

任意海区海底泥温设计参数的推算方法研究

安永宁^{1,2}

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 天津市水运工程测绘技术企业重点实验室, 天津 300456)

摘要:为解决离岸海洋工程设计所需的海底泥温参数获取困难及精度不高等问题,运用一维热传导方程和耿贝尔极值 I 型分布方法,分析了中国科学院大气物理研究所(The Institute of Atmospheric Physics, IAP)发布的 IAP 全球水温场资料,探讨了任意指定海区海底面以下不同深度不同重现期的泥温极值推算方法。将逐月推算结果与渤海某站历史实测资料进行相应对比,在秋冬季差值为 0.16~1.04 °C,春夏季差值为 0.96~2.47 °C;将 1~100 a 不同重现期的泥温极值推算结果与辽东湾某油田区块的实测值回归统计分析结果进行对比,当正态分布函数 <0.2 时,其分组差值数为-0.45~1.55 °C。应用此方法推算海底泥温设计参数,不受资料实测限制,可应用于全球绝大部分海区。

关键词:海底泥温;热传导方程;回归统计分析;IAP 水温场;耿贝尔分布

中图分类号:P738.6

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2018)04-0009-08

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2018.04.002

海底温度场是海底管缆等海洋工程设计建造与运行管理所需的重要环境参数,对海底结构物的保温、载流、疲劳、腐蚀、生物附着等都有一定的影响。由于海洋环境的特殊性,穿透数十至数百米深的海水探测海底温度场的年际周期变化,在目前看来,不仅代价高昂,而且实施难度很大^[1]。对于离岸海洋工程,通常会因缺少场区多年的水温、泥温实测资料,导致无法统计不同深度、不同重现期的海底泥温极值设计要素,一直以来,在设计与生产中,大多以周边海域表层水温极高值对应的泥温回归相关值作为泥温极大值、以冰底水温(-2 °C)作为泥温极小值^[2]。这种简单的取值方法在工程安全性方面和参数准确性方面都不甚可靠,容易使海洋工程在保温设计、温升效应计算等环节出现误差,从而产生保温造价增加、电缆过载等负面影响,不利于海底设施的降本增效和安全运营。因此,探索新的海底泥温设计参数取值方法势在必行。

1 海底泥温研究现状

早在 20 世纪 90 年代,海洋石油开发部门就认识到了泥温设计参数的重要性,与海洋科研机构联合开展过几次短期或长期的海洋水温、海底泥温联合观测,取得了一些规律性认识。刘文通和宋珊^[3]分析渤海 2 个测点年际水温泥温观测资料,对泥温的铅直分布特征、季节变化及与水温间的关系进行了初步探讨;刘文通等^[4]将泥温随深度的变化视为垂向波,分析了泥温相位随深度变化特征,近似确定了海底恒温层的相位和取值;尹逊福等^[5]以海底泥水界面的温度作为边界条件,通过求解热传导方程,并利用临近海洋站的历史水温资料推算出了近岸场区的多年一遇泥温极值设计要素;杨鲲^[6]根据辽东湾某工程中水温和泥温状况的实测数据,利用回归分析方法推算出了不同重现期的泥温极值设计参数;此后,有关泥温设计参数推算方面的报道较少,而考虑泥温、水温、结构物温度多因子耦合影响的数值仿真研究成果逐渐增多,如高艳波等^[7]应用 CFD 软件模拟了海底管道运行过程中管道周围海泥温度的分布,分析了输油温度、海水温度、保温层传热系

收稿日期:2018-08-25

资助项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——基于多源数据的南海岛礁工程环境与选址研究(TKS160220)

作者简介:安永宁(1981-),男,高级工程师,硕士,主要从事海洋地质与工程环境调查评估方面研究。E-mail:tksayn@qq.com

(陈靖 编辑)

数等对管道周围温度的影响,其数值算法的核心是热传导方程。

在海底泥温探测仪器开发方面,中国科学院海洋研究所^[8]、国家海洋局第一海洋研究所^[9]、中国海洋大学^[10]等科研机构都有专利等成果,但在工程应用领域,并未见大范围推广。

在行业规范中,《海底电缆管道路由勘察规范》^[11]对海底泥温设计参数较为重视,在1998年发布的版本中规定,“重要的管道项目增加泥温测试。在国内尚无地温探针的情况下,可在沉积物取到船上时立即测定泥温。或同时测定底层水温和泥温,建立两者的关系,然后收集底层水温资料再推算泥温”,在2009年版修改为“泥温可通过已有底层水温与泥温关系进行推算,或在土样取到船上后及时测定”。2个版次对泥温设计参数确定方法的建议都较简单,未详细描述建立水温与泥温的回归关系的具体方法,这反映出在海洋工程领域,进行泥温年周期探测的条件目前尚不成熟,也没有可靠的水温-泥温回归关系经验公式可供借鉴与参考,导致许多工程中采用的海底泥温设计参数都偏离实际。

综上所述,海底泥温设计参数的推算方法主要分2种:一种基于热传导方程;另一种基于回归分析。从理论上讲,2种方法均可得出可用的泥温设计参数,但需要特定的基础数据和应用条件。本文重点介绍2种推算方法的理论原理和应用案例,并通过引入水温场时空分布资料库,以求在无实测数据的条件下,快速推算任意指定海区的海底泥温设计参数。

2 热传导方程海底泥温推算

2.1 一维热传导方程

一维热传导方程的微分形式:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (1)$$

式中: θ 为泥温; a 为导温系数; t 为时间; z 为海底深度。

导温系数 a 可依据经验值给出,也可根据实测数据计算得出:

$$a = \frac{(z_1 - z_2)\pi}{(\ln \theta_1 - \ln \theta_2)T}, \quad (2)$$

式中: θ_1 、 θ_2 分别为 z_1 、 z_2 深度处的实测泥温; T 为泥温的变化周期。

海底表层和海水底层为同一个泥水界面,可认为表层泥温与底层水温的数值一致。由底层水温的周期性变化可判断出,表层泥温也做周期性变化,当周期大至一年时,其初始条件将无意义。此时,将海底表面视为平面,海底深度视为无限,将泥温年变化当作一个谐波 $A \cos \omega t$,则泥温随深度 z 和时间 t 变化的求解问题,简化成了半无限空间中无初始条件的求解问题。

根据边界条件,可推导出一维热传导方程的通解:

$$\theta(z, t) = \theta_0 + A e^{-z \sqrt{\omega/2a}} \cos(\omega t - z \sqrt{\omega/2a}), \quad (3)$$

式中: θ_0 为表层泥温周期平均值; A 为表层泥温周期变幅; ω 为角频率, $\omega = 2\pi/T$ 。

随着海底深度的增加,泥温变幅减小,出现的相位也会发生滞后。不同深度处泥温的相位滞后数值的计算可用经验公式:

$$\varphi = \sqrt{\omega/2a} z, \quad (4)$$

式中: φ 为泥温相位滞后值,单位为rad。

应用热传导方程求解海底泥温值,首先应确定泥温的变化周期。由于工程关键的设计要素是泥温极值,一般极大值出现在夏秋季节,极小值出现在冬春季节,因此,选择以年为周期,即可使泥温极值出现在求解区间内。此时,周期为365 d,角频率 ω 为 0.0172 d^{-1} 。

以年为周期,代入当地海泥的导温系数 a 以后,未知参数只剩下表层泥温的年均值 T_0 和年变幅 A ,这2

个因子等同于底层水温的年均值和年变幅,需要从当地至少 1 a 周期的底层水温观测数据中统计得出,如果工程需要不同重现期的海底泥温极值设计要素,就需要多年周期的观测数据支撑,这只有在场区附近设有海洋台站或固定观测站位时方可行。就我国现有的海洋台站布局而言,站点分布只能满足近海部分海域的研究需求,一方面水温资料的空间代表性不足,另一方面通常只观测表层海水的温度,缺乏垂向的水温剖面资料^[12]。因此,面向离岸深水工程或“一带一路”建设的需求,建立覆盖海域广泛的水温场时空分布资料库,在海洋工程设计领域,是不可或缺的工作。

2.2 基于“IAP 水温场”应用热传导方程推算泥温

近年来,随着 Argo 浮标观测网、卫星热辐射遥感等方面成果数据的完善^[13],许多国际数据中心依次发布了各自的格点化海洋温度场数据,如英国气象局的 EN 数据、日本气象厅的 Ishii 数据、美国 NOAA 的 WOD、以及基于 Argo 的各种格点数据(IPRC,SCRIPPS)等。

2016 年,中国科学院大气物理研究所的科研人员提出了一种新的空间插值方案 IAP 水温场,通过利用 CMIP 5 多模式历史模拟、应用 XBT 数据偏差订正方案等技术方法,再现了 1940—2015 年的气候平均态、年代际变化、年际变率以及长期趋势^[14]。本文将作为水温场时空分布资料库,结合热传导方程,用于工程场区海底泥温设计参数推算研究。

目前,我国以年为周期的实测海洋水温、泥温数据非常少,选取了文献[3]中的实测数据为测试样本,推算同期水温和泥温值,并将推算值与实测值进行对比,来检验本文方法的可靠性与准确性。实测数据包括春夏秋冬四个季节的观测内容,观测时间分别为 1992-04—05, 1991-08, 1991-10—11, 1992-01, 观测点坐标为(119°42'E, 39°42'N)。由于“IAP 水温场”的网格空间尺度为 1°,因此,本文在推算观测点位置的水温时,综合利用了与观测点临近的多个格点的值,分别按照经度和纬度进行反距离加权法(各格点水温值的差异性在同纬度条件下比在同经度条件下小)求出观测点位置的推测水温值,导温系数根据各个季节的实测值计算得出,推算值与实测值的对比结果见图 1 和表 1。

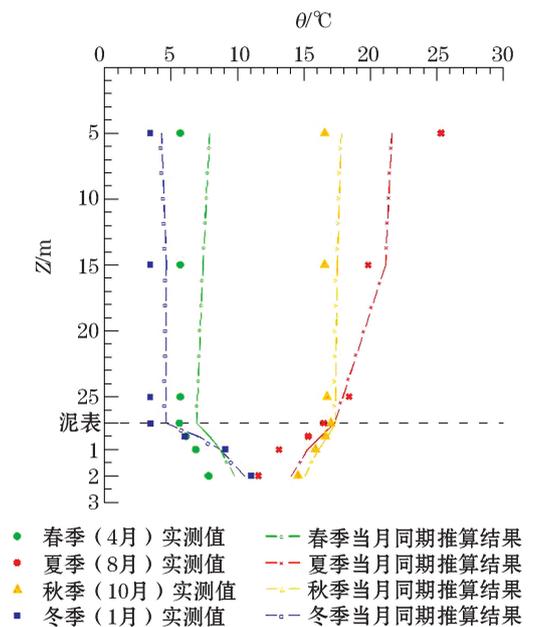


图 1 水温泥温推算值与实测值对比

Fig.1 Comparison between the calculated and the measured values of water and mud temperature

表 1 水温泥温推算值与实测值的差值(°C)

Table 1 Differences between the calculated and the measured values of water and mud temperature (°C)

层位	春季	夏季	秋季	冬季
水体表层	2.22	3.69	1.24	0.87
水体中层	1.72	1.30	0.95	1.23
水体底层	1.30	0.45	0.64	1.19
泥表层	1.28	0.81	0.36	1.17
泥面以下 0.5 m	1.78	0.96	0.16	1.04
泥面以下 1.0 m	1.83	2.15	0.22	0.36
泥面以下 2.0 m	1.98	2.47	0.50	0.46

由表 1 可知,秋冬季的海底泥温推算值与实测值吻合好,差值为 0.16~1.04 °C;春夏季吻合一般,差值

为 0.96~2.47 °C。春季差异稍大可能与调查时段跨越了 4 月和 5 月有关,因为这 2 个月份正值海水和海泥年周期升温的初期,月均变幅较大,2 个月之间的“IAP 水温场”格点数据本身差异性较大;夏季差异稍大可能与月份的代表性不强、表层水体受热辐射较大而底层水和海泥热传导滞后等因素有关。总体来说,泥温推算值与实测值相差 2 °C 左右是可以接受的,因为目前进行海底泥温长期观测的精度普遍较低,即便是主流的基于布里渊散射原理的光纤温度传感器的监测精度也仅为 1 °C^[15]。

3 回归分析法海底泥温推算

3.1 一元线性样本回归方程

回归分析法指利用数据统计原理,对大量统计数据进行数学处理,并确定因变量与某些自变量的相关关系,建立一个相关性较好的回归方程式,并加以外推,用于预测今后的因变量的变化的分析方法。可分为一元回归分析和多元回归分析,或线性回归分析和非线性回归分析^[16]。在海底泥温与底层水温的回归分析中,多采用一元线性回归分析方法,其样本回归方程:

$$\hat{y}_i = a + b x_i, \quad (5)$$

式中: \hat{y}_i 是与自变量(水温)取值 x_i 相对应的因变量(泥温)均值的估计; a 是样本回归方程的常数项,即样本回归直线在 Y 轴上的截距; b 是样本回归系数,即样本回归直线的斜率。

在应用回归分析法时,可以根据底层水温和各层泥温的相关性进行拟合,也可以根据泥温和深度的相关性进行拟合,还可以根据某月底层水温平均值和几月以前的月泥温平均值的相关性进行拟合,采用几月中的相关系数最大者。

3.2 回归分析法与热传导方程法的推算结果比较

杨颀根据 3 个站位在 8 月份获得的底层水温与不同深度泥温的实测数据,应用一元线性回归分析方法推算了泥温的极值分布^[6]。我们选取了文献[6]中的实测数据为测试样本,分别基于实测水温数据和“IAP 水温场”资料,应用热传导方程推算了当月不同深度的泥温值,然后与回归分析法推算的进行了比较(表 2)。热传导方程中海泥的导温系数 a 取值为 $0.72 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ (沼泽土壤的经验值),表层泥温周期平均值 T_0 取值为 12.2 °C,表层泥温周期变幅 A 取值为 8.6 °C。

表 2 不同方法推算的泥温值及其与实测值的差值

Table 2 Differences between the measured values of mud temperature and the values calculated with different methods (°C)

层 位	泥温/°C			
	实测	应用回归分析法 推算	应用热传导方程推算	
			基于实测水温数据	基于“IAP 水温场”
泥表层	18.73	18.91(0.18)	19.10(0.37)	20.80(2.07)
泥面以下 0.5 m	16.57	17.02(0.45)	16.33(-0.24)	17.87(1.30)
泥面以下 1.0 m	14.16	15.03(0.87)	13.98(-0.18)	15.43(1.27)
泥面以下 1.5 m	11.47	15.08(3.61)	12.11(0.64)	13.66(2.19)
泥面以下 2.0 m	9.81	13.38(3.57)	10.73(0.92)	12.53(2.72)
泥面以下 3.0 m	9.39	13.00(3.61)	9.24(-0.15)	11.66(2.27)

注:括号内数据为泥温推算值与实测值之间的差值

应用回归分析法推算的泥温在 1.5 m 以上深度准确性较高,与实测值差值介于 0.18~0.87 °C,但在

1.5 m 以下的结果发散很大,与实测值差值迅速增大至 3.6 °C 左右,这是由于该站位 1.5 m 以下泥温随深度的变幅出现了较大转折,而在回归拟合时没有相应的体现,这说明回归样本方程并不一定能够通用于所有的海底沉积物环境,在个别海区容易出现较大的误差。基于实测水温数据应用热传导方程推算的泥温值与实测泥温值最为接近,其差值介于 $-0.24 \sim 0.92$ °C,这说明应用热传导方程推算泥温,只要给定准确的边界条件参数,结果具有很高的准确性。基于“IAP 水温场”应用热传导方程推算的泥温值与实测泥温值的差值介于 $1.30 \sim 2.72$ °C,其准确性不高,但也处于可接受范围内,该方法的优点在于不需要任何实测数据的支撑,即可推算指定点不同深度的泥温值。

4 不同重现期的海底泥温设计参数推算

海洋工程所需的海底泥温设计参数主要包含不同重现期的不同深度泥温极大值与极小值,一般需要给出 1, 10, 25, 50, 100 a 等重现期的极值。IAP 包含了 1940—2017 年共 78 a 的水温数据,当基于“IAP 水温场”底层水温数据并应用热传导方程推算泥温极值时,受益于数据的长期性、完整性和连续性,可以首先推算出距今 33 a 以上的逐年泥温极值,然后应用耿贝尔极值 I 型分布^[17]来推算不同重现期的泥温极值。耿贝尔极值 I 型分布函数可表示为

$$F(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x - \beta)]\} \quad (6)$$

式中 α 和 β 的估计方法:先根据服从耿贝尔极值 I 型分布的随机变量 x 的一组观测数据 x_1, x_2, \dots, x_n , 利用矩法计算出其平均值的估计值 $\hat{\mu}$ 与标准差的估计值 $\hat{\sigma}$:

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ \hat{\sigma} = S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \end{cases} \quad (7)$$

然后,在矩法估计下利用下式分别估计参数 α 和 β :

$$\begin{cases} \hat{\alpha} = 1.282 \ 6 / \hat{\sigma} \\ \hat{\beta} = \bar{x} - 0.577 \ 2 / \hat{\alpha} \end{cases} \quad (8)$$

选取辽东湾某油田区块为验证海区,该油田区块已运营多年,建设期曾通过多点位的长周期测试,取得了各层泥温的月均值、年极值等数据,并经与水温关联的回归分析,建立了 1, 10, 25, 50, 100 a 重现期的泥温极值设计参数。根据该油田区块的地理位置,利用“IAP 水温场”在该位置的 1985—2017 年共 33 a 的底层水温数据,应用热传导方程,逐年推算了泥面以下 3 m 内的泥温极大值与极小值,然后应用耿贝尔极值 I 型分布推算了不同重现期的泥温极值(表 3)。

将本文推算的泥温设计极值与原有极值进行比较,结果显示,其差值在 $-1.30 \sim 2.16$ °C,其中,10 a 重现期与 25 a 重现期的对比结果尤佳,分别为 $-0.70 \sim 1.10$ °C, $-0.62 \sim 1.49$ °C。将比较结果绘制为正态分布曲线(图 2),在 60 个样本数中,频数 < 4 、正态分布函数 < 0.2 时对应的分组差值为 $-0.45 \sim 1.55$ °C,说明应用本文方法推算任意已知海区的海底泥温设计参数,其结果与长期原位测试然后回归统计的传统方法相比,具有较好的符合性和一致性,可以作为更快捷有效的替代方法,并可节省大量财力、人力和时间成本,具有显著的经济效益。

表 3 辽东湾某油田区块不同重现期的海底泥温设计参数推算值与原有值比较(°C)

Table 3 Comparison between the calculated values of mud temperature design parameters and the original ones in different recurrence periods in an oil field block in the Liaodong Bay (°C)

层位		各重现期极值									
		100 a		50 a		25 a		10 a		1 a	
		极大值	极小值	极大值	极小值	极大值	极小值	极大值	极小值	极大值	极小值
泥表层	本文推算值	23.69	0.04	23.28	0.47	22.86	0.92	22.29	1.51	21.98	2.70
	原有极值	23.20	0.42	23.16	0.50	23.12	0.57	22.99	0.69	22.91	0.77
泥面以下 0.5 m	本文推算值	22.41	1.37	22.01	1.78	21.63	2.19	21.10	2.75	20.77	3.91
	原有极值	21.23	2.08	21.20	2.15	21.16	2.21	21.06	2.31	20.99	2.38
泥面以下 1.0 m	本文推算值	21.31	2.52	20.94	2.90	20.56	3.30	20.06	3.82	19.71	4.96
	原有极值	19.15	3.82	19.12	3.87	19.09	3.92	19.01	4.00	18.96	4.05
泥面以下 1.5 m	本文推算值	20.35	3.51	19.99	3.88	19.64	4.26	19.16	4.76	18.79	5.89
	原有极值	19.11	3.97	19.09	4.02	19.06	4.07	18.97	4.15	18.92	4.20
泥面以下 2.0 m	本文推算值	19.51	4.38	19.13	4.73	18.83	5.09	18.37	5.57	17.98	6.70
	原有极值	17.38	5.49	17.36	5.54	17.34	5.57	17.27	5.63	17.23	5.68
泥面以下 3.0 m	本文推算值	18.17	5.77	17.85	6.10	17.52	6.44	17.09	6.90	16.66	8.02
	原有极值	16.71	6.14	16.70	6.18	16.68	6.21	16.62	6.27	16.58	6.30

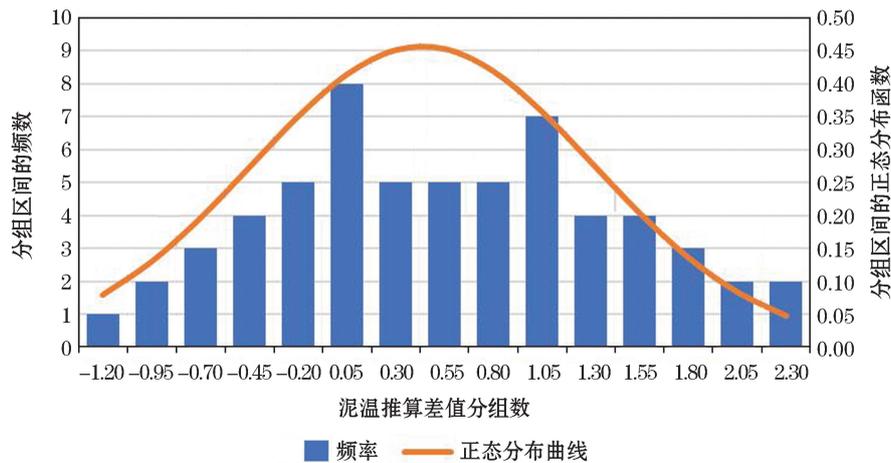


图 2 泥温推算值与原有极值不同重现期差值的正态分布曲线

Fig.2 The normal distribution curve of the differences between the calculated mud temperature values and the original extreme values in different recurrence periods

5 结 语

热传导方程和回归统计分析方法均可应用于海底泥温设计要素推算,其中回归统计分析方法需要水温泥温实测数据的支持,而一维热传导方程基于海水底层与海底表层界面的同一性,可在仅有水温数据的条件下,推算出泥温数值。在引入“IAP 水温场”数据后,热传导方程推算方法可以不受实测数据的限制,快速获得全球指定任意海区的泥温数值。“IAP 水温场”数据跨越的周年数很长,在对不同深度的泥温极值进行逐年推算后,借助耿贝尔极值分布曲线,可求得不同重现期的海底泥温设计要素。

基于“IAP 水温场”并应用热传导方程,推算得出的海底泥温设计要素与多年实测水温泥温数值然后进行回归统计的结果相比,当正态分布函数 <0.2 时其分组差值数为 $-0.45\sim 1.55\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明两者符合性较好,上述方法可用于海底泥温设计要素的推算。

由于脱离了实测数据的需求限制,上述方法在节约成本、提高效率等方面具有很大的优势,并受益于“IAP 水温场”数据平面覆盖的广泛性,可适用于全球绝大部分海域海底泥温设计要素的推算,在服务于“一带一路”、离岸深水工程方面具备很好的可推广性。

参考文献 (References):

- [1] ZHANG H L, HAN W L and JIANG L L. Present situation of thermal-insulation technology for foreign and domestic subsea pipeline[J]. *Anticorrosion & Insulation Technology*, 2012(1): 27-31. 张红磊, 韩文礼, 蒋林林. 国内外海底管道保温技术现状[J]. *防腐保温技术*, 2012(1): 27-31.
- [2] SONG S. The survey of temperatures of mud on the seafloor in Liaodong Bay[J]. *China Offshore Oil and Gas Engineering*, 1990, 2(3): 27-30. 宋珊. 辽东湾海底泥温调查[J]. *中国海上油气:工程*, 1990, 2(3): 27-30.
- [3] LIU W T, SONG S. Vertical distribution of soil temperature (at seabed) and relationship between soil and water temperatures in the central Bohai Sea[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1993, 24(6): 584-591. 刘文通, 宋珊. 渤海中部海底泥温铅直分布特征以及与水温的关系[J]. *海洋与湖沼*, 1993, 24(6): 584-591.
- [4] LIU W T, SONG S. Soil-temperature at the depth with constant temperature and phase characteristics of soil temperature profile in central Bohai Sea[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1995, 26(5): 460-465. 刘文通, 宋珊. 渤海中部海底恒温层温度及泥温相位随深度变化特征[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(5): 460-465.
- [5] YIN X F, LI F H, YU X R, et al. The variation in mud-temperature in the western Liaodong Bay and the deduction of its extreme[J]. *Coastal Engineering*, 1993(1): 11-19. 尹逊福, 李繁华, 于学仁, 等. 辽东湾北部海域泥温的变化和极值推算[J]. *海岸工程*, 1993(1): 11-19.
- [6] YANG K. Regression analysis method of water temperature and mud temperature in marine environmental survey[C]// *Proceedings of the twenty-first comprehensive symposium on marine surveying and mapping*, Beijing: Nany Press, 2009: 583-587. 杨鲲. 海洋环境调查中水温、泥温的回归分析方法[C]// *中国测绘学会海洋测绘专业委员会第二十一届海洋测绘综合性学术研讨会论文集*, 北京: 海军出版社, 2009: 583-587.
- [7] GAO Y B, MA G Y, LIU H Y, et al. Numerical simulation of sea mud temperature field around submarine hot oil pipeline[J]. *Industrial safety and Environmental Protection*, 2013, 39(5): 89-91. 高艳波, 马贵阳, 刘宏宇, 等. 海底热油管道周围海泥温度场的数值模拟[J]. *工业安全与环保*, 2013, 39(5): 89-91.
- [8] GONG D J, LI S R, LAN Z G. Seafloor temperature meter: ZL02239631.4[P]. 2003-09-10. 龚德俊, 李思忍, 兰志刚. 海底泥温测量仪: ZL02239631.4[P]. 2003-09-10.
- [9] DING Z J, LIU B H, WU J L, et al. Measuring device for marine sediment thermal conductivity in-situ measuring system: ZL200610043887[P]. 2006-09-27. 丁忠军, 刘保华, 吴金龙, 等. 用于海洋沉积物热导率原位测量系统的测量装置: ZL200610043887 [P]. 2006-09-27.
- [10] WANG Z B. Research and implementation of rapid measurement technology for submarine mud temperature[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. 王增彬. 海底泥温快速测量技术的研究与实现[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [11] National Ocean Standardization Technica Committee. Specification for submarine cable and pipeline routing investigation: GB/T 17502—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. 全国海洋标准化技术委员会. 海底电缆管道路由勘察规范: GB/T 17502—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [12] HOU C W. Representativeness analysis of water temperature data of marine stations in China[D]. Qingdao Ocean University of China, 2008. 侯查伟. 我国海洋台站水温资料代表性分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [13] LI W E, SU H, WANG X Q, et al. Estimation of global subsurface temperature anomaly based on multisource satellite observations[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(6): 881-891. 黎文娥, 苏华, 汪小钦, 等. 多源卫星观测的全球海洋次表层温度异常信息提取[J]. *遥感学报*, 2017, 21(6): 881-891.
- [14] CHENG L, ZHU J. Benefits of CMIP5 Multimodel ensemble in reconstructing historical ocean subsurface temperature variations[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(15): 5393-5416.
- [15] LÜ A Q. Research on condition monitoring of optical fiber composite submarine power cable based on distributed strain and temperature

- sensing technology using optical fiber[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015. 吕安强. 基于分布式光纤应变和温度传感的光纤复合海底电缆状态监测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [16] SHENG Z. Probability theory and mathematical statistics[M]. 3rd. Beijing: Higher Education Press, 2001. 盛骤. 概率论与数理统计[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [17] HOU R K. Calculating the highest annual water level by using Gubel extreme value distribution[J]. Marine Science Bulletin, 1993(3): 126-129. 候瑞科. 利用耿贝尔极值分布计算年最高水位[J]. 海洋通报, 1993(3): 126-129.

Study on the Method for Calculating Submarine Mud Temperature Design Parameters in Arbitrary Sea Areas

AN Yong-ning^{1,2}

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China

2. Tianjin Enterprise Key Laboratory for Water Transport Engineering Survey, Tianjin 300456, China)

Abstract: To solve the difficulties in obtaining and low precision of submarine mud temperature parameters needed for offshore engineering design, a method for calculating the submarine mud temperature extremum at different depths and in different recurrence periods in a given arbitrary sea area is studied by using one-dimensional heat conduction equation and Gumbel extreme I-type distribution method and based on the latest IAP global water temperature data released by the Institute of Atmospheric Physics of the Chinese Academy of Sciences. The differences obtained by comparing the results calculated monthly by using this method with the data measured historically at a station in the Bohai Sea in the same seasons are $0.16 \sim 1.04$ °C in autumn and winter and $0.96 \sim 2.47$ °C in spring and summer. By comparing the mud temperature extreme values calculated for different recurrence periods from 1 to 100a with the results from the regression statistical analysis of the data measured in an oil field block in the Liaodong Bay, it is found that the grouping differences range from -0.45 °C to 1.55 °C when the normal distribution function is less than 0.2. By using this method, the submarine mud temperature design parameters can be calculated quickly and conveniently. This method can be applied in most sea areas of the world.

Key words: submarine mud temperature; heat conduction equation; regression statistics analysis; IAP water temperature field; Gubel distribution

Received: August 25, 2018