

基于光纤传感技术的着靶点测量系统设计

倪春雷¹, 马胜利², 邹滨键³

(1 中国人民解放军 91550 部队 大连 116023

2 北京航天控制仪器研究所 北京 100854

3 北京计算机技术及应用研究所 北京 100854)

摘要: 为检验武器系统的制导精度, 必须对制导武器命中靶标的相对位置即脱靶量进行测量。针对靶船着靶点测量的需求, 提出基于光纤传感技术的测量方案。在分析光纤传感器测量原理的基础上, 通过光纤传感器网格、光源发射装置、信息采集、数据接收处理等分系统的设计, 实现对靶船着靶点的高精度实时测量。通过对系统工程实现及关键技术问题的研究, 表明该系统的技术可行性和工程可实现性, 并可推广应用于其它靶标系统。

关键词: 光纤传感; 靶船; 着靶点测量

中图分类号: TN818

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)04-0049-06

Design of miss-distance measurement system based on optical fiber sensing technology

NI Chunlei¹, MA Shengli², ZOU Binjian³

(1. 91550 of PLA, Dalian 116023, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100854, China;

3. Beijing Institute of Computer Technology and Applications, Beijing 100854, China)

Abstract: To test the accuracy of shooting or guidance of weapon system, it's necessary to measure the drop-point of missile on target ship. In order to satisfy the needs of measurement, a measurement scheme is proposed based on the optical fiber sensing technology. On the basis of analyzing the principle of fiber optic sensor measurement, the system including optical fiber sensor grid, light source emitting deceives, information collection, data processing is designed to get high precision measurement of drop-point. It shows that technical feasibility and engineering of the system can be applied by system engineering realization and research.

Key words: Fiber optic sensor grid; Target ship; Drop-point measurement

引 言

在武器装备试验鉴定领域, 制导武器的性能检验集中体现在弹靶遭遇段。根据遭遇段弹与靶的状态信息, 可鉴定末制导精度、评估引战配合效能和判定杀伤效果。因此, 精确测量弹靶相对位置的脱靶量对武器装备性能检验起着关键的作用。

目前, 针对不同类型目标脱靶量测量, 国内外在光、声、无线电和高能射线等技术领域均有研究应用。光、声学测量受自然条件影响大, 数据处理复杂; 高能射线受放射物质使用安全限制; 无线电是脱靶量测量常用的技术手段, 但易受复杂电磁环境干扰。以上方法对测量精度均存在不同程度影响。不断提升的武器系统制导精度对测量精度的要求也越来越高, 因此, 在分析各种测量技术优劣的基础上, 研究适用于复杂电磁环境下基于光纤传感器的脱靶量测量技术, 在武器装备试验鉴定中具有重要意义。

1 光纤传感器测量技术原理

光纤传感器是一种将被测对象的状态转变为可测光信号的传感器, 具有径细、柔韧、强度高、耐

高温、耐腐蚀、抗电磁干扰能力强等特点。光纤既是传感器又能充当信号传输通道, 且光路有可绕曲性, 便于按需布设构成监测区域, 实现对被测信号的远程检测, 在远距离分布式光纤传感测量中具有突出的优势^[1-3]。

光纤传感器网络测量是将传感光纤按需设计为网格状结构, 布设覆盖于被测体部位。当被测区域受到应力作用, 光纤中的光信号会发生变化, 光线传感器实时采集信号信息可迅速分析出受到应力的相应位置。光纤网络最小单元由两纵两横四路传感光纤组成, 被测体的应变点产生在网格内, 由于这四路光反馈信号在光路信息采集通道上是各自独立的, 反馈的时域信号也得到充分隔离, 光纤接收终端收到的信号在时间上也同样得到隔离^[4]。因此, 通过对反馈信号的检测, 分析光纤传感器网络和光纤反馈时域信号关系, 可以准确判断测量区域应变点产生的位置并被唯一确定。这种方法原理简单可靠, 响应速度快, 有环境适应性强、抗强电磁干扰等优点, 特别适用于靶船着靶点测量。

2 靶船着靶点测量系统设计

2.1 系统组成

靶船被击中时, 靶船着靶点测量系统采用光纤传感、数据采集与处理以及远程无线传输技术, 对制导武器命中靶标时的位置和时间等有效信息进行高精度测量。系统由光纤传感器网络、光源发射装置、信息采集设备和数据接收处理设备等组成, 如图 1 所示。光纤传感器网络用于检测着靶点信息; 光源发射装置为光纤传感器网络提供连续稳定的光信号; 信息采集设备监测每路传感光纤的光信号状态信息, 并通过远程无线通讯系统发至地面数据接收处理设备, 解析获得着靶点位置信息。

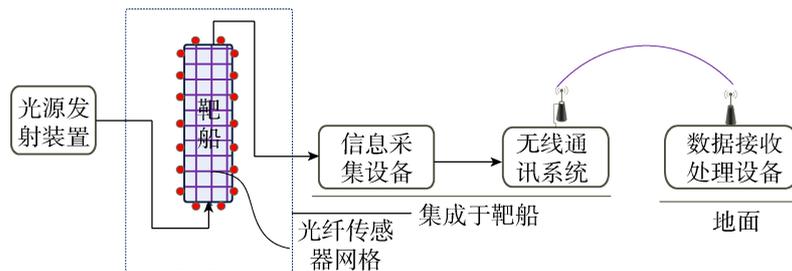


图 1 靶船着靶点测量系统组成

Fig. 1 The composition of miss-distance measurement system of target ship

当制导武器击中靶船时, 撞击接触的光纤网格区域相应位置的传感光纤会损坏, 信息采集设备及时探测光信号从有到无的状态变化, 提取并确定断裂状态光纤编号, 将其与 GPS 时间信息组建着靶信息数据帧, 由远程无线通信系统传送至地面或测控船上的数据接收处理设备, 同时备份到数据记录器中。数据接收处理设备对原始断裂光纤编号信息进行处理, 解算获取着靶点位置坐标并进行二维显示, 完成着靶点测量。

2.2 光纤传感器网络设计

通过将多根传感光纤按经纬交错的方式布设于靶船甲板平面上, 且任意两个交错方向的传感光纤只能确定唯一交点^[5], 形成光纤传感器网络。通过光源发射装置向光纤传感器网络中的所有经纬度传感光纤输入光信号, 并与信息采集设备连接构成通路; 当制导武器落入光纤传感器网络区域后, 由最早撞击接触点开始扩散形成损伤区域, 位于该区域的传感光纤网格会受到损坏, 光源发射装置输出的光信号无法送到另一端的信息采集设备, 对应光路的通断状态被实时采集。利用交错光纤交点唯一的特性, 结合光纤传感器网络与目标靶船的物理对应关系解析获取着靶点信息^[5]。技术原理如 2 图所示。

制导武器落入光纤传感器网络区域形成最早的撞击点, 即着靶点 (如图 3 所示), 撞击毁坏过程将以此点开始扩散。着靶点在传感器网络中的位置可分为多种情况, 若此撞击点紧邻定位点 A, 则接触后随即切断传感光纤 1 和传感光纤 2, 通过分析上传数据可获得撞击位置坐标为点 A; 当撞击点紧邻

B、C、D时，情况类似，此时获得的着靶点坐标相对较为精确。然而，最早撞击点也可能落入 ABCD 构成的边长为 L 的正方形区域内，从测量精度的角度分析，最恶劣的情况是正好落于正方形中心，随着毁伤区域的扩散，若最先断裂的传感光纤为光纤 1、光纤 2，则分析下传数据获得撞击位置为 A 点，此时将会产生最大的测量精度误差，其值为 $\sqrt{2}\frac{L}{2}$ ；当获得撞击位置为 B、C、D 时，情况类似。

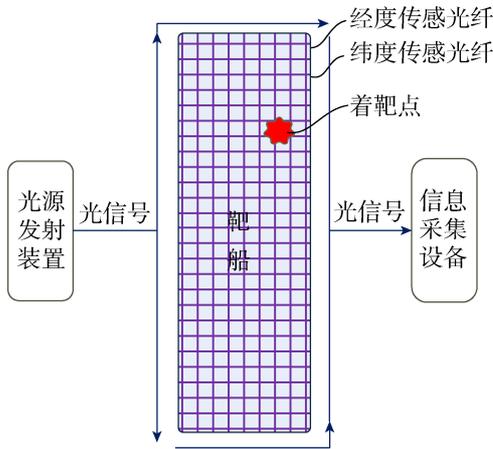


图 2 光纤传感器网格技术原理

Fig. 2 Schematic diagram of fiber optic sensor grid technology

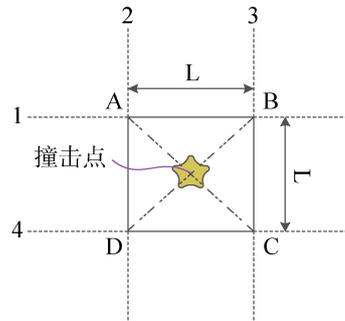


图 3 着靶点位示意图

Fig. 3 Sketch map of miss-distance

若根据靶船着靶点测量精度性能指标要求优于 d ，则传感光纤布设间距应小于 $\sqrt{2}d$ ，即在经度、纬度方向上传感光纤围成的四边形区域，若小于以 $\sqrt{2}d$ 为边长的正方形区域即可满足精度要求。显然，光纤传感器网格间距不仅仅决定于精度指标要求，还需考虑到试验制导武器着靶后的毁伤区域直径 D ，以避免出现“漏网”风险，因此，设计的传感光纤间距同时还需满足小于 D 的要求。

确定网格间距后，根据整个靶船甲板平面大小，设计采用不同路数和长度的传感光纤构成光纤传感器网格。其中，沿船体首尾方向定义为经度布设 n 根光纤，宽度方向定义为纬度布设 m 根光纤，每经纬方向上的两根传感光纤确定唯一交点，并对应于再入体表面上的唯一坐标，通过监测撞击发生后 n 根光纤和 m 根光纤的通断（通为“1”，断为“0”）来确定撞击位置。

2.3 光源发射装置设计

光源发射装置由光源及其驱动电路、光分路器和光纤连接器等组成，用于实现输出稳定的光信号，并输入到靶船甲板平面上的光纤传感器网格。光源在驱动电路驱动下输出功率稳定的光信号，经光分路器均分成多路光信号，再由光纤连接器输出到布设于靶船甲板平面上的光纤传感器网格，装置设计原理如图 4 所示。

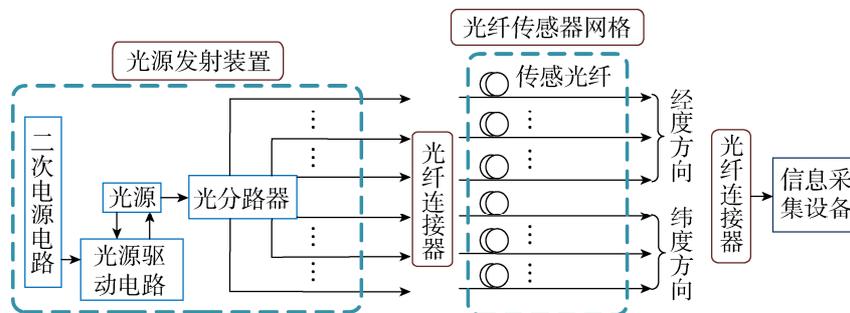


图 4 光路装置原理

Fig. 4 Principle of optical path device

2.4 信息采集系统设计

信息采集设备主要包括探测器电路、信息采集处理电路、母板和二次电源电路，如图 5 所示。信息采集设备监测从光纤传感器网络每路传感光纤传输来的光信号，放大、判决并转换成通断状态信息；完成光纤传感信息的采集、编码和封装处理，并发送给远程无线通讯系统；发送的信息中包含系统状态信息，可同时实现系统状态反馈功能。

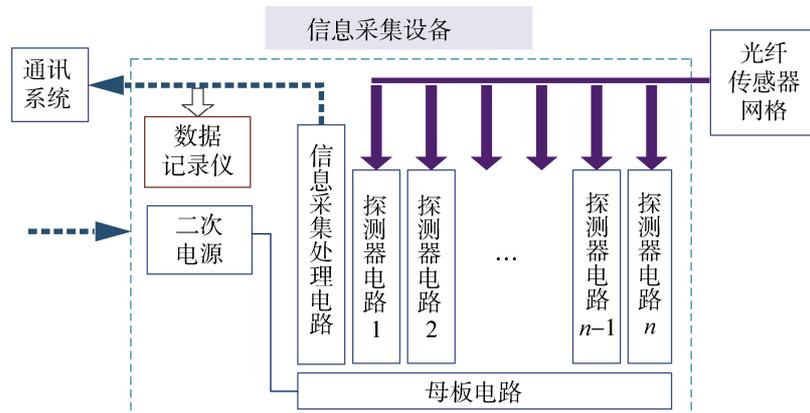


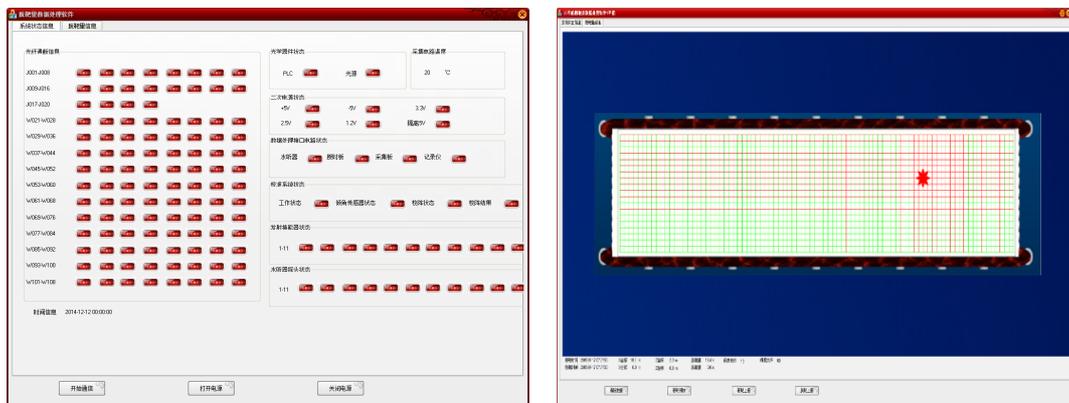
图 5 信息采集原理

Fig. 5 Principle of information acquisition

光信号经光纤传感器网络的传感光纤传输到探测器电路组件中，因此，根据光纤传感器网络传感光纤的数量设计探测器电路组件。传感器采集到的信息经母板电路汇集后传输到信息采集处理电路，进行信息处理和编帧后发送至远程通讯系统；板级的电压状态、温度状态等信息以及光纤传感器网络的通断状态信息均可实时通过远程无线通讯系统上报，并可接收远程启动及时间同步信号等控制指令。

2.5 数据接收处理软件设计

数据接收处理软件主要用于对光纤传感信息的接收与解调，如图 6 所示，包括系统状态信息和着靶点信息显示两个界面。远程无线通讯系统将信息采集设备采集到的光纤传感网络通断状态信息以及设备状态信息传输至工作站，通过数据接收处理软件对状态信息进行实时接收、解调与处理，从而识别制导武器着靶后光纤传感器网络破坏的先后顺序，解析获得着靶点位置坐标并进行二维显示，同时，还可以获得靶船命中时刻信息以及毁伤过程。



(a) 系统状态信息界面

(a) System status information interface

(b) 着靶点显示界面

(b) Drop-point display interface

图 6 数据接收处理软件

Fig. 6 Data receiving and processing software

3 工程实现及关键技术问题

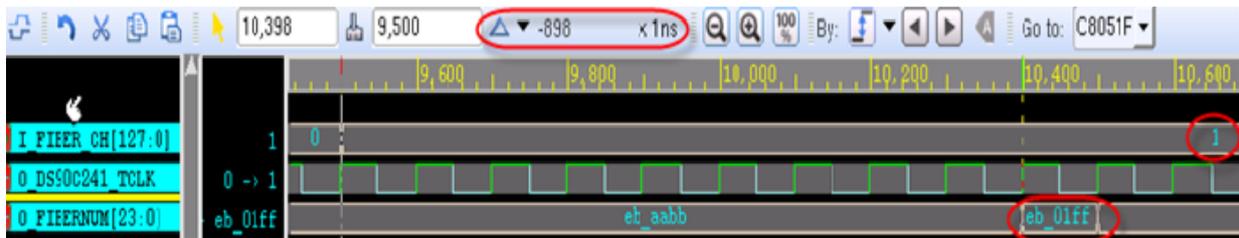
3.1 光纤传感器网格布设

在靶船上实现有效传感区域的全监测覆盖是着靶点测量系统的难点。为了实现全方位监测，光纤的铺设采用与靶船甲板全面附着贴合的安装方式。根据设计的网格间距和靶船外形尺寸以及设备安装位置，确定经度和纬度传感光纤的长度和数量，传感光纤两端分别设置单芯光纤连接器；根据传感光纤经、纬向间距要求，在船舷四周设计同等间距的固定栓。布设时，取出相互对应编号标识的传感光纤和固定栓，从靶船一端向另一端布设，并按一定间距采用光缆固定夹固定在甲板上，实现整个光纤传感器网络的保形，并具备抗海上风浪的能力；传感光纤固定形成光纤传感器网格后，一端集束到多芯光纤连接器与光源发射装置接插，另一端集束到多芯光纤连接器后与信息采集设备连接。光纤传感器网格布设可以实现靶船甲板全覆盖监测，同时确保试验武器撞击靶船甲板后不会“漏网”或拉扯光缆造成着靶点误判。

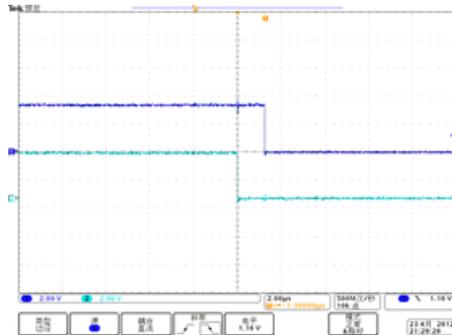
针对靶船甲板上的基础设施，光纤传感器网格布设采取两种措施：对可覆盖的基础设施，根据其三维模型设计特殊的传感光纤长度^[6]，按照投影间距制作间距标识，当布设到基础设施时越过其上继续前向布设，以保证测量精度；对于不可覆盖的基础设施，设计特殊长度的传感光纤绕行布设。

3.2 系统的抗干扰性能设计

除选用本征抗干扰的光纤作为传感介质外，在光信号探测方面，采用具有高增益、高带宽和高压摆率的开关双状态光电探测器准确探测光信号的有无，通过判决电路设定合理阈值，实现光路通断两种状态的准确判断，避免由于电磁干扰、光缆受压损耗变大造成的误判；在信息采集处理算法上，考虑到光纤遭物理损伤后的不可恢复性，采取滤波算法，仅对由通到断并持续一定时间的信号进行识别，可有效剔除高频信号干扰产生的“毛刺”，进一步确保光路通断状态的准确识别。通过双路光纤传感器切断实验进行验证，如图7(a)所示，01号光纤由通到断的响应时间为898ns，即光路状态由eb_aabb变成eb_01ff，对应光电探测器响应如图7(b)所示，可有效抑制噪声和干扰，提升系统的抗干扰性能。



(a) 01号光纤通断响应时间
(a) No.1 fiber optic make-and-break responding duration



(b) 01号和02号光纤断裂时对应光电探测器响应
(b) The respond of photoelectric detector to No.1 and No.2 fiber optic's break

图7 响应时间及抗干扰验证

Fig. 7 Responding duration and anti-jamming test-and-verify

3.3 光纤传感器网格故障对精度影响分析

光纤传感网格着靶点测量为典型接触式测量, 采用强度适当的铠装传感光纤可极大降低光纤的损坏。如前所述, 忽略毁伤直径 D 的影响, 当测量精度要求优于 d 时, 光纤传感器网格边长应优于 $\sqrt{2}d$ 。但是, 由于靶船加装设备多、工作环境恶劣, 传感光纤会不可避免地发生故障, 对测量精度将产生不同的影响。当 1 根独立经度光纤或纬度光纤故障时, 网格边长为 $\sqrt{2}d$ 条件下, 测量精度变为 $\sqrt{10}d/2$, 不满足优于 d 的精度要求。因此, 为了使不连续的经度光纤或纬度光纤故障不影响测量精度 d , 需对光纤传感器网格增加密度, 缩小网格间距, 如将 $\sqrt{2}d$ 减小为 $(2\sqrt{5}d)/5$, 仍可满足精度指标要求。因此, 在实现精度指标前提下, 可根据需求加减光纤传感器网格密度, 实现冗余设计。

4 结束语

通过识别试验武器破坏光纤传感器网格的有效信息, 实时探测传感光纤毁伤的状态, 可获得撞击靶船首点位置信息以及损伤过程, 实现靶船着靶点的高精度实时测量。系统解决了光纤传感信息高速采集与传输、抗干扰性能设计以及光纤传感器网格布设等关键技术和工程实现问题, 为该技术的推广应用提供可靠的借鉴。

参考文献

- [1] 李川, 李英娜, 万舟, 等. 光纤传感器技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
LI Chuan, LI Yingna, WAN Zhou, et al. Optical fiber sensor technology[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] 张森. 光纤传感器及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
ZHANG Sen. Optical fiber sensor and its application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2011.
- [3] 高宏, 贾振安, 禹大宽, 等. 光纤分布式布里渊散射传感技术的发展[J]. 科技资讯, 2014, 12(24): 30–31.
GAO Hong, JIA Zhenan, YU Dakuan, et al. Development of optical fiber distributed Brillouin scattering sensing technology[J]. Technology Information, 2014, 12(24): 30–31.
- [4] 王帅, 栾丽君, 邵秀江. 基于 BOTDR 的矿井冒顶坍塌事故全方位监测[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 774–777.
WANG Shuai, LUAN Lijun, TAI Xiujiang. All directional real-time monitoring on roof fall and collapse in coalmines based on BOTDR technique [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2012, 31(5): 774–777.
- [5] 陈喜锋, 王国利, 郭雪梅. 实现目标跟踪的光纤传感网络及其优化设计[J]. 自动化学报, 2012, 40(7): 1348–1354.
CHEN Xifeng, WANG Guoli, GUO Xuemei. A fiber sensor network and its optimization design for target tracking[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 40(7): 1348–1354.
- [6] 胡常青, 孙巧英, 杨勇, 等. 一种靶场末区多方式融合落点测量系统[P]. 北京: CN105629253A, 2016-06-01.
HU Changqing, SUN Qiaoying, YANG Yong, et al. A multi-mode fusion landing point measurement system at the end of range[P]. Beijing: CN105629253A, 2016-06-01.

[作者简介]

倪春雷 1966 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为武器装备试验技术。

马胜利 1994 年出生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为目标毁伤及近感探测。

邹滨键 1991 年出生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为信息技术应用创新。