

# 飞行力学设计的新思路

常伯浚

北京机电工程研究所, 北京 100074

E-mail: [mailto:cbj1276@sina.com](mailto:mailto:cbj1276@sina.com)

收稿日期: 2008-07-18; 接受日期: 2008-11-15

**摘要** 对于现代高性能飞行器而言, 飞行力学是与各类学科紧密相关的纽带. 为了要获得飞行器良好的总体性能, 必须要有良好的飞行力学设计. 对此, 提出了一个飞行力学设计的新思路. 为满足现代飞行器高的操纵性、稳定性、机动性、宽的速度应用范围(亚、超声速)等要求, 采用发动机、进气道与弹体一体化设计, 三通道协同控制以及主动控制等技术, 导致了多类学科交叉耦合, 使得单一学科分别设计的方法难以解决现代飞行力学设计问题, 采用多学科设计优化(MDO)技术就成为现代飞行器设计的必然选择.

**关键词**

飞行力学

MDO

一体化设计

自从世界上第一架飞机上天至今才 100 多年的历史, 但飞行器的发展却日新月异. 飞行器已经成为当今世界先进科学技术的载体和应用对象. 对于第 4 代战机和高性能战术导弹而言, 面对复杂多变的战场环境, 要做到安全、快速突防并对目标实施精确打击, 则飞行器必须有良好的飞行性能, 从而对飞行力学设计提出了更高的要求, 主要体现在如下方面<sup>[1]</sup>.

(1) 随着飞行器飞行性能的提高, 飞行力学从辅助位置提升到起主导作用的核心学科地位, 导弹弹体的动力学特性与飞行性能密切相关.

(2) 传统的飞行力学设计注重于弹体的静稳定度的选取和重心前后限的确定, 为保证弹体的稳定性与操纵性, 不惜牺牲弹体的其他性能, 因此这不是一种优化设计. 基于有控飞行力学的概念, 现代飞行力学设计的理念则不单是发挥飞行力学本身的技术作用, 而且要充分利用现代控制理论、数控技术、人工智能技术等优势, 寻求一种多学科协同作用下的系统级的优化设计, 跳出了飞行力学单一学科的应用范畴.

(3) 鉴于技术基础的限制, 在传统飞行力学设计中主要采用小扰动、线性化以及纵、侧向分开的近似

模型, 其设计结果是不精确的, 为验证设计结果的正确性, 往往要用物理样机进行设计验证, 从而使型号研制周期增长、研制成本居高不下. 随着计算机技术、数字化设计技术的发展与应用, 设计环境得到极大改善的情况下, 采用未经简化的模型, 应用多学科数字化设计技术, 是高性能飞行器设计的必然选择.

现代高性能飞行器的实质是一个由多个学科构成的复杂的高阶非线性、变系数动力学系统. 众多设计变量相互紧密耦合, 显然, 通过静稳定度等少数几个设计指标是不可能获得系统的最优性能的. 新一代飞行器的研制, 必须要有新的设计理念、技术与设计方法支持. 设计技术伴随着层出不穷的新飞行器研制需求而协调发展着.

## 1 飞行力学设计的本质特征

飞行器本质上都是一种运载工具, 按照特定的要求, 将各种有效载荷(战斗部、测量仪器、人员、卫星及其它航天器等)以一定的方式, 安全地、准确地运送到目的地, 完成既定任务. 飞行器本身又是一种遵循飞行力学原理的飞行受控体, 是一个复杂的动力学系统, 故在飞行器的设计过程中, 飞行力学起到主

导学科的作用. 飞行力学设计的本质特征有如下方面.

(1) 飞行力学模型的复杂性

飞行器的飞行力学模型是一个6自由度(3个线运动、3个绕质心的角运动)变质量、非线性的高阶常微分方程组. 方程组之间存在着气动交叉耦合、惯性矩耦合和运动学耦合, 从而导致设计时只能利用数值积分法求得特解来揭示飞行特性外, 一般很难得到物理概念明确的通解. 在计算技术(包括计算方法与计算工具)比较落后、还难以支持的情况下, 一般只能以简化模型求得近似解并通过物理实验修正设计结果的方法解决飞行力学设计问题.

(2) 飞行力学与多个学科相关联, 学科之间在不同强度的耦合现象. 因此, 用单学科的设计方法难以获得高性能的飞行品质.

为说明问题, 图1给出了某类导弹的设计结构矩阵(DSM). 由图1可见, 有关飞行力学设计的模块有弹道设计, 包括有飞行方案设计、方案弹道计算、空间弹道(6自由度)计算、弹体动态特性分析等内容. 这

些设计与空气动力学(气动布局、气动力计算、气动力矩计算、气动加热计算等)、推进系统(包括固体火箭发动机和助推器、吸气式发动机及进气道)设计、弹体结构设计(弹体受力构件布局、弹体部位安排、物性计算)、自动控制系统设计、自动导引系统设计、作战效能分析以及成本概算等模块. 即飞行力学设计基本上与其它学科全相关, 从而使飞行力学设计成为一个多学科参与下, 多设计变量、多目标函数和多约束条件的3多设计问题.

(3) 由于飞行力学模型本身的复杂性和与多学科的相关性, 导致飞行力学设计的难度和设计周期的增加.

鉴于以上飞行力学设计的特征, 既反映出飞行力学设计在型号研制中的重要性, 又表明了为获取良好的飞行性能进行飞行力学设计的艰巨性. 针对当代高性能飞行器研制的需求, 如何充分利用先进的设计理念, 改造传统的设计技术与方法则是型号总体设计工作者进行现代飞行器设计具有挑战性的任务.

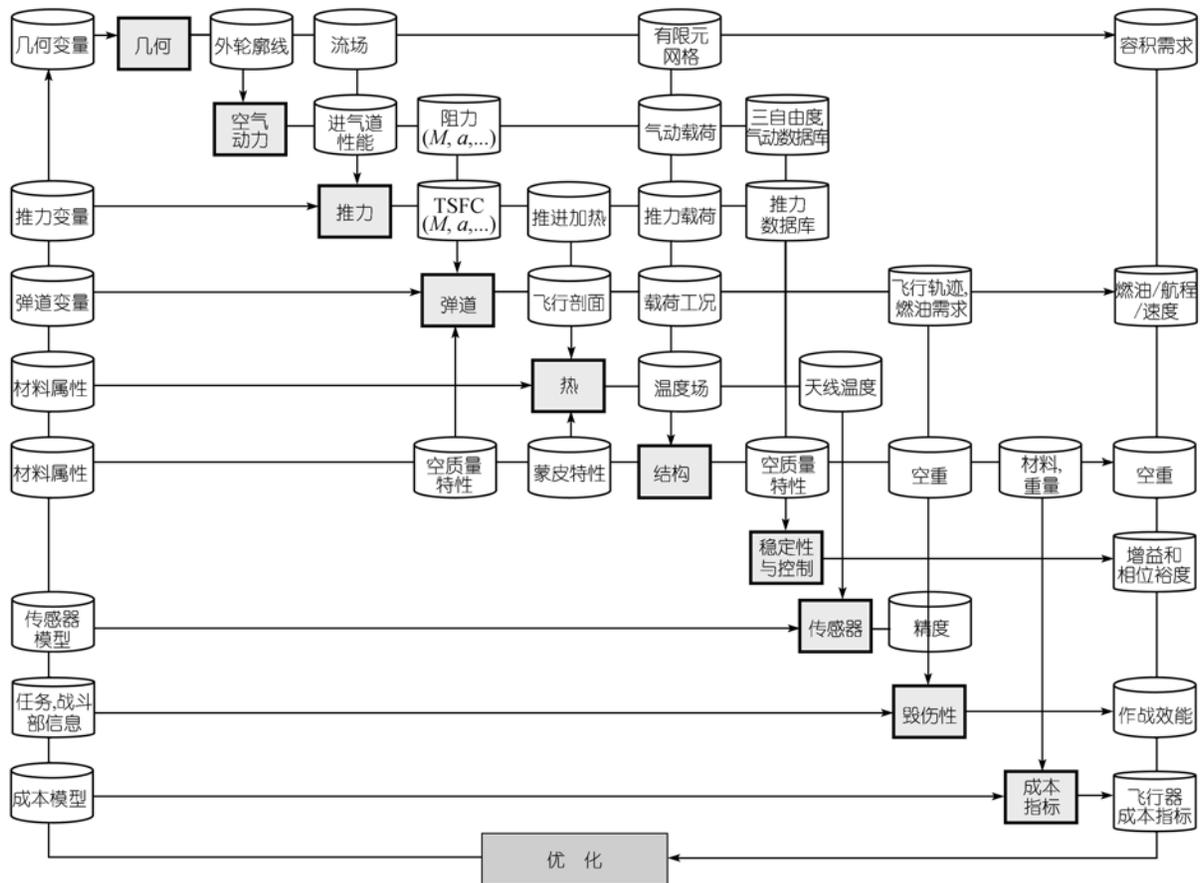


图1 导弹设计结构矩阵示例<sup>[1]</sup>

## 2 传统飞行力学设计回顾

一般情况下, 飞行器的运动方程组是由 6 个动力学方程(3 个线运动、3 个绕质心的转动)、6 个运动学方程(3 个线位移、3 个角位移)、3 个几何关系方程和 1 个质量方程, 共 16 个方程. 其中常微分方程 12 个. 由于本模型是由设计变量、约束条件和目标函数组成的 3 多系统, 在计算机技术(计算机软、硬件环境)、自动控制技术、数控技术尚不发达的条件下, 飞行力学设计很难突破, 长期以来, 一直沿用传统的设计方法, 主要表现在: 在设计理念上, 遵循以模型进行设计, 以飞行试验来验证设计结果是否正确, 通过试验发现问题进而修改设计, 循环往复, 直至成功. 这种研制模式由于物理样机的制造成本高、周期长, 难以满足型号创新和快速研制的市场竞争的需求, 对于更为复杂的高新导弹产品, 这一矛盾就更为突出.

(1) 在模型简化上, 采用纵向运动与侧向运动分开的处理方式, 其依据是飞行器有一个纵向对称面( $OX_1Y_1$ ), 当其在某个垂直平面内飞行, 且纵向对称面随时与飞行平面相重合时, 侧向运动参数( $\beta, \gamma, \eta, \alpha_x, \alpha_y$ )为零, 从而使纵向运动可以单独处理, 而侧向运动则不能消除纵向参数的影响而独立存在. 这种将飞行器的飞控系统拆分为纵向、航向和滚动 3 个通道的设计方法, 是以牺牲飞行器整体性能为代价的. 将一个相互协调的 6 自由度运动体人为地、强制地作成相互独立的 3 个系统, 必将限制导弹原有的侧向机动性的发挥.

(2) 在设计思想上, 强调以保证飞行器具有自然稳定性的技术思想. 过去, 对于有人驾驶的飞行器而言, 为保证驾驶员的安全驾驶和减轻人的劳动, 使飞行器具有良好的自然稳定性是必要的. 随着技术的发展和飞行器飞行性能要求的提高, 保证飞行器具有自然稳定性的设计思想已经不适应高性能现代飞行器的要求了. 这有三方面的原因: (i) 为了保证飞行器具有自然稳定性, 以纵向运动为例, 飞行器必须要有水平尾翼, 并且水平尾翼中有一部分面积是固定翼, 另一部分则是产生操纵力矩的活动翼(舵面). 固定翼部分除产生保证自然稳定性的配平升力外, 还产生阻力. 如何降低阻力提高飞行器的动力航程, 在当代飞行器设计中具有十分重要的意义, 特别对

于多次使用的、大航程的飞行器则更是如此. (ii) 在保证自然稳定性的尾翼设计中, 必须遵循 2 个准则, 飞行器在飞行过程中, 随着燃油的消耗, 飞行器重心的位置在弹体坐标系内移动. 对于纵向运动而言, 为保证飞行器良好的动态特性, 重心移动的范围要受到限制. 重心后限(重心后移的最后位置限制)——由对自然稳定性的最低要求确定; 重心前限(重心前移的最前位置限制)——由保证最大操纵力矩确定. 重心位置的确定与很多因素有关, 除了稳定性与操纵性外, 还与弹上设备的部位安排、弹体的气动布局、油箱布置、弹上各类传感器的安装等有关. 为了减轻导弹的结构重量, 设计师们在结构设计时绞尽脑汁, 但为了控制导弹重心的变化范围又不得不安装配重. 此外, 对于 HCM(hypersonic cruise missile 高超声速巡航导弹)而言, 飞行速度的范围宽, 压心的变化也比较大, 表明单纯的保证自然稳定性的设计思想的局限性. (iii) 为了对飞行器航迹进行控制, 常规的方法是通过舵面的偏转来改变飞行姿态角, 进而改变飞行攻角或侧滑角导致产生升力或侧力, 在这些力的作用下使得飞行器的重心产生位移, 达到航迹的改变. 在进行控制和开始改变航迹之间不可避免地存在时间的滞后, 从而降低了飞行快速响应性能和突防能力. 对于 HCM 等高性能飞行器而言, 采用直接力控制技术可能是一种合理的选择.

## 3 飞行器多学科设计优化(MDO)技术

由于受到技术发展和条件的限制, 常规设计往往是立足于将飞行器按学科切割, 分别对学科设计, 求得学科的工程可行解, 在此基础上将各学科的工程可行解拼装成系统的可行解, 无法保证系统整体性能最优. 飞行器本身是各类学科相互影响、相互制约与协调的综合体, 常规的设计思路已经不能满足现代飞行器的设计需求, 从而使得 MDO 技术成为复杂系统设计的主流, 是一种充分考虑学科之间相互影响因素, 设计系统与子系统的综合方法. MDO 是从系统级的层次上研究复杂系统的设计问题, 探索学科耦合对系统最终性能的影响, 并立足于既定评定目标, 应用优化理论寻求系统的最优设计方案. MDO 是 20 世纪 90 年代以来发展的新型设计技术, 它的出现及其快速发展是基于高新飞行器等产品研制需求

的牵引, 以及计算机技术、人工智能技术、知识工程技术、虚拟产品开发技术等的发展, 为MDO技术的发展与应用提供了基础平台, 没有基础技术的支持, MDO技术的应用也是不可能的<sup>[2]</sup>.

### 3.1 以高超声速巡航导弹为代表的新一代导弹武器对设计技术的新需求

从20世纪80年代以来, 世界各国争相研制HCM, 为争夺HCM技术制高点, 开展了激烈的竞争. HCM在超燃冲压发动机、流体力学、新材料、新工艺、热防护技术、制导与控制、飞行力学、结构与可靠性等方面采用了大量的新技术, 学科的密集度高、学科之间强耦合多. 此外, 高的性能要求导致一体化设计技术的普遍应用, 使得HCM的设计成为型号研制的技术关键. 根据各国HCM研制情况, 采用MDO新的设计理念与方法符合逻辑的.

### 3.2 多学科设计优化的建模技术

MDO是一种数字化的设计技术, 通过由各个学科数学模型构成的系统数学模型进行优化设计和仿真验证, 求得系统的全局优化方案. 故在MDO技术中, 建立各个学科乃至系统的多学科优化模型是系统设计的关键. MDO技术是建立在高性能计算技术基础之上的虚拟产品开发技术.

关于飞行力学模型, 在型号设计的不同阶段可以采用不同粒度的模型, 但为了贯彻主模型工作法, 保证各学科间信息的交换和相关性、避免学科设计的不连续性和不协调性, 弹体结构的三维几何模型和弹体6自由度飞行力学模型, 通过各种信息与各个学科关联起来, 形成一个内在联系的有机整体, 过多的简化将使系统模型不完整和不连续, 出现信息断层

现象, 导致设计结果的不正确.

### 3.3 优化算法

优化设计的实质, 就是通过一定的搜索策略, 不断寻求满足一定约束条件且对一定设计指标具有更好或最好的设计方案. 对于HCM复杂对象而言, 优化算法是MDO中又一关键技术. 由于系统涉及的学科多、学科之间相互耦合、设计空间高度非线性, 使得设计变量、约束条件和目标函数的数量多达数十个, 甚至上百个, 为了通过反复迭代和全局搜索求得系统的优化方案, 其计算工作量是相当大的, 故近年来优化算法、包括近似算法的研究成为热门的研究课题, 并取得了丰硕研究成果.

## 4 结束语

在研究飞行器时总离不开飞行力学, 100多年来, 飞行器有了惊人的发展, 而飞行力学设计技术基本上仍遵循一种固定的模式. 今天, 当大家争相研制高性能飞行器的时候, 就感到常规的飞行力学设计技术难以满足新型飞行器的设计需求. 新型飞行器强调要高、精、尖, 技术上要创新, 从而带来研制上的高难度和高风险, 要求设计精细化和研制快速性. 说明一代新的高技术产品, 必须要有一代新的研制技术的支持. 水涨船才能高. 传统的飞行器设计主要依赖于原准机、专家知识、既定标准和规范以及物理样机的实验验证, 由于受到固有的技术思想的羁绊, 使得研制出来的新产品中新的成份并不多, 难以实现跨越式发展. 而MDO技术则只要有精确可靠的设计模型就有可能得出全新的设计方案. MDO技术为高新工程领域复杂系统优化及创新提供了高效率、低成本的运行环境.

## 参考文献

- 1 Porter C S, Baker M, Alonge F, et al. The integrated hypersonic aeromechanics tool structural module. In: The 12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies, Norfolk, AIAA-2003-7012, 2003
- 2 哈佛尔 X, 萨克斯 G. 现代飞机设计中的飞行力学原理. 西安: 飞行力学杂志社, 1985