

睡眠状态下人体生理信号模糊分析系统的研究

徐现通¹、卢广文²、马波¹ 第一军医大学生物医学工程系¹ 广州 510515

摘要 采用 LabVIEW 技术完成对心电、呼吸、无创血氧和无创血压信号的采集与处理，而后通过 MATLAB 模糊测量系统对采集的人体生理信号进行模糊预测分析。通过实验检验了人体生理信号检测、处理和模糊预测分析方法的可靠性。遥

LabVIEW 技术对人体生理信号的模糊预测分析是有效的，可用于检测阻塞性睡眠呼吸暂停患者的生理状态信号。

关键词 LabVIEW；模糊预测；模糊测量系统；阻塞性睡眠呼吸暂停

中图分类号：R318.04 文献标识码：A 文章编号：1000-2588(2003)11-1177-04

Study of fuzzy analytical system for physiological signals during sleep

XU Xian-tong, LU Guang-wen, MA Bo

Department of Biomedical Engineering, First Military Medical University, Guangzhou 510515, China

Abstract: A new approach to sleep analysis based on fuzzy prediction theory is described. This article gives a general introduction to detection and processing of biologic signals with LabVIEW software, and the application of the designed fuzzy measurement system in fuzzy prediction analysis of the physiological signals recorded during sleep. The results of trials of the fuzzy prediction analysis demonstrated the reliability of this method. LabVIEW-based fuzzy prediction analysis can be helpful for early diagnosis, monitoring and prognostic assessment of some diseases, and may be valuable in the analysis of the physiologic signals of patients with obstructive sleep apnea syndrome (OSAS) during sleep.

Key words: LabVIEW; fuzzy prediction; fuzzy measurement system; obstructive sleep apnea syndrome

1 前言

阻塞性睡眠呼吸暂停综合征（Obstructive sleep apnea syndrome, OSAS）是指患者在夜晚睡眠时上呼吸道无气流通过的时间超过 10 s，且累计超过 5 次/h。每晚 7 h 睡眠中超过 30 次。OSAS 患者睡眠时反复出现的呼吸暂停及由此引起的低氧血症对心脏的危害越来越受到人们的重视及关注。研究表明，呼吸暂停所引起的心率减慢和收缩压升高及血氧饱和度降低是室性异位搏动的主要原因。心肌氧的需求和动脉血氧降低不匹配而发生的暂时性心肌缺血，易使心肌受损。另外副交感神经兴奋是引起猝死的主要原因之一。OSAS 对心血管系统的主要影响表现如下：心律失常、冠状动脉病变、心脏功能和结构的改变、高血压等。OSAS 不但会严重影响患者白天的工作和生活质量，而且还可引起有猝死危险的严重心律失常。综合分析发现，OSAS 引起心脏功能和结构的改变是诸多因素包括夜间呼吸暂停、肥胖、高血压共同作用的结果，而非夜间呼吸暂停的单一效应。提示对 OSAS 的诊断应综合考虑相关因素。

2 模糊测量系统

2.1 模糊系统的建立

模糊测量系统的设计思路为：LabVIEW 通过数据采集得到含有噪声的生理信号，通过仪器前面板设置消噪处理的参数，将参数通过 LabVIEW 与 MATLAB 接口传递给 MATLAB 相应的功能函数，完成信号分析与处理功能，然后 LabVIEW 继续通过程序接口调用相应的 MATLAB 程序生成符合要求的模糊系统。构造模糊系统时用到的信息就是用户通过程序接口传递到 MATLAB 的工作空间的建立模糊系统的流程框图见图 1。

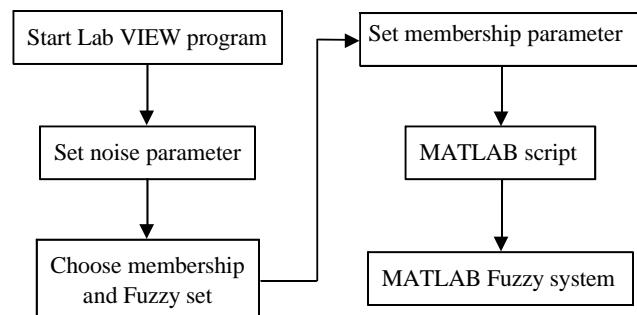


图 1 模糊系统构造框图

Fig.1 Structural illustration of the Fuzzy system

2.2 模糊测量过程

在生成相应的模糊系统之后，就可以执行模糊测量过程。根据不同的生理信号，选用不同的传感器。

收稿日期：2003-04-29

作者简介：徐现通，男，河南偃师人，硕士，讲师，电话：20-61648288

联及调理电路构成测量模块遥数据采集卡的基本任务是心电、呼吸、无创血氧和无创血压等生理信号的测量。在完成心电、呼吸、无创血氧和无创血压的采集与处理后即可将处理结果传递到

MATLAB Script 袁紧接着继续调用相应的 MATLAB 模糊系统进行模糊测量袁且要将睡眠状态下人体生理信号的模糊分析结果通过 MATLAB Script 节点反馈到 LabVIEW 整个过程如图 2 所示。

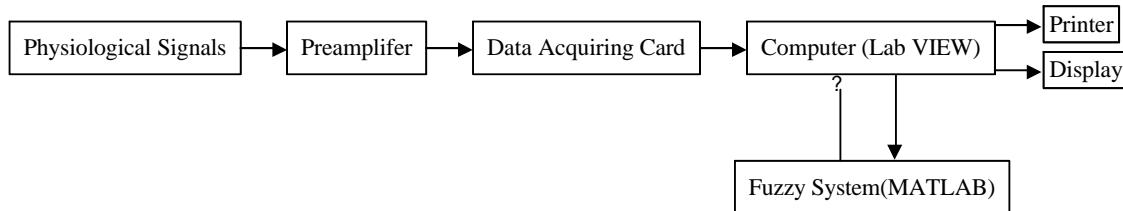


图 2 模糊测量过程

Fig.2 Process of the fuzzy measurement

在 LabVIEW 中袁是用软件驱动 I/O 接口数据采集卡袁驱动方法有 2 种。LabVIEW 支持的数据采集卡袁如 NI 公司生产的各类数据采集卡袁可利用 LabVIEW 自带的驱动函数来驱动。设计者只需正确设置输入参数就可实现数据采集的任务袁而不需编写代码程序。LabVIEW 不支持的数据采集卡袁可利用 LabVIEW 的代码嵌入功能模块来实现采集卡的软件驱动。

2.3 工作原理

2.3.1 模糊集的构成 OSAS 患者睡眠时有较大的心率变异袁 6% 患者有明显的心率失常袁同时伴有低氧血症、高血压等症状。由于影响 OSAS 诊断的因素很多袁各因素之间关系复杂袁因此袁单纯用 1 个因素诊断 OSAS 显然是不够的。由于 OSAS 患者呼吸暂停低通气指数 AHI 袁 SO₂ 袁 HR 袁 血压袁 BP 袁 之间有一定的相关性袁因此与此对应的人体生理信号构成影响因素集院

$$U = \{f_1, f_2, f_3, f_4\} = \{AHI, SO_2, HR, BP\}$$

用户定义的模糊集个数可根据需要来定袁 4 个袁考虑临床实际应用的需要袁将 OSAS 分为 4 个等级院正常袁轻度袁中度袁重度袁。

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\} = \{\text{正常}, \text{轻度}, \text{中度}, \text{重度}\}$$

e_i 代表各种可能的总评判结果袁。

2.3.2 隶属函数的建立 用模糊数学综合评判法处理问题的关键是建立适当的隶属函数。可供用户选择的隶属函数有以下几种形式院梯形袁 trapezoidal 袁 高斯形袁 Gaussian 袁 三角形袁 triangular 袁 S 形函数袁 bellmf 袁 sigmoidal 袁。本文采用梯形隶属函数袁其特征参数为 a 袁 b 袁 c 袁 d 用公式表示为院

$$f(x, a, b, c, d) = \max \left\{ \min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right\}$$

式中袁参数 a 袁确定梯形的左脚袁而参数 b 袁确定梯形的右肩膀袁。

对 40 岁以上人群袁 AHI 袁 SO₂ 袁 HR 袁 BP 4 项 OSAS

诊断指标的正常值为院

AHI < 5 袁 SO₂ > 96% 袁 0 次 /min < HR < 80 次 /min 袁 BP 袁舒张压 / 收缩压 袁 90/140 mmHg 袁 kPa = 7.5 mmHg 袁。

根据睡眠呼吸暂停综合症的各影响因子指标 f_i 袁建立关于 e_1, e_2, e_3, e_4 模糊等级袁表 1 袁即视 e_k 为模糊集袁把这样的模糊集记为 A_{jk} 袁。

表 1 等级划分表

Tab.1 Grade classification performance

Factor	Normal	Mild	Moderate	Severe
	$a_0 \sim a_1$	$a_1 \sim a_2$	$a_2 \sim a_3$	$a_3 \sim a_4$
AHI, j=1	0~5	5~21	5~21	51~100
BP, j=4	80~120	120~130	130~140	140~180

AHI: Apnea-hypopnea index; BP: Blood pressure

把目标函数 $\varphi_j^{(k)}$ 取为这些模糊集的隶属函数院。
 $\varphi_j^{(k)}(x) = A_{jk}(x)$ 袁根据各单因素的评判等级的标准值袁。
 考虑每一单因素的某一评判等级论域袁可推导出上述单因素 AHI 袁 BP 的隶属函数如下院。

$$\begin{aligned} &\text{扇}, a_{j0} < x < a_{j1} \\ &\text{渐}, \frac{x - a_{j1}}{a_{j2} - a_{j1}}, a_{j1} < x < a_{j2}; (j=1, 4) \\ &\text{堵}, a_{j2} = x = a_{j4} \\ &\text{扇}, \frac{x - a_{j(k-2)}}{a_{j(k-1)} - a_{j(k-2)}}, a_{j(k-2)} < x < a_{j(k-1)} \\ &\text{渐}, a_{j(k-1)} < x < a_{jk} ; (j=1, 4; k=2, 3) \\ &\text{堵}, \frac{x - a_{jk}}{a_{j(k+1)} - a_{jk}}, a_{jk} < x < a_{j(k+1)} \\ &\text{堵}, \text{other} \\ &\text{扇}, a_{j0} < x < a_{j2} \\ &\text{渐}, \frac{x - a_{j2}}{a_{j3} - a_{j2}}, a_{j2} < x < a_{j3}; (j=1, 4) \\ &\text{堵}, a_{j3} < x < a_{j4} \end{aligned}$$

根据其它影响因子指标 f_j 建立关于 $e_1, e_2, \text{噎}, e_p$ 模糊等级表 2 见图 e_k 为模糊集 袁把这样的模糊集记为 A_{jk} 遥

表 2 等级划分表

Tab.2 Grade classification performance

Factor	Severe	Moderate	Mild	Normal
	$a_0 \sim a_1$	$a_1 \sim a_2$	$a_2 \sim a_3$	$a_3 \sim a_4$
SO_2 , j=2	50~80	80~85	85~96	96~100
HR, j=3	0~30	30~45	45~60	60~80

HR: Heart rate

把目标函数 $\varphi_j^{(k)}$ 取为这些模糊集的隶属函数院 $\varphi_j^{(k)}(x) = A_{jk}(x)$ 遥根据各单因素的评判等级的标准值袁考虑每一单因素的某一评判等级论域袁可推导出上述单因素 SO_2 和 HR 的隶属函数如下院

$$\begin{aligned} & \text{扇形, } a_{j0} < x < a_{j1} \\ & \text{渐变, } \frac{x-a_{j1}}{a_{j2}-a_{j1}}, a_{j1} < x < a_{j2}; (j=2, 3) \\ & \text{噎, } a_{j2} = x = a_{j4} \\ & \text{扇形, } \frac{x-a_{j(k-2)}}{a_{j(k-1)}-a_{j(k-2)}}, a_{j(k-2)} < x < a_{j(k-1)} \\ & \text{渐变, } \frac{x-a_{j(k-1)}}{a_{j(k+1)}-a_{j(k-1)}}, a_{j(k-1)} < x < a_{j(k+1)} \\ & \text{噎, other} \\ & \text{扇形, } a_{j0} < x < a_{j2} \\ & \text{渐变, } \frac{x-a_{j2}}{a_{j3}-a_{j2}}, a_{j2} < x < a_{j3}; (j=2, 3) \\ & \text{噎, } a_{j3} < x < a_{j4} \end{aligned}$$

2.3.3 综合分析 一般来说袁各种因素对 OSAS 诊断结果的影响程度是不同的袁每个待评对象 u 都对应一个测定指标向量院

$$f(u) = (f_1(u), f_2(u), f_3(u), f_4(u))$$

代入上述隶属函数便得到单因素评判矩阵院

$$R(u) = (r_{jk}(u))_{m \times p} = (\varphi_j^{(k)}(f_j(u)))_{m \times p}$$

对于一类待评对象 U 袁诸影响因子的重要性一般是不一样的袁事先应确定一个权向量 $W = (w_1, w_2, \text{噎}, w_m)$ 遥然后可按模型 M 来得到评判向量 $D^{(u)} = W R(u)$ 其中 $d_k(u) = \sum_{j=1}^m w_j r_{jk}(u)$, $k=1, 2, \text{噎}, p$ 遥根据最大隶属原则袁即可判定患者病情遥

3 应用研究

模糊数学是通过对事件本身的模糊性及客观外界事物在人脑中反映的不确定性袁即模糊性分析袁用较少的代价传输足够的信息袁对复杂事件做出高效

率的判断和处理袁模糊综合评判正是基于这一理论袁建立数学模型袁达到研究模糊事物之属性遥

整个系统分为参数设置袁实时监测袁显示和数据存储袁数据回放三大部分袁按功能划分为心电部分袁呼吸部分袁无创血氧部分和无创血压部分袁为了使系统高效可靠地工作袁设计中解决了隧道袁实时数据波形显示袁心电图数据实时处理袁心率计算算法和呼吸率计算算法袁心电图数据实时存储袁数据波形与趋势图回放处理算法袁多微处理器间相互控制与数据传输袁数据打印输出等关键技术袁实时监测各通道的生理信号并存储数据袁回放分析同一时间段内各导的生理信号袁计算呼吸暂停时患者 AHI 袁 SO_2 袁 P 等参数袁最后利用模糊分析方法评判患者病情袁临床试验选择有睡眠障碍的病人进行遥试验结果显示袁 $AHI < 5$ 袁 $O_2 > 96\%$ 袁 0 次 /min < $HR < 80$ 次 /min 袁 P 张压 / 收缩压袁 $90/140$ mmHg 遥

图 3 为实时监测某睡眠障碍患者的生理信号波形袁可见相关指标值与正常指标值有一定的差异袁不能确诊是否为 OSAS 遥要进一步判断应综合考虑这 4 个因子指标袁通过模糊分析系统进行模糊预测分析及评判遥

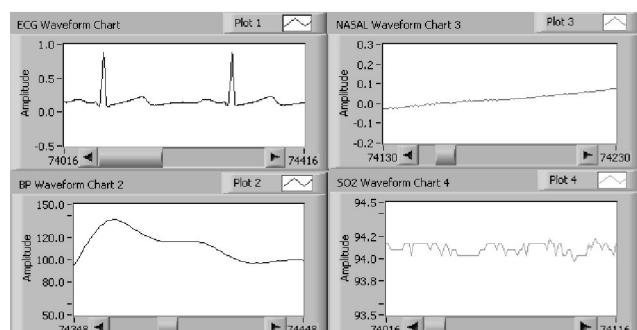


图 3 某睡眠障碍患者的实时生理信号波形

Fig.3 Real-time physiologic signals of a patient with obstructive sleep apnea syndrome (OSAS)

现对某睡眠障碍的病人进行综合评判袁首先测出 U 的 4 项指标袁 AHI 袁 IR 袁 O_2 袁 P 遥根据 4 种隶属函数袁构造模糊关系 R 矩阵袁最后算出评判向量院 $B = A R$ 袁图 4 为某睡眠障碍患者的生理状态信号综合评判结果遥

4 评价

本文提出了一种基于 LabVIEW 技术的模糊测量系统袁其中信号的获取与采集是以计算机为核心的硬件平台来完成遥在此硬件平台基础上袁调用 MATLAB 程序模块袁完成对心电袁呼吸袁无创血氧和

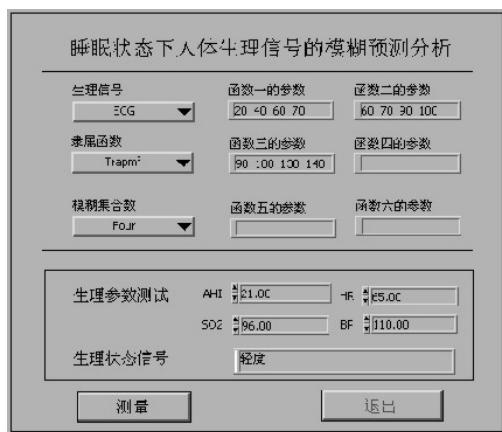


图 4 某睡眠障碍患者的生理状态信号综合评判结果

Fig.4 Result of sleep physiological signal analysis based on fuzzy prediction theory in an OSAS patient

无创血压信号的模糊预测分析综上所述每个单项指标只能反映患者某个特定的功能状态只有将各个指标综合在一起才能较全面地反映 OSAS 患者总的功能状态因此从系统论观点看各项指标的综合运用对于提高诊断效率具有重要的意义。本研究中各影响因素的隶属函数是根据以往文献进行筛选经统计分析后得到的通常确定隶属函数的构造比较困难。可以预先假定它的分布类型根据临床经验经过多

次试验进行修改直到满意为止。

本研究将模糊数学初步应用到 OSAS 患者病情的评判中其影响因素各因素的权重及相应的隶属函数可根据临床应用进一步完善。

参考文献院

- 咱暂 王 蓓. 睡眠呼吸障碍性疾病的诊断与治疗 咱暂北京: 军事医学科学出版社, 2002. 30-128.
- 咱暂 Roche F, Gaspoz JM, Court-Fortune I, et al. Screening of obstructive sleep apnea syndrome by heart rate variability analysis 咱暂 Circulation, 1999, 100(13): 1411-5.
- 咱暂 吴学勤. 动态心电图技术与应用 咨暂合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998. 23-46.
- 咱暂 Hilton MF, Bates RA, Godfrey KR, et al. Evaluation of frequency and time-frequency spectral analysis of heart rate variability as a diagnostic marker of the sleep apnoea syndrome 咨暂 Med Biol Eng Comput, 1999, 37(6): 760-9.
- 咱暂 刘君华. 基于 LabVIEW 的虚拟仪器设计 咨暂北京: 电子工业出版社, 2003. 333-72.
- 咱暂 National Instrument Corporation. The Mesasurement and Automation Catalog 2002 咨暂 2002. 49-354.
- 咱暂 汪培庄, 李洪兴. 模糊系统理论与模糊计算机 咨暂北京: 科学出版社, 1996. 166-95.
- 咱暂 Bock J, Gough DA. Toward prediction of physiological state signals in sleep apnea 咨暂 IEEE Trans Biomed Eng, 1998, 45(11): 1332-41.

责任编辑 隋开颜 宛

渊上接 1176 页冤

参考文献院

- 咱暂 倪 宏, 骆抗先, 刘定燮, 等. 乙型肝炎病毒全基因重组真核表达质粒的构建 咨暂 第一军医大学学报, 2001, 21(3): 185-6.
Ni N, Luo KX, Liu DX, et al. Construction of recombinant eukaryotic expression plasmid containing full-length genome of hepatitis B virus 咨暂 J First Mil Med Univ/Di Yi Jun Yi Da Xue Xue Bao, 2001, 21(3): 185-6.
- 咱暂 Kuhober A, Pudollek HP, Reifenberg K, et al. DNA immunization induces antibody and cytotoxic T cell response to hepatitis B core antigen in H-2b mice 咨暂 Immunol, 1996, 156(45): 3687-95.
- 咱暂 Ulrich R, Koletzki D, Lachmann S, et al. New chimeric hepatitis B virus core particles carrying hantavirus (serotype Puumala) epitopes: immunogenicity and protection against virus challenge 咨暂 J Biotechnol, 1999, 73(2): 141-53.
- 咱暂 Milich DR, Hughes J, Jones J, et al. Conversion of poorly immunogenic malaria repeat sequences into a highly immunogenic vaccine candidate 咨暂 Vaccine, 2002, 20(5-6): 771-88.
- 咱暂 Borisova G, Borschukova O, Skrastina D, et al. Behavior of a short preS1 epitope on the surface of hepatitis B core particles 咨暂 Biol Chem, 1999, 380(3): 315-24.
- 咱暂 田泽维, 董文其, 王 萍, 等. 以 HBc 颗粒为呈现载体的 HBV 多表位复合基因真核表达载体的构建 咨暂 热带医学杂志(Trop Med J), 2002, 2(4): 334-6.
- 咱暂 吴 军, 王晓怀, 杨太成, 等. 经癌胚抗原重组痘苗病毒转染的树突状细胞体外诱导特异性 T 细胞免疫 咨暂 第一军医大学学报, 2002, 22(3): 256-8.
Wu J, Wang XH, Yang TC, et al. Dendritic cells transfected with carcinoembryonic antigen-vaccinia recombinant virus induces CEA-specific immunity mediated by cytotoxic T lymphocytes in vitro 咨暂 J First Mil Med Univ/Di Yi Jun Yi Da Xue Xue Bao, 2002, 22(3): 256-8.
- 咱暂 Donnelly JJ, Ulmer JB, Shiver JW, et al. DNA vaccines 咨暂 Annu Rev Immunol, 1997, 15(6): 617-48.
- 咱暂 胡贵方, 吴小兵, 俞守义, 等. 含乙型肝炎表面抗原基因重组腺相关病毒的构建及其基因的表达和功能初步研究 咨暂 第一军医大学学报, 2003, 23(6): 553-6.
Hu GF, Wu XB, Yu SY, et al. Construction of recombinant adenovirus-associated virus carrying hepatitis B surface antigen gene and preliminary study of the gene expression and function 咨暂 J First Mil Med Univ/Di Yi Jun Yi Da Xue Xue Bao, 2003, 23(6): 553-6.
- 咱暂 邵同京, 骆抗先, 侯金林, 等. HBV 转录后调节序列中与干扰素 琢应答有关位点的初步鉴定与分析 咨暂 第一军医大学学报, 2002, 22(6): 542-4.
Xing TJ, Luo KX, Hou JL, et al. Preliminary identification and analysis of different points related with response to interferon-琢 in HBV post-transcriptional regulatory element 咨暂 J First Mil Med Univ/Di Yi Jun Yi Da Xue Xue Bao, 2002, 22(6): 542-4.

责任编辑 隋金星 宛