

航空发动机尺寸和质量估算技术

Estimating Technology of Aero Engine Dimensions and Mass

■ 李定乃 蔡建兵 / 中国航发动研所

航空发动机尺寸和质量估算技术是根据发动机的设计参数和构型，获得发动机尺寸和质量的技术，是连接发动机性能、结构以及转子动力学设计的桥梁，是建立基于多学科的高效综合设计体系的重要组成部分，广泛应用于航空发动机综合论证评估和综合优化。

航空发动机尺寸和质量是评价发动机先进性的重要指标，是由发动机的流量、涵道比、压比、涡轮前温度、转速等设计参数和构型确定的。在发动机方案论证阶段主要是通过发动机循环参数分析确定满足发动机性能需求的发动机设计参数，而此时发动机各部件的设计还未开始，无法获得发动机的尺寸和质量，需要一种能快速把设计参数与发动机的尺寸和质量关联起来的技术来解决这一问题。因此，发动机尺寸和质量估算技术应运而生。在进行发动机循环参数分析时，运用发动机尺寸和质量估算技术，可以把所选择的循环参数所对应发动机各部件的尺寸和质量估算出来，使之具体化，进而在保证发动机性能的基础上，开展以发动机的尺寸和质量为目标的设计参数优化工作。在中国航发运营管理体系（AEOS）的建设中，对发动机尺寸和质量估算提出了更高的要求，因此，很有必要对发动机尺寸和质量估算技术的发展和應用进行分析研究，总结相关应用经验。

航空发动机尺寸和质量估

算方法及特点分析

航空发动机尺寸和质量估算方法主要有两种：一是利用统计数据拟合的经验公式计算法；二是根据部件简化构型计算发动机部件质量的构型法。用于估算发动机质量的经验公式称为质量模型，是一种自上而下的分析，它基于已有的发动机设计数据，通过回归分析，确定设计参数与质量之间的函数关系。这种方法的优点是速度快、算法简单，但当设计参数明显偏离数据样本时，其估算精度可能会降低。构型法是一种自下向上的分析，通过部件的形状、尺寸和材料等计算部件质量，进而得到发动机整机质量。这种方法的精度较高、适用性广，但计算量大、算法复杂。航空发动机尺寸和质量估算技术由经验公式法向构型法发展，由整机级向部件级细化发展。

经验公式法

经验公式法有整机级和部件级两种模型。

整机级经验公式是指发动机设计参数直接与发动机整机尺寸和质量的关系曲线。这些经验公式主要通过数学统计分析方法，把发动机流量、涵道比、压比、涡轮前温度、

转速等发动机设计参数以及代表发动机技术水平因子的发动机设计时间或者定型时间作为统计变量，建立变量与发动机的整机尺寸和质量的关系式。整机级经验公式的估算精度不高，而且与所选取的发动机样本的数量和类型有很大关系。波音公司通过对350台发动机参数进行统计分析，得到发动机整机尺寸及质量经验公式，经验证约有85%的发动机估算质量在 $\pm 15\%$ 误差带以内。

部件级经验公式是指把发动机设计参数分解到各部件，得出各部件的设计参数与尺寸和质量之间的关系曲线，再通过部件的尺寸和质量组合成整机的尺寸和质量。部件级经验公式可以把发动机整机质量细分至每个部件，进行部件级尺寸和质量估算。美国国家航空航天局（NASA）刘易斯（1999年更名为格伦）研究中心通过对发动机简化部件模型的统计分析，发展建立了估算风扇、风扇过渡段、压气机、燃烧室、涡轮、框架和附件等轴流部件尺寸和质量的公式，其精度在 $\pm 10\%$ 以内。法国航空航天研究院（ONERA）通过简化部件模型建立了涡轴发动机部件尺寸和质量估算公

式，并在发动机方案设计和最优化 CREATION 平台中进行了应用^[1]。

构型法

构型法是通过给定发动机和部件气动参数和发动机结构参数，基于发动机部件的二维流道设计方法并采用一些成熟的经验公式，建立各主要部件的尺寸和质量估算方法，从而获得整台发动机的尺寸和质量。部件设计参数包括压力、最高温度、材料、几何形状、级数、轮毂比以及转速等，这些设计参数值的选择不仅确定了部件的性能还直接与部件的尺寸和质量关联起来，可以进行基于部件尺寸和质量为目标的部件设计参数优化研究。该方法的精度得到了提升，误差在 $\pm 10\%$ 。NASA 刘易斯研究中心的尺寸和质量估算程序 WATE-II 和小型航空发动机质量估算程序 WATE-S 均是基于该方法开发的。国内学者也进行了相关跟踪研究，并对发动机尺寸和质量模型进行了修正，如北京航空航天大学郭淑芬团队采用构型法和经验公式法相结合对发动机的轴流压气机、离心压气机、涡轮、燃烧室、减速器、粒子分离器轴和附件的尺寸或质量估算公式进行了研究^[2-3]。

航空发动机尺寸和质量估算技术的应用分析

单一的循环热力参数研究已经不能满足现代高性能经济性航空发动机的研制要求，基于多学科的高效综合设计体系应充分综合考虑发动机循环参数、部件气动和结构、质量、强度、噪声，以及研制成本等方面的问题。航空发动机尺寸和质量估算技术广泛应用于高效综合设计体

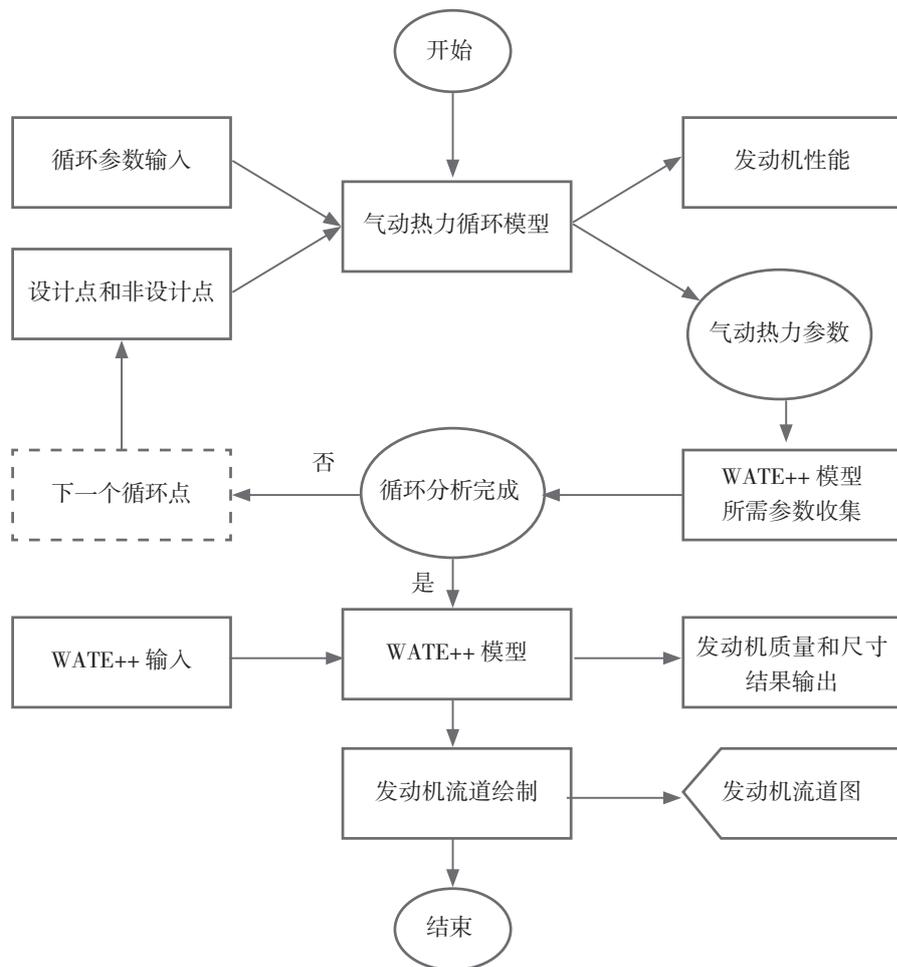


图1 WATE++在NPSS平台计算发动机尺寸和质量过程

系中并发挥着重要的作用。

NPSS平台

为了把发动机尺寸和质量计算程序加入推进系统数值仿真平台 (NPSS)，NASA 格伦研究中心把原有的 WATE-II 程序改写为面向对象的 WATE++ 程序，同时对程序进行了升级改进，使得 WATE 不仅能与 NASA 的 NPSS 程序无缝连接，还增加了程序适用发动机的类型并将计算精度提高至 $\pm 10\%$ 以内。图1为 WATE++ 在 NPSS 平台中计算发动机尺寸和质量的过程^[4]。该过程主要分两个步骤：首先，在进行发动机各状态气动热力循环分析时，程序会

自动收集 WATE++ 模型计算时所需的数据，如发动机各部件的性能和截面参数、发动机的功率和转速等；然后，把发动机气动热力循环参数分析时搜集的数据，尺寸、质量计算所需的其他参数作为 WATE++ 模型的输入，进行发动机尺寸和质量估算，最后程序会绘制出发动机流道图。

TERA平台

欧洲环境友好型航空发动机 (VITAL) 项目成功开发了技术、经济和环境风险评估工具 (TERA)，能够在发动机方案论证阶段就对发动机的设计难点、设计成本和污染



图2 CREATION平台模块关系

排放等方面进行综合高效的评估，缩短了发动机的研制周期、降低了研制成本和风险。

在该项目中，英国罗罗公司开发了发动机初步设计工具Genesis，在发动机气动热力参数确定后，就能通过计算分析，给出发动机主要部件尺寸和质量，如发动机的轮盘和叶型。ONERA开发了CREATION平台，其目的是评估、优化和改进旋翼机系统，量化新技术对旋翼机性能的影响。图2为该平台的7个模块关系，其中两个中心模块（目标模块）为飞行性能模块和环境影响模块，围绕这两个中心模块，有5个方法模块用来提供飞行性能和环境影响评估的方式，分别为任务分析模块、架构与布局模块、质量与结构模块、气动性能模块以及动力装置模块。动力装置模块中发动机循环参数分析与优化过程如图3所示，

在进行发动机循环参数分析过程中完成了发动机的尺寸和质量计算，

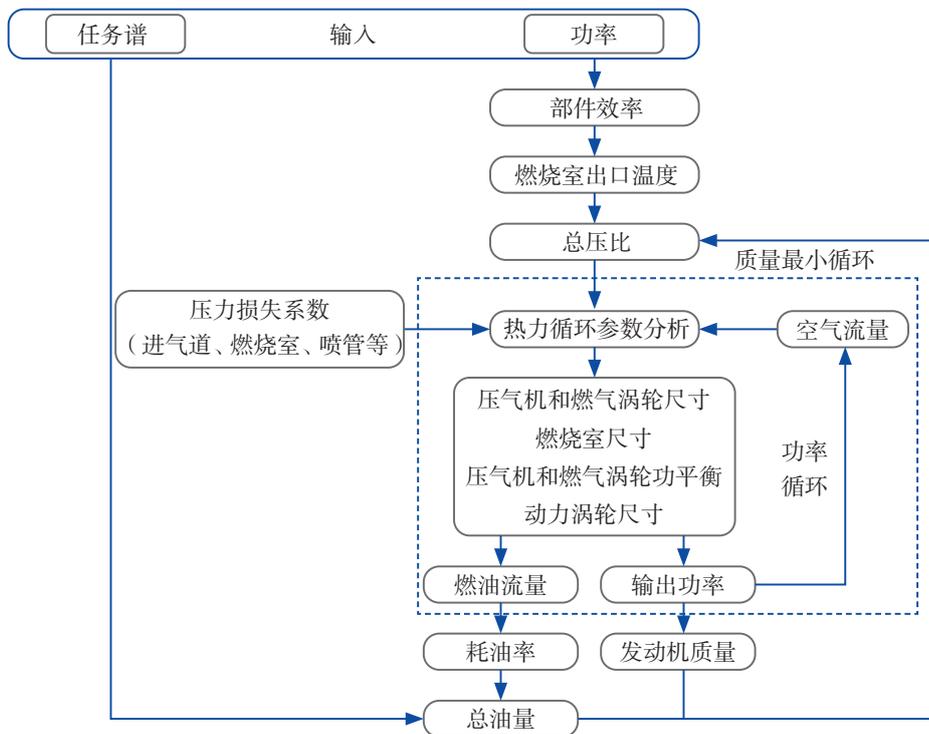


图3 发动机循环参数分析与优化过程

在完成以发动机功率为目标循环分析后，再以旋翼机完成给定任务所需的燃油质量和发动机质量之和最小为目标进行进一步优化。

德国MTU公司开发了内部设计工具MOPEDS^[5]，在发动机初步设计过程中计算分析发动机的循环参数和各部件的气动参数、几何参数、质量大小、噪声大小以及制造成本，如图4所示。

在设计平台中应用的特点和作用

航空发动机尺寸和质量估算技术已经成为先进航空发动机设计体系中重要的环节。把发动机的气动性能和结构强度连接起来，进行动力级和飞机平台级的综合优化设计，主要有以下几个方面的特点和作用。

第一，航空发动机尺寸和质量估算技术应用于发动机项目论证或者方案论证的阶段早期，主要是集成在综合设计平台中，用于以发动

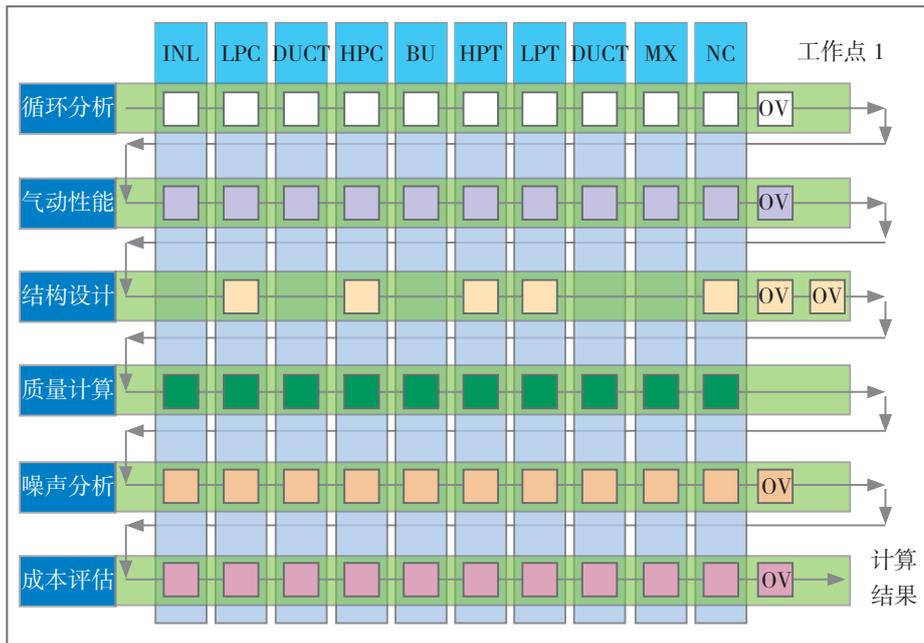


图4 MOPEDS结构

机级或者飞机平台级设计需求为目标的循环参数以及构型确定和优化工作。这些设计需求包括发动机功率和耗油率、发动机的排放和噪声要求、飞行平台性能和结构布局、发动机级或飞机平台级的经济性等。这样可以充分考虑参数给定的合理性，合理约束总体对部件参数的选择，特别是小尺寸效应对部件效率的影响、小尺寸结构对强度方面的影响，以及部件性能参数对部件结构形式（压气机的类型、燃烧室的类型等）的选择。

第二，航空发动机尺寸和质量估算技术把发动机性能和结构连接起来，起到了桥梁的作用。在发动机论证初期，进行发动机循环参数分析可以获得发动机的气动性能，进行初步的发动机结构强度、尺寸和质量优化、转子动力学方面的多学科综合优化分析研究，进一步实现循环参数优化。

第三，航空发动机尺寸和质量估算技术可以促进动力和飞行平台性能综合优化。在方案论证阶段，飞行平台在动力选配和飞行平台性能优化设计时，需要评估动力系统和燃油系统质量和尺寸，进而评估飞行平台的性能和优化动力系统的选配。在动力系统没有备选方案时，航空发动机尺寸和质量估算技术可以发挥重要作用，给出相对准确的动力系统的质量和尺寸。

结束语

国内航空发动机尺寸和质量估算技术发展过程主要是一个跟踪研究的过程，也是从基于数据统计的经验公式法到构型法的发展过程，因此发动机尺寸和质量估算的方法基本相同、估算公式相似。主要的研究工作是基于不同的发动机类型、部件类型、样本数量等数据对估算公式中的系数进行修正，以获得更适

合特定发动机及部件尺寸和质量的估算公式，因此计算精度都得到了较大提升，但可能会牺牲公式的适用范围。随着航空发动机基于多学科的高效综合设计体系的推进和逐步完善，航空发动机尺寸和质量估算技术的作用将会逐渐发挥和显现，但仍需要在以下方面开展深入研究：首先，正确地认识和对待航空发动机尺寸和质量估算技术，促使该技术纳入综合设计优化平台；其次，进一步开展航空发动机尺寸和质量估算技术研究，充分挖掘现有成熟发动机的参数，形成自己的设计准则；最后，提升总体综合设计水平，突破多学科综合设计知识壁垒，提炼设计方法，建立方案论证阶段的综合设计优化平台。

航空动力

（李定乃，中国航发动力研究所，工程师，主要从事航空发动机总体性能设计工作）

参考文献：

- [1] Burguburu S, Basset P M. Turboshaft engine predesign and performance assessment[C]. AIAA, 2012.
- [2] 郭淑芬, 陈军, 赵红利. 涡喷与涡扇发动机估算方法[J]. 航空发动机, 1999(2): 8-10.
- [3] 郭淑芬, 宋慧敏, 王普居. 涡轴与涡桨发动机特殊部件质量估算[J]. 航空发动机, 1999(4): 8-11.
- [4] Donus F, Schaber R. Accuracy of analytical engine weight estimation during the conceptual design phase[C]. ASME, 2010.
- [5] Michael T T, Bret A N. An object-oriented computer code for aircraft engine weight estimation[R]. NASA/TM-2009-215656.