

不同交流海底电缆系统标准中试验方法的差异分析

肖敬成

(上海国缆检测股份有限公司, 上海 200444)

摘 要:国内外适用于交流海底电缆的覆盖 6~500 kV 电压等级的主要标准和技术文件,随发布时间、适用对象、技术侧重等不同,对于同一试验,各文件中的规定和要求存在一定差异。文中梳理了国内外关于交流海底电缆主要标准和技术文件的制/修订情况及相互联系,阐述了海底电缆系统机械试验、三芯海底电缆电气试验和透水试验等海底电缆系统重点试验项目在不同标准中规定的差异,并给出标准中试验方法制/修订方向的建议。

关键词:交流海底电缆;卷绕试验;张力弯曲试验;电气试验;透水试验

中图分类号:TM247.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1672-6901(2023)05-0054-05

Comparison Analysis of Testing Methods in Different Standards for
AC Submarine Cable System
XIAO Jingcheng
(Shanghai National Center of Testing and Inspection for Electric Cable and
Wire Co., Ltd., Shanghai 200444, China)

Abstract: Standards and technique documents for AC submarine cables at home and abroad covers the voltage range from 6 kV to 500 kV. There are differences in testing methods and requirements in those documents depending on release date, applicable products, and technical emphasis. Preparation and revision of main standards and technical documents of AC submarine cables at home and abroad and their mutual relations were introduced. Differences of the key test items of submarine cable system, such as mechanical test of submarine cable system, electrical test of three core submarine cables and water penetration test in different standards were expounded. Suggestions on the revision direction of standard test method in the future were also proposed.

Key words: AC submarine cables; coiling test; tensile bending test; electrical test; water penetration test

0 引 言

随着全世界对清洁能源需求的增加,依托于挤包绝缘高压交流海底电缆的海上风力发电工程在世界范围内快速发展。我国海上风电资源丰富,相比于陆上风电资源,到达沿海等高能源需求地区的距离短、成本低,适合大规模开发。海底电缆系统也随着海上风电的大力建设而快速发展。海底电缆的快速发展带动了技术的进步,相应的技术文件和标准也在不断更新和完善。目前,国内外对交流海底电缆的生产制造与考核主要依据国际电工委员会(IEC)发布的 IEC 标准、国际大网会议(CIGRE)发布的 CIGRE TB 技术手册和中国国家标准^[1]。

随着试验标准的增加和修订,形成了较完整的

规范体系,包括 CIGRE 规范和国家标准。国际电工委员会在 2019 年也发布了唯一一个与海底电缆相关的 IEC 标准。目前,主要应用的交流海底电缆国内外标准和技术文件由于适用的电压等级、使用环境、技术侧重等情况不同,在机械试验、透水试验等海底电缆特殊试验的方法和技术要求上存在一定的差异。本工作对海底电缆系统机械试验、三芯海底电缆电气试验和透水试验等海底电缆系统重点试验项目在不同标准中规定的差异进行了讨论。

1 国内外海底电缆标准及技术规范

与陆地电缆相比,由于海底电缆在敷设或打捞过程中经受机械力,且在海水中运行,所以在不同的海底电缆标准或技术文件中,除电气试验与相应电压等级陆地电缆标准中规定的方法基本一致外,对机械试验方法、透水试验方法也进行了相关规定。目前,国内外常用的海底电缆标准及技术规范见表 1。

收稿日期:2022-11-03

作者简介:肖敬成(1986—),男,工程师。

E-mail:xiaojingcheng@ticw.com.cn

表 1 常用海底电缆标准及技术规范

标准规范	适用电压等级/kV	主要技术内容
JB/T 11167. 1—2011	10~110	主要规定例行试验、抽样试验、型式试验(包含机械试验、电气试验、非电气试验及透水试验)和敷设后试验的技术内容;其中,机械试验的规定和 Electra No. 171 保持一致,透水试验中关于试验时间的规定要严于其他标准
CIGRE TB 490 (2012)	30~500	主要规定对大长度交联聚乙烯绝缘海底电缆的例行试验、抽样试验、型式试验、预鉴定试验、扩展试验、工厂验收试验、安装后电气试验、开发试验等试验方法;引用 IEC 60840:2011、IEC 62067:2011 和 Electra No. 171 中机械试验的相关内容,并且详细规定了海底电缆导体透水、金属套下透水、工厂接头和修理接头透水的试验方法 ^[2]
CIGRE TB 623 (2015)	—	主要规定海底电缆的型式试验、工程特定的试验和特殊试验的试验方法;其中,型式试验对不同水深下的张力弯曲力值的计算进行了修订,详细规定了动态缆的全尺寸疲劳试验方法
CIGRE TB 862 (2022)	—	主要规定型式试验项目中动态海底电缆全尺寸疲劳试验、电缆特性的试验和动态海底电缆相关的机械试验的试验方法
GB/T 32346. 1—2015	220	主要规定例行试验、抽样试验、型式试验(包含机械试验、电气试验、非电气试验及透水试验)、预鉴定试验及预鉴定扩展试验和安装后电气试验的技术内容
GB/T 41629. 1—2022	500	
CIGRE TB 722 (2018)	6~60	主要规定“干式”与“湿式”海底电缆的鉴定试验,其中“干式”设计的海底电缆应经受冲击测试、侧压力测试、刮磨性能测试、焊接型护套机械性能测试、黏结型护套的长期老化后性能测试、附件接头的阻水和防腐蚀性性能测试;“湿式”设计海底电缆的 3 种老化的试验方法与导体屏蔽处击穿场强的判定标准
IEC 63026:2019	6~60	该标准主要基于 IEC 60502、IEC 60840 和 CIGRE TB 623(2015)的测试建议,规定例行试验、抽样试验、型式试验(包含机械试验、电气试验、非电气试验及透水试验)和安装后电气试验的技术内容;机械试验相关的方法主要参照 CIGRE TB 623(2015)中的规定,且型式试验中电气试验规定三芯海底电缆的每一相均应进行试验
DL/T 2233—2021	110~500	主要规定海底电缆的预鉴定试验和预鉴定扩展试验的试验要求,对预鉴定试验的敷设条件做出了详细的规定,增加在预鉴定试验结束后修理接头须进行径向透水试验的要求,并明确规定多芯海底电缆可以在其中一芯上进行预鉴定试验

2 机械试验标规的差异分析

2.1 卷绕试验

海底电缆制造收贮和转运的过程中,在储缆池或敷设船没有主动收放线的情况下,海底电缆将经受扭转,继而在海底电缆中产生机械应力,因此有必要用卷绕试验来检验海底电缆是否受损。卷绕试验相关的标准有 JB/T 11167—2011、CIGRE TB 490 (2012)、CIGRE TB 623 (2015)、GB/T 32346. 1—2015、GB/T 41629. 1—2022、IEC 63026: 2019。其中,卷绕试验均要求卷绕次数等于电缆在制造、储存、运输和敷设过程中预期进行卷绕作业的次数;卷绕高度不超过任何卷绕操作的高度;接头间及接头和电缆末端的距离至少为两整圈电缆。

不同标准在卷绕圈数、工厂接头数量和最小卷绕直径上存在差异。不同标准对卷绕圈数及工厂接头数量的规定见表 2。

表 2 不同标准对卷绕圈数及工厂接头数量的规定

标准规范	卷绕圈数/圈	工厂接头数量/个
JB/T 11167—2011	≥8	≥2
CIGRE TB 490(2012)	≥6	≥1
CIGRE TB 623(2015)	≥6	≥1
GB/T 32346. 1—2015	≥8	≥1
GB/T 41629. 1—2022		
IEC 63026:2019	≥6	≥1
	≥8	≥2

最小卷绕直径的规定直接影响卷绕试验中电缆的排列方式。根据 IEC 63026:2019 规定,应记录工厂接头所在位置的最小直径,确保工厂接头的位置在制造商规定的最小直径上^[3],电缆可以由内向外平铺排列。其他标准中,电缆和工厂接头需要满足制造商规定的最小直径^[4-8],电缆须由下至上进行

排列。

IEC 63026:2019 和 CIGRE TB 623 (2015) 对三芯海底电缆中接头数量和距离做了更详细的描述。三芯海底电缆分相接头的数量取决于电缆的结构。接头处铠装层外径增加的部分被认为是“机械特殊的部件”,若两个“机械特殊的部件”之间距离至少为一个外铠装节距,则认为两个“机械特殊的部件”之间不会相互影响,被视为机械独立,反之为非机械独立,接头位置示意图见图 1。

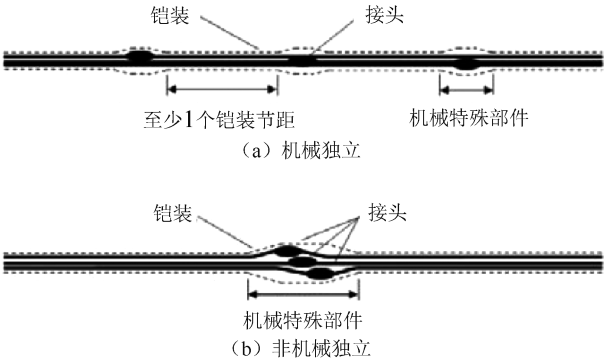


图 1 三芯海底电缆接头位置示意图

机械独立时,接头的数量和距离可以参照单芯电缆,在接头端和测试电缆长度的最近端之间保持至少两整圈线圈的距离;非机械独立时,三芯海底电缆分相接头的数量应与交货电缆中的接头数量一致^[3,6],若电缆中接头间距离小于 1 个外铠装节距,那么被测海底电缆中应至少包括三相接头,且每一相接头间的距离应与交货电缆中“机械相关”的每相接头的距离保持一致。

2.2 张力弯曲试验

对于海底电缆张力弯曲的试验方法和规定,几个标准中均没有很大差异,但是关于张力弯曲力的计算方法在 CIGRE TB 623 (2015) 中进行了修订。在 CIGRE TB 623 (2015) 发布之前,各标准中张力弯曲力计算方法均采用 Electra No. 171 中的方法,对 0~500 m 敷设水深海底电缆的试验张力计算公式为^[9]

$$T = 1.3 \times W \times d + H \tag{1}$$

式中: T 为试验张力,N; W 为 1 m 电缆水中重量(电缆自重减去排开的同体积水重), $N \cdot m^{-1}$; d 为最大敷设水深,m; H 为安装期间最大预期水底接触点对电缆的张力,N。

d 取最小规定值 200 m 时, H 的计算公式为

$$H = 0.2 \times W \times d \tag{2}$$

CIGRE TB 623 (2015) 中敷设水深为 0~500 m 时的张力计算与 Electra No. 171 中的相比,主要变

化如下。

1) 公式(1)中系数取值 1.3,考虑到敷设和修复引起的额外张力及敷设和修复情况下的动态力而附加的力。CIGRE TB 623 (2015) 中依然采用这个系数,在有效波高(H_s)不大于 2 m 时适用,但当 H_s 大于 2 m 时,张力弯曲力需选择敷设水深大于 500 m 时的公式进行计算^[6]。

2) 安装期间,最大预期底部张力 H 是水平方向上的力^[6],与敷设水深无关,在 CIGRE TB 623 (2015) 中规定 H 不应小于 40 N,意味着海底电缆在着陆点的最小弯曲半径为 40 m,如果半径大于 40 m,则应选择更大的张力。

3) CIGRE TB 623 (2015) 删除了 Electra No. 171 中建议的海底电缆直接从电缆沟槽被拉起时的额外张力 5~20 kN,认为这种做法并不常见,且对这个力值不是非常确定^[6]。

CIGRE TB 623 (2015) 中对敷设水深大于 500 m 时静态张力的计算与 Electra No. 171 中保持一致,仅对动态张力的部分进行了修订,动态张力的计算由惯性力 D_i 和拖拽力 D_o 共同组成,这两个参数均与实际敷设时的条件有关。

3 三芯海底电缆试验芯数标准规范的差异

在不同标准中,对三芯海底电缆在型式试验或预鉴定试验中电气试验试验芯数的规定见表 3。

标准规范	型式试验	预鉴定试验
JB/T 11167. 1—2011	适用所有安装的海底电缆和附件	不适用
CIGRE TB 490 (2012)	在热分布无明显差异的前提下,可去除铠装或三芯取一芯	不适用
CIGRE TB 623 (2015)	不适用	不适用
GB/T 32346. 1—2015	在热分布无明显差异的前提下,可去除铠装或三芯取一芯	规定单芯可以覆盖三芯
GB/T 41629. 1—2015	不适用	不适用
IEC 63026:2019	规定仅适用三芯	不适用
DL/T 2233—2021	不适用	在不破坏多芯海底电缆系统整体结构的情况下,适用于单芯

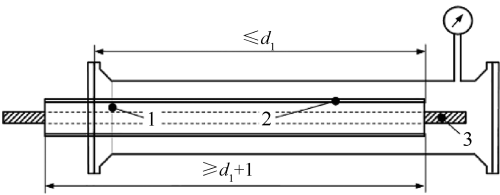
目前,在型式试验中,电压等级 66 kV 及以上的三芯海底电缆在电气试验时通常在其中一芯上进行,预鉴定试验也是在其中一芯上进行。参照 IEC 63026:2019 执行的型式试验均在三芯上进行。三芯海底电缆针对一芯进行试验和在三芯上均进行试验的主要区别为对导体加热时钢丝铠装上是否产生涡流。使用三相交流电源对三芯导体加热,三相电流之间的相角为 120°,在铠装钢丝上不会产生涡流损耗,钢丝铠装不会发热,和三芯海底电缆在实际运行时保持一致。

表 4 不同标准规范对海底电缆透水试验试验条件的差异

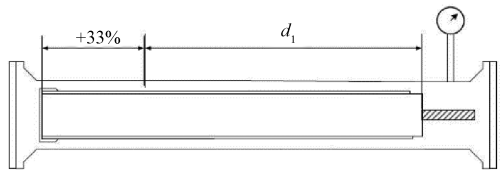
标准规范	试验水深/m				试验时间/h				样品长度/m		透水距离
	导体	金属套	工厂接头	修理接头	导体	金属套	工厂接头	修理接头	导体	金属屏蔽	
JB/T 11167—2011	d	30	未规定	未规定	480	480	未规定	未规定	$2d_1$	$2d_2$	不超过申明透水长度
CIGRE TB 490(2012)	d	30	d	d	240	240	48	48	$1.33d_1$	d_2+1	不超过申明透水长度
CIGRE TB 623(2015)	d	30	$d+50$	d	240	240	48	48	$1.33d_1$	d_2+1	不超过申明透水长度
GB/T 32346.1—2015	d	30	d	d	240	240	48	48	$1.33d_1$	d_2+1	不超过 30 m
GB/T 41629.1—2015											
IEC 63026:2019	d	30	d	d	240	240	48	48	d_1+1	d_2+1	不超过申明透水长度

不同标准和技术规范除在表 4 中对透水试验条件规定的差异外,还有以下几点重要的差异。

1) IEC 63026:2019 中规定,导体透水的样品,其规定导体的一端在试验设备中,另一端应该暴露在试验设备外。其他标准规定,试验样品的一端应该密封,另一端去除导体外的包覆层露出导体,样品两端均安装在试验设备内部,试验样品安装方式见图 2^[3,5]。



(a) 导体一端在试验设备外



(b) 导体两端在试验设备内

图 2 试验样品安装方式

4 海底电缆透水试验方法标准规范的差异

海底电缆透水试验方法主要包括导体的纵向透水,金属套下的纵向透水和接头的径向透水,不同标准和技术文件中的透水规定见表 4。表 4 中预处理的导体透水样品取自经机械试验的样品,金属套下的透水样品不必经机械试验,试验前须受 3 次热循环;试验用水为自来水或盐水; d 为申明最大敷设水深,m; d_1 为申明导体最大透水距离,m; d_2 为申明金属屏蔽最大透水距离,m。

2) IEC 63026:2019 中规定,在透水试验后对接头的导体和水之间施加 25 kV 的直流电压^[3],以验证是否有水分侵入。

3) GB/T 41629.1—2015 中规定了金属套与铠装短接点透水试验。电缆采用绝缘护套时,为解决电缆金属套上感应电压,对电缆的金属套和铠装之间进行短接,检验在最大水深时护套和金属套内有无水分侵入。电缆试样(含短接点)应经受机械试验,对于不大于 500 m 深度的情况,施加 $(d+50)$ m 的水压;深度大于 500 m 时,施加 $(d+100)$ m 的水压。透水试验持续 48 h,当到达试验时间后,将试样从水中取出,要求试样的短接点连续可靠、无断点,护套和金属套内无水分侵入迹象^[8]。

5 结束语

随着海洋输电工程的不断发展,与之相关的海底电缆标准也在不断更新完善。本工作结合实际工程,根据重点项目中试验方法的差异变化给出标准试验方法制/修订方向的建议。

1)推荐卷绕试验中海底电缆(含工厂接头)的排列方式为由内向外排列,且应保证工厂接头能够在制造商声明的最小卷绕直径的位置,从而确保能够对海底电缆的机械性能和后续电气性能进行有效考核。

2)三芯海底电缆在经历卷绕试验时,如果三相上的工厂接头的距离大于1个铠装节距,那么其中的至少两相上应分别有1个工厂接头来证明两相上的工厂接头的距离大于1个铠装节距。但是,如果工厂接头不参与后续电气试验,则可以做成与工厂接头形状类似的模拟接头。

3)关于三芯海底电缆在电气试验时芯数的规定,推荐试验中采用三相电流源对磁性铠装三芯海底电缆导体加热,既可以减少钢丝铠装的发热,也符合三芯海底电缆运行时的状态。对于电气试验,如果进行试验的三芯海底电缆系统的每一相包含的附件设计都相同,则可以在其中有代表性的一相上进行电气试验,若试验通过,则可以证明与这项试验中相同设计的附件具有相同的性能。

4)实际透水试验结果表明,图2(a)和图2(b)的两种导体安装方式对试验结果无根本性影响。两种导体透水试验方案的区别在于前者可以保证不会因水从导体端头密封的地方进入而导致试验失败,但这种方式很难满足设备与电缆接口处的密封要求。因此,推荐采用图2(b)的方式进行导体的透水试验,这种方式能够满足更大敷设水深时相应的试验压力。

参考文献:

[1] 孙建生,夏俊峰,曹俊平,等. 中国海上风电用海底电缆系统标准体系研究[J]. 船舶工程,2021,43(增刊1):121-126.

[2] 陈果. 浅析我国海底电缆标准的修订方向[J]. 电线电缆,2020(3):1-5.

[3] IEC. Submarine power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 60 kV ($U_m = 72.5$ kV)-Test methods and requirements; IEC 63026; 2019[S]. Switzerland; IEC,2019.

[4] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 10 kV ($U_m = 12$ kV)至 110 kV($U_m = 126$ kV)交联聚乙烯绝缘大长度交流海底电缆及附件 第 1 部分 试验方法和要求; JB/T 11167.1—2011[S]. 北京:机械工业出版社,2011.

[5] CIGRE. Recommendations for testing of long ac submarine cables with extruded insulation for system voltage above 30 (36) to 500 (550) kV; CIGRE TB 490 (2012) [S]. Pairs; Working Group B1. 27, 2012.

[6] CIGRE. Recommendations for mechanical tests on submarine cables; CIGRE TB 623 (2015) [S]. Pairs; Working Group B1. 43, 2015.

[7] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 220 kV ($U_m = 252$ kV)交联聚乙烯绝缘大长度交流海底电缆及附件 第 1 部分 试验方法和要求; GB/T 32346.1—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

[8] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 500 kV ($U_m = 550$ kV)交联聚乙烯绝缘大长度交流海底电缆及附件 第 1 部分 试验方法和要求; GB/T 41629.1—2022[S]. 北京:中国标准出版社,2022.

[9] CIGRE. Recommendations for mechanical tests on submarine cables; Electra No. 171 [S]. Pairs; Working Group 02 of Study Committee,1997.

JB/T 14389—2023《高温超导电缆技术要求》即将发布

2023 年 7 月 26 日,工业和信息化部科技司发布公示信息,对一批行业标准和推荐性国家标准进行报批前公示。由上海电缆研究所有限公司牵头的 JB/T 14389—2023《高温超导电缆技术要求》在列其中。

JB/T 14389—2023《高温超导电缆技术要求》是国内首个超导电缆行业标准,主要立足于上海电缆研究所有限公司在该领域的长期科研基础和标准

化积淀,充分反映国内高温超导电缆产业化和示范工程的技术经验。

该标准规定了 35 kV 及以下高温超导电缆电压等级、设计结构、成品及材料主要性能、试验方法和指标要求,具有可操作性,并形成了良好的技术体系。该标准正式发布后,将对超导电缆产业化发展和工程化应用起到促进作用。