

12-12-2019

Airplane Pre-conditioning Optimizing Control Based on Large-scale System Theory

Xiuyan Wang

1. School of Electronics Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;;2. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Gewen Zhang

1. School of Electronics Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;;2. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Zhou Chen

1. School of Electronics Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;;

Zongshuai Li

1. School of Electronics Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Airplane Pre-conditioning Optimizing Control Based on Large-scale System Theory

Abstract

Abstract: Aiming at airplane pre-conditioning optimizing control, a modified OPBM (*Output Prediction and Balance Method*) was introduced. Taking Boeing 737 airplane pre-conditioning as the research subject, the decentralized identification algorithm was adopted for *establishing the airplane pre-conditioning large-scale system model; the optimal objective considering the system energy consumption, air conditioning area human comfort, and air quality was proposed; and the global system optimization operating condition model was constructed. The OPBMLF with local feedback was designed to optimize globally airplane pre-conditioning system model.* Matlab was used for achieving simulation research, and the results was compared with the real data. The results showed that the optimal control strategy can minimize the energy consumption of the system under the condition of meeting the environmental requirements, which verifies its effectiveness.

Keywords

modified OPBM, airplane pre-conditioning, optimizing control, large-scale system, globally optimizing model

Authors

Xiuyan Wang, Gewen Zhang, Zhou Chen, Zongshuai Li, and Yanmin Liu

Recommended Citation

Wang Xiuyan, Zhang Gewen, Zhou Chen, Li Zongshuai, Liu Yanmin. Airplane Pre-conditioning Optimizing Control Based on Large-scale System Theory[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(6): 1239-1248.

基于大系统理论飞机地面专用空调优化控制

王修岩^{1,2}, 张革文^{1,2}, 周琛¹, 李宗帅¹, 刘艳敏¹

(1. 中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

摘要: 针对飞机地面专用空调优化控制的问题, 将改进 OPBM (*Output Prediction and Balance Method*) 引入到飞机地面专用空调系统优化中。以波音 737 飞机地面专用空调为对象, 采用分散辨识法, 建立空调大系统数学模型, 提出了同时考虑空调系统能耗与空调区域热舒适性的优化目标, 建立了空调系统全局优化运行模型, 设计带局部反馈的 OPBMLF 对模型进行了优化求解。利用 Matlab 进行仿真研究, 研究结果与实际数据进行对比, 结果表明优化控制策略能够在满足环境需求的情况下, 实现系统能耗最小, 验证了其有效性。

关键词: 改进 OPBM; 飞机地面专用空调; 优化控制; 大系统; 全局优化模型

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 06-1239-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0216

Airplane Pre-conditioning Optimizing Control Based on Large-scale System Theory

Wang Xiuyan^{1,2}, Zhang Gewen^{1,2}, Zhou Chen¹, Li Zongshuai¹, Liu Yanmin¹

(1. School of Electronics Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at airplane pre-conditioning optimizing control, a modified OPBM (*Output Prediction and Balance Method*) was introduced. Taking Boeing 737 airplane pre-conditioning as the research subject, the decentralized identification algorithm was adopted for establishing the airplane pre-conditioning large-scale system model; the optimal objective considering the system energy consumption, air conditioning area human comfort, and air quality was proposed; and the global system optimization operating condition model was constructed. The OPBMLF with local feedback was designed to optimize globally airplane pre-conditioning system model. Matlab was used for achieving simulation research, and the results was compared with the real data. The results showed that the optimal control strategy can minimize the energy consumption of the system under the condition of meeting the environmental requirements, which verifies its effectiveness.

Keywords: modified OPBM; airplane pre-conditioning; optimizing control; large-scale system; globally optimizing model

引言

随着我国民航事业的快速发展, 乘客对飞行



收稿日期: 2017-05-15 修回日期: 2017-09-08;
作者简介: 王修岩(1965-), 男, 吉林农安, 博士, 教授, 研究方向为非线性系统建模与控制; 张革文(1992-), 男, 江西吉安, 硕士生, 研究方向为控制理论与控制工程; 周琛(1992-), 女, 山东东营, 硕士生, 研究方向为控制理论与控制工程。

舒适体验的要求日益增加。民航客机在机坪过夜检修或在机场待飞, 都需要有新鲜空气送入客舱, 一方面能够满足客舱内人员的基本新风量需求, 另一方面能散去机内设备的部分热量从而保证环境的舒适性。民航客机在航前、航后和过站阶段, 通常使用机载辅助动力装置 APU (auxiliary power unit)^[1]为其提供空调, 为了响应国家政策和贯彻中国民用航

空局节能减排精神, 使用飞机地面专用空调代替机载 APU 来进行客舱内环境的控制, 地面专用空调使用工业用电, 机载 APU 消耗航空燃油, 根据 IATA (国际航协) 数据显示, 在全负荷运行条件下, 地面专用空调消耗的费用为机载 APU 的 1/5, 因此使用地面专用空调存在节能减排与减低成本的优点。

空调系统具有滞后性、大惯性以及非线性特点, 常规的控制方法导致空调与环境所需能量不平衡, 既浪费了能量也不能达到满意的效果。目前空调系统的控制方法主要有传统 PID 控制、自适应模糊 PID 复合控制^[2]以及回归分析预测控制^[3]、神经网络预测控制^[4]等基于多种预测方法的控制模型。国外的 Honeywell 等公司的控制系统中, 越来越多的工程师采用的是一种基于神经网络的参数自适应 PID 控制方法, 目前该方法仍停留在仿真阶段, 缺少实效性的理论支持; 国内近年来的研究主要集中在空调系统的稳定性控制上, 优化控制方面的研究主要针对于空调系统的子系统, 对于整个空调系统的全局优化的研究方案较少。

飞机地面专用空调作为具有大滞后性、非线性、强耦合性的系统, 是一个复杂的高维数系统, 近来出现的大系统理论能够有效地解决系统维数高和参数多的问题, 文章建立了基于大系统理论含有 4 个子系统的飞机地面专用空调数学模型, 设计了各子系统的延长预测步长模糊控制器, 采用递阶控制完成飞机地面专用空调大系统的协调控制, 并进行了仿真实验验证。

1 大系统的理论基础

假设一个系统可以被分解为一些相互关联的子系统, 则说明此系统能够属于一个大系统, 一般大系统处于一个优化周期过程中, 其系统模型变化不大, 所以可以看作时不变系统, 进行大系统稳态建模^[5]。采用数学模型

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(c_1, u_1) \\ F_2(c_2, u_2) \\ \vdots \\ F_n(c_n, u_n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

来描述一个大系统。

这个系统对应子系统的数学模型能够表示为

$$y_i = F_i(c_i, u_i) = A_i c_i + B_i u_i \quad (2)$$

$$u_i = \sum_{j=1}^N H_{ij} y_j \quad (3)$$

式中, y_i 为子系统 i 的输出变量; u_i 为子系统 i 的关联输入变量; c_i 为子系统 i 的控制变量; H_{ij} 为布尔型矩阵; F_i 为子系统 i 的输入输出映射。

本设计中采用分散辨识法, 通过设计大系统的关联输入、关联输出以及设定点的阶跃信号, 来确定系统的稳态模型^[6]。

通过协调控制, 大系统中的子系统间相互制约、相互协作, 在完成子系统目标的基础上实现全局总目标, 其原理如图 1 所示。

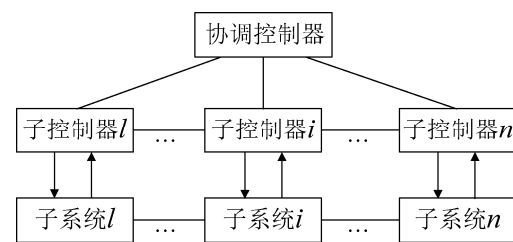


图 1 大系统递阶协调控制原理

Fig. 1 Hierarchical coordination control principle of large scale systems

2 飞机地面专用空调模型建立

2.1 飞机地面专用空调递阶结构分解

飞机地面专用空调系统分解如图 2 所示。

根据大系统递阶优化方法, 分析空调系统中各部分的工作原理与关联性, 将系统分解为 4 个子系统: 制冷子系统 1、制冷子系统 2、送风子系统和末端子系统。飞机地面专用空调系统分解原理如图 3 所示。

2.2 飞机地面专用空调大系统模型

对于空调大系统来说, 模型在优化周期内近似不变, 其各个子系统为:

$$y_i = F(c_i, u_i) = A_i c_i + B_i u_i$$

$$u_i = \sum_{j=1}^N H_{ij} y_j \quad (4)$$

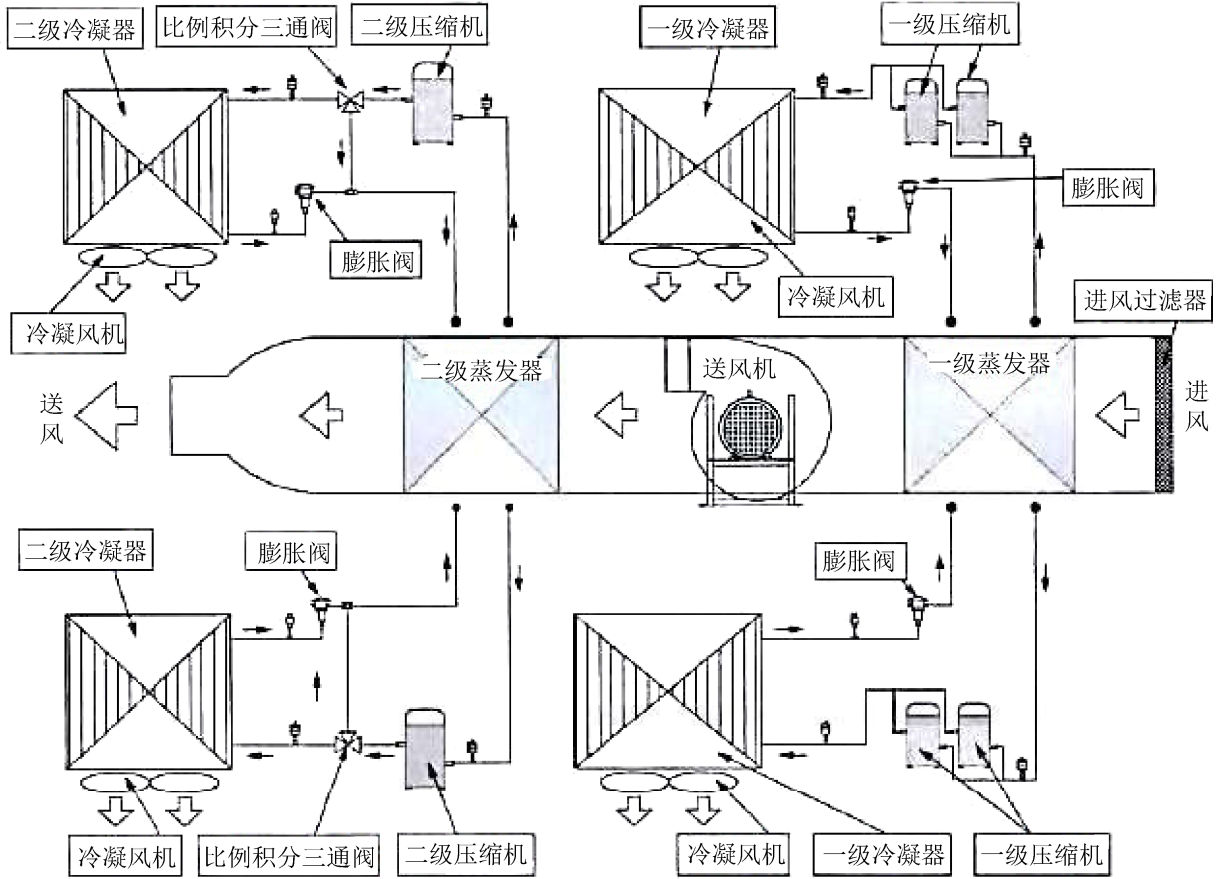


图 2 飞机地面专用空调系统模型
Fig. 2 Airplane pre-conditioning system model

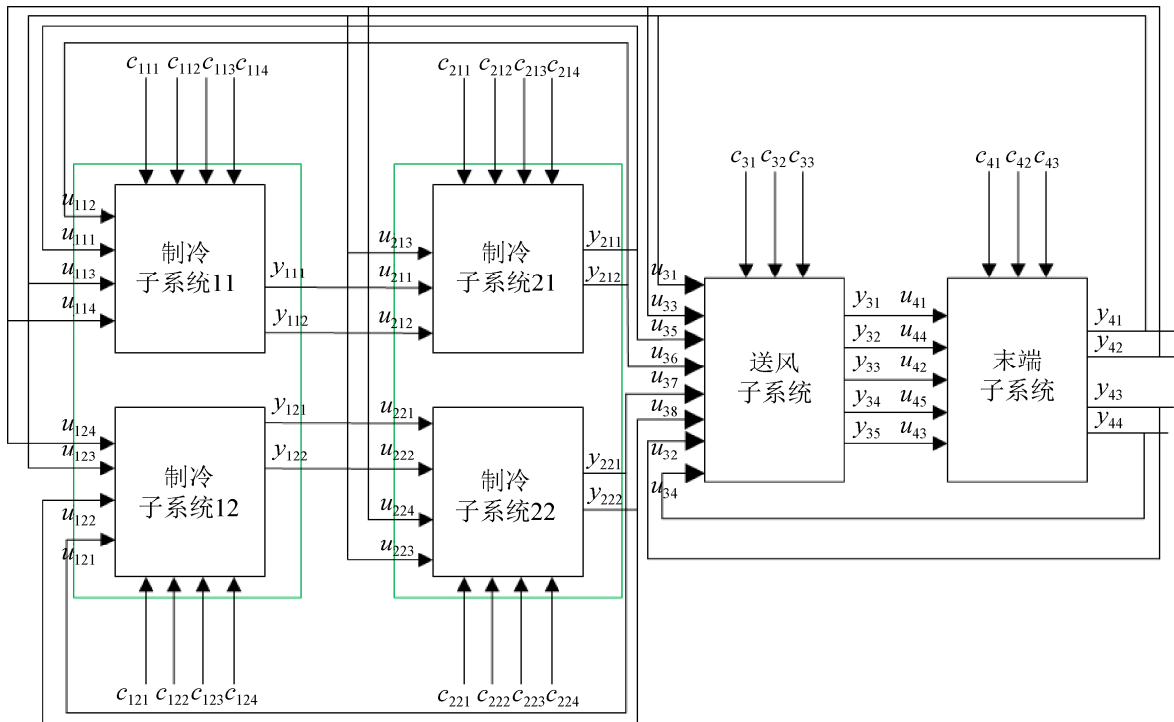


图 3 地面空调系统工作原理分解图
Fig. 3 Working principle decomposition diagram of airplane pre-conditioning system

<http://www.china-simulation.com>

式(4)的紧凑型表达式为

$$y=F(c, u)=Ac+Bu, u=Hy \quad (5)$$

将各子系统采用大系统理论分别描述为

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(c_1, u_1) \\ F_2(c_2, u_2) \\ F_3(c_3, u_3) \\ F_4(c_4, u_4) \end{bmatrix} = A_i c_i + B_i u_i \quad (6)$$

$$u_i = \sum_{j=1}^4 H_{ij} y_j \quad (i=1,2,3,4)$$

对于制冷子系统 1 来说:

$$y_1 = \begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{12} \end{bmatrix}, c_1 = \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{12} \end{bmatrix}, u_1 = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \end{bmatrix}$$

$$y_{11} = \begin{bmatrix} y_{111} \\ y_{112} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{OU1} \\ V_{OU1} \end{bmatrix}, y_{12} = \begin{bmatrix} y_{121} \\ y_{122} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{OU2} \\ V_{OU2} \end{bmatrix}$$

$$c_{11} = \begin{bmatrix} c_{111} \\ c_{112} \\ c_{113} \\ c_{114} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{1wj1} \\ U_{od1} \\ f_{str1} \\ f_{gtr2} \end{bmatrix}, c_{12} = \begin{bmatrix} c_{121} \\ c_{122} \\ c_{123} \\ c_{124} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{1wj2} \\ U_{od2} \\ f_{str3} \\ f_{gtr4} \end{bmatrix}$$

$$u_{11} = \begin{bmatrix} u_{111} \\ u_{112} \\ u_{113} \\ u_{114} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{OU3} \\ V_{OU3} \\ T_{in} \\ R_{in} \end{bmatrix}, u_{12} = \begin{bmatrix} u_{121} \\ u_{122} \\ u_{123} \\ u_{124} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{OU4} \\ V_{OU4} \\ T_{in} \\ R_{in} \end{bmatrix}$$

对于送风子系统来说:

$$y_3 = \begin{bmatrix} y_{31} \\ y_{32} \\ y_{33} \\ y_{34} \\ y_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{sa} \\ P_{sa} \\ R_{sa} \\ V_{sa} \\ C_{sa} \end{bmatrix}, c_3 = \begin{bmatrix} c_{31} \\ c_{32} \\ c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{wm} \\ U_{war1} \\ U_{war2} \end{bmatrix}$$

$$u_3 = \begin{bmatrix} u_{31} \\ u_{32} \\ u_{33} \\ u_{34} \\ u_{35} \\ u_{36} \\ u_{37} \\ u_{38} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{in} \\ C_{in} \\ R_{in} \\ P_{in} \\ T_{OU3} \\ V_{OU3} \\ T_{OU4} \\ V_{OU4} \end{bmatrix}$$

其他子系统情况类似。

式中: T_{ou1} , T_{ou2} 为通过制冷子系统 11, 12 的出风温度; V_{ou1} , V_{ou2} 为通过制冷子系统 11, 12 的出风

速度; f_{str1} , f_{str2} , f_{str3} , f_{str4} 为压缩机 1, 2, 3, 4 的工作频率; f_{1wj1} , f_{1wj2} 为冷凝风机 11, 12 的工作频率; U_{od1} , U_{od2} 为膨胀阀 11, 12 的开度; T_{in} 为舱内温度; R_{in} 为舱内湿度; T_{sa} , P_{sa} , R_{sa} , V_{sa} , C_{sa} 分别为送风温度、送风管道静压、送风湿度、送风风速、送风 CO_2 浓度; f_{wm} 为鼓风机的频率; U_{war1} , U_{war2} 表示为加热器 1, 2 的开度; T_{in} 为舱内温度; R_{in} 为舱内湿度; C_{in} 为舱内 CO_2 浓度; P_{in} 为舱内气压。本空调系统中压缩机为变频系统, 采用的是变频旋涡式压缩机, 频率范围 40~80 Hz。冷凝风机同样为变频系统, 膨胀阀为电子膨胀阀, 采用脉冲电机驱动, 阀的开度从完全闭合到开启对应 0~240 次脉冲, 因此, 对于 $[f_{str1}, f_{str2}, f_{str3}, f_{str4}, f_{1wj1}, f_{1wj2}, U_{od1}, U_{od2}]$ 均为变量, 鼓风机为变频系统, 采用的是变频器启动, 可使得鼓风机根据空调机组负荷调整风机转速, 相比传统风量调节提高了控制精度, 还能够节约电力资源。

根据大系统分散辨识的原理, 在夏季工况下, 将子系统的设定点 c_1 , c_3 的阶跃信号分别选取

$$\delta_{11}^1 = c_{11}^1 = \begin{bmatrix} 15 \\ 25 \\ 10 \\ 20 \end{bmatrix}, \delta_{11}^2 = c_{11}^2 = \begin{bmatrix} 25 \\ 25 \\ 10 \\ 15 \end{bmatrix}$$

$$\delta_{11}^3 = c_{11}^3 = \begin{bmatrix} 15 \\ 35 \\ 25 \\ 10 \end{bmatrix}, \delta_{11}^4 = c_{11}^4 = \begin{bmatrix} 25 \\ 25 \\ 20 \\ 10 \end{bmatrix}, \delta_{11}^5 = c_{11}^5 = \begin{bmatrix} 15 \\ 20 \\ 10 \\ 30 \end{bmatrix}$$

$$\delta_{12}^1 = c_{12}^1 = \begin{bmatrix} 15 \\ 25 \\ 10 \\ 20 \end{bmatrix}, \delta_{12}^2 = c_{12}^2 = \begin{bmatrix} 25 \\ 25 \\ 10 \\ 15 \end{bmatrix}$$

$$\delta_{12}^3 = c_{12}^3 = \begin{bmatrix} 15 \\ 35 \\ 25 \\ 10 \end{bmatrix}, \delta_{12}^4 = c_{12}^4 = \begin{bmatrix} 25 \\ 25 \\ 20 \\ 10 \end{bmatrix}, \delta_{12}^5 = c_{12}^5 = \begin{bmatrix} 15 \\ 20 \\ 10 \\ 30 \end{bmatrix}$$

$$\delta_3^1 = c_3^1 = \begin{bmatrix} 20 \\ 25 \\ 45 \end{bmatrix}, \delta_3^2 = c_3^2 = \begin{bmatrix} 35 \\ 45 \\ 25 \end{bmatrix}$$

$$\delta_3^3 = c_3^3 = \begin{bmatrix} 25 \\ 50 \\ 25 \end{bmatrix}, \delta_3^4 = c_3^4 = \begin{bmatrix} 25 \\ 35 \\ 55 \end{bmatrix}$$

c_2 、 c_4 选取方式相同, 确定出各子系统模型, 制冷子系统 1 大系统模型如下, 其他子系统模型类似:

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{12} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0.0190 & 0.5326 & 0.1160 & -0.1005 \\ 0.0422 & 4.7520 & 0.3125 & 0.0273 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 0.0057 & 0.7016 & 0.1923 & -0.1150 \\ 0.0238 & 5.1250 & 0.1457 & 0.0164 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & B_{12} \end{bmatrix}$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} 0.1086 & 0.0103 & -0.0021 & 0.7427 \\ -0.0425 & 0.0099 & 0.0104 & 0.0095 \end{bmatrix}$$

$$B_{12} = \begin{bmatrix} 0.1082 & 0.0109 & -0.0037 & 0.6932 \\ -0.0421 & 0.0097 & 0.0093 & 0.0078 \end{bmatrix}$$

3 飞机地面专用空调优化控制

3.1 飞机地面专用空调优化目标分析

飞机地面专用空调优化的总目标分为三部分, 分别是系统总能耗、空气品质及热舒适度, 其决策如图 4 所示。

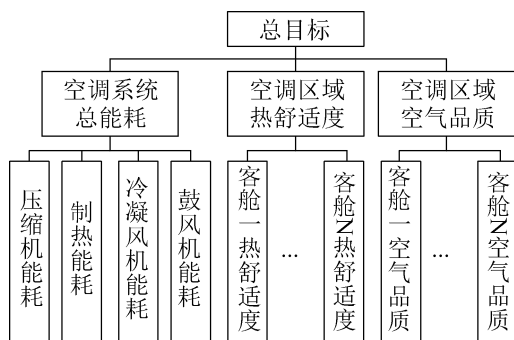


图 4 空调系统多目标决策图

Fig. 4 Multi-objective decision diagram of air conditioning system

空调系统总能耗有制冷能耗、制热能耗、冷凝风机能耗以及鼓风机能耗等。空气品质和热舒适性主要与空调区域的舱内空气质量有关, 对系统进行

全局优化时, 需要同时考虑这几个方面, 才能得出各个控制量的最优解, 完成运行最优的策略。

飞机地面专用空调系统优化的目标是在满足空气品质与热舒适性的前提, 实现降低系统总能耗输出。飞机地面专用空调主要能耗输出有冷凝风机能耗、送风机能耗及制冷能耗等。主要优化问题是以环境品质与舒适性为基础, 通过寻求送风温度, 送风速度, 静压, 压缩机频率及冷凝风机频率等参数的最优值, 从而确定系统总能耗最小。其中采用 PMV 指标进行热舒适性评价, 将 CO₂ 的相对浓度作为判断空气品质的指标, 本系统中总体优化的目标函数表示为

$$N_{total} = \min \left\{ \alpha \left(\sum_{i=1}^{N_1} P_{tfan.i} + \sum_{i=1}^{N_2} P_{cfan.i} + \sum_{i=1}^{N_3} P_{wfan.i} \right) + \beta \left(\sum_{i=1}^{N_4} PMV_i \right) + \eta \left(\sum_{i=1}^{N_5} M_{co_2.i} \right) \right\} \quad (7)$$

式中, $P_{tfan.i}$ 为冷凝风机能耗; $P_{cfan.i}$ 为送风机能耗; $P_{wfan.i}$ 为制冷能耗; PMV_i 为机舱内热舒适度指标; $M_{co_2.i}$ 为机舱内 CO₂ 浓度指标; α , β , η 分别为能耗、热舒适度、空气品质的控制权系数, 根据不同工况下设计系数不同^[9]。

3.2 全局优化策略研究

基于大系统递阶控制理论的飞机地面专用空调控制原理如图 5 所示。

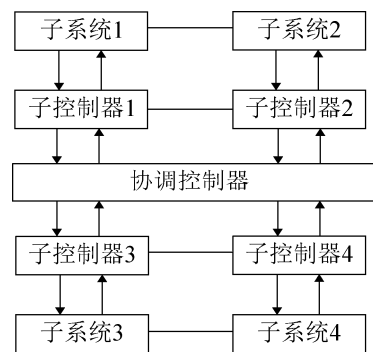


图 5 地面专用空调控制原理

Fig. 5 Control principle of airplane pre-conditioning

由图 5 可知, 整个大系统控制器由一个协调控制器及 4 个子控制器构成, 每个子控制器控制一个

子系统, 由局部决策单元寻找各自局部最优值, 发出局部指令, 采用延长预测步长模糊控制器, 而协调控制器作为大系统协调单元, 根据全局优化目标结合局部优化的结果完成全局优化, 确定最终全局优化值。

3.2.1 延长预测步长模糊控制

地面空调系统各子系统由于工作性能存在 k 步延迟, 控制作用滞后 k 个采样周期才能影响输出, 因而设计了的延长预测步长模糊控制器, 在模糊理论的基础上提前 k 步对输出做最优预测, 再根据预测输出与实际输出偏差及其变化量来设计当前控制作用。实际上, 在第 k 个采样周期时, 系统尚未产生输入, 当前的输入控制作用要在 k 的下一采样时刻产生作用。因而对有 k 步延迟对象作未来 k 步的最优预测存在较大误差, 可能会使控制作用幅度过大。同时, 在延迟时间未知, 并对其估计不准确时, 也很难确定预测步长。针对这种情况, 可以考虑适当延长预测步长, 对 $k+N$ 步的输出做最优预测, 并根据该预测输出设计当前时刻的控制作用。

3.2.2 改进 OPBM 协调优化算法

(1) OPBM 优化算法

根据关联平衡与预测法的原理, 预估关联输出结果, 建立两级 OPBM 算法。

下级: 对于初始赋予的 \hat{y} 、 $\hat{\lambda}$ 、 $\hat{\rho}$, 解

LP:

$$\min L_a(c, u, \hat{y}, \hat{\lambda}, \hat{\rho})$$

$$\text{s.t } (c, u) \in CU$$

∴

$$L_a(c, u, \hat{y}, \hat{\lambda}, \hat{\rho}) = \sum_{i=1}^N L_{a_i}(c_i, u_i, \hat{y}, \hat{\lambda}, \hat{\rho}) = \sum_{i=1}^N \{Q_i(c_i, u_i) + \hat{\lambda}_i^T (u_i - H\hat{y}) + \hat{\rho} \|u_i - H_i \hat{y}\|^2 + \hat{\lambda}_2^T [\hat{y}_i - F(c_i, u_i)] + \hat{\rho} \|\hat{y}_i - F(c_i, u_i)\|^2\} \quad (8)$$

因此, 可分解成 N 个独立的问题。

LP_i:

$$\min L_{a_i}(c_i, u_i, \hat{y}, \hat{\lambda}, \hat{\rho})$$

$$\text{s.t } (c_i, u_i) \in CU_i$$

上级: 寻找对偶函数 $\varphi(y, \lambda, \rho) \triangleq L_a(c, u, y, \lambda, \rho)$ 的鞍点 $(\hat{y}, \hat{\lambda})$, 因此分别利用 Newton 法与 Hestense 乘子规则进行 y 及 λ_1 , λ_2 的改进。

$$y^{k+1} = y^k - Q_k^{-1} \varphi_k(y^k, \lambda^k, \rho^k) \quad (9)$$

$$\lambda_1^{k+1} = \lambda_1^k + 2\rho^k (u^k - Hy^{k+1}) \quad (10)$$

$$\lambda_2^{k+1} = \lambda_2^k + 2\rho^k (y^{k+1} - F_i(c_i^k, u_i^k)) \quad (11)$$

式中: Q_k 是 $\varphi(y, \lambda, \rho)$ 关于 y 的 Hesse 阵。

(2) OPBM 算法的不足与改进

对于部分稳态大系统不易得出精确的数学描述, 这样 OPBM 算法就可能失去适用性, 全局反馈是每次模型修正后, 然后进行开环优化, 假设没有全部结束优化的前提下, 在下级问题解决后立即进行模型修正, 如此仅仅只是增加了下级计算量, 就解决了全局反馈中两级计算量都很大的问题。

系统的数学模型为 $y_i = F_i(c_i, u_i)$, 而实际关系 $y_i^* = F_i^*(c_i, u_i)$, 其中 $F_i^*(c_i, u_i)$ 同样是未知的。要满足 y^* 与 \hat{y} 一致性, 应该对模型进行修正, 同样采用引入位移因子的方式, 即为 $y_i = F_i(c_i, u_i) + s_i$, $s_i \in R_i$, 问题是寻找 \hat{s} 使其在修正后的下级问题的解加到实际系统中得出的实际输出 y^* 满足条件

$$\hat{y}_i = y^*(\hat{c}_i(\hat{s}_i, \hat{\lambda}_i), \hat{u}_i(\hat{s}_i, \hat{\lambda}_i)) = F_i(\hat{c}_i, \hat{u}_i) + \hat{s}_i \quad (12)$$

这时下级问题目标函数转变为

$$L_{a_i}(c_i, u_i, y, \lambda, \rho, s_i) = Q_i(c_i, u_i) + \lambda_1^T (u_i - H_i y) + \rho \|u_i - H_i y\|^2 + \lambda_2^T [y_i - F(c_i, u_i) - s_i] + \rho \|y_i - F(c_i, u_i) - s_i\|^2 \quad (13)$$

上级问题是找出对偶函数

$$\varphi(y, \lambda) = \sum_{i=1}^N L_{a_i}(c_i, u_i, y, \lambda, \hat{s}_i, \rho) \quad (14)$$

的鞍点 $(\hat{y}, \hat{\lambda})$ 。下级问题是对给定的 $\hat{y}, \hat{\lambda}, \hat{\rho}$ 求解 LP_i,

LP_i:

$$\min L_{a_i}(c_i, u_i, \hat{y}, \hat{\lambda}, \hat{\rho}, s_i)$$

$$\text{s.t } (c_i, u_i) \in CU_i$$

将结果送入协调器, 协调器采用双环迭代法, 先利用 OPBM 算法对一组 \hat{s}_i 求解, 将 c 与 u 施加到实际系统中, 得出的实际 y^* 与给定 \hat{y} 进行比较, 利用下式对位移因子修正 s_i , 最终使得 $y_i^* = \hat{y}_i$, 局

部反馈结构如图 6 所示。

$$s_i^{J+1} = s_i^J + [\hat{y}_i - F_i^*(c_i, u_i)] \quad (15)$$

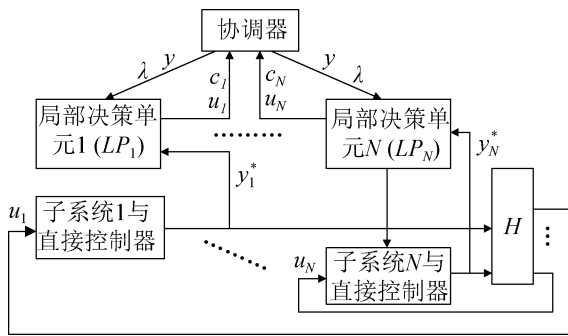


图 6 局部反馈结构图

Fig. 6 Local feedback structure diagram

3.2.3 空调系统全局优化运行模型

针对研究所描述的系统全局优化问题,主要是对空调系统各参数进行寻优,如压缩机频率、送风温度、送风速度、送风静压、送风风量等,在保证一定空气质量(热舒适度与空气品质)的条件下,空调系统总能耗最小。可得出飞机地面专用空调系统全局优化模型如下:

$$\left\{ \begin{aligned} &W_{\text{total}} = \\ &\min \left\{ \sum_{i=1}^{N_1} W_{\text{chiller}1.i}(T_{\text{chiller}_e.i}, T_{\text{chiller}_c.i}) + \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^{N_2} W_{\text{chiller}2.i} + \sum_{i=1}^2 W_{\text{fani}.i}(f_{\text{lwj}.i}) + W_{\text{cfan}}(Q_{\text{cfan}}) + \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^N W_{\text{BAC}.i}(T_{r.i.\text{set}} - T_{r.i}), T_{sa}, Q_{rs.i} \right\} \\ &\text{s.t. } y_i = F(c_i, u_i) \quad u = Hy \\ &T_{\text{chiller}_e} \geq [1, \dots, 1]_{1 \times N_1}^T [T_{\min}] \\ &Q_{\text{cfan}} \Delta T_{sa} C_{\text{air}} = \xi Q_R \\ &Q_{rs.i} = S_{sa.i} v_{sa.i} (I_{AQ}, PMV, T_{r.i}, h_{r.i}, C_{re.i}) \\ &\begin{bmatrix} Q_{\text{cfan}} \\ Q_{rs} \\ f_{\text{lwj}} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} [\Lambda]_{1 \times 1} \\ [\Lambda]_{N \times N} \\ [\Lambda]_{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{\text{cfan}.max} \\ Q_{rs}.max \\ f_{\text{lwj}.max} \end{bmatrix} \\ &\begin{bmatrix} Q_{\text{cfan}} \\ Q_{rs} \\ f_{\text{lwj}} \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} [\Lambda]_{1 \times 1} \\ [\Lambda]_{N \times N} \\ [\Lambda]_{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{\text{cfan}.min} \\ Q_{rs}.min \\ f_{\text{lwj}.min} \end{bmatrix} \\ &\Delta T_{sa} \leq \Delta T_{\max} \\ &T_{r.i.\text{set}}^T \leq [1, \dots, 1]_{N \times 1}^T \Delta T_{\max.i} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

式中, $N_1=4, N_2=2, W_{\text{chiller}.i.j}, W_{\text{fani}.j}$ 分别为空调子系统 i 的第 j 台压缩机与冷凝风机的能耗; $T_{\text{chiller}_e}, T_{\text{chiller}_c}, f_{\text{lwj}.min.i}, f_{\text{lwj}.i}, f_{\text{lwj}.max.i}$ 分别为制冷系统的蒸发温度、冷凝温度与冷凝风机的最低频率、实际频率及最大频率; T_{\min} 为蒸发温度的下限值; $W_{\text{cfan}}(Q_{\text{cfan}})$ 表示送风系统的总能耗; $Q_{\text{cfan}.min}, Q_{\text{cfan}}, Q_{\text{cfan}.max}$ 分别表示送风机最小送风量、实际送风量, 额定送风量; ΔT_{sa} 表示送风温度与实际差值; C_{air} 表示空气比热容; $\xi = Q_{\text{load}} / Q_R$, 表示为显热冷负荷率; Q_{load} 为显热冷负荷; Q_R 为舱内总冷负荷; N 为空调作用机舱数; W_{BAC} 表示末端系统总能耗; $W_{\text{BAC}.i}$ 表示为机舱 i 的末端能耗; $T_{r.i.\text{set}}$ 与 $T_{r.i}$ 分别表示为机舱 i 的温度预设值及实际温度值; $Q_{rs.min.i}, Q_{rs.i}, Q_{rs.max.i}$ 分别为机舱 i 的末端送风量最小值、实际值及最大值; $S_{sa.i}, v_{sa.i}$ 分别表示为机舱 i 的送风面积与送风速度; $I_{AQ}, PMV, C_{re.i}, h_{r.i}$ 分别为空气质量、热舒适性、机舱 i 的 CO_2 相对浓度及机舱 i 的相对湿度。

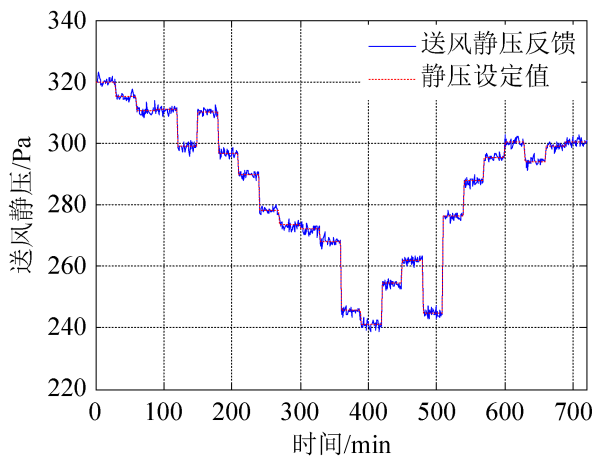
4 优化控制结果与对比分析

设计协调控制器时,将子控制器的部分输出量作为协调控制器的输入量,根据总体性能与能耗要求,对子控制器的输出量进一步优化^[5],在设计中送风机一台、蒸发器 2 台、冷凝风机 4 台以及压缩机为 6 台。在飞机地面专用空调系统的运行稳态下,设备自身物理性能的安全性问题及实际情况可能产生的限制问题,使得系统内部变量受到了相应的约束。根据各子系统控制作用的从属、优先与时间上的关系先后进行局部控制,同时由于各子系统相互之间的工作关系和系统本身的运行特性来确定关联项,各子系统间的主要约束为气压差的上下限、送风温度的上下限等,从而实现整个地面空调大系统的协调控制。利用大系统控制理论的优化方法,选取系统优化周期为 30 min,选取夏季 8:00 到 20:00 共计 12 个小时的优化结果。模拟机舱外气象的状态,波音 737 飞机地面专用空调冷负荷值,且考虑各子系统间的干扰与其他噪声的影响,

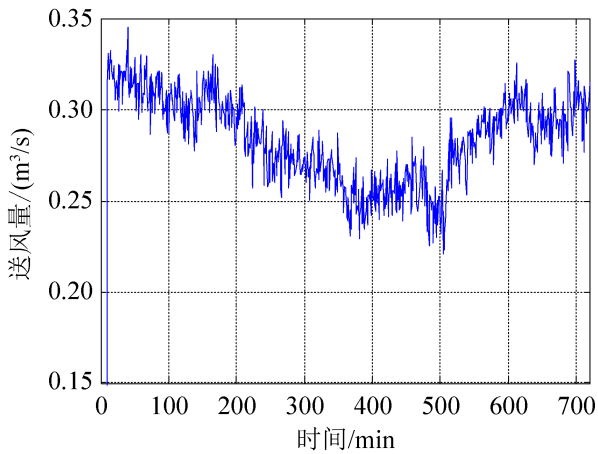
对地面空调大系统进行全局优化控制,送风系统的送风静压预设值为表1,空调系统送风静压设定值序列与控制情况如图7所示。

表1 送风静压设定值序列
Tab. 1 Air supply static pressure setting sequence /Pa

1	2	3	4	5	6	7	8
320	315.2	310.54	311	298.9	310.2	296.87	289.5
9	10	11	12	13	14	15	16
278.3	273.3	272	268	245.5	240.9	254.3	262.1
17	18	19	20	21	22	23	24
245	276.4	287.7	295.4	300.5	294	299.0	300.2



(a) 送风静压



(b) 送风量

图7 送风静压优化控制

Fig. 7 Air supply static pressure optimization control

制冷系统的送风温度预设值为表2,图8给出了空调系统送风温度设定值序列与控制量的变化情况。

表2 送风温度预设值序列

Tab. 2 Preset value sequence of air supply temperature /°C

1	2	3	4	5	6	7	8
1.5	1.5	2	2	1.7	1.7	1	1
9	10	11	12	13	14	15	16
0.4	0	-0.2	-0.2	-0.4	-0.4	-1	-1
17	18	19	20	21	22	23	24
-0.8	-0.1	0.5	0.7	0.7	1	1.2	1.2

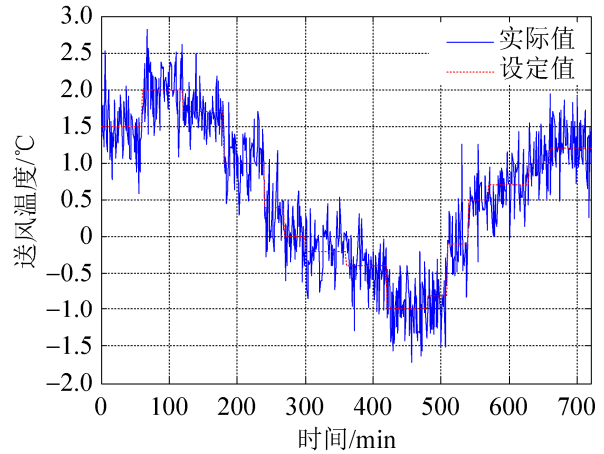
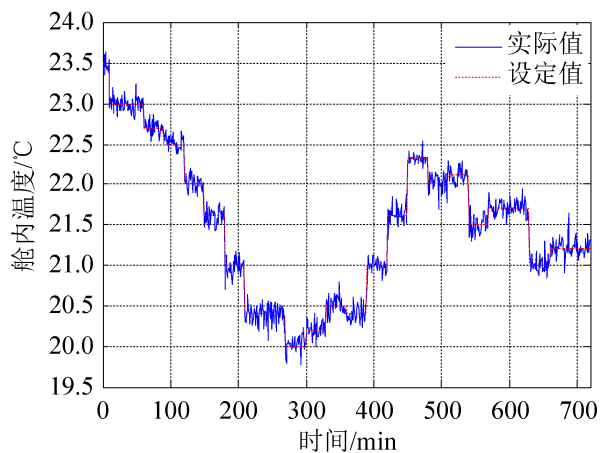


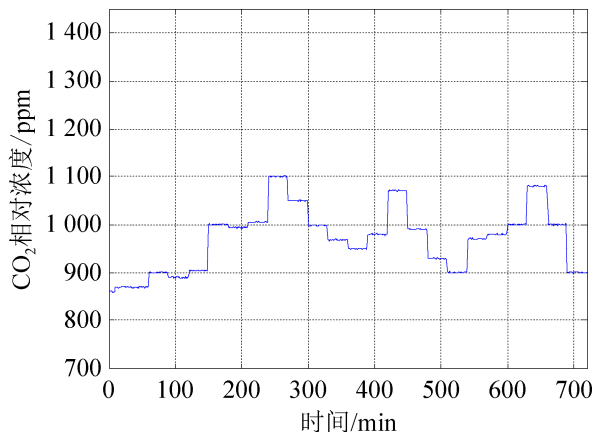
图8 送风温度优化控制

Fig. 8 Air supply temperature optimization control

基于带局部反馈的 OPBMLF 优化算法的末端舱内环境情况如图9所示。设定人体正常基本适宜温度为30 °C,在风速正常的情况下,根据实验数据分析,如图10所示,环境平均温度处于21 °C~27 °C时,PMV取值范围为-1~1,满足舒适性要求;而CO₂的相对浓度范围是500~3 000 ppm,认为它对人体健康不构成威胁。



(a) 舱内温度情况



(b) 舱内 CO₂ 相对浓度

图 9 机舱内环境优化控制

Fig. 9 Environment optimization control in engine room

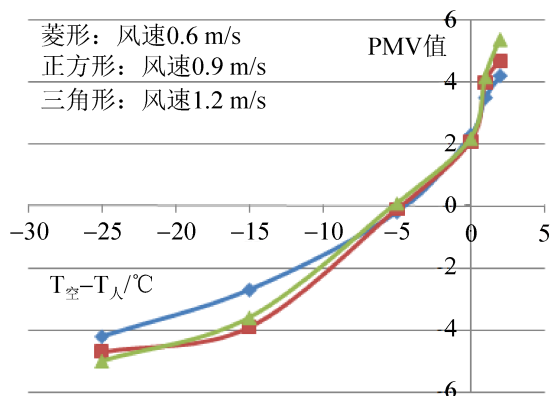


图 10 PMV 曲线图
Fig. 10 PMV curve

由图 7~10 可知, 根据初始预设值, 通过调节空调系统相应的被控对象实现机舱内部区域环境的控制, 使其达到热舒适与空气质量的要求。表 3 给出了空调系统协调优化前后的设备能耗对比情况, 从表 3 中可看出空调实行协调优化控制前后系统能耗明显下降。

表 3 设备优化前后能耗情况对比

Tab. 3 Comparison of equipment energy consumption /kW·h

设备	压缩机	冷凝风机	鼓风机	总能耗
优化前	9.43	10.43	12.65	32.51
优化后	8.90	5.63	6.12	20.65

5 结论

本文针对机场的飞机地面专用空调全局优化

控制的问题, 在夏季工况下, 以波音 737 飞机地面专用空调为对象, 以实际数据为基础, 采用延长预测步长模糊控制算法实行底层控制, 利用改进的 OPBM 优化控制策略对空调大系统模型进行求解, 通过仿真研究, 实施改进的 OPBM 优化算法能够有效地控制机舱区域环境, 从而保证机舱内部人员的环境需求; 通过对比数据分析, 看出采用改进的 OPBM 优化控制策略, 能够明显地降低飞机地面专用空调系统的能耗。

对于航空公司与机场来说, 采用飞机地面专用空调替换机载 APU 是一个必须完成的进程, 而由于飞机机型的多样性以及飞机地面专用空调控制问题的局限性, 这方面有很大的挖掘潜力, 还能够进一步研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国民用航空行业标准. MH/T6109-2014 飞机地面空调机组[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. People's Republic of China Civil Aviation Industry Standard. MH/T6109-2014 Airplane Pre-conditioning Air Unit[S]. Beijing: China standard Publication, 2014.
- [2] 杨世忠, 任庆昌. 大系统理论在变风量空调系统中的应用[J]. 计算机仿真, 2015(12): 360-363. Yang Shizhong, Ren Qingchang. Application of Large Scale System Theory in Variable Air Volume Air Conditioning System[J]. Computer Simulation, 2015(12): 360-363.
- [3] Zhang Zhiqin, Li Hui. Optimization of the Cooling Tower Condenser Water Leaving Temperature Using a Component-Based Model[J]. ASHRAE Transactions (S0001-2505), 2011, 117: 934-944.
- [4] 李宁洲, 冯晓云, 卫晓娟. 采用动态多子群 GSA-RBF 神经网络的机车黏着优化控制[J]. 铁道学报, 2014, 36(12): 27-34. Li Ningzhou, Feng Xiaoyun, Wei Xiaojuan. Optimized Locomotive Adhesion Control Based on Dynamic Multiple Sub-group GSA-RBF Neural Network[J]. Journal of The China Railway Society, 2014, 36(12): 27-34.
- [5] 王日英, 罗文广, 吴小娜, 等. 中央空调冷却水系统节能优化控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(11): 3568-3571. Wang Riying, Luo Wenguang, Wu Xiaona, et al. Energy

- Saving Optimization Control Research of Central Air Conditioning Cooling Water System[J]. *Computer Measure and Control*, 2014, 22(11): 3568-3571.
- [6] 白克强, 刘知贵, 陈思海, 等. 工业大系统多模型-分散辨识方法[J]. *化工自动化及仪表*, 2009, 36(5): 45-47.
- Bai Keqiang, Liu Zhigui, Chen Sihai, et al. Multiple Models of Industrial Large Scale Systems-Decentralized Identification Algorithm[J]. *Chemical Automation and Instrumentation*, 2009, 36(5): 45-47.
- [7] Gregor P. Henze, Anthony R. Florita. Advances in Near-Optimal Control of Passive Building Thermal Storage[J]. *Journal of Solar Energy Engineering* (S1528-8986), 2010, 132(5): 1-9.
- [8] Zhiqin Zhang, William D Turner. Methodology for determining the optimal operating strategies for a chilled water storage system. Part1: Theoretical model[J]. *HAVC & Rresearch* (S1078-9669), 2011, 17(5): 737-751.
- [9] 朱自伟, 王勇, 朱晓红, 等. 智能建筑节能策略与应用研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2006(3): 99-101.
- Zhu Ziwei, Wang Yong, Zhu Xiaohong, Ren Yanming. Study on Energy-Saving Strategy and Application of Intelligent Buildings[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2006(3): 99-101.
- [10] Nabil Nassif, Raymond C. Tesiero. Impact of Ice Thermal Storage on Cooling Energy Cost for Commercial HVAC Systems [J]. *ASHRAE Transactions* (S0001-2505), 2013.
- [11] Nabil Nassif. Optimal Design and Operation of Ice Thermal Storage System for a Typical Chilled Water Plant[J]. *ASHRAE Transactions* (S0001-2505), 2014, 120(1): 248-255.