

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 25220051302578

UDC _____

厦 门 大 学

_____ 硕 士 _____ 学 位 论 文

钢筋混凝土框架结构
优化设计及其实用程序

Optimization Design of R.C. frame Structure
and Its Application Programme

杨建林

指导教师姓名: 王景文副教授

专业名称: 结构工程

论文提交日期: 2008年05月

论文答辩时间: 2008年 月

学位授予日期: 2008年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008年5月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘要

结构优化设计是将最优化理论应用于工程结构设计,在众多可行设计方案中寻找最适宜设计方案的现代设计方法。它集专业设计理论、数学上最优化方法、计算机技术于一体,通过科学设计方法缩短结构设计周期,减少人力、物力和财力的投入,创造巨大的经济效益和社会效益。

钢筋混凝土框架结构具有造价低、平面布置灵活、便于标准化施工等优点,已成为我国建筑的重要结构形式之一,而且仍将保持良好的发展前景。因此,对钢筋混凝土框架结构进行优化设计已成为工程师的迫切需要,国内外学者已进行了广泛的研究,取得了一定成果,现已趋向于如何实现框架结构优化设计的实际应用。针对这些问题,本文对钢筋混凝土框架结构优化设计的工程应用做了一定的探讨,即重视他们的应用,而不是发展优化新技术。为此,在总结分析前人的研究成果、方法和不足的基础上,建立了基于造价的符合设计规范的全参数全约束框架梁、柱优化设计的数学模型。并根据建立的数学模型,在众多的最优化方法中选择稳定、高效的序列二次规划法进行寻优计算,因此还详细介绍了序列二次规划及其数值算法,做到数学推理过程简单,思路清晰,目的是为寻优计算作理论准备。然后在构件优化的基础上,采用分部优化法对钢筋混凝土框架结构进行优化设计,且对框架结构优化存在的一系列问题进行了必要的探讨,最终建立一个稳定高效、界面友好的实用框架结构优化设计程序,该程序采用图形界面输入框架梁、柱优化设计的相关参数,融入了混凝土结构设计规范、建筑抗震设计规范等相关现行结构设计规范,可自动实现寻优计算和数据保存,亦可与其它有限元分析软件接力完成框架结构的优化设计。最后通过算例验证了该方法可行且数值结果稳定,并通过计算结果的分析得出一些可以指导工程设计的结论。

本文的研究为钢筋混凝土框架结构优化设计的应用提供了一种有效手段,它同样可以应用于框架-剪力墙结构中的框架,具有重要的现实意义。

关键词: 钢筋混凝土框架结构 优化设计 序列二次规划

Abstract

Structural optimization design is a modern design approach, which applied optimization theory to engineering structural design, to find the most appropriate design in many feasible designment. It consists of professional theory of structure design, mathematical programming and computer technology, which a scientific design approach was adopted to shorten the design cycle and reduce human, material and financial investment, and create huge economical and social benefits.

Reinforced concrete frame structure has become the most important structural form in China, because of its low costs, flexible layout and ease of standardized construction, and will maintain a good development prospects. Therefore, the optimization design of reinforced concrete frame structure has become an urgent need for engineers. There are a great of studies and researchs in this aera home and abroad, and having got a lot of useful conclusions. Recently, the situation is tended to how to get the theory to the application. This paper just focused on the application of reinforced concrete frame structure optimization. That is, to their applications, rather than the development of some new optimization technologies or algorithms. To this end, in summarizing the results of previous studies, methods and weak points, this paper established whole parameters full constraints optimization design models of reinforced concrete frame beam and column. Then according to the mathematical models, selected a suitable stable and highly efficient sequential quadratic programming for optimization calculation in many optimization algorithm, it also introduced details of the sequential quadratic programming, numerical algorithms and mathematical reasoning process as simply as possible. Using clear ideas and images easy to understand and grasp. Then, on the basis of framework beam and column optimization, a branch optimization method was used to optimization design of reinforced concrete frame structure. It also discussed a series of problems which exist in structural optimization of reinforced concrete frame, and ultimately established a

practical, user-friendly GUI Optimization System of reinforced concrete framework design, which is fit to the Code for design of concrete structures and Code for seismic design of buildings. The programme can be connected with various structure design software to carry on parameters optimization. Finally, an example was given to verify the feasibility and numerical stability of procedures, and draw some interesting conclusions results of the example analysis.

This study has great realistic significance by creating positive conditions for application to optimization design of reinforced concrete frame structure. It also can be used in the frame of frame-shearwall structure.

Keywords: reinforced concrete frame structure, optimization design,
sequential quadratic programming

目 录

第一章 绪论	1
1.1 选题背景.....	1
1.2 研究历史及现状.....	1
1.3 本文研究内容.....	3
第二章 结构优化的基本理论	5
2.1 结构优化的数学模型.....	5
2.2 结构优化的分类.....	6
第三章 结构优化设计方法	8
3.1 最优准则法.....	8
3.2 数学规划法.....	8
3.2.1 数学规划法概述.....	8
3.2.2 牛顿法.....	10
3.2.3 拟牛顿法.....	11
3.2.4 二次规划.....	13
3.2.5 序列二次规划.....	18
3.3 本章小结.....	22
第四章 钢筋混凝土框架结构构件优化	23
4.1 框架优化设计的数学模型.....	23
4.1.1 设计参数.....	23
4.1.2 目标函数.....	23
4.1.3 约束条件.....	24
4.2 框架柱优化设计的数学模型.....	30
4.2.1 设计参数.....	30
4.2.2 目标函数.....	31
4.2.3 约束条件.....	31
4.3 框架梁柱优化方法.....	36

4.4 本章小结.....	37
第五章 框架优化及其应用程序.....	38
5.1 框架结构优化方法.....	38
5.2 优化分析的数据准备.....	39
5.3 优化计算应用程序.....	39
5.3.1 程序编写.....	39
5.3.2 图形用户界面设计.....	49
5.4 编译打包.....	64
5.5 本章小结.....	66
第六章 算例.....	67
6.1 例题模型.....	67
6.2 例题计算.....	69
6.3 本章小结.....	81
第七章 结论.....	82
7.1 论文总结.....	82
7.2 不足与展望.....	83
参考文献.....	84
致谢.....	86
攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	87

全文符号说明

1. 材料性能

E_s ——钢筋弹性模量 (N/mm^2)

C35——表示立方体强度标准值为 $35\text{N}/\text{mm}^2$ 的混凝土强度等级

C_c ——混凝土每立方米造价 ($\text{元}/\text{m}^3$)

C_s ——钢筋每吨造价 ($\text{元}/\text{吨}$)

C_f ——模板每平米造价 ($\text{元}/\text{m}^2$)

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm^2)

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值 (N/mm^2)

f_y ——钢筋抗拉强度设计值 (N/mm^2)

f_{yv} ——箍筋及拉筋抗拉强度设计值 (N/mm^2)

2. 作用、作用效应及承载力

M_b ——框架梁跨中截面弯矩设计值 ($\text{kN}\cdot\text{M}$)

M_{bl} ——框架梁左支座截面弯矩设计值 ($\text{kN}\cdot\text{M}$)

M_{br} ——框架梁右支座截面弯矩设计值 ($\text{kN}\cdot\text{M}$)

M_k ——按荷载标准效应组合计算的弯矩值 ($\text{kN}\cdot\text{M}$)

σ_{sk} ——按荷载效应的标准组合计算的纵向受拉钢筋应力或等效应力 (N/mm^2)

V_b ——框架梁剪力设计值 (kN)

N_c ——计算框架柱轴压比时, 考虑荷载组合后选取的轴力设计值 (kN)

N_{cy} 、 M_{cy} ; N_{cx} 、 M_{cx} ——计算框架柱 A_{sx} 、 A_{sy} 时, 考虑荷载组合后选取的

控制轴力和弯矩设计值 (kN , $\text{kN}\cdot\text{M}$)

N_{cv} 、 V_{cx} 、 V_{cy} ——计算框架柱 A_{sv} 时，考虑荷载组合后选取的控制轴力和剪力设计值 (kN, kN)

3. 几何参数

a_0 ——纵向受力钢筋的混凝土保护层厚度 (mm)

c ——最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离 (mm)

a ——纵向受拉钢筋合力点至截面近边的距离 (mm)

a' ——纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离 (mm)

l ——梁长 (mm)

H ——柱高 (mm)

x ——混凝土受压区高度 (mm)

ξ_b ——相对界限受压区高度： $\xi_b = x_b/h_0$

h_b ——框架梁截面高度 (mm)

b_b ——框架梁截面宽度 (mm)

b_f' ——T 型截面梁受压区的翼缘计算宽度 (mm)

h_f' ——T 型截面梁受压区的翼缘高度 (mm)

h_c ——框架柱截面高度 (mm)

b_c ——框架柱截面宽度 (mm)

A_{s0} ——框架梁跨中截面受拉区纵向钢筋的截面面积 (mm²)

A_{s1} ——框架梁左支座截面受拉区纵向钢筋的截面面积 (mm²)

A_{s2} ——框架梁右支座截面受拉区纵向钢筋的截面面积 (mm²)

A_{sx} 、 A_{sy} ——框架柱单边纵向钢筋的截面面积 (mm²)

A_{sv} ——同一截面内各肢箍筋的全部截面面积 (mm²)

s ——箍筋间距 (mm)

B ——受弯构件的截面刚度

4. 计算系数及其他

α_1 ——受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值

β_1 ——矩形应力图受压区高度与中和轴高度的比值

β_c ——混凝土强度影响系数

ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数

γ_{RE} ——承载力抗震调整系数

α_{cr} ——构件受力特征系数

S ——梁挠度计算时与荷载形式、支撑条件有关的荷载效应系数

d_{te} ——受拉区纵向钢筋的等效直径 (mm)

θ ——柱轴压比

λ_v ——最小配箍特征值

$[f]$ ——受弯构件的挠度限值 (mm)

$[\theta_e]$ ——弹性层间位移角限值 (rad)

ω_{lim} ——最大裂缝宽度限值 (mm)

ρ ——纵向受力钢筋的配筋率

ρ_v ——柱箍筋加密区的体积配箍率

ρ_{te} ——按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率

Δu_e ——多遇地震作用标准值产生的楼层内最大的弹性层间位移 (mm)

$C_b(X)$ ——梁造价 (元)

$C_c(X)$ ——柱造价 (元)

第一章 绪论

1.1 选题背景

钢筋混凝土框架结构是我国各类型建筑中使用最普遍的结构形式之一。钢筋混凝土结构具有造价低、耐久性高、防火性能好以及刚度大可减少侧向位移等特点,使其成为世界各国占主导地位的结构。另外,由于框架结构把围护结构与承重结构分开,使其具备结构轻巧、平面布置灵活、立面富于变化、可形成大的使用空间、可标准化施工等优点,而成为钢筋混凝土结构中最常用的结构形式。

传统结构设计一直沿用着经验类比的设计方法。这种方法参照同类工程较为成熟的设计方案或凭借设计者的经验,通过初步估算,确定一个适宜的初步方案和相关设计参数,然后对初定方案进行必要的分析校核,调整参数,并再一次进行分析校核,如此反复,直到获得满足工程要求的设计方案为止。即“假设——分析——校核——重新设计”^[1]的过程。这种设计方法,主要是基于安全性的考虑,很少考虑经济性,求得的结果虽然满足设计要求,但不一定是最优的方案。结构优化设计就是要发展一套科学、严格而实用的数学方法,应用于工程中,找到既安全又经济的设计,已成为工程设计中的重要问题之一。

国内外已有的诸多研究表明,结构优化设计能取得显著的经济效益和社会效益。我国正处于蓬勃发展的高速建设之中,以2002年为例,当年城镇住宅建设总投资4500亿^[2],如果按优化设计节省造价5%~30%^[3]计算,其节省投资的金额将是相当可观的。另外,通过对结构优化设计的造价分析可以找出影响工程造价的主要因素,为工程设计作指导。同时分析框架结构优化的数学模型,编制框架结构优化设计应用程序,做到理论上可行、实际应用上可取。

1.2 研究历史及现状^[4~8]

远古时代,人们在工程实践中即已萌生出优选的思想,结构形式由梁演变到桁架、拱、预应力混凝土梁就是人们在不断探索与寻求重量轻、材料省、受力好的合理结构形式的过程中长期经验的总结。这种朴素的优化思想一直延续到19世纪,1890年由Maxwell及1905年由Cilley等提出最轻桁架的同时破坏设计^[9],

使优化思想应用于土建结构设计有了一定的理论依据, 这些方法形成了结构设计的优化准则, 尽管没有在数学上得到严格的证明, 但在指导人们进行结构设计方面起到了很好的作用。这一阶段优化设计处于较低层次, 主要解决的工作有: 高度理想化框架的最小重量布局, 基于强度分析或结构指标等准则的结构构件优化设计, 基于塑性破坏或极限分析设计原理的简单结构体系的最轻设计。

在五十年代末, 优化方法中的数学规划法被首次用于结构优化并获得巨大成功, 成为优化方法的理论基础。1960年, Schmit首先给出了用数学规划方法求解多种荷载情况下弹性结构设计的数学表达^[10], 开启了现代结构优化的新时代。在这样的表达式中, 结构优化设计成为在诸于应力、位移、频率等性态函数约束下的设计变量空间中目标函数的数学极值问题, 由数学规划方法来实现极值的搜索。此后, 结构优化的数学规划法很快得到发展和应用。但结构优化问题变量多、约束也多, 并且大都是复杂的隐式函数, 每做一次重分析的工作量浩大, 若直接采用数学规划理论需要多次调用函数计算, 并且随设计变量的增加而迅速增加, 即使用能力很大的计算机也很难胜任, 因此, 人们不得不重新考虑回到比较现实的基础上, 回到理论上不那么广泛适应而应用上比较容易实现的优化准则法。

1971年, Venkayya提出了一个离散型优化准则——均匀应变能密度准则^[11], 标志着离散优化准则得到极大重视的开始。20世纪70年代, 人们把数学规划中的Kuhn-Tucker条件作为最优结构满足的准则, 使通用性得到提高, 理论性得到加强。优化准则法最突出的特点是迭代次数少, 且迭代次数对设计变量的增加不敏感, 因而有很高的计算效率。但是准则法的递推公式缺乏数学基础, 没有收敛性证明, 因此, 还远不能应用于工程实践。于是, 从七十年代初起, 结构优化就有了准则法和数学规划法两条不同的途径。

当前, 学者们除积极研究两种方法结合之外, 还积极探索其它研究途径。如将计算智能与优化理论结合起来构造智能优化技术。1993年, Berk发现神经网络计算也可以用来进行对土木工程结构构件的优化设计^[8]。1994年, 美国Holland提出了基于遗传算法的结构优化设计^[8]。但是, 由于这些研究在理论上还不完备, 无法进行实际工程应用。

结构优化设计在我国起步比较晚。1973年, 钱令希教授发表的关于“结构优化设计的近代发展”一文, 可以说是国内研究结构优化设计的一个进军号^[5]。

1982年,钱令希教授的另一论著《我国结构优化设计的现况》,论述了我国在结构优化设计方面的成果。近二十年来,结构优化设计的研究更是取得了长足的发展,如结构形状优化、使用灵敏度分析、将可靠度引入结构优化领域等等。

但考察过去二十年结构优化设计走过的道路,我们注意到一些现象和启示:一是研究工作活跃,而应用方面显然落后,比之结构分析中的有限元法的普及,差距很大;二是相关书籍或研究论文,从内容思路到文字表达,以面向研究者为主,很少兼顾工程设计人员的要求。工程设计人员非常尊重设计规范,这是很实际的问题,因此,从发展的观点看,使优化手段能为他们所接受,就必须建立一个准确的全面反映设计规范的数学模型和一套实用的结构优化设计程序。可喜的是针对这类问题,近年来相关文献作了不少尝试和研究,如基于地震作用的框架-剪力墙结构剪力墙优化及辅助设计程序,基于体积最小的框架结构优化设计有限元分析等等,特别是对目前最广泛使用的钢筋混凝土结构类型之一的钢筋混凝土框架结构优化设计,不少学者进行了广泛而卓有成效的研究,但是为了解决实际应用或方法的高效,大多文献将设计参数简化为一维^[12]问题或多维^[13~15]问题,或为全参数优化设计,但约束条件不够充分^[16];或有考虑全约束的,但不是全参数优化设计^[14],使得以往的数学模型无法完善的描述实际问题。有时,解法虽然很巧妙,解的精度也很高,但是如果忽视了某条设计规范的要求,这样的解也是不可以接受的。实际上钢筋混凝土框架结构优化设计是一个极其复杂的问题。它不仅需要对结构进行细致的力学分析,还要考虑优化参数的选取是否有效反映框架结构设计特征、是否具备高效稳定的寻优计算功能和方便工程设计人员操作的应用程序等等。本文就是结合结构优化理论的发展,利用中国建筑科学研究院编制的工程应用程序SATWE的内力计算功能以及MathWorks公司推出的工程计算及数值分析软件MATLAB的强大数值计算功能对框架结构进行优化设计并编制可独立执行的应用程序。

1.3 本文研究内容

本文综合结构设计、数学规划和计算机技术,通过分部优化法对钢筋混凝土框架结构进行优化设计和分析,并开发图形用户界面可独立执行应用程序。本文完成的主要研究内容有:

第一章 介绍结构优化的历史和现状,论述选题的重要意义;

第二章 介绍结构优化的基本理论

第三章 介绍准则法以及数学规划在结构优化设计中的应用,并重点介绍了具有严密理论基础的数学规划法,详细分析了 MATLAB 中 fmincon 函数关于非线性约束中型最优化问题的规范算法——序列二次规划,为寻优计算作理论准备;

第四章 建立融入设计规范的成熟完善的全参数全约束钢筋混凝土框架梁柱优化设计的数学模型,对框架梁、柱构件进行优化设计;

第五章 在构件优化的基础上,根据优化设计参数与力学模型关系的分析,采用分部优化法对钢筋混凝土框架结构进行优化设计,并结合 MATLAB 编制了框架结构优化设计的寻优计算及其可独立应用程序;

第六章 通过算例验证程序的稳定性、准确性以及方法的可行性、高效性,并对算例的相关数据结果进行分析,得出一些定量及定性的结论以指导工程设计;

第七章 对本文的研究内容及不足进行了总结,通过本文的研究,为框架结构优化设计的实际应用,节省建筑材料和降低造价,具有重要的现实意义和很好的应用前景,同时概述了作者关于进一步完善研究内容的几点设想。

第二章 结构优化的基本理论^[1, 3, 4, 17]

2.1 结构优化的数学模型

如何把解决结构优化这一具体、个别的问题抽象到一般形式加以研究,关键在于结构优化问题的数学模型化。优化问题的数学模型一般为:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(X), \quad X = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]^T \\ \text{s.t.} \quad & g_i(X) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & h_j(X) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (2-1)$$

即求 $X \in R^n$, 使得目标函数值最小, 且满足全部约束条件。从上述数学模型(式 2-1)可知结构优化设计有三个要素: 设计变量、目标函数和约束条件。

(1) 设计变量

结构优化设计中待确定的某些参数, 称为设计变量。一个结构设计的方案是由若干个参数来描述的, 根据具体情况, 这些变量可以是截面尺寸、面积、惯性矩等设计界面的几何参数, 也可以是高度、跨度等形状布置几何参数, 还可以是材料的力学或物理特性参数。这些参数中, 在优化设计过程中始终保持不变的量称为预定参数, 那些可以变化的量即为设计变量。

为了便于矩阵运算, 可以用设计向量来表示 n 维设计变量, 即

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]^T$$

(2) 目标函数

结构优化设计时判别设计方案优劣标准的数学表达式称为目标函数。它是设计变量的函数, 它代表所设计结构的某个重要特征或指标。优化设计就是以目标函数为标准, 在众多可行设计中, 找出这个函数的极值, 从而确定最优设计方案。

结构的布置方案、体积、刚度、承载力、造价、重量、自振频率、位移或加速度等都可以根据需要作为优化设计中的目标函数。

(3) 约束条件

结构优化设计在寻求目标函数极值时应该遵守的条件称为约束条件。它反映了有关设计规范、计算规程、安装、施工、构造等各方面的约束, 甚至可以反映

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库