

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.04.011

基于光纤传感的带式输送机张力检测技术

苗长云, 张豫飞

(天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对目前带式输送机张力检测存在易损坏及准确性和可靠性差的问题, 提出了一种基于光纤传感的带式输送机的张力检测方法。将法珀腔传感头置于带式输送机张紧装置的液压回路中, 液压回路的压力使法珀腔传感头的硅膜片产生形变, 引起法珀腔传感头反射光变化; 光电解调器光路接收法珀腔传感头的反射光后, 经光路解调后得到反射光谱, 通过光电解调器电路的光电转换、处理、分析后, 得到反射光光谱的自由光谱范围, 再根据油缸内部面积计算出带式输送机张力, 实现了带式输送机张力检测。根据双干涉效应原理设计了法珀腔传感头, 采用 Jetson Nano 嵌入式系统开发板设计了光电解调器硬件, 采用 Python 语言设计了光电解调器软件, 并进行了实验研究。实验结果表明: 该方法能够实现带式输送机张力检测, 压力测量范围为 0~25 MPa, 灵敏度为 0.148 nm/MPa, 测量精度为 0.1%, 不易损坏, 抗干扰性好, 准确性和可靠性高。

关键词: 光纤传感器; 带式输送机; 张力检测; 张紧油缸; 法珀腔传感头; 光电解调器

中图分类号: TD76; TP212.44

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)04-0067-08

Tension detection technology of belt conveyor based on optical fiber sensor

MIAO Changyun, ZHANG Yufei

(School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: A tension detection method of belt conveyor based on optical fiber sensing is proposed for the current problems of easy damage, poor accuracy and reliability of belt conveyor tension detection. The method is based on the principle of double interference effect by placing the Fabry Perot cavity sensor in the hydraulic circuit of the belt conveyor tensioning device, and the pressure of the hydraulic circuit causes deformation of the silicon diaphragm of the Fabry Perot cavity sensor, which causes changes in the reflected light of the Fabry Perot cavity sensor. After the optical demodulator optical circuit receives the reflected light from the Fabry Perot cavity sensing, the reflected spectrum is obtained after demodulation of the optical circuit, and the free spectral range of the reflected light spectrum is obtained through photoelectric conversion, processing and analysis of the photoelectric demodulator circuit, and then the belt conveyor tension is calculated according to the internal area of the cylinder, which realizes the belt conveyor tension detection. A Fabry Perot cavity sensor and an electro-optical demodulator are designed, and the software of the electro-optical demodulator is designed using Python language, and experimental studies are conducted. The experimental results show that the method can achieve belt conveyor tension detection with a pressure measurement range of 0~25 MPa, sensitivity of 0.148 nm/MPa, measurement accuracy of 0.1%, not easy to damage, good anti-interference, high accuracy and reliability.

Key words: optical fiber sensor; belt conveyor; tension test; tensioning cylinder; Fabry Perot cavity sensor; optical demodulator

带式输送机是一种现代化生产中连续运输设备, 具有运量大、运距远、能耗小、运费低、效率高、运行平稳、装卸方便、适合于散料运输等优点, 与汽车、火车一起成为三大主力工业运输工具, 已被广泛应用于煤

炭、港口、电力、矿山、冶金、化工等领域^[1-2]。由于带式输送机驱动力、带速、物料流量变化以及安装调整不当等原因, 会导致输送带张力过大或过小^[3-5]。当张力过大时, 造成输送带的塑性变形、断带、机架和电气传动

收稿日期: 2022-11-24 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(NSFC51274150); 天津市重点研发计划科技支撑项目(18YFZCGX00930)

通信作者: 苗长云(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光电检测技术与系统。E-mail: miaochangyun@tiangong.edu.cn

装置损坏等安全事故;当张力过小时,输送带与驱动滚筒间摩擦力减小,造成打滑、滚筒包胶磨损,缩短滚筒和胶带的使用寿命,降低物料运输量,增加能耗,引起局部温度升高,发生火灾安全事故。为了确保带式输送机安全可靠地运行,我国《智慧矿山信息系统通用技术规范》(GB/T 3467.9—2017)和《带式输送机工程技术标准》(GB50431—2020) 要求对带式输送机进行张力保护。

目前,带式输送机张力检测方法主要采用张力传感器和压力传感器检测。张力传感器检测法是将张力传感器串联在张紧装置的张紧钢丝绳中,实现张力检测。这种方法易受到改向滚筒的震动影响,检测准确性差,易损坏,可靠性差^[6-7]。杨小林等^[8]设计了一种带式输送机永磁智能驱动系统,采用张力传感器检测带式输送机张力;揭施军等^[9]设计了带式输送机拉紧装置,采用拉力传感器检测带式输送机张力。压力传感器检测法是将压力传感器置于张紧装置张紧油缸中,实现张力检测,易损坏和受电磁干扰,准确性和可靠性差^[10-11]。张宏明等^[12]设计了带式输送机液压绞车自动张紧装置,采用压力变送器测量带式输送机张力;曾飞等^[13]设计了基于 LabVIEW 的带式输送机动态特性参数监测系统,采用压力传感器检测带式输送机张力。

针对目前带式输送机张力检测存在易损坏、准确性和可靠性差的问题,本文提出一种基于光纤传感的带式输送机的张力检测方法,将法珀腔传感头置于带式输送机张紧装置的液压回路中,液压回路的压力使法珀腔传感头的硅膜片产生形变,引起法珀腔传感头反射光变化,通过光电解调器检测反射光谱、光电转换、处理与分析后,得到反射光光谱的自由光谱范围,再根据油缸内部面积计算出带式输送机张力,实现带式输送机张力检测,具有不易损坏、抗干扰性好、测量精度高、准确性好和可靠性高等优点。

1 带式输送机张力检测系统及光电解调器设计方案

基于光纤传感的带式输送机张力检测系统由光电解调器、法珀腔传感头、显示屏和上位机等组成,其组成框图如图 1 所示。该系统采用双干涉效应原理,将法珀腔传感头置于带式输送机张紧装置的液压回路中,液压回路的压力使法珀腔传感头硅膜片产生形变,引起法珀腔传感头反射光变化,通过光电解调器检测反射光谱、光电转换、处理与分析后,得到反射光光谱的自由光谱范围,再根据油缸内部面积计算出带

式输送机张力,实现带式输送机张力检测,将检测到的张力送给显示屏,当检测到张力过大或过小时,通过报警器报警,并通过以太网将检测的张力结果传输给上位机。

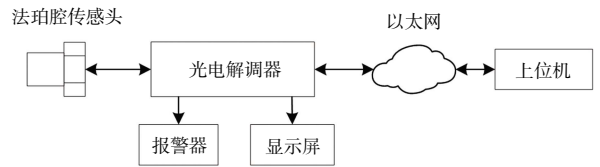


图 1 基于光纤传感的带式输送机的系统组成

Fig.1 Composition of belt conveyor system based on optical fiber sensor

法珀腔传感头通过螺纹连接方式置入张紧装置的液压回路中,安装示意图如图 2 所示。法珀腔传感头接收到光电解调器入射的光信号后在单模光纤端面 and 硅膜片内表面产生反射光^[14],形成干涉,液压回路压力变化改变硅膜片形状,引起法珀腔传感头反射光变化,将反射光传输给光电解调器。

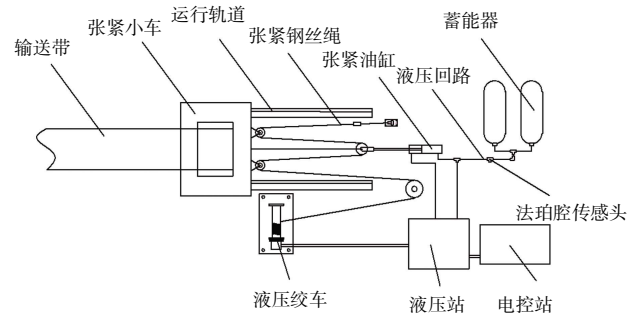


图 2 法珀腔传感头安装示意

Fig.2 Installation diagram of Fabry Perot cavity sensing head

光电解调器是由光路和电路组成,其组成框图如图 3 所示。其中,光源选用 ASE 宽带光源,通过光环形器为法珀腔传感头提供光源;光环形器选用 PIOC-3 偏振无关三端环形器,用于正反向传输光的分离;阵列波导光栅选用型号为 AAWG-C161C39G24-01 的 1×16 型阵列波导光栅,用于分离法珀腔传感头反射光,得到反射光谱;光电转换电路用于将阵列波导光栅输出反射光谱信号转换为电信号;调理电路用于对光电转换电路输出的电信号进行调整;A/D 转换电路用于将调理电路输出的模拟信号转换为数字信号;主处理器模块通过 SPI 接口获取 A/D 转换电路的数字信号,对光谱数据的处理、解调、张力计算,实现带式输送机张力检测,将检测到的张力信号送给显示屏,当检测张力过大或过小时,通过报警器报警,并通过以太网将检测张力的结果传输给上位机。

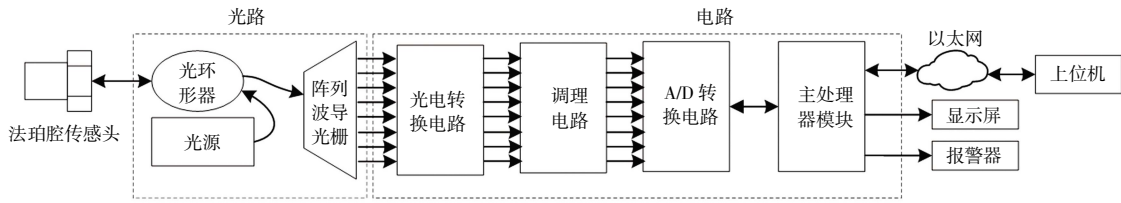


图 3 光电解调器组成

Fig.3 Composition of the optical demodulator system

2 法珀腔传感头设计

2.1 法珀腔传感头原理

法珀腔传感头是检测系统中传感部件,由单模光纤、反射腔、硅膜片、树脂外壳等构成,其结构示意图如图 4 所示。



图 4 法珀腔传感头结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of Fabry Perot cavity sensing head

将单模光纤插入到反射腔内,光电解调器的入射光分别在单模光纤的端面和硅膜片的内表面发生反射,由于硅膜片具有不透明性,入射光在硅膜片的内表面不产生折射,因此两束反射光形成双干涉效应^[15],两束反射光光程差为

$$\Delta = 2nL \quad (1)$$

式中: n 为反射腔中的空气折射率; L 为反射腔腔长。

设入射光波长为 λ , 则两束反射光的光程差之间的相位差可表示为

$$\delta = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (2)$$

假设入射光谱分布为 $I_0(\lambda)$, 光纤端面反射率为 R_1 , 硅膜片端面反射率为 R_2 , 法珀腔的反射光谱公式为:

$$I_r(\lambda) = I_0(\lambda) \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \delta}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \delta} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)得

$$I_r(\lambda) = I_0(\lambda) \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda}\right)}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda}\right)} \quad (4)$$

由式(4)可知,反射光谱 $I_r(\lambda)$ 的大小不仅与腔长 L 和入射光的波长 λ 有关,还与光纤端面反射率 R_1 和硅膜片的反射率 R_2 有关。当 R_1, R_2, λ 和 $I_0(\lambda)$ 不变的

情况下,因待测压力使得硅膜片发生形变导致腔长发生变化,从而反射光 $I_r(\lambda)$ 也会发生改变,所以可以利用光纤法珀腔传感头输出的光谱检测出压力的大小。

2.2 法珀腔传感头的制备

法珀腔传感头的制备流程如图 5 所示。首先使用三维打印机打印树脂外壳,树脂外壳内径为 $500 \mu\text{m}$, 长度为 15 mm ; 然后使用环氧树脂胶将 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 400 \mu\text{m}$ 的硅片固定在树脂外壳的端面上;最后使用纤径为 $125 \mu\text{m}$ 的单模光纤制造干涉仪,将单模光纤插入树脂外壳中,并在纤维表面和硅膜片内表面之间形成反射腔,完成对法珀腔传感头的制备。

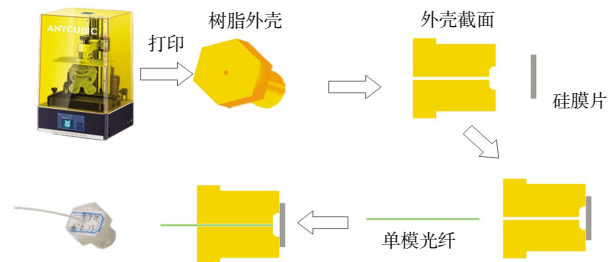


图 5 法珀腔传感头制备流程

Fig.5 Preparation process of Fabry Perot cavity sensing head

2.3 法珀腔传感头仿真分析

假设反射腔中气体的折射率 n 为 1, 入射光的中心波长 λ 为 1550 nm , 初始相位 ϕ_0 为 0° , 并假设两面平面镜的反射率的绝对值相同, 即 $|R_1| = |R_2| = R$, 当反射面的反射率 R 发生改变时, 反射率与干涉图案之间的关系如图 6 所示。

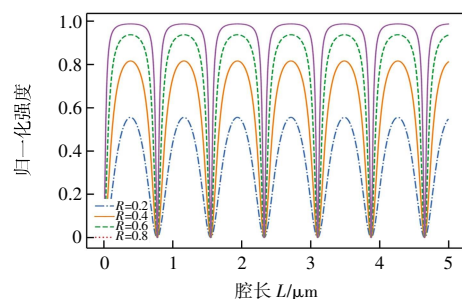


图 6 R 变化时的仿真曲线

Fig.6 Simulation curves when R changes

假设反射腔中气体的折射率 n 为 1, 入射光的入射波长在 1 525~1 575 nm 之间, 初始相位 ϕ_0 为 0° , 反射率 R 为 0.4, 腔长与干涉图案之间的关系如图 7 所示。分析不同的腔长与干涉图案之间的关系, 由图 7 可知随着腔长 L 的增大, 在 1 525~1 575 nm 的波长范围内, 反射光谱的自由光谱范围减小, 由此可根据自由光谱范围来解调。

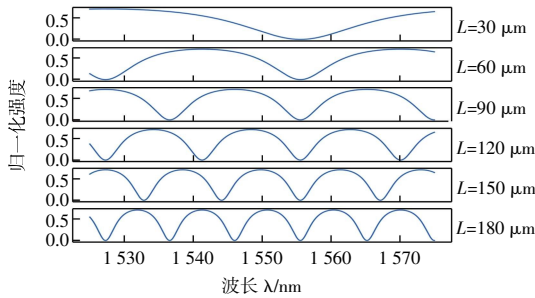


图 7 L 变化时的仿真曲线

Fig.7 Simulation curves when L changes

2.4 法珀腔传感头实验及结果分析

将法珀腔传感头通过螺纹连接的方式接入到手压泵的液压管路中, 通过生料带来保证液压的密封性, 使用手动液压泵调节液压管路中压力的大小, 采用 HC-YS60 液压压力表来测量实际液压压力。通过这种方式, 可以在传感头上施加不同的液压压力, 在常温下对法珀腔传感头进行 0~25 MPa 的加压测试, 每 5 MPa 采集反射光谱进行分析^[6], 随着液压压力的增加, 法珀腔传感头的压力特性如图 8 所示。

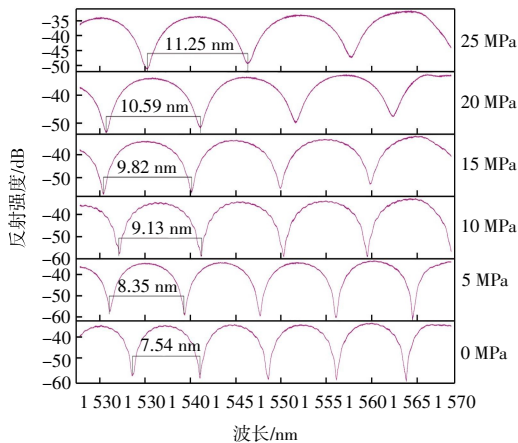


图 8 法珀腔传感头的压力特性

Fig.8 Pressure characteristics of Fabry Perot cavity sensing head

实验结果表明, 随着压力的增加, 法珀腔传感头的硅膜片的形变量增加, 使法珀腔传感头内腔长 L 减小, 使反射光谱的波长和强度都发生了变化。光谱数据中强度最小的波长之间的差在增大, 即自由光谱范围增大, 与图 7 中的仿真结果相吻合。

3 带式输送机张力计算

3.1 自由光谱范围计算

对图 8 分析, 得出随着压力的增大反射光谱的自由光谱范围在增大, 因此本文通过求解法珀腔反射光谱中的自由光谱范围与压力之间的关系, 求解出压力大小, 最终实现带式输送机张力的检测。而法珀腔传感头的反射光谱在较窄的波长范围内, 可以近似地认为是周期性的, 光谱周期即自由光谱范围 FSR 为常数^[7], 即

$$I_r(\lambda) = I_0(\lambda) \cos\left(\frac{2\pi\lambda}{FSR}\right) \quad (5)$$

因此通过获取反射光谱中的频率信息即可实现对反射光谱的解调, 对 0 MPa 压力下的反射光谱进行快速傅里叶变换, 所获得的频谱图像如图 9 所示。

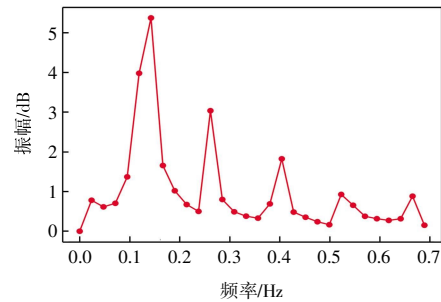


图 9 0 MPa 压力下的反射光谱的频谱曲线

Fig.9 Reflection spectrum under 0 MPa pressure

从图 9 中可知, 快速傅里叶变换获得的反射光谱频率信息分辨率较低, 这是因为光谱仪分辨率较低, 导致频谱信息中的谐波分量较少。使用快速傅里叶变换获得自由光谱范围的方法要求光谱分辨率高, 解调成本高, 因此本文使用三角函数拟合的方法求解自由光谱范围, 假设反射光谱满足:

$$y = a \cos(bx + c) + d \quad (6)$$

采用最小二乘法求残差为:

$$SSE = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

式中: \hat{y}_i 为光谱仪测量到的强度数据; y_i 为预测强度。以梯度下降法进行多次迭代, 使残差平方和最小化, 求参数的最优解, 则 FSR 为

$$FSR = \frac{2\pi}{b} \quad (8)$$

3.2 张力计算

张力的会影响输送带和滚筒间摩擦力和托辊间垂度, 为保证带式输送机在启动、运行和制动工况下保持稳定, 需要对光电解调器获得的自由光谱范

围与压力标定并进行计算,获得张力的大小。由于各个矿场所采用的带式输送机型号参数的不同,以及张紧装置中张紧油缸参数的不同,假设带式输送机张紧装置如图 2 所示,张紧油缸和液压回路中无摩擦,无气孔,无背压,且张紧油缸中压力处处相等;忽略输送带弹性、粘性阻尼和惯性^[18]。张紧油缸中有效活塞直径为 D ,张紧油缸中的液压压力为 P ,则张紧油缸输出力方程为

$$F = \frac{\pi D^2}{4} \times P \quad (9)$$

输送带张力为

$$F_t = F \quad (10)$$

4 光电解调器的设计

4.1 光电解调器的硬件设计

4.1.1 主处理器模块设计

主处理器模块是由主处理器电路、HDMI 接口电路、GPIO 扩展电路、以太网接口电路和电源电路等组成,其组成框图如图 10 所示。主处理器模块选用 Jetson Nano 高性能嵌入式开发平台,具有 4 核 64 位 ARM CPU 和 128 核集成 NVIDIA GPU,可提供 472 GFLOPS 的计算性能,且提供了基于 Ubuntu 18.04 的完整桌面 Lin-ux 环境,因此能够以图形化界面显示带式输送机张力检测系统中的内容。

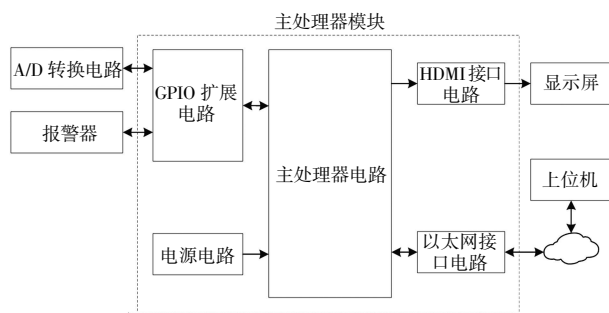


图 10 主处理器模块组成框图

Fig.10 Composition of main processor module

4.1.2 光电转换电路设计

光电解调器采集到法珀腔传感头的反射光在光路中以光波的形式传输,光信号经过光电转换电路转换为电信号。本文选取 PIN 型光电二极管作为光电探测器,光电二极管有 2 种工作模式:光伏模式和光导模式。光电二极管工作在光伏模式下,不会流过任何暗电流,线性度和灵敏度达到最高,非常适合高精度测量应用;光电二极管工作在光导模式下,响应速度快,缺点是存在暗电流、高噪声和线性度差。本文选取

光电二极管的光伏模式作为光电转换电路的工作模式。

4.1.3 调理电路设计

光电转换电路将光信号转换后的电信号仍为小信号,一般不能直接被 A/D 转换电路采样,因此需要设计具有放大功能的调理电路对该信号进行放大。本文采用 LF353 运算放大芯片设计调理电路,该芯片具有低输入偏置电流、高输入阻抗和高压摆率等特点。

4.1.4 A/D 转换电路设计

A/D 转换电路将调理电路放大后的模拟电信号转化为数字信号。本文选用 ADS1263 模数转换芯片,ADS1263 数模转换芯片拥有 10 通道 32 位高分辨率和 38.4 kSPS 的采样速率,满足光电解调器的采样需求。ADS1263 具有单端输入和差分输入 2 种配置模式,本文采用单端输入模式,即将 AVDD 连接 5 V,AVSS 连接 GND。

4.2 光电解调器的软件设计

光电解调器使用 Jetson Nano 高性能嵌入式开发平台,采用 Python 语言进行设计,其主程序流程图如图 11 所示。

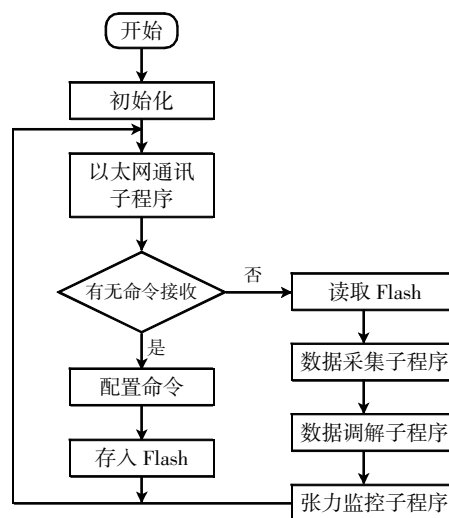


图 11 主程序流程

Fig.11 Flow chart of main program

主程序主要包含数据采集子程序,数据解调子程序和以太网通讯子程序。数据采集子程序通过 SPI 与 A/D 转换电路通讯,实现对阵列波导光栅输出的各通道光信号的强度数据采集;数据解调子程序将采集到的数据与预设的波长数据形成二维数组,解调后得到自由光谱范围,计算出压力大小和张力的数值;张力监控子程序负责将解调后的数据进行显示并判断,判断张力是否存在过大或过小的情况控制报警器报警;以太网通讯子程序将用户在上位机输入的命令或解调程序计算的数据进行下发或上传。

5 实验及结果分析

5.1 实验平台搭建

基于光纤传感的带式输送机张力检测实验平台是由手动液压泵、液压回路、三通阀、数字压力表、光环形器、阵列波导光栅、光源和光谱仪等构成,其示意图如图 12 所示。通过手动液压泵来调节液压回路中的压力大小来模拟带式输送机张紧装置中张紧油缸中的压力;通过 HC-YS60 数字液压表来测量实际中液压回路中的液压压力;将法珀腔传感头通过螺纹连接的方式接入到液压回路中。光源发出的光信号经过光环形器入射到法珀腔传感头中;法珀腔传感器的反射光经过光环形器入射到阵列波导光栅;通过光谱仪对阵列波导光栅的输出光进行采集。

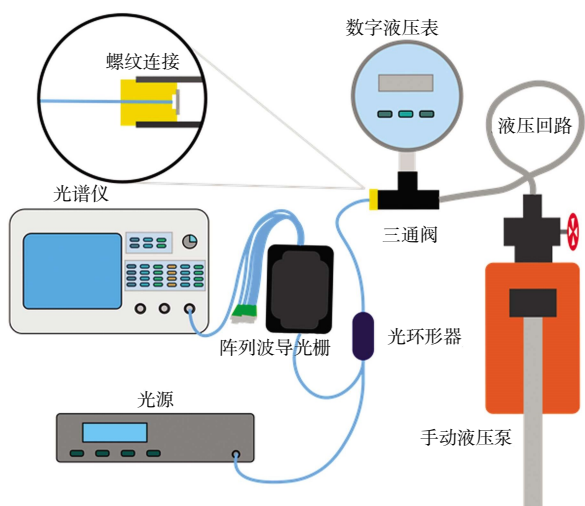


图 12 实验平台示意

Fig.12 Schematic diagram of experimental platform

5.2 实验结果及分析

通过光谱仪测量阵列波导光栅 AWG 分别输出光谱各个通道与直接测量光环形器 Port3 光谱数据如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,反射光经过阵列波导光栅之后各通道的光谱数据与法珀腔传感头的反射光谱存在关系,因此通过多通道的阵列波导光栅能够测量出反射光谱。采用 16 通道阵列波导光栅进行实验测得的自由光谱范围如图 14 所示,16 通道阵列波导光栅在 25 °C 的测量范围为 1 546.133~1 558.192 nm,各通道波长差 $\Delta\lambda = 0.8$ nm,由于其最大波长测量范围为 12.8 nm,小于 2 倍 25 MPa 压力的自由光谱范围,测量范围内不能完全表示出频率信息,造成解调效果差,误差过大。从法珀腔传感头的反射光谱中获得 1 542.937~1 560.614 nm 范围内 32 个强度数据,来模拟 32 通道

阵列波导光栅,其解调后的自由光谱范围如图 14 中所示,拟合直线参数如表 1 所示。

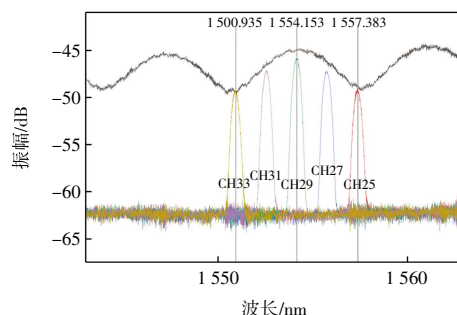


图 13 检测系统输出光谱

Fig.13 Output spectrum of detection system

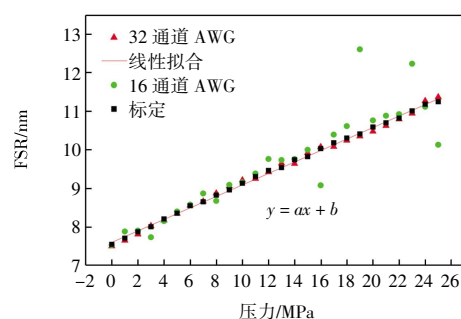


图 14 阵列波导光栅实验结果

Fig.14 Experimental results of array waveguide grating waveguide gratings

表 1 32 通道 AWG 线性拟合参数

Tab.1 Linear fitting parameters of 32 channel AWG

a	b	R^2	残差平方和
0.148	7.59	0.995	0.159

传感器的灵敏度是判断传感器性能的重要指标之一^[19],其中灵敏度为所测量到的光谱数据中自由光谱范围变化量与压力的比值,当压力与光谱中自由光谱范围呈线性关系时,其灵敏度的大小为线性方程的斜率,即本文中所制备的光纤传感器的灵敏度为 0.148 nm/MPa。 R^2 拟合优度是指回归直线对观测值的拟合程度, R^2 的值越接近于 1 说明传感器的线性度越好。本文提出的法珀腔传感头及其解调方法的线性度达到了 0.995,线性度好。

传感器的分辨率是指能够测量到最小压强变化,为避免测量过程中由于压力表测量所带来的测量误差,连续测量 0 MPa 下的自由光谱范围,取测量数据的标准差 0.002 86 nm 作为系统测量误差^[20],得到传感器所能测量的最小压力为 19 kPa,即传感器的压力分辨率为 19 kPa。压力测量精度为 0.1%。

相比目前带式输送机采用的 1%精度的 GAD 系列张力传感器测量张力的方法,本文提出的光纤传感

的带式输送机张力检测方法精度至少提高至 0.1%。与采用电压力传感器测量带式输送机张力的方法相比,本文提出的张力检测方法,具有抗电磁干扰、分辨率高、结构简单等优点,能够满足带式输送机在井下复杂环境中对张力的检测。

6 结 论

本文提出了一种基于光纤传感的带式输送机的张力检测方法,该方法将法珀腔传感头置于带式输送机张紧装置的液压回路中,液压回路的压力使法珀腔传感头的硅膜片产生形变,引起法珀腔传感头反射光变化;光电解调器光路接收法珀腔传感头的反射光后,经光路解调后得到反射光谱,通过光电解调器电路的光电转换、处理、分析后,得到反射光光谱的自由光谱范围,再根据油缸缸内部面积计算出带式输送机张力,实现了带式输送机张力检测。根据双干涉效应原理设计了法珀腔传感头,采用 Jetson Nano 嵌入式系统开发板设计了光电解调器硬件,采用 Python 语言设计了光电解调器软件。实验结果表明,该方法能够实现带式输送机张力检测,压力测量范围 0~25 MPa,灵敏度为 0.148 nm/MPa,测量精度为 0.1%,不易损坏,抗干扰性好,准确性和可靠性高。

参考文献:

- [1] ANDREJIOVA M, GRINCOVA A, MARASOVA D. Measurement and simulation of impact wear damage to industrial conveyor belts[J]. *Wear*, 2016, 368/369: 400-407.
- [2] 刘洋. 机器视觉的输送带纵向撕裂故障检测系统信号采集器的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
LIU Y. Research on signal collector of conveyor belt longitudinal tearing fault detection system based on machine vision[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2016(in Chinese).
- [3] KULINOWSKI P, KASZA P, ZARZYCKI J. Influence of design parameters of idler bearing units on the energy consumption of a belt conveyor[J]. *Sustainability*, 2021, 13(1): 437.
- [4] ZHANG M Y, ZHU H D, ZHANG W. Finite element analysis of belt conveyor bracket[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1748(6): 062047.
- [5] GIERZ Ł, WARGUŁA Ł, KUKLA M, et al. Computer aided modeling of wood chips transport by means of a belt conveyor with use of discrete element method[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(24): 9091.
- [6] 赵东升. 带式输送机自动变频张紧系统动态特性影响因素分析[J]. *煤炭技术*, 2020, 39(11): 193-195.
ZHAO D S. Influencing factors analysis on dynamic characteristics of variable frequency automatic take-up for belt conveyor[J]. *Coal Technology*, 2020, 39(11): 193-195(in Chinese).
- [7] 王亭亭. 矿用带式输送机安全监测系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
WANG T T. Research on safety monitoring system for mine belt conveyor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016(in Chinese).
- [8] 杨小林, 葛世荣, 祖洪斌, 等. 带式输送机永磁智能驱动系统及其控制策略[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2116-2126.
YANG X L, GE S R, ZU H B, et al. Permanent magnet intelligent drive system and control strategy of belt conveyor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2116-2126(in Chinese).
- [9] 揭施军, 熊晓燕, 武兵, 等. 带式输送机拉紧装置及其张力控制系统研究[J]. *工矿自动化*, 2018, 44(2): 90-95.
JIE S J, XIONG X Y, WU B, et al. Research on tension device and its tension control system of belt conveyor[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(2): 90-95(in Chinese).
- [10] 钱科. 长距离连续带式输送机自适应控制系统研究[J]. *煤矿机械*, 2021, 42(12): 57-59.
QIAN K. Study on adaptive control system of long distance continuous belt conveyor[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(12): 57-59(in Chinese).
- [11] 李曼, 申俊杰, 赵坤. 矿用带式输送机安全性能检测仪设计[J]. *工矿自动化*, 2018, 44(12): 24-29.
LI M, SHEN J J, ZHAO K. Design of safety performance detector for mine-used belt conveyor[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(12): 24-29(in Chinese).
- [12] 张宏明, 王文, 寇子明. 长距离带式输送机液压绞车自动张紧装置设计[J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(8): 78-80.
ZHANG H M, WANG W, KOU Z M. Design on hydraulic winch automatic tension device of long distance belt conveyor[J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(8): 78-80(in Chinese).
- [13] 曾飞, 欧宏日, 黄书伟, 等. 基于 LabVIEW 的带式输送机动态特性参数监测系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2021(12): 87-91.
ZENG F, OU H R, HUANG S W, et al. Dynamic characteristic parameter monitoring system of belt conveyor based on LabVIEW[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(12): 87-91(in Chinese).
- [14] 宋娜. 基于机器学习算法的光纤 FP 压力传感器测量方法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
SONG N. Research on measurement method of fiber optic Fabry-Perot (FP) pressure sensor based on machine learning algorithm[D]. Jinan: Shandong University, 2021(in Chinese).
- [15] 赵雷, 陈伟民, 章鹏. 光纤法布里-珀罗传感器光纤端面反射率优化[J]. *光子学报*, 2007, 36(6): 1008-1012.
ZHAO L, CHEN W M, ZHANG P. Optimization on end reflectivity of fiber optic F-P sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*,

- 2007, 36(6): 1008–1012(in Chinese).
- [16] SHI J, YANG F, XU W, et al. High-resolution temperature sensor based on intracavity sensing of fiber ring laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(7): 2010–2014.
- [17] 吴映. 光纤法-珀传感器解调算法研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- WU Y. Research and implementation of the demodulation algorithm for fiber Fabry-Perot sensors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021(in Chinese).
- [18] 孟建兴. 带式输送机液压张紧装置设计和控制研究[J]. *机械管理开发*, 2021, 36(3): 54–56.
- MENG J X. Research on design and control of hydraulic tensioning mechanism of belt conveyor[J]. *Mechanical Management and Development*, 2021, 36(3): 54–56(in Chinese).
- [19] 周宁. 强度调制型光纤压力传感器设计与研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- ZHOU N. Design and research of intensity modulation fiber optic pressure sensor[D]. Taiyuan: North University of China, 2020(in Chinese).
- [20] 白浪, 郑刚, 张雄星, 等. 调频连续波光纤压力传感器及其测量特性分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0328002.
- BAI L, ZHENG G, ZHANG X X, et al. Optical fiber pressure sensor based on frequency-modulated continuous-wave and analysis of its measurement characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0328002(in Chinese).

本文引文格式:

- 苗长云, 张豫飞. 基于光纤传感的带式输送机张力检测技术研究[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(4): 67–74.
- MIAO C Y, ZHANG Y F. Research on tension detection of belt conveyor based on fiber optic sensing [J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(4): 67–74(in Chinese).

(上接第 59 页)

- taset for scene text detection and recognition[C]//2017 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). Kyoto, Japan:IEEE, 2017: 935–942.
- [24] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, USA:IEEE, 2016: 770–778.
- [25] LIU Z, LIN Y T, CAO Y, et al. Swin Transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows[C]//2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Montreal, Canada:IEEE, 2021: 9992–10002.
- [26] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y Q, et al. Going deeper with convolutions [C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Boston, USA:IEEE, 2015: 1–9.
- [27] HUANG L C, YANG Y, DENG Y F, et al. DenseBox: Unifying landmark localization with end to end object detection [EB/OL]. [2015–09–15]. <http://arxiv.org/abs/1509.04874>
- [28] XUE C H, LU S J, ZHANG W. MSR: Multi-scale shape regression for scene text detection[EB/OL]. [2019–01–19]. <http://arxiv.org/abs/1901.02596>
- [29] ZHANG S X, ZHU X B, YANG C, et al. Adaptive boundary proposal network for arbitrary shape text detection [C]//2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Montreal, Canada:IEEE, 2021: 1285–1294.
- [30] LIU Y L, SHEN C H, JIN L W, et al. ABCNet v2: Adaptive bezier-curve network for real-time end-to-end text spotting[EB/OL]. [2021–05–21]. <http://arxiv.org/abs/2105.03620>
- [31] DAI P W, ZHANG S Y, ZHANG H, et al. Progressive contour regression for arbitrary-shape scene text detection[C]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Nashville, USA:IEEE, 2021: 7389–7398.

本文引文格式:

- 耿磊, 李嘉琛, 刘彦北, 等. 基于链接关系预测的弯曲密集型商品文本检测[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(4): 50–59, 74.
- GENG L, LI J H, LIU Y B, et al. Text detection of curved and dense products based on link relationship prediction [J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(4): 50–60(in Chinese).