

土木与建筑工程CAE课程作业展示

浮式结构动态管缆的 智能优化设计

| 汇报人：王辰宇、杨磊 | 时间：2023.06.02



清华大学深圳国际研究生院
Tsinghua Shenzhen International Graduate School

CONTENTS

01

课题背景

02

前期工作

03

智能优化

04

最优化构型

05

总结与展望

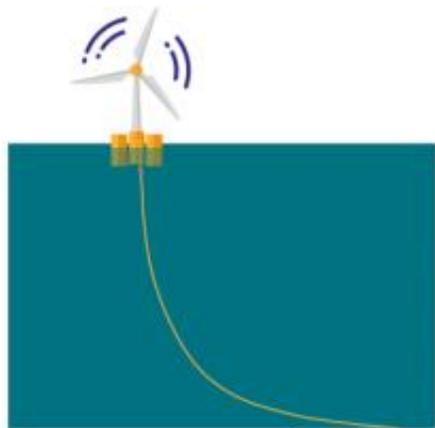
01

课题背景

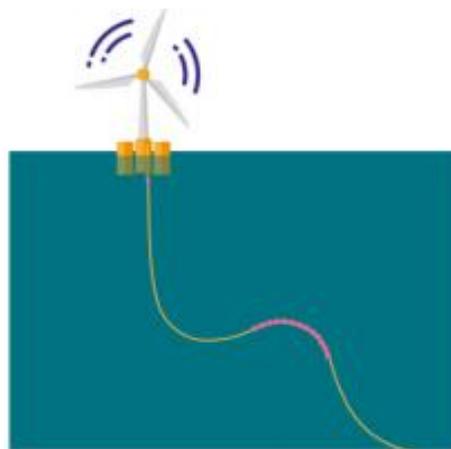


1.1 项目背景

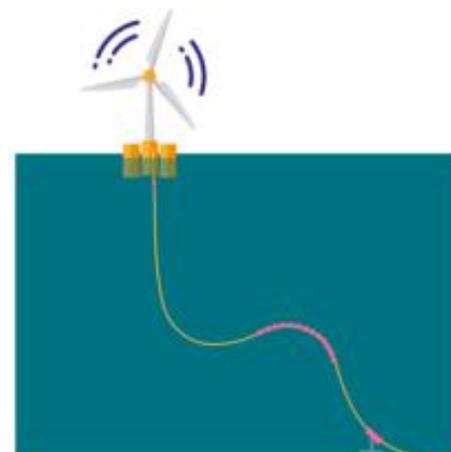
深海管缆分为静态管缆和动态管缆。其中动态管缆非常容易受到浮式结构运动、波浪海流、管土接触效应的影响，其结构安全性的设计分析极为重要。动态管缆的构型分为多种：钢悬链型、柔性立管、脐带电缆。



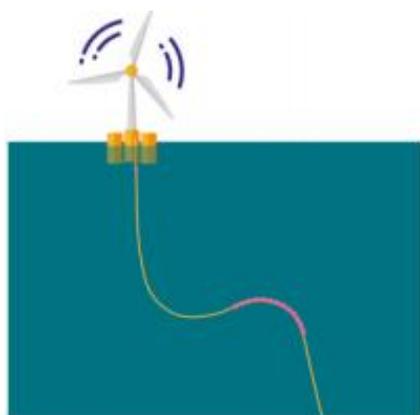
Free Hanging
(钢悬链型)



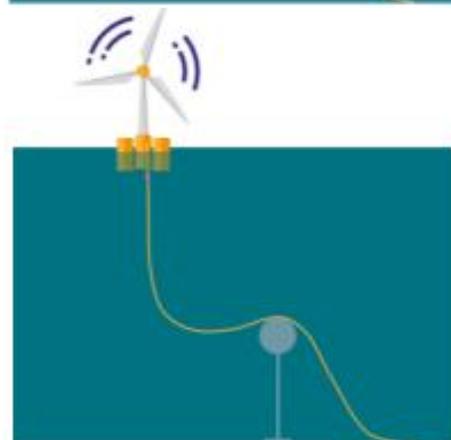
Lazy wave
(缓波型)



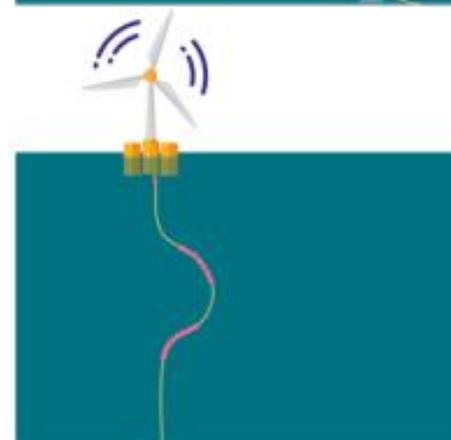
Tethered wave
(系链型)



Steep wave
(陡波型)



Lazy S
(缓波S型)



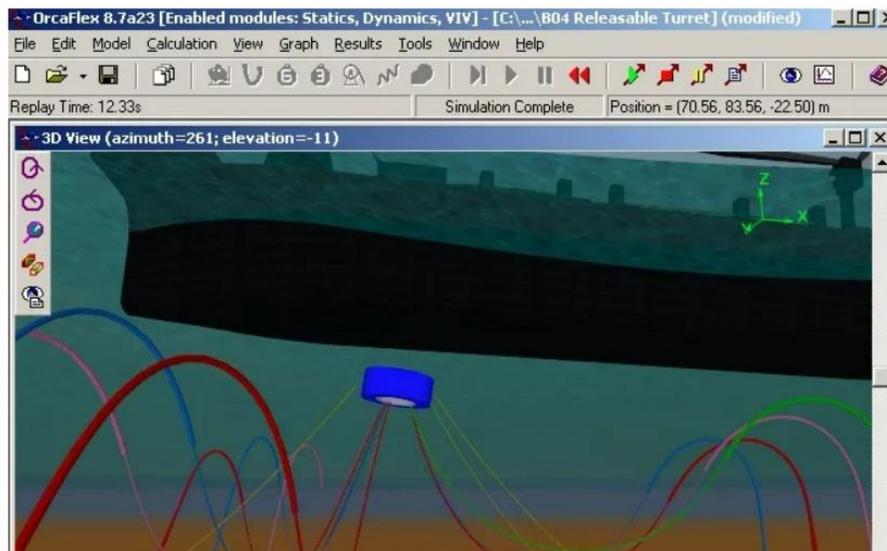
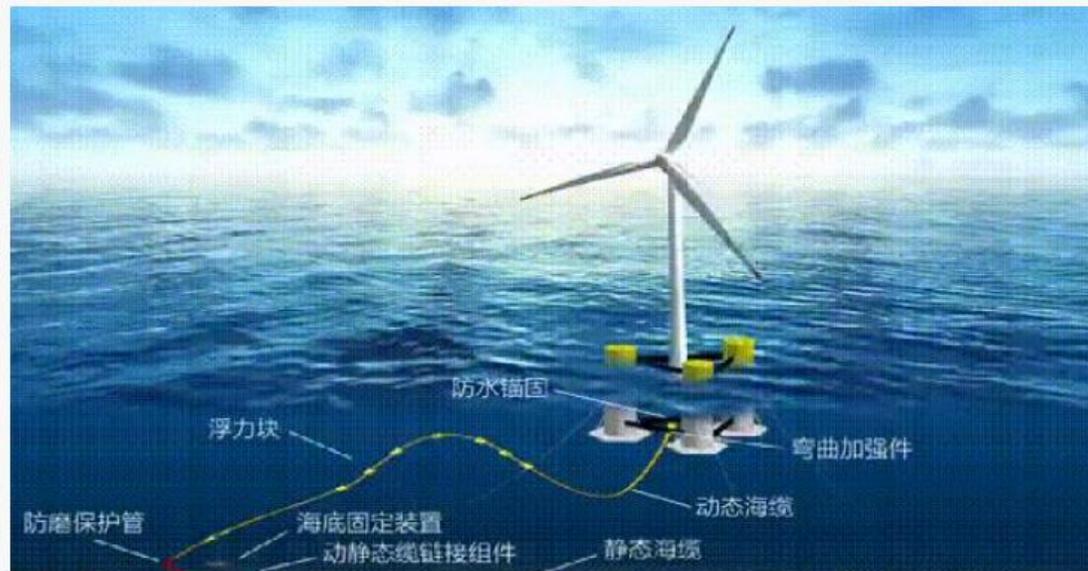
Chinese lantern
(灯笼型)

1.1 项目背景

不同构型管缆的力学性能差别很大，但目前工程中采用的管缆构型多根据经验得到，其力学性能和经济性未必是最优的，因此管缆的优化设计是必要的。

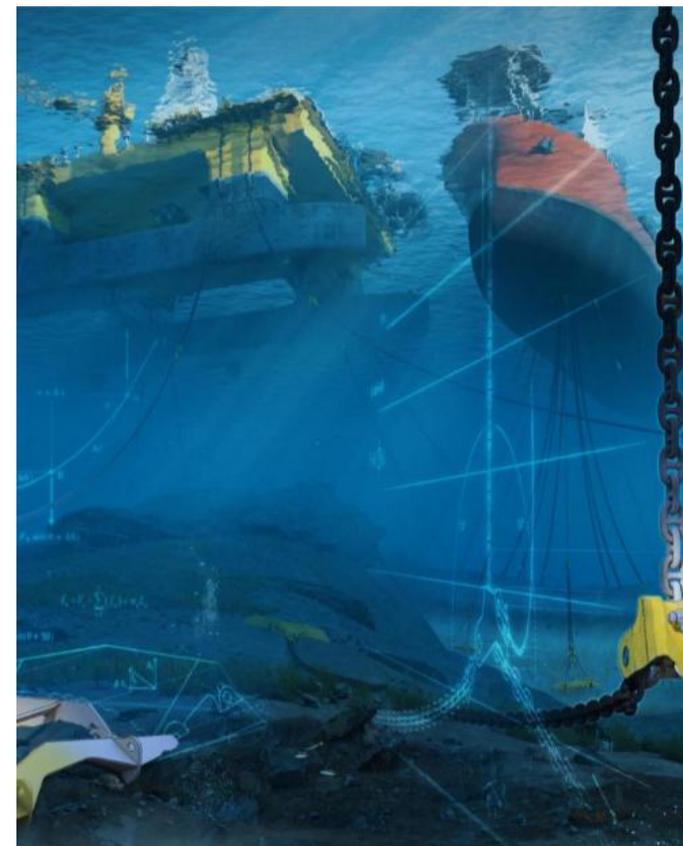
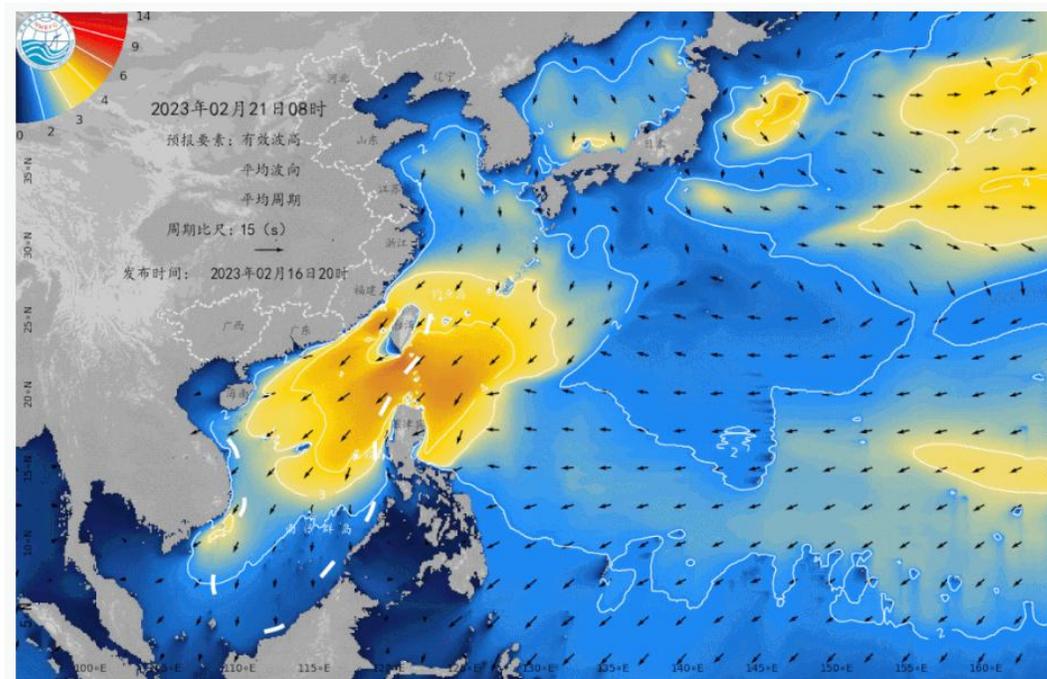
但现有的管缆受力分析软件，如Ocafex，计算时间成本非常大，模拟时间与CPU运行时间比甚至可达10:1，由此可见采用海工计算软件进行优化设计显然时不现实的。

机器学习模型为海工计算软件提供了替代的代理模型，能够显著降低计算时间，为管缆构型的优化设计提供了可能。



1.2 项目选址

本组选择南海某油田作为项目作业地址，作业油田水深**330m**，考虑百年一遇台风工况，浪和流同向。波浪为**Stokes五阶波**，并考虑近向和远向风浪流两种工况。海况参数如下：



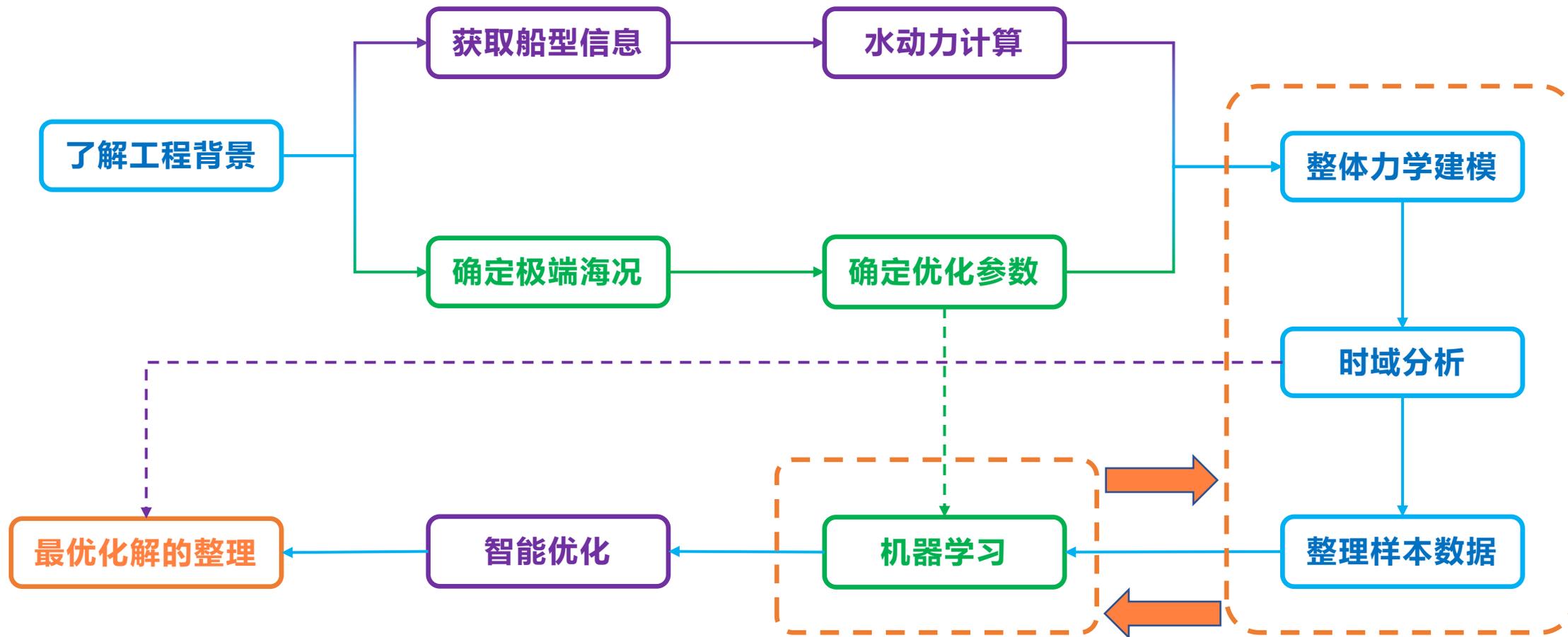
波浪		海流速度 (m/s) , h 为水深 330m										
H_{\max} (m)	T(s)	平均海平面以下 1m	0.1h	0.2h	0.3h	0.4h	0.5h	0.6h	0.7h	0.8h	0.9h	海床以上 1m
23	15	1.99	1.80	1.61	1.42	1.23	1.04	0.81	0.76	0.71	0.66	0.59

02

前期工作



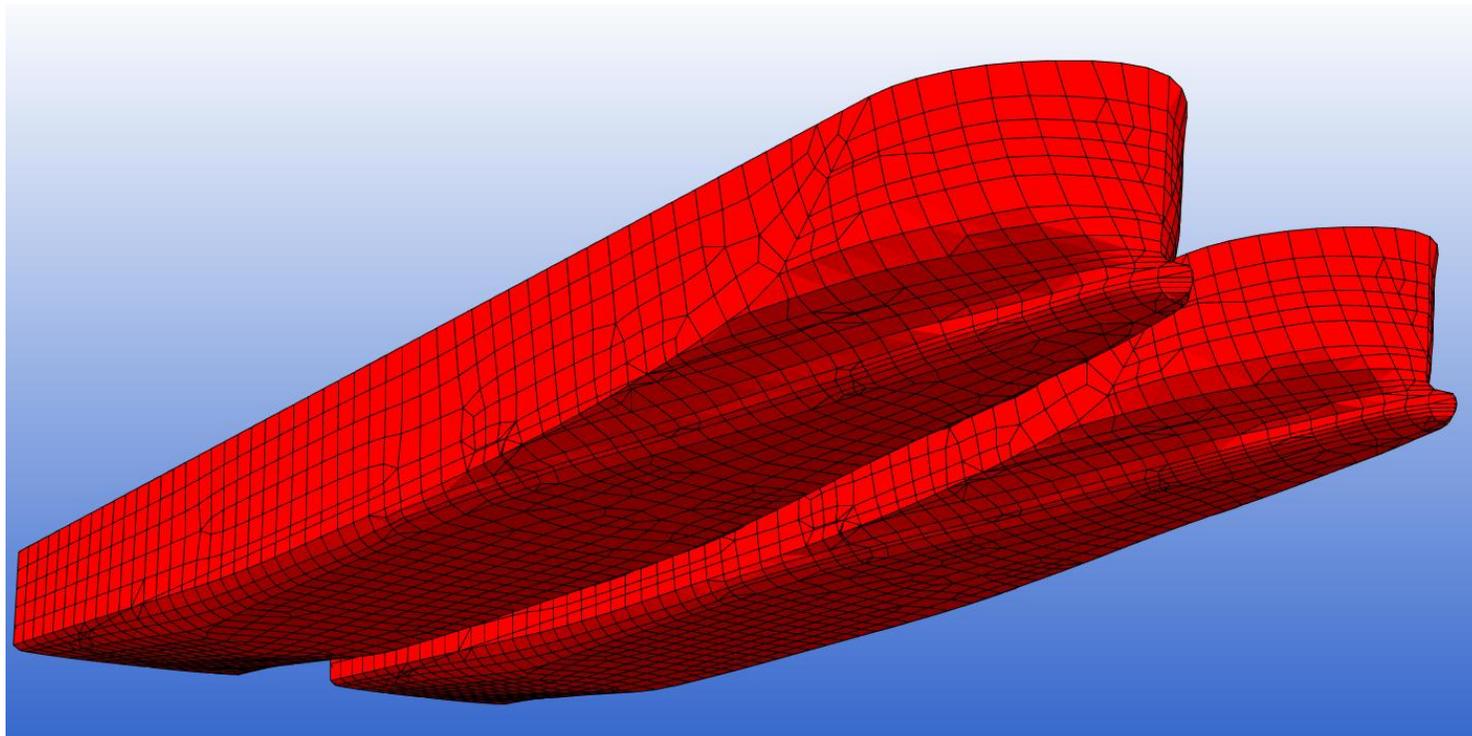
2.1 流程与分工



机器学习的代理模型替代
时域分析进行智能优化

2.2 浮体及动态管缆初步选型

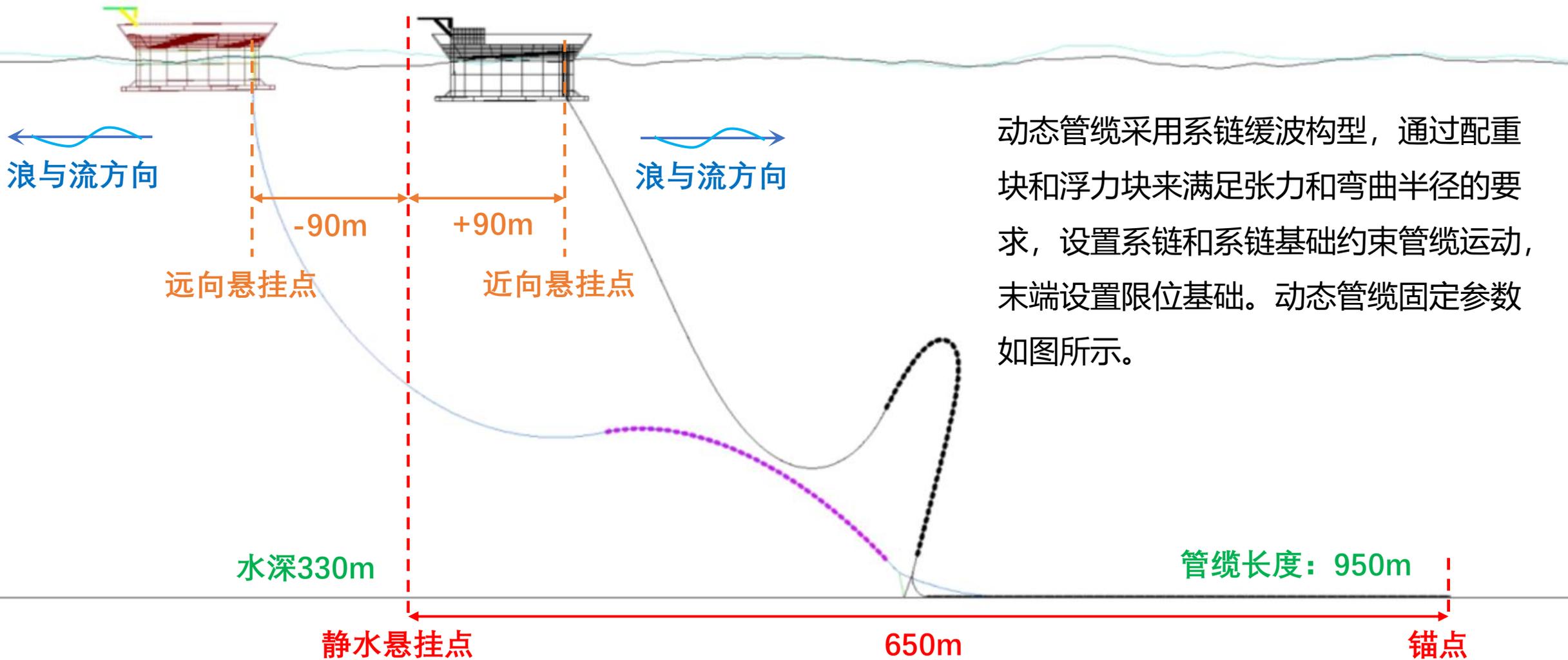
本组浮体模型来自于科研项目其他课题输入，该浮体是国内某驳船的实际模型，船体水线面处直径72m，主甲板直径82.8m，垂荡板直径90m，满载吃水14m，其主要参数如下：



总长	173.24m
垂线间长	153m
型宽	35m
型深	20
吃水	4.5m
浮心高度	-2.073m
稳性高 (COG:25m)	170.616m
稳性半径 (COG:25m)	197.689m

2.2 浮体及动态管缆初步选型

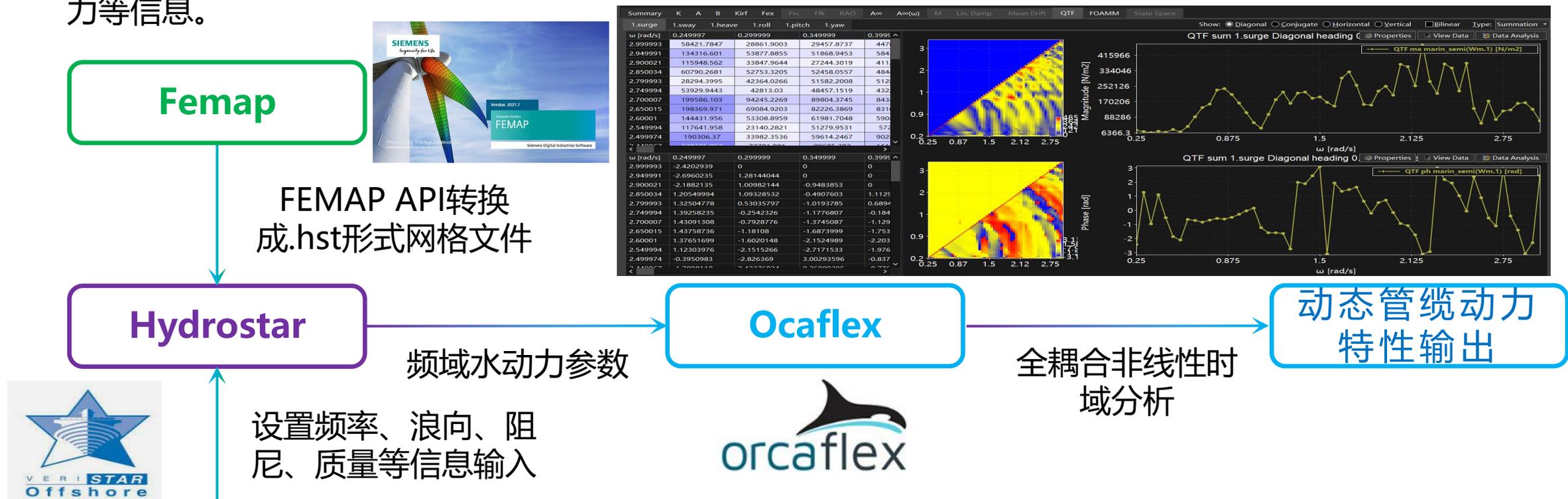
驳船的动态管缆设计



动态管缆采用系链缓波构型，通过配重块和浮力块来满足张力和弯曲半径的要求，设置系链和系链基础约束管缆运动，末端设置限位基础。动态管缆固定参数如图所示。

2.3 水动力分析

- 采用水动力频域计算软件Hydrostar计算频域水动力系数，输出的频域水动力系数将作为Orcaflex的输入进行全耦合非线性时域计算。
- 通过有限元软件femap划分网格，自主开发femap与hydrostar网格转换的API将femap中建立的网格模型转换成Hydrostar能够识别的.hst格式。网格划分完成之后，在hydrostar设置频率、浪向、阻尼、重心等信息，便可以运行输出水动力参数。
- 完成水动力参数输出后，可以利用开源软件BEMRosetta可视化并校核水动力系数，检查结构的自然频率、二阶力等信息。



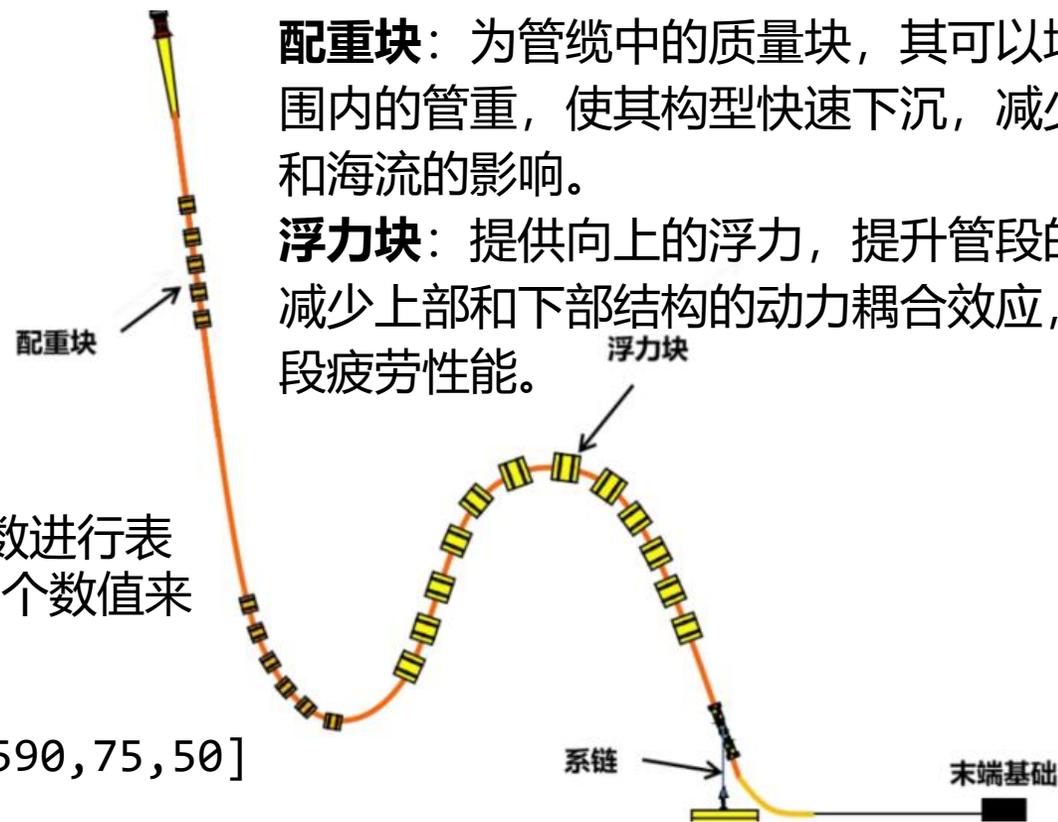
2.4 优化参数确定

优化参数

- 浮力块数量与位置
- 重力块数量与位置

经过初步设计与简化，所有重力浮力块的信息可由12个数进行表示。其分为两个重力块段及两个浮力块段，每段分别由3个数值来表示数量、起始位置和持续长度。

12*1数组: $x = [4, 6, 10, 210, 30, 50, 12, 8, 410, 590, 75, 50]$



配重块: 为管缆中的质量块，其可以增加一段范围内的管重，使其构型快速下沉，减少受到波浪和海流的影响。

浮力块: 提供向上的浮力，提升管段的位置，并减少上部和下部结构的动力耦合效应，增强触地疲劳性能。

重力块段 1	重力块段 2	浮力块段 1	浮力块段 2
重力块数量: 4	重力块数量: 6	浮力块数量: 12	浮力块数量: 8
起始位置: 10m	起始位置: 210m	起始位置: 410m	起始位置: 590m
持续长度: 30m	持续长度: 50m	持续长度: 75m	持续长度: 50m

2.5 优化目标

优化目标

- 满足力学性能要求
- 尽可能节约成本

力学性能要求：按照工程概况，选取管缆**最大允许轴向张力为490 kN**，**最小弯曲半径为2.5 m**。

成本最优化：体现在**重力块和浮力块**的数量上，**数量越小，成本越低**。而由于无法获取重力块和浮力块的确切成本，则直接采用其数量作为优化目标。

最终的优化目标为安全性能和成本指标的复合得分。其中安全性能的目标判决有助于帮助优化算法确立优化梯度目标，朝着更安全的方向进行设计，避免落入不安全设计的参数区域。

最终的优化目标由如下函数表示

$$S = \begin{cases} 0.6 \cdot s_1 + 0.4 \cdot s_2 & \text{safe} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$s_1 = 140 - n_c - n_f$$

$$s_2 = 40 \cdot \frac{R_m}{\frac{T_m}{490} \cdot 0.1 + \frac{n_f}{50} \cdot 0.6 + \frac{n_c}{20} \cdot 0.3}$$

n_c 和 n_f 为重力块和浮力块的数量;

T_m 和 R_m 分别为所有工况下的最小弯曲半径 (m) 和最大轴向张力 (kN)

若结构的计算不满足安全条件，则总得分为0。优化的最终目标则是让得分 S 最大化。

2.6 约束条件

约束条件

- 精度限制
- 重力块和浮力块位置关系
- 工程合理性

在确定优化参数和目标后，需确定优化的约束条件。

- 由于工程生产上**精度的限制**，长度一般为整数设计，因此， $x(12*1)$ 是一个正整数数组。
- 按照一般工程经验，**后一段重力段或浮力段的位置必须在前一段之后**，因此有：

$$\begin{cases} x(10) + x(12) \leq 950 \\ x(9) + x(11) \leq x(10) \\ x(4) + x(6) \leq x(9) \\ x(3) + x(5) \leq x(4) \end{cases}$$

- 根据**工程合理性**及初始测试结果，取各个参数的上下限：

参数下限： [3, 5, 0, 150, 20, 30, 12, 8, 320, 500, 70, 45]

参数上限： [6, 10, 200, 400, 75, 120, 24, 16, 550, 750, 300, 200]

2.7 模型接入



Input[1]:

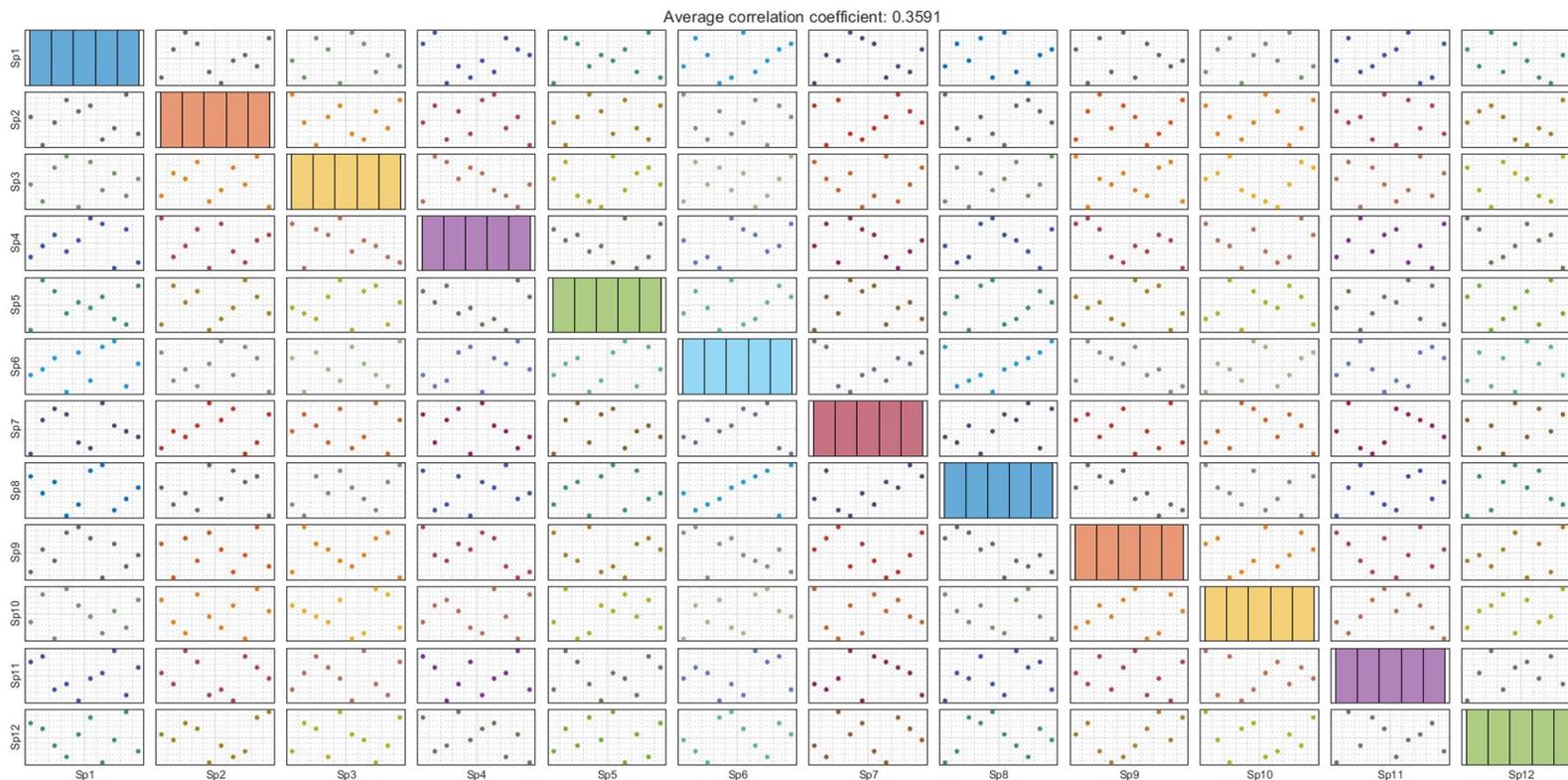
```
[4,6,10,210,30,50,12,8,410,590,75,50]
```

Output[1]:

```
All calculations completed at far Point  
All calculations completed at near Point  
Maximum Tension: 241.1 kN, Position: 0.00 m, at far Point.  
Minimum Bending Radius: 2.04 m, Position: 688.75 m, at near Point.  
Time Used:17.19s
```

2.8 参数采样

均布拉丁超立方采样(Latin hypercube sampling, LHS): 使用LHS对12*1样本空间进行采样。用该方法随机抽取10个样本, 对所有样本进行相关性分析, 得出其平均相关系数为0.3591, 说明**样本之间的相关性很弱, 质量较好**。



2.8 参数采样

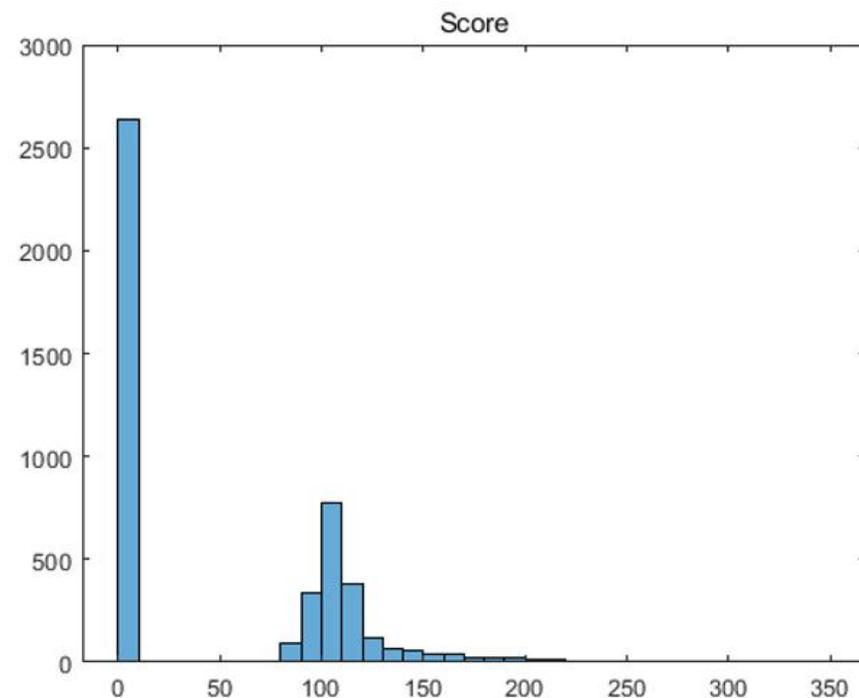
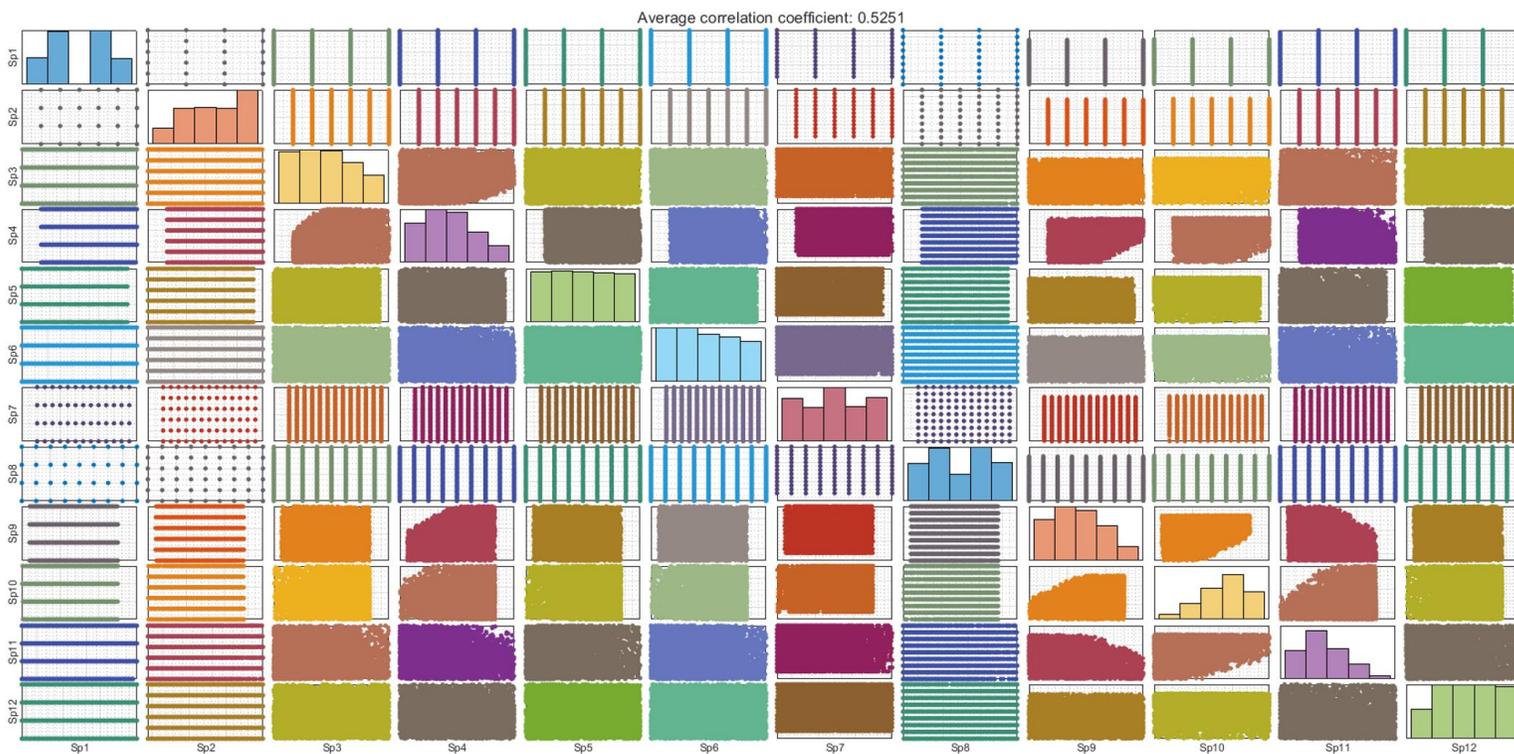
利用模型接口进行初始样本的计算



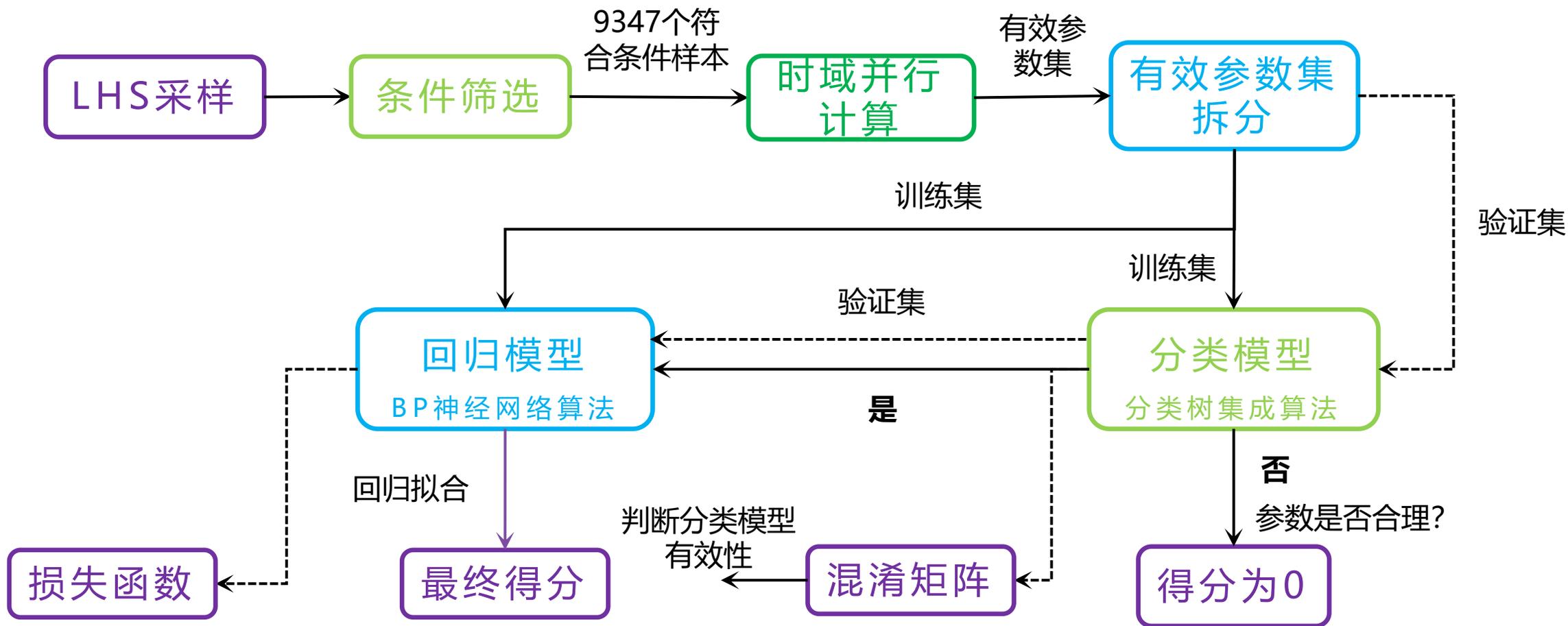
15000个随机均匀样本

仅4672个满足边界条件

充分发挥计算机多核算力

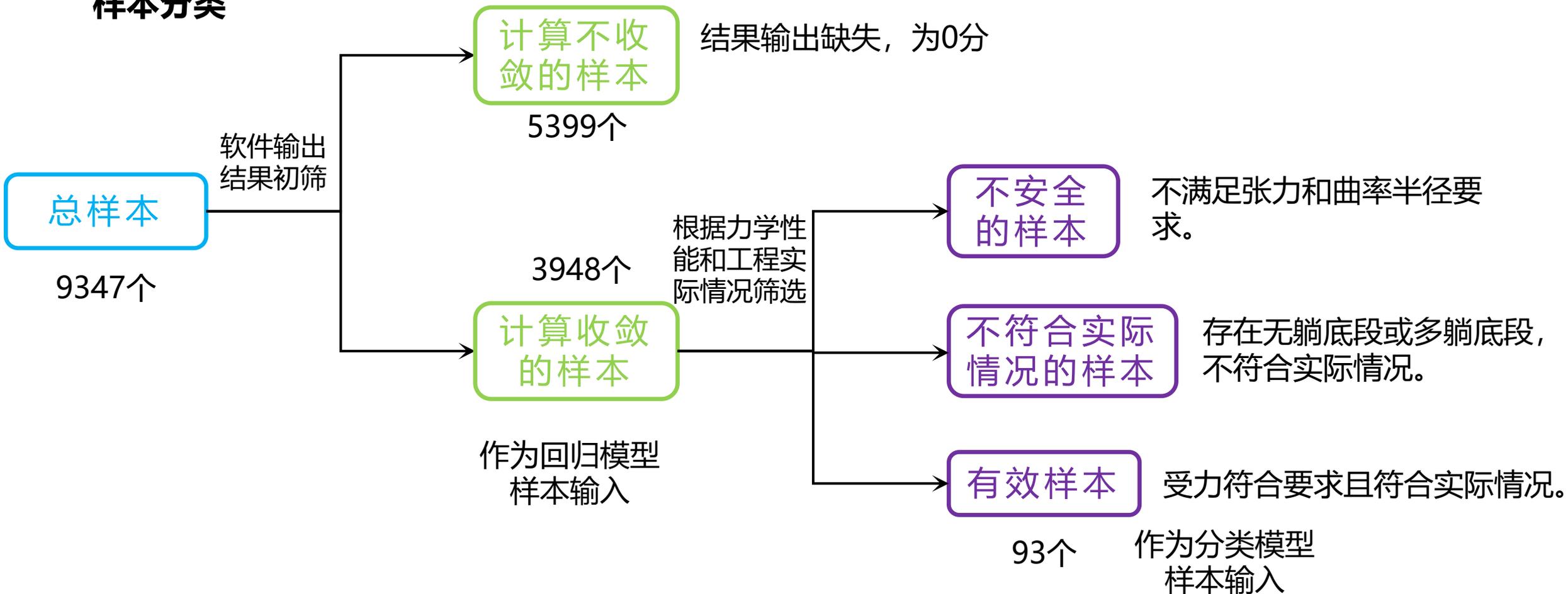


2.9 代理模型思路



2.9 代理模型思路

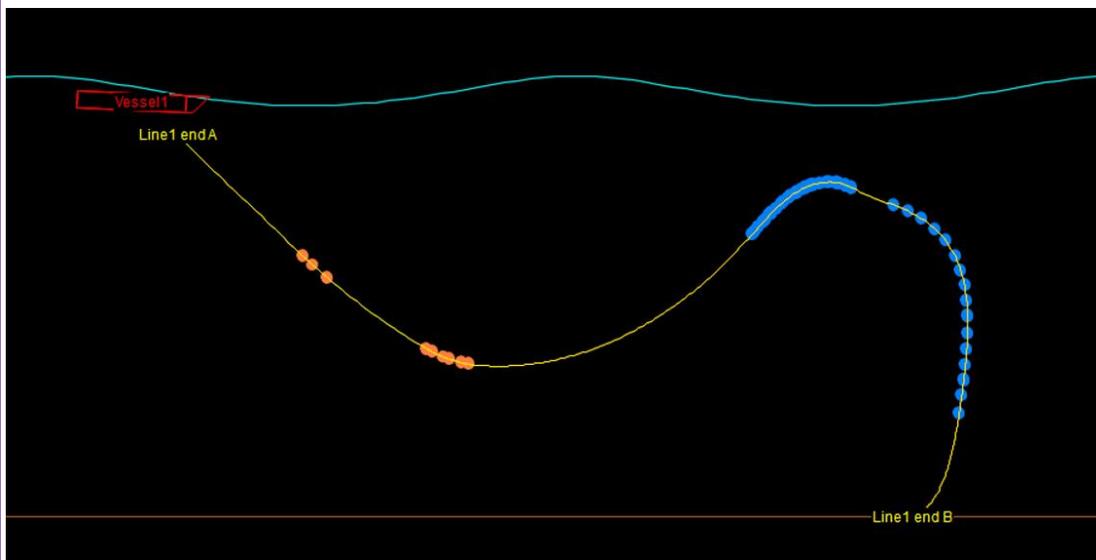
样本分类



2.9 代理模型思路

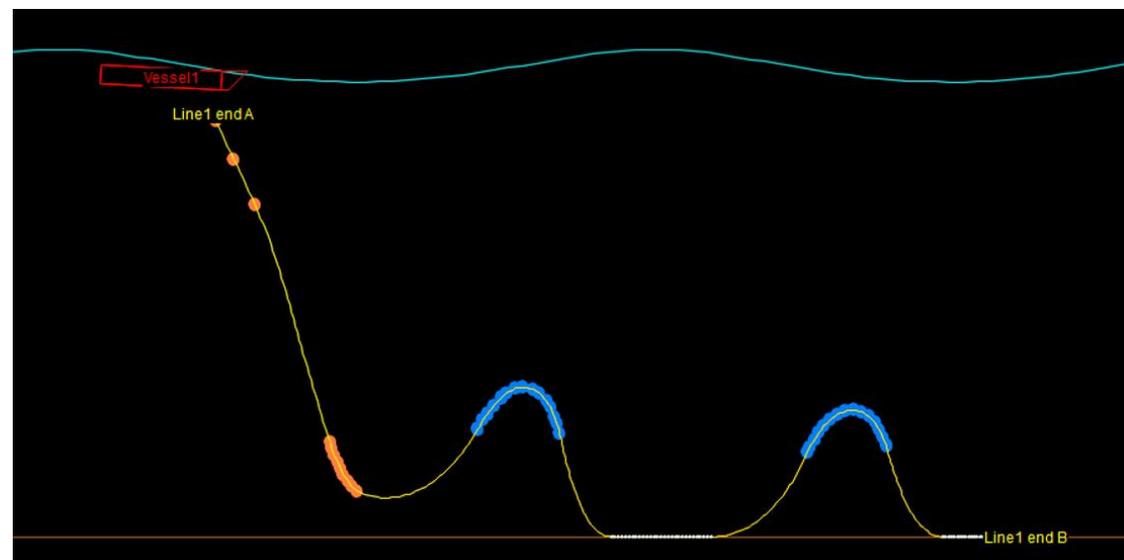
不符合实际情况的样本说明

1、无躺底段情况



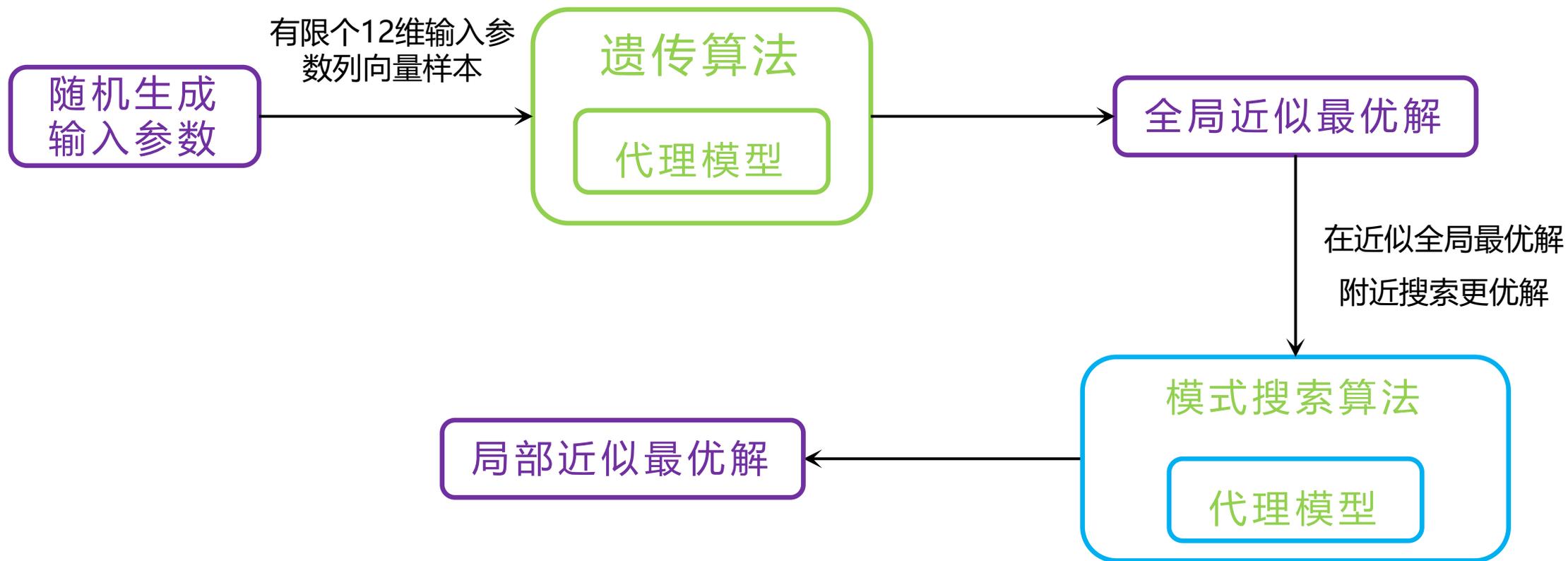
该算例的重力块和浮力块构型可以极大程度上减少曲率，最大张力和最小弯曲半径分别为260.9kN和10.94m，其最终得分达到了315.93分，但在近向情况下无躺底段，完全不符合工程实例要求，因此排除。在任何时候，线缆末端躺底段长度不足时，将安全状态设为0。

2、多躺底段情况



该算例的分散浮体段使得整条曲线的曲率最小化，其最大张力和最小弯曲半径分别为251.7kN和10.50m，最终得分为342.79分，但近向情况下存在两个躺底段，实际工程中极易导致线缆疲劳破坏，不符合实际情况，同样剔除。在躺底段多于1时，安全状态设为0。

2.10 优化思路



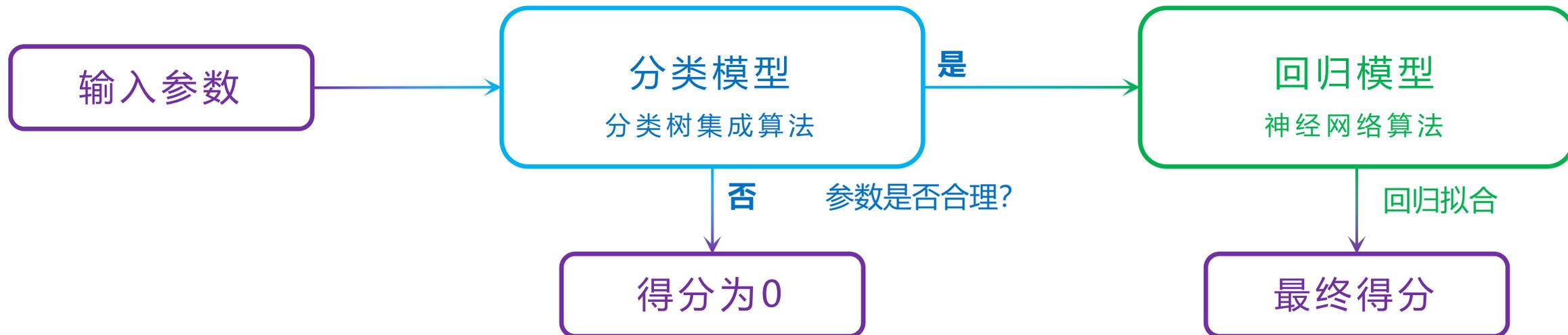
03

智能优化



3.1 机器学习代理模型

模型简述



- 机器学习代理模型一个看一眼参数就能出大致结论的专家
- 用初始采样计算的数据进行训练
- 输入1*12优化参数数组，快速得出最终分数 S
- 只要样本够多，就能又快又准

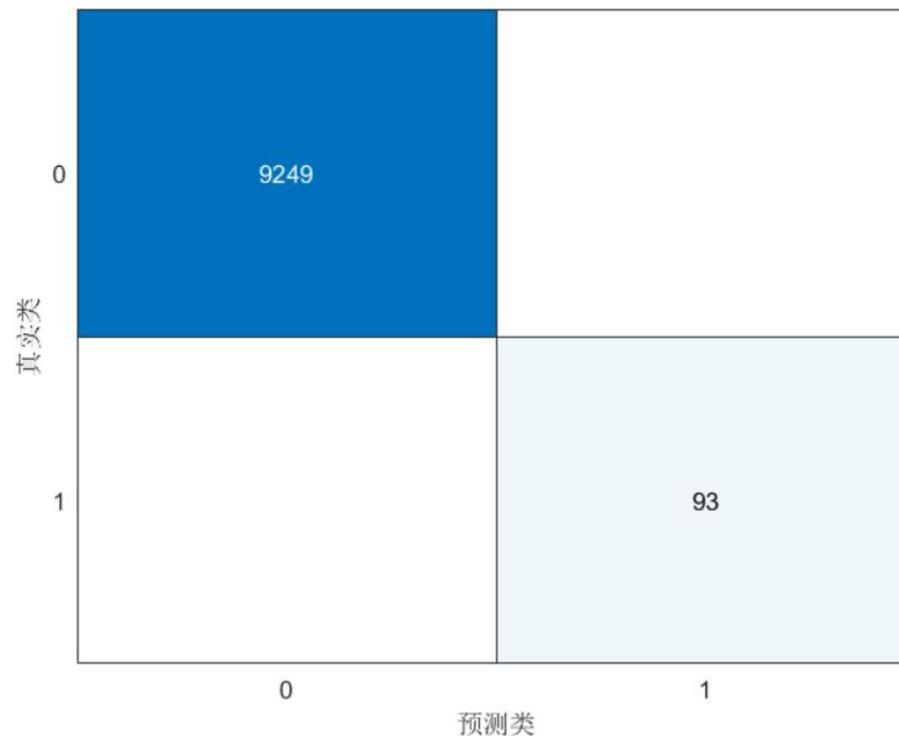
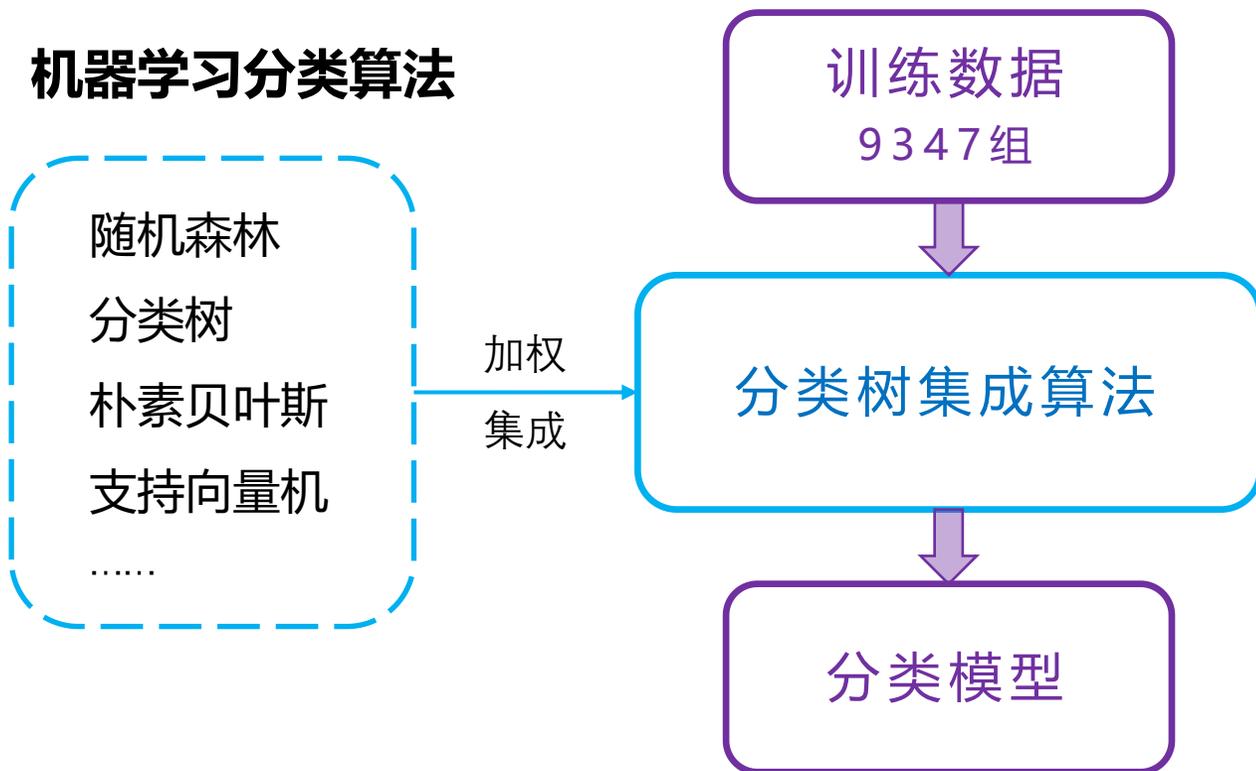
Orcaflex理论计算：准确，耗时20s

机器学习代理模型：较高准确性，<0.05s

3.1 机器学习代理模型

分类模型

机器学习分类算法



混淆矩阵

- 由于具有有效得分的样本很少，所以不适合使用带有交叉检验的算法
- 模型很可能存在过拟合问题，但在实际优化中可靠性较好

3.1 机器学习代理模型

拟合模型

如何提高拟合精度?

- 取用**MSE**损失函数，评估拟合模型误差
- 进行**5折交叉检验**，确保准确性，减少过拟合
- 进行神经网络参数的**Bayes迭代优化**，取迭代中损失函数最低的拟合模型
- 优化参数包括神经网络排布，激活函数，标准化和正则化权重

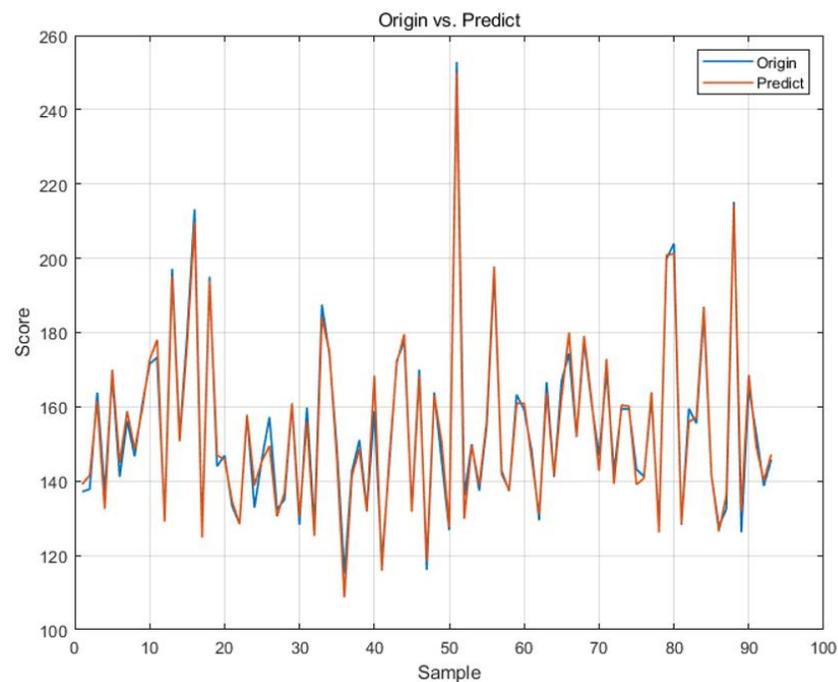
Iter	Eval result	Objective: log(1+loss)	Objective runtime	BestSoFar (observed)	BestSoFar (estim.)	Activations	Standardize	Lambda	LayerSizes
1	Best	6.5766	2.8602	6.5766	6.5766	tanh	true	8.9717e-08	13
2	Accept	6.6088	5.5256	6.5766	6.5784	relu	false	0.011778	[69 1 55]
3	Accept	6.7992	0.10857	6.5766	6.5914	tanh	true	1.7985e-08	[2 5 2]
4	Best	6.4959	1.4886	6.4959	6.5042	none	true	0.13842	[74 21]
5	Accept	6.4959	16.828	6.4959	6.4959	none	true	0.0010817	[194 26]
6	Accept	10.233	0.34188	6.4959	6.4959	none	false	8.3294e-07	[78 23]
7	Accept	6.4959	57.062	6.4959	6.4959	none	true	4.482e-07	[79 198 299]
8	Best	6.4815	29.724	6.4815	6.4816	sigmoid	true	2.8775e-07	296
9	Accept	6.5501	28.336	6.4815	6.4816	tanh	false	0.0016065	296
10	Best	6.4766	1.2808	6.4766	6.4767	relu	true	5.9623e-05	2
11	Accept	6.5859	14.894	6.4766	6.4767	sigmoid	false	7.8195e-05	126
12	Best	6.0171	114.27	6.0171	6.0177	relu	true	0.039936	[299 282 48]
13	Accept	6.5498	37.983	6.0171	6.0177	sigmoid	true	1.5051e-06	[1 37 290]
14	Accept	6.4133	22.231	6.0171	6.0179	relu	true	4.2729e-08	[2 298]
15	Accept	6.0587	51.768	6.0171	6.0163	relu	true	0.12089	[73 62 299]
16	Accept	6.7992	5.9491	6.0171	6.0164	tanh	false	1.7756e-07	[1 29 299]
17	Accept	6.7733	24.569	6.0171	6.0165	sigmoid	false	3.3474e-07	[1 259 264]
18	Accept	6.1458	77.465	6.0171	6.0622	relu	true	1.2907e-06	[242 73 244]
19	Accept	6.1008	38.804	6.0171	6.0206	relu	true	15.645	[298 15 2]
20	Best	5.9101	94.272	5.9101	5.9535	relu	true	3.2141	[215 191 153]
21	Accept	5.9447	187.96	5.9101	5.9319	relu	true	7.4091	[261 300 195]
22	Accept	6.0473	85.722	5.9101	5.964	relu	true	11.944	[273 162 76]
23	Accept	6.3661	47.906	5.9101	6.0152	relu	true	16.596	[10 176 117]
24	Accept	6.483	55.829	5.9101	6.0202	relu	false	0.0051287	[1 297 38]
25	Accept	10.934	0.32722	5.9101	6.0176	none	false	48.894	1
26	Accept	6.4959	0.099865	5.9101	6.0175	none	true	5.763e-09	1
27	Accept	9.2632	11.325	5.9101	5.9763	tanh	true	22.245	[300 20 1]
28	Accept	6.7992	0.063363	5.9101	5.9893	tanh	true	1.576e-08	1
29	Accept	7.9036	1.4004	5.9101	5.9851	sigmoid	true	48.116	[264 42]
30	Accept	6.7419	0.85033	5.9101	5.9886	relu	false	5.0083e-09	[1 20]

拟合模型训练过程

3.1 机器学习代理模型

最终拟合模型参数	
神经网络排布 LayerSize	[215,191,153]
激活函数 Activation	Relu
是否标准化 Standardize	True
正则化权重 Lambda	3.2141

拟合模型



拟合模型结果检验

- **标准化 (Standardization)** : 对原始数据进行正态分布标准化处理, 使得不同特征之间的数值数量级相同, 防止因为不同特征数值差异而导致的不利影响。
- **正则化权重 (Lambda)** : 通过权重衰减来防止神经网络的过拟合。Lambda越大, 正则化程度越高, 模型复杂度越低, 对于降低过拟合效果也就越好。但过高的lambda会导致模型欠拟合的问题。

3.2 智能全局优化求解

优化简述



➤ 12维输入参数空间

- 参数量巨大，无法遍历
- 参数存在复杂约束条件
- 输入到输出计算复杂
- 使用代理模型替代计算

➤ 确定目标 S 取得最大值的位置

- 全局优化搜寻最优解可能的位置
- 局部优化在该位置附近寻找最优
- 二者结合，多次调用

3.2 智能全局优化求解

计算个体得分

样本	1	2	3	...	N	MAX	SUM
得分	120	180	300	...	150	300	3000
标准得分	0.4	0.6	1.0	...	0.5	1	10

适者生存

存活率 $\beta = 20\%$

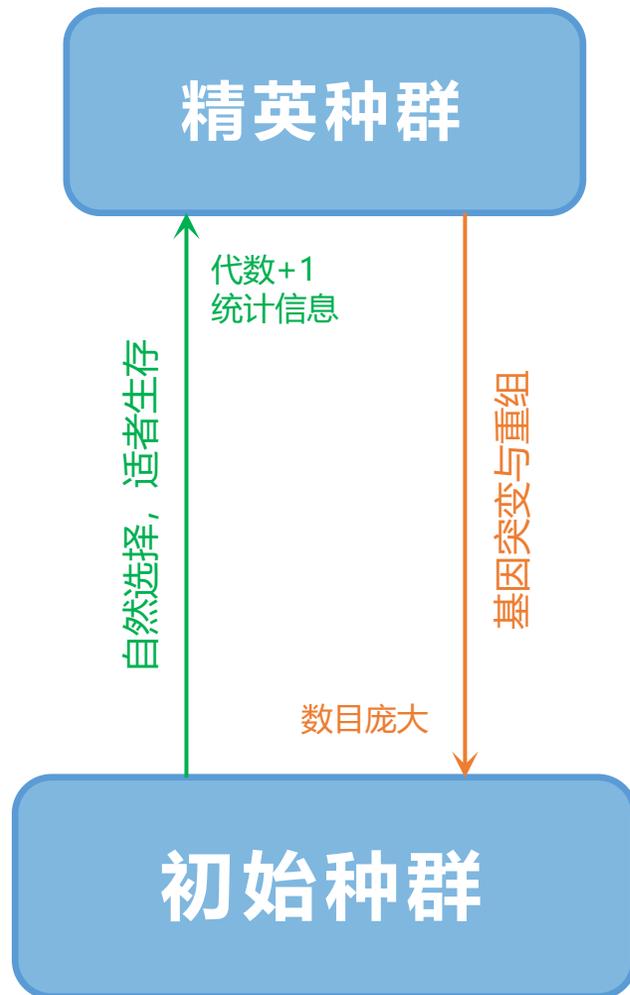
初始样本 $N = 20$

存活率指数

$$\eta = \frac{\beta N}{\text{Sum}(S_N)} = 0.4$$

样本	1	2	3	...	N	预计存活: 4
生存概率	16%	24%	40%	...	20%	对最优样本3 采取保护措施
是否生存	0	0	1		1	

全局优化-遗传算法



原始输入参数

[4, 6, 10, 210, 30, 50, 12, 8, 410, 590, 75, 50]

基因突变

[4, 8, 10, 210, 41, 50, 12, 8, 410, 590, 75, 47]

[4, 7, 10, 210, 30, 50, 12, 8, 403, 590, 75, 53]

.....

基因重组

[4, 7, 10, 210, 30, 50, 12, 8, 410, 590, 75, 47]

[4, 8, 10, 210, 30, 50, 12, 8, 410, 590, 75, 53]

.....

边界条件筛选、数量确认

3.2 智能全局优化求解

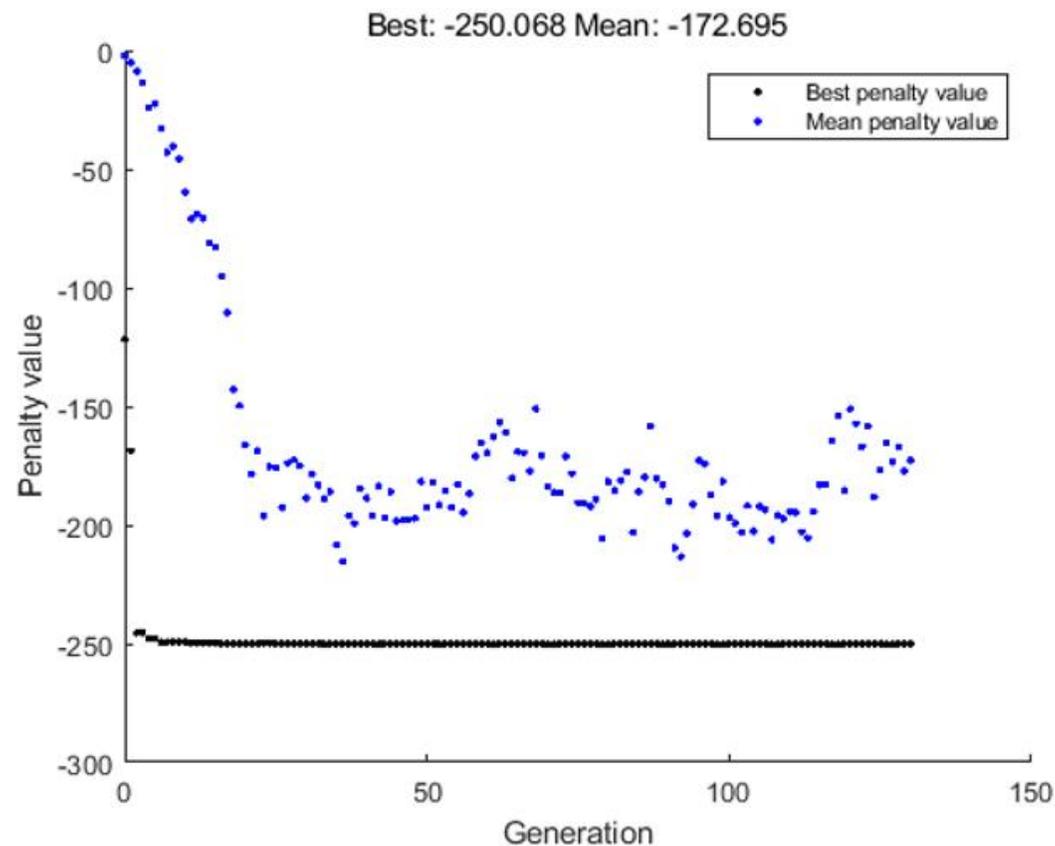
➤ 全局优化结果

- 遗传到第**130**代达到收敛
- 共调用代理模型**12456**次
- 预测最优得分：**250.068**
- 实际最优得分：**252.80**
- 最优构型参数：
[6, 9, 150, 246, 75, 120, 21, 15, 476, 743, 108, 66]

➤ 可重复性

- 全局优化算法具有**较大的随机性**，相同输入条件下会得出不同的结果
- 实际情况下需要进行**多次优化**，结合所有结果并取**最优解**

全局优化-遗传算法

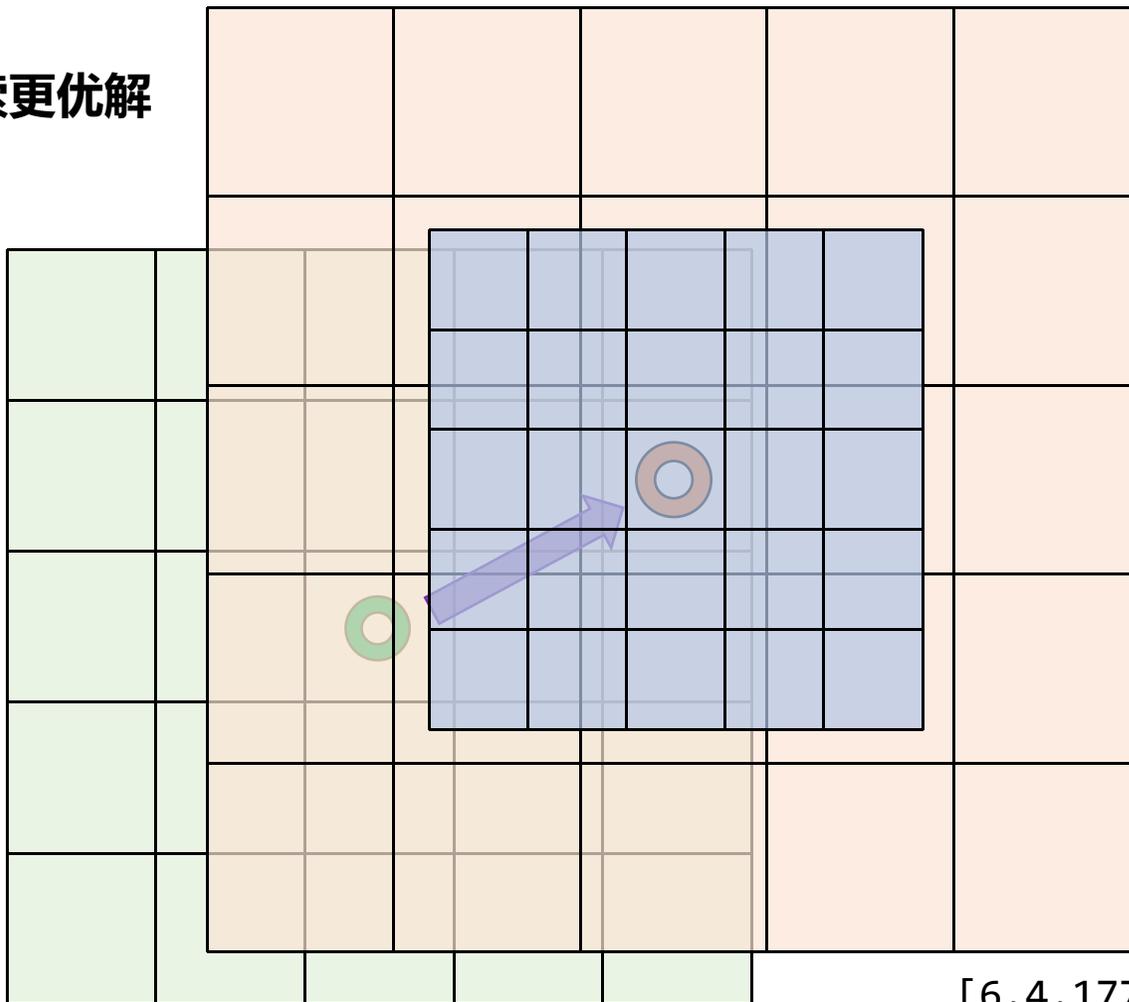
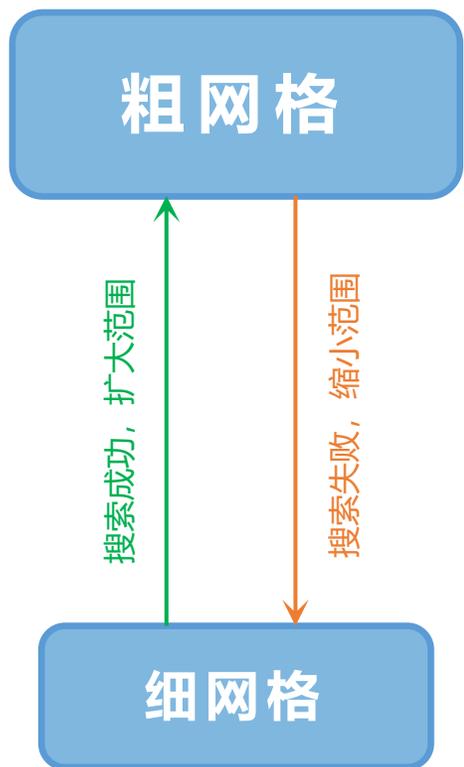


遗传算法迭代过程

3.2 智能全局优化求解

局部优化-模式搜索

- 在近似全局最优解附近搜索更优解



输入参数

- 初始网格大小: 25
- 收敛大小: 1.0

输出结果

- 迭代次数: 29
- 代理模型调用次数: 339
- 预测最优得分: 261.0707
- 实际最优得分: 274.01
- 构型参数:

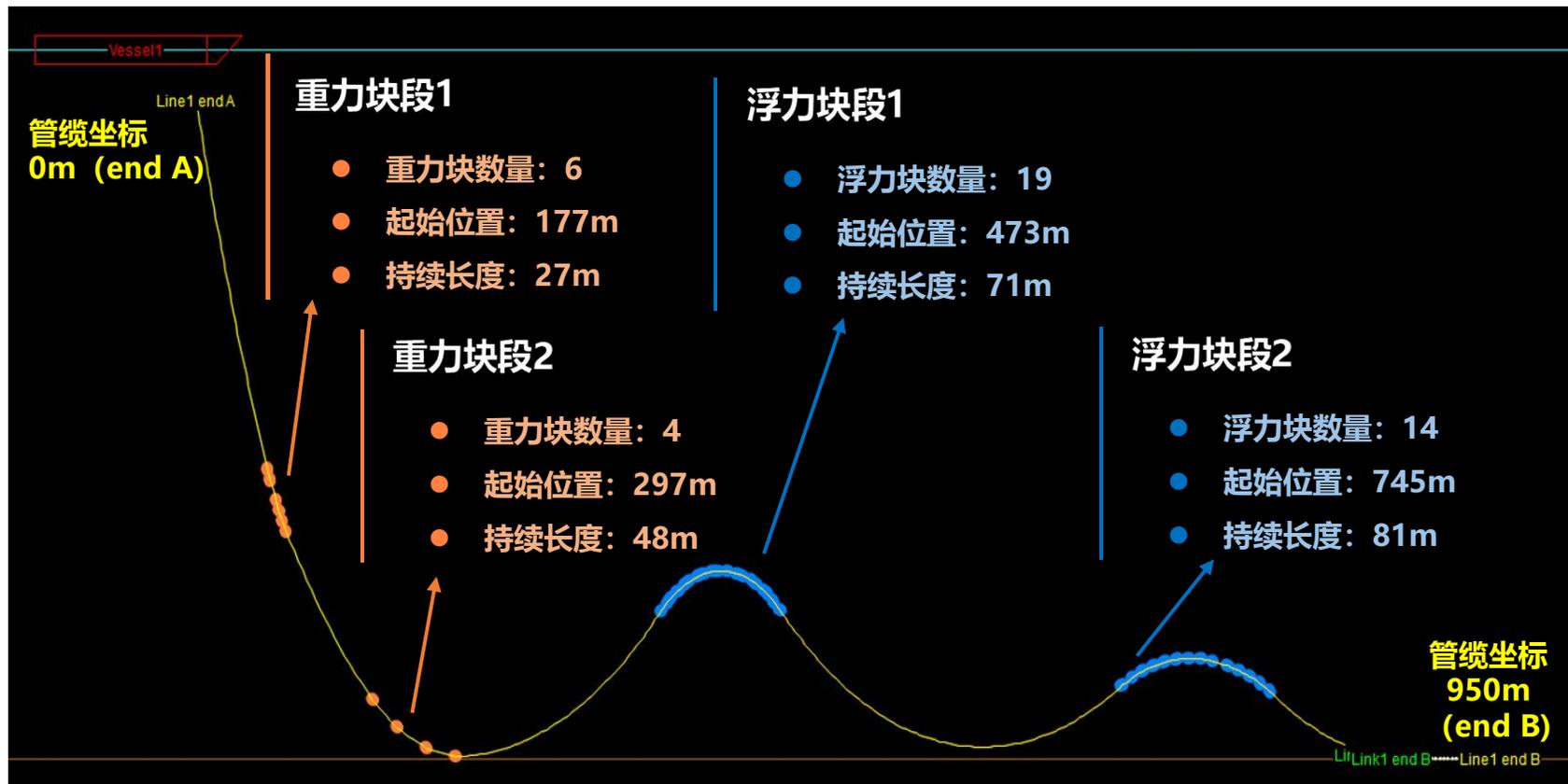
[6,4,177,297,27,48,19,14,473,745,71,81]

04

最优化构型



4.1 最优化构型参数



设计&性能参数

- 浮力块总数: 33
- 重力块总数: 10
- 最大轴向张力: 249.15 kN
- 最小弯曲半径: 7.95 m
- 最终得分: 271.42

平台中性位置 (x=0) 静态管缆构型

4.2 构型特点

力学性能

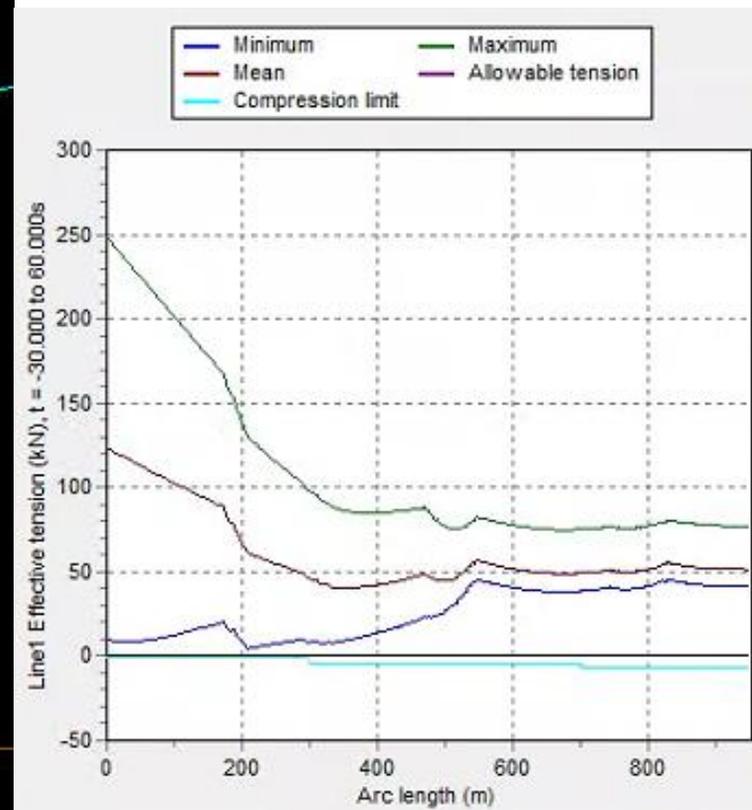
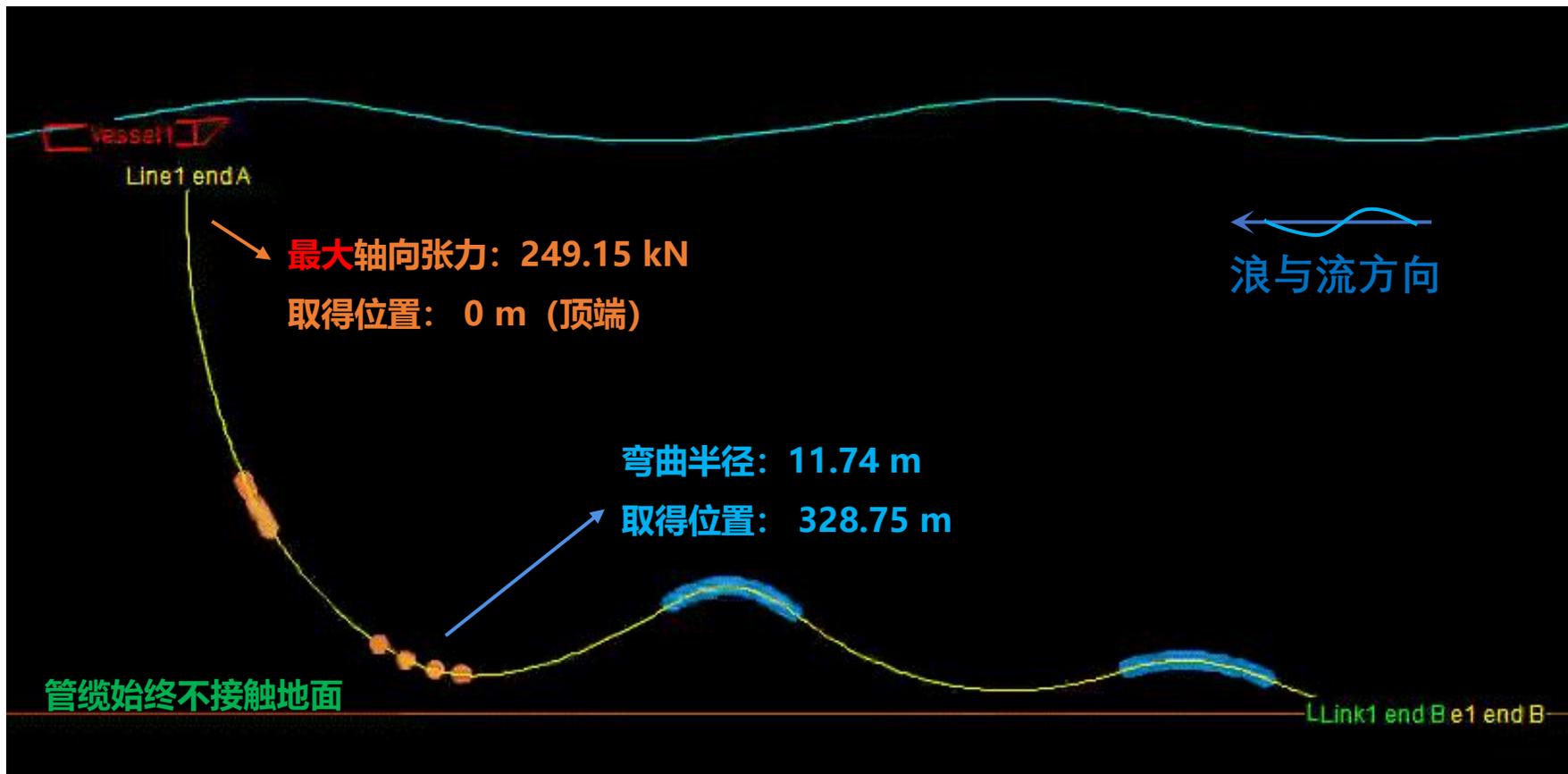
- 整体结构受力拥有足够安全冗余
- 最大轴向张力249.15 kN，远小于极限张力490 kN
- 远向工况下线缆几乎被拉直，提供轴向张力
- 最小弯曲半径7.95 m，远大于极限弯曲半径2.5 m
- 多位置共同承担较大弯矩，充分发挥材料性能
- 近向工况下有足够的躺底段，不会发生堆积盘绕

耐波性能

- 极端海况下管缆触地点位置相对固定，系链始终张紧
- 重力块的布置增加管缆起始处配重，减小其受到浅水波浪和流的影响，优化受力构型
- 浮力块的分段布置将管缆构型压至低位，避免浅水波浪和海流的影响，达到很好的动力解构效应
- 双玻构型的使用有效消耗了线缆长度，管缆有足够躺底长度，整体动力性能明显优于单波构型。

- 根据所选海况，最优化构型在不同的浪与流方向下，有不同的动力特性
- 分别选取0°近向和180°远向两种工况，对最优化构型得分进行验证。

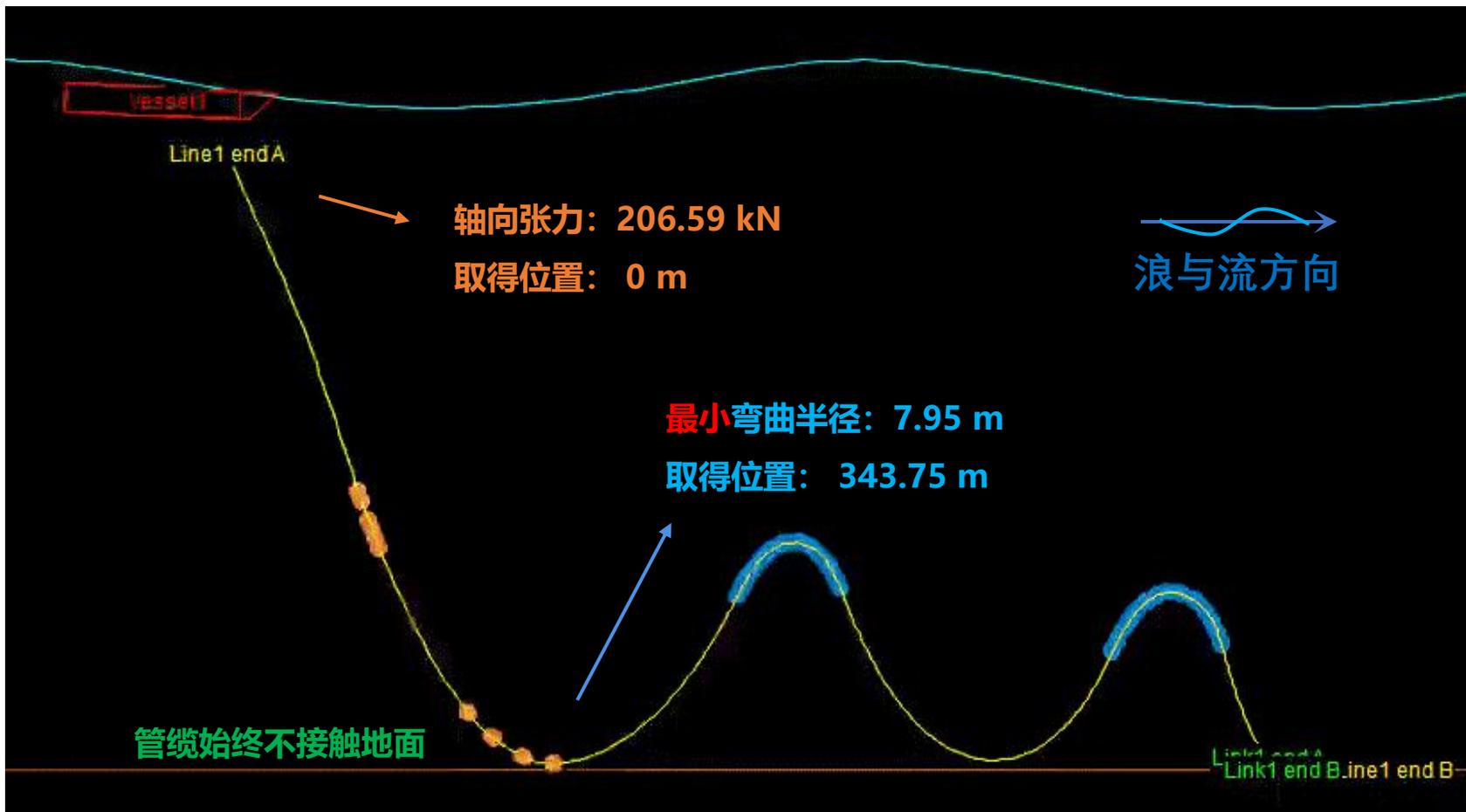
4.3 远向位置工况优化结果



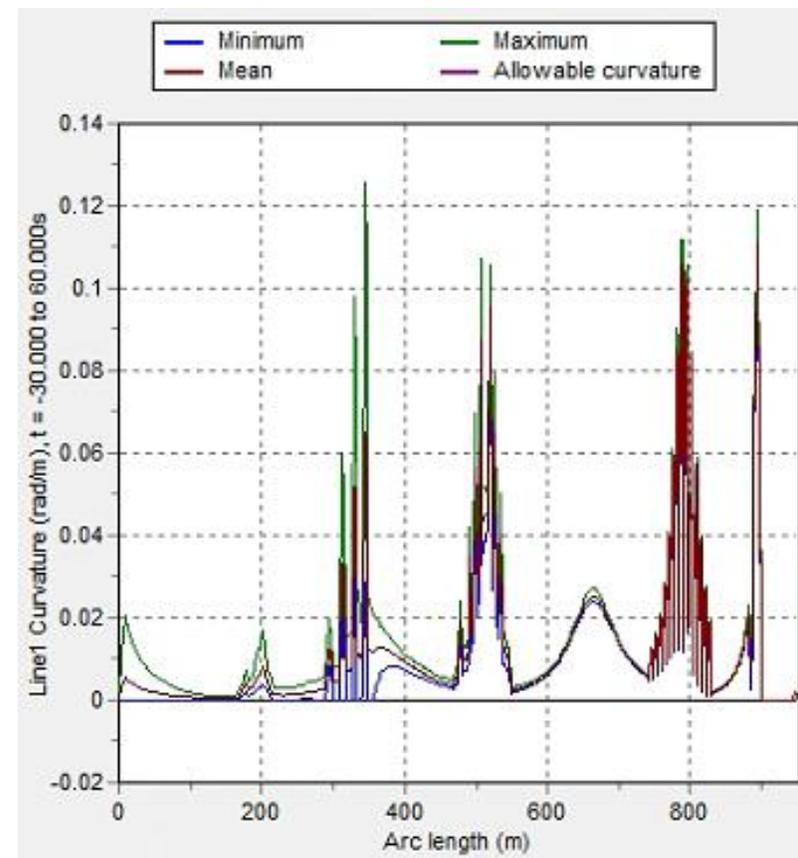
平台远向位置 (x=-90) 的动态构型 (百年一遇台风海况)

张力包络图

4.4 近向位置工况优化结果



平台近向位置 (x=+90) 的动态构型 (百年一遇台风海况)



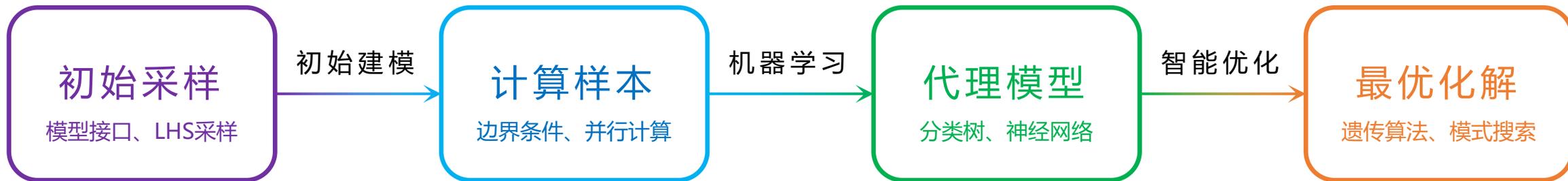
曲率包络图

05

总结与展望



5.1 项目总结



项目亮点

- 双波形构型的尝试与采用
- 自动化批量计算模型的使用
- 机器学习和代理模型的使用
- 多种优化算法结合的优化过程
- 一整套优化流程的实践与应用

未来展望

- 更多的采样样本和覆盖面
- 更高效的样本筛选与计算算法
- 更高级机器学习方法的应用
- 针对特定问题的改良优化算法

5.2 未来应用前景

01



大型船舶系泊系
统的设计与开发



02



浮式风机电缆系
统的设计与开发



03



采油平台立管系
统的设计与开发



04



海洋无尽的可能



THANKS FOR WATCHING

感谢观看

| 汇报人：王辰宇、杨磊 | 时间：2023.06.02



清华大学深圳国际研究生院
Tsinghua Shenzhen International Graduate School