

光纤光栅传感技术在油田石油平台健康监测应用



深圳市简测科技有限公司

二〇一四年九月

项目概况

XX 油田位于渤海湾东北海域，距河北东南方向约 20km，有两座平台，CEP 平台和 WHPB 平台水深 12.6m。



图 8.1 NB35-2WHPB 导管架平台外景图

其中的 WHPB 平台包括导管架、上部组块、钻井模块和生活楼等设施。其导管架为 6 腿 6 桩结构，桩腿间距为 19.2m×17m×17m，包括 3 个水平层，桩的直径为 1524mm，设计入泥深度 104m，共 40 个井槽；组块为 6 腿结构，包括四个水平层，主甲板面积为 55.85m×38.4m；钻井模块包括钻机模块和支持模块两部分；生活楼 3 层，定员 80 人，尺寸为 11.5m×30m，顶部为直升飞机平台。

平台的操作模式为边钻边采，钻井周期为 15 个月，钻井 3 个月后将开始生产，钻井完成后，后期主要是生产和修井工作，可能还会有侧钻工况。

在平台监测设备安装之前，WHPB 平台组块、生活楼、钻修机模块业已安装就位。

由于 WHPB 平台打桩施工阶段出现了意外，导致各桩桩基均没有达到预定深度，根据《南堡油田 WHPB 平台场址工程地质调查报告》，表 8.1 列出了目前状态下平台各桩的垂直入泥深度和设计极限承载力。同时由于桩的入泥深度与详细设计不同，引起桩在反弯点处材料壁厚由 60mm 减少至 32mm，材质由 E36 降低至 A36。

表 8.1 NB35-2WHPB 桩基入泥深度及极限承载力

桩腿	A1	A2	A3	B1	B2	B3
----	----	----	----	----	----	----

入泥深度(m)	88.476	89.795	88.387	88.619	89.063	88.555
极限承载力(MN)	36.2	36.82	36.2	36.2	36.4	36.2

海工公司考虑到平台桩基的持力层位于沙土层和粘土层交界处，未达到规范关于持力层的要求，并且粘土层作为持力层，存在不稳定因素；采用的土壤承载力评估方法（动力检测）尚不作为常规手段应用于海工检测；特别是在钻完井阶段，上部荷载的增加较多，因此有必要对平台进行现场监测，以保证平台安全。

监测内容

平台的荷载监测可以采用结构秤重的方式，对上部的荷载加以监控；但是对于平台沉降的监测就比较困难，由于没有固定的参考坐标，只能采用 GPS 全球定位系统，但是其价格非常昂贵，不适合于平台长期监测的要求，因此只能采用间接的方法进行监测。

考虑海洋石油平台桩基监测的特殊性与 NB35-2WHPB 平台的实际情况，对该平台钻井和相关作业过程采用三级监测和预警，即：

1. 监测平台荷载变化，控制平台的活荷载与总荷载不超过设计的限定值；
2. 监测各个桩的桩头力，当桩头力达到限定值时提出预警；
3. 监测平台各桩腿的相对沉降，当相对沉降值达到一定值时提出预警。

监测原理

NB35-2WHPB 平台的上部重量通过六个直立腿传递到桩头上。平台上部的重量变化，将导致桩头上端立柱的弹性变形的变化，根据虎克定律，直立腿的变形与外荷载成正比，通过测量各直立腿的应变就可以确定桩头荷载的增加量。根据光纤应变传感器的性能与结构的参数，可以分辨单桩 4 吨的荷载变化。只要将监测到的荷载与平台现有的荷载相加即可得到总的桩头荷载值。为了消除弯曲应力和偏心对测量的影响，需要在每个桩腿上安装 4 个光纤应变计，为了消除温度对监测数据的影响，需要在每个桩头位置安装光纤光栅温度传感器以补偿温度变化引起的应力变化。

NB35-2WHPB 桩基处理交底会最终确定了由海工公司提出的上部总荷载容许值。上部总荷载的容许值为 10330T；，上部已有荷载为 7711T；上部剩余总荷载为 2619T。当监测结果发现平台的监测荷载达到容许值的 85%时（8780T），系统将进行警告，平台操作人员必须对整个平台的荷载进行有效的限制，以防止荷载超出容许范围；当监测结果发现平台的监测荷载达到

容许值的 95% 时 (9813T)，系统将进行报警，平台操作人员必须停止作业，并对平台进行适当减载，直到报警取消，再逐步恢复平台作业。

根据平台评估的结果，确定各桩头容许荷载，随时对各桩头荷载进行监测，以防止其超过评估容许的范围。单腿最大荷载的控制是平台局部安全的保证，如果单腿的荷载超出设计的容许范围，可能会造成此腿周围局部的失效，产生严重的后果。

NB35-2WHPB 桩基处理交底会最终确定了由海油工程公司提出的单桩容许荷载及报警指标。

当监测结果发现单桩荷载达到容许值的 95% 时，系统将进行报警，平台操作人员必须停止此桩腿附近区域内的作业活动，并对平台该区域进行适当减载，直到报警取消，再逐步恢复平台作业。

表 8.2 单桩容许桩头荷载和报警指标 (吨)

桩腿	承载能力	目前桩头力	剩余桩头力	%95 报警
A1	2059.07	1028.39	1030.68	1956.12
A2	2152.83	1171.44	981.39	2045.19
A3	2101.95	1435.02	666.93	1996.85
B1	2065.70	1046.66	1019.04	1962.42
B2	2147.29	1190.84	956.45	2039.92
B3	2085.54	1446.27	639.28	1981.26

计算分析及监测点选择

用于上部荷载监测的测点位置选择比较简单，原则是选取直立腿上距离焊缝较远（大于 50cm）的位置就可以，因此，将测点放置于 EL.7 600 处桩腿外表面。

测点的具体位置如图 8.2 所示。

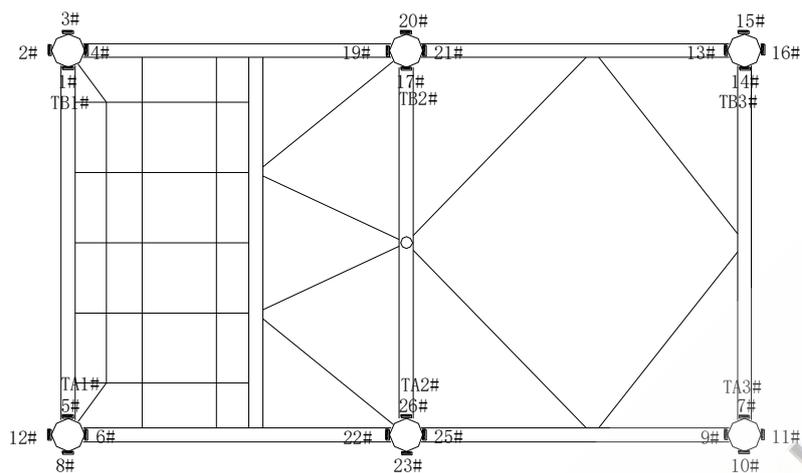


图 8.2 EL.7 600 桩头光纤应变传感器位置图

用于沉降监测的测点位置的确定比较复杂，既要能够充分反映沉降信息，又要尽可能减少其它工况产生的影响。沉降监测的传感器包括光纤应变传感器和倾斜仪，即通过关键位置的应力变化和倾斜变化间接的来计算平台桩基的沉降。这就需要找到对于桩基沉降比较敏感的结构部件，通过数值模拟计算可以得到所需的结构位置及其响应。在数值模拟计算中，分别考虑 9 种边界条件和 4 种荷载条件。9 种边界条件分别为 A1、A2、A3、B1、B2、B3 六条腿失效和 A1&B1、A2&B2、A3&B3 失效。4 种荷载条件是桩基沉降量分别为 10cm、5cm、1cm、0.5cm。

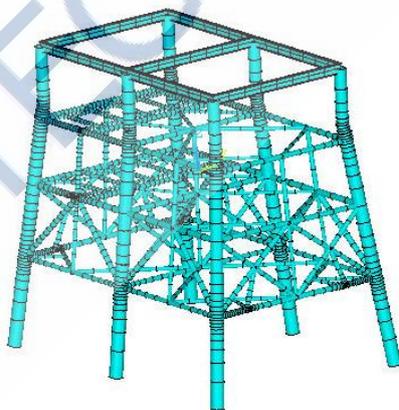


图 8.3 NB35-2WHPB 桩基沉降监测数值模拟计算简图

通过数值计算确定的测点位置如图 8.3 和图 8.4 所示。

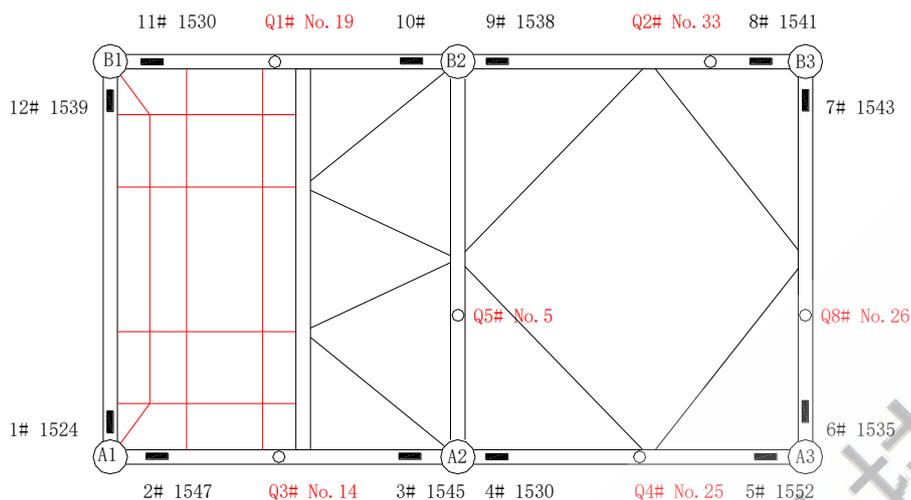


图 8.4 EL.5 200 水平光纤传感器、倾斜仪位置图

传感器以及仪器安装调试

在桩头部位（EL.7 600）设置光纤应变传感器，每个桩头 4 个应变传感器、1 个温度传感器，共计 30 个光纤传感器。在桩头安装时，需要对该部位用砂轮和细砂纸打磨，使用 502 胶将裸光栅粘牢，最后用环氧树脂封装、并进行油漆涂装防腐。对于光栅温度传感器和光纤线路，需要用环氧树脂封装固定于桩腿的外表面。

在带缆走道（EL.5 200）横撑上设置 12 个应变传感器、1 个温度传感器，共计 13 光纤传感器。在该部位安装时，也同样需要打磨安装部位的表面，然后使用氩弧焊将传感器的底座固定，并安装保护盖、用环氧树脂封装、油漆涂装防腐。

以上传感器的布点位置参见相关图纸。

所有传感器的安装、布线工作于 7 月 19 日全部结束；7 月 20 日至 7 月 22 日进行设备调试、软件制作，以保证在整个测试期间设备仪器软硬件的正常稳定运行；7 月 23 日至 7 月 31 日进行仪器数据标定工作，为今后的数据采集寻找一个稳定的数据基准点。

数据采集软件

光纤光栅传感器的数据采集软件是在 LabVIEW 程序下编制的。LabVIEW 是一个具有革命性的图形化开发环境，它内置信号采集、测量分析与数据显示功能，摒弃了传统开发工具的复杂性，为用户提供强大功能的同时还保证了系统灵活性。它将广泛的数据采集、分析与显示功能集中在了同一个环境中，让您可以在自己的平台上无缝地集成一套完整的应用方案。

LabVIEW 是一个开放式的开发环境，用户可以将其与任何测量硬件轻松连接。它的交互式测

量助手(assistant)、自动代码生成以及与成千上万个设备的简易连接功能，使它能够如此轻而易举地完成数据采集。LabVIEW 带有超过 450 个内置函数，专门用于从采集到的数据中挖掘有用的信息，用于分析测量数据及处理信号。LabVIEW 提供一系列工具用于数据显示、用户界面设计、Web 信息发布、报告生成、数据管理及软件连接。

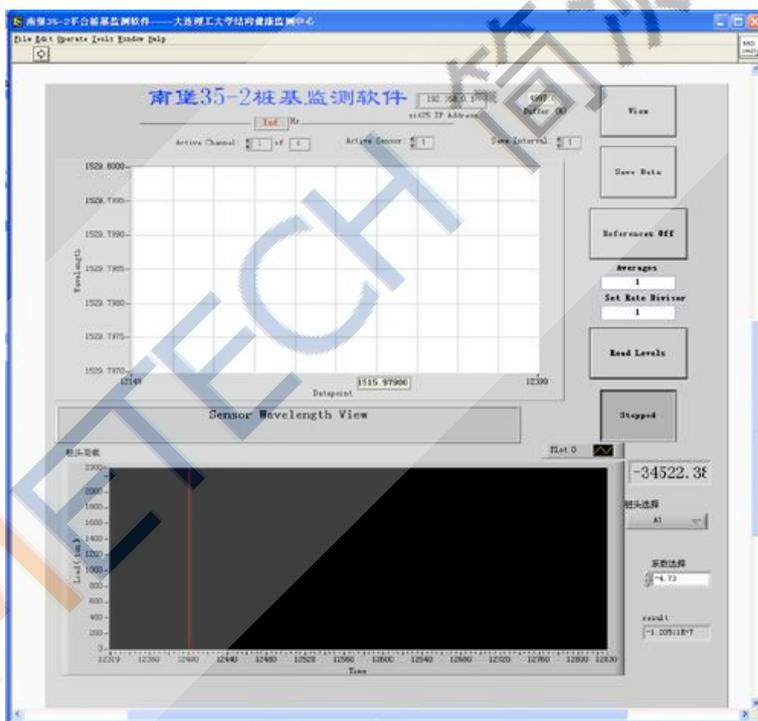
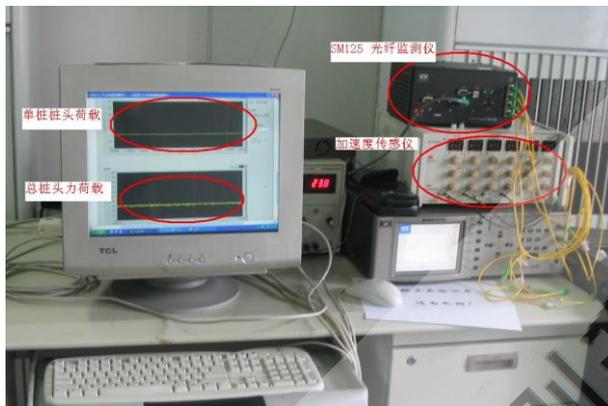


图 8.5 光纤光栅解调器现场监测情况及监测软件界面

光纤光栅传感器的数据采集软件的程序是在 Sm125 光纤光栅解调器的原有监测软件的基础上开发的。不仅能够自动采集光纤数据、定时存储（每个一小时存储一个文件），而且还实现了荷载实时监控的功能，可以直接显示平台的上部总荷载和六个桩头力，为平台的荷载监测提供了更加简便的操作平台，其监控画面如图 8.5 所示。

监测流程

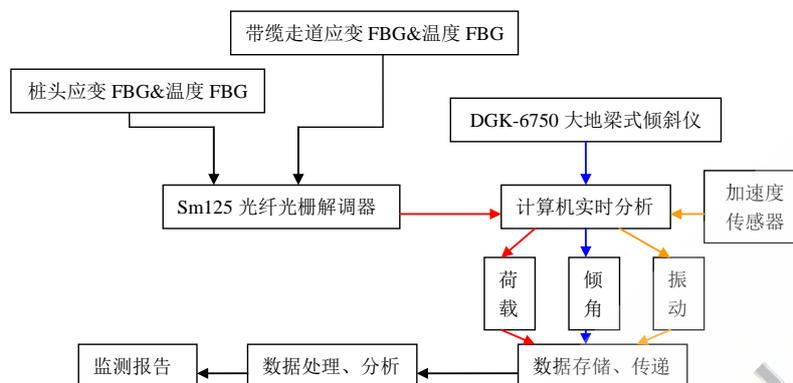


图 8.6 NB35-2WHPB 平台桩基监测流程图

监测系统标定

NB35-2WHPB 平台使用 40 吨吊车进行部分物资、设备的吊装，平台方面提供了本次吊装的数据。



图 8.7 吊装记录（平台吊车司机提供）——平台上部总荷载变化

根据实时监测得到的数据，平台上部总荷载的变化如图 8.7 所示，通过对比图 8.8 和图 8.9，监控数据和吊装记录数据完全吻合。

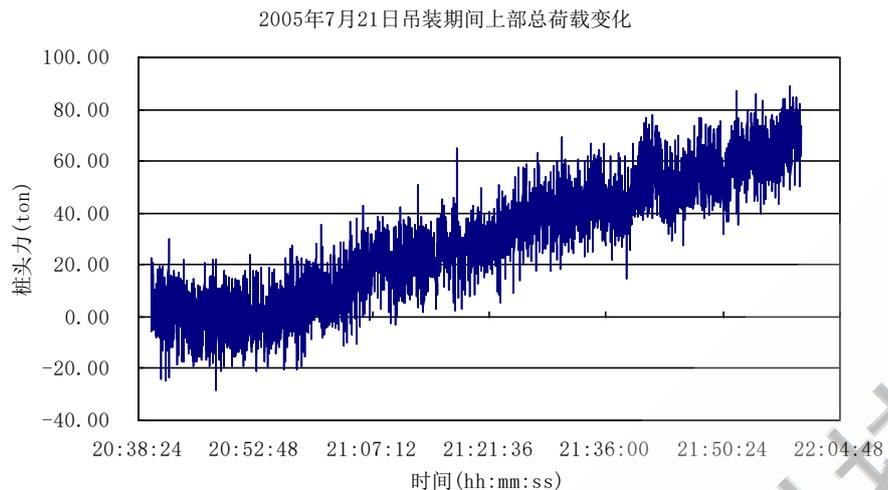


图 8.8 荷载监测——平台上部总荷载变化

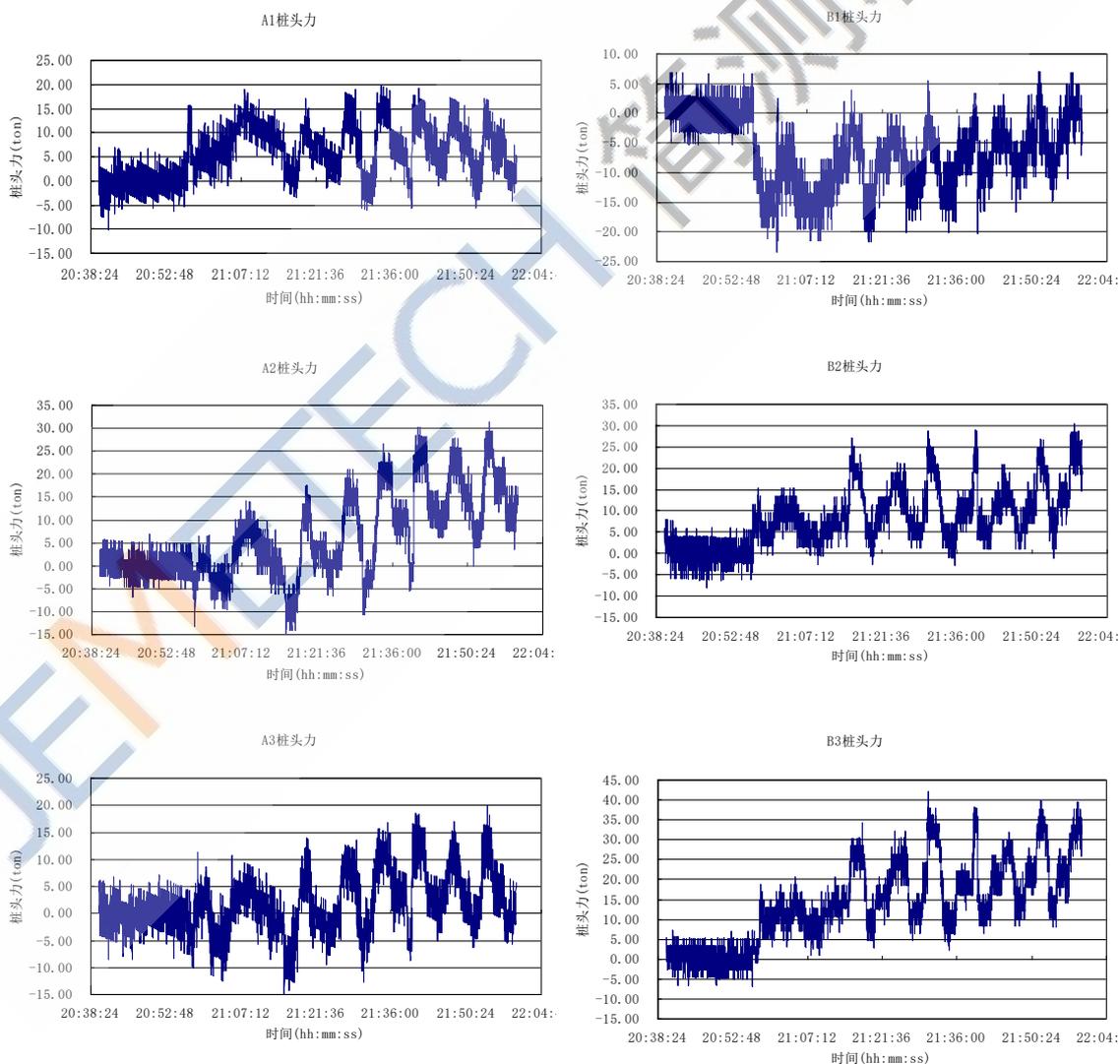


图 8.9 荷载监测——各桩头荷载变化

通过各桩头荷载变化可以很明显地看到 7 个波峰，这是 7 次起吊的时候动力冲击带来的变化。在总的桩头荷载曲线上，7 次起吊带来的波动并不明显，其表现为荷载持续地上升。

工作日报

我们编制的数据分析软件可以自动分析一天的数据，10 分钟的数据做一次均值。该软件自动生成工作报表，显示一天内总荷载的变化量，同时也可以显示各个桩腿的荷载变化。

以下选择一天的数据作为例子。

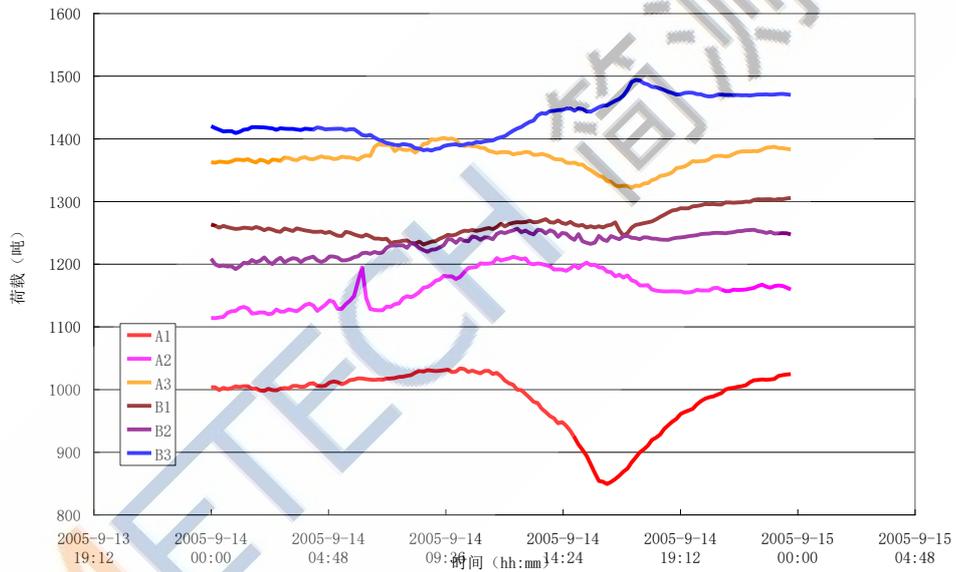
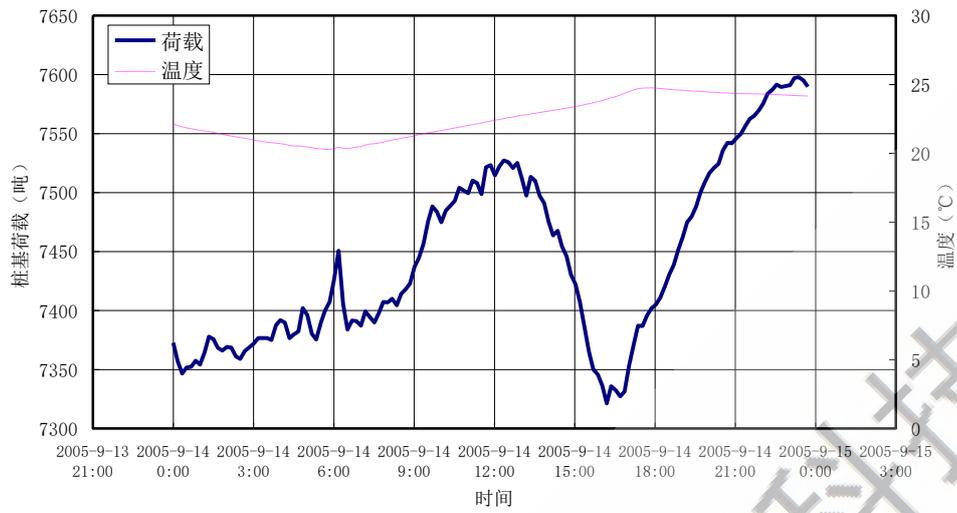
NB35-2WHPB 平台桩基荷载监测工作日报

日期 **2005-9-14** 报警级别 **无报警**

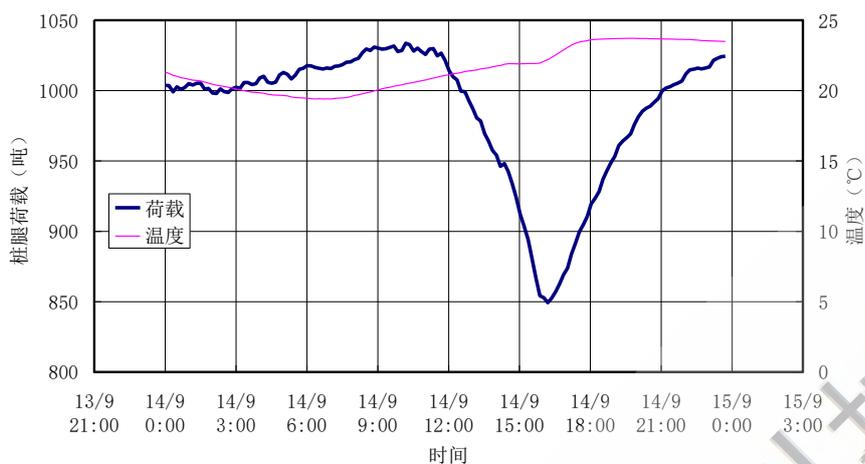
桩号	载荷 (吨)			载荷等级			桩号	载荷 (吨)			载荷等级		
A1	849.3	~	1034	41.2	~	50.2	B1	1231	~	1305	59.6	~	63.2
A2	1114	~	1212	51.7	~	56.3	B2	1192	~	1257	55.5	~	58.5
A3	1322	~	1401	62.9	~	66.7	B3	1381	~	1494	66.2	~	71.6
总载荷 (吨)								7321	~	7598	70.9	~	73.6
平台荷重变化记录													
时间	内容											荷重变化量 (吨)	
00:00	柴油											-11	
00:00	淡水											-42	
00:00	套管											200	
00:00	累计变化量											147	

注：当载荷等级达到 85 以上时为警戒报警，达到 95 以上时为停产报警

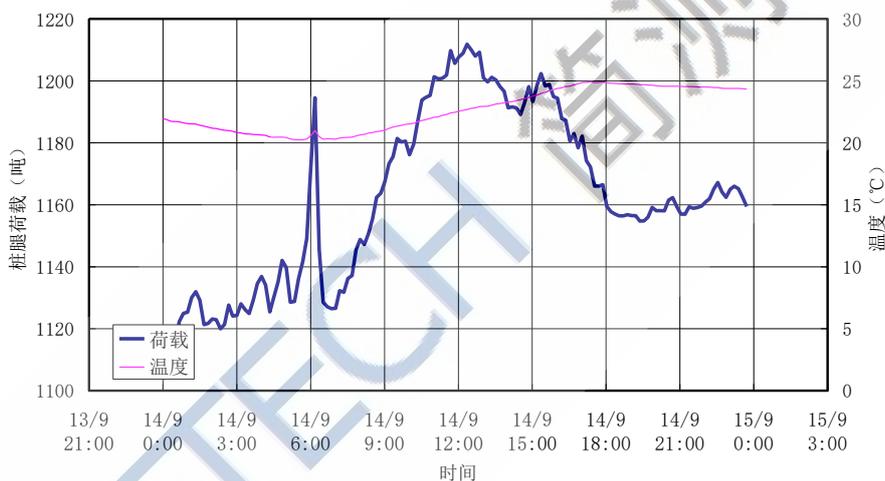
NB35-2WHPB桩基总荷载变化曲线



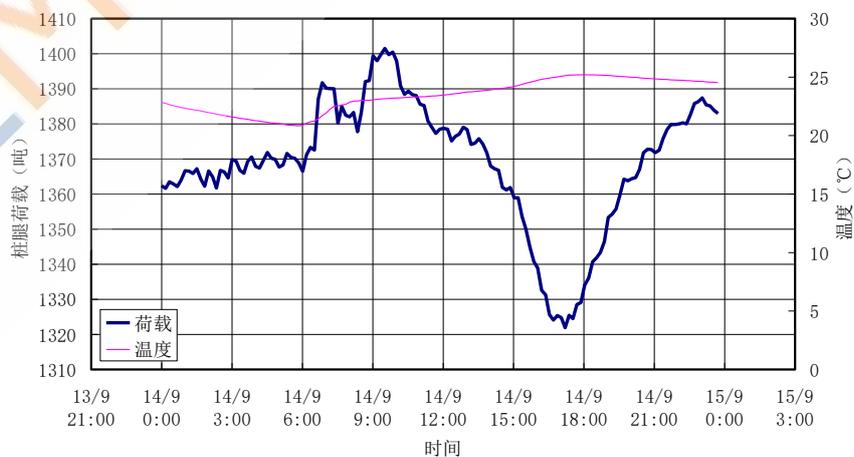
NB35-2WHPB平台A-1桩腿荷载



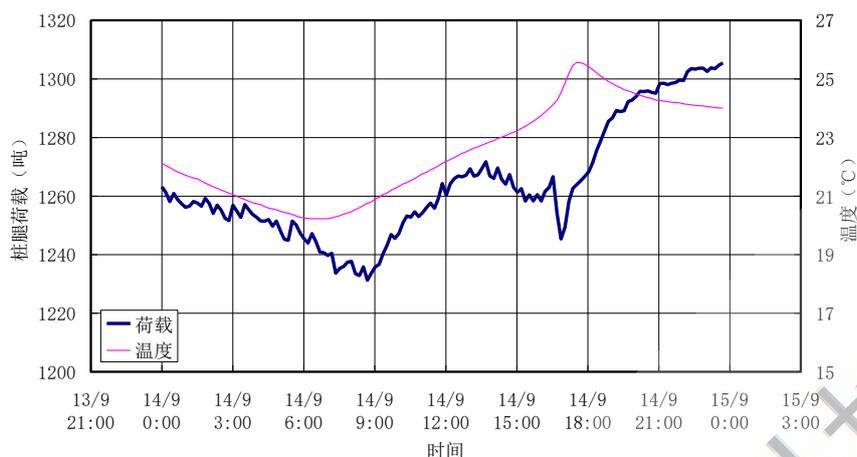
NB35-2WHPB平台A-2桩腿荷载



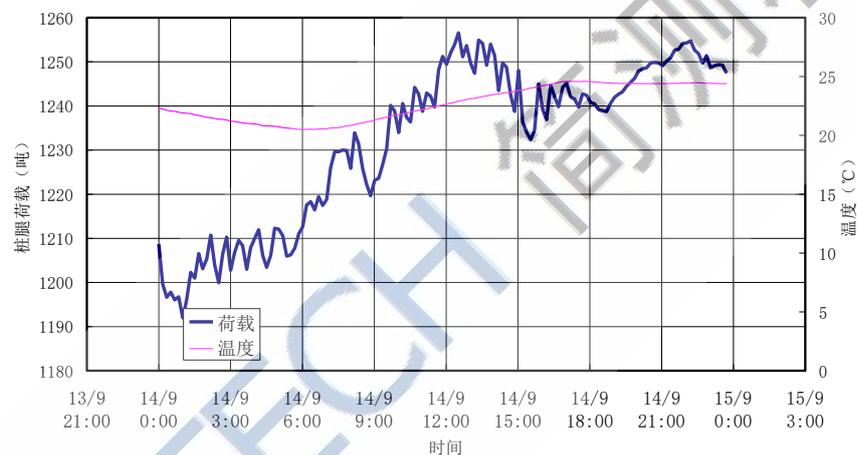
NB35-2WHPB平台A-3桩腿荷载



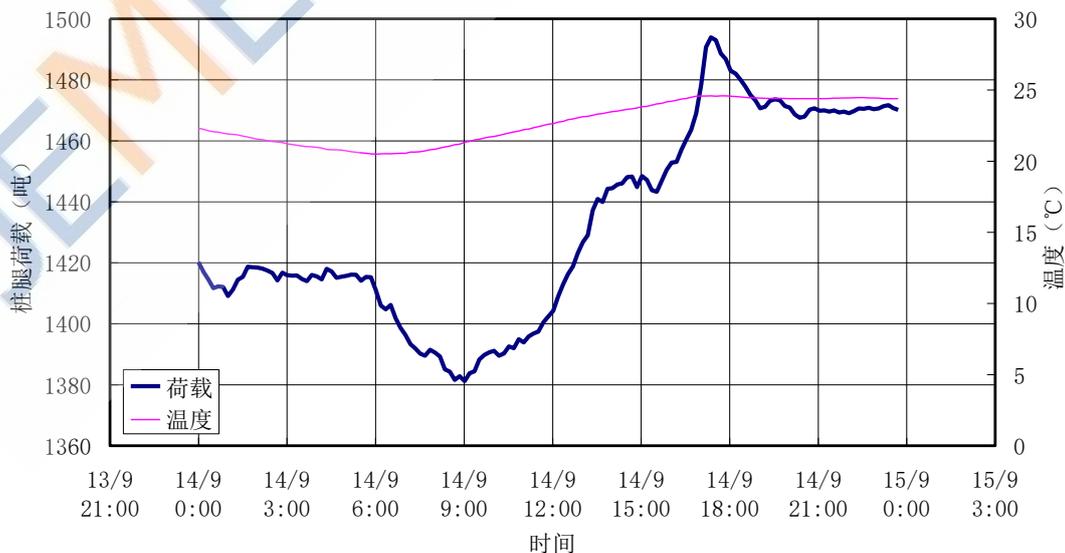
NB35-2WHPB平台B-1桩腿荷载

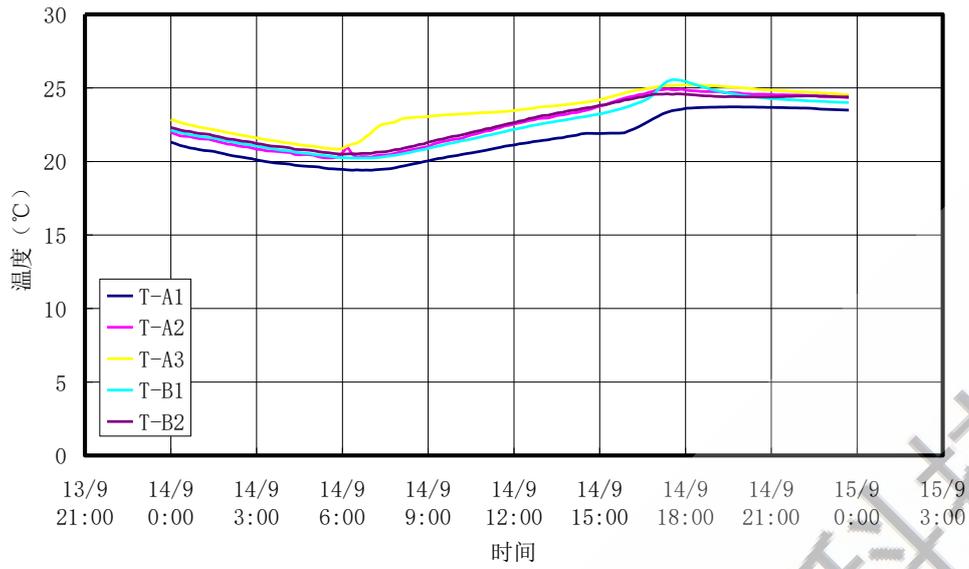


NB35-2WHPB平台B-2桩腿荷载



NB35-2WHPB平台B-3桩腿荷载





数据分析--荷载监测

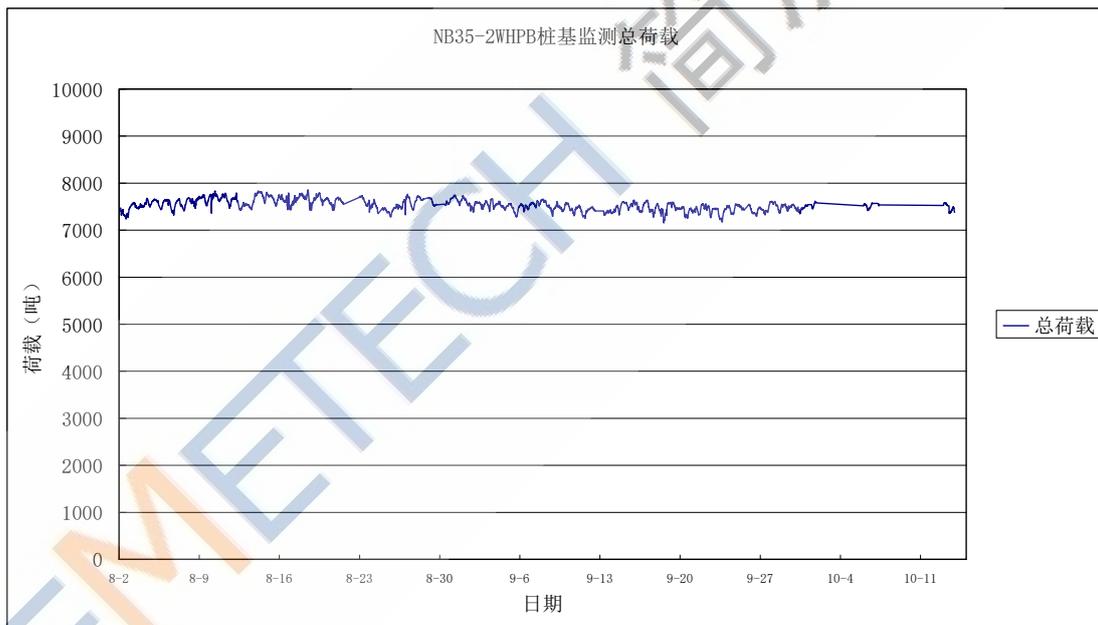


图 8.10 荷载监测——上部总荷载

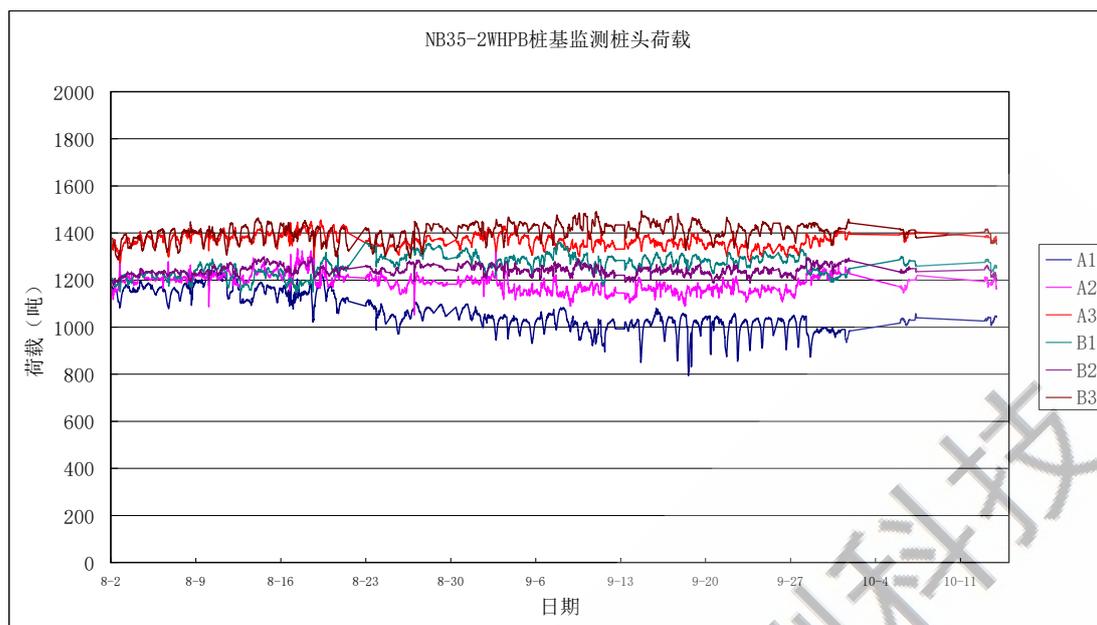


图 8.11 荷载监测——桩头荷载

图 8.10 和图 8.11 是每日监测报告中的图表。从荷载监测的数据来看，平台上部总荷载大致在 73%左右，各桩头力在 40%--70%之间，远小于 85%的警戒荷载。并且总荷载与桩头荷载都没有较大的变化，这说明上部的荷载控制比较成功，平台处于安全状态。

工作总结与展望

针对海洋石油平台桩基监测的特殊性与 NB35-2WHPB 平台的实际情况，我方制定的三级监测和预警标准完全满足海工公司提出的监测要求，并取得了良好的效果。迄今为止，NB35-2WHPB 桩基监测设备已正常运行了几年，这期间的监测数据表明平台的总荷载控制和桩头力控制都已达到了预期的目的，可以保证平台正常的生产生活秩序。

在此次监测过程中，我方使用了先进的光纤光栅监测技术，该技术在国内外的一些大型工程中已得到应用，但是在海洋工程领域的应用尚属首次。为此我方进行了详尽的技术论证，并且派出了很强的技术力量进行现场的安装调试工作，保证了整个监测设备的正常运行，为该项技术在海洋工程监测领域的应用积累了宝贵的经验。