

防波堤的优化设计与可靠度

刘大中 编著



人民交通出版社

U656.202

93-3844

9600039

FANGBODI DE YOUHUA SHEJI YU KEKAO DU

防波堤的优化设计与可靠度

刘大中 编著

人民交通出版社

防波堤的优化设计与可靠度

刘大中 编著

插图设计：秦淑珍

正文设计：崔凤莲

责任校对：高琳

人民交通出版社出版发行

（北京和平里东街10号）

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：850×1168_{1/32} 印张：7.375 字数：189千

1990年8月 第1版

1990年8月 第1版 第1次印刷

印数：0001—1,100册 定价：8.20元

ISBN7-114-00858-9

U·00532

目 录

第一章 绪论	1
第一节 防波堤优化的意义和研究课题	2
第二节 优化设计的基本概念、术语	6
第三节 非线性规划问题	11
第二章 技术经济分析方法与决策论	32
第一节 技术经济分析比较方法	32
第二节 决策论的基本概念	41
第三章 波浪的浅水变形	62
第一节 概述	62
第二节 海浪谱	66
第三节 波浪的折射和绕射	72
第四节 波浪的浅水变形	77
第五节 浅水波长及波高	81
第四章 波浪对直立式防波堤的作用	85
第一节 直立堤及其破坏形式	85
第二节 直立堤前波浪破碎形态	94
第三节 直立波浪力计算方法及研究动向	96
第四节 防波堤结构型式的发展动向	112
第五章 直立堤的优化设计	119
第一节 概述	119
第二节 直立堤的优化设计方法	123
第三节 直立堤优化设计框图	129
第四节 国外防波堤的优化设计方法	132
第五节 国外码头结构的优化设计	139
第六章 直墙式防波堤的可靠度分析	153

第一节	可靠度理论的概述.....	153
第二节	可靠度理论的基本内容.....	154
第三节	可靠度理论在防波堤滑移稳定中的应用.....	162
第七章	斜坡式防波堤及其受波浪的作用.....	175
第一节	概 述.....	175
第二节	斜坡堤破坏实例.....	176
第三节	斜坡堤设计中所要研究的课题.....	184
第八章	斜坡堤的优化设计.....	193
第一节	概 述.....	193
第二节	优化设计的基本方法.....	195
第三节	斜坡堤的经济效益分析.....	204
第四节	斜坡堤的波列累积率设计标准的确定.....	213
第五节	斜坡堤合理堤顶高程的确定.....	215
参考文献.....		223

第一章 绪 论

我国沿海担负着对外贸易、繁荣国家经济的重任，但是岸线开发与其长度相比是很不适应的，与国外相比差距很大。美国平均每120km 就有一个大、中型港口，其沿海水深在7.6m 以上的泊位有2923个，总泊位数近5000个，在1980~1990年间将投资50亿美元建造247个深水泊位。日本受港湾法管辖的港口有1093个，特大型和主要港口18个，一般港口114个，平均每10km 就有一个大、中型港口，水深在7.5m 以上的深水泊位约2000个，每年平均增加50~60个泊位。而我国港口建设长期处于自然发展状态，机械化水平低，劳动强度大。建国以来，我国港口建设虽有了很大发展，但目前港口数量还不多，仅132个。其中吞吐能力在50万吨以上的大、中港口仅36个，平均每500余公里才有一个港口，与国民经济和外贸发展很不适应，因而压船现象严重。设备效率低且不配套，货流变化常随形势发展而波动，使港口难以充分发挥效益。近年来，国家实行对外开放，对内搞活经济政策，沿海有了很大发展，交通运输列为经济建设战略重点之一，制定了建港方针，一方面加紧建设一些重点港口设施，一方面调动地方积极性，改造港口，解决了疏港难的问题。

“六五”期间我国南北已有二十多个港口开工，新建了万吨以上的深水泊位，增加了吞吐能力，平均每年建成10.8个深水泊位。建设重点是煤炭、集装箱、石油码头泊位。到1985年底，我国主要港口吞吐能力已达3亿吨以上，深水泊位达199个，比1980年增长50%，五年建设是前十年建设项目的总和。这些港口建设增强了我国的经济实力，为我国对外开放方针的实现，以及国民经济和外贸发展创造了良好条件。今后的港口建设将随国民经济建设需要而稳步发展，建设任务重，难度大。港口建设投资

大，建设周期长，资金不足，港口利用效益低，有些大型港口还要靠国外贷款，所以建设速度也不能太快，应符合国情适度发展。港口建设要根据全国经济布局和发展规划，地区性开发计划，主要客货流量、地理位置、自然条件等因素，统筹安排、合理布局，遵照港口建设技术政策，重点建设一批担负枢纽港作用的大型港口，同时建设一批为大港分流，为地区经济发展服务的中、小港口，逐步形成大、中、小结合，集疏运畅通，设备配套的港口运输体系。港口建设应贯彻勤俭建国、艰苦奋斗、厉行节约的方针，要先进适度，及时形成生产能力，充分发挥工程的经济效益、社会效益和环境效益。必须使港口建设为增强国家经济实力做贡献。

港口是交通运输的枢纽，水陆交通的咽喉，国内外贸易的门户，它的建设与发展直接影响到经济建设的发展与交往。按照国家基本建设程序规定，建设者首先应申请，经批准后进行可行性研究，技术论证，认为确有明显效益而获准后才能进行设计。在可行性研究阶段要进行各种方案比选，技术论证，通过优化设计来确定。优化对建设速度、投资效益评估关系极大。港工专业技术人员学点工程优化和经济分析方法，使工程设计中能通过多种方案选择出最佳方案，节省投资，提高经济效益、降低成本，增产节约，把系统工程方法、决策理论应用于港口工程设计中，进行方案的决策论证，确保工程质量、加快建设速度，降低工程造价，提高经济效益，创造出新型现代化港口，为我国国民经济建设服务。希望这门课程能起到抛砖引玉作用。

第一节 防波堤优化的意义和研究课题

防波堤是港口的重要组成部分，其建造费占整个工程投资比重很大，而毁坏又会遭到严重损失。经多年使用，形成了各种断面结构型式，常用的是直立式和斜坡式防波堤。由于波浪本身及其对防波堤作用的复杂性，目前对它的研究还在继续中，世界上

防波堤的毁坏事故仍在不断发生,说明对波浪的本质及其对海岸建筑物作用的认识还很不充分,往往重要工程的防波堤平面布置和断面结构稳定性还要通过模型实验来验证。下面谈几个目前尚未解决的课题及与优化设计的关系。

一、不规则波问题

海浪是防波堤的主要外力,其性质很多,但主要的并且有工程意义的还是其不规则性。目前设计中多数仍以其某种特征波来代替实际天然海浪,而天然海浪又是不规则波,这就与实际有很大差别。事实表明,建立在规则波理论基础上的海浪作用不足以反应防波堤的实际受力情况。近年来一些实验结果表明,所选用的特征波高不论其风暴历时如何,都低估了随机海浪的作用,有人认为,当水深增大到某一程度时,波列中最大波高与有效波高之比超过一定值后,应提高所采用的设计波浪标准。另一些实验表明,当不规则波作用的波列中有连续大波出现的波群存在时,其危害性比无波群时更大,更易失稳。目前对不规则波与防波堤作用的影响及不同海域中波群特性的研究工作还很不透彻,也有争议,有待进一步研究,以提出完整的不规则波设计法。但是,无论如何,为了保证大型重要防波堤工程的安全可靠,认为设计时应考虑不规则波作用的影响效果是一致的。国内外都很重视这方面的研究工作。国内也已有条件进行不规则波的实验研究,并积极开展原型观测工作,以对不规则波谱理论及谱型等进行广泛的研究,使其在工程应用上更符合我国海况特点,并提供完整、准确连续的可靠数据。不规则波是随机的,其设计法将与概率论有关,将会用到优化设计的概念和方法。

二、防波堤设计标准问题

防波堤设计波浪标准一般包括两个内容,即波浪重现期(长期分布)和波列累积率(一场风暴历时内短期分布)。目前规范中都规定采用几十年一遇(如50年一遇)的波浪,但实际上波浪

重现期只是个平均的概念，在理论上并不能保证建筑物在使用期限内不出现超过50年一遇的波浪。近年来，随着概率论理论的发展而应用于工程结构设计中，同时，以概率论为基础的结构极限状态设计法是国际上迅速发展的工程结构设计法。根据概率论可求出重现期为 T_K 年的波浪在使用年限为 N 年时出现的遭遇概率 Q

(危险概率)， $Q = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_N}\right)^N$ ，如 $T_K = 50$ ， $N = 50$ ，则

$Q = 63.3\%$ ，它是置信水平的指标，有人认为，用这样的置信水平值进行设计，其标准偏低，另外应引入危险率和使用年限的概念。这样若以包括建造费和维修费的总投资最省作为目标函数，所得出的最合理断面的波浪重现期也不一定是50年一遇。因此，应引入优化设计原理来确定设计波浪标准的合理重现期，以此考虑使用年限内的危险率。因为设计标准问题是防波堤设计中成败的关键，会影响国家的投资，所以应列为重大研究课题进行研究。

三、优化设计概念的提出

防波堤是造价昂贵的水工建筑物，随着电子计算机技术的发展和数学在工程应用上的普及，有必要引入优化设计的概念。桥梁结构、铁路、造船等工程在优化设计应用上已较深入，目前已和绘图学结合起来形成了计算机辅助设计系统，即CAD(Computer Aided Design)技术。实践表明，它在工程分析、设计研究、结构计算与模型实验上应用将可提高效率3~6倍，甚至可提高20~30倍。目前CAD技术已向工程化、集成化、标准化、智能化方向发展。优化设计的目的是使系统或个体设计达到效益高、成本低。国外设计是多方案的，初步设计一般有5~6个方案，从中挑选出2~3个优选方案再进行详细设计，最后比较出可行的最优方案。每一方案设计中采用优化设计，使之材料使用合理，资金发挥最大效益。我国建筑结构及水电建设工程结构方面早在70年代后期就已逐步采用优化设计法，但在港工设计方面

尚未被重视，为了完成繁重的水运工程建设任务，必须开展优化设计。

防波堤的优化设计与结构的优化设计有些不太一样，这种水工建筑物在优化时不能要求以轻型为其目标函数，否则将导致不合理的设计结果。因而对一般水工建筑物优化时，要求应以造价最低为其目标函数。防波堤优化设计不能按规范规定那样采用某一规定的重现期波浪进行设计，它并不规定好用那种重现期波浪，而是在一定范围内变化，根据其相应的波浪要素进行断面设计，分别求出各相应断面尺寸、工程量、造价及维修费，以其总投资进行比较，从中找出最佳设计断面。维修费的计算方法引入某种概率的概念，且直立堤和斜波堤有些不同。根据其破坏程度估算它的损失和效益，求出其不同的维修费，这里将引入损坏概率，和前述概念相联系，对比可求出优化的最佳断面。防波堤的优化设计方法应结合我国港口实际情况来考虑，使之在工程设计中尽快推广应用。

四、防波堤合理堤顶高程的确定

防波堤堤顶高程的确定将决定防波堤断面尺寸大小和投资多少，因此堤顶高程的确定必须特别注意从经济实用观点考虑。防波堤实际上很少不越浪，尤其是我国确定的防波堤顶高程都很低，若是该地强风暴较少，且历时与高潮无多大关系，应允许少量越浪，此时堤顶高程可相应降低，但越浪水体不应对港口水域的船舶装卸和建筑物设施有较大的破坏性损害和影响。其中影响作业的不可作业天数可根据某一波高出现的概率来计算，不可作业天数与堤顶高低有密切关系。顶高低则造价低，但不可作业天数多，造成的损失也增大，反之则损失小但造价高。到底堤顶多高合适，这里就有个优化问题。因此应该用优化设计来确定。

综上所述，防波堤优化设计在工程设计中是很有意义的，它将会节省大量投资而使设计思想和方法得以改进。电子计算机在设计工作中应用将加快设计速度，提高设计质量，降低成本，迅

速可靠,深入细致,形象多变等等,使设计者有条件去搞多种方案,能涌现出更多的优秀设计。使设计向标准化、工程化方向发展,并在长期积累中形成一套港口工程设计的程序库,到那时,设计者就可得到多种设计方案。达到高度自动化水平后,港口建设速度就会很快提高。从另一个角度考虑,计算机技术、数学、港口工程学及绘图自动化结合起来将会融合而形成新的交叉科学体系。

防波堤优化设计内容是很丰富的,波浪设计标准、合理堤顶高程是目前要解决的问题,可靠度的研究和不规则波设计法的研究将是今后发展的方向。根据工程设计问题的需要而组织塑造出防波堤优化设计模型进行相应的优化设计,其中将涉及到经济效益分析和决策论等内容,优化设计方法将会不断发展。

第二节 优化设计的基本概念、术语

在结构设计中,工程技术人员主要工作之一是研究如何解决支承和外力的传递问题,避免出现力的传递不合理,又要保证结构安全可靠、经济合理。寻求合理的最佳结构型式。判断结构合理性有许多准则,如重量最轻、建造费用最低、节能高效、可靠性好等等。设计者的目的是要分析一个给定结构型式,并给出能满足设计准则的结构。下面举例说明优化设计的基本概念和术语。

【例1】 有一如图1-1所示的三角桁架,受荷载 $2P$ 作用,桁架由厚度为 t 的圆钢管构成, BC 间距为 $2b$,允许屈服应力 $[\sigma_0]$ 。求桁架不破坏时的合理高度 h 和管径 d ,使结构重量最轻。

分析其破坏形式有:

- 1) 杆件压应力超过材料允许屈服应力 $[\sigma_0]$ 而破坏。
- 2) 杆件柔性弯曲破坏,即压杆屈曲失稳。

首先由平衡条件求杆件内力 N

$$N = \frac{P}{\cos\theta},$$

$$\cos\theta = \frac{h}{\sqrt{b^2 + h^2}}.$$

则杆件应力 $\sigma = \frac{N}{A},$

管的截面积 $A = \pi dt,$

由 $\sigma \leq [\sigma_0]$ 可得

$$\sigma - [\sigma_0] \leq 0 \quad (1-1)$$

由压杆屈曲稳定求得

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 EI}{A(b^2 + h^2)}$$

而

$$I = \frac{\pi}{8} dt(d^2 + t^2)$$

故

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{8} \frac{d^2 + t^2}{b^2 + h^2}$$

由 $\sigma \leq [\sigma_c]$ 得

$$\sigma - [\sigma_c] \leq 0 \quad (1-2)$$

此即为应力约束条件。

其几何约束条件为

$$\left. \begin{aligned} h - h_{\max} &\leq 0; \\ d - d_{\max} &\leq 0; \\ h_{\min} - h &\leq 0; \\ d_{\min} - d &\leq 0. \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

目标函数是重量最轻，即

$$W = 2\rho AL \rightarrow W_{\min}$$

这就是简单的优化设计例子、概念和术语。

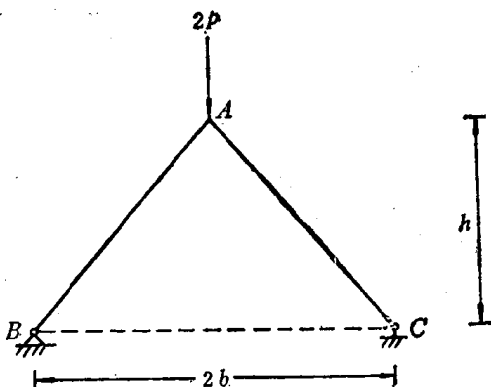


图 1-1.

一、优化设计的定义

结构优化就是运用最优化方法实现自动设计，选出合适的设计变量。从经济性考虑，结构优化设计主要是选择出合理的结构元件尺寸。优化设计方法是將全部设计的限制条件作为约束条件，通过设计变量或性能变量的一组不等式表达出来，把最能反映出主要设计要求的量作为目标函数。优化设计是用数学手段求出满足全部约束条件的，并能使目标函数为最佳的设计变量的一种设计方法。

二、数学模型

进行优化设计之前，设计人员常凭直观和经验决定结构布局，材料性能等，塑造出一数学模型。建立数学模型是优化设计中极为重要的步骤。数学模型塑造的好坏将直接影响到设计的效果和解的收敛性。它在以后优化设计过程中将起到重要作用。数学模型的选取必须审慎行事，尽可能符合实际。但是，数学模型过分近似和过分粗糙都会失去优化设计的价值。在工程设计中如不舍弃一些因素，进行某些模型化处理，就势必增加计算量。受计算机容量的限制和计算机速度要求，简化是必要的。

三、设计变量

在一个结构设计方案中往往有三种参数，即：设计参数、性能参数和中间参数。

设计参数是设计中的自变量，通常是由设计者主动选择确定出来的。

性能参数是设计各方案使用特点，它是设计参数的因变量，不能由设计者直接选择出来，只能靠结构分析来描述。如结构应力。

中间参数是设计中运算而产生的，如荷载求应力时需先求内力，它就是中间参数。

在优化设计中，针对具体问题常将一些设计参数事先给定，称为确定参数，另一部分称为设计变量。如防波堤优化设计中通常将某一定点的水深 d 、波高 H 、波周期 T 定为参数，而求堤宽 B 、基床上水深 d_1 及其尺寸等为设计变量，所求得波浪力 P 及其弯矩 M 则是中间参数。

四、约束条件

设计中应该遵守的条件都属于约束条件，即限制条件。一般可表示为：

$$g(X) \leq 0$$

通常，约束条件因对象不同而不同，对结构约束条件有应力约束，变形约束，稳定约束，几何约束等。还有界限约束、审美约束，以及无法用数学表达式表示的约束等。

五、目标函数

符合约束条件的设计变量有无数组合，但不能全部满足，设计的目的是将那些限制条件去掉，而选择出最适合工程需要的组合，就是要达到设计目的的指标。因此目标函数是评价设计成果好坏的函数，称之为目标函数。

目标函数是一个设计方案要达到目标的数学表达式，它是设计变量的函数，是对该方案进行比选评价的指标，是选择方案的标准。其标准可以是结构重量最轻，成本最低，经济效益最大等等。

目标函数的确定是整个优化过程最重要步骤之一，有时很明显，如制造飞机当然要求最轻型结构，土建工程多比较其造价最便宜，机械制造工业常取功率一重量最小。如果选择目标函数不当就会失去优化设计的意义。这里有个组合合理问题。如土建工程，钢筋混凝土中的钢筋单价较贵；若不恰当地取重量最轻则可能导致钢筋过密，施工困难。而且技术、经济上不一定是合理的。设计者必须仔细研究设计对象，恰当地确定出目标函数，选

择好设计变量和约束条件，使之选择最佳途径，给出最优设计方案。

六、优化方法

优化设计方法从数学上讲有解析法、准则法和数学规划法。前二者是古典微分极值原理和变分原理求极值问题，及结构力学基本原理满足一定准则求得优化解。后者是用数学规划法和优选法寻求设计参数的最优解。按约束条件与目标函数，是否是设计变量 X 的线性函数，可有线性规划法与非线性规划法。日常生活中大多数工程问题是非线性规划问题，需要将它转化为线性规划问题求解。其基本方法可列表如图 1-2 所示。

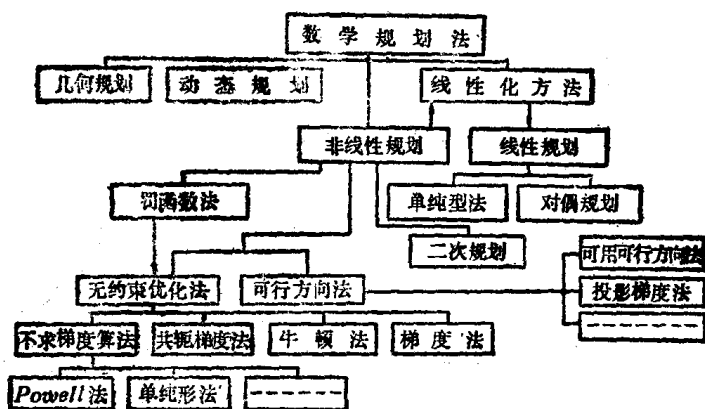


图 1-2

上述这些方法在一般结构优化书籍中均可查到。而防波堤优化设计需采用非线性规划法，如罚函数法，即SUMT法，还有用鲍威尔法等。下节将概要介绍非线性规划问题中常用的解法，如需详细了解这些方法原理和求证，可查阅工程优化设计方面书籍和文献。

第三节 非线性规划问题

一、概 述

当目标函数或约束条件方程中有一个或多个是非线性函数时,就不能用线性规划方法求解,而需要采用非线性规划法求解。日常生活中常遇到许多工程问题是非线性规划问题。其一般表达式可写成

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\text{约束于} \quad g(X) \leq 0$$

$$\text{目标函数} \quad \min f(X)$$

$$X \in E^n$$

下面举例说明。

【例 2】某工地有 n 个施工区, 已知其位置 (a_j, b_j) 与配料量 r_j , 各工区所需材料由 m 个贮存仓库供应。已知该库的材料贮存量 c_i 。问这些仓库各应设于何处方便各库向各区送料 w_{ij} 的总吨·公里数最小。

解: 令第 i 个仓库位置为 (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, m$, 其存贮量为 c_i 。已知第 j 个工区位置为 (a_j, b_j) , $j = 1, \dots, n$, 该工区需材料 r_j , 从 i 仓库到 j 工区距离 d_{ij} , 它向该工区送料量为 W_{ij} , 其目标函数是运输总吨、公里数最小。即

$$\min \quad Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} d_{ij}$$

$$\text{约束于} \quad \sum_{j=1}^n W_{ij} \leq c_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m W_{ij} = r_j \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$W_{ij} \geq 0$$

由于 W_{ij} , d_{ij} 都是待定量, 因此目标函数是非线性的, 运距可由

下式求得:

$$d_{ij} = [(x_i - a_j)^2 + (y_i - b_j)^2]^{1/2}$$

这是 x_i, y_i, W_{ij} 的非线性规划问题, 若仓库位置 d_{ij} 已知, 则就成了线性规划问题了。上节例1的三角桁架设计也是个非线性规划问题。非线性规划问题的几何意义是求可行域内函数的极值问题。古典方法求极值是微分求导数。而二元函数时还需海色矩阵 (Hessian Matrix) 大于等于零。非线性规划方法一般分为两大类, 即古典优化法, 如微分法、拉格朗日乘子法等, 另一类是搜索法 (Search Method), 即从某一初始点出发沿着不同方向搜索, 逐步逼近使得目标函数不断下降或上升, 直至达到优化点。对单变量函数优化问题可用微分求极值, 黄金分割法、牛顿法等古典方法。它是非线性规划问题的基础, 因为许多多变量函数优化问题往往归结为反复求解一系列单变量函数的极值问题, 所以先讲一下单变量函数的优化问题。

二、单变量函数的优化

1. 黄金分割法 (The Golden Section Method)

当单变量函数的次数较高, 或函数形式较复杂时, 不能用一阶导数 $f'(x)=0$ 或微分法求解 x^* 值, 而要用搜索法。黄金分割法就是搜索法中消去法的一种。就是不断消去部分搜索区, 逐步缩小最优点存在范围, 以至最后求得最优点。从数学上讲, 是一函数 $f(x)$ 在 (a_1, b_1) 区间内求一点 x^* , 使 $f(x)$ 达极小值, 即求极小点 $x^* \in R$, 使 $f(x^*) \leq f(x), \forall x \in R \subset E'$

为用黄金分割法, 需找到最佳分割点, 在区间内取 x_1, x_2 点, 使之满足

$$x_1 - a_1 = b_1 - x_2$$

即 x_1, x_2 点对区间中点是对称的。可以证明, 该点比值应为

$$\lambda = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} = 0.618033988 \approx 0.618$$

则另一点位置应为