

纤光制导^{*}光缆的缠放及其损失

陈 光 辉

〔摘要〕纤光制导导弹发展中一个特殊问题，就是光缆的缠放及由此而引起的光能量的损失。光缆顺从地放出与光缆技术要求、线轴设计和光缆缠绕工艺及参数控制十分有关。光缆在缠放过程中所处弯曲状态造成的宏弯和微弯附加损失，以及层间压力对弯曲损失的影响等，本文将作简要分析与讨论。

〔叙词〕光纤制导 光学纤维 缠绕结构工艺 弯曲性质 应力计算

1 前 言

导弹纤光制导是有线指令制导的一种最新概念，它利用光学纤维传输光信息的特性，将弹上摄像机摄取的视频信息通过光缆下行发送给地面站，并作视频图象显示，而地面站的控制指令则仍由此光缆上行传给导弹。通过如此方式进行信息传递，达到搜索、识别、跟踪或更换目标，直至命中目标的目的。

连接于导弹和地面站之间的这种光缆，对于地地使用环境大都由弹上放出的。给定长度的光缆在经受精心缠绕和高速放出过程中，其光学性质比处于常态下引起若干复杂的变化，其中尤其是光信息在传输中的能量衰减，即损失。纤光制导的特殊问题之一就是光缆，而光缆在实际使用中的重要技术问题就是它的缠放，本文就此问题作如下探讨。

2 光缆的要求和评定

用于导弹制导环境下的光缆，对其提出的要求要比一般工业通讯苛刻得多。据目前国外发展中的纤光制导导弹，其射程范围在5~25公里之间，飞行速度在300米/秒以内，贮存环境温度要求在-62°C~+68°C，贮存期20年，为此，必须对使用的光缆提出严格的要求并作出评定。

2.1 机械要求与评定

为确保光缆的缠绕、贮存和放出，对光缆的技术要求一般包括以下内容：光缆的连续长度，纤维不圆度，无外力作用下光缆盘绕直径，光缆剩余扭转变度，光缆标称线密度，包覆层厚度，包覆层不同心度，光缆不圆度，光缆平均直径和超出平均直径的最大偏差，光缆横向可压缩性，纤维抗拉强度，包覆层抗拉强度，包覆层表面摩擦力，包覆层韧性，光缆低温刚性、抗湿性、抗疲劳性，以及贮存温度和工作温度等，其中最为令人关注的是纤维的抗拉强度和低温特性。

* 这里“纤光制导”系作者的提法——编者注

大家知道，用于导弹制导的光缆总是希望具有连续长度而不拼接，尤其是对于纤芯直径在10微米以下的单模纤维，不仅拼接工艺困难，拼接点处的拉力强度难于保证，并带来附加的拼接损失，而且由于拼接造成形状鼓凸，影响密致而有序地缠绕。但是在实际使用中，为满足导弹作用距离要求，有些场合还需使用拼接的光缆。直接影响拼接的光缆参数有光缆直径的波动，纤维椭圆度，纤芯直径波动，纤芯偏心度，纤芯椭圆度和数值孔径。它们的影响情况分别如下：

1. 纤维直径波动给拼接造成侧向偏置和角偏置，而纤维的椭圆度能造成轴向偏置，使拼接工艺难于校正。

2. 纤维直径波动会在拼接平面上造成损失。假定光功率在纤维截平面上是均匀传播的，而且是从较大纤芯向较小纤芯传播，于是较大纤芯中的一部分能量要传到较小纤芯的纤维包层中，因而造成损失。其传输的功率比为两个纤芯直径的面积比，于是由于纤芯直径波动造成的损失为：

$$L_{d_o} = 10 \lg \left(\frac{d_{c_2}}{d_{c_1}} \right)^2 \quad (1)$$

式中 d_{c_2} 和 d_{c_1} 分别为较小纤芯和较大纤芯的直径。

3. 纤芯偏心度会造成纤芯之间作侧向偏置。在某种光缆偏心度 ϵ 给定的情况下，从统计上讲，这个偏置量在 $0 \sim 2\epsilon$ 之间。由于 ϵ 是统计分布的，因此，纤芯偏心度造成的损失也是随机率。

4. 纤芯椭圆度也会给光能量传输造成损失。尽管两个纤芯椭圆度是一样的，而且它们的中心是对正的，但其长轴之间存在角偏置，而且椭圆度和偏置的角度都是随机的。假定光能量在纤芯中作均匀分布传播，于是由于纤芯椭圆度造成的随机损失正比于重叠面积与椭圆总面积之比：

$$\frac{a}{a_{\text{总}}} = 1 - A \sin \theta \quad (2)$$

式中A是椭圆长轴与短轴之比的函数， θ 是偏置角。

5. 纤维数值孔径波动引起的损失是根据从纤维轴测量的最大传播角评定的：

$$\theta_{\text{最大}} = \sin^{-1} (N.A.) \quad (3)$$

N.A.表示数值孔径，拼接中如果数值孔径失配，则在拼接点处的高阶波模将变为辐射波模，通过对这两个最大传播角的两个圆在单位球表面上的重叠面积的比较，于是得出由于纤维数值孔径变化引起的损失为：

$$L_{N.A.} = 10 \lg \left(\frac{N.A.2}{N.A.1} \right)^2 \quad (4)$$

式中N.A.2和N.A.1分别为较小和较大数值孔径。

纤维的强度是导弹制导光缆十分重要的参数之一，必须满足规定的要求和经过严格的评定。在一定速度下（导弹飞行速度分布），放出的光缆都要承受相当高的动态拉力，因此在其全长上必须处处有足够的抗拉强度。美国陆军目前研制的纤光制导导弹，其所用光缆的制造检验强度不得低于25000公斤/平方厘米，工作抗拉强度不得低于14000公斤/平方厘米，而且正在制造42000公斤/平方厘米的高强度纤维。

一根无拼接的光导纤维，其强度主要取决于纤维本身的质量（包括其包层质量）和在贮存、工作环境下的受力状态。纤维的抗拉强度的检验往往在其制造过程中受给定负荷情况下就进行了，其检验示意图如图1。这样，如果在使用的全长上存在薄弱部位，也就是抗拉强

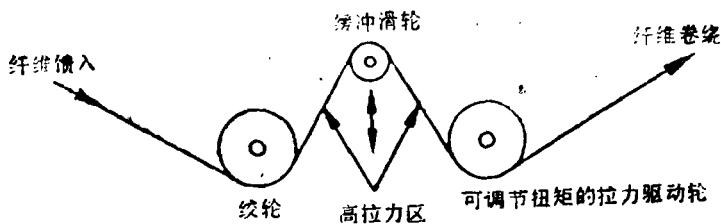


图1 纤维强度检验装置示意图

度低于检验强度的话，它就断在检验机上，把纤维自身的缺陷暴露在缠绕之前。检验负荷需在0.5秒内建立，加负荷的时间间隔约1~2秒，并在0.5秒内解除该负荷。这样，纤维所受的应力可由下式计算：

$$S = \frac{Er}{R + r + t} \quad (5)$$

式中：

E 为纤芯玻璃的Young氏模数；

R 为卷筒半径；

r 为纤维半径；

t 为包层厚度。

2.2 信息传输要求与评定

这主要反映在这两个方面，即光脉冲在传输过程中的衰减损失和到达时间的散布。脉冲散布影响数据传输率，如果期望的最大传输率给定，则这种散布必须限制在一定范围之内。衰减的问题，也就是光信息在传输过程中其能量的损失，这也是个重量的参数。除了发送、接收机和其它部件的损失之外，单就光缆在缠放状态下其损失机理也是十分复杂的。对于给定的光缆结构，在导弹最大作用距离下，容许的最大损失必须作适当的分配和严格的控制。

光学评定不只是光缆质量的检验，它也为缠绕对光学参数的影响确定基本数据。有关光缆的评定检测规程可查阅美国国防部军标MIL-STD-1678。对于光缆的弯曲损失后边将予讨

论。

2.3 环境评定

环境评定主要考核光缆在高、低温条件下对衰减和脉冲散布的影响，在一定温度下作温度循环后测其拉力强度，以及光缆的抗霉菌能力。该评定检验规程可查阅美国军标MIL-ST D-810C，其中温度循环的规程是：

1. 在4小时内将工作室温度从+86°F升到+149°F；
2. 在+140°F温度下保温8小时；
3. 在4小时内将温度从+149°F降到+86°F；
4. 在+86°F温度下保温21小时；
5. 在1小时内将温度从+86°F降到+68°F；
6. 在+68°F温度下保温4小时；
7. 在1小时内将温度从+68°F升到+86°F；
8. 在+86°F温度下保温5小时。

对上列总时数为48小时的循环周期，被测试品需进行五次，然后将其做拉力试验，以考核其对拉力强度的影响。纤维在给定拉力强度作用下持续3分钟，观测其是否断折。

至于霉菌试验是按美国军标MIL-STD-810进行的，试验之前，被试纤维需用异丙基已醇清洗，然后放入霉菌室内，喷予已准备的试验用的霉菌繁殖菌，室温保持在+86°F，相对湿度为95%，持续28天后看其抗霉菌能力。

综括起来，用于导弹制导目的的光缆在给定长度下十分强调在机械、传输和环境等方面达到最佳化，具体地讲，就是要使单位长度的损失低，纤芯直径小，数值孔径大，脉冲散布小，具备足够的抗拉强度，包层的同心度和圆度必须在规定的范围之内，高、低温对强度和衰减的影响要小，并有较强的抗霉菌能力。上述这些要求与光缆的包层材料和包覆工艺关系很大。一种实用的光缆一般由纤芯、包层（有的是双包层）和外层组成，选择特性适当的包层对光缆可靠地使用是十分重要的。光缆发生的故障往往与包层有关，玻璃纤维承受大部分负荷，重要之点在于包层的拉伸量大于玻璃纤维，这就意味着一旦发生故障，包层不会在玻璃纤维之前失效。

光信息传输损失和光缆的抗拉强度是导弹制导光缆设计至为关心的问题，它们与放线器（即线轴）的设计有着强烈的相互影响。在没有一套最佳设计程序之前，需要通过多方案结构设计和线轴参数之间仔细协调，方可使光缆衰减损失既低又满足最低强度要求。

3 线轴设计

根据弹上容许线轴可利用的尺寸和空间，以及由导弹作用距离决定的光缆长度，线轴的设计则由光缆参数和线管结构尺寸的不同变化进行叠代组合的结果确定的，这是一个不断修正的过程，直至使给定长度的光缆满足限定的几何尺寸和衰减要求。

绕在圆柱形线管上的光缆长度可由下式计算：

$$L = 2\pi \sum_{n=1}^N \left[b + \frac{d}{2} + (n-1) \frac{d}{2} \sqrt{4 - \frac{d_s^2}{d^2}} \right] \left[\frac{l}{d_s} - (n-1)i \right] \quad (6)$$

式中：

- d 为光缆直径；
- b 为线管外径；
- d_s 为缠绕步距 ($\geq d$)；
- N 为层数；
- l 为线管长度；
- i 为每层回跳匝数。

光缆包装件的外半径为：

$$R_n = b + d \left(1 + \frac{N-1}{2} \sqrt{4 - \frac{d_s^2}{d^2}} \right) \quad (7)$$

在这些计算式中略去了光缆包装件和线管在缠绕期间产生的任何压缩量，同时还略去了线管梢度的影响。至于线管和光缆包装件的应力计算，是通过一种计算机程序进行的^[1]，这个程序是以设计陶式导弹线轴设计程序为基础的。用于程序中的方程略去了一系列未予考虑的因素，诸如绕线过程中出现的各种应力和应变，只是在圆柱形线管的轴上是不变的，没有考虑光缆和线管材料的差分热膨胀效应，没有考虑在绕下一层时出现的跨越效应，光缆之间侧向刚性为常数，略去光缆扭转效应和略去线管梢度效应等。

在线轴结构设计中，以下一些原则应予考虑：

1. 为了尽可能减小微弯效应，必须保持较低的层间压力，这就要求低的绕线拉力和更少的层数；
 2. 线管长度和层数受下式约束：
- $$l > d_s(N-1)i \quad (8)$$
3. 缠绕过程中光缆在一定拉力下受弯曲，为了使绕在线管上的第一层光缆不产生屈服性的弯曲，必须确定最小线管半径；
 4. 线轴的最大外径要限制在导弹容许的尺寸以内；
 5. 线管所受的应力必须保持在屈服应力和弯曲应力以下，这应由线管的材料和厚度来保证；
 6. 光缆包装件中各层应保持正的拉力，以防止光缆可能出现的局部皱结；
 7. 为保障光缆包装件的稳固性，在一层向下一层过渡区上要有一定匝数的回缩量，即每层的两端要回缩比如抽出端为2匝和另一端为1匝的回缩量，或者更多。

4 光缆的缠绕与放出

对于纤光导弹制导这种特殊应用情况，在光缆参数和线轴结构设计经过精心协调之后，

它们需在一定拉力和缠绕工艺条件下，由专门的绕线机精密地绕成一个实用的光缆包装件，其典型的线轴结构和缠绕几何形状分别如图2和图3所示。在绕制过程中，一层的线匝都应套

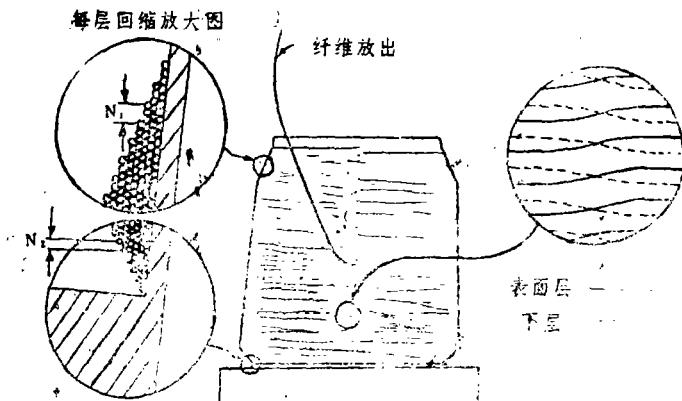


图 2 典型线轴结构

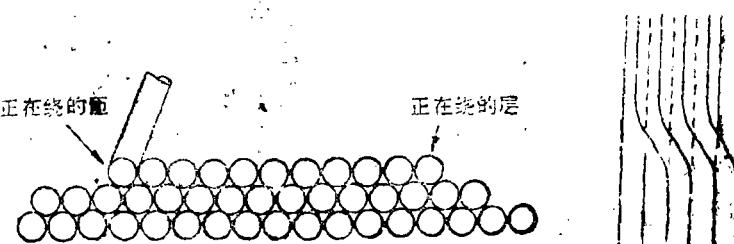


图 3 光缆缠绕几何形状

嵌在前一层（即其下层）线匝之间的凹谷内。按螺旋线缠绕的底层，就以一个光缆直径为步距朝缠绕方向推进，在每一层的端部都需要向下一层过渡，从概念上讲，这一层应该仍然是一条螺旋线，步距仍为一个光缆的直径，且落在其下层的凹谷内，但推进的方向与其下层相反。这样绕的结果，势必造成这一层的线匝不能整匝地落在其下层的凹谷内，而必须在某处从凹谷中提升起来方能进入到其邻近的凹谷之中，这个局部提升称之为跨越，其几何关系见图2中的局部放大图。前已提到，在一层绕好之后向下一层过渡时，每层的两端都要有一定匝数的回缩量或回跳量，目的是确保光缆包装件的稳固性。如此，直至给定光缆全长绕完。

绕线过程中光缆是在一定拉力下缠绕的，这样就存在剩余拉力，造成层与层之间的层间压力，这种呈径向作用的层间压力其几何关系如图4所示，并由下式计算：

$$P_1 = \frac{2F_1 \cos \alpha}{d_s} \quad (9)$$

式中

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{d_s}{2d_w}$$

这个力约等于绕线拉力，它趋向于压下一层。于是不难理解，每层所受的剩余拉力和层间压

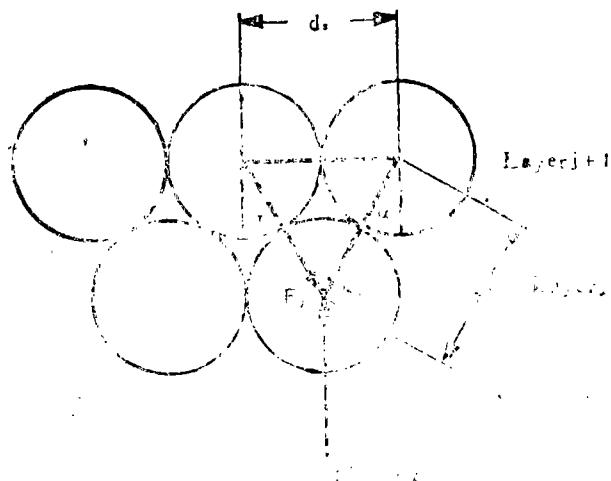


图 4 层间作用力

力都是变化的，其与线轴缠绕层数的关系如图 5 所示。这个作用力的存在是对光缆性能重要影响因素之一，它在跨越点处引起的局部微弯造成重大的信号衰减（由于弯曲效应引起的损失）。这个问题后边再作讨论。



图 5 层间压力与层数的关系

绕线过程中需要控制的一些参数包括底层的制备，拉力分布，导前角，回绕和跨越的控制以及使用的粘合剂等，其目的是使层间压力降到最小程度，以减小衰减损失，同时确保光缆顺利地放出，不紊乱，不缠结，不折断。这里如何恰当地使用粘合剂的问题是十分重要的。粘合剂的作用不仅使光缆包装件在经受各种环境下保持安定，而且可防止在放线拉力或

剥离力作用下出现绊线现象。粘合剂加多了会使剥离力增大，纤维易断，且不易展开，影响放线张力，加少了可能造成多层放线。每绕一层都需要加粘合剂，而且在绕下一层之前粘合剂要处于适当地固化状态。粘合剂的热物理性质和化学性质，必须与纤维缓冲材料相容，以适应长期贮存和高、低温环境。有关粘合剂的选择和使用都在探索之中。光缆的缠绕工艺被认为是导弹制导应用中的一个关键性难题。

导弹制导用的光缆是以导弹飞行速度放出去的，这是一个较为复杂的放线力学问题，其基本影响因素包括纤维强度，放线速度，线轴结构设计和尺寸，缠绕方式以及粘合剂的使用等。高速高应力地导弹放线，是光缆最恶劣的使用环境，其主要要求是高度可靠，而这种可靠性又主要取决于在其全长上具有足够的机械强度。放线过程中的机械故障大部分发生在纤维强度低于要求的检验强度的地方，而且伴有包覆层遭破坏或者纤维表面发生龟裂的现象^[3]。因此，在光缆的全长上，纤维的包层中存在龟裂，或者包层的不均匀性致使纤维露出来都是不允许的，它们都是机械故障的根源。

随着不同军用目的，光缆的放线环境已涉及到地地、空地、地空和水下，放线的速度，线轴结构和控制方式也随之不同。对于近程地地导弹，光缆则可从弹上放出，而有的空地导弹（如美国GBU-15空地电视制导炸弹的改型）则采用发射导弹的飞机和导弹同时双向放线的方式。目前看来，导弹放线速度依然受光缆强度限制。使光缆加速所受的力等于光缆单位长度的质量乘以速度的平方。然而放线过程中的机械摩擦和导弹飞行的动不稳定，往往使光缆受力大为增加。如图6和图7所示的放线过程，光缆是处于不同的受力状态的，尤其在剥离点

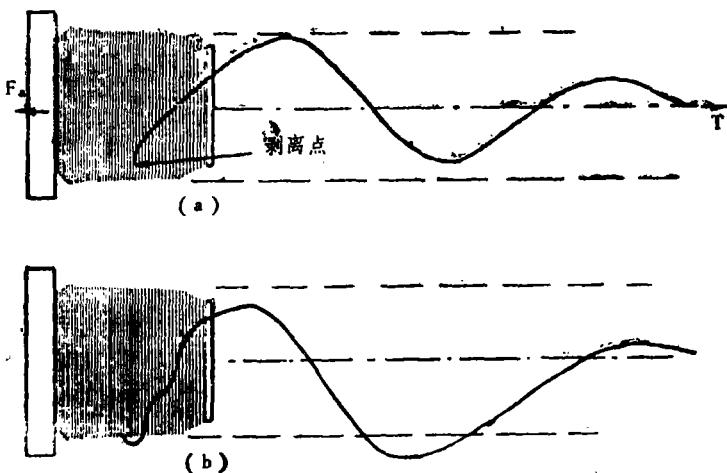


图 6 导弹光缆放线状态
(a) 为稳态放线 (b) 为扰乱放线

离点处其受力状况极为恶劣，具有峰值应力。典型的线轴结构是呈梢形的，光缆按螺旋线放出，放出时主要由线轴自身控制，放出光缆的螺旋幅度为空气所阻尼，由于导弹飞行速度和运动状态在改变，光缆要承受很高的拉力，这个力可表示为

$$T = (1.5 + \alpha) \rho' v^2 + F_0 \quad (10)$$

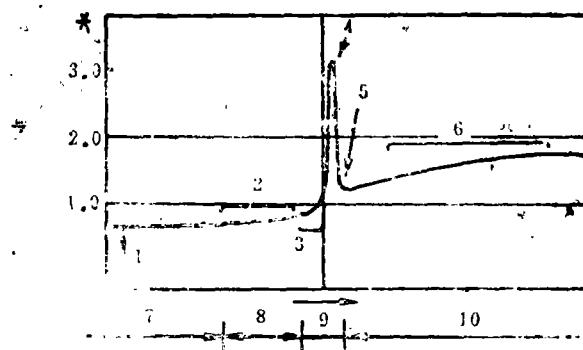


图 7 放线期间光缆典型受力状态

图中：(1) 留在线轴上的余应力；(2) 由于上层纤维被剥去引起余应力增加；
 (3) 剥离前瞬态拉力；(4) 剥离点处的峰值应力；(5) 放线拉力加摩擦力；
 (6) 放出纤维呈螺旋状引起的阻力使拉力增加；(7) 贮存阶段；
 (8) 剥离前阶段；(9) 剥离阶段；(10) 剥离后阶段；(•) 纵坐标，
 表示光缆规范化了的拉力幅度

式中 ρ' 为光缆线密度， F_A 为线轴轴向力， α 为空气动力阻力系数。轴向力 F_A 是由于在剥离点处的剥离力和正在放出的光缆触及线轴引起的。根据图 8 所示的光缆拉力测试方法，则

$$T = \rho' v^2 + \frac{F}{2 \sin \alpha} \quad (11)$$

式中 F 为所加负荷。

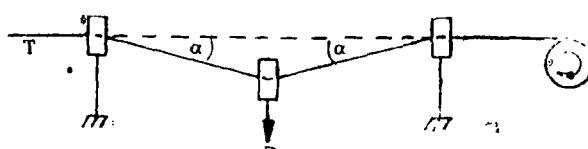


图 8 光缆拉力测量示意图

5 光缆绕线损失及其测量

在纤光制导弹系统中，光信息的衰减（即光能量损失）贯穿于传输过程的始终，其中最为引人关注的就是光缆由于受弯曲应力造成的宏弯和微弯损失，特别是那种弯曲半径大于或等于纤维半径的微弯曲，如前面提到在绕线中出现的跨越和在放线时的剥离，这都是光缆作急剧弯曲的所在。这是除了光缆自身固有损失之外的一个附加诱导损失，这种弯曲损失与纤维本身参数选择，线轴结构设计和绕线过程控制有关，其基本机理在于纤维中的导模（guide mode）与辐射模（radiation mode）之间发生的模耦合。耦合到包层中的辐射模

使光功率在光纤全长上造成缓慢的功率漏泄，而耦合到空气中的辐射模，由于光功率实际上辐射出光纤之外，也引起辐射损失，这种辐射损失是由于光纤模场变形的结果，因此在很大程度上取决于弯曲半径和光纤指数分布。从理论上讲，微弯损失是个复杂的问题，它往往需用统计的方法来表征这种损失的性质。有关光缆绕线损失的计算可以通过数学模型来预定，但主要还是依据OTDR这种仪器来测定。

前已提到，光缆的绕线损失与层间压力十分相关，不同层压下的相对功率衰减幅度如图9所示。图中每条响应曲线都是在某一压力下（模拟的层间压力）实测的，曲线的斜率正比

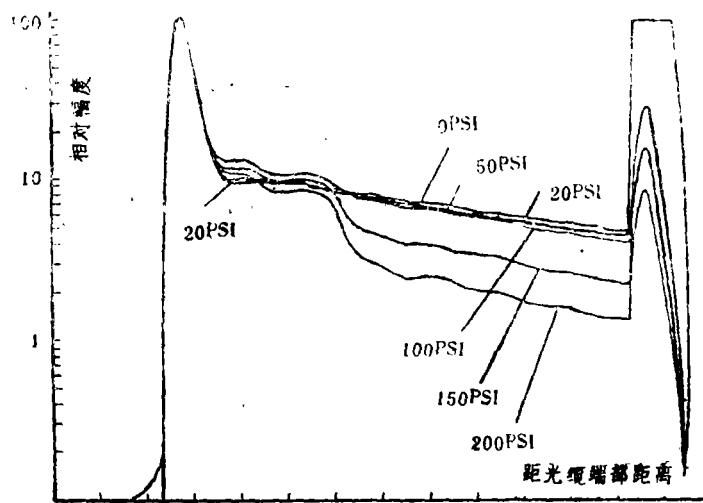
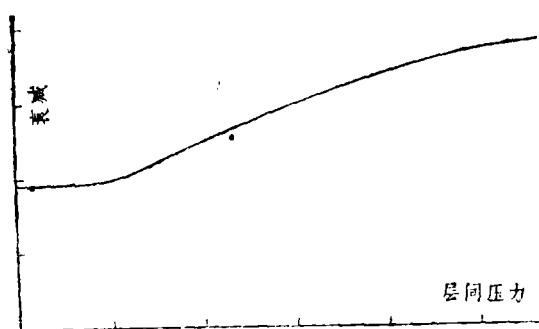


图 9 典型OTDR 测量结果

于衰减。而层间压力与衰减的关系如图10所示。

根据线轴层间压力和每层光缆长度，于是总损失可按下式预定：

$$L_{\text{总}} = \sum_{i=1}^N X_i L(P_i) \quad (12)$$



式中 X_i 为第 i 层光缆长度（以公里计）， P_i 为第 i 层的层间压力， N 为绕线层数， $L(P_i)$ 为第 i 层损失（以分贝/公里计）。

减小纤芯直径 d_c 和增加纤维数值孔径 $N.A.$ 都能降低光纤对弯曲诱导损失的灵敏度。对于单个弯曲点引起的损失可表示为：

$$L_i = \frac{K d_c^4}{d_f (N.A.)^2} \quad (13)$$

式中 K_i 是弯曲半径的函数, d_f 为纤维直径。于是对于 M 个弯曲点其造成的纯弯曲损失为:

$$L_s = \sum_{i=1}^M \frac{K_i d_c^4}{d_f^6 (N.A.)^3} = \sum_{i=1}^M K_i \frac{d_c^4}{d_f^6 (N.A.)^3} = A \frac{d_c^4}{d_f^6 (N.A.)^3} \quad (14)$$

式中

$$A = \sum_{i=1}^M K_i$$

K_i 随每个弯曲点几何形状而不同, 因此参数 A 表征光缆所承受的微弯环境。对于给定的线管结构和绕线拉力, 则缠绕某一长度光缆的线轴就具有一个相应的 A 值, 于是这个线轴的总损失等于光缆的固有损失加上因绕线引起的附加损失。

光缆包装件内的微弯环境十分复杂, 以致不能预定它的绕线损失。现在如果一个特定的线轴其绕线损失已通过实测确定了, 那么以同样方式缠绕, 但纤芯直径 d_c 和数值孔径 $N.A.$ 有变化的类似光缆, 其绕线损失是可以预定的。这里所说的类似是指光缆的机械特性相类似, 诸如纤维直径和缓冲层的性质。

设 L_0 为某光缆实测的绕线损失, d_{c0} 为该光缆纤芯直径, $(N.A.)_0$ 为数值孔径, 于是由方程式 14 得这两个光缆绕线损失之比为:

$$\frac{L_s}{L_0} = \frac{(d_c/d_{c0})^4}{[N.A./(N.A.)_0]^3} \quad (15)$$

由此, 对不同的规范化了的纤芯直径和数值孔径, 其规范化了的绕线损失如图 11 所示。这里我们可以发现, d_c 和 $N.A.$ 对绕线损失都有强烈的影响。减小纤芯直径对降低绕线损失对微弯的灵敏度有实质性的改善。若干研究表明, 制导光缆的损失主要受绕线的影响, 即光缆的微弯效应, 而改善这种损失的有效办法在于减小纤芯直径, 这是导弹制导光缆优先结构设计重要的一环。

一条合格的导弹制导光缆, 需在大范围的拉力、振动、冲击和温度等环境下对其长度、损失、缺陷和拼接等进行测量。这种测量不仅在绕线之前要进行, 而且在绕到线管上之后还要进行。其典型的测试设备就是光

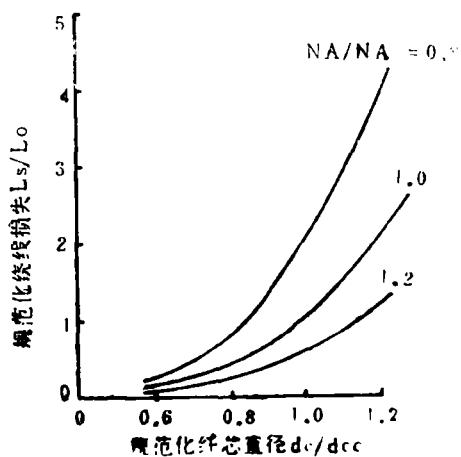


图 11 规范化绕线损失与规范化纤芯和数值孔径关系

学时间域反射计(OTDR)，其示意图如图12，这是一个综合的光参数测量仪器，它比用

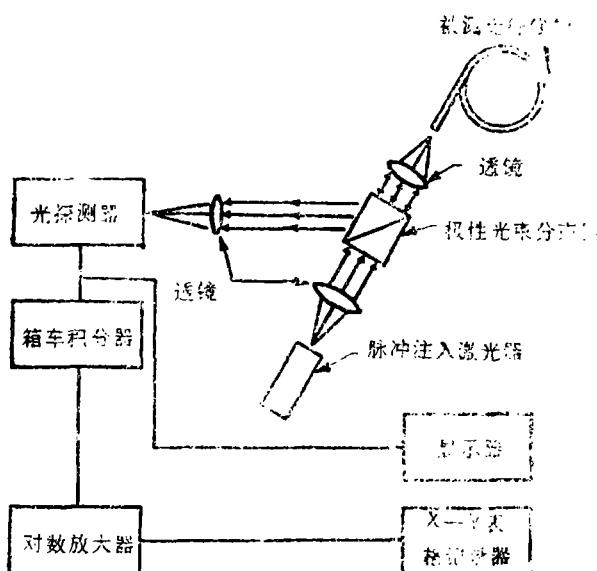


图 12 OTDR示意图

光功率计测量更为完备。OTDR测量原理包括三部分，即雷利反向散射，Fresnel反射和传播时间。任何用于光传播的介质都具有特定的散射性质。光波是通过纤芯传播的，在传播过程中经受一种称之为雷利反向散射的光散射。沿纤维轴传播的一部分散射光为波导型的，反回到光输入端的散射光称之为雷利散射。高质量的光导纤维，其散射光可认为是均匀分布的，而且反向散射光的能量是时间的函数，它随传播时间呈指数衰减。在任何点处，这种雷利反向散射光正比于该点传输脉冲的能量，根据反向散射的时间历程确定衰减量，其大小是沿纤维不同位置的函数。OTDR就是利用这种雷利反向散射原理测量纤维的损失的。

当光脉冲从光缆一端输入向光缆不连续点传播时，反射的脉冲就回到输入端，这种反射的脉冲波称之为Fresnel反射，如图13所示。如图可见，其反射率与不连续点的截平面与纤

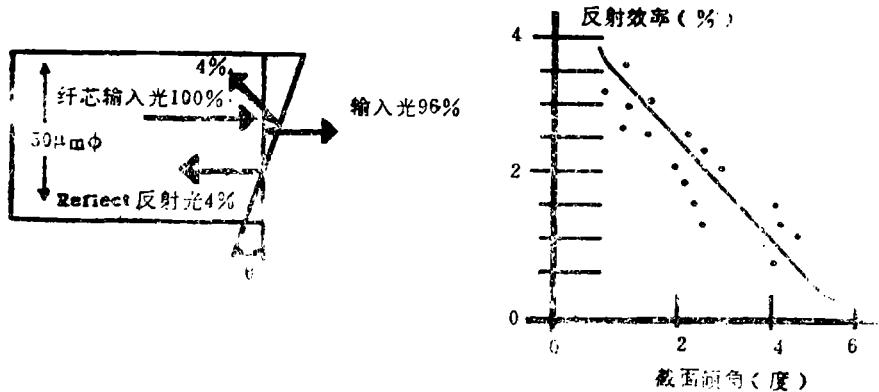


图 13 Fresnel 反射

维轴线之间的夹角有关，即使是理想的垂直平面，其Fresnel反射量也只占发送功率的4%。反之，如果这个截平面倾斜于纤维轴线的垂直平面即使只有6°，则几乎不产生这种反射。OTDR就是利用Fresnel反射原理判断光缆中出现的不连续点，确定是否断线和测定断线的位置。

光在光缆中传播的速度可表示为：

$$V = \frac{C}{n} \quad (16)$$

式中C为光在真空中传播的速度，n为光纤折射指数。当光脉冲在光缆中运行到特定点并反回到光传入端时，其传播时间为

$$T = \frac{2L}{V} \quad (17)$$

式中L为传播的光缆长度。因此，该光缆长度可表示为

$$L = \frac{VT}{2} \quad (18)$$

或

$$L = \frac{CT}{2n} \quad (19)$$

在已知C和n的情况下，通过测得的传播时间T就可确定光在光缆中运行的距离。

OTDR是一台测量导弹制导光缆基本特性的理想测试仪器，它能测出有关损失，找出光缆不连续点的位置和光脉冲运行的距离，即光缆的长度。它只要更换适当的模块，就可适用以不同工作波长的单模或多模纤维的测量。其典型型号如便携式的Anritsu MW910A，它测量精度高，通用性好，操作方便，能测长度达144公里，分辨率为0.01分贝和1米。

6 结束语

纤光制导技术经过近十年来的应用研究，可行性论证，一些技术问题已经取得基本性的突破，达到了可实用的程度。据国外发展动态，预计纤光制导的导弹在九十年代将在美欧国家中首先投入使用，主要用于反坦克和反武装直升机。在这使用初期阶段，弹上的摄像机将是电视型的，并与此同时向发展成凝视式红外焦面阵列型过渡，所用的光导纤维也将由多模过渡到单模，纤维的强度将提高到42000公斤/平方厘米，实用光缆长度即导弹飞行距离将增至15~25公里，以满足这一目的的战术需要。业已表明，纤光制导导弹是一种有效的反坦克、反直升机武器，这一概念已为人们所认识、所接受。

纤光技术用于制导导弹还只是处于初期发展阶段，一些技术问题还正在探索认识和尚需

完善，比如纤维弯曲对光信息传输性能的影响，低温对衰减的影响，光缆两端的光耦合，高强度纤维的制作与纤维的包覆，以及光缆的缠绕工艺等。对这些问题国外已在做大量的工作，限于有关资料尚未公布发表和本文讨论的范围，拟将在以后的专题跟踪研究中再作论述。

参 考 文 献

- [1] D.S.Fox, R.A.Eisentrant, "High Strength Rapid Payout Fiber Optic Cable Assembly", AD-A079633
- [2] D.S.Fox; F.Akers; G.Gasparian, "Optimization of an Optical Fiber for Missile Guidance Applications", SPIE, Vol.326, P.14-22, 1982
- [3] H.P.Hsu, "Single Mode Fiber Bending Loss and Its Environmental Dependence", ARO 22707.1-MS, 1986
- [4] Joseph Wysocki 等, "Reliability of Optical Fibers for Missile Payout", SPIE, Vol.988, P.157-162, 1988
- [5] Paul L.Jacobs, "The Fiber Optic Guided Missile", SPIE, Vol.989, P.178-182, 1988
- [6] Russell C.Pepe, "Fiber Testing in The FOG-M, MFOC'87, P.158-173
- [7] Gerald J.Herskowitz, "The Impact of Data Rates on The Design of a Fiber Optics Guidance System", AD-A 119175
- [8] William H.Culver, "Military Applications of Fiber Optic Tethered Vehicle Technology", SPIE, Vol.989, P.156-161, 1988

[上接84页]

由于爆炸成形弹丸是从顶部攻击坦克要害部位，顶部攻击面积大，弹丸的攻击效果又不受炸高的限制，特别是爆炸成形弹丸能够有效攻击披挂了反应装甲的坦克，而且后效又大，所以它是一个应用前景广泛的新弹种。但是，由于它的外弹道飞行稳定性国内尚未解决，国外也没有成功经验的报导，这将严重影响它的威力和精度。所以，解决爆炸成形弹丸的外弹道飞行稳定性已经成为它是否能够广泛应用的最大关键。可以预计随着爆炸成形弹丸战斗部技术关键的突破，爆炸成形弹丸不仅在末敏弹上会发挥巨大潜力，在其它弹种上也将得到广泛应用。



图3 带尾裙的爆炸成形弹丸

参 考 文 献

《现代军事》1988年12月（总144期）等