

基于分布式光纤 Bragg 光栅传感技术的光缆卷盘静态压力研究*

马成举¹⁾²⁾ 任立勇^{1)†} 唐峰³⁾ 屈恩世¹⁾ 徐金涛¹⁾ 梁权³⁾ 王舰¹⁾ 韩旭¹⁾

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2) (西安石油大学理学院, 西安 710065)

3) (西安现代控制技术研究所, 西安 710065)

(2011年4月18日收到; 2011年5月12日收到修改稿)

基于对光缆卷盘缆层静态压力分布的理论分析, 建立了光缆缠绕体系中的受力理论模型. 研究表明, 随着缠绕层数的增加, 卷盘各层光缆所受压强先快速增大而后变化平缓. 采用分布式光纤 Bragg 光栅 (FBG) 对光缆绕线装置上缆层的静态压力进行了实时传感, 理论上给出了 FBG 的中心波长偏移量与体系压强的定量关系, 实验上发现各层 FBG 的中心波长随着光缆卷盘缠绕层数的增加先较快速变化而后趋于平缓, 理论模拟和实验测量结果符合得很好. 该技术解决了光缆绕线过程中无法对缆层所受压力进行实时监测的难题.

关键词: 光缆卷盘, 光纤 Bragg 光栅 (FBG), 轴向应变, 径向应变

PACS: 47.80.Fg, 81.40.Jj, 42.81.Pa, 42.81.-i

1 引言

自 Morey 等报道将光纤 Bragg 光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 应用于传感技术以来^[1], 由于其具有传感体积小、抗干扰能力强、灵敏度高、稳定性好、寿命长、测量范围广、能够实现现场的实时在线测量、易于构成智能传感网络等优势, FBG 传感技术一直是人们的研究热点^[2-6], 但大多数仅限于利用 FBG 轴向应变特性进行传感^[7]. 在诸如建筑物健康检测、光纤制导和多维应力应变传感等领域, 利用 FBG 径向应变进行传感有着广泛的应用前景^[8-11].

作为 FBG 传感技术的一个新应用案例, 本文将分布式 FBG 引入制导光缆卷盘体系中, 实现了缆层间压强的分布式实时测量; 建立了描述制导光缆卷盘缆层内压强分布的理论模型; 利用分布式 FBG 传感器对卷盘缆层内的压强进行了实验测量, 理论和实验符合得很好; 解决了光缆绕线过程

中无法对绕线轴和各层光缆的受力进行实时监测的问题. 本研究对光纤制导技术中的制导光缆缠绕、卷盘上缆层内压力测量及卷盘绕线机构设计等具有重要的参考价值^[12].

2 理论分析与模型建立

光纤制导光缆通常是用专用绕线装置把光缆逐层缠绕在卷盘上. 为了建立描述光缆卷盘缆层内的受力和压强分布理论模型, 我们分三个层次进行了理论分析: 首先对忽略卷盘和光缆层形变以及光缆层间摩擦力的简单情形进行了分析; 然后分析了包含卷盘和光缆层形变的情形; 最后模型中又加入了考虑光缆层间摩擦力影响的实际情形.

2.1 忽略卷盘和光缆层形变以及光缆层间摩擦力的简单情形

当光缆在卷盘上缠绕一层时, 体系的受力分

* 中国科学院“西部之光”(批准号: 2009LH01)、中国科学院创新基金(批准号: CXJJ-11-M22)、留学人员科技活动项目择优资助经费和教育部留学回国人员科研启动基金资助的课题.

† E-mail: renliy@opt.ac.cn

析如图 1 所示. 图中, T 为缠绕时光缆所受恒定张力, R 为卷轴半径, O 为卷轴中轴轴心, dl 为光缆长度微元, θ 为微元 dl 对应的张角, N 为光缆所受的支持力. 则卷盘柱面 (卷轴面) 所受的压力 F_0 可表示为

$$F_0 = -N = 2T \sin \frac{\theta}{2}. \quad (1)$$

由于 θ 很小, $\sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{dl/2}{R}$, 故卷盘柱面所受的压强 P_0 可表示为

$$P_0 = \frac{F_0}{\Delta s} = \frac{F_0}{D \cdot dl} = \frac{1}{D} \cdot \frac{T}{R}, \quad (2)$$

式中, Δs 为微元面积, D 为光缆直径.

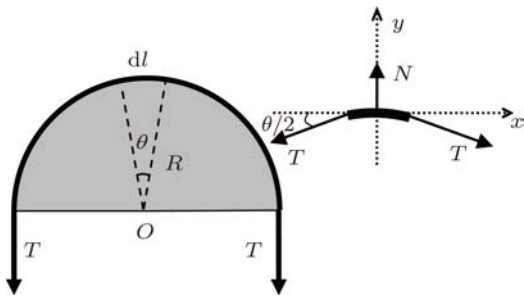


图 1 光缆缠绕一层时光缆及卷盘的受力分析

由于忽略了卷盘和光缆层形变以及光缆层间摩擦力的影响, 所以各层光缆轴向所受拉力均为 T . 根据上面的理论分析, 容易推导出如下结论: 1) 当光缆缠绕到第二层时, 卷轴面所受到的压强为 $P_0 = \frac{1}{D} \left(\frac{T}{R} + \frac{T}{R+D} \right)$; 2) 当光缆缠绕到第三层时, 卷轴面所受到的压强为 $P_0 = \frac{1}{D} \left(\frac{T}{R} + \frac{T}{R+D} + \frac{T}{R+2D} \right)$; 3) 当光缆缠绕到第 n 层时, 卷轴面所受到的压强为 $P_0 = \frac{1}{D} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{T}{R+iD}$.

与此相类似, 我们可求得光缆缠绕 n 层时, 其内部第 m 层光缆受到外层光缆的压强为

$$P_m = \frac{1}{D} \sum_{i=m}^{n-1} \frac{T}{R+iD}. \quad (3)$$

2.2 考虑卷盘和光缆层形变的情形

在实际情况下, 考虑到外层光缆的压力作用, 卷盘和内层光缆会发生径向的收缩形变, 从而导致各层光缆受到的轴向拉力和径向压强都会发生变化. 以第 m 层光缆为研究对象, 其径向收缩形变可表示为

$$\varepsilon_{mr} = \frac{\Delta R}{R+mD} = \frac{P_m}{\alpha_r}, \quad (4)$$

其中, α_r 是卷盘的径向收缩形变系数, ΔR 为第 m 层光缆以内的卷盘径向收缩量. 由于卷盘的径向收缩形变, 导致了第 m 层单根光缆的轴向长度、轴向拉力和径向压强都会发生变化. 首先, 单根光缆轴向长度收缩量可表示为

$$\Delta l_m = 2\pi \Delta R = 2\pi \frac{R+mD}{\alpha_r} P_m. \quad (5)$$

其次, 光缆轴向拉力由 T 变为 $T - \Delta T_m$, 拉力改变量 ΔT_m 可根据光缆轴向弹性模量公式 $\frac{\Delta T_m}{S} = E \frac{\Delta l_m}{l_m}$ 求得, 其中, E 为光缆轴向的弹性模量, S 为光缆的横截面面积, $l_m = 2\pi(R+mD)$ 是第 m 层光缆的周长. 因此, 第 m 层光缆轴向实际的拉力为

$$T_m = \begin{cases} T - \Delta T_m = T - \frac{ES}{\alpha_r} P_m & (m = 1, 2, \dots, n-1) \\ T & (m = n). \end{cases} \quad (6)$$

显然, 在考虑到卷盘和光缆层径向收缩效应的情况下, 公式 (3) 变为

$$P_m = \frac{1}{D} \sum_{i=m}^{n-1} \frac{T_{i+1}}{R+iD}. \quad (7)$$

利用 (6) 和 (7) 式, 从最外层 (第 n 层) 向内层递推, 依次迭代可求得各层光缆的轴向拉力和径向压强, 如图 2.

经过繁琐的推导, 我们得到了第 m 层光缆的径向压强:

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{T}{D} \sum_{i=m}^{n-1} \frac{1}{R+iD} - \left(\frac{ES}{\alpha_r} \right) \\ &\quad \left(\frac{1}{D} \right)^2 T \sum_{i=m}^{n-2} \frac{1}{R+iD} \left(\sum_{j=i+1}^{n-1} \frac{1}{R+jD} \right) \\ &\quad + \left(\frac{ES}{\alpha_r} \right)^2 \left(\frac{1}{D} \right)^3 T \sum_{i=m}^{n-3} \frac{1}{R+iD} \\ &\quad \left[\sum_{j=i+1}^{n-2} \frac{1}{R+jD} \left(\sum_{k=j+1}^{n-1} \frac{1}{R+kD} \right) \right] \\ &\quad - \left(\frac{ES}{\alpha_r} \right)^3 \left(\frac{1}{D} \right)^4 T \sum_{i=m}^{n-4} \frac{1}{R+iD} \left[\sum_{j=i+1}^{n-3} \frac{1}{R+jD} \right. \\ &\quad \left. \times \left[\sum_{k=j+1}^{n-2} \frac{1}{R+kD} \left(\sum_{z=k+1}^{n-1} \frac{1}{R+zD} \right) \right] \right] \\ &\quad + \dots = \sum_{s=1}^{n-m} (-1)^{s-1} \left(\frac{ES}{\alpha_r} \right)^{s-1} \left(\frac{1}{D} \right)^s \end{aligned}$$

$$\times T \sum_{i=m}^{n-s} \frac{1}{R+iD} \left\{ \sum_{j=i+1}^{n-s+1} \frac{1}{R+jD} \left[\sum_{k=j+1}^{n-s+2} \frac{1}{R+kD} \left(\sum_{z=k+1}^{n-s+3} \frac{1}{R+zD} \left(\cdots \left(\sum_{w=q+1}^{n-1} \frac{1}{R+wD} \right) \cdots \right) \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

根据制导光缆及绕线系统的实际参数: $T = 200 \text{ N}$, $D = 340 \mu\text{m}$, $R = 0.05 \text{ m}$, $\alpha_r = 1.30 \times 10^{11} \text{ Pa}$, $E = 7.452 \times 10^{10} \text{ Pa}$. 由于 $R \gg D$, 忽略 (8) 式求和项中的 D , 可求得 (8) 式中后一项与前

一项之比约为 $\left(\frac{ES}{\alpha_r}\right)\left(\frac{1}{D}\right) \cdot \frac{1}{R} = 0.0031$. 因此, 可以将 (8) 式中后一项看作是前一项的无穷小量而予以忽略. 此时, 第 m 层光缆受到外层光缆的压强可近似表示为 (3) 式.

由上面的分析可知,

尽管外层光缆的压力作用导致内层光缆轴向拉力和径向压强都发生了变化, 但是卷盘和内层光缆的径向收缩形变对光缆层所受的压强影响不大. 然而, 其所导致的光缆轴向收缩对 FBG 中心波长的偏移量却会产生较大的影响 (有关这部分的论述参见 (12) 式).

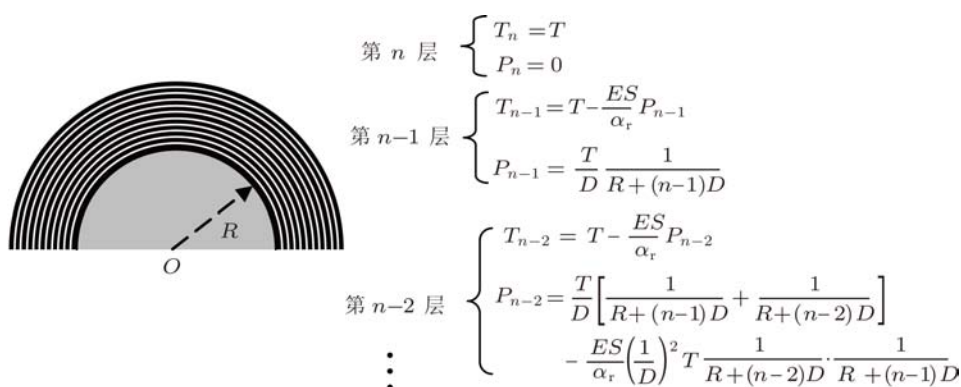


图2 缠绕了 n 层光缆的卷盘, 其光缆的轴向拉力和径向压强分布

2.3 考虑光缆层之间存在摩擦力的情形

考虑到光缆层之间的摩擦力作用, 第 m 层光缆受到的轴向拉力可表示为 $T' = T - \mu P_m \pi(R+mD)D$, μ 为静摩擦系数, 用 T' 替代 (3) 式中的 T , 第 m 层光缆受到外层光缆的压强可表示为

$$P_m = \frac{\frac{T}{D} \sum_{i=m}^{n-1} \frac{1}{R+iD}}{1 + \pi(R+mD)\mu \sum_{i=m}^{n-1} \frac{1}{R+iD}}. \quad (9)$$

为了测量各层光缆的压强, 我们在各层光缆中熔接了 FBG 传感器. 由 FBG 理论可知, 轴向形变引起的 FBG 中心波长的偏移量为 $\Delta\lambda_{Bz} = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_{zm}^{[13]}$, 其中 λ_B 是自由状态下 FBG 的 Bragg 波长, p_e 是有效弹光系数, $\varepsilon_{zm} = \frac{\Delta l_m}{l_m}$ 是 FBG 的轴向应变, l_m 和 Δl_m 分别为第 m 层光缆的周长及其在外层光缆压强作用下所导致的轴向长度收缩量 ($\Delta l_m < 0$). 考虑到 (5) 式, 轴向形变引起的 FBG 中心波长的偏移量可表示为

$$\Delta\lambda_{Bz} = -\frac{\lambda_B(1 - p_e)}{\alpha_r} P_m. \quad (10)$$

另一方面, 在卷盘径向均匀压力 P_m 的作用下, 光缆中的 FBG 因均匀受力 (注意: 当 FBG 受到局部横向压力时, 其反射峰会发生分裂^[14]). 而产生的中心波长偏移量为 $\Delta\lambda_{Br} = -k_{pr}\lambda_B P_m$, 其中, k_{pr} 是径向压力灵敏度系数^[15]. 显然, FBG 在轴向和径向同时存在应力和应变时, 其中心波长的偏移量可表示为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \Delta\lambda_{Bz} + \Delta\lambda_{Br} \\ &= -\lambda_B\left(\frac{1 - p_e}{\alpha_r} + k_{pr}\right)P_m. \end{aligned} \quad (11)$$

在实际光缆缠绕过程中, 由于各层光缆之间存在间隙, 所以不同层光缆的径向收缩 (压缩) 形变系数会有变化. 首先, 光缆所在层数 m 越大, 同样的压力下光缆径向收缩量越大; 另外, 随着缠绕层数 n 的增加, 内层光缆变得越来越紧, 所以其径向收缩量会变小. 考虑到收缩形变系数的变化, 我们对 (11) 式进行了如下修正:

$$\Delta\lambda = -\lambda_B\left(\frac{1 - p_e}{\frac{\alpha_r}{m} \times n} + k_{pr}\right)P_m. \quad (12)$$

公式 (12) 反映了在轴向收缩形变和径向压缩形变

同时存在时, 缠绕了 n 层光缆的卷盘中第 m 层光缆中的 FBG 中心波长的偏移量.

3 理论模拟

为了便于与后面的实验结果相对照, 根据 (9) 和 (12) 式, 我们模拟了缠绕 50 层光缆时其第 7 到 15 层光缆中 FBG 中心波长 (1534 nm—1554 nm, 波长间隔 2 nm) 的变化量和各层光缆压强随缠绕层数的变化关系, 结果分别如图 3 和图 4 所示. 模拟所用参数是光缆绕线时的实验参数, 其值分别为: $P_e = 0.22$, $\alpha_r = 1.30 \times 10^{11}$ Pa, $k_{pr} = 8.38 \times 10^{-13}$ Pa $^{-1}$, $R = 0.05$ m, $D = 340$ μ m, $T = 200$ N, $\mu = 0.00625$.

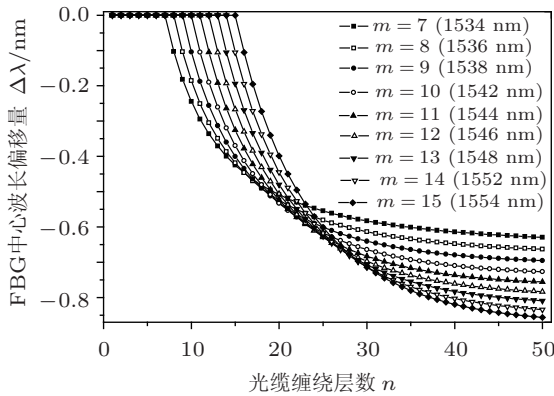


图 3 FBG 中心波长偏移量随缠绕层数的变化关系

由 (12) 式可知, FBG 中心波长偏移量取决于两个因素: 一方面, 缠绕过程中光缆卷盘径向收缩形变导致的各层 FBG 的轴向应变; 另一方面, 外层光缆压强导致的各层 FBG 的径向应变. 基于这两种因素的共同作用, FBG 的中心波长开始变化迅速而后趋于平缓, 如图 3 所示.

图 4 可以看出, 各层的压强 P_m 随着缠绕层数 n 的增加而逐渐增大. 为了更明显地反映压强随缠绕层数的变化, 我们模拟了缠绕 200 层时第 7 层光缆所受径向压强的变化, 结果如图 5 所示. 可以

明显地看到, 随着缠绕层数的增加, 压强先是变化很快而后趋于平缓.

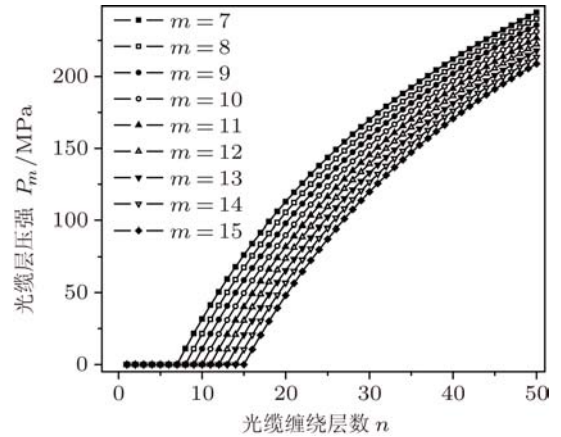


图 4 各光缆层压强随缠绕层数 n 的变化关系

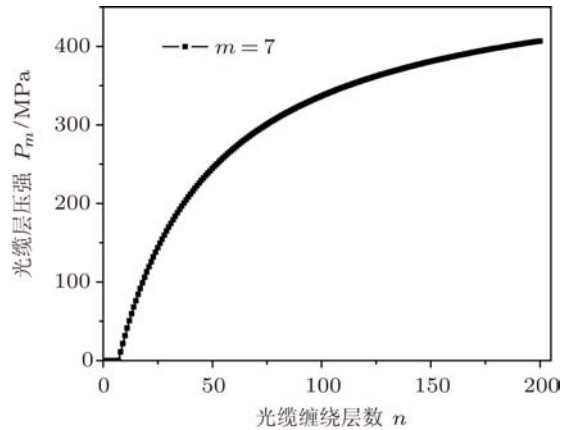


图 5 缠绕 200 层光缆时第 7 层光缆所受压强随缠绕层数的变化关系

4 实验研究

实验所使用的光纤总长度为 2 km, 其中熔入了波长从 1534 nm—1554 nm, 中心波长间隔为 2 nm 的 11 根 FBG 作为分布式传感器, 如图 6 所示. 首先, 从 500 m 处开始, 依照波长从小到大每隔 50 m 依次熔接 FBG; 然后, 将 1000 m 光纤熔接上去; 最后, 进行二次涂覆和涂层恢复处理制成光缆.

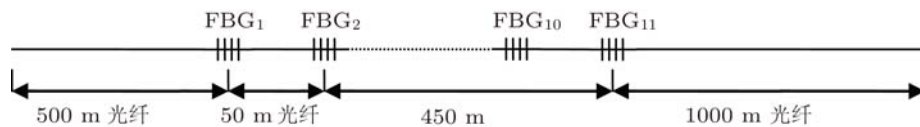


图 6 分布式 FBG 熔接连接示意图

在光缆绕线装置上,对包含了 11 根 FBG 的 2 km 长光缆进行分层式的紧密缠绕,首层光缆长度为 78 m. 在光缆缠绕过程中,随着层数的增加,每层两个端头均在逐渐回收以确保缠绕的致密性和防止绕层坍塌,总共绕了 38 层的光缆卷盘. 图 7 给出了缠绕的绕层结构示意图,图中黑色的小方块标志着 FBG 的相对几何位置,图中奇数层的缠绕方向从左向右,偶数层从右向左.

对绕线过程进行全程测试,当绕线至第 7 层时第 1 根 FBG 进入到了绕线轴上. 此时对该 FBG 串进行波长解调,得到其静态波长为 1534 nm 的 FBG 反射中心波长量,然后继续加层绕线,当绕线至第 8 层时,第 2 根 FBG 进入绕线轴上,此时对静态波长为 1534 nm 和 1536 nm 的 FBG 进行波长解调测量,以此方式直到绕线过程完成,即将 2 km 的光缆全部绕在绕线轴上,此时共绕线 38 层. 实验得到了 11 根 FBG 在绕线全过程中波长的变化量如图 8

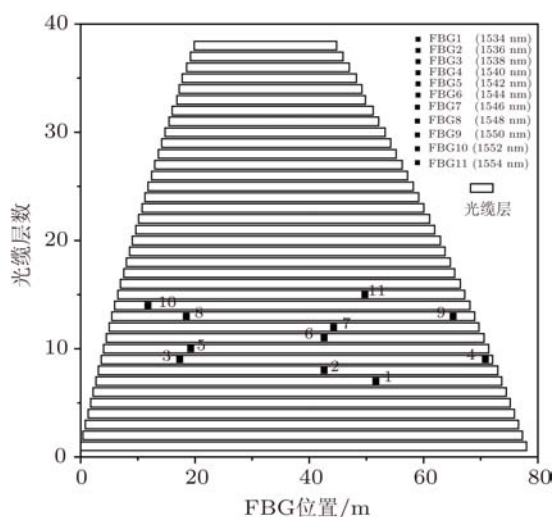


图 7 光缆绕层的缠绕结构示意图

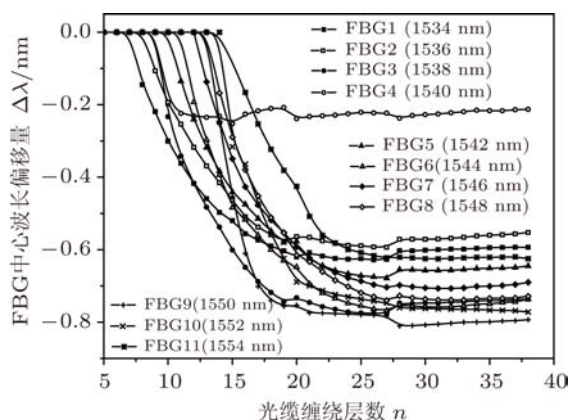


图 8 绕线过程中 11 根 FBG 中心波长偏移量随绕线层数的变化关系

所示. 其中,第 4 根 FBG 靠近第 9 层光缆的边缘,仅有少数的几层外层光缆作用在其上面(如图 7 所示),因此后续的绕层几乎没有引起 FBG 的波长偏移. 比较图 8 和图 3 发现,实验结果和理论模拟符合得很好.

需要特别说明的是:在图 8 中 $n = 28$ 层处,所测的 FBG 中心波长发生了突变,其原因是实验在无恒温措施的普通实验室进行. 由于绕线时间较长,28 层以前的缠绕在上午阶段,下午从第 28 层开始缠绕. 由于十月底当时正午温度明显高于上午,我们认为这个跳变是由于温度升高引起了 FBG 中心波长的变化,而理论处理过程并未扣除温度对 FBG 中心波长的影响.

根据图 8 的实验结果和 (12) 式,计算出各层光缆所受的压强随缠绕层数变化关系如图 9 所示,该结果与理论模拟结果(图 4)符合得很好.

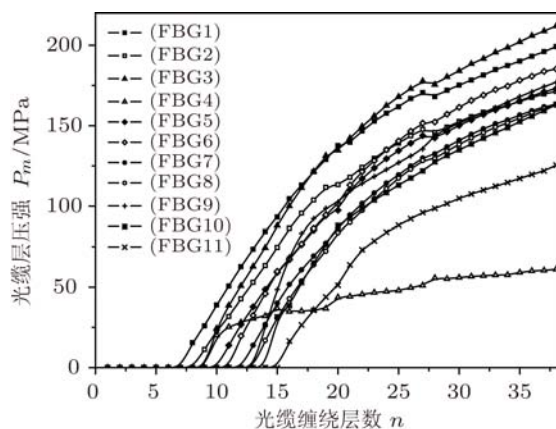


图 9 各层光缆压强随缠绕层数 n 的变化关系

5 结论

通过对制导光缆卷盘各层光缆所受压力和压强进行理论分析,建立了各层光缆压强随缠绕层数变化的数学物理模型并进行了理论模拟和实验研究,发现随着光缆缠绕层数的增加,各层光缆所受压强先明显增加而后趋于稳定. 实验测得各层 FBG 中心波长先是变化很快而后趋于平缓,这是由于缠绕过程中光缆卷盘径向收缩形变导致的各层 FBG 轴向应变和外层光缆的压强导致的各层 FBG 径向应变共同作用的结果. 本研究对光纤制导技术中的制导光缆卷盘缠绕、卷盘上各层光缆所受的压力测量及卷盘设计等具有重要的参考价值. 利用这种分布式 FBG 传感技术解决了光缆绕线过程中无法对绕线轴和光缆所受压力进行实时监测的问题.

- [1] Morey W W, Meltz G, Glenn W H 1989 *Fiber Optic and Laser Sensors* **1169** 98
- [2] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, LeBlanc M, Koo K P, Askins C G, Putnam M A, Friebele E J 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1442
- [3] Rao Y J 1999 *Opt. Lasers Eng.* **31** 297
- [4] Tsuda H, Sato E, Nakajima T, Nakamura H, Arakawa T, Shiono H, Minato M, Kurabayashi H, Sato A 2009 *Opt. Lett.* **34** 2942
- [5] Tsuda H 2010 *Opt. Lett.* **35** 2349
- [6] Wang J, Tang F, Ren L Y, Xu J T, Hu M L 2010 *J. Appl. Opt.* **31** 993 (in Chinese) [王舰, 唐峰, 任立勇, 徐金涛, 忽满利 2010 应用光学 **31** 993]
- [7] Gan J L, Hao Y Q, Ye Q, Pan Z Q, Cai H W, Qu R H, Fang Z J 2011 *Opt. Lett.* **36** 879
- [8] Udd E, Schulz W, Seim J, Haugse E, Trego A, Johnson P, Bennett T E, Nelson D, Makino A 2000 *Proc. SPIE* **3986** 254
- [9] Shao L Y, Xiong L Y, Chen C K, Laronche A, Albert J 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 2681
- [10] Kanellos G T, Papaioannou G, Tsiokos D, Mitrogiannis C, Nianios G, Pleros N 2010 *Opt. Express* **18** 179
- [11] Zhu T, Rao Y J, Mo Q J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 249 (in Chinese) [朱涛, 饶云江, 莫秋菊 2006 物理学报 **55** 249]
- [12] Hu J L, Ma H J, Cui D D 1997 *Study Opt. Commun.* **3** 35 (in Chinese) [胡君良, 马恒坚, 崔得东 1997 光通信研究 **3** 35]
- [13] Zhang W T, Liu L H, Li F, Liu Y L 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 507
- [14] Cai L L, Yi W W, Wu F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7737 (in Chinese) [蔡璐璐, 尹闻闻, 吴飞 2008 物理学报 **57** 7737]
- [15] Li Z Z, Yang H Y, Liu Y, Zhou W L, Hu Y M 2005 *J. Appl. Opt.* **26** 16 (in Chinese) [李志忠, 杨华勇, 刘阳, 周伟林, 胡永明 2005 应用光学 **26** 16]

Study on static pressure of fiber cable spool based on distributed fiber Bragg grating sensing technology*

Ma Cheng-Ju¹⁾²⁾ Ren Li-Yong^{1)†} Tang Feng³⁾ Qu En-Shi¹⁾ Xu Jin-Tao¹⁾
Liang Quan³⁾ Wang Jian¹⁾ Han Xu¹⁾

1) (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

2) (School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

3) (Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065, China)

(Received 18 April 2011; revised manuscript received 12 May 2011)

Abstract

Based on the theoretical analysis of the static pressure distribution of fiber cable layer in an optical fiber cable spool, we establish a theoretical model of the force in the cable winding system. Simulations indicate that with the increase of the twining layers, the pressure of every layer in the spool increases very quickly at the beginning and mildly then. The static pressure of fiber cable layers in the spool on cable winding device is sensed by use of distributed fiber Bragg gratings (FBG). The quantitative relationship between the variation of FBG center wavelength and the system pressure is given theoretically. It is shown experimentally that with the increase of the twining layers, the variation pace of FBG center wavelength in every layer is very quick at the beginning and gentle then. Theoretical simulations coincide with experimental results very well. This technology provides us a real-time method to monitor the pressure of the fiber cable layer in the cable winding process.

Keywords: fiber cable spool, fiber Bragg grating (FBG), axial direction strain, radial direction strain

PACS: 47.80.Fg, 81.40. Jj, 42.81.Pa, 42.81.-i

* Project supported by the West Light Foundation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2009LH01), the Innovation Foundation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. CXJJ-11-M22), the Advanced Programs of Technological Activities for Overseas Scholars, and the Scientific Research Starting Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, Education Ministry of China.

† E-mail: renliy@opt.ac.cn