

用适应性理念指导短程客机概念设计

余雄庆 欧阳星 王宇 邓枫 张帅

(南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京, 210016)

摘要:提出一种适应性设计理念,以应对飞机概念设计中用户需求、竞争环境、先进技术成熟度等不确定性因素。其基本思想是在飞机概念设计中应事先为后继机型应用新技术预留发展空间,以便后继机型能适应新的用户需求和竞争环境。根据适应性设计的理念,对一种短程客机的基本机型及其后继机型进行了概念设计。短程客机基本型采用尾吊布局型式,目的是为后继机型应用新型发动机和先进机翼气动技术预留发展空间。基本机型 N1 配装齿轮传动涡扇发动机和超临界后掠翼;第二代机型 N2-A 和 N2-B 分别采用开式转子发动机或小后掠自然层流机翼技术;第三代机型 N3 同时采用开式转子发动机和小后掠自然层流机翼技术。基本型与后继机型自然过渡,形成飞机族,具有很好的继承性。对飞机族的评估表明,两种第二代机型的油耗比基本型分别低 17% 和 7%;第三代机型的油耗比基本型低 26%。整个客机系列具有很好的可持续发展能力。

关键词:飞机;概念设计;适应性;开式转子发动机;自然层流

中图分类号:V221 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)03-0349-06

Adaptability Inspired Conceptual Design of Short-Haul Civil Jets

Yu Xiongqing, Ouyang Xing, Wang Yu, Deng Feng, Zhang Shuai

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The idea of design for adaptability is presented to cope with the uncertainties in aircraft conceptual design, such as custom requirements, competitive market and technical maturity. The meaning of adaptability in aircraft conceptual design is that when beginning to design the first version of aircraft, the possibility of the advanced technology applications should be considered for its successor to meet future requirements and competitive market. The conceptual designs of a short-haul civil jet and its successors are demonstrated using the idea of design for adaptability. The configuration for first version of the short-haul civil jet is featured with rear-fuselage-mounted engines, and its purpose is to pre-set the room for advanced propulsion and wing technology applications for the successors, i. e. the second and the third versions. The first version N1 adopts the current mature technology (geared turbofan engine and supercritical wing). The second version N2-A and N2-B adopt open rotor engines and less swept wing with natural laminar flow technology, respectively. The third version N3 adopts open rotor engine and natural laminar flow wing simultaneously. The successors (N2-A, N2-B and N3) can be derived from the first version N1 smoothly, and a family of short-haul civil jets has an excellent inheritance. Compared with the fuel consumption of the version N1, that of the version N2-A and N2-B can be reduced by 17% and 7%, respectively, and that of version N3 can be reduced by 26%. The family of short-haul civil jets presents good sustainability.

Key words: aircraft; conceptual design; adaptability; open rotor engine; natural laminar flow

基金项目:中央高校基本科研业务费专项科研(NJ20130001)资助项目;国防基础科研计划资助项目。

收稿日期:2013-12-01;**修订日期:**2014-04-02

作者简介:余雄庆,男,1965年生,博士,教授,博士生导师。主要从事飞机总体设计和多学科设计优化的科研和教学工作。1997~1998年为美国圣母大学(Univ. of Notre Dame)访问学者;2004年9月~12月为美国密苏里大学(Univ. of Missouri-Rolla)访问教授。已发表论文70余篇。

通信作者:余雄庆, E-mail: yxq@nuaa.edu.cn.

概念设计是飞机研制的早期阶段,对飞机特性具有全局性影响的重大决策,包括总体布局方案、先进技术应用方案、总体参数等,主要是在这个阶段做出的^[1]。

客机从立项研制到退出服役可能长达数十年,例如 A320 飞机 1984 年正式立项,1987 年首飞,1989 年开始交付使用,预计要到 2020~2024 年关闭生产线,最后一架飞机预计到 2040 年左右才退出运营^[2]。而其后继机型 A320-neo 将进一步延长该机型的服役时间。客机概念设计面临的最大挑战是无法精确预测未来可能发生的情况。例如,未来的用户需求和运营环境会发生变化;先进技术的成熟时间难以精确预测;适航条例可能出现新标准;可能会出现新的竞争机型。在这些不确定性因素的情况下,进行概念设计是一个难题。另一方面,客机研制投入巨大,在客机概念设计中的决策失误会导致投资的重大损失。因此,在概念设计中应考虑未来可能发生的情景,尽量减小风险。

应对上述挑战的一个有效办法是采用适应性设计策略^[3]。纵观客机发展历史,成功的机型都具有应用先进技术的潜力和适应市场需求变化的能力。成功的飞机,在不同的时间段,通过采用新技术(例如,更换新的动力装置和机载系统,采用先进的机翼等),对基本型号进行改型,开发出具有竞争力的后继机型,以适应不同时间段的市场需求。因此,只有具有很好适应性的飞机,才能具有长久的生命力。

飞机的适应性是指飞机适应新环境的能力,它包括两个方面:一是飞机本身对新技术应用的适应性;二是飞机对市场需求变化的适应性。前者与概念设计密切相关,后者主要取决于市场定位。本文主要研究飞机对新技术应用的适应性问题。以一种设想的短程客机为例,探讨在概念设计中如何考虑先进技术应用适应性的问题。

1 设想的机型

中国已进入大众航空时代,自费旅客数量的比例将不断增加。由于自费旅客更注重机票价格,因此短程客机的设计必须强调的运营经济性。另一方面,随着我国实施西部大开发战略的进一步深入,西部地区对航空运输的需求可能会大大增加,因此短程客机应适合在西部地区运营(适于高原机场)。设想的短程客机的市场定位是为低成本航空公司提供一种运营成本低、适于西部地区的机型。该机型在满足安全性的前提下,突出经济性,注重

运营的适应性,兼顾舒适性和环保性。

该短程客机主要用于连接国内地区枢纽、旅游热点和经济活跃的中等城市。与目前单通道干线客机相比,巡航速度相当(巡航 Ma 数为 0.78),客座数较少(二级客舱布置可容纳 115 人),航程较短但能满足国内绝大多数航线要求(设计航程 2 200 km),起飞场长和着陆场长较短(起飞场长小于 1 500m,着陆场长小于 1 500 m)。

2 设计理念

2.1 适应性设计理念

适应性的概念来自生物进化论。生物只有适应环境才能够生存下去。生物通过基因重组和变异,不断适应环境,从而使得生物具有适应性。类似地,客机要在激烈的民机市场竞争环境中长期保持竞争力,应该具有适应性。飞机的适应性可通过新技术应用,改变飞机特性来实现。

适应性设计的基本思想是:在概念设计中应事先为未来新技术在客机中的应用预留发展空间,在新技术成熟之后,能及时地采用已成熟的新技术,快速开发出后继机型,提升客机的经济性、环保性和航线适应性,以适应新的市场竞争环境,实现可持续发展的目标。

民机的先进技术一般分为气动、推进、材料和结构、系统技术几个方面^[4-5]。在概念设计阶段,首先要考虑先进推进技术和先进气动技术应用的适应性。因为这两项新技术应用对飞机总体布局方案有重大影响。根据对客机先进推进技术和先进气动技术的考察,认为开式转子发动机和自然层流机翼有可能应用于未来的短程客机。

2.2 拟采用的未来先进技术

(1) 开式转子发动机

开式转子发动机又被称为无涵道风扇发动机或桨扇发动机,它可兼具涡桨发动机耗油率低与涡扇发动机适于高速飞行的特点,在经济性和环保性方面具有突出优势。开式转子发动机一般采用二级对转桨扇型式(见图 1),以提高发动机的推进效率。与现有涡扇发动机相比,开式转子发动机具有显著降低油耗和排放量的优点^[5-6]。由于开式转子发动机显著提高了涵道比(可达 35~45),可使推进效率大为提高,明显降低油耗,可比现有涡扇发动机的油耗低 30%。另一方面,由于燃油效率高,氮氧化物和二氧化碳排放量大大降低。开式转子发动机的主要缺点是降低噪声的难度大。不过发动机厂商认为,先进开式转子发动机的噪声水平仍

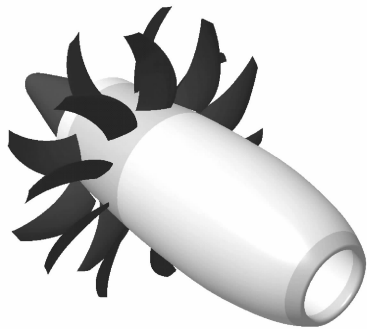


图1 开式转子发动机模型

Fig.1 A model of open rotor engine

然能比目前的涡扇发动机的噪声水平低 10 dB 左右。

(2) 自然层流机翼

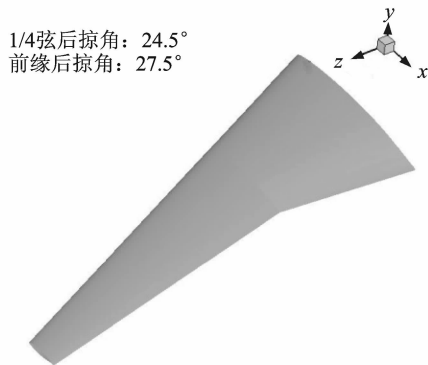
在先进气动技术方面,减阻效果明显且有可能应用的技术是机翼自然层流技术。最近,自然层流机翼技术在小型公务机 Honda Jet 中获得了应用,有效地降低了机翼阻力^[7]。Honda Jet 的机翼构形采用直机翼,最大飞行速度不超过马赫数 0.7。

对于本文设想的短程客机,若要保证巡航马赫数 0.78,常规后掠翼机翼无法达到保持自然层流的要求。这是因为:为了消除机翼波阻,机翼需有一定后掠角(通常在 1/4 弦处后掠角为 $24\sim 25^\circ$);另一方面为了使机翼表面保持尽量多的层流,机翼前缘后掠角要尽量小(不超过 20°)。对于后掠翼构形来说,由于机翼存在梯形比,前缘后掠角会大于 1/4 弦处后掠角,因此常规后掠翼机翼无法同时满足消除波阻(1/4 弦后掠角大于 24°)和保持层流(前缘后掠角小于 20°)的要求。

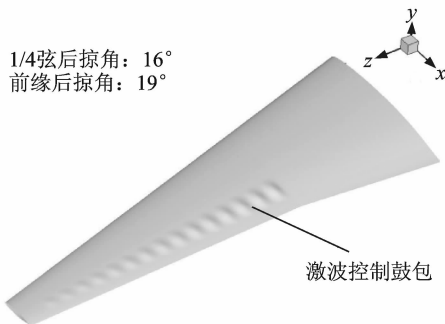
克服上述矛盾的一个技术是采用激波控制技术来减小机翼后掠角^[8]。这种气动技术的思路是:通过三维激波控制鼓包来限制小后掠机翼波阻的发展,推迟阻力发散的出现,从而提高阻力发散马赫数,使高亚声速机翼后掠角的减少成为可能。

数值计算表明^[9],在巡航马赫数 0.78 的条件下,采用三维鼓包串可以将机翼 1/4 弦后掠角从 24.5° 减至 16° (见图 2),在同样的设计升力系数条件下,带激波控制鼓包的小后掠角机翼不会导致波阻增加,具有与常规后掠翼同样的升阻比。也就是说三维鼓包串具有将较大后掠角机翼解锁成小后掠角机翼的潜力,从而给自然层流机翼的设计创造了条件。

这种技术可称之为基于激波控制鼓包的小后掠自然层流机翼技术,与常规后掠翼相比,其优点



(a) 常规后掠机翼



(b) 带激波控制鼓包的小后掠角机翼

图2 两种机翼外形对比

Fig.2 Comparisons of two wing configurations

是:①有利于在马赫数 0.78 左右实现自然层流;②减轻机翼结构重量;③升力线斜率增大。

3 总体布局方案

按照第 2 节中适应性设计理念和拟采用先进技术,短程客机总体布局设计的指导思想是要为开式转子发动机和自然层流机翼的应用预留发展空间。

客机总体布局一般分为机翼吊挂发动机(翼吊)和机身尾部吊挂发动机(尾吊)两种典型方式。从客机的发动机布局演变过程来看,干线客机(中型和大型客机)一般倾向于采用翼吊布局,70 座以下的支线涡扇客机倾向于采用尾吊布局。

对于 115 座级的短程客机,如果单从目前的技术水平来看,可选用的先进发动机为高涵道比涡扇发动机(包括齿轮传动涡扇发动机),可采用的机翼气动技术为常规超临界后掠翼,采用翼吊布局更有利一些。但从先进技术应用适应性的角度来看,尾吊布局既可安装目前已成熟的先进高涵道比发动机,同时也有利于开式转子发动机的安装,因此尾吊布局使得先进发动机安装具有更大的灵活性。另一方面,尾吊布局使机翼“干净”,更有利于自然

层流机翼技术的应用,更换机翼也不会影响发动机安装。因此,按照适应性设计理念,短程客机总体布局型式采用发动机尾吊布局。

短程客机总体布局型式的发展规划阐述如下。根据目前的发动机技术和气动技术,短程客机的基本机型采用目前已成熟的先进齿轮传动涡扇发动机,机翼采用常规超临界后掠翼,下单翼布局;考虑到发动机布局采用了尾吊布局,尾翼布局采用T形平尾布局;起落架采用前三点布局,主起落架安装在机翼上。短程客机的基本机型命名为N1机型,外形见图3(a)。由于基本机型所应用的发动机和气动技术成熟,技术风险小。基本机型投入使用之后,若开式转子发动机技术成熟,发动机可更换为开式转子发动机,发展为第二代机型N2-A型,见图3(b);若基于激波控制鼓包的小后掠自然层流机翼技术成熟,机翼可更换为自然层流机翼,发展成另一种第二代机型N2-B型,见图3(c);若开式转子发动机和基于激波控制鼓包的小后掠自然层流机翼技术均成熟,那么同时采用开式转子发动机和自然层流机翼技术,可发展为第三代机型N3型,见图3(d)。

从上述短程客机总体布局规划中看出,在短程客机发展过程中,基本机型采用已成熟的技术,风险小,而其后继机型N2型和N3型具有明显创新性,但目前技术还不成熟,风险大,只能作为后继机型。在整个机型发展过程中,基本机型与后继机型自然过渡,既体现了机型之间的继承性,又可大大

减少创新机型N2和N3型号研制成本和技术风险。

4 客舱布置与总体参数设计

根据市场定位,要求客舱舒适性应与目前运营的干线飞机相当。基本机型客舱的标准布置形式是二级布置,载客人数为115人,配置有3个厨房和3个盥洗间,如图4所示。客舱前部有2个厨房和1个盥洗间,客舱后部有2个盥洗间。一级舱布置有2排(每排4座)的座椅,载客8人,排距为914 mm(36英寸)。经济舱布置每排5座的座椅,共有21.5排,载客107人,排距812.8 mm(32英寸)。在应急出口处排距为965.2 mm(38英寸)。经济舱过道宽度483 mm(19英寸)。

总体参数设计分为3个阶段。第一阶段是初始设计阶段,首先根据经验公式^[10]估算出所需的翼载和推重比,然后确定出初始的机翼外形参数和尾翼参数。在第二阶段中,应用客机总体综合分析和优化程序系统^[11],对机翼外形参数进行优化。该程序系统包括几何、重量、气动、动力、性能和操稳等专业的工程算法模块^[12]。为了使该程序系统能适用于配装开式转子发动机的客机,专门开发了面向客机总体设计的开式转子发动分析模型^[13]。为了能评估客机的污染气体排放量,专门开发了污染气体排放量估算模块^[14-15]。通过总体参数优化设计,确定出初步的机翼参数和发动机参数,然后通过操稳特性评估,确定出尾翼参数。第三阶段采

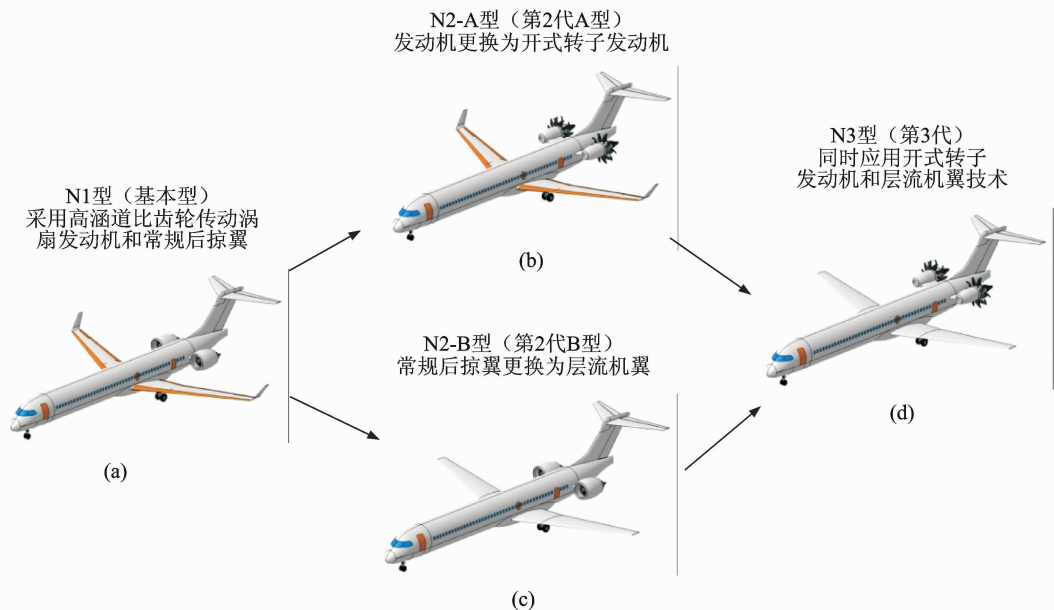


图3 短程客机总体布局型式的发展规划

Fig. 3 Roadmap of configuration evolution for the short-haul civil jets

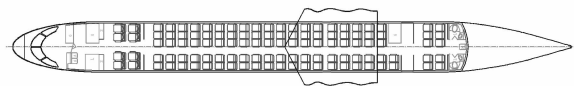


图4 典型的二级客舱布置方案

Fig. 4 Typical cabin layout for dual class

用更为详细的分析方法,气动计算方法为全速势方程数值方法和附面层理论,结构重量采用简化的机翼结构有限元模型,通过机翼气动结构多学科设计优化方法^[16],确定出最终的机翼参数。

根据客舱布置和总体参数优化设计结果,最后确定出短程客机的总体参数。基本机型 N1 主要总体参数见表 1。N2-A 型的机身、机翼和尾翼参数与 N1 形完全一致,而发动机换为开式转子发动机,每台发动机海平面静推力为 110 kN;N2-B 型的机翼为小后掠层流机翼,其几何参数见表 2,发动机与 N1 机型一样;N3 型的机身、机翼和尾翼参数与 N2-B 一致,发动机与 N2-A 型的发动机相同。

表 1 基本型的主要几何参数

Tab. 1 Primary parameters of the basic version

总体参数	数值
机身长/m	36.98
机身宽/m	3.344
机身高/m	3.067
机翼参考面积/m ²	95.75
机翼展弦比	9.9
机翼稍根比	0.22
机翼 1/4 弦后掠角/(°)	24.5
平尾面积/m ²	24.0
垂尾面积/m ²	18.76
单台发动机海平面静推力/kN	89.0

表 2 层流机翼的主要参数

Tab. 2 Key parameters of the laminar wing

机翼参数	数值
参考面积/m ²	95.75
展弦比	9.8
稍根比	0.25
1/4 弦后掠角/(°)	16.1

5 短程客机的评估

应用客机总体综合分析程序系统^[11-12]对基本

机型和后继机型的重量特性、巡航升阻比、飞行性能、燃油经济性和排放量进行了评估。评估结果见表 3。对比表 3 中的各项数据,可以获得以下结论:

(1)基本机型 N1 能满足航程、起降场长等基本性能要求。

(2)与基本机型相比,尽管 N2-A 机型(采用开式转子发动机)的使用空重有所增加,但由于开式转子发动机在耗油率方面的明显优势,经济性得到了很大的提高,油耗减少 17%左右,排放量降低 20%。另一方面,由于所需任务燃油少,在同样航程情况下最大起飞重量较轻,且开式转子发动机低速时推力大,使得起飞性能大大提高,起飞场长可缩短 19.1%,易于满足高原机场的起飞要求。

(3)与基本型相比,N2-B 机型(机翼采用小后掠层流机翼)的升阻比明显提高,客机的经济性得到有效改善,油耗减少 7%左右,排放量减少 8.7%。另外,由于小后掠层流机翼具有更大的升力线斜率,起飞场长可缩短 7.8%。

(4)由于 N3 机型同时采用了开式转子发动机和小后掠层流机翼两种新技术,节油减排的优势尤为明显。与基本型相比,N3 机型的油耗减少 26.3%,排放量减少 30.7%,起飞场长可缩短 25.7%。

表 3 短程客机各机型特性评估的结果

Tab. 3 Evaluation results of performance for the family of short-haul civil jets

飞机特性	N1	N2-A	N2-B	N3
使用空质量/kg	28 556	29 262	28 224	28 701
设计商载/kg	11 590	11 590	11 590	11 590
最大起飞质量/kg	46 401	46 042	45 444	44 976
任务燃油/kg	4 455	3 690	4 130	3 285
设计燃油/kg	6 255	5 190	5 630	4 685
巡航升阻比	16.63	16.30	18.22	17.88
设计航程/km	2 200	2 200	2 200	2 200
起飞场长/m	1 475	1 188	1 382	1 114
着陆场长/m	1 499	1 491	1 462	1 452
每座千米油耗/kg	16.4	13.6	15.2	12.1
温室气体排放量/kg	2.41×10^4	1.92×10^4	2.20×10^4	1.67×10^4

6 结束语

根据适应性设计理念,对短程客机的基本机型及其后继机型进行了概念设计。短程客机采用尾

吊布局型式,目的是为后继机型应用新型发动机(开式转子发动机)和先进气动技术(层流机翼)预留发展空间。

短程客机的基本机型及其后继机型的评估结果表明:在基本机型基础上,若配装开式转子发动机,油耗可减少17%;若应用基于激波控制鼓包的小后掠层流机翼技术,油耗可减少7%;若同时应用开式转子发动机和层流机翼技术,油耗可减少26.3%,且具有更好的短距起飞性能。

在短程客机系列化发展过程中,可根据先进技术的成熟度、竞争环境和市场需求,快速开发出经济性更好、排放量更小、场长性能更好的后继机型。因此,基于适应性理念的概念设计方案使得短程客机具有很好的可持续发展能力。

参考文献:

- [1] Torenbeek E. Advanced aircraft design: Conceptual design, analysis and optimization of subsonic civil airplanes[M]. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2013.
- [2] Szodruich J, Grimme W, Blumrich F, et al. Next generation single-aisle aircraft-requirements and technological solutions[J]. Journal of Air Transport Management, 2011,17:33-39.
- [3] Fernandez I. Valuation of design adaptability in aerospace system[D]. Georgia Institute of Technology, 2008.
- [4] Acosta D M, Guynn M D, Wahls R A, et al. Next generation civil transport aircraft design considerations for improving vehicle and system-level efficiency[R]. AIAA 2013-4286, 2013.
- [5] Guynn M D, Berton J J, Fisher K L. Engine concept study for advanced single-aisle transport[R]. NASA TM 2009-215784, 2009
- [6] Guynn M D, Berton J J, Hendricks E S. Initial assessment of open rotor propulsion applied to an advanced single-aisle aircraft[R]. AIAA 2011-7058, 2011.
- [7] Fujino M, Yoshizaki Y, Kawamura Y. Natural laminar flow airfoil development for the Honda jet[R]. AIAA 2002-2932, 2002.
- [8] Qin N, Wong W S, LeMoigne A. Three-dimensional contour bumps for transonic wing drag reduction[J]. Proc IMechE, Part G: J. Aerospace Engineering, 2008,222(G5):605-617.
- [9] Deng F, Qin N, Liu X, et al. Shock control bump optimization for a low sweep supercritical wing[J]. Sci China Tech Sci, 2013,56(10):2385-2390.
- [10] Howe D. Aircraft conceptual design synthesis[M]. London: Professional Engineering Publishing Ltd, 2000.
- [11] 余雄庆,张帅.面向客机族的总体参数优化方法[J].南京航空航天大学学报,2012,44(5):718-724.
Yu Xiongqing, Zhang Shuai. Optimization for conceptual design of airliner family[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012,45(5):718-724.
- [12] 张帅,余雄庆.中短程客机总体参数敏感性分析[J].航空学报,2013,34(4):809-816.
Zhang Shuai, Yu Xiongqing. Sensitivity analysis of primary parameters in preliminary design of a short/medium-haul airliner[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(4):809-816.
- [13] 张帅,余雄庆.面向飞机总体设计的开式转子发动机分析模型[J].航空动力学报,2012,27(8):1802-1808.
Zhang Shuai, Yu Xiongqing. Model of open rotor engine for aircraft conceptual design[J]. Journal of Aerospace Engine, 2012,27(8):1802-1808.
- [14] 王宇,张帅.面向客机概念设计的污染气体排放量估算方法[J].南京航空航天大学学报,2013,45(5):708-714.
Wang Yu, Zhang Shuai. Estimation method of pollutant gas emissions for civil jet conceptual design[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013,45(5):708-714.
- [15] Wang Yu, Yin Hailian, Zhang Shuai, et al. Multi-objective optimization of aircraft design for emission and cost reductions[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014,27(1):52-58.
- [16] 胡婕,王如华,王稳江,等.客机机翼气动-结构多学科优化方法[J].南京航空航天大学学报,2012,44(4):458-463.
Hu Jie, Wang Ruhua, Wang Wenjiang, et al. Multi-disciplinary optimization of transport wing aerodynamic/structural integrated design[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012,44(4):458-463.