

DOI:10.16781/j.CN31-2187/R.20210727

· 论 著 ·

一种应用于非接触式心率、呼吸频率监测研究的模拟器设计

冯逸飞^{1△}, 徐伟^{2△}, 孙文业³, 何颖^{1*}, 张娜⁴, 李靖⁴, 余长泉⁵

1. 海军军医大学(第二军医大学)海军特色医学中心海洋生物医药与极地医学研究室, 上海 200433

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119

3. 苏州大学附属第二医院信息处, 苏州 215000

4. 苏州安莱光电科技有限公司, 苏州 215123

5. 浙江清华长三角研究院海纳-智能光子系统研究中心, 嘉兴 341006

[摘要] **目的** 设计一种用于非接触式心率、呼吸频率监测研究的模拟器, 阐述其基本工作原理并测试其指标性能。**方法** 利用STM32F429开发板、电磁栓、H桥驱动电路、直流推杆、触摸屏等设计心率、呼吸模拟器, 并进行性能测试, 测试参数包括心率、心率变化响应、呼吸频率和呼吸频率变化响应。**结果** 成功研制了一种心率、呼吸模拟器。心率模拟器的心率可调节范围为30~250 min⁻¹, 误差都在±2 min⁻¹内, 心率变化响应时间在15 s内, 满足应用要求。呼吸模拟器的呼吸频率可调节范围为1~40 min⁻¹, 误差都在±1 min⁻¹内, 呼吸频率变化响应时间在15 s内, 满足应用要求。**结论** 该心率、呼吸模拟器能够通过设置不同的心率、呼吸频率参数模拟不同伤病状态下的人体生理信号, 符合非接触式生命体征监测研究中的应用要求, 可实现测量范围、测量精度、响应时间等性能指标监测的专业化设计与验证。

[关键词] 非接触式; 心率; 呼吸频率; 模拟器设计; 测试

[中图分类号] R 314 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-1338(2022)06-0633-05

Design of a simulator for non-contact heart rate and respiratory rate monitoring research

FENG Yi-fei^{1△}, XU Wei^{2△}, SUN Wen-ye³, HE Ying^{1*}, ZHANG Na⁴, LI Jing⁴, YU Cheung-chuen⁵

1. Department of Marine Biomedicine and Polar Medicine, Naval Medical Center of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China

3. Information Office, The Second Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu, China

4. Anlight Optoelectronic Technology Co., Ltd, Suzhou 215123, Jiangsu, China

5. Haina-Intelligent Photonic System Research Center, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 341006, Zhejiang, China

[Abstract] **Objective** To design a simulator for non-contact heart rate and respiratory rate monitoring research, explain its working principle, and test its performance. **Methods** STM32F429 development board, electromagnetic bolt, H-bridge driver circuit, direct current push rod, and touch screen were used to design a heart rate and breath simulator. Performance tests were evaluated with parameters including heart rate, heart rate change response, respiratory rate, and respiratory rate change response. **Results** A heart rate and breath simulator was successfully developed. The adjustable range of the heart rate simulator was 30-250 min⁻¹ with error in ±2 min⁻¹. The adjustable range of the respiratory rate of the breath simulator was 1-40 min⁻¹ with error in ±1 min⁻¹. The response time of heart rate change and respiratory rate change was both in 15 s, which met its application requirements. **Conclusion** The heart rate and breath simulator can simulate human physiological signals under different injury conditions by setting different heart rate and respiratory rate parameters, which meets the application requirements for non-contact vital signs monitoring research, and can realize the professional design and verification of performance indicators such as measurement range, measurement accuracy, and response time.

[Key words] non-contact; heart rate; respiratory frequency; simulator design; test

[Acad J Naval Med Univ, 2022, 43(6): 633-637]

[收稿日期] 2021-07-27 [接受日期] 2022-03-07

[基金项目] 军队后勤应急科研重点项目(BHJ20C008), 海军军医大学(第二军医大学)海军特色医学中心青年科技创新人才项目. Supported by Key Project for Logistics Emergency Research of PLA (BHJ20C008) and Youth Science and Technology Innovation Talent Project of Naval Medical Center of Naval Medical University (Second Military Medical University).

[作者简介] 冯逸飞, 硕士生, 助理研究员. E-mail: fengyifei1012@163.com; 徐伟, 博士, 讲师. E-mail: xuweiopt@163.com

[△]共同第一作者(Co-first authors).

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-81883261, E-mail: yinghe_hys@163.com

伤病员生命体征的有效监测是医疗救治和健康维护的重要前提,心率和呼吸频率作为最重要的2个基本参数,通常需要在皮肤表面粘贴电极或戴血氧指夹来获取心率信号,在胸腔捆绑一个呼吸传感器来监测呼吸运动,这种传统的接触式体感监测存在易引发交叉感染、用户不友好、无法动态长时监测等缺点。因此,越来越多的研究致力于探索新的解决方案,即通过非接触式监测技术,无须穿戴或粘贴任何传感器即可实现伤病员呼吸和心率监测^[1-4]。当前非接触式监测技术的研究重点主要集中在测量范围、测量精度、响应时间等性能指标监测的专业化设计与验证方面^[4-5]。

在非接触式生命体征监测技术设计研究阶段,由于无法应用于伤病员临床测试,缺乏监测对象模型,对应的各项性能指标的验证面临着较大的困难。当前针对各类生命体征信号的模拟手段主要以数学模型分析和计算机仿真为主,个别高端模拟人也采用机械电子结构实现了生命体征的物理模拟,主要应用于临床医疗设备检修、临床培训等领域^[6-9]。因此,本研究专门设计了应用于非接触式无感生命体征监测研究的高稳定性、大量程、快速响应的心率和呼吸模拟器,通过设置不同的心率、呼吸频率参数模拟不同伤病状态下的人体生理信号,以期开展非接触式无感心率、呼吸频率监测技术研究提供工具和验证手段。

1 材料和方法

1.1 模拟器设计

1.1.1 材料与仪器 电磁栓(广州赛瑞电子有限公司),直流推杆(深圳亿星科技有限公司),H桥驱动模块(深圳科比电子科技有限公司),无感心率、呼吸频率传感器(苏州安莱光电有限公司),4.3英寸(1英寸=2.54 cm)触摸屏(深圳淘晶驰电子有限公司),STM32F429开发板(苏州安莱光电有限公司),船用床垫(江阴滨江舰船设备有限公司)。
1.1.2 系统架构 心率模拟器和呼吸模拟器的硬件设计架构如图1所示。对于心率模拟器,通过STM32F429开发板的串口(PA2、PA3)连接触摸屏并实现控制通信,研究人员可以根据实验设计需求设定模拟心率值;当设定模拟心率值后,可按下“锁定”防止误触,保证模拟器稳定输出。对于呼吸模拟器,通过STM32F429开发板的串口(PA2、PA3)连接触摸屏通信,另外通过输入/输出(input/output, IO)口(PB0、PB1、PA5)连接H桥驱动电路的控制信号端口,H桥驱动电路连接直流推杆。开发板利用PB0、PB1驱动H桥驱动电路进一步控制直流推杆的推进方向,同时利用PA5控制直流推杆的推进速度。呼吸模拟器的使用方法和心率模拟器一致,通过触摸屏实现模拟值设定和“锁定”防止误触,保证模拟器稳定。

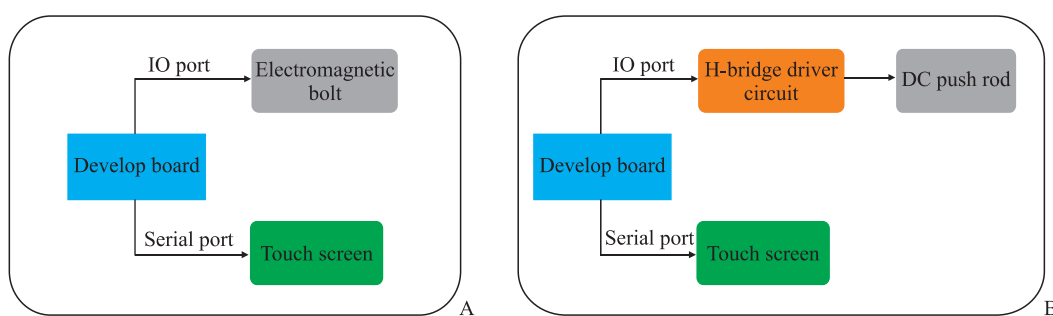


图1 心率模拟器(A)和呼吸模拟器(B)的硬件设计架构示意图

Fig 1 Schematic diagram of hardware design architecture of heart rate simulator (A) and breath simulator (B)

IO: Input/output; DC: Direct current.

1.1.3 软件开发 软件开发主要包括3个部分,分别为人机交互触摸屏软件、心率模拟器内开发板的嵌入式软件、呼吸模拟器内开发板的嵌入式软件。

针对人机交互触摸屏的软件开发,心率模拟器的界面设定心率范围为25~255 min⁻¹,呼吸模拟器的界面设定呼吸频率范围为1~60 min⁻¹。触摸

屏幕和心率、呼吸模拟器内部的开发板通过串口进行高速通信,且两者都具有频率锁定功能,能有效防止误触导致输出频率发生变化。

针对心率模拟器内开发板的嵌入式软件,根据研究人员输入的心率值,利用STM32F429开发板内部的定时器模块精确计算并控制相邻2次触发电

磁栓的时间间隔,从而精准控制心率模拟器产生的心率值。

针对呼吸模拟器内开发板的嵌入式软件,根据研究人员输入的呼吸频率值,利用STM32F429开发板^[10]内部的定时器模块精确计算并控制相邻2次触发直流推杆的时间间隔及控制直流推杆的推进方向,从而精准控制呼吸模拟器产生的呼吸频率值。直流推杆的推进方向和速度通过STM32F429开发板的IO口和H桥驱动电路^[11]来精确控制;H桥驱动模块真值表见图2,可以实现自由控制并实现前进、后退、停止、调速等功能,并可利用脉宽幅度调制实现可变的行进或后退速度^[12]。

In1	In2	Enable1	Out1/out2
0	0	×	Braking
1	1	×	Hangling
1	0	PWM	Forward speed regulation
0	1	PWM	Backward speed regulation
1	0	1	Full speed forward
0	1	1	Full speed backward

图2 H桥驱动模块真值表

Fig 2 H-bridge driver module truth table

“×” indicates invalid. PWM: Pulse width modulation.

1.2 性能测试 测试过程中,将模拟器放置于本

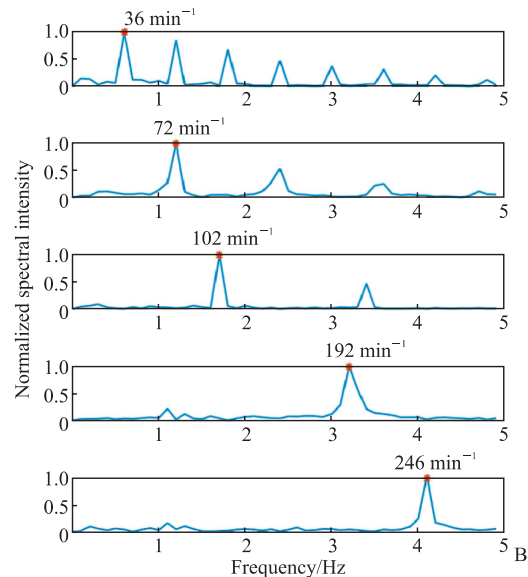
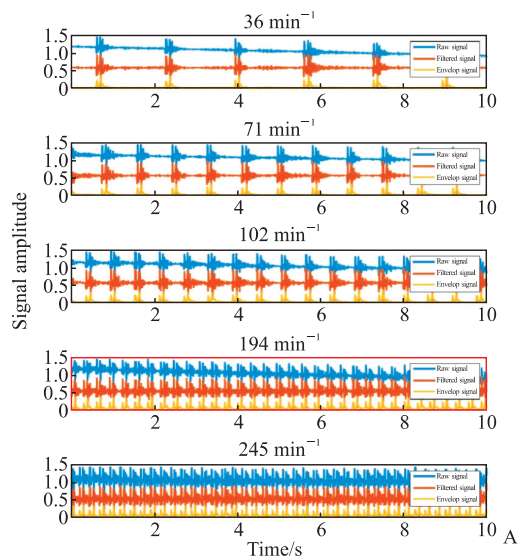


图3 随机心率测试(A)及快速傅里叶变换结果(B)

Fig 3 Random heart rate test (A) and fast Fourier transform results (B)

2.2 心率变化响应测试 心率从80到120 min⁻¹和从80到40 min⁻¹的短时傅里叶变换图见图4,响应时间均在15 s内,远小于30 s的指标值,因此

课题组研制的非接触式生命体征监测床垫正上方,分别调节心率、呼吸模拟器的设定值,采集数据并进行分析。参照医疗监护设备行业标准要求,设定模拟器性能参数如下:(1)心率测试范围为30~250 min⁻¹(误差±2 min⁻¹);(2)心率变化响应测试,从80到120 min⁻¹的响应时间不超过30 s,从80到40 min⁻¹的响应时间也在30 s内;(3)呼吸频率测试范围为1~40 min⁻¹(误差±1 min⁻¹);(4)呼吸频率变化响应测试,呼吸频率从25到15 min⁻¹的响应时间不超过30 s,从25到35 min⁻¹的响应时间也不超过30 s。

2 结果

2.1 心率测试 随机设定心率模拟器发生器在测试范围内的5个心率值(36、71、102、194、245 min⁻¹),分别在5个心率值情况下采集的原始信号、滤波信号、包络信号见图3A,对应的快速傅里叶变换结果见图3B。原始信号先经过1个2 Hz的高通滤波器得到滤波信号,接着进行希尔伯特变换得到包络信号^[13];针对包络信号进行快速傅里叶变换得到傅里叶变换结果,在0~5 Hz范围内寻找最大值及最大值对应的频率,简单换算后即为计算得到的心率。从傅里叶变换结果可以看出,心率的测试结果误差都在±2 min⁻¹内,满足性能要求。

该心率模拟器具有较快的响应速度,符合测试标准,能够达到应用于非接触式生命体征监测设备心率研究应用的要求。

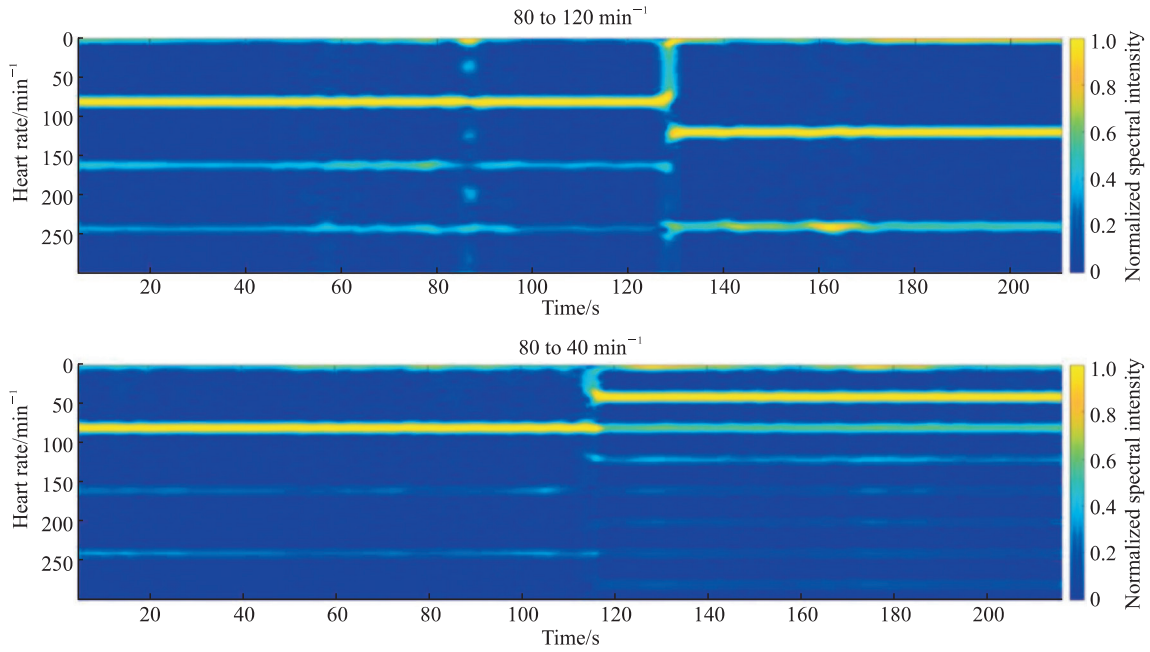


图4 心率变化响应测试结果

Fig 4 Test results of heart rate change response

2.3 呼吸频率测试 随机设定呼吸模拟器发生器在测试范围内的5个呼吸频率值(6、11、19、27、40 min⁻¹),在5个呼吸频率值情况下采集的原始信号、滤波信号、包络信号见图5A,对应的快速傅里叶变换结果见图5B。原始信号先经过1个0.1~2 Hz的带通滤波器得到滤波信号,接着

进行希尔伯特变换得到包络信号;针对包络信号进行快速傅里叶变换得到傅里叶变换结果,在0~1 Hz内寻找最大值及最大值对应的频率,简单换算后即得到计算得到的呼吸频率;从傅里叶变换结果可以看出,呼吸频率的测试结果误差都在±1 min⁻¹内,满足性能要求。

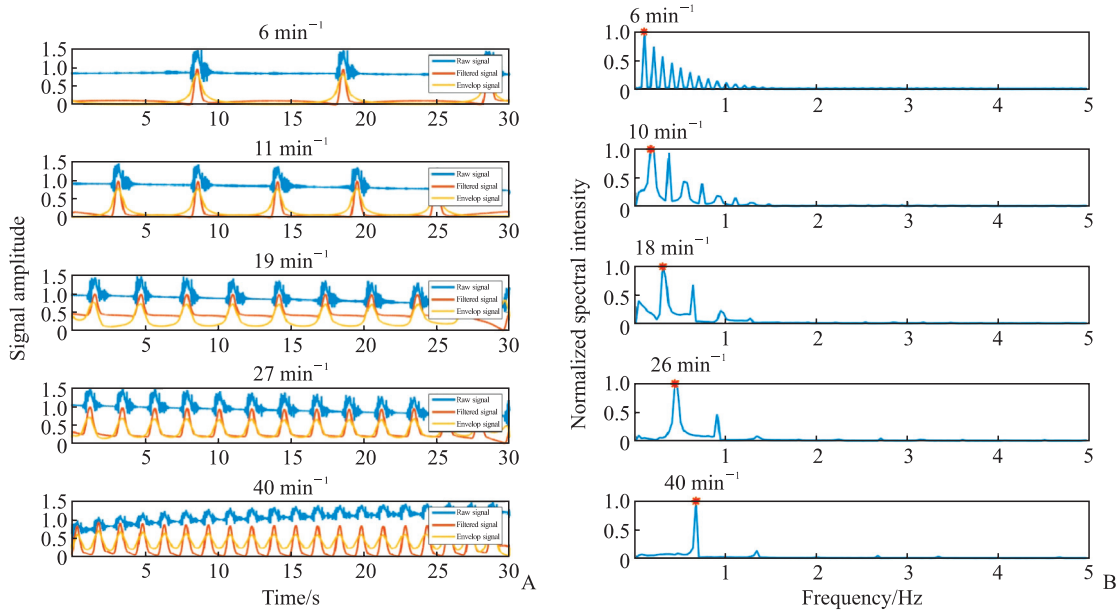


图5 随机呼吸频率测试(A)及快速傅里叶变换结果(B)

Fig 5 Random respiratory rate test (A) and fast Fourier transform results (B)

2.4 呼吸频率变化响应测试 呼吸频率从25到35 min⁻¹和从25到15 min⁻¹的短时傅里叶变换见图6,响应时间均在15 s内,远小于30 s的指标

值,因此该呼吸模拟器具有较快的响应速度,符合测试标准,能够达到应用于非接触式生命体征监测设备呼吸频率研究应用的要求。

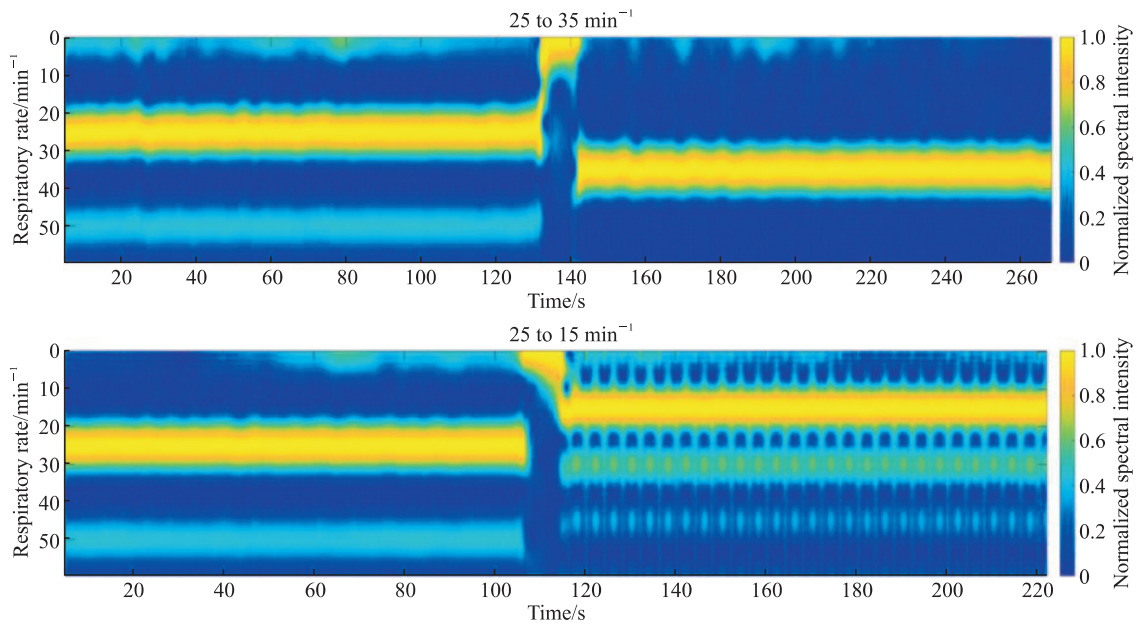


图6 呼吸频率变化响应测试结果

Fig 6 Test results of respiratory rate change response

3 讨论

根据性能测试结果,本研究设计的心率、呼吸模拟器可以有效且高精度地模拟人体不同心率和呼吸频率的信号,符合临床呼吸、心率医疗监测设备应用对象的信号采集指标要求,解决了非接触式生命体征监测设备的技术研究和性能验证工具缺失的困难;同时,心率和呼吸模拟器模拟信号的响应时间也符合测试性能要求,可以为相关非接触式生命体征监测设备提供大量、不同的模拟心率和呼吸频率信号。该模拟器可为部队特种伤病救治提供研究数据基础,为开发相关人工智能算法模型积累数据量,提高监测算法精度,支持非接触式生命体征监测技术应用于不同的救治场景,包括平时健康管理监测、战时批量伤员快速检伤分类、重伤救治监护等卫勤保障工作。

[参考文献]

- [1] TAL A, SHINAR Z, SHAKI D, CODISH S, GOLDBART A. Validation of contact-free sleep monitoring device with comparison to polysomnography[J]. *J Clin Sleep Med*, 2017, 13: 517-522.
- [2] FAJKUS M, NEDOMA J, MARTINEK R, VASINEK V, NAZERAN H, SISKKA P. A non-invasive multichannel hybrid fiber-optic sensor system for vital sign monitoring[J/OL]. *Sensors (Basel)*, 2017, 17: 111. DOI: 10.3390/s17010111.

- [3] CHEN Z H, LAU D, TEO J T, NG S H, YANG X F, KEI P L. Simultaneous measurement of breathing rate and heart rate using a microbend multimode fiber optic sensor[J/OL]. *J Biomed Opt*, 2014, 19: 057001. DOI: 10.1117/1.JBO.19.5.057001.
- [4] 景裕,曹育森,朱明明,雷涛,夏娟娟,李钊,等.非接触式生命探测技术研究现状与发展[J]. *中国医疗设备*, 2021, 36: 1-4.
- [5] 罗朗娟,张洽.非接触式人体生命信号检测方法研究[J]. *医疗卫生装备*, 2021, 42: 8-13, 19.
- [6] 刘国辉,肖华军,于立华.人体呼吸系统力学属性下呼吸动力过程的仿真研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17: 313-318.
- [7] 豆梦,王传洋,郁树梅,孙荣川,孙立宁.一种面向放疗机器人的人体胸腹体表-肿瘤呼吸运动模拟器[J]. *现代制造工程*, 2018: 20-25.
- [8] 杨冰.基于生命体征模拟器prosim3对心电图机检测方法的研究[J]. *信息记录材料*, 2020, 21: 81-82.
- [9] 靳杰,董文龙,樊毫军,侯世科,范斌.心肺复苏模拟人研究现状[J]. *医疗卫生装备*, 2021, 42: 80-84.
- [10] 朱明杰,梁志超,黄懿淳.基于STM32的机器人运动控制系统[J]. *中国新通信*, 2019, 21: 76-77.
- [11] 戴貽康,焦运良,范晶.H桥式电路驱动无刷直流电机的设计[J]. *信息技术与网络安全*, 2019, 38: 58-63.
- [12] 杨馥华,康婷霞.无刷电机PWM调速系统设计[J]. *电子设计工程*, 2021, 29: 124-128, 133.
- [13] 许晓飞,林勇,严彬彬.基于希尔伯特-黄变换的心音包络提取[J]. *航天医学与医学工程*, 2008, 21: 134-136.

[本文编辑] 杨亚红