

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104336

融合在线监测数据的海底电缆综合健康状态评估*

李 茜¹ 苏天赐¹ 胡意茹² 张安安¹ 林 钰¹ 袁海云¹

(1. 西南石油大学 电气信息学院 成都 610500; 2. 中海油研究总院有限责任公司 北京 100028)

摘要:海底电缆的运行状况直接影响海洋工程的安全可靠运行,及时有效地掌握其健康状态具有重要意义。海缆自身结构和运行环境复杂,健康状态难以准确掌握。为此,提出了一种融合在线监测数据的海底电缆综合健康状态评估方法。首先,以电缆状态评价技术导则为指导,融合海缆在线监测动态数据和巡检、试验等静态数据,构造适用于海缆综合健康状态评估的指标体系。其次,基于海缆在线监测状态量的特征,结合电缆导则评价标准,形成了一套合理、有据的评估准则。然后,在上述基础上建立多状态量融合的评估模型,分层对海缆部件和整体进行评估,得到海缆健康状态,并根据模糊理论量化状态,得到海缆综合健康状态评估结果。最后通过对某海上油气工程的海缆进行实例分析,验证了该方法的可行性和有效性。

关键词:海底电缆;在线监测数据;状态评估;模糊理论;评估准则

中图分类号: TN818; TM757.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

Comprehensive health status assessment of submarine cables with online monitoring data

Li Qian¹ Su Tianci¹ Hu Yiru² Zhang An'an¹ Lin Yu¹ Yuan Haiyun¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. CNOOC Research Institute Co. Ltd, Beijing 100028, China)

Abstract: The operating status of submarine cables directly affects the safety and reliability of offshore engineering. It is of significance to timely and effectively obtain the health status of submarine cables. Due to the complex structure and operating environment of submarine cables, it is difficult to accurately obtain the health status of submarine cables. Therefore, a comprehensive health status assessment method of submarine cables with online monitoring data is proposed. Firstly, following technical guidelines of cable status evaluation, an index system suitable for submarine cable comprehensive health status evaluation is constructed by integrating static data, such as patrol inspection and testing data and dynamic data from online monitoring. Secondly, a set of reasonable and evidence-based evaluation criteria is formed based on the characteristics of online monitoring status of submarine cable and evaluation standards from cable guidelines. Then, on the basis of the above, a multi-state fusion based status evaluation model is established, which can evaluate the overall submarine cable as well as its components hierarchically to obtain its health status. Further leveraging fuzzy theory, a comprehensive health status of the submarine cable can be obtained. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method is verified by applying on submarine cables in a practical offshore oil and gas project.

Keywords: submarine cable; on-line monitoring data; status evaluation; fuzzy theory; evaluation criterion

0 引言

随着海洋资源的开发和利用,以及海上平台、海上风电场及海底观测站等海洋工程的发展,海底电缆这些年

得到了日益广泛的应用,是作为海上平台设备和水下生产系统之间电力和通信的主要连接通道。海缆的稳定运行不仅关系到海洋工程的生产、同时关系到整个海洋工程的可靠运行^[1-3]。海缆故障往往会造成海洋工程停电,导致直接的经济损失,且需要花费大量的时间和费用进

收稿日期: 2021-05-22 Received Date: 2021-05-22

* 基金项目: 中海石油(中国)有限公司科技项目(YXKY-ZX 06 2020)、四川省科技计划项目(2021YFSY0051, 2020YFQ0038)资助

行维修。实时掌握海缆运行状况,能发现许多潜在问题,提高检修的针对性以及设备的精细化管理水平,进而确保海洋工程的安全可靠运行。因此,对海缆健康状态进行准确评估显得至关重要。

目前关于海缆健康状态评估方面还具有很大的空白,且由于海缆特殊的运行环境,无法对其常规巡检,缺乏有效的安全管理措施。随着光纤应用技术的发展,人们可以利用该技术获取海缆的相关运行参数,通过监测海缆温度、应变、扰动以及埋深等信息^[4-8],掌握海缆在水下的运行状况,对了解海缆的运行健康水平、合理提高海缆的输送能力有着重要作用。虽然海缆在线监测技术已日趋成熟,但现有的监测系统存在功能单一,采集数据分散等问题^[9-10],且并未全面考虑影响海缆运行状态的其他影响指标^[11-12]。因此,仅通过对海缆进行在线监测,把握海缆运行健康状态是不准确的,还需对不同类型的静态数据分析,以便更好的把握海缆整体健康状态。

目前对于海缆状态评估的方法很少,甚至关于陆上电缆的运行状态评估的研究也不是很多,文献[13]通过搭建高压频域介电响应测量平台,针对海缆绝缘老化状态进行分析。文献[14-15]通过分析影响电缆老化参数变化,对电缆绝缘进行状态评估。这些方法都存在考虑状态量并不全面的问题,无法综合考虑设备其余部件对设备状态的影响,导致其评估结果存在分散性和误差较大的问题。自 2010 年以来,国家电网公司和国家能源局相继颁布了一系列电缆设备的状态评价和海缆运行规程导则^[16-18],这些研究成果和制度有效解决了状态量有限的问题。文献[19]介绍了基于导则的状态评估方法,但该方法存在评估状态参量多,无轻重之分,评估工作量大,效率低的问题。综上所述,现有状态评估方法多针对陆上电缆,缺乏适用于海缆的健康状态评估方法,且现有海缆评估方法评估指标体系不全面,评价准则不能量化,基于导则的评价方法工作量大、状态参量无轻重之分,使得评估结果具有一定模糊性,不能有效直观的体现出评估对象的健康状态。

纵观上述国内外研究成果可知,目前对于海缆健康状态监测的研究主要从温度、扰动等特定方面开展。并未从海缆整体的健康方面考虑,本文为使海缆健康状态评估更加客观、准确,首次融合海缆在线监测动态数据^[20]和不同类型的静态数据,构造动静结合的海缆健康状态评估指标体系。其次,结合导则标准^[16-18]和海缆在线监测运行原理,提出基于状态量量化的海缆评估准则。在此基础上建立多状态量融合的评估模型,分层对海缆部件和整体进行评估,得到海缆的健康状态等级,并根据模糊理论量化当前海缆部件和整体的健康状态等级,得到海缆综合健康状态评估结果,并引用计算机编程技术,快速得到评估结果。最后通过实例分析验证了所

提方法的有效性和实用性。

1 基于动静结合的海缆状态评估指标体系

考虑现有电缆状态评价导则只有静态数据这一缺陷,将海缆在线监测动态量纳入海缆健康评估指标体系中,并结合海缆自身结构特征与运行环境影响因素,修改并完善了海缆不同类型的静态数据,以此,构建一套适用于海缆综合健康状态评估的指标体系^[21-22],该指标体系收集并整合了海缆各部件中的 64 个状态量,如图 1 所示。

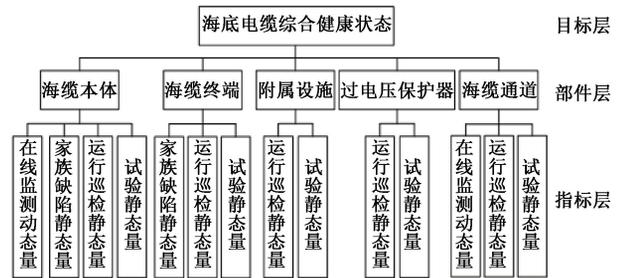


图 1 海底电缆状态评估指标体系

Fig. 1 Submarine cable condition evaluation index system

该评估指标体系将海缆健康状态指标参量划分为 3 层。第 1 层为海缆目标层,用来综合评判海缆整体健康状况。第 2 层为中间部件层,用来判断海缆各部件的健康情况,考虑海缆实际运行环境,部件层根据海缆各组成部件分类,其工作时各部件组成示意图如图 2 所示。底层为指标层,由反映海缆各部件下在线监测动态数据和包含家族缺陷、运行巡检及预防性试验在内的静态数据组成。在线监测能实时监测海缆运行状况,是海缆健康状态评估中重要的状态量指标。通过监测海缆温度和应变变化,能发现海缆自身结构或绝缘状态发生的异常状况;通过监测扰动变化,能预警海缆将要遭受的外部破坏;通过监测埋设深度变化,能有效避免因海缆裸露而发生的锚害事故;通过 AIS 监测,能预警海缆敷设路径中船舶肇事事故信息。基于海缆各在线监测状态量表征的信息不同,本文将温度、应变及扰动直接反映海缆本身运行状态的动态特征量纳入海缆本体部件状态指标中,将埋深和 AIS 直接反映海缆运行通道状态的动态特征量纳入海缆通道部件状态指标。

针对海缆自身复杂结构和运行所处复杂海洋环境,结合电缆状态评价导则和海缆基础资料,修改并完善海缆各部件的家族缺陷、运行巡检及试验等静态状态指标。针对海缆本体部分部件,以自身结构为例,相较于电缆,海缆含有内置光缆,每根光缆设置了多芯单模和多模光纤,在海缆本体部件的预防性试验静态量中须新增包含

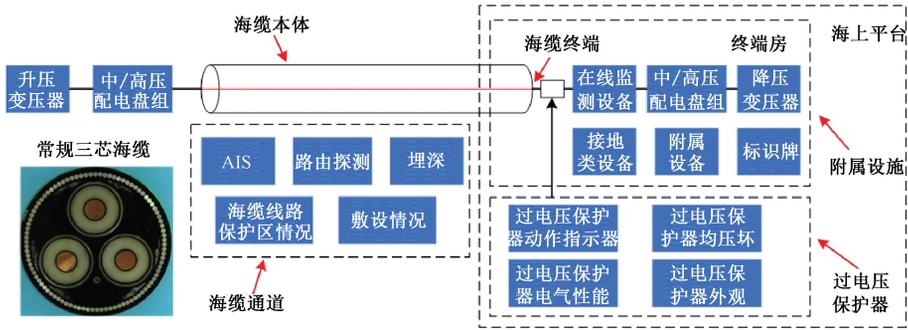


图 2 海缆各部件组成示意图

Fig. 2 Diagram of components of submarine cable

光纤衰减试验;以运行环境为例,海缆由于敷设环境复杂包含埋设段和登陆段等,因此在海缆本体预防性试验中须对耐压试验和绝缘电阻试验进行修改,同时运行巡检中须包含对登陆段海缆的巡视。由于篇幅限制,对海缆其余部件的静态数据修改和完善原因不再一一赘述。关于对海缆运行巡检静态数据的修改总结如下:1)海缆终端部分须包括对海缆终端、终端房、终端头以及终端电气设备的巡视;2)附属设施部分须包括对海缆警示标识、命名标识、监控设备、防雷系统以及接地系统的巡视;3)海缆通道部分须包括对海缆埋设段的巡视。关于对海缆预防性试验静态数据的修改总结如下:1)海缆本体部分须包括光纤衰减试验、绝缘电阻测试以及交流耐压试验;2)海缆通道部分须包括对海缆的路由探测以及对埋设段的巡视。

2 基于状态量量化的海缆评估准则

根据构建的海缆状态评估指标体系,对各状态量的劣化程度和重要性进行判断,以此对各状态量在反映海缆状态时的模糊性和不确定性进行量化。

依据 Q/GDW 456-2010《电缆线路状态评价导则》,将各状态量的劣化程度由轻到重分为 4 个等级,不同的劣化程度对应不同的基本扣分值。依据状态量对海缆线路安全运行的影响程度,将各状态量权重分为 4 个等级,权重 1、2 对应一般状态量,权重 3、4 对应重要状态量。得到各状态量缺陷扣分值^[23],即:

$$S_i = X_i \cdot W_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: S_i 为状态量缺陷扣分值; X_i 为状态量劣化程度的基本扣分值; W_i 为状态量的权重系数。缺陷状态量扣分规则表如表 1 所示。

在上述基础之上,以海缆在线监测状态量为例,考虑在线监测的运行特征,通过阈值判断,将其划分为不同的劣化等级,考虑在线监测状态量是表征海缆运行健康状态的重要信息,将其定义为重要状态量,其权重系数取为

3,最终形成了关于海缆在线监测动态量的评价标准,如表 2 所示。

表 1 缺陷状态量扣分规则表

Table 1 Defect state quantity deduction rules table

劣化程度	不同权重系数的基本扣分			
	1	2	3	4
I	2	4	6	8
II	4	8	12	16
III	8	16	24	32
IV	10	20	30	40

表 2 海底电缆在线监测量评价标准

Table 2 Evaluation standard for on-line monitoring of submarine cables

状态量	劣化程度	判断依据	权重系数	基本扣分值
海缆温度	II	温度注意状态	3	4
	III	温度异常状态		8
	IV	温度严重状态		10
海缆应力	II	应力注意状态	3	4
	III	应力异常状态		8
	IV	应力严重状态		10
海缆扰动	I	扰动一级报警	3	2
	II	扰动二级报警		4
	III	扰动三级报警		8
	IV	扰动四级报警		10
海缆埋深	II	埋深注意状态	3	4
	III	埋深异常状态		8
	IV	埋深严重状态		10
海缆 AIS	II	AIS 一级报警	3	4
	III	AIS 二级报警		8
	IV	AIS 三级报警		10

确定海缆评估指标中新增的运行巡检以及试验等静态量的劣化程度和其重要性,采用专家评分法,通过向专家和现场作业人员发放制定好的调查表,以确定各静态量的劣化程度和权重。如附录 A 中表 A1 所示含义是该专家对该静态量在不同劣化程度的把握程度。如附录 A

中表 A2 所示的含义是该专家认为该静态量为不同权值的把握程度。

分别计算各静态量的劣化程度和权重系数结果,基于专家调查表对各静态量的劣化程度和权重计算公式定义如下:

$$\begin{cases} l'_{ij} = \sum_{k=1}^D l_{ij,k} / D \\ l_{ij} = l'_{ij} / \sum_{d=1}^4 l'_{ij,d} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $l_{ij,k}$ 为专家 $k(k=1,2,\dots,D)$ 认为该静态量的劣化程度和权值为 $r(r=1,2,3,4)$ 的把握程度标度; l'_{ij} 为所有专家认为该静态量的劣化程度和权值为 $r(r=1,2,3,4)$ 的把握程度的平均标度; l_{ij} 为 l'_{ij} 的归一化值; 最后得到专家调查表结果 $L=[l_{ij}(1), l_{ij}(2), l_{ij}(3), l_{ij}(4)]$, 采用最大隶属度原则, 隶属度最大的结果即为该静态量的劣化程度和权重系数。

以此修改和完善了海缆静态数据的评价标准。最终形成了一套适用于海底电缆的评估准则, 由于受篇幅限制, 仅列出海缆在线监测量评价标准。

3 基于多状态量融合的海缆状态评估模型

3.1 分层状态评估模型

沿用国家标准准则并结合海缆的自身特征, 本文将

海缆的健康状态划分为正常、注意、异常和严重 4 种标识等级。根据评估指标体系, 结合评估准则, 对海缆部件和整体分层进行健康状态评估。首先, 逐项评估指标层中影响海缆各部件的状态量, 得到各状态量扣分值, 并将各状态量的扣分值叠加得到海缆各部件合计扣分值, 通过分析海缆各部件单项状态量扣分值及合计扣分值情况, 得到海缆部件的健康状态等级。依据 Q/GDW 456-2010《电缆线路状态评价导则》, 得到海缆部件健康状态评估规则表如表 3 所示。其次, 融合部件层中海缆各部件健康状态评估结果, 得到海缆整体健康状态等级。考虑海缆任一部件的缺陷都会对海缆整体健康状态产生严重影响, 因此为确保评估的准确性, 选取海缆 5 个部件中最严重的状态等级作为海缆整体的健康状态等级。海缆分层健康状态评估流程如图 3 所示。

表 3 海缆部件评估规则表

Table 3 Rules for evaluation of submarine cable components

部件	正常		注意		异常	严重
	合计	单项	合计	单项	单项	单项
	扣分	扣分	扣分	扣分	扣分	扣分
海缆本体	≤30	<12	>30	12~16	20~24	≥30
海缆终端	≤30	<12	>30	12~16	20~24	≥30
附属设施	≤30	<12	>30	12~16	20~24	≥30
过电压保护器	≤30	<12	>30	12~16	20~24	≥30
海缆通道	≤30	<12	>30	12~16	20~24	≥30

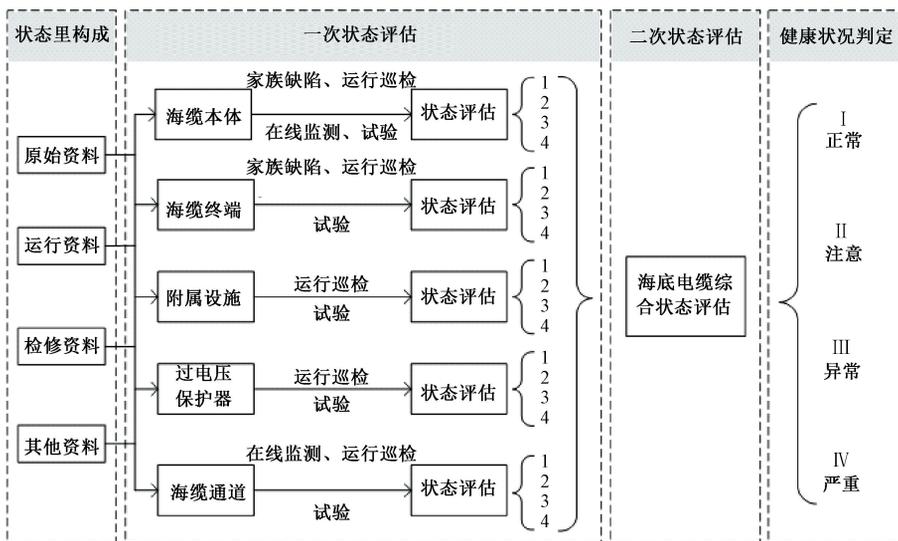


图 3 分层状态评估流程

Fig. 3 Hierarchical status assessment process

3.2 健康状态结果的量化

根据上述评估流程确定的海缆健康状态评估结果相对粗糙且直观性不强。为使其评估结果更加直观具体,

需对海缆部件和整体进行量化处理得到更为精确的状态等级隶属结果^[24]。采用百分制方法能够得到较为直观的结果^[25], 结合实际工程经验和现场工作人员意见, 将各状态等级对应评分值定义为:

$$\begin{cases} 90 \leq P, E < 100 & (\text{正常}) \\ 70 \leq P, E < 90 & (\text{注意}) \\ 50 \leq P, E < 70 & (\text{异常}) \\ 0 \leq P, E < 50 & (\text{严重}) \end{cases} \quad (3)$$

基于模糊数学理论^[26]对海缆健康状态量化公式定义如下:

$$f(U_i) = P_i \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (4)$$

$$f(U) = E \quad (5)$$

$$U \supset U_i \quad (6)$$

式中: i 为海缆的部件; U_i 、 U 分别表示海缆部件*i*对应的状态量集合及海缆整体状态量集合; P_i 为海缆部件*i*健康状态评分值; E 为海缆整体健康状态评分值。

本文为满足工程实际需求,依据表3评估规则表结合模糊数学理论,对海缆各状态量扣分情况和所处不同状态等级进行权重分配,提出海缆部件和整体在不同健康状态等级的隶属度计算公式,如式(7)和(8)所示,以此可计算得到海缆各部件和整体评估分数。

$$P_{ij} = M_j \cdot W_{ij} \cdot \left(1 - \frac{S_i}{S_{i\max}}\right) + M_j \cdot (1 - W_{ij}) \quad (7)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5; j = 1, 2, 3, 4$

$$E_j = N_j \cdot W_j \cdot \left(1 - \frac{\sum S_i}{\sum S_{i\max}}\right) + N_j \cdot (1 - W_j) \quad (8)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5; j = 1, 2, 3, 4$

式中: j 表示海缆部件和整体的健康状态等级,分别表示正常、注意、异常、严重; P_{ij} 表示海缆部件*i*在*j*状态等级下的评估分值, E_j 表示海缆整体在*j*状态等级下的评估分值; M_j 、 N_j 分别表示海缆部件及整体在状态等级*j*下对

应的最大评分值。为使得到的评分值在各状态等级更加平滑,对其进行权重分配,该权重系数通过海缆部件*i*中各缺陷状态量在状态等级*j*下最大扣分值经过反演计算求出, W_{ij} 表示部件*i*在*j*状态等级下的权重系数, W_j 表示海缆整体在*j*状态等级下的权重系数,如附录A中表A3所示; S_i 表示当前部件*i*中各缺陷状态量总扣分值, $S_{i\max}$ 表示部件*i*中所有状态量在劣化程度最严重的情况下的总扣分值。

根据式(7)和(8)可计算得到海缆在不同缺陷状态量输入下海缆部件及整体在各健康状态等级中出现的最高及最低评估分值,如附录A中表A4所示。各健康状态等级的评估分值及语义描述如附录A中表A5所示。

4 实例分析

以中海油某油田实际海上平台的三芯海缆作为研究对象,采用本文所提方法对其进行健康状态评估分析,并采用 Visual C++及 QT 平台开发海缆健康状态评估系统,通过对各状态量进行编码并枚举到算法程序中,将输入的缺陷状态量通过编码识别,并基于本文所提方法进行逐项评估,得到海缆健康状态结果,系统响应时间<2 s,有效减少评估工作量,最后与实际运行状态进行对比验证。该海缆全长 6.15 km,额定电压为 12 kV。算例选取海缆两次状态进行健康状态评估分析,两次状态下海缆的缺陷状态量信息如图 4 和 5 所示,两次状态下海缆的电参量信息如表 4 所示。

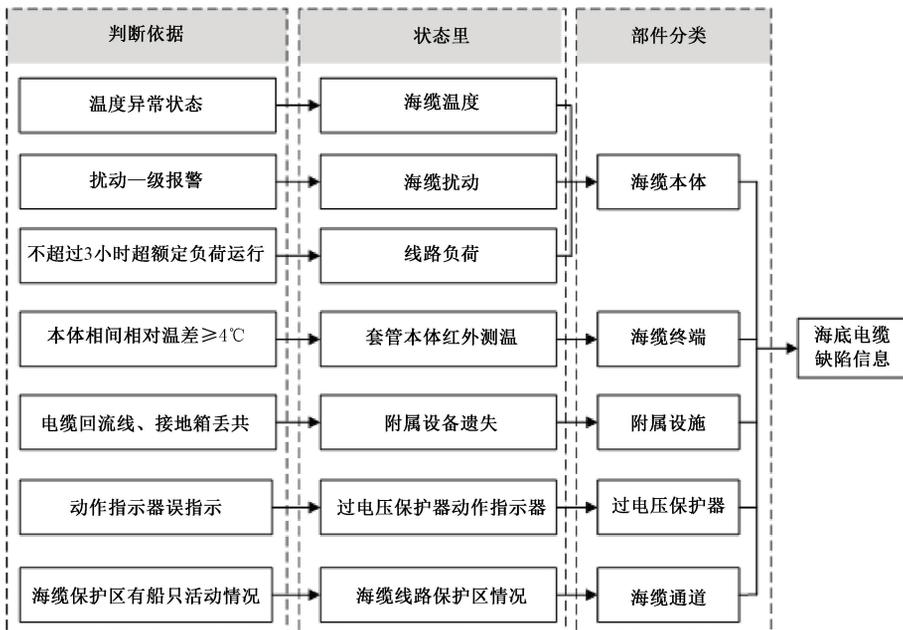


图4 第1次评估周期的缺陷状态量信息

Fig. 4 Defect status quantity information for the first evaluation cycle

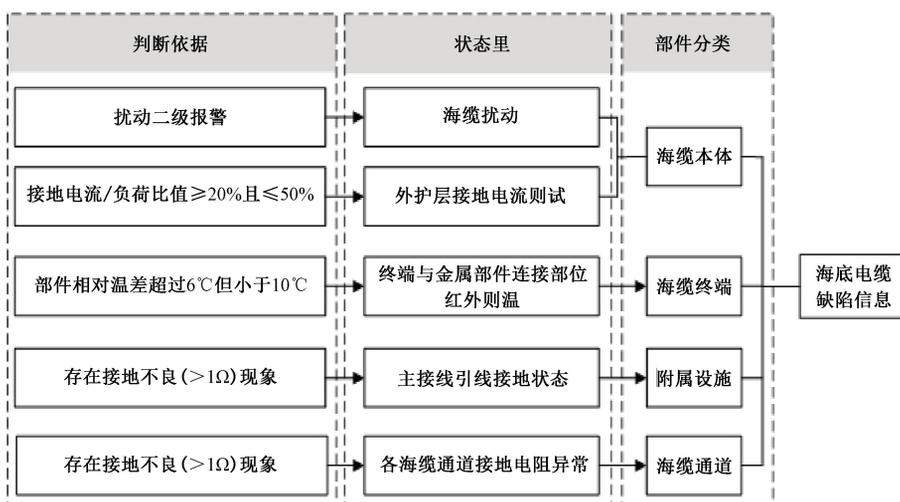


图 5 第 2 次评估周期的缺陷状态量信息

Fig. 5 Defect status quantity information for the second evaluation cycle

表 4 两次评估周期海缆的电参量信息表

Table 4 Information sheet of electrical parameters for two evaluation cycles of submarine cables

电参量	第 1 次评估周期	第 2 次评估周期
三相电压	12.3 kV	11.8 kV
三相电流	230 A	150 A
有功功率	7 638.3 kVA	4 779 kVA
无功功率	3 734.3 kVar	2 336.4 kVar
功率因数	0.9	0.9

表 5 海缆各部件及整体的健康状态表

Table 5 Health status of all components and the whole of the submarine cable

评估部件	扣分值	部件状态	整体状态
海缆本体	单项 ≤ 24 分; 合计 = 46 分	异常状态	
海缆终端	单项 ≤ 16 分; 合计 = 16 分	注意状态	
附属设施	单项 ≤ 6 分; 合计 = 6 分	正常状态	异常状态
过电压保护器	单项 ≤ 4 分; 合计 = 4 分	正常状态	
海缆通道	单项 ≤ 12 分; 合计 = 12 分	注意状态	

4.1 第 1 次状态下的健康状态评估

基于各缺陷状态量的劣化程度和权重,通过式(1)可得到每个缺陷状态量扣分值如下。

1) 海缆本体:温度监测高于标准温度限值 5 ℃,且已接近标准限值 90 ℃,海缆温度处于异常状态,该项扣 24 分;扰动能量监测未达到注意值,但已有往其变化的趋势,该项扣 6 分;海底电缆因运行方式改变,短时间(不超过 3 h)超额定负荷运行,该项扣 16 分。海缆本体单项缺陷状态量扣分最大值为 24 分,合计扣分 46 分。

2) 海缆终端:海缆套管本体红外测温,其相间相对温差大于 4 ℃,该项扣 16 分。

3) 附属设施:海缆附属设备遗失,其海缆接地箱丢失,该项扣 6 分。

4) 过电压保护器:过电压保护器动作指示器发生误指示,该项扣 4 分。

5) 海缆通道:海缆线路保护区内有船只停泊的情况,但扰动报警等级为一级,并未影响海缆正常运行,该项扣 12 分。

根据海缆分层健康状态评估模型,可得到海缆各部件及整体的健康状态等级如表 5 所示。

得到海缆各部件和整体的健康状态等级结果后,基于式(7)和(8),可计算得到海缆各部件及整体的健康状态量化结果。海缆各部件健康状态评估分值为 $P_i = [65.0, 87.8, 98.0, 98.2, 87.2]$,海缆整体健康状态评估分值为 $E = 67.5$ 。

4.2 第 2 次状态的健康状态评估

同理,可以得到第 2 次状态下海缆的健康状态评估结果。第 2 次状态下海缆各部件及整体的健康状态等级如表 6 所示,海缆各部件健康评估分值为 $P_i = [86.4, 98.0, 87.7, 100, 96.7]$,海缆整体健康状态评估分值为 $E = 87.9$ 。

海缆两次健康状态评估如图 6 所示。海缆整体的健康状态等级从“异常状态”变为“注意状态”,其健康评估分值也从 67.5 分提升为 87.9 分。海缆整体健康状态等级变化的主要是因为海缆本体部件的健康状态等级发生了变化。对海缆的运行情况进行分析可知,第 1 次评估

表6 海缆各部件及整体的健康状态表

Table 6 Health status of all components and the whole of the submarine cable

评估部件	扣分值	部件状态	整体状态
海缆本体	单项 ≤ 12 分; 合计 = 20 分	注意状态	注意状态
海缆终端	单项 ≤ 6 分; 合计 = 6 分	正常状态	
附属设施	单项 ≤ 16 分; 合计 = 16 分	注意状态	
过电压保护器	合计 = 0 分	正常状态	
海缆通道	单项 ≤ 8 分; 合计 = 8 分	正常状态	

周期处于海洋平台采油的关键时期,所以海缆负荷重,海缆工作电流达到 230 A,根据当时海缆所处运行环境,由 IEC-60287 标准计算得知在该工作电流下海缆标准正常温度为 78.1 °C,但监测到的海缆温度已达到 86.2 °C,高于当前标准正常温度 5 °C,但低于 10 °C,且已接近标准限值 90 °C,因此海缆本体部件处于异常状态,最终导致海缆整体状态等级呈现异常状态,健康程度下降。由于温度异常状态持续时间较短,且未超过海缆最高允许温度,工作人员对海缆温度状态进行密切监视,海缆能够保持正常运行,消除了海缆温度异常缺陷信息。之后现场运维工作人员在对海缆进行年度检修时,通过对其绝缘电阻测试发现海缆绝缘程度相比与之前发生轻微下降,且海上工作人员发现海缆温度异常位置在日常运行中温度略高于同区段相邻位置温度,评估结果与实际运行情况相符合。其余状态评估结果也反映了运行巡检和预防性试验对海缆健康状态的影响。在第 2 次评估周期时,海缆工作电流为 150 A,且根据当时海缆所处运行环境,同理,在该工作电流情况下的标准正常温度为 49.5 °C,监测到海缆温度为 49.8 °C。温度不再是影响海缆健康状态的主要原因。对海缆的运行环境进行分析,发现在洋流的影响下,埋设段海缆扰动能量增大为 196 a. u.,海缆监测设备诊断为扰动二级报警,因此运行环境是影响海缆状态变化最主要的原因。同时,在对附属设施进行巡检时,发现主接线引线存在接地不良现象,导致海缆本体和附属设施两个部件都处于注意状态,最终使海缆整体状态等级呈现为注意状态。针对以上健康状态评估结果,海上平台运维人员立即对海缆进行检查发现与本文评估结果相吻合,及时对隐患进行排查,避免海缆发生故障,确保平台的安全可靠运行。

为进一步验证本文所提的动静结合的海缆健康状态评估指标体系及方法的有效性,以电缆评估准则为基准,不考虑海缆在线监测动态状态量,采用本文评估方法,对海缆的上述两次状态进行健康状态评估,评估结果如表

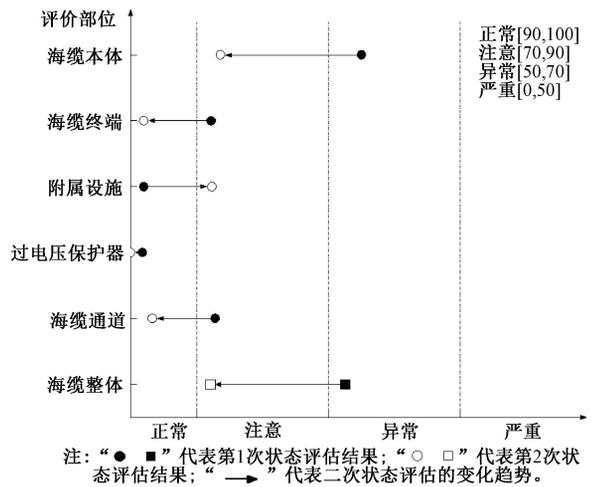


图6 两次状态评估分值变化趋势
Fig. 6 Change trend chart of two status evaluation scores

7 所示。

表7 缺少动态数据的评估状态等级

Table 7 Lack of evaluation status level for dynamic data

评估次数	评估部件	部件状态	整体状态
第 1 次状态评估	海缆本体	注意状态	注意状态
	海缆终端	注意状态	
	附属设施	正常状态	
	过电压保护器	正常状态	
	海缆通道	注意状态	
第 2 次状态评估	海缆本体	正常状态	注意状态
	海缆终端	正常状态	
	附属设施	注意状态	
	过电压保护器	正常状态	
	海缆通道	正常状态	

两种评估指标体系下的健康状态评估结果比较如图 7 所示。由图 7 可知,本文建立的海缆健康状态评估指标体系与缺少动态数据的评估结果略有差异,且加入动态数据的评估指标体系的评估结果与海缆实际运行情况更相符。对比分析两种评估指标体系下健康状态评估结果,由于缺少动态数据的评估指标体系,无法对在线监测状态量进行评估,导致海缆本体和整体的评估分值明显高于动静结合评估指标体系下的评估分值,且无法及时对海缆突发及潜在故障进行预警,说明包含动态数据的评估指标体系更加完善,同时体现了在动静结合的指标体系下的评估结果比缺少动态数据指标体系下的评估结果更加全面、具体。更进一步,若只对海缆静态数据进行评估,其评估周期长、数据更新慢,本文方法充分考虑海缆的实际运行情况,实现对海缆健康状态进行实时评估,时刻掌握海缆健康状态。因此动静结合的指标体系在保证海底电缆评估准确性的同时,又提高了评估的全面性。

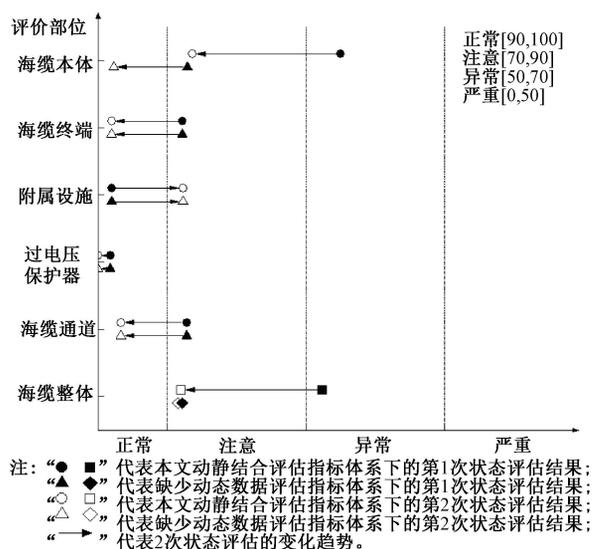


图 7 两种评估指标体系下评估分值变化趋势

Fig. 7 The trend chart of the evaluation scores under the two evaluation index systems

5 结论

本文针对海缆运行健康状态难以准确掌握的问题,提出了一种融合在线监测数据的海底电缆综合健康状态评估的方法。

1) 针对海缆健康状态评估指标体系的空缺,本文在电缆状态评价和海缆运行规程导则的基础上,首次将在线监测动态量引入传统的状态评估指标体系中,从海缆自身复杂结构和所处复杂环境的角度出发,修改并完善了不同类型的静态量。基于此,融合动态和静态信息,构造动静结合的海缆状态评估指标体系,为健康状态评估工作奠定基础。

2) 本文基于构造的海缆健康状态评估指标体系,考虑各状态量的劣化程度和重要性,从海缆实际运行原理出发,提出基于状态量量化的海缆评估准则,并建立多状态量融合的评估模型,对海缆状态进行分层评估,为得到海缆的健康状态等级提供理论依据。

3) 本文通过模糊理论对海缆状态等级量化,得到包括状态等级和评估分数的健康状态评估结果,直观有效地表达了海缆健康状态。同时,引用计算机编程技术,只需简单地输入编码信息,即可快速得到海缆健康状态评估结果,同时将理论分析结果和海底电缆实际运行状况进行对比分析,并通过算例证明了本文所提方法的有效性和可行性。

参考文献

[1] TAORMINA B, BALD J, WANT A, et al. A review of potential impacts of submarine power cables on the

marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions (Review) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 96: 380-391.

- [2] PURVINS A, SERENO L, ARDELEAN M, et al. Submarine power cable between Europe and North America: A techno-economic analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 186: 131-145.
- [3] 管霖, 陈沛东, 李峰, 等. 近海风电场接入城市电网规划原则 [J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2135-2140.
GUAN L, CHEN P D, LI F, et al. Planning principles of off-shore wind power interconnection [J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2135-2140.
- [4] XU ZH N, HU ZH W, ZHAO L J, et al. Application of temperature field modeling in monitoring of optic-electric composite submarine cable with insulation degradation [J]. Measurement, 2019, 133: 479-494.
- [5] 吕安强, 李永倩, 李静, 等. 基于 BOTDR 的光纤复合海底电缆应变/温度监测 [J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 533-539.
LV AN Q, LI Y Q, LI J, et al. Strain and temperature monitoring of 110 kV optical fiber composite submarine power cable based on brillouin optical time domain reflectometer [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 533-539.
- [6] MASOUDI A, PILGRIM J A, NEWSON T P, et al. Subsea cable condition monitoring with distributed optical fiber vibration sensor [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1352-1358.
- [7] LV A Q, LI J. On-line monitoring system of 35 kV 3-core submarine power cable based on φ -OTDR [J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2018, 273: 134-139.
- [8] 徐伟, 汪嘉钰, 郑志源, 等. 船舶拖锚对海底电缆埋深的影响 [J]. 船海工程, 2018, 47(1): 147-150, 154.
XU W, WANG J Y, ZHENG ZH Y, et al. Effect of anchor towing on depth of submarine cable [J]. Ship & Ocean Engineering, 2018, 47(1): 147-150, 154.
- [9] ZHAO L J, LI Y Q, XU Z N, et al. On-line monitoring system of 110 kV submarine cable based on BOTDR [J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2014, 216: 28-35.
- [10] 李永倩, 赵雨娟, 杨志, 等. 基于 BOTDR 的海缆 3D 立体监测系统设计与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1029-1036.
LI Y Q, ZHAO L J, YANG ZH, et al. Design and realization of the submarine cable three-dimensional monitoring system based on BOTDR [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1029-1036.
- [11] HAMDAN M A, PILGRIM J A, LEWIN P L. Analysis of thermo-mechanical stress in three core submarine power

- cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4) : 1288-1296.
- [12] 邵森安, 马颀, 丰如男, 等. 海底电缆国内外研究综述 [J]. 南方电网技术, 2020, 14(11) : 81-88.
SHAO S AN, MA X, FENG R N, et al. Review of researches on submarine cables at home and abroad [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14 (11) : 81-88.
- [13] 郝建, 戴锡泽, 高震, 等. 基于高压频域介电响应的交流 500 kV 交联聚乙烯海缆绝缘老化状态检测与分析 [J/OL]. 电网技术, 2021, <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotol-DWJS20210105008.htm>.
HAO J, DAI X Z, GAO ZH, et al. Detection and analysis of insulation aging state of AC 500 kV XLPE submarine cable based on high voltage frequency dielectric response [J/OL]. Power System Technology, 2021, <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotol-DWJS20210105008.htm>.
- [14] 赵艾萱, 刘健, 徐龙, 等. 基于 PDC 法的在运 XLPE 电缆绝缘状态评估 [J]. 高电压技术, 2019, 45 (5) : 1542-1550.
ZHAO AI X, LIU J, XU L, et al. Insulation status evaluation of in-service cables based on polarization and depolarization current [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5) : 1542-1550.
- [15] 朱永华, 高小庆, 杨娟娟, 等. 等温松弛电流法在高压交联聚乙烯绝缘交流电缆状态评估中的应用 [J]. 高电压技术, 2016, 42(2) : 513-521.
ZHU Y H, GAO X Q, YANG J J, et al. Application of isothermal relaxation current technique in condition assessment for XLPE HVAC cables [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2) : 513-521.
- [16] Q/GDW 456-2010, 电缆线路状态评价导则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
Q/GDW 456-2010, Guidelines for cable line condition evaluation [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [17] DL/T 1278-2013, 海底电力电缆运行规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
DL/T 1278-2013, Code for operation of submarine power cables [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [18] DL/T 1279-2013, 110KV 及以下海底电力电缆线路验收规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
DL/T 1279-2013, Code for acceptance of submarine power cables up to and including 110 kV [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [19] 廖瑞金, 王有元, 刘航, 等. 输变电设备状态评估方法的研究现状 [J]. 高电压技术, 2018, 44 (11) : 3454-3464.
LIAO R J, WANG Y Y, LIU H, et al. Research status of condition assessment method for power equipment [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11) : 3454-3464.
- [20] 刘大同, 宋宇晨, 武巍, 等. 锂离子电池组健康状态估计综述 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11) : 1-18.
LIU D T, SONG Y CH, WU W, et al. Review of state of health estimation for lithium-ion battery pack [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11) : 1-18.
- [21] 陈海宁, 沈洁, 马福龙, 等. 基于射频识别技术的电能质量计量评估模型 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6) : 25-31.
CHEN H N, SHEN J, MA F L, et al. Power quality measurement and evaluation model based on radio frequency identification technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(6) : 25-31.
- [22] 陈宏, 上官霞, 郑钟, 等. 基于营配数据融合的配电网运行状态评估的研究 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(4) : 111-115.
CHEN H, SHANGGUAN X, ZHENG ZH, et al. Study on the operation state evaluation of distribution network based on the data fusion of business distribution [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(4) : 111-115.
- [23] 王健一, 李金忠, 李军, 等. 高海拔直流工程主设备状态评估的修正方法 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17) : 4786-4793.
WANG J Y, LI J ZH, LI J, et al. Modification of condition assessment for HVDC equipment used in high altitude area [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (17) : 4786-4793.
- [24] 陈曦, 唐斌, 余飞. 基于变权重理论和融合实时信息配电开关柜的状态评价 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8) : 193-200.
CHEN X, TANG B, YU F. State evaluation of distribution switchboard based on variable weight theory and fusion of real time information [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32 (8) : 193-200.
- [25] 罗建军, 苏超, 龚翔, 等. 融合多源数据的架空输电线路运行状态评估方法 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(19) : 176-181.
LUO J J, SU CH, GONG X, et al. Condition assessment method of overhead transmission lines based on multi-source data [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(19) : 176-181.
- [26] 肖运启, 王昆朋, 贺贯举, 等. 基于趋势预测的大型风

电机组运行状态模糊综合评价[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2132-2139.

XIAO Y Q, WANG K P, HE G J, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for operating condition of large-scale wind turbines based on trend predication [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2132-2139.

作者简介



李茜, 2011 年于华南理工大学获得学士学位, 2016 年于四川大学获得博士学位, 现为西南石油大学讲师, 主要研究方向为新能源并网、综合能源系统和电气设备智能监测控制。

E-mail: swpuliqian@163.com

Li Qian received the B. Sc. degree from South China University of Technology in 2011, Ph. D. degree from Sichuan

University in 2016. Now she is a lecture at Southwest Petroleum University, China. Her main research interests include new energy grid-connected, integrated energy system and intelligent monitoring and control of electrical equipment.



苏天赐, 2019 年于西南石油大学获得学士学位, 现为西南石油大学硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态评估与故障诊断。

E-mail: 1042108477@qq.com

Su Tianci received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. Currently he is a M. Sc. candidate at Southwest Petroleum University. His main research interests include status assessment and fault diagnosis of electrical equipment.

附录 A

表 A1 专家劣化程度调查表

Table A1 Expert deterioration questionnaire

Table with 5 columns: 把握程度(标度), I级, II级, III级, IV级. Rows include: 很有把握(1), 有把握(0.84), 较有把握(0.68), 一般(0.5), 较没把握(0.32), 很没把握(0.16).

表 A2 专家权重系数调查表

Table A2 Expert weighting coefficient questionnaire

Table with 5 columns: 把握程度(标度), 权重1, 权重2, 权重3, 权重4. Rows include: 很有把握(1), 有把握(0.84), 较有把握(0.68), 一般(0.5), 较没把握(0.32), 很没把握(0.16).

表 A3 各部件权重系数配比

Table A3 The weight coefficient ratio of each component

Table with 5 columns: 状态等级, 正常, 注意, 异常, 严重. Rows include: 权重系数, 海缆本体, 海缆终端, 附属设施, 过电压保护器, 海缆通道, 权重系数, 海缆整体.

表 A4 状态评估结果

Table A4 Status assessment results

Table with 9 columns: 状态, 正常, 注意, 异常, 严重. Rows include: 海缆本体, 海缆终端, 附属设施, 过电压保护器, 海缆通道, 综合分值.

表 A5 状态等级与评估分值关系及语义描述

Table A5 The relation and semantic description of status rating and correlation evaluation score

Table with 3 columns: 状态等级, 评估分值, 语义描述. Rows include: 正常状态, 注意状态, 异常状态, 严重状态.