

放线光缆强弯曲状态建模与特征分析

王 荣^{1,2}, 李振华¹, 卞保民¹, 刘成林², 纪运景¹

(1.南京理工大学信息物理与工程系,江苏南京,210094;2.盐城师范学院物电学院,江苏盐城,224002)

摘要 针对放线光缆放线剥离点附近的强弯曲状态可能引发光缆断纤的问题,在建立光缆运动姿态数学模型的基础上,对光缆剥离点处曲率半径和弯曲弧长的分布情况进行了研究。重点讨论了剥离点处曲率半径和弯曲弧长与剥离点位置、剥离段光纤所在缠绕层的半径、光缆放线速度、光缆线密度等光纤特征参量之间的变化关系,并对曲率半径最小值位置的具体讨论。结果表明,在对应试验条件下,放线过程中剥离点处光缆的曲率半径存在极小值,其大小约为1.2 mm,与光缆缠绕层半径、放线速度几乎无关。而曲率半径和弯曲弧长会随剥离点位置、放线层、放线速度、光缆线密度的改变发生变化。

关键词 放线光缆;强弯曲;断纤;曲率半径;弯曲弧长

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.02.017

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)02-0071-05

Modeling and Characteristics Analysis of Strong Bending State of Fiber Optical Cable

WANG Rong^{1,2}, LI Zhen-hua¹, BIAN Bao-min¹, LIU Cheng-lin², JI Yun-jing¹

(1. Department of Information Physics and Engineer, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Physics and Electronics, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, Jiangsu, China)

Abstract: Aimed at the strong bending condition of optical fibers near the stripping points probably leads the fibers to break, the distribution of the bending radius and the bending length near the fibers' stripping points are calculated and analyzed on the basis of the mathematics model of the unreeling kinematic attitude of the optical fiber cable during weapon flight movement. The relationship between the above two geometric quantities and the position of the stripping point are researched. And some other optical characteristic parameters such as the radius of the winding player, speed of the payout optical cable, line density of the optical cable are also studied respectively. The result indicates that the radius of curvature at the stripping point exist a minimal value 1.2 mm, and the value of the minimum almost has nothing to do with the above parameters. However, the bending radius and the bending length will be changed with the diversification of the stripping points location, payout layer, speed and fiber cables linear density.

Key words: fiber cables guidance; strong bending; fiber break; bending radius; bending length

收稿日期: 2013-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11175152)

作者简介: 王 荣(1965—),男,江苏盐城人,讲师,博士,主要从事激光测量与信息感知技术研究. E-mail: yctcwangrong@163.com

引用格式: 王荣,李振华,卞保民,等. 放线光缆强弯曲状态建模与特征分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(2):71-75. WANG Rong, LI Zhenhua, BIAN Baomin, et al. Modeling and characteristics analysis of strong bending state of fiber optical cable[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(2): 71-75.

光缆制导通过光导纤维进行武器和地面制导站之间双向数据传输来实现图像制导,是军用高技术领域中的一个热门话题^[1-5]。典型的光纤制导导弹具有精度高、能即时评估目标毁伤效果、抗干扰能力强等优点,但光纤本身如光缆长度、卷轴的释放速度和光纤自身抗拉强度等因素限制了制导距离。在高速、中长距离光缆制导系统中,如何保证在强拉力条件下顺利释放光缆而不断纤,是一项重要的关键技术^[2-3]。已有一些文献对光纤在弯曲情况下进行理论和实验研究^[6-10]。但对放线光缆动态过程中的剥离段强弯曲状态参数本身却缺乏研究。

本文通过卷轴尺寸、绕线方式或光纤参数的不同来改变放线光缆剥离点附近曲率半径和弯曲弧长,减少断纤的概率。

1 放线光缆强弯曲参数的理论模型

地面模拟武器放线实验中,光缆从卷轴上剥落时会发生强弯曲现象,利用 MC1300 型高速 CMOS 相机拍摄如图 1 照片。为描述放线光缆的弯曲状态,用“曲率半径”和“弯曲弧长”的概念来表征放线光缆剥离点附近的弯曲特性。

武器飞行放线光缆缠绕卷筒的长度远大于光缆的线径,用光缆线元表示光缆上代表点。以柱形光缆绕线管为基础建立的实验室直角坐标系见图 2。绕线管的轴与 z 坐标轴共线, z 轴的正方向从收线轮指向光缆绕线管, s 为光缆轨道, p 为所考察的光缆元 Δm ,光缆元 Δm 将在光缆绕线管表面上运动。

图 1 强弯曲现象照片

Fig.1 Photos of the strong bending phenomenon

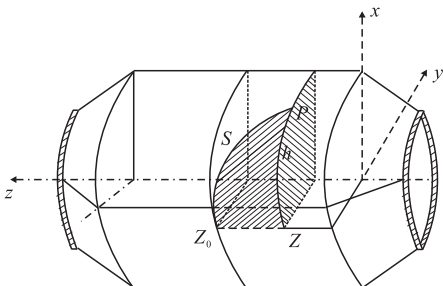


图 2 放线光缆坐标系示意图

Fig.2 Diagrammatic drawing of coordinate system of payout fiber cables

设任意时刻,释放光缆缠绕于光缆卷筒侧面上,由光缆运动摄像资料的分析,可得光缆运动姿态的特征。通过剥离点 z_0 在绕线管柱面上作一条母线,再经过运动光缆轨道上点 $p(x, y, z)$ 作一个与 z 轴垂直的平面 P 。 P 平面与光缆绕线管表面相交成一圆弧。该弧线上从 $p(x, y, z)$ 点到剥离点母线间的长度为 h 满足经验公式:

$$h = A(z_0 - z)(1 - Be^{-k \frac{R f_{S_z}}{\lambda v_0} \frac{z_0 - z}{z_0 - z}})^{2\sigma}, (z_0 \geq 0, z_0 - z \geq 0) \quad (1)$$

式中:参数 A 、 B 、 K 为无量纲数; R 为光缆元所在位置处光缆缠绕层半径; λ 为放线光缆的线质量密度; v_0 为光缆剥离点的放线速度; z 为光缆元 z 轴坐标; z_0 为光缆元剥离点的 z 轴坐标; f_{S_z} 为光缆轨道受到的沿 z 轴方向上的单位长度摩擦力,可由实验测得。式(1)的范围是从光缆剥离点 $z_0(t)$ 起到绕线管外端口($z=0$)为止。

$$\text{令 } c_2 = k \frac{R f_{S_z}}{\lambda v_0}, \eta = \frac{c_2 z_0}{z_0 - z}, \text{ 则在柱坐标系中,}$$

光缆轨道上固定光缆元的角坐标为:

$$\theta = \theta_0 - \Delta\theta_h = \theta_0 - \left(-\frac{h}{R}\right) =$$

$$A \frac{z_0 - z}{R} [1 - Be^{-\eta^{2\sigma}}] + \theta_0 \quad (2)$$

所以固定光缆元的坐标可表示为:

$$\begin{cases} x = R \cos\left(A \frac{z_0 - z}{R} [1 - Be^{-\eta^{2\sigma}}] + \theta_0\right) \\ y = R \sin\left(A \frac{z_0 - z}{R} [1 - Be^{-\eta^{2\sigma}}] + \theta_0\right) \\ z = z \end{cases} \quad (3)$$

对于放线光缆轨道上固定光缆元曲率半径可通过求解曲率半径的数学公式^[11],则弧线上某点 $p(x, y, z)$ 对应的曲率半径有如下表达式:

$$\rho = \sqrt{\frac{(x^2 + y^2 + z^2)^3}{(x^2 + y^2 + z^2)(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) - (\dot{x}\dot{y} + \dot{y}\dot{z} + \dot{z}\dot{x})^2}} \quad (4)$$

将式(3)代入到式(4),并令 $\zeta = e^{-\eta^{2\sigma}} (1 + 2\sigma\eta^{2\sigma})$,则放线光缆的曲率半径表达式式(4)为:

$$\rho = \sqrt{\frac{(A^2(1-B\zeta)^2+1)^3}{\frac{A^4}{R^2}(1-B\zeta)^4 + \frac{A^6}{R^2}(1-B\zeta)^6 + A^2 B^2 (\zeta - e^{-\eta^{2\sigma}} \eta^{2\sigma-1} \frac{4\sigma^2}{c_2 z_0} \eta^2)^2}} \quad (5)$$

由于放线过程中,剥离点处的弯曲是非纯弯曲情形,考虑到弯曲弧长与曲率半径在同一数量级,则对于放线光缆轨道上固定光缆元弯曲弧长的计算公式为:

$$L = \int_z^{z_0} \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} dz = \int_z^{z_0} \sqrt{1 + A^2 [1 - Be^{-\eta^{2\sigma}} (1 + 2\sigma\eta^{2\sigma})]^2} dz \quad (6)$$

式中:积分下限用剥离点 z_0 的坐标;积分上限为 $2\rho_0$ 处固定光缆的坐标。通过式(6)可求得任何剥离点处的弯曲弧长。

2 放线光缆曲率半径随其它物理量的变化关系

取光缆线径为 0.41 mm,光缆放线速度为 200 m/s,光缆线密度为 0.162 g/m,光缆在第 58 层,缠绕半径为 73.78 mm,根据式(5)对曲率半径的分布情况进行具体计算分析。

2.1 剥离点处曲率半径与剥离点 z_0 之间的关系

剥离点 z_0 (离外端口)的曲率半径进行计算,在不同剥离点处的曲率半径随剥离点位置的变化关系见表 1。

表 1 不同剥离点处的曲率半径

Tab.1 The curvature radius at different position of the stripping point

z_0 /mm	ρ /mm	z_0 /mm	ρ /mm
0.2	1.448	5	4.147
0.3	1.274	10	9.604
0.4	1.203	20	28.049
0.5	1.180	30	55.662
0.6	1.181	40	72.797
0.7	1.199	50	78.145
0.8	1.226	60	79.345
0.9	1.262	70	79.454
1.0	1.303	80	79.673

当 z_0 在 0.5 mm 以内时,剥离点处曲率半径随着剥离点位置 z_0 的增加而减小;当 z_0 在 0.5 mm 以外时,剥离点处曲率半径随着剥离点位置 z_0 的增加而增大。剥离点在 0.5 mm 处表现为曲率半径最小值。

2.2 剥离点处曲率半径与剥离段光纤所在缠绕层的半径之间的关系

在剥离点位置不同时,剥离点处曲率半径随缠绕半径的变化关系是不同的,见图 3。

1)在最外端口时,剥离点处曲率半径随着缠绕半径的增加在减小。

2)在剥离点 z_0 从 1.22 mm 到 1.7 mm 时,剥离点处曲率半径随着缠绕半径的增加先减小后增大。这种情况下,曲率半径的最小值大约在第 23 层,即缠绕半径为 59.43 mm 时取得。

3)在剥离点位置 z_0 从 1.7 mm 往后,剥离点处曲率半径随着缠绕半径的增加而减小,随缠绕半径

的不同剥离点处的曲率半径有最小值,但最小值的取得剥离点所在位置有关。

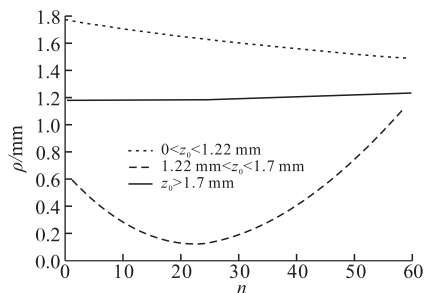
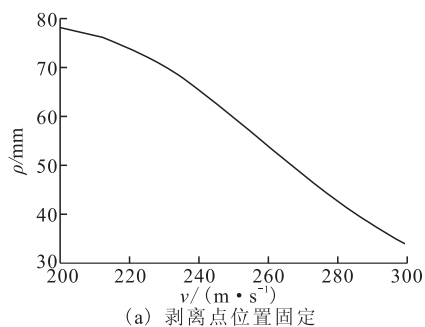


图 3 曲率半径随放线层数的变化关系

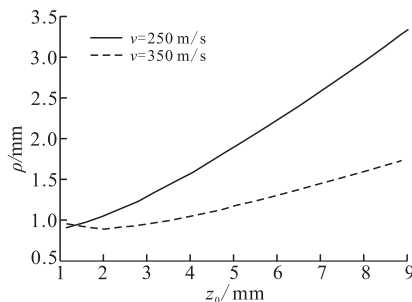
Fig.3 Relationship between curvature radius and payout layer

2.3 剥离点处曲率半径随放线速度的变化

剥离点处曲率半径与放线速度之间的关系见图 4。在图 4(a)中,剥离点处的曲率半径随着放线速度的增加而减小。另外,不同的放线速度在外端口附近曲率半径的变化也存在着差异,以 250 m/s 和 350 m/s,光缆线密度为 0.162 g/m 为例,不同放线速度下曲率半径随剥离点位置的变化关系见图 4 (b)。在 2 个不同放线速度情况下,曲率半径随剥离点位置的存在明显变化。在右端口附近的某个位置,放线光缆剥离点处的曲率半径有最小值,但随着放线速度的增大,该位置向左端移动,所以放线过程中如果要提高放线速度,则光缆向左端退绕圈数要根据提高放线速度的幅度相应的提高。



(a) 剥离点位置固定



(b) 剥离点位置改变

图 4 曲率半径随放线速度的变化关系

Fig.4 Relationship between curvature radius and payout velocity

2.4 剥离点处曲率半径随光缆线密度的变化关系

剥离点处曲率半径随光缆线密度的变化关系见图5,随着线密度的减小放线光缆曲率半径增大,故适当减小光缆线径,可以减小放线光缆的强弯曲程度,这对放线是有利的。如果光缆线密度减小为原来的一半,则曲率半径增加大约为1.5 mm左右,可见考虑减小光缆线密度来增加曲率半径的方法是有限度的。

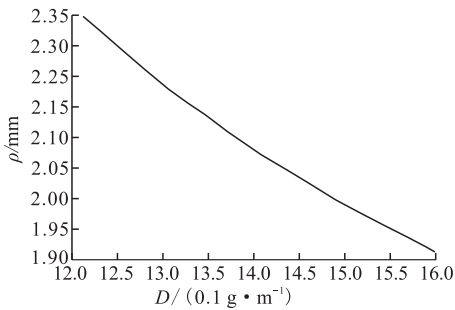


图5 曲率半径随光缆线密度的变化关系

Fig.5 Relationship between curvature radius and fiber cables linear density

2.5 对曲率半径最小值位置的具体讨论

根据前面对曲率半径分布的描述,影响曲率半径的因素有:剥离点 z_0 的位置,缠绕半径,放线速度,光缆线密度。在固定其它中3个参数时,剥离点

处曲率半径随其中另外一个的变化存在最小值。考虑到光缆线密度的变化对曲率半径的影响较小,且实际放线情况下,对光缆线密度有要求。本文只考虑其他3个因素对曲率半径最小值的影响见表2。

从表2可以看出,第1,随剥离点位置的变化,剥离点处曲率半径的最小值在最外端口附近的某处取得。第2,随放线速度的增加,剥离点处曲率半径的最小值离外端口越来越远。第3,随缠绕半径的增加,剥离点处曲率半径的最小值离外端口越来越远。且从表2中还可以看出,在所取参数范围内,剥离点处曲率半径的最小值不随剥离点 z_0 位置,放线速度以及缠绕半径的变化几乎不变,为1.178 mm。通过向里端退绕3圈的方法(实际放线过程中也退绕了)可以使整个放线过程中的曲率半径的最小值达到1.3 mm,而光缆准静态时2.5 kg 负荷下,90°弯曲弧长的折断下限半径值1.25 mm。曲率半径越大,断纤的概率越小,另外弯曲弧长越大,断纤的概率也越小。所以,退绕处理后光缆不会出现断纤现象。由此可以推断,剥离点处曲率半径的最小值只与光缆本身的特性有关,与其它放线参数无关,但它在卷轴上的分布会随剥离点位置,放线速度及缠绕半径的不同而不同。

表2 不同剥离点、缠绕半径和放线速度关系

Tab.2 The minimum value of curvature radius for the different stripping points

剥离点位/mm	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2	
R=50	V=200	1.307	1.200	1.178	1.194	1.232	1.283	1.343	1.411	1.483
	V=250	1.527	1.322	1.231	1.191	1.178	1.183	1.200	1.222	1.251
	V=300	1.800	1.502	1.354	1.270	1.122	1.195	1.181	1.178	1.182
R=73.37	V=200	1.203	1.181	1.226	1.303	1.397	1.504	1.619	1.742	1.871
	V=250	1.331	1.211	1.179	1.187	1.217	1.260	1.313	1.373	1.439
	V=300	1.516	1.315	1.227	1.189	1.178	1.184	1.201	1.228	1.259

3 放线光缆弯曲弧长随其它物理量的变化关系

在放线2一层中,轨道半径为58.2 mm、缠绕半径为73.37 mm放线速度为200 m/s、光缆线密度为0.162 g/m的情况下,根据弯曲弧长的计算式(6),弯曲弧长随剥离点位置、放线层、放线速度、光缆线密度的变化曲线见图6。

弯曲弧长随剥离点位置的变化曲线见图6(a),如果只从弯曲弧长的角度来考虑弯曲程度,那么从左到右和放线过程中,放线光缆剥离点处弯曲程度

在加强。图6(b)中,在剥离点为1 mm附近,曲率半径有最小值,此时,剥离点处弯曲弧长随着放线层的变化关系,弯曲弧长随着放线层的增加而增加。放线速度的变化也会对弯曲弧长的大小产生影响,所在轨道缠绕半径为73.37 mm时,剥离点处弯曲弧长与光缆放线速度之间的关系见图6(c)。随着放线速度的增加,弯曲弧长在减小,因此,增加放线速度是有利于减小弯曲程度,但放线速度的增加会引起曲率半径的减小。

当光缆线密度发生变化时,弯曲弧长也在发生变化。剥离点处弯曲弧长与光缆线密度之间的关系见图6(d)。其它条件恒定的条件下,随着线密度的减小,弯曲弧长增加。

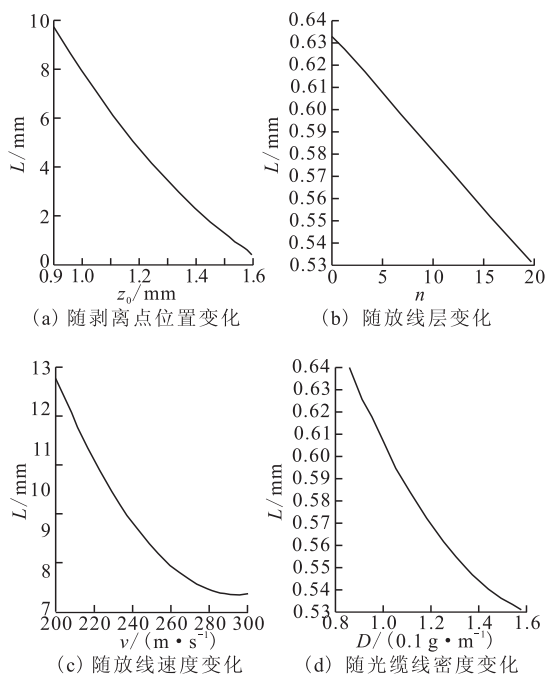


图6 弯曲弧长分别随剥离点位置

Fig.6 Relationship between bending length and the stripping point position

4 结语

本文给出了卷轴上放线光缆剥离段运动轨道方程、曲率半径和弯曲弧长计算公式。在光缆放线速度为 200 m/s, 光缆线密度为 0.162 g/m 的条件下, 对强弯曲参数曲率半径和弯曲参数弯曲弧长进行了计算, 并对它的分布情况给予了详细的分析。结果表明, 放线过程中剥离点处光缆的曲率半径存在极小值 ρ_m , 大小约为 1.2 mm, 与光缆缠绕层半径、放线速度几乎无关, 只是出现 ρ_m 的位置随光缆缠绕层半径、放线速度的不同略有变化。曲率半径和弯曲弧长随剥离点位置、放线层、放线速度、光缆线密度的改变会发生相应变化。

参考文献 (References):

- [1] 杨双收, 吴重庆, 李政勇, 等. 基于压电偏振控制器辅助 POTDR 的光纤弯曲半径测量研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(2): 47-51.
YANG Shuangshou, WU Chongqing, LI Zhengyong, et al. Measurement of bend radius based on PPC-assisted POTDR [J]. Journal of the China railway society, 2012, 34(2): 47-51. (in Chinese)
- [2] 曹自强. 光纤制导技术及其应用[J]. 光子学报, 2007, 36(S1): 53-55.
CAO Ziqiang. Technology of fiber-optical guidance and its application[J]. Acta photonica sinica, 2007, 36

(S1): 53-55. (in Chinese)

- [3] 白本, 周洁, 王泽和. 光纤制导弹综述[J]. 航空兵器, 2003(3): 40-43.
BAI Ben, ZHOU Jie, WANG Zehe. The summary of optical fiber guidance missile [J]. Aviation weapon, 2003(3): 40-43. (in Chinese)
- [4] 崔得东. 光纤图像精确制导系统[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 226-230.
CUI Dedong. Fiber optic image precision guidance system [J]. Infrared and laser engineering, 2003, 32(3): 226-230. (in Chinese)
- [5] 王雪珍, 卞保民, 纪运景, 等. 单模光纤弯曲损耗理论模型的修正[J]. 光子学报, 2006, 35(6): 819-823.
WANG Xuezheng, BIAN Baomin, JI Yunjing, et al. Theoretical model modify of bending loss of mono-mode fiber [J]. Acta photonica sinica, 2006, 35(6): 819-823. (in Chinese)
- [6] Qin F X, Li H G, Fan W, et al. Experimental study on vibration frequency response of micro-bend optic-fiber sensor [J]. Chinese optics letters, 2009, 7(7): 556.
- [7] Pramod R, Watekar P R, Ju S, et al. design and development of a trenched optical fiber with ultra-low bending loss [J]. Optics express, 2009, 17(12): 10350-10363.
- [8] Pramod R, Watekar P R, Ju S, et al. Single-mode optical fiber design with wide-band ultra low bending-loss for FTTH application [J]. Optics express, 2008, 16(2): 1180-1185.
- [9] QIAN Wang, Gerald F, Thomas F. Theoretical and experimental investigations of macro-bend losses for standard single mode fibers [J]. Optics express, 2005, 13(12): 4476-4484.
- [10] Sorensen T, Broeng J, Bjarklev A. Macro-bending loss properties of photonic crystal fibre [J]. Electronics letters, 2001, 37(5): 287-289.
- [11] 叶其孝, 沈永欢. 实用数学手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
YE Qixiao, SHEN Yonghuan. Handbook of applied mathematics [M]. Beijing: Publishing house of science, 2006. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)