BWB 客机经济性相关设计参数的影响分析

赵志高 张曙光

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了分析翼身融合布局客机(BWB,Blended Wing Body)高巡航升阻比和与其匹配的下一代低油耗发动机所带来的经济性收益,通过估算飞机的总体参数和计算飞行性能,以每座公里耗油量为衡量标准,定量分析巡航升阻比和发动机耗油率等相关参数对250座级和450座级的影响;与现有同量级常规布局客机对比分析,估算出BWB系列客机经济性收益的具体数据,并分析座级和航程对BWB客机经济性的影响,得出BWB系列客机发展的趋势和特点,最终综合考虑收益与可实现难度和代价,给出合理的设计参数值.

关 键 词: BWB客机; 巡航升阻比; 发动机耗油率; 每座公里耗油量

中图分类号: V 221

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)08-0937-06

Analysis of effects of BWB airliner design parameters on its economic profitability

Zhao Zhigao Zhang Shuguang

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to analyze economic profitability due to high cruise L/D and higher engine performance of blended wing body (BWB) airliner, the methods of estimating major parameters and calculating flight performance were imposed. Using fuel flow per capita (Fuel/km/seat) as the weighing standard, quantitative analysis was operated on the effects of cruise L/D and specific fuel consumption on 250-seat and 450-seat airliner; then contrasts BWB airliner family with existing equivalent conventional airliner and the material data of economic profitability was obtained. Moreover, analysis was operated on effects of seats and range. In the end conclusion was made on the trend and characteristic of BWB airliner family development and then considering the balance between benefits and realizing difficulty, the reasonable design parameters are given.

Key words: BWB airliner; lift to drag ration at cruise; specific fuel consumption; fuel flow per capita

翼身融合体(BWB,Blended Wing Body)布局被认为是最有可能取代现有传统布局的大型客机设计方案[1-2],它是根据早期人们对飞翼布局的研究成果提出来的[3]. BWB布局与传统布局相比具有更大的载运量、更高的升阻比和更低的燃油消耗率,其经济性不言而喻,较早研究BWB布局的文献[4]对BWB系列中800座级做了比较详细的经济性收益分析,预测BWB系列中800座级的经济性收益很明显.

BWB飞机设计过程中,机体的气动外形可以以气动载荷的最优分布为目标进行设计研究,没有其他部件的干扰,且其布局非常接近于总阻力最小的截面积分布,飞机的巡航马赫数可以提高到0.88以上[4]. BWB布局减小了浸润面积,这样可以减小阻力,同时飞机的机身也提供升力,经初步气动分析表明[5],机身(内翼)部分可以提供达1/3量级的升力贡献,文献[4]研究表明BWB布局客机巡航升阻比提升了21%,燃油消耗减少27%[4]. BWB布局的主承力结构包括机翼结构和增压机身结构两部分,机身承受展向气动载荷,载

收稿日期: 2010-04-26

基金项目: 国家863基金资助项目(2006AA11Z219)

作者简介: 赵志高(1986 -)男,河南开封人,博士生,zzg1162@163.com.

荷分布较常规布局更加合理,机翼重量减轻,虽然非圆形机身由于承受弯矩增加部分重量,但 BWB 布局没有尾翼和更轻的机翼,使总的结构重量更轻[4]. 与常规布局客机的机舱纵向扩展不同,BWB 布局客机的机舱是横向扩展,且其翼身融合段也能承载,在同等展长情况下,BWB 客机能提供更大的机舱容积,增加有效载荷[6].

BWB 布局在国内也得到重视,2008 年对 BWB 布局的气动设计做了重点研究,综述翼身融合体的概念,着重 BWB 布局的气动设计方法并讨论多学科优化[7];2009 年重点研究 BWB 客舱设计,确定 BWB 客舱基本布局方案和客舱参数化设计方法[6],2010 年重点研究 BWB 的气动特性和优化,根据前者的客舱限制进行气动布局设计和优化,更加符合 BWB 整体设计要求,使巡航最大升阻比接近 23,且预测巡航最大升阻比尚有提高的潜力[5].

从市场适应性和旅客/运营商接受能力及目前的技术状态考虑,巨型远程 BWB 布局(800 座)运输机的研制风险比较大. 现在主流的常规布局飞机的量级为 150 ~450 座级,这些量级的飞机更易采用目前的技术和生产水平,且更符合市场需求.

因此本文的分析重点是 250 和 450 座级的 BWB 客机,研究目标是相关设计参数对其经济性指标的影响.

1 评价指标和分析方法

客机的直接使用成本由 3 项指标组成:客机燃油特性、飞行/乘务员劳务时间和地面维修等其他费用,燃油特性和飞行/乘务员劳务时间的衡量指标分别是每座公里耗油量和飞行时间,本文暂不考虑地面维修等其他费用.

客机的飞行时间与巡航马赫数 Ma 相关,当前常规布局客机的 Ma 是 0.85. BWB 布局的气动载荷分布更为合理,且没有其他部件干扰,截面积的总阻力相对更小,Ma 可以提高至 0.95,根据最大化 $Ma \cdot K$(K 是巡航升阻比)的原则,BWB 客机的最佳 Ma 是0.9[7],本文为便于和常规布局对比,采用 $Ma = 0.85$.

每座公里耗油量 f_{ks} 反映占客机成本较大比重的燃油特性,与飞机总体设计参数密切相关,如式(1)所示.

$$f_{ks} = \frac{q_{kh} \cdot W}{\eta \cdot Ma \cdot K_{max} P} \tag{1}$$

由式(1)可知,每座公里耗油量与发动机耗油率 q_{kh}、巡航最大升阻比 K_{max} 和座级 P 相关,而客机重量 W、发动机效率 η 和 Ma 是既定值.

影响分析方法是结合参考文献[8 -9]中的总体参数估算方法和飞行性能计算方法,按飞机的商载、航程估算总体参数,并利用估算出的总体参数进行飞行性能计算. 为了便于对比,基本设计要求与文献[4]相同:座级 800、航程 12 964 km、初始巡航高度 10 668 m、巡航马赫数 0.85、进场速度 150 km、耗油率 0.466 (kg/h)/daN、巡航升阻比 23,作为初步验证采用全金属结构. 依据以上分析的影响因素和总体参数估算方法,得到估算结果和对比如表 1.

表 1 总体参数估算结果与参考文献[4]对比

总体参数	估算值	Liebeck[4]
最大起飞重量/kg	380 564	373 642
空机重量/kg	196 957	187 048
燃油重量/kg	107 525	96 702
机翼面积 S/m^2	659	728
发动机总推力/N	3 ×274 427	3 ×274 071

对比可知,估算结果与参考文献[4]中的最大起飞重量相差 5%,空机重量差 5%,燃油重量差 10%,机翼面积差 10%,其主要原因是空机重量的差别,估算时采用的是全金属结构,而参考文献[4]中 BWB 客机采用的是复合材料. 但总的来看,采用的估算方法足以反映总体趋势.

进一步,根据表 1 的估算结果和飞行性能计算方法[8],得飞行性能如表 2.

表 2 飞行性能计算结果

飞行性能	输出结果
起飞距离/m	3 016
着陆距离/m	2 051
设计航程/km	12 692
轮挡耗油/kg	96 395
轮档时间/min	872
每座公里耗油量/((kg · km^{-1}) · 座$^{-1}$)	0.009 5

与设计指标对比可知,航程相差 272 km,即 2% 的误差,证明采用现有客机结构水平估算 BWB 客机的总体参数和计算飞行性能的合理性.

2 BWB 客机与常规客机基本对比

本文设计并经过 1∶30 缩比试飞模型验证的 250 座级 BWB 客机的外形模型如图 1 所示,与常规布局相比,BWB 布局只有机身和机翼没有尾翼,从侧视图可看出机身具有较大厚度且是翼型剖面形状,用于承载乘客和货物并能提供升力;翼身融合段是内翼,用于安放燃油箱;发动机位于机

身上侧后部,以提高飞行效率;起落架采用前三点式布局,能够采用常规布局的起落架.

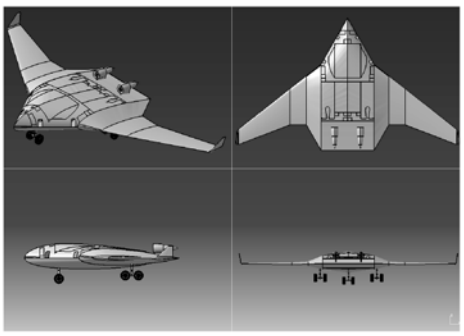


图 1　BWB 客机的布局方案

当前最先进的常规布局客机 B787 采用大量先进的气动设计方法:超临界翼型、平滑机翼技术、放襟翼时下垂的扰流板、流线机头、鲨鱼鳍式翼端与尾翼、简单的枢轴后缘襟翼和巡航中后缘装置可变曲度控制等等,使得 B787 阻力降低、气动效率提高,巡航最大升阻比达到 20.8.

BWB 布局有高巡航升阻比的潜力,通过气动设计和优化,以固定巡航飞行升力系数下最小化飞行阻力作为目标优化机翼展向几何扭转角分布、融合段及外翼后掠角,可将巡航最大升阻比 K_{max} 由目前的 19 提高至 23[5].

当前最先进的客机发动机是 B787 安装 GE 的 GEnx 或 RR 的 Trent1000 发动机,采用高总压比高涵道比(涵道比 = 10)、低叶尖速度、掠形复合材料风扇和第 3 代高压涡轮等先进技术,其耗油率 $q_{kn}=0.52$[10].

BWB 布局采用背部埋入式下一代大涵道比涡扇发动机,通过最大限度提高风扇和涡轮的效率获得最高的传输效率及采用大或超大涵道比(10 以上)降低平均喷流速度,下一代的大涵道比涡扇发动机将采用更大的涵道比、先进复合材料风扇、纳米材料转子叶片/结构和高压比压气机等技术进一步降低耗油率,使 q_{kh} 降至 0.46[10].

巡航升阻比和耗油率的改进可以很好地改善 BWB 客机经济性中的单项指标燃油特性,即减小每座公里耗油量. 同时可由 BWB 系列的座级和航程对每座公里耗油量的影响趋势和特点,选取适合采用 BWB 布局的座级数和航程值.

估算 BWB 系列客机的总体参数并计算飞行性能,性能指标和估算结果见表 3 和表 4. 由表 4 可知,由于 BWB 客机巡航升阻比的提高和发动机耗油率的降低,250 座级的每座公里耗油量比同量级的 B787-8($q_{kh}=0.52$(kg/h)/daN, $K_{max}=20.8$)少 30%.

表 3　BWB 系列客机性能指标

座位数/座	航程/km	初始巡航高度/m	巡航马赫数 Ma	进场速度/kn	耗油率/((kg·h^{-1})·daN^{-1})	巡航升阻比
250	14200	10668	0.85	150	0.466	23
450	13149	10668	0.85	150	0.466	23
800	12964	10668	0.85	150	0.466	23

表 4　BWB 系列客机总体参数估算结果

最大起飞重量 $W_{max,TO}$/kg	空机重量/kg	燃油重量/kg	机翼面积 S/m^2	发动机总推力/kN	每座公里耗油量/((kg·km^{-1})·座$^{-1}$)
147731	79170	44812	249	2×160	0.0118
228647	120574	65323	395	2×248	0.0102
380157	196746	107411	659	3×274	0.0095

450 座级 BWB 客机每座公里耗油量比同量级 B747-8($q_{kh}=0.54$(kg/h)/daN, $K_{max}=20$)少 40%,比 550 座级 A380($q_{kh}=0.53$(kg/h)/daN, $K_{max}=20$)少 35%,而 800 座级 BWB 客机的每座公里耗油量更低. 可见当充分发挥 BWB 布局高巡航升阻比的潜力和发动机技术的进步,BWB 客机的经济性收益很明显.

3　设计参数的影响分析

根据以上总体参数估算结果,进一步分析按每座公里耗油量衡量巡航升阻比(15 ~ 25)和发动机耗油率(0.4 ~ 0.79),其他计算条件如表 5.

表 5　分析巡航升阻比和耗油率影响的其他计算条件

计算条件	量值
着陆最大升力系数	2.25
巡航马赫数 Ma	0.85
航程/km	12964
初始巡航高度/m	10668
巡航马赫数 Ma	0.85

3.1　巡航最大升阻比的影响

在现有发动机水平下(发动机耗油率 0.557(kg/h)/daN,GE90-94B),根据客舱设计和气动设计及优化,巡航升阻比可达 22.7,后续要进行深入优化能使巡航升阻比超过 23[5-6]. 根据表 5 估算总体参数及计算飞行性能,BWB 客机每

座公里耗油量与现役常规布局客机比较如图 2.

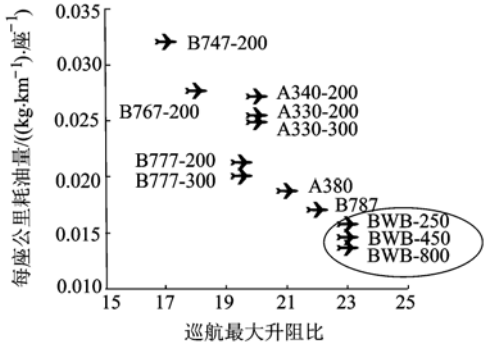


图 2 BWB 系列客机与现役客机的每座公里耗油量

由图 2 可知,对于常规布局客机,随巡航升阻比的提高(17 ~ 20),每座公里耗油量的总趋势是减少,巡航升阻比由 17 提高到 20,每座公里耗油量降幅最大 37%. 如图 2 圈中所示,BWB 系列客机的巡航升阻比从 20 提高到 23,每座公里耗油量比现役常规布局客机减少了 26% ~ 67%.

分析 BWB 系列客机随座级和航程变化的每座公里耗油量受巡航最大升阻比影响的定量关系,由表 5 的计算条件可得到图 3 和图 4.

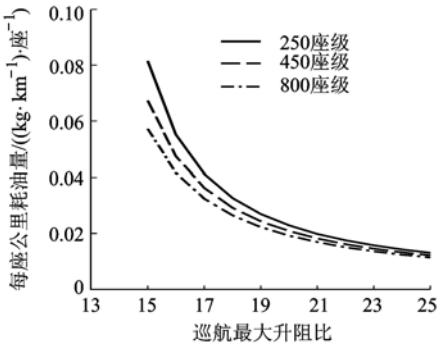


图 3 按座级 BWB 系列客机每座公里耗油量

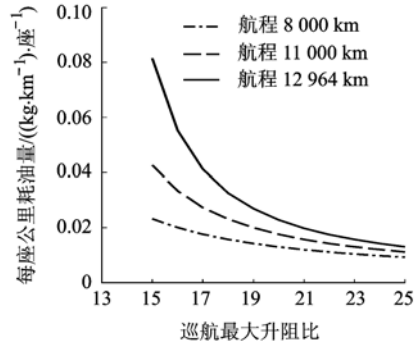


图 4 按航程 BWB-250 飞机每座公里耗油量

由图 3,巡航升阻比 15 ~ 23 曲线的下降趋势很大,在同等计算条件下,对于 BWB 客机的不同座级,其每座公里耗油量随巡航升阻比变化趋势是一样的,而且座级数越高,每座公里耗油量越低. 由此可知,当只考虑 BWB 客机巡航升阻比的提升,其经济意义已非常明显.

由图 4 可知,对于 BWB 的 250 座级客机,随着航程的增加,每座公里耗油量也增加,原因是对于同一座级,当航程增加时,其最大起飞重量也增加,飞行时所需的发动机推力和公里耗油量也相应的增大. 但是航程越大巡航升阻比所带来的影响也越大.

3.2 发动机耗油率的影响

在当前气动设计水平下即 $K_{max}=20$,BWB 布局采用埋入式发动机方案,与之匹配低耗油率的下一代大涵道比涡扇发动机(GEny). BWB 客机每座公里耗油量与现役常规布局客机比较如图 5 所示.

由图 5 知,对于常规布局客机,随发动机耗油率的降低,每座公里耗油量的总趋势是减少,耗油率由 0.57(kg/h)/daN(GE90)减少到 0.53(kg/h)/daN(GEnx),每座公里耗油量降幅最大 27%. 如图 5 中所示, BWB 系列客机的发动机耗油率从 0.53(kg/h)/daN(GEnx)减少到 0.46(kg/h)/daN(GEny),每座公里耗油量比现役常规布局客机减少了 32%.

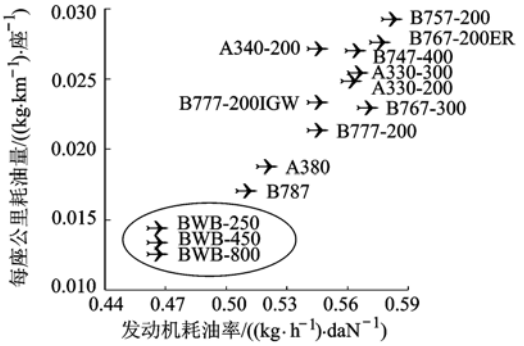


图 5 BWB 系列客机与现役客机的每座公里耗油量

分析 BWB 系列座级和航程变化的每座公里耗油量受发动机耗油率影响的定量关系,由表 5 的计算条件可得到图 6 和图 7.

由图 6 可知,发动机耗油率 0.79 ~ 0.46(kg/h)/daN,曲线的下降趋势很大,在同等计算条件下,对于 BWB 布局的不同座级,其每座公里耗油量随发动机耗油率变化趋势是一样的,而座级数越高,每座公里耗油量越低. 由此可知,当只考虑 BWB 客机发动机性能的提高,其经济意义也很明显.

由图 7 可知,对于 BWB 的 250 座级客机,随着航程的增加,每座公里耗油量也增加,原因是对于同一座级,当航程增加时,其最大起飞重量也增加,飞行时所需的发动机推力和公里耗油量也相应的增大. 但是航程越大发动机耗油率所带来的影响也越大.

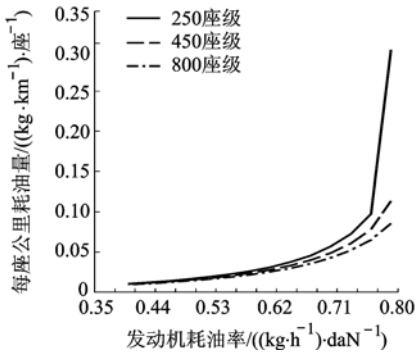


图 6　按座级 BWB 系列飞机每座公里耗油量

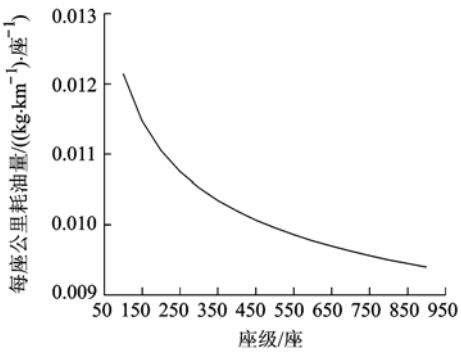


图 8　BWB 每座公里耗油量随座级变化曲线

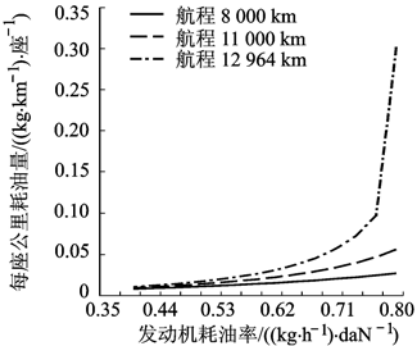


图 7　按航程 BWB-250 飞机每座公里耗油量

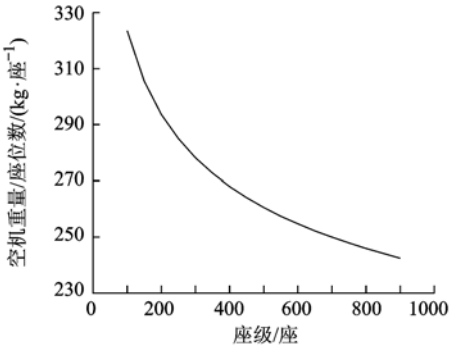


图 9　BWB 每座空机重量随座级变化曲线

4　座级和航程的影响分析

进一步分析按每座公里耗油量衡量座级变化(100 ~ 900 座)和航程(2 000 ~ 16 000 km),计算条件如表 6,得到图 8 ~ 图 10.

表 6　分析座级和航程影响的计算条件

计算条件	量值
着陆最大升力系数 C_{Lmax}	2.25
巡航马赫数 Ma	0.85
初始巡航高度/m	10668
巡航马赫数 Ma	0.85
发动机耗油率/((kg·h⁻¹)·daN⁻¹)	0.466
巡航升阻比 L/D	23

4.1　7 000 nm 航程条件下座级的影响

由图 8 可知,在同等计算条件下,座级数越高每座公里耗油量越低,座级 100 ~ 300 曲线下降趋势很大,而从 400 到 900 座级,下降趋势近似斜线.

由图 9 可知,随座级的提高,空机重量与座位数的比值降低,即对应于每座的结构重量和使用项目重量减少,进而每座的耗油率减少,这导致每座公里耗油量随座级的提高而减少.

因此当将座级从 150 增加到 450,经济性收益是很明显的,而当座级达到 450 以后,经济性收益与座级的增加量是等比例的,载客量更大的 BWB 飞机经济性收益也会更高.

4.2　250 座级的航程影响

由图 10 可知,曲线呈二次曲线形式,在航程 4 500 ~ 5 000 km 每座公里耗油量为最低,在航程 2 000 ~ 4500 km 曲线呈下降趋势,而当航程增加到 5 000 km 以后,曲线呈上升趋势. 原因是飞机爬升阶段所需的推力和发动机耗油率比巡航阶段高,即爬升阶段的公里耗油量大于巡航阶段的公里耗油量.

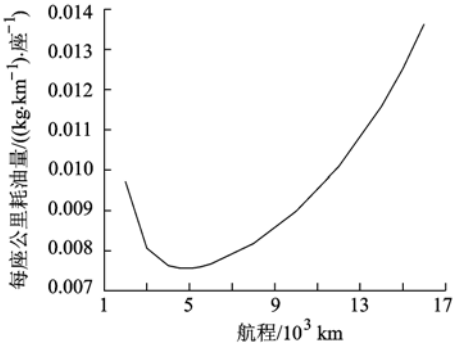


图 10　BWB-250 每座公里耗油量随航程变化图

由图 11 可知当航程由 2 000 ~ 4 500 km,巡航阶段的比重增加,总的平均公里耗油量减小,因此每座公里耗油量减少;而当航程增加到 5 000 km 以后,虽然巡航段的比重增加,可由于飞机重量和所需推力越来越大,在同等发动机耗油率和飞行速度条件下,各飞行阶段的公里耗油量逐渐变大,总的平均公里耗油量增大,所以当航程大于 5 000 km,每座公里耗油量随航程的增加而增大;而对于航程在 4 500 ~ 5 000 km,飞机的经济性是最好的.

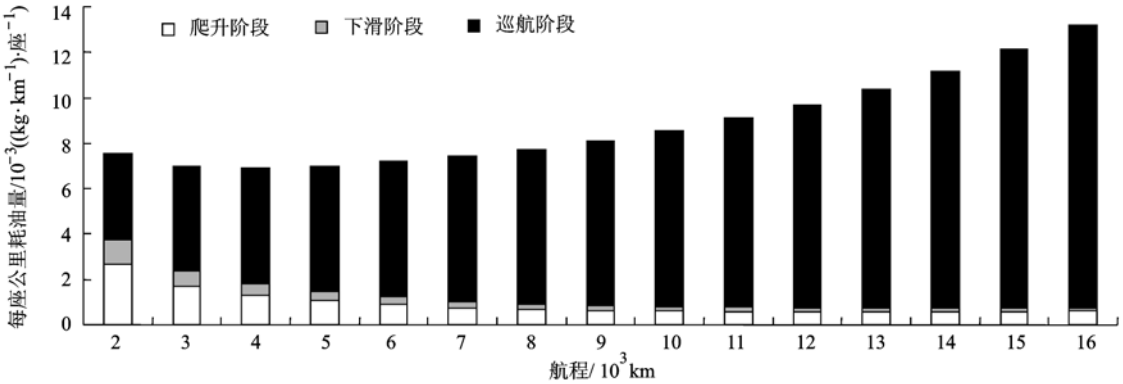


图11 随航程变化BWB-250各飞行阶段占每座公里耗油量的比例

5 结 论

1）与常规布局客机中最先进的250座级的B787和550座级的A380相比，BWB系列客机的巡航升阻比由20提高到23，使每座公里耗油量降30%，而BWB系列客机耗油率由0.53(kg/h)/daN降到0.46(kg/h)/daN，使每座公里耗油量降35%.

2）根据不同座级和航程，定量分析了巡航升阻比和耗油率对每座公里耗油量的影响趋势，为气动设计目标和发动机改进目标的设定提供经济性收益方面的依据. 在巡航升阻比20～23和发动机耗油率0.53～0.46(kg/h)/daN，每座公里耗油量的减少量非常可观；当升阻比达到23或耗油率降到0.46(kg/h)/daN以后，提高升阻比和降低耗油率能带来的收益就不太明显，即当付出更大努力和代价时，其经济性收益不明显.

3）由座级和航程对每座公里耗油量的影响趋势，分析出适合采用BWB布局的量级. 随着座级和航程的减少，巡航最大升阻比和发动机耗油率对每座公里耗油量的影响也越来越小，所以对于200座级以下中短航程(小于4 000 km)飞机，翼身融合体的优势就不明显. 对于250座级以上的长航程客机，BWB布局客机的低油耗和高经济性等特性很有可能使其成为取代现有常规布局的大型客机设计方案.

相对常规布局客机，BWB客机有诸多优势但其机身是非圆筒形，不只承受环绕应力，还要承受比较大的弯矩，导致其结构重量较大，所以增压机身的结构设计仍有待于进一步研究.

参考文献（References）

[1] Wahls R. Advanced concept studies for commercial transports entering service in the 2030-35 period subsonic fixed wing perspective[C]//Fundamental Aeronautics Pre-Proposal Conference. Washington DC:[s. n.],2007

[2] Hileman J I,Reynolds T R,de la Rosa Blanco E,et al. Development of approach procedures for silent aircraft [R]. AIAA-2007-0451,2007

[3] Portsdam M A,Page M A,Liebeck R H. Blended wing body analysis and design[R]. AIAA-97-2317,1997

[4] Liebeck R H. Design of the blended wing body subsonic transport [J]. Journal of Aircraft ,2004,41(1):10－25

[5] 刘晓静，吴江浩，张曙光. 250座级翼身融合布局客机气动设计与优化[J]. 空气动力学报，2010，29(1)：78－84
Liu Xiaojing, Wu Jianghao, Zhang Shuguang. Aerodynamic design and optimization of the blended wing body aircraft for 250 passengers [J]. Journal of Aerodynamics,2010,29(1):78－84 (in Chinese)

[6] 廖慧君，张曙光. 翼身融合布局客机的客舱设计[J]. 北京航空航天大学学报，2009，35(8)：986－989
Liao Huijun,Zhang Shuguang. Design of cabin layout for blended wing body passenger transports[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2009,35(8):986－989 (in Chinese)

[7] 朱自强，王晓璐，吴宗成，等. 民机的一种新型布局形式——翼身融合体飞机[J]. 航空学报，2008，29(1)：49－58
Zhu Ziqiang ,Wang Xiaolu ,Wu Zongcheng,et al. A new type of transport—blended wing body aircraft[J]. Aeronautica et Astronautica Sinica,2008,29(1):49－58(in Chinese)

[8] L R 詹金森. 民用喷气飞机设计[M]. 李光里，译. 北京：中国航空研究院，2001
Jenkinson L R. Civil jet aircraft design [M]. Translated by Li Guangli. Beijing: China National Aviation Academy, 2001 (in Chinese)

[9] 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
Cheng Bushi. Aircraft design manual 5, civil aircraft design [M]. Beijing: Aviation Industry Press,2005(in Chinese)

[10] 陈光. 用于波音787客机的GEnx发动机设计特点[J]. 航空发动机，2010，36(1)：1－6
Chen Guang. Design characteristics of GEnx engine for B787 [J]. Aeroengine,2010,36(1):1－6(in Chinese)

(编 辑：张 嵘)