

文章编号: 1673-3193(2024)03-0348-09

基于近红外漫射光谱的离体血氧测量技术研究

刘培俊, 李为龙, 张睿芝, 高国雅, 桂志国, 尚禹

(中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 基于近红外漫射光谱技术(Near-Infrared Diffuse Optical Spectroscopy, NIRS)和修正的比尔朗伯定律(Modified Beer-Lambert Law, MBL)提出了一种适用于离体血液的新型氧含量测量方法,同时开发了血氧实时监测系统以实现体外循环血氧参数的连续监测。NIRS利用脱氧血红蛋白和氧合血红蛋白对两种波长近红外光吸收率的差异来计算组织的吸收和散射系数,朗伯-比尔定律是表征光强衰减与光子传输路径关系的数学表达式,将二者结合可估算血红蛋白的吸收系数;与传统的测量方式不同,本文所提出的透射式测量方法,通过双波长(660~904 nm)光源探头交替切换可获取多参数的光学信号,信号实时上传至采集界面(LabVIEW),经过对数化处理,并结合创新的血氧算法得到血液吸收系数、血氧饱和度与光信号的线性模型。为了验证本文研究方案的可行性,开展了液态仿体实验和离体血溶液实验,以滴入溶液墨水体积(仿体实验)和酵母溶液体积(血溶液实验)为变量,通过调控溶液浓度改变光密度变化幅度,证实二者均与光密度(D_0)具有良好的线性关系($r^2 > 0.95$, $p < 0.01$)。本研究所提出的新型血氧测量方法和血氧实时监测系统适合于离体血液的血氧测量,数据准确可靠、重复稳定性好。

关键词: 近红外漫射光谱技术; 修正的比尔朗伯定律; 体外循环; 血氧饱和度

中图分类号: R446.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.03.013

引用格式: 刘培俊, 李为龙, 张睿芝, 等. 基于近红外漫射光谱的离体血氧测量技术研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 348-356.

LIU Peijun, LI Weilong, ZHANG Ruizhi, et al. *In vitro* measurement of blood oxygenation based on near-infrared diffuse optical spectroscopy[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(3): 348-356.

In Vitro Measurement of Blood Oxygenation Based on Near-Infrared Diffuse Optical Spectroscopy

LIU Peijun, LI Weilong, ZHANG Ruizhi, GAO Guoya, GUI Zhiguo, SHANG Yu

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Based on near-infrared spectroscopy (NIRS) and modified Beer-Lambert law (MBLL), a new method for measuring oxygen content *in vitro* blood was proposed, at the same time, a blood oxygen saturation real-time monitoring system was developed to realize continuous monitoring of blood oxygen parameters during cardiopulmonary bypass. NIRS computes the absorption and scattering coefficients of tissues by using the difference in the absorption rates of the two wavelengths of near-infrared light by deoxyhemo-

收稿日期: 2023-04-28

基金项目: 山西省基础研究计划项目(202203021221097, 202203021211100); 中北大学研究生科技立项(2022180502, 20221831, 20221833); 山西省研究生教育创新项目(2022Y621)

作者简介: 刘培俊(1997-), 男, 硕士生, 主要从事近红外漫射光谱方面的研究。

通信作者: 尚禹(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事近红外漫射光技术和诊疗设备开发的研究。E-mail: yushang@nuc.edu.cn。

globin and oxygenated hemoglobin. Beer-Lambert law is a mathematical expression that characterizes the relationship between light intensity attenuation and photon transmission path. Combining the two can estimate the absorption coefficient of hemoglobin. Different from the traditional measurement method, the transmission measurement method proposed in this paper can obtain multi-parameter optical signal by alternating the probe of double wavelength (660–904 nm) light source. The signal was uploaded to the acquisition interface (LabVIEW) in real time and processed by logarithm, a linear model of blood absorption coefficient, oxygenation and optical signals was developed using an innovative blood oxygen algorithm. In order to verify the feasibility of the research scheme, the experiments of liquid phantom and in vitro blood solution were carried out, and the volume of Ink Drop (phantom experiment) and yeast (blood solution experiment) were taken as variables, by adjusting the concentration of solution to change the change amplitude of optical density, it was proved that both of them had a good linear relationship with optical density (D_o) ($r^2 > 0.95$, $p < 0.01$). The novel oximetry method and real-time oximetry monitoring system proposed in this study are suitable for oximetry of isolated blood, with accurate and reliable data, good repeatability and stability.

Key words: near-infrared diffuse spectroscopy; modified Beer-Lambert law; extracorporeal circulation; oxygenation saturation

0 引言

体外循环是器官移植等各类手术过程中常用的一种医学技术,在低温、血液稀释的环境条件下,其利用一系列特殊装置将回心静脉血引流到体外,经人工方法进行血液的氧气溶解,最终将动脉血输回体内。血氧参数监测主要对体外循环系统的离体静脉血和回流的动脉血的氧含量进行实时和连续监测,监测结果能够及时准确地反映病人的组织血流灌注和氧供情况,这对于手术的治疗评估具有重要意义^[1-4]。血液中氧含量的测量方式分为有创和无创,有创的方法是将动脉中的血液抽取到体外,利用血气分析法^[5],由化学分析得到血氧饱和度。有创方

法虽然具有很高的精确度,但其检测过程费时、易引起患者感染,且不能提供实时、连续的血氧饱和度数据。近年来,近红外漫射光谱技术(Near-Infrared Diffuse optical Spectroscopy, NIRS)广泛应用于临床血氧监测,是目前无创测量血氧饱和度的主要物理手段。NIRS利用光子被微血管内红细胞散射和吸收的特性来估算血红蛋白的吸收系数,脱氧血红蛋白、氧合血红蛋白和水在近红外光波段(650~950 nm)有独特的吸收光谱(见图 1),据此特性可以将三者区分,并进一步计算得到血氧饱和度^[6-7]。此外,NIRS仪器具有体积小、易携带、时间分辨率高、仪器操作简单和测量成本低廉等优点,利用其研究组织中血液的成份时方法简单可靠^[7-8]。

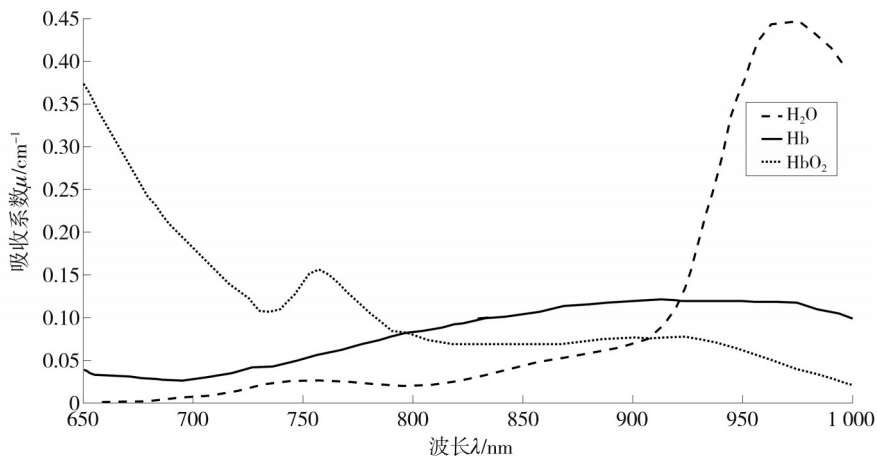


图 1 组织中不同物质的可见光和近红外光吸收光谱^[7]

Fig. 1 Visible and near-infrared absorption spectrum of different substances in tissues

由于NIRS技术可用于大多数复杂环境下的测试,因而被广泛应用于血氧饱和度的临床研究中^[9]。最常见的方法是利用动脉血氧仪在手指末端测量得到动脉血氧饱和度^[10-12],但是该方法需要得到随脉搏变化的周期信号,无法应用于离体血液测量。另一种方法是将光源和探测器都放在皮肤表面,通过“反射式”测量来获得组织的血氧饱和度,但是该方法使用的空域算法^[13]对人体组织有诸多限定,也不适用于离体血液。血氧水平依赖功能磁共振成像(Blood Oxygen Level-Dependent Functional Magnetic Resonance Imaging, BOLD-fMRI)是目前临床中脑部血氧成像的主要影像手段,fMRI具有高空间分辨率,但是需要大型且价格昂贵的磁共振设备来测量,并且fMRI的时间分辨率低,需要将患者置于特定的体位和物理环境下才能得到检测数据^[14-17],也不符合体外循环手术中的离体血液和连续监测要求。另一方面体外循环应用范围不断扩展,不仅在心脏、肝、肾、肺等大血管手术中获得应用,在肿瘤治疗、心肺功能衰竭的患者的生命支持方面也是非常关键的保障^[18],因此,开展体外循环离体血氧监测技术的研究意义重大。为克服以上现有技术的局限性,本文提出一种新的适用于离体血液氧含量测量的方法,同时开发了体外循环血氧监测系统,实现对离体血液血氧的实时监测,并降低体外循环手术过程的风险性,减少体外循环并发症的几率。本文进行了血氧的线性模型、光电硬件模块和血氧装置的设计,并通过液态仿体实验和离体血液实验,对所提出的方法进行了定量验证。

1 氧含量测量方法

1.1 NIRS测量原理

在一般生理活动中,人体组织散射(约化散射系数)处于相对稳定的状态,其吸收系数与光波长度密切相关,如图1所示,将不同波长的激光(如660 nm和904 nm)射入组织,根据组织内部各种发色团(主要是血液中的血红蛋白)的独特吸收光谱^[19],便可以提取出组织发色团的浓度。

通常,吸收系数可以分解为不同发色团的组合,即

$$\mu_a(\lambda) = \epsilon_i(\lambda)C_i, \quad (1)$$

式中: $\mu_a(\lambda)$ 表示多个发色团的共同作用; $\epsilon_i(\lambda)$ 为*i*个发色团的消光系数; C_i 为第*i*个发色团的浓度。

若分别将波长为 λ_1 和 λ_2 的激光射入组织,则

式(1)可以具体化为

$$\mu_a(\lambda_1) = \epsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda_1) \cdot C_{\text{HbO}_2} + \epsilon_{\text{Hb}}(\lambda_1) \cdot C_{\text{Hb}}, \quad (2)$$

$$\mu_a(\lambda_2) = \epsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda_2) \cdot C_{\text{HbO}_2} + \epsilon_{\text{Hb}}(\lambda_2) \cdot C_{\text{Hb}}. \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可以得到氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白这两种重要吸收粒子的浓度。组合生理参数,如总血红蛋白浓度($C_{\text{TH}} = C_{\text{HbO}_2} + C_{\text{Hb}}$)和血氧饱和度($S_{\text{O}_2} = C_{\text{HbO}_2}/C_{\text{TH}}$)也可以由计算得出。在实验过程中,一般使用两个及以上波长的入射光来最小化其他生色团(如水和脂类)和测量噪声的影响。按照此方法,利用HbO₂和Hb对两种波长的近红外光吸收率的差异来计算组织的吸收和散射系数的测量技术称为漫射光谱技术(Diffuse Spectroscopy, DOS)。

1.2 修正的比尔朗伯定律

假设厚度为*L*的透明容器中均匀分布浓度为*C*的某种吸收体,将光强为*I*的光入射到该容器表面,并检测透过该容器的出射光强*I*₀。定义*D*₀为光密度,即出射光强相对于入射光强的衰减,则有

$$D_0 = \log(I/I_0) = \epsilon CL. \quad (4)$$

式(4)即为基本的比尔朗伯定律^[20]。这里 ϵ 称作消光系数,它是只与吸收体种类和波长有关的常数,可查表得到。光强*I*和*I*₀可用光学方法测得,*L*可量出,因此可求出吸收体的浓度*C*。如果该容器中有Hb和HbO₂两种吸收体,则需使用两个发光波长 λ_1, λ_2 ,即

$$\begin{aligned} D_0^{\lambda_1} &= (\epsilon^{\lambda_1} C_{\text{HbO}_2} + \epsilon^{\lambda_1} C_{\text{Hb}})L, \\ D_0^{\lambda_2} &= (\epsilon^{\lambda_2} C_{\text{HbO}_2} + \epsilon^{\lambda_2} C_{\text{Hb}})L. \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)即为双波长的比尔朗伯定律。为将上述比尔朗伯定律应用于人体组织血氧参数的检测,考虑到人体组织光学特性:1)人体组织是强散射介质,故光子的平均路径长度*L*_{pp}远大于光源到探测器的距离;2)组织中存在多种吸收体,除Hb和HbO₂外,组织中水的吸收不容忽视;3)外层组织对检测有影响。修正的比尔朗伯定律为

$$\begin{aligned} D_0^{\lambda_1} &= (\epsilon^{\lambda_1} C_{\text{HbO}_2} + \epsilon^{\lambda_1} C_{\text{Hb}})r \cdot F_{\text{DP}} + G_{\lambda_1}, \\ D_0^{\lambda_2} &= (\epsilon^{\lambda_2} C_{\text{HbO}_2} + \epsilon^{\lambda_2} C_{\text{Hb}})r \cdot F_{\text{DP}} + G_{\lambda_2}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中:*G*为衰减,其值与波长有关; $L_{\text{pp}} = r \cdot F_{\text{DP}}$,这里*F*_{DP}称作差分路径因子,它与待测组织的光学特性和外层组织的几何结构有关。

1.3 血氧吸收系数及饱和度与光密度的线性模型

根据修正的比尔朗伯定律

$$\ln(I/I_0)/(d \cdot F_{DP}^\lambda) = \mu_{a,\lambda}(C_{TH}) + \mu_{a,\lambda}(C_{water}) \quad (7)$$

简化为

$$y = kx + b, \quad (8)$$

式中: $x = \mu_{a,\lambda}(C_{TH})$; $y = \ln I_0$; $k = -d \cdot F_{DP}^\lambda$; $b = -\mu_{a,\lambda}(C_{water}) \cdot d \cdot F_{DP}^\lambda + \ln I_0$.

假设从仿体溶液实验中共获得 n 个测量点, 即吸收系数 μ_a 和 I_0 , 获得相对应的 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$; 通过 x 与 y 之间的线性回归来确定斜率 k 和截距 b . 由此, 可以获得血氧吸收系数与光密度之间的线性模型

此外, 由漫射光谱测量原理, 即式(2)和式(3)可知

$$\begin{aligned} \mu_{a,\lambda}(C_{TH}) &= \epsilon_{HbO_2}(\lambda)C_{HbO_2} + \epsilon_{Hb}(\lambda)C_{Hb} = \\ &= \epsilon_{HbO_2}(\lambda)C_{TH} \cdot S_{O_2} + \epsilon_{Hb}(\lambda)C_{TH}(1 - S_{O_2}) = \\ &= C_{TH} \cdot (\epsilon_{HbO_2} - \epsilon_{Hb})S_{O_2} + C_{TH} \cdot \epsilon_{Hb} \end{aligned} \quad (9)$$

简化为

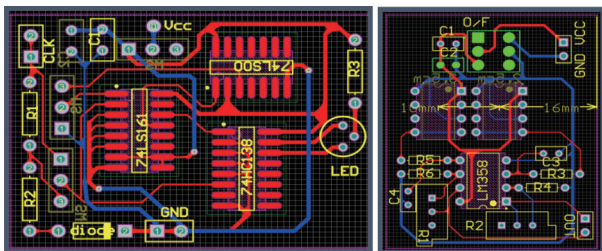
$$z = cw + f, \quad (10)$$

式中: $z = \mu_{a,\lambda}C_{TH}$; $c = C_{TH} \cdot (\epsilon_{HbO_2} - \epsilon_{Hb})$; $w = S_{O_2}$; $f = C_{TH} \cdot \epsilon_{Hb}$; 通过 w 与 z 之间的线性回归来确定斜率 c 和截距 f , 由此可获得血氧饱和度 (S_{O_2}) 与光密度 (D_0) 之间的线性模型。

2 血氧监测系统

2.1 电路模块设计

根据本文提出的新型氧含量测量方法进行硬件电路设计, 主要包括控制模块(控制两个波长的 LED 灯交替切换)、放大滤波模块(放大滤波经过血液或仿体后的待测信号)和数据采集模块(由光探测器接收光信号)。



(a) 控制模块 (b) 放大滤波模块

图2 电路模块PCB图

Fig. 2 PCB of circuit module

控制模块: 前期利用单片机的两个输出口控制 LED 灯, 在 51 芯片上下载好间隔 500 ms 点亮两个 LED 的控制程序, 再运用译码器 74LS138^[21] 和与非门 74LS00 使两路分别输出到各自的放大滤波模块

中。后期为了整体设备的便携, 利用数据采集卡^[22] 发出类似方波信号来控制 LED 灯。

放大滤波模块: 采用单电源供电、低功耗电流的双运放大芯片 LM358^[23] 作为信号的放大器, 单电源和双运放的特点符合设计的小巧便携性, 低功耗电流使得电路电源可以采用普通电池, 安全可靠, 没有纹波或者其他噪声。后面加上无源滤波部分, 滤除高于 100 Hz 的外界干扰。

数据采集模块: 采用 OPT101 硅光电池作为光探测器, 以线性关系把光信号转化为电信号, 然后把电信号通过数据采集卡返回到电脑中进行处理和运算。

2.2 光电装置设计

光电装置设计主要包括硬件探头的设计和发光光源波长的选择。如图 1 所示, 氧合血红蛋白(HbO₂) 和脱氧血红蛋白(Hb)对不同波长的光吸收的情况明显不同。为降低非血液成分对测量精度的影响, 选择光波长时, 要求 HbO₂ 和 Hb 对光的吸收系数要大于非血液成分对光的吸收, 但不宜大到使透过的光信号难于检测。目前, 提取组织血氧饱和度绝对值的方法需要测量来自多个光源和探测器(S-D)之间的漫射光信号, 多个 S-D 对增加了仪器的成本以及光学探针的尺寸^[24], 同时测试环境中光的变化也会对测量结果造成一定影响。



(a) 血氧装置系统 (b) 光源和探测器

图3 血氧系统装置图

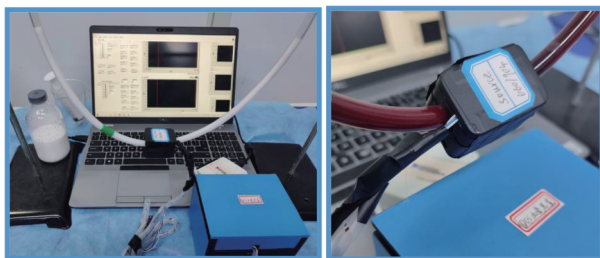
Fig. 3 Diagram of the oximetry device

为解决以上难题, 本文设计的探头采用透射式^[25-26], 波长组合选择为 660~904 nm, 因为在 660 nm 处, 光对脱氧和氧合血红蛋白的吸收系数之差很大, 并且水的吸收很小。当血氧饱和度不同时, 血液对该波长光吸收量的变化最为敏感, 这样可保证数据的多样化, 有利于推出更精确的血氧计算公式以提高检测的灵敏度; 另外, 尽管水在波长为 904 nm 的吸光系数较大, 但脱氧和氧合血红蛋白吸收系数的差异很明显, 经实验证明, 波长选择 904 nm 可以很好地满足血氧计算公

式中的线性关系。因此,为实现双波长算法的设计^[27],光源灯采用内设两种不同波长(660 nm和904 nm)的LED灯,光源和探测器分别嵌入探头的两侧,如图3(b)所示,该设计可保证测量的稳定性和可重复性,同时可避免环境光对测量的影响。实际测量中,可发光器件与光接收器件分置于被测物体的两侧,发出的近红外光透过被测物直接被接收器件接收,通过切换不同波长光源,可方便快捷地获取更多的测量数据,最后利用数据采集卡采集数据并上传到电脑,通过LabVIEW设计的数据采集界面来实时显示。

3 实验设计

为验证体外循环血氧饱和度测量技术的可行性,本文围绕研究目标设计了两部分实验。如图4所示,将体外循环管制成U型,便于固定和测量,血氧装置探头固定在胶管中间。



(a) 仿体实验设置

(b) 光学探头

图4 血氧装置测量图

Fig. 4 Measurement diagram of the oximetry device

系统搭建后,在上位机(LabVIEW 数据采集

界面)控制输出端口可实现660 nm和904 nm波长LED灯的切换。液态仿体实验中,先以脂肪溶剂(体积分数30%,四川华瑞制药)和纯净水为基本材料配制仿体溶液,通过控制滴入墨水(吸收率28.75%,上海晨光)的量来改变溶液的吸收系数,常用的溶液配比为^[28] $V_{\text{Ink}} : V_{\text{Intralipid}} : V_{\text{Water}} = 1 : 23.57 : 550.3595$ 。

利用墨水的量配制不同吸收系数的仿体溶液,从而考察吸收系数与光强(其数值正比于探测器测得的电压)是否具有线性关系。

离体血液实验分为全血和稀释血溶液(绵羊血,广州鸿泉生物公司)两种方案。以生理盐水为稀释液,目的是改变电压幅度的变化范围;以血气分析仪(武汉明德生物科技)测得的血氧饱和度和其他相关参数作为先验信息,同时记录实验过程中随时间变化的电压值(光密度 D_0)。实验中的还原剂是干酵母粉和生理盐水制成的酵母溶液^[29-31],可稳定持续地消耗血液中的氧气,以此来改变血溶液的含氧血红蛋白浓度,用于探究光密度与吸收系数是否具有良好的线性关系。

4 实验结果与讨论

本文依据提出的新型氧含量测量方法,分别开展了液态仿体实验和离体血溶液实验,两组实验分别在不同波长(660 nm和904 nm)光源下进行,每组实验重复3次并取平均值。图5展示了吸收系数在 $0 \sim 0.200 \text{ cm}^{-1}$,平均电压值 U 在 $0 \sim 1 \text{ V}$ 范围内的48个数据点的统计结果。

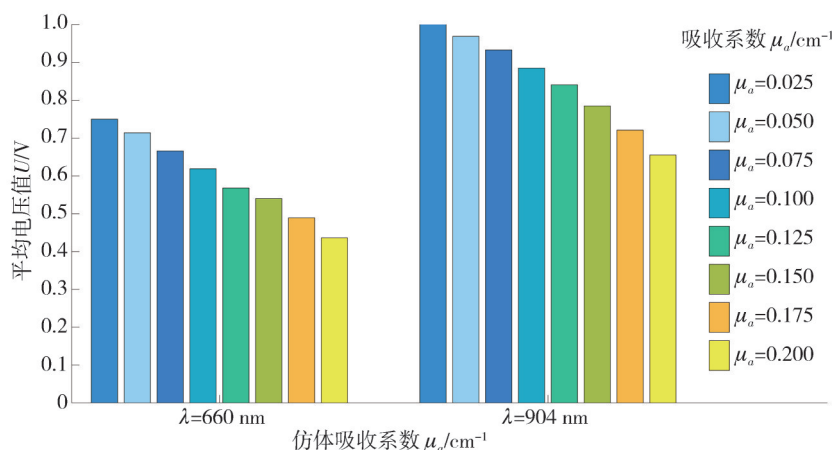


图5 3次重复仿体实验测量电压大小及其统计结果

Fig. 5 Mean voltage value and the results from triple phantom experiment

从图5中可以看出,随着吸收系数以固定步长增大, U 在均匀减小,二者具有良好的线性关系,并且不同波长光源下 U 的变化幅度和大小不同,表明

通过双波长参数可获得多元化的数据结果。

图6为 $0 \sim 60 \text{ min}$ 范围内,两组波长实验在各时间点的血溶液的平均电压值 U 和平均血氧值 S_{O_2} ,共

采集 156 个数据点, 图中 4 组柱状数据分别为 660 nm 波长稀释血溶液实验组、660 nm 波长全血溶液实验组、904 nm 波长稀释血溶液实验组、904 nm 波长全血溶液实验组。由图 6 可以看出, 660 nm 波长光源

下, U 随时间的增大而减小, 904 nm 组中 U 随时间的增大而减小, 相比 904 nm, 660 nm 时溶液的 U 变化较快, 这与图 1 展示的氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白独特吸收特性相符。

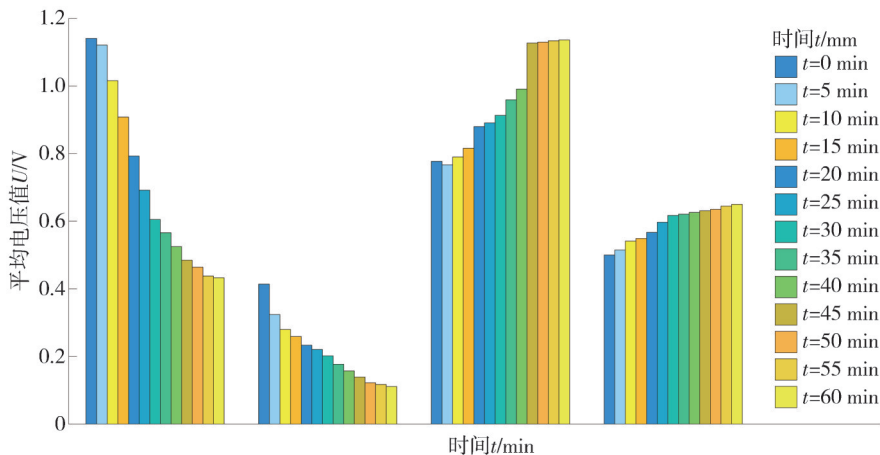


图 6 3 次血溶液实验平均电压值及其统计结果

Fig. 6 Mean voltage value and the results from triple blood experiment

图 7 展示了在相同时间点各组血溶液相应的 S_{O_2} , 从图中可以看出, S_{O_2} 呈下降趋势且变化均匀, 表明

血溶液中血液和酵母的配比适宜, 实验方案设计合理。

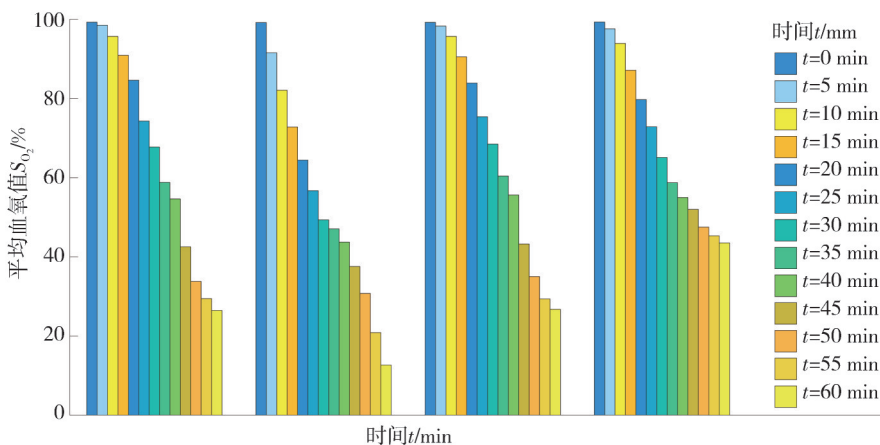


图 7 3 次血溶液实验测量平均血氧值及其统计结果

Fig. 7 Mean oxygen saturation and the results from triple blood experiment

对图 5~图 7 中的数据作线性回归处理, 可初步获取液态仿体/血溶液吸收系数及血氧饱和度与光学信号的线性关系, 并计算出相应线性方程, 结果如图 8 和图 9 所示。

图 8 展示了光密度与吸收系数大小的线性回归曲线, 结果表明二者具有良好的线性关系(液态仿体实验: $r^2 > 0.98$, $p < 0.01$), 初步验证了本文提出的血氧测量方法的科学性, 同时不同波长光源下得到了不同的线性方程, 证明通过设计多波长参数来获取多元化数据这一方法的可行性, 为进一步获取血氧经验公式提供了更多的途径。

图 9 展示了光密度值与血氧值线性回归曲线。

结果表明, 660 nm 和 904 nm 波长光源的实验中, 光密度与溶液吸收系数大小/血氧值都有良好的线性关系(离体血溶液实验: $r^2 > 0.95$, $p < 0.01$), 印证了本文血氧饱和度算法的创新思路, 得到线性模型有利于公式的推导与验证; 从图 9(a) 和图 9(c) 或者图 9(b) 和图 9(d) 的对比可以看出, 在实验相同配置下, 660 nm 和 904 nm 波长光源获得的回归曲线表达式截然不同, 这与液态仿体实验的线性回归结果一致, 表明了双波长光源的设计可获得多元化的血氧经验公式, 可进一步提高血氧计算的精确度。

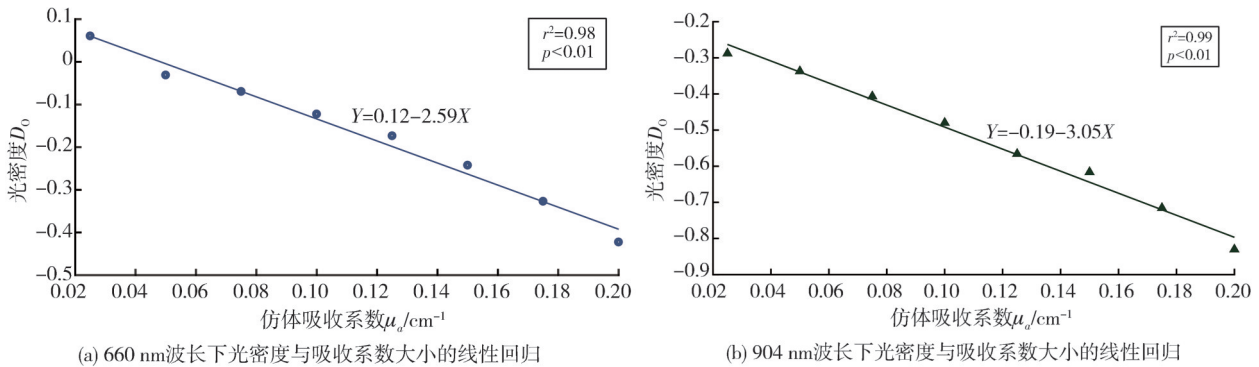


图8 光密度与吸收系数大小的线性回归

Fig. 8 Linear regression between optical density and absorption coefficient

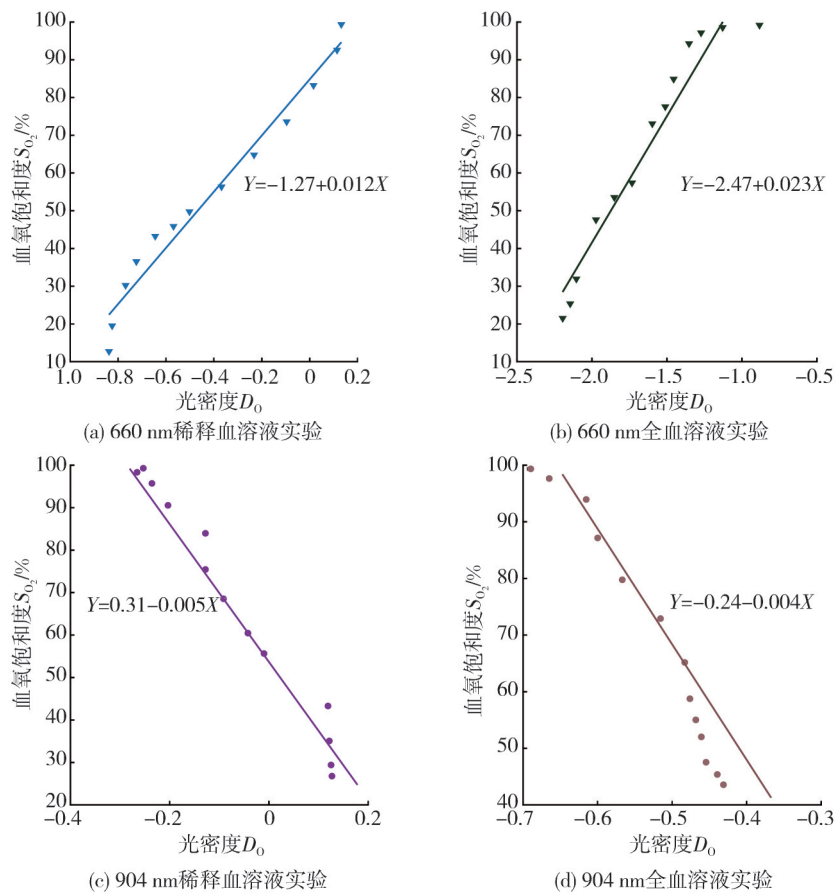


图9 光密度与血氧值的线性回归结果图

Fig. 9 Linear regression plot of optical density and blood oxygen value

5 结论

本文结合近红外漫射光谱技术和修正的比尔朗伯吸收定律,设计并搭建了多个电路模块(控制模块、放大滤波模块、数据采集模块)和离体血溶液实验平台,同时依据脱氧血红蛋白、氧合血红蛋白和水在近红外光波段的吸收特性,对光学探头的光源波长(660 nm和904 nm)、测量方式(透射式)以及外观样式(遮光封闭式)进行了独特设计。

该血氧装置可以进行实时连续的光学信号(光密度)采集,透射式光学探头、宽谱硅光电池探测(OPT101)、上位机实时监测(LabVIEW数据采集界面)等先进技术也在很大程度上保证了测量数据的稳定性和准确性。依据本文提出的新型氧含量测量方法和实验方案(液态仿体实验和离体血溶液实验),对血液吸收系数及血氧饱和度与光学信号的关系进行了验证,结果证明二者均与光密度(D_0)有良好的线性关系($r^2 > 0.95$, $p < 0.01$),且长时间(4 h)的重复测量表明该光电装置具有较

好的实用性。初步离体血液的血氧饱和度测量方案证明了NIRS技术应用于体外循环血氧监测的科学性,更多的方案正在尝试和优化,有望应用于体外循环手术的离体血液血氧实时监测。

参考文献:

- [1] CHU Z, WANG Y, YOU G, et al. The P_{50} value detected by the oxygenation-dissociation analyser and blood gas analyser [J]. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 2020, 48(1): 867-874.
- [2] 赵莉. 反射式低血氧饱和度检测系统的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
- [3] 严新忠, 杨静, 郭略. 人体血氧饱和度监测方法的研究[J]. *医疗装备*, 2005, 18(12): 1-4.
YAN Xinzhong, YANG Jing, GUO Lue. Study on measuring method of human oxygen saturation [J]. *Chinese Journal of Medical Device*, 2005, 18(12): 1-4. (in Chinese)
- [4] 王钊, 梁洪, 王佳晨, 等. 基于可穿戴技术的临床监护新模式探索研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2021, 38(4): 753-763.
WANG Zhao, LIANG Hong, WANG Jiachen, et al. Investigation on new paradigm of clinical physiological monitoring by using wearable devices [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2021, 38(4): 753-763.
- [5] 翟敬芳, 吴子健, 吴杰斌, 等. 血气分析Excel电子表格自动判断酸碱平衡紊乱类型的临床应用[J]. *中华危重病急救医学*, 2020, 32(8): 976-981.
ZHAI Jingfang, WU Zijian, WU Jiebin, et al. Clinical application of Excel spreadsheet with blood gas analysis in automatic judging the type of acid-base balance disorder [J]. *Chinese Critical Care Medicine*, 2020, 32(8): 976-981. (in Chinese)
- [6] 李增勇, 代世勋, 张小印, 等. 驾驶员疲劳态下脑氧饱和度的近红外光谱法检测及其分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(1): 58-61.
LI Zengyong, DAI Shixun, ZHANG Xiaoyin, et al. Assessment of cerebral oxygen saturation using near infrared spectroscopy under driver fatigue state [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(1): 58-61. (in Chinese)
- [7] 刘颂阳, 刘光达, 刘卓娅, 等. 扩展的卡尔曼滤波在近红外光谱提取脑血流信号中的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(7): 2048-2053.
LIU Songyang, LIU Guangda, LIU Zhuoya, et al. Research on extended Kalman filter in extracting cerebral blood flow signals by near infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(7): 2048-2053. (in Chinese)
- [8] 张纯青. 无创检测血氧饱和度系统设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [9] 张小青, 孙小亮, 潘庆华, 等. 衰减全反射傅里叶变换红外光谱技术的临床应用研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(2): 408-411.
ZHANG Xiaoqing, SUN Xiaoliang, PAN Qinghua, et al. The advancement of attenuated total reflection Fourier transform infrared technology in clinical application [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(2): 408-411. (in Chinese)
- [10] 王晓飞, 赵文俊. 基于动态光谱法的多波长脉搏血氧饱和度测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1323-1326.
WANG Xiaofei, ZHAO Wenjun. Measurement of multi-wavelength pulse oxygen saturation based on dynamic spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1323-1326. (in Chinese)
- [11] 李庆波, 韩庆阳. 人体血氧饱和度检测中消除脉搏波信号高频噪声的方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(9): 2523-2527.
LI Qingbo, HAN Qingyang. The method of removing high-frequency noise in pulse wave signal in detecting oxygen saturation of human [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(9): 2523-2527. (in Chinese)
- [12] 陈宁, 游天. 脉搏血氧饱和度测量精度的影响因素分析[J]. *中国医学工程*, 2021, 29(5): 13-16.
CHEN Ning, YOU Tian. Influencing factors of pulse oxygen saturation measurement accuracy [J]. *China Medical Engineering*, 2021, 29(5): 13-16. (in Chinese)
- [13] LIU H, BOAS D A, ZHANG Y, et al. Determination of optical properties and blood oxygenation in tissue using continuous NIR light [J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1995, 40(11): 1983-1993.
- [14] 刘彩彩. 漫射光技术的深层组织血流测量算法研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [15] 张鹏. 近红外漫射光血流测量的N阶线性算法的去噪研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [16] ZOU Y, ZHOU X. Oxygen reserve index: A new method for monitoring oxygen therapy [J]. *Chinese Journal of Contemporary Pediatrics*, 2022, 24(11): 1275-1280.
- [17] 吴剑, 丁海曙, 叶大田. 用近红外脑组织血氧仪评定保健食品抗疲劳效果[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(9): 2357-2360.

- WU Jian, DING Haishu, YE Datian. Evaluating fatigue resistance effect of health food by near-infrared tissue oximeter[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009,29(9): 2357-2360. (in Chinese)
- [18] 苏国宝, 席茜, 刘晓晨, 等. 不停跳和体外循环下冠状动脉搭桥术后患者心肺功能、血液动力学和炎症变化[J]. 中华实验外科杂志, 2022, 39(5): 844-846.
- SU Guobao, XI Xi, LIU Xiaochen, et al. Effects of beating and cardiopulmonary bypass on cardiopulmonary function, hemodynamics and inflammation after coronary artery bypass grafting[J]. Chinese Journal of Experimental Surgery, 2022, 39(5): 844-846. (in Chinese)
- [19] 白静. 基于近红外漫射光的血氧血流一体化成像系统[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [20] 丁海曙, 腾轶超. 组织血氧参数近红外无损检测技术及自主创新之路[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(9): 14-31.
- DING Haishu, TENG Yichao. Non-invasively monitoring human tissue oxygenation using near infrared spectroscopy: independent innovations [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(9): 14-31. (in Chinese)
- [21] 杨庆国, 陈军, 肖贵林. 基于TMS320C6748的多路串行通信接口设计与实现[J]. 电子技术应用, 2019, 45(7): 59-62.
- YANG Qingguo, CHEN Jun, XIAO Guilin. Design and implementation of multi-channel serial communication interface based on TMS320C6748 [J]. Application of Electronic Technique, 2019, 45(7): 59-62. (in Chinese)
- [22] 陈君宝, 李捷, 刘永, 等. 基于数据采集卡的瞬时转速测量方法研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(13): 26-29.
- CHEN Junbao, LI Jie, LIU Yong, et al. Research on the measurement method for instantaneous rotation speed based on the data acquisition card [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(13): 26-29. (in Chinese)
- [23] 曹举文. 物联网技术在电力隧道自动预警系统中的应用[J]. 电子测试, 2022(6): 69-71. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8519.2022.06.024.
- CAO Juwen. Application of internet of things technology in power tunnel automatic early warning system of power tunnel [J]. Electronic Test, 2022(6): 69-71. (in Chinese)
- [24] CUI P, WANG Q, LI Z, et al. A feasibility study on improving the non-invasive detection accuracy of bottled Shuanghuanglian oral liquid using near infrared spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 274: 121120.
- [25] LIU J, FU Y, HAN T, et al. Analysis of spectral characteristics of human body based on direct measurement of effective attenuation coefficient [J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2022, 42(9): 2746-2751.
- [26] 渠立亮. 基于近红外光透射式血氧含量监测系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [27] 李孟泽, 季忠, 程锦绣, 等. 基于非线性自回归神经网络和双波长的无创血糖检测方法实现[J]. 生物工程医学工程杂志, 2021, 38(2): 342-350.
- LI Mengze, JI Zhong, CHENG Jinxiu, et al. Realization of non-invasive blood glucose detector based on nonlinear auto regressive model and dual-wavelength [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2021, 38(2): 342-350. (in Chinese)
- [28] IRWIN D, DONG L, SHANG Y, et al. Influences of tissue absorption and scattering on diffuse correlation spectroscopy blood flow measurements [J]. Biomedical optics express, 2011, 2(7): 1969-1985.
- [29] 郭海峰, 杨康. 医疗光学CT成像前期研究——相位调制仪测量血氧饱和度的模拟生物实验[J]. 中国医学物理学杂志, 2004, 21(5): 300-301.
- GUO Haifeng, YANG Kang. The prophase research on medical treatment optics CT imaging—experimentation of phase modulation device measure herogeneous saturation on simulate biology [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2004, 21(5): 300-301. (in Chinese)
- [30] 徐广民, 蔡兵, 苏鹏, 等. 每搏量变异度为目标导向行急性超容血液稀释技术在脊柱肿瘤手术中的应用 [J]. 中国肿瘤临床, 2022, 49(15): 781-785.
- XU Guangmin, CAI Bing, SU Peng, et al. Application of acute hypervolemic hemodilution targeting stroke volume variation in patients undergoing spinal tumor surgery [J]. Chinese Journal of Clinical Oncology, 2022, 49(15): 781-785. (in Chinese)
- [31] 李洁, 张雪睿, 陈忠如, 等. 清开灵注射液保存血小板对体外大失血模型的纠正效果[J]. 临床输血与检验, 2023, 25(1): 88-96.
- LI Jie, ZHANG Xuerui, CHEN Zhongru, et al. Correction effect of platelets preserved with Qingkailing injections *in vitro* model of massive blood loss [J]. Journal of Clinical Transfusion and Laboratory Medicine, 2023, 25(1): 88-96. (in Chinese)