

# 基于光纤传感器的透析穿刺针头漏血检测方法研究\*

张敏<sup>1</sup>, 邱召运<sup>1,2,△</sup>, 陈雪梅<sup>1</sup>, 王倩倩<sup>1</sup>, 齐静<sup>1</sup>, 隋亚奇<sup>1</sup>

(1. 潍坊医学院生物科学与技术学院生物医学工程系, 潍坊 261053;

2. 潍坊医学院电子与计算机技术教研室, 潍坊 261053)

**摘要:** 基于光导纤维设计了一种检测红细胞浓度的光纤传感器, 并将光纤传感器用于透析穿刺针头的漏血检测, 提出了一种漏血检测的新方法。通过动物血样实验, 分别测量了红、绿、蓝三色光为光源的光纤传感器的输出曲线, 对比分析了三色光源的光纤传感器的输出特性, 证明蓝光源光纤传感器检测灵敏度最高; 通过志愿者血样实验测量了蓝光源光纤传感器输出特性曲线, 并确定了报警阈值范围。结果证明, 以蓝光为光源的光纤传感器漏血检测方法具有灵敏度高和安全的优点, 能够准确检测透析穿刺针头的微量漏血量。此种漏血检测报警装置能够在透析过程中对穿刺针头的微量漏血进行实时监测, 避免透析中发生漏血事故。

**关键词:** 透析; 漏血; 穿刺针头; 光纤传感器; 灵敏度

中图分类号: R318.5 文献标识码: A 文章编号: 1672-6278 (2020) 02-0181-05

## Study on blood leakage detection method of dialysis needle tip based on optical fiber sensors

ZHANG Min<sup>1</sup>, QIU Zhaoyun<sup>1,2</sup>, CHEN Xuemei<sup>1</sup>, WANG Qianqian<sup>1</sup>, QI Jing<sup>1</sup>, SUI Yaqi<sup>1</sup>

(1. Department of Biomedical Engineering, School of Bioscience and Technology, Weifang Medical University, Weifang 261053, China;

2. Department of Electronic and Computer Technology, Weifang Medical University, Weifang 261053)

**Abstract:** A high-sensitivity optical fiber sensor was designed to detect the concentration of erythrocyte with aid of optical fiber, which was applied to the detection of blood leakage for a puncture needle tip in dialysis treatment, and a new method for detecting the leakage of blood was advanced. In the investigation of animal blood, output curves of optical fiber sensors were measured by red, green and blue light sources respectively. These results were analyzed and it demonstrated that the best efficiency for detection of blood leakage was the optical fiber sensor with blue light source. Moreover, based on blood experiments of some volunteers, output curves of optical fiber sensor with the blue light source was also measured, which determined the threshold for blood leakage to an alarm system. The results show that there are highly sensitive, safe and reliable for detection of blood leakage using optical fiber sensor with blue light source. Further, this medical instrument can accurately acquire the level of blood leakage around needle tip in dialysis treatment. Based on the new detection method described in this study, an alarm instrument is designed to detect the blood leakage of the puncture needle tip in real time, which will avoid the medical accidents during dialysis treatment.

**Key words:** Dialysis; Blood leakage; Dialysis needle; Fiber optic sensor; Sensitivity

## 1 引言

血液透析是肾功能衰竭患者肾脏替代治疗的方

式之一, 属于血液净化技术。目前国内约有 200 万名患者需要做血液透析来维持生命, 一般患者需每周血液透析 2~3 次, 每次 4~5 h。临床上患者的静

DOI 10.19529/j.cnki.1672-6278.2020.02.14

\* 山东省自然科学基金资助项目(ZR2018BC025, ZR2019BF037); 山东省高等学校科技计划项目(J16LM06); 潍坊医学院教育教学改革与研究项目(2018ZD003)。

△通信作者 Email: wfqzy@sohu.com

脉与动脉内瘘仍是维持血液透析的理想血管通路。但动静脉内瘘构建后,透析部位的静脉压也随之升高,长期定点穿刺、透析中抗凝剂的使用等因素可导致静脉血管弹性下降,引起内瘘穿刺针孔漏血<sup>[1]</sup>,另外患者在长时间透析过程中的身体移动亦会引起穿刺针头脱落而漏血,透析时发生漏血十分危险,若不及时采取措施则可能危及患者的生命安全<sup>[2]</sup>。迄今为止,临床上使用过的漏血检测方法有:人工巡查法<sup>[3]</sup>,但增加了医护人员的工作负担和心理压力;压力检测法<sup>[4]</sup>,但是透析过程中当进血针头和出血针头同时脱针时,透析机检测不到压力差变化,将无法触发透析机报警;阻抗检测法<sup>[5]</sup>,利用血液引起电极的阻抗变化实现漏血检测,存在的问题是患者出汗时易造成误报警,电极接触皮肤给患者带来安全隐患,其可靠性和安全性较低;图像检测法<sup>[6]</sup>,为了获取漏血信息,图像传感器系统需要覆盖在穿刺针头部位,不利于医护人员巡查。上述漏血检测方法均存在一定的弊端和不足,需要创新检测方法。

透析过程发生漏血是严重的医疗责任事故,因此,漏血检测方法需具备以下特点:不能遮挡穿刺部位,漏血检测不能影响医护人员巡查,任何检测装备均不可完全代替人工巡查;漏血检测设备需操作简单,在减轻医护人员的心理压力的同时,不能带来额外的工作负担;漏血检测技术需安全可靠,避免给患者带来额外的安全隐患;漏血检测设备的舒适性要好,不能给患者带来不适感。针对上述要求,本研究提出了一种基于光纤传感器的透析针头漏血检测的新技术,能有效检测穿刺针孔的微量漏血,提高了检测装置的灵敏度,具有安全可靠的优点。采用该技术的检测装置有漏血报警功能,能有效克服误报、漏报问题,降低透析过程中的安全风险。

## 2 透析漏血检测方法

### 2.1 漏血检测实验装置

漏血检测光纤传感器<sup>[7-8]</sup>是利用光导纤维的传光导像功能,将待测部位的信息传至远端进行测量,通过待测部位对光的反射或吸收引起光强改变而实现检测,检测方式分为对射式和反射式。以 Y 型光纤为光信号的传输介质<sup>[9]</sup>,光电转换元件为光信号接受器,设计了一种反射式 Y 型光纤传感器,用来进行血红细胞浓度的检测实验。

实验装置由单色 LED 光源<sup>[10]</sup>、Y 型光纤和光电转换元件构成,图 1 是 Y 型光纤实验系统实物

图, A 是 Y 型光纤, B 是光纤探头, C 是测试样本, D 是检测光斑。Y 型光纤包括光源端、检测端、探头端三部分。LED 分别发出红、绿、蓝光,从 Y 型光纤的光源端进入,探头端将入射的光照射到测试样本上形成检测光斑<sup>[11]</sup>,反射光信号经光纤导出并在检测端通过光电转换元件完成电信号的转化。Y 型光纤传递光信号,具有损耗低、绝缘性好、抗干扰能力强等特点。实验装置采用的 Y 型光纤探头端纤细且光滑,接触皮肤时不会给患者带来不适感,且易消毒灭菌,方便重复使用。Y 型光纤传感器的光电转换元件采用了颜色传感器<sup>[12]</sup>,具有灵敏度高、波长范围窄、转换速度快的特点,能够识别检测样本色度的微小变化。实验过程中,需要保持探头端与测试样本的距离与角度不变,否则会影响实验精度。

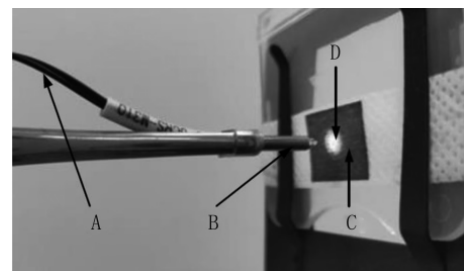


图 1 Y 型光纤实验系统实物图

Fig. 1 Diagram of Y - type optical fiber experimental system

### 2.2 反射式漏血检测原理

由于透析穿刺针头包埋于创可贴下方,漏血检测处于黑暗环境,因此,需要利用 Y 型光纤将光源引入到穿刺部位,并通过光的反射将漏血信息导出到检测端,实现穿刺部位的漏血检测。透析治疗时,将光导纤维和透析针头通过创可贴固定于穿刺部位,当穿刺针孔无血液渗出时,固定穿刺针头的创可贴呈现白色,因此,测试样本反射的光信号相对较强。当产生漏血时,包埋光纤探头端的测试样本被血液迅速染红,导致反射光的强度发生改变,光纤检测端输出的电压信号也随之产生变化。

## 3 漏血检测电路设计

### 3.1 信号采集电路

图 2 为漏血检测的信号采集电路原理图,由 Y 型光纤和电压放大器两部分构成。透析时穿刺静脉形成血液的循环通路,需要同时监测出血针孔和进血针孔的漏血状态,所以,应设置两组光纤传感器对透析针头进行实时检测。本研究中单色发光二极管  $L_1$ 、 $L_2$  分别发出红、绿、蓝三种颜色的光作为光源,通过 Y 型光纤  $SY_1$ 、 $SY_2$  的光源端射入,探头端垂直照

射测试样本中心,光源从探头端照射到检测点上,当有血液渗出时,光纤的检测端将导出不同强度的光信号,由颜色传感器  $D_1$ 、 $D_2$  接收并转换为电信号。 $U_{1A}$  和  $U_{1B}$  构成两组同相电压放大电路,其放大倍数约为十倍,用于放大光纤传感器输出的电信号,实现漏血检测的信号采集。

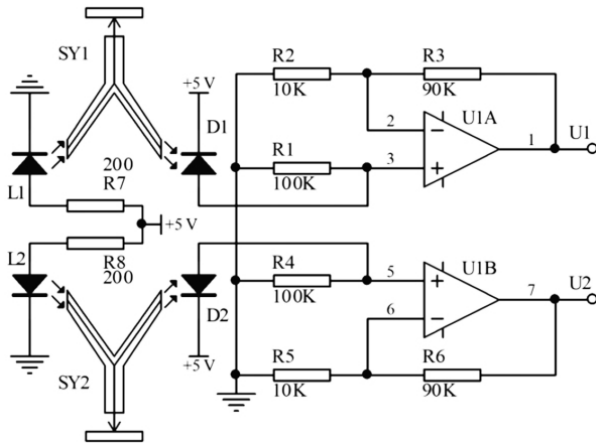


图 2 信号采集电路原理图

Fig. 2 Principle of signal acquisition circuit diagram

### 3.2 信号处理电路

图 3 为漏血检测的信号处理电路图,主要由两个电压比较器、单片机系统和报警电路三部分构成。两组光纤传感器输出的电压信号  $U_1$ 、 $U_2$  与其对应的电压比较器  $U_{1C}$  和  $U_{1D}$  设定的阈值电压进行比较,当任意一组输入的电压信号小于阈值电压时,比较器输出漏血信号,该信号由 STC15F104E 单片机系统进行确认后输出报警信号,驱动报警电路发出声光报警。漏血报警系统设有两个可操作的按键,当按下  $K_1$  键

时,漏血检测报警系统开始运行,实时检测穿刺针头部位的漏血状态,一旦出现漏血将立即触发报警系统,提醒医护人员及时处理,处理完毕后按下  $K_2$  键,系统消除报警并回到正常检测工作状态。

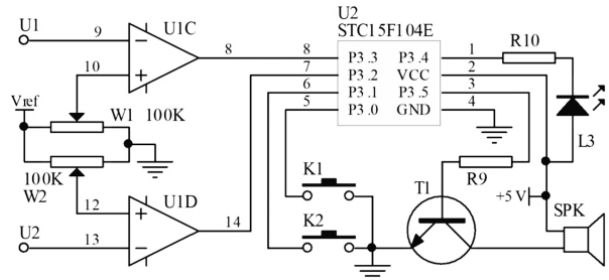


图 3 信号处理电路原理图

Fig. 3 Principle of signal processing circuit diagram

## 4 漏血检测实验

### 4.1 动物血样实验

不同波长的光照射同一物体时反射的光信号不同,因此,选用红、绿、蓝三种颜色的光照射检测样本进行模拟漏血实验,用来优选灵敏度更高的光纤传感器。为了模拟透析过程中穿刺针头漏血量的多少,将兔静脉全血用 0.9% 的生理盐水配备 12 组浓度为 0% ~ 100% 的血溶液,每组取等量血溶液滴加至厚度和面积大小相同的无纺布上制成血液实验样本,其中 0% 浓度的样本只需在无纺布上滴加等量的生理盐水。图 4(a) 是 12 组不同浓度的兔血实验样本,图 4(b) 是 12 组不同浓度的志愿者血液实验样本。由图可知,血液样本的颜色呈现由浅入深,可等效为漏血染红检测区域的血量多少。

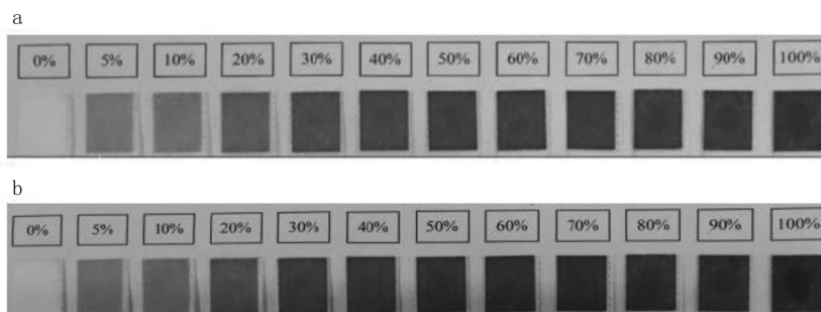


图 4 血液浓度样本图

Fig. 4 Blood concentration sample diagram

实验中分别采用红、绿、蓝光的光纤传感器对浓度  $C$  为 0% ~ 100% 的兔血进行检测,由于透析针头与光纤探头端是包埋在创可贴下方,为了模拟检测环境,避免环境光对检测造成干扰,模拟实验在黑暗条件下进行。设红、绿、蓝光的光纤传感器的输出电压分别为  $U_r$ 、 $U_g$ 、 $U_b$ ,实验数据见表 1。

图 5 是根据表 1 的实验数据绘制的光纤传感器

输出特性曲线。图中, $U$  为光纤传感器的输出电压, $C$  为血液样本浓度, $U_r$  为红光光纤传感器的输出特性曲线, $U_g$  为绿光光纤传感器的输出特性曲线, $U_b$  为蓝光光纤传感器的输出特性曲线。对比分析  $U_r$ 、 $U_g$ 、 $U_b$  特性曲线可知,红光光纤传感器对样本浓度的变化最不敏感,灵敏度最低;绿光光纤传感器在检测样本微量变化时较敏感,灵敏度较高;蓝光光纤传

感器其电压变化量远大于绿光传感器,表明蓝光光纤传感器的灵敏度最高,故选蓝光光纤传感器进行漏血检测。

表 1 光纤传感器兔血样本实验数据

Table 1 The experimental data of rabbit blood sample of fiber optic sensor

$C(\%)$	$U_r(\text{mV})$	$U_g(\text{mV})$	$U_b(\text{mV})$
0	111.80	81.33	476.50
5	108.73	59.20	264.50
10	108.00	50.07	188.50
20	106.00	43.47	119.00
30	103.80	41.13	96.00
40	100.67	39.87	91.00
50	97.13	39.20	81.50
60	89.60	38.87	79.50
70	81.27	37.93	71.50
80	72.73	37.07	66.00
90	70.60	36.80	63.50
100	67.27	36.73	59.00

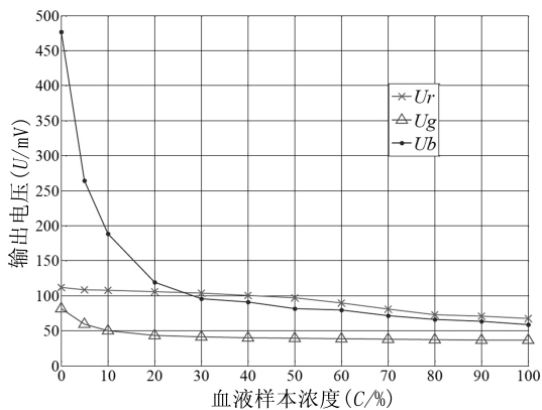


图 5 光纤传感器的输出特性曲线

Fig.5 Output characteristic curve of optical fiber sensor

4.2 志愿者血样实验

动物血样实验证明,蓝光光纤传感器对微量漏血的灵敏度最高,需要采集志愿者血液对该传感器进行血样实验,进一步验证其检测灵敏度并确定检测系统的报警阈值范围。实验条件和方法与动物血样实验相同。参照图 4(b),采用浓度为 0% ~ 100% 的 12 组志愿者血样进行实验。

以蓝光光纤传感器对 12 组不同浓度的血液样本进行检测,其输出电压为  $U_b$ ,得出的实验数据见表 2。由表 2 可知,蓝光光纤传感器对不同浓度血样对应的输出电压值呈现明显的递减趋势,进一步验证了动物血样实验的结论。

表 2 蓝光光纤传感器的志愿者血液样本实验数据

Table 2 Experimental data of blood samples from volunteers using blue fiber optic sensor

$C(\%)$	$U_b(\text{mV})$
0	470.33
5	244.00
10	212.00
20	165.67
30	145.67
40	122.67
50	92.67
60	79.00
70	74.33
80	54.33
90	51.00
100	43.67

图 6 是蓝光光纤传感器随血样浓度变化的输出特性曲线。图中,  $U$  为光纤传感器的输出电压,  $C$  为血液样本浓度。曲线表明,蓝光光纤传感器对血样浓度的微量变化灵敏度高,适于设计漏血检测的报警装置;蓝光光纤传感器在 0% ~ 40% 的血样浓度范围内电压输出变化量较大,40% ~ 100% 的血样浓度范围内电压输出变化量较小,为提高报警速度,故优选 20% ~ 40% 浓度范围对应的输出电压值作为报警阈值设定范围。

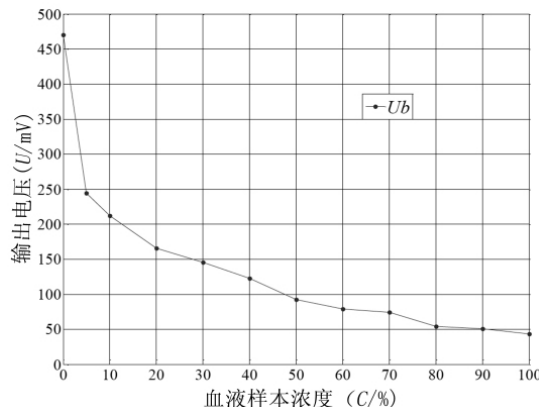


图 6 蓝光光纤传感器的输出特性曲线

Fig.6 Output characteristic curve of blue fiber sensor

4.3 临床应用实验

漏血检测时光纤探头端与检测部位的角度或距离难以保持一致,需要归一化测量条件才能保证检测精度。因此,设计一个由无纺布或脱脂药棉制成的引血帽安装在光纤探头端,不仅能实现垂直照射测试样本,还可扩大引血范围,图 7 为引血帽实物图。图中, A 是已吸收血液引血帽, B 是空白引血

帽。透析治疗过程中,当穿刺针孔有血液渗出时,引血帽可以快速吸收并均匀扩散,便于光纤传感器及时检测到漏血信息。引血帽为一次性设计,使用方便,安全卫生。

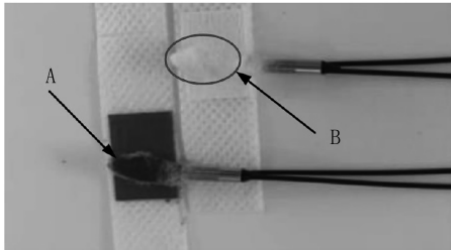


图7 引血帽实物图

Fig.7 Diagram of absorbent cotton padded cap

图8是Y型光纤漏血检测的临床应用实物图。图中,C是固定针头的创可贴,D是透析管,E是光纤探头端,F是Y型光纤。临床透析时出血口和进血口均需穿刺针头插入静脉,因此,需要两组Y型光纤探头与穿刺针包埋在创可贴下方进行漏血实时监测。Y型光纤传感器纤细柔软便于固定,且绝缘性好,无触电危险。本研究可将漏血信息传输至远离穿刺的部位,操作简便,安全性、可靠性、准确性高,可保障透析患者的安全,有效避免漏血事件的发生,减轻医护人员的工作负担。

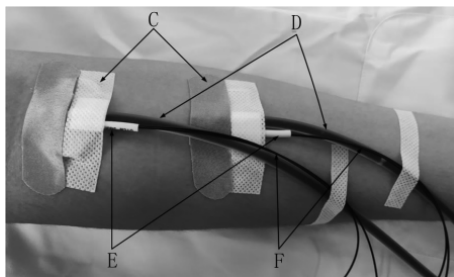


图8 漏血报警系统的临床应用

Fig.8 Clinical application of blood leakage alarm system

## 5 结束语

透析过程中发生漏血易导致严重的医疗事故,由于没有安全可靠的漏血检测技术,通常采取加固穿刺针头和加大巡查力度来保障患者的安全。这些

措施虽在一定程度上降低了透析的漏血风险,但增加了医护人员的工作负担,同时也给患者增添了诸多不适。因此,研制一种性能可靠的漏血检测装备对降低医疗风险和改善医疗条件具有实际应用价值。实验证明,蓝光光纤传感器对透析穿刺针头的微量漏血检测具有较高的灵敏度,利用光导纤维传导光像,将漏血信息传输至远离穿刺部位的漏血检测报警装置,实现了非接触式漏血检测,创新了漏血检测的技术方法。为进一步提高检测精度和可靠性,设计一次性引血帽安装在光纤传感器探头端,归一化了测量条件。报警装置采用单片机进行智能化控制,抗干扰能力强,有利于避免误报和漏报,可有效避免透析中的漏血事故。

## 参考文献:

- [1]宗晓玉.血透患者血透术中发生穿刺针脱落的原因分析及护理[J].医学信息,2014,3:373.
- [2]马伟平,刘少平,林小君.两种止血法在动静脉内瘘穿刺针口渗血病人中的应用效果[J].护理研究,2014,28(3):332-333.
- [3]谢丰明,潘先春.血液透析过程中内瘘针滑脱的预防及护理方法探讨[J].现代医药卫生,2014,30(5):791-792.
- [4]徐冬梅,姜雪梅,王岩棠.血液透析机常见报警原因及护理[J].中国医疗器械信息,2019,25(6):184-185.
- [5]王蓉花,马逊,朱亚梅,等.一种用于血管穿刺渗血及出血报警装置的设计与应用[J].全科护理,2016,14(21):2258.
- [6]李柯,吴昌哲,霍小林.一种新型数字化漏血传感器设计[J].传感器与微系统,2016,35(1):98-100.
- [7]彭博,史仪凯,姚钦.一种光纤血流量传感器信号处理系统的设计[J].传感技术学报,2007,20(5):975-979.
- [8]李德强,曹晔,宫顺顺,等.基于细芯光纤与双球结构的干涉型光纤传感器[J].传感技术学报,2018,31(6):857-860.
- [9]苏广,胡志刚,杜喆,等.基于Y形光纤的便携式免疫荧光定量检测系统[J].生物医学工程研究,2018,37(3):315-319.
- [10]尹焱.使用LED点光源实现均匀照明效果的要点探究[J].电子技术与软件工程,2019,10:71.
- [11]刘茜倩,许雪梅,李维,等.光纤生物传感器探针锥形设计及参数优化[J].传感技术学报,2008,21(1):36-40.
- [12]陈飞飞,邱召运,陈雪梅,等.基于颜色传感器的透析液红细胞微漏出量的检测研究[J].生物医学工程研究,2019,38(2):161-164.

(收稿日期:2019-09-27)