

## 激光与光电子学进展

## 实时监测高压电线弧垂的毛细管光纤传感器

张晓东<sup>1</sup>, 朱晓亮<sup>2,3\*</sup>, 虞瑶<sup>2</sup>, 陈佳一<sup>2</sup>, 孙泽诚<sup>2</sup><sup>1</sup>杭州科技职业技术学院机电工程学院, 浙江 杭州 311402;<sup>2</sup>浙江工商大学信息与电子工程学院 (萨塞克斯人工智能学院), 浙江 杭州 310018;<sup>3</sup>富通技术研究院有限公司, 浙江 杭州 310000

**摘要** 高压输电线的弧垂是线路设计和运行的重要指标,关系到线路的运行安全,必须控制在设计规定的范围内。输电线弧垂测量是国内外电力部门和研究机构的重点研究内容。基于毛细管光纤设计了一种新型的高压电线弧垂传感器。该传感器具有模场面积大、抗电磁干扰能力强、可实时在线监测的优点。实验结果表明,当传感器的弧垂曲率半径小于 15 cm 时,监测灵敏度为 2.552 dB/cm,线性相关系数为 0.9635。传感器的弧垂曲率半径越小,弯曲程度越大,毛细管光纤传感器的灵敏度就越高。该实验现象与理论分析结果相一致,验证了其在实际应用中的可行性。

**关键词** 传感器; 高压输电线; 弧垂; 毛细管光纤; 实时监测

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0728001

## Capillary Optical Fiber Sensor for Real-Time Monitoring of High-Voltage Transmission Lines Sag

Zhang Xiaodong<sup>1</sup>, Zhu Xiaoliang<sup>2,3\*</sup>, Yu Yao<sup>2</sup>, Chen Jiayi<sup>2</sup>, Sun Zecheng<sup>2</sup><sup>1</sup>College of Mechanical and Electrical, Hangzhou Polytechnic, Hangzhou, Zhejiang 311402, China;<sup>2</sup>College of Information and Electronic Engineering (Sussex Artificial Intelligence Institute), Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;<sup>3</sup>Futong Technology Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China

**Abstract** The sag of high-voltage transmission lines is an important indicator for the lines design and operation. Moreover, it is related to the safety of the lines operation and is controlled within the range specified by the design. Transmission lines sag measurement is a key research topic for domestic and international power departments and research organizations. In this paper, a capillary fiber-based high-voltage transmission lines sag sensor is designed. The sensor has advantages of a large mode area, strong anti-electromagnetic field interference ability, and real-time online monitoring. The experimental results show that when the sag radius of the sensor is less than 15 cm, the monitoring sensitivity is 2.552 dB/cm, and the linear correlation coefficient is 0.9635. The higher the sensitivity of the capillary fiber optic sensor, the smaller the sag curvature radius of the sensor and the greater the bending degree. The experimental phenomenon is consistent with the theoretical analysis results, indicating its practical applicability.

**Key words** sensors; high-voltage transmission lines; sag; capillary optical fiber; real-time monitoring

## 1 引言

架空传输线系统可在高电压下将电能从一个点

传送到另一个点,从而进行远距离传输。随着世界人口的增加、运输技术的发展和经济的扩张,人们对电力的需求也在不断增加,导致架空线路系统超载、

收稿日期: 2021-05-13; 修回日期: 2021-06-17; 录用日期: 2021-06-19

基金项目: 浙江省自然科学基金基础公益研究计划(LGG20E040001)、杭州科技职业技术学院课题(HKZYB-2018-1)

通信作者: \*zhuxiaoliang@zjgsu.edu.cn

输电线路出现问题。下垂量指在架空线路中,相邻两电杆输电导线最低点与两悬挂点间连线的垂直距离,当相邻两输电杆的距离较远时,导线单位长度质量、张力水平分量、总张力、季节、气候等因素均会导致导线垂直间隙降低、拉伸损失、伸长和蠕变,进而缩短输电线的寿命<sup>[1]</sup>。高压电线弧垂过大或过小均会造成严重事故<sup>[2]</sup>:弧垂过大时,无法确保导线对地安全距离,且在风力作用下导线会大幅度舞动;弧垂过小时,导线承受的应力过大,可能造成断线甚至电杆倾覆<sup>[3]</sup>。因此,高压电线弧垂的实时在线监测,对确保输电线路的稳定工作具有重要意义,也是国内外电力部门和机构的重点研究目标<sup>[4-5]</sup>。

高压电线弧垂的测量方法大多使用有源电子器件,受用电量峰谷的影响较大,通过电子元器件对高压电线产生电磁场的强弱判断弧垂情况的方法并不准确,且缺乏驱动电源。因此,用无源传感系统对高压电线的悬垂情况进行实时在线监测具有重要意义。特种光纤是目前的研究热点<sup>[6-8]</sup>,其中,毛细管光纤(COF)是一种具有中心气孔、 $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$  环形芯和  $\text{SiO}_2$  包层的光纤<sup>[9]</sup>。作为一种光学传感器,COF 不需要任何电子元件,具有无源、绝缘、响应速度快、防水、防潮、可靠性高、使用寿命长的优点,可在恶劣的环境中长时间工作,并实现信号的远距离传输和解调。相比单模光纤(SMF),COF 具有更大的模场<sup>[10]</sup>,对弧垂弯曲也更敏感。

本文提出了一种用于监测高压电线弧垂的 COF 传感系统,并对传感系统的工作机理进行了研究。通过对比监测信息和参考信息,得到高压电线的弧垂情况。实验结果表明,弯曲半径越小,弯曲程度越大,COF 传感器的灵敏度就越高;且曲率半径与弯曲损耗呈线性关系,可实现高灵敏度、宽线

性测量范围的弯曲传感。

## 2 传感系统的设计

设计的传感系统为全光纤构造,相比 SMF 传感器,COF 传感器对弧垂半径的灵敏度更高。此外,COF 传感器的质量较轻,安装方式也更灵活。传感系统只需对 COF 传感器弯曲产生的反射光功率进行监测就能得到弧垂的变化情况,因此,可以将 COF 传感器贴附在已有的高压输电线起端或尾端,也可以在铺设前将其与高压输电线构建光电集成的复合高压输电线路。

COF 的截面如图 1 所示,传感系统的结构如图 2 所示。该传感系统采用一段 10 cm 长的 COF 与 SMF 集成得到,在 COF 输出端面镀银,输入端用光纤熔接器熔接到一段 SMF 上,SMF 通过光纤接头(FC/PC adapter)连接到 3 dB 耦合器。熔接时,COF 中的空气孔会塌陷,在 SMF-COF 分界面处形成锥形实心区。来自 SMF 的光通过锥形区域射入 COF,逐渐转变为环形光束。采用波长为 1550 nm 的半导体激光器(LD)作为光源,为了避免反射光的干扰,光源连接到光纤隔离器,并连接 3 dB 耦合器。COF 镀银层的



图 1 COF 的截面图

Fig. 1 Cross section of the COF

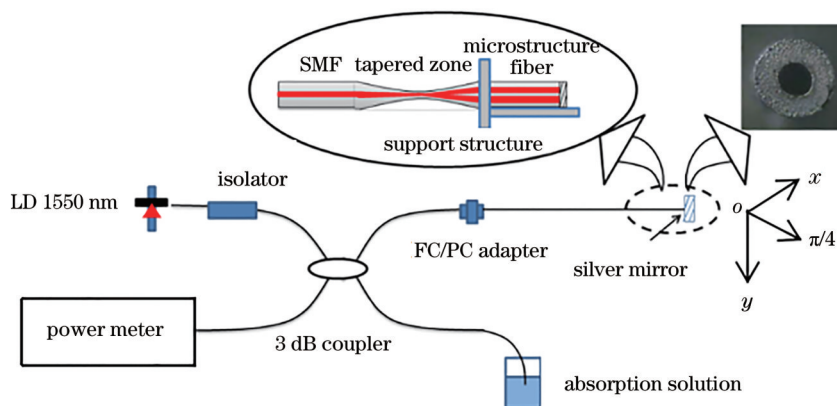


图 2 传感系统的实验装置

Fig. 2 Experimental setup of the sensing system

反射光通过 3 dB 耦合器传输到光功率探测器,从而对 COF 传感器不同方向的弯曲重复性进行研究。

### 3 理论分析与实验研究

为避免高压输电线工作时的热效应对 COF 传感器的影响,将 COF 传感器用绝热材料进行包裹,因此,在研究中只考虑弯曲对 COF 传感器的影响,不考虑高压电线对 COF 传感器产生的附加热效应。由文献[11]可知,光纤的等效折射率分布随光纤的弯曲会发生一定的变化,弯曲光纤的等效折射率分布  $n_{eq}(r)$  可表示为

$$n_{eq}(r) = n(x, y) \exp(r/R), \quad (1)$$

式中,  $R$  为 COF 的曲率半径,  $r$  为以光纤中心为圆心时的极坐标,  $n(x, y)$  为以光纤中心为圆心时直角坐标系中  $(x, y)$  处对应的介质折射率。直 COF 纤芯的折射率  $n_1 = 1.454$ , 包层折射率  $n_2 = 1.450$ 。COF 的

内芯半径  $a = 27 \mu\text{m}$ , 外芯半径  $b = 32 \mu\text{m}$ 。直 COF 和弯曲 COF 的折射率分布和模态分布不同,随着弯曲曲率的增加,模态分布与导向轴的偏差增大,模场之间会发生耦合损耗,弯曲损耗可通过模式场的失配计算。COF 的模场分布  $\psi_t^{[10]}$  可表示为

$$\psi_t = \begin{cases} AI_m(vr/a), & r < a \\ BJ_m(ur/a) + CY_m(ur/a), & a \leq r \leq b, \\ DK_m(wr/a), & r > b \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $u = a\sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}$ ,  $v = a\sqrt{\beta^2 - n_0^2 k_0^2}$ ,  $w = a\sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为自由空间的波数,  $\lambda$  为光的波长,  $\beta$  为光纤的传播常数,  $J_m$  和  $Y_m$  ( $I_m$  和  $K_m$ ) 分别为第一类  $m$  阶(修正)贝塞尔函数和第二类贝塞尔函数,  $A, B, C, D$  可由  $r = a$  和  $r = b$  处的连续性边界条件求得,  $\beta$  和  $u, v, w$  可由  $r = a$  和  $r = b$  处场的连续性特征方程<sup>[9]</sup>求出,可表示为

$$\frac{J_m(\alpha u)}{J_m(u)} \left[ \frac{wK'_m(\alpha w)}{uK_m(\alpha w)} \frac{J'_m(\alpha u)}{J_m(\alpha u)} \right] \left[ \frac{vI'_m(v)}{uI_m(v)} \frac{Y'_m(u)}{Y_m(u)} \right] = \frac{Y_m(\alpha u)}{Y_m(u)} \left[ \frac{Y'_m(\alpha u)}{Y_m(\alpha u)} \frac{wK'_m(\alpha w)}{uK_m(\alpha w)} \right] \left[ \frac{J'_m(u)}{J_m(u)} \frac{vI'_m(v)}{uI_m(v)} \right]. \quad (3)$$

将  $A, B, C, D$  和  $u, v, w$  代入(2)式就能计算出直 COF 的模场分布。由于线性偏振基模( $LP_{01}$  模)的方程只有一个根,故高阶模截止。用  $\beta = 5.8812$  对 COF 的模场进行归一化处理(总能量为 1)后,  $LP_{01}$  模

的模场分布如图 3 所示。联立(1)式与(2)式,分别得到不同曲率半径  $R = 7 \text{ cm}$  及  $R = 6 \text{ cm}$  时 COF 的模场分布,如图 4 和图 5 所示。SMF 中的模为  $LP_{01}$  模,表明 SMF 与 COF 之间的耦合发生在基模之间。

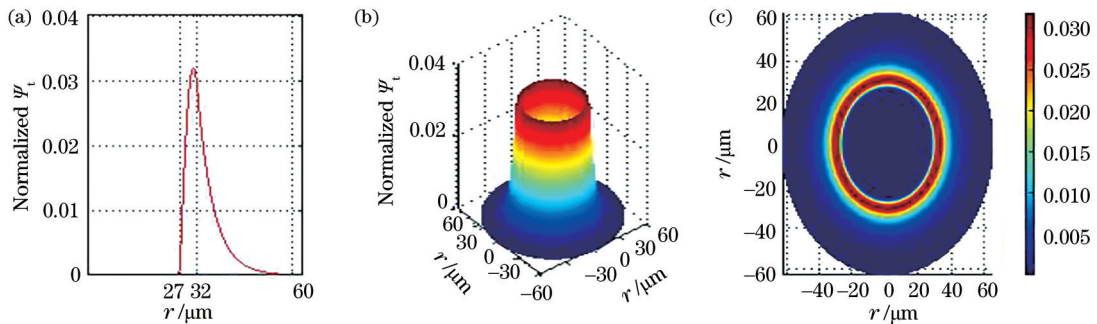


图 3 直 COF 的模场分布。(a)二维分布;(b)三维分布;(c)俯视图

Fig. 3 Mode field distribution of the straight COF. (a) Two-dimensional distribution; (b) three-dimensional distribution; (c) top view

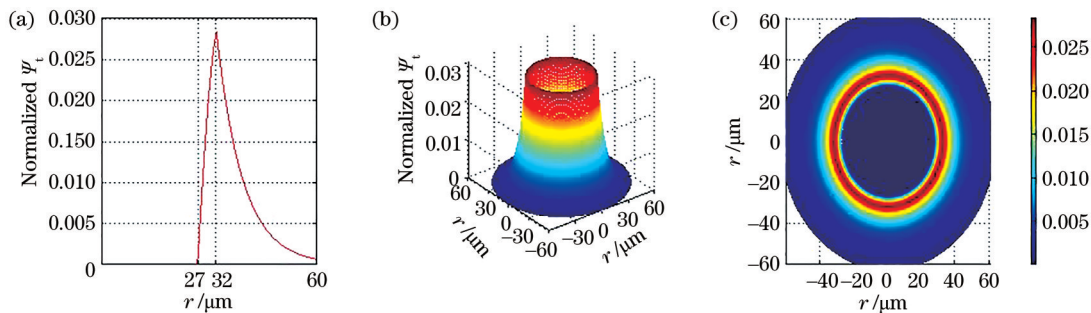


图 4 弯曲 COF 的模场分布 ( $R = 7 \text{ cm}$ )。 (a)二维分布; (b)三维分布; (c)俯视图

Fig. 4 Mode distribution of the bending COF ( $R = 7 \text{ cm}$ ). (a) Two-dimensional distribution; (b) three-dimensional distribution; (c) top view

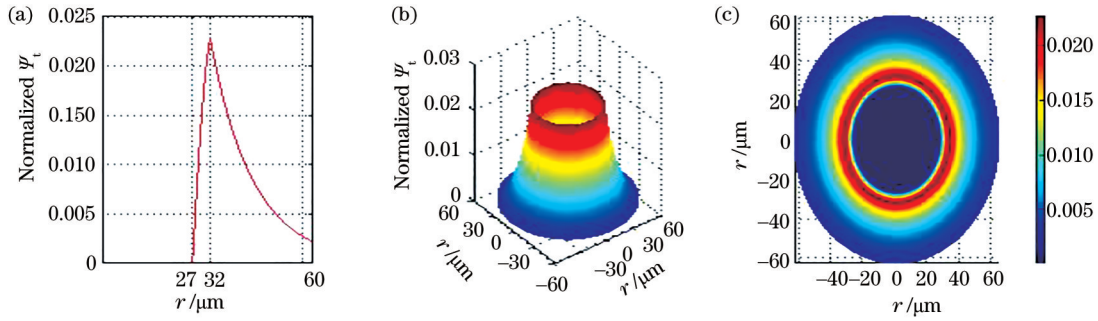


图 5 弯曲 COF 的模场分布 ( $R=6\text{ cm}$ )。(a) 二维分布; (b) 三维分布; (c) 俯视图

Fig. 5 Mode distribution of the bending COF ( $R=6\text{ cm}$ ). (a) Two-dimensional distribution; (b) three-dimensional distribution; (c) top view

从图 3~图 5 可以发现, 曲率半径越小, 光纤弯曲程度越大, COF 模场的倏逝场越强, 传输光功率的损耗就越大, 这与理论分析结果一致。耦合功率可通过直光纤和弯曲光纤的模场重叠积分计算。传输功率  $P$  可表示为

$$P = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{st} \psi_{cu}^* r dr \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{st}^2 r dr \right| \left| \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{cu}^2 r dr \right|}, \quad (4)$$

式中,  $\psi_{st}$  为直 COF 的模场分布,  $\psi_{cu}$  为弯曲 COF 的模场分布,  $\psi_{cu}^*$  为  $\psi_{cu}$  的共轭函数。COF 的损耗  $A = -10\log(P/P_m)$ 。其中,  $P_m$  为输入光功率, 归一化值为 1。

用图 2 中的实验装置记录反射功率和弯曲半径, 获得  $y$  方向 COF 的弯曲损耗, 结果如图 6 所示。可以发现: 当  $R > 15\text{ cm}$  时, 对应的监测灵敏度为  $0.276\text{ dB/cm}$ , 线性相关系数为  $0.8197$ ; 当  $R < 15\text{ cm}$  时, 对应的监测灵敏度为  $2.552\text{ dB/cm}$ , 线性相关系数为  $0.9635$ 。对比发现,  $R$  越小, 弯曲程度越大, COF 传感器的灵敏度就越高, 曲率半径与弯曲损耗

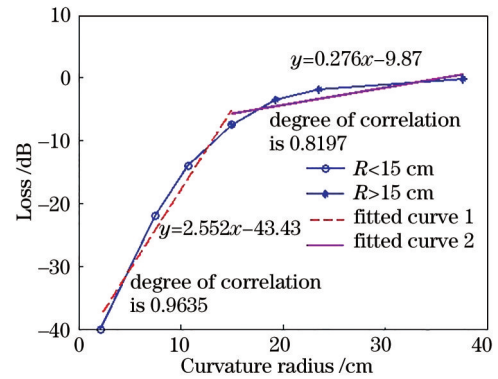


图 6 曲率半径与弯曲损耗的关系

Fig. 6 Relationship between curvature radius and bending loss  
呈线性关系, 可实现高灵敏度、宽线性测量范围的弯曲传感。

为研究 COF 传感器对不同方向的重复性, 对 COF 传感器  $+x+y$  和  $\pi/4$  方向的曲率半径与弯曲损耗关系进行实验研究, 结果如图 7(a) 所示。实验结果的平均值与 (4) 式计算的理论值如图 7(b) 所示。可以发现, 实验测量的弯曲损耗平均值与理论预测结果一致, 这表明用 COF 传感系统测量高压电

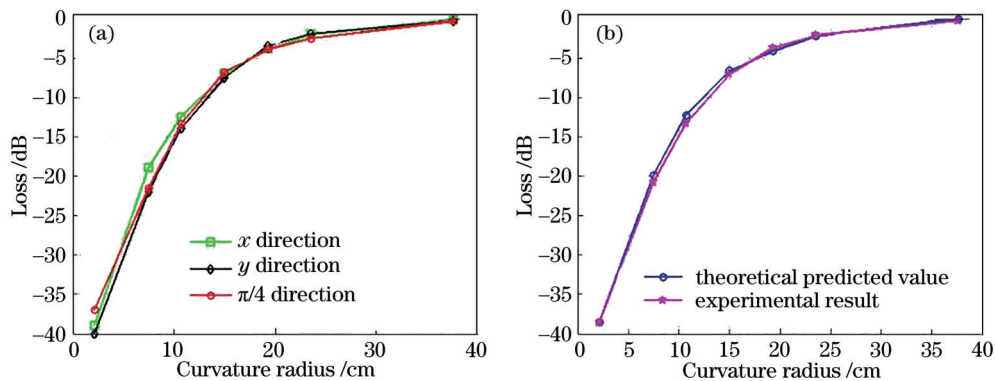


图 7 不同方向上测量的弯曲损耗。(a) 不同方向上的测量结果; (b) 理论预测值与实验结果

Fig. 7 Bending loss measured in different directions. (a) Measurement results in different directions; (b) theoretical predicted value and experimental result

线弧垂的方法是可行的。此外,COF 向不同方向弯曲时,实验结果的重复性较好,这表明将 COF 传感器埋入电缆保护套时不需要考虑光纤结构的方向。通过实验标定弯曲损耗对应的弧垂半径后,就能得到高压电线的弧垂曲率信息。

## 4 结 论

提出了一种用于监测高压电线弧垂的 COF 传感系统,对传感系统的工作机理进行了研究,并通过实验验证了理论分析的准确性。通过对比监测信息和参考信息,得到高压电线的弧垂变化状况。实验结果表明,COF 的弯曲半径越小,弯曲程度越大,COF 传感器的灵敏度就越高,且曲率半径与弯曲损耗呈线性关系,可实现高灵敏度、宽线性测量范围的弯曲传感。该传感系统的优点:1)相比基于 SMF 的弯曲传感器,模场面积更大,对弧垂的敏感性更高;2)集成度高,不受电磁场干扰,可与高压电线一起埋入保护套;3)可实现对高压电线弧垂的实时在线监测,在实际监测中具有简单便捷的优势。

## 参 考 文 献

- [1] Zainuddin N M, Abd Rahman M S, Ab Kadir M Z A, et al. Review of thermal stress and condition monitoring technologies for overhead transmission lines: issues and challenges[J]. IEEE Access, 2020, 8: 120053-120081.
- [2] Andersson G, Donalek P, Farmer R, et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928.
- [3] Kim J W, Sohn J H. Galloping simulation of the power transmission line under the fluctuating wind[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(9): 1393-1398.
- [4] Su C, Wu X M, Deng J W, et al. Arc-sag monitoring and early-warning technology of overhead line based on ANSYS simulation[J]. Heilongjiang Electric Power, 2018, 40(6): 523-529.  
苏超,武小梅,邓杰文,等.基于 ANSYS 仿真的架空线路弧垂监测预警技术[J].黑龙江电力,2018,40(6): 523-529.
- [5] Xu Q, Liu X Y, Zhu K, et al. Magnetic-field-sensing-based approach for current reconstruction, sag detection, and inclination detection for overhead transmission system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7): 4003307.
- [6] An Y, Yang H, Xiao H, et al. 4-kW single-mode laser output using homemade double-tapered fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0115002.  
安毅,杨欢,肖虎,等.国产双锥形光纤实现 4 kW 单模激光输出[J].中国激光,2021,48(1): 0115002.
- [7] Xi X M, Lin X F, Ye Y, et al. 3.4 kW all-fiber oscillator based on novel core-spun gain fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1216001.  
奚小明,林贤峰,叶云,等.基于新型纤芯纺锤形增益光纤的 3.4 kW 全光纤振荡器[J].中国激光,2020,47(12): 1216001.
- [8] Wang Z Y, Zhang T T, Shi W H. Tunable supercontinuum generation in chalcogenide suspension core fibers via temperature control[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0306001.  
王中焱,张甜甜,施伟华.硫系化物悬吊芯光纤产生温控可调谐超连续谱[J].中国激光,2021,48(3): 0306001.
- [9] Salceda-Delgado G, van Newkirk A, Antonio-Lopez J E, et al. Optical capillary fiber mode interferometer for pressure sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(5): 2253-2260.
- [10] Zhu X L, Xiang H X. Tapered splice technique for capillary optical fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 36: 130-133.
- [11] Heiblum M, Harris J. Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1975, 11(2): 75-83.