

# 直升机总体设计技术的新进展

New Progress of General Design Technology for Helicopter

南京航空航天大学 张呈林 彭名华



张呈林

南京航空航天大学航空宇航学院教授、博导。享受政府特殊津贴。直升机旋翼动力学国防科技重点实验室学术委员会主任。研究方向为直升机旋翼动力学设计、直升机综合设计技术、直升机动力学设计。共发表论文 30 余篇、出版教材 1 部、获部省级科技成果奖 6 项。

随着现代直升机性能的不不断提高,其技术越来越复杂。直升机总体设计是一种大规模复杂的系统工程,具有反复迭代与多轮逼近、综合权衡与全面协调等特点,它对新机研制工作具有全局性的影响,是直升机研制中最为重要的一个阶段。总体设计的好坏直接影响直升机研制的全局

现代设计方法及高度集成的大型综合软件系统在直升机总体设计中的应用,极大地推动了直升机总体设计技术的进步与发展,也给直升机总体设计技术增添了新活力,提出了新挑战。

和成败。

随着直升机技术的迅猛发展以及计算机技术的广泛应用,直升机总体设计正开始一场深刻的变革,各种现代设计理论、设计方法和设计手段不断涌现。现代设计方法及高度集成的大型综合软件系统在直升机总体设计中的应用,极大地推动了直升机总体设计技术的进步与发展,也给直升机总体设计技术增添了新活力,提出了新挑战。本文将从直升机总体设计理念和模式的转变、总体设计方法和直升机总体综合设计软件系统的发展三方面阐述直升机总体设计技术的最新进展。

## 直升机总体设计理念和模式的转变

20 世纪 90 年代以来,随着直升机技术的发展和外部环境的变化,直升机系统日益复杂,需要满足的使用要求越来越多、越来越高,促使

直升机总体设计理念和设计模式发生了重大转变。直升机总体设计已从传统的“面向性能设计(Design for Performance)”转变为现代的“面向可负担性和质量设计(Design for Affordability and Quality)”,即从追求少数重要飞行性能发展到追求系统综合使用效能、从单纯追求性能发展到考虑全寿命周期费用、从采用串行和迭代的设计模式发展到采用并行设计模式。

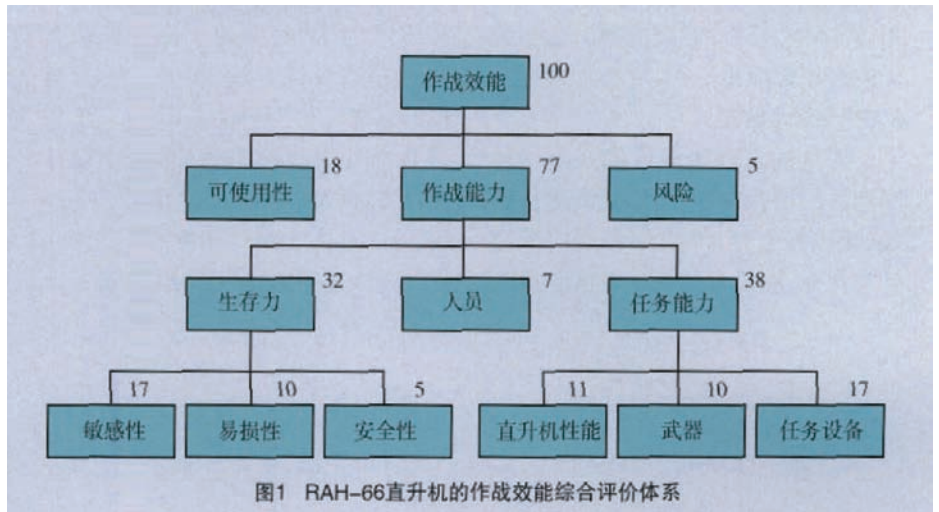
与此同时,直升机总体设计阶段变得越来越重要,在直升机总体设计阶段的传统设计理念中主要考虑气动、动力和重量等工程学科设计要求,以最小重量代价获得最好的性能,采用简单的经验分析模型进行设计;而现代直升机总体设计阶段除了考虑以上工程学科外,还要考虑飞行力学、结构动力学、隐身性等以及可靠性、维修性、保障性、经济性等新兴设计要求,追求更低的全寿命周期

成本和更高的系统综合使用效能,并采用高精度的计算机仿真分析模型进行设计,以提高设计方案的可信度。现代直升机的研制实践已经证明,新的设计模式能够很好地降低直升机全寿命周期成本和研制风险,缩短设计周期,提高设计质量和直升机综合效能。现代直升机总体设计理念 and 模式主要有以下 3 个特点。

### 1 综合评价体系

在直升机总体设计中,为了对多个设计方案进行对比分析,做出评价和优选,需要有合适的评价准则和指标,这些评价准则和指标应能全面地反映用户的各种使用要求。传统的总体设计根据直升机的不同用途类型,按个别主要性能指标的优劣对直升机设计方案进行评价,如重量效率、航程、载重量、生产率等。但随着直升机系统日益复杂,任务能力及使用要求的多样化,这种评价方法显得越来越不科学,已不能全面、综合和正确地评价直升机设计方案的优劣,因此迫切需要建立起包括直升机各项性能指标的综合评价体系,从用户的角度出发,通过对各个指标进行权衡协调,用来指导和评价直升机总体设计,保证获得满足用户要求的全局综合最优的总体设计方案。

近年来,在直升机总体设计中引入了直升机使用效能的综合评价体系,从系统工程角度来评价直升机总体方案的优劣。直升机的使用效能表征其在给定条件下完成任务的能力,其主要影响因素有任务能力、可用性和生存力,使用效能从系统的角度全面综合地反映了直升机的优劣。国内外对直升机使用效能评价体系进行了广泛的研究,特别是武装直升机的作战效能评价体系,已在实际工程设计中取得较好的应用。如美国的“科曼奇”(RAH-66)直升机在总体设计方案评估中,首次通过采用加权系数分配反映不同相关因素对其作战效能的影响程度,根据如图 1 所



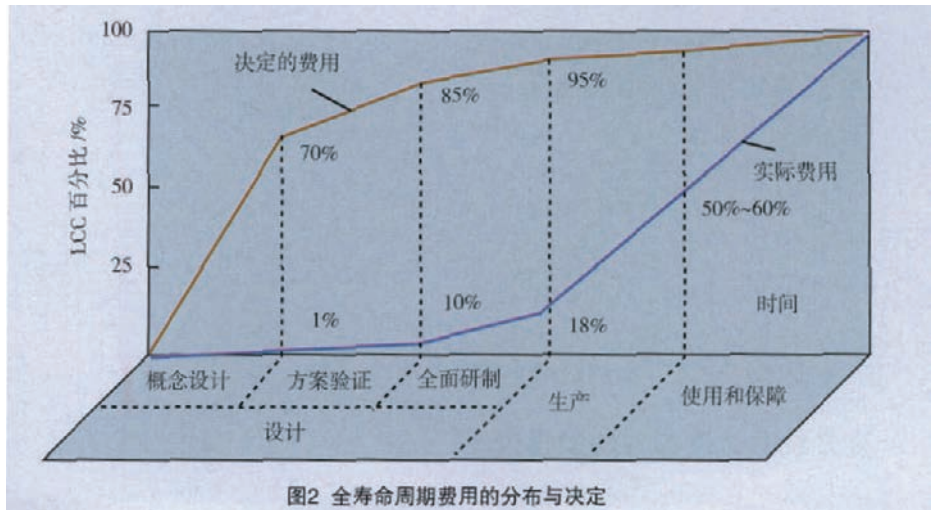
示的作战效能综合评价体系,进行直升机总体方案的优化,使得新的总体设计方案与现有的直升机相比有了大幅度改进。

### 2 全寿命周期费用

随着直升机技术的发展,直升机性能变得更加优良,但同时其费用成本呈指数曲线增长,使得直升机装备费用越来越高,其经济性问题越来越突出,因此以较小的费用获得最大的使用效能,已成为直升机研制和使用中需要解决的核心问题之一。此外,随着现代直升机系统日益复杂,其使用维护也变得越来越复杂和重要,使直升机的使用维护费用相对于采购费用也越来越高,因而传统的以采购费用作为选择直升机决策准则的做法,显然已经脱离现代直升机装备发展的现实,可能导致买得起、用不起

的问题。在这样的背景下出现了全寿命周期费用(Life-Cycle Cost, LCC)的概念,用来代替最小采购费用作为选择直升机的准则,它能更全面综合地反映直升机装备使用的经济性,也逐渐成为直升机研制中进行经济性分析和评价的指标及准则。

研究和实践表明,大规模复杂工程系统全寿命周期费用的 95% 是在研制阶段决定的,特别是花费仅占全寿命周期费用不到 10% 的方案验证阶段已决定了全寿命周期费用的 85%,如图 2 所示。可见此阶段的决策对直升机全寿命周期费用影响巨大,因此在此阶段必须考虑总体设计方案对直升机经济性的影响,进行直升机全寿命费用分析和优化,选择合适的总体设计方案,从而降低直升机全寿命周期成本,同时进行直升机使



用效能和经济性的综合权衡,达到最优的费用效能比。

### 3 并行设计模式

传统的直升机设计模式是一种序列性的串行设计,通常依次进行性能、操纵稳定性、动力学和结构等设计与优化,在设计过程中常常会造成

和模式的转变,出现了许多新的直升机总体设计方法,在直升机总体设计中获得广泛的应用。下面主要介绍其中两种方法:多学科设计优化方法(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)和鲁棒设计优化方法(Robust Design Optimization)。

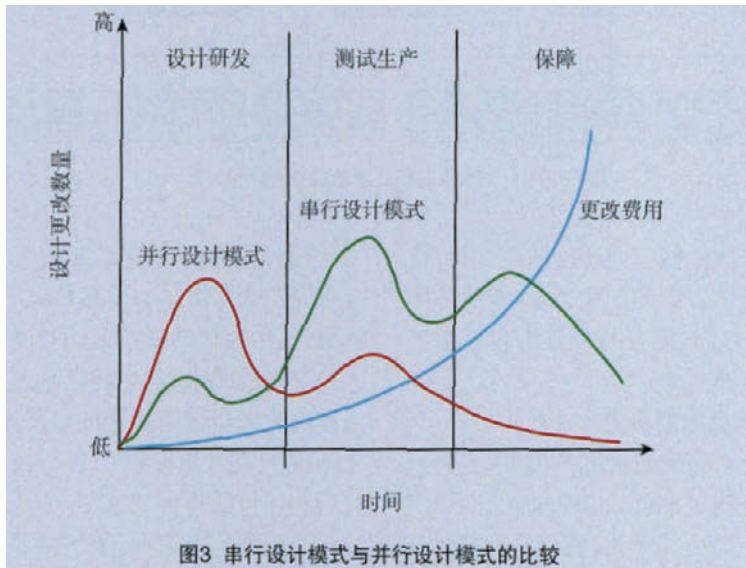


图3 串行设计模式与并行设计模式的比较

返工或反复修改,致使设计周期加长,研制成本增加。随着现代工程分析和计算技术的发展,在直升机设计中越来越多的使用复杂的高精度计算机数值分析模型和设计工具,如气动分析采用计算流体力学(CFD)方法,结构分析采用有限元素法(FEM),因而可以利用并行工程方法和计算机技术集成总体设计所涉及的各学科模型和设计工具,将设计与制造过程和保障过程综合在一起,从而在整个研制过程中综合考虑其性能、可靠性、维修性、保障性和可生产性,从而缩短设计周期,降低设计费用。图3比较了串行设计模式和并行设计模式对设计费用的影响,可以看出并行设计模式在总体设计阶段就对设计方案进行了充分的综合分析,从而减少了研制后期对设计方案的更改,降低了整个研制费用。

### 直升机总体设计方法的发展

伴随着直升机总体设计理念

#### 1 多学科设计优化方法

20世纪80年代后期,航空设计领域兴起了一种新的设计方法——多学科设计优化。多学科设计优化是一种通过充分探索和利用工程系统中相互作用的协同机制来设计复杂系统和子系统的理论,其目的是通过充分利用各个学科之间的相互作

用所产生的协同效应,获得整体最优方案。MDO应用高精度分析模型来提高设计的可信度,通过采用并行设计来缩短设计周期,通过考虑学科之间的相互耦合来挖掘设计潜力,通过系统的综合分析来进行方案的选择和评估,通过系统的高度集成来实现飞行器设计自动化,通过多学科的综合来提高设计可靠性,并降低研制成本,从而使研制出的产品更具有竞争力。NASA Langley研究中心对直升机旋翼桨叶多学科设计优化进行了大量研究,如图4所示,研究表明通过考虑多个学科间的耦合作用,可以提高旋翼的综合性能。

直升机总体设计涉及到空气动力学、飞行力学、动力学、结构强度、经济性等多个学科,而这些学科之间互相耦合、相互影响,需要对总体参数进行多学科综合协调和权衡才能获得全局最优的直升机总体设计方案,所以直升机总体设计是典型的多学科设计优化问题。多学科设计优化是实现直升机综合设计最有效的技术途径,通过集成多个与总体设计相关的高精度学科分析模型,充分分析和利用各学科之间的协同效应,可以设计出综合效能更好、全寿命周期成本更低的直升机,同时采用并行的设计模式有效地缩短直升机研制周

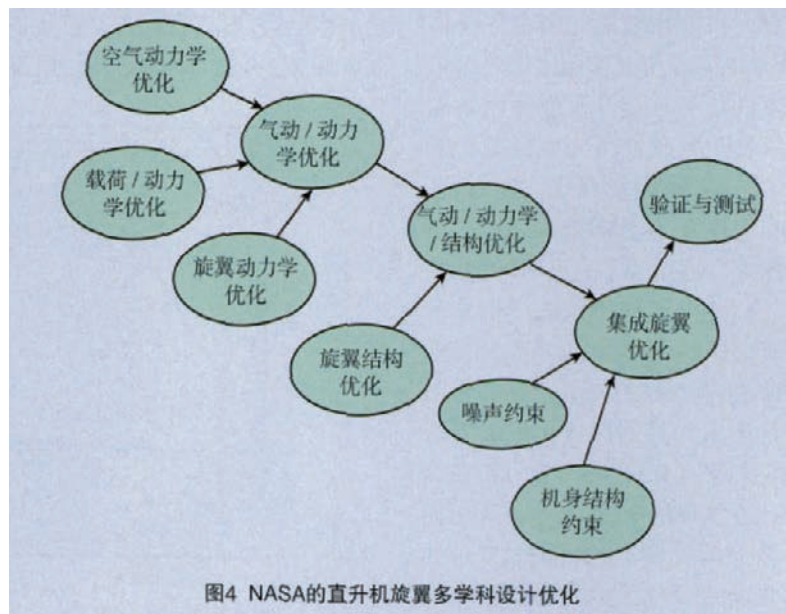


图4 NASA的直升机旋翼多学科设计优化

期,提高设计质量。图5为直升机总体多学科设计优化流程图。

直升机总体多学科设计优化需要解决的主要关键技术问题有:

(1) 建立适合直升机总体设计的各个学科的高精度分析模型,特别是总体设计关注的全寿命周期成本,综合效能等学科分析模型以及总体参数化几何模型,同时需要分析学科之间耦合关系,建立起直升机总体多学科设计优化框架。

(2) 研究如何采用代理模型以解决多学科计算复杂度问题。

(3) 发展适合直升机总体多学科设计优化模型求解的多学科设计优化算法。

## 2 鲁棒设计优化方法

由于直升机总体设计是直升机设计的最初阶段,掌握的信息较少,对所设计的直升机缺少全面深刻的了解,因而存在较多的不确定性因素。比如:(1)不同的直升机使用方案、气候环境等因素会使得直升机的飞行状态具有不确定性;(2)直升机制造和装配中的误差会导致直升机的气动外形具有不确定性;(3)总体设计中的分析模型存在着误差,使得计算结果具有不确定性;(4)外部环境的变化导致直升机成本具有较大的不确定性,等等。由于这些不确定性因素的存在,导致总体设计方案存在着不确定性,可能会不满足设计要求,从而使得设计方案存在着风险。

鲁棒设计优化是寻求一种在满足不确定性模型约束条件下使目标值概率最大化的设计方法。鲁棒设计的目的是要寻求一种可行的设计方法,使得一方面满足目标值最优的要求,另一方面满足稳定性最大化,或者目标函数值对输入变量的敏度最小化的要求。鲁棒设计优化中的设计变量是具有概率分布的随机变量,因此通过系统分析,所得到的响应目标也是具有某种概率分布

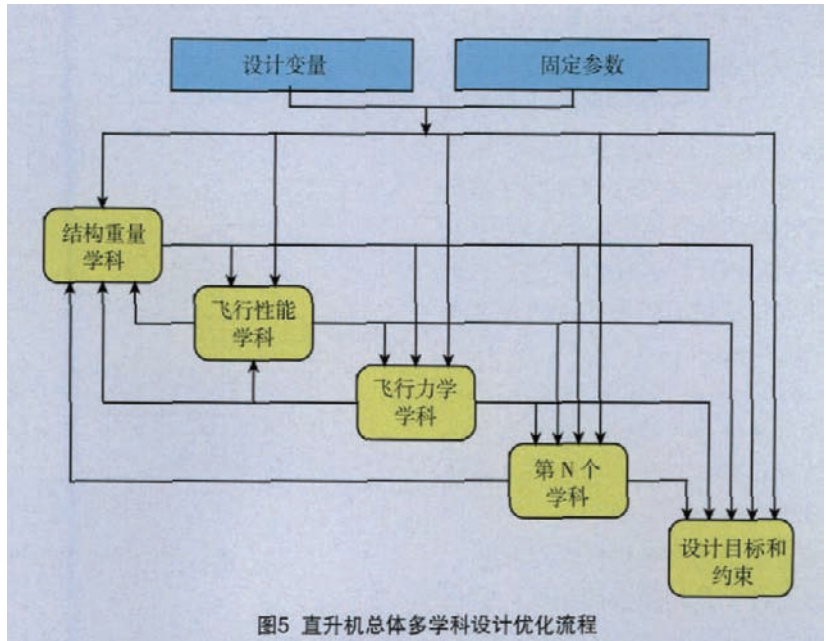


图5 直升机总体多学科设计优化流程

的随机变量,如图6所示。

在直升机总体设计中采用鲁棒设计优化方法可以分析不确定因素对总体设计方案的影响,通过优化设计,不但可以获得最优的总体方案,而且可以得到最稳定的,即受不确定因素影响最小的总体方案。

直升机总体鲁棒设计优化研究的主要内容有:

(1) 直升机总体不确定性因素分析,包括确定不确定性设计变量及其概率分布特征。

(2) 直升机总体鲁棒设计优化算法研究。针对直升机总体鲁棒设计

优化模型,发展具有收敛速度快、计算量小的优化求解算法。

## 直升机总体综合设计软件系统的发展

随着计算机辅助设计理论和方法的发展以及与优化设计方法的结合,使直升机总体设计从传统的工程设计过程逐步向自动化、集成化、智能化方向发展,出现了专门的直升机总体综合设计软件系统,成为实用的直升机总体综合设计分析平台。直升机综合设计软件系统能完成总体设计各项任务,确定直升机主要参数

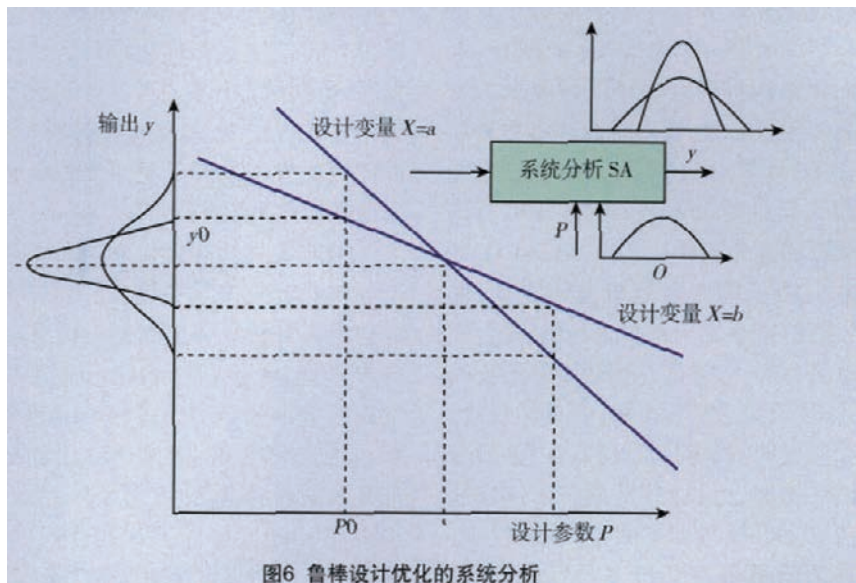


图6 鲁棒设计优化的系统分析

和尺寸,进行气动和总体布局设计,分析计算各项飞行性能和直升机成本等;同时还可以根据设计要求进行优化设计,以获得最优的总体方案。直升机总体综合设计软件系统通常还包括直升机旋翼桨叶翼型、发动机和总体参数等数据库,为直升机总体设计提供有借鉴作用的参考和可信的判据。

目前,国内外直升机总体综合设计软件系统正从传统的直升机总体参数优化软件系统发展到直升机总体多学科设计软件系统。

### 1 直升机总体参数优化软件系统

直升机总体参数优化软件系统通过建立直升机总体设计优化模型,把直升机总体设计问题转变为数学寻优问题,利用计算机自动完成总体参数的选择。采用直升机总体参数优化设计不但可以得到最优的总体设计方案,而且能缩短设计周期,提高设计效率,但由于只考虑飞行性能和重量的设计要求,没有考虑到总体参数对其他学科的影响,仅优化重量和旋翼等少数总体参数,没有进行直升机的气动和总体布局优化设计,其确定的总体设计方案较简单和粗糙,并且分析模型简单,得到的总体设计方案可信度不高。

目前,国外常用的直升机总体参数优化软件系统主要有波音直升机公司的 HESCOMP 和 VASCOMP,它们可以用来确定满足设计要求的所需发动机参数、直升机总体参数和尺寸等,计算和分析各分系统的重量和飞行性能,同时进行直升机总体参数的优化选择。其中, HESCOMP 专门用于常规直升机总体设计,而 VASCOMP 用于有翼直升机、复合式直升机以及垂直/短距起落飞行器(倾转旋翼、倾转机翼)的总体设计。乔治亚理工学院开发的 GTPDP 直升机总体综合设计软件系统可以快速估算直升机总体参数、尺寸和性能,它能够进行直升机飞行性能、机动

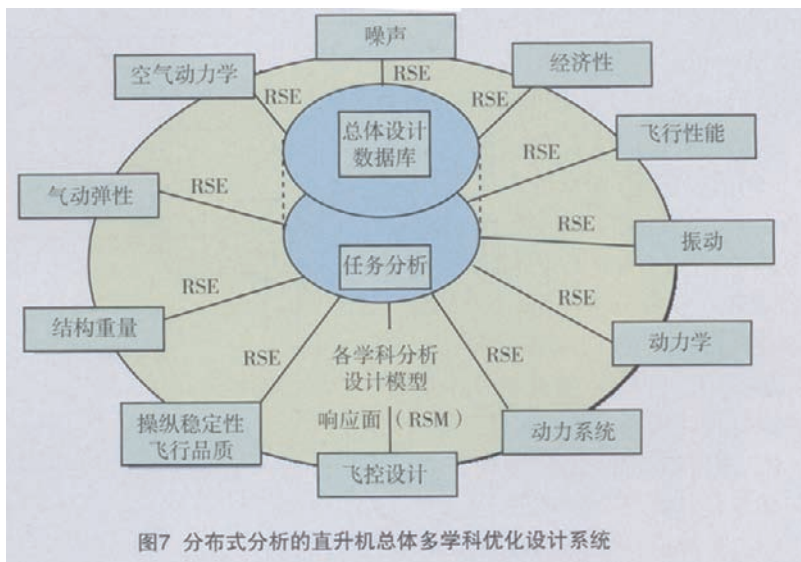


图7 分布式分析的直升机总体多学科优化设计系统

性、重量和成本等参数分析,同时可以进行总体参数的优化设计,并且包括常用的直升机旋翼桨叶翼型和发动机数据库, GTPDP 目前广泛应用于直升机总体工程设计和教学科研等。

国内南京航空航天大学直升机技术研究所自从 80 年代以来进行了大量直升机总体参数优化研究,编制了直升机总体参数优化软件系统,进行了总体参数单目标、多目标等研究,同时应用于直升机型号设计中,取得了较好的效果。

### 2 直升机总体多学科优化设计软件系统

随着直升机各学科分析模型、计算机分布式技术和优化设计方法的发展,特别是直升机总体多学科设计优化方法的成熟,出现了基于多学科设计优化方法的直升机总体综合优化设计软件系统。

2000 年乔治亚理工大学进行了基于分布式分析多学科设计优化体系结构的直升机总体多学科设计优化初步研究,通过利用响应面代理模型集成各个分布的学科精确分析模型,形成如图 7 所示的分布式分析的直升机总体多学科优化设计系统。2006 年 Khalid 进行了多学科设计优化在直升机初步设计中应用的研究,

通过集成用于直升机初步设计中的各学科计算机分析程序和设计工具,形成适合直升机初步设计的多学科设计优化软件系统。

国内南京航空航天大学直升机技术研究所进行了直升机总体多学科设计研究,提出了直升机总体多学科设计优化框架,利用 iSIGHT 集成软件平台,集成直升机飞行性能、重量、操纵稳定性和经济性分析程序,基于协同优化方法,建立起可以并行设计的初步直升机总体多学科设计优化软件系统。

### 结束语

随着直升机技术、计算机辅助设计技术以及工程优化设计方法的发展和成熟,直升机总体设计已从传统的面向性能设计转变为现代的面向可负担性和质量设计。通过建立总体综合评价体系,考虑全寿命周期费用,采用并行设计模式,使得直升机总体设计技术得到较大的提高,同时多学科设计优化方法和鲁棒优化设计方法在直升机总体设计中得到了广泛的应用,大大提升了直升机总体综合设计水平,并且随着直升机总体综合设计软件系统的发展,使得直升机总体工程设计拥有了良好的综合设计优化平台。(责编 侧卫)