

国外航空发动机寿命及可靠性

译 文 集

第五集

中国航空工业总公司

沈阳航空学院发动机可靠性编辑部

1996.5

V23/1015

V23
1015-1

前 言

本集为“国外航空发动机寿命及可靠性”译文集的第五集。

本译文集是在航空工业总公司发动机局领导支持下,本着引进国外先进技术及吸取他们的经验编译的,参加单位有航空工业总公司、沈阳航空学院和 606 研究所等。

本集侧重于可靠性、寿命、计算、模拟,准则研究、冷却分析、质量保证及管理方面的问题等。

限于水平、人员、能力,文集中定会有许多错误,敬请批评、指正。



发动机可靠性译文集
编辑部
1996.5



200429483

200429483

目 录

1. 综合模型发动机系统设计的可靠性研究	1
2. 发动机寿命循环的计算和发展趋势	22
3. 等效损伤——一种准则的评估	34
4. 涡轮发动机部件使用寿命计算	41
5. 喷气发动机结构性能和可靠性的计算模拟	52
6. 燃气涡轮盘损伤容限准制	61
7. 可靠性分析的三种方法	75
8. 涡轮叶尖部间隙流动的数值和试验研究	89
9. 离散孔式气膜冷却涡轮叶片的空气动力和换热分析	138
10. 先进小型燃烧室火焰筒高效冷却设计	161
11. 设计和制造中可靠性和质量保证的要求和处理方法	161
12. 碳/碳化硅复合材料在先进无人驾驶燃气涡轮发动机燃烧室 中的应用	167
13. 涡轮发动机试验设备的数据验证和质量保证的改进	179
14. 质量保证和设计系统	196
15. 寿命管理计划	205
16. F110 发动机监控系统	216



综合模型发动机系统设计的可靠性研究

梁淑清译

张宝诚校

摘要 本文就估算综合模型发动机(IME)设计方案的可靠性进行了研究。运用扩充循环结构在网络 IME 系统和非网络离散系统之间进行了比较;分析了冗余和非冗余两种系统。应用二项式近似法和 Markov 分析技术估算了总系统可靠性。此外,应用预损伤分析、故障模态/影响分析和故障树分析详细的估算了 IME 设计方案。另外还阐述了这些系统可靠性概念的讨论结果。

引言

目前,正在研究综合模型机(IME)的设计的用于不同的空间推进系统。常规的非网络或离散式发动机设计均是按每种发动机系统是一个标准单位体进行的。在离散系统。如果由于相应的推力室故障,则涡轮泵也就必须停止工作。在网络或模型发动机设计方案中,所有的涡轮泵组件和所有推力室组件均通过共用集合管连接在在一起。因此,在该系统中,某一故障在两者的任一组件发生时,涡轮泵或推力室仍能够独立的停止工作。因此,与离散系统相比,IME 提供了增加故障容限和可靠性的潜在优点。本文的目的旨在估算和对比 IME 系统和离散发动机系统的可靠性,确定 IME 的可靠性驱动件及进行部件故障对 IME 系统可靠性影响的敏感性研究。

为了估算 IME 可靠性应用了定量和定性分析技术。定量分析包括二项式和 Markov 分析。应用二项式近似分析法表示基于部件停止工作概率的系统可靠性的特性。应用 Markov 分析法的重点是进行模型系统和离散系统之间的相对比较,而不是求得绝对破坏数据。定性分析方法包括故障模态和影响分析、预损伤分析和故障树分析。对于 IME,进行故障模态/影响分析以确定单点破坏对系统的影响。运用预损伤分析来识别与 IME 进行相联系的潜在损伤。最后,进行故障树分析有助于描述系统宽范围破坏的特点。

系统的描述

图 1 示出综合模型发动机系统简图。这一设计是基于 NASA 路易斯研究中心的计划以确定 IME 设计方案并确定实际上组成综合模型发动机的方法。在 IME 设计中,应用了扩充循环结构。作为基准,把 8 个推力室组件与 4 个燃料和 4 个氧化剂的涡轮泵组件连在一起。本设计中需要 5 个总管以连接推力室和涡轮泵。在泵、涡轮和推力室三个部件的某一个工作可靠和性能降低时,应用关闭阀以孤立这三个部件。对于 IME,所需要的阀数为 66 个,每个推力室、燃料涡轮泵和

氧化剂涡轮泵 4 个,外加 2 个涡轮旁路阀。IME 的详细设计在文献 5 中有说明。相比之下,图 2 示出离散系统,没有总管,每台发动机 4 个阀,总共 32 个阀。

分析方法和结果

应用某些定量和定性分析方法以估算 IME 的可靠性,包括二项式近似法,Markov 分析法、故障模式/影响分析、预损伤分析和故障树。对于每种分析方法给出上述系统结构的分析结果,还包括每个过程的说明在内。

二项式近似分析法

二项式近似分析法,亦称作 N 之外的 K 模化法。该法假定:对于整个系统,为了成功的运行,在总的 N 个部件之外 K 个部件必须工作。因此,这种方法只应用于采用冗余的情况。在冗余系统的二项式近似分析中,应用下列方程:

$$Re_{\text{总}} = Re^N + \sum_{x=K}^{N-1} \frac{N!}{X!(N-X)!} Re^X (1-Re)^{N-X}$$

式中:

$Re_{\text{总}}$ — 系统总可靠性($1.0 - P_{r\text{总}}$);

Re — 部件可靠性($1.0 - Pr$);

$P_{r\text{总}}$ — 系统总停止工作概率;

Pr — 部件停止工作概率;

K — 系统工作所需的部件最低数目;

N — 部件总数;

为了分析具有冗余的 IME 系统,在每个冗余的子系统(一系统部件)通过乘部件的可靠性求得每个子系统(燃料泵、氧化剂泵、燃料涡轮、氧化剂涡轮、推力室)的可靠性。利用平行子系统的二项式方程求得子系统的总可靠性。例如,对于燃料涡轮泵, $K=3$ 和 $N=4$ (对于基准情况)。通过乘子系统可靠性求得系统总可靠性。对于离散系统,通过乘每个部件的可靠性求得每台发动机的可靠性。应用二项式近似分析法求得平行发动机系统的总系统可靠性($K=7, N=8$, 对基准情况)。

对于不包括冗余情况,可以乘以部件可靠性以求得系统总可靠性 $Re_{\text{总}}$ 。在每种情况下,系统总破坏概率按 $1.0 - P_{r\text{总}}$ 计算。

表 1、2 分别列出 IME 和离散系统的部件及其估算的故障率。对于二项式分析,故障率被定义为每 1000 次开车的失效次数。除了总管估算以外,按文献 4,应用普·惠公司的火箭发动机可靠性数据库可以求得这些故障率。这种数据库考虑了基于飞行数据的历史上发动机的破坏。由于可应用的数据量是有限的,因此,能够预定与故障率有关的高不准确度。然而,应用这种数据能够进行 IME 和离散系

统的相对比较。总管的故障率取决于氢、氧导管。另外,高不准确度与这些总管的故障率有关。在阀和总管关停率方面进行了敏感性分析以确定这些参数对总系统可靠性的影响。应用某些关键假设表示出应用二项式分布的分析结果。

1. 允许无局部故障;这些仅有的状态或都是成功的或都是失败的。部件均不是可修复的。

2. 只考虑主动冗余(即在某一部件失效前,所有部件均在工作)。

3. 分件中,包括非工作范围的运行(即若一个 IME 涡轮泵发生故障,则假定其余涡轮泵能够满足功率要求而不改变其可靠性)。因此,故障率均为常数且与这些部件的功能无关。

4. 健康监控系统能够识别问题,并能按时间 100% 的对问题起响应。

5. 包括非公共原因的故障。

6. 分析中不包括传感器和控制器的可靠性。

7. 若某一涡轮(泵)在氧流路或氢流路发生故障,则其相应的泵(涡轮)也将不工作。

8. 涡轮旁路阀损失将导致 IME 系统损失(旁路同时地影响所有涡轮并且不利影响不能被减轻)。

在 2 至 12 个推进器范围进行二项式分析。对 IME,在每种情况下,涡轮泵组件数是推力室组件数的一半。此外,在不具有冗余的情况下 IME 设计不包括用于涡轮机或用于喷管冷却通道的隔离阀和检查阀。在发生故障后,只对于部件隔离,要求这些隔离阀和检查阀。在不具有冗余情况下,任一部件失效将造成整个系统失效,因此隔离将不是不必要的。

图 3-6 示出二项式近似分析法的结果。图 3 对比了 IME 和离散系统的可靠性,这种离散系统装有 2-12 个推力室,其中无任何冗余是可应用的(即所有部件都必须工作)。由图可以看出:对于少于 6 个推力室情况,离散系统显示出比 IME 系统较高的可靠性。对于 6 个推力室和更多推力室情况,IME 的可靠性高于离散系统。当推力室数低时,总管故障概率引起 IME 系统可靠性减少(与离散系统相比)。当推力室数增加时,在整个系统的可靠性中涡轮机变成更重要的因素。因为 IME 比离散系统具有较少的涡轮泵,因此,当推力室数和涡轮泵组件数增加时,IME 比离散系统更可靠。

图 4 示出类似的比较,并假设该系统设有冗余并能够在 1 个推力室和 1 个涡轮泵停在下工作。在 IME 情况下,这意味着:一个涡轮泵和一个推力室能够被关闭,且 IME 系统仍能满足系统推力要求。在离散系统,若推力室或涡轮泵停车时,整个发动机系统就能够被停车,并且该系统仍将满足推力要求。由图 3 和图 4 的比较很显然。冗余对两个系统都提供明显好处。通过部件故障转移到其它运行部

件,冗余能增加可靠性。正如由图 4 可看出的,当与 IME 相比时,离散系统显示较高的系统可靠性。对于 4 至 12 个推进器,离散系统的可靠度介于 0.99998 - 0.99975。这些可靠性相应于总系统失效率为每 1000 次开车达 0.20 至 0.25。相比之下,IME 具有可靠度从 0.99789 改变到 0.99773,或失效率是每 1000 次开车 2.11 至 2.27。因此,IME 的系统失效率近似地高于离散系统一个数量级。

根据本报告未包括的可靠性预研结果,显然,可靠性驱动件是阀门和总管,特别是由于涡轮旁路阀和总管呈现单点故障的潜在危险。因此,在涉及这些部件的可靠性方面进行了敏感性研究。图 5 示出阀门关闭速率对装有八个推力室组件的离散系统和 IME 系统两者的系统可靠性的影响。阀门故障率(停车)从每 1000 次开车的 0 变化到 0.5。由图可以看出,即使阀门停车率为 0(可靠度 100%),IME 也显示出比离散系统低的可靠性。在以前给定的假设下,由于涡轮旁路阀出现单点故障,因此可以在旁路阀中有冗余时进行可靠性分析。再者,离散系统可靠性高于 IME,但离散系统和 IME 两者的可靠性都是在加入冗余的情况下做出改善的。值得注意的是,由于是不是损失涡轮旁路阀就能引起系统故障这还不能肯定,因此需要做进一步分析以确定该系统与这些阀的关系。然而,该图以例示出,虽然阀故障率能够影响总系统可靠性,但与离散发动机系统相比,这些阀不可视为减少 IME 可靠性的原因。

图 6 示出总管故障率对总系统可靠性的影响。由图可以看出:除了当总管可靠性高时且涡轮旁路阀又假定为冗余的,在与 IME 设计相比时,离散发动机设计提供更高的可靠性。由于离散系统中假定没有总管,因此离散系统没有变化。考查图 1 设计表明:总管呈现出一种单点破坏,总管损坏造成系统损坏。总管包括各管道系的联接件(法兰、固紧件等)以及导管本身。因此,由于认为总管是关键的可可靠性驱动器,IME 设计的进一步研究工作集中在总管可靠性且包括连接件这可能是很必要的,对于 IME 这一设计概念可实现类似于离散系统的可靠性。

二项式分析结果表明:由冗余技术使系统的可靠性有明显改善。离散系统通过隔离故障与单个机组并通过减少与共用部件如总管的依赖关系提高了可靠性。因此,基于这一分析,实际的可靠性争论点不是冗余技术,而是实际的系统设计。

Markov 分析

Markov 分析技术在随机系统的可靠性模化中是很有用的工具。为了这一目的,在有限状态空间就用一种均时 Markov 过程来对比 IME 和离散发动机系统设计中与时间相关的可靠性。

记录系统可靠性随时间的衰减在确定基于所要求的可靠性和部件故障的系统运行包线中是很有用的。此外,人们能够在某一范围内基于部件的累积和用于共同原因分析的部件相同作用来确定系统的可靠性。接着给出 IME 和离散发动机

系统系统设计概念可靠性的研究结果。开始讨论集中在简短的引述 Markov 方法和所应用的假设.如在二项式分析中一样,重点集中在部件故障率的系统敏感性而不集中在这些速率的绝对值。

均时 Markov 分析技术确定了以系统实时工作状态为基础的时间范围内的系统可靠性。一种状态定义为故障件和健康件的一定组合。某系统的状态空间包括系统能够存在的所有状态的总和:一所假定的初始非破坏状态(Z_0),单个或多个故障部件状态(Z_j)和最终故障状态(Z_f)。图 7 示出简单的 Markov 状态空间。该系统从时间 $t=0$ 的状态 Z 。按时地进展到有限状态空间中的另一状态。过渡概率 $P_{i,j}$ 表达从某一现状态 Z_i 至某一新状态 Z_j 的系统过渡的可能性。在这种过渡中,单个系统部件在离散时间间隔 δt (均时)。

这种型的分析结果均是有价值的。系统工作中随时间进展,系统故障概率是通过单个部件的故障概率和这种故障将如何的影响系统来确定。在每一个序次时间间隔中的系统故障概率的增加确定故障概率分布。这种概率分布确定系统故障概率随时间增加,并且每一时间步长下与单位长度的差确定了系统率 $R_{e\text{系统}}$ 。类似的,故障平均时间(MTTFs)(即系统故障的期望时间)可以由该分布来确定。

如无另外说明,部件故障率均按文献 4 确定并列于表 I 和表 II。在 Markov 分析中所考虑的部件为液氧涡轮泵、液氢涡轮泵、推力室组件、总管和涡轮旁路阀。每个部件故障率是构成该部件的各子部件故障率之和。因此,若其一部件子部件发生故障,则部件本身也发生故障。

最后,在 Markov 分析中还包括下列假设:

1. 所有部件均为非可修理的,主动冗余、载荷均布,一旦有故障就完全破坏(非局部破坏)。载荷均布意指部件故障率正比于由部件承受的载荷。
2. 对于 IME 设计,总管和涡轮旁路阀被表示为单点故障。
3. 当 IME 推力室组件发生故障时,为保持推力平衡,由已破坏的推力室转 180° 的推力室组件也立即的停车。因此,一个推力室组件的破坏造成状态过渡中两个推力室组件的净损失。
4. 当系统不再能够给出 100% 的推力时,假定系统有故障。IME 系统故障定义为大于一个已故障的液氧涡轮泵组件、大于一个已破坏的液氧涡轮泵组件,大于 4 个停车的推力室组件(即大于两个完全破坏的组件)和具有单点破坏的瞬态故障。离散系统的故障定义为大于 4 个已破坏的发动机。

图 8 示出 IME 和离散系统可靠性随时间的衰减。在所有系统开车时间下,离散发动机系统比 IME 系统具有较高的可靠性。IME 系统故障平均时间(MTTFs)。IME 系统故障平均时间的减少部分是由于单点破坏的系统敏感性(总管、涡轮旁、路阀),部分是系统运行对少数部件固有的较高的依赖性。类似的,

按所要求的 99% 可靠性值, 离散系统能够比 IME 系统多运行 470 秒, 即离散系统 500 秒至 IME 系统的 30 秒。基于部件故障率和所要求的系统可靠性能够计算出合适的开车持续时间, 这证明了 Markov 分析法的实用价值。

业已发现应用二项式分析法对单点故障 IME 系统是有缺点的。因而, 通过假设无故障 (100% 可靠度) 总管和涡轮旁路阀 (TBPVs), 应用 Markov 分析法时可研究所假定的单点故障概率对 IME 系统可靠性的影响。系统可靠性的改进示于图 9。当总管/涡轮旁路阀可靠性置于 1.0 时, 按 99% 的可靠度下, 开车时间 30 - 143 秒中可达到 377% 的极大的改进。在较低可靠度值下系统开车时间的改进逐渐减少时, 这表明减少单点故障随时间变化的重要性。这一点下面可进一步阐明。应注意: 在所有可靠性水平下, 开车持续时间的这些增加即使很大但仍然小于离散系统的预测开车持续时间。

很明显, 总系统的可靠性取决于每个部件的故障率。当系统对这些故障率被确定时, 为了提高可靠性应识别确定系统可靠性的关键部件。对所有系统的部件, 取恒定故障率 (0.0003 故障/秒) 作为基准。然后系统地使每个部件的故障率加倍, 并把最终系统可靠性与基线情况加以比较。

对 IME 系统, 除了所注意的总管/涡轮旁路阀在可靠性水平大于 94% 以外, 在确定所有系统 (离散系统、IME) 中, 涡轮泵均为最重要的部件。图 10 示出 IME 系统装有涡轮泵和推力室两者时总管/涡轮旁路阀的系统可靠性的变化。由于总管/涡轮旁路阀的故障率加倍使得系统故障概率分布快速升高和扩展加大造成了这种变化曲线相交。另外, 在 99% 的可靠性水平下推力室组件的故障对离散系统明显地高于 IME 系统。开车持续时间对 IME 系统减少 25% (247 至 186 秒) (与 3% 相比 (31 至 30 秒))。这些结果证实这一明显因素, 即增加部件故障率减少系统可靠性。

最后, 假设对所有系统分析健康监控系统在切断和隔离故障部件时都立即 100% 时间内对部件破坏起反应。然而, 若应用 80% 的有效健康监控系统假设时, 所有部件故障的 20% 都是未被检测的。引用这个假设时, 冗余 IME 系统的可靠性在每秒都瞬间的以非冗余系统所经受故障的 20% 被减少。这一点假设允许故障件运行时不能引起灾难性的系统故障。图 11 示出 IME 系统的 80% 可靠健康监测系统可靠性的衰减。例如, 对于 500 秒开车时间, 系统可靠性减少近似 13%。可靠性的这种下降随开车持续时间增加而增加, 直至在近似 130 秒下该系统故障达到概率为 100%。

故障模态和影响分析

故障模态和影响分析是一种归纳技术, 它提供了一种系统识别那些部件能够发生故障、它们又怎样破坏及故障的影响是什么的方法。一旦完成了故障模态和

影响分析,就准备了一个重要项目表。该表汇总了表示系统的各项单点故障。通常,在假定关键项的故障概率和求出单个概率之和情况下尽管可以定量地应用故障模态和影响分析法,但是这种方法仅能用作近似的量分析的近似法。应用故障模态和影响分析的优点在于能够识别单点故障并且能够分析的优点在于能够识别单点故障并且能够逐个零件的识别危害。故障模态和影响分析的缺点在于:由于分析集中在单个的部件故障,因此不考虑共存故障的组合影响(共同原因故障)。

在 IME 上进行故障模态和影响分析以区别部件故障模态和其对 IME 的影响。表Ⅲ列出氧化剂泵出口总管的故障模态和影响分析的例子,它包括总管的导管和连接件。总管的故障模态包括裂纹和疲劳破坏,管道和密封或密封表面的污染、密封破坏和紧固件扭矩松弛。以前的研究表明:由于紧固件扭矩松弛通过法兰的泄漏能够引起飞行系统的重要问题。缓解这种故障模态的方法是需要研究由很多螺栓连接法兰构成的 IME 系统。一种意见是可以引用全焊接式连接件以消除这些故障模态。然而,这种设计改进将减少了飞行前变更外部部件的能力,即是减少了 IME 的机动性。重要项目表示出点火器动力源故障、总管故障和阀作动器故障可能是 IME 设计系统的单点故障。

预损害分析

预损害分析是一定量归纳方法用于估计由系统造成的潜在危害。通常,预损害分析同故障模态和影响分析相结合使用。预损害分析的目的在于识别系统中的潜在危害确定可能由于这些危害产生的潜在事故的重要性。一旦识别出,就研究出对每种危害的控制方法。减少这些危害的控制方法按择优应用序列如下:

1. 设计改变;
2. 工程上的安全装置(如冗余备件、保护阀等)。
3. 安全设备(如保护器,遮护屏,人体防护装置等);
4. 报警装置(报警器,指示灯等);
5. 运行程序和导向;

预损害分析能够定量识别系统的风险概率和其苛刻性。损害概率和苛刻性的值按文献 9 定义。然而,这种方法不能够识别共同原因故障,也不能够处理系统中的复杂相互作用。

表 IV 列出为 IME 研究出的预损害分析的例子。这里所考虑损害是来自推进剂泄漏或不适当的通风和运送推进剂产生的总管着火或爆炸。控制程序包括硬件安全因素。污染控制程序和运行前的泄漏检查。为表示出总管的损害还寻找了火箭体。碰撞可引起裂纹或表面变形,从而导致某种破坏和可能的燃烧室或涡轮泵损失。对火箭体的控制程序均类似于对着火/爆炸损害所描述的程序。

故障树分析

故障树分析是一种推断性故障分析方法。该法能够识别一个最重要的事件并提供一种确定该事件原因的方法。这种处理方法明显的不同于以前讨论的那些方法,因为这种分析假设系统以某种方式发生了故障,然后试图确定能够产生不合乎要求条件的所有可靠的方法。故障树是一种故障次序和导致不合乎要求事件的一些损坏的图示模型。因此,故障树表示了某些基本事件和最重要事件之间的逻辑关系。故障树是导致于破坏的那些事件的定量模型,人们能够定量的估算这些事件。在核动力装置的概率风险评估中,故障树定量计算形成了一核心分析技术。

对于大的复杂系统,如综合模型发动机,由于下列原因故障树是特别有吸引力的。

1. 系统的图示显示能深入的了解故障的结果链。
2. 能够定量的识别有影响因素对系统的破坏的相对影响。
3. 系统的薄弱点能够定量的被识别。
4. 能够容易的识别共同原因故障的系统易损性。

应用故障树的限制在于该分析不能够包括所有可能的故障。在故障率数据方面可能有很大的不准确性和处理过程可能耗费时间很大。概率方法,包括故障树分析在 NASA 的许多应用中评定风险方面是有用的。

图 12 示出 IME 故障树的样本。故障树是在 NASA 路易斯研究中心应用 IRRAS 编码制作的。IRRAS 是为美国核管理委员会提出的一种标准码,用于概率风险评估(图中所应用的符号按图 13 定义)。该故障树不包括涡轮旁路阀的故障(这种故障是由于与这些部件相关的系统相连的不准确性产生的)。由图可以看出,顶部方框事项是“IME 为产生所需推力的故障”。若第二层方框的某一事件发生,则这一事件就能产生。注意:当检查“LH2TPA/气流供给阀故障”的活门工作时,若涡轮泵都磨损了,或若阀作动器液压损失了,而假定所有的燃料涡轮阀均以相同的液压工作时,这第二层方框的事件就能够发生。按故障树,共同原因故障能够这样的发生,即由于液压损失所有阀不工作。这表明故障树处理方法的力度、共同原因故障的识别如本分析所识别的阀作动器故障。故障树方法还表明:点火器电源的回路不正常工作能够产生共同原因故障(假定所有推力室的点火器是在不相同电源不工作)。据故障树的例子很显然,IME 系统比离散系统可能更适应于共同原因故障。

在核工业中,反应器运行经验和概率风险评估两者如一的表明:这些共同原因故障是事故的主要影响因素。文献 16 陈述了推进系统先天性的易受相关故障(共同原因故障)损害,因为这些故障能量很大。因此,为了确定共同原因对 IME 的影响就需要进一步的努力应用定量的概率风险评估方法。

几点结论

为估算 IME 总体设计方案的可靠性进行了上述研究。应用扩展器循环结构对比了 IME 与离散系统的可靠性。为了进行对比,进行了二项式近似分析和 Markov 分析。另外,为了确定临界参数和 IME 的高风险分量,对 IME 又进行了故障模态和影响分析、预损害分析和故障树分析。

二项式近似分析的结果定量地表明:总管是 IME 的可靠性关键驱动部件,并且对 IME 这种总体设计方案,它要求低的总管故障概率才能显示出与离散系统相比拟的利益。因此,按这一分析,IME 将在大多数情况下是比离散系统具有较低可靠性的发动机系统。应用 Markov 分析也得出这些结论。此外,Markov 分析还表示出:IME 具有较低的系统故障平均时间和较低的中间故障时间(比离散发动机系统)。Markov 和二项式近似方法的分析结果清楚的表明通过冗余技术能得到系统可靠性的重要改进以及设计火箭系统应采用独立发动机系统。冗余设计通过安排部件故障给其它运行部件增加了可靠性。离散发动机系统通过隔离单体的故障和减少发动机功能对共用部件(如总管)的依赖性增加可靠性。所以,基于这一分析,实际的可靠性问题不是冗余的而是系统综合整体(系统设计本身)。这些分析都是在八个推力室的发动机系统进行的。更深入的分析实际上可能要求较少的推力室,这取决于飞行任务的选择。虽然这些倾向对少数推进机都是类似的,但只要实际的发动机结构被确定下来,就需要进行未来的可靠性研究。

故障模态和影响分析、预损害分析和故障树分析方法也用于评估综合模型发动机设计方案的可靠性。所有三种方法对于完整估算火箭发动机系统设计都是必要的。进一步的努力应集中在定量的故障树分析折衷的改进 IME 的可靠性或任一其它的被考虑应用于宇宙空间的火箭推进系统的可靠性。

参考文献略

译自 AIAA - 93 - 1886 Reliability studies of Integrated Modular Engine System Designs.

表1

综合模型发动机部件汇总

子组件	部 件	每套 中数 量	总 数	部件故障率 (/1000秒) (Markov)	部件停车率 (/1000开车) (二项式法)
LOX 泵/涡轮	涡轮	1	4	0.0175	0.1466
	泵	1	4	*	*
	检测阀	2	8	0.0167	0.2000
	关闭阀	2	8	0.0167	0.2000
	泵出口管线	1	4	0.0111	0.0335
	涡轮进口管线	1	4	0.0111	0.0335
	涡轮出口管线	1	4	0.0111	0.0335
H2 泵/涡轮	涡轮	1	4	0.0194	0.2419
	泵	1	4	*	*
	检测阀	2	8	0.0167	0.2000
	关闭阀	2	8	0.0167	0.2000
	泵出口管线	1	4	0.0334	0.0835
	涡轮进口管线	1	4	0.0334	0.0835
	涡轮出口管线	1	4	0.0111	0.0835
燃烧室/喷管	点火器	1	8	0.0215	0.0010
	喷咀	1	8	0.0001	0.0920
	燃烧室	1	8	0.1078	0.1077
	喷管	1	8	0.0006	0.1930
	检测阀	1	8	0.0167	0.2000
	关闭阀	3	24	0.0167	0.2000
	氧化剂管路	1	8	0.0111	0.0335
	燃料管路	1	8	0.0334	0.0835
	涡轮进口管路	1	8	0.0334	0.0835
	冷却剂管路	1	8	0.0334	0.0835
总管	LOX 泵出口	1	1	0.0264	0.1000
	LH2 泵出口	1	1	0.0660	0.5000
	LOX 涡轮出口	1	1	0.0660	0.5000
	LOX 涡轮进口	1	1	0.0660	0.5000
	LH2 涡轮进口	1	1	0.0660	0.5000
	涡轮旁路阀	2	2	0.0167	0.2000

表2

离散发动机部件汇总

子组件	部 件	每套 中数 量	总 数	部件故障率 (/1000秒) (Markov)	部件停车率 (/1000开车) (二项式法)
LOX 泵/涡轮	涡轮	1	8	0.0175	0.1466
	泵	1	8	*	*
	控制阀	1	8	0.0167	0.2000
LH2 泵/涡轮	涡轮	1	8	0.0194	0.2419
	泵	1	8	*	*
	控制阀	2	16	0.0167	0.2000
	主燃料阀	1	8	0.0167	0.2000
	泵出口管线	1	8	0.0334	0.0835
	涡轮进口管线	1	8	0.0334	0.0835
	涡轮出口管线	1	8	0.0111	0.0835
燃烧室/喷管	点火器	1	8	0.0215	0.0010
	喷咀	1	8	0.0001	0.0920
	燃烧室	1	8	0.1078	0.1077
	喷管	1	8	0.0006	0.1930
	氧化剂管路	1	8	0.0111	0.0335
	燃料管路	1	8	0.0334	0.0835

表3

IME 总管的故障模态和影响分析的例子

标 号	部件 名称	故 障 模 态	故障原因	故障影响	损害 种类	故障率 1/1000 开 车	工作要求
7.1	氧化剂 泵 出口总 管	7.1.1裂纹 /疲劳 7.1.2管道 中污染 7.1.4密封 /密封表面 污染 7.1.5密封 破坏 7.1.6紧固 件扭矩 降低 7.1.3法兰 变形	7.1.1 疲劳、 振动、热畸 变,材料缺欠 超应力,加 工不合理,焊 接不正常 7.1.2外部原 因,机加 7.1.3超压装 配错误热问题 7.1.4外部原 因,加工问题 7.1.5密封破 坏,组件误差, 不适当装拆、 超应力,超温 密封表面破坏 7.1.6振动、 过载,不适当 装配破坏	7.1.1氧化剂 泄漏燃烧、爆 炸、燃烧室氧 化剂损失性能 损失飞行任务 失败 7.1.2通道堵 塞造成室的流 量减少 7.1.3同 7.1.1 7.1.4同 7.1.1 7.1.5同 7.1.1 7.1.6同 7.1.1	II III II II II II		7.1.1结构防 护性试验安 全因子1.4 7.1.2严格检 验;污染控制 程序 7.1.3设计范 围宽;起动前 泄漏检查 7.1.4工作前 泄漏检查,严 格的检查;污 染控制; 7.1.5同7.1.3 7.1.6同7.1.3 还有自锁螺母 或垫片

表4

IME 总管的预损害分析实例

标 号	事 故 状 态	事 故 原 因	事 故 影 响	事故 种类	事故 频率	事 故 控 制	注意
6.1	着火/ 爆炸	6.1.1推进剂由下列原因泄漏: a. 裂纹/疲劳 b. 法兰变形 c. 密封/密封面污染 e. 紧固件扭矩松弛 (故障模态和影响分析章节 6.1-6.14,9.1,9.2	泄漏产生一种潜在着火环境; 仪器可以燃烧; 预防系统健康监控; 调整硬件可能过热, 导致裂纹/破坏; 总系统损坏	II	C	按屈服安全系数为1.1和强度极限安全系数为1.4设计硬件; 污染控制程序; 总管应力分析; 工作前进行泄漏检查; 严格的检查技术	总管
		6.12不适当的泄效和输送推进剂: a. 不适当的组装 b. 通风气体再进入或收集在管线	燃料和氧化剂混合物可以产生一种潜在可燃环境; 仪器可以燃烧; 预防系统健康监控; 调整硬件可能过热, 导致裂纹/破坏总系统损坏	II	D	所有氧化剂和燃料管线都将装配适当防止不适当装配; 氧涡轮泵推进剂间密封组装机通风管线; 压力按红线监控	总管

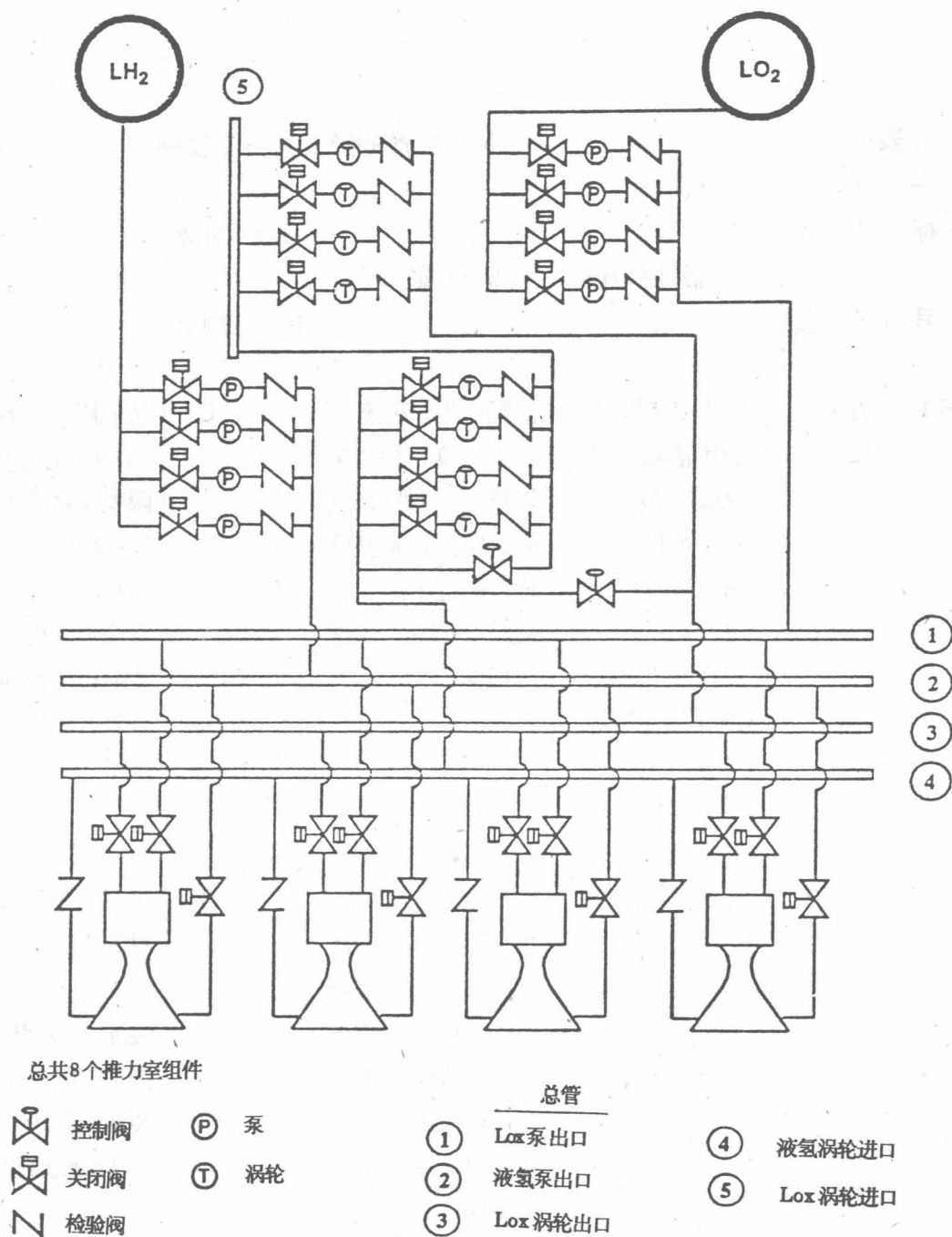


图 1 IME 简图, 扩充循环结构