

基于 Vague 集及隐马尔科夫的大学生心理危机预测

高广银¹, 刘 姜², 丁 勇¹

(1. 南京理工大学 泰州科技学院 计算机科学与技术系, 泰州 225300; 2. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 现有关于大学生心理问题的研究主要停留在心理健康教育层面, 对心理问题的发现缺乏有效手段, 难以准确预知大学生心理危机。针对这一问题, 应用隐马尔科夫模型对大学生心理危机进行预测, 分析影响大学生心理健康的因素, 并利用 Vague 集理论构造核心因素集; 确立隐马尔科夫模型各个要素的初始值, 建立预测大学生心理危机的模型, 运用 Baum-Welch 算法对模型参数进行训练, 并结合 Viterbi 算法进行预测。根据某大学学生心理健康评估原始记录进行实例分析, 验证了模型的正确性。研究表明, 采用核心因素集能够提高预测的准确性, 为预知大学生心理问题提供有效的途径。

关键词: Vague 集; 隐马尔科夫模型; 大学生心理危机

中图分类号: TP 3

文献标志码: A

Prediction of College Students' Psychological Crisis Based on Vague Set and HMM

GAO Guangyin¹, LIU Jiang², DING Yong¹

(1. Department of Computer Science and Technology, Taizhou Institute of Science and Technology, NUST, Taizhou 225300, China; 2. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Existing research on college students' psychological problems mainly stays at the mental health education level. The analysis methods and corresponding treatment measures of psychological problems have been sometimes proposed. However, it is still difficult to accurately predict the students' psychological crisis, and is lacking in effective means to discover these problems. To settle this, a hidden Markov model (HMM) was applied to predict the psychological crisis of college students. A core factor set which may lead to crisis was constructed based on the theory of vague set, and the factors that affect the mental health of college students were analyzed. An initial HMM to predict college students psychological crisis was built by figuring out the initial value of each element of the model, and trained by using the Baum-Welch algorithm. Combining with the Viterbi algorithm, the prediction was carried out, and its correctness was verified by instance analysis according to the original students' psychological health valuation records in an university. The results show that the method can improve the prediction accuracy by adopting the core factor set in the model which would be an effective means to foresee the hidden crisis.

收稿日期: 2014-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61103009)

第一作者: 高广银(1982-), 男, 讲师。研究方向: 数据挖掘与机器学习。E-mail: 11148312@qq.com

Key words: *Vague Set; HMM; college students' psychological crisis*

大学校园里因心理问题引发的心理危机事件呈上升趋势,各种从压力、抑郁到自伤、他伤等失控行为并不鲜见.专家学者积极研究大学生心理健康教育,分析影响心理健康的因素,并提出了从学生心理委员到学校心理咨询中心层层报送的高校心理危机监控报送体系^[1],及以建设校园文化、确立价值观导向为核心的心理危机干预机制^[2],这促进了人们对心理危机问题的关注和思考.然而,这些研究大都停留在心理健康教育的层面,缺乏有效的手段预知大学生是否产生了心理危机.人的心理活动极其复杂,其变化过程也不可见,通过心理危机预测能够尽早地发现问题,及时采取干预措施,有效避免心理危机形成、恶化带来的后果.

隐马尔科夫模型(hidden Markov model, HMM)^[3]作为一种统计分析模型,创立于20世纪70年代,80年代得到了传播和发展,并应用于语音人工合成、图像处理、模式识别及生物信号处理等领域^[4].近年来,该模型被应用于金融市场的波动性分析、经济预算、网络安全^[5]、人的行为分析^[6]等诸多领域,从而被证明对于解决一类问题,即系统中表层可见事件可能由低层隐藏状态引发,具有重要意义.

本文将隐马尔科夫模型应用于高校学生心理危机的预测,在分析影响大学生心理健康因素的基础上,利用 Vague 集理论^[7]建立核心因素集,由此确定可观察序列集,建立隐马尔科夫模型,对模型参数进行训练,并将训练后的模型应用于心理危机预测.实例分析结果表明基于该模型预测大学生心理危机是可行的.

1 心理危机因素

1.1 影响大学生心理健康的因素分析

在大学生心理健康教育研究中,不同的学者由于研究工具和研究对象的不同而得出了许多不同的结论.针对综合性大学新生的心理调查发现,大学新生的主要心理问题是学习压力大、人格缺陷和人际交往障碍^[8].基于高职学生的研究表明,导致心理压力因素主要是学习、就业和情感等^[9].这些研究成果都从不同层面指出了影响大学生心理健康的因素,但是关于这些因素对心理危机产生的影响程度并未阐明.本文首先在已有研究成果的基础上,结合某独立学院的

实际情况,通过与学院心理辅导教师和辅导员的访谈,概括影响大学生心理健康有4大因素共19项指标:家庭因素(氛围、父母教养方式、经济条件、重大变故)、社会因素(价值多元化、扩招学费高、竞争就业难)、学校因素(学习压力、教育方式、管理制度、设施条件、教工素质)及个人因素(认知方式、应对方式、归因方式、自我定位、人际关系、社会认同、生理疾病);其次基于 Vague 集对这些因素约简得出影响心理危机产生的核心因素^[10].

1.2 建立核心因素集

根据上述分析的19项指标,可以建立大学生心理健康影响因素的完备集 $D = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$,其中 $m = 19$.然而这些因素对于心理危机的形成作用不等,只有那些起关键作用的因素对于开展心理危机预测有意义,即核心因素.

首先,组建能够代表心理健康教育各层面的专家组,组员有市教育局心理咨询师、高校心理学专业教师、辅导员、其他心理健康教育工作者及家长代表共 n 名,并请这 n 位专家,对 m 个因素的重要性表态,分重要、不重要和不好判断,并分别记为 1, -1 和 0.其次,汇总专家意见,确定每个因素的重要程度,并用 Vague 集表示^[11].

从而,因素完备集 D 到核心因素集 C 的关系 $R(D \rightarrow C)$ 可以定义为一 Vague 集关系.每一指标 $a_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的重要程度可以表示为 $(t(a_i), 1 - f(a_i))$.其中, $t(a_i)$ 表示指标 a_i 对大学生心理危机产生重要影响的成分; $f(a_i)$ 表示指标 a_i 不对大学生心理危机产生重要影响的成分. $t(a_i)$ 及 $f(a_i)$ 定义如下:

$$t(a_i) = \text{认为因素 } a_i \text{ 重要的专家数} / n \quad (1)$$

$$f(a_i) = \text{认为因素 } a_i \text{ 不重要的专家数} / n \quad (2)$$

最后,计算核函数 $H(a_i)$,并给出重要性标准 $\alpha (0 < \alpha < 1)$,当 $H(a_i) \geq \alpha$ 时, a_i 入选核心因素集 C .核函数 $H(a_i)$ 可以解释为因素 a_i 对心理危机产生重要影响的重要程度,其定义为

$$H(a_i) = t(a_i) - f(a_i), \\ i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

根据经验,取 $\alpha = 0.3$,并用 $H(a_i) \geq \alpha$ 作为判断准则,从19个因素中筛选出5个核心因素,得到核心因素集 $C = \{\text{父母教养方式、重大变故、竞争就业难、教工素质、人际关系}\}$,如表1所示(见下页).

表 1 专家评分表
Tab.1 Expert score table

类别	因素																		
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}
专家 1	1	1	0	1	-1	-1	1	-1	0	1	-1	1	1	0	-1	-1	1	0	0
专家 2	0	0	1	1	1	1	0	-1	1	-1	0	1	-1	0	1	0	1	-1	0
专家 3	0	1	-1	0	-1	-1	1	0	0	1	0	1	0	1	-1	-1	1	0	1
专家 4	1	1	0	1	1	0	1	-1	-1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0
专家 5	0	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	0	-1	1	1	1	0	0	0	1	0	-1
专家 6	1	0	0	1	-1	0	1	-1	1	1	0	-1	0	0	-1	-1	-1	0	0
专家 7	0	1	0	1	0	-1	1	1	-1	0	0	1	1	-1	0	-1	1	0	-1
专家 8	0	1	1	0	-1	-1	1	-1	1	1	0	-1	-1	0	-1	0	1	-1	0
专家 9	-1	0	0	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	0	0
专家 10	0	1	0	1	1	-1	1	-1	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	1	0	0
$t(a_i)$	0.3	0.6	0.2	0.7	0.3	0.3	0.9	0.1	0.4	0.5	0.1	0.7	0.4	0.2	0.2	0	0.7	0	0.1
$f(a_i)$	0.1	0.1	0.2	0.1	0.6	0.4	0	0.8	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.6	0.7	0.3	0.3	0.2
$H(a_i)$	0.2	0.5	0	0.6	-0.3	-0.1	0.9	-0.7	0.1	0.2	-0.1	0.5	0.1	0	-0.4	-0.7	0.4	-0.3	-0.1
入选		✓		✓			✓					✓					✓		

2 心理危机预测建模

2.1 隐马尔科夫模型

隐马尔科夫模型是一种用参数表示的用于描述随机过程统计特性的概率模型,是一个双重随机过程.它由马尔科夫链和一般随机过程两部分组成,其中马尔科夫链用转移概率矩阵描述状态的转移,而一般随机过程则用观察概率矩阵描述状态与观察序列间的关系^[12].HMM 定义如下:

a. X 表示一组状态集合, $X = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, 状态数为 N , 并用 q_t 表示 t 时刻的状态;

b. O 表示一组可观察序列的集合, $O = \{V_1, V_2, \dots, V_M\}$, 其中, M 是从每一个状态可能输出的不同观察值数目;

c. 状态转移概率矩阵 $A = \{a_{ij}\}$, 其中, $a_{ij} = P\{q_{i+1} = S_j | q_i = S_i\}$, $i \geq 1, j \leq N$;

d. 状态 S_j 的观察概率矩阵 $B = \{b_j(k)\}$, 表示状态 S_j 输出相应观察值的概率, 其中 $b_j(k) = P\{O_t = V_k | q_t = S_j\}$, $1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq M$;

e. 初始化状态分布 $\pi = \{\pi_i\}$, $\pi_i = P\{q_1 = S_i\}$, $1 \leq i \leq N$.

由上, HMM 可以定义为一个五元组 $\lambda = (X, O, \pi, A, B)$, 并简写为 $\lambda = (\pi, A, B)$.

HMM 主要解决 3 类问题: 评估、解码和学习。

a. 评估. 给定模型参数 $\lambda = (X, O, \pi, A, B)$ 及观察序列 $O = \{V_1, V_2, \dots, V_M\}$, 根据此模型计算

此观察序列的概率 $P(O|\lambda)$.

b. 解码. 根据给定的模型 $\lambda = (X, O, \pi, A, B)$ 及一个观察序列, 选择最符合该观察序列的状态序列。

c. 学习. 给出一个观察序列, 调整模型的参数 A, B, π , 使得 $P(O|\lambda)$ 最大。

2.2 初始模型的建立

建立预测大学生心理危机的隐马尔科夫模型, 即要确定隐马尔科夫模型的 5 个要素, 可通过 5 个步骤完成^[13].

步骤 1 通过心理专家对大学生心理状态进行评估, 确定其状态的几种可能情况, 一般描述为心理健康、心理亚健康、心理危机等, 以此作为预测大学生心理危机的隐马尔科夫模型的隐状态, 定义隐状态集合为: $X = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, $N = 3$, 其中, S_1, S_2, S_3 分别为心理危机、心理亚健康、心理健康 3 种心理状态。

步骤 2 将核心因素集 $C = \{\text{父母教养方式, 重大变故, 竞争就业难, 教工素质, 人际关系}\}$ 记为 $C = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$, 为了便于描述这些因素对心理危机产生的影响以及建立隐马尔科夫模型, 本文采用这 5 个因素的一个组合 V 表示, 定义为

$$V = v_1 v_2 \cdots v_m, m = 5$$

其中

$$v_i = \begin{cases} 0, & \text{如果因素 } a_i \text{ 对心理危机的产生没有影响} \\ 1, & \text{如果因素 } a_i \text{ 对心理危机的产生有影响} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

显然, V 是由 0 或 1 组成、长度为 m 的串,且可以通过学生问卷调查或心理测试等方式获得,从而可以作为隐马尔科夫模型的可观察状态,定义可观察序列集合为: $O = \{V_1, V_2, \dots, V_M\}, M = 2^m$.

步骤 3 设置初始状态转移概率矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.50 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.50 \end{bmatrix}$$

步骤 4 根据大学生心理健康评估历史数据分别统计心理健康、心理亚健康、心理危机 3 种状态下各影响因素组合 V , 即观察状态的概率 $\mathbf{B}$.

步骤 5 设置 $\pi = \{1, 0, 0\}$, 即假设大学生入校时不存在心理危机问题.

通过以上步骤, 预测大学生心理危机的隐马尔科夫初始模型 $\lambda = (\pi, \mathbf{A}, \mathbf{B})$ 已建立, 然而其中的参数未进行优化, 无法真正应用于心理危机的预测中, 因此需要对模型中的参数进行训练和优化.

2.3 模型训练

初始模型 $\lambda = (\pi, \mathbf{A}, \mathbf{B})$ 经过 Baum-Welch 算法优化后, 可以得到模型 $\lambda' = (\pi', \mathbf{A}', \mathbf{B}')$, 其参数经过大量训练数据训练得出, 具体的训练优化流程如下:

a. 引入两个变量 $\epsilon_t(i, j)$ 和 $\gamma_t(i, j)$, 其中

$$\epsilon_t(i, j) = P(q_t = S_i, q_{t+1} = S_j | O, \lambda) = \frac{\alpha_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{\sum_{i=1}^N \alpha_t(i) \beta_t(i)} \quad (5)$$

式中, $\epsilon_t(i, j)$ 为给定隐马尔科夫模型 λ 和观察序列 O 的前提下, 在 t 时刻状态为 S_i 且在 $t+1$ 时刻状态为 S_j 的概率; $\alpha_t(i)$ 为前向变量, 表示 t 时刻状态为 S_i , 且 t 时刻之前 (包括 t 时刻) 满足给定观测序列的概率; $\beta_t(i)$ 为后向变量, 表示 t 时刻状态为 S_i , 且 t 时刻以后满足给定观测序列的概率.

$$\gamma_t(i) = P(q_t = S_i | O, \lambda) = \frac{P(q_t = S_i | O, \lambda)}{P(O | \lambda)} = \frac{\alpha_t(i) \beta_t(i)}{\sum_{i=1}^N \alpha_t(i) \beta_t(i)} \quad (6)$$

式中, $\gamma_t(i)$ 为给定隐马尔科夫模型 λ 和观察序列 O 的前提下, 在时刻 t 状态为 S_i 的概率. 合并后得到

$$\gamma_t(i) = \sum_{j=1}^N \epsilon_t(i, j) \quad (7)$$

b. 利用前面定义的变量 $\epsilon_t(i, j)$ 和 $\gamma_t(i)$, 可得出状态转移概率矩阵 $\mathbf{A}$ 的优化算法, 具体推导过程为

$$\alpha'_{ij} = \frac{P(O | S_i \rightarrow S_j, \forall t)}{P(O | S_i \rightarrow \forall S_j)} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \epsilon_t(i, j)}{\sum_{t=1}^{T-1} \sum_{j=1}^N \gamma_t(i)} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \alpha_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{\sum_{t=1}^{T-1} \sum_{j=1}^N \alpha_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)} \quad (8)$$

最后得出经过优化后的 α_{ij} 为

$$\alpha'_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \alpha_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{\sum_{t=1}^{T-1} \sum_{j=1}^N \alpha_t(i) \beta_t(i)} \quad (9)$$

c. 观察值概率分布 $\mathbf{B}$ 的优化算法为

$$b'_j(k) = \frac{\sum_{t=1}^T \gamma_t(j)}{\sum_{t=1}^T \gamma_t(j)} = \frac{\sum_{t=1}^T \alpha_t(j) \beta_t(j)}{\sum_{t=1}^T \alpha_t(j) \beta_t(j)} \quad (10)$$

d. 初始状态概率分布 π 的优化算法为

$$\pi'_i = \gamma_1(i) = \frac{\alpha_1(i) \beta_1(i)}{\sum_{i=1}^N \alpha_1(i) \beta_1(i)} \quad (11)$$

通过式(9)、式(10)及式(11)分别对转移概率矩阵 $\mathbf{A}$ 、观察概率矩阵 $\mathbf{B}$ 及初始化状态分布 π 进行优化, 得到训练后的模型 $\lambda' = (\pi', \mathbf{A}', \mathbf{B}')$, 并用于心理危机预测.

2.4 模型应用

模型 $\lambda' = (\pi', \mathbf{A}', \mathbf{B}')$ 应用于心理危机预测, 根据核心因素的观察序列, 寻找生成该观察序列最可能的隐状态序列, 即学生的心理状态, 达到预测的目的. 这属于隐马尔科夫模型中的解码问题, 使用 Viterbi 算法解决, 具体算法过程如下:

a. $t=1$ 时, $\delta_1(j) = \pi(j) b_{jk_1}$;

b. $t>1$ 时, $\delta_t(j) = \max_i \{b_{jk_t} \delta_{t-1}(i) a_{ij}\}$;

c. $t=T$ 时, 计算 $\delta_T(j)$, 选择包含最大局部概率的状态 q_T^* , 相应的局部最优路径即为全局最优路径;

d. 反向指针 $\varphi_t(j)$ 用于回溯, $\varphi_t(j) = \arg \max_i \{\delta_{t-1}(i) a_{ij}\}$.

其中, 最优的隐状态序列 $q_1^* q_2^* \dots q_T^*$ 是使得 $P = (O_T | q_1 q_2 \dots q_T)$ 最大的 $q_1 q_2 \dots q_T$ 组合; 局部概率 $\delta_t(i)$ 为在 t 时刻到达状态 S_i 的所有序列概率中最大的概率; 局部最优路径表示产生上述最大概率的隐状态序列 $q_1^* q_2^* \dots q_T^*$.

事实上, 求出 q_T^* 后, 便可对 T 时刻所观察到的学生心理危机影响因素的值所对应的学生心理状

态作出预测,而回溯得到的心理状态序列可以用于分析心理变化的过程.

3 实例分析

模型训练及预测程序基于 Eclipse 平台,采用 Java 语言及 google jahmm-0.6.1 包编写.

实例分析数据来自南京理工大学泰州科技学院大学生心理健康教育与咨询中心近两年来学生心理健康评估原始记录约 2 000 条.根据前文定义的隐状态集合及可观察序列集合对心理健康评估原始数据进行预处理,得到观测符号对应隐状态的记录,其中观察符号是由 0,1 组成的长度为 5 的字符串,共 32 种,隐状态共 3 种.将预处理后的数据分成两部分:训练数据和测试数据,分别用于模型训练和预测.

分析结果表明,随着训练样本容量的增加,模型的预测准确率逐步提高,并在达到一定数目后趋于稳定,模型是收敛的,如图 1 所示.使用单个因素的预测效果远低于使用核心因素集,使用核心因素集的预测准确率能够达到 90% 以上;另一方面,各因素对预测结果的影响程度是不等的,其中“父母教养方式、重大变故、竞争就业难”这 3 个因素对预测影响较大.

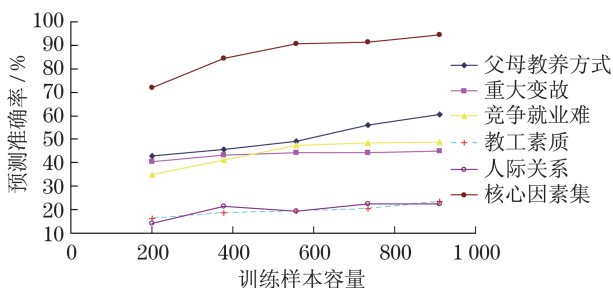


图 1 基于各因素及核心因素集的预测结果

Fig.1 Prediction result based on single factor and core factor set

此外,将该模型应用于在校一年级学生心理危机预测,并与心理卫生测试国际通用标准 UPI 筛选及 SCL-90 进行比较,其中 UPI 是大学人格问卷, SCL-90 是心理健康测试量表.从表 2 中数据可以看到心理卫生测试标准的评测结果具有一致性,即 UPI 与 SCL-90 对 S_1 , S_2 , S_3 这 3 种状态样本数的统计结果保持一致.但两者都倾向于将样本由 S_3 评测为 S_2 ,由 S_2 评测为 S_1 ,继而采取后续约谈等干预手段实施心理健康教育;使用 HMM 的预测结果与使用测试标准的评测结果基本吻合,且准确率更高一些,表 3 中准确率的比较也说明了这一点.

表 2 实际预测与标准评测

Tab.2 Practical prediction and standard evaluation

状态	HMM		UPI		SCL-90	
	样本数	百分率/%	样本数	百分率/%	样本数	百分率/%
S_1	65	3.31	302	15.37	268	13.64
S_2	498	25.34	457	23.26	448	22.80
S_3	1 402	71.35	1 206	61.37	1 249	63.56
合计	1 965	100	1 965	100	1 965	100

表 3 准确率对比

Tab.3 Accuracy comparison among various methods %

测试类型	HMM	UPI	SCL-90
准确率	89.11	75.17	78.63

4 结束语

为了解决大学生心理危机预测问题,基于 Vague 集理论分析并建立了影响大学生心理危机的核心因素集,构造了可观察序列集合,建立了预测大学生心理危机的隐马尔科夫模型.运用 Baum-Welch 算法对模型参数进行训练,并将训练后的模型应用于心理危机预测,通过基于真实数据的实例分析验证模型的正确性.研究表明,单个因素无法准确预测,而采用核心因素集能够显著提高预测的准确率,且各因素对预测所起的作用不等.下一阶段将继续研究更合理的因素组合,对模型进行优化,运用序列挖掘方法挖掘大学生心理活动变化的规律,细化隐状态及隐状态之间的转移,提高预测的精度,通过反向算法还原心理危机的产生过程,分析并给出合理的干预措施建议.

参考文献:

- [1] 王群,刁静,林磊.大学生心理危机预防与干预体系的研究[J].上海中医药大学学报,2013,27(2):88-92.
- [2] 陈小红,李三岗.生命教育视角下大学生心理危机及其干预探析[J].渭南师范学院学报,2013,28(12):78-80.
- [3] Rabiner L R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(2): 257-286.
- [4] Yamato J, Ohya J, Ishii K. Recognition human action in time sequential images using hidden Markov model [C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Champaign, IL: IEEE, 1992: 379-385.

(下转第 391 页)

区时空资源集成多目标优化模型. 仿真结果表明,该模型能较好地协调交叉口直行待行区交通运行效益及环境效益.

本文的研究对象为单直行车道及其所属直行待行区,一般情况下,直行待行区与左转待行区会共同设置,且本文未将整个交叉口考虑在内,上述问题是未来重点研究工作.

参考文献:

- [1] 王秋平,谭学龙,张生瑞. 城市单点交叉口信号配时优化[J]. 交通运输工程学报,2006,6(2):60-64.
- [2] 杨晓芳,张盛,付强. 基于博弈论的信号配时方法研究[J]. 上海理工大学学报,2013,35(6):567-571.
- [3] 杜春燕,周溪召,智路平. 基于系统动力学的交叉口通行能力测算模型的仿真与分析[J]. 上海理工大学学报,2014,36(5):449-455.
- [4] 倪颖,李克平,徐洪峰,等. 信号交叉口机动车左转待行区的设置研究[J]. 交通与运输,2006(2):32-36.
- [5] 季彦婕,邓卫,王伟,等. 信号交叉口左转机动车等待区设置方法研究[J]. 公路交通科技,2006,23(3):135-138.
- [6] 尚德申,王山川,王文红,等. 信号交叉口直行待行区的设置研究[J]. 中外公路,2010,30(1):29-31.
- [7] 李小帅,贾顺平,孙海瑞,等. 机动车待行区设置方法

的实证研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,11(S1):194-200.

- [8] 江颖. 左转待行区对信号交叉口通行能力的影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2013:36-49.
- [9] Yang Z, Liu P, Chen Y G, et al. Can left-turn waiting areas improve the capacity of left-turn lanes at signalized intersections [C] // 8th Intersection Conference on Traffic and Transportation Studies. Changsha,2012:192-200.
- [10] Yang Z, Liu P, Tian Z Z, et al. Effects of left-turn waiting areas on capacity and level of service of signalized intersections[J]. Journal of Transportation Engineering,2013,139(11):1076-1085.
- [11] 王殿海,李丽丽,陈永恒,等. 机动车左弯待转区设置的临界条件[J]. 公路交通科技,2009,26(11):132-135.
- [12] 李丽丽. 信号交叉口左转交通流组织中的临界问题研究[D]. 长春:吉林大学,2009:53-69.
- [13] 荣建,何民,陈春妹. 信号交叉口排队长度动态计算方法研究[J]. 中国公路学报,2002,15(3):101-103.
- [14] 王殿海,祁宏生,徐程,等. 信号交叉口停车次数[J]. 吉林大学学报(工学版),2009,39(S2):140-145.
- [15] Webster F V. Traffic signal setting[R]. London: Rood Research Laboratory Technical Paper No. 39,1958.

(编辑:丁红艺)

(上接第384页)

- [5] Bilmes J A. What HMMs can do [J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2006, 89(3):1-24.
- [6] 邬书跃,田新广. 基于隐马尔可夫模型的用户行为异常检测新方法[J]. 通信学报,2007,28(4):38-43.
- [7] Gau W L, Buehrer D J. Vague sets [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(2):610-614.
- [8] 刘伶俐,王朝立,于震. CHMM 语音识别初值选择方法的研究[J]. 上海理工大学学报,2012,34(4):323-326.
- [9] 马广水. 基于系统动力学大学生心理安全预警技术研

究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.

- [10] 林志贵,徐立中,刘英平. Vague 集理论及其在模糊信息处理中的应用[J]. 信息与控制,2005,34(1):54-59.
- [11] 张丽,马良. 基于粗糙集属性约简的模糊模式识别[J]. 上海理工大学学报,2003,25(1):50-53.
- [12] 彭子平,张严虎,潘露露. 隐马尔科夫模型原理及其重要应用[J]. 计算机科学,2008,35(4):138-139.
- [13] 闫新娟,谭敏生,严亚周,等. 基于隐马尔科夫模型和神经网络的入侵检测研究[J]. 计算机应用与软件,2012,29(2):294-297.

(编辑:丁红艺)