

基于决策树的驾驶疲劳等级分析与判定

胥 川¹, 王雪松¹, 陈小鸿¹, 张 惠²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 中国第一汽车股份有限公司技术中心车身部安全研究室, 吉林 长春 130011)

摘要: 为了提高疲劳检测的精度, 通过驾驶模拟试验采集了 15 位中青年有经验驾驶员的车辆横向位置、方向盘操控、眼动等多源数据并计算疲劳特征指标, 同时采集驾驶员主观疲劳程度并通过视频回放进行校核, 在此基础上建立疲劳等级与特征指标的决策树模型, 结果表明, 对于区别疲劳等级最显著的变量有闭眼时间比例 (percentage of eye closure, PERCLOS)、车道偏移标准差、越线时空面积、方向盘反转率, 且上述变量与疲劳等级呈正相关; PERCLOS 为最优的疲劳等级划分变量, 并获取了 2 个重要阈值: 当 PERCLOS 小于 2.8% 时, 驾驶员处于严重疲劳状态的比例为零; 当 PERCLOS 大于 21.9% 时, 驾驶员处于未疲劳状态的比例为零; 该模型预测的总正确率为 64.31%。为了校验模型, 从 15 位驾驶员中随机选取了 4 位进行模型校验试验。校核结果表明该模型的正确率达 63.22%。模型在 2 次试验中均未发现将严重疲劳识别为未疲劳的情况。

关键词: 驾驶模拟器; 疲劳驾驶; 决策树; 疲劳等级; 生理参数; 驾驶行为参数

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Driver Drowsiness Level Analysis and Predication based on Decision Tree

XU Chuan¹, WANG Xuesong¹, CHEN Xiaohong¹, ZHANG Hui²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China FAW Group Corporation R&D Center, Vehicle Safety of Body Department, Changchun 130011, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of drowsiness detection, in this study multi-source data for young and middle-aged experienced drivers including vehicle lateral position, steering wheel controlling, and eye movement are collected in a driving simulator experiment. Meanwhile, the

subjective drowsiness level of the drivers were also recorded and validated by replaying the videos. Based on those data, the decision tree model was established. The results indicate that the most significant variables to estimate drowsiness level are percentage of eye closure (PERCLOS), the standard deviation of lateral position, the time-space area of lane crossing, the reverse rate of steering wheel and those variables are positively correlated to drowsiness level. Among these variables, PERCLOS is the best variable to divide drowsiness level. When PERCLOS is lower than 2.8%, there are no drivers in seriously drowsy state and when PERCLOS is higher than 21.9%, there are no drivers in non-drowsy state; the total correct predicting rate is 64.31%. To verification the model, 4 drivers were selected from the 15 drivers randomly. The results of model validation showed the correct predicting rate of the decision tree model is 63.22%. In both experiments, the decision tree model doesn't mistake seriously drowsy state for non-drowsy state.

Key words: driving simulator; drowsy driving; decision tree; drowsiness level; physiological index; driving behavior index

疲劳驾驶是造成严重交通事故的重要原因。2007 年, 我国直接由于疲劳驾驶造成的事故为 3 349 起, 死亡 1 768 人^[1]。尽管疲劳驾驶广泛存在且后果严重, 但由于疲劳概念的模糊、缺乏有效和可靠的设备检测驾驶员疲劳程度、对疲劳在事故形成中贡献的认识匮乏以及多数驾驶员因不愿担责而拒绝承认疲劳驾驶事实^[2]等原因, 导致交警对事故是否涉及疲劳驾驶的认定困难, 从而导致难以通过法律手段减少疲劳驾驶。车载疲劳预警被视为重要且有效的防疲劳驾驶主动安全技术手段, 它可以通过对驾驶员或车辆运行状态进行在线监控实时判定驾驶员的

收稿日期: 2013-11-28

基金项目: 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室开放基金(2013100)

第一作者: 胥 川(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为交通安全、交通心理与行为。E-mail: xuchuan7@gmail.com

通讯作者: 王雪松(1977—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为交通安全、交通统计分析、交通规划、驾驶模拟器应用。

E-mail: wangxs@tongji.edu.cn

疲劳等级并发出相应疲劳预警提示。

疲劳等级判定是其中的关键技术,目前研究中通常以驾驶员生理指标、驾驶行为指标为判断依据。通过脑电在不同频段的能量值^[3]、熵^[4]以及心率变异率^[5]等指标可以较准确地判定驾驶员是否疲劳,但由于脑电、心率采集的侵入性太强,在实际驾驶环境中不易被驾驶员接受。相比之下,眼动指标不但与疲劳程度相关性好^[6],而且有非接触、侵入性小的特点,应用可行性高。此外,方向盘^[7-8]、车道偏移^[9]等驾驶行为指标与疲劳程度有明显相关性,易获取性高,也有较大的应用潜力。

目前对于疲劳等级判定的研究多集中在生理指标或驾驶行为指标的单一数据源上,很少有将生理指标与驾驶行为指标结合起来判定疲劳等级的研究;另一方面,国内已有关于疲劳等级判定的研究中对于疲劳等级的划分通常较为简略(一般分为疲劳和清醒 2 级),而国外部分研究虽然常采用 9 级的 KSS (Karolinska sleepiness scale) 主观疲劳等级,但以问询方式获取的驾驶员 KSS 疲劳等级可能存在偏差,缺乏通过其他数据的校核;此外,现有的相关研究多数在静态驾驶模拟器环境下进行,而运动感对于驾驶员的方向盘控制、车道偏移等指标有不可忽视的

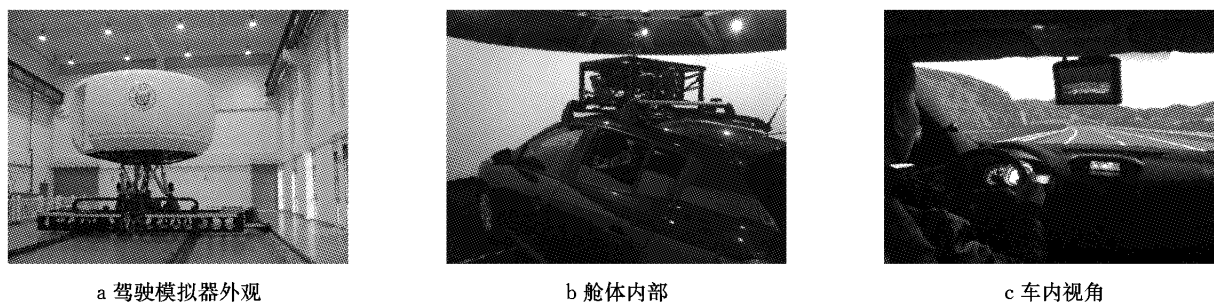
影响^[10]。

本文利用同济大学 8 自由度运动驾驶模拟器设计试验,采集了中青年有经验驾驶员的眼动、方向盘、车道偏移数据并计算相应的疲劳特征指标,同时通过试验过程中的 KSS 主观询问和驾驶员人脸视频校核确定驾驶员疲劳等级,并在此基础上建立决策树疲劳等级判定模型。

1 试验方法

1.1 驾驶模拟器简介

本试验采用 2010 年建成的同济大学高仿真度驾驶模拟器,如图 1 所示。该驾驶模拟器的运动系统为 8 自由度(6 自由度支架,横纵向运动导轨尺寸分别为 20 m, 5 m),模拟舱体内部一辆去掉发动机并安装了方向盘和刹车力反馈、电子传感器和音响系统的梅甘娜 3 系轿车,所有操作和实车完全相同。其视觉场景主要由 5 台投影仪组成的柱面沉浸式投影系统提供,可视范围达 $250^{\circ} \times 40^{\circ}$,车内的 3 个后视镜均被 LED(light-emitting diode)显示屏替代。驾驶模拟器的有效性通过系统测试并证明该模拟器的仿真度可以满足研究需要。



a 驾驶模拟器外观

b 舱体内部

c 车内视角

图 1 同济大学高仿真度驾驶模拟器

Fig.1 Tongji advanced driving simulator

1.2 受试人员

受试人员共 15 人,包括 13 位男性和 2 位女性,年龄(33.9 ± 4.9)岁,累计驾驶里程为(18.0 ± 7.1)万公里,驾龄(7.5 ± 2.1)年。受试人员主要是中青年有经验的驾驶员,尽量减少驾驶经验差异对驾驶行为的影响。所有受试人员要求持有效驾照,身体状况良好,在试验前 1 个月内无药物服用史,测试前 24 h 内不饮酒,测试前 12 h 内不饮用咖啡和功能性饮料。受试人员在测试前都需要填写描述试验要求和权利的《试验知情同意书》。整个试验中,除 1 位驾驶员因睡着而导致试验中断外(中断前的数据依然在本文中进行分析),其余驾驶员均顺利完成试验。

1.3 试验设计

试验道路为一条环形双向六车道且车道宽度 3.75 m 的郊区单调高等级公路。试验道路全长 20 km,每圈由 6 条长为 2 km 的直线段(路段编号为 1, 3, 5, 9, 11, 13)、2 条长为 2 km 曲线段(路段编号为 7, 15)和其他连接曲线组成,如图 2 所示。为了增加环境真实感,道路两旁设置绿草地、树木和少量的村落建筑。

为了让受试人员在有限的试验时间内达到较高的疲劳程度,每位驾驶员被要求在试验道路上连续驾驶 6 圈(约 1 h),车速需要保持在 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右;驾驶期间不需要变换车道;试验车使用自动挡,

驾驶员无需变换档位;试验期间驾驶员不使用手机、收音机、CD机等设备;无环境干扰(例如道路横风);不需要切换试验车的灯光(白天,无隧道,无天气变化);少量其他交通车辆,但不阻挡试验车所在车道。

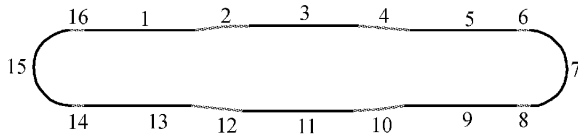


图2 试验道路的线形和路段编号

Fig.2 Ring form highway and segment ID

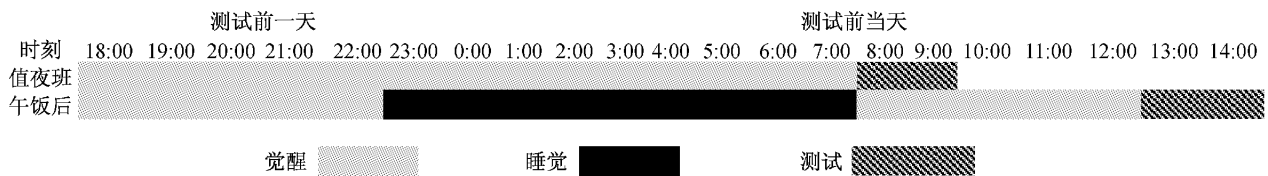


图3 值夜班后和午饭后的测试时间

Fig.3 Study protocol for the condition of night shift and post lunch

驾驶模拟器,先进行5 min的熟悉模拟器试驾,然后开始1 h的正式试验;试验结束后,驾驶员填写试验后疲劳状态调查表。

1.5 数据采集

客观数据的采集:驾驶行为参数包括速率、车道位置、方向盘转角通过驾驶模拟器数据输入输出系统以10 Hz的采样频率记录;驾驶员面部视频通过内部监控摄像头记录;驾驶员眼动参数通过Smart eye眼动仪记录,采样频率为60 Hz。试验过程中,驾驶员每圈在固定位置需要向工作人员报告KSS主观疲劳等级:1级为极度清醒,2级为非常清醒,3为级清醒,4级为有些清醒,5级为不清醒但也不困倦,6级为开始出现困倦的征兆,7级为困倦容易控制,8级为困倦但还可以控制,9级为困倦无法控制。

由于KSS是受试人员主观报告和实际的疲劳程度可能存在偏差。为了提高疲劳程度参考值的准确度,采用了疲劳程序的目测校核。2位经过训练的分析人员分别独立观看驾驶员面部视频,通过对驾驶员的眼睑开度、眼球活动、注意力、反应等的观测对驾驶员疲劳等级进行评估校核。当2位分析人员对某个KSS修正建议一致且与原始值相差不超过1时,直接进行修正;当2位分析人员的修正意见不一致或修正意见一致但修正值超过2时,需要重新观测视频,再协商决定是否修正。经统计,29.4%的KSS值修正幅度为1级,仅有13.3%的KSS值修正幅度超过1级,57.2%的KSS值无修正。

1.4 试验流程

15位受试人员被随机分配为2种测试情况:值夜班后的测试为9人,午饭后的测试为6人。2种情况的试验时间如图3所示。值夜班后测试的驾驶员在一夜未睡眠的情况下早晨8:00到达模拟器实验室进行试验;而午饭后的测试的驾驶员测试前一夜正常睡8 h,中午12:00时,在工作人员的陪同下用标准午餐,然后在13:00进行试验。2种情况的驾驶员都经历完全相同的试验流程,试验前先填写驾驶员基础信息调查表、测试前疲劳状态调查表;之后进入

2 疲劳特征指标计算

以试验道路中2 km长的路段为分析单元,计算每个分析单元内的车道偏移、方向盘、眼动指标。

2.1 车道偏移指标

车道偏移标准差反应了驾驶过程中的车道位置波动,被认为是基于车辆的检测指标中与驾驶员疲劳的一致性最好的^[11]指标。车辆中心与所在车道中心线的距离为车道偏移值(如图4a所示),然后计算分析单元内车道偏移值的标准差,用 L_{PS} 表示。

车辆越线时空面积反应了驾驶过程中车辆越线的严重程度,用 S_{LC} 表示。图4b中 T 为车辆运行时间;黑色曲线表示车辆中心的运行轨迹;虚线为越线判别线,即当车辆中心超越此线时,等价于车辆边缘越过车道分割线。根据车道宽度和车身宽度可以计算越线判别线与车道中心线的距离 L_0 ,其计算公式为

$$L_0 = (a - b) / 2 \quad (1)$$

式中: a 为车道宽度; b 为车身宽度。 S_{LC} 为图4b中的阴影面积,可通过累加求和计算,其计算公式为

$$S_{LC} = \sum_{i=1}^n (|L_i| - L_0) \times t_i, |L_i| > L_0 \quad (2)$$

式中: i 为越线样本点序号; n 为越线样本点的总数; L_i 为车道偏移值; t_i 为抽样间隔时间。

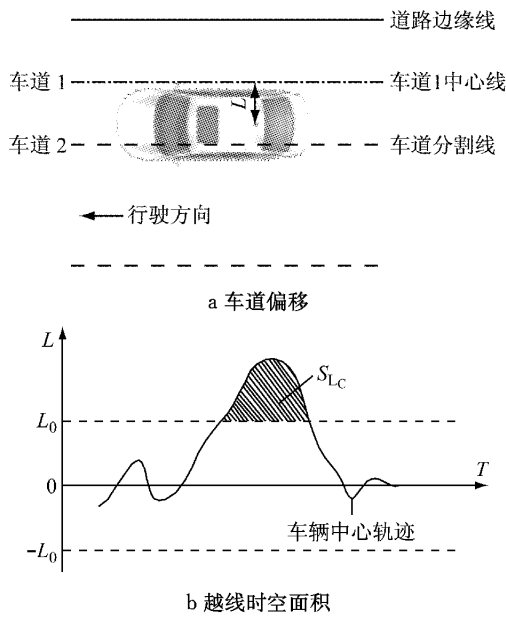


图 4 车道偏移指标示意

Fig. 4 Lateral position indicators illustration

2.2 方向盘指标

方向盘角速度标准差反应了驾驶员操纵方向盘的速度波动,用 S_s 表示. 计算方法为:通过两两相邻的方向盘角度抽样值和时间间隔计算方向盘角速度,然后计算其在分析单元内的标准差.

方向盘反转次数是驾驶员方向盘角速度改变的次数,用 S_R 表示. 本试验的基本路段的线性为直线和圆曲线,理想操作情况下驾驶员的方向盘不需要反转,因此方向盘反转增加说明驾驶员操作的水平下降.

2.3 眼动指标

闭眼时间比例 (percentage of eye closure, PERCLOS) 是指眼睛闭合时间所占的时间比例,与疲劳相关性高. 闭眼眼睑开度阈值是计算 PERCLOS 的关键指标,通常取最大眼睑开度的 20% 作为闭眼眼睑开度阈值 (E_c). 分析单元内,眼睑开度值小于 E_c 的样本数为 N_c ,总样本点数为 N ,则 PERCLOS 的计算公式为:

$$P_s = N_c / N \quad (3)$$

平均瞳孔直径是分析单元内驾驶员瞳孔直径的平均值,用 P_U 表示;平均眨眼频率是指单位时间内驾驶员眨眼的频率,用 B_F 表示.

3 疲劳等级判定模型

3.1 决策树算法

本文以校核后的 KSS 疲劳等级为因变量、以车

道偏移、方向盘、眼动指标为自变量建立模型决策树 (chi-squared automatic interaction detection, CHAID) 分类模型. 决策树通过递归算法形成的树形图来表示事物分类逻辑. 由于决策树有非参数特性且解释能力强,在各领域中得到了广泛应用. CHAID 算法又称卡方自动交叉检验,是决策树分类算法的一种,它可以一次对因变量切分出多个统计显著的分支,会更快生长出高预测能力的分支,适用于分类和序次等级数据的分析,同时 CHAID 还能获取自变量对因变量的重要性程度.

因变量为离散变量 $y, x_1, x_2, \dots, x_g, \dots, x_m$ 为 m 个解释变量,则 CHAID 的算法如下:先将连续变量 x_k 离散化,并让离散化后的变量 $x_k (1 \leq k \leq m)$ 与 y 进行交叉分类;计算每个交叉分类表的卡方统计量 χ^2 .

$$\chi^2 = \sum_g \sum_j \frac{(f_{gj} - \hat{F}_{gj})^2}{\hat{F}_{gj}} \quad (4)$$

式中: $f_{gj} = y_{gj} / u$, 为交叉分类表中第 g 类 x 与第 j 类 y 的实际分布频率, y_{gj} 为分布频数, u 为分类表样本总数; \hat{F}_{gj} 为与 f_{gj} 对应的期望分布频率估计值. 比较 m 个交叉分类表 χ^2 的相伴概率 p 值的大小. 假如 x_k 与 y 的 p 值最大,则选 x_k 为最佳交叉分类变量;重复以上步骤,得到不同阶段多维交互表并找到针对 y 的最优分类,满足深度或显著性终止条件后停止.

3.2 模型及结果

由于采用 9 级疲劳等级造成每个疲劳等级的样本量太少不利于模型估计,因此在建模前先对疲劳等级进行合并,合并后的疲劳等级用 F_L 表示. 合并规则如下: KSS 为 1~5 的合并为未疲劳, $F_L = 1$; KSS 为 6 或 7 的合并为轻度疲劳, $F_L = 2$; KSS 为 8 或 9 的合并为重度疲劳, $F_L = 3$.

CHAID 决策树模型的建立通过 SPSS 软件实现. 模型以 F_L 为因变量, $L_{PS}, S_{LC}, S_s, S_R, P_s, P_U, B_F$ 作为自变量. SPSS 中的模型设置如下:所有自变量都为连续变量,均被离散化为 10 个区间;由于本文中的样本量较大为 703,根节点的最大深度取默认值 3,父节点和子节点需要的最小观测数分别取 70 和 35;使用 Pearson 卡方统计量;分割节点和合并节点的显著性水平都取 0.05,最大迭代次数取 100,单元格最小频率改变量取 0.001;允许用 Bonferroni 方法调整合并或分割节点;采用交叉检验 (参数设置为 10 组) 的方式对决策树进行验证.

模型结果如图 5 所示,最优分化变量为 $P_s (\chi^2 =$

195.7),其卡方值远远大于其他指标,其余分化变量分别为 $L_{PS} (\chi^2 = 17.9)$, $S_{LC} (\chi^2 = 16.4)$, $S_R (\chi^2 =$

10.2)。从划分区间来看,4 个变量与疲劳程度都呈正相关关系。

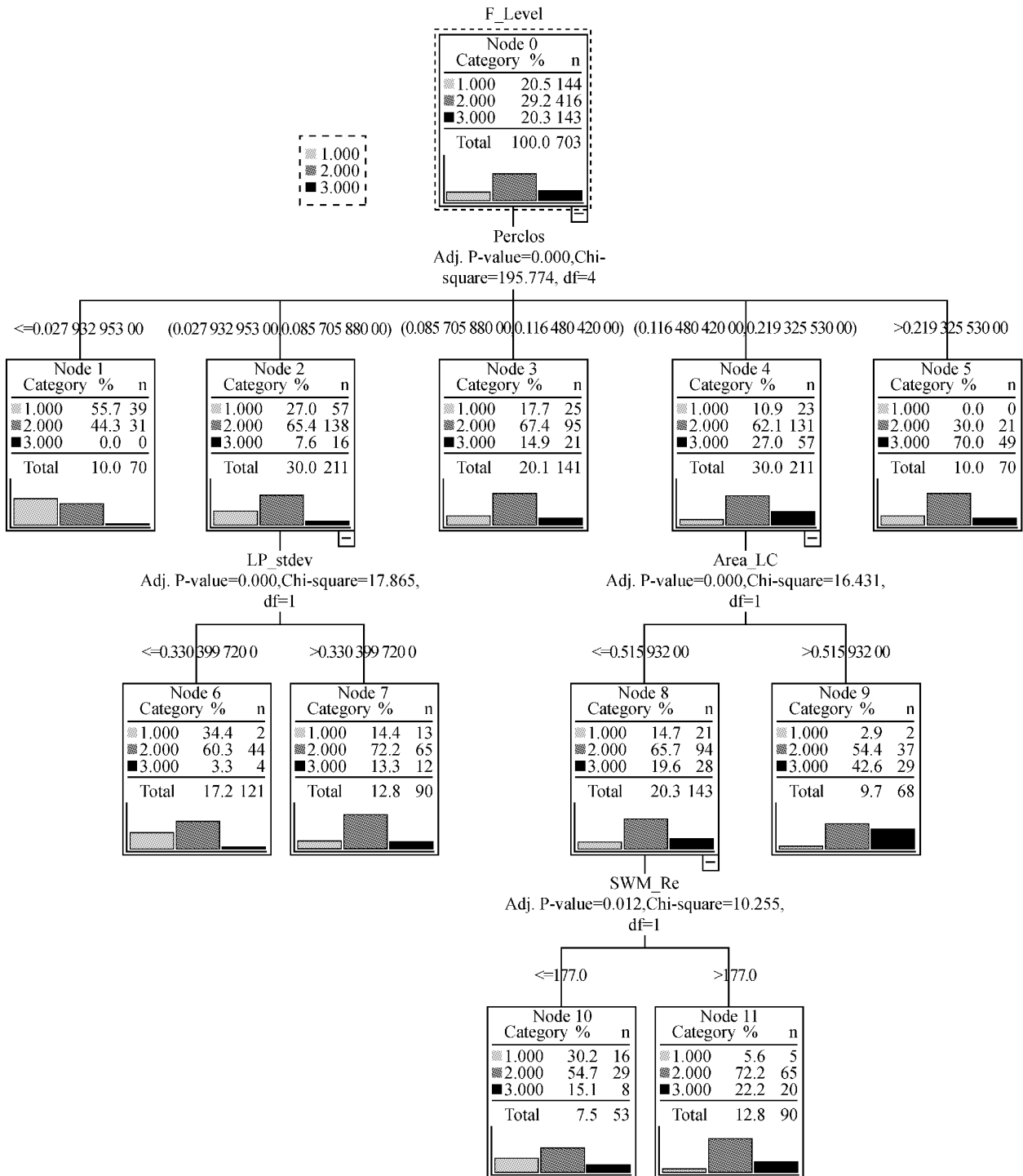


图 5 决策树模型的树形图 SPSS 输出界面

Fig.5 Output of SPSS decision tree diagram for the decision model

模型共生成 8 个叶子节点,其特征如下:

(1) 当 $P_s < 2.8\%$ 时,多数路段(55.7%)内的受试人员处于未疲劳状态,驾驶员处于严重疲劳状态的路段比例为零。

(2) 当 $8.5\% < P_s < 11.6\%$ 时,多数路段

(67.4%)内的驾驶员处于轻度疲劳状态;当 P_s 大于 21.9% 时,多数(70.0%)路段内的受试人员处于严重疲劳状态,驾驶员处于未疲劳状态的比例为零。

(3) 当 $2.8\% < P_s < 8.6\%$ 时,多数路段内(65.4%)驾驶员处于轻度疲劳状态;进一步通过 L_{PS}

进行划分,结果表明, $L_{PS} > 0.33$ 的路段中驾驶员处于轻度疲劳和严重疲劳的比例高于 $L_{PS} < 0.33$ 的样本(相差 10%左右)。

(4) 当 $11.6\% < P_S < 21.9\%$ 且 $S_{LC} < 0.516$ 时, $S_R > 177$ 的路段内驾驶员处于轻度疲劳和严重疲劳的比例都高于 $S_R < 177$ 的路段。

(5) 当 $11.6\% < P_S < 21.9\%$ 且 $S_{LC} > 0.516$ 时, 驾驶员处于未疲劳状态的路段比例仅为 2.9%, 72.0% 的路段中驾驶员处于轻度疲劳状态, 而有 22.2% 的路段中驾驶员处于严重疲劳状态。

决策树模型的精度用分类汇总表进行评价, 表中以行表示试验中通过问询调查获得的主观疲劳程度, 以列表示通过决策树模型计算的疲劳程度, 表中的分类百分比计算如式(5)所示。

设预测疲劳等级为 P_{FL} ($P_{FL} = 1, 2, 3$), 观测疲劳等级为 O_{FL} ($O_{FL} = 1, 2, 3$), $p(P_{FL}, O_{FL})$ 为预测等级为 P_{FL} 的样本中观测等级为 O_{FL} 的百分比, 则

$$p(P_{FL}, O_{FL}) = \frac{Z(P_{FL}, O_{FL})}{Z(P_{FL})} \quad (5)$$

式中: $Z(P_{FL}, O_{FL})$ 表示样本中预测疲劳等级为 P_{FL} 、观测疲劳等级为 O_{FL} 的样本数; $Z(P_{FL},)$ 表示样本中预测疲劳等级为 P_{FL} 的样本数。

模型的总正确率按式(6)计算:

$$p(P_{FL} = O_{FL}) = \frac{Z(P_{FL} = O_{FL})}{Z} \quad (6)$$

式中: $p(P_{FL} = O_{FL})$ 为决策树模型的总正确率; $Z(P_{FL} = O_{FL})$ 为模型预测疲劳等级与观测疲劳等级相等的样本数量; Z 为试验采集的样本总数量。

疲劳分级模型的预测总正确率为 64.3%, 详细结果如表 1 所示。其中, 当模型预测疲劳等级为 3 时正确率最高, 为 70%; 此外, 模型预测疲劳等级分别为轻度疲劳和未疲劳时的正确率也较高, 分别达到 64.65% 和 55.71%。当模型预测的疲劳等级为 1 时, 观测疲劳等级为 2 的可能性为 44.29%; 当模型预测的疲劳等级为 2 时, 观测疲劳等级为 1 和 3 的可能性分别为 18.65% 和 16.70%; 当模型预测的疲劳等级为 3 时, 观测疲劳等级为 2 的可能性为 30.00%。此外, 模型预测的疲劳等级与实际观测的疲劳等级差异不会大于 1 级, 即模型预测的疲劳等级为 3 时, 观测疲劳等级不可能为 1, 模型预测的疲劳等级为 1 时, 观测疲劳等级不可能为 3。

3.3 模型校验

为了验证本模型的有效性进行了模型的校验试验。在 15 位受试人员中随机选取 4 位, 4 位男性, 年龄 (40 ± 4.76) 岁, 累计驾驶里程 (8.75 ± 2.50) 万公

表 1 决策树模型预测精度

观测疲劳等级	预测疲劳等级 1	预测疲劳等级 2	预测疲劳等级 3
1	55.71%	18.65%	0
2	44.29%	64.65%	30.00%
3	0	16.70%	70.00%

注: 表中加粗数字为每个观测疲劳等级下预测的正确率。

里, 驾龄 (5.75 ± 1.71) 年, 试验流程采用午饭后测试 (见图 3), 试验道路、情景、数据采集与 15 人试验一样。驾驶员的疲劳等级通过上述决策树模型以 1 min 为单元进行评估。为了避免驾驶员受到高频率问询的影响, 驾驶员的疲劳等级由受过训练的分析人员通过面部视频观测获得, 面部观测的要点与 1.5 节中主观疲劳程度的校核一致。模型对于校验试验的预测总正确率为 63.22%, 详细结果如表 2 所示。模型对于 3 级疲劳的预测正确率最高, 达 75.71%; 对于 2 级疲劳的预测正确率最低, 为 36.17%。值得注意的是, 校核试验中仍然没有将 3 级误判为 1 级的情况发生。

表 2 校核试验的决策树模型预测精度

观测疲劳等级	预测疲劳等级 1	预测疲劳等级 2	预测疲劳等级 3
1	73.68%	34.04%	12.86%
2	26.32%	36.17%	11.43%
3	0	29.79%	75.71%

注: 表中加粗数字为每个观测疲劳等级下预测的正确率。

4 结论

通过高仿真度驾驶模拟器采集了中青年有经验驾驶员包括眼动、车道位置、方向盘在内的多源数据并计算了疲劳特征指标, 利用问询获取了驾驶员 KSS 疲劳等级并经过视频回放校核。在此基础上建立了疲劳等级与疲劳特征指标之间的决策树分类模型, 得出以下结论: ①对于区别疲劳等级最显著的变量有 PERCLOS、车道偏移标准差、越线时空面积、方向盘反转率, 且上述变量与疲劳等级呈正相关; ② PERCLOS 为最优的疲劳等级划分变量, 并获取了 PERCLOS 的 2 个重要阈值: 当 PERCLOS 小于 2.8% 时, 驾驶员处于严重疲劳状态的路段比例为零; 当 PERCLOS 大于 21.9% 时, 驾驶员处于未疲劳状态的比例为零; ③基于决策树的疲劳分级模型的预测正确率为 64.3%, 其中当模型预测疲劳等级为

3 时,其正确率最高,达 70%。④模型校验试验中模型的预测准确度为 63.22%。⑤该决策树模型不存在将 3 级误认为 1 级的情况。

需要注意的是本文还存在一些不足,所采用的所有数据均来自标准化驾驶模拟试验,试验场景统一设定为郊区单调高速公路,没有环境车辆、道路属性变化等对驾驶员造成的影响,而实际道路交通环境复杂,需要用实车采集的数据对本文中疲劳分级模型的有效性、灵敏度、可靠性进行校核。

参考文献:

- [1] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计资料汇编 2001—2008[R]. 北京:公安部交通管理局, 2009.
The Ministry of Public Security Road and Transport Authority. Road traffic crash statistics 2001 — 2008 of the People's Republic of China[R]. Beijing: The Ministry of Public Security Road and Transport Authority, 2009.
- [2] Radun I, Ohisalo J, Radun J, *et al.* Driver fatigue and the law from the perspective of police officers and prosecutors[J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2013, 18(3):159.
- [3] Li W, He Q C, Fan X M, *et al.* Evaluation of driver fatigue on two channels of EEG data[J]. *Neuroscience Letters*, 2012, 506(2):235.
- [4] 赵晓华,许士丽,荣建,等. 基于 ROC 曲线的驾驶疲劳脑电样本熵判定阈值研究[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(1): 178.
- ZHAO Xiaohua, XU Shili, RONG Jian, *et al.* Discriminating threshold of driving fatigue based on the electroencephalography sample entropy by receiver operating characteristic curve analysis [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013,48(1):178.
- [5] Patel M, Lal S, Kavanagh D, *et al.* Applying neural network analysis on heart rate variability data to assess driver fatigue [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(6): 7235.
- [6] Pilutti T, Ulsoy A G. Identification of driver state for lane-keeping tasks[J]. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, IEEE Transactions,1999, 29(5): 486.
- [7] Berglund Jens. In-vehicle prediction of truck driver sleepiness—Steering related variables[R]. Sweden: Linköping University, 2007.
- [8] 毛喆. 机动车疲劳驾驶行为识别方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009.
MAO Zhe. Research on identification of fatigue driving Behavior [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [9] Mattsson K. In-vehicle prediction of truck driver sleepiness—Lane position variables [D]. Luleå: Luleå University of Technology, 2007.
- [10] Feenstra P, van der Horst R, Grácio B J C, *et al.* Effect of simulator motion cuing on steering control performance [J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2185(1): 48.
- [11] Charles C L, Simon G H, Michael G L. Predicting driver drowsiness using vehicle measures: Recent insights and future challenges[J]. *Journal of Safety Research*, 2009, 40(4): 239.
- [12] 陆金甫,关治. 偏微分方程数值解法[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
LU Jinfu, GUAN Zhi. Numerical solution of partial differential equation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [9] 王传坤,高祥杰,赵羽习,等. 混凝土表层氯离子含量峰值分布和对流区深度[J]. *硅酸盐通报*, 2010, 29(2): 262.
WANG Chuankun, GAO Xiangjie, ZHAO Yuxi, *et al.* Peak value distribution of surface chloride concentration and convection depth of concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2010, 29(2): 262.
- [10] 向发海. 氯离子在混凝土中的传输机理研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
XIANG Fahai. Study on the transmission mechanism of chloride ions in concrete [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [11] Taylor G. Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1953, 219(1137): 186.
- [12] 施惠生,王琼. 海工混凝土使用寿命预测研究[J]. *建筑材料学报*, 2004, 7(2): 161.
SHI Huisheng, WANG Qiong. Research on service life prediction of marine concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2004, 7(2):161.
- [13] Park S, Kwon S, Jung S H, *et al.* Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 27(1): 597.
- [14] 陈伟,许宏发. 考虑干湿交替影响的氯离子侵入混凝土模型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(12): 2191.
CHEN Wei, XU Hongfa. Modeling of chloride ion ingress in concrete considering the effect of cyclic wetting and drying[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(12): 2191.
- [15] Hobbs D W. Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(12): 1995.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50476—2008 混凝土结构耐久性设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50476—2008 Code for durability design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [17] de Rincon O T, Castro P, Moreno E I, *et al.* Chloride profiles in two marine structures-meaning and some predictions[J]. *Building and Environment*, 2004, 39(9): 1065.

(上接第 66 页)