

海底管线模型地震实验



深圳市简测科技有限公司

二〇一四年九月

引言

管道运输是油气运输中最快捷、经济、可靠的方式。海底油气管道一般采用开沟埋设的方式敷设，当海床起伏不平或岩石较为坚硬时，也可采取分段锚固的方式固定在海底岩石上。然而，由于海流的冲刷，或者受敷设路线上地形的影响，许多最初放置在海床上的管道出现了悬跨现象。当垂直于悬跨方向的海流流过时，将可能产生涡激振动，最终导致管道的失稳破坏。如果管道的敷设路线经过地震带，则在地震作用下，管道的悬跨部分也是整个管道系统的薄弱环节，研究悬跨部位的应变反应具有重要的理论意义和实际意义。

光纤光栅是近 10 年来出现的一种新型智能传感元件，同传统的电测传感器相比较，光纤光栅具有稳定性好、耐腐蚀、抗电磁干扰、准分布测量、体积小、重量轻、结构简单和精度高等优点。但是对于裸光纤光栅，它的直径仅有 $125\mu\text{m}$ ，抗剪能力差，在实际的恶劣环境中易折断。因此，针对实际应用，需要开发一种光纤光栅的封装技术，在不降低光纤光栅传感性能的基础上，有效的保护裸光纤光栅。

我们开发的光纤光栅应变传感器在海底管线模型振动实验中得到了应用，监测了管线模型悬跨部位垂直方向上的地震应变反应特性。

模型设计及激励系统

该模型采用有机玻璃（聚丙烯树脂）材料制作。这种材料的特点是弹性模量低，强度高，材质细密，宜于进行机械加工，是用来模拟海底管线的理想材料。模型总长 2700mm，外径 150mm，壁厚 5mm，几何尺寸如图 7.1 所示。

模型试验的激励装置采用大型电-液伺服控制水下地震模拟系统，如图 7.2 所示。该系统由水下振动台、驱动系统、中心控制系统、水池组成。是国内唯一可用于水下振动试验的地震模拟振动台。能进行水平和竖直两个方向的激振，可产生的最大加速度为 $1.0g$ （水平）、 $0.7g$ （竖直），工作频率为 $0\sim 50\text{Hz}$ ，最大水深为 1.0m 。

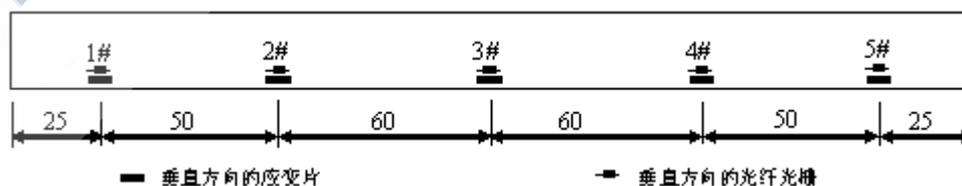


图 7.1 海底管道模型传感器布置图



图 7.2 水下振动台及海底管线模型

传感器布置及数据采集系统

传统的应变测试采用的传感器一般为电阻应变计，由于其具备安装简便，造价低，精度可以达到一般要求而得到了广泛的应用。但是电阻应变计稳定性较差，易受环境电磁场干扰，必须进行防水处理才能进行短期水下工作。光纤光栅（FBG）传感器作为性能优良的敏感元件，具有灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀、稳定性好、可以实现分布式测量等优点，符合本次试验水下应变测试的要求。

本次试验的应变测试系统由光纤光栅（FBG）传感器、波长解调器及相应软件构成。沿管线长度方向在管线的底面纵轴线布置了 5 个 FBG 传感器以及 5 个高精度应变片，分别用以测试模型在竖向振动时的动应变。如表 7.1 所示。

表 7.1 光纤光栅（FBG）传感器布置位置及波长

应变片	1#	2#	3#	4#	5#
光纤光栅传感器	1548.1nm	1546.9nm	1541.6nm	1538.7nm	1536.9nm

光纤光栅中心波长的测量采用简测科技的四通道解调系统 JEME-iFBG-S04，该设备集成了扫频激光光源和可调光纤滤波器解调模块，仪器的扫描频率为 10Hz，波长分辨率为 1pm。工作波长范围为 1510-1590nm。

试验结果

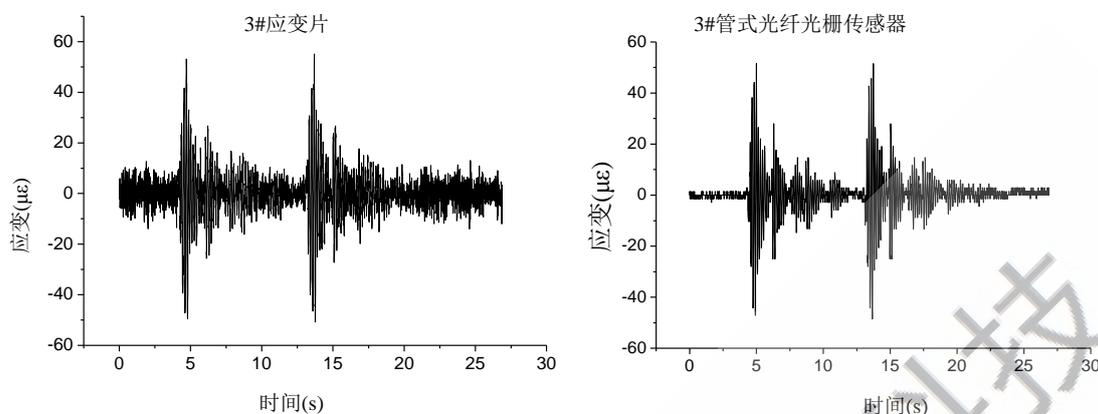


图 7.3 El Centro 波激励下海底管线模型跨中位置的应变响应

图 7.3 所示，在 El Centro 地震波激励下，光纤光栅传感器的应变响应特性与应变片的结果是相近的但由于振动台周围环境电磁干扰很大，使得应变片的噪声达到了 $\pm 10\mu\epsilon$ ；而光纤光栅传感器噪声仅有 $\pm 1\mu\epsilon$ 。同应变片相比，光纤光栅传感器显示出了其优越的抗电磁干扰能力。

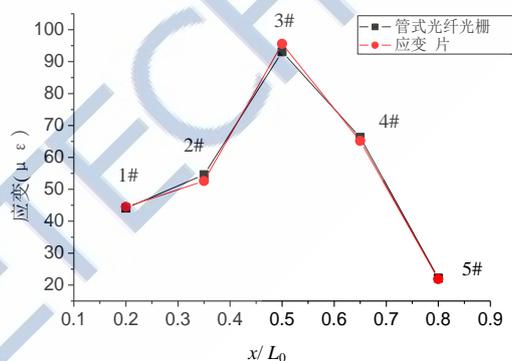
图 7.4 简支约束管道最大应变(ϵ_{\max})沿管轴方向的变化

表 7.2 光纤光栅和应变应变峰值

各点所处位置 (m)	光纤光栅测量值($\mu\epsilon$)	应变片测量值($\mu\epsilon$)
0.2	44.111	44.51
0.35	54.553	52.6
0.5	93.083	95.59
0.65	66.257	65.15
0.8	22.146	21.87

图 7.4 是管内无水情况下简支约束管道最大应变(ϵ_{\max})沿管轴方向(x/L_0)的变化，图中

分别给出了管式光纤光栅传感器和应变片所测应变最大值对比图。试验中振动台所输入的地震波为 El Centro 波。实验表明，光纤光栅测量结果最大值与电阻应变片测量值基本吻合。从图 7.4 中还可以看出，对于简支管道，管道中间反应最大，然后向两端逐渐减小，试验测试结果的分布趋势与梁在简支约束下理论分析结果的趋势相同。

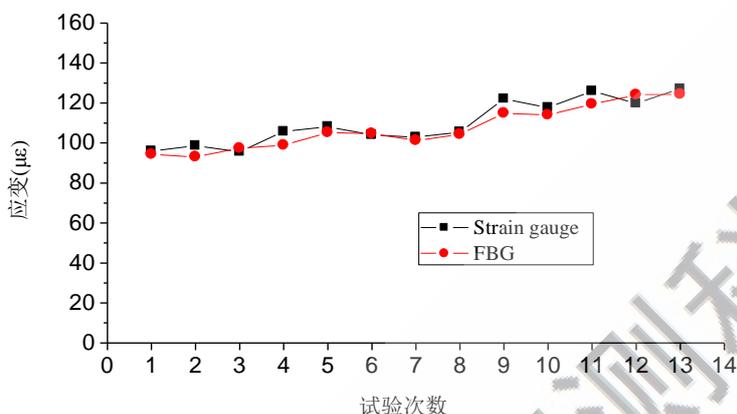


图 7.5 管式光纤光栅与应变片测量值比较

针对不同的工况，我们对海底管线模型进行了 13 组不同的垂直方向 El Centro 地震波激励。试验时间跨度为一个月。图 7.5 比较了 3#管式光纤光栅传感器和应变片的应变测量最大值。试验结果显示，在这 13 种不同的工况下，管式光纤光栅应变测量值与应变片符合的很好。试验说明光纤光栅传感器具有良好的长期测量稳定性。

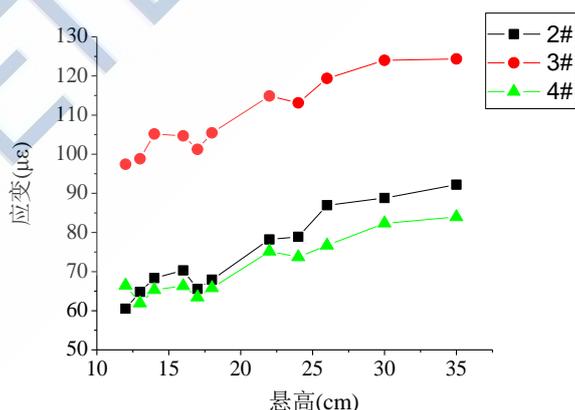


图 7.6 海底管线模型垂直方向各个部位最大应变与悬高关系

由于海底面高低不平，铺设在海底面上的管线悬高也会有所不同，本节研究了不同悬高情况下的海底管线受地震波影响时各个部位的应变变化趋势。图 7.6 给出了在相同垂直地震波(El Centro 波)作用下，海底管线模型垂直方向 2#、3#及 4#传感器部位最大应变与悬高变化的关系。

结果表明，随着悬高的增加，海底管线跨中及 1/4 跨部位的应变也随之增加。

小结

我们利用自行开发的光纤光栅应变传感器监测了海底管线模型在不同工况下的应变反应特性，结果表明：

1. 金属管式封装是一种有效的光纤光栅传感器封装技术，它不仅具有裸光纤光栅的本质优点，而且外形牢固可靠，能够胜任于恶劣环境下的应变监测。
2. 对于不同的基体材料，光纤光栅传感器具有不同的应变灵敏系数。

在海底管线模型振动试验中，利用管式光纤光栅传感器成功监测了模型的应变反应，结果表明，海底管线跨中及 1/4 跨部位的应变随着管线悬高的增加而增加。