

引用本文:刘嘉达仁,杨绿峰,张 伟,等. 框架结构整体承载力优化设计的改进方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 161-169.  
LIU Jiadaren, YANG Lyu-feng, ZHANG Wei, et al. Improved Method for Optimal Design of Overall Bearing Capacity Optimization of Frame Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 161-169.

DOI:10.19815/j.jace.2018.01053

# 框架结构整体承载力优化设计的改进方法

刘嘉达仁<sup>1,2</sup>, 杨绿峰<sup>1</sup>, 张 伟<sup>1</sup>, 冯瑛琪<sup>3</sup>

(1. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004;

2. 阿尔伯塔大学 土木与环境工程学院, 阿尔伯塔 埃德蒙顿 T6G1H9;

3. 广西建设职业技术学院, 广西 南宁 530003)

**摘要:**为解决框架结构整体承载力优化设计方面存在的问题,建立了多内力组合下矩形和工字形截面几何参数的调整方法,并通过引入强化迭代系数提出了框架结构整体承载力优化设计的改进方法。首先,通过弹性模量缩减法分析框架结构在组合内力下的损伤演化过程,据此确定框架结构在构件和整体 2 个层面的承载力需求。然后提出了强化迭代系数并确定了其取值,据此调整构件截面强度,建立了结构整体承载力优化设计的加速迭代格式,其可保证框架结构在构件和整体 2 个层面上的安全性需求并优化结构耗材。同时,为实现截面强度调整在结构计算模型中的更新,建立了多内力组合作用下矩形和工字形截面几何参数调整公式,可根据截面强度调整需求进行截面几何参数的调整。最后,通过与满应力优化准则法对比分析验证了所提方法的合理性。结果表明:采用构件截面几何参数调整方法和加速迭代格式,强化迭代系数取 1.001~1.020 时,所提方法迭代收敛速度快,且能够获得承载性能和经济性能均优的框架优化设计方案。

**关键词:**整体承载力;强化迭代系数;优化设计;弹性模量缩减法

**中图分类号:**TU318

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-2049(2020)05-0161-09

## Improved Method for Optimal Design of Overall Bearing Capacity Optimization of Frame Structures

LIU Jiadaren<sup>1,2</sup>, YANG Lyu-feng<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, FENG Ying-qi<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton T6G1H9, Alberta, Canada; 3. Guangxi Polytechnic of Construction, Nanning 530003, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to solve the problems existing in the optimal design of the overall bearing capacity of frame structures, the adjustment method of geometric parameters of rectangular and I-shaped sections under the combination of multiple internal forces was studied and established. By introducing the enhanced iteration coefficient, an improved method for the optimal design of overall bearing capacity of frame structure was proposed. Firstly, the damage evolution process of the frame structure under the combined internal force was analyzed by the elastic modulus

收稿日期:2019-10-21

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51738004);国家自然科学基金项目(51478125,51469004)

作者简介:刘嘉达仁(1993-),男,山东菏泽人,工学博士研究生,E-mail:jiadaren@ualberta.ca.

通信作者:杨绿峰(1966-),男,河南鲁山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:alfyang@foxmail.com.

reduction method, and the bearing capacity requirements of the frame structure at both the component and the overall level were determined. Then, the enhanced iteration coefficient was put forward and the value was determined, and the section strength was adjusted accordingly. The accelerated iterative scheme for the optimization design of the overall bearing capacity of the structure was established, which could ensure the safety requirements of the frame structure at both the component level and the overall level, and optimized the structural consumables. At the same time, in order to update the section strength adjustment in the structural calculation model, the geometric parameters adjustment formulas of rectangular and I-shaped sections under the combined action of multiple internal forces were established, which could be used to adjust the geometric parameters of cross-section according to the requirements of section strength adjustment. Finally, the rationality of the proposed method was verified by comparing with the full stress optimization criterion method. The results show that using the method of adjusting the geometric parameters of the member section and the accelerated iterative scheme, the convergence speed of the proposed method is fast when the enhanced iteration coefficient is 1.001-1.020, and the optimal design scheme of the frame with excellent bearing performance and economic performance can be obtained.

**Key words:** overall bearing capacity; enhanced iteration coefficient; optimal design; elastic modulus reduction method

## 0 引言

在工业和民用建筑中,相较于桁架结构及砌体结构,框架结构具有整体性和刚度较好、空间分布灵活、自重轻等优点,是一种被广泛使用的结构形式。为兼顾框架结构的安全性和经济性,有必要对其开展整体承载力优化设计。

结构优化设计方法包括数学规划法和优化准则法,其中优化准则法原理简单,且迭代分析次数与优化变量数目无关,收敛快,计算效率高,是框架结构承载力优化主要采用的方法<sup>[1-3]</sup>。优化准则法通常根据设计荷载工况下的弹性分析结果开展构件承载力优化,不能对结构整体承载力进行优化设计。近年来,国内外一些学者<sup>[4-7]</sup>基于塑性设计理论,将整体承载力纳入到结构优化设计的约束条件中,对框架结构整体承载力优化设计进行了很有意义的尝试。这类方法通常需要根据主观经验假定结构失效模式,在大型复杂框架结构中难以有效模拟结构的真实失效模式及损伤过程,从而难以准确地考虑结构整体承载力要求。为此,杨绿峰等<sup>[8-9]</sup>初步提出了结构整体承载力优化设计的均匀承载准则法,但是该方法尚未提供多内力组合作用下截面几何参数的调整方法,且迭代收敛速度尚需改进,影响了该方法在框架结构中的有效应用。

优化准则法通常是一个迭代计算的过程,在每

个迭代步结束时,各构件的截面几何参数需要根据本迭代步的强度需求进行调整,并在结构计算模型中进行更新,从而开展下一个迭代步的结构分析及优化设计。由于框架结构通常需考虑多内力组合、材料及几何非线性情况,根据强度需求确定截面几何参数的过程往往存在耗时长、计算过程繁琐等问题<sup>[10]</sup>。因而如何由强度需求确定截面几何参数是开展结构优化设计的关键环节之一。文献[11]~[13]将构件截面几何参数视为离散变量,基于规格型号库选择构件以满足强度需求,绕过了截面几何参数调整的环节。由于优化迭代过程中截面几何参数始终按照构件规格型号库选取,此类方法往往会导致构件强度过高、耗材量增加的情况,并且难以满足实际工程中为实现结构特定功能要求或节省耗材而使用非定型或异形构件的需求。文献[11], [14]~[16]基于拟合得到的截面几何参数之间的经验函数关系,将多参数调整问题简化为单参数调整问题,但这类方法需要事先给定各构件截面几何参数间的函数关系,容易遗漏最优的结构优化设计方案。

为解决上述框架结构整体承载力优化设计中的难题,基于结构极限承载力分析的弹性模量缩减法(EMRM),本文针对工程中常用的矩形和工字形截面,研究了多内力组合作用下截面几何参数调整方法,提出了能够提升计算效率并兼顾优化效果的强化迭代

系数,据此建立了框架结构整体承载力优化设计的改进方法。

## 1 框架结构整体承载力优化设计

### 1.1 结构整体承载力分析的弹性模量缩减法

结构承载力是结构优化设计中的重要约束条件,本文采用 EMRM 分析确定框架结构的构件和整体承载力,定义单元承载比 (EBR) 为

$$r^e = \sqrt[M_1]{f} \quad (1)$$

式中:  $r^e$  为单元  $e$  的承载比;  $f$  为齐次广义屈服函数;  $M_1$  为齐次广义屈服函数的阶次。

对于矩形截面,  $f$  为

$$\begin{aligned} f = & 1.016n_x^4 + 0.887n_x^3m_y + 1.41n_x^3m_z + \\ & 4.303n_x^2m_y^2 + 3.548n_x^2m_z^2 - 2.05n_x^2m_y m_z - \\ & 0.121n_xm_y^3 - 1.214n_xm_y^2m_z - 0.686n_xm_y m_z^2 + \\ & 0.033n_xm_z^3 + 0.326m_y m_z^3 + 2.289m_y^2m_z^2 + \\ & 0.375m_y^3m_z + 0.993m_y^4 + 0.994m_z^4 \end{aligned} \quad (2)$$

对于工字形截面,  $f$  为

$$\begin{aligned} f = & 1.005n_x^4 + 1.902n_x^3m_y + 0.954n_x^3m_z + \\ & 6.802n_x^2m_y^2 + 1.758n_x^2m_z^2 - 2.275n_x^2m_y m_z + \\ & 1.116n_xm_y^3 - 1.587n_xm_y^2m_z + 0.602n_xm_y m_z^2 - \\ & 0.434n_xm_z^3 + 0.098m_y m_z^3 + 2.675m_y^2m_z^2 + \\ & 0.992m_y^3m_z + 1.007m_y^4 + 1.011m_z^4 \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $n_x, m_y, m_z$  分别为轴力和双向弯矩的量纲一的内力,  $n_x = N_x/N_{px}$ ,  $m_y = M_y/M_{py}$ ,  $m_z = M_z/M_{pz}$ ,  $M_x, M_y$  和  $M_z$  分别为梁单元截面上的轴力和双向弯矩内力值,  $N_{px}, M_{py}$  和  $M_{pz}$  分别为与  $N_x, M_y$  和  $M_z$  相对应的全截面塑性抗力。

根据  $r_k^e$  定义承载比均匀度  $d_k$ , 即

$$d_k = \frac{\bar{r}_k + r_k^{\min}}{r_k + r_k^{\max}} \quad (4)$$

式中:  $k$  为迭代步数;  $\bar{r}_k, r_k^{\min}$  和  $r_k^{\max}$  分别为单元承载比的平均值、最小值和最大值。

定义基准承载比  $r_k^0$  为

$$r_k^0 = r_k^{\max} - (r_k^{\max} - r_k^{\min})d_k \quad (5)$$

$r_k^e > r_k^0$  时, 单元  $e$  处于高承载状态, 称之为高承载单元; 反之当  $r_k^e \leq r_k^0$  时, 单元  $e$  处于低承载状态, 称为低承载单元。结构由受力至失效的塑性损伤过程可以通过高承载单元的弹性模量缩减来模拟, 即

$$E_{k+1}^e = \begin{cases} E_k^e \frac{2(r_k^0)^2}{(r_k^e)^2 + (r_k^0)^2} & r_k^e > r_k^0 \\ E_k^e & r_k^e \leq r_k^0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $E_{k+1}^e$  和  $E_k^e$  分别为单元  $e$  的弹性模量在两相邻迭代步  $k+1$  和  $k$  时的取值。

第  $k$  迭代步的极限荷载  $P_L^k$  为

$$P_L^k = P_0 / r_k^{\max} \quad (7)$$

式中:  $P_0$  为外荷载初始值。

定义 EMRM 收敛条件为

$$|(P_L^M - P_L^{M-1}) / P_L^{M-1}| \leq \epsilon \quad (8)$$

式中:  $\epsilon$  为收敛容许误差, 本文取 0.000 1。

根据第  $M$  迭代步的计算结果  $P_L^M$  可以得到结构整体承载力  $P_{Lim}$ , 即

$$P_{Lim} = P_L^M = P_0 / r_M^{\max} \quad (9)$$

上述计算结构整体承载力的方法称为弹性模量缩减法。

### 1.2 高、低承载构件的判别准则

在框架结构有限元计算模型中, 各构件通常被划分为多个梁单元。取各构件内全部 EBR 的最大值为该构件的构件承载比 (CBR), 即

$$b_k^c = \max\{r_k^1, r_k^2, \dots, r_k^{N_c}\} \quad (10)$$

式中:  $b_k^c$  为构件  $c$  在第  $k$  迭代步时的构件承载比;  $N_c$  为构件  $c$  划分单元的数量。

根据构件在承载过程中 CBR 值的变化, 可区分为高、低承载构件并进行相应判别。若构件在 EMRM 迭代全过程中 CBR 值始终小于  $r_k^0$ , 则该构件为低承载构件, 即

$$b_k^c < r_k^0 \quad k=1, 2, \dots, M \quad (11)$$

若构件在 EMRM 迭代末步 CBR 值大于或等于  $r_k^0$ , 则该构件为高承载构件, 并包含了第一类高承载构件和第二类高承载构件。第一类高承载构件为 CBR 值在 EMRM 迭代全过程中始终大于或等于  $r_k^0$  的构件, 即

$$b_k^c \geq r_k^0 \quad k=1, 2, \dots, M \quad (12)$$

第二类高承载构件的 CBR 值虽在 EMRM 迭代末步大于或等于  $r_k^0$ , 但在迭代初期处于低承载状态, CBR 值小于  $r_k^0$ , 即

$$\left. \begin{aligned} b_k^c < r_k^0 \quad k=1, 2, \dots, M_2 \\ b_k^c \geq r_k^0 \quad k=M_2+1, \dots, M \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

### 1.3 两层面承载力设计方法

在结构优化设计过程中, 结构的构件承载力和整体承载力都应满足预定要求。构件或结构整体安全系数小于目标值时, 表明构件或整体承载力不满足要求, 此时需要改进构件截面设计方案。

#### 1.3.1 构件承载力设计的截面强度调整方法

EMRM 迭代首步时无任何塑性损伤模拟, 各构件处于弹性承载状态, 因此可基于首步结果计算构件层面承载力储备, 即构件安全系数  $K_1^c$

$$K_1^c = 1/b_1^c \quad (14)$$

当构件  $c$  的构件承载力储备不足, 即该构件的构件安全系数小于其目标值 ( $K_1^c < K_0$ ) 时, 需根据截面强度需求调整该构件的截面强度, 避免构件失效风险

$$R_w^c = \alpha^c R^c, \alpha^c = \eta K_0 / K_1^c \quad (15)$$

式中:  $R^c$  和  $R_w^c$  分别为调整前、后的构件截面强度;  $\alpha^c$  为构件强度调整系数;  $\eta$  为强化迭代系数。

### 1.3.2 整体承载力设计的截面强度调整方法

EMRM 迭代末步时结构失效破坏, 结构整体处于塑性极限状态, 因此可基于迭代末步结果计算整体层面承载力储备, 即整体安全系数  $K_M^c$

$$K_M^c = 1/b_M^{\max} \quad (16)$$

式中:  $b_M^{\max}$  为 EMRM 迭代末步的最大构件承载比。

同时, 可计算结构临近失效破坏时的各构件安全系数  $K_M^c$

$$K_M^c = 1/b_M^c \quad (17)$$

当结构整体承载力储备不足, 即该结构的整体安全系数小于其目标值 ( $K^c < K^s$ ) 时, 需根据截面强度需求调整不满足  $K_M^c \geq K^s$  的高承载构件, 避免结构整体失效风险

$$R_w^c = \alpha^s R^c, \alpha^s = \eta K^s / K_M^c \quad (18)$$

式中:  $\alpha^s$  为整体承载力调整系数。

由于荷载和材料分项安全系数已在结构初始设计方案中考虑, 本文取  $K_0 = 1.00$ , 同时参考文献 [8], [9] 对结构整体承载能力安全性的研究, 取  $K_0 = 1.40$ 。

需要说明的是, 式 (15), (18) 中均提出了强化迭代系数  $\eta$ 。  $\eta$  的取值略大于 1, 使得截面强度的调整幅度略大于 1。这是由于构件截面强度调整后, 截面几何尺寸及刚度也相应改变, 在超静定框架结构中各构件的内力分配会发生变化, 有时会导致截面强度调整后无法严格满足安全系数目标值的要求, 需开展多次的迭代循环。引入取值略大于 1 的强化迭代系数, 可以有效降低迭代次数, 提升计算效率, 但其取值过大时会带来截面强度调整幅度过大、降低优化效果的问题。后文结合算例分析研究了  $\eta$  的取值问题, 并给出了取值建议。

### 1.4 整体承载力的优化设计方法

优化设计的实质就是通过不断减少低承载构件的截面强度, 实现减少结构耗材的目的。

低承载构件截面强度在调整前后应满足

$$R_w^c / R^c = b_M^c / r_M^0 \quad (19)$$

据此可调整低承载构件截面强度

$$R_w^c = \alpha^p R^c, \alpha^p = b_M^c / r_M^0 \quad (20)$$

式中:  $r_M^0$  为 EMRM 迭代末步的基准承载比;  $\alpha^p$  为低承载构件的强度调整系数。

从上述高、低承载构件的强度调整过程可以看出, 通过降低高承载构件的 CBR 值及提升低承载构件的 CBR 值, 结构的承载比均匀度  $d_k$  得到显著提升, 使得各构件强度利用更加充分。重复开展上述高、低承载构件的强度调整过程, 直至满足框架结构优化设计的均匀承载准则, 即前后 2 次 EMRM 迭代末步的结构承载比均匀度满足

$$\frac{|d_M^i - d_M^{i-1}|}{d_M^{i-1}} \leq \varepsilon_d \quad (21)$$

式中:  $\varepsilon_d$  为收敛容差, 本文取 0.001。

多内力组合下框架结构整体承载力优化设计流程如图 1 所示。

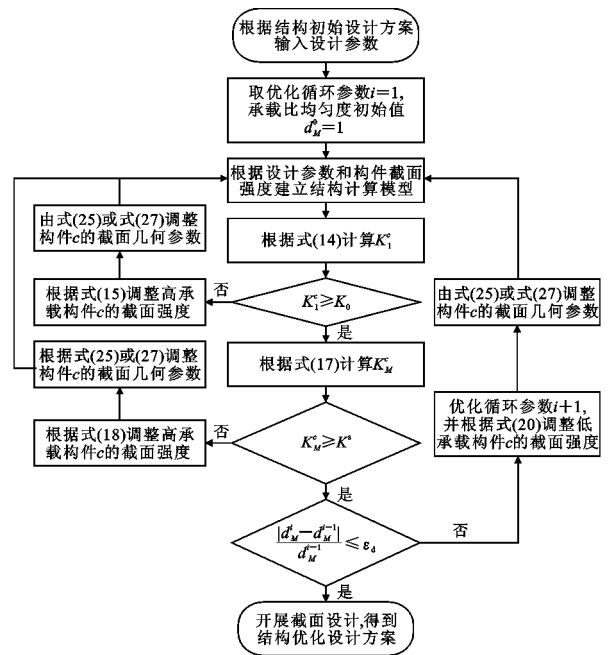


图 1 结构整体承载力设计与优化流程

Fig. 1 Flow Chart of Overall Bearing Capacity Design and Optimization

## 2 截面几何参数调整方法

通过第 1.3 节和第 1.4 节可以确定多内力组合作用下结构整体承载力优化设计所需要的构件截面强度, 并据此调整构件的截面几何参数。

### 2.1 矩形截面

如图 2 所示矩形截面, 截面高为  $h$ , 宽为  $b$ , 材料屈服强度为  $\sigma_s$ 。多内力组合作用下, 平面内外弯矩  $M_y, M_z$  和轴力  $M_x$  相应的截面强度为

$$M_{py} = 0.25\sigma_s b h^2, M_{pz} = 0.25\sigma_s b^2 h,$$

$$N_{px} = \sigma_s b h$$

(22)

考虑  $N_{px}$  和  $M_{py}$  时, 可建立截面几何参数调整

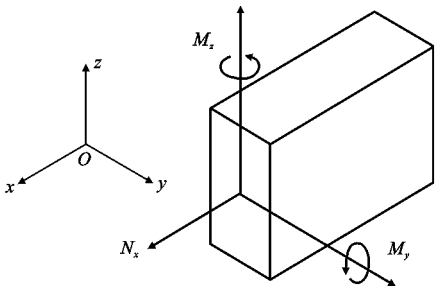


图 2 矩形截面

Fig. 2 Rectangular Cross Section

公式,即

$$h_1=\frac{4M_{py}}{N_{px}},\quad b_1=\frac{N_{px}}{\sigma_s h}\tag{23}$$

考虑  $N_{px}$  和  $M_{pz}$  时,可建立截面几何参数调整公式,即

$$h_2=\frac{N_{px}}{\sigma_s b},\quad b_2=\frac{4M_{pz}}{N_{px}}\tag{24}$$

矩形截面的几何参数调整公式为

$$h=\max\{h_1,h_2\},\quad b=\max\{b_1,b_2\}\tag{25}$$

2.2 工字形截面

如图 3 所示工字形截面,截面高度为  $d$ ,翼缘宽度为  $b_f$ ,翼缘厚度为  $t_f$ ,腹板厚度为  $t_w$ ,材料屈服强度为  $\sigma_s$ ,令  $\beta$  为腹板与单翼缘面积比,  $\beta=A_w/A_f$ 。

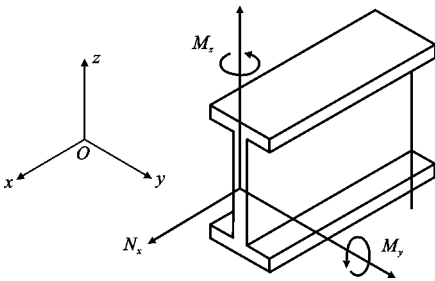


图 3 工字形截面

Fig. 3 I-shaped Cross Section

平面内外弯矩  $M_y, M_z$  和轴力  $N_x$  相应的截面强度为

$$M_{py}=\sigma_s A_f d(1+0.25\beta),\quad M_{pz}=0.5\sigma_s A_f b_f,\quad N_{px}=\sigma_s A_f(2+\beta),\tag{26}$$

工字形截面的几何参数调整公式为

$$A_f=\frac{N_{px}}{\sigma_s(2+\beta)},\quad b_f=\frac{2M_{pz}}{\sigma_s A_f},\quad t_f=\frac{A_f}{b_f},\quad d=\frac{M_{py}}{\sigma_s A_f(1+0.25\beta)}+t_f,\quad t_w=\frac{\beta A_f}{d-2t_f}\tag{27}$$

3 算例分析

3.1 算例 1:工字形平面框架

图 4 为一工字形截面平面框架,其中均布荷载

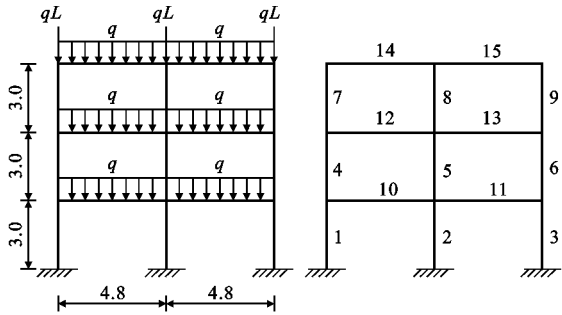


图 4 平面框架计算模型

Fig. 4 Calculation Model of Plane Frame

$q=24\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,半跨长  $L=4.8\text{ m}$ ,材料为 Q235 钢。初始方案各构件的规格型号如表 1 所示。构件和整体安全系数目标值分别取  $K_0, K^s=1.40$ 。

表 1 初始方案

Tab. 1 Initial Scheme

组别	构件类型	构件编号	$d/\text{mm}$	$b_f/\text{mm}$	$t_w/\text{mm}$	$t_f/\text{mm}$
①	柱	1~9	320	130	9.5	15.0
②	梁	10~15	180	94	6.5	10.7

3.1.1 结构高、低承载构件的识别

首先采用 EMRM 进行结构分析。基于结构初步设计方案建立线弹性有限元模型,每根构件被划分为 4 个梁单元。在 EMRM 迭代过程中,识别出高承载构件包括 1,3,4,6,10~15,低承载构件包括 2,5,7~9。其中,典型构件的 CBR 迭代过程如图 5 所示。从图 5 可以看出:低承载构件 7 的 CBR 在迭代过程中始终小于  $r_k^0$ ;第一类高承载构件 10 的 CBR 在迭代过程中始终大于  $r_k^0$ ;第二类高承载构件 1 和 4 的 CBR 在迭代初期小于  $r_k^0$ ,但在迭代末步大于  $r_k^0$ 。这些典型构件的弹性模量缩减过程如图 6 所示。可以看出,构件 7 为低承载构件,在承载过程中始终处于弹性阶段,其弹性模量未被缩减,高承载构件 1,4 和 10 在承载过程中逐渐产生塑性损伤,其弹性模量在迭代过程中逐步被缩减。

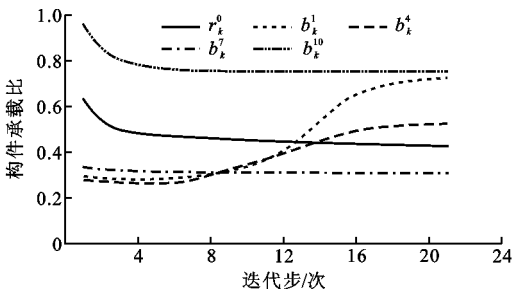


图 5 CBR 迭代过程

Fig. 5 Iterative Process of CBR

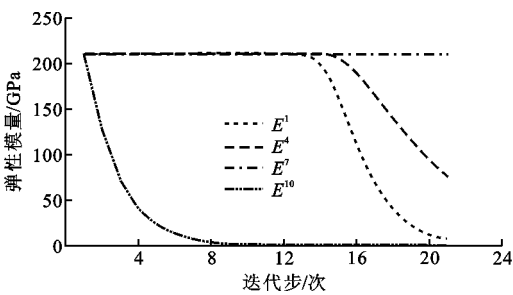


图 6 弹性模量迭代过程

Fig. 6 Iterative Process of Elastic Modulus

3.1.2 结构整体承载力设计

根据EMRM迭代首步结果,可评估构件层面

承载能力的储备,即各构件的构件安全系数  $K_{\text{f}}$ 。如表2所示,所有构件的  $K_{\text{f}}$  均大于目标值  $K_0$ ,即无需根据构件承载力要求进行截面调整。

根据 EMRM 迭代末步结果,可评估整体层面承载能力的储备,即结构整体安全系数  $K^{\text{g}}=1.33$ ,小于其目标值要求  $K^{\text{s}}=1.40$ ,表明需进行整体承载力的截面强度调整。基于式(18),(27)进行整体承载力设计,得到结构整体承载力设计方案如表 2 所示。从表 2 可以看出,通过增强部分高承载构件(构件 10~15)的截面强度,结构整体承载力安全性要求得以满足。

表 2 结构整体承载力设计方案

Tab. 2 Design Scheme of Overall Bearing Capacity of Structure

构件 编号	初步设计					整体承载力设计					整体承载力优化设计					满应力准则设计				
	$d/$ mm	$b_{\text{f}}/$ mm	$t_{\text{w}}/$ mm	$t_{\text{f}}/$ mm	$K_{\text{f}}$	$d/$ mm	$b_{\text{f}}/$ mm	$t_{\text{w}}/$ mm	$t_{\text{f}}/$ mm	$K_{\text{f}}$	$d/$ mm	$b_{\text{f}}/$ mm	$t_{\text{w}}/$ mm	$t_{\text{f}}/$ mm	$K_{\text{f}}$	$d/$ mm	$b_{\text{f}}/$ mm	$t_{\text{w}}/$ mm	$t_{\text{f}}/$ mm	$K_{\text{f}}$
1,3	320	130	9.5	15.0	3.40	320	130	9.5	15.0	3.40	320	130	9.5	15.0	3.51	140	80	5.5	9.1	1.10
2	320	130	9.5	15.0	3.08	320	130	9.5	15.0	3.08	180	94	6.5	10.7	1.39	160	88	6.0	9.9	1.14
4,6	320	130	9.5	15.0	3.57	320	130	9.5	15.0	3.57	320	130	9.5	15.0	3.23	160	88	6.0	9.9	1.16
5	320	130	9.5	15.0	4.11	320	130	9.5	15.0	4.11	160	88	6.0	9.9	1.56	120	74	5.0	8.4	1.05
7,9	320	130	9.5	15.0	2.98	320	130	9.5	15.0	2.99	180	94	6.5	10.7	1.28	180	94	6.5	10.7	1.22
8	320	130	9.5	15.0	6.15	320	130	9.5	15.0	6.15	160	88	6.0	9.9	2.30	100	68	4.5	7.6	1.26
10,11	180	94	6.5	10.7	1.04	181	94	6.9	11.3	1.10	200	100	7.0	11.4	1.37	200	100	7.0	11.4	1.13
12,13	180	94	6.5	10.7	1.06	181	94	6.9	11.3	1.12	200	100	7.0	11.4	1.34	200	100	7.0	11.4	1.29
14,15	180	94	6.5	10.7	1.02	181	94	6.9	11.3	1.07	200	100	7.0	11.4	1.16	200	100	7.0	11.4	1.19
$K^{\text{g}}$	1.33					1.40					1.45					1.05				
节省耗材 比例/%						-3.25					16.11									

3.1.3 结构整体承载力优化

由表 2 可以看出,整体承载力设计由于增强了部分高承载构件(10~15)的截面强度,使结构耗材与初步设计方案相比增加了一3.25%,且结构初步设计和整体承载力设计方案中低承载构件的  $K_{\text{f}}$  均远大于其目标值  $K_0=1.00$  的要求,构件承载力储备偏高,因此有必要进行结构优化。基于式(19)~(21)开展结构整体承载力优化迭代,减小低承载构件的截面强度,并基于式(27)进行相应的截面几何参数调整,最终根据《热轧型钢》(GB/T 706—2008)规范,选择构件截面尺寸规格,得到整体承载力优化设计方案(表 2)。从表 2 可以看出,5 个低承载构件(构件 2,5,7,8,9)的截面强度被显著缩减,结构耗材较初始方案节省了 16.11%。由此可见,本文方法能够同时满足构件承载力和整体承载力的安全性要求,获得承载性能与经济性能均优的优化设计方案。

需要指出的是,第二类高承载构件 1,3,4,6 的截面强度未被缩减。此类构件的 CBR 值在迭代初期较小,低于基准承载比  $r_k^0$ ,但在迭代末期高于  $r_k^0$ ,对结构整体承载力安全贡献较大。

3.1.4 强化迭代系数  $\eta$  的取值

取  $\eta=1.001\sim1.030$ ,计算研究了  $\eta$  取值对整体承载力优化设计优化效率和计算效率的影响。由表 3 可知:当  $\eta$  取值稍大于 1(1.000 1~1.001 0)时,优化效率被略微减小,但计算效率大幅提升;进一步增大  $\eta$  的取值,计算效率总体呈提升趋势,但优化效率被逐步减小。通过大量数据分析, $\eta=1.001\sim1.020$ 时可以在提升计算效率的同时兼顾良好的优化效率。本算例取  $\eta=1.001$ 。

3.1.5 满应力准则设计对比

满应力准则设计以结构中各构件的应力在约束条件下达到最大值为准则,被广泛应用于桁架结构的优化设计中。这里采用框架结构满应力设计中的

表 3 强化迭代系数  $\eta$  效应分析

Tab.3 Effect Analysis of Enhanced Iterative Coefficient  $\eta$

强化迭代系数 $\eta$	1.000 0	1.000 1	1.001 0	1.005 0	1.010 0	1.015 0	1.020 0	1.030 0
节省耗材比例/%	16.04	16.03	15.97	15.63	15.21	14.79	14.37	13.53
计算耗时/s	288.2	176.3	154.3	152.0	148.5	152.0	151.4	155.0

浮动应力指数法<sup>[10]</sup>,对比分析本文方法的合理性。取截面惯性矩  $I_y$  作为设计变量,得到框架结构的满应力准则设计方案,如表 2 所示。各构件的构件安全系数均大于目标值  $K_0=1.00$ ,表明满应力准则设计可以满足结构在构件层面安全性的要求。

利用弹塑性增量法(EPIA)计算得到满应力准则设计方案的整体承载力为  $25.24\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,代入式(16)可以得到其整体安全系数  $K^g=1.05$ ,远小于其目标值  $K^s=1.40$  的要求,表明满应力准则设计无法满足结构在整体层面安全性的要求。由表 2 可以看出,第二类高承载构件 1,3,4,6 的截面强度被大幅度缩减,表明满应力准则设计无法识别这类高承载构件,将这类高承载构件等同为低承载构件进行截面强度的缩减,从而导致结构整体承载力不足。本文方法通过 EMRM 迭代分析,可以准确识别第二类高承载构件,克服了满应力准则设计无法满足结构在整体层面安全性的要求。

同时,表 4 对比分析了 EPIA 和 EMRM 对整体承载力优化设计方案的计算结果。可以看出,2 种方法的计算结果基本吻合,EMRM 具有较高的计算效率。

表 4 整体安全系数及计算耗时

Tab.4 Overall Safety Factor and Calculation Time			
计算方法	$P_L/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$K^g$	耗时/s
EPIA	33.60	1.40	14.8
EMRM	34.86	1.45	11.5

注: $P_L$  为结构极限承载力。

3.2 算例 2:工字形空间框架

图 7 为工字形截面空间框架, $q=24\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,层高  $H=3.0\text{ m}$ ,材料为 Q235 钢。初始方案各构件的规格型号如表 5 所示。构件和结构整体安全系数的目标值分别取  $K_0=1.00$  和  $K^s=1.40$ ,强化迭代系数  $\eta=1.001$ 。

3.2.1 结构整体承载力设计

基于结构初步设计方案可建立线弹性有限元模型进行 EMRM 分析,每根构件被划分为 8 个梁单元。在 EMRM 迭代过程中,识别出高承载构件包括 1~16,18~35,37~50,52~64,66,低承载构件包括 2,5,7~9。其中,识别出第二类高承载包括 1,

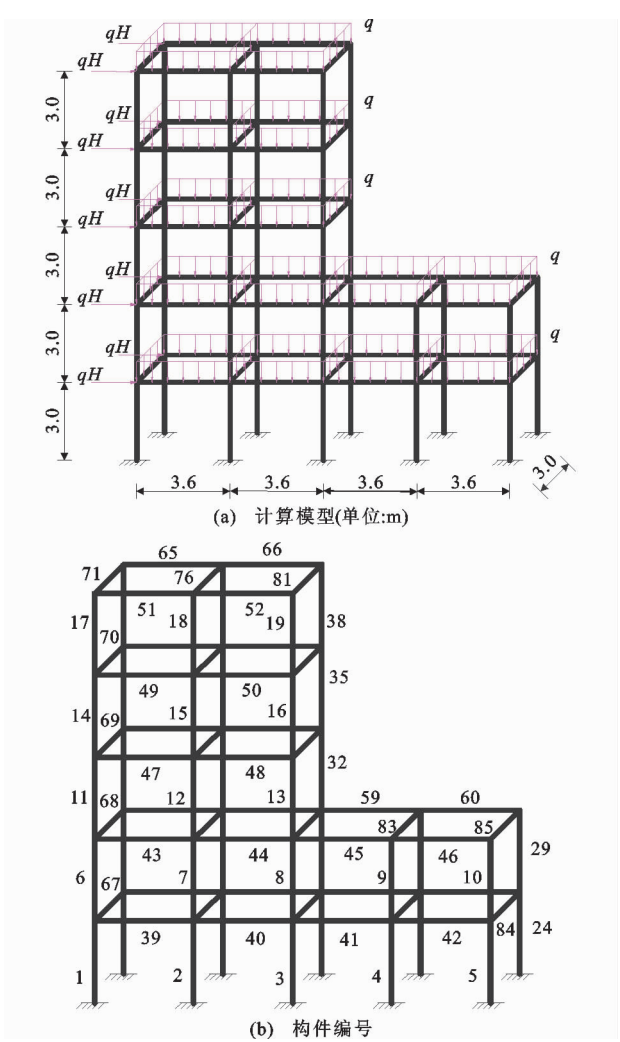


图 7 空间框架

Fig.7 Space Frame

表 5 工字形空间框架初始方案

Tab.5 Initial Scheme of I-shaped Space Frame					
构件组别	构件类型	构件编号	$d/\text{mm}$	$b_f/\text{mm}$	$t_w/\text{mm}$
①	柱	1~38	360	136	10.0
②	纵梁	39~66	320	130	9.5
③	横梁	67~85	280	124	10.5

6,10~11,14~16,18~20,25,29~30,33~35,37~38,40,45~46,49~50,52,54,59~60,63~64 和 66。

基于式(14),(16),可计算得到各构件安全系数和整体安全系数,如表 6 所示。可以看出,各构件安全系数和整体安全系数均满足目标值  $K_0=1.00$  和

表 6 各设计方案杆件规格

Tab. 6 Bar Specifications of Each Design Scheme

构件编号	初步设计(整体承载力设计)				整体承载力优化设计				满应力准则设计			
	$d/mm$	$b_l/mm$	$t_w/mm$	$t_f/mm$	$d/mm$	$b_l/mm$	$t_w/mm$	$t_f/mm$	$d/mm$	$b_l/mm$	$t_w/mm$	$t_f/mm$
1,20	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	320	130	9.5	15.0
2,8,9,12,13,21,27,28,31,32	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	450	150	11.5	18.0
3,22	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	450	154	15.5	18.0
4,23	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	360	138	12.0	15.8
5,16,18,19,24,35,37,38	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8
6,25	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	240	118	10.0	13.0
7,26	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	400	146	14.5	16.5
10,29	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	360	140	10.0	15.8
11,30	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	300	128	11.0	14.4
14,33	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	270	122	8.5	13.7
15,34	360	136	10.0	15.8	360	136	10.0	15.8	400	142	10.5	16.5
17,36	360	136	10.0	15.8	320	132	11.5	15.0	220	110	7.5	12.3
39~41,45,50,53~55,59,64	320	130	9.5	15.0	320	130	9.5	15.0	300	125	9.0	14.4
42,56	320	130	9.5	15.0	320	130	9.5	15.0	300	128	11.0	14.4
43,47,57,61	320	130	9.5	15.0	320	130	9.5	15.0	320	130	9.5	15.0
44,48,58,62	320	130	9.5	15.0	320	130	9.5	15.0	360	136	10.0	15.8
46,60	320	130	9.5	15.0	320	130	9.5	15.0	240	118	10.0	13.0
49,63	320	130	9.5	15.0	320	130	9.5	15.0	270	122	8.5	13.7
51,52,65,66	320	130	9.5	15.0	320	130	9.5	15.0	220	110	7.5	12.3
67~70,72~75,77~80,82~85	280	124	10.5	13.7	180	94	6.5	10.7	120	74	5.0	8.4
71,76,81	280	124	10.5	13.7	180	94	6.5	10.7	140	80	5.5	9.1
$\min\{K_f\}$	1.08				1.08				1.14			
$K^g$	1.42				1.42				1.33			
节省耗材比例/%					9.21							

$K^g=1.42$ 的要求,表明无需进行构件和整体承载力的截面强度调整。

3.2.2 结构整体承载力优化

基于式(19)~(21)开展结构整体承载力优化迭代,减小低承载构件的截面强度,并基于式(27)进行相应的截面几何参数调整,最终根据《热轧型钢》(GB/T 706—2008)规范,选择构件截面尺寸规格,得到整体承载力优化设计方案(表 6)。从表 6 可以看出,21 个低承载构件的截面强度被显著缩减,结构耗材较初始方案节省了 9.21%。由此可见,本文方法能够保证结构在构件和整体 2 个层面上的安全性,获得承载性能与经济性能均优的优化设计方案。需要指出的是,第二类高承载构件的截面强度均未被缩减。

3.2.3 满应力准则设计对比研究

对本算例进行满应力准则设计,得到满应力准则设计方案(表 6)。从表 6 可以看出:各构件的构件安全系数均满足其目标值要求,表明满应力准则

设计可以满足结构在构件层面安全性的要求;整体安全系数为 1.33,不满足其目标值的要求,表明满应力准则设计无法满足结构在整体层面安全性的要求。由表 6 可以看出,第二类高承载构件 11,16,30,35 的截面强度被缩减,表明满应力准则设计无法识别这类高承载构件,将这类高承载构件等同为低承载构件进行截面强度的缩减,从而导致结构整体承载力不足。本文方法通过 EMRM 迭代分析,可以准确识别第二类高承载构件,克服了满应力准则设计无法满足结构在整体层面安全性的要求。

表 7 对比分析了 EPIA 和 EMRM 对整体承载力优化设计方案的计算结果。可以看出,2 种方法的计算结果基本吻合,EMRM 的计算效率显著优于 EPIA。

4 结 语

(1)建立了多内力组合作用下矩形和工字形截面的几何参数调整方法,克服了多内力组合作用下



表 7 工字形空间框架整体安全系数及计算耗时

Tab. 7 Overall Safety Factor and Calculation Time of I -shape Space Frame

计算方法	$P_L/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$K^g$	耗时
EPIA	35.17	1.47	124 min
EMRM	34.23	1.42	40.0 s

根据强度需求确定截面几何参数耗时长、计算过程繁琐等问题。

(2)强化迭代系数取值  $\eta=1.001\sim1.020$  时,可以显著提高优化迭代的收敛速度,并可获得较好的框架结构整体承载力优化设计方案。

(3)本文整体承载力优化设计方法克服了传统优化设计方法不能准确识别第二类高承载构件,不能满足整体承载力安全性要求的问题。

参考文献:

References:

[ 1 ] PATNAIK S N, HOPKINS D A. Optimality of a Fully Stressed Design[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 165 (1/2/3/4): 215-221.

[ 2 ] MAKRI S P A, PROVATIDIS C G. Weight Minimisation of Displacement-constrained Truss Structures Using a Strain Energy Criterion[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191 (19/20): 2187-2205.

[ 3 ] KHOSRAVI P, GANESAN R, SEDAGHATI R. Optimization of Thin-walled Structures with Geometric Nonlinearity for Maximum Critical Buckling Load Using Optimality Criteria [J]. Thin-walled Structures, 2008, 46(12): 1319-1328.

[ 4 ] O'BRIEN E J, DIXON A S. Optimal Plastic Design of Pitched Roof Frames for Multiple Loading[J]. Computers & Structures, 1997, 64(1/2/3/4): 737-740.

[ 5 ] KALISZKY S, LOGO J. Optimal Design of Elastoplastic Structures Subjected to Normal and Extreme Loads[J]. Computers & Structures, 2006, 84 (28): 1770-1779.

[ 6 ] KHANZADI M, TAVAKKOLI S M. Optimal Plastic Design of Frames Using Evolutionary Structural Optimization(ESO) [J]. International Journal of Civil Engineering, 2011, 9(3): 165-170.

[ 7 ] KAVEH A, BAKHSHPOORI T, KALATEH-AHANI M. Optimum Plastic Analysis of Planar Frames Using Ant Colony System and Charged System Search Algorithms[J]. Scientia Iranica, 2013, 20(3):

414-421.

[ 8 ] 杨绿峰,欧伟,张伟. 桥梁结构两层面承载力设计与优化的策略和方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29 (7): 62-71.

YANG Lu-feng, OU Wei, ZHANG Wei. Investigation on Strategy and Method of Two-level Load Carrying Capacity Design and Optimization for Bridge Structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 62-71.

[ 9 ] 杨绿峰,李琦,张伟. 工程结构整体承载力设计与优化的弹性模量缩减法研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(5): 61-70.

YANG Lu-feng, LI Qi, ZHANG Wei. Elastic Modulus Reduction Method for Design and Optimization of Global Load Bearing Capacity of Engineering Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48 (5): 61-70.

[10] 朱伯芳. 复杂结构满应力设计的浮动应力指数法[J]. 固体力学学报, 1984(2): 255-261.

ZHU Bo-fang. The Method of Floating Stress Exponent for the Fully Stressed Design of Complex Structures[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1984 (2): 255-261.

[11] KAVEH A, TALTAHARI S. An Improved Ant Colony Optimization for the Design of Planar Steel frames[J]. Engineering Structures, 2010, 32(3): 864-873.

[12] TOGAN V. Design of Planar Steel Frames Using Teaching-learning Based Optimization[J]. Engineering Structures, 2012, 34: 225-232.

[13] MAHERI M R, NARIMANI M M. An Enhanced Harmony Search Algorithm for Optimum Design of Side Sway Steel Frames[J]. Computers & Structures, 2014, 136: 78-89.

[14] CHAN C M, GRIERSON D E. An Efficient Resizing Technique for the Design of Tall Steel Buildings Subject to Multiple Drift Constraints[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 1993, 2(1): 17-32.

[15] SAKA M P, KAMESHKI E S. Optimum Design of Nonlinear Elastic Framed Domes [J]. Advances in Engineering Software, 1998, 29(7/8/9): 519-528.

[16] 张爱林,魏文豪,杨海军. 预应力索-拱结构优化设计[J]. 钢结构, 2008, 23(1): 24-27.

ZHANG Ai-lin, WEI Wen-hao, YANG Hai-jun. Optimal Design of Prestressed Cable-arch Structure[J]. Steel Construction, 2008, 23(1): 24-27.