

发动机构型分析与评价软件的设计与实现

陈杰 王克昌 陈启智

(国防科学技术大学)

摘 要: 在发动机初步设计阶段,要根据对发动机的构型方案进行分析与评价,来选择发动机主要设计参数,并从多个发动机方案中选择最佳方案。作者以液体推进剂火箭发动机为研究对象,建立了一个发动机构型分析与评价软件 LRE/CAA。本文阐述了软件 LRE/CAA 的设计思想,介绍了软件所包括的模块和各个模块的功能,并说明了在软件实现过程中一些问题的处理方法。

关键词: 液体推进剂火箭发动机, 构型, 软件开发

DESIGN AND REALIZATION OF ENGINE CONFIGURATION ANALYSIS AND ASSESSMENT SOFTWARE

Chen Jie Wang Kechang Chen Qizhi

(National University of Defence Technology)

Abstract: In the preliminary design phase of engine, engine configurations must be analyzed and assessed to choose main design parameters and to select optimal engine scheme from multiple candidates. A configuration analysis and assessment software for liquid propellant rocket engine LRE/CAA has been set up by author. This paper explains the main idea in design thinking of LRE/CAA, introduces software blocks and their function, and illustrates how to deal with some problems in software realizing process.

Keywords: Liquid rocket engines, Configuration, Software development

1 引 言

新型运载系统的研制,既要保证性能又要把减少运载系统的发射费用和提高运载器的可

可靠性放在重要位置。因此,为运载器选择液体推进剂火箭发动机,要对众多可供选择的发动机方案从性能、费用、可靠性、现实性、可使用性等各个方面进行综合分析与评价,即通过广泛的发动机构型研究工作,来确定较优的发动机方案。

过去由于研制经验较少,缺少强有力的计算机工具和可用的发动机系统分析与评价模型,对液体推进剂火箭发动机方案与主要设计参数一直采用经验方法选择,因此,最终采用的发动机系统方案与参数并不是最优的。随着计算机的普及与计算技术的发展,发动机研制经验的积累和发动机系统分析模型的建立与完善,为我们开展发动机构型方案的计算分析和对方案进行科学的多目标决策提供了现实的条件。

发动机构型分析的主要任务是根据选择的发动机方案(即推进剂组合、动力循环方式、冷却方式等)产生一组技术上可行的发动机设计参数(燃烧室压力,涡轮泵转速、燃烧室和发生器混合比等),并求出各个支路流量、发动机的比冲和质量等参数;而发动机构型评价的任务是从运载器和空间任务要求角度出发,对发动机从性能、全寿命周期费用、研制的现实性等多方面进行比较与选择。因此液体推进剂火箭发动机构型方案分析与评价工作,涉及到发动机与运载器设计的各个领域,是一个综合多学科知识和发动机与运载器研制经验的系统工程。

作者通过一系列理论模型和计算方法的建立^[1~4],构造了一个通用的液体推进剂火箭发动机构型分析与评价软件系统 LRE/CAA(Liquid Rocket Engines Configuration Analysis and Assessment Software)。LRE/CAA 是在 IBM-PC/XT 286 微机上开发的,最终形成的执行块可以在普通的具有640kB内存的PC机上运行,因而便于推广使用。LRE/CAA 集热力参数计算、动力平衡计算、推力室冷却分析、发动机部件质量预估、运载器质量计算、发动机全寿命周期费用估算和发动机多准则评价等功能于一体。这些功能覆盖了发动机构型分析与评价的各个方面,它们既可以单独使用,也可以组合起来为构型研究服务。

本文第二节阐述了软件 LRE/CAA 的设计思想;第三节介绍了软件所包括的功能模块和各个功能模块的作用;第四节介绍了在对软件实现过程中遇到的一些问题的处理方法。

2 LRE/CAA 软件系统设计思想

2.1 建立集成化软件的设计思想

建立软件体系对发动机构型方案进行分析与评价,首先要选择一个合适的系统实施方案。事实上有多种可供选择的方案,其中两种极端方案为:

2.1.1 分散软件体系

由负责发动机系统分析,推力室、涡轮泵等部件设计和运载器设计的专家分别编制适合于各自需要的软件,然后组织他们进行发动机方案的分析与评价。现有的一些发动机设计单位按该模式已经建立了一些工程计算程序(例如,热力计算、冷却计算、动力平衡计算程序),并在以往的发动机构型方案论证中发挥了一定的作用。由于这是一种分散的软件体系,程序、输入数据计算结果都掌握在程序使用者手中,要进行大量发动机构型方案的分析与评价,人员的组织管理问题比较突出。在发动机方案论证时,经常存在计算信息的反馈(例如在动力平衡计算时要首先估计一个推力室冷却压降来求出发动机各个支路的流量,然后才能进行推力室冷却分析,如果冷却分析得到的冷却压降与前面假定的值不一致就要进行修正,

重新进行动力平衡计算和冷却计算), 而分散软件体系实现这种信息反馈非常慢。另外, 分散软件往往存在着接口不统一的问题, 即一个专家编写的程序的输出结果可能并没有包括另一个专家的程序急需的数据。

2.1.2 高度集中的软件体系

将发动机专家与计算机专家组成一个小组, 研制专门的发动机构型分析与评价系统, 按照构型分析与评价的逻辑过程把各个分析软件组合在一起, 形成一个完整的软件。显然, 这样系统的建立要花费较多的人力和较长的研制时间。由于发动机构型分析与评价逻辑过程是一个复杂的反馈与迭代过程, 于是这样的软件系统采用微型计算机的硬件资源是无法实现的, 而且各个程序的连接与调试也存在很多困难, 形成的软件仅能用于发动机构型研究。

为了避免以上存在的困难和问题, 以较短的时间和较少的人力开发出一个可用的发动机构型分析与评价软件, 作者折衷以上两种方式, 选择了第三种方式, 即构造一个由菜单驱动的、由一组功能相对独立的、(输入与输出数据) 接口相容的模块组成的软件系统。软件共包括八个独立功能模块, 图1给出软件的控制流程和各个模块的名称。由图可知, 除了热力计算模块可被动力平衡计算和冷却分析模块调用外, 其它的模块都是相对独立的。采用该软件进行发动机构型研究时, 要求用户按一定的逻辑顺序运行这些模块来完成发动机构型方案的分析与评价工作。按这种设计思想设计带来的好处, 除软件便于开发, 可在微机上使用以外, 系统的各个模块还可以单独使用。因此软件不仅可以用于构型研究, 软件中的一些模块还可以为发动机工程设计服务, 并且还便于软件扩展新的功能模块或者修改已有的软件模块。

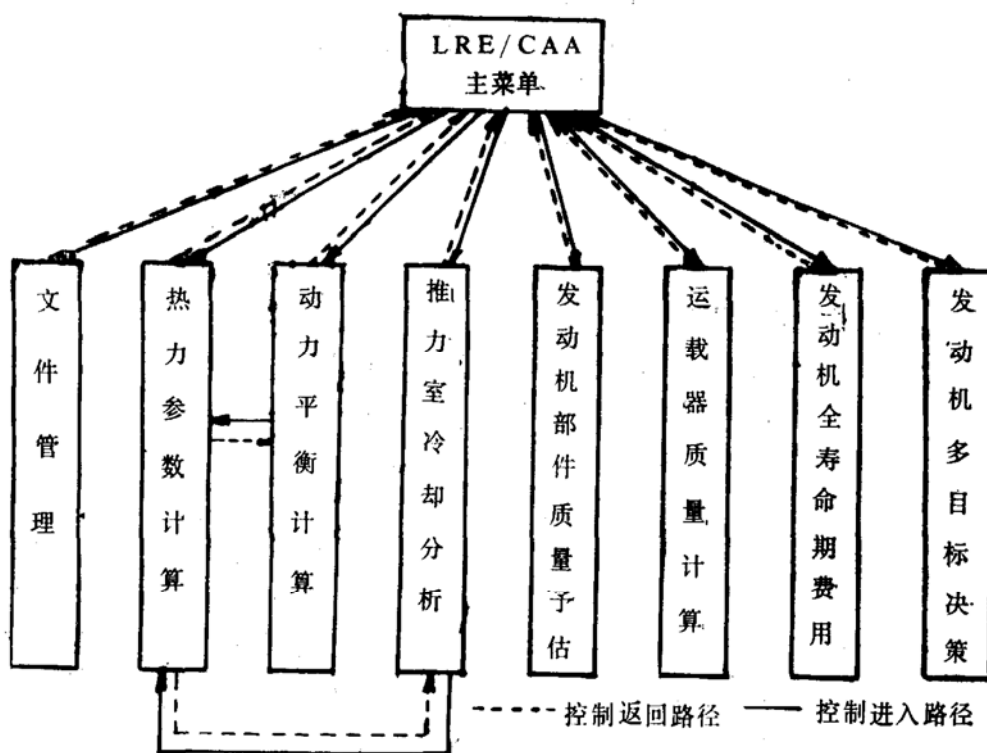


图1 LRE/CAA 软件控制流程图

2.2 采用文件驱动系统

按上述系统进行发动机构型研究软件设计时, 还要考虑每个模块输入与输出数据的组织问题。一种是按数据文件方式设计, 即输入与输出数据都按标准 ASCII 码形式来组织, 这种软件系统称为文件驱动系统; 另一种方式是外部数据采用数据库来管理, 这称为数据库驱动系统。由于第二种方式要求增加一个数据库管理模块, 会增加内存开销, 在微机上实现较困难, 因此作者采用了文件驱动系统。

作者在软件设计时, 把文件分成三类:

(1) 第一类是输入数据文件, 它们带后缀 (.INP)。这些文件中包括了各个候选发动机构型方案的模块所要求的输入数据。

(2) 第二类是标准数据文件, 它们带后缀 (.DAT)。这些文件中包括了诸如各种推进剂组元物性参数、传热准则, 发动机质量模型中的统计系数等与发动机构型选择无关的数据。

(3) 第三类是输出数据文件, 它们带后缀 (.OUT)。这些文件中的数据是模块的计算结果。具体输出哪些数据考虑了整个软件的数据接口的相容性。图 2 给出了软件 LRE/CAA 的数据流程路径。

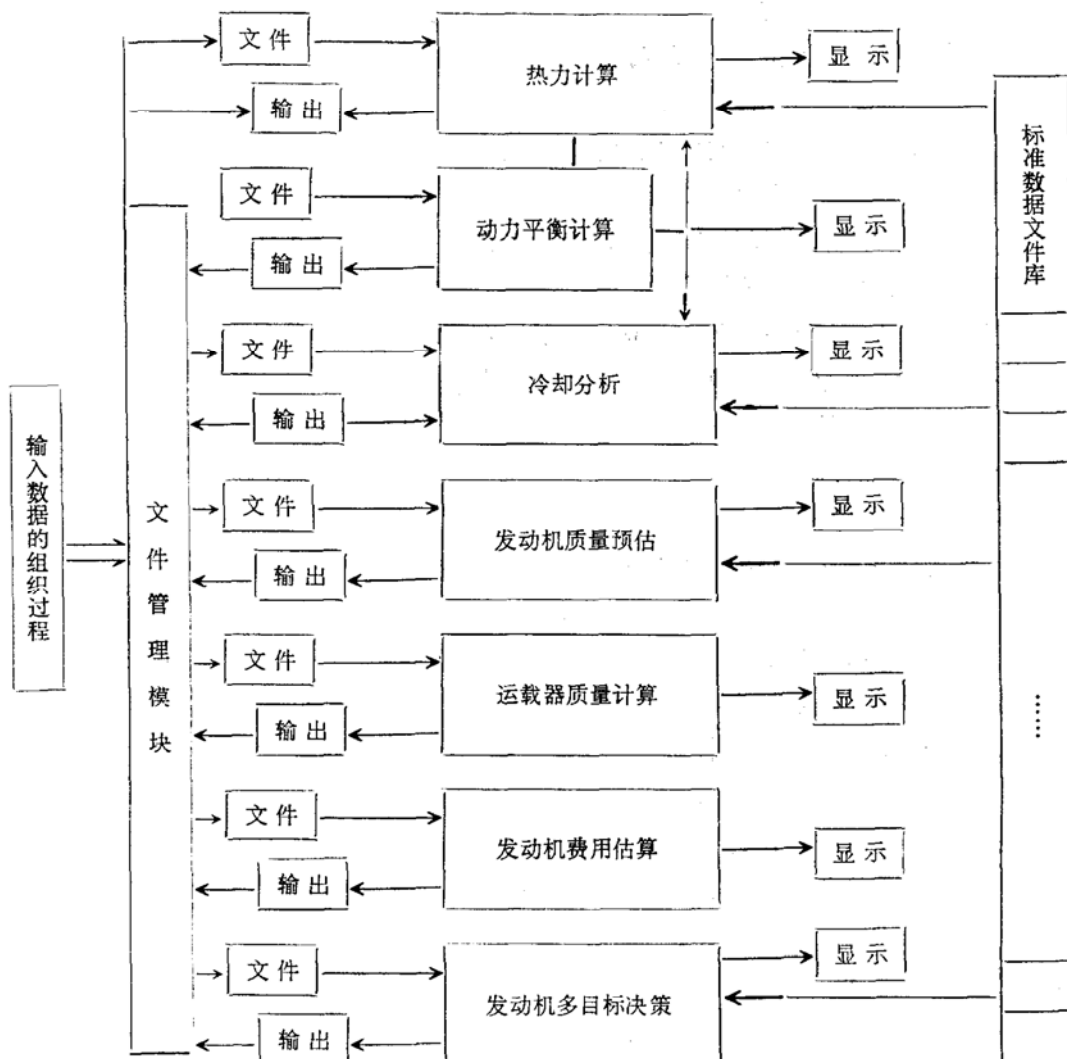


图 2 LRE/CAA 数据流程图

2.3 研制通用的分析模块

研制适合于各种发动机构型方案的通用分析模块是 LRE/CAA 软件追求的一个重要设计目标。以前的一些工程分析程序大多只适用于特定几个发动机构型方案,而在进行发动机构型方案研究时,要分析与比较的发动机构型方案多种多样,如果软件对发动机构型方案有限制,遇到新的构型方案要重新修改软件,那么这样的软件是无法真正满足构型研究要求的。作者对此问题进行了研究,采取了一些软件设计技术^[1]来保证软件的通用性。

3 LRE/CAA 软件系统功能

LRE/CAA 软件从发动机构型分析与评价要求出发,包括了一系列可以单独调用而数据之间又有相互联系的功能模块,其功能覆盖了发动机构型与分析的各个方面。这些模块是:数据文件管理模块(MFILE)、热力参数计算模块(TDC)、动力平衡分析模块(CPB)、推力室传热计算模块(HEAT)、发动机部件质量预估模块(MASS)、运载器质量计算模块(VSA)、发动机全寿命周期费用计算模块(LCC)、发动机多目标综合评价模块(ASSESS)。

3.1 数据文件管理模块(MFILE)

MFILE 是 LRE/CAA 软件自带的一个小型数据文件编辑或显示模块。由于 LRE/CAA 采用文件驱动方式设计,数据的输入与输出都通过文件来实现。输入数据文件原则上可以在任何专业编辑器(EDLIN、EDIT、PE 等)下产生或修改,但要求退出 LRE/CAA 软件系统,进入这些编辑系统。改完数据以后又要退出编辑系统,重新进入 LRE/CAA,这给软件的使用带来了麻烦。MFILE 就是专门为 LRE/CAA 设计的一个编辑器。利用 MFILE 用户不必退出 LRE/CAA,就可以产生、修改输入数据文件或者显示输出数据文件的内容。

3.2 热力参数计算模块(TDC)

热力计算模块(TDC)用于确定推进剂的平衡燃烧产物成份、温度、发动机理论比冲、比热、比热比、气体常数、燃气粘性系数、导热系数等数据。热力计算是发动机系统分析工作的基本计算。这里计算模块以最小自由能法构造热力计算非线性方程组,用 Newton-Raphson 线性化方法和迭代法求解。

TDC 具有三种计算模式:

- (1) 仅求燃烧室平衡燃烧产物成份与温度等参数
- (2) 给定喷管出口压力,求理论比冲等参数
- (3) 给定喷管出口面积比,求理论比冲等参数

3.3 动力平衡分析模块(CPB)

动力平衡分析模块用于确定各种动力循环方式发动机系统流量分布、压力分布、发动机推力室可以达到的最高室压等参数^[1,4]。这些参数是进一步进行发动机构型方案分析与评价的基础。该模块具有相当好的通用性,可以对给出喷管出口直径、或给出喷管出口压力、或喷管出口面积比的各种系统流路布置方式进行分析。燃气发生器或预燃室的参数可以按四种方式确定或给出:

- (1) 直接给定参数
- (2) 给定混合比,由热力计算确定参数
- (3) 给定允许温度和燃烧状态(富氧或富燃),由热力计算迭代确定混合比和参数

(4) 指定燃气由另一个涡轮出口而来

该模块在运行时根据需要自动调用 TDC 模块。

3.4 热力室传热计算模块 (HEAT)

推力室传热计算模块在发动机构型分析阶段,用于确定采用某种推进剂组元作冷却剂能否满足推力室冷却要求,并确定冷却压力降。该模块可以分析冷却剂从喷管尾部向推力室头部单向流动的槽道式冷却通道的传热计算问题。

HEAT 还可以进行优化冷却通道尺寸的传热设计计算,其优化目标是使通过冷却通道的冷却剂的冷却压降最小。HEAT 模块与 CPB 模块相结合,可以用于确定一个发动机循环方案是由动力平衡限制还是冷却限制来决定燃烧室最高室压^[4]。

3.5 发动机部件质量预估模块 (MASS)

该模块依据作者构造的一套发动机部件质量模型^[2],在动力平衡和传热计算确定了发动机的一些主要设计参数的前提下,对发动机部件及系统质量进行预估。在构型分析阶段,MASS 主要用于确定发动机推力室、涡轮泵、连接件、自动器、贮箱增压系统五大部件和系统质量随设计参数的变化规律,并确定发动机的推力与重量之比。VSA 模块和 LCC 模块将使用 MASS 的输出数据。

3.6 运载器质量计算模块 VSA

VSA 是一个简化的运载器线性化质量分析模块^[3],它可以对两级串联和两级半并联推进的运载器方案进行质量分析。VSA 可以按起飞质量最小或运载器干质量最小来优化运载器各级速度增量,并求出各子级和运载器系统的起飞质量,推进剂工作质量,推进剂非工作质量,推进剂加注量和干质量等质量参数。

在液体火箭发动机构型分析阶段,可以用 VSA 模块分析发动机比冲、发动机质量以及发动机所采用推进剂类型和推进剂密度对运载器干质量或起飞质量的影响,即确定它们对运载器的影响系数,以便从运载器角度对发动机方案进行评价。

3.7 发动机全寿命周期费用计算模块 (LCC)

按照作者提出的一套费用模型构造的 LCC 模块^[4],可以用于预估发动机研制费、生产费、操作费和发动机全寿命周期费用。研制费用被划分成三项:设计费、硬件费和试验费。LCC 模块还可以确定研制费用随时间的分布情况(即投资强度),并可以采用 MonteCarlo 方法确定研制费用风险。

把 LCC 模块的费用预估结果与 VSA 的发动机比冲、质量和推进剂组合密度对运载器影响系数的计算结果相结合,可以从费用角度对发动机构型方案进行评价。

3.8 发动机多目标综合评价模块 (ASSESS)

ASSESS 是一个多目标综合评价模块,它可以按树形多层指标体系对多个发动机方案进行多指标综合评价。发动机系统的评价指标,要根据空间任务要求和其它方面的考虑事先拟定。评价指标的合并规则,合并时各指标的加权因子也要事先给定。评价指标反映了发动机的设计目标,指标的加权因子反映了决策者对各个指标的偏好程度,具有一定的主观性。因此一般不存在固定不变的评价指标和加权因子。然而采用 VSA 和 LCC 的分析结果,可以用于发动机比冲、质量、推进剂组合密度和发动机全寿命周期费用得到比较客观的定量指标值和加权因子。

ASSESS 还包括了一个独立的层次分析法 (AHP) 子程序和一个独立的加权因子敏感

性分析子程序。用户可以单独使用它们来确定某些指标的加权因子, 并进行敏感性分析。

4 LRE/CAA 软件的实现

4.1 程序设计语言的选择

作者对各种程序设计语言进行比较, 最终选择 C 语言 (Turbo C Ver 2.0) 作为 LRE/CAA 软件的设计语言, 主要原因如下:

(1) Turbo C Ver 2.0 提供了包括编辑、编译、连接和动态调试功能于一体的集成软件开发环境。编辑错误可以定位到字符名, 运行错误可以采用逐行调试查找, 因而非常有利于软件的开发。

(2) C 语言程序代码具有很好的可移植性、代码运行效率较高。

(3) 通过 Turbo C 的选择内存模式功能, 可以充分利用 PC 类型微机的 640kB 的内存。代码、堆栈、数据的长度不受 16 位微机段长 64kB 的限制。

(4) C 语言是结构化语言, 编写出来的程序层次清晰, 易实现模块化的程序设计思想, 便于软件维护。

(5) C 语言具有递归功能, 为进一步将专家系统引入液体推进剂火箭发动机机构型研究奠定了基础。

(6) C 语言有较强的字符屏幕功能, 便于实现具有较好用户界面的软件。

4.2 软件工程设计思想与软件的模块性

作者按软件工程方法^[5]来指导软件 LRE/CAA 的开发。在软件开发期间, 作者与用户反复交换意见、澄清问题、明确需求、检验分析模型的合理性并对软件各个模块的功能逐级进行划分, 得到最终的子程序模块。子程序模块强调独立性, 尽量提高模块内聚减少模块之间的耦合, 降低模块接口的复杂程度。另外在编码过程中, 强调程序的可读性, 子程序模块都用注释说明其功能和输入/输出数据, 在子程序模块内部, 也采用注释说明每个逻辑块的作用。

4.3 用户界面

在软件实现过程中, 作者采取了一些措施来产生具有较好用户界面的软件。这些措施包括:

(1) 主要的八个功能模块, 通过菜单引导进入。

(2) 在模块运行过程中, 对运行的关键信息进行显示, 以便于用户动态地监视运行进程。

(3) 利用 C 语言较强的字符屏幕功能, 采用彩色字符显示, 增强屏幕显示效果。

(4) 对于可以检查的输入/输出、数据越界等错误, 采取声音与信息显示报错。

5 结论与建议

作者经过两年的研制, 对软件 LRE/CAA 已完成了系统定义、需求分析、软件设计、编码和初步测试工作, 并已交付用户使用。

对软件 LRE/CAA 的初步使用表明: LRE/CAA 使用方便, 适用于多种发动机机构型方

(下转第 5 页)

续表

参 数	改 进 解 析 解	原解析解	误 差
改进解不需要 $\begin{cases} T^* \\ k_0 \\ k_1 \\ k_2 \end{cases}$	—	615.71	
	—	1.3796	
	—	1.3916	
	—	1.3755	
p_2/p_1	10.3705213	10.3705211	-1.7×10^{-8}
$\sigma = p_2^*/p_1^*$	0.32736792	0.32736787	-1.6×10^{-7}
ΔS (J/kg · K)	320.541438	320.541484	1.4×10^{-7}

4 结 语

由计算结果对照,原解析解的误差极小,可说还是准确的;但改进解不牵动总温,更为合理,且求解更为简明迅速,所以是先进的。

参 考 文 献

- [1] 崔济亚.变比热气动函数式及计算的准确解和近似解.工程热物理学报,1986,7(3)
- [2] 崔济亚.变比热时气动函数式的简化及正冲波解析解.工程热物理学报,1990,11(2)
- [3] 张世铮.燃气热力性质的数学公式表示法.工程热物理学报,1980,1(1)

(上接第12页)

案的分析,可以用较快的时间完成多个发动机构型方案的分析与比较工作,为发动机构型方案的科学决策提供了一个强有力的工具。

软件的维护是一个漫长的过程,需要在软件的使用过程中,不断地发现问题和解决问题,增加与完善功能模块。而软件 LRE/CAA 按独立模块组合的特点,有利于软件维护工作的开展。进一步完善现有的分析模型,提高分析精度是下一步要深入开展的工作。

参 考 文 献

- [1] 陈杰.液体火箭发动机系统动力平衡参数通用计算方法.上海航天,1991(4)
- [2] 陈杰,陈启智.液体推进剂火箭发动机元件质量模型.航空与航天,1991(1)
- [3] 陈杰.串联与并联推进多级运载火箭线性化质量方程.中国空间科学技术,1990(4)
- [4] 陈杰.航天运载器液体推进剂火箭发动机构型研究:[博士论文].长沙:国防科学技术大学,1991
- [5] Pressman R S. Software Engineering——A Practitioner's Approach. McGraw Hill Book Company, 1982