

文章编号: 2095-2163(2019)03-0092-05

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

基于VR的面粉生产工艺仿真系统的设计与实现

钟玲, 张晨

(沈阳工业大学信息科学与工程学院, 沈阳 110023)

摘要: 将虚拟现实技术应用与仿真技术相结合,建立了面粉生产工艺虚拟现实流程仿真系统。针对面粉生产工艺流程设计了三维场景浏览、知识问答和工艺流程仿真等部分。分析了基于欧拉角变化的视角旋转方法和知识问答实现方法,详述谷物粒子仿真与流程仿真相结合的工艺流程仿真方法。

关键词: 虚拟现实; 场景浏览; 知识问答; 流程仿真

Design and implementation of flour production process simulation system based on VR

ZHONG Ling, ZHANG Chen

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

[Abstract] Combining the application of Virtual Reality (VR) technology with simulation technology, the VR-based process simulation system for flour production process is established. The 3D scene browsing, knowledge quiz and process simulation are designed for the flour production process. The application of perspective rotation method based on Euler angle change and knowledge quiz method in the system are analyzed, the process simulation method combining grain particle simulation and process simulation are also discussed in detail.

[Key words] Virtual Reality; scene browsing; knowledge quiz; process simulation

0 引言

虚拟现实(VR)技术可以创造出虚拟现实世界,将该技术应用于产品设计、场景模拟等,使工业设计者通过视觉、听觉、甚至触觉,直观了解规划设计的生产场景、生产流程以及产品功能和质量等方面的情况,有助于及时发现产品生产的不足并做出后期修正。工业设计水平的高低直接关系到现代工业的水平与制造质量^[1],虚拟现实技术的使用,能够提高工业生产的效率,缩短工艺制造时间并降低生产成本,从而提高企业利润。

作为日常必需品,面粉生产流程较复杂、涉及设备较多,缺乏系统性仿真平台。故而,文中提出了一种基于虚拟现实的面粉生产工艺流程仿真方法,基于此则研究了仿真系统的设计与实现。通过将虚拟现实技术与系统仿真技术相结合,实现生产流程的可视化及其与用户之间的人机交互,有效帮助生产设计者更深入地了解工艺流程^[2],同时还可以辅助培训人员学习相关设备和工艺知识^[3]。工艺流程仿真系统为企业的生产工艺研究、人员培训等提供

有效的决策支持,从而更好地保证了生产作业的安全性和可行性,大幅度降低了员工的训练成本。

1 系统设计与开发

1.1 系统设计

面粉生产工艺流程仿真系统以虚拟现实技术和仿真技术为基础,系统结构设计上要兼顾环境仿真、虚拟设备交互、工艺知识学习以及工艺流程仿真等环节。系统的总体结构主要分为四大模块,分别是:三维场景查看模块、车间漫游模块、工艺知识问答模块和工艺流程仿真模块,功能设计结构如图1所示。根据功能模块建立相应的三维场景浏览部分、知识问答部分和工艺流程仿真部分。

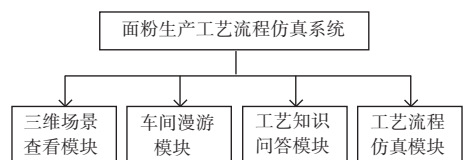


图1 面粉工艺流程仿真功能模块

Fig. 1 Flour process simulation function module

基金项目: 辽宁省科学事业公益研究基金(2016001005)。

作者简介: 钟玲(1970-),女,副教授,主要研究方向:图像处理、数据挖掘、智能软件;张晨(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:计算机图形学、虚拟现实。

收稿日期: 2019-02-26

1.2 开发思路

仿真系统开发流程可以分为2部分,对此阐释如下。

(1) 构建三维场景模型。主要利用3ds Max进行三维建模,包括车辆、厂区环境、各类生产设备、谷仓和管道。

(2) 生产场景的构建及场景中的交互。首先用Unity3D读取搭建完成的三维模型,构建场景;然后根据交互设计编写C#脚本,使用C#脚本编程把静态的三维模型与用户操作连接起来;最后研发设计工艺流程仿真算法,实现工艺流程的可视化。

1.2.1 三维场景建模

考虑到虚拟现实系统中显示对象的真实性,要求所显示的对象模型在形态、光照、质感等方面都十分相似。仿真系统的虚拟场景建模分为几何建模和物理建模^[4]。本系统亦如此。对此内容可做探讨描述如下。

对象的几何建模是描绘对象内部固有的几何性质的抽象模型^[5]。对象模型的组织结构对仿真系统的运行质量起着关键性的作用,根据虚拟场景中每个实体的几何空间位置,以及模型间的结构关系,确定面粉厂虚拟场景的树形结构,如图2所示。

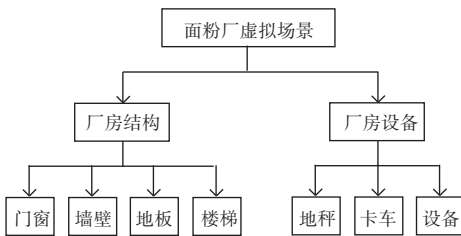


图2 虚拟场景层次结构

Fig. 2 Hierarchical structure of virtual scene

仿真系统中虚拟场景的物理建模是利用3ds Max进行建模和贴图,模型完成后需保存为FBX文件,为Unity3D平台进一步开发做准备。在保存为FBX文件时,需要将单位设置为“米”,并设置Y轴方向向上,同时勾选“嵌入媒体”选项。

1.2.2 Unity3D开发场景构建及交互

Unity3D是由Unity Technologies开发的多平台综合型虚拟现实开发工具,该软件的视觉编辑特点是所见即所得,即可以根据实际需要组成一些相关的场景。该工具在物理引擎、场景特效和跨平台开发中具有一定优势^[6],比较适合开发虚拟环境下的仿真系统。

仿真系统需要编辑大量的模型数据,所有对象(GameObject)均在Hierarchy视图中列出,每个对象

都有自身专属的特定属性^[7]。把编写的C#脚本绑定在对象上,驱动与虚拟设备的交互,以此完成系统的各功能。

2 仿真系统的关键点

面粉生产工艺仿真系统根据面粉实际生产中的生产场景和生产流程,模拟面粉生产的工艺流程,在虚拟现实空间中展示生产场景,利用知识问答功能更好地满足人员培训需要。因此仿真系统包括工艺流程仿真、三维场景浏览和知识问答等3个关键点。

根据各设备中物料的种类和运转时间占比,采用工艺流程仿真方法模拟面粉生产工艺流程;根据三维空间中相机和虚拟人物的关系,通过视角旋转方法使人物进行三维场景浏览;设计知识问答方法实现基于虚拟现实的知识问答。对此本文将展开研究论述如下。

2.1 工艺流程仿真方法

工艺流程仿真方法包括谷物粒子仿真和随着时间变化的流程仿真。研究设计过程可详述如下。

2.1.1 谷物粒子仿真

谷物粒子仿真主要分为生成新谷物粒子,谷物粒子运动模拟以及粒子绘制等3个步骤。为此,拟做研发表述如下。

某时刻 t_0 ,谷物粒子在虚拟现实世界三维坐标系的某点产生,根据谷物形状特征,文章采用椭圆球近似谷物粒子。设谷物粒子在 x 、 y 、 z 轴的半径分别为 a 、 b 和 c ,则谷物粒子的形状可以表示为:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (1)$$

设初速度为 V 、初始方向为 D , x 轴方向的初速度为 v_x , y 轴方向的初速度为 v_y , z 轴方向的初速度为 v_z ,运动类型为 T ,粒子淡化系数为 A ,粒子运行的最大高度为 H ,垂直加速度为 g 。

研究可知,产生后的粒子具有独立的属性并开始周期运动^[8],各项属性随即变化,最终实现谷物粒子效果的仿真。令谷物粒子的运动周期为 Δt ,时刻 $t_i = t_0 + i\Delta t$,其中 $i \in \mathbb{Z}^+$, L 为 y 轴方向修正系数。设 $B_i(x_i, y_i, z_i)$ 为此时粒子的位置,则下一个周期粒子的位置 $B_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 可表示为:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + v_x \cdot \Delta t; \\ y_{i+1} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_{i+1}^2 \cdot L + H; \\ z_{i+1} = z_i + v_z \cdot \Delta t. \end{cases} \quad (2)$$

随时间增加,粒子在 y 轴上的分量逐渐减小,存

在时刻 t_x , 当 $t_i < t_x$ 时 $y > 0$, 此阶段谷物粒子运行类型 $T = True$, 在该时间段内通过粒子淡化系数 A 控制谷物粒子的淡化和消失。当 $t_i \geq t_x$ 时 $y \leq 0$, 此时粒子的运动类型 $T = False$, 谷物粒子消失。粒子系统的消失和淡化效果使得物料倾泻入仓库和储存设备时更加真实。设 Δa 为谷物粒子淡化速率, 则粒子淡化方程可表示为:

$$\begin{cases} A = A - \Delta a \cdot t_i, & \text{if } A > 0, \\ A = 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (3)$$

t_0 时刻, 当 $A = 1$ 时, 谷物粒子完全不透明, 随着时间的增加颜色逐渐变浅, 直至 $A = 0$ 时粒子完全透明。

2.1.2 流程仿真

设某部分流程实际生产时间为 RT_N , 流程中某设备运转时间为 RT_i , 仿真系统中该设备的修正系数 $\sigma_i = RT_i/RT_N$, σ_i 即用来修正相机的移动和旋转速度, 又表示此设备在本部分流程中的时间占比。设有 $T[N + 1]$ 、 $VC[N][2]$ 、 $CM[N][2]$ 和 $CS[N][2]$ 等 4 个数组。 $T[i]$ 表示每步流程中物料在第 i 个设备中运转结束的时刻 St , $T[0] = 0$, 时刻 St 是该部分流程当前运行总系统时间, dt 是系统时间增量, 则 St 表示为:

$$St = \sum_{T[0]} dt, \quad (4)$$

当 $T[i - 1] < St < T[i]$ 时, 该时间段相机的平移速度为 $VC[i - 1][0]$, 旋转速度为 $VC[i - 1][1]$, 平移方程为 $CM[i - 1][0]$, 旋转方程为 $CM[i - 1][1]$, 平移最大距离为 $CS[i - 1][0]$, 旋转最大距离为 $CS[i - 1][1]$ 。

取 $j = \max\{i, T[i] \leq St\}$, 相机 M 在 3 个方向上的速度分量分别为 $VC_x[j]$ 、 $VC_y[j]$ 和 $VC_z[j]$, 则相机平移距离 S 旋转角度 α , 各方向上移动的分量 S_x 、 S_y 和 S_z 的数学运算即如式(5)所示:

$$\begin{cases} S_x = \sigma_j \cdot VC_x[j][0] \cdot dt; \\ S_y = \sigma_j \cdot VC_y[j][0] \cdot dt; \\ S_z = \sigma_j \cdot VC_z[j][0] \cdot dt; \\ S = \sigma_j \cdot VC[j][0] \cdot dt; \\ \alpha = \sigma_j \cdot VC[j][1] \cdot dt. \end{cases} \quad (5)$$

设时间差 $\Delta T = T[j] - T[j + 1]$, St' 是区间内的时间标识, 其运算公式可表示为:

$$St' = \sum_{T[j]}^{T[j+1]} dt, \quad (6)$$

当 $St \in (T[j], T[j + 1])$ 时, 如果满足 $St' \leq \Delta T \cap S \leq CS[j][0]$, 相机 M 开始该时间段的运动,

根据空间几何变换^[9], 其平移方程如式(7)所示:

$$\begin{pmatrix} \hat{e}_x' \\ \hat{e}_y' \\ \hat{e}_z' \\ \hat{e}_1' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{e}_x \\ \hat{e}_y \\ \hat{e}_z \\ \hat{e}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

工艺流程仿真系统的相机旋转均绕 y 轴方向的左右旋转, 旋转矩阵如公式(8)所示:

$$R_x(\theta_1) = \begin{pmatrix} \hat{e}_x & \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \hat{e}_1 & \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ \hat{e}_y & 0 & 0 & 1 \\ \hat{e}_z & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

当 $S > CS[j][0]$ 时, 相机停止平移; 同理, 当 $\alpha > CS[j][1]$ 时, 相机停止旋转。

2.2 视角旋转方法

处于虚拟世界三维坐标系 (X, Y, Z) 中 O 点的物体或人物旋转时, 相机 M 应满足同步旋转的条件, 当相机旋转时应以物体或人物为中心, 即向量 MO 绕 O 旋转。

假设交互设备 P (如鼠标、键盘等) 每次触发时所处位置为投影平面直角坐标系 (x_1, y_1) , 其原点 $O_1(0, 0)$, 每次拖动 P 在 x_1 和 y_1 轴方向移动的系统时间分别记为 t_x 和 t_y , 速度标识为 v 。则 P 在 x_1, y_1 轴方向上的移动分量分别为 $x_m = vt_x$ 和 $y_m = vt_y$ 。

P 在 x_1 轴方向的移动控制虚拟现实世界中的相机 M 在水平方向上的左右旋转。相机 M 绕 O 旋转度数 $\theta_1 = x_m \times 360^\circ$, 旋转轴与 y 轴平行, 根据定点旋转的欧拉变换^[10], 相机 M 在水平方向上的旋转矩阵 $R_x(\theta_1)$ 即如上文式(8)所示。

P 在 y_1 轴方向的移动控制虚拟现实世界中的相机 M 在垂直方向上的上下旋转。相机旋转的度数为 $\theta_2 = y_m \times 360^\circ$, 与水平方向的旋转不同, 垂直方向的旋转轴需根据向量内积的性质求得。设向量 $MO = (x_0, y_0, z_0)$, 其中 $y_0 = 0$, 旋转轴 $\vec{l} = (l_x, l_y, l_z)$ 。

因为 \vec{l} 过点 O 且垂直于 y 轴, 则 $l_y = y_0$ 。令 $l_z = 1$, 由此求得旋转轴 $\vec{l} = (-z_0/x_0, y_0, 1)$ 。则相机 M 在垂直方向上的旋转矩阵 $R_y(\theta_2)$ 可表示为:

$$R_y(\theta_2) = \begin{pmatrix} \hat{e}_x & \cos^2\theta_2 & -\frac{1}{2}\sin 2\theta_2 & \sin\theta_2 \\ \hat{e}_1 & \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 \\ \hat{e}_y & -\frac{1}{2}\sin 2\theta_2 & \sin^2\theta_2 & \cos\theta_2 \\ \hat{e}_z & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

2.3 知识问答方法

综上分析后,文章又给出一种基于虚拟现实的知识问答方法。首先,对工艺知识题库做预处理^[11],将处理后的题库储存在工程对象数据库中。给每道题添加3种作答状态:回答正确、回答错误或没有作答,分别用 T 、 F 和 N 表示。根据题目对应的设备不同把题目进行分类,即每个设备代表一个类别的题目,类别用 C_N 表示,其中 $N \in Z^+$ 。类别 C_N 所包含的每道题目的标号为 $C_N x_m$,其中 $x_m \in (1, 2, \dots, n)$,例如 $C_2 x_3$ 即表示第2类设备第3道题。

设 $C_N M$ 表示类别 C_N 中随机抽取的题目数量,链表 $C_N F$ 存储类别 C_N 中已经作答过的题目标号, $C_N S$ 表示类别 C_N 已经作答的题目数量。 MAX 表示问卷题目总数, S 表示所得成绩, SUM 表示已答题目数量。研究最终得到的基于虚拟现实的知识问答算法步骤可分述如下。

Step1 初始化: $S = 0, SUM = 0, C_N M = 0$ 。

Step2 判断题目类型 C_n ,若该类型满足 $C_n S = C_n M$,则需漫游至其它设备。否则随机分配数量 $C_n M (C_n M \leq MAX)$ 。

Step3 从 C_n 类题库中随机抽取一道题 $C_n x_m$,遍历 $C_n F$,判断是否已经作答,若已经作答则重新抽取。

Step4 判断题目 $C_n x_m$ 的作答状态,若为 T ,则 $S = S + 1$;若为 F ,则 $S = S$;若为 N ,则继续作答本题。

Step5 重复 Step3、Step4,若 $C_n S = C_n M$,提示该类别题目答题结束。

Step6 重复 Step2 ~ Step5,直至 $\sum C_n M = MAX$ 。

3 仿真系统的实现

由前文讨论可知,仿真系统包括三维场景浏览、知识问答和工艺流程仿真等3部分,三者之间相互联系组成有机整体。在Unity3D中,使用NGUI设计系统界面,包括系统导航栏(内嵌二级菜单)、系统操作提示、知识问答界面以及工艺流程仿真交互等,系统界面如图3所示。点击左侧导航可在场景浏览、面粉工艺知识问答、工艺流程仿真等功能中来回切换。基于此,对每一部分的功能设计可分别解析阐述如下。

三维场景浏览部分实现了三维场景查看模块和车间漫游模块的功能,两功能模块交互方式相同,采用基于欧拉角变换的视角旋转方法,通过长按右键并拖动鼠标,使虚拟世界中对应物体在三维坐标系中旋

转,控制视角范围,多次实验取速度标识 $v = 0.3$ 。



图3 面粉工艺流程仿真系统界面

Fig. 3 Flour process simulation system interface

在知识问答部分中,使用基于虚拟现实的知识问答算法,随机从题库中抽取题目组成一套问卷。每套问卷包含多个设备的考点,每个设备的题目数量随机。在三维场景浏览系统中漫游至某台设备,可触发该设备的相关问答题目,该设备随机题目回答完毕后,漫游至其它设备可继续答题。通过Unity引擎使虚拟现实交互和题目数据库建立连接,最后实现知识问答功能如图4所示。

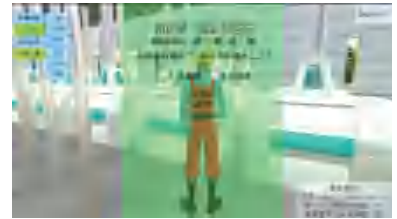


图4 知识问答系统

Fig. 4 Knowledge question answering system

工艺流程仿真部分的功能以动画的方式予以呈现。根据面粉实际生产中,各设备加工物料需运转的时间占比,采用工艺流程仿真方法,使相机通过平移和旋转随着流程移动,把谷物粒子仿真和流程仿真有机地结合在一起。用不同颜色的滚动箭头标识不同物料的运行轨迹,并在储存设备中显示粒子仿真特效。期间经过主要设备时,该设备就会闪烁并显示设备结构和工作原理,实际视像效果如图3所示。可以交互实现流程的暂停和继续显示。

谷物粒子的色彩渲染和纹理图案的映射是使用Unity引擎完成的,通过该引擎设置粒子系统的Renderer、Material等属性,并通过实验确定初速度、方向、最大高度和粒子淡化系数等函数的取值,参数设置见表1,谷物粒子倾泻入仓库的仿真结果如图5所示。

利用Unity引擎,通过实验为 $T[N+1]$ 、 $VC[N][2]$ 、 $CM[N][2]$ 和 $CS[N][2]$ 设置合适的参数值,完成工艺流程的仿真。整个工艺流程仿真系统即如图6所示。

表1 粒子属性参数设置

Tab. 1 Particle property parameter setting

粒子属性	设置值
粒子各半径	$a = 0.9, b = 0.05, c = 0.1$
最大高度 H	1
初速度 V	5
方向 D	(0,0,1.5)
淡化速率 Δa	0.1
垂直加速度 g	-1



图5 谷物粒子仿真

Fig. 5 Grain particle simulation



图6 工艺流程仿真系统

Fig. 6 Process simulation system

4 结束语

基于虚拟现实的面粉生产工艺仿真系统,通过将虚拟现实技术和仿真相结合,利用 Unity3D 研究设计了三维场景浏览部分、知识问答部分和工艺

流程仿真部分,各部分之间可以自由交换信息。而且,基于虚拟现实的知识问答方法的成功研发,使该系统能更好地应用于员工培训。其中的工艺流程仿真方法结合谷物粒子仿真和工艺流程仿真,配合关键设备详解和三维场景浏览,实现了面粉生产工艺流程及其生产设备的仿真和展示。同时,仿真系统具有良好的跨平台性和扩展性。但文章所涉及的内容仅对工业虚拟场景的构建、人机交互和工艺流程仿真进行了初步讨论,虚拟现实技术在工业中还有着巨大的应用潜力。

参考文献

- [1] 杨茜. 虚拟现实技术在工业设计中的应用现状与发展趋势[J]. 中国高新技术企业, 2015(16):48-49.
- [2] 朱玉韬. 流程工业信息可视化平台理论与应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [3] 陈晓青, 王少伟. 基于 Unity 的虚拟现实技术在教育中的应用[J]. 软件导刊(教育技术), 2011(12):76-78.
- [4] 赵铭超. 虚拟现实三维建模技术的研究与应用[D]. 天津:天津师范大学, 2011.
- [5] 宋沫飞. 交互式数字几何建模及其关键技术研究[D]. 南京:南京大学, 2015.
- [6] 修春华, 孙秀娟, 苗坡, 等. 基于 Unity3D 的虚拟矿山漫游仿真系统设计与实现[J]. 金属矿山, 2015, 44(4):262-266.
- [7] 张典华, 陈一民. 基于 Unity3D 的多平台虚拟校园设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(2):127-130, 135.
- [8] 潘秋羽, 毕硕本, 陆良虎, 等. 基于粒子系统三维动态云的快速仿真算法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(1):85-89, 106.
- [9] 吴仲明, 田联房, 李彬, 等. 基于体可视化的计算机辅助轮廓测量系统设计[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(4):146-150.
- [10] 苏召斌, 林森. 绞刀运动姿态的欧拉角表示[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(12):62-66.
- [11] 杨玉芬, 李明明, 高晓旻. 对象管理在面向对象数据库中的应用研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2015, 31(5):548-553.
- [12] 党向盈, 姜代红. 神经网络结合遗传算法在建筑优化设计中的应用[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2017, 32(2):66-71.
- [13] 孙国明, 杨佳欣. 神经网络在民用建筑设计工程中的应用[J]. 工程建设与设计, 2012(10):138-140.
- [14] 赖鑫生. 神经网络结合遗传算法优化应用[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2004, 21(2):179-184.
- [15] 李建, 陈烈, 茅林明. 支持向量机在建筑能耗预测中的应用[J]. 建筑节能, 2014, 42(12):77-80.
- [16] 李杰. 改进粒子群算法优化支持向量机的工程造价预测[J]. 计算机系统应用, 2016, 25(6):202-206.
- [17] ZHOU Ying, SU WanJun, DING Lieyun, et al. Predicting safety risks in deep foundation pits in subway infrastructure projects: Support Vector Machine approach [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(5):04017052.
- [18] SAMUI P. Support vector machine applied to settlement of shallow foundations on cohesionless soils[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(3):419-427.
- [19] CHANG C C, LIN C J. LIBSVM: A library for support vector machines [J]. ACM Transactions on Internet Systems and Technology, 2011, 2:27:1-27:27.
- [20] 谢益辉, 朱钰. Bootstrap 方法的历史发展和前沿研究[J]. 统计与信息论坛, 2008, 23(2):90-96.
- [21] 赵玉, 祁春节. 大宗农产品价格风险评估—基于小波神经网络—Bootstrap 方法的实证研究[J]. 技术经济, 2014, 33(3):75-79.
- [22] 陈娇娜, 张翔, 张生瑞. 高速公路行程时间 Bootstrap-KNN 区间预测分析与实证[J]. 控制与决策, 2018, 33(11):2080-2086.
- [23] NEGNEVITSKY M. Artificial intelligence: A guide to intelligent systems [M]. 3rd ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2001.
- [24] EFRON B R, TIBSHIRANI J. An introduction to the Bootstrap [M]. London: Chapman and Hall/CRC, 1993.
- [25] KHOSRAVI A, NAHAVANDI S, SRINIVASAN D, et al. Constructing optimal prediction intervals by using neural networks and bootstrap method [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(8):1810-1815.

(上接第91页)