



用概率法结合ANSYS分析 深水航道整治铺排锚缆在恶劣工况下的受力

刘德进¹, 冯海暴^{1,2}

(1.中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071; 2.中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 长江南京以下12.5 m深水航道一期工程中, 铺排船最恶劣作业工况为水深35 m, 流速2 m/s, 流向角20°, 这在国内尚属首次。如采用常规铺排作业方法, 经常会出现锚缆受力不均的情况, 当锚缆受力超过设定值时, 铺排船将失去系泊控制, 是影响安全的主要因素, 如果不能有效加以控制可能会引起工程事故。结合国内外相关资料及长江南京以下12.5 m深水航道一期工程现场的作业工况, 利用概率法及ANSYS有限元软件进行计算分析, 对铺排船在大流速、大深度的不定向流恶劣工况下进行了铺排锚缆受力体系的分析, 提出了优化锚系及随动的锚系控制方法。通过工程应用进行验证, 得出优化锚系结合随动的方法是合理的, 可有效控制恶劣工况下的铺排船失去系泊控制的难题, 为以后解决类似现象提供借鉴经验。

关键词: 概率法; 铺排; 系泊失控; 随动

中图分类号: U 615.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0008-05

Analysis of anchor cable stress for placing mattress under harsh conditions in deepwater channel regulation based on probability method and ANSYS

LIU De-jin¹, FENG Hai-bao^{1,2}

(1. The Second Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao 266071, China;

2. Ocean University of China, Qingdao 266071, China)

Abstract: In the first phase project of 12.5 m deepwater channel of the Yangtze River downstream Nanjing, under the worst working condition for the mattress placing ship, the water depth is 35 m, flow velocity is 2 m/s, and angle of current is 20 degrees. If we use the conventional placing operation method, the anchor cable stress often appears uneven situation. When the anchor cable stress exceeds the set value, the placing ship will lose mooring control. It is the main factor affecting safety. If it's not effectively controlled, it may cause works accident. Therefore, in combination with the relevant information at home and abroad and the first phase project field operation of 12.5 m deepwater channel of the Yangtze River downstream Nanjing, this paper carries out the calculation analysis using the probability method and ANSYS finite element software, analyzes the anchor cable stress system on the placing ship in big flow velocity, deep depth and shifting current conditions, and puts forward the optimization of anchor system and servo anchor system control method. Through verification by engineering application, optimization of anchor system in combination with follow-up method is reasonable, can effectively control the difficult problem of losing mooring control in harsh conditions, and provides the referential experience for solving similar phenomenon.

Key words: probability method; mattress placing; losing mooring control; follow-up

目前国内排体铺设水深基本都在20 m以内, 长江南京以下12.5 m深水航道一期工程高潮期最大

水深为35 m (目前国内航道整治中最大水深), 且流速最大为2 m/s, 深水铺排受水深、流速等因

收稿日期: 2013-04-17

作者简介: 刘德进 (1964—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事港口航道施工技术。

素影响, 铺排施工过程中的风险因素随之增加。因此, 该工况条件对铺排施工船舶性能、布锚方式、系泊控制等方面要求极高。为保证该工况下铺排作业的顺利进行, 作者对船舶的布锚体系优化、系泊稳定性等方面进行了全面分析计算和验证, 保证了在深水恶劣工况下铺排施工的安全、准确。

1 工程概况

长江南京以下12.5 m深水航道一期工程整治建筑物工程, 位于长江太仓至南通间的通州沙和白茆沙水道。通州沙Ⅱ标段位于通州沙—狼山沙过渡段以及狼山沙区域。通州沙Ⅱ标段施工区域距离上游江苏省南京市约250 km, 距离下游上海市约80 km, 距离左岸江苏省南通市江岸约5 km, 距离右岸江苏苏州常熟市约8 km, 本标段铺排作业主要工程数量约为343万 m^2 , 工程地理位置见图1。



图1 工程地理位置

2 工况条件

2.1 潮汐

潮位基准面为1985国家高程基准, 航道水深为理论深度基准面下的水深值, 前者比后者高1.42 m。

2.2 流速

本工程施工区域基本规律为落潮流速大于涨潮流速, 从上游通州沙水道至南北支, 落流与涨流之比值减小, 即落潮优势越向下游越弱。统计最大流速为2 m/s。

2.3 水深

工程区域属于中等强度潮汐河口, 平均潮差

约为2.5 m, 最大潮差4.0 m以上, 高潮期最大水深为35 m, 是目前国内航道整治中最大水深。

3 铺排锚缆受力体系及受力分析

3.1 计算条件

取本工程中最不利工况作为计算条件:

1) 水深为35 m, 即高潮时水面高程3 m, 底部-32 m; 水流流速为2 m/s, 流向与排布成 20° 。

2) 船舶滑板水下33.1 m联锁片; 排布宽度38.5 m, 铺排顺序为顺流铺设; 船舶吃水为2.3 m; 铺排船长75 m, 宽26 m。

3.2 锚缆受力体系设置

铺排作业时除考虑满足工况条件外还要满足以下原则: 锚缆长度必须满足整幅排体铺设的需要, 排体单幅长度为38.5 m; 抛锚点距排头或排尾距离不小于50 m; 抛锚角度结合水流力方向对称布置锚系; 满足一次施工移船长度不小于200 m; 按照该原则锚系布置可满足一次布锚移船250 m, 可提高铺排效率(图2)。

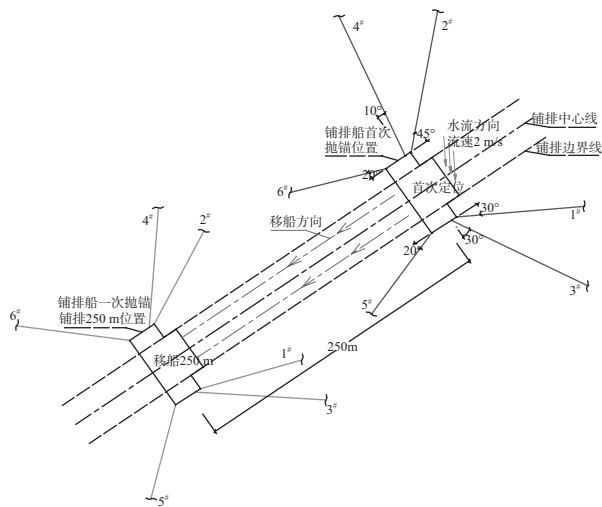


图2 一次抛锚移船铺排250 m铺排锚系布置

3.3 船舶受力模型及水动力分析

3.3.1 船舶受力模型

由于船舶布锚可满足一次移船铺排250 m, 根据图3可以看出, 在移船过程中, 随作业进度增加各缆系的角度与水流方向夹角变小, 故锚系受力随之减小, 则初始铺排时为各缆系受力最不利状态。

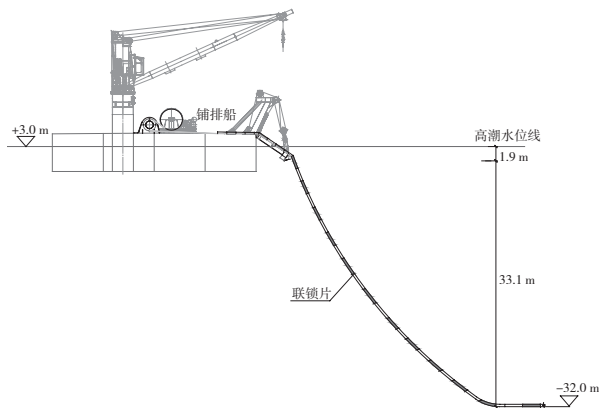


图3 铺排船35 m水深作业示意图

3.3.2 水流作用力分析

船舶和排布受水流作用力计算公式^[1]：

$$F_w = C_w \frac{\rho}{2} v^2 A \quad (1)$$

式中： F_w 为水流力标准值(kN)； C_w 为水流阻力系数； ρ 为水密度(t/m^3)，淡水取1.0； v 为水流设计流速，取2 m/s； A 为计算构件在流向垂直面上的投影面积。

1) 排布承受的水流力。

$$F_{w1} = C_{w1} \frac{\rho}{2} v^2 A_1 \quad (2)$$

根据文献[1]，水深35 m，流向角 20° 时，水流阻力系数 C_{w1} 计算选取0.85， $A_1=436 m^2$ ；为考虑安全，水流作用于排布的受力，按全部由船体承受，计算得 $F_{w1}=741.2 kN$ 。

2) 铺排船承受水流力。

$$F_{w2} = C_{w2} \frac{\rho}{2} v^2 A_2 \quad (3)$$

根据文献[2]，趸船阻力系数 C_{w2} 取1.2； $A_2=115.2 m^2$ ；计算得 $F_{w2}=276.5 kN$ 。

3) 船舶和排布承受的总水流力。

$$F_w = F_{w1} + F_{w2} = 1\ 017.7 kN$$

4 水流作用系泊力概率法分析

概率又称或然率、机会率或机率、可能性，是数学概率论的基本概念，结合概率的方法分析铺排船系泊控制，分析在作业状态在250 m的移船过程中，采用概率计算方法确定每根缆绳可能出现的最大受力，当缆力超过设定值时，将失去控制。

4.1 船舶横向X轴及Y轴水流受力分解

文献[3]中有类似计算实例。由于系泊缆力的计算通过铺排船传递于缆绳，以铺排船和排布作为整体分析对象、铺排船作为传力对象建立坐标系，铺排船横向为X轴，纵向为Y轴(图4)。铺排船X轴受水流作用力 $F_{wx}=F_w \sin 20^\circ=348.1 kN$ ，铺排船Y轴受水流作用力 $F_{wy}=F_w \cos 20^\circ=956.3 kN$ 。

4.2 锚缆受力体系分析

在船舶铺排作业时， F_{wx} 由1[#]、2[#]、3[#]和4[#]锚缆承担，即 P_1, P_2, P_3, P_4 ； F_{wy} 由2[#]、4[#]和6[#]锚缆承担，即 P_2, P_4, P_6 ；5[#]锚缆主要为控制移船和铺排船整体稳定性而设置。根据平面力系受力原理，在水流力作用下同一侧无法实现4根和3根缆绳同时受力，可出现两个缆绳结合水流作用同时受力的不利工况，取最不利工况下两根缆绳共同承担水流作用。

4.2.1 X方向缆绳受力

选取 P_1 和 P_2 作为X方向主要受力缆绳，缆绳中两根缆绳承担受力，根据水流角度不同分担不同比例受力；由于 P_3 和 P_4 是次要受力锚系，实际不会出现 P_3 和 P_4 承担全部水流力的情况，故只作为核对受力，并不作为受力分析，根据文献[3]，则缆绳可能受到的最大张力为： $P_1=0.5F_{wx}/\cos 30^\circ=201.0 kN$ (可取值)， $P_2=0.5F_{wx}/\cos 45^\circ=246.2 kN$ (可取值)， $P_3=0.5F_{wx}/\cos 60^\circ=348.1 kN$ (非取值)， $P_4=0.5F_{wx}/\cos 80^\circ=1\ 000.3 kN$ (非取值)。

4.2.2 Y方向缆绳受力

由于水流力作用方向位于 P_2 和 P_4 之间，故将 P_2 和 P_4 作为Y方向主要受力缆绳， P_6 为次要受力锚系只作为核对计算，各缆绳可能受到的最大张力为： $P_2=0.5F_{wy}/\cos 45^\circ=676.3 kN$ (可取值)， $P_4=0.5F_{wy}/\cos 10^\circ=485.5 kN$ (可取值)， $P_6=0.5F_{wy}/\cos 70^\circ=1398.1 kN$ (非取值)。

4.2.3 锚缆体系受力分析

根据上述分析，作为缆绳最大受力计算结果从上述可取值缆力中选取，分别为 $P_1=201 kN$ ； $P_2=246.2 kN$ ； $P_2=676.3 kN$ ； $P_4=485.5 kN$ ；结合文献[4]中的概率法分析原理， P_2 锚缆可能会承担 F_{wx} 和 F_{wy} 的双向作用力，故取 P_2 的合力作为可承受的最大锚缆受力即 $P_{2H}=246.2 kN+676.3 kN=922.5 kN$ 。

通过文献[5]中的缆力取值原理和物理模型试验得出的结论分析, 铺排缆系受力控制最大缆力值为 $P_2=922.5$ kN。

5 ANSYS有限元数模分析^[6]

5.1 铺排船及缆绳建模

5.1.1 材料选取

铺排船结构取弹性刚体, 船体采用Solid42; 锚缆为钢丝绳, 采用link10弹性材料, 弹性模量为 200 kN/mm^2 ^[6], 泊松比取0.25^[6]。

5.1.2 坐标系建立

坐标系以船体边角为坐标原点 O , 以水平向右为 X 轴, 竖直向下为 Y 轴, 不设定 Z 方向, 将所有受力全部转换为平面方向受力。有限元模型长度单位为mm, 力单位为N。

5.1.3 网格划分

由于船体并不是分析的主要对象, 划分单元1 m网格。钢丝绳受力需要的并不是微观变化, 也划分为1 m网格。

5.1.4 模型边界条件^[7]

根据设定工况, 将水流力分为 X 和 Y 方向, 在船体上对称施加于计算模型, 每根缆绳施加预拉力100 kN。允许船体产生位移, 锚缆和船体连接为铰接, 对模型拟加载的荷载位于 XOY 平面内, 允许其在 XOY 平面内的线位移; 允许其在平面内出现转角。

5.2 模型的加载及计算

5.2.1 作用力大小与方向

施加计算荷载 $F_{WX}=348.1$ kN, $F_{WY}=956.3$ kN; 对称布置分至两端, 分别为一半受力。

5.2.2 模型计算结果

通过ANSYS软件进行建模、加载和求解, 得出锚缆在受水流量作用时数值, 计算结果见图4。

图4中的结果表明, 铺排船在35 m水深, 流速2 m/s, 流向角为 20° 水流量作用下, 铺排船6根缆绳中2#缆绳最大受力为1 150.6 kN, 最小受力为5#缆绳缆力127.3 kN, 去除初始施加预拉力100 kN, 则2#缆绳最大受力为1 050.6 kN, 5#缆绳为27.3 kN。与概率法计算结果中的2#缆绳受力 $P_{2H}=922.5$ kN相符

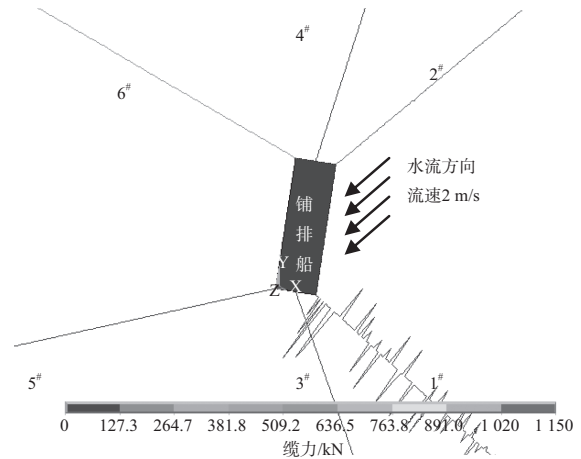


图4 ANSYS受力模型

合。按照概率法通过ANSYS有限元进行了调整缆系计算分析, 得出缆系调整后ANSYS分析计算可使得1#缆力调整至小于700 kN。

6 缆力调整原则

6.1 概率法及有限元分析结果

铺排船在上述恶劣工况下, 利用概率法^[4]计算得2#缆绳最大缆力为922.5 kN; ANSYS有限元软件建模计算得2#缆绳最大缆力为1 050.6 kN; 两者计算差别不大, 基本相符合, 故可应用于概率法进行缆绳缆力调整计算, 选取缆绳最大控制值为1 050.6 kN作为铺排船控制缆力。铺排船最大作业缆力控制值为700 kN, 当缆力超过700 kN时可通过调整缆系布置和松弛缆绳的方法进行缆力调整。

6.2 概率法缆力调整

6.2.1 作业工况调整

铺排船作业时, 对于作业设备都有一定的限值, 本工程铺排船设定缆绳缆力不大于700 kN, 最大控制缆力根据计算确定, 在超过700 kN时通过调整缆绳松弛度、缆系布置或降低作业流速来减小最大缆绳的受力, 由其他缆绳共同分担。

缆力调整设定将 P_2 缆力调整为700 kN时, 求解合力作用的水流量减小 ΔF_w 值, 通过单变量求解方程: $0.5(F_w - \Delta F_w) \sin 20^\circ / \cos 45^\circ + 0.5(F_w - \Delta F_w) \cos 20^\circ / \cos 45^\circ = 700$ kN。

单变量求解水流量 $\Delta F_w=244.6$ kN, 则 ΔF_w 需要重新分配: $\Delta F_{WX} = \Delta F_w \sin 20^\circ = 83.7$ kN。船尾侧 $\Delta F_{WY} = \Delta F_w \cos 20^\circ = 229$ kN。

6.2.2 松弛缆绳调整缆系布置

在水流力不减小的情况下,通过调整缆系 ΔF_w 水流作用力由 P_4 和 P_1 承担。

P_1 需要增加部分力为 $\Delta P_1=0.5 \Delta F_{wx}/\cos 30^\circ=48.3 \text{ kN}$; P_4 需要增加部分力为 $\Delta P_4=0.5 \Delta F_{wy}/\cos 20^\circ=121.8 \text{ kN}$;故调整缆系使 P_2 为700 kN时,则调整后 $P_{1T}=P_1+\Delta P_1=249.3 \text{ kN}$; $P_{4T}=P_4+\Delta P_4=485.5+121.8=607.3 \text{ kN}$;

6.2.3 调整后各缆力受力取值

通过作业工况调整或松弛缆绳调整缆系布置的方法,可实现缆力满足船舶性能要求,调整后概率法统计可出现最大缆力数值为 $P_{2H}=700 \text{ kN}$, $P_{1T}=249.3 \text{ kN}$, $P_{4T}=607.3 \text{ N}$;均不大于船舶锚缆设定值700 kN,由于船舶本身具有安全系数,故在缆力 $P_{2H}=700 \text{ kN}$ 时可正常作业。

6.3 现场验证实施效果

通过在长江深水航道铺排现场进行相似流速下验证记录,所得数值和计算数值相符合,取得了良好的效果,目前深水铺排作业已经全部完成,利用概率法调整缆系布置和优化锚系,使得铺排船锚缆受力均未超过设定值700 kN,确保了在恶劣工况下铺排作业施工的安全性。

7 结论

通过对长江南京以下12.5 m深水航道一期工程中的铺排作业工况分析计算,铺排船作业采用6缆系泊体系时,采用概率法^[4]计算缆系中1#缆最

大缆力值为922.5 kN;相同边界条件进行ANSYS有限元分析^[6],得出缆系中1#缆最大缆力值为1 050.6 kN;两种计算方法分析结果相差不大,基本相符。概率法和ANSYS有限元进行缆系调整可实现缆力调整至设定值700 kN以下,通过实际工程验证结果相符。故在上述工况中,可将1 050.6 kN作为铺排船控制缆力,但在施工中可通过概率法缆系调整原则将缆力控制在设定值700 kN以下,以满足工程施工。由于该工况中35 m深度是目前铺排深度最大的作业,没有经验可以借鉴,通过工程实践得出的计算分析数据,可为以后类似深水铺排作业中提供参考数据。

参考文献:

- [1] 石石,冉莉娜.基于概率法的油气储量不确定性分析[J].天然气勘探与开发,2011(1):18-21.
- [2] 吴济铭,马贺,刘海蛟,等.某铺排船舷侧铰链板有限元计算分析[J].船舶工程,2012(S2):158-160.
- [3] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [4] 交通部第一航务工程勘察设计院.海港工程设计手册[M].北京:人民交通出版社,1996.
- [5] 严金秀.世界沉管隧道技术(第一期)[R].成都:中国铁路工程西南科学研究院,1998.
- [6] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [7] 方子帆,吴建华.钢丝绳类索结构模型的动力学仿真研究[J].起重运输机械,2009(2):71-75.

(本文编辑 武亚庆)

征订通知

2014年《水运工程》杂志征订工作已经开始,订阅方式请登录《水运工程》杂志社官方网站: www.sygc.com.cn, 首页下载中心下载2014年《水运工程》征订通知单,有关要求和反馈信息一应俱全。