

民用客机空间布置的经济性思考

吴晓光*

中国商飞北京民用客机技术研究中心, 北京, 102211

摘要: 民用客机正在不断宽体化、大型化, 在窄体机无法合理利用的内部空间, 对于宽体机而言却是一个可以再利用的空间。通过对民用客机的空间经济性进行分析, 对空间进行重新组合分配, 在不提高飞机总成本的情况下, 可以提升飞机的盈利能力。本文对国内几家航空公司的年度财务报表进行分析, 可以得出客运空间收益要大于货运空间, 而其他空间对飞机的经济性贡献较小。这一点, 构成了民用客机空间布置时的经济性原则之一。

关键词: 民用客机; 空间; 布置; 重组; 经济性

中图分类号: V221+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2016) 04-0009-07

在民用客机总体设计工作中, 飞机总体布置工作包括机翼、机身等飞机重要部件相互位置在总体布置设计方面的选择, 飞机的内外部部位安排, 飞机主要使用功能的描述与布置, 飞机主要总体布置参数的选择与描述。一般可以分为总体布置、分舱布置、结构布置和系统特设布置^[1]。以上所有工作都离不开对飞机空间的分配, 从这个意义上讲, 飞机的总体布置核心也就是飞机的空间布置。在国内, 通常会将这方面内容放在飞机的几何外形设计和分舱设计等专业内进行讨论, 然而, 仅这样做还是无法解决空间分配的综合权衡问题。因此, 有必要将飞机的空间布置单独列为一个项目进行综合评估。

在飞机设计进程中, 飞机空间布置通常会参考竞争机型和历史经验, 并考虑到很多因素的限制, 如适航安全、总体性能、气动操控性、结构强度、生产工艺和经济性等方面的因素。在具体空间布置过程中, 经常会出现多种因素间的不协调问题。要解决这些不协调问题, 除适航安全方面的限制是不能妥协的, 其他不协调项目, 总体设计人员通常会采用重量经济性的方法进行综合协调。

然而, 随着乘客对飞机舒适性要求的不断提高, 仅仅用重量来判断一架飞机的经济性, 已经无法反应市场对民用客机经济性指标要求的综合性和市场竞争的残酷性。在当前的市场情况下, 民用客机空间布置的经济性将是每一个总体布置人员必须回答的问题。

1 民用客机空间经济性评估方法的市场需求

民用客机的研发是由飞机制造商进行的, 然而民用客机的评判方却是民用客机的用户——航空公司, 只有航空公司认可的机型才是市场上成功的机型。对于航空公司而言, 首先关注的是飞机的使用经济性, 也就是说, 航空公司对一架飞机的重量并不关心, 而是更关心这架飞机能为他们带来多少利润。而航空公司的顾客却是广大的旅客, 在商品经济社会中, 任何一种商品的成败都要由顾客做出裁决^[2]。飞机制造商要同时满足航空公司和旅客的要求, 其产品才能获得成功。

过去, 在评估飞机经济性指标时, 主要是将重量作为衡量飞机经济性的重要指标来进行评估^[3], 虽然满足了飞机总体设计评估的部分需求, 但却割裂了民用客机气动外形、布局与市场指标的关系, 忽略了民用客机的经济性并不完全来自于重量, 飞机的外部形态也会影响到飞机的经济性。所以, 在飞机总体设计时, 需要补充建立一套飞机的新价值评估体系。这套飞机新价值评估体系要尽可能多地将各种技术指标关联在一起, 使用同一个平台评估这些技术指标的经济性。飞机空间正是这样一个平台, 它可以将飞机的强度、重量、空气动力特性、盈利能力等有效地联系起来, 把它们放在同一个平台下进行评估。

收稿日期: 2016-01-10; 录用日期: 2016-02-10

*通讯作者. Tel.: 010-57808108 E-mail: wxg97wxg@126.com

引用格式: WU Xiaoguang. Economic research on the space layout in civil aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(04): 09-15. 吴晓光. 民用客机空间布置的经济性思考[J]. 航空科学技术, 2016, 27(04): 09-15.

2 民用客机空间的组成

目前,飞机空间没有具体定义。本文根据飞机的空间特性,将民用客机的空间规定如下:

飞机空间可以分成外部空间和内部空间2种。如下:

$$V_A = V_O + V_I$$

其中, V_A 为飞机空间, V_O 为飞机的外部空间, V_I 为飞机的内部空间。

外部空间 V_O 主要包括飞机实体外形以及可能会影响飞机综合指标的气动影响空间。之所以将气动影响空间包括进来,主要是因为飞机外形变化会引起飞机的气动性能变化^[4],进而会对飞机的综合指标产生影响,包含这部分空间有利于对飞机综合指标进行评估。

内部空间是指飞机实体或系统实现功能所需要的空间,如下式所示:

$$V_I = V_R + V_N$$

其中, V_R 为飞机的盈利空间, V_N 为飞机的非盈利空间。

盈利空间 V_R 是可以用来获得直接收入的空间,主要指民用客机提供的用于载货、载客和其他收费性服务的空间。由于航空运输的计价方式通常是客公里和吨公里,因此,盈利空间 V_R 主要包括客舱、货舱(含前货舱、后货舱和散货舱)、附加收益空间和燃油箱空间,这些空间都可以直接为航空公司带来收入。

非盈利空间 V_N 是用来保证飞机运行的空间,主要包括结构空间、系统空间、飞走空间、工作空间和未使用空间等。如下式所示:

$$V_N = V_S + V_E + V_C + V_W + V_V$$

其中, V_S 为飞机的结构空间, V_E 为飞机的系统空间, V_C 为飞机的飞走空间, V_W 为飞机的工作空间, V_V 为飞机的未使用空间。

结构空间 V_S 是指为承受飞机上各种载荷所需要的结构件实体空间;系统空间 V_E 是指为了保证机载系统正常工作所

需要的内部和外部空间,这部分空间中还包括一部分系列化或升级所需要的预留空间;飞走空间 V_C 是飞机运行过程中消耗物品所占用的空间,主要指餐食、滑油等消耗物资占用的空间,还包括飞机上卫生间所占用的空间;工作空间 V_W 是指在飞机营运期间,空乘人员和维修人员工作所需要的空间;未使用空间 V_V 是指在民用客机运营过程中,因为各种客观条件的限制,暂时无法被使用的空间,如破碎的细小空间等。

3 民用客机空间的常规分配方式

目前,根据发动机的安装方式不同,现代民用客机主要分为翼吊式飞机和尾吊式飞机2种,并正趋向于全部采用翼吊式飞机布置方式。本文主要列出波音和空客公司的翼吊式飞机的空间布置方案。

飞机制造商通常根据民用客机的特点及实践经验,将翼吊式民用客机分成六大协调区,飞机的空间会按图1和表1进行布置。

从图2和图3可以看出,B787在空间分配时,首先确定了飞机的增压区位置,雷达舱、中央翼、空调设备包、主起落架舱、尾段机身前部和辅助动力装置(APU)舱位于非增压区内,主要是因为这些部位基本没有增压需求。其次,B787增压区段以驾驶舱和客舱地板为分界线,将增压区设定为运营过程中有人活动的上部甲板区(包括驾驶舱和客舱)和无人活动的下部甲板区(含电子设备舱、前货舱、空调设备舱、中央翼上部空间、主起落架舱上部空间、中电子设备舱、后货舱、散货舱和水/废水舱),考虑到下部甲板区有可能会空运一些生鲜货品,同时也为了综合利用上部甲板区的环控气体冷却等相关设备,下部甲板区也处于增压区内;下部甲板区中的货舱和散货舱出于装卸的需要,在下部安装了货舱甲板。货舱甲板下部空间、货舱两侧三角区、客舱甲板系统通过空间、中央翼上部空间、主起落架舱上部空间和客舱顶部空

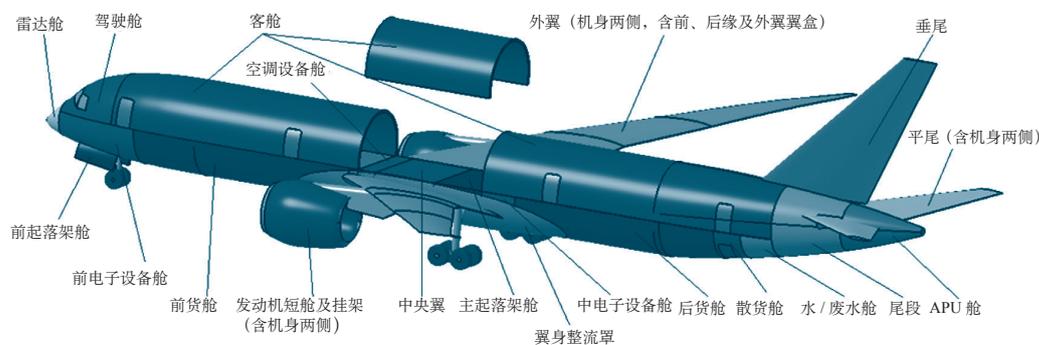


图1 常见民用客机空间布置

Fig.1 The traditional space layout of the civil aircraft

表1 民用客机协调区及空间布置

Table 1 The civil aircraft's coordination area & space layout

协调区	空间	
	盈利空间	非盈利空间
机身	客舱 前货舱 后货舱 散货舱	雷达舱、驾驶舱、前电子设备舱、中电子设备舱、空调设备舱、水/废水舱、翼身整流罩
机翼	外翼翼盒 中央翼	机翼前缘、机翼后缘、翼梢小翼
尾段	平尾油箱(备选)	尾段及尾翼
短舱及吊挂		发动机短舱、吊挂
起落架舱		前起落架舱 主起落架舱
外部		外部照明、外部天线、外部口盖、标记、喷漆等

间共同组成飞机机体内系统管路的通道。

图4是A350飞机空间纵向分配方案,与B787飞机空间纵向分配的主要区别是A350没有中电子设备舱。

对于远程飞机,为了保证乘务人员的充分休息,B787和A350都在客舱顶部空间开辟了乘务人员休息区,如图5和图6所示。

某些在欧美地区运营的宽体飞机,为了最大限度地利用客舱空间,甚至将客舱内的厨房和卫生间移到了下部甲板区。

4 民用客机空间分配与成本间的关系

根据飞机的全寿命周期理论,飞机上的任何一种变化,都要对飞机研发成本、生产成本、使用成本、维护成本和处置成本形成的影响进行分析^[5]。

在飞机外形不变的情况下,飞机内部空间的再分配,只会造成部分区域的环境需求发生较大变化^[6,7]。再分配工作,如果仅仅是将2个空间的功能进行互换,那么某个区域的环境需求变化与另一区域的环境需求变化会相互抵消,对飞机的设计、生产和处置成本产生的影响有限。但由于互换后,部分功能区域的环境需求和全机重心会发生变化,可能会造成飞机布局和使用维护费用发生变化,在全机空间重新分配时需要注意。

5 实例验证

根据中国国际航空公司、中国东方航空公司和中国南

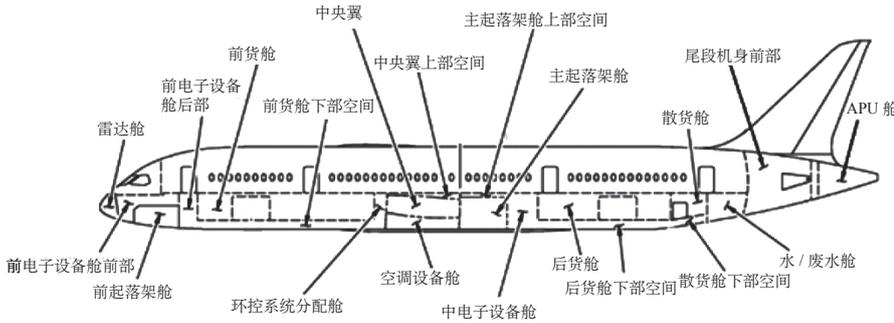


图2 B787飞机空间纵向分配方案
Fig.2 B787 space longitudinal layout

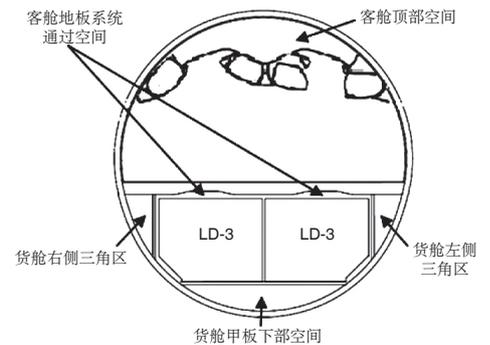


图3 B787空间剖面分配方案
Fig.3 B787 space's sectional layout

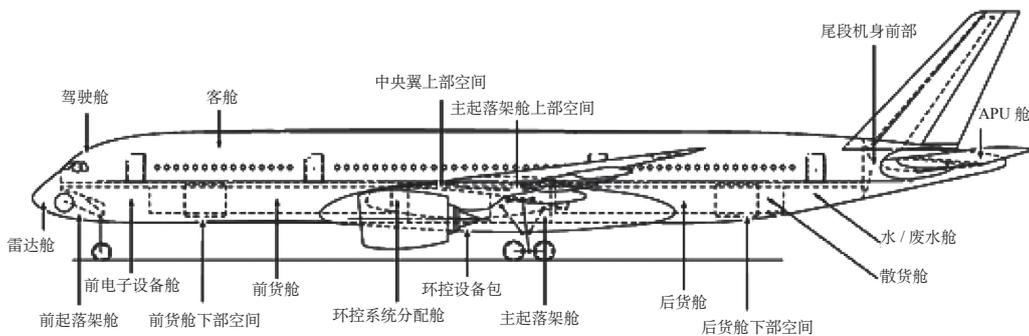


图4 A350飞机空间纵向分配方案
Fig.4 A350 space longitudinal layout

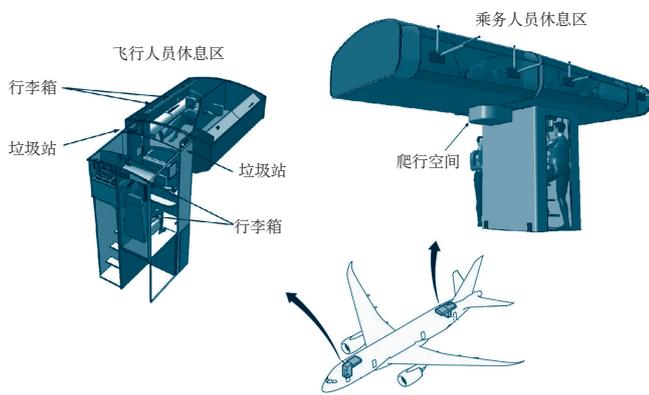


图5 B787机组及乘务人员休息区布置
Fig.5 B787 pilot's & crews' rest area

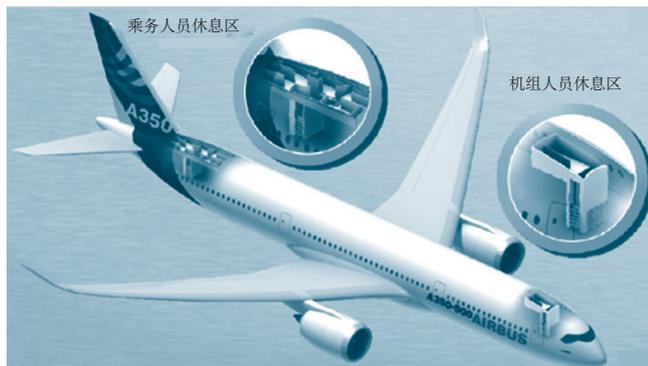


图6 A350机组及乘务人员休息区布置
Fig.6 A350 pilot's & crews' rest area

方航空公司发布的2014年和2013年财务报表^[8-13],对这三大航空公司的收入组成进行比较,如表2所示。

从表2中可以看出,客舱空间是各航空公司的主要收入来源,其次是货舱空间,其他服务空间对航空公司的收入组成相对最小。

表2 三大航空公司收入组成比较

Table 2 The comparison to 3 Chinese airline's revenue composition

项目	国航		东航		南航	
	2014	2013	2014	2013	2014	2013
客运收入/亿元	934.71	874.71	354.74	345.11	971.45	882.71
客运收入占比	90.74%	91.12%	89.54%	89.82%	91.25%	91.62%
货运收入/亿元	87.86	78.76	36.03	35.36	71.83	64.13
货运收入占比	8.53%	8.20%	9.09%	9.20%	6.75%	6.66%
其他收入/亿元	7.54	6.47	5.4	3.74	21.35	16.64
其他收入占比	0.73%	0.67%	1.36%	0.97%	2.01%	1.73%
总收入/亿元	1030.11	959.94	396.17	384.21	1064.63	963.48

表3比较了三大航空公司单位运输收入。

由于三大航空对于每个乘客的标准重量略有不同,

本文仅以每位乘客标准重量为100kg^[14]计算。发现每运送1000kg乘客,航空公司将收入约6元,而每运送1000kg货物,航空公司将收入约1.5元,航空公司的每吨客运公里收入大约是每吨货运公里收入的4倍左右。

表3 三大航空公司单位运输收入比较

Table 3 The comparison to 3 Chinese airline's unit transportation revenue

项目	国航		东航		南航	
	2014	2013	2014	2013	2014	2013
客运单位运输收入/元	0.60	0.62	0.598	0.597	0.58	0.59
货运单位运输收入/元	1.54	1.57	1.570	1.539	1.42	1.48

通过比较单位客、货运空间公里数的产出量,可以计算飞机的空间经济性。

通常,散货货运按160kg/m³装载,集装箱或集装板按176kg/m³装载^[14],在此假定所有的货物都进行集装箱或集装板装载,那么,每立方米货运空间的每公里收入约为0.264元。

根据表4发现,国内三大航空公司的运输主力为A320系列和B737系列。由于其他机型的数据缺乏,在计算三大航空公司每个乘客占用的客舱空间(含厨、卫空间)时,以这两种机型为基础,估算出平均每位乘客占有1.465m³的客舱空间。每立方米客运空间的每公里收入约为0.41元。

表4 国内三大航空公司2014年机队一览

Table 4 The fleet of 3 Chinese airlines in 2014

	国航	东航	南航
A380			5
A340-600	4	5	
A330-300/A330-200/A300-600R		44	31
A321/A320/A319	203	205	240
B787			12
B777-300ER/B777-200	30		9
B767		7	
B757-200	2	7	19
B747	8		
B737-800/B737-700/B737-300	223	175	261
CRJ-200		6	
EMB190			25
EMB145LR		10	

从以上估算可以得出,航空公司每立方米客运空间每公里收入大约是每立方米货运空间每公里收入的1.55倍。

从如上的实例分析中也可以看到,航空公司的客运空间单位产出要高于货运空间单位产出。

6 对国产大型双通道民用客机的借鉴意义

通过例证，证明了不同盈利空间对航空公司的客、货盈利能力的差异。这些数据是民用客机空间布置的重要参考，但在民用客机空间布置时，还有一个重要的因素需要考虑，即盈利空间布置的转变的便利性。

由于民用客机的投资是一个大规模、长周期的过程，而民用客机的飞行航线特点却都不尽相同，如有的航空公司会飞行在客、货运都饱满的航线上，有的却不是。过于细分的市场很难研制一个机型甚至是衍生机型，但细分市场的利润率又会非常高，因此，研制一个机型时，需要民用客机在研制时，空间要具有一定的灵活性，可以保证不同航空公司在不同航线上的需求，有利于提升机型的市场覆盖率。

大型双通道民用客机主要应用于国内主干线和国际航线，相对的客、货源较为充沛，起伏较小。但随着国内外空中运输市场的不断发展变化，很多原来的支线航线正在成为客源充沛、货源较少或季节差异性较大的新航线。这部分航线份额正在不断增加，对民用客机的需求量也在不断增加。过去，这部分市场主要是由不断拉长机身的220座级A321飞机所占据，但过短的起落架和不断拉长的机身正在不断降低飞机的机场适应性和飞机安全性，所以市场需要一种全新的大型双通道民用客机来替代A321飞机。波音公司曾经推出过B767双通道半宽体飞机，但由于过小的载客量（每排7座），经济性并未超过A321（每排6人），没有获得成功。

中国是国际民用航空市场发展速度最快的市场，并且这一细分市场主要在中国，这是国产大型双通道民用客机不能忽视的。为了争夺这部分新生市场，需要国产大型双通道客机要在原本用于单通道客机的机场上运营和起降，同时经济性要比单通道客机更优秀或在同一级别上。为了提升机场适用性，需要飞机使用更大的轮胎和飞机擦地角。更大的轮胎意味着更大的主起落架舱空间，而更大的飞机擦地角意味着飞机总长度受限制。而为了保证经济性，就需要在机身总长度受限的情况下，既要保证更大的主起落架舱，还要保证最大限度的盈利空间。因此，也对国产大型双通道客机的空间布置提出更高的要求。

第一，较大的剖面是民用客机盈利的保证。在同等起降重量水平下，提升客、货舱可盈利空间的容积，将会大幅度提升民用客机的经济性。但较大的剖面也会带来更大的气动阻力，需要权衡后确定剖面尺寸。

第二，合理分配客、货运空间的比例。民航客、货运收益的不同，不只表现在收费的不同，同时也表现在客、货源特性的不同。相对于客运客源的往返双向性，货运货源是明显的

单向性，乘客乘坐飞机到达目的地，通常也会乘坐飞机返回，而货物却不是，运过去的货物在当地使用后，就不会再回来了。这就意味着，除非货运来源地和目的地之间的货物往来频繁，否则，定期货运航班必定是单向盈利的。民航很难仅仅依靠定期货运班机盈利，即使有，也仅仅是个例。所以，在进行剖面设计和空间分配时，必须进行空间经济性有效分析，提升腹舱货运空间的使用效率。

第三，减少对等直段可盈利空间的浪费。根据本文的B787和A350的示例，可以发现2种飞机对等直段的利用程度不相同。B787在主起落架舱后面有一个2m多的中电子设备舱，而A350没有。主要原因在于两种飞机的多电化方案不同，B787的多电化程度较高，必须在中机身处设置一个空间进行一次配电等工作；而A350的多电化程度没有那么多高，因此就不需要那么大的一次配电空间。目前，国产民用客机产业还没有达到空客的多电化水平，因此，我们可以将一部份等直段空间节省下来，把它变成可盈利的货运空间。

第四，能够更便捷地进行空间转换和空间利用。国产大型双通道飞机在执行中近程飞行时，不需要过大的厨房空间，这就需要在空间布置时，能够保证在最短时间内将多余的厨房空间改造成客运空间，需要重新考虑飞机内管道和线缆布置方案。由于大多数大型双通道飞机运营的航线货源都不是很充足，装卸便利的前、后货舱就已经无法完全利用，更不用说，非常不方便的散货舱空间，因此，国产大型双通道飞机要充分考虑到如何最有效地利用这部分空间。

7 结论

飞机空间布置对飞机的经济性、功能性影响较大。如果能在对飞机的总成本影响有限的情况下，对空间进行重新分配和再利用，将会大幅度地提升飞机的盈利能力。

在民用客机总体布置时，需要注意以下几点：

(1) 飞机的剖面设计和空间布置是飞机性能和空间经济性的平衡；

(2) 飞机的盈利空间受到市场需求和多种因素的影响，不可能无限制增大，但却可以提高有限空间的利用率；

(3) 飞机的等直段空间和近似等直段空间是飞机盈利的主要保证；

(4) 客舱地板上空间是整架飞机的高盈利空间，在布置时，要尽可能地保证客舱空间最大，并减小工作空间、厨卫空间和客舱顶部空间对它的占用；

(5) 客舱地板下部空间，是整机飞机的低盈利空间，受到适航规范的要求，在起降过程中，客舱地板下不能有人员

驻留,不能转化为客运空间,但却可以在飞机巡航过程中接受人员暂时停留;

(6) 飞机总体布置要能保证可以便捷地进行空间转换和利用。

综上所述,由于现代民用客机的机身在不断增宽,可利用的空间也正在不断增多。在飞机空间布置时,需要对各部分空间的成本收益进行有效分析和权衡,才能设计出一款更具市场竞争力的民用客机。

AST

参考文献

- [1] 《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册-民用客机总体设计[M].北京:航空工业出版社, 2002:206-237.
Editorial Board of Aircraft Design Manua. Aircraft design manual-Civil aircraft conceptual design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002: 206-237. (in Chinese)
- [2] 张家顺.乘坐舒适性/旅行满意性-客机成败的一个关键因素[J].国际航空, 1995,4:27-28.
ZHANG Jiashun. The key factor to the civil aircraft's success-the seating comfortability / the travel satisfaction [J]. International Aviation, 1995,4:27-28. (in Chinese)
- [3] 《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册-技术经济设计[M].北京:航空工业出版社, 2002:50-51.
Editorial Board of Aircraft Design Manual. Aircraft design manual-Technical economic design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002: 50-51. (in Chinese)
- [4] 《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册-气动设计[M].北京:航空工业出版社, 2002:118-121.
Editorial Board of Aircraft Design Manual. Aircraft design manual-Aerodynamic design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002: 118-121. (in Chinese)
- [5] 李晓勇, 宋文滨.民用飞机全寿命周期成本及经济性设计研究[J].中国民航大学学报,2012, 30(2):48-55.
LI Xiaoyong, SONG Wenbin. Research to the civil aircraft whole life cycle cost and economic design [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2012,30(2):48-55. (in Chinese)
- [6] 郭念辉,马伟泽.关注民用飞机电缆布线及其技术[J].国际航空, 2009(11): 44-45.
GUO Nianhui, MA Weize. Focus on civil aircraft wiring and technical [J]. International Aviation,2009(11):44-45.(in Chinese)
- [7] 徐科华, 陈谋, 徐扬, 等. 民用飞机机载电子系统分布式体系架构研究[J].工程设计学报, 2012.(12):494-498.
XU Kehua, CHEN Mou, XU Yang,et al. Research on onboard electronic system distributed architecture of civil aircraft [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2012.(12):494-498. (in Chinese)
- [8] 中国国际航空公司.中国国际航空公司2013年度报告[EB/OL].Http://file.ws.126.net/quotes/pdf/sh/2014/2014-3/2014-03-26/1330308.pdf.
Air China. Annual report of Air China in 2013 [EB/OL]. Http://file.ws.126.net/quotes/pdf/sh/2014/2014-3/2014-03-26/1330308.pdf. (in Chinese)
- [9] 中国东方航空公司.中国东方航空公司2013年度报告[EB/OL]. Http://file.ws.126.net/quotes/pdf/sh/2014/2014-3/2014-03-27/1332868.pdf.
China Eastern Airline. Annual report of China Eastern Airline in 2013 [EB/OL].Http://file.ws.126.net/quotes/pdf/sh/2014/2014-3/2014-03-27/1332868.pdf. (in Chinese)
- [10] 中国南方航空公司.中国南方航空公司2013年度报告[EB/OL].Http://file.ws.126.net/quotes/pdf/sh/2014/2014-3/2014-03-29/1338551.pdf.
China Southern Airline.Annual report of China Southern Airline in 2013 [EB/OL]. Http://file.ws.126.net/quotes/pdf/sh/2014/2014-3/2014-03-29/1338551.pdf. (in Chinese)
- [11] 中国国际航空公司.中国国际航空公司2014年度报告[EB/OL].Http://pdf.dfcfw.com/pdf/H2_AN201503260008930258_1.pdf.
Air China. Annual report of Air China in 2014 [EB/OL]. Http://pdf.dfcfw.com/pdf/H2_AN201503260008930258_1.pdf. (in Chinese)
- [12] 中国东方航空公司.中国东方航空公司2014年度报[EB/OL].Http://pdf.dfcfw.com/pdf/H2_AN201503270008952612_1.pdf.
China Eastern Airline. Annual report of China Eastern Airline in 2014[EB/OL].Http://pdf.dfcfw.com/pdf/H2_AN201503270008952612_1.pdf. (in Chinese)
- [13] 中国南方航空公司.中国南方航空公司2014年度报[EB/OL].Http://pdf.dfcfw.com/pdf/H2_AN201503300009006055_1.pdf.
China Southern Airline. Annual report of China Southern Airline in 2014 [EB/OL]. Http://pdf.dfcfw.com/pdf/H2_AN201503300009006055_1.pdf. (in Chinese)
- [14] 《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册-重量平衡与控制[M].北京:航空工业出版社,2002:26-28.
Editorial Board of Aircraft Design Manual. Aircraft design manual -Weight balance and control [M]. Beijing: Aviation

Industry Press, 2002: 26-28. (in Chinese)

机总体布置，材料选择，复合材料结构设计。

作者简介

Tel: 010-57808108

吴晓光(1970—) 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞

E-mail: wxg97wxg@126.com

Economic Research on the Space Layout in Civil Aircraft

WU Xiaoguang*

Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute of COMAC, Beijing 102211, China

Abstract: The civil aircraft is in the widening and enlarging process now, the inside spaces which cannot be used in the narrow body aircraft, will be reused in the wide body aircraft. By the economic evaluation to the civil aircraft's space, reallocate and reuse these spaces will promote the revenue capability of the aircraft without increasing the cost of the aircraft. After review to the annual reports of several Chinese airlines, found the cabin space's revenue capability was better than the cargo space's, and the other spaces nearly do not have the revenue capability. So this point is one of the principles to the civil aircraft's space layout designing.

Key Words: civil aircraft; space; layout; reallocate; economic

Received: 2016-01-10; Accepted: 2016-02-10

*Corresponding author. Tel. : 010-57808108 E-mail: wxg97wxg@126.com