

一种基于粒子群算法的暖通空调过程对象辨识方法

侯丹琳^a, 潘毅群^a, 黄治钟^b

(同济大学 a. 机械与能源工程学院; b. 中德工程学院, 上海 201804)

摘要: 暖通空调系统运行效果的好坏依赖于控制系统。传统的控制过程中 PID 参数需要专业人员根据工程经验进行设定, 往往控制精度不够, 鲁棒性差。而基于系统传递函数的 PID 控制虽然表现性能良好, 但实际使用过程中往往由于不能得到准确的传递函数而受到限制。采用粒子群优化算法对所研究的暖通空调对象进行模型参数的辨识。在辨识过程中, 首先将空调系统中涉及的某个被控对象的传递函数设置为二阶滞后模型, 然后采用粒子群优化算法对模型参数进行在线辨识。通过将目标函数设置为最小化模型输出与系统实际输出的偏差值而得到最优参数解, 从而得到被控对象的传递函数。通过 2 个算例说明该方法过程简单、结果准确, 且具有一定的鲁棒性。

关键词: 系统辨识; 粒子群算法; 传递函数; 二阶加滞后模型; 模型降阶

中图分类号: TU831 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2017)03-0019-05

A Method of HVAC Process Object Identification Based on PSO

HOU Dan-lin^a, PAN Yi-qun^a, HUANG Zhi-zhong^b

(a. School of Mechanical Engineering; b. Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The operation effect of HVAC system is largely determined by the automatic control system. In the conventional control process, the PID parameters need to be set according to the engineering experience. The control precision is not enough, and the robustness is poor. The performance of PID control based on the system transfer function is relatively good, however, it is usually limited by the accuracy of transfer function. A method based on Particle Swarm Optimization (PSO) is studied for the model parameters identification of an object in HVAC system. In the process of the identification, we simplify a transfer function as a second order plus dead time model, the PSO algorithm is utilized to optimize the parameters of the model. By setting the fitness function as minimum differentiation between the outputs of the system and the model, we obtain the best parameters. Two examples are given to show the method is simple and the results are accurate.

Keywords: system identification; Particle Swarm Optimization (PSO); transfer function; second-order plus dead-time model; model reduction

0 引言

自动控制技术是现代科学文明的标志, 在其辉煌发展的 60 年间^[1], 控制理论在社会和经济发展中都发挥了巨大的作用。从日常生活、工业生产, 到国防事业、航空航天, 无一不说明自动控制的成就与贡献。特别是在暖通空调系统中, 控制效果的好坏直接关系到系统的能耗与舒适度。

数学模型作为控制系统理论的研究依据, 适用于特定对象的研究和分析。系统辨识以系统的数学模型为基础, 在已知输入输出数据的前提下, 利用一定的手段建立一个与所研究系统“最为等价”的模型^[2]。系统辨识对于所有的控制问题来说都是最为基础、最为关键的^[3]。

系统辨识包括很多种方法, 比如最小二乘辨识方法^[4-7]、辅助模型辨识方法^[8-10]、迭代搜索辨识方

收稿日期: 2016-07-18; 修回日期: 2017-03-09

法^[11-13]等,但其计算过程中常常涉及逆矩阵,计算量大、计算时间长、对计算机存储容量要求高,应用在暖通空调系统时效果并不是十分理想。

1995年,美国心理学家 Kennedy 同电气工程师 Eberhart 在研究分析鸟类搜索食物这一现象时,发现鸟类依靠个体之间的信息共享机制,使得群体中任何一个个体都可以享受到其他个体的飞行信息。正是受到这样的启发提出了粒子群算法^[14]。这是一种非常有效的群体智能算法,相继受到了广大研究人士的研究与应用^[15-21]。

本文将粒子群寻优算法应用在暖通空调系统辨识中,通过将对象的高阶传递函数模型简化为二阶加滞后模型,采用粒子群算法对模型参数进行辨识,得到非常接近于该系统真实传递函数的类传递函数。最后采用仿真实验进行验证,结果表明该方法具有可行性。

1 暖通空调系统中的对象系统辨识

系统辨识就是通过系统的观测数据(包含输入与输出数据)拟合一个数学模型,使得这个模型尽可能“等价”于原系统——即在同一输入下,该模型输出与系统输出最为接近,如图1所示。系统辨识包括结构辨识与参数估计。

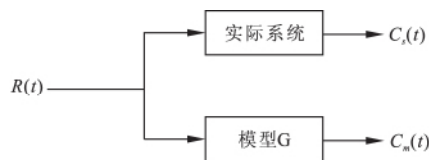


图1 辨识原理

Fig. 1 Identification Principle

暖通空调系统中包含了很多像风机、水泵以及加热器这类需要采用 PID 方法对其进行控制的设备。对于 PID 控制来说,其控制效果主要依赖于比例、积分以及微分这 3 个参数。通常 PID 的参数普遍是采取试凑法给定,很多时候无法满足精准的实时控制要求^[22-24]。大部分情况下,以传递函数为基础进行的 PID 参数整定法的控制效果都要好于人工经验整定方法。对于暖通空调系统进行过程辨识就是在系统输入输出已知的前提下,求取被控对象传递函数的过程。在此过程中,传递函数分子分母多项式的系数即为待辨识系统参数,传递函数分母多项式阶数即为待辨识系统结构。

实际过程中被控对象的传递函数较为复杂,往往为四阶及以上高阶模型,对如此复杂的模型进行系统辨识时间成本和计算成本较高。考虑上述分析之后,本文对待辨识模型 G 的传递函数设置为二阶滞后模式:

$$(1)$$

式中: α_1 、 α_2 、 k 和 θ 为待辨识参数。

2 粒子群优化算法

该算法中,任何一个优化问题的潜在解都可被当作 D 维搜索空间中的虚拟的微粒,种群大小为 n 个。种群中一个微粒的性能优劣可以用待优化问题的函数适应度来衡量,比如说当其目标函数为取最小值的时候,得到的适应度越小,则表征该粒子性能更优。对于每个微粒都有速度和位置的更新处理,具体的处理模式是以种群中当前时刻的最优粒子位置以及历史最优位置为主要依据进行求解。

PSO 算法的第一步就是在可行解空间以及可行速度空间对种群随机进行初始化,确定微粒 (particle) 的初始位置和速度,第二步是进行多次迭代寻找到最优解。比如搜索空间中的第 i 个微粒在第 t 次迭代时,其位置可表示为:

$$X_i(t) = [x_{i,1}(t) \ x_{i,2}(t) \ \dots \ x_{i,D}(t)] \quad (2)$$

其速度可以表示为:

$$V_i(t) = [v_{i,1}(t) \ v_{i,2}(t) \ \dots \ v_{i,D}(t)] \quad (3)$$

通过比较各微粒的目标函数适应值大小,确定 t 时刻每个微粒所经过的最佳位置 (p_{best}) $P_i(t) = [p_{i,1}(t) \ p_{i,2}(t) \ \dots \ p_{i,D}(t)]$ 以及群体所发现的最佳位置 (g_{best}) P_g 。在 t+1 次迭代计算时,微粒 i 根据如下公式分别更新自己的速度和位置^[25-26]:

$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1r_1[p_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)] + c_2r_2[p_{g,j}(t) - x_{i,j}(t)] \quad (4)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad i=1, \dots, n; j=1, \dots, D \quad (5)$$

式中: w 为惯性因子;

c_1 和 c_2 为正的加速度常数;

r_1 和 r_2 为在 0~1 之间均匀分布随机数。

由上述公式可知,PSO 粒子群算法主要是利用三部分算式对微粒 i 的速度进行更新:第一部分是微粒 i 当前时刻的速度,代入当前时刻的速度有利于全局和局部搜索的稳定;第二部分代表着自身认知模式,更新微粒的全局搜索能力,防止它在迭代过程中陷入到局部最优;第三部分则是代表群体之间的信息共享模式。正是在这三部分公式的共同作用下,使得微粒依据历史经验同时结合种群特有的信息共享机制,持续调整自身所在的位置和所拥有的速度,进而寻找到问题的最优解。

3 系统辨识参数估计基本思想

3.1 模型 G 的输出函数

本文采取实数编码的形式,搜索空间设置为四

维模型 G 的四个参数作为一个微粒。当采用单位阶跃信号作为输入时,其输出可表示为:

$$C_m(s)=R(s) \times G(s)=\frac{1}{s} \cdot \frac{k}{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)} e^{-\theta s} \quad (6)$$

将其进行拉普拉斯反变换后可确定时域内模型 G 的输出函数为:

$$C_m(t)=0, t < \theta; \\ C_m(t)=k \times [1 + \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \times (\frac{1}{\tau_2} e^{-\frac{t-\theta}{\tau_1}} - \frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t-\theta}{\tau_2}})], t \geq \theta \quad (7)$$

3.2 目标函数

当模型 G 传递函数的参数估计被认定是最优的时候,那么输出曲线 $C_s(t)$ 与 $C_m(t)$ 应该是最接近的,即模型输出和系统真实输出的差值间隙最小。借鉴统计学样本标准差 S_{slope} 的概念,分别定义输出值标准差 S_{value} 和斜率标准差 S_{slope} 的概念如下:

$$S_{value} = \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^{t_n} (C_s(t) - C_m(t))^2}{t_n - 1}} \quad (8)$$

式中: t_f 为系统输出时间步长;

t_n 为系统输出时间步数;

$C_s(t)$ 与 $C_m(t)$ 分别为 t 时刻系统输出值与模型 G 的计算值;

$$S_{slope} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{t_n} (K_s(t) - K_m(t))^2}{t_n - 2}} \quad (9)$$

式中: $K_s(t)$ 与 $K_m(t)$ 分别为 $(t - t_f)$ 时间段内系统斜率值与模型 G 的斜率值,其计算公式为:

$$K(t) = \frac{C(t) - C(t - t_f)}{t_f} \quad (10)$$

本文定义适应度函数如下:

$$F = S_{value} \times S_{slope} \quad (11)$$

3.3 基于 PSO 算法的系统辨识实现过程

(1) 设定算法参数: 最大迭代次数、学习因子 c_1 、 c_2 、粒子的维数 D , 惯性权重 w 设置为线性衰减的模式,其最大值为 0.9, 最小值为 0.4;

(2) 初始化种群: 随机生成 n 个微粒的初始化位置和速度;

(3) 计算模型输出值、评估微粒性能: 按照步骤 (2) 得到的初始化微粒信息去代入到模型中得到模型的输出,并利用式(11)计算每个微粒的函数适应度;并把当前时刻该粒子的最好位置存在 p_{best} 中,一轮迭代之后在全部 p_{best} 中找到性能最优的个体位置,将其保存到 g_{best} 中;

(4) 根据式(4)和式(5)更新粒子的速度和位置;

(5) 计算模型输出值,评价种群所有微粒;

(6) 更新 p_{best} ,将每个微粒当前的目标函数适应度同其历史最优 p_{best} 比较,如果当前目标值更好,那么采用当前位置和目标值替换历史 p_{best} ;

(7) 比较当前所有 p_{best} 和 g_{best} 的目标值,更新 g_{best} ;

(8) 检查结果是不是符合结束条件,若符合便停止迭代;否则转至(4)。

4 仿真算例

例 1: 系统模型为四阶无滞后模型:

$$G(s) = \frac{5}{(5s+1)(10s+1)(20s+1)(30s+1)} \quad (12)$$

在时间步长为 10、步数为 20、单位阶跃信号作为输入信号的情况下,系统产生的无噪声输出数据(C_s)和有噪声输出数据(C_{s-n})如表 1 所示。

表 1 算例 1 系统输出值(无噪声和有噪声两种)

Table 1 System outputs of Example 1 (without noise and with noise)

t	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
C_s	0.00	0.03	0.28	0.77	1.40	2.06	2.66	3.18	3.61	3.95	4.22
C_{s-n}	0.000	0.034	0.290	0.746	1.389	2.107	2.703	3.107	3.635	3.784	4.323
t	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-
C_s	4.42	4.57	4.69	4.77	4.83	4.88	4.91	4.94	4.95	4.97	-
C_{s-n}	4.405	4.441	4.517	4.536	4.607	5.120	5.134	4.821	5.019	4.966	-

PSO 算法的参数设置为: $c_1 = c_2 = 1.4962$, 最大迭代次数为 200, 初始种群数为 40, 粒子维数 $D = 4$, 惯性权重 w 从 0.9 线性递减到 0.4。利用带噪声组数据 C_{s-n} 作为目标函数中的输入数据,利用无噪声组数据 C_s 作为模型输出值 C_m 的对比数据。

采用式(11)作为适应度函数时,采用二阶加滞后模型进行拟合,拟合公式如式(13):

$$G(s) = \frac{5.1}{(38.3s+1)(18.6s+1)} e^{-11.1s} \quad (13)$$

拟合结果如图 2 所示,其系统输出值均方差(以无噪声组数据 C_s 为基础)为 0.0401。

例 2: 系统模型为四阶无滞后模型:

$$G(s) = \frac{2.4}{(0.6s+1)(2s+1)(7s+1)(20s+1)} \quad (14)$$

在时间步长为 5、步数为 20、单位阶跃信号作为输入信号的情况下,产生的无噪声输出数据(C_s)和有噪声输出数据(C_{s-n})如表 2 所示。

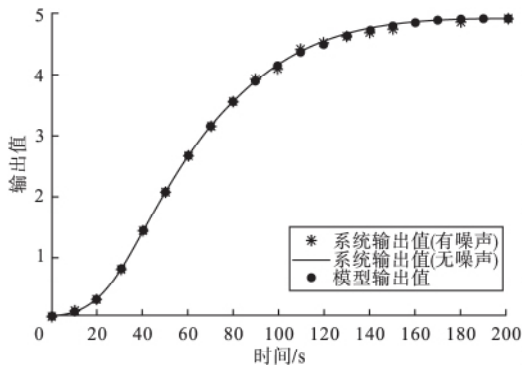


图2 拟合结果(例1)

Fig.2 Fitting Results(Example 1)

表2 算例2 系统输出值(无噪声和有噪声两种)

Table 2 System outputs of Example 1(without noise and with noise)

t	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
C_s	0.00	0.06	0.31	0.63	0.96	1.24	1.48	1.68	1.83	1.96	2.05
C_{s-n}	0.00	0.06	0.31	0.64	0.97	1.26	1.53	1.70	1.87	2.03	2.00
t	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	-
C_s	2.13	2.19	2.24	2.27	2.30	2.32	2.34	2.35	2.36	2.37	-
C_{s-n}	2.21	2.18	2.33	2.20	2.42	2.21	2.43	2.39	2.24	2.37	-

际的暖通空调控制系统中。

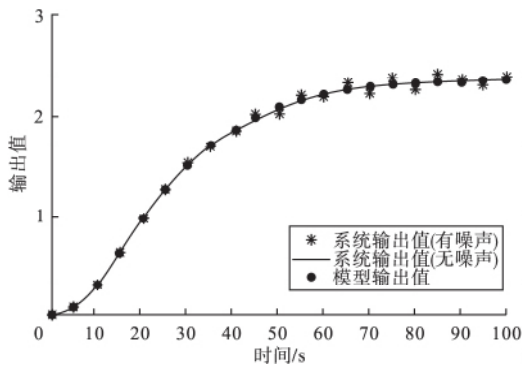


图3 拟合结果(例2)

Fig.3 Fitting results(Example 2)

5 结语

系统辨识作为控制理论基础以及状态估计中必不可少的内容,具有十分重要的研究意义。其系统辨识结果的优劣会直接影响到控制系统的输出结果的好坏。粒子群智能优化算法具有简单、快速的特点,并且涉及的参数比较少,目前,已经被广泛应用于很多领域。本文将粒子群算法应用在暖通空调系统的过程辨识中,根据得到的仿真结果,可以看出其性能十分优良:避免了常规系统辨识问题中计算量大的问题,且结果准确,具有一定的鲁棒性,可以应用到实际暖通空调系统控制领域中。

参考文献:

[1] 万百五. 控制论创立六十年[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 597-602.

PSO 算法的参数设置与例 1 相同。利用带噪声组数据 C_{s-n} 作为目标函数中的输入数据,利用无噪声组数据 C_s 作为模型输出值 C_m 的对比数据。

采用式(11)作为适应度函数时,采用二阶加滞后模型进行拟合,拟合公式如式(15):

$$G(s) = \frac{2.4}{(14.9s + 1)(11.0s + 1)} e^{-1.9s} \quad (15)$$

拟合结果图 3 所示,其系统输出值均方差(以无噪声组数据 C_s 为基础)为 0.009 4。

仿真结果表明,用粒子群算法进行系统辨识过程简单,计算速度快,且寻优效果很好。可以应用到实

[2] 丁锋. 系统辨识(1): 辨识导引[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2011, 3(1): 1-22.

[3] 徐小平, 钱富才, 王峰. 基于改进粒子群算法的系统辨识新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(11): 2231-2236.

[4] Ding F, Chen T. Combined parameter and output estimation of dual-rate systems using an auxiliary model[J]. Automatica, 2004, 40(10): 1739-1748.

[5] Ding F, Chen T. Identification of dual-rate systems based on finite impulse response models[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2004, 18(7): 589-598.

[6] Ding F, Chen T. Parameter estimation of dual-rate stochastic systems by using an output error method[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(9): 1436-1441.

[7] Ding F, Liu P X, Liu G. Gradient based and least-squares based iterative identification methods for OE and OEMA systems[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(3): 664-677.

[8] Ding F, Liu P X, Liu G. Auxiliary model based multi-innovation extended stochastic gradient parameter estimation with colored measurement noises[J]. Signal Processing, 2009, 89(10): 1883-1890.

[9] Wang D, Ding F. Performance analysis of the auxiliary models based multi-innovation stochastic gradient estimation algorithm for output error systems[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(3): 750-762.

[10] Chen J, Zhang Y, Ding R. Auxiliary model based multi-innovation algorithms for multivariable nonlinear systems[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 52(9): 1428-1434.

[11] Wang D, Ding F. Least squares based and gradient based iterative identification for Wiener nonlinear systems[J]. Signal Processing, 2011, 91(5): 1182-1189.

[12] Ding F, Liu P X, Ding J. Iterative solutions of the generalized Sylvester matrix equations by using the hierarchical identification principle[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 197(1): 41-50.

[13] Ding F, Chen T. On iterative solutions of general coupled matrix e-

quations[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2006, 44(6): 2269-2284.

[14] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science, 1995, 1: 39-43.

[15] García-Gonzalo E, Fernández-Martínez J L. A brief historical review of particle swarm optimization(PSO)[J]. Journal of Bioinformatics and Intelligent Control, 2012, 1(1): 3-16.

[16] Barrera J, Coello C A C. A review of particle swarm optimization methods used for multimodal optimization[M]//Innovations in swarm intelligence. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 9-37.

[17] Song M P, Gu G H. Research on Particle Swarm Optimization: a review[C]//Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2004, 4(4): 2236-2241.

[18] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14-19.

[19] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100.

[20] 震纪, 廖惠连, 吴青华, 等. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[21] 马慧民, 叶春明, 张爽. 二进制改进粒子群算法在背包问题中的应用[J]. 上海理工大学学报, 2006, 28(1): 31-34.

[22] Ziegler J G. Optimum Settings for Automatic Controllers[J]. Transactions of the A. S. M. E., 1942, 115(2B): 759-768.

[23] Tyreus B D, Luyben W L. Tuning PI controllers for integrator/dead time processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1992, 31(11): 2625-2628.

[24] Skogestad S. Probably the best simple PID tuning rules in the world[C]//AIChE Annual Meeting, Reno, Nevada, 2001.

[25] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer[C]//Evolutionary Computation Proceedings, IEEE World Congress on Computational Intelligence, The 1998 IEEE International Conference, 1998: 69-73.

[26] Shi Y, Eberhart R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization[C]//Evolutionary Computation, 2001. Proceedings of the 2001 Congress on. IEEE, 2001: 101-106.

作者简介: 侯丹琳(1987),女,吉林珲春人,动力工程专业(暖通方向)研究生,主要从事暖通空调控制方向的研究(173355917@qq.com)。

(上接第18页)

($\leq 3\text{ }^{\circ}\text{C}$)的范围会随之增大。

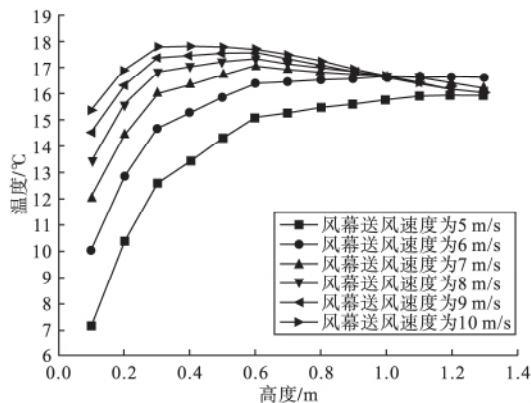


图12 风幕送风速度不同时室内中心截面1.4m高度范围内的温度分布

3 结论

本研究中通过对冬季商场入口处空气幕对室内热环境影响的研究,得出以下结论。

(1) 冬季商场一层入口空间处,无风幕,随着新风速度增加,温度降低,室内温度下降明显,但降幅逐渐减弱,当新风速度的波动值为 0.2 m/s 时,室内温度变化为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。侵入新风速度的改变较新风温度对室内温度的影响更为显著。

(2) 冬季人员对一层入口周围区域内感觉较冷,舒适度低,人员的不满意度达到了80%。空气幕的存在对侵入新风有一定的抑制作用,当空气幕送风速度从 0 m/s 提高到 7 m/s 室内平均温度增加 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,而加空气幕后,人员对于呼吸高度处的满意率在20%以

内,属于较为理想状态。加空气幕对于商场室内空气品质的改善作用较为明显。空气幕对冷风侵入的阻挡效果随着送风速度的增加而提高。

(3) 空气幕送风速度较小时,入口空间处温度分层严重,头足温差大,影响舒适度,距外门不小于 2 m 且保证头足垂直温度变化在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内的最低风幕送风速度为 8 m/s 。随空气幕送风速度的减小,不满足人体头足垂直温差舒适标准($\leq 3\text{ }^{\circ}\text{C}$)的范围会随之增大。

参考文献:

[1] 赵丽华. 严寒地区建筑入口空间热环境研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[2] 李强民. 空气幕的隔断特性及其节能效果[J]. 暖通空调, 1986, 16(2): 4-8.

[3] F C Hayes, W F Stoecker. Heat transfer characteristics of aircurtain[J]. ASHRAE Transaction, 1969, 1(1): 153-168.

[4] JB/T 9067—1999, 中华人民共和国机械行业标准[S].

[5] DBJT02—81—2013, 12系列建筑标准设计图集[K].

[6] 杨彦宾. 热压和风压耦合作用下冷库大门空气幕性能的数值研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.

[7] 2001 ASHRAE Handbook, Fundamentals (SI), American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N. E., Atlanta, GA 30329.

[8] 陆亚俊. 暖通空调[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 1451.

作者简介: 孙策(1992),男,河北南皮人,硕士,研究方向:建筑节能与仿真研究(sunce12300@163.com)。