

多参数运动心肺功能测试系统的初步应用

刘杰^{1,3}, 叶继伦^{1,2,3}, 文斌^{1,3}, 袁懋结^{1,3}

1. 深圳大学医学部生物医学工程系, 广东 深圳 518060; 2. 广东省生物医学信号检测与超声成像重点实验室, 广东 深圳 518060;
3. 深圳市生物医学工程重点实验室, 广东 深圳 518060

【摘要】心肺运动试验(CPET)结合呼吸气体、十二导联心电图以及功率踏车技术,实时监测在不同负荷条件下,人体心率、氧耗量和二氧化碳排出量等心肺功能参数的动态变化,从而客观、定量地评价心肺储备功能,为医师诊断、评估心肺功能疾病以及运动耐受力提供相应的临床资料。本系统结合十二导联心电图、呼吸流量、血压、二氧化碳和氧气五大生命体征监测功能,联合计算出静息状态下的静态肺功能参数,如用力肺活量(FVC)、慢肺活量(SVC)和最大通气量(MVV)等,计算出运动情况下的动态心肺功能参数,如每分钟摄氧量(VO_2)、每分钟二氧化碳排出量(VCO_2)以及无氧阈(AT)等。通过验证,该系统稳定可靠,参数计算准确,可准确诊断运动不耐受,为评价人体呼吸、循环、代谢等功能提供可靠的参考,具有较好的应用前景。

【关键词】十二导联心电图;呼吸力学;氧气;二氧化碳;静态肺功能;动态心肺功能

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)03-0344-06

Preliminary application of multi-parameter cardiopulmonary exercise test system

LIU Jie^{1,3}, YE Jilun^{1,2,3}, WEN Bin^{1,3}, YUAN Maojie^{1,3}

1. Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Guangdong Key Laboratory for Biomedical Signal Measurements and Ultrasound Imaging, Shenzhen 518060, China; 3. Shenzhen Key Laboratory for Biomedical Engineering, Shenzhen 518060, China

Abstract: Cardiopulmonary exercise test combines the proportion of breathing gas, 12-lead ECG and cycloergometer to monitor the real-time dynamic changes of cardiopulmonary function parameters such as heart rate, oxygen consumption and carbon dioxide output under varying load conditions, so as to objectively and quantitatively evaluate cardiopulmonary reserve, thereby providing corresponding clinical data for physicians to diagnose and evaluate cardiopulmonary diseases and exercise tolerance. Five vital signs, namely 12-lead ECG, respiratory flow, blood pressure, carbon dioxide and oxygen, can be monitored by the system for calculating static lung function parameters at rest, such as forced vital capacity, slow vital capacity and maximum ventilation volume, and calculating dynamic cardiopulmonary function parameters during exercise, such as oxygen uptake per minute, carbon dioxide output per minute and anaerobic threshold. Through verification, the system is proved to be stable and reliable, and the parameter calculation is accurate. The proposed system can be used to accurately diagnose exercise intolerance, providing a reliable reference for evaluating the functions of human breathing, circulation, metabolism, etc., with a good application prospect.

Keywords: 12-lead ECG; respiratory mechanics; oxygen; carbon dioxide; static lung function; dynamic cardiopulmonary function

前言

【收稿日期】2020-10-17

【基金项目】深圳市产业关键技术研发项目(20190215140144982)

【作者简介】刘杰, 硕士研究生, 研究方向: 生命信息监护与支持, E-mail: 740145143@qq.com

【通信作者】叶继伦, 博士, 教授, 研究方向: 生命信息监护与支持、医疗器械标准化与设计应用, E-mail: yejilun@126.com

近几年公布的中国心血管报告中显示,我国因心血管疾病死亡人数占疾病死亡总人数的40%以上,是死亡率最高的疾病,呼吸疾病死亡人数占疾病死亡总人数的10%以上,是死亡率第3的疾病^[1]。根据世界卫生组织发布的世界全球卫生报告指出,近年来每年全球死亡人数约为5 000万,其中每年约有700万人死于心源性猝死^[2],而我国每年心源性猝死者高达55万人,平均每分钟约有1人死于心源性猝死,院前心脏骤停存活率不足1%。因此,对心肺功能

疾病的早期诊断、预防以及治疗,并提升国民对相关疾病的认知尤为重要。

心肺运动试验(Cardiopulmonary Exercise Testing, CPET)可以对患者的心血管和呼吸系统进行全面、动态的评估,相较于传统心电图、超声心动图以及静态肺功能,在整体评估心肺功能时,CPET可提供更丰富的参数、更高的准确性以及更多的预后信息^[3-4]。CPET对受试者从静息状态、热身运动状态,再逐渐递增功率至最大极限状态,再逐渐降低功率恢复至静息状态过程中的每分钟摄氧量(VO_2)、每分钟二氧化碳排出量(VCO_2)、血压、心电图(ECG)、氧脉搏(VO_2/HR)以及心率(HR)等指标进行连续动态监测,进而对数据进行精确解读,对人体心肺功能进行整体评价,其对健康管理、疾病预防、诊断至关重要^[5-6]。CPET在评价人体代谢、运动耐力、运动受限等方面有着极高的应用价值^[7-9]。本文主要介绍硬件系统设计、软件平台的展示、心肺运动试验的主要参数、部分参数计算方法以及本系统的初步临床应用。

1 硬件系统的设计

本文设计的运动心肺功能试验系统不仅包含十二导联心电图、呼吸流量、血压、二氧化碳和氧气 5 大生命体征指标,实现呼吸代谢及心功能评价。并可通过 WIFI 传输实时采集到的数据,在 PC 端的监测界面实现实时波形的显示和存储。并配备了运动心肺试验评测软件,可以对采集到的运动心肺数据进行心肺功能分析与诊断^[10]。本系统的实现框图如图 1 所示。

2 监测系统与评测系统展示

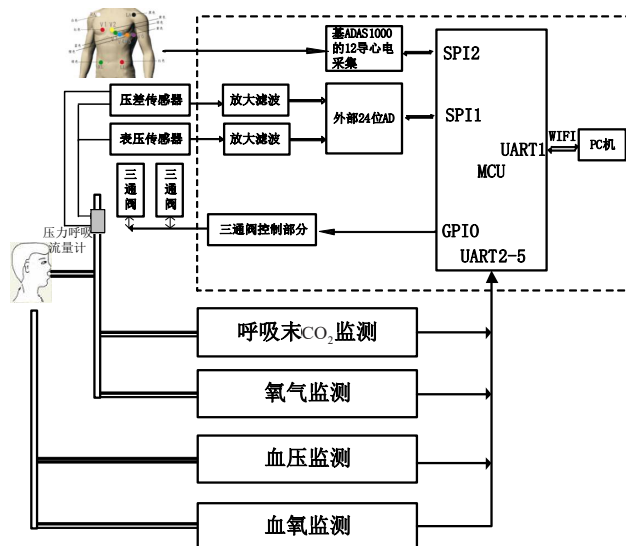


图1 多参数运动心肺试验系统实现框图

Fig.1 Block diagram of multi-parameter cardiopulmonary exercise test system

监测平台可实现16通道波形数据与二十余个参数的实时显示与存储。监测平台分为波形显示和运动心肺参数显示两个部分,波形显示部分从上到下、从左至右分别为十二导联心电图波形、流量波形、压力波形、二氧化碳波形、氧气波形。参数显示区域从上到下为 VO_2 、 VCO_2 、呼吸熵(RER)、HR、心率储备(HRR)、每分钟通气量(VE)、氧气通气当量(VE/VO_2)、二氧化碳通气当量(VE/VCO_2)、潮气量(VT)、 VO_2/HR 、流量(Flow)、呼气末二氧化碳分压($EtCO_2$)、呼气末氧分压(EtO_2)、呼吸率(RR)、无氧阈(AT)等二十余个参数,图2为监测平台主界面。

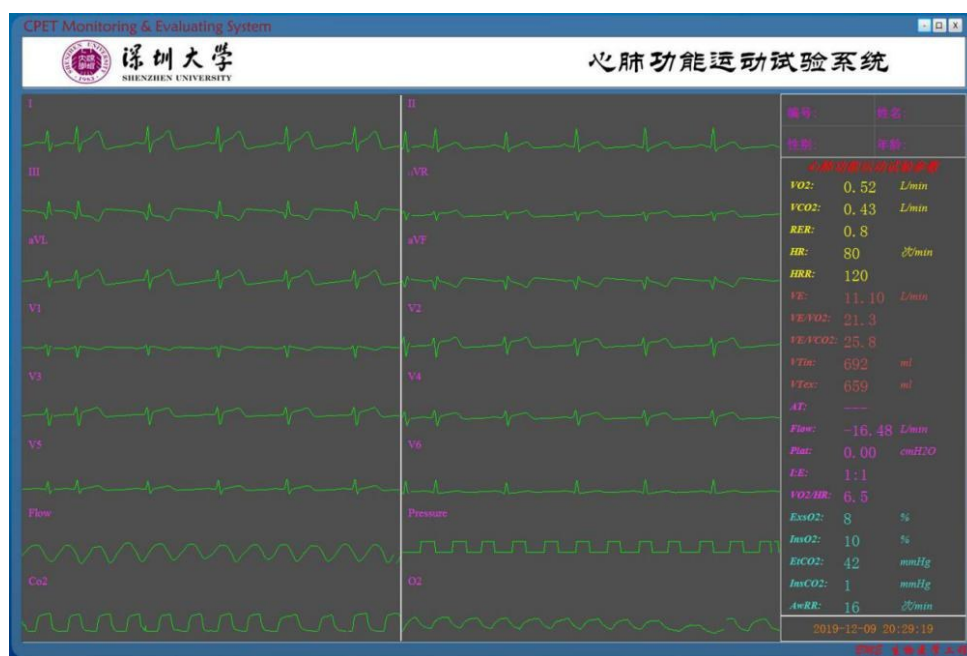


图2 运动心肺功能监测系统

Fig.2 Exercise cardiopulmonary function monitoring system

运动心肺功能评测软件可实现数据回放、标定、参数计算、心肺功能诊断报告输出等功能。如图3所示,从上到下、从左至右分别为十二导联心电波形、流量波形、压力波形、二氧化碳波形、氧气波形。右端分别显示峰值每分钟摄氧量(VO_{2peak})、峰值每分

钟二氧化碳排出量(VCO_{2peak})、HR、HRR、 VO_2/HR 等二十多个参数的输出。根据这些参数,进行运动不耐受以及整体心肺功能的评价,输出心肺功能诊断报告以及运动指导建议。

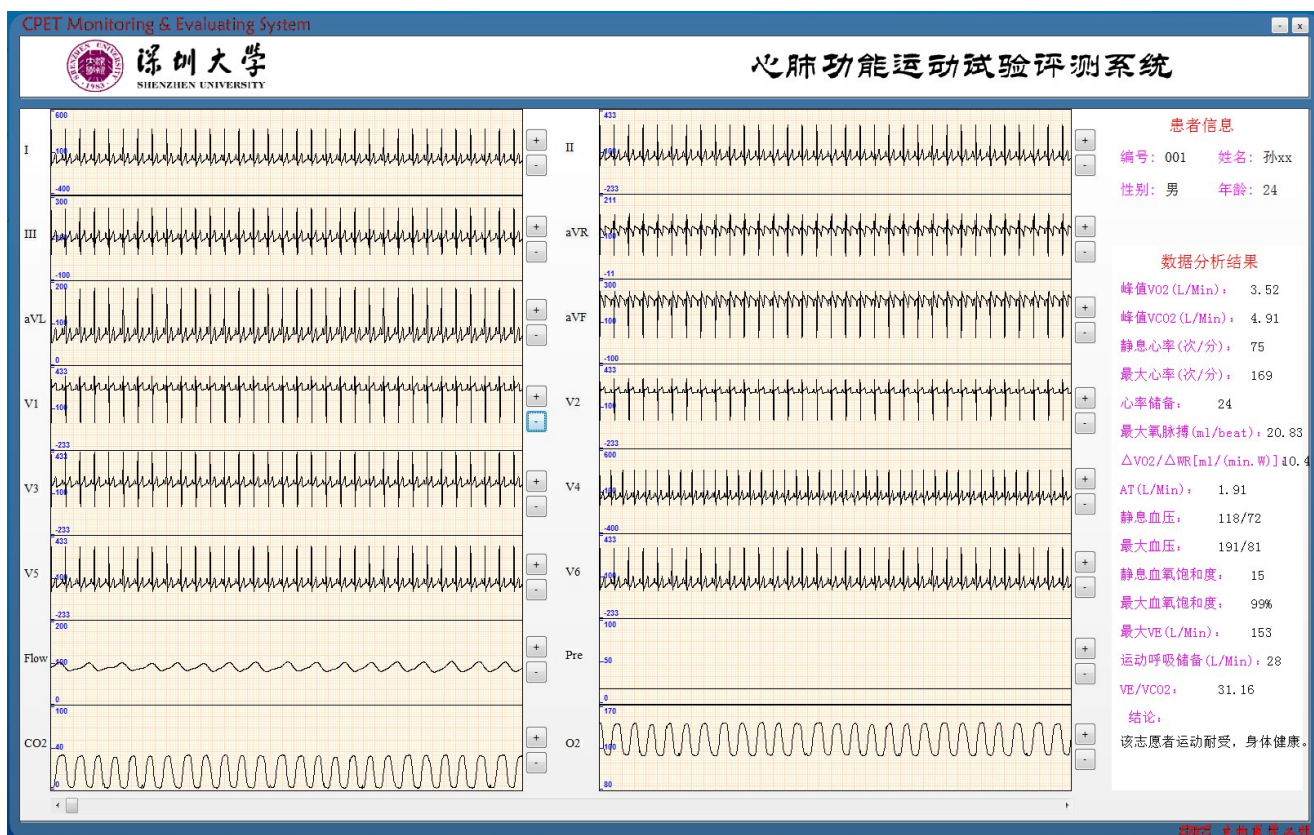


图3 运动心肺功能评测系统

Fig.3 Exercise cardiopulmonary function evaluation system

3 系统主要参数介绍及计算

在本系统中如何准确计算出 VO_2 、 VCO_2 、AT、Flow、HR、VE、用力肺活量(FVC)、VC、最大通气量(MVV)等参数至关重要。以上参数主要分为静态肺功能参数和动态心肺功能参数,做此分类的意义在于:部分肺功能疾病通过静态肺功能检查即可诊断出来,如慢性阻塞性肺病等。部分心肺功能疾病则需要在运动过程中才可以诊断出来,如运动诱发的心肌缺血等。

3.1 静态肺功能参数介绍及计算

静态肺功能参数主要包括FVC、慢肺活量(SVC)、MVV,其余参数有深吸气量(IC)、VT、一秒量(FEV_1)等。其中,FVC是指深吸气至肺总量后以最大用力、最快速度呼出肺内气体至残气量位,所测得的气体容量; FEV_1 是第1秒钟内的用力呼气量,临床上采用 FEV_1 和 FEV_1/FVC 判断肺内气道受阻、气流受限,其是慢性阻塞性肺病诊断标准;SVC是指深吸

气至肺总量后,然后深呼出所有气体,所测得的气体容量;MVV是指受试者在1 min内尽可能快速和尽可能深的幅度,所测得的1 min通气量^[11],其是潮气量与呼吸率的乘积。

3.2 动态心肺功能参数介绍及计算

动态心肺功能参数包括 VO_2 、 VCO_2 、AT、 $EtCO_2$ 、 EtO_2 、RER、 VO_2/HR 、VE等。其中, VO_2 是指人体1 min从外界环境所摄取氧气的量; VCO_2 是指人体1 min经过新陈代谢所排出二氧化碳的量,尤其是最大摄氧量(VO_{2max}),该指标是评价心肺功能的金标准^[12];AT是指有氧代谢向无氧代谢转换的临界点,该零界点时,有氧代谢所产生能量无法满足机体所需,需要无氧代谢补充,也是最大摄氧量出现的时刻,并且此刻尚未出现乳酸生产过量^[13]。 VO_2 和 VCO_2 均通过检查呼吸气体中各自所占比重来测量,RER为每分钟二氧化碳排出量和每分钟摄氧量的比值,VE为潮气量和呼吸率的乘积。以下展示部分参数计算方法。

VO₂计算公式如下:

$$VO_2 = \int_0^t Flow \times T \times INSO_2 \, dt$$

(1)

式中, Flow 为流量, 单位: L/s; INSO₂ 为吸入气体中的氧气浓度; T 为采样周期, 单位: s。

VCO₂计算公式如下:

$$VCO_2 = \int_0^t Flow \times T \times (EtCO_2 / Atm) \, dt$$

(2)

式中, Atm 为大气压。

本系统采用 V-斜率法实现 AT 的计算, VO₂ 摄入量和 VCO₂ 产出量曲线分为两段, 较低部分斜率小于 1, 较高部分斜率大于 1, 当该曲线斜率由小于 1 向大于 1 转折点对应的 VO₂ 值即为 AT 值^[14]。图 4 红色线在 X 轴截距即为无氧阈, AT 下降是所有心血管疾病的特征。

RER 计算公式如下:

$$RER = VCO_2 / VO_2$$

(3)

VE 计算公式如下:

$$VE = VT \times RR$$

(4)

式中, VT 为潮气量, RR 为呼吸率。

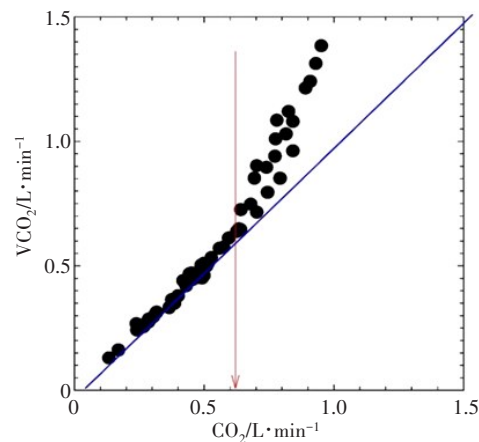


图4 V-斜率法测定无氧阈

Fig.4 Determination of anaerobic threshold by V-slope method

4 运动方案和参数估算

4.1 运动方案

心肺运动试验的目的是连续监测人体运动状态下十二导联心电图、呼吸、氧气以及二氧化碳等生命体征信号,以观察人体是否会出现某些病理生理学改变,因此需要制定一套科学的运动方案。目前有运动平板和功率踏车两种方案,鉴于功率踏车具备安全性高、易于操作、可直接记录功率等优点,本系统的运动设备选择功率踏车,该功率踏车功率递增为: 10~60 W/min, 具体每分钟递增功率值根据受试者实际情况决定。

根据美国加州大学洛杉矶分校海港医学中心

(Harbor-UCLA) 心肺运动实验室的标准, 本课题采用连续递增功率方案使受试者完成症状限制性最大极限 CPET^[15-16], 其详细实施步骤如下: 先询问受试者身体状况, 告知受试者试验内容, 让受试者熟悉测试设备, 调整座椅高度至最舒适位置以及紧急终止试验情况等安全性步骤, 进而安放心电图电极贴, 后佩戴呼吸面罩, 首先在平静状态下进行静态肺功能测试以及静态十二导联心电图测试, 紧接着在运动情况下连续监测并记录十二导联心电图、呼吸、氧气、二氧化碳以及血压等生命体征参数的动态变化, 以及 VO₂、VCO₂ 等气体交换指标变化趋势。CPET 共包括 4 个阶段: 静息阶段、热身阶段、极限运动阶段和恢复阶段, 其详细实施步骤如下: 受试者首先在功率踏车上静息 3 min; 然后进入热身阶段, 以 60 r/min 的速度在无负荷状态下蹬车 3 min; 然后根据受试者实际情况选择递增功率(功率为 10~50 W/min 进行选择), 仍然以 60 r/min 的速率蹬车, 直到精疲力尽为止, 该过程时间应该控制在 9~12 min 内, 从而获得运动过程中各项心肺指标变化趋势图, 此过程需要受试者全力配合, 否则难以达到预定目标; 最后逐渐降低功率进入恢复期, 继续以 10~20 W/min 的转速蹬车 30 s, 然后静坐 4.5 min 结束整个测试过程, 在恢复过程中继续记录该过程的心肺参数以及监测血压^[17]。

4.2 目标参数的估算

在心肺运动试验中, 需要估算无负荷 VO₂、峰值 VO₂、每分钟递增功率(W)、峰值 HR 等, 并且设定特定时间间隔, 持续测量血压, 以保证受试者在测试过程中的安全, 具体计算公式如下^[18-19]:

无负荷VO₂(mL/min) = 150 + [6 + 体质量(kg)]

(5)

峰值VO₂(mL/min) = [身高(cm) - 年龄(岁)] *
20(男性)或*14(女性)

(6)

每分钟递增功率(W) =
[峰值VO₂(mL/min) - 无负荷VO₂(mL/min)] / 100

(7)

最大心率(次/min) = 220 - 年龄(岁)

(8)

成人无氧阈估计值与峰值 VO₂ 预计值的比值的 95% 可信下限为 0.4 (该公式仅针对 25 岁左右的人群)。

通常情况下, 在受试者达到最大心率或精疲力竭时, 开始逐渐降低脚踏车功率进入恢复状态, 并持续检测各项生理指标。测试过程中如遇见受试者在测试过程中出现头晕、眼花、运动者血压不升反降或严重高血压反应(如收缩压>300 mmHg)时可考虑提前终止试验。

5 初步的临床试验评测

本课题所设计的多参数运动心肺功能测试系统可直接监测 5 种生命体征信号, 鉴于心肺运动试验的

复杂性以及应用的广泛性,加之本课题的设计系统处于初步应用阶段,故本系统仅将其用于运动不耐受判定以及初步病因的诊断,结合运动不耐受的病理生理机制,评价人体受控状态下心功能、呼吸功能以及循环代谢等功能,并实现评价运动不耐受病因的诊断、运动建议以及康复指导方案。

为了验证本课题所搭建系统对运动不耐受病因、心肺功能评价的准确性。本研究选择7名志愿者进行心肺运动试验,年龄22~27岁,均为健康男性,其中2名经常运动健身,3名运动量较少,2名几乎不运动。受试者信息如表1所示,表格中包含按照式(1)至式(4)计算所得关键参数的预计值。

表1 志愿者信息表
Tab.1 Information of volunteers

测试对象	性别	年龄/岁	身高/cm	体质量/kg	预计峰值 摄氧量/L·min ⁻¹	预计无氧阈 /L·min ⁻¹	最大心率 /次·min ⁻¹	最大氧脉 搏/mL·次 ⁻¹	运动量	有无疾病
1	男	27	175	74	2.96	>1.18	193	15.30	较多	无
2	男	27	172	65	2.90	>1.16	193	15.02	较多	无
3	男	25	169	78	2.88	>1.15	195	14.77	较少	无
4	男	27	169	60	2.84	>1.14	193	14.72	较少	无
5	男	23	170	60	2.94	>1.17	197	14.92	较少	无
6	男	26	168	65	2.84	>1.14	194	14.64	几乎不	无
7	男	22	187	112	3.30	>1.32	198	16.67	几乎不	无

采集环境为独立、宽阔、安静的专用运动心肺功能测试房间,操作人员在旁辅助、监测受试者身体状况。指导受试者开始进行心肺运动试验,首先进行静态肺功能测试和静态十二导联心电图检查;其次按照第4.1小节的心肺运动试验临床方案进行心肺运动试验,以保证测试数据的有效性,并存储整个测试过程的数据,以备后续诊断使用。

测试完成后,将数据文件导入运动心肺评测平

台进行算法自动分析。根据临床的诊断标准,采用手动分析法提取运动心肺功能参数关键指标。以手动标定为参考,进行误差分析。表2是本系统所测量部分运动心肺功能数据。

观察表2可知,人工手动分析与软件自动分析对VO₂peak、VCO₂peak以及AT存在着一定的误差。通过观察监测过程中的数据,对比软件自动标定特征点与人工手动标定特征点,发现软件自动标定相关

表2 系统测试数据
Tab.2 System test data

分析方法	关键指标	测试对象						
		1	2	3	4	5	6	7
软件分析	监测时长/min	21	21	21	21	21	21	21
	峰值摄氧量/L·min ⁻¹	3.52	3.60	2.92	2.70	2.69	2.91	3.10
	峰值二氧化碳排出量/L·min ⁻¹	4.91	4.85	3.95	3.52	3.61	3.42	3.42
	无氧阈/L·min ⁻¹	1.91	1.83	1.44	1.55	1.68	1.44	1.35
	静息心率/次·min ⁻¹	75	73	72	68	75	71	78
	最大心率/次·min ⁻¹	169	168	176	178	172	182	183
	心率储备	24	25	19	15	22	12	15
软件评测结果	是否运动不耐受	耐受	耐受	耐受	耐受	耐受	耐受	不耐受
人工分析	峰值摄氧量/L·min ⁻¹	3.4	3.71	3.12	2.61	2.80	2.78	3.21
	峰值二氧化碳排出量/L·min ⁻¹	4.81	5.01	4.09	3.41	3.78	3.22	3.53
	无氧阈/L·min ⁻¹	1.83	1.92	1.48	1.49	1.61	1.53	1.28
人工诊断结果	是否运动不耐受	耐受	耐受	耐受	耐受	耐受	耐受	不耐受

信号特征点存在着漏判现象。造成该种现象主要原因还是在于运动过程中生理参数数据变异性大,所设计算法易受运动过程中干扰影响,以造成误判和漏判现象,从而导致相关参数计算存在误差。但软件分析能够迅速、准确分析计算出更多的生理参数指标,可对运动不耐受以及整体心肺功能进行初步评价,再结合人工手动分析进一步提取关键指标,最终可实现对整体心肺功能的全面诊断与评价。软件自动分析 VO_{2peak} 、AT 准确率分别为 95.4% 和 95.2%,该运动心肺功能测试系统能够作为诊断运动不耐受以及人体心肺功能初步评价的工具。

6 结论

本设计已经初步搭建出一套集合静态肺功能检测和运动心肺功能检测的运动心肺功能测试系统,并实现了初步的应用。结合十二导心电图、呼吸流量、氧气、二氧化碳、血压五大生命体征信号,在上位机通过特征点的识别,成功实现了 FVC、SVC、MVV 等静态肺功能参数的测量,实现了 VO_2 、 VCO_2 、 VO_2/HR 等动态心肺功能参数的测量,为后续国内研究人员研究运动心肺功能测试系统提供了很好的参考意义。

该系统还存在参数计算的准确性、应用面等问题,后续会对特征点提取的算法和硬件电路进行更新,提高系统的测量准确性,挖掘信号中更多的信息,对参数进行整合,使得对静态肺功能和动态心肺功能的评价更加全面,辅助医生更好地对患者的心肺功能进行诊断与治疗,指导患者运动,预测运动风险,将其应用于术前麻醉风险评测等方面,进而更好地服务社会。

【参考文献】

- [1] 陈伟伟,高润霖,刘力生,等.中国心血管病报告2017概要[J].中国循环杂志,2018,33(1): 5-12.
CHEN W W, GAO R L, LIU L S, et al. Summary of Chinese cardiovascular disease report 2017[J]. Chinese Journal of Circulation, 2018, 33(1): 5-12.
- [2] 佚名. WHO 发布 2017 世界卫生统计报告[J]. 健康管理, 2017(5): 1-2.
YI M. WHO released the 2017 world health statistics report[J]. Health Management, 2017(5): 1-2.
- [3] 朱颖莹,陈晓亮.心肺运动试验在心血管疾病患者中的应用价值和前景[J].心电与循环,2017,36(4): 271-274.
ZHU Y Y, CHEN X L. The application value and prospect of cardiopulmonary exercise test in patients with cardiovascular disease[J]. Electrocardiogram and Circulation, 2017, 36(4): 271-274.
- [4] MILANI R V, LAVIE C J, MEHRA M R, et al. Understanding the basics of cardiopulmonary exercise testing[J]. Mayo Clin Proc, 2006, 81(12): 1603-1611.
- [5] 孙兴国.整体整合生理学医学新理论体系:人体功能一体化自主调控[J].中国循环杂志,2013,28(2): 88-92.
SUN X G. A new theoretical system of holistic integrated physiology medicine: integrated autonomous regulation of human body functions[J]. Chinese Journal of Circulation, 2013, 28(2): 88-92.
- [6] ADACHI H. Cardiopulmonary exercise test[J]. Int Heart J, 2017, 58(5): 654-655.
- [7] 孙兴国.心肺运动试验在临床心血管病学中的应用价值和前景[J].中华心血管病杂志,2014,42(4): 347-351.
SUN X G. Application value and prospect of cardiopulmonary exercise test in clinical cardiovascular disease[J]. Chinese Journal of Cardiology, 2014, 42(4): 347-351.
- [8] OLDER P, HALL A, HADER R. Cardiopulmonary exercise testing as a screening test for perioperative management of major surgery in the elderly[J]. Chest, 1999, 116(2): 355-362.
- [9] 刘爱华,董竞成.运动心肺功能试验的应用进展[J].医学综述,2013,19(22): 4125-4128.
LIU A H, DONG J C. Application progress of exercise cardiopulmonary function test[J]. Medical Recapitulate, 2013, 19(22): 4125-4128.
- [10] 刘杰,叶继伦,袁懋结,等.多参数心肺功能运动试验系统的研制[J].中国医疗器械杂志,2020,44(2): 136-140.
LIU J, YE J L, YUAN M J, et al. Development of a multi-parameter cardiopulmonary exercise test system[J]. Chinese Journal of Medical Devices, 2020, 44(2): 136-140.
- [11] 中华医学会呼吸病学分会肺功能专业组.肺功能检查指南(第一部分)—概述及一般要求[J].中华结核和呼吸杂志,2014,37(6): 402-405.
Pulmonary Function Professional Group, Respiratory Disease Branch, Chinese Medical Association. Guidelines for pulmonary function examination (part 1)-overview and general requirements[J]. Chinese Journal of Tuberculosis and Respiratory Medicine, 2014, 37(6): 402-405.
- [12] LAFOUNTAIN R A, DA SILVEIRA J S, VARGHESE J, et al. Cardiopulmonary exercise testing in the MRI environment[J]. Physiol Meas, 2016, 37(4): N11-N25.
- [13] BINDER R K, WONISCH M, CORRA U, et al. Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing[J]. Eur J Prev Cardiol, 2008, 15(6): 726-734.
- [14] SUE D Y, WASSERMAN K, MORICCA R B, et al. Metabolic acidosis during exercise in patients with chronic obstructive pulmonary disease. Use of the V-slope method for anaerobic threshold determination[J]. Chest, 1988, 94(5): 931-938.
- [15] 费家玥,孙兴国,于辉,等.功率递增速率影响正常人心肺运动试验峰值呼吸交换率的初步观察研究[J].中国全科医学,2018,21(30): 36-41.
FEI J Y, SUN X G, YU H, et al. Preliminary observation and research on the rate of power increase affecting the peak respiratory exchange rate of normal people's cardiopulmonary exercise test[J]. Chinese General Practice, 2018, 21(30): 36-41.
- [16] 孙兴国.心肺运动试验的规范化操作要求和难点-数据分析图示与判读原则[J].中国应用生理学杂志,2015,31(4): 361-365.
SUN X G. The standardized operation requirements and difficulties of cardiopulmonary exercise test-data analysis diagram and interpretation principle[J]. Chinese Journal of Applied Physiology, 2015, 31(4): 361-365.
- [17] BERRY N C, MANYOO A, OLDHAM W M, et al. Protocol for exercise hemodynamic assessment: performing an invasive cardiopulmonary exercise test in clinical practice[J]. Pulm Circ, 2015, 5(4): 610-618.
- [18] KARLMAN W, JAMES E H.心肺运动试验的原理及其解读:病理生理及临床应用[M].第5版.北京:北京大学医学出版社,2018: 129-130.
KARLMAN W, JAMES E H. Principle and interpretation of cardiopulmonary exercise test-pathophysiology and clinical application[M]. 5th ed. Beijing: Peking University Medical Press, 2018: 129-130.
- [19] 孙兴国,代雅琪.心肺运动试验终止指征:85%最大预计心率及特定收缩压界值的探讨[J].中国全科医学,2018,21(30): 21-28.
SUN X G, DAI Y Q. Indications for termination of cardiopulmonary exercise test: discussion of 85% maximum predicted heart rate and specific systolic blood pressure limit value[J]. Chinese General Practice, 2018, 21(30): 21-28.

(编辑:陈丽霞)