

# 驾驶疲劳脑电信号的多尺度熵分析

刘苗苗, 艾玲梅

(陕西师范大学 计算机科学学院, 陕西 西安 710062)

**摘要:** 驾驶疲劳是引起交通事故的主要因素之一。为了降低因驾驶疲劳引起的危害, 探索检测驾驶疲劳的新方法, 根据脑电信号的非线性特征, 使用非线性动力学的多尺度熵方法来分析 12 名受试者处于不同驾驶状态时各导联脑电信号的多尺度熵值。实验结果表明: 尽管 12 名受试者在不同驾驶状态时的熵值不同, 但其数值特征是一致的, 即非疲劳驾驶状态时的熵值高于疲劳驾驶状态时的熵值。说明多尺度熵可以区分不同的驾驶状态, 可以作为检测驾驶疲劳的一个指标。

**关键词:** 驾驶疲劳; 脑电图; 多尺度熵

中图分类号: R318.04

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2011)08-0209-04

## Application of Multi-scale Entropy for Detecting Driving Fatigue in EEG

LIU Miao-miao, AI Ling-mei

(College of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** Driving fatigue is one of the main factors that caused traffic accidents. In order to reduce the harm caused by driving fatigue and explore a new method for detecting driving fatigue, use the multi-scale entropy method that is a kind of nonlinear dynamics method to analyze the EEG of drivers who drove in different states. The results show that there is significantly difference between fatigue state and non-fatigue state, that is, the value in the driving fatigue state is higher than in the driving non-fatigue state. Explained that multi-scale entropy can be used to detect driver fatigue. It is available to be an indication of detecting driving fatigue.

**Key words:** driving fatigue; electroencephalogram (EEG); multi-scale entropy

### 0 引言

驾驶疲劳是驾驶员在连续行车后随体力和脑力的消耗所造成的心理、生理功能及操作效能下降的现象。具体表现有: 视觉模糊、听力减退、精神恍惚、反应迟缓等。据不完全统计<sup>[1]</sup>, 全世界每年因交通事故导致的死亡人数约 60 万, 由于驾驶员疲劳造成的交通事故至少 10 万起, 直接经济损失 125 亿美元。由这些统计数字可知: 驾驶疲劳是引起交通事故的主要原因之一。因此研究驾驶疲劳的检测方法具有非常重要的意义。

目前, 国内外对于驾驶疲劳的检测主要包括主观方法和客观方法。主观方法主要有主观调查表、驾驶员自我记录表、睡眠习惯调查表等测评方法。此方法主观性强, 各人的理解又有明显的差异, 所以其结果往

往不能令人满意。客观方法主要有脑电图(EEG)、眼电图(EOG)、肌电图(EMG)等测量方法。其中脑电图能够实时地检测疲劳状况, 被认为是最精确的测量方法<sup>[2]</sup>。

近年来, 采用脑电图研究驾驶疲劳仍然处于探索阶段。比如彭军强等<sup>[3]</sup>、Brookhuis 等<sup>[4]</sup>都是从脑电的线性方法即时-频图形出发来研究驾驶疲劳的特征。但是, 脑电的时-频图不能很好地反映出驾驶疲劳的脑电特征, 因而无法准确地检测出驾驶疲劳。而脑电的非线性方法克服了上述缺点, 还可以实现对驾驶疲劳的定量分析<sup>[5]</sup>。因此文中使用非线性理论中典型的多尺度熵方法来分析驾驶员在驾驶过程中的脑电信号。

### 1 多尺度熵理论

最早的熵方法主要是 Pincus 等<sup>[6]</sup>提出的近似熵 (approximate entropy, ApEn) 方法以及 Richman 等<sup>[7]</sup>提出的样本熵 (SampEn) 方法。但这两种方法都是单尺度方法, 并没有考虑到尺度变化时的情况。鉴于此, Costa 等<sup>[8]</sup>提出了多尺度熵 (multi-scale entropy,

收稿日期: 2011-01-28; 修回日期: 2011-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(60803088); 中央高校基本科研业务费专项资金重点项目(GK200901006); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2009JM8018)

作者简介: 刘苗苗(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为生物医学信号处理; 艾玲梅, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为生物医学信号处理。

MSE)方法,即多尺度样本熵方法,在生理信号的分析中得到了广泛的应用<sup>[9-11]</sup>。

具体算法如下:

首先对原始序列进行多尺度化。

给定一维离散时间序列  $\{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_N\}$ , 按照公式

$$y^\tau(j) = \sum_{i=(j-1)\tau+1}^j u_i / \tau, (1 \leq j \leq \frac{N}{\tau}) \quad (1)$$

进行多尺度化,其中  $\tau$  为尺度因子,序列的长度为  $M = \text{int}(N/\tau)$ 。

然后计算每个尺度因子下的样本熵值。

①对于一维离散时间序列,构造成一组  $m$  维矢量,从  $X_m(1)$  到  $X_m(N - m + 1)$ , 其中:

$$X_m(i) = [u_i, u_{i+1}, u_{i+2}, \dots, u_{i+m-1}] \quad (i = 1 \sim N - m + 1) \quad (2)$$

②定义任意两个  $m$  维向量之间的距离为:

$$d[X_m(i), X_m(j)] = \max |u_{i+k} - u_{j+k}|, 0 \leq k \leq m - 1; j, i = 1 \sim N - m, j \neq i \quad (2)$$

③给定阈值  $r$ , 对每一个  $i$  值, 计算  $B_i^m(r)$ :

$$B_i^m(r) = \frac{d[X_m(i), X_m(j) < r * SD \text{ 的数目}]}{N - m + 1}, i, j = 1 \sim N - m, i \neq j \quad (3)$$

SD 是一维离散时间序列的标准差。

④计算:

$$B^m(r) = 1 / (N - m) \sum B_i^m(r) \quad (4)$$

⑤对于  $m + 1$  点矢量, 按以上步骤, 同样可得  $A^m(r) = 1 / (N - m) \sum A_i^m(r)$

⑥理论上此序列的样本熵值为:  $\text{SampEn}(m, r) = \lim \{-\ln[A^m(r)/B^m(r)]\}$ , 当序列长度为有限值时, 其样本熵估计值为:

$$\text{SampEn}(m, r) = -\ln[A^m(r)/B^m(r)] \quad (5)$$

其中参数  $m$  是预先选定的模式维数,  $r$  是预先选定的相似容限。

## 2 实验方法

本实验采用模拟驾驶方法(在计算机上运行模拟驾驶软件,显示器上显示驾驶环境:山区公路),受试者是 12 名 22-27 岁的健康研究生,均经过驾校培训,有较短的驾龄。实验前,受试者睡眠充足,精神充沛,并且熟悉模拟驾驶环境。使用北京太阳公司的数字脑电图仪,记录受试者驾驶过程中的脑电波形,采样频率为 100Hz。该仪器可以采集 16 导 EEG 数据,记录导联 FPI、FP2、F3、F4、F7、F8、C3、C4、P3、P4、T3、T4、T5、T6、O1、O2。

对每一位受试者,在脑电数据记录前首先填写一

次疲劳自评打分表(表 1:Chalder 等人<sup>[12]</sup>提出的一种评价疲劳水平的量表 14-Item Fatigue Scale 即 FS-14。其得分标准为:如果有自觉症状在得分栏写 1,如果无自觉症状在得分栏写 0,得分越高说明越疲劳)。然后先记录受试者静坐 10 分钟的脑电数据,再记录受试者连续模拟驾驶 2 个小时的脑电数据,每记录一段连续驾驶 10 分钟的脑电数据,受试者就会被问及一次表 1 的内容,记录员根据受试者回答是或否的情况,在相应的得分栏记 1 或 0。

表 1 疲劳自评打分表(FS-14)

姓名: _____ 年龄: _____ 日期: 年 月 日 时 分			
问题		是或否	得分
1	是否感觉到周身酸痛、腿脚发软		
2	是否需要休息		
3	是否感觉到困倦		
4	动作是否笨拙		
5	是否感觉难以继续做事		
6	是否感觉到浑身无力		
7	是否感觉到肌肉无力		
8	是否想躺下休息		
9	思想是否难以集中		
10	是否常忘事		
11	是否容易做错事		
12	思想是否集中		
13	记忆力是否下降		
14	是否对事物冷淡,不感兴趣		

## 3 实验结果与分析

### 3.1 主观分析

通过填写表 1 可以得到所有受试者在不同驾驶阶段的得分情况。

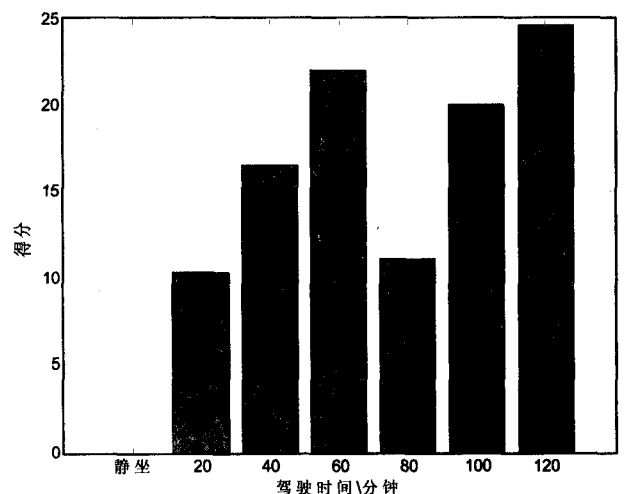


图 1 疲劳自评得分均值情况

图 1 是相同驾驶阶段内所有驾驶者的得分均值情况,从该图可以看出:在静坐的状态下,其得分均值为 0,说明在此种情况下,受试者的精神充沛。驾驶时间增加到 60 分钟的时候,得分均值随着驾驶时

间的增加而增加,80 分钟后得分均值降低,100 分钟后得分均值又随时间的增加而增加。说明受试者连续驾驶 1 小时左右就出现疲劳,而且驾驶员在驾驶过程中疲劳程度并不随时间的增加而呈直线增加的趋势,而是先增加后减少又增加的趋势。

3.2 数据选取和参数选取

文中根据受试者填写表 1 的得分情况和驾驶时间的长短来确定驾驶状态(得分比较高并且驾驶时间比较长的阶段被认为是疲劳驾驶状态,得分比较低并且驾驶时间比较短的阶段被认为是非疲劳驾驶状态)。

经过大量计算不同采样点个数的样本熵发现,当个数大于等于 500 后才能达到相对稳定,本实验中尺度因子  $\tau$  选取在 1~10 之间,考虑最少的点数即 5000 个点除以 10,将得到 500 个点,所以在数据分析时选取  $N = 5000$ 。根据 Pincus 等<sup>[4]</sup> 建议,选取参数  $m = 2$ ,  $r = 0.25\sigma$ ,其中  $\sigma$  是原始数据的标准差。尺度因子  $\tau$  在 1~10 之间对原始数据进行多尺度化,当  $\tau = 1$  时即为原始数据。

3.3 实验数据处理

由实验方法可知,脑电数据的记录是 20 分钟一次。对每一位受试者在不同的驾驶状态下均选取出受干扰较少的脑电波形,从中选取连续的 5000 个采样点作为分析对象,并对其进行小波分析法去除干扰(因为脑电波在采集过程不能避免眼电干扰)。

为了便于说明去除眼电干扰后的效果,以第 2 名受试者导联 O1 的脑电数据为例。

图 2 和图 3 是该名受试者在非疲劳和疲劳两种状态下驾驶时导联 O1 去除干扰前后的脑电波形(a 是原始波形,b 是去除眼电干扰后的波形)。

比较图 2 和图 3 可知,非疲劳状态下受试者驾驶时的脑电信号和疲劳状态下受试者驾驶时的脑电信号,在时域波形上无明显差异,说明脑电的线性方法(时-频分析法)不能很好地检测出驾驶疲劳,因此需要借助其它的方法对脑电信号进行分析。

3.4 结果及分析

通过分析 12 名受试者在不同驾驶状态下的多尺度熵值,可以得到相同的规律,为具有说明性,文中给出 12 名受试者在不同驾驶时状态尺度  $\tau = 5$  时,平均熵值随导联变化的情况(见表 2)。

从表 2 可以看出:

(1)对于所有的导联,疲劳状态下的数据均低于非疲劳状态下的数据。说明驾驶疲劳时,各个导联的脑电特性是一致的,即受试者在非疲劳状态下的脑电复杂度均高于疲劳状态下的脑电复杂度。各个导联代表不同的脑区,前额(FP1,FP2)、额(F3,F4)、侧额(F7,F8)、中央(C3,C4)、顶(P3,P4)、颞(T3,T4)、后颞(T5,T6)、枕(O1,O2),额叶主要记录大脑的精神活动和运动活动,枕叶主要记录大脑的视觉活动,颞叶主

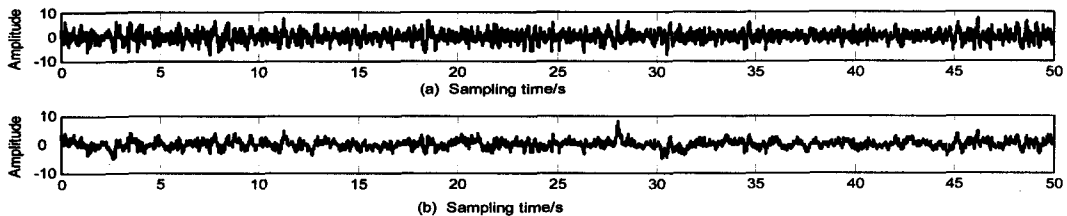


图 2 非疲劳状态下导联 O1 去除干扰前后的波形

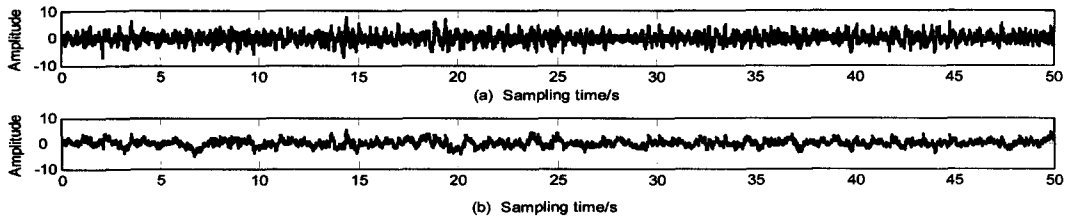


图 3 疲劳状态下导联 O1 去除干扰前后的波形

表 2 受试者在两种状态下驾驶时尺度因子为 5 时各个导联对应的多尺度熵值

导联		FP1	FP2	F3	F4	C3	C4	P3	P4
驾驶状态	非疲劳	1.4539	1.459	1.5721	1.4515	1.5034	1.4337	1.5556	1.5484
	疲劳	1.0495	1.1175	1.2984	1.0454	1.325	1.3177	1.3649	1.3405
导联		O1	O2	F7	F8	T3	T4	T5	T6
驾驶状态	非疲劳	1.5987	1.615	1.3547	1.544	1.5719	1.48	1.4891	1.4669
	疲劳	1.42	1.1259	1.0000	1.1313	1.302	1.2575	0.9619	1.375

要记录大脑的听觉活动。说明受试者在出现驾驶疲劳的时候其运动活动、视觉活动、听觉活动等都会受到一定的影响,与驾驶疲劳时精神恍惚、视觉模糊、听力减退的特征一致。

(2)在疲劳状态下,不同导联对应的熵值均不相同。说明不同的脑区呈现出的脑电复杂性程度不同,即受试者在疲劳状态下,大脑各部分功能的减退程度不同,表现为精神恍惚程度、视觉模糊程度、听力减退程度等不同。这是因为人体在疲劳的情况下,身体各方面做出的反应程度不同,同时当人感到疲劳的时候会有一个自发抑制疲劳的过程,但身体各方面被抑制的程度也不相同。

为便于说明熵值随尺度变化的情况,以 12 名受试者在不同驾驶状态时,导联 O1 的平均熵值为例,如图 4(x 轴表示尺度,y 轴表示平均熵值)。

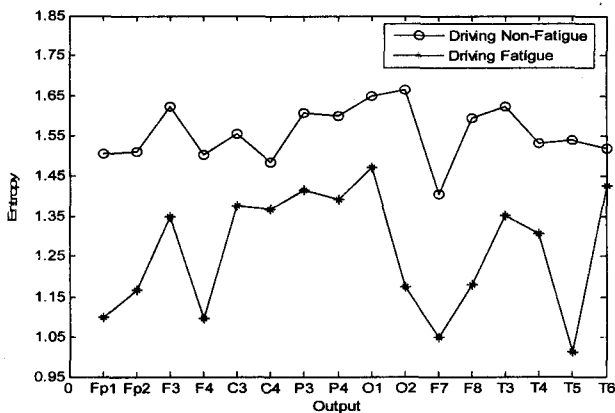


图 4 导联 O1 随尺度变化时的熵值情况

从图 4 可以看出:

(1)受试者在非疲劳状态下驾驶的熵值高于疲劳状态下的,说明熵值能较好地反应出脑电的复杂程度。熵值越小,说明随着驾驶疲劳现象(瞌睡、头晕、视野变窄、精神恍惚、注意力下降等)的出现,大脑思维的活跃性就会减弱,脑电活动也会减少,复杂程度就会降低;反之,熵值越大,则复杂程度高。表明人在疲劳状态下的脑电复杂性比较小。

(2)任意尺度下,受试者在疲劳状态下驾驶时的熵值均低于非疲劳状态下的熵值,反映了脑电信号在不同尺度上的规律性,说明了多尺度熵检测驾驶疲劳的可行性。尺度为 1 时,非疲劳状态下受试者驾驶时与疲劳状态下受试者驾驶时的熵值幅度变化不明显,尺度为 2~6 之间时熵值的幅度变化则非常明显,说明不同尺度下熵值的幅度变化不同。尺度为 1 时,即是样本熵分析法,可见多尺度熵方法比样本熵方法更适用。尺度大于等于 7 时熵值的幅度变化很小,说明当尺度达到一定值的时候熵值的幅度变化趋于平稳。在尺度 1~10 之间,非疲劳状态下驾驶时的熵值波动范

围比疲劳状态下驾驶时的熵值波动范围小,说明疲劳状态下驾驶时的脑电信号复杂度较不稳定。

#### 4 结束语

使用非线性动力学的多尺度熵方法来分析不同驾驶状态下的脑电信号,发现受试者在疲劳状态下驾驶时的熵值低于非疲劳状态下的熵值,说明人在疲劳状态下大脑的活跃性降低,而且各个脑区表现出的疲劳程度不同,即精神恍惚程度、视觉模糊程度、听力减退程度等不同。初步验证了多尺度方法用来分析和检测驾驶疲劳的可行性。

由于模拟实验与实际驾驶存在一定的差异、实验环境单一、驾驶时间稍短、实验人数比较少等原因,因此目前的研究尚不成熟,还需要进一步的探索。

#### 参考文献:

- [1] 郑培,宋正河,周一鸣. 机动车驾驶员驾驶疲劳测评方法的研究状况及发展趋势[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(6): 101-105.
- [2] Saroj K L L, Ashley C. A critical review of the psychophysiology of driver fatigue [J]. Biological Psychology, 2001, 55: 173-194.
- [3] 彭军强,吴平冬,殷昱. 疲劳驾驶的脑电特性探索[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(7): 585-589.
- [4] Brookhuis, Karel A, deWaard D. The use of psychophysiology to assess driver status [J]. Ergonomics, 1993, 36(9): 1099-1110.
- [5] 吴绍斌,高利,王刘安. 基于脑电信号的驾驶疲劳检测研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(12): 1072-1075.
- [6] Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity [J]. Proc Natl Acad Sci, 1991, 88: 2297-2301.
- [7] Richman J S, Moorman J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy [J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2000, 278: 2039-2049.
- [8] Costa M, Goldberger A L, Peng C K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series [M]. Phys. Rev. Lett., 2002.
- [9] 蔡瑞,卞春华,宁新宝. 多尺度熵在心率变异信号复杂性分析中的应用[J]. 北京生物医学工程, 2007, 26(5): 543-548.
- [10] 葛家怡,周鹏,赵欣,等. 脑电信号的多尺度熵分析[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(10): 13-19.
- [11] 王俊,宁新宝,马千里. 基于多尺度熵的心电图分析[J]. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(3): 331-334.
- [12] Chalder T, Berelowitz G, Pawlikowska T, et al. Development of a fatigue scale [J]. Journal of Psychosomatic, 1993, 37(2): 147-153.