

应力诱导单模光纤双折射的研究

万 瑾 黄元庆

(厦门大学机电工程系 厦门 361005)

摘要 单模光纤在通常情况下可以认为是不存在双折射现象的。但当光纤受到弯曲、侧压及扭转时,由于光弹效应使得光纤分别产生了线性双折射和圆振双折射。该文对单模光纤由于各种作用产生的诱导双折射进行了论述,推导了不同情况下双折射的计算公式,并分析了其中的差别。同时,还初步分析了实际系统中对各种双折射效应的应用。

关键词 单模光纤 双折射 传感器

Study of the Induced Birefringence in the Single-mode Optic Fiber

Wan Jin Huang Yuanqing

(Dept. of Mechanical and Electric Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract In a general way, it is considered that the single-mode optic fiber has no birefringence. But once the single-mode optic fiber is bent, clamped or twisted, the externally applied stresses can lead to induced birefringences through the photoelastic effect. This paper discusses the induced birefringences, one kind of which is linear birefringence, induced by bending or clamping the fiber, while another is circular birefringence, induced by twisting the fiber. Based on the photoelastic effect, the formulas in different conditions are presented. Furthermore, the applications of those formulas in real system are mentioned.

Key words Single-mode optical fiber Birefringence Sensor

1 引言

单模光纤中的双折射主要由两种原因引起: 光纤芯截面几何尺寸的偏差与光弹效应产生的机械应力。光纤材料石英有很高的杨氏模量,这决定了光纤制成后几乎不可能再有形状的变化。但根据光弹效应,外来的压力仍然可以使光纤产生诱导双折射。

这里针对光纤弯曲、受侧压及扭曲情况下的诱导双折射进行了讨论与分析,并综述了其在实际系统中的运用。假设在这三种情况中光纤没有内在的线性双折射,而主要是诱导双折射。

2 诱导双折射产生机理

2.1 弯曲

弯曲双折射主要是由弯曲感应应力和弯曲感应光

纤芯椭圆度引起的。如图 1,当光纤弯曲时,半径为 r 的圆光纤芯变成长短轴分别为 $r(1 + \sigma^2 r^2 / (2R^2))$ 和 r 的椭圆光纤芯,从而产生双折射。 σ 是泊松系数, R 是弯曲曲率半径。但由此引起的双折射相对于前者非常小^[4],故这种情况可以忽略。而对于由弯曲产生的感应应力,光纤芯区会受到沿 x 轴方向的横向内应力,即弯曲光纤产生的主应力,它使单模光纤的模式在快慢轴方向的传播常数产生差异从而导致应力双折射。

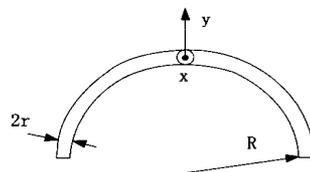


图 1 弯曲引起的双折射及系统坐标系

2.1.1 纯弯曲

由弹性理论可知,沿 z 方向上的应力为 $\sigma_z = kEx$, k

$= 1/R$ 为弯曲曲率, E 为杨氏模量。在 xy 平面 $x > 0$ 时, σ_x 为一张力, $x < 0$ 时 σ_x 为一压力, 于是光纤外层会施加一沿 R 方向的 $-\sigma_x$ 压力给内层光纤。这种压力在光纤轴上达到最大, 这是产生双折射的主要原因^[5]。这一点与平直光纤受到径向压力时的情况很相似。

光纤受到应力作用时, 其各个方向的折射率变化可表示^[5]为 $\Delta n = - (n^3/2) \sum P_i \epsilon_i$, P_i 是弹光系数, ϵ_i 是应变分量。设光纤截面的弹性是均匀各向同性的, 则只用考虑 xy 平面, 即 y 轴与 x 轴的基模传播常数之差:

$$\Delta\beta = \beta_y - \beta_x = k_0(\Delta n_y - \Delta n_x)$$

产生了诱导双折射。一般, 曲率半径 R 和光纤外径 r 满足 $R \gg r$, 如图 1 所示, 利用泊松比 σ 有 $\epsilon_x - \epsilon_y = (\sigma_x - \sigma_y)(1 + \sigma)/E$, σ_x, σ_y 分别为 x 轴与 y 轴方向的应力分量, 则可以得出归一化的双折射率 B 的表达式:

$$B = \frac{\Delta\beta}{\beta} = 0.25n_1^2(P_{11} - P_{12})(1 + \sigma) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (1)$$

B 的下标表示应力的不同情况。代入石英的弹光系数 $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.270$, 石英的泊松比 $\sigma \approx 0.16$, 光纤的折射率 n_1 , 则可得到:

$$B = -0.093 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (2)$$

由此式可看到, 与横向应力引起二阶的双折射相比, 具有对称性的纵向压力引起的可以忽视不计。同时此式也说明诱导的最大归一化双折射是受到光纤抗张强度的限制。因此 r/R 决定了加在光纤外表面的张力, 一般实验中取 2%, 实际系统中取 0.4%^[1], 其相应的 $|B|$ 值极限为 3.7×10^{-6} 和 1.5×10^{-6} 。

2.1.2 拉伸弯曲

如果单纯地拉伸光纤, 那么显然由于对称性不可能产生双折射。但如果将受拉伸力的光纤缠绕在一个半径为 R 的圆形心轴上, 该心轴反作用于光纤, 就可以得到一个由该应力产生的二阶的双折射, 同时由于这种张力引发了附加的双折射。圆形心轴对应力双折射光纤的固有张应力没有反作用, 而只对张力作用下缠绕的光纤有反作用。由于这种反作用产生的附加双折射为:

$$B = \frac{n_1^2}{2} (P_{11} - P_{12}) \frac{(1 + \sigma)(2 - 3\sigma)}{1 - \sigma} \frac{r}{R} S_z \quad (3)$$

式中 S_z 为外部应力产生的轴向拉伸应变。

如果将前两者都考虑进来, 则受拉伸力作用的受力缠绕的弯曲光纤总的归一化双折射为:

$$B_t = -0.093 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 0.336 \frac{r}{R} S_z \quad (4)$$

很明显, 将光纤拉伸并缠绕到圆形心轴上会增加

诱导双折射。其最大的拉伸应变为 $S_z + r/R$ 。同样, 对于实验与实际系统中的最大值 2% 与 0.4%, 可以算出相应的 $|B_t|$ 值极限为 4.6×10^{-6} 和 1.9×10^{-6} 。与纯弯曲情况相比, $|B_t|$ 值极限只高出了 25%。

2.2 侧压

如图 2, 当光纤受侧压时 (假设侧应力沿 y 轴), 相应的双折射 $\Delta\beta = \beta_y - \beta_x$ 可由下式得到^[11]:

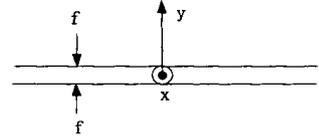


图 2 侧压引起的双折射及系统坐标系

$$B_t = \frac{\Delta\beta_t}{\beta} = \frac{4n_1^2}{\pi} (P_{12} - P_{11}) \frac{(1 + \sigma)}{E} \left(\frac{f}{2r} \right)^2 \quad (5)$$

$E = 6.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 为石英的杨氏模量。代入已知值, 可得:

$$B_t = 3.63 \times 10^{-12} \left(\frac{f}{r} \right)^2 \quad (6)$$

对于不同外径的光纤, 根据该式可以描述其归一化双折射曲线。显而易见, 当光纤外有保护层, 双折射就会小很多。

同时, 由于双折射与双折射散射有以下关系^[1]:

$$B = \frac{\Delta\beta}{\beta} = -n_1^2 \frac{(P_{11} - P_{12})}{2} (S_2 - S_1)(T_a - T_g) \quad (7)$$

S_1 和 S_2 分别是光纤和其覆盖层的热膨胀系数, $T_a - T_g$ 为光纤周围环境与光纤制造环境的温差。所以, 存在双折射散射:

$$T_r = \frac{n_1}{c} B \left[1 - \lambda \frac{d[n_1^3(P_{11} - P_{12})]/d\lambda}{n_1^3(P_{11} - P_{12})} \right] \quad (8)$$

括号内第二项对于 $0.6 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.6 \mu\text{m}$ 值远小于 0.1, 所以忽略不计。则有:

$$T_r \approx \frac{n_1}{c} B \quad (9)$$

这些公式可实际应用 在偏振灵敏测量系统中的光纤上。通常, 用弹簧压力或磁力将光纤夹在一个 V 形槽中。理想情况下 ν 角为 60° 时由于对称性应该无双折射, 但由于摩擦力的作用, 双折射并不可能不存在, 而只能是一个最小值。但无论如何, 60° 角是减小残余双折射的最理想角度^[1]。

2.3 扭转

光纤扭转是在拉丝和成缆中不可避免的。有时为了改善光纤的极化特性, 常有意地使光纤进行扭转, 如



图 3 光纤的扭转

图 3 扭转是一种几何效应

假设不存在内在固有的双折射。绕轴向扭转光纤，转速为 αN (rd/m)， N 为每一米扭转的圈数。这样，就会产生一个剪切应力，该剪切应力使光纤因弹光效应而产生旋光性，引起与前面的线性双折射不同的圆振双折射。这也就是说扭转光纤的本征模不再是 x 向 (或 y 向) 的线性偏振模，而是右旋 (或左旋) 的圆振偏振模。

旋光性在光纤单位长度内引起的偏振面的转角 γ 正比于光纤每单位长度的扭转角 φ 。

$$g = \gamma / \varphi = n_1^2 (P_{11} - P_{22}) \quad (10)$$

式中，比例系数 g 称为扭转光纤的旋光能力，它取决于光纤材料的弹光系数。 n_1 为纤芯折射率， P_{11} 、 P_{22} 是纤芯材料的弹光系数。由此可得诱导双折射 $\Delta\beta_c$ 可由下式计算得出^[1]：

$$\Delta\beta_c = \frac{n_1^2}{2} (P_{11} - P_{22}) \alpha N = g \alpha N \quad (11)$$

$\Delta\beta_c$ 是正旋与反旋时的模传输常数差。实验得出 $g = -0.14$ ，代入上式，并对其进行归一化，有：

$$R = \frac{\Delta\beta_c}{\beta} \approx \frac{g}{n_1} \approx -0.1N\alpha \quad (12)$$

为了保证光纤的机械性能不受损害， N 要限制在大致为 $100 \times (60/r)$ (实验中) 或者 $20 \times (60/r)$ (实际系统中)^[1]， r 单位为微米， N 为每米的圈数。

同时，相应产生的双折射散射为^[1]：

$$T_c = \frac{\lambda}{c} B \left[\frac{dn_1}{d\lambda} - n_1 \frac{d[n_1^2(P_{11} - P_{22})]/d\lambda}{n_1^3(P_{11} - P_{22})} \right] \quad (13)$$

对于波长为 μ_m 的光，代入已知值，可得：

$$T_c \approx 8.7 \times 10^4 \frac{\lambda}{c} B \approx -2.9 \times 10^5 N\alpha^2 \quad (14)$$

这说明对于一个给定的归一化双折射，扭转光纤的双折射散射比线性双折射光纤小 $10 \sim 20$ 倍，具体倍数由入射光的波长而定。

3 双折射的应用

利用压力或振动使光纤变形，进而影响光纤中传

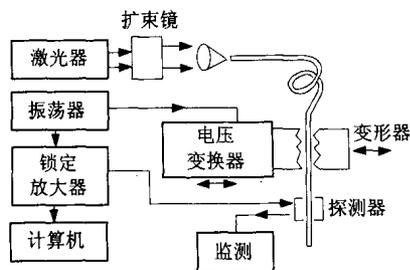


图 4 光纤压力传感器

输光的强度构成强度型光纤压力或振动传感器^[8]。图 4 是其原理图。

激光经过扩束镜，聚焦注入多模光纤。包层中的非导引模由脱模器 (一般涂有黑漆的光纤，长度数厘米) 去掉，然后进入变形器 (一般为 5 个周期，节距 3mm)。当变形器受外界压力作用时，光纤的微变程度发生变化，影响光纤的传输常数，通过光探测器测出其变化。

利用光纤双折射效应中的延迟角现象，可以制作出分别对应着与经典晶体波片类似的 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ 、 $\lambda/8$ 波片^[6]。基于光纤弯曲双折射效应中延迟角现象的光纤应变计^[2,3]，可以非常准确地测出悬臂梁的应变 ($< 4 \times 10^{-6}$)。在智能结构中，也可将单模保偏光纤埋入复合材料，将外部压力转变为内部不对称应力，使两个偏振模的相位产生较大延迟从而提高检测灵敏度^[7]。

此外，采用微弯传感器可以实现土木结构及桥梁中的压力、负载、位移等量的测量^[7]。

4 结 论

在此对弯曲双折射进行了分析与比较，并初步总结了双折射在实际系统中的应用。可以看出，利用双折射可以解决实际中的很多问题，同时可以在不同情况下根据应用适当地减少或引入双折射。

参考文献

- 1 Luc B. Jeunhomme. Single-mode Fiber Optics Principles and Applications, 1983.
- 2 G. B. Hocker. Fiber-optic Sensing of Pressure and Temperature. Selected Papers on Optical Fiber Sensors, 1984. 275- 278.
- 3 C. D. Butter, G. B. Hocker. Fiber Optics Strain Gauge. Selected Papers on Optical Fiber Sensors, 1984. 320- 322.
- 4 王延云, 卢启柱. 单模光纤弯曲双折射的研究. 光电子技术, 1997, 17(1): 50- 53.
- 5 胡正荣, 毛秀华, 吴卫刚. 1.3 μ m 单模光纤偏振控制器的研究. 光电子. 激光, 1994, 5(3): 148- 153.
- 6 阮迎澜, 向清, 黄修德. 单模光纤应力诱导双折射及其测试研究. 中国激光, 1996, 23(10): 901- 905.
- 7 黄民双, 梁大开, 袁慎芳, 陶宝祺. 应用于智能结构的光纤传感新技术研究. 航空学报, 2001, 22(4): 326- 329.
- 8 张志鹏, W. A. Gambling. 光纤传感器原理. 1991.