

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.03.017

## 多目标约束下的民机舱室气流组织优化研究

周 月<sup>1,2</sup> 张鹤林<sup>1,2</sup> 庞丽萍<sup>3</sup>

(1. 航空工业南京机电液压工程研究中心, 南京, 211106; 2. 航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京, 211106;  
3. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京, 100191)

**摘要:** 民机客舱内的气流组织和人体热舒适性受到送风形式、送风温度和风量等多种因素的影响。在现代民机舱室设计中, 客舱新风的送风形式很大程度上逐渐受限于舱室美学设计方案。本文采用 CFD 流体仿真技术, 结合客舱内饰设计对民机客舱的热环境和舱内人体热舒适性进行研究。本文建立了适用于民机客舱热环境仿真的多目标优化方法, 对新型行李箱结构设计下的顶部送风口的位置进行优化分析, 优化结果能够明显改善民机客舱内的空气分布和乘客的热舒适性。研究发现新型行李箱结构会使得顶部新风产生贴壁流动的康达效应。康达效应会很大程度上改变顶部新风的流动轨迹, 影响新风利用率和乘客的舒适性。

**关键词:** 民机舱室; 气流组织; 热舒适性; 空气质量; 送风系统优化

**中图分类号:** V223.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2019)03-0390-05

## Air Distribution Optimization for Civil Aircraft Cabin Based on Multi Objective Constraints

ZHOU Yue<sup>1,2</sup>, ZHANG Helin<sup>1,2</sup>, PANG Liping<sup>3</sup>

(1. AVIC Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing, 211106, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing, 211106, China; 3. School of Aeronautics Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100191, China)

**Abstract:** Air distribution and thermal comfort of human body in a civil aircraft cabin are affected by many factors, such as ventilation air temperature, air distribution system and air flow, etc. In these factors, the air distribution mode is largely limited by the interior aesthetics design results in model civil aircraft design. It is very necessary to optimize the air distribution mode for the civil aircraft. This paper adopts a new CFD fluid simulation technology, which is combined with cabin aesthetics design, to carry the thermal comfort design study for civil aircraft cabin. A multi-objective optimization method is used to automatically realize the CFD optimization design for the air distribution mode. The optimal outlet position of air distribution mode can be obtained. The optimization results can improve the air distribution performance and cabin thermal comfort around passengers. In addition, study results also show that the Coanda effect will change the flow path of the air supply and affect the utilization rate of fresh air and the comfort of passengers.

**Key words:** aircraft cabin; air distribution; thermal comfort; air quality; air supply system optimization

伴随着飞机出行方式的普及, 飞行过程中的舒适性已经成为绝大多数乘客选择飞机航班的重要标准之一<sup>[1-3]</sup>。在这种情况下, 民机客舱热环境优化设计在现代航空工业中占据了越来越重要的位

置, 欧洲政府针对民机客舱热环境开展了两个著名的工程研究项目<sup>[4]</sup>。另外, 包括波音和空客在内的各大航空公司也不断着力加大民机客舱热环境研究与提高, 民机客舱热环境逐渐成为了各个航空公

**收稿日期:** 2017-09-19; **修订日期:** 2018-03-27

**通信作者:** 周月, 女, 工程师, E-mail: yuehao20103@163.com。

**引用格式:** 周月, 张鹤林, 庞丽萍. 多目标约束下的民机舱室气流组织优化研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3): 390-394. ZHOU Yue, ZHANG Helin, PANG Liping. Air Distribution Optimization for Civil Aircraft Cabin Based on Multi Objective Constraints[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3): 390-394.

司市场竞争的重要因素。因此,民机客舱乘客热舒适性优化与设计研究已经成为现代民机客舱热环境设计中不可或缺的重要步骤。

乘客的热舒适性主要与人体周围的空气温度和空气流动速度有关。而空气温度与空气流动速度往往由民机舱室环境内气流组织分布有关。民机客舱舱室环境是一个包含有多热源、多换热方式和多干扰因素的复杂环境。在这个高人群密度的狭小环境中,导热换热、强制对流换热、自然对流换热、辐射换热等多种换热方式同时发生,且乘客的高频率走动使得舱室内的空气流动扰动非常大<sup>[5]</sup>。因此不论是实验研究还是仿真研究,对如此复杂的民机客舱气流组织的研究多数建立在静态环境和人体静坐的假设条件下。在此基础上,民机舱室气流组织分布往往由舱室内部构型、舱室送风形式、舱室送风口位置、送风角度、风量和温度等主要因素决定<sup>[6-7]</sup>。然而,民机客舱中乘客的舒适性体验不仅仅包含热舒适性感觉,还包括民机客舱内部的美学设计。民机客舱美学设计主要有对舱室内部构型设计、灯光样式与位置设计、座位排布设计等方面,而这些设计结果又会反过来对客舱气流组织优化产生影响和限制。

大多数民机客舱气流组织仿真研究都仅仅是对两个或3个仿真模型的结果进行比较分析。极少数学者会通过10个以上仿真模型的计算结果来对客舱内的空气流动进行研究。本文将目光集中在民机客舱新型送风形式下,建立民机客舱仿真模型。针对行李箱设计结构对民机舱室内气流组织的影响进行研究,通过优化算法,经过对近30个不同的送风结构形式分别进行CFD仿真优化后,最终获得最优的顶部送风口的位置,并对不同送风角度下客舱内的热环境进行对比分析。

## 1 民机客舱模型

### 1.1 民机客舱几何模型

本文研究的民机客舱模型是基于B737-800单通道新型客舱布局,如图1(a)所示。行李箱结构采用新型美学设计形式,以增大舱室空间宽敞度。舱室共有两种类型的送风口,安装于天花板上的两列顶部送风口和安装于侧壁面上的两列侧壁送风口。顶部送风口由两列对称的细小条缝组成,沿长度方向均匀分布的条缝。侧壁送风口沿水平方向送风。进入舱室的新风在与舱室和乘客换热后由位于侧壁底部回风口排出。

### 1.2 送风口安装位置变化范围

送风口的位置直接影响了客舱内部的气体流场和热舒适场分布。如图1所示,送风口安装位置

变化范围主要集中在天花板上。对于本文研究的单通道客机,顶部送风口相对中轴线对称分布。天花板区域的细节和顶部送风口的参数化如图1(b)所示。设置顶部送风口与天花板边界之间的长度约束 $l$ 。这样长度 $l$ 值的改变就能直接改变顶部送风口的相对位置。同时在Catia模型中天花板也通过Catia中特殊的Wireframe and Surface Design模块建立,保证在顶部送风口相对位置改变的情况下整体舱室结构的完整性。半边天花板的长度大约为700 mm。顶部送风口的位置在开始点与结束点之间变换。

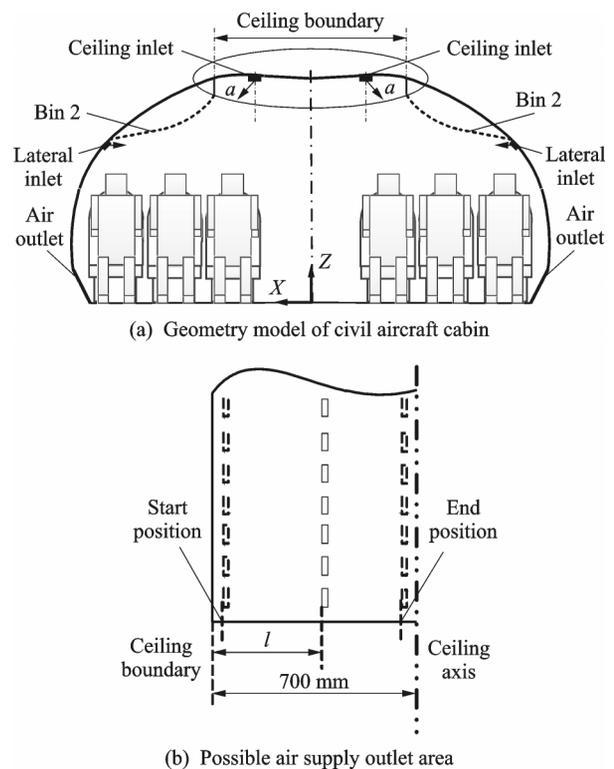


图1 民机客舱几何模型及可能送风口区域

Fig.1 Geometry model of civil aircraft cabin and possible air supply outlet area

### 1.3 边界条件

舱室总送风量按适航标准确定,送风温度为 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其中顶部送风量占75%,侧壁送风量占25%。舱室各边界的表面温度均为某次航班中实机实验测量所得。地板温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;天花板温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;侧壁面温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑实际飞行过程中乘客可能会有少量的起身活动,本文取 $75\text{ W/m}^2$ 为客舱乘客代谢率。顶部送风口和行李侧壁送风口为速度边界条件,速度分别为 $2.9\text{ m/s}$ 和 $0.7\text{ m/s}$ 。

## 2 民机舱室送风系统多目标优化

### 2.1 目标函数

对民机客舱热环境的评价方法和目标函数的选择十分关键。民机客舱中乘客的舒适性取决于

多个变量因素。这些相互影响和制约,并在客舱中形成了多个十分复杂的耦合物的理场。这就使得对民机客舱热环境的评价必须使用多目标函数的方法。本文选用两个目标函数对客舱内热环境进行综合评价。其中一个目标函数选用丹麦教授Fanger的PMV热舒适预测评价模型<sup>[8]</sup>。PMV函数包含了人体周围的空气压力、湿度、温度和风速等多个关键因素,是一个耦合作用下的评价函数。然而PMV模型并没有将人体周围的空气质量考虑在内,而空气质量也是反映人体舒适性的重要指标之一。借助CFD计算中的被动标量概念<sup>[9-10]</sup>,本研究运用空气在某一位置处的停留时间反映该位置处的空气质量,并将其作为本文的另一个目标函数。

舱室目标函数PMV和空气龄通过预先建立在第中间排人体模型附近的检测点计算。每个人的PMV值采用该人周围 $P_1$ 、 $P_2$ 和 $P_3$ 三点的平均值,空气龄值采用 $P_1$ 和 $P_2$ 两点的平均值。因此,本文中的两个目标函数,最小平均空气龄值和最小平均PMV值可表示为

$$f_1(l) = \min(\bar{\phi}) = \min\left[\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \phi_{i,j}\right)\right] \quad (1)$$

$$f_2(l) = \min(\overline{\text{PMV}}) = \min\left[\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \text{PMV}_{i,j}\right)\right] \quad (2)$$

式中: $i$ 为第3排人体模型索引; $j$ 为人体模型周围测点索引。

## 2.2 优化变量

为了保证自动优化程序的顺利进行,仿真计算中顶部送风口的位置需要是可变动的。通过设置顶部送风口与天花板边界之间的长度约束 $l$ 所示,将顶部送风口的相对位置参数化,这样长度 $l$ 值的改变就能直接改变顶部送风口的相对位置。 $l$ 值将被作为优化变量输入到优化程序之中。天花板区域的细节和顶部送风口的参数化如图1(b)所示。半边天花板的长度大约为700 mm,顶部送风角度 $\alpha$ 。顶部送风口的开始位置与结束位置没有相应的与天花板边界和中轴线重合,这是因为仿真模型需要预留出一定距离才能保证网格划分的正确性。

## 2.3 优化方法

对于多目标函数的优化问题,由于目标函数之间耦合作用的存在,很难得到单个的最优解,而是一系列的最优解集。这种多目标函数优化下的最优解集被称为帕累托前沿。因此要得到较为准确的优化结果,就需要大量的计算工况,这对计算机来说是一个非常庞大的计算量。如果对每个顶部

送风口位置工况都进行计算,将需要花费大量的时间。

本文采用一种名为微遗传算法的优化方法,该方法能够大大降低得到最优解集所需计算的工况个数,从而降低优化所需时间<sup>[11-12]</sup>。与遗传算法不同,微遗传算法中每一代所需要的个体数更少,收敛速度更快。在本文的优化研究中微遗传算法通过对上一代优化变量和目标函数的分析,在约束条件内生成新一代的优化变量值,并将这些值输入到CFD软件中用以建立新的仿真计算模型。本研究采用的微遗传算法中每一代种群有5个个体。图2展示了微遗传优化算法的计算流程。

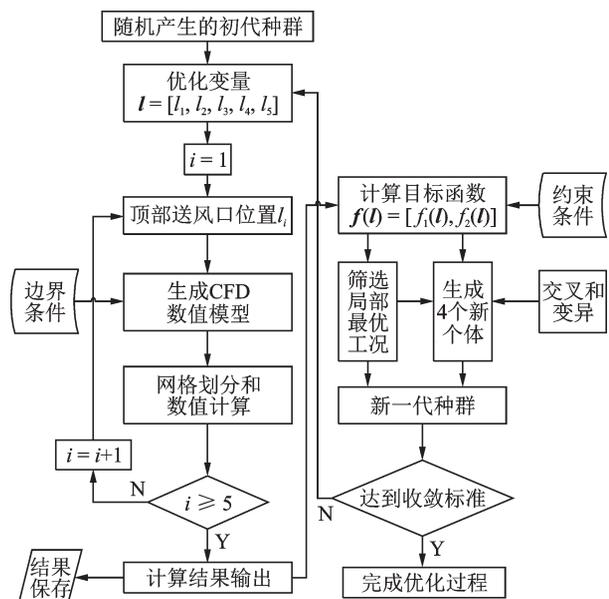


图2 基于微遗传算法的送风系统优化流程

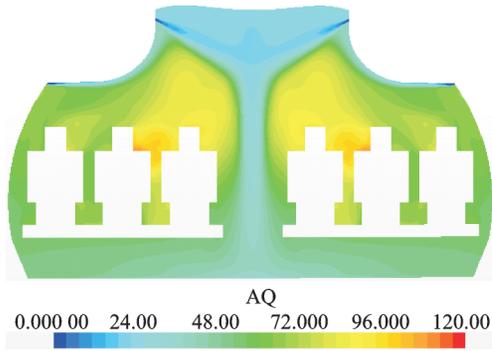
Fig.2 Optimization process of air supply system based on micro genetic algorithm

## 3 优化结果分析

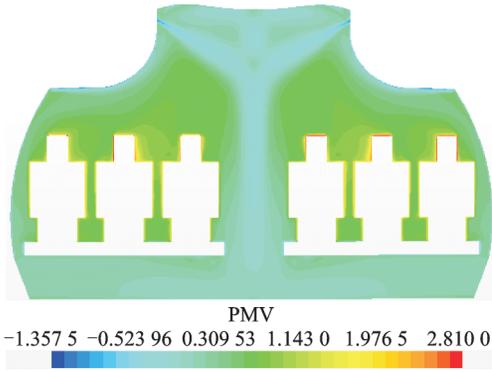
### 3.1 传统送风口位置仿真结果

为了便于比较,本文首先给出单通道传统的送风口位置下的送风结构,送风口一般位于行李箱上部。在这样的舱室气流组织下形成的空气龄场和PMV场如图3所示。

从上述云图中能够清楚地看出在传统送风模式中空气流动趋势是:顶部的两股新风在过道上方交汇后垂直向下流动,之后沿着地板流向出口位置。侧壁新风在喷出后没有向人体区域扩散,而是因为康达效应而向天花板区域流动并与顶部新风汇合。侧壁新风的这种流动轨迹也与Kuhn等<sup>[13]</sup>的结果吻合。在这种空气分布下新风主要集中在过道及地面区域,而进入人体区域的新风较少。这就导致人体周围的空气龄和PMV热感都偏高,头脚温差大等现象的出现。



(a) Nephogram of air age



(b) Nephogram of PMV

图 3 传统送风口仿真计算结果

Fig.3 Simulation results of traditional air supply port

### 3.2 送风系统优化结果

采用图 2 所示的微遗传算法,本文在新型行李箱结构的优化中仅采用顶部 30°送风角度的条件,最终获得的帕里托优化结果如图 4 所示。

图 4 中的优化结果,以帕里托散点图的形式给出。图 4 中 PMV 值变化范围为 0.23~0.52,空气龄变化范围为 36.76~66.31。圈的大小代表代数。

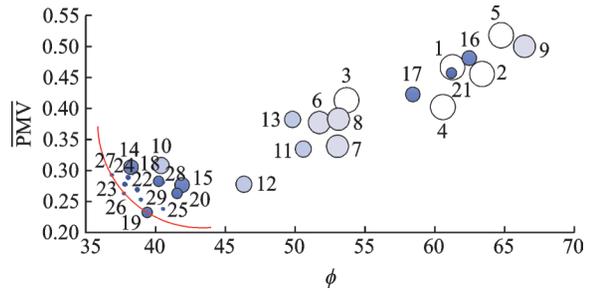


图 4 优化结果图

Fig.4 Optimization result

如希望从多目标优化结果中筛选出最优解,一定是多目标折衷的结果。因此,最终设计点主要集中在图 4 所示的红色前缘附近,如设计点 27,23,26,19 等。最终选定工况 19 为最优计算结果。

在此优化中,当能量标准残差和设为小于  $10^{-6}$ ,其他为  $10^{-3}$  时,所有 CFD 计算当迭代次数达到 1 000 步时,都能达到非常的收敛结果。图 5 给出了工况 19 的收敛曲线。

最优设计工况 19 的速度、空气龄和 PMV 云图如图 6 所示。

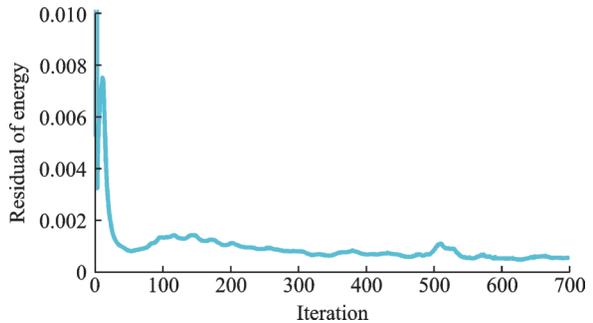


图 5 工况 19 的收敛曲线

Fig.5 Convergence curve of operating condition 19

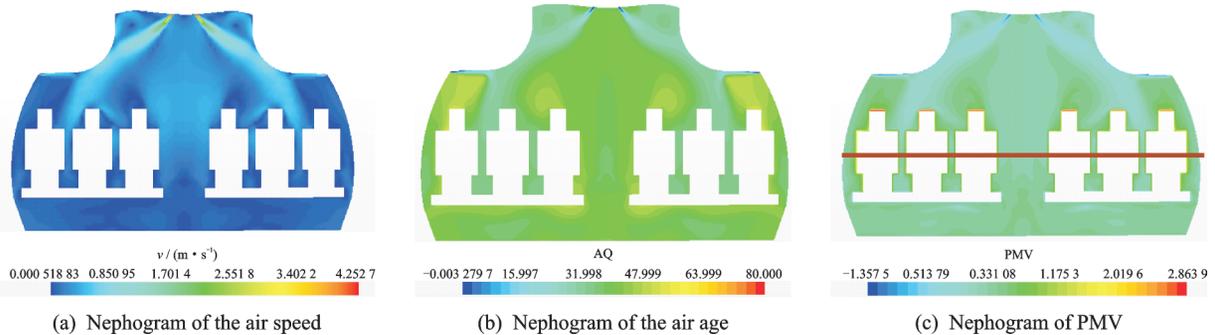


图 6 工况 19 最优设计工况的仿真结果

Fig.6 Simulation results of operating condition 19

图 6 所示的优化设计点云图与图 3 相比表明:采用优化后的送风形式向客舱输送新风能够使人体周围的空气龄和 PMV 值都更低,人体热舒适性更好;新风能够有效地进入人体周围区域,增加该区域换气速率,较小污染气体的停留时间,大大提高了新风利用率。为了更直观地比较图 3 传统送

风形式和图 6 优化送风形式下人体周围的热感,本文在人体模型胸前 0.1 m,高 0.9 m 的位置建立一条检测线,如图 6(c)所示,该检测线上 PMV 分布如图 7 所示。图 7 能够直观地看出 2 种不同的送风模式下人体附近的热舒适程度。在人体区域内,传统送风形式下人体周围的 PMV 值都较高,超出

了+0.5的舒适值;而在过道区域的PMV又非常低,甚至在0以下。这表明,传统送风下舱内热感分布极不均匀,新风利用率非常低。相反,优化送风形式下的PMV分布都集中在0~+0.3的舒适区间内,人体区域内的PMV值更加接近与舒适值0,舱室内热感分布均匀性好。图6的对比结果清楚地表明顶部送风角度为30°时能够明显改善民航客舱内的热环境状况。

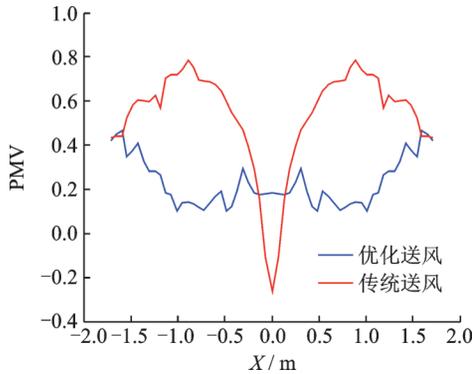


图7 传统送风与优化结果比较

Fig.7 Comparison between traditional air supply optimization results

## 4 结 论

本文结合民航中内饰设计对客舱内热环境进行研究,并运用基于多目标函数的微遗传算法原理对客舱送风系统进行优化。研究结果表明民航客舱内饰美学设计方案会对舱内气流组织分布产生直接影响。通过本文研究可以得出以下结论:

(1)民航客舱不同行李箱结构和灯光位置设计方案下,舱内空气的流动轨迹有着很大的差异。新型行李箱结构会舱内气流产生康达效应,使得在该行李箱设计下顶部送风口的最优位置产生变动。因此客舱结构美学设计和到客舱送风系统设计需要考虑到两者彼此之间的相互影响作用。

(2)乘客周围空气质量和热舒适性与达到人体周围的新风量密切相关。在一定程度内,到达人体周围的新风量越大乘客的舒适性就越高。但仍需要注意过高的新风量还会导致乘客产生强烈的吹风感而降低其舒适程度。

(3)在同一舱室结构下,顶部送风口位置和角度的变化会对舱内热环境分布产生很大影响。本文优化结果显示顶部30°角的送风模式。本文采用的优化方法能够有效地对民航客舱顶部送风口位置进行优化。优化结果能够得出顶部送风口的最佳位置,较大程度的提高客舱内乘客周围的空气质

量和热舒适性。

## 参考文献:

- [1] MUIJDENJ V. Modeling the impact of aircraft cabin pressure and humidity on thermal comfort[R]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory (NLR), 2011.
- [2] UCHIYAMA E, ARONOWICZ J D, BUTOVICH I A, et al. Increased evaporative rates in laboratory testing conditions simulating airplane cabin relative humidity: an important factor for dry eye syndrome [J]. Eye & Contact Lens, 2007, 33(4): 174-176.
- [3] MARGGRAF M C, PIEWALD C, WINZEN J, et al. Thermal comfort in the aircraft-cabin—Research in the Do 728 cabin-mock-up [R]. Hamburg: German Aero-space Center, 2010.
- [4] PARK S, HELLWIG R T, GRUN G, et al. Local and overall thermal comfort in an aircraft cabin and their interrelations[J]. Building and Environment, 2011, 46(5): 1056-1064.
- [5] MAZUMDAR S, CHEN Q. Impact of moving bodies on airflow and contaminant transport inside aircraft cabins[C]//Proceedings of Roomvent 2007. Helsinki: [s.n.], 2007: 13-15.
- [6] ZHANG T, CHEN Q. Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins[J]. Building and Environment, 2007, 42(4): 1675-1684.
- [7] ZHANG Y, SUN Y, WANG A, et al. Experimental characterization of airflows in aircraft cabins. Part II: Results and research recommendation [J]. ASHRAE Transactions, 2005, 111: 53-59.
- [8] FANGER P O. Thermal comfort analysis and application in environment engineering [M]. Copenhagen: Danish Technology Press, 1970.
- [9] WARHAFT Z. Passive scalars in turbulent flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000, 32(1): 203-240.
- [10] SHRAIMAN B I, SIGGIA E D. Scalar turbulence [J]. Nature, 2000, 405(6787): 639-646.
- [11] PARK S W. Optimization of combustion chamber geometry for stoichiometric diesel combustion using a micro genetic algorithm[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(11): 1742-1752.
- [12] GOLDBERG D E. Genetic algorithm in search optimization, and machine learning [M]. New Jersey: Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [13] KUHN M, BOSBACH J, WAGNER C. Experimental parametric study of forced and mixed convection in a passenger aircraft cabin mock-up [J]. Building and Environment, 2009, 44(5): 961-970.