

海底电缆检测技术方法选择分析

岑贞锦, 蒋道宇, 张维佳, 蔡驰

(中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局, 广州 510663)

摘要: 海底电力电缆路由、埋深位置和裸露的定期精准检测是保障海缆长治久安及安全运营的根本, 海缆精准检测技术方法的选择尤为重要。常规的磁力仪、管线仪探测技术方法是探测海洋管线的主要手段之一, 但其结果较为粗略, 无法做到精准检测。对比了海缆检测各技术方法的优劣性, 提出了以水下机器人为依托, 携带摄像头、声呐系统、TSS350 近距离检测海缆路由埋深、抛石石坝外观、抛石石坝厚度、海缆裸露悬空及风险点、海缆路由区域障碍物等, 辅以多波束、ADCP 进行海缆路由区域地形地貌、海流测量, 分析海缆埋深、路由等状况变化的原因。同时以海南联网海缆检测应用为例, 研究表明: 该综合检测方法全面, 检测效果好, 历次检测检测对比吻合度高, 准确掌握了海缆的实际状况。为后期海缆精准检测及运行维护提供了参考依据。

关键词: 海缆检测; 多波束; 声呐摄影; TSS350; 视频; ROV

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)03-0085-07

Analysis on Selection of Submarine Cable Detection Technology

CEN Zhenjin, JIANG Daoyu, ZHANG Weijia, CAI Chi

(Guangzhou Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: There are many submarine pipeline detection technology methods, but due to special requirements of submarine cable detection's high precision. It was rough by using conventional magnetometer and pipeline detection technology, submarine cable was detected by many integrated detection methods base on ROV carrying all kinds of equipment increasingly mature, conventional submarine topography measurement technology as an auxiliary means has been suitable market, meanwhile it has been suitable for complex seabed environment.

Key words: submarine detection; multi beam; sonar photography; TSS350; video; ROV

近年来国家极度重视海洋开发和海防建设。如海上风电场勘察、海缆路由的勘察和运维检测工作现正热火朝天; 国防建设需要对国家领海海域情况进行全方位掌握; 近海的桥梁工程、隧道工程及各种通信光缆、电力电缆铺设及后期检测工作越来越火热。诸多海岛填海造陆和各种联网以及海洋环境、资源调查和保护等, 市场的现状已经成规模,

前景相当明确广阔^[1-6]。其富有代表性的是海上风电项目, 至目前为止, 沿海各海域海上风电项目几乎已经规划完毕, 随着国家相关政策已经出台, 各风电场准备或者已经开始着手建设, 其建设和运维过程中包括后期运维检测、监测工程项目极多。

500 kV 海南联网大通道海底电力电缆工程是南方电网跨省区主干网和重要联络线, 是国家实施西电东送战略的重要项目^[7-9]。该项目自 2009 年建成并运营, 由于海缆路由区地形起伏多变, 分布有陡坡、槽底、冲刷沟槽、突起丘状坡顶, 存在大面积的鱼鳞状冲刷坑和沙波, 海底环境复杂、水动力条件强, 海流流速大、流向复杂, 随着时间积累, 海底冲刷严重, 从而可能造成海缆裸露、悬空进而会造成海底浊流和碎屑流直接冲刷或者携带其他物

收稿日期: 2017-03-03

基金项目: 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局科技项目“非动力定位平台水下机器人技术方案研究”(CGYKJ00000002)

作者简介: 岑贞锦(1988), 男, 海南定安人, 工程师, 学士, 主要从事海底电缆检修维护和海上检测研究(e-mail) cenzhenjin@126.com。

质对海缆进行冲击, 直接或者间接威胁海缆的安全^[7-13]。故对海缆路由坐标及埋深检测、海缆路由障碍物检测、海缆路由裸露、悬空、抛石石坝(海缆保护的一种方式)检测, 可降低海底电力损害几率, 为海缆安全运营提供保障。

1 技术方法

目前, 海底管线探测技术方法众多, 其中具有代表意义的主要技术方法如表1所示。常规的海底管线探测水面技术方法主要有: 海洋管线仪、磁力仪、侧扫声呐; 随着 ROV 应用越来越广泛, 出现了大量基于 ROV 为基础近距离追踪或者完成海底工程的项目, 如: 基于 ROV 的海底管线探测水下技术方法主要有: 水下海底摄像、TSS 系统(代表设备为 TSS350)、水下声呐等^[14-17]。

表1 海底管线探测技术方法

Table 1 Submarine pipeline detection technology

方式	方法	原理	优点	缺点
水面拖拽	磁法	通过探测水下磁场变化, 从而探测出水下管线等磁异常体。	对磁性物质敏感, 精度高。	定位精度较低。
	多波束	采用声波原理测定管道路由区域的地形地貌, 主要用于分析海缆变化原因。	分辨率高, 图像清晰, 效率高。	水深大条件下分辨率较低。
	侧扫声呐	采用声波原理, 通过拖鱼发射声波, 接收遇到目标体反射回来的声波信号, 形成图像, 从而识别海底管线等目标体。	分辨率高, 工作效率高, 图像清晰。	水深条件下定位精度较低。
浅地层剖面(海洋管线仪)		采用声波原理, 通过发射机发射声波脉冲信号, 接收机接受反射声波脉冲并形成图像, 可识别管线等目标体。	对管径较大并埋藏较浅的管道探测明显。	对小管径管线探测能力弱。
	水下摄像	采用光学摄影原理, 在水下机器人光照下进行拍照及录像。	摄影直观可靠。	可视距离较短。
水下 ROV 集成	声呐摄影	采用声波原理, 通过集成在 ROV 上的声呐设备发射声波, 接收遇到目标体或水底反射回来的声波信号, 形成图像, 从而识别海底管线等目标体。	近距离摄影, 分辨率高。	探测范围有限。
	TSS350 电磁感应	通过电磁感应原理接受加载在海底电缆上的特殊频率信号, 结合高度计并通过公式换算计算海缆的位置及埋深。	近距离探测, 易追踪, 探测效果好, 精度高。	探测范围小。

但由于海底电力电缆检测的特殊性, 需检测其路由、埋深精确坐标及裸露、悬空情况, 海洋管线仪及磁力仪都未能满足其高精度要求。故在海缆检测中主要采用侧扫声呐(包括水下机器人集成声呐)、水下海底摄像、TSS 系统(代表设备为 TSS350)等, 为分析海底电力电缆风险点原因, 还需进行地形地貌检测及流速观测, 从而可更好的分析海缆路由变化及裸露、悬空产生的原因。

1.1 声呐摄影

声呐摄影分为水面拖体侧扫声呐及水下机器人集成声呐。水面拖体侧扫声呐系统是一种多脉冲高速侧扫声呐, 又是一种高分辨率双模式侧扫声呐, 其原理是通过放在水下拖鱼中的换能器以一定的倾角向测线两侧发射脉冲宽度为零点几毫米到几毫米的超声波至海底, 按照声波发射与散射原理, 其中必定有部分散射回到拖鱼为换能器接收, 换能器在接收到回散射信号后, 便立刻转变为电信号并通过一系列的放大原理, 在电脑中记录下它的灰度强度, 然后通过对记录上的回散射信号的判读与解释, 可以得出水底地貌图像与外来物体存在的情况, 从而用来达到寻找水下障碍物与疑存物的目的。

水下机器人集成声呐的原理与水面拖体侧扫声呐系统原理一致, 其不同点是将声呐集成在水下机器人(ROV)上, 通过对指定水域进行扫测, 将数据通过 ROV 的脐带缆传回工作船的工作室, 通过专用软件分析出二维、三维声呐影像图。由于是近距离扫测目标体, 水下机器人集成声呐的工作频率要求更高, 故扫测更为精细。

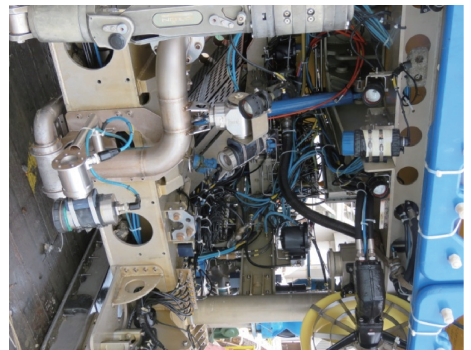


图1 集成声呐系统

Fig. 1 Integrated sonar system

1.2 集成水下摄影

集成水下摄像是将照明系统及水下高清摄像

头、低光黑白摄像头集成在水下机器人上, 配置相应的云台, 通过实时摄像将视频设局通过脐带缆传回工作船的工作室, 从而可近距离直观观测水下目标体、障碍物、地形地貌、海底底质等状况。由于海底可视距离较短, 而同时由于高流速扬沙, 故需采用低光黑白摄像头进行摄像, 同时需要配置合理的组合和配置光源, 以提供一个在色彩/强度/位置最优化的摄影角度和光源配置。



图2 集成水下摄像系统

Fig. 2 Integrated underwater camera system

1.3 TSS350

TSS350 管线探测仪属于有源探测, 分为两组三分量探头进行海缆空间位置探测, 结合高度计测量 TSS350 与海底的高度, 从而可获得海缆路由位置及埋深。

TSS350 测量原理: 当磁感应单分量的线圈与电缆成平行时线圈感应电流为最小值零; 当磁感应单分量的线圈与电缆成垂直时线圈感应电流为最大值; 当磁感应单分量的线圈与电缆成一定角度时线圈感应电流为介于最大值与最小值中间, 同时采用两个相互垂直的线圈同时探测电缆, 从而通过测量值的比值计算出线圈与电缆的夹角^[16], 如图 3 所示。

而在实际工作中通常采用两组线圈进行海缆路由、埋深探测, 及采用两组探头, 由于探头间距已经设定, 故可根据线圈测量值计算的夹角以及几何关系计算出海缆相对线圈的空间距离, 此时结合高度计即可计算出海缆路由、埋深数据, 如图 4 所示。

1.4 多波束

多波束测深系统由于可一次获得几十上百个测

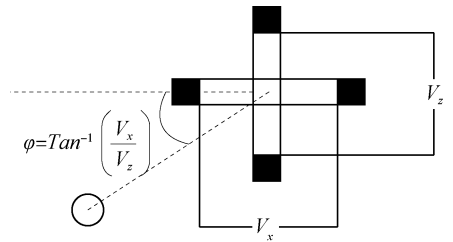


图3 通过两个垂直线圈确定夹角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the angle between two vertical coils

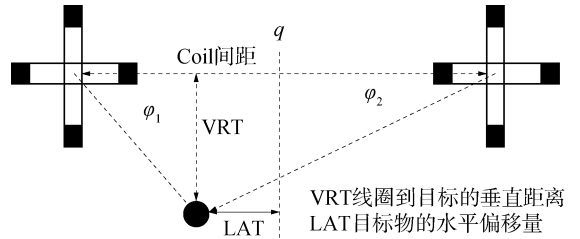


图4 利用线圈组探测电缆埋深示意图

Fig. 4 Schematic diagram of detecting cable buried depth by coil group

深点数据从而形成一定宽度的全覆盖水深测量条带^[17], 具有测量点密集、分辨率高、工作效率高的特点, 被广泛应用于海底地形地貌测量。在海底电缆检测中应用多波束测深系统主要目的是分析海缆出现裸露、悬空以及其他风险点的时候, 根据海底底质进行分析原因。多波束系统其原理是利用超声波原理, 其发射探头与接收探头一体化, 有发射探头激发出扇形声脉冲信号, 声脉冲信号在海水中传播并被海底及目标体反射, 由接收探头的水听器组合阵接收, 水听器组合阵不同基元根据接收到的信号进行相位、时间来确定海底目标体位置及方向, 通过结合定位系统(GPS)、姿态传感器、声速剖面仪和电罗经对多波束系统进行实时补偿, 从而能够精确快速的测出沿航线一定宽度范围内水下目标的大小、形状和高低变化, 从而比较可靠的描绘出海底地形地貌的精细特征, 从而用来达到检测抛石坝外观及海缆保护情况的目的。

2 工程实例

海南联网海底电缆检测是国内电缆检测标志性项目, 自运营以来每两年需进行一次检测。根据现有的检测方法, 摒弃了海洋管线仪及磁力仪检测方式, 采用水面测量与水下机器人检测相结合的方式。其中水面上主要采用侧扫声呐, 同时采用多波

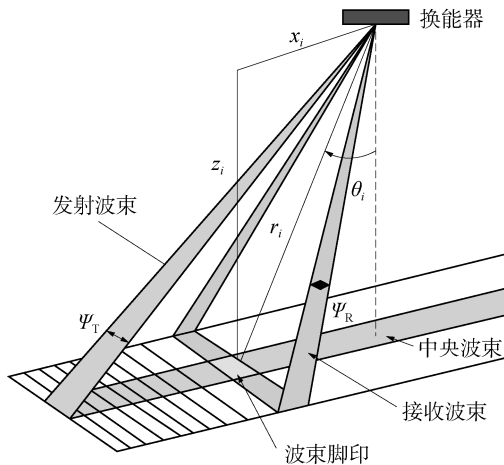


图5 多波束波束的几何构成

Fig. 5 Geometry of multi beam beam

束及 ADPL 进行地形地貌、海水流速测量, 以便分析海缆路由、埋深变化的原因; 水下机器人检测主要以水下机器人为载体, 携带声呐、水下摄像头、TSS350 进行摄影、路由埋深探测等工作。

其工作过程为: 选择 DP 船 + ROV + USBL/DGPS 定位配套系统, 计算并实时调控 ROV 行进速度和航向(ROV 距离海底 0.5 ~ 4.0 m, 以不触碰海底为前提, 行进速度保持 0.5 节左右); 采用 USBL + DGPS 相互补充验证的海上航向及定位方法, 对海底电缆位置、ROV 位置进行准确定位; TSS350 系统加载集成在水下机器人上, 通过向前搜索模式确定电缆的位置, SCD 可以显示一个估计的 ROV 行进范围, 以指导 ROV 的走向。当确定电缆的位置之后, 采用运行模式保持 ROV 处于电缆的上方进行追踪探测。另外, 保持 ROV 在水下的姿态, 确保 TSS350 线圈平行于海床面, 从而保证获取每隔 5m 的路由和埋深数据; 于此同时, 集成在 ROV 上的摄像头及声呐系统进行摄影, 通过脐带缆将视频数据传回 DP 船工作室。

2.1 视频摄像

通过水下机器人摄像头, 可对海缆路由区域进行检测, 获取海底电缆周边影像, 根据影像分析障碍物, 如对海缆路由残存海床的锚具、锚链、缆绳缠绕海缆等异物须记录位置坐标并记录着床姿态, 如图 6 所示; 同时可辨识海底电缆裸露和悬空情况, 确定裸露段、悬空段的长度等, 如图 7 所示; 对海缆保护石坝进行辨识, 识别海底电缆上方石坝的外观状态, 是否存在塌散或变形等, 如图 8

所示。



(a) 海底石块障碍物

(b) 海底渔具障碍物

图6 海缆障碍物检测成果视频截图

Fig. 6 Cable obstacle detection results



(a) 海缆悬空点

(b) 海缆裸露点

图7 海缆裸露、悬空检测成果视频截图

Fig. 7 The cable suspended bare, test results of video screenshot



(a) 海底保护石坝塌散

(b) 海底保护石坝变形

图8 抛石坝检测成果视频截图

Fig. 8 The test results of dam video screenshot

2.2 TSS350 检测

由 ROV 携带 TSS 系列海缆埋深检测设备, 可对海缆路由、埋深进行检测, 如图 9 所示。同时, 对实施过抛石保护的海缆路由区域进行探测, 获取抛石段海底电缆正上方石坝厚度及电缆埋深, 其方法为假定石坝铺设地与其两侧地形起伏误差可以忽略不计, 即可以使用 TSS 系统上自带的高度计 ALT250 获取石坝上方高度数据以及石坝任何两侧一方高度数据, 最后两个数据相减获得石坝厚度, 埋深检测成果如图 10 所示。

图 11、表 2 为抛石石坝平均检测厚度及与石坝平均设计厚度的对比图、数据对比表。从图上可知抛石石坝平均设计厚度为 0.75 m, 而平均检测厚度接近 1 m, 分析其原因为抛石过程中石料过多导致;

对于部分石坝变薄处, 其原因为海底底质松软导致石坝高度变低, 同时考虑到海缆路由区域强海流冲刷, 导致石坝被冲散。



图9 TSS350 检测截图

Fig. 9 The detection of TSS350 screenshot

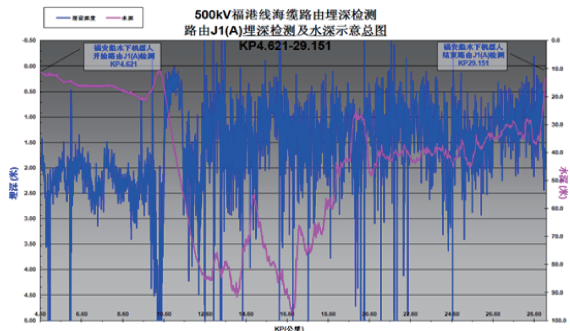


图10 海缆埋深检测成果图

Fig. 10 Submarine depth detection result map

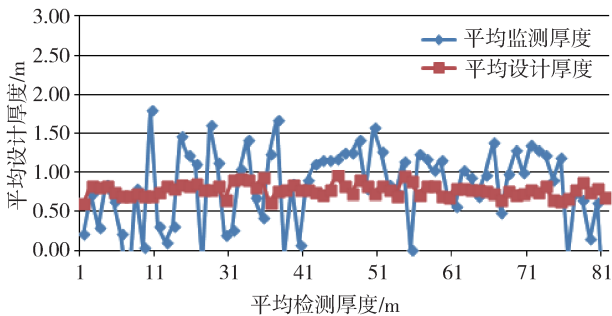


图11 J1(A) 抛石石坝平均厚度对比图

Fig. 10 J1(A) riprap stone dam average thickness comparison chart

图12为J(B)相KP5.4-9区段2016年埋深检测与2013年对比图, 分析该图得出: 2016年检测此区域埋深约2m, 2013年埋深约2.5m, 即三年间埋深降低了0.5m, 按照目前的发展趋势, 到2022年此处理深将小于1m, 不满足设计标准, 此

表2 J1(A) 抛石石坝平均检测厚度及与石坝平均设计厚度数据对比表

Tab. 2 J1(A) riprap stone dam average thickness comparison table

序号	开始 KP/km	结束 KP/km	石坝平均设计厚度/m	石坝平均检测深度/m
1	12.392	12.43	0.6	0.21
2	12.473	12.574	0.83	0.72
3	12.639	12.715	0.8	0.65
4	12.739	12.865	0.83	0.85
5	12.89	12.972	0.75	0.68
6	13.019	13.093	0.7	0.46
7	13.119	13.12	0.7	-0.24
8	13.18	13.205	0.73	-0.37
9	13.26	13.261	0.7	0.04
10	13.289	13.29	0.7	1.79
11	13.33	13.341	0.75	0.31
12	13.366	13.377	0.83	0.11
13	13.4	13.415	0.79	0.31
14	13.46	13.892	0.84	1.47
15	13.955	14.126	0.83	1.22
16	14.149	14.377	0.86	1.11
17	14.408	14.419	0.78	-0.22
18	14.451	14.468	0.77	1.61
19	14.493	14.587	0.83	1.13
20	14.705	14.732	0.64	0.19
21	14.787	14.83	0.91	0.26
22	14.903	14.956	0.92	1.04
23	15.07	15.164	0.9	1.42
24	15.211	15.275	0.81	0.67
25	15.297	15.309	0.93	0.42
26	15.371	15.378	0.61	1.24
27	15.454	15.489	0.76	1.67
28	15.52	15.539	0.77	-0.05
29	15.568	15.734	0.84	0.85
30	16.207	16.211	0.77	0.07
31	16.238	16.511	0.77	0.89
32	16.544	16.547	0.75	1.11
33	16.576	16.578	0.71	1.16
34	16.646	17.048	0.77	1.16
35	17.075	17.425	0.96	1.17
36	17.501	17.72	0.82	1.26
37	17.755	17.766	0.72	1.25
38	17.849	18.245	0.9	1.41
39	18.385	18.453	0.82	0.79
40	18.478	18.479	0.73	1.57
41	18.54	18.696	0.83	1.28
42	18.844	18.968	0.78	0.84
43	19.117	19.129	0.7	0.73
44	19.804	20.386	0.95	1.14
45	20.933	20.944	0.89	0.01
46	21.0	21.024	0.71	1.23

表2(续) J1(A) 抛石石坝平均检测厚度及与石坝平均设计厚度数据对比表

序号	开始 KP/km	结束 KP/km	石坝平均设计厚度/m	石坝平均检测深度/m
47	21.072	21.088	0.83	1.17
48	21.124	21.227	0.83	1.02
49	21.249	21.564	0.7	1.16
50	21.628	21.639	0.68	0.69
51	21.85	21.924	0.79	0.56
52	22.166	22.223	0.79	1.03
53	22.436	22.607	0.78	0.94
54	23.092	23.285	0.78	0.70
55	23.319	23.328	0.76	0.97
56	23.356	23.388	0.72	1.39
57	23.768	23.77	0.65	1.16
58	23.823	23.875	0.76	0.98
59	23.9	24.212	0.71	1.29
60	24.587	25.016	0.73	0.99
61	25.072	25.336	0.78	1.35
62	25.371	25.727	0.74	1.29
63	25.754	26.58	0.83	1.22
64	26.995	27.005	0.64	0.90
65	27.199	27.199	0.63	1.20
66	27.417	27.423	0.67	-0.05
67	27.556	27.795	0.78	0.74
68	27.869	28.006	0.87	0.64
69	28.087	28.097	0.74	0.14
70	28.168	28.865	0.79	0.62
71	28.891	28.905	0.68	-0.92

区段将成为风险区段。根据海缆路由海底地质资料反映, KP5.4-9 区域海底土壤属于易被冲刷的软质层, 在海流冲刷等因素的作用下, 海缆埋深逐渐变浅, 自保护能力下降, 故在后期需要材料抛石、联排石垫等措施进行保护。

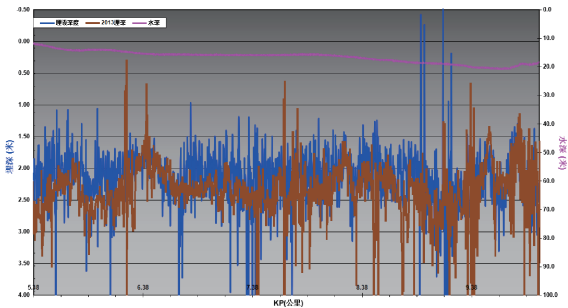


图12 J(B)相 KP5.4-9 区段 2016 年埋深检测与 2013 年对比
Fig. 12 J(B) phase KP5.4-9 depth detection in 2016 compared with the year of 2013

2.3 声呐检测

通过声呐摄影, 可对海缆路由区域进行检测, 获取海底电缆周边影像, 根据影像分析障碍物, 如对海缆路由残存海床的锚具、锚链、缆绳缠绕海缆等异物须记录位置坐标并记录着床姿态, 如图 13 所示; 同时可辨识海底电缆裸露情况; 对海缆保护石坝进行辨识, 识别海底电缆上方石坝的外观状态, 根据抛石坝深度坐标计算抛石坝厚度等, 如图 14 所示。

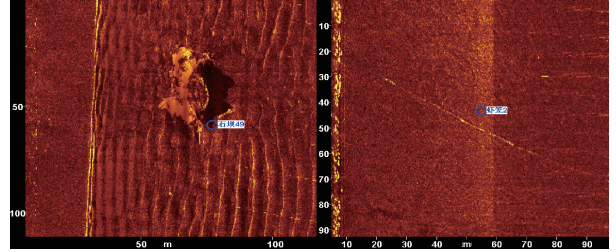


图13 海缆障碍物检测成果声呐摄影截图

Fig. 13 Submarine sonar obstacle detection results of photography

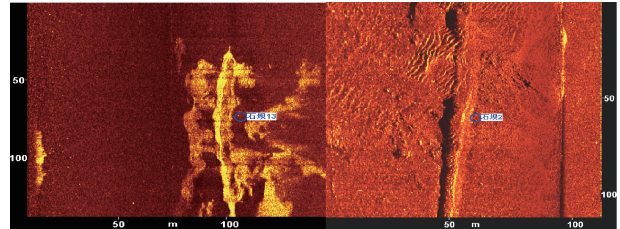


图14 抛石坝检测成果声呐摄影截图

Fig. 14 The dam detection results of sonar photography

2.4 多波束测量

对海底电缆路由区域进行多波束测量, 主要目的是进行海底电缆产生裸露、悬空的原因进行分析。通过多波束测量, 对海缆区域海底底质及地貌分析发现: 海缆路由范围内发育有大量的海底沙波, 沙波的高度一般在 2~6 m 之间, 波长一般在 100~400 m 之间(最大波长 500 m)。向流面的坡度长而缓(斜率一般在 2%~6%), 背流面的坡度较陡(斜率一般在 16%~18%之间)。多数沙波呈明显的不对称, 在部分较大沙波的向流面上发育有次一级沙波。根据检测结果分析, 路由海底存在的不良地质现象包括沙波、沙堤沙丘、冲刷槽、冲刷脊和丘状突起、陡坡、滑坡、珊瑚礁、浅埋岩石、软弱地层等。此外, 海缆路由区地形起伏多变, 分布有陡坡、槽底、冲刷沟槽、突起丘状坡顶, 存在大面积的鱼鳞状冲刷坑和沙波, 地形横截剖面呈锯齿状。

齿状; 沙波基本在整个路由都出现, 脊部大体上呈南北向, 与琼州海峡的潮流方向(N~E)基本相垂直; 形状大小、长度、波高呈从北往南逐渐变大的趋势, 如图15~图16所示。故海底沙坡及极其复杂的海流流态是造成海缆裸露、悬空及抛石难以固定导致散石的主要原因。

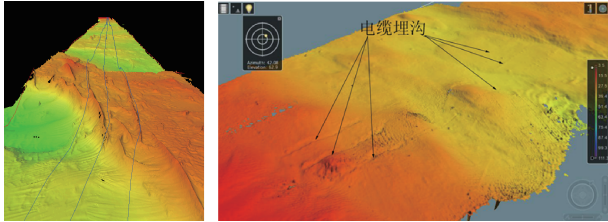


图15 海南联网项目中多波束结果图

Fig. 15 Multi beam results in Hainan networking project

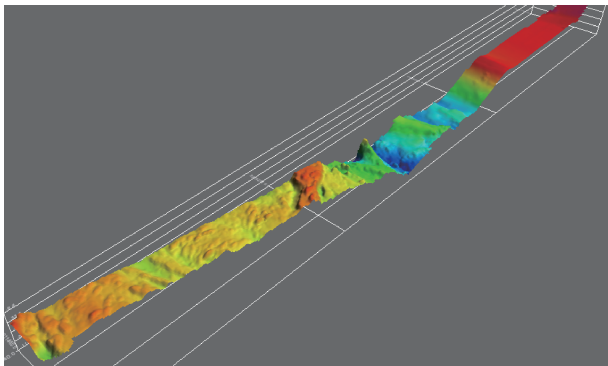


图16 海南联网海底电缆路由断面示意图

Fig. 16 Multi beam results in Hainan networking project

3 结论

海底管线探测的技术方法很多, 但由于海底电缆检测精度高的特殊要求, 常规的磁力仪、管线仪探测技术方法已经显得较为粗略。

本文对比了海缆检测各技术方法的优劣性, 提出以水下机器人为依托, 多种检测方法集成近距离检测海底电缆的综合技术方法, 通过水下机器人携带各种设备近距离检测, 以常规的海底地形地貌等测量技术作为辅助手段的综合技术已经适用市场, 同时适用于复杂多变的路由海床环境。

本文以海南联网海缆检测标志性项目为例, 介绍了以水下机器人为依托, 携带摄像头、声呐系统、TSS350 近距离检测海缆路由埋深、抛石石坝外观、抛石石坝厚度、海缆裸露悬空及风险点、海缆路由区域障碍物等, 辅以多波束、ADCP 进行海缆路由区域地形地貌、海流测量, 分析海缆埋深、

路由等状况变化的原因, 实例表明, 该综合检测方法全面, 检测效果好, 历次检测结果对比吻合度高, 准确掌握了海缆运维的实际状况。为后期海缆检测及运行维护提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 龙志, 袁力翔. 海南电网与南方主网第二回联网工程方案研究 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(4): 80-83.
LONG Z, YUAN L X. Scheme research for interconnection project II of Hainan Power Grid and China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(4): 80-83.
- [2] 王裕霜, 海底电缆抛石保护工程建设综述 [J]. 中国电力教育, 2012(3): 51-56.
WANG Y S. Construction summary of riprap protection of submarine cable [J]. China Electric Power Education, 2012(3): 51-56.
- [3] 孙明, 王柏森, 贾海涛. 海底电缆在埕岛油田的应用及发展趋势 [J]. 海岸工程, 2009, 28(1): 56-62.
SUN M, WANG B S, JIA H T, et al. Application of underwater electrical cables in Chengdao oil field and its developing tendency [J]. Coastal Engineering, 2009, 28(1): 56-62.
- [4] 苏永森. 硃洲岛 35 kV 大外径海底电缆的敷设 [J]. 东北电力技术, 2001(8): 44-46.
SU Y S. 35 kV Large outer diameter cable laying of Naozhou island [J]. Northeast Electric Power Technology, 2001(8): 44-46.
- [5] 刘杨华, 林舜江. 电力市场环境上海上风电场综合评估研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 34-37.
LIU Y H, LIN S J. Comprehensive estimation research on offshore wind farm within electric power market [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 34-37.
- [6] 马海毅, 曾亮, 丁金伟, 等. 海上风电环境与勘测 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊1): 151-153+157.
MA H Y, ZENG L, DING J W, et al. Environments and investigations of offshore wind farm [J]. Southern Energy Construction, 2016, (Supp. 1): 151-153+157.
- [7] 王星, 尚涛, 黄贤球. 海南联网海底电缆护套绝缘监测方法 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(1): 62-65.
WANG X, SHANG T, HUANG X Q, et al. The insulation inspection method for submarine cable sheath of Hainan Grid interconnection project [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(1): 62-65.
- [8] 刘宣宣, 张巧玲. 海南与南方电网联网工程 500 kV 线路保护配置分析 [J]. 电力建设, 2010, 31(6): 31-34.
LIU X X, ZHANG Q L. Analysis on the 500 kV line protection configuration of Hainan transmission interconnection project [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(6): 31-34.

- correction of wind turbine based on wind measurement data of wind tower [J]. *Journal of System Simulation*, 2016(11): 2790-2797.
- [2] 高婕, 王健, 崔永锋, 等. 基于陕北某复杂地形风电场 Windsim 软件数值模拟研究 [J]. *风能*, 2016(10): 62-64.
GAO J, WANG J, CUI Y F, et al. Numerical simulation of windsim software based on a complex terrain wind farm in Northern Shanxi [J]. *Wind Energy*, 2016(10): 62-64.
- [3] 卢胜, 吴莎. 基于 SCADA 数据的风电场后评估方法 [J]. *电子测试*, 2016(1): 41-43.
LU S, WU S. Post-evaluation method of wind farm based on SCADA data [J]. *Electronic Testing*, 2016(1): 41-43.
- [4] 刘凯, 曾杰, 叶任时, 等. 复杂地形山地风电场的 CFD 分析 [J]. *人民长江*, 2016(3): 56-58+102.
LIU K, ZENG J, YE R S, et al. CFD analysis of complex terrain mountain wind farms [J]. *Yangtze River*, 2016(3): 56-58+102.
- [5] 迟继峰, 钟天宇, 刘庆超, 等. 复杂地形多测风塔综合地貌及风切变拟合修正的风资源评估方法研究 [J]. *华电技术*, 2012(11): 75-77+81.
CHI J F, ZHONG T Y, LIU Q C, et al. Study on wind re-
- source evaluation method of synthetic landform and wind shear fitting in complex terrain [J]. *Huadian Technology*, 2012(11): 75-77+81.
- [6] 王有禄, 李淑华, 宋飞. 风电场测风数据的验证和处理方法 [J]. *电力勘测设计*, 2009(1): 60-66.
WANG Y L, LI S H, SONG F. Treatment method and inspection of anemometric dates in wind power plant [J]. *Electric Power Survey & Design*, 2009(1): 60-66.
- [7] 国际电工委员会. 风力涡轮机, 第 1 部分设计要求: IEC 61400-1-2007 [S]. 美国: 国际电工委员会, 2007.
IEC/TC. Wind turbines-part 1, design requirements; IEC 61400-1-2007 [S]. U. S. A.; IEC/TC, 2007.
- [8] 国际电工委员会. 风轮, 第 12 部分风轮发电的动力性能测试: DIN EN 61400-12-1-2007 [S]. 美国: 国际电工委员会, 2007.
IEC/TC. Wind turbine-Part 12, test for dynamic performance of wind turbine power generation; DIN EN 61400-12-1-2007 [S]. U. S. A.; IEC/TC, 2007.

(责任编辑 黄肇和)

(上接第 91 页 Continued from Page 91)

- [9] 陈凯华. 海南联网海缆敷设施工与防护 [J]. *南方电网技术*, 2009, 3(5): 25-26.
CHEN K H. Laying and protection of submarine cables of Hainan interconnection project [J]. *Southern Power System Technology*, 2009, 3(5): 25-26.
- [10] 陈利明, 邵芳, 邵平. 海底光缆安全研究 [J]. *光通信技术*, 2009, 33(11): 29-31.
CHEN L M, SHAO F, SHAO P. Study on security in submarine optical fiber cable [J]. *Optical Communication Technology*, 2009, 33(11): 29-31.
- [11] 潘富国, 付晓明, 苟净慷, 等. 侧扫声纳在海底光缆维护工程中的应用 [J]. *工程地球物理学报*, 2004, 5(1): 389-394.
PAN F G, FU X M, GOU Z K, et al. Side scan sonar applications in undersea fiber-optic cable maintenance projects [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2004, 5(1): 389-394.
- [12] 黄春晖. 海底电力电缆探测方法及实际应用 [J]. *电力技术*, 2010, 19(15): 20-26.
HUANG C H. Detection method and practical application of submarine power cable [J]. *Electric Power Technology*, 2010, 19(15): 20-26.
- [13] 贾玉明. 侧扫声纳在琼州海峡海底电力电缆路由测定中的应用 [J]. *广东输电与变电技术*, 2011, (1): 37-38.
JIA Y M. The Side-scan sonar application in Qiongzhou channel submarine electric power cable routes surveying [J]. *Guang-*
- dong Power Transmission and Substation Technology, 2005, 23(3), 374-384.
- [14] 刘保华, 丁继胜, 裴彦良, 等. 海洋地球物理探测技术及其在近海工程中的应用 [J]. *海洋科学进展*, 2005, 23(3): 374-384.
LIU B H, DING J S, PEI Y L, et al. Marine geophysical survey techniques and their applications to offshore engineering [J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(3): 374-384.
- [15] 张永明, 毕建强, 孙圣堂, 等. 青岛崂山头海域海底滑坡的声波探测 [J]. *工程地球物理学报*, 2012, 9(2): 170-174.
ZHANG Y M, BI J Q, SUN S T, et al. Sound wave prospecting in the submarine landslip in Laoshantou sea area of Qingdao [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2012, 9(2): 170-174.
- [16] 曾亮, 王艳, 李明波, 等. TSS350 系统在海底电缆探测中的应用 [J]. *工程勘察*, 2012, 40(4): 92-95.
ZENG L, WANG Y, LI M B, et al. Application of TSS350 system in the detection of submarine power cables [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2012, 40(4): 92-95.
- [17] 董庆亮, 王伟平. EM1002 型多波束测深系统及参数校正 [J]. *海洋测绘*, 2004, 24(5): 23-26.
DONG Q L, WANG W P. EM1002 multi-beam sounding system and its parameter correcting [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2004, 24(5)23-26.

(责任编辑 郑文棠)