

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.051

光电式断纱检测电路的开发

焦洋浩,崔明浩,王彦博,熊剑,张昊

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:针对在纺织机械生产过程中,由于各种原因可能造成纱线张力突变,使得断纱成为纺织过程中最常见的故障之一的问题,分析纱线走纱断纱的动态特征。基于光电式检测原理,设计一套有较高检测准确度和灵敏度的非接触式断纱检测电路。对系统中信号采样、信号滤波、信号放大等电路进行设计,选择 2.4 G 无线传输模块进行信号传输。通过实验研究纱线直径以及红外二极管发射功率对本系统断纱检测灵敏度的影响。

关键词:纺织机械;断纱检测;光电传感器;信号处理电路;信号采集电路

中图分类号:TS103.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)02-0269-05

Development of Photoelectric Yarn Breakage Detection Circuit

JIAO Yanghao, CUI Minghao, WANG Yanbo, XIONG Jian, ZHANG Hao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:To address the issue of yarn breakup as one of the most common faults caused by sudden changes in yarn tension for various reasons in the production process of textile machinery, this article analyzes the dynamic characteristics of yarn breakage during yarn running, designs a non-contact yarn breakage detection circuit with high detection accuracy and sensitivity based on the principle of photoelectric detection. The circuits for signal sampling, filtering, and amplification in the system are designed, and a 2.4G wireless transmission module is selected for signal transmission. And the influence of yarn diameter and infrared diode emission power on the sensitivity of yarn breakage detection in this system is studied through experiments.

Keywords:textile machinery; yarn breakage detection; photoelectric sensor; signal processing circuit; signal sampling circuit

0 引言

在纱线的织造过程中,由于导向装置对纱线的摩擦,纱线本身的粗细不均匀以及其他各种原因会造成的纱线的张力不均匀,这都会导致纱线的断头。若断纱发生的后设备不能及时停止,往往会扩大故障^[1],同时还会消耗大量的人力和时间来清理纱线和接上断头^[2]。因此,需要在纱线发生断纱的时候,检测元件能够及时检测到并发出信号,控制设备停机并显示断纱发生的位置。这对提高产品质量和生产效率具有很重要的意义^[3]。

纱线的断裂在纺织过程中是常见的故障之一^[4]。断纱检测原理可以分为接触式和非接触式两种^[5]。接触式断纱检测有电子机械式以及压电式断纱检测两种。电子机械式断纱检测是将运动中的纱线与轴或销进行接触,当断纱发生的时候,机械部件发生运动会导致电路的状态发生变化,发出报警信号,控制设备停机。该原理简单,但是容易接触杂质,或者在使用中,导电触点发生氧

化,造成接触不良,引起不报警或误报警。压电式断纱检测中,运动中纱线与压电传感器接触^[6],产生电信号,当纱线发生断纱,电信号丢失,判断断纱。该方式原理简单,反应迅速,但是接触摩擦会使纱线的质量降低,且灵敏度受到机械振动的影响。非接触式断纱检测主要有两种,一是光电式断纱传感器,该方式反应灵敏,不会造成纱线磨损,适用范围广。近年来发展起来的一种断纱检测方式是图像检测式^[7],通过采集纱线经过时的图像,判断是否断线。

本文基于光电式断纱检测原理,设计了新的信号采集和处理电路,开发出一套灵敏准确的断纱检测电路。

1 光电式断纱检测原理

光电传感器包括光源,光通路和光电元件三要素^[8-9]。在断纱检测中光源的波长选择要避开自然光线波长^[10],故选择峰值波长频率在 940 nm 的红外二极管。光电元件使用 940 nm 吸收峰值波长的红外三极管。

第一作者简介:焦洋浩(2000—)男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为微机电系统检测与控制,15893964975@163.com。

单个发光二极管由于其尺寸较小,可以看作点光源。为模拟真实的发光二极管,将发光二极管看作光强渐变的点光源^[11],认为光敏三极管接收辐照度与其和红外二极管之间距离的平方成正比。

光电式断纱传感器的检测模型如图 1 所示。

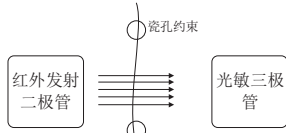


图 1 传感器检测模型

设纱线的直径为 d , 纱线处在光电对管中的长度为 y , 设在无遮挡状态下的光敏三极管的接收总光强为 E_0 , 纱线吸收的光强占遮挡总光强的比例为 ε , 则可以计算出光敏三极管可以接收到的总光强度 $E^{[12]}$ 为

$$E = E_0 \left(1 - \varepsilon \frac{d}{y} \right) \quad (1)$$

式中 ε 与纱线的吸光率有关, 与纱线的颜色、材料相关。

在光敏三极管的典型工作范围内, 其接收的光强度与其输出电流之间的关系通常是成近似正比例的, 则传感器的输出电压与光敏三极管的接收光强度也成正比。由此可得, 传感器电压变化可表示为

$$\Delta u = -k \Delta d \quad (2)$$

即在其他因素一致的情况下, 纱线的直径越大, 传感器的输出电压降低。

根据上述原理, 设计一套光电式断纱检测系统, 信号采集电路将纱线的走纱或断纱信号转化为电压信号; 滤波电路过滤掉低频干扰信号; 放大电路放大信号, 将走纱信号和断纱信号产生更大的电压差; 电压比较电路将走纱和断纱信号转变为二值信号, 以输入 MCU 处理分析, 如图 2 所示。

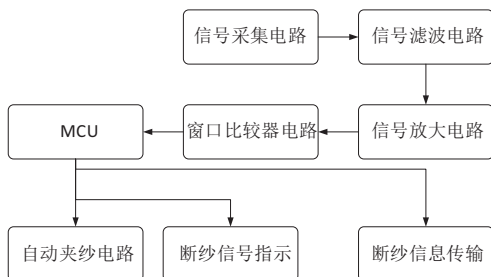


图 2 传感器信号处理电路结构

2 断纱检测电路设计

本系统的信号采集电路选择二线制信号传输方案。二线制传输中, 信号传输电信号与传感器的供电电路同时在一对导线中实现, 具有接线简单, 电信号以电压信号传输, 电压信号传输通常需要更低的电流值, 有助于减小系统功耗, 且电压信号易于测量, 信号采集电路如图 3 所示。

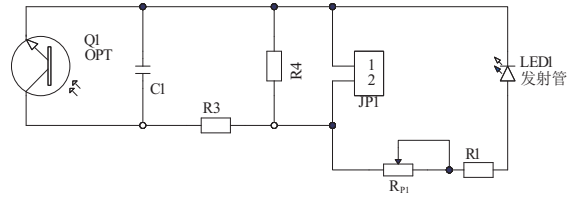


图 3 信号采集电路

外部电路通过 JP1 为光电传感器提供电源, 并通过 JP1 传输光电信号以进行处理。在电路中, R1 与可调电阻 R_{p1} 串联, 连接到红外二极管, 通过调整可变电阻的阻值来调整二极管的发射功率。旁路电容 C1 用于滤除直流电源中的交流分量, 并将其耦合至地, 以提高直流源的纯度。此外, R4 用于限制电流并实现电流平衡。

上拉电阻为传感器电路供电, 也提高了信号的电压, 供后续电路处理。一些因素会在本电路中引入低频噪声, 容易造成系统误判问题, 所以在本系统中使用压控电压源 2 阶高通滤波电路, 滤除了电压信号中的低频信号。电路示意图如图 4 所示。

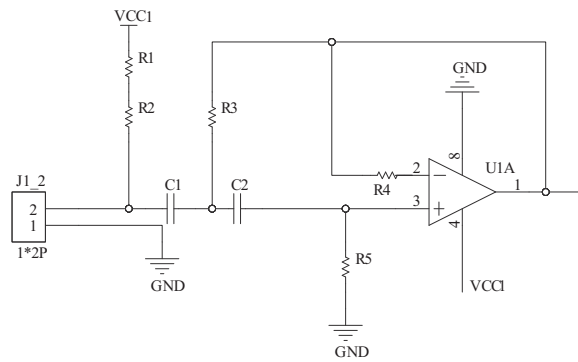


图 4 信号滤波电路

为减小设计以及计算难度, 令 $C = C_1 = C_2$, $R = R_3 = R_5$, 当设定合适的通带频率 f_0 , 阻尼系数 ξ , 通带增益 K_p 后, 电容 C 可以由经验表格选取, 其余各个参数计算公式为:

$$R_3 = \frac{\xi + \sqrt{\xi^2 + 2(K_p - 1)}}{4\pi f_0 C} \quad (3)$$

$$R_4 = K_p(R_3 + R_5) \quad (4)$$

用 Ispice 仿真 Bode 图如图 5 所示,可以看到通带增益为 1,在通带频段中,相位偏移也趋近于 0,符合设计要求。

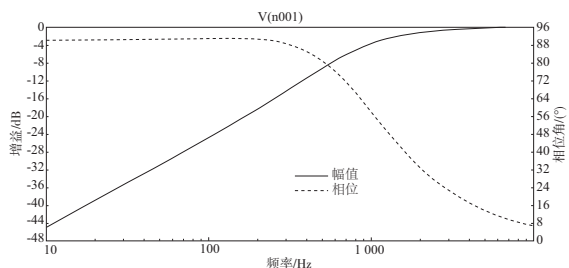


图 5 信号滤波电路 bode 图

滤波电路之后对电压信号进行放大处理,将断纱信号电压与走纱信号电压之间的压差拉大。本系统使用两级放大电路,实现差分比例放大运算,该电路具有对于信号源的输入电阻大,对信号源的影响较小,可以方便地调整电阻来改变放大电路放大倍数,电路示意图如图 6 所示。

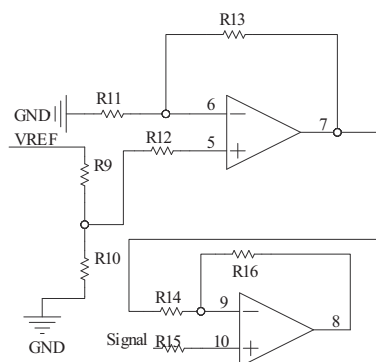


图 6 信号放大电路

若 $R_{16} = R_{11}$, $R_{14} = R_{13}$, 则

$$u_o = \left(1 + \frac{R_{16}}{R_{14}}\right) \left(u_i - V_{ref} \cdot \frac{R_{10}}{R_9 + R_{10}}\right) \quad (5)$$

通过信号放大电路,断纱走纱信号出现了一个大的电压差,需要将电压信号通过窗口比较器电路^[13],将电压信号转换为 MCU 可以处理的二值信号,窗口比较器电路示意图如图 7 所示。

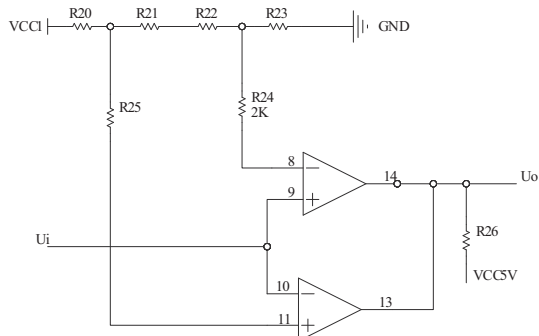


图 7 窗口比较器电路

通过 R_{20} 、 R_{21} 、 R_{22} 、 R_{23} 电阻分压设置窗口比较器的上限电压下限电压 V_H 、 V_L ,当电压处在 V_H 、 V_L 之间时,输出高电压,否则输出低电压,用一个幅值为 6 V,频率 1 000 Hz 的正弦激励。

可见,该窗口比较器能够输出具有较高压摆率的 0 V—5 V 数字信号。经过与非门芯片的处理,两路信号输出到微控制器 (MCU) 端口,实现了在任意一路断纱发生时端口电平快速变化,引发外部中断,有效提高系统的实时性。

断纱信息传输通过 NRF24L01 模块向主控传输,其 PCB 如图 8 所示。

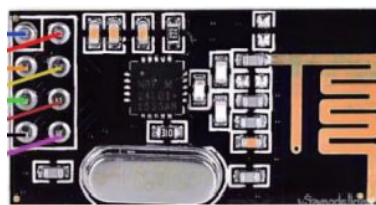


图 8 NRF24L01 PCB 引脚图

NRF24L01 采用 SPI 通信,可以方便地与各种 MCU 连接,通信速度最快可达 2 Mbps,一次传输数据最大可达 32B^[14],是一款兼顾距离和数据传输的无线模块^[15]。

3 试验

3.1 光电传感器可行性试验

将光电传感器与分控制板连接,在光电通路完全不遮挡和完全被遮挡情况下,用示波器测量信号处理电路的输出,如图 9 所示。



图 9 光电电压信号跳变图

由图 9 可以看到,在两种情况下,输出信号发生了清晰陡峭的跳变,信号采集电路可以清晰将光通路中光辐射被吸收的情况转化为电压差输出。

3.2 纱线直径影响实验

为深入研究检测系统对不同吸光率和直径的

纱线的检测性能,进行以下实验以优化设计信号处理电路。在实验中,测得信号采集电路中可变电阻为 $0\ \Omega$ 、 R_1 为 $1.8\ \text{k}\Omega$ 时,红外二极管的发射功率最大。通过调整光电传感器中的可变电阻至 $0\ \Omega$,同时将放大电路的放大倍数调整到 4.3 倍,实验条件为温湿度 $24\ ^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $30\%\ \text{RH}$,张力 $15\ \text{cN}$ 。

在这一设定下,对不同纱线直径进行了测试,分别测量了 8 s(英支)、10 s、12 s、16 s、21 s、32 s 和 40 s 的纱线信号处理电路的输出,每组纱线做 10 次实验,舍去最大最小值,并取平均值。英支是纱线直径的一种度量单位,表示 1 磅棉纱所具有的 840 码长度的个数。所以纱线支数越高,纱线直径越小。

实验结果显示:纱线在走纱过程中呈现无规则振动,输出信号也在一定电压范围内呈现波动趋势。表 1 中, V_{up} 表示波动的上限电压, V_{down} 表示波动的下限电压,而 V_{still} 则是纱线静止于传感器中时的电压输出。

表 1 可变电阻 $0\ \Omega$ 走纱断纱电压信号			
状态	V_{up}/V	V_{down}/V	$V_{\text{still}}/\text{V}$
8 s	8.53	7.12	4.81
10 s	8.61	7.24	5.13
12 s	8.94	7.57	5.66
16 s	9.16	7.87	6.86
21 s	9.95	8.47	8.63
32 s	10.66	9.61	9.82
40 s	11.35	11.24	10.67

由表 1 可绘制纱线支数与走纱平均电压关系如图 10 所示。

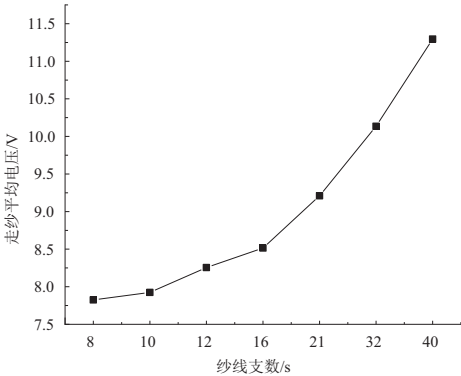


图 10 纱线支数与走纱平均电压关系图

可得纱线支数的增加导致走纱平均电压的上升。在可变电阻阻值为 $0\ \Omega$ 情况下,光电传感器无遮挡时,处理电路输出电压 V_{unshaded} 为 $11.43\ \text{V}$ 。因此,纱线直径的增大使走纱平均电压与纱线无遮挡时输出电压之间的压差增大,表明该电路对此纱线响应更为灵敏。

3.3 可变电阻影响实验

在光电传感器中, R_1 与可调电阻 R_{pl} 串联,可以调节红外二极管两端的电压,进而对红外二极管的发射功率进行调节。较高的发射功率可以提高红外对管的信号强度,从而增加系统的工作距离和稳定性,同时,也增大了其穿透性。调节可调电阻阻值,分别测量了 R_{pl} 在 $100\ \Omega$ 、 $200\ \Omega$ 、 $300\ \Omega$ 、 $400\ \Omega$ 情况下不同直径纱线的输出电压信号,当 R_{pl} 取 $500\ \Omega$ 时,无遮挡状态下电路输出电压 V_{unshaded} 仅有 $1.2\ \text{V}$,不足以判断断纱的发生。列出可调电阻值在 $400\ \Omega$ 下的数据如下表:

表 2 可调电阻 $400\ \Omega$ 数据表			
状态	V_{up}/V	V_{down}/V	$V_{\text{still}}/\text{V}$
8 s	4.13	3.41	0.81
10 s	4.24	3.61	0.86
12 s	4.26	3.63	0.94
16 s	4.41	3.94	1.21
21 s	4.73	4.26	1.26
32 s	5.16	4.57	1.83
40 s	5.36	4.92	2.21

由于篇幅原因,其余数据不再列出。为深入研究 R_{pl} 引起的发射功率变化对本系统的影响,选择一个物理量表示在不同 R_{pl} 下不同纱线吸收光辐射占光敏三极管吸收总光辐射量的比值,若该物理量大,代表该纱线吸收占总吸收总光辐射量大,可以认为电路检测灵敏度较高,反之占比小,则灵敏度较低。为清晰度量该物理量,绘制不同 R_{pl} ,不同纱线情况下 $(V_{\text{unshaded}} - V_{\text{still}})$ 以及 $(V_{\text{unshaded}} - V_{\text{obscure}})$ 的比值,其中 V_{obscure} 表示光电对管被完全遮挡时的输出信号,在所有 R_{pl} 下,其为同一定值 $0.5\ \text{V}$ 。选取该物理量的原因如下: $(V_{\text{unshaded}} - V_{\text{still}})$ 代表纱线完全进入传感器造成的输出信号压降,而 $(V_{\text{unshaded}} - V_{\text{obscure}})$ 代表传感器被完全遮挡的输出信号压降,两者之比就可以度量纱线吸收光辐射占三极管吸收总光辐射量的比值。纱线吸收光辐射比率如图 11 所示。

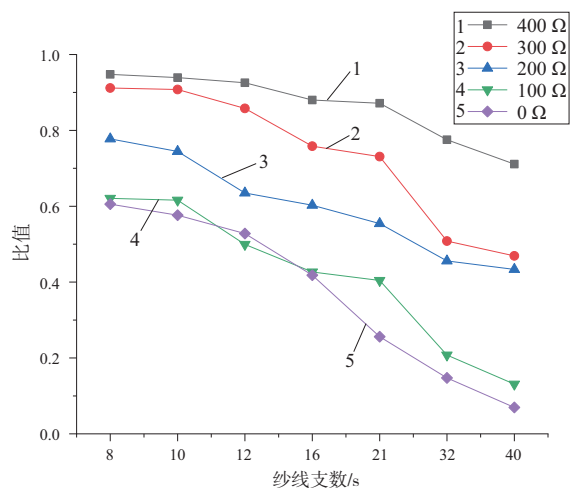


图 11 纱线吸收光辐射比率

受机械振动等外部因素影响,测得的同一直径纱线吸收光辐射比率并不是严格随可变电阻阻值的增大而减小。然而,整体呈现这样的趋势。可知在输出电压符合要求情况下,随着 R_{p1} 的增大,系统的灵敏度将提高,这为后续设计提供指导。

4 结语

本文基于光电式断纱检测原理,设计开发了一款断纱检测电路,完成了器件选型、电路设计,并通过实验完成了设计的可行性验证,探究了纱线的直径与电路检测灵敏度的关系,以及在本电路下可变电阻值与传感器灵敏度的关系,并基于此做了电路的优化设计,为后期系统设计奠定基础。

参考文献:

[1] 李婷. 纱线断裂检测专利技术综述[J]. 中国科技信息, 2018(12): 22-25, 12.

[2] 缪宇轩,孟祥益,夏港东,等. 非接触式纱线张力监测系统的研制与开发[J]. 毛纺科技, 2020, 48(5): 71-76.

[3] 宋晓亮,刘建立,徐阳,等. 光电式环锭断纱在线检测系统[J]. 纺织学报, 2014, 35(8): 94-98, 103.

[4] CHEN G F, SUN H C, ZHAI L L, et al. A capacitance based circuit design for yarn breaking detection [J]. Advanced Materials Research, 2012, 562/563/564: 1840-1843.

[5] 吕竞则,戴宁,胡旭东,等. 静电荷感应式断纱传感器设计[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(3): 14-20.

[6] 任尧,袁嫣红,向忠. 非接触式断纱检测系统设计[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 43(2): 200-205.

[7] 龙秀光. 基于光电传感技术的双目光源结构断纱检测系统设计[D]. 杭州:浙江理工大学, 2023.

[8] 韩璐斌. 光电式传感器的原理及其特性[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(10): 77-78.

[9] 吕鹏飞,李新荣,刘立冬. 环锭纺纱断头监测技术的创新发展[J]. 纺织器材, 2019, 46(4): 42-48.

[10] 李洪元,姜勇,刘承尚,等. 机载光电传感器抗振结构设计及仿真研究[J]. 自动化仪表, 2025, 46(11): 24-30, 38.

[11] 宋晓亮,杨艺,张慧灵,等. 光电式断纱检测头性能试验研究[J]. 棉纺织技术, 2015, 43(3): 19-22, 45.

[12] 秦浩杰,张昊,周文聪,等. 光电式断纱检测系统的研制[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(4): 209-213.

[13] 李旭帆,安霆. 基于 nRF24L01 的物联网无线数据传输系统[J]. 信息技术与信息化, 2021(6): 132-134.

[14] 单保森,郝传柱. 基于 nRF24L01 的车间紧急报警系统研究[J]. 设备管理与维修, 2024(23): 87-89.

[15] 张静秋. 基于集成运算放大器的窗口电压比较器的设计[J]. 电子制作, 2017, 25(7): 10-12.

收稿日期: 2024-01-02