

直接空冷凝汽器 DTS 测温技术优化研究

贺金鑫

西安智源电气有限公司, 陕西 西安 710054

DOI:10.61369/EPTSM.2026050005

摘 要 : 分布式光纤测温 (DTS) 技术, 凭借抗强电磁干扰、全分布式无盲区的独特优势在直接空冷凝汽器设备上得到广泛应用。然而现有的 WDM 方案存在易损伤、测不准、误报率高的缺点使其实用性大打折扣。本文将探讨引入石英棱镜分光/合光模块, 替代或协同传统 WDM, 实现拉曼散射中反斯托克斯 (约 1530 nm) 与斯托克斯 (约 1570 nm) 波长的精准分离/合并, 核心目标是提升波长隔离度、降低串扰、增强系统鲁棒性, 对直接空冷凝汽器 DTS 测温技术进行优化。

关 键 词 : 光纤测温; 石英棱镜; 拉曼散射; 信噪比; 线性度

Optimization Research on Temperature Measurement Technology for Direct Air-Cooled Condensers (DTS)

He Jinxin

Xi'an Zhiyuan Electric Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054

Abstract : Distributed Thermal Sensing (DTS) technology has found widespread application in direct air-cooled condenser systems due to its unique advantages of resistance to strong electromagnetic interference and full distribution without blind spots. However, existing WDM solutions suffer from drawbacks such as susceptibility to damage, measurement inaccuracies, and high false alarm rates, significantly compromising their practicality. This paper investigates the introduction of a quartz prism spectrometer module to replace or complement traditional WDMs, enabling precise separation and combination of anti-Stokes (approximately 1530 nm) and Stokes (approximately 1570 nm) wavelengths in Raman scattering. The primary objectives are to enhance wavelength isolation, reduce crosstalk, improve system robustness, and optimize DTS performance for direct air-cooled condensers.

Keywords : fiber optic temperature measurement; quartz prism; raman scattering; signal-to-noise ratio; linearity

引言

“一根光纤感知全域温度”的 DTS 技术, 核心为 2 种物理原理: 一种是通过测量激光脉冲在光纤中传输的往返时间, 计算出散射点位置, 实现空间定位的光时域反射原理, 另外一种是通过计算反斯托克斯光 (Anti-Stokes, 约 1530 nm)、斯托克斯光 (Stokes, 约 1570 nm) 两者强度的比值, 获得精确温度的拉曼散射原理。在每一个散射点的位置上都标记出温度, 这就是传统意义上的直接空冷凝汽器 DTS 测温场。但是实际应用中光纤易受机械破坏, 风机振动导致散射点移位, 断裂点后数据大范围丢失, 信号传播被距离限制等因素导致的测温场不准确、误报警、易损伤、难维修的问题降低了 DTS 技术的可信度。

现有的 WDM (Wavelength Division Multiplexing) 方案为: 多个激光器 (一般为 5~10 个) 在一条光纤上同时发送多束不同波长的激光, 在发送端经复用器 (亦称合波器, Multiplexer) 汇合在一起, 并耦合到光线路的同一根光纤中进行传输; 在接收端, 经解复用器 (亦称分波器或称去复用器, Demultiplexer) 将各种波长的光载波分离, 然后由光接收机作进一步处理以恢复原信号。根据其物理学原理, 存在的本质问题为: 因空冷岛温度变化范围是较大的, 以内蒙古自治区为例, 冬季检修停机期间温度最低可到 -30°C , 夏季温度最高可达 70°C , -30°C 到 70°C 的温度范围内, 在光纤的形变量并非和温度是线性相关的。光学元件热胀导致波长偏移, 长期稳定性变差。多通道和多波段易混叠, 温度场重构失真。还有光纤展宽限制, 空间分辨率下降等问题。虽然可以使用多根测温光缆增加分辨率, 但是会增加重构温度场的难度。因此在实际实施过程中, 很少采取多跟光缆重复测量同一区域温度场的方案。

本文提出利用光学元件石英棱镜优化 DTS 技术的实际使用效果。

一、技术原理

在光学领域，利用石英棱镜的色散特性（折射率随波长变化），不同波长的光在棱镜主截面内折射角不同，实现空间分离。通过反向光路，将分离后的不同波长的光沿原路径汇聚，恢复为复合光。

角色散率公式：

$$D = \frac{dn}{d\lambda} * \frac{2 \sin(A/2)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(A/2)}}$$

A 为棱镜顶角，n 为石英折射率。

加入石英棱镜，使得光纤测温信噪比与线性度优化，技术路线为：激光→传感光纤→背向散射光→准直→石英棱镜色散→聚焦→AS/S（Anti-Stokes、Stokes）分别探测。

AS/S 分别探测、完全分离，光强比更准，解决串扰问题。其次弱信号得到增强，AS（弱信号）无干扰，测温下限与分辨率提升，分辨率可以由 0.1℃ 精确到 0.05℃。石英棱镜无波长漂移、无老化，比滤光片 /FBG 稳定性高一个量级，在 -40 ~ 300℃ 的温度区间内解调曲线更线性。石英棱镜色散环节，棱镜组可做预色散，抵消部分光纤色散，压缩脉冲，提升空间分辨率。

解决温度测不准的问题，稳定性得到优化。石英棱镜和玻璃基座的热膨胀系数低（约为 $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ），热失配小。增加的石英棱镜分光波长、透过率、光路指向不变，符合空冷岛温度测量的稳定性要求。长期零点漂移 <0.01℃/h，适合长期连续温度场监测。

因此从技术原理角度去考虑，DTS 技术中加入石英棱镜，使得光纤测温信噪比与线性度得到优化，解决串扰问题，减少弱信号干扰，测温分辨率提升 50%，解决温度测不准和长期使用的要求，是完全正向的技术，值得推广。

二、插入的石英棱镜技术要求

（1）工作波长在 1450 到 1700 之间，需要覆盖反斯托克斯光和斯托克斯光。

（2）选用熔融石英材质。经查证熔融石英在紫外至红外的波长区间内高透光，完美覆盖 DTS 所需要的拉曼波段。

（3）石英棱镜的顶角最适宜为 60 度。透光孔径需要不少于 5 纳米，入射角和出射角均在布鲁斯特角附近，减小反射损耗。

（4）石英棱镜的热膨胀系数低、热光系数小。减少温度变化产生的光路漂移。

（5）选用非晶态结构。具备耐侵蚀、低散射的特点。

三、系统架构和关键参数优化

（一）系统架构

分为四个部分，发射端合光部分、传感传输部分、接收端分光部分、信号处理部分。分管激光发射、光纤传感、光信号处

理、温度解析。

1. 发射端合光部分介绍

发射端合光是将脉冲泵浦光、校准补偿光等多波长光信号整合到单一同轴光束。通过传感光纤，减少多波长信号之间的串扰问题，保障发射端光信号的纯净性、一致性。激光驱动单元提供精准时间顺序，脉冲激光器输出高稳定性（1064 纳米）泵浦光，利用校准光模块进行输出补偿光，确保光信号发射与后续接收的顺序一致。

脉冲激光源采用窄线宽的激光器，输出能量稳定、线宽符合 DTS 传感技术要求的光信号。校准光模块配套适配波段为 1000 到 1065 纳米，提供基准的参考信号，用于系统温漂校准和误差补偿。石英棱镜合光部分的核心是熔融石英等边三棱镜。双面镀宽带增透膜，单表面反射率不大于 0.2%。多波长的光信号经校准和补偿后，以最小入射角射入棱镜。主要技术原理是利用熔融石英的色散特性完成波长的偏差补偿，最终实现多光束同轴合光输出，合光效率高，波长串扰得以解决。

最后利用光纤准直器优化合光后的光斑质量，通过聚焦耦合镜将合光输入单模传感光纤，降低耦合损耗。

2. 传感传输部分

光信号传输部分需要采用高灵敏度单模传感光纤。具有低损耗、抗干扰特性，支持百米至数十公里级传感距离。发射端合光后的泵浦光注入传感光纤后产生拉曼散射，反向散射的光信号包含 1064 纳米波段的瑞利光、1010 纳米波段反斯托克斯光 AS、1120 纳米波段斯托克斯光 S，反向传输至接收端分光部分。

3. 接收端分光部分

接收端分光是将传感光纤反向传输的瑞利光、反斯托克斯光、斯托克斯光这三种光信号进行高精度空间分光，区分波段，减少光信号之间的串扰。

反向传输光首先经接收准直器准直为平行光，再通过狭缝光阑抑制杂散光与平衡噪声，提升输入光信号的信噪比。

石英棱镜分光的核心器件与合光组件同源，为熔融石英等边三棱镜。平行光射入棱镜后，利用石英材料的色散特性，将瑞利光、反斯托克斯光、斯托克斯光三波长光信号在空间中精准分离，实现无串扰分光。分光后三波段光信号透过率不小于 99%，串扰不大于 -40dB。分离后的三波段光信号分别经过独立聚焦透镜聚焦，精准耦合至 APD 探测器阵列的三个探测通道（通道 1 对应反斯托克斯光、通道 2 对应斯托克斯光、通道 3 对应瑞利光），完成光信号到电信号的转换，为后续信号处理提供基础的电信号。

4. 信号处理与主控子系统

实现系统全流程时间顺序控制、电信号处理、温度解算及误差补偿，保障 DTS 系统测温的高精度、高稳定性与实时性。

主控单元（FPGA/MCU）：作为系统核心控制中枢，同步处理发射端激光的发射和接收端部分信号采集。精准控制脉冲发射

的频率、采集时序，同时协调发射端和接收端各个模块的工作，确保系统协同运行。主控单元可以内置棱镜漂移补偿算法，针对石英棱镜随温度变化产生的折射率微变进行实时校准，消除温漂对分光精度的影响，长期测温稳定性每年差值低于0.05℃。

信号处理模块：包含电信号放大电路、AGC自动增益控制电路及数据转换模块，对接受端输出的微弱电信号进行放大、降噪、数据调节，将模拟电信号转换为数字信号，提升信号质量，抑制噪声干扰。

温度解算模块：拉曼比值测温原理，计算反斯托克斯光与斯托克斯光通道信号的比值，结合石英材料色散特性与环境温度的模型，解算对应温度光纤位置的温度值；同时结合瑞利光信号通道信号进行误差补偿，进一步提升测温准确性。

公式为：

$$R(T) = \frac{I_{as}(T)}{I_s} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \cdot \exp \left(-\frac{h\Delta\nu}{k_B T} \right)$$

其中：

$I_{as}(T)/I_s$ ：反斯托克斯光强与斯托克斯光强的比值

λ_s, λ_{as} ：斯托克斯光和反斯托克斯光的波长

h ：普朗克常数（ 6.626×10^{-34} Js）

$\Delta\nu$ ：石英光纤的拉曼声子频率

k_B ：玻尔兹曼常数

T ：绝对温度（单位：K）

实际温度计算公式为：

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k_B}{h\Delta\nu} \ln \left(\frac{R(T)}{R(T_0)} \right)$$

最终输出的温度分辨率不大于0.1℃，空间分辨率小于1米。

（二）关键参数优化

参数项	优化目标	设计依据
棱镜顶角 A	60°，折中色散与损耗	顶角越大色散越强，但反射损耗增加，60°为工业常用最优值
入射 / 出射角度	布鲁斯特角	降低表面反射，提升透射率至≥95%
棱镜尺寸	25 × 25 × 25 mm	兼顾光束质量与结构紧凑，适配 DTS 现场安装
棱镜对间距	50 - 100 mm（分光组） / 反向对称（合光组）	控制色散量，避免光斑重叠，保证分离精度
表面质量	平整度小于等于 $\lambda/10$	降低散射与波前畸变，提升信噪比

棱镜分光模块可采用紧凑型封装方案集成至温度场在线监测解调仪前端。方案实施的关键技术点包括：

（1）准直与聚焦系统：自聚焦透镜替代传统的球面透镜，材料更新可以实现光线准直与光线聚焦一体化，减小模块体积，满

足紧凑型封装要求；

（2）光纤阵列耦合：采用光纤阵列，纤芯间距125μm，精确定位输出光纤，确保分离后的三种光信号瑞利光、反斯托克斯光、斯托克斯光，可以实现精准耦合；

（3）紧凑型封装：全金属外壳封装，棱镜与基座之间采用弹性固定，以缓冲受到的振动冲击。

（4）系统架构更简洁：分光与合光过程具有可易性，分光模块和合光模块可同时承担分光与合光的功能，系统组件简单。

四、分光与合光流程

（一）分光流程

第一步：激光脉冲先经过准直镜进行准直，以布鲁斯特角入射第一块石英棱镜；

第二步：石英棱镜色散使反斯托克斯光和斯托克斯光产生折射角差值；

第三步：第二块石英棱镜反向补偿，将反斯托克斯光和斯托克斯光耦合入传感光纤，完成合光。

第四步：合光发射。

（二）合光流程

第一步：背向散射光返回，经准直镜入射合光棱镜模组；

第二步：棱镜色散将反斯托克斯光和斯托克斯光空间分离，分别耦合至对应探测通道；

第三步：使用环形器隔离发射与接收光路，避免信号干扰。

（三）核心优化策略

（1）采用双棱镜组抵消单棱镜色散不均匀性，提升波长标定线性度。

（2）集成温度传感器，实时校准棱镜折射率变化，保证分离精度稳定。

（3）准直镜采用熔融石英材质，减少热透镜效应，确保光斑直径稳定。

（4）棱镜表面镀高反射带通膜，增强目标波长反射与透射能力，抑制串扰。

五、与现有 DTS 技术对比

	石英棱镜方案	传统 WDM 方案
波长隔离度	≥ 30 dB（高）	20 - 25 dB（中）
插入损耗	≤ 1.5 dB	1 - 2 dB（相近）
温漂稳定性	优（热膨胀系数低）	一般（器件易温变）
抗干扰能力	强（无精密光栅）	弱（高阶衍射易杂散）
维护成本	低（结构简单、耐候）	高（光栅 / 滤光片易损）

六、总结

本次研究围绕 DTS 测温系统的精度优化问题，引入熔融石英棱镜替代传统滤光元件完成技术升级。依托熔融石英材料热膨胀系数低、温度稳定性优异的物化特性，搭配配套误差补偿算法，有效改善了川通服 DTS 设备长期存在的测温偏差问题。研究通过

精细化调试石英棱镜的安装角度，完成三路不同波长光信号的精准拆分，彻底规避光路串扰问题，显著提升系统分光精度，为设备精准测温提供核心保障。同时，该石英材质具备较高的激光损伤耐受阈值与优良的化学稳定性，能够适配空冷岛 -40℃至 85℃的全年度复杂温差工况，大幅提升测温设备的环境适配能力与长期运行稳定性。

参考文献

- [1]李明宇, 张磊, 周智. 低膨胀石英光学元件在分布式光纤测温中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(2):187-193.
- [2]王巍, 赵洪, 蔡军. 基于棱镜分光的拉曼 DTS 信噪比优化研究 [J]. 光学技术, 2021, 47(4):442-447.
- [3]姜亚军, 张旭苹. 长距离分布式光纤温度传感系统关键技术 [J]. 光学学报, 2022, 42(12):1-16.
- [4]李磊, 胡志宇. 高分辨率 DTS 系统中色散补偿棱镜组设计与分析 [J]. 光子学报, 2020, 49(7):112-119.
- [5]张在宣, 王洪海, 王剑锋. 分布式光纤拉曼温度传感系统原理及研究进展 [J]. 光学学报, 2008, 28(6):1181-1186.
- [6]刘畅, 余有龙, 李川. 基于石英棱镜分光的高精度 DTS 系统设计 [J]. 光电子·激光, 2016, 27(3):245-250.
- [7]陈勇, 杨远洪. 熔融石英棱镜色散补偿对光纤测温系统空间分辨率的提升 [J]. 中国激光, 2019, 46(5):102-108.
- [8]孙军强, 黄德修. 光纤中拉曼散射温度传感的理论实验 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [9]Heering P, et al. High-resolution distributed temperature sensing using prism-based spectral filtering[J]. Optics Express, 2018, 26(12):15467-15479. (SCI)
- [10]Zhang L, et al. Temperature field optimization of DTS with fused silica prism for power cable monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9):10678-10685. (SCI/EI)