

Research on Temperature Sensor based on Optical Fiber Coupling Light Powered

Cheng Pengfei Pan Jinyan* Zhang Bo

North China University of Science and Technology, Tangshan

Abstract: A temperature sensing measurement scheme based on fiber-coupled light-powered conversion probe is proposed. The sensing probe is powered by a 20 mW semiconductor laser with stable fiber transmission, which improves the coupling efficiency of the light source and the fiber. The optical drive and detection signals are isolated by optical fiber. The sensor probe has the characteristics of high voltage resistance and electromagnetic interference resistance, and the power consumption is less than 2.0 mW. Experiments have verified the feasibility of measuring temperature, high current and other parameters with this method. The developed instrument has higher detection sensitivity and accuracy.

Key words: Sensing probe; Optical fiber transmission; Temperature sensing; High precision

Received: 2020-07-03; Accepted: 2020-07-13; Published: 2020-07-21

基于光纤耦合光推动式温度传感器的研究

程朋飞 潘金燕* 张 博

华北理工大学, 唐山

邮箱: panjinyan@ncst.edu.cn

摘 要: 提出一种基于光纤耦合光推动式转换探头的温度传感测量方案。传感探头采用光纤传输稳定的 20 mW 半导体激光器供电, 提高了光源和光纤耦合效率。光推动和检测信号均采用光纤隔离, 传感探头具有耐高压, 抗电磁干扰能力特性, 功耗小于 2.0 mW。实验验证了用该方法实现的温度、高电流等参数测量的可行性, 研制的仪器具有较高的检测灵敏度和精度。

关键词: 传感探头; 光纤传输; 温度传感; 高精度

收稿日期: 2020-07-03; 录用日期: 2020-07-13; 发表日期: 2020-07-21

Copyright © 2020 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1 引言

光电器件和光纤产业的发展,使得光纤技术系统既可以作为光信息的传输媒介,又可以作为光功率传输系统[1][2]。光纤的功率在远距离传输的过程中,具有功耗低、输出的信号稳定性好、信号不失真等性质[3]。基于光纤的功率远距离传输性质研制各种形式的光推动装置,必将带来不同的特性优势,也有利于促进纤维光学和电子学器件的发展。

光推动式温度传感器,将探头端与信号处理的仪器端用光纤隔离,既保证了电传感技术中的高精度和高分辨力,又有光学传感的强电磁场的抗干扰能力,是一种可实用化的光纤传感新技术[4][5]。这类传感器采用光纤连接转换探头与信号处理单元相结合,优势在于测量特殊环境下的各类参数:(1)转换探头是由光传输能量供电,且探头电路低功耗,保证了易燃易爆工作情况下参数测量的安全性,非常适合于实现石油、化工、天然气物位、液位等参数在线测量[6]。(2)测量端的转换探头与信号处理端用长光纤连接,由于光纤具有高强度电绝缘性,使该类传感器可以胜任超高压电力系统的运行参数如电流、电压及开关柜温度等的在线测量[7]。(3)某些病理检查,化疗和生物体状态测量中可以利用光纤供电传感器的微电场、微功耗特性,以避免影响被测场和产生生物电场效应[8]。

光推动技术结合了微功耗信号检测和特殊的调制技术,探头与二次仪表之间只有长光纤相连的探头为光输入和光输出,对外可以视为“全光学”式的,这样既保证了常规电传感器的精度,又充分利用了光纤的功率与信号长距离传输的优势,开辟了一种混合式光电检测新领域[9][10]。

光供电系统适于电阻、电容、可测参数包括温度、力(压力、流量、流速、振动)、微位移等。传感系统主要由三部分组成,传感器的供电部分即光纤耦合的光功率通道,探头端的参数测量以及电光信号的变换,测量信号的光纤传输及处理部分,整体结构组成如图1所示。

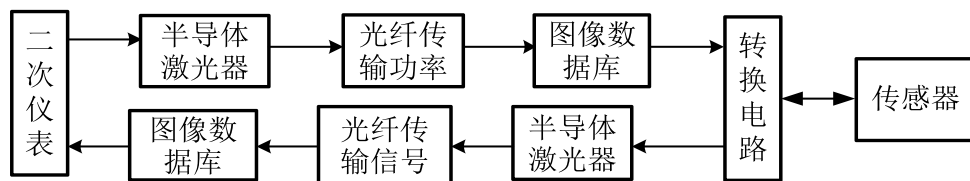


图1 光供电式传感器的整体结构

Figure 1 The overall structure of the light-powered sensor

2 供电系统的选择

光转换电源的特点是光信号转换成电信号，它是温度敏感元件、温度传感器正常工作的保证。电源设计必须满足以下要求：一是无间断地长时间稳定工作，并且满足电子线路的对功率的要求；二是抗干扰能力强，可以适应恶劣的工作环境。激光供电具有结构简单、绝缘性能好、工作可靠性高、抗干扰性强等优点，近几年应用日益广泛 [11] [12]。激励光通过光纤传送至探头端，光电二极管使光信号转换成电信号，为有关的功能电路供电。

2.1 激光供电原理

低压侧的电源经光电转换器把电信号转为光信号驱动激光器发光，经光纤传至光电转换器将光信号转为电信号，电信号再经 DC/DC 直流升压变换器输出稳定的直流电压，供给测量系统的各电路工作电源，实现激光供电。

2.2 激光供电电路组成

激光供电系统主要由激光器、激光驱动电路、光纤、光电转换器、光电池、DC/DC 变换器、自动温度控制电路、监测反馈回路组成如图2所示。

(1) 激光器。向高压侧光电转换器发送光能。

(2) 激光驱动电路。由于激光器是低压工作器件，容易受到静电或电流变化的影响而损坏，为了保护激光器，电路采用限流，防止浪涌冲击的恒流驱动。

(3) 光纤。作为高压侧与低压侧间传输电能的媒介，在可靠传输的同时有效保证了高压及低压两侧二次设备的可靠绝缘。

(4) 自动温度控制电路。激光器的发光波长和输出功率随着温度变化而变化，因此为了系统的稳定工作，采用了半导体制冷技术，使光功率及波长稳定，同时延长了激光器的使用寿命。

(5) 监测反馈回路。通过监测远程单元的工作电流来自动调节激光器的功率，以获得适当的输出光能，如在冬季低温时，可以自动调低激光器的输出功率，延长激光气的工作寿命。

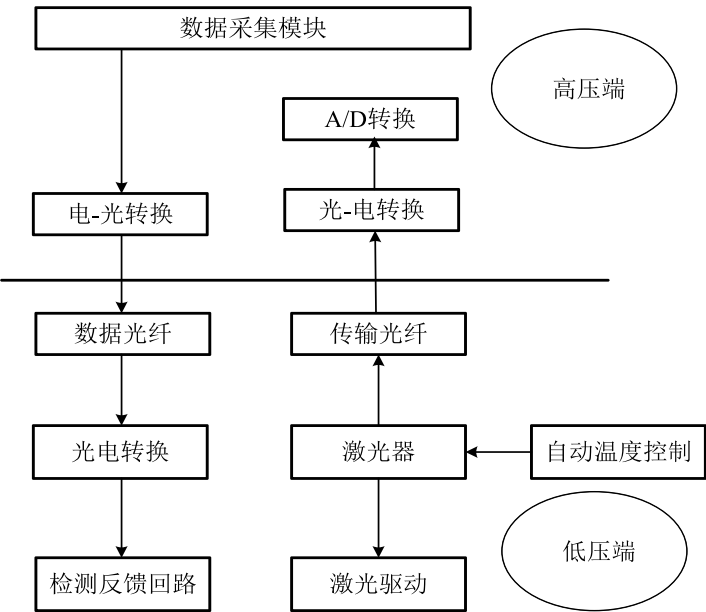


图 2 激光供电系统图

Figure 2 Laser power supply system diagram

3 光推动式温度传感器

温度在很大程度上决定了石英谐振器的振荡频率，因此可以利用这一特性，使石英谐振器的振荡频率变高，然后将此振荡频率的变化变成线性或接近线性关系制成温度传感器，其灵敏度非常高。阻抗匹配和带宽在构造石英谐振器时是必须考虑的，接入到系统中的光缆必须是整数波长。为了把时间信号变换成频率信号，仪器内必须设置一个有温度补偿的震荡电路。由于仪器输出的频率很高，必须先用计数器分频，再选用合理的闸门时间测频，由闸门时间内的溢

出次数和计数结果来确定频率大小，将计算好的频率转换成温度后，进行温度显示和打印。

光功率驱动传感器大多使用半导体激光二极管（LD）通过大芯径、大数值孔径和低损光纤驱动电传感器工作，并做远距离光信号发送。光驱动温度传感器的系统框图如图 3 所示，它由五部分组成：光源驱动端、光信号传输端、光—电信号处理端、电—光信号传输端和数据显示模块，它们组成一个自激反馈闭环系统。

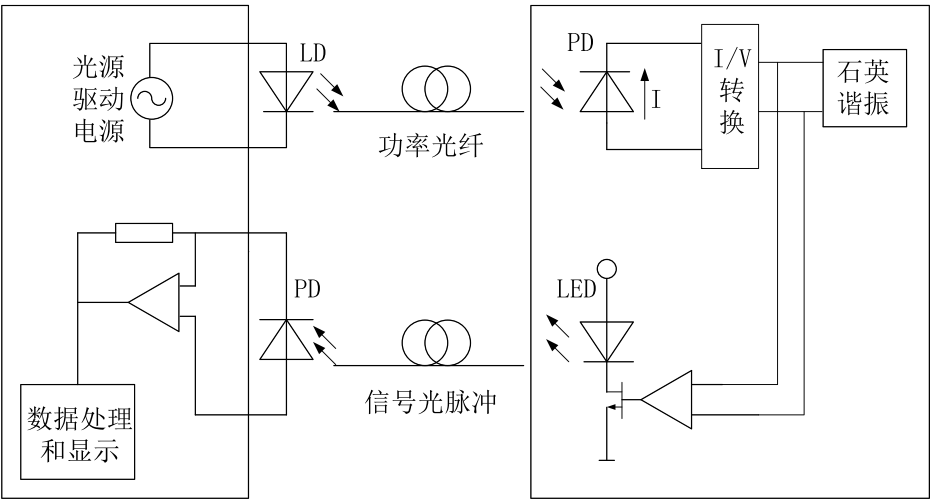


图 3 光推动温度传感器的系统框图

Figure 3 Optical powered temperature sensor system block diagram

其中仪表控制单元由光源驱动端和数据显示模块，先后两次的光信号传输端为光纤耦合单元，测温传感端由石英振荡器组成，此三个单元组成整个光推动温度传感器系统。振荡频率取决于温敏传感探头中石英晶体的谐振频率，表示被测温度大小的振荡频率由锁相环跟踪输出[13]，该系统实质上是一个温度—频率变换器。

锁相环的输出频率由系统振荡频率决定，LD 具有光反馈电路，在反馈电路中由 I/V 变换器，电压信号与锁相环输出信号比较后传到 LD 驱动电路上，反馈极性要保证为负。光源由 LD 耦合进光纤中的光功率，由光纤分光器将其 1/10 的光功率做反馈光。

3.1 石英谐振器的选择

石英晶体谐振器（简称石英晶体）由于其高品质因数（Q值）、高稳定性、小尺寸和低成本作为优良的频率选择与控制器件，用途极为广泛，现正向高基频、高性能、高可靠和微小型化方向发展 [14] [15]。

石英晶体谐振器频率会随着力（或应力）和其他因素的改变而改变。其中温度因素最明显，而且频率与温度的函数式可以用三次多项式来形容。在进行石英谐振器力敏特性的应用研究时发现，谐振器的频率—温度特性曲线对应的各次项系数（即频率温度系数），除与谐振器的取向有关外，还与谐振器所处的环境气氛及边界条件有关。谐振器频率温度系数的改变，使频率—温度特性曲线的重复性变差，影响谐振器的开发应用。现从实验的角度，研究分析石英晶体谐振器频率温度系数与环境条件的关系。石英谐振器的频率—温度特性可以表示为三次多项式 [16]：

$$f(t) = f_0 [1 + T_f^{(1)} (t - t_0) + T_f^{(2)} (t - t_0)^2 + T_f^{(3)} (t - t_0)^3] \quad (1)$$

式中： f_0 为温度 t_0 时的谐振频率， $T_f(n)$ ($n=1, 2, 3$) 为石英谐振器的 n 阶频率温度系数。对 AT 切石英谐振器，在理想状态及最佳切角 θ_0 ($\approx 35.25^\circ$) 附近，频率温度系数可近似为

$$T_f^{(1)} = [-5.15 \times 10^{-6} (\theta - \theta_0)] / (^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$T_f^{(2)} = [0.4 \times 10^{-9} - 4.7 (\theta - \theta_0)] / (^\circ\text{C})^2 \quad (2)$$

$$T_f^{(3)} = [1.095 \times 10^{-10} - 2 (\theta - \theta_0)] / (^\circ\text{C})^3 \quad (3)$$

式中： θ 为晶片平面与晶体光轴（Z轴）的夹角，单位为 ($^\circ$)。当 $F_T^{(2)} = F_T^{(3)} = 0$ ，即选用的石英晶体切割取向与晶轴夹角为 $\Phi = 8^\circ 44'$ ， $\theta = 13^\circ$ ，晶体的平均频率温度系数 $F_{r1}(T) > 60 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 时，灵敏度越高，温度—频率转换的直线性越好。

3.2 光推动温度测量探头设计

石英晶体的测温敏感元件具有低功耗、高阻抗的性能，是一高 Q 值的谐振回路，而且谐振频率是温度的函数，由于输入端和信号输出端的阻抗很高，故消耗功率可以忽略不计。光驱动温度测量探头电路如图 4 所示。

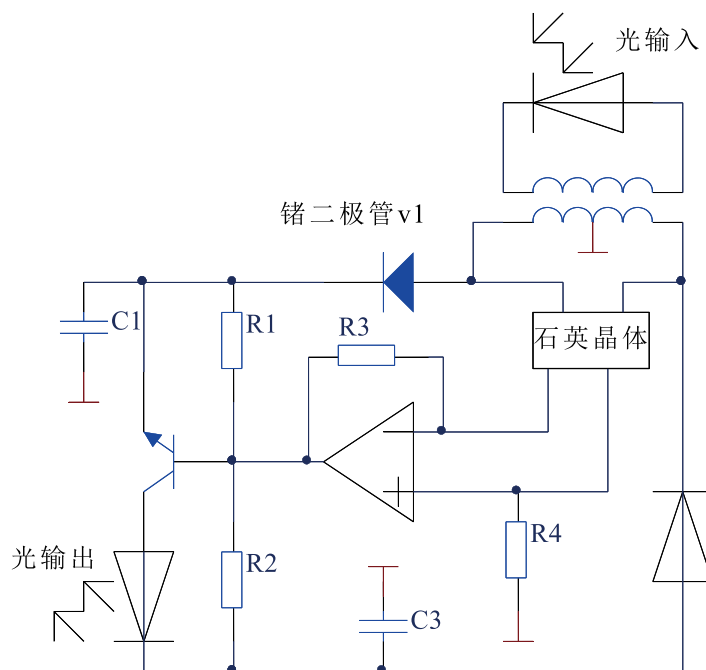


图 4 光驱动温度测量探头电路

Figure 4 Optical powered temperature measurement probe circuit

探头电路的微功耗除了取决于 PPM 调制外,选用的电路有源元件均由微功耗线性集成片和 CMOS 数字集成片组成。如每只运算放大器最小静态电流 $1.2 \mu\text{A}$,稳压器 $4 \mu\text{A}$,带隙参考二极管 $8 \mu\text{A}$,三端参考结补偿集成片 $1 \mu\text{A}$,电路的静态和动态平均电流只有 $27 \mu\text{A}$,功耗小于 $84 \mu\text{W}$ 。

LD 的光通过光电管 (PD) 做光电转换,光源发出的光由光纤远距离传输进探头,探头在光电管内,光电管的负载是变压器 TP。当 PD 在光的照射下有电流经过时,PD 的光电源会产生 2V 的电压。电压在 TP 次级的两个半绕组上,经过整流后给探头电路供电。当 PD 无光照时,它截止,此时由于 TP 的电流不能发生突变,那么会在次级两端得到 $\pm 20 \text{V}$ 对地峰值的电压,石英晶体会在感应脉冲的激励下使探头工作。相应的光功率和电压波形图见图 5。系统的振荡波形是一种脉冲光,光的占空比为 10%,在 $63 \mu\text{s}$ 内持续发光,当时间为 $70 \mu\text{s}$ 时截止。在 PD 的光照期内,形成的正向电压较低,源阻抗很低的,特别适合低阻电子电路供电用。在 PD 截止期内,形成的反向感应电压很高,源阻抗大,持续

期短，输出功率很小，但适于驱动石英晶体负载。

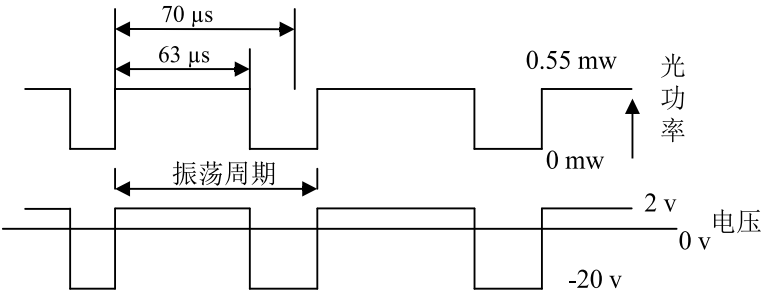


图 5 光功率和变压器输出电压波形

Figure 5 Optical power and transformer output voltage waveform

一级运放、一级发光二极管（LED）组成探头电子驱动电路，该电路具有很小的静、动态功耗，静态功耗由一级运放决定，选用微功耗可编程运算放大器，放大器的静态电流最小可调至 $1\text{ }\mu\text{A}$ ，静态功耗仅为 $2.6\text{ }\mu\text{W}$ 。为保证很大的带宽，选用静态电流和静态功耗分别为 $60\text{ }\mu\text{A}$ ， $156\text{ }\mu\text{W}$ 。

另外，由于晶体谐振有较低的频率，电子电路有很小的动态功耗，静动态功耗之和仅为 $186\text{ }\mu\text{W}$ 。射级跟随器为驱动级，驱动级输出电压为 0.5 V ，一级发光二极管被调制在晶体谐振频率上，整个探头电子线路的总功耗为 $300\text{ }\mu\text{W}$ ，具体电功耗实验数据见表 1。

表 1 探头电路功耗表

Table 1 Probe circuit power consumption table

元件	功耗 / μW	百分比 / %
整流二极管	59	19.7
LED 及驱动	55	18.3
运算放大器	186	62.0
合计	300	100

LD 耦合光纤中的光功率约为 2.2 mW ，在 0.5 km 光纤传输的过程中约有 0.88 mW 的光功率损耗在 PD 上，转换成光电流为 0.5 mA ，相应电功率约为 0.5 mW （PD 正向电压约 1 V ），满足驱动微功耗探头工作的要求。为了减小误差，使系统可靠得工作，驱动距离应小于 0.5 km 。

选用双异质结 GaAlAs 激光二极管为 LD，当其平均电流为 40 mA 时，出纤功

率为 3 mW。选用光纤的芯径为 200 μm ，数值孔径为 0.4 的阶跃折射率分布的玻璃光纤，优点是损耗小于 3 dB/km，选用硅发光二极管为探头中的发光二极管。

4 结论

提出的光纤传输光供电式传感技术分别实现了强磁场、复杂环境下的温度的精确测量。温度传感器采用了石英晶体测温技术，具有分辨率和灵敏度高等特点。利用以上传感技术优势的同时，引入光纤传输技术，实现了强磁场、远距离下温度、电流测量。光推动光电混合式光纤传感器不仅利用了现有的传感测量技术，同时有效利用了光纤的绝缘性强、抗干扰性好等优点。

基金项目

国家自然科学基金资助项目（61771419）；河北省自然科学基金资助项目 F2019209323，F2019209443）；唐山市科技计划项目（18130204a）。

参考文献

- [1] 郑国权, 唐悦, 刘宣. 基于光纤技术的电能信息采集系统设计 [J]. 激光杂志, 2020, 41 (5): 173-177.
- [2] 王玉田, 程朋飞, 杨哲, 等. 基于光束传播法的偏芯光纤传输特性研究 [J]. 燕山大学学报, 2015, 39 (2): 107-113.
- [3] 黄艳. 高斯-谢尔脉冲在单模光纤中的传输特性研究 [J]. 激光技术, 2019, 43 (6): 841-845.
- [4] Yang F, Zheng Z, Lin Z, et al. Visible-light-driven room-temperature gas sensor based on carbyne nanocrystals [J]. Sensors and Actuators: B. Chemical, 2020: 316. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128200>
- [5] 赵勇, 王敏, 高文旗, 等. 分布式光纤传感新技术在盾构隧道结构变形监测中的应用 [J]. 公路, 2017, 62 (7): 326-329.
- [6] 胡艳玲, 商凤凯, 程朋飞, 等. 基于光纤探头的辐射式温度测量系统的研究 [J]. 燕山大学学报, 2018, 42 (6): 547-551.

- [7] 田恺. 时分 / 波分复用光纤传感系统及其关键技术研究 [D] . 北京交通大学, 2018.
- [8] Irawati N, Hatta A M, Yhuwana Y G Y, et al. Heart Rate Monitoring Sensor Based on Singlemode–Multimode–Singlemode Fiber [J] . Photonic Sensors, 2019: 1–8. <https://doi.org/10.1007/s13320-019-0572-7>
- [9] Matsuura M, Sato J. Bidirectional Radio–Over–Fiber Systems Using Double–Clad Fibers for Optically Powered Remote Antenna Units [J] . IEEE Photonics Journal, 2015, 7 (1) : 1–9. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2381669>
- [10] 严冰. 光推动 PCB–Rogowski 探头的光电式电流传感器的研究 [D] . 燕山大学, 2016.
- [11] 王传川, 白世军, 李毅, 等. 低温环境下电子式电流互感器激光供电情况的分析与研究 [J] . 高压电器, 2020, 56 (5) : 135–142.
- [12] 严雪飞, 朱长青, 石科仁, 等. 脉冲电场测试中的激光供电技术 [J] . 发光学报, 2019, 40 (2) : 264–271.
- [13] Chen F, Gao J, Tian W. Corrigendum to “Force–frequency characteristics of multi–electrode quartz crystal resonator cluster” [J] . Sensors & Actuators: A. Physical, 2018, 269 (1) : 427–434.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.12.002>
- [14] Bau M, Ferrari M, Ferrari V. Quartz Crystal Resonator Sensor With Printed–on–Crystal Coil for Dual–Harmonic Electromagnetic Contactless Interrogation [J] . IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2020, 67 (4) : 883–886.
<https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2956814>
- [15] 李宇. 多边形电极石英晶体谐振器的振动分析 [D] . 南京航空航天大学, 2019.
- [16] Sugimoto Y, Onoda J. Force spectroscopy using a quartz length–extension resonator [J] . Applied Physics Letters, 2019, 115 (17) : 1–4.
<https://doi.org/10.1063/1.5112062>