性能规定如下诸项：安装方便；可对技术状态定期检查；保管条件与运输条件；使用维护时的温度、湿度范围；所用推进剂在保管、加注和发射时的温度与压力；推进剂组元间允许的最大温差；与推进剂及其蒸汽最长接触时间；在不同维护条件下的使用寿命；振动、超压及短期温升幅值；冲击载荷；轴向及径向过载等。