

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.04.015

浅析民用飞机研制总体参数优化 Overall Parameter Optimization for Civil Aircraft Development

吴玲琳 李海涛 / WU Linglin LI Haitao

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

分析了在概念设计阶段民用飞机总体设计工作内容和 workflows, 并结合时下国外在用软件优缺点, 构思了民用飞机总体设计参数综合优化的技术方案, 包括优化设计架构、分析模型和优化算法等, 为形成具有自主知识产权的民机总体设计综合分析和优化程序打下基础。

关键词: 民机总体设计; 参数优化; 分析模型

中图分类号: V221⁺.6

文献标识码: A

OSID:



[Abstract] This article analyzes work content and work process of general design for civil aircraft during concept design phase. Combined with merits and drawbacks of foreign software used presently, we presented technical plan of general design parameters comprehensive optimization, including optimizing design architecture, analyzing model and optimizing arithmetic, which would be a foundation for forming civil aircraft general design combination analysis and optimization program with proprietary intellectual property rights.

[Keywords] the general design of civil aircraft; parameter optimization; analysis model

0 引言

民用飞机总体设计工作贯穿于整个飞机的全寿命周期中, 是民机研制程序的主干线。总体设计工作是将各专业技术集成到一起, 形成整体性能最优的设计方案。在概念定义阶段, 根据商载、航程、飞行性能及场域特性等有限指标和技术要求确定最优的最大起飞重量、推重比和翼载荷、机翼安装位置、机翼面积及展弦比、尾翼、总载油量、机身尺寸等至关重要的总体参数, 为后续设计工作确定准确的工作目标。

1 国内外总体参数优化程序发展现状

为了加快民机总体设计工作概念设计阶段的进度, 国内外对飞机总体参数优化展开了一系列研究, 形成了多个具有自身特色的飞机总体参数优化程序。

国内的航空主机研究所引进或开发了一些适于特定机型的飞机总体参数优化程序, 但在公开出版

的文献中很少见到详细的报告。原上海飞机设计研究所在 20 世纪 70 年代后期就开始研究民机总体参数优化技术, 并开发了相关计算机程序, 对于我国飞机总体综合优化技术的发展起到了促进作用。国内一些具有航空特色的高校也对飞机总体参数优化开展过一些研究, 譬如南京航空航天大学针对轻型飞机开发了一个带图形显示的软件^[1], 其中图形部分是利用 OpenGL 图形库自己开发的一套系统, 并将软件应用于 AD 系列轻型飞机总体参数设计; 南京航空航天大学研究过计算机辅助概念设计软件, 该软件具有一定的总体参数优化功能, 集成了飞机主要参数初步估算模块、气动分析模块、重量计算模块、推力系统模块、性能分析模块以及飞机三维外形生成模块等。北京航空航天大学开发过一个称之为 EDRIPS 的设计环境^[2], 在这个设计环境中, 设计人员可通过用户界面, 进行总体参数的初步确定。西北工业大学在他们编写的飞机总体设计教材基础上, 开发了辅助课程教学的总体参数评估软件^[3]。

在民机研制总体参数优化方面,国内技术研究还不够深入,还没有成熟的研究软件。

国外在开发民机总体设计分析和优化软件方面已经较为成熟,并形成了商用软件。以美国航空航天局(NASA)阿姆斯研究中心为首开发了 ACSYNT (AirCRAFT SYNThesis)^[4-5],该系统自 20 世纪 70 年代开始研发,经过多年的发展,目前已具有较强大的功能;ACSYNT 可以通过几何建模界面,快速地构建飞机几何模型,然后用气动分析模块、推力分析模块和性能分析模块,对设计方案进行分析和评估,现已经被成功地应用于民用运输机和战斗机的总体设计。Roskam 教授在其系列教材基础上,开发了面向飞机概念设计的 AAA 软件(Advanced Aircraft Analysis,简称 AAA)^[6];该软件可以快速地实现对设计方案进行初期的重量估算、气动特性初步计算、性能初步分析和操稳初步分析,但该软件没有参数优化功能。美国的 AVID 公司曾开发过一个适用于无人飞行器的总体初步设计系统^[7-8]。美国 NASA 兰利研究中心在 20 世纪 80 年代曾开发出面向飞机总体参数分析和优化系统的 FLOPS (Flight Optimization System,以下简称 FLOPS),它包括重量分析、气动分析、推进系统分析、航线性能分析、起飞着陆性能分析、噪声评估和成本分析等模块,具有总体参数优化功能,该系统一直在持续改进和完善中,已被工业界和飞机设计研究者所应用,但该软件的应用范围有限,主要在美国和欧洲的一些国家可以应用。Raymer 在其教材 *Aircraft Design: A Conceptual Approach* 基础上,开发了一个面向飞机总体初步设计的快速设计系统 RDS 软件^[9],该软件主要用于飞机设计教学,但参数优化的功能较弱。PIANO (Project Interactive Analysis and Optimisation,以下简称 PIANO)软件是一款商用飞机总体初步方案分析和优化软件,该软件具有良好的用户界面,计算分析功能较强,具有一定的参数优化功能,能对机翼主要参数进行优化,但没有操稳分析功能。

2 民用飞机研制总体参数优化

飞机总体设计过程需要进行大量循环和迭代设计,尤其在初步方案设计阶段,信息量较少、各专业学科之间耦合关系高度复杂,设计迭代更加密集。总体参数设计优化技术是通过集成各学科的分析模型,将各种设计要求提炼为约束条件,定义一个或多个优化目标,应用优化算法自动寻找出最佳总体参

数。参数优化基本原理^[10]如图 1 所示。

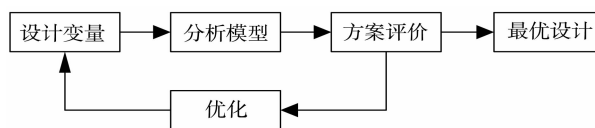


图 1 总体参数优化基本原理

2.1 总体参数优化的意义

总体参数的选择有两种不同的方法,一种是用计算机进行参数优化,为此必须采用参数优化程序;第二种是经验设计法(统计法),即凭借已有飞机的工程经验,从统计中得到各参数之间的统计关系,据此确定新飞机的各项参数。

总体方案设计涵盖众多学科,要满足多方面的设计要求和目标,每个设计参数的变化都会影响多个性能指标,仅靠设计人员的经验或人工调整参数的办法,因其参数多、计算量大,计算周期长,设计过程强烈非线性、非唯一性,分析过程不可逆性等特点,很难获得最佳总体设计参数。

随着民机研制进程的快速发展及总体设计参数优化方法的日趋完善,程序化发展是趋势,国外各主制造商均有自己的优化工具。应用总体参数优化程序化的优势主要有:

- 1) 可以快速进行迭代设计,缩短总体参数优化时间,对方案的分析比较完整和精确,可以达到所需的详尽程度;
- 2) 优化得到的是“最优设计”,即在当前技术水平上满足要求的诸方案中最好的一个;
- 3) 当设计任务要求在某方面性能超过一般已有飞机的情况时,用传统的人工设计方法,已有的可供参考的经验较少,但使用参数优化程序仍然可以很快确定飞机的总体规模,可以快速地分析出不同设计要求和先进技术(如先进气动技术、先进推进技术、先进材料和结构技术)应用的影响。

因此,总体参数优化技术是民机研制总体方案设计的必备关键技术。

在实际的飞机设计中,一般会结合使用上述两种方法,一方面利用计算机的强大性能,另一方面可使用设计者的判断并充分参考一切可以借鉴的经验。

2.2 总体参数优化原则

根据概念设计阶段总体设计工作内容和工作流程,考虑传统飞机设计技术手段的缺陷和现有商业软件的不足之处,取长补短,制定了总体参数优化方

法,总体参数优化程序建立流程如图 2 所示。

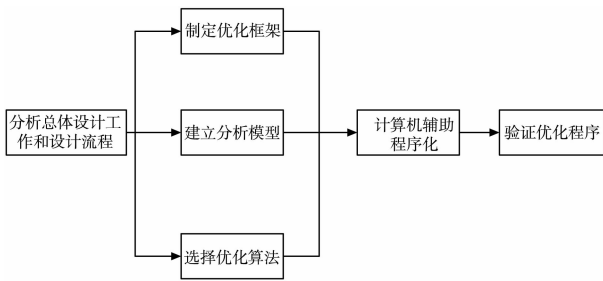


图 2 总体参数优化程序建立流程

2.3 联合概念定义阶段总体设计工作内容

飞机联合概念定义阶段总体设计工作过程可概括为三个环节(初步设计方案的形成、方案分析和方案优化),如图 3 所示。

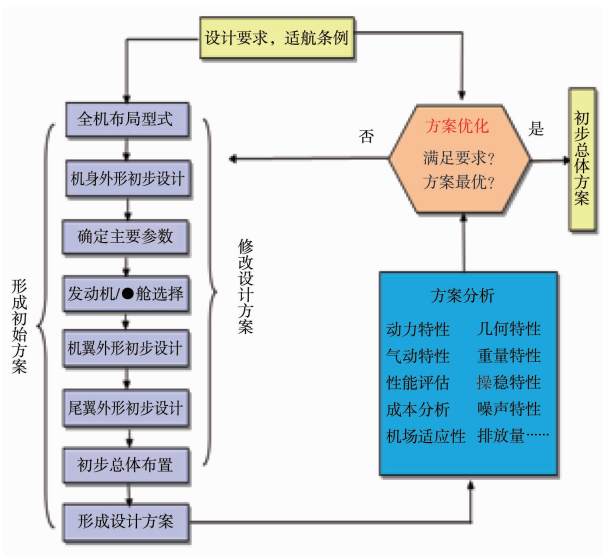


图 3 飞机概念定义阶段总体设计工作过程

飞机联合概念定义设计阶段是整个飞机设计过程的初始阶段,其任务主要是根据飞机的设计要求,对所设计的飞机进行全面的构思,形成飞机基本总体技术方案。主要内容包括^[10]:

- 1) 初步选定飞机的构型和气动布局;
- 2) 初步选择飞机的主要参数;
- 3) 选定发动机和主要的机载设备;
- 4) 初步选择各部件的主要几何参数;
- 5) 绘制飞机的三面草图;
- 6) 初步考虑飞机的总体布置方案;
- 7) 初步估算性能,检查是否符合飞机设计要求给定的性能指标,然后修改整理所拟定的初步方案。

总体设计工作内容输入输出关系如图 4 所示。

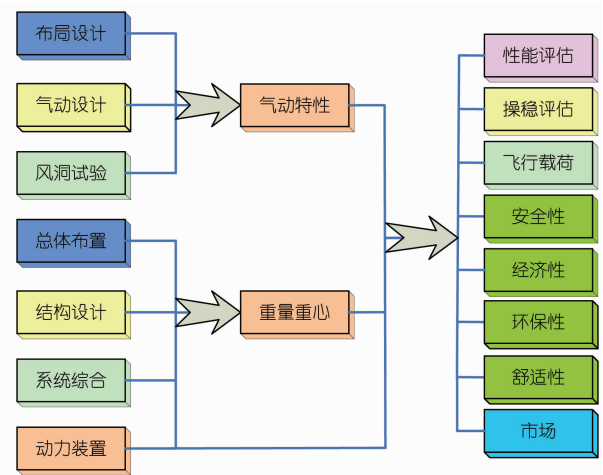


图 4 总体设计主要工作输入输出关系

2.4 总体参数优化框架

目前,国内使用的国外商业优化软件主要有 AAA、PIANO、Pacelab APD 等软件,在使用过程中发现了一些不足和限制,基于这些不足和限制,经过综合分析并取长补短,研究者制定了总体参数优化的框架。国外主要的总体参数优化商业软件优缺点见表 1。

表 1 主要的商业总体参数优化软件对比

功能	软件			
	AAA	PIANO	Pacelab APD	本文
几何模块	√	√	√	√
推进模块	√	√	√	√
重量估算模块	√	√	√	√
分析模块	重心分析模块	√	×	√
	气动分析模块	√	√	√
	性能分析模块	√	√	√
操纵分析模块	√	×	×	√
DOC 模块	√	√	×	√
参数分析优化技术	设计参数敏感性分析	×	√	√
	优化算法库	×	√	√
	优化过程和结果可视化	×	×	×
软件架构	用户界面的友好性	√	√	√
	代码的开放与修改	×	×	√
	模块化结构	√	√	√
	无用户数限制	×	×	×

结合现有商业软件的优缺点,基于系统工程的理念统筹全局,建立各专业分析模型并集成;采用统一的数据库,保证各专业设计过程中数据保持一致,实现了数据协同;所有工程师采用同一平台进行计算分析,确保了过程协同;采用模块化设计,既可以进行整机综合分析,也可以独立进行分析;同时,整个架构保持开放式,可以根据不同需求进行扩展。利用 ISIGHT 平台提供的设计优化工具,包括优化算法库、实验设计方法、敏感分析、代理模型等;同时也应充分利用该平台前、后处理功能,使本系统具有良好的用户界面。优化设计架构如图 5 所示。

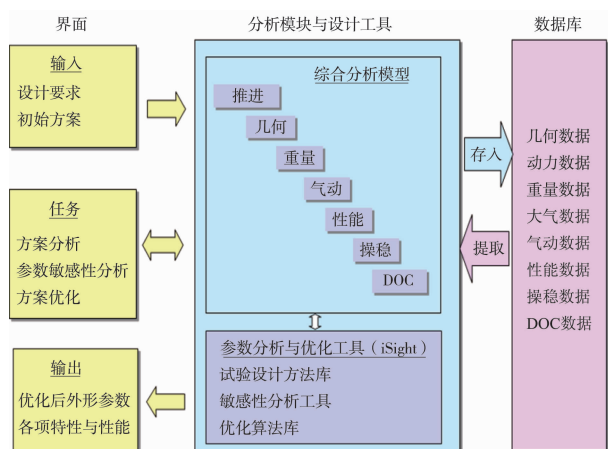


图 5 优化设计架构

2.5 分析模型

总体参数分析优化由基本性能分析和操稳特性分析两部分组成,包括几何模块、气动模块、重量模块、推进模块、性能分析模型、操稳分析模块、经济性分析模块等。各模块主要功能如下:

- 1) 推进模块: 给出发动机总体参数和外部特性;
- 2) 几何模块: 计算可容最大燃油量的体积和各部件的外露面积几何信息;
- 3) 气动模块: 估算大型客机的高速气动特性和低速气动特性,计算纵向、横侧向气动导数,在气动模型中考虑翼尖装置对气动特性的影响;
- 4) 重量模块: 估算设计方案的各部件重量、制造空机重量、使用空重、零燃油重量、最大起飞重量等重量特性,预测全机重心及变化范围;
- 5) 性能分析模型: 计算起降性能、爬升性能、商载航程等;

6) 操稳分析模块: 确定静稳定裕度,评估起飞、巡航、着陆各阶段的操稳特性;

7) 经济性分析模块: 根据设计方案提供的重量、商载、性能等数据,计算该设计方案飞机的直接运营成本。

各分析模型采用经验数据和经验公式组成估算模型,对于所选择的计算模型均采用现役飞机进行分析和验证,并结合工程经验进行修正,确保分析模型误差最小。

几何模型是最重要的基础分析模型,为后续模型提供计算所需的各类几何数据;推进系统分析模型主要有三部分组成,即发动机外部特性(包括推力特性和油耗特性)、发动机主要尺寸(长度、最大直径等)以及发动机裸机重量等,外特性主要提供给性能和操稳模型使用,尺寸和重量数据分别供几何和重量模型使用;性能和操稳以推进、气动和重量等核心模型分析的结果为基础,设计目标和约束主要来自于这两个模型的分析结果。各模型间数据传递关系如图 6 所示。

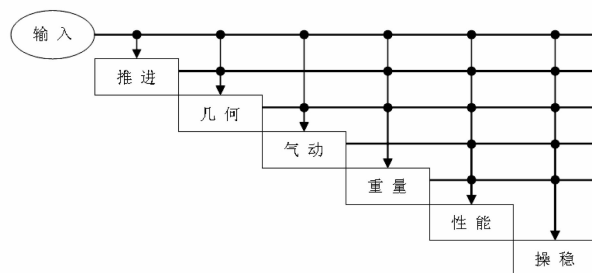


图 6 各模型间数据传递关系

2.6 优化算法

ISIGHT 平台是一个通用的工程系统设计优化环境,它提供了强大的用户界面,通过图形化工作界面,用户可以进行产品设计的过程集成、参数分析、优化等设计工作。

优化计算方法主要有数值型和探索型两类,数值型算法主要有外点惩罚函数法、修正可行方向法、序列线性规划、广义简约梯度法、序列二次规划法、逐次逼近法等;探索型算法主要有遗传算法、批处理遗传算法、模拟退火算法等。

通过对优化算法的研究,采用混合搜索策略最优,先用探索型(遗传算法)搜索到全局最优解附近,再用数值型(序列二次规划算法)快速地搜索到精确的全局最优解,如图 7 所示。采用多步优化策

略,一方面可以加快收敛,缩短计算时间;另一方面,可以防止陷入局部最优解,获得全局最优解,即设计要求范围内的最优设计方案。

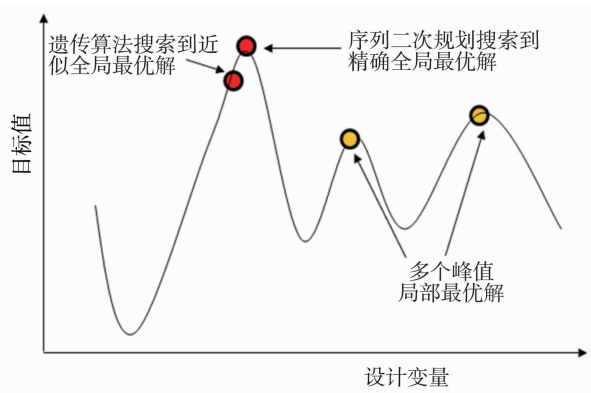


图7 混合型搜索策略

2.7 计算机辅助设计程序化

整个总体参数分析程序由基本性能分析和操稳特性分析两部分程序组成,各部分程序的组成关系如图8所示。

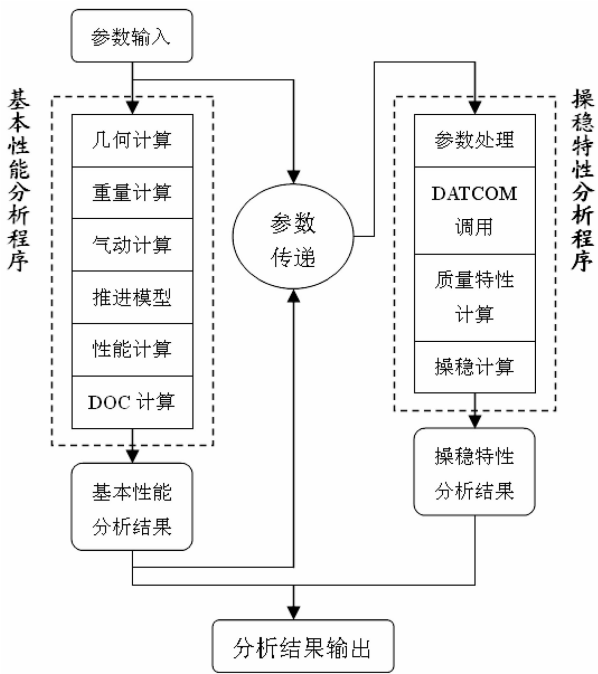


图8 总体参数分析程序的组成

在总体参数分析程序的基础上,对分析结果进行解析,指定优化目标 and 设计约束;对输入参数进行解析,指定设计变量;结合一定的优化方法,就可以实现总体参数的优化设计。整个优化设计的过程如图9所示。

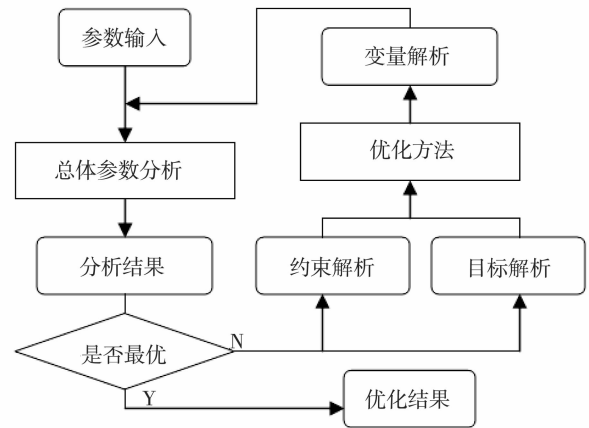


图9 总体参数优化过程

通过对比分析,采用MATLAB(Matrix Laboratory,以下简称MATLAB)进行程序化。MATLAB具有科学计算能力强、语言简单易用、绘图功能方便、数据库功能便捷、能与文字处理软件无缝链接等优点,已成为计算机辅助设计和分析、算法研究和应用开发的基本工具。MATLAB主要程序采用MATLAB m-file编写,并编译为EXE格式的可执行文件;采用ISIGHT软件对EXE文件实现集成,在ISIGHT软件环境下可以实现集成分析和优化。

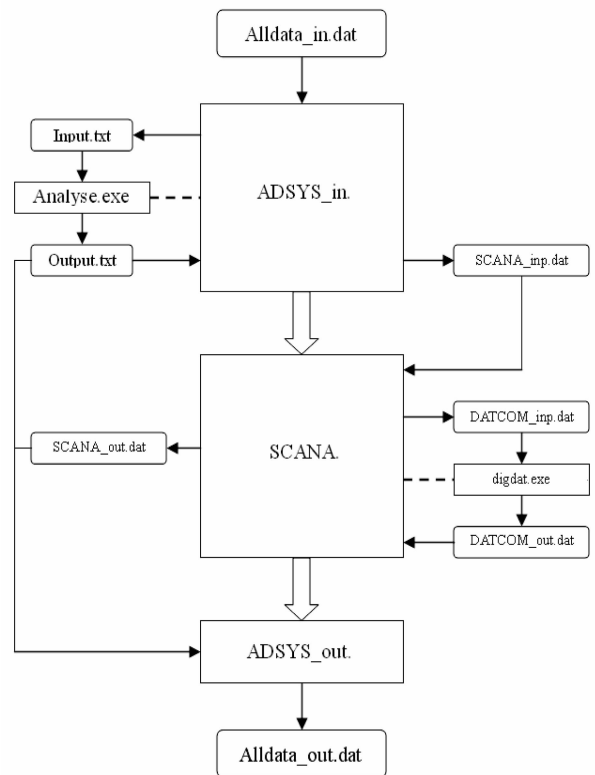


图10 各部分程序组成关系

总体参数分析程序一般包括 ADSYS_in、SCANA和 ADSYS_out 三个主要的流程控制和分析程序,还包括 Analyse 和 Digdat 两个回调程序。各部分程序组成关系如图 10 所示。

程序运行的主流程顺序为: ADSYS_in → SCANA → ADSYS_out。

3 总结与展望

本文建立了总体参数综合分析和优化计算的技术方案,包括分析模型和优化策略,为建立具有自主知识产权优化工具、突破国外技术封锁打下基础,为民机系列化发展和新型号研制积累了总体参数综合分析和优化的经验,以期能进一步提高国内民机研制的技术抓总能力和集成能力。

参考文献:

- [1] 金海波. 飞机概念设计中的虚拟设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2000.
- [2] LIU H, WU Z. Environment of design requirements input and preliminary sizing for aircraft conceptual design[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2003,16(1): 15-21.
- [3] 李为吉. 现代飞机总体综合设计[M]. 西安:西北工业大学出版社,2001.
- [4] JAYARAM S, MYKLEBUST A, GELHAUSEN P. ACSYNT-A standards-based system for parametric, computer aided conceptual design of aircraft[C] //Aerospace Design Conference, Washington, D. C. :AIAA,1992:1268.
- [5] MOORE M D, HUYNH L C, WATERS M H, et al. Economic optimization of an advanced subsonic transport[C]//1997 World Aviation Congress, [S.l.]:AIAA, 1997.
- [6] ROSKAM J. Advanced aircraft analysis module description [R]. Kansas: DAR Corporation, 2007.
- [7] VANDERPLAATS G N. Automated optimization techniques for aircraft synthesis[C]//Aircraft System and Technology Meeting, [S.l.]:AIAA.
- [8] KO A, OHANIAN O J, GELHAUSEN P. Ducted fan UAV modeling and simulation in preliminary design[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, South Carolina: AIAA.
- [9] RAYMER D P. RDS: a PC-based aircraft design, sizing, and performance system[C]//Guidance, Navigation and Control Conference, Washington, D. C. :AIAA.
- [10] 程不时. 飞机设计手册第 5 册:民用飞机总体设计[M]. 北京:航空工业出版社,2005.

作者简介

吴玲琳 女,本科,工程师。主要研究方向:项目技术管理、总体设计。E-mail: wulinglin@comac.intra

李海涛 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:项目技术管理、总体设计。E-mail: lihaitao@comac.intra