

SHENSHUIMAO ANZHUANG CHENGZAI
JI YUNDONG TEXING DE DABIANXING YOUXIANYUAN YANJIU

深水锚安装、承载 及运动特性的大变形有限元研究

赵燕兵 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书利用大变形有限元分析方法耦合的欧拉-拉格朗日法,重点研究了桩锚、拖曳锚、重力贯入锚的安装、承载及运动特性。全书共分为9章,包括绪论、大变形有限元分析方法、系泊/安装缆绳在海床中的输力和变形规律、桩锚在海床中的承载特性及破坏模式、拖曳锚在海床中的运动特性和嵌入机理、拖曳效应对拖曳锚运动特性和嵌入机理的影响、重力贯入锚在海床中的安装特性和贯入机理、重力贯入锚在海床中的运动特性、考虑缆绳影响的深水锚运动行为的高效数值分析模型。

本书可供海洋工程、岩土工程、土木工程和水利工程等领域的教师、研究生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

深水锚安装、承载及运动特性的大变形有限元研究 / 赵燕兵著. — 北京:中国水利水电出版社,2020.6
ISBN 978-7-5170-8709-0

I. ①深... II. ①赵... III. ①深水港—抛锚—研究
IV. ①U675.922

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第126685号

书 名	深水锚安装、承载及运动特性的大变形有限元研究 SHENSHUIMAO ANZHUANG、CHENGZAI JI YUNDONG TEXING DE DABIANXING YOUXIANYUAN YANJIU
作 者	赵燕兵 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10印张 196千字
版 次	2020年6月第1版 2020年6月第1次印刷
定 价	56.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

深水锚是深水系泊系统的核心组成，是海洋空间利用和海洋资源开发迈向深海的一大瓶颈。随着新概念和新技术在深水系泊领域的不断涌现和发展，深水锚在海床中的运动行为变得更为复杂，这给既有的分析方法带来了极大的挑战。对深水锚安装、承载及运动特性开展研究，是深海锚固技术的科学基础，也是深海工程尤其是海洋岩土工程科学的重要内容。

深水锚安装、承载及运动过程中会导致海床土发生极大变形，传统的有限元分析方法已不再适用。作者通过博士及博士后阶段的探索和研究，基于大变形有限元分析方法耦合的欧拉-拉格朗日(CEL)法，建立起系泊/安装缆绳-锚固结构-海床耦合作用的大变形有限元分析框架，能够有效分析深水锚的安装、承载及运动特性。

全书共分9章：第1章介绍了系泊系统、系泊/安装缆绳、锚固结构的研究背景及发展现状；第2章介绍了目前常用的大变形有限元分析方法；第3章介绍了系泊/安装缆绳在海床中的输力和变形规律；第4章介绍了桩锚在海床中的承载特性及破坏模式；第5章介绍了拖曳锚在海床中的运动特性和嵌入机理；第6章介绍了拖曳效应对拖曳锚运动特性和嵌入机理的影响；第7章介绍了重力贯入锚在海床中的安装特性和贯入机理；第8章介绍了重力贯入锚在海床中的运动特性；第9章介绍了考虑缆绳影响的深水锚运动行为的高效数值分析模型。

感谢研究生李培冬、徐奎、刘孟源、李洲、彭劲淞对深水锚安装、承载及运动特性大变形有限元研究做出的贡献；感谢研究生李泽莹对本书的文字进行了校核。

特别感谢国家自然科学基金(51741909)、山西省应用基础研究计划(201901D211020)和中国博士后科学基金(2016M601264)对

深水锚安装、承载及运动特性大变形有限元研究给予的经费支持。

作者将在天津大学攻读博士学位及博士后研究期间的研究成果汇总整理后形成本书的主要章节。深水锚的安装、承载及运动特性是不断发展和完善的课题，由于时间仓促，加之所掌握资料和作者水平有限，书中难免存在失当和谬误之处，欢迎读者予以指正。

作者

2020年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 系泊系统	1
1.2 系泊/安装缆绳	3
1.2.1 反悬链特性	4
1.2.2 三维构形	6
1.3 锚固结构	7
1.3.1 桩锚	7
1.3.2 拖曳锚	8
1.3.3 重力贯入锚	11
第 2 章 大变形有限元分析方法	14
2.1 任意的拉格朗日-欧拉 (ALE) 法	15
2.2 基于小变形模型的网格重划分和插值 (RITSS) 法	16
2.3 耦合的欧拉-拉格朗日 (CEL) 法	16
2.4 RITSS 法与 CEL 法的对比分析	17
2.4.1 算例	17
2.4.2 RITSS 法的实现	18
2.4.3 CEL 法的实现	19
2.4.4 结果分析	20
2.4.5 土体流动机制	21
2.4.6 小结与讨论	23
第 3 章 系泊/安装缆绳在海床中的输力和变形规律	24
3.1 缆绳模拟技术及模型考察	25
3.1.1 缆绳的模拟及建模	25
3.1.2 网格密度和拖曳速度的影响	26
3.2 嵌入缆反悬链特性的验证和研究	28
3.2.1 系缆点处系缆力的验证	28
3.2.2 嵌入缆反悬链形态的验证	29

3.2.3	嵌入点处缆绳张力的验证	31
3.3	参数考察与分析	32
3.3.1	摩擦系数的影响	32
3.3.2	初始下嵌深度的影响	34
3.3.3	土体容重的影响	35
3.4	锚固结构运动过程中嵌入缆的变形及输力规律	36
3.4.1	数值模型及计算结果	36
3.4.2	初始系泊角的影响	38
3.4.3	土体应变率及应变软化的影响	39
3.5	嵌入缆的三维构形模拟	41
第4章	桩锚在海床中的承载特性及破坏模式	44
4.1	数值模型及验证	44
4.1.1	数值模型	44
4.1.2	模型验证	46
4.1.3	荷载作用方向和长径比的影响	47
4.2	理论模型	48
4.2.1	桩锚的力学模型	48
4.2.2	破坏方向及承载力的求解	49
4.2.3	最佳系缆点的求解	50
4.3	大变形有限元模型与理论模型的对比分析	50
4.3.1	最佳系缆点	50
4.3.2	破坏模式及承载力	52
4.3.3	最佳系缆点与桩顶处承载力对比	54
第5章	拖曳锚在海床中的运动特性和嵌入机理	56
5.1	数值建模及考察	57
5.1.1	数值模型	58
5.1.2	网格密度、土体尺寸和拖曳速度的影响	60
5.1.3	对比考察	63
5.2	锚板截面形状对锚的运动特性和嵌入机理的影响	65
5.2.1	对运动方向的影响	66
5.2.2	对拖曳角的影响	68
5.2.3	对系缆点处拖曳力的影响	69
5.2.4	对运动轨迹的影响	70
5.3	拖曳锚安装过程中土体的流动机制	72

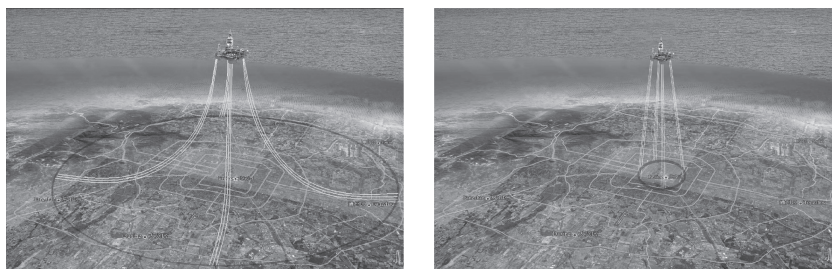
5.4	极限嵌入深度的经验表达式	73
第6章	拖曳效应对拖曳锚运动特性和嵌入机理的影响	75
6.1	数值建模及工况设计	77
6.2	拖曳速度的影响	78
6.2.1	拖曳速度对锚嵌入行为的影响	78
6.2.2	拖曳力与拖曳速度之间的关系	79
6.3	安装缆绳直径的影响	81
6.4	拖曳角的影响	82
6.5	安装缆绳长度的影响	85
6.5.1	对拖曳锚嵌入行为的影响	85
6.5.2	极限嵌入深度	86
6.5.3	临界缆长	88
6.6	土体强度的影响	89
第7章	重力贯入锚在海床中的安装特性和贯入机理	92
7.1	数值模型及验证	94
7.1.1	数值模型	94
7.1.2	模型验证	97
7.2	数值结果分析	98
7.3	修正的能量分析模型	102
第8章	重力贯入锚在海床中的运动特性	105
8.1	关键技术的验证	106
8.1.1	水中缆绳的模拟	106
8.1.2	旋转行为的验证	109
8.2	与塑性分析模型对比	112
8.3	算例分析	113
第9章	考虑缆绳影响的深水锚运动行为的高效数值分析模型	116
9.1	将缆绳的影响嵌入 CEL 法	118
9.1.1	缆绳方程	118
9.1.2	子程序 VUAMP	119
9.1.3	计算流程	119
9.2	标准算例（拖曳锚安装）	120
9.2.1	控制时间间隔和荷载增量的影响	120
9.2.2	计算结果对比分析	122

9.3 吸力嵌入式板锚 (SEPLA) 旋转调节过程的模拟	124
9.3.1 控制速度和摩擦系数的影响	124
9.3.2 与 Song 等 ^[164] 的计算结果对比	126
9.3.3 与 Wei 等 ^[147] 的计算结果对比	128
9.4 OMNI - Max 锚运动行为的研究	129
9.4.1 控制速度的影响	129
9.4.2 参数考察	130
9.4.3 锚运动过程中土体的流动机制	135
9.5 锚旋转行为的经验公式	136
附录 A 嵌入缆反悬链形态的数值积分解	138
参考文献	139

绪 论

1.1 系泊系统

随着海洋空间利用和海洋资源开发不断向深水挺进，大型海洋浮式结构物，如油气开采平台、海上机场和人工浮岛等，通常置身于极其复杂和恶劣的海洋环境中，在生产和运行过程中面临诸多技术挑战。系泊系统作为最有效和最经济的长期性、永久性定位技术，能够保证浮式结构物的稳定性，使其在相对固定的水域进行正常作业。随着作业水深的加大，系泊系统的系泊方式由悬链式系泊向绷紧式系泊转变。图 1.1 为某半潜式平台在 3000m 水深下的系泊系统效果图^[1]，图 1.1 (a) 采用传统的悬链式系泊系统，图 1.1 (b) 采用绷紧式系泊系统。如以北京市地图作为模拟的海床面，则悬链式系泊系统覆盖的海床面达到了北京六环，而绷紧式系泊系统仅在北京二环附近。在大幅提高系泊性能的前提下，绷紧式系泊系统占用了相当小的海床面积，由此降低了安装和作业难度，也给其他生产系统和装置在海床面的布置带来方便。Liu 等^[2]对



(a) 悬链式系泊系统

(b) 绷紧式系泊系统

图 1.1 系泊系统效果图^[1]

1981 年投产以来,包括 FPSO、Spar、Semi 和 TLP 等在内、水深分布在 15~2600m 的 232 例浮式油气生产平台的系泊方式进行了调研:当水深在 500m 以上(深水)时,采用最多的定位方式为绷紧式系泊系统,达到 59%的比例,其次为悬链式系泊系统,达到 25%的比例,张力腿平台的比例为 15%,动力定位最少,为 1%;当达到 1500m 以上的超深水时,绷紧式系泊系统的比例升至 83%,占绝对优势,悬链式系泊系统为 14%,动力定位为 3%。结果表明,绷紧式系泊系统是深海空间利用和深海资源开发的首选方案。

系泊系统主要由系泊缆绳、锚固结构及其他连接结构组成。系泊缆绳为细长柔性结构,只传递轴力,不承受弯矩。根据材料和结构特性,系泊缆绳可分为铁链、钢缆和合成纤维缆绳。铁链常用于悬链式系泊系统,依靠自身重力产生的回复力来保障浮式结构物的安全和稳定。钢缆一般用于张力腿平台的系泊系统,运行过程中呈紧绷状态。由于合成纤维缆绳自重轻(密度接近水的密度)及强度高,通常应用于绷紧式系泊系统。值得注意的是,合成纤维缆绳耐磨性较差,因此,通常会与铁链或钢缆一起使用。铁链或钢缆作为下部结构,嵌入在海床中,合成纤维缆绳作为上部结构,浸没在海水中。锚固结构在系泊系统中起承载作用,浮式结构物所承载荷通过系泊缆绳传至锚固结构。常见的锚固结构包括重力锚、桩锚、拖曳锚、吸力锚、吸力嵌入式板锚和重力贯入锚等。衡量锚固结构性能的指标包括安装性能、承载性能及极端荷载作用下锚的灾害规避能力。

绷紧式系泊系统的系泊角通常在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间^[3,4],由于系泊缆绳与海床面形成较大夹角,锚将受到很大的上拔力,对锚的抗拔性能提出了更高的要求;此外,绷紧式系泊系统更多运用于深水和超深水中,也对锚的深水安装性能提出了更高的要求。研发兼具优良的深水安装和抗拔承载性能的深海锚固结构,一直是国际海洋工程界追求的目标。随着新概念和新技术在深水系泊领域的不断涌现和发展,深水锚正经历从吸力锚、法向承力锚(新型拖曳锚)、吸力嵌入式板锚到重力贯入锚的发展和应用历程,如图 1.2 所示。由于迥然各异的结构特性和安装方式,不同类型的深水锚在海床中的运动行为复杂且各具特点,如吸力锚在负压作用下的定点沉贯,拖曳锚在海床中的长距离拖曳安装,吸力嵌入式板锚在负压定点贯入后的旋转调节过程,以及重力贯入锚在自重作用下的初始贯入和在海床中后续的旋转和嵌入。图 1.3 所示为拖曳锚和重力贯入锚在海床中的复杂运动行为。深水锚在海床中的这些复杂运动行为,不断更新人们的既有认知,挑战人们的分析能力。

锚固结构安装、承载及受极端荷载作用下的运动特性均涉及缆绳、锚、海水和海床四者的耦合作用。以拖曳锚和重力贯入锚为例,前者依靠拖船拖曳的方式通过缆绳将锚拖入海床深部,后者依靠自身重力从水中抛落嵌入海床内

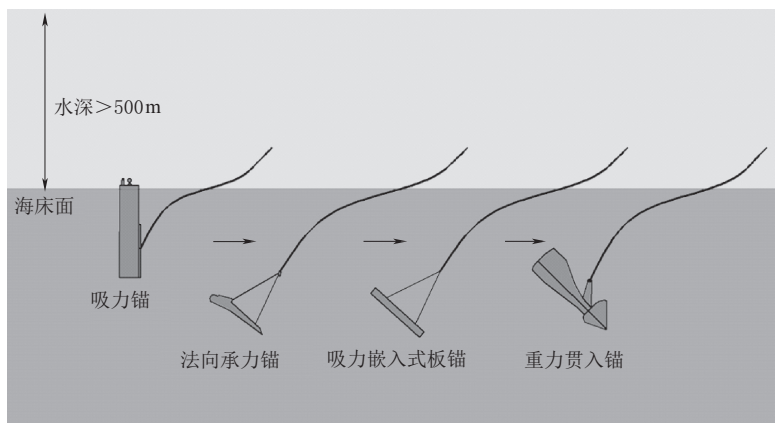


图 1.2 深水锚的发展和历程

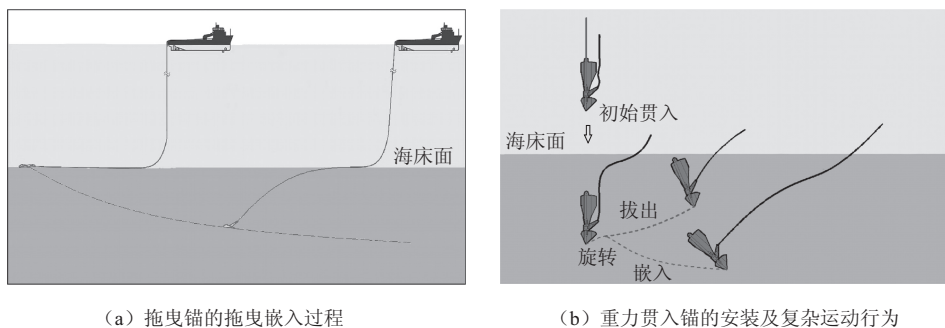


图 1.3 深水锚在海床中的复杂运动行为

部。从锚的运动特性来讲，不同锚固结构的运动行为均可以归纳为初始贯入、旋转、嵌入和拔出。虽然锚的运动行为各异，但均可以采用类似的研究方法进行分析。从锚的安装方式来讲，不同锚固结构的分析重点不同：在拖曳锚安装过程中，海水对锚的影响甚小，可以忽略；在重力贯入锚安装过程中，锚的贯入速度较大，锚在海水中的稳定性则必须考虑。另外，锚固结构运动过程中，缆绳与海床发生相互作用，缆绳在海床中形成反悬链形态，甚至形成复杂的三维构形，进而影响锚在海床中的运动行为，如何处理缆绳对锚运动行为的影响也需谨慎对待。因此，研究者需根据研究对象的不同，对分析方法进行相应处理。

1.2 系泊/安装缆绳

系泊/安装缆绳是系泊系统的重要组成部分。一方面，拖船或系泊浮体的运动通过拖曳或系泊缆绳传至锚固结构，从而导致锚固结构在海床中的复杂运动；

另一方面，由于海床土抗力的作用，嵌入海床中的缆绳（嵌入缆）也将发生复杂的变形并呈现特殊形态。对于拖曳或系泊作用与锚固结构运动共面的特殊情形，嵌入缆的变形也在此平面，即所谓的反悬链形态，如图 1.4 (a) 所示。由于海洋工程实践的复杂性和不确定性，拖曳或系泊作用与锚固结构运动可能处于不共面的情形更为普遍，如在浮体长距离漂移的情况下，系泊系统中布置于不同位置的锚固结构通常会与浮体运动不共面的嵌入运动，此时嵌入缆的变形也是不共面的，该情况下嵌入缆在海床土中的形态定义为缆绳的三维构形，如图 1.4 (b) 所示。

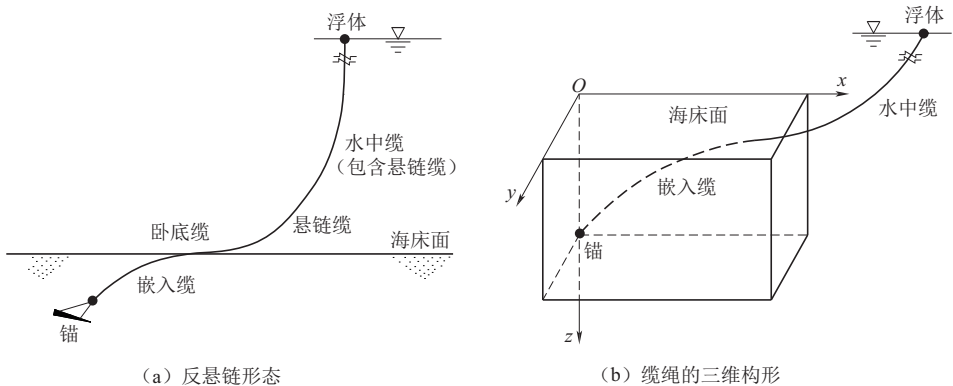


图 1.4 系泊/安装缆绳的形态示意图

1.2.1 反悬链特性

拖曳或系泊状态下，缆绳与锚作为一个耦合作用的系统，其反悬链特性直接决定了锚的运动轨迹和承载力。目前国际上针对缆绳反悬链特性已有较完善的理论和实验研究。

调研表明，缆绳反悬链特性的理论研究以数值迭代求解为主。为了优化桩锚的设计和安装，包括优化桩的长度、直径和系缆点位置，确定其安装深度，Reese^[5]研究了饱和黏土中缆绳的反悬链特性。Reese^[5]基于极限平衡理论，假设缆绳只传递轴力不传递弯矩，将嵌入缆离散为一系列零弯曲刚度的圆弧单元。忽略切向土抗力和缆绳自重的影响，只考虑嵌入缆张力和法向土抗力作用，由嵌入缆的几何尺寸和土性参数推得嵌入缆的力学控制方程，通过反复迭代力学控制方程以满足嵌入缆的边界条件，最终得到嵌入缆的张力分布和反悬链形态。基于 Reese^[5]的工作，Gault 和 William^[6]、Vivatrat 等^[7]、Degenkamp 和 Dutta^[8]、Bang^[9]以及 Bang 等^[10]考虑了切向土抗力和缆绳自重的影响，同样通过数值迭代求解得到嵌入缆的张力分布和反悬链形态。Gault 和 William^[6]

的研究表明, 嵌入缆的反悬链形态主要受法向土抗力的影响, 嵌入缆的张力分布主要受切向土抗力的影响, 缆绳自重对反悬链形态和张力分布的影响相对较小。为了使模型更具普适性, Bang 和 Taylor^[11]将嵌入缆的力学控制方程推广至砂土。砂土与饱和黏土中嵌入缆的力学控制方程最大的区别在于土抗力的力学描述。饱和黏土的内摩擦角 $\varphi = 0^\circ$, 其产生的土抗力不受土体内摩擦角的影响; 而砂土的内摩擦角并不为零, 其产生的土抗力受土体内摩擦角的影响很大。

虽然数值迭代求解嵌入缆的反悬链形态和张力分布可以考虑诸多因素的影响, 计算精度也较高, 但求解过程复杂, 需要反复迭代, 且研究者一般针对自己所研究的问题建立特定的力学控制方程并迭代求解。因此, 数值迭代求解的可操作性和普适性都较差。Neubecker 和 Randolph^[12]基于 Vivatrat 等^[7]的力学微分控制方程, 通过忽略缆绳自重和小角度假定, 建立了可求解嵌入缆反悬链形态和张力分布的解析解, 使得反悬链的相关计算更容易操作。深海海底多为正常固结和轻微超固结的饱和黏土, 其不排水抗剪强度 s_u 随土体深度近似线性增长, 即 $s_u = s_{u0} + kz$, 式中, s_{u0} 为海床表面土体不排水抗剪强度, k 为不排水抗剪强度梯度, z 为土体深度。Neubecker 和 Randolph^[12]推导的解析解只适用于强度均匀和表面抗剪强度为零的饱和黏土, 即 $k = 0\text{kPa/m}$ 和 $s_{u0} = 0\text{kPa}$ 的情况, 且获得的反悬链形态与海床面无交点, 有悖于物理实际。

Liu 等^[13,14]从物理实际出发, 推导了同时适用于一般性饱和黏土 ($s_u = s_{u0} + kz$) 和砂土的反悬链方程, 给出了反悬链形态的解析解; 通过引入初始下嵌深度的概念, 合理地解决了反悬链形态与海床面无交点的问题; 并提出了嵌入点、有效缆长、等效缆长和临界缆长等概念, 这些概念对深水锚的工程应用, 尤其对优化拖曳锚的安装技术提供了有效的理论支撑。另外, Han 和 Liu^[15]基于塑性分析方法, 建立起嵌入缆反悬链特性的塑性屈服面, 丰富了已有的理论分析方法。

在实验研究方面, Degenkamp 和 Dutta^[8]在 $4.5\text{m} \times 1.25\text{m} \times 0.37\text{m}$ 的土槽中, 针对直径分别为 6.4mm 、 9.5mm 和 16mm 的铁链进行了拖曳测试。实验中, 将铁链的一端固定在土槽的某一深度处, 并将其垂直延伸至土体表面, 然后平铺在土面上。通过电机在缆绳的另一端施加 0.002m/s 的拖曳速度, 铁链在土中逐渐形成反悬链形态。通过测量系缆点处铁链的水平和竖向分力以及拖曳点的拉力, Degenkamp 和 Dutta^[8]标定了铁链在切向和法向上的有效承载宽度系数。由于铁链埋置在海床土中, 并不可见, 反悬链形态很难捕捉, Degenkamp 和 Dutta^[8]并未对嵌入缆的反悬链形态进行研究。为了捕捉缆绳的反悬链形态, Heyerdahl 和 Eklund^[16]采用了手工静态测量技术, 首先在缆绳上等间距地系上很细的绳索, 当拖曳到某一特定位置时, 将细绳索绷直, 记录绳

索埋置在土中的长度和距离系缆点的水平距离,并推算当前系缆点的埋深和水平坐标,最终求得嵌入缆的反悬链形态。Bang 等^[17]在离心机实验中采用了更直接的方式来测量嵌入缆的反悬链形态,其方式如下:每次拖曳完毕后,将实验土槽取出,剔除缆绳一侧的土体使嵌入缆的形态显露出来,并进行测量。上述两种反悬链形态测量技术均比较粗糙,测量精度易受人为干扰,且难以实时捕捉嵌入缆的反悬链形态。

近来,Liu 等^[14]和柳成林^[18]通过在缆绳上布置倾角传感器来测量不同测点处缆绳与水平面的夹角,并采用圆弧递推公式,实时测得了拖曳锚安装过程中嵌入缆的反悬链形态。为了验证测试技术的精度和合理性,柳成林^[18]在空气中分别针对缆绳的悬链形态、反悬链形态和直线形态进行了模拟,模拟结果与真实形态吻合良好。将该技术推广至土体中时,缆绳上传感器的布置形式直接决定了测量的精度,布置过密会影响缆绳的嵌入,过疏则降低了测量精度。如何合理布置倾角传感器及控制测量精度,更多的细节可以从柳成林^[18]的科研工作中获取。在测量缆绳反悬链形态的同时,Liu 等^[14]和柳成林^[18]还研究了安装缆绳的嵌入点、有效缆长和等效缆长等概念,为分析嵌入缆的反悬链特性和拖曳锚的工程应用提供了技术支撑。

1.2.2 三维构形

目前,针对嵌入缆三维构形的研究相对较少。为了分析非共面荷载(缆绳张力与拖曳锚锚胫不共面)作用下拖曳锚的运动轨迹,Aubeny 和 Chi^[19]假设在非共面荷载作用下,嵌入缆在海床中的构形落在与锚胫成某一角度的垂直平面内,该平面内嵌入缆在海床中的构形采用二维条件下 Neubecker 和 Randolph^[12]推导的反悬链方程求解。通过坐标系的转换求得系缆点处拖曳力的大小和方向,通过塑性极限法迭代求得锚的运动轨迹。虽然 Aubeny 和 Chi^[19]的模型能够求解三维空间下拖曳锚的运动轨迹,但嵌入缆的输力和变形规律仍采用二维条件下 Neubecker 和 Randolph^[12]推导的反悬链方程计算,并不能真实反映嵌入缆的三维构形和输力规律。

Wang 等^[20]在以系缆点为原点的整体笛卡尔坐标系下,引入局部笛卡尔坐标系来描述嵌入缆上任意一点的方位及受力情况,推得了嵌入缆在海床中的三维构形和输力模式。Wang 等^[20]的模型中,假设嵌入缆上任意一点所受到的摩阻力总是沿着缆绳轴向,端阻力垂直于该点的运动方向。Liu 等^[21]采用与 Wang 等^[20]相同的求解模式,将嵌入缆在海床中三维构形和输力模式的理论模型推广至砂土。Martins 和 Lages^[22]通过在以系缆点为原点的整体笛卡尔坐标系下引入局部 Frenet 坐标系,可以描述嵌入缆受任意方向土抗力作用下的三维构形和输力模式。但局部 Frenet 坐标系的引入使得模型含有一些物理意义

不明确的参数（如扭转系数 τ ）。

调研表明，目前国际上针对嵌入缆的反悬链特性已有较完善的理论研究，但由于理论推导中存在假设和实验条件（可操作性、测量精度等）所限，缆绳与土体间的摩擦系数、嵌入缆初始下嵌深度和土体容重等参数对嵌入缆反悬链特性的影响很难通过理论和实验来确定。嵌入缆的三维构形及输力规律的研究尚处于起步阶段，如何完善已有的理论模型或采用有限元技术来研究嵌入缆的三维构形和输力规律，均是很有意义的工作。

1.3 锚固结构

锚固结构作为系泊系统的根系所在，是保障系泊系统海上定位及安全运行的前提。根据锚的适用水深，以水深 500m 为界，可分为浅水锚和深水锚；根据锚的结构特点及安装方式，可分为重力锚、桩锚、拖曳锚、吸力嵌入式板锚和重力贯入锚等。本书的研究对象主要为桩锚、拖曳锚和重力贯入锚。

1.3.1 桩锚

桩是一种工程中常见的结构形式，既可以作为基础承受压荷载，又可以作为锚固结构承受上拔荷载。承受上拔荷载的桩起锚固的作用，因此定义为桩锚。随着海上油气资源开发的不断发展，桩锚作为一种可靠的锚固结构，被用作海上浮式结构物的系泊基础。常见的桩锚有锤击贯入桩锚和钻入式桩锚，桩通常垂直贯入到海床中，通过缆绳与上部结构相连接，为上部结构提供承载力^[23]。锤击贯入桩锚通过水下液压锤不断锤击至工作深度，目前水下液压锤的工作水深上限为 2000m^[24]。桩锚在海床软黏土中安装时所受到的阻力较小，即使是重量较轻的小型液压锤也能够满足安装需求。然而，桩的安装难度及工程造价随水深增加而显著提高，这仍是桩锚在深水及超深水领域进一步应用中面临的障碍。尽管如此，桩锚因其适用范围广、可有效抵抗循环荷载、既适用于悬链式系泊系统又适用于绷紧式系泊系统、安装完成后可快速发挥承载力等优点，仍被广泛应用于海洋平台的锚固结构^[23]。

桩作为锚固结构提供抗拔承载力时，可能受到不同方向荷载的作用：应用于张力腿平台（TLP）时承受竖向荷载；应用于浮式储油平台（FPSO）的悬链式系泊系统时承受水平向荷载；应用于立柱式平台的绷紧式系泊系统时承受倾斜荷载。当桩承受竖向荷载作用时，其承载力全部由桩侧摩阻力提供，海洋软黏土中的摩阻力可通过经验公式 $f = \alpha s_u$ 计算^[4]，式中， α 为土体黏滞系数， s_u 为土体不排水抗剪强度。 s_u 可由工程中实际测得， α 受土体固结及桩锚的长细比等因素影响。Vijayvergiya 和 Focht^[25]、Randolph 和 Murphy^[26]、API^[27]

及 Kolk 和 Velde^[28] 针对土体固结及桩锚的长细比对 α 的影响开展了一系列的研究。桩锚侧向承载力的研究包括极限平衡法^[29]、地基反力法^[30]、 $p-y$ 曲线法^[31]、弹性理论法^[32] 和塑性理论法^[33] 等。桩锚倾斜荷载作用下承载力计算的常用方法为经验法^[34,35] 和有限元分析^[36-38]。

对于张力腿平台, 系泊缆绳与桩锚在桩顶连接; 对于其他浮式结构物, 系泊缆绳与桩锚在最佳系缆点连接。最佳系缆点通常位于桩顶之下, 起平衡桩锚所受竖向荷载和水平荷载产生的弯矩的作用, 即荷载施加在最佳系缆点可使得桩锚所受弯矩为零, 进而提供最大的承载力。Ramadan 等^[39] 采用有限元法分析了系缆点深度对桩锚承载力的影响, 并给出了柔性桩锚最佳系缆点的位置。对于刚性桩, 其最佳系缆点与吸力锚类似, 当荷载施加在最佳系缆点时, 桩锚仅发生平移破坏, 不发生旋转^[40]。Liu 等^[41,42] 的研究表明, 吸力锚的最佳系缆点位于 0.45~0.7 倍锚的埋深处。桩锚的破坏模式受系泊角、桩锚的长细比及周围土体强度等因素的影响, 直接决定着其承载力的大小。明确桩锚的破坏模式是分析桩锚承载力的前提。

上述调研表明: 针对桩锚承载力的有限元研究主要采用传统的小变形有限元分析方法, 该方法不能模拟桩锚的完整拔出过程。因此, 很难明确桩锚在海床中的破坏模式, 尤其当桩锚受水平荷载作用时。另外, 针对桩锚在倾斜荷载作用下的破坏模式和承载性能的理论研究较少, 开展相应的理论研究也显得尤为必要。

1.3.2 拖曳锚

拖曳锚的安装主要分为两个步骤, 即抛锚过程和拖曳安装过程^[18]。在抛锚过程中, 锚板从安装船的甲板上缓慢下降, 锚板后部的尾缆起到定位的作用, 同时水下机器人可对锚板的状态进行监控。到达海床面后, 由于锚板自身的结构形状, 在海床面将形成一定的初始角度, 通过安装船缓慢的水平移动, 锚板在缆绳的作用下逐渐下嵌直至目标深度, 如图 1.3 (a) 所示。针对拖曳锚安装过程的研究主要体现在对其运动轨迹的预测。拖曳锚的承载力由锚的埋深和方位角决定, 因此, 研究拖曳锚的运动轨迹对预估拖曳锚的承载力有着重要的指导意义。图 1.5 为国际上两种常用的法向承力锚, 法向承力锚是拖曳锚的最新发展, 由于其在承载性能方面的优势, 被广泛用于深水系泊中。目前, 计算拖曳运动轨迹的方法主要有经验法、极限平衡法、塑性极限法和运动模型。

经验法是根据工程或实验中采集的实测数据以及工程师的工程经验来总结经验公式, 用于计算拖曳锚的运动轨迹。该方法的精度由实测数据的样本数和样本种类决定, 但实测数据往往是在特定的施工条件下得到的, 且数目有限。

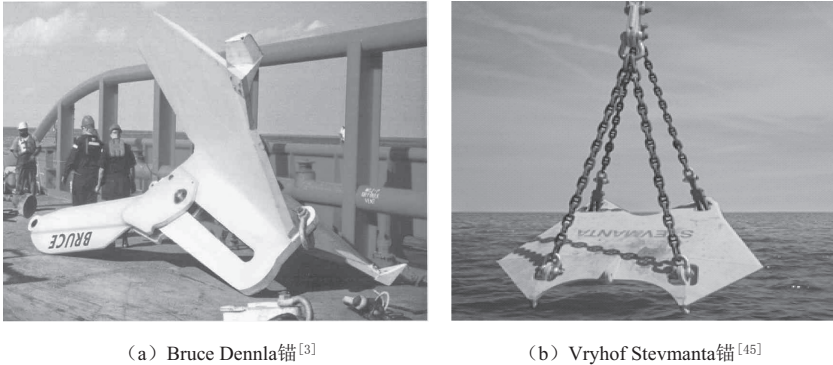


图 1.5 国际上两种常用的法向承力锚实物图

因此,经验法精度不高,很难反映各种因素对拖曳锚运动轨迹的影响。常用的经验公式来自 NCEL^[43]和 Vryhof^[44,45]。

极限平衡法最先被 Stewart^[46]用于计算拖曳锚的运动轨迹,之后又被 Neubecker 和 Randolph^[47]、Thorne^[48]、Dahlberg^[49]、DNV^[50]和 Ruinen^[51]用于拖曳锚运动轨迹的研究中。极限平衡法的实现步骤可归纳为:①根据承载力分析理论和摩阻力计算公式,计算作用在锚上的土抗力;②假设任意嵌入深度下锚处于受力平衡状态,列出锚的力学平衡方程(包括弯矩平衡);③通过与缆绳方程联立,计算缆绳对锚运动轨迹的影响。不同研究者在采用极限平衡法时的区别主要体现在两方面,一是作用在锚上的土抗力的表达方式不同,即力的作用点和作用方向不同,但力的作用原理是一致的;二是判断锚板旋转的条件不同,例如通过弯矩平衡方程^[46,48-51]或假设拖曳力与锚板的夹角为常数^[47]来确定锚板的旋转行为。极限平衡法的计算可以通过增量求解^[46,48-51]或解析表达^[47]来实现。解析表达拖曳锚的运动轨迹通常是一项比较有挑战性的工作,因此,一般的解析表达式都有其适用条件,比如,Neubecker 和 Randolph^[47]的运动轨迹解析表达式只适用于土体强度符合幂指数分布的饱和黏土。

塑性极限法最先由 Bransby 和 O'Neill^[52]引入到拖曳锚运动轨迹的预测中,之后 O'Neill 等^[53]又进一步完善了该方法。塑性极限法需要事先通过有限元计算求得表征拖曳锚嵌入行为的塑性屈服函数,该屈服函数囊括了锚的平移和旋转的综合影响。塑性极限法中,缆绳对拖曳锚运动轨迹的影响同样通过嵌入缆的反悬链方程来计算。Aubeny 等^[54]、Aubeny 和 Chi^[55,56]、Wang 等^[57]及王忠涛等^[58]同样采用塑性极限法分析了拖曳锚的运动轨迹。Aubeny 和 Chi^[55,56]及王忠涛等^[58]分析了安装缆绳长度以及法向承力锚安装-系泊转换装置等因素对锚运动轨迹的影响。Wang 等^[57]探讨了不同安装方式下(拖曳安装和绞盘绞动安装)拖曳锚运动轨迹的区别。