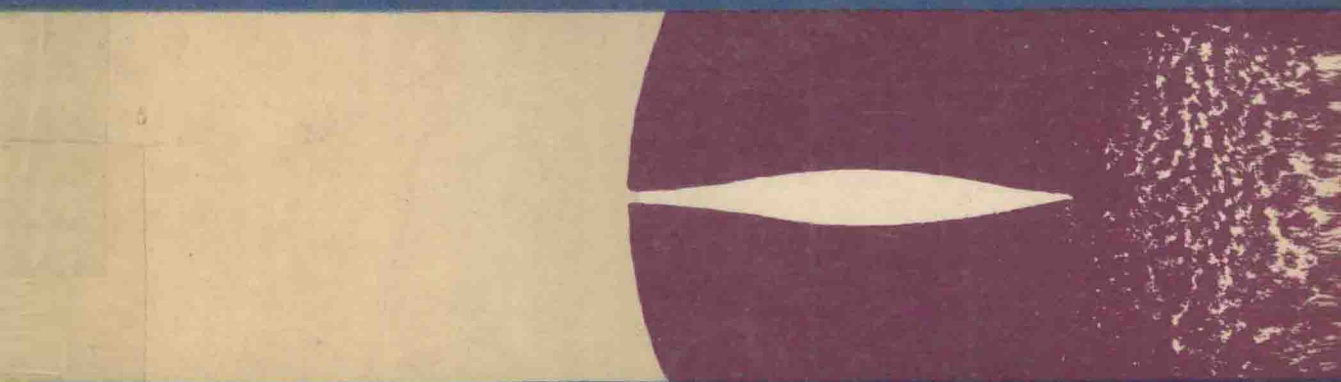


NASA涡轮发动机 热端技术(HOST)文集



航空航天工业部第 628 研究所

1991.3

NASA 涡轮发动机 热端技术(HOST)文集



航空航天工业部第 628

1991, 3

编者的话

美国NASA已经完成了一项为期7年(1980~1987)的涡轮发动机热端技术(HOST)计划。这项多学科的研究和技术计划(相当于美国国防部6.1类研究和6.2类探索发展)分解为70多个研究课题,涉及工业界、大学和政府研究机构共21个单位,最后共发表250篇研究报告和大量的计算机程序。计划总投资超过4400万美元。

HOST计划的目的在于发展气动热力环境、热载荷、材料特性、结构响应和寿命预估的分析模型并建立相应的数据库和计算机程序,供先进涡轮发动机燃烧室和涡轮的关键部件的设计分析时使用,以便改善未来发动机热端部件的耐久性和可靠性。

HOST计划有如下特点:

- 与NASA近年来负责实施的主要针对性能的其他计划(如节能发动机和先进螺旋桨计划)不同,HOST计划主要着眼于提高耐久性和可靠性,进而提高飞行安全性和降低维修费用。因此,HOST计划是对NASA过去的研究计划的平衡或补充。

- 是一项针对性很强的综合性研究计划。它主要针对工作温度在1755K以上的热端部件——燃烧室和涡轮,涉及为研究上述部件所需的6个工程学科——高温测量、燃烧、涡轮传热、结构分析、疲劳与断裂以及表面防护。

- 虽然NASA主办的这项计划是由民用发动机的需求提出的,但所发展的方法同样适用于军用发动机。

- 没有研制象验证机那样的重大硬件,而是通过小规模的研究性试验、建立数据库、编制计算机程序和建立分析模型,来增强对技术的理解和设计能力。

在计划结束后,为评估HOST计划的成果及其影响,NASA刘易斯研究中心征集了41名来自各参与单位的专家的意见,一致认为:HOST计划是非常成功和值得的;把重点放在研究而不是研制硬件的做法符合NASA为航空工业提供长远支持的作用;目标集中,并由若干单位共同攻关,使问题得到较快的解决并建立了工业界、大学和政府研究机构之间良好关系;一年一度的专题报告会是HOST计划成功的一个重要因素,一方面有利于改进计划的组织,另一方面及时交流了成果;HOST计划的一项附带效果是有可能大大降低发动机研制费用,估计由此节省的研制费和改进费会比HOST计划的投资大几个数量级。

为供我国航空发动机科研、设计、教学和管理人员参考,特选择有代表性的24篇报告编译成文集出版。

参加编译和校对工作的有:方昌德、侯志兴、艾青、潘宇、李跃、魏钰、唐湘碧、梁凯、朱守信、王玉琛、郑祺选和罗小东。

在编译和出版中,得到中国航空发动机总公司的大力支持和资助,特此表示感谢。

编者

1991年3月

(205)	目 录	88
(218)	88

回顾和评论

- 1. NASA涡轮发动机热端技术 (HOST) 计划的回顾..... (1)
- 2. 对热端技术 (HOST) 计划的影响的评论..... (7)

测量和仪表

- 3. HOST仪表研制计划综述..... (14)
- 4. 热端部件研究中应用的先进高温仪器..... (16)
- 5. 激光测速——进展报告..... (37)
- 6. NASA 刘易斯研究中心应变仪实验室——一个现代化的实验室..... (41)

燃烧

- 7. 燃烧室气动热力模型的评定、发展和应用..... (46)
- 8. 燃烧室扩压器相互作用研究计划..... (62)
- 9. 气动雾化喷嘴先进诊断技术的应用..... (67)
- 10. 用于复杂流动的有效数值技术..... (72)
- 11. 再循环紊粘气流数值计算方法的改进..... (74)

涡轮传热

- 12. 涡轮传热数据库和数学模型评估..... (78)
- 13. 涡轮静子流场模拟..... (94)
- 14. 涡轮叶片传热系数测量..... (97)
- 15. 旋转条件下冷却剂通道的传热..... (110)

结构分析

- 16. 燃气涡轮发动机热端部件结构分析方法的发展..... (123)
- 17. 结构分析的应用..... (154)
- 18. 热端部件的三维非弹性分析方法..... (167)
- 19. 单晶和定向凝固高温合金本构模型的进展报告..... (174)

疲劳与断裂

- 20. 疲劳和断裂综述..... (178)
- 21. 涡轮热端部件材料的疲劳寿命预测模型..... (184)
- 22. 用于材料试验室的自动化软件..... (199)

表面防护

23. 飞机燃气涡轮发动机隔热涂层的寿命模化..... (205)
24. 关于隔热涂层的研究——包括热膨胀失配和粘结层氧化..... (213)

国外文献

- (1) NASA 航空发动机隔热涂层 (HOST) 寿命模化研究..... 1
- (2) NASA 航空发动机隔热涂层 (HOST) 寿命模化研究..... 2

国内文献

- (3) HOST 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 3
- (4) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 4
- (5) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 5
- (6) NASA 航空发动机隔热涂层 (HOST) 寿命模化研究..... 6

摘要

- (7) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 7
- (8) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 8
- (9) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 9
- (10) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 10
- (11) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 11

参考文献

- (12) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 12
- (13) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 13
- (14) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 14
- (15) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 15

参考文献

- (16) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 16
- (17) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 17
- (18) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 18
- (19) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 19

参考文献

- (20) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 20
- (21) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 21
- (22) 航空发动机隔热涂层寿命模化研究..... 22

NASA 涡轮发动机热端技术

(HOST) 计划的回顾

D. E. Sokolowski

NASA 刘易斯研究中心

1.0 序 言

自从把燃气涡轮发动机用于飞机推进以来，追求高性能的结果使发动机核心的总压比呈不断提高的趋势。自压气机和燃烧室流出并流经涡轮的气流温度也随之增加。在可以预见的将来，民用飞机发动机的压气机出口温度将超过 922K (1200°F)，而涡轮进口温度大约为 1755K (2700°F)。军用飞机发动机将大大超过这些值。

特别自 1973 年以来燃油价格的不断提高，提出了节能和燃油效率更高的飞机发动机的要求。为满足这一要求，发动机制造商不断提高这一代燃气涡轮发动机的性能。之后不久，航空业开始遇到发动机核心的热端——燃烧室和涡轮的关键部件耐久性或有使用寿命显著降低的问题。这主要是由于燃烧室火焰筒、涡轮静子叶片和涡轮转子叶片上出现裂纹引起的。此外，燃烧室的热防护涂层的剥落也是明显的原因。

对航空公司来说，使用中的发动机，主要是高涵道比发动机的耐久性降低是用维修费用的急剧增加来度量的。维修费用的增加在热端部件方面显得特别明显。正如 Dennis 和 Cruse 所表明的，热端部件的维修费用几乎达到发动机总维修费用的 60%。对这种直线上升的维修费用的普遍关注导致一个新的要求——改进热端部件的耐久性。

热端部件的耐久性可以用下述四种途径的任何组合来改进。它们是采用：(1) 具有更高使用温度的材料，(2) 更有效的冷却技术以降低材料温度，(3) 先进的结构设计概念以减小应力，和 (4) 在设计分析过程中的更精确的分析模型和计算机程序以确定热点、高应力等。

目前，高温金属材料包括镍基和钴基超级合金。这些合金的某些元素，如钴，供应短缺而且价格昂贵。在 Stephans 的文章中介绍了减少这些合金元素的方法。此外，先进高温超级合金还包括定向凝固、单晶和氧化弥散加强材料。新型材料的研制时间长，工艺往往困难，而且费用大。因此，成功地使用这些材料需要在设计要求、加工可能性和总的费用之间权衡。

目前的冷却技术变得复杂，因而加工也相当困难。在高性能发动机上，可以用增加冷却剂流量的办法来改善冷却能力。然而，这样做会降低发动机的热力循环性能。此外，这种先进发动机的冷却剂温度比目前使用中的发动机的高。因而，正在研究更有效的冷却技术。新的冷却技术一般在设计上更复杂，要求新的加工方法，并且需要有大量的薄膜冷却小孔，每个小孔会产生限制寿命的高的应力集中。采用先进冷却技术需要有设计分析用的精确模型。

先进结构设计方案的采用往往以一种已经得到证实的初步方案开始，然后进一步发展，而且最关键的是它必须大大优于已经确立的标准设计方法。要人们接受新方案是花费时间的，并且新方案的收益必须是很大的。对于改进高性能燃烧室的耐久性来说，Tanrikut 等人

讨论的分段火焰筒是先进结构设计方案的一个极好例子。将标准的全环火焰筒分成若干段，解决了由于环形件应力大而造成的寿命限制问题。同时，设计师实现了灵活地选择先进冷却技术和材料，包括陶瓷复合材料。

最后，诸如燃烧室火焰筒或涡轮静子和转子叶片等热端部件的设计分析包括采用分析的或经验的模型。这样的模型往往放入计算机程序，预估和分析气动热力环境、热-机械负荷以及材料和结构对这种负荷的响应。当零件暴露在象涡轮发动机内的高温循环工作条件下，材料发生的反复应变导致裂纹起始和扩展，直到失效或断裂。一个零件的有用寿命或耐久性通常定义为重要裂纹起始和扩展前所能积累的任务循环数。因此，设计师们需要预估有用“寿命”，这样他们能设计满足要求的零件。

对一个零件的寿命的预估工作一般遵循如图1所示的分析流程。实际上，设计一个满足规定寿命目标的零件，如涡轮转子叶片，需要通过图1的“寿命预估系统”作多次迭代，不断改变叶片几何形状、材料或每个通道的冷却效果，直到预估到满意的寿命目标。

分析模型和计算机程序常常预估定性的物理特性，但在定量上则精度不够满意。为了提高预估能力，研究人员往往需要：(1)理解关于耐久性的基本物理现象并作出更精确的模化，(2)既要强调当地的又要注意整体的条件和响应，(3)适应非线性和非弹性特征，和(4)将某些模型由二维扩展到三维。

幸运的是，在要求改善热端部件耐久性的时候，数学解析技术、电子计算机存储量和计算速度正在急剧提高。大幅度改进分析预估能力的时机已成熟。

2.0 HOST 计划的回顾

为了改善特别是用于分析在先进燃烧室和涡轮内高温循环工作条件下的分析设计和寿命预估手段，NASA的刘易斯研究中心负责实施涡轮发动机热端技术(HOST)计划。该计划于1980年10月开始，1987年底结束。

2.1 目的

HOST计划发展气动热力环境、热-机械负荷、材料特性、结构响应和寿命预估的改进的分析模型，它们与完善的计算机程序一起可用于先进涡轮发动机燃烧室和涡轮的关键零件的设计分析。在设计过程中，更为精确的分析手段更好地保证改善未来发动机热端部件的耐久性。

2.2 途径

在高温循环工作条件下的涡轮发动机部件复杂的耐久性问题需要在诸多技术学科方面做研究工作来解决。在HOST计划中，涉及六个学科：测量、燃烧、涡轮传热、结构分析、疲劳与断裂和表面防护。这种多学科的交叉不仅是由于研究目标的集中而且有时是因问题的综合性造成的。HOST计划中的大多数学科遵循一条共同的研究途径。首先，往往是用小型实验的办法来研究与耐久性有关的现象。用已知的边界条件和适当的测量设备，这些实验得出这样的现象的特征和对它们更好的理解，象气动热力环境、在热-机械负荷下的材料和结构特性和裂纹的起始和扩展。其次，对现有分析模型进行分析评估，并用内容更广的物理考虑和/或先进的计算机程序加以改进。最后，用与实验结果特别是小规模实验的数据比较的办法，来证实实用改进的分析手段所得的预估结果。

2.3 计划安排

HOST计划的目标是通过大量的研究和技术计划实现的。HOST计划的管理部门与私营工业界签订了40项独立的研究合同，其中大部分是多年的和多阶段的。有几项工作，由于其研究的性质和每个承包商的特点，涉及到几家承包商。另外13项工作用拨款的办法由大学进行。最后，NASA刘易斯研究中心用该计划的经费进行17项重要的工作。表1列出HOST计划的全部技术工作。

3.0 技术转移

HOST计划的研究工作是按上述学科组织、进行并提出报告的。大量的出版物提供关于从HOST计划得出的详细研究结果。举办了六次专题讨论会，从1982年到1987年每次都出版会议文集，题为《涡轮发动机热端技术》。每个文集一般都包括上一年的研究结果。最后两个文集还包括最后研究报告的目录。在研制先进测量设备和改进燃烧室气动热力和涡轮传热模型方面的进展见Sokolowski和Ensign的文章。最后，一份HOST计划的详尽目录正在编辑之中，计划于1988年晚些时候出版。

表1 HOST计划的研究工作

测量	合同(C)、拨款(G)、 或 NASA 内部(N)项目编号	
热端观察系统	C	NAS 3-23156
动态燃气温度测量系统-A	C	NAS 3-23154
动态燃气温度测量系统-B	C	NAS 3-24228
涡轮静态应变仪-A	C	NAS 3-23169
涡轮静态应变仪-B	C	NAS 3-23722
涡轮热通量传感器	C	NAS 3-23529
激光斑纹应变测量	C	NAS 3-26615
高温应变仪材料	G	NAC 3-501
热端传感器	N	2510
用于热端的激光风速仪	N	2520/2530
HOST测量技术的应用	N	2510
燃烧		
燃烧室气动热力模型的评估-I	C	NAS 3-23523
燃烧室气动热力模型的评估-II	C	NAS 3-23524
燃烧室气动热力模型的评估-III	C	NAS 3-23525
改进的数值方法-I	C	NAS 3-24351
改进的数值方法-II	C	NAS 3-24350
改进的数值方法-III	G	NAC 3-596
流动干扰实验	C	NAS 3-24350
燃油涡流特性-I	C	NAS 3-24350
燃油涡流特性-II	C	NAS 3-24352
质量和动量的传递	C	NAS 3-22771

扩压器/燃烧室相互干扰	C	F33615-84-C-2427
掺混射流混合研究	C	NAS 3-22110
进入典型燃烧室流场的横向射流喷射	G	NAS 3-549
火焰辐射研究	N	2650
<u>涡轮传热</u>		
弯管内主流紊流对流动的影响-A	C	NAS 3-23278
✓弯管内主流紊流对流动的影响-B	G	NAG 3-617
无薄膜冷却的二维传热	C	NAS 3-22761
有前缘薄膜冷却的二维传热	C	NAS 3-23695
有下游薄膜冷却的二维传热	C	NAS 3-24619
涡轮转子内转子叶片和静子叶片传热系数的测量	C	NAS 3-23717
三维边界层程序的评估	C	NAS 3-23716
在旋转条件下冷却剂一侧的传热	C	NAS 3-23691
分析流动和传热	C	NAS 3-24358
✓紊流对传热的影响	G	NAG 3-522
✓叶尖区的传热	G	NAG 3-623
✓冲击冷却	G	NSC 3-075
✓涡轮转子叶片传热的计算	G	NAG 3-579
先进测量技术的发展	N	2640
用激光风速仪画热涡轮流动图	N	2620
真实发动机工作条件下涡轮的气动热力试验	N	2640
<u>结构分析</u>		
热/结构载荷传递程序	C	NAS 3-23272
三维非弹性分析方法-I	C	NAS 3-23697
三维非弹性分析方法-II	C	NAS 3-23698
部件的特定模化	C	NAS 3-23687
火焰筒循环寿命的确定	N	5210
结构部件响应程序	N	5210
高温结构研究实验室	N	5210
本构模型的建立	N	5210
均质材料的本构模化-I	C	NAS 3-23925
均质材料的本构模化-II	C	NAS 3-23927
单晶合金的理论结构模型	G	NAG 3-511
单晶和定向凝固合金的双轴结构方程的推导	G	NAG 3-512
<u>疲劳与断裂</u>		
均质材料的蠕变疲劳寿命的预估	C	NAS 3-23288
高温下裂纹的扩展	C	NAS 3-23940
非均质材料的寿命预估和材料结构特性	C	NAS 3-23939
疲劳裂纹增长机理的分析	G	NAG 3-348
高温疲劳和结构实验室的重要作用	N	5220
<u>表面防护</u>		
表面化学对热腐蚀的影响	C	NAS 3-23926

隔热涂层寿命预估-I	C	NAS 3-23943
隔热涂层寿命预估-II	C	NAS 3-23944
隔热涂层寿命预估-III	C	NAS 3-23945
叶片沉积模型	G	NAG 3-201
隔热涂层的机械特性	G	NCC 3-27
涂层氧化/扩散的预估	N	5160
沉积模型的证实	N	5160
双循环的破坏作用	N	5160
试验台/发动机相关	N	5160
燃烧试验台的现代化	N	5160

注: A和B系先后的工作
I、II和III系同时进行的工作

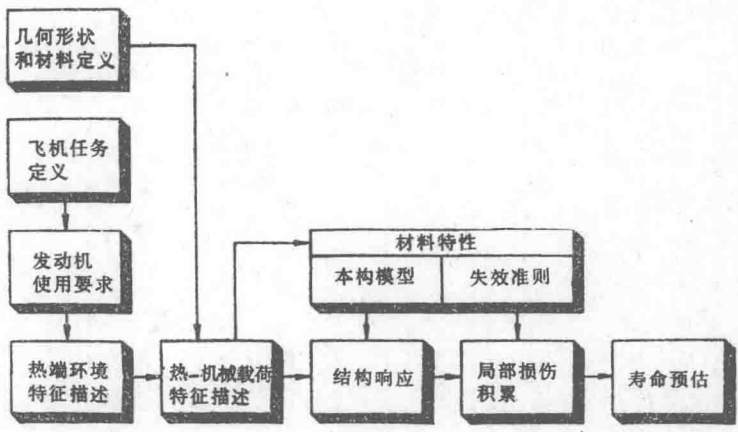


图 1 热端零件寿命预估的分析流程

参 考 文 献

Dennis, A. J. and Cruse, T. A., 1979, "Cost Benefits from Improved Hot Section Life Prediction Technology--for Aircraft Engine Combustor and Turbine Parts," AIAA Paper 79-1154.

Sokolowski, D. E. and Ensign, C. R., 1986, "Toward Improved Durability in Advanced Combustors and Turbines--Progress in the Prediction of Thermomechanical Loads", NASA TM-88932.

Sokolowski, D. E., 1988, "Comprehensive Bibliography of the Turbine Engine Hot Section Technology (HOST) Project," NASA TM-100275, to be published.

Stephans, J. R., 1982, "COSAM Program Overview," COSAM (Conservation of Strategic Aerospace Materials, Program Overview, NASA TM-83006, PP. 1-11.

Tanrikut, S., Marshall, R. L., and Sokolowski, D. E., 1981, "Improved Combustor Durability--Segmented Approach with Advanced Cooling Techniques," AIAA Paper 81-1354, Turbine Engine Hot Section Technology (HOST) 1982, NASA TM-83022.

Turbine Engine Hot Section Technology (HOST) 1983, NASA CP-2289.

- Turbine Engine Hot Section Technology (HOST) 1984, NASA CP-2339.
- Turbine Engine Hot Section Technology (HOST) 1985, NASA CP-2405.
- Turbine Engine Hot Section Technology (HOST) 1986, NASA CP-2444.
- Turbine Engine Hot Section Technology (HOST) 1987, NASA CP-2493.

方昌德译自 IGTI-Vol.2, P.1~4

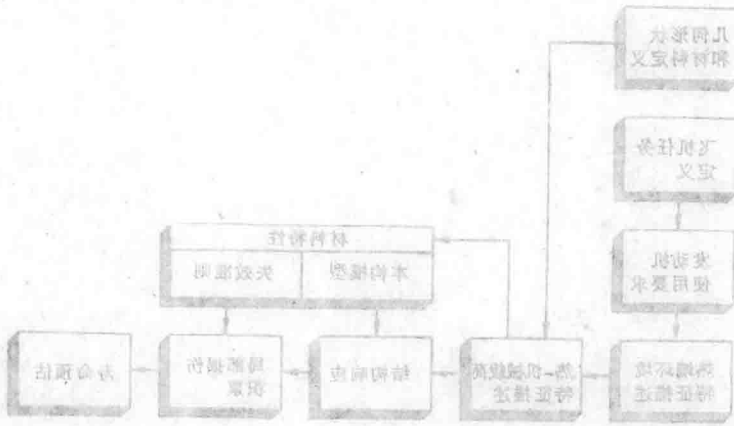


图1 涡轮零件寿命评估的流程图

参考文献

Donnis, A. J. and Cress, T. A., 1978, "Cost Benefits from Improved Hot Section Life Prediction Technology for Aircraft Engine Compressor and Turbine Parts," AIAA Paper 78-1184.

Sokolowski, D. E. and Ensign, C. R., 1988, "Toward Improved Durability in Advanced Compressors and Turbines—Progress in the Prediction of Thermomechanical Loads," NASA TM-88032.

Sokolowski, D. E., 1983, "Comprehensive Bibliography of the Turbine Engine Hot Section Technology (HOST) Project," NASA TM-100275, to be published.

Stephan, J. R., 1982, "COSAM Program Overview," COSAM (Conservation of Strategic Aerospace Materials) Program Overview, NASA TM-83006, pp. 1-11.

Tanrikul, S., Marshall, R. L., and Sokolowski, D. E., 1981, "Improved Compressor Data-Bility—Segmented Approach with Advanced Cooling Techniques," AIAA Paper 81-1854.

Turbine Engine Hot Section Technology (HOST) 1982, NASA TM-83032.

Turbine Engine Hot Section Technology (HOST) 1983, NASA CP-2339.

对热端技术 (HOST) 计划的影响的评论

J. B. Esgar 和 D. E. Sokolowski

NASA 刘易斯研究中心

摘 要

由 NASA 刘易斯研究中心发起的热端技术 (HOST) 计划 (1980~1987) 旨在通过增强技术理解和采用更精确的设计分析方法改善先进飞机发动机热端部件的耐久性。该计划是一项多学科、跨部门和目标集中的研究工作, 涉及21个单位和70项工作, 共产生约250篇研究报告。没有研制大的硬件。为了评定HOST计划是否对整个飞机发动机工业产生了重要的影响, 采访了41位计划的参与者, 听取他们的评论意见。本文摘要介绍这些采访的结果。

1.0 序 言

HOST计划有一些特点。与NASA负责的其他一些计划主要集中在性能改善方面不同, HOST计划着重改善耐久性。那些改善性能的计划包括节能发动机 (EEE)、发动机部件改进 (ECI) 和先进涡轮螺桨 (ATP) 计划, 并且只涉及飞机发动机工业的一部分。HOST计划补充了那些往往会恶化发动机耐久性的性能改进计划。此外, HOST计划的70项主要的研究和技術工作从三个工作领域——工业界 (包括全部大型的美国发动机制造商)、学术界和政府部門抽调出研究人員, 朝着共同的目标一起工作。

HOST计划的另一个特点是研究的目标集中并具有综合性。它包括六个工程学科, 这些学科研究发动机热端——燃烧室和涡轮所需要的关键技术。这些学科是测量、燃烧、涡轮传热、结构分析、疲劳与断裂和表面防护。HOST计划起到纽带作用, 使这些学科协调工作。

因为发动机制造商在研制民用和军用发动机时采用同样的设计分析系统, 所以, 该计划虽然是根据民用飞机的需求制订的, 军用需求同样也能满足。最后, 没有研制象发动机原型机那样的重大硬件, 而是发表了约250篇研究报告和大量的计算机程序, 从而增强技术理解和设计分析能力。通过六次年度专题报告会, 使技术得以进一步鉴定和交流, 总共有1500人出席了这些报告会。采用研究报告和专题报告会上介绍的研究结果, 开始把先进发动机的研制途径从历史上的“试凑”方法改为较为分析性的途径, 即在试验开始以前, 用精确得多的数据库和数学模型对部件设计进行分析。试验就变得更为设计验证性的而不是实验性的。

2.0 途 径

本研究的目的是通过收集有代表性的重要项目参加者的意见, 确定 HOST 计划的影响。作了努力以避免接受采访者的偏见 (如果有的话)。本文的作者包括 NASA 的 HOST 计划经理和一名负责保障服务的承包人。前者构思并指导这项研究。后者具体实施这项研究, 他在 HOST 计划之前, 就有相当深的吸空气发动机的背景知识, 但并不了解 HOST 计划, 因而在开

始研究前对该计划不抱有偏见。计划经理对要采访的HOST计划参与单位和人选提出建议。这位承包人与这些单位联系，安排采访，并与计划经理建议的接受采访者和采访过的人建议的另外一些人交换意见。在整个采访期间，一些HOST计划的参加者主动要求提出评论意见。这样，所采集到的意见和数据就不夹杂成见。

41名接受采访者按单位分配如下：发动机制造商26名、大学5名、研究所4名和政府部门（NASA和美国空军）6名。采访时要求接受采访者自由发表个人意见，包括对HOST计划的正面和反面的意见。在对意见的理解上有问题时，找接受采访者澄清，有时用书面形式提交有关的评论意见。负责采访的作者相信，评价是自然和真实的。

3.0 结 论

每个接受采访者一致同意，HOST计划是极其有效的，对所有的参与者都有好处。NASA因提出、支持和管理这项计划而受到称赞。接受采访者中的一些人认为，HOST计划中特别应该认为是有益的项目包括：（1）三维非弹性结构分析，（2）热-机械疲劳试验，（3）结构模化，（4）燃烧室气动热力模化，（5）涡轮传热，和（6）防护涂层。进行测量技术研究的单位认为，测量技术的研究也是有益的。其他单位则对此热情不高，因为所研制的测量仪器它们还买不到。计算机程序的情况多少有点类似，HOST计划所编制的计算机程序特别是较长和较复杂的程序，一般对编制这些程序的单位较有用，对其他单位则要差些。

3.1 对技术理解和预估能力的影响

3.1.1 三维非弹性结构分析

非弹性或非线性结构分析的用途有限，但非常重要。这些分析方法主要用于短寿命循环场合，在这种场合下，在不多几个循环内超出弹性极限也许是可以接受的。然而，对于长寿命用途，硬件的设计一般应按照在弹性范围内工作。但是，即使对于按弹性设计的长寿命用途，有时也需要作三维非弹性分析。一种情况是当寿命短于预估值时。在这种情况下，非弹性分析往往能指出问题的所在。此外，当局部屈服发生时，非弹性分析能确定应力的重新分布。因此，对于这些特殊的情况，三维非弹性分析会是一项非常有用的设计手段。

只是当HOST计划开始之后的最近几年内，发动机设计分析人员才有真正的三维分析方法可供使用。在HOST计划中，探讨了几种三维非弹性分析的途径。也许在一段时间内还不能确定最佳的途径。现行的三维非弹性分析是麻烦和复杂的，并且需要许多计算机时间，因而，除非绝对必要，分析人员不大愿意用三维非弹性分析。然而，随着时间的迁移，当设计分析人员变得能比较舒服地使用这种分析方法时，它将得到更广泛的应用。当怀疑发生或可能发生局部屈服时，不管是发动机研制阶段的早期或是后来的外场使用中故障识别和修正时，都可用它来解决问题。结果，HOST计划所获得的在三维非弹性分析的进展被参与者认为是一项重要成果。

3.1.2 热-机械疲劳试验

过去，金属材料的机械性质由试验确定，试验所用的机械和热载荷变化条件比许多发动机的实际情况简单。为改善发动机的耐久性，需要在更为真实的条件下评定材料的特性和寿命。在HOST计划中，进行了在循环的双轴机械载荷和在各种大气和循环温度环境下的材料特性评定研究，包括随时间的裂纹扩展和材料变形。循环机械载荷包括高频与低频载荷的叠加。

在更为现实条件下获得的这些机械性质数据才有可能具有更高的正确性。按照某些接受采访者的意见,材料的热-机械性质数据库和HOST计划其他阶段所获的实验数据也许是HOST计划最有用的成果之一。

3.1.3 本构模化

本构模化是预估在复杂循环双轴机械载荷和温度变化条件下应力和应变随时间变化的一种分析方法。在HOST计划以前,对本构模化的研究工作主要在大学而不是在飞机发动机制造商进行。HOST计划使大学、工业界和NASA合作,共同发展一种以前没有的能力。航空航天工业现在有能力在非弹性结构分析中使用均质和非均质金属材料的非线性本构模型。这项研究提供一个基础,以便把本构模化扩展到象金属基复合材料那样的更加复杂的材料。实施HOST计划的结果,NASA刘易斯研究中心已经成为在世界范围内的从事本构模化的重要中心。HOST计划不仅把本构模化介绍给发动机公司,而且因此而使发动机公司与学术界的工作关系更为密切。

3.1.4 燃烧室气动热力模化

在HOST计划以前,就已经进行了关于掺混射流与燃烧气流混合的研究。这些模化研究是以射流混合实验中的平均温度测量为基础的。这种研究到HOST计划开始时已大为减少。在HOST计划中,有普拉特·惠特尼、通用电气、艾利森和加雷特四家公司接到合同,评估燃烧室气动热力模化的技术水平。由于这项评估和关于不带反应流的另外的研究工作的结果,对气动热力模化的理解大大加深,并正在航空航天工业内推广使用。然而,这并不是说所有的问题都已经解决。要精确预估燃烧室的气动热力性能以及壁面温度和温度梯度,还需要进一步改进数值计算方法,这种方法以目前还没有的、充分规定的反应流实验数据为输入。在能够得到反应燃气流和燃料涡流特性数据之前,HOST计划就结束了。然而,分析程序已经改进到这样的程度,有一个单位表示,在燃烧室设计中应用了三元流动分析,使试验工作量减到最低限度。

在关于燃烧室模化的评论中,几乎一致的意见是,HOST计划开始得太晚,并且它是针对改进对燃烧室的理解和设计分析的分析能力的。

3.1.5 涡轮传热

在涡轮传热方面,HOST计划负责的工作包括涡轮叶片内几乎所有的内、外传热问题。在计划中一些按合同和拨款的研究工作包括薄膜冷却、冲击冷却、在大尺寸低转速涡轮中转子与静子的相互作用、冷却通道内复合向心力和浮力对传热的影响、带流过叶尖气流的传热和端壁附面层研究。这项研究的结果使相关技术得到发展,从而大大提高了叶片金属温度的计算精度。还得出了高质量实验数据并作了详尽的记录,这些将被传热分析人员得到广泛的应用。由于HOST计划的结果,现在有可能更好地控制局部温度,进而更好地控制叶片寿命和表面氧化。

3.1.6 防护涂层

防护涂层包括降低传热的隔热涂层和抗氧化涂层。在改进涂层和对涂层与结构基体材料之间的理解方面取得了进展。此外,已经对具有抗氧化和隔热涂层的材料进行了热-机械疲劳试验。正在发展寿命预测模型。这项研究工作的一个附带收获是,发现在改进寿命预估方面设计师和材料研究人员的工作必须紧密配合。

3.1.7 从HOST计划得到的计算机程序

HOST计划的输出是以研究报告、实验数据和计算机程序形式的技术信息。编制计算机程序的一项要求是，程序的调试和运算要在NASA刘易斯研究中心的下列一台或多台计算机上进行：带DOS操作系统的Cray X-MP/2-4、带VM操作系统的Amdahl 5840或VAX 11-750。这项要求旨在使程序更为通用。在某些情况下，最初程序的编制是在一种比刘易斯中心有的更先进的计算机上进行。对这种程序进行修改使之适合于在刘易斯中心的计算机上运算，将使它可以在更多的计算机上运算。

实际上，上述构思并不象所希望的那样成功。在某些情况下，一个单位编制的程序让别的单位用起来很方便。这些一般是比较简单的程序。在另一些情况下，HOST计划所产生的程序对那些不是该程序的编制者好处有限。对于比较复杂的程序，NASA人员的经验是，在NASA的计算机上调试和熟悉由HOST计划承包商提供的计算机程序要花3~12个月。如果由别的用户来用这种程序，即使已在NASA进行了相当的调试工作，估计还需要相当于上述的时间。这些程序的一个不足是，编制者或NASA不能以商业程序的方式提供保障服务。

有一条意见也许能解决这个计算机程序的保障服务问题。今后，应该给一家商业软件公司拨计划经费，来充分地调试和记录比较复杂的计算机程序。而且，允许该软件公司推销程序，它们就能提供连续不断的保障和修改功能。这样，所编制的程序才能在长时间内供对此感兴趣的用户使用。

3.2 对发动机研制过程的影响

3.2.1 提高发动机设计能力

根据HOST计划所得出的计算机程序和实验数据库已经在发动机设计中发挥了作用。预计在今后若干年内，它的影响会被感觉出来。虽然对程序发展的程度还有一定的保留态度，但HOST计划所产生的全部技术将在飞机发动机工业中继续发挥其有用的价值。有一点是清楚的，得出计算机程序和实验数据库的研究工作对从事这项研究工作的单位价值最大，但其他单位肯定能在不同程度上利用这些研究成果。

在燃烧室和涡轮方面的设计分析能力已经得到提高。由于能力的提高，在部件研制中需要做的试验较少。因为由传热、流动和非弹性应力分析所取得的温度和应力预估的改进，估计可靠性将会得到改善。目前，还没有足够的历史资料可以确定HOST计划是否已经导致维修费用的降低——计划的目的之一。但有理由估计，如果耐久性和可靠性改善了，那么维修费用就会降低。

一些接受采访者认为，在燃烧室和涡轮流动、涡轮传热和热-机械疲劳方面所获得的实验数据库至少与相应的计算机程序同等重要。正如在文章前面部分中提到的，要使设计师能够方便地在日常工作中使用HOST计划所编制的一些先进计算机程序，那还要一段时间。

3.2.2 降低发动机研制费用

降低发动机研制费用并不是HOST计划的原来目标，但已经成为一项可能的重要附带效益。HOST计划产生的计算机程序和数据库已经提高了设计能力，因而在研制新发动机时可以少做试验。然而，实验性试验费用的降低会被设计分析过程中计算机费用的增加所抵销。由于下述因素，对研制费用的降低还提不出一个全面而确切的数字。（1）HOST计划在改进发动机热端技术方面已经起了重要的作用，但并不是唯一起作用的。其他的NASA内部的、制造商独立研究和政府负责的计划也在改进技术。要定量地确定HOST计划在整个技术改进中所占的比例是困难的。（2）每一项新的发动机研制计划都利用新的技术，往往

会更复杂并且(或者)设计的温度、压力和应力等极限更高。这种“变化着的目标”使得作相对于先前的发动机的研制费用比较困难。(3)计算机能力不断在改进,因而完成计算任务的费用在下降。

考虑到所有这些因素,使得难以得出明确结论:HOST计划是否实际上已经降低了发动机研制费用或降低了多少。然而,下面列出一些接受采访者的意见

(1) HOST计划产生的计算方法已经为一些发动机研制计划每年节省了计算机机时费用。

(2) HOST计划所产生的一项将温度从粗网格有限元传热分析的输出转变为细网格有限元结构分析的输入的计算机程序,已经为一家公司每年节省26人年的技术工时。

(3) 使设计更细化的三元流和非弹性应力分析所增加的计算机费用目前差不多与所降低的实验性试验费用相当。但分析费用正在迅速降低,所以,估计不久即可节省费用。

(4) 据估计,如果要用1975年的设计和试验技术来研制新发动机,那么发动机研制费用是用目前先进技术的大约三倍。HOST计划对这种先进技术作出了重要的贡献。总的节省估计在几十亿美元。

(5) 有理由估计,发动机设计中改进的预估能力会减少试验要求。如果在某项研制或验证机计划中这种改进能减少一次设计或试验-制造迭代,那末就能节省25万美元或更多。而且,由于消除一项使用中暴露的缺陷所节省的费用会大一个数量级。

根据上述意见可以明显看出,在某些情况下,HOST计划所产生的费用节省是可以明确确定的。在另外一些情况下,这种节省是可以推断出来的,但不一定能明确地记载下来。然而,根据发动机制造商的人员关于发动机研制费用降低的意见和关于由减少使用中暴露的缺陷而实现的费用节省数字,可以有把握地说,由于HOST计划所产生的技术而节省的费用比该计划的经费大几个数量级。

3.3. 对技术转移的影响

HOST计划产生了大约250篇技术研究报告和大量的计算机程序。此外,还举行了六次大型年度专题讨论会和一些单个研究领域的小型专题讨论会。因为每次专题讨论会有250~300人参加,既有正式报告又有非正式讨论,因此,有充分的机会进行信息交流和技术转移。因为出席这些专题讨论会的来自所有的大型发动机制造商以及学术界、研究所和政府部门,所以达到的技术转移可能会比任何其他NASA负责的飞机发动机研究或发展计划好。

这些接受采访者的一致意见是,这种为期两天的专题讨论会是非常成功的。下面列出一些评论意见。

(1) “在美国没有任何别的讨论会比得上HOST的年度专题讨论会,这种专题讨论会使各界人士聚在一起讨论共同感兴趣的研究工作。”

(2) “专题讨论会使NASA和工业界有可能每年修改它们的想法和计划。”

(3) “在休息时与别的与会者的随意交谈收到的好处如此之大,因此建议NASA应该考虑增加会议中间的休息次数和提供更多的非正式聚会机会。”

(4) “HOST专题讨论会为工业界提供极好的机会来鉴定它们自己的研究方向。”

3.4 对工业界-大学-政府部门参与的影响

3.4.1 改善关系

有意见认为,主要是通过专题讨论会,HOST计划大大地改善了工业界、学术界和政府部

门的人员的关系。计划还为大学教授提供了与工业界直接在一起工作的机会。这种安排有双重效益：公司能够利用大学目前和以前做的研究工作，教授对发动机的环境和问题加深了理解并且可以把它们传授给学生。

虽然大多数接受采访者强调的是工业界与大学的关系的改善，但也有一些人认为HOST计划改善了他们与NASA的关系。有些人还十分赞赏NASA对HOST计划的组织和管理。他们认为，计划的设想是好的，NASA的管理人员知识丰富，对解决研究过程中所发生的问题很有帮助。

3.4.2 参与者的热情

一般来说，每个接受采访者都表示出对HOST计划的热情，但其程度因单位和个人而异。对于较大的单位，所表现出的热情一般与参与程度（合同数）有关。

从大学来的接受采访者似乎表现出高于从工业界来的热情，可能是因为大学人员往往有较少的机会参与象HOST计划那样规模的计划。对有些人，这次还是第一次有机会将他们的研究成果直接用于工业界关心的项目。另一个好处是，通过与工业界的接触可以使教学更联系实际并指导毕业生就业。

3.5 对今后合同工作的考虑

虽然从采访中得到的大多数意见对HOST计划的执行和所得的结果是赞赏的，但收到的某些意见有可能对有关HOST计划今后合同工作的改进有帮助。

在采访中经常提到的一条意见是，由于NASA预算的考虑HOST计划的结束比预期的早。所表现出来的主要担心是（1）计算机程序的实验验证不充分和（2）在燃烧室气动热力模化计划中没有按照原先计划研究反应动力学。现在，还不知道这项增加的研究工作什么时候能完成。也许还要等若干年才有资金供从事这项研究使用。在今后的计划工作中，设法避免成功计划的过早结束会有好处的。

正如前面提到的，一些没有参与测量技术研究工作的人对这项工作表示关切。因为，所研究的测量仪器买不到，所以这项研究工作对除研制者本身外的人来说似乎没有什么价值。在今后的计划工作中，应该考虑评定对所有参与者的可能效益或者鼓励第三方制造这种研制出来的技术。

4.0 结论的摘要

关于HOST计划的影响的主要结论摘要如下：

（1）一致同意HOST计划是十分成功的和值得的。

（2）HOST计划这种花费研究资金的途径是非常有效的。一些接受采访者认为，强调研究而不是硬件研制是NASA为飞机工业提供长期持续效益所应该起到的作用。许多单位在共同的目标下从事相似的计划，可以取长补短，改进各个单位的研究工作。

（3）与传统的研究和技术合同相比，HOST计划的优点是重点突出，集中解决发动机热端部件的问题。此外，HOST计划产生了前所未有的工业界、学术界和政府部门之间的工作关系。

（4）年度专题讨论会对HOST计划的成功起了重要作用。对在会上发表的结果进行评定，有助于改进计划。讨论会起到了及时的信息交流作用。

（5）计划产生的计算机程序和数据库在今后将对分析人员有用。然而，某些大型程序