

固体火箭发动机的 CAD 和 CAM 设想*

何洪庆 刘 宇

(西北工业大学航天工程学院, 西安, 710072)

摘 要: 提出固体火箭发动机领域计算机辅助设计 (CAD) 和计算机辅助制造 (CAM) 的流程图, 并认为结构装药设计的性能预示和热防护计算是发动机理论和结构设计的中心内容, 计算机制图是设计思想的最终表达。性能预示的核心是考虑燃烧和流动相互作用的工作过程的数值模拟, 热防护设计的核心是烧蚀、传热和强度计算。CAD 和 CAM 系统应当随时吸收新的研究成果, 高水平的核心研究成果, 对固体火箭发动机性能预示的准确度和理论设计水平的提高具有重要作用。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 计算机辅助设计, 计算机辅助制造, 数值模拟

分类号: V435.1, TP391

A CONSIDERATION ON CAD AND CAM OF SOLID PROPELLANT ROCKET MOTOR (SPRM)

He Hongqing Liu Yu

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

Abstract: The flow profiles by CAD (computer aided design) and CAM (computer aided manufacture) of SPRM are proposed in the paper. Authors consider that the performance prediction combined with grain design and thermo-protection calculation are the main content in theory and structure design of SPRM, and drawing by computer is the final expression of design idea. The core of performance prediction is the numerical simulation of operating process which regards the function each other between combustion and flow, and the core of thermo-protection design is ablation, heat-transfer and stress calculation. CAD and CAM system should absorb at any time new research achievements. The achievements of high-level core research possess the function of holding the balance for raising prediction accuracy and theory design level of SPRM performance prediction.

* 本文 1992 年 10 月 15 日收到

Keywords: Solid propellant rocket engine, Computer aided design, Computer aided manufacturing, Numerical Simulation

1 引言

由于大容量、高速度的数字计算机迅猛发展,固体火箭发动机研制的计算技术也大大提高。在固体火箭发动机研制过程中采用计算机辅助设计,用计算机进行准确的性能预示,通过计算机进行工作过程的数值模拟,以及计算机程序控制的辅助制造和辅助试验,大大推进了研制工作。充分利用计算机作为研制中的重要手段,其意义不仅在于可进行快速设计,快速高质量的加工,而且在于提高预示精确度,突破某些难点,提高设计水平,诊断某些故障,防患于未然,减少重大反复,争取研制迅速取得成功。

2 计算机辅助设计和辅助制造

国外在固体火箭发动机领域里的计算机辅助自动化设计是80年代发展和逐步完善起来的,它的实际应用有力地促进了固体火箭发动机设计和制造的速度和水平的提高。按传统的设计程序,从方案选择论证到完成生产图纸,需一年以上的时间;而用计算机辅助自动化设计,可以在短短的几天内完成。

美国在1981年就发展了一个较为完整的计算机辅助优化设计程序SPOC^[1]。主要功能有推进剂组份和热化学计算,燃烧稳定性分析,内弹道性能计算,比冲效率计算,装药、燃烧室和喷管结构设计,质量评估和成本预算等。在图形库中有五种装药形式,三种前封头,两种后封头,六种喷管结构供选择。设计者可以通过调节推进剂配方,调整36个发动机设计参数和几何参数,根据对发动机的约束条件和极限条件,在满足发动机性能要求的情况下,实现发动机质量比、比冲、冲重比、排气速度、成本等参数,以及发动机总体和部件的优化设计。

法国于1987年发展了一套计算机辅助自动化设计程序PAPAO^[2],使用该程序,已在IBM-4381机上成功地完成了ARIANE-5助推器设计。PAPAO程序注重发动机的基本性能参数和特性必须满足发动机设计准则和约束条件,建有推进剂、材料、结构等数据库。特别是结构设计模块、构成许多按一定工艺设计部件的子程序,改变结构设计时,只需改变设计参数,便可方便地得到新方案。程序采用人工交互会话方式,并具备图象显示和处理的能力。

美国空军火箭推进实验室发展的固体火箭发动机性能预估程序SPP实质上也是一种计算机辅助设计程序,它已成为美国对固体火箭发动机进行性能预估的标准程序。据报道,它对比冲的预示精度可达到 $\pm 0.5\%$,对推力和总冲的预示精度可达到 $\pm 0.3\%$ 。

固体火箭发动机的计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)是密切联系的两个连续流程,设计要考虑工艺,工艺要实现设计。为简洁起见,对它们采用流程图的形式来表示。图1是一种实验自动化设计的CAD设想。图2是CAM流程图,它仅对重要零件的制造才需要。

除图示的流程结构以外,还需一个主控程序。CAD、CAM中的某些语句要与主控程序中的命令相呼应。我们以CAD的主控程序为例,来说明它的必要性和功能:

- (1) 检验输入设计参数的完整性、有效性、相容性和协调性。
- (2) 控制输入、输出及各模块间的数据传递。

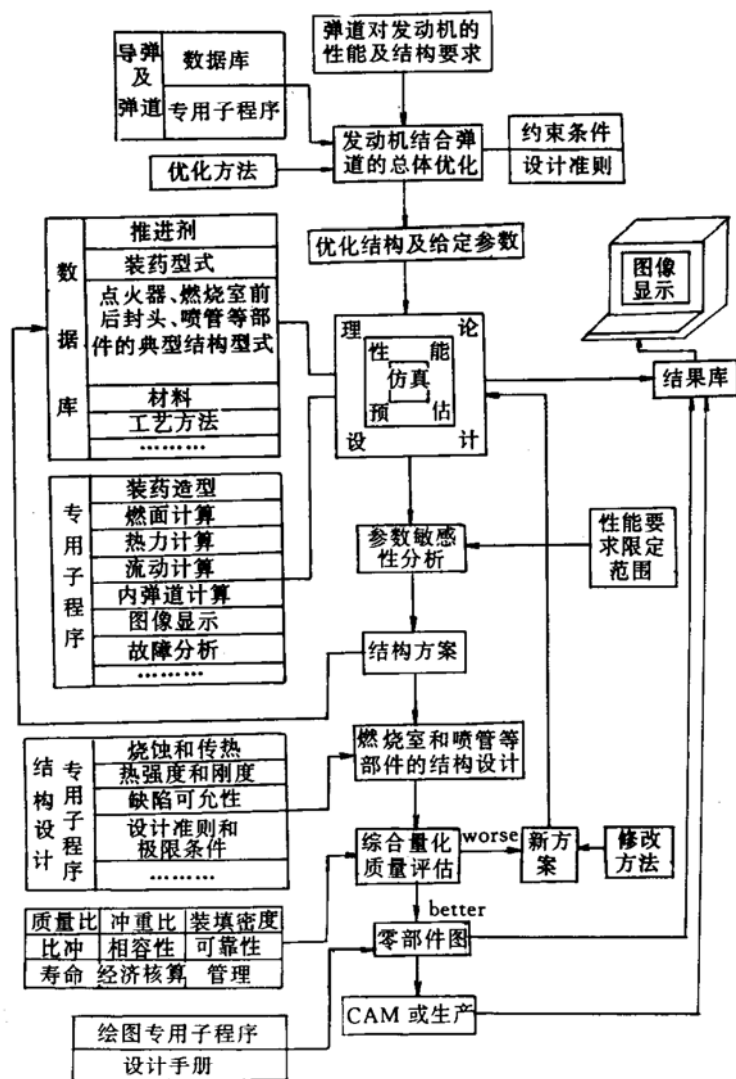


图1 CAD流程图

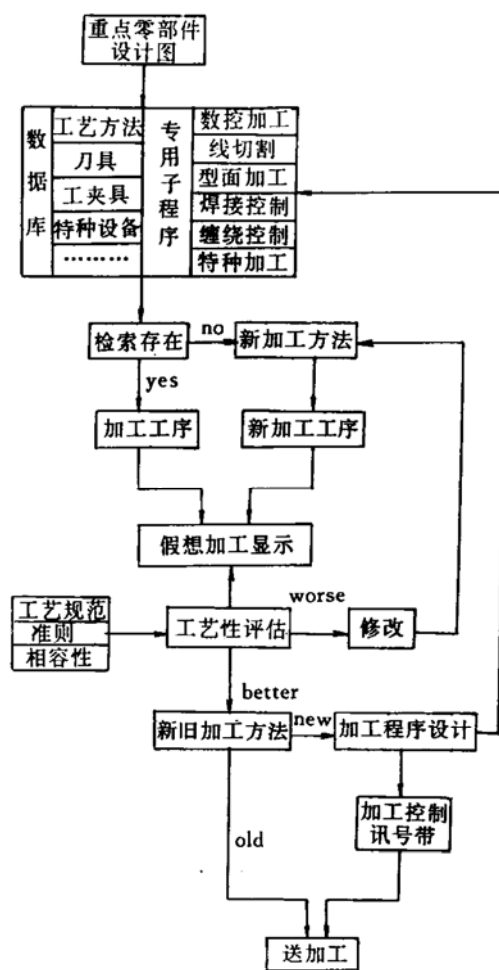


图2 CAM流程图

(3) 确定计算状态。例如，是进行自动化设计，还是导弹发射前的发动机工作过程仿真；是进行顺算，还是进行反算。

导弹经过运输、贮存后，推进剂的力学和性能参数会发生变化，或产生细小的裂纹、脱粘；发动机某些关键尺寸或工作状态会发生变化，以致造成发动机性能发生变化。射前仿真就是用计算机模拟发动机的工作状态和性能，以确定该发动机能否投入使用。

顺算是指按自动化设计所确定的已知参数计算顺序进行发动机设计计算。而反算是根据反设计的需要调整已知参数和计算顺序，这可以通过主控程序来实现。

(4) 调整计算项目。即通过主控程序调整计算内容，是进行全部计算，还是进行部份（如优化、理论设计、结构设计等）计算。

(5) 对数据库、程序库、模块中的某些部份进行修改、补充、删除，以保持程序系统的完整性、先进性。例如，数据库常以图形、表格曲线等形式来贮存数据、资料、手册，并配以检索、复表、内插、显示等手段，它需要不断修改、补充、更换。许多专用计算程序，设计方法等要不断更新。通过主控程序，均可予以实现。

(6) 人工干预。根据设计专家的判断，改变方案、数据、计算路线或中断计算等。

(7) 图象显示。对于装药造型,性能预示曲线,工作过程仿真的三维燃面推移和三维流场,结构设计,机械制图及工艺过程等都需要以图象显示,有时需进行立体、彩色、动态的显示。图象显示可避免对大批数据枯燥无味的人工处理,而使计算结果形象鲜明生动地表示出来,便于设计人员审阅、判别、修改。

此外,CAD、CAM 程序系统的设计还需与以下的先进系统结合:

(1) 人机对话。可以通过指令、口述或光笔来实现。

(2) 人工智能。人工智能的两大支柱是知识表示和搜索技术;也可通过逻辑推理和判断来实现某些问题的智能化。

(3) 专家系统。所有的计算和设计结果是否合理、正确,都需要由有经验的设计专家来判定认可。例如理论计算和设计的合理性,实现的可能性,设计与工艺是否兼顾等。在程序系统中可以设置专家系统表达专家意见。

从固体火箭发动机的CAD示意图中可以看出,对提高固体火箭发动机设计水平起关键作用的是各种专用设计子程序。

3 新技术的补充

固体火箭发动机理论计算、结构设计和制造工艺随时都有新技术、新发展,这些综合性或单项技术的新成就应随时补充到CAD和CAM的数据库、程序库和模块中去。

当前的新技术进展如下。

(1) 发动机总体方面

单室三推力、串联式、套装式、整体级、捆绑式发动机,推力比20以上的单室双推力发动机,无喷管或可燃喷管发动机,隔窗式和任意多次起动发动机,旋流阀等可调推力发动机,补给液氢或氧化剂的发动机,固冲组合发动机等。

(2) 推力向量控制方面

当前主张垂直发射,之后采用推力向量控制,如二次喷射、燃气舵、摆动喷管等。又采用在导弹重心处直接施加侧向力,使导弹平移迅速瞄准目标的直接侧向力控制方案。

(3) 材料方面

发展凯夫拉、C/C、陶瓷/陶瓷、非晶态金属带、三元乙丙等,趋向采用全复合材料发动机。

(4) 推进剂方面

高能无烟或少烟推进剂,改性双基推进剂,无铝高能推进剂,含铍推进剂,负压力指数推进剂,特高或特低燃速推进剂等。

(5) 测量方面

无损检测,大量程、高精度传感器,脉冲测量技术等。

(6) 基础研究方面

发动机内外一体化非定常、三维、二相流场,发动机工作过程数值模拟,导弹与发动机一体化寻优CAD,点火与燃烧过程、机理和规律,燃速相关性,燃烧转爆轰的发动机临界工作条件,相似准则在静动力、燃烧过程、缩比发动机及高空性能方面的应用,三维装药造型,三维结构粘弹性分析,可靠性、经济性、贮存及寿命预估,复合材料烧蚀、传热、强度及缺陷可允性准则研究,极限设计技术,高精度小型传感器及高精度测试系统,无损检测原理,

CAD、CAM、CAT 等新进展等。

(7) 工艺方面

新的缠绕、胶接、整体旋压、模压等工艺, 数控加工, 真空电子束焊等特种加工, 药柱的压力浇注、真空浇注。

4 结束语

由于计算机的飞速发展, 在各个领域, 用计算机优化设计来代替人工设计, 用工作过程的计算机数值模拟来代替或部分代替实验研究或试车, 已经成为发展的总趋势, 也已经取得明显的成功和效果。

在固体火箭发动机领域, 计算机辅助设计和计算机辅助制造具有最广泛的概念和任务, 结构装药设计的性能预示和热防护计算是发动机理论和结构设计的中心内容, 计算机制图是设计思想的最终表达。而性能预示的核心是考虑燃烧和流动相互作用的工作过程的数值模拟, 热防护设计的核心是烧蚀、传热和强度计算。CAD 和 CAM 系统应当随时吸收新的研究成果。高水平的核心研究的完成, 对固体火箭发动机性能预示的准确度和理论设计水平的提高具有举足轻重的作用。

参 考 文 献

- [1] Roys G P. User's Manual for Solid Propulsion Optimization Code (SPOC). AD-A 108224, 1981
- [2] Jacques L and Legagneux D. Computer Aided Preliminary Design of ARIANE 5 SRM. AIAA 87-1738
- [3] Salvatat B. Analysis of Gas Flow in Three Dimensional Solid Propellant Grains. AIAA 84-1357
- [4] Waesche R. Effects of Grain Slots on Flow in SRM. AIAA 89-2790
- [5] Huang C J and Chang G C. Numerical Study of Gas-Particle Flow in a Solid Rocket Nozzle. AIAA J, 1988, 26 (6)
- [6] Chang I S. Three-Dimensional, Two-Phase Supersonic Nozzle Flows. AD-A138649
- [7] Brown J J and Hoffman J D. Three-Dimensional Flow in Rotating Rocket Motor Nozzles. J of Spacecraft, 1986, 28 (3)
- [8] 何洪庆, 张振鹏主编. 固体火箭发动机气体动力学. 西安: 西北工业大学出版社出版, 1988. 5
- [9] 候晓, 何洪庆, 蔡体敏等. 固体火箭喷管两相粘性跨音速流场计算. 推进技术, 1991 (2)

~~~~~  
(上接第 31 页)

(3) 计算结果的准确性与网格的疏密有相当大的关系。

(4) 对于高度稀疏矩阵, 采用一维压缩存贮, 可大大地节约计算机内存。对于本文所用网格, 在温度场计算中节约内存 98.26%, 在应力场计算中节约内存 98.28%。

(5) 本文计算中忽略了一些实际因素的影响, 如: 温度场的计算中, 没有考虑烧蚀, 忽略了辐射的影响, 在应力场的计算中, 没有考虑材料层间的相对滑动等。这些还有待于进一步完善。