

需求控制通风技术在地下商场的节能研究

刘 京¹, 邓小池²

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090, liujinghit0@163.com;

2 华为技术有限公司 中央研发部, 广东 深圳 518129)

摘 要: 结合地下商场建筑独特的热工和负荷特点, 建立了适合于地下商场建筑的新型 DCV 模式. 该模式将 CO₂ 体积分数控制与常规的温控 VAV 系统相结合, 同时实现对空气品质、温度的 PID 控制, 并确立全年工况自动切换策略. 利用动态仿真系统进行建模, 并以上海实际地下商场建筑为对象, 进行全年的动态运行计算. 结果表明: 提出的 DCV 系统比定风量系统全年节能 22.2%, 比常规 VAV 系统全年节能 17.5%. 说明该技术在地下商场类建筑应用时, 可以同时实现对室内空气品质、温度的良好控制, 并且在最大限度上节省了能耗.

关键词: 地下商场; 需求控制通风; 能耗; CO₂ 体积分数

中图分类号: TU831.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)11-1783-05

Energy saving potential of demand control ventilation system for underground store

LIU Jing¹, DENG Xiao-chi²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, liujinghit0@163.com; 2. Huawei Technologies Co., Ltd, Shenzhen 518129, China)

Abstract: Considering the unique thermal and load characteristics of underground store, a new DCV strategy has been established in this study. Combining the features of CO₂ control with conventional temperature control VAV system, this new system can achieve the PID control for both CO₂ and temperature, and a hand-off auto switch mode can be used to operate the system automatically. The system has been modeled by a dynamic simulation system, and a simulations for an existent underground store in Shanghai has been carried out. The results show that comparing with the conventional CAV system and VAV system, about 22.2% and 17.5% of the annual energy consumption can be saved, respectively, which demonstrates that the DCV strategy is an acceptable technique to control thermal environment and indoor air quality simultaneously in underground stores.

Key words: underground store; demand control ventilation; energy consumption; CO₂ concentration

需求控制通风(DCV)系统是根据建筑物内污染物的体积分数(一般为 CO₂)来确定新风量的大小,使通风系统在保证室内空气品质的同时,实现节能目的的一种通风系统.该系统能够实时地保证新风量满足人员密度变化,因此,非常适合于新风能耗所占比重大同时人员密度波动较大的建筑^[1].国内外在 DCV 系统的性能分析^[2-3]、

控制模式^[4]、实际应用^[5]以及计算方法^[6]等方面已经开展了一些有成效的工作.

近年来随着我国城市化的高速发展,地下商业建筑获得了越来越普遍的利用.相比地上建筑,地下商场围护结构负荷和渗风负荷均较小,高峰期人员密集,设计新风量和人员负荷所占比均很大.同时,地下商场一天内人流变化明显,具有典型的早中晚三峰人流曲线,CO₂ 体积分数基本上能反映人流密度^[7].根据以上分析,地下商场应可以采用 DCV 系统,但到目前为止相关的可行性研究尚未开展.本文拟提出地下商场的 DCV 模

式,并利用数值仿真手段对该模式的节能潜力进行分析评价.

1 适用于地下商场的 DCV 模式

1.1 地下商场基本新风量的确定方法

需要指出,室内污染物众多,特别是存在大量与人体活动无关的污染物,仅以 CO₂ 体积分数来反映室内空气品质具有局限性. 和颗粒物、甲醛、VOC 等其他地上建筑亦常见的污染物相比,氡在地下建筑污染物中具有更大的代表性. 其水平比地上建筑高出一个数量级以上^[8]. 故本研究选取氡作为基本新风量的控制参数,以保证足够的新风量来稀释那些非人员造成的污染物. 室内氡浓度与通风量的关系如下式:

$$z_b = \frac{M_c V}{C_\infty - C_0}.$$

式中: z_b 为基本新风量, m³/h; M_c 为地下房间的析氡率, Bq/(m³ · h). 该值可分为墙体、地板等建材析氡率和底层土壤析氡率两部分,具体计算方法见文献[9]; V 为房间体积, m³; C_∞ 为室内氡浓度的上限值, 本文取 200 Bq/m³; C_0 为室外氡浓度, 本文取 5 Bq/m³.

1.2 夏季空调 DCV 系统模式

1.2.1 新风量与 CO₂ 控制系统

在本 DCV 系统中,首先建立地下商场 CO₂ 体积分数控制系统. 如图 1 所示,此控制系统是 CO₂ 体积分数相对于参考输入值(商场内 CO₂ 体积分数设定值,本研究取 1.25×10^{-3}) 的偏差进行控

制的闭环控制系统. 图中干扰信号为室内人员数所引起的室内 CO₂ 体积分数变化量^[10].

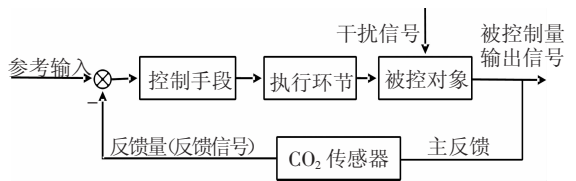


图 1 DCV 系统关于 CO₂ 体积分数控制原理图

地下商场内新风量和 CO₂ 体积分数之间关系可利用如下质量平衡方程:

$$m_{\text{CO}_2}(t) - m_{\text{CO}_2}(t_0) = \int_{t_0}^t M_0 X(\tau) d\tau + \rho_{\text{CO}_2} \int_{t_0}^t [Y_0 - Y(\tau)] Z(\tau) d\tau.$$

式中: $m_{\text{CO}_2}(t)$ 、 $m_{\text{CO}_2}(t_0)$ 为 t 时刻和初始时刻 t_0 地下商场内空气中 CO₂ 质量, kg; $X(\tau)$ 、 $Y(\tau)$ 和 $Z(\tau)$ 分别为 t 时刻地下商场内人员数、CO₂ 体积分数和新风量, m³/h; M_0 为人体 CO₂ 呼出量, 取 0.045 kg/h; ρ_{CO_2} 为 CO₂ 密度, kg/m³; Y_0 为室外空气 CO₂ 体积分数, 本文中取体积分数 4.0×10^{-4} .

根据前述内容,利用 Simulink 建立图 2 所示的 CO₂ 与新风量控制系统框图模型. 控制系统采用 PID 控制策略,保持了 PI 控制稳定性和精度高的特点,更有利于改善控制超调. 发信器为 CO₂ 传感器,安置在回风风道内. 另外,由于送风带入 CO₂ 以及室内人体释放 CO₂ 量对室内 CO₂ 体积分数的影响均有滞后过程,本研究中考虑纯滞后时间 τ_z . 对于面送风和散流器送风,该值可按 $9/N(\text{min})$ 估算,其中 N 为空调房间的换气次数^[11].

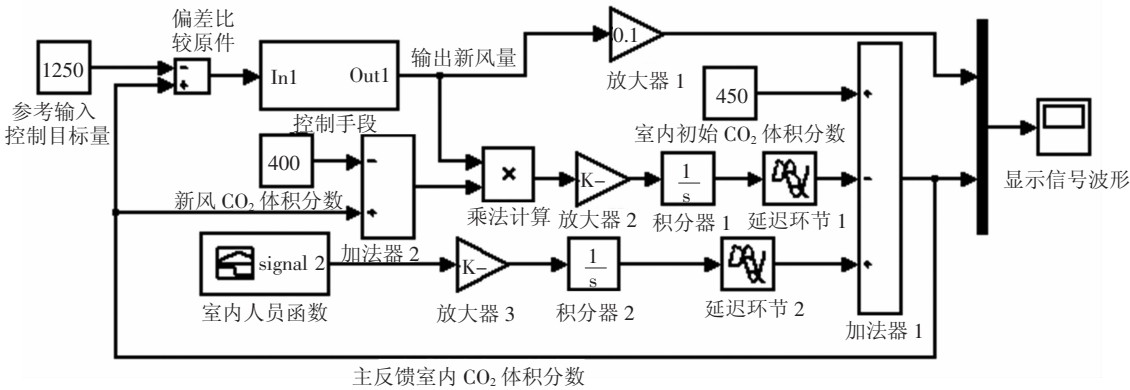


图 2 地下商场内 CO₂ 与新风量控制系统框图模型

1.2.2 总风量与温度控制系统

除了 CO₂ 体积分数控制之外,提出的 DCV 模式还考虑了总风量对室温进行控制. 其控制原理与图 1 类似,发信器为温度传感器. 通过调节总风量大小对室温进行控制,室温控制指标为 25.5 ℃. 对于地下商场,可以忽略壁面传热量,引起室内温度变化的主要是室内人员显热热量、灯

光散热量、设备散热量和送排风引起的温升. 可以建立如下能量平衡方程:

$$T_N(t) - T_N(t_0) = \int_{t_0}^t \{ q_s X(\tau) + q_1(\tau) + q_e + m(\tau) c_p [T_s(\tau) - T_N(\tau)] \} d\tau / M c_p.$$

式中: $T_N(t)$ 为 t 时刻商场温度, ℃; q_s 为人体散热量, W/人; $q_1(\tau)$ 为照明散热冷负荷系数, 可以

在 Simulink 下的 Sources 库中以波形形式给出; q_e 为商场内热设备散热量, W; $m(\tau)$ 为送风质量流量, kg/h; $T_s(\tau)$ 为送风温度, 本文中取 18 °C; M

为商场内空气质量, kg.
根据上述方程, 利用 Simulink 建立图 3 所示地下商场总风量与温度控制系统框图模型.

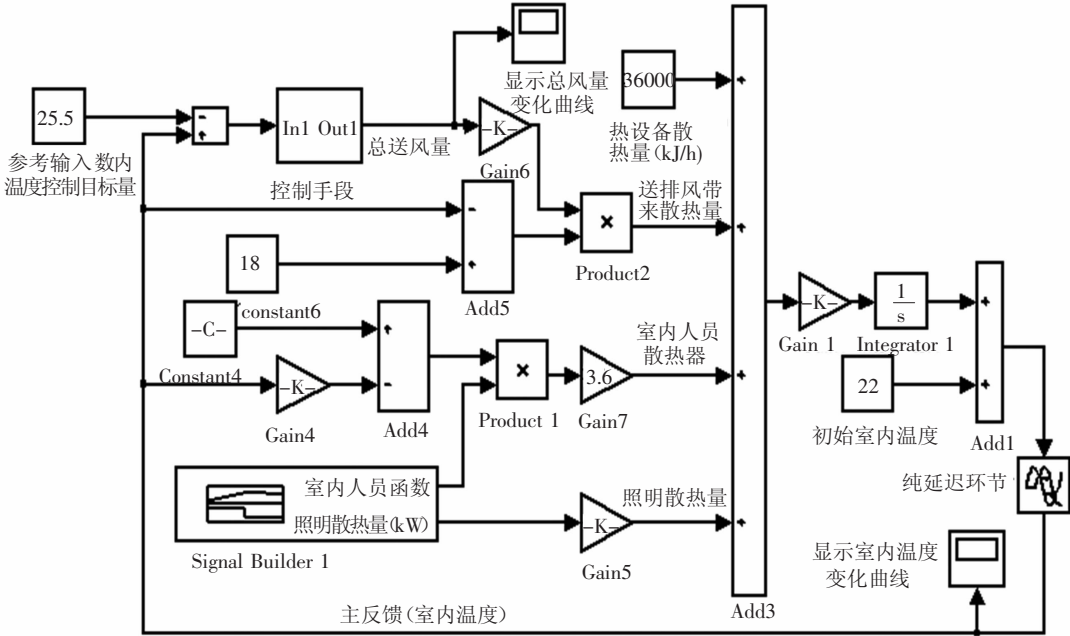


图 3 地下商场内总风量与温度控制系统框图模型

1. 2. 3 DCV 系统控制总模型

综上, 本文提出的 DCV 模式中, 温度控制和 CO₂ 体积分数控制并列运行但又彼此互为条件: 新风量大于总风量的 10%, 总风量大于新风量. 图 4 为利用 Simulink 建立的 DCV 系统控制总框图模型, 整个仿真系统的模拟流程是: 利用室内总风量

温度控制系统、新风量和 CO₂ 体积分数控制系统模拟室温和 CO₂ 体积分数的控制过程, 然后利用计算所得的室内温湿度、总风量和新风量进一步计算出空调机组进行空气处理的耗能和风机能耗, 然后输出结果. 仿真过程中选用的时间变量单位为小时, 计算步长为自动变步长, 但不大于 0.001 h.

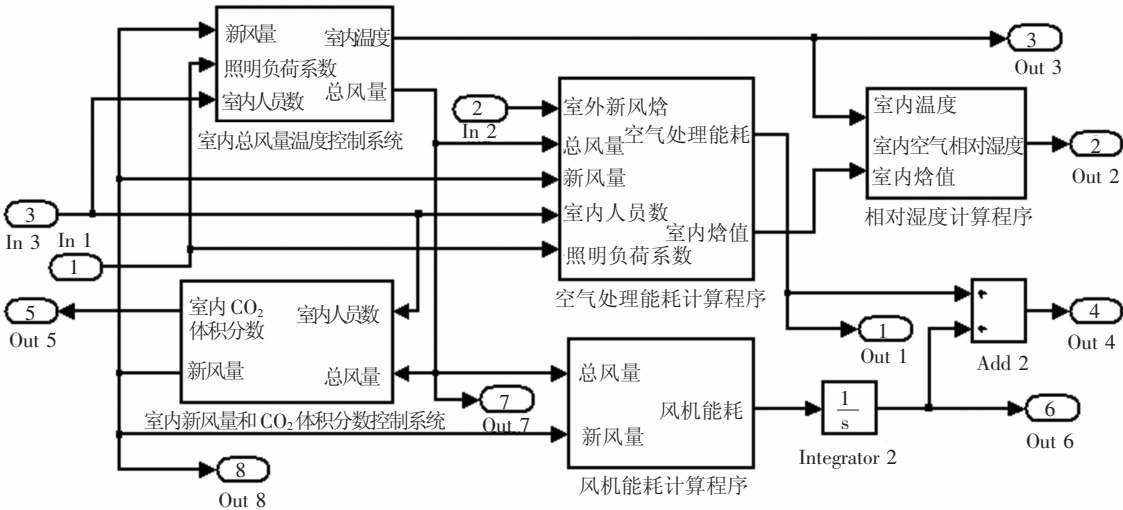


图 4 DCV 系统控制总系统框图模型

2 地下商场 DCV 控制效果和能耗分析

2.1 计算条件

选取实际上海地下商场对上述建立的 DCV 模式的节能潜力进行评价. 该工程属于上海市某地下人防工程中一个防火分区, 作商场用, 其建筑

面积 1 166 m², 埋于地下 3 ~ 8 m. 上海市全年气象条件如图 5 所示. 每日营业时间为 08:00 ~ 22:00. 工作日和双休日的客流量如图 6 所示. DCV 系统基本新风量根据前文方法计算后取 5 000 m³/h. 当按 CO₂ 体积分数计算的新风量低于基本新风量时, 则按基本新风量值提供新风量.

经整定,CO₂ 体积分数 PID 控制器的控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d 分别取为 220,540 和 2;温度控制器的控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d 分别取 30 000,120 000 和 180.

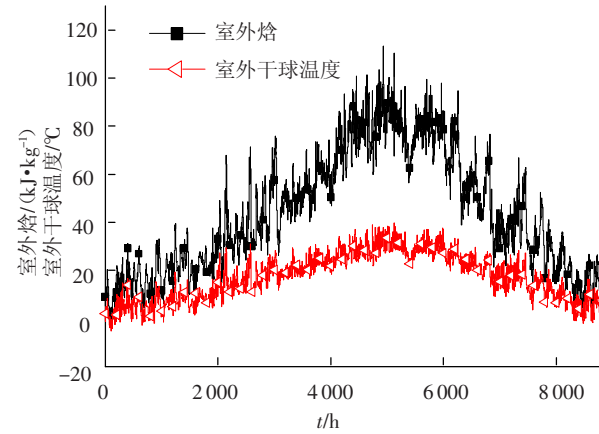


图 5 上海市全年气象参数

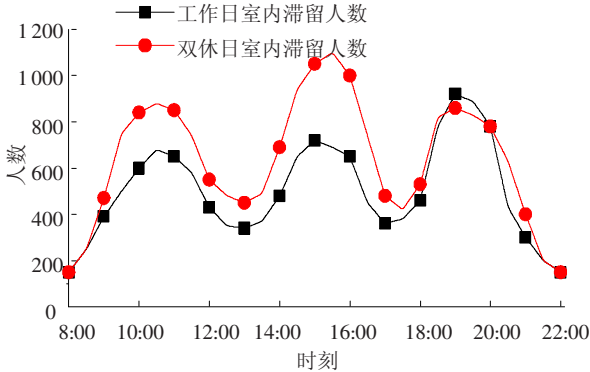


图 6 工作日和双休日客流量

考虑到地下商场本身的恒温恒湿和气密性,同时商场内人员负荷较大,故上海地区地下商场全年为冷负荷. 根据前文所述,本研究提出的 DCV 模式中新风量和总送风量分别依靠空调机组的排风机和送风机的变频调节来实现. 送风机额定风量 50 000 m³/h,全压 1 200 Pa,轴功率 22 kW;双速排风机额定流量 25 000/50 000 m³/h,功率 10/22 kW,全压 800/1 100 Pa. 风机进行变频控制. 冬夏季空气温湿度、CO₂ 体积分数均按照相关规范要求设定. 空调季节采用最小新风,排风机低速运行;过渡季节排风机尽可能高速运行,以便最大限度利用室外冷源,即 air – side economizer 技术. 但对于上海地区地下商场来说,排风量还需考虑允许的室外最低温度与最高湿度,以防出现地下建筑墙面结露问题.

2.2 典型工作日仿真结果分析

由图 6 可见工作日的营业高峰出现在下班后 6:00~8:00,而图 7 显示商场内 CO₂ 体积分数在高峰期也保持在体积分数 $(12.5 \pm 0.5) \times 10^{-4}$,温度在 $(25.5 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ 波动,能很好地满足室内

热舒适度和空气品质要求. 夏季空调工作日的风量变化见图 8. 无论是新风量还是总风量,其变化规律都追随人员变化,且大多数情况下要低于设计值. 需要指出的是,如前文所述,本研究目前的计算模型虽然考虑了新风量和 CO₂ 体积分数变化之间的滞后性问题,但与实际系统运行结果相比尚有差异,需要在今后的工作中进一步研究.

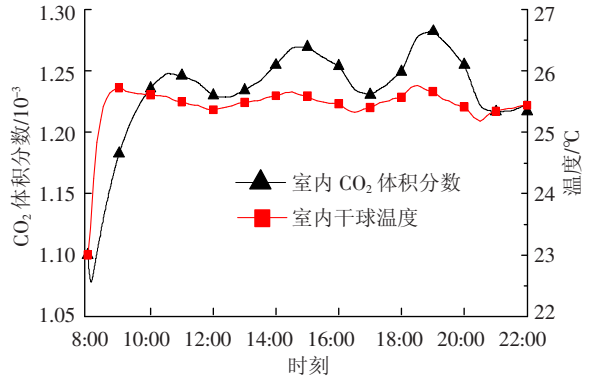


图 7 商场内 CO₂ 体积分数和温度日变化

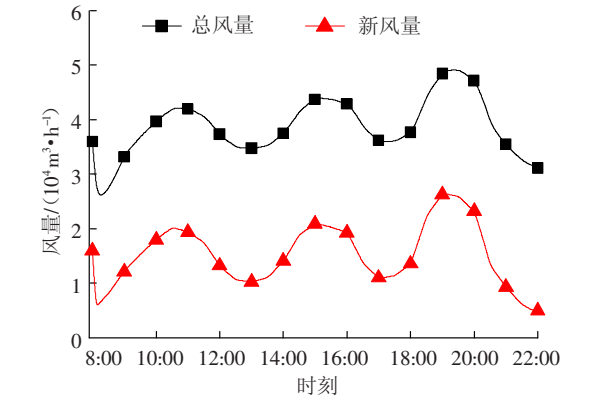


图 8 商场内风量日变化

2.3 全年能耗分析

将全年的能耗汇总得出如表 1 所示的结果. 作为比较还模拟了传统 CAV 和 VAV 系统. CAV 系统的新风量和总风量固定为设计值,VAV 系统则只考虑利用总风量控制室温. 由表 1 可以看出,相比传统的 CAV 系统和 VAV 系统,DCV 系统无论是风机能耗(即降低新风量和总风量)还是空调能耗(即降低夏季新风处理能耗),节能效果均十分明显,总节能率分别达到 22.8% 和 19.10%.

表 1 不同空调通风系统地下商场全年能耗比较 10⁹ kJ

空调通风系统	空调能耗	风机能耗	总能耗
DCV 系统	2.11	0.41	2.52
CAV 系统	2.74	0.51	3.24
VAV 系统	2.61	0.45	3.06

3 结 语

建立的 DCV 模式可以很好地控制商场温度、CO₂ 体积分数在合适的范围之内,同时节能效果

显著,比 CAV 系统全年节能 22.8%,比 VAV 系统全年节能 19.1%。

参考文献:

- [1] ALALAWI M, KRARTI M. Experimental evaluation of CO₂-based demand-controlled ventilation strategies [J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108(2): 307–317.
- [2] NASSIF N, KAJL S, SABOURIN R S. Ventilation control strategy using the supply CO₂ concentration setpoint [J]. HVAC&R Research, 2005, 11(2): 239–262.
- [3] 耿世彬,杨家宝. 基于室内空气品质的需求控制通风研究[J]. 建筑热能通风空调,2003,22(5): 1–3.
- [4] XU X H, WANG S W. An adaptive demand-controlled ventilation strategy with zone temperature reset for multi-zone air-conditioning systems [J]. Indoor and Built Environment, 2007, 16(5): 426–437.
- [5] WACHENFELDT B J, MYSEN M, SCHILD P G. Air flow rates and energy saving potential in schools with demand-controlled displacement ventilation [J]. Energy and Buildings, 2007, 39(10): 1073–1079.

- [6] JEONG J W, CHOI A, NO S T. Improvement in demand-controlled ventilation simulation on multi-purposed facilities under an occupant based ventilation standard [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(1): 51–62.
- [7] 祁晓霞,潘京. 对大型专业商场疏散人数的调查研究[J]. 消防科学与技术,2007,24(1): 60–63.
- [8] 付正惠. 地下空间热环境与空气质量评价[J]. 地下空间,1997,17(1): 37–42.
- [9] 黄强. 城市地下空间开发利用关键技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [10] NASSIF N, ZAHEER-UDDIN M. Simulated performance analysis of a multizone VAV system under different ventilation control strategies [J]. ASHRAE Transactions, 2007, 113(1): 617–629.
- [11] 王翠华,戴玉龙,蔡培力. 基于 Matlab/Simulink 环境下空调房间仿真模型的建立[J]. 大连水产学院学报, 2005,25(2): 128–131.

(编辑 刘 彤)

(上接第 1778 页)

3 结 论

1) 工程项目谈判(博弈)行为可以满足 KM-RW 声誉模型要求的 3 个约束条件:参与方非理性概率 $p > 0$ 、谈判次数足够多和参加方具有足够的耐心,进而促成谈判各参与方在项目建设过程中的合作。

2) 贴现因子、信任产生的超额收益以及采用信任策略时各参与方的初始投入是影响工程项目谈判系统演化的 3 个主要因素。

3) 工程项目谈判各方采用信任策略是保证工程项目谈判系统向合作方向演化及其稳定性的基础。

参考文献:

- [1] RAIFFA H, RICHARDSON J, METCALFE D. Negotiation Analysis: The Science and Art of Collaborative Decision Making [M]. Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press, 2002.
- [2] CHEUNG S O, YIU T W Y, YEUNG S F. A study of styles and outcomes in construction dispute negotiation

[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2006, 132(8): 805–814.

- [3] 程德华. 有限理性下的企业合作竞争的进化博弈分析[J]. 计算机与数字工程,2005,33(5):44–47.
- [4] 盛昭瀚,蒋德鹏. 演化经济学[M]. 上海:三联出版社,2002:1–25.
- [5] 龚小庆,范文涛,丁义明. 建立系统科学基础理论框架的一种可能途径与若干具体思路之九——博弈的演化分析[J]. 系统工程理论与实践,2003,23(9): 1–6.
- [6] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海:上海人民出版社,1996.
- [7] FUDENBERG D, LEVINE D K. The Theory of Learning in Games [M]. 肖争艳,侯成琪,译. 北京:中国人民大学出版社,2004:60–69.
- [8] FUDENBERG D, MASKIN E. Evolution and cooperation in noisy repeated games [J]. American Economic Review, 1990(80): 274–279.
- [9] 吴昊,杨梅英,陈良猷. 合作竞争博弈中的复杂性与演化均衡的稳定性分析[J]. 系统工程理论与实践, 2004,24(2):90–94.

(编辑 张 红)