

海底光缆余长测试新方法可行性分析

黄欢,王瑛剑

(海军工程大学,湖北 武汉 430033)

摘要:光纤余长是海底光缆的重要性能指标,目前针对光纤余长的分析主要采用解析法,尚没有进一步精确分析光纤余长分布的实验方法。文章提出两种精确分析管内光纤余长分布的实验方法:高能射线法和光纤光栅法,并从理论上分析了这两种方法的可行性。

关键词:海底光缆;光纤余长;高能射线;三芯光纤 Bragg 光栅

中图分类号:TN818 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2012)04-0036-03

Feasibility study on new testing method for fiber excess length of submarine cables

Huang Huan, Wang Yingjian

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Fiber excess length is an important performance index in submarine optical cable communications. At present, we have no experimentation for the accurate analysis of submarine cable fiber excess length distribution but the analytical method. This paper presents two experimentations for the accurate analysis of the fiber excess length in the stainless central-tube, high-energy ray method and the fiber grating method, and theoretically analyzes their feasibilities.

Key words: submarine optical cable; fiber excess length; high-energy ray; three-core fiber Bragg grating

0 引言

光纤余长是海底光缆的重要性能指标。光纤余长可以有效地缓解光缆受力引起的光纤受力,并且直接影响海底光缆的使用寿命。目前针对光纤余长的分析主要采用解析法,但是解析法存在一定的局限性,解析法分析得出的光纤余长计算公式是在假设了一些理想条件下推导得出的^[1]。由于影响光纤余长形成的因素有很多,余长的稳定性、均匀性和分布状态很难确定,目前仍然缺少精确分析管内光纤余长分布形态的实验方法。本文提出两种分析管内光纤余长分布形态的实验方法:高能射线法和光纤光栅法,并从理论上分析这两种方法的可行性。

1 高能射线法的可行性分析

由于高能射线穿透不同材料、不同厚度的物体后强度的衰减不同,可以接收并分析穿透后的射线强度形成的图像,而不同的图像灰度代表不同的射线强度,这就是高能射线成像的原理。设射线的初始强度为 I_0 ,穿透厚度为 H (单位为 cm) 的物体时,其穿透后强度为

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho H}, \quad (1)$$

式中, μ_m 为材料的质量吸收系数(单位为 cm^2/g); ρ 为物体密度(单位为 g/cm^3)。

通过查阅资料可知,特征能量为 136 keV 的标准⁵⁷CO射线的各单质元素的质量吸收系数分别如下^[2]: H:0.272, C:0.139, O:0.143, Si:0.155, Fe:0.243。

实际的工业级计算机 X 射线层析扫描系统(即工业 CT 系统)所用的射线能量的可调范围为几 keV 到 450 keV。下面的计算将采用特征能量为 136 keV 的标准⁵⁷CO射线的各单质元素的质量吸收系数。

光纤的材料为石英,纤膏混合物为高分子聚合物(二甲基硅油),其中 80% 以上为基础油,中心管为不锈钢,铁元素含量 75% 以上。各材料的密度(单位为 g/cm^3) 分别如下:石英:2.65, 二甲基硅油:0.96, 不锈钢:7.85。

根据上面给出的各单质元素的质量吸收系数,可计算出各化合物和混合物的质量吸收系数,化合物的质量吸收系数为^[2]

$$\mu_m = \sum_i a_i \mu_{mi}, \quad (2)$$

式中, a_i 为各元素的质量分数; μ_{mi} 为相应元素的质量吸收系数。

经过计算,石英的质量吸收系数为 $\mu_m^{\text{石英}} = 0.1486$ 。为便于计算,用二甲基硅油的质量吸收系数代替纤膏的质量吸收系数,用铁元素的质量吸收

系数代替不锈钢的质量吸收系数,则二甲硅油的质量吸收系数为 $\mu_m^{\text{二甲硅油}} = 0.1876$, 不锈钢的质量吸收系数为 $\mu_m^{\text{不锈钢}} = 0.243$ 。

对比灵敏度指的是成像设备响应试件最小厚度改变量的能力,由文献[3]可知,工业 CT 系统通常能提供的对比灵敏度量值范围为 $0.1\% \sim 1\%$ 。本文计算以中天科技海缆为例,中心管的内径为 2.6 mm, 外径为 3 mm。这里假设中心管内充满纤膏,并且纤膏是均匀的,当中心管内没有纤芯时,其横截面如图 1 所示。没加入纤芯且充满纤膏的中心管其等效钢板厚度如图 2 所示。

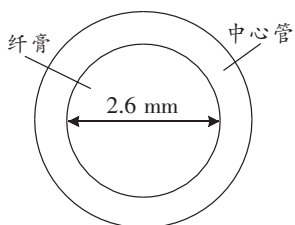


图 1 中心管横截面

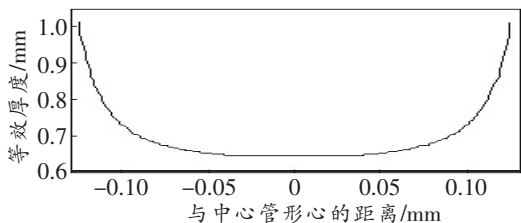


图 2 等效钢板厚度

加入光纤后,由于光纤为一圆柱体,为方便计算,计算中取其平均厚度,从而计算其等效平均厚度改变量,并计算出其与未加纤芯的等效厚度的比值,结果如图 3 所示。

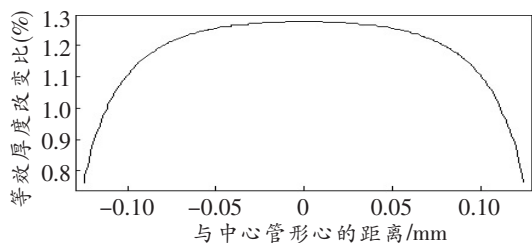


图 3 加纤芯后等效厚度改变比

由图 3 可知,光纤在中心管中的大部分区域所造成的等效厚度的改变量 $> 1\%$,工业 CT 系统提供的对比灵敏度完全能满足要求。而工业 CT 系统提供的最小空间分辨率一般 $< 10 \mu\text{m}$,均小于各试件的尺寸,因此在空间分辨率方面也满足要求。

综上所述,利用工业 CT 系统来观察分析光纤余长的分布和形态在理论上是可行的。

2 光纤光栅法的可行性分析

光纤 Bragg 光栅的长度一般为 $2 \sim 5 \text{ mm}$,对于中心管内光纤的微弯可以当作一个点,通过分析光

纤 Bragg 光栅的反射谱,计算出各个光栅所在处的曲率和弯曲方向,从而重构出光纤余长的形态。

光纤 Bragg 光栅的谐振条件为^[4]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}^{\text{co}} \Lambda, \quad (3)$$

式中, λ_B 为谐振波长; $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 为纤芯有效折射率; Λ 为光栅周期。

根据弹光理论,在不考虑温度变化的情况下,谐振波长和光纤轴向应变 ϵ 有如下关系:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P)\epsilon, \quad (4)$$

式中, P 为光纤的有效弹光系数,一般取值为 $0.22^{[5]}$ 。常用的光纤 Bragg 光栅的周期 $\Lambda \leq 0.5 \mu\text{m}$, 谐振波长 λ_B 为 $1510 \sim 1590 \text{ nm}$, 光栅长度 L 为 $2 \sim 5 \text{ mm}$, 反射率 $R \geq 80\%$, 反射带宽 $B \leq 0.7 \text{ nm}$ 。

由材料力学理论可知,当材料发生弯曲形变时,其轴向应变 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{(R \pm y)\theta - R\theta}{R\theta} = \pm \frac{y}{R} = \pm yC, \quad (5)$$

式中, R 为中性层的曲率半径; C 为中性层的曲率; y 为应变点到中性层的距离; θ 为弯曲弧长所对应的圆心角; $\epsilon > 0$ 表示伸长, $\epsilon < 0$ 表示压缩。

在验证光纤余长分布形态的试验中,由于光纤的弯曲方向是未知的,需要通过光纤 Bragg 光栅的反射谱计算得出,所以需选用多芯光纤 Bragg 光栅。本文中讨论的是 3CFBG (3 芯光纤 Bragg 光栅),其

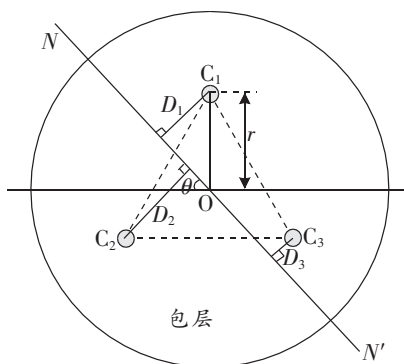


图 4 3 芯光纤 Bragg 光栅横截面

横截面如图 4 所示。图中,包层内的 3 条纤芯 C_1 、 C_2 和 C_3 的连线为正三角形,该正三角形的形心与包层形心 O 重合,每根纤芯与包层形心 O 的距离为 r , NN' 为弯曲中性轴, NN' 与水平方向的夹角为 θ , D_1 、 D_2 和 D_3 分别为 C_1 、 C_2 和 C_3 到中性轴的距离。

由图 4 可知:

$$\begin{cases} D_1 = r |\cos\theta| \\ D_2 = r \left| \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right| \\ D_3 = r \left| \sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right| \end{cases} \quad (0 \leq \theta \leq \pi). \quad (6)$$

由式(4)、(5)可推出各纤芯谐振波长相对偏移 $\Delta\lambda_B^i/\lambda_B^i$ ($i=1,2,3$, 分别与 C_1 、 C_2 和 C_3 对应) 与 θ 和 r 之间的关系如下:

$$\begin{cases} \frac{\Delta\lambda_B^1}{\lambda_B^1} = \pm 0.78r \left| \cos\theta \right| C \\ \frac{\Delta\lambda_B^2}{\lambda_B^2} = \pm 0.78r \left| \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right| C \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \\ \frac{\Delta\lambda_B^3}{\lambda_B^3} = \pm 0.78r \left| \sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right| C \end{cases} \quad (7)$$

实验框图如图 5 所示。记录各光纤 Bragg 光栅的相对波长偏移,通过式(7)计算出 n 组 C 和 θ , 并根据相对波长偏移的正负判断弯曲方向,从而重构出光纤的弯曲形态。

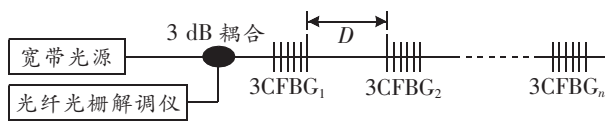


图 5 实验原理示意图

由文献[1]中解析法推导的余长公式可知,光纤在中心管内径为 2.6 mm 的条件下,弯曲形成光纤余长后,其弯曲曲率 $<12 \text{ m}^{-1}$ 。常用的光纤含包层的半径约为 $60 \mu\text{m}$,取 $r=20 \mu\text{m}=2 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。图 6、图 7 分别为中性面与水平方向的夹角 $\theta=\pi/4$ 和 $\theta=3\pi/4$ 时,各纤芯谐振波长相对偏移 $\Delta\lambda_B^i/\lambda_B^i$ 与中性面弯曲曲率 C 之间的关系的仿真结果。

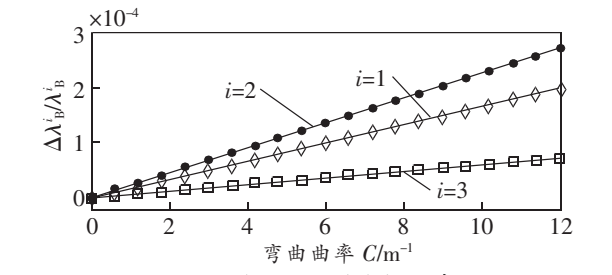


图 6 $\theta=\pi/4$ 时, $\Delta\lambda_B^i/\lambda_B^i$ 与中性面弯曲曲率 C 之间的关系

通过仿真可知,谐振波长相对偏移在 10^{-4} 数量级,波长偏移 $\Delta\lambda_B < 0.3 \text{ nm}$ 。一般常用的光纤光栅解调仪都能非常精确地测量波长,其分辨率 $<1 \text{ pm}$,因此能够非常准确地测量出波长偏移。通

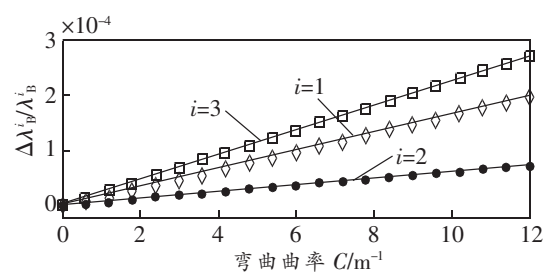


图 7 $\theta=3\pi/4$ 时, $\Delta\lambda_B^i/\lambda_B^i$ 与中性面弯曲曲率 C 之间的关系

过式(7)就可以计算出光纤的弯曲曲率,根据 3 个波长偏移的正负可以判断光纤的弯曲方向。

3 结束语

由于海底光缆的特殊性对光纤余长有特殊的要求,需进一步精确分析中心管内光纤余长分布形态,弥补基于解析法的光纤余长分析中存在的不足,因此本文设计了基于高能射线法和光纤光栅法的验证光纤余长分布形态的实验方法,并从理论上分析了这两种方法的可行性。由理论推导和计算结果可知,两种方法均可以满足验证光纤余长分布形态的要求。高能射线法实验方法简单,但是需要有较高精度的工业 CT 系统;光纤光栅法精度较高,但是需使用多芯光纤 Bragg 光栅,目前此类光栅在国内尚没有厂家生产,多为实验和科研应用。

参考文献:

[1] 邹林森. 中心管式和绞合式光缆光纤余长探讨 [J]. 光通信研究, 1993, (1): 3-7.
[2] 孙普男, 赵国志, 曲庆明. 光子质量吸收系数的蒙特卡罗计算 [J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(2): 310-313.
[3] 李衍. 非胶片射线检测技术(续) [J]. 影像技术, 2003, (2): 35-39.
[4] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. 19-20.
[5] AMANDA F, EUAN J R, ROBERT R, et al. Dynamic two-axis curvature measurement using multicore fiber Bragg gratings interrogated by arrayed waveguide [J]. Applied Optics, 2006, 45(12): 9041-9048.