

· 港口 ·

高桩结构全工况包络优化设计方法及应用*



张丽媛¹, 陈文明¹, 于忠涛¹, 王亚军²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 浙江海洋学院 海运与港航建筑工程学院, 浙江 舟山 316000)

摘要: 高桩结构形式在海港工程中应用广泛, 结构设计需要考虑复杂的荷载和繁多的工况组合, 进行全工况包络计算往往需要付出巨大的代价, 如果受计算时间、计算条件的限制进行简化, 则会错过最危险工况或降低计算精度。鉴于此, 提出了自动化全工况包络优化设计方法, 并结合 SQLite 与 Python 开发了相应的自动化管理与计算平台。该方法基于通用计算程序对独立荷载的计算结果, 首先对广义均载、广义流机荷载的分布多态性进行预处理, 降低计算复杂度, 再通过 n 维空间的笛卡尔积和矩阵运算分别计算全工况组合列表和离散位置的荷载作用效应, 最后输出全工况包络图。该方法能够大幅提高计算效率, 为高桩结构构件的高效化、精细化设计奠定了技术基础。

关键词: 水运工程; 高桩结构; 优化设计; 组合工况; Staad

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0050-05

Optimization method and application of full load case and location on open-type wharf

ZHANG Li-yuan¹, CHEN Wen-ming¹, YU Zhong-tao¹, WANG Ya-jun²

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. School of Maritime and Civil Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China)

Abstract: The open-type wharf is widely used in port engineering. Due to the complexity of load combinations, calculation that covers full load combinations usually costs a lot of time. When simplification is applied, accuracy will be sacrificed or most dangerous load combination may be missed. An automatic calculation method is put forward and corresponding data management platform is built on SQLite and Python. Load effect is calculated on single effect by Staad. First of all, the distribution polymorphism of generalized uniform and generalized mobile loads is dealt with, then the load effect of discrete position of all members is computed. Envelope diagram is the final output of this method. The method greatly reduces computational complexity and highly increases efficiency. The achievement of this article makes refined and accurate design possible.

Keywords: port and waterway engineering; open-type wharf; optimized design; load combination; Staad

1 概述

高桩结构是沿海码头的常用结构形式之一^[1], 由桩、梁、板等构件构筑而成, 其结构预制程度高、施工期短, 尤其适用于软弱地基^[2]。高桩结构设计分为承载能力使用状态和正常使用极限状态两阶段, 以持久状况持久组合和持久状况准永久组合为例, 作用效用与结构抗力需要满足

式(1)~(3)^[3-4]:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1)$$

$$S_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} C_{Gi} G_{ik} + \gamma_P C_P P + \quad (2)$$

$$\gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1k} + \psi_0 \sum_{j=2}^n \gamma_{Qj} C_{Qj} G_{jk}$$

收稿日期: 2016-01-05

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51109118)

作者简介: 张丽媛 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事海港码头和内河航运方面的研究。

$$S_d = \sum_{i=1}^m G_{ik} + P + \psi_0 \sum_{j=1}^n G_{jk} \quad (3)$$

各参数的含义见表 1。

表 1 参数说明

符号	含义
γ_0	结构重要性系数
S_d	作用效应设计值
R_d	抗力设计值
γ_{Gi}	第 i 个永久作用的分项系数
$C_{Gi}, C_p, C_{Q1}, C_{Qj}$	第 i 个永久作用、预应力、第 1 个和第 j 个可变作用的作用效应系数
G_{ik}	第 i 个永久作用的标准值
γ_p	预应力的分项系数
P	预应力的标准值
γ_{Q1}, γ_{Qj}	第 1 个和第 j 个可变作用分项系数
Q_{1k}	持久组合中, 主导可变作用标准值
ψ_0	可变作用组合系数
Q_{jk}	第 j 个可变作用的标准值

式(1)~(3)对计算提出了 3 点要求: 1) 计算所有可能遭遇的荷载、荷载组合。由于高桩结构遭遇的荷载种类繁多^[5], 理论上至少应计算 2^n 种荷载组合, n 为结构可能遭遇的可变荷载数量。特别地, 对于分布或作用位置并不确定的可变荷载(如均载、流动机械荷载等), 应先列出其所有可能的分布形式, 再将每种分布形式分别与其他可变荷载进行组合, 这样计算工况数远远超过 2^n 。2) 式(2)、式(3)对作用效应设计值的计算适用于构件内所有截面位置, 即应对结构进行离散, 按照包络图设计。3) 所有截面位置在所有工况下的计算结果均要满足式(1)的要求。

综上所述, 若要得到全工况的包络计算结果, 至少需要求解 $m \times n_{member}$ 个位置在 2^n 种工况下的荷载作用效应, 其中 m 为单个分析对象离散的子结构数目、 n_{member} 为分析对象总数。如果受到计算手段、数据处理能力的限制而采取简化方法, 例如忽略部分荷载组合或是降低离散精度, 则可能错失最危险工况、降低结果的可靠性。

针对上述问题, 本文提出了全工况包络优化设计方法, 并开发了相应的自动化数据管理与计算平台。该套方法首先计算单一荷载的荷载作用

效应, 继而处理广义均载、广义流机荷载的分布多态性问题, 降低计算复杂度, 最后通过 n 维空间向量积及矩阵运算计算全工况列表及离散位置荷载作用效应, 得到包络图。该优化设计方法及计算平台可应用于二维、三维计算模型, 适用于各类高桩结构构件在各种工程状态下的设计计算。平台基于 Python 语言和 SQLite 数据库开发, 工程数据能够得到科学有序的管理, 方便更深入的研究与优化。

2 优化设计方法

全工况包络优化设计方法流程见图 1。该方法主要由 5 部分组成: 结构离散、单荷载作用效应计算、数据库处理、全工况包络算法、统计分析。最终输出全工况包络图等统计分析结果。

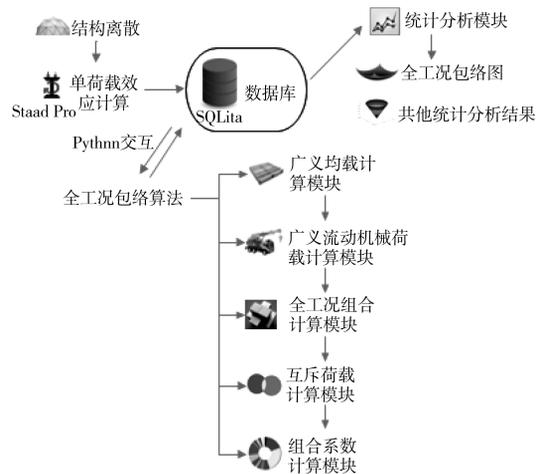


图 1 全工况包络设计方法流程

结构离散是包络算法的几何保障, 离散程度由荷载形式和计算精度决定。Staad. Pro^[6-7]通用结构力学分析软件, 能够快速准确地计算独立荷载的作用效应。SQLite^[8]是开源的嵌入式数据库, 用它对计算结果进行管理, 系统开销小、检索效率高。全工况包络算法能够对广义均载、流机荷载的分布多态性进行预处理, 利用 n 维空间笛卡尔积列出所有可能的工况组合。包络算法按照全工况列表对离散位置的荷载作用效应进行矩阵运算。统计分析模块基于全工况包络算法的最终结果, 分析全局或重点构件的最大荷载作用效应等。

2.1 全工况组合法

记均载及其荷载作用系数为 Q_U, γ_U ，流机荷载及其荷载作用系数为 Q_C, γ_C ，其余可变荷载及其荷载作用系数为 $Q_i, \gamma_{Qi}, i \in [1, n]$ 、 n 为可变荷载总数。全部荷载组合可以表示为 $n+2$ 维空间上的向量积： $[0, Q_1] \times [0, Q_2] \times \dots \times [0, Q_n] \times [0, Q_U] \times [0, Q_C]$ ，为 $[2^{n+2}, n+2]$ 的二维矩阵，行向量为荷载组合。若某荷载组合中考虑可变荷载 Q_j ，则行向量的第 j 个元素值标记为 Q_j ，反之标记为 0。遍历该矩阵，删除含有互斥荷载对的组合并将永久荷载添加至每项荷载组合最前端，得到相容工况列表。

相容工况列表还需补充各项荷载的系数信息才可按照公式(2)、(3)进行运算。若计算模式为承载能力极限状态，依次指定 $Q_i (i \in [1, n])$ 、 Q_U, Q_C 为主导可变荷载，并将荷载分项系数 γ 、荷载组合系数 ψ 信息补充到每一项荷载组合中；若计算模式为正常使用极限状态，则对所有可变荷载补充荷载组合系数 ψ ，最终得到全工况组合列表。全工况组合算法流程见图 2。

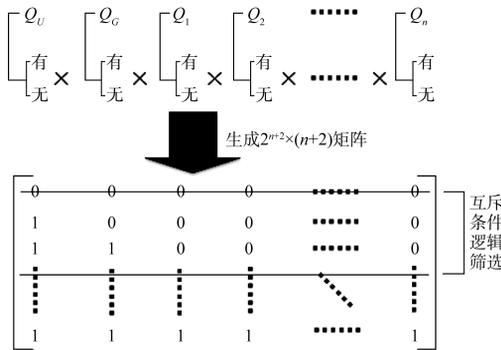


图 2 全工况组合算法流程

2.2 广义均载计算方法

广义均载的形式不仅是均匀荷载，也可以是集中荷载、三角荷载、梯形荷载等。其作用范围为整个结构或某些特定位置，即存在分布多态性。例如码头上的堆货，可能放置于整个码头面，也可能只集中堆放在某些位置。通常无法直接判断哪种分布形式对结构最为不利。在全工况组合计算模块中，广义均载被标示为 Q_U ，即被看作只具一种分布形式的单一荷载。本模块旨在将多态的

均载作用效应转化为单一荷载效应。

类似于 2.1 节全工况组合列表的计算方法，由 $[0, u_1] \times [0, u_2] \times \dots \times [0, u_{n_{QU}}]$ 可得到均载全分布形态列表。按照公式(2)、(3)进行计算的结果为 $[n_spread, n_member \times n_section, n_effect]$ 的三维矩阵， $n_spread = 2^{n_{QU}}$ 为广义均载分布形态总数， n_{QU} 为广义均载可能分布的位置数， n_member 为分析构件数， $n_section$ 为单个构件离散数， n_effect 为荷载效应数。在第一、二维的构成平面对该矩阵做最大值投影，即可得到广义均载作用效应的包络结果。

需要指出，本算法不受计算模型维度的限制。以图 3 所示的 16 块双向板为例，图中数字表示板编号， $n_member = 16$ 。每块板均被 4 等分，产生 9 个计算节点(图中未示出)， $n_section = 9$ ，共计 144 个子节点(其中包含 63 个重复计算节点)。每块板上均可能作用荷载， $n_{QU} = 16$ ，各板上可能作用的荷载形式不尽相同。记各板可能作用的荷载分别为 $u_{ij}, i, j \in [1, 4]$ 。则可能出现分布形态为 $[0, u_{11}] \times [0, u_{12}] \times \dots \times [0, u_{43}] \times [0, u_{44}]$ ，计算结果为 $2^{16} = 65\ 536$ 行、16 列的二维矩阵，各行向量表示 1 种分布形态。其中 $[0, 0, \dots, 0]$ 表示 16 块板均无均载作用， $[0, \dots, 0, u_{33}, 0, u_{41}, 0, 0, 0]$ 表示 33#、41# 两块板上同时作用荷载，见图 3。若以薄板理论进行计算，则对 65 536 种分布形态均需保留 144 个节点的荷载作用效应计算结果。最后，对 144 个节点逐一求 65 536 种分布形态下的最大荷载作用效应作为本模块输出结果，整个过程的计算复杂度为 $144 \times 65\ 536 = 9\ 437\ 184$ 。

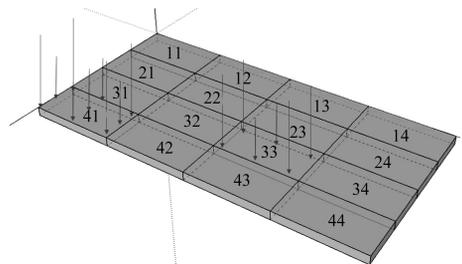


图 3 广义均载计算模型

2.3 广义流机荷载计算方法

流动机械可能运行在结构的不同位置，同样

存在分布多态性。通过定义起始位置、终点位置、分析步长即可得到流机荷载全作用位置列表, 按照公式(2)、(3)计算, 结果为 $[n_location, n_member \times n_section, n_effect]$ 的三维矩阵, 其中 $n_location$ 为流机荷载分布位置数。在第一、二维的构成平面对矩阵做最大值投影, 即可得到广义流机荷载的作用效应包络图。

2.4 包络统计分析

经全工况包络算法, 最终得到 $[n_loadcase, n_member \times n_section, n_effect]$ 的三维结果矩阵, 其中 $n_loadcase$ 为全工况列表中的工况总数。按照构件编号或截面编号对结果矩阵进行切片, 即可对分部工程或特定分析对象的作用效应深入分析。

3 应用实例

3.1 工程概况

黄骅港综合港区泰地液体化工码头工程建设规模为 2 个 5 万吨级液体化工品泊位。码头长 497 m、宽 25 m, 采用高桩梁板结构形式。横向排架上部设 5 段横梁, 横梁截面尺寸为 0.8 m×1.5 m, 单根横梁长度 3.0~6.8 m; 下部施打 6 根 650 mm×650 mm 的预应力空心方桩。计算时, 每根杆件被离散为 10 个子结构。分析中考虑的荷载情况见表 2, 结构见图 4。

表 2 计算模型需要处理的荷载

项目	荷载
永久荷载	(1) 自重(面层、预制板、预制横纵梁、桩); (2) 工艺管架荷载
可变荷载	(1) 撞击力及挤靠力; (2) 系缆力; (3) 浮托力; (4,5) 工艺荷载(海侧、陆侧倾覆)
广义均载	使用均载
广义流机荷载	(1) 16 t 汽车吊; (2) 50 t 平板挂车; (3) 40 t 汽车起重机
互斥荷载	(1) 流机荷载、使用均载; (2) 撞击力、系缆力; (3) 工艺荷载海、陆侧倾覆

全工况包络算法对使用均载、流机荷载的多态性进行了处理。5 段横梁上均可能分布均载, 共 $2^5 = 32$ 种分布形态; 3 种流机运行区间为码头前后沿, 荷载计算步长均设定为 0.5 m, 共有 274 种作用位置。经过全工况组合模块处理后, 工况统计见表 3。

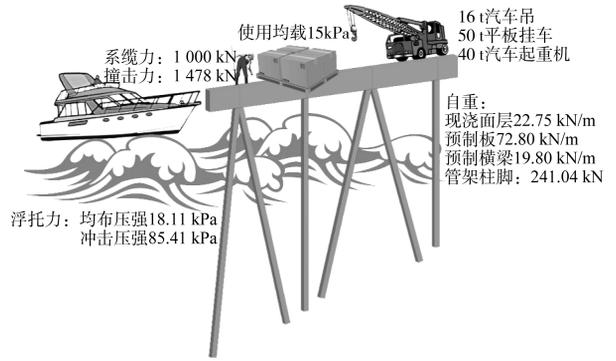


图 4 横向排架结构及荷载

表 3 计算工况统计

状态	工况总数	包含均载/流机荷载工况数
1	297	111/111
2	107	36/36

注: 状态 1 为承载能力极限状态, 状态 2 为正常使用极限状态。

3.2 计算结果及计算效率

荷载作用效应包括众多方面, 其中杆件内力是影响结构安全和构件配筋最重要因素。因此, 本文以正负弯矩、剪力为分析对象, 对承载能力极限状态(持久组合)、正常使用极限状态(准永久组合)的计算结果进行展示, 计算结果见表 4、图 5 和 6。本文算法的计算效率见表 5。可以看出, 使用本文优化设计方法对两种状态的计算总时间不超过 60 s, 极大地提高了计算效率。其中, 单荷载计算针对表 2 中的 2 种永久荷载、5 种可变荷载、使用均载的 5 种独立作用位置、3 种流机荷载的 274 种作用位置进行计算, 经历了单(总)刚度计算、三角阵分解、内力(应力、位移)求解等过程, 占整个计算过程的时间比重较大。全工况包络算法的运行时间仅为 4 s 左右。

表 4 最大荷载作用效应计算结果

状态	正弯矩/ (kN·m)	负弯矩/ (kN·m)	剪力/ kN
1	4 130.76 (G+F+J)	6 930.43 (G+X+F+L)	2 051.08 (G+JZ+F+L)
2	1 999.03 (G+F+J)	3 197.61 (G+X+F+L)	

注: 括号内表示产生最值对应工况, G、F、J、X、L 分别代表永久荷载、浮托力、使用均载、系缆力、流动机械荷载。

表5 计算效率

计算状态	独立荷载 运算时间 (Staad)	均载模 块运行 时间	流机荷载 模块运行 时间	本文算法 运算总 时间	计算过程 总体运算 时间
1		0.06	0.02	4.0	60
2	56	0.12	0.01	4.0	

注：为避免统计误差，表中时间值为重复运算3次的平均值。

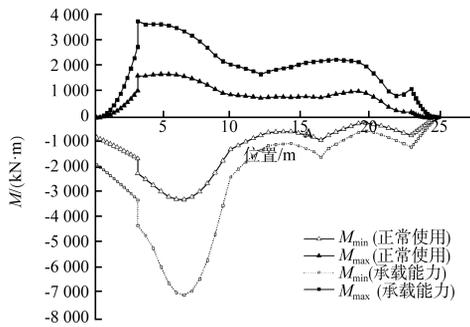


图5 弯矩计算结果

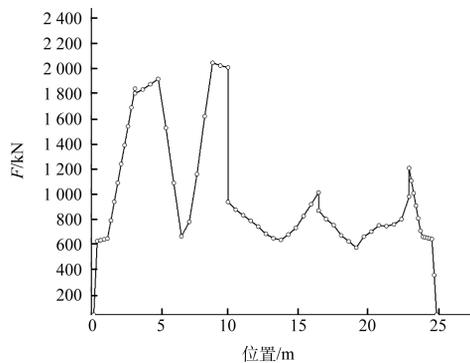


图6 剪力计算结果

3.3 分析及讨论

需要指出，常规算法如果考虑全部工况并以同等精度离散结构，能够达到和本文算法一致的结论。但这种情况下，常规算法面临着巨大的计算复杂度：以表2为例，常规算法必须处理使用均载和流机荷载的分布多态性，即分别在含有均载(流机荷载)的工况组合中，详细计算32种(274种)分布形态的荷载效应。因此，常规算法对承载能力极限状态、正常使用极限状态的实际计算工况数目分别达到34 152、11 087种。并且对这34 152、11 087种工况，均应保留132处离散节点的计算成果，总体计算复杂度可达到百万量级，这对于计算和分析都是沉重的负担。而如果简化计算工况，则很可能遗漏最危险工况、低估了全局最大荷载作用效应；若减少结构离散数目，则不能得

到满足计算精度的包络图。从3.2节可以看出，本文提出的优化设计方法对全工况计算具有较明显的优势。

4 结论

- 1) 高桩结构的设计需考虑繁多复杂的可变荷载时，本文计算方法能够自动计算全部工况列表。特别是能够处理广义均载、广义流机荷载的分布多态性问题，大幅降低计算复杂度。
- 2) 本文提出的设计方法能够适应较高离散程度的运算，满足高精度运算的需求。
- 3) 本文提出的设计方法不受计算模型维度的限制，同时适用于二维、三维模型分析，能够满足工程现阶段计算需求、适应未来计算趋势。

将本文的算法应用于实际工程实例，从工况数量、计算时间等角度论证了本文计算方法相较于常规算法的效率提高程度。计算过程确保能够针对每一离散位置精确求解最大荷载作用效应及其相对应的最危险工况。整套计算平台采用SQLite管理数据，科学有序，为深入设计奠定了基础。

参考文献：

- [1] 张丽媛, 苏永生, 芦志强. 基于 WebGL 和有限元的码头三维设计与计算仿真[J]. 水运工程, 2013 (12): 57-63.
- [2] 洪晓林, 柏文正. 高桩码头结构研究综述[J]. 水利水运工程学报, 1995 (3): 302-311.
- [3] JTS 167—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [4] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].
- [5] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [6] Altaie E, Alansari N, Knutsson S. Effect of bearing capacity on designing foundations in Iraq using STAAD Pro-v8i[J]. Engineering, 2014, 6(6): 292-303.
- [7] Subramani T, Ponnuel D. Seismic and stability analysis of gravity dams using staad PRO[J]. International Journal of Engineering Research and Development, 2012, 1(5): 44-54.
- [8] Bi Chunyue. Research and application of SQLite embedded database technology[J]. Wseas Transactions on Computers, 2009, 8(1): 83-92.