

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.05.001

穿梭式中型立体仓库货架立柱截面优化

曹伟, 黄磊, 刘伟, 左俊

(安徽建筑大学 机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为解决穿梭式中型立体仓库的 N90 型货架立柱设计成本较高的问题, 对其截面进行优化。首先将立柱截面参数化, 用 9 个独立参数代表整个截面。随后采用复合形法, 考虑截面面积最小同时减小长细比, 结合 ANSYS 分析软件, 对 8 个可变参数对立柱性能的影响进行研究, 得到各个参数对货架的影响趋势。通过上述步骤对货架立柱进行截面参数优化。分析结果表明, 优化后的立柱截面面积减少了 3.1%, 长细比减小了 2.9%; 疲劳寿命提升了 16.77%, 安全系数提升了 4.32%, 优化后的货架立柱相比于优化前更加优异。

关键词: 货架立柱; 复合形法; 截面面积; 长细比

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)05-0001-07

引文格式: 曹伟, 黄磊, 刘伟, 等. 穿梭式中型立体仓库货架立柱截面优化 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(5): 1-7.

Optimization of Rack Column Cross Sections in Shuttle-Styled Medium-Sized Stereoscopic Warehouses

CAO Wei, HUANG Lei, LIU Wei, ZUO Jun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In view of the problem of the high design cost of N90 rack columns in shuttle-styled medium-sized stereoscopic warehouses, an optimization has been achieved for the cross-sections. Firstly, the column sections are parameterized with 9 independent parameters representing the entire section. Subsequently, the composite method is adopted to consider minimizing the cross-sectional area while reducing the length-to-slender ratio. Combined with ANSYS analysis software, a research is conducted on the influence of 8 variable parameters on the performance of the column, thus obtaining the trend of the influence of each parameter on the shelf. Based on an optimization of the cross-sectional parameters of the shelf columns through the above steps, the analysis results show that the optimized column cross-sectional area has decreased by 3.1%, with the length-to-slender ratio decreasing by 2.9%. The fatigue life has increased by 16.77%, while the safety factor has increased by 4.32%, indicating that the optimized shelf columns are even better in performance compared with those before optimization.

Keywords: rack column; composite method; sectional area; length-to-slender ratio

1 研究背景

自 19 世纪中叶开始, 钢结构因其作为建筑支撑

材料独特的优异性能, 在美国和欧洲国家逐渐普及。至今冷成型钢已被广泛应用于建筑领域, 成为关键建筑钢材之一。为推动中国仓储物流行业走上更规范、

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 安徽省高校自然科学基金杰出青年科研基金资助项目 (2022AH020025); 安徽省高校自然科学基金资助重点项目 (2022AH050257); 安徽省市场监督管理局科技计划基金资助项目 (2023MK033)

作者简介: 曹伟, 男, 安徽建筑大学硕士生, 主要研究方向为数字化设计与制造, E-mail: a1453996862@126.com

快速的发展道路,国家发布了一系列相关政策法规,包括从成本端减少仓储物流企业压力、从运营端提升仓储物流企业效率等。政策的发布使得国家为仓储物流企业的发展提供了政策方向。随着仓储行业的蓬勃发展。降低成本并提升效率也是国内外学者和工程师研究的主要方向。在货架设计制造领域,设计师通常依赖于个人经验进行决策,而较少运用系统的结构优化方法。因此,尽管设计的立柱能满足基本的使用功能,但往往未能充分考虑成本效益最大化。这种方法可能导致资源的不充分利用和成本的不必要增加,从而影响其整体经济性和竞争力。

Guo Y. L. 等^[1]研究了冷弯型钢与焊接短柱在极限承载力及局部屈曲方面的表现,并开展相应理论分析。Kwon Y. B. 等^[2]发现了特定情况下材料畸变、局部屈曲以及整体屈曲之间的关系,可作为判断立柱稳定性的参考。A. T. Sarawit 等^[3]通过不同的构建单元、材料、网格单元以及初始条件,对冷弯型薄壁钢进行了有限元分析和试验,得到冷弯型薄壁钢的研究可以采用有限元分析方法的结论。Chou S. M. 等^[4]运用有限元软件分析了 C 型卷边冷弯型薄壁钢短柱的屈曲行为。A. M. S. Freitas 等^[5]通过运用有限元分析软件 ANSYS 以及实验,对短柱进行了分析,得到有限元分析与实验结果相似的结论,证明其仿真有参考价值。P. Prabha 等^[6]研究了不同立柱截面厚度、横梁截面长度和连接件长度的梁柱连接节点力学特性,并采用 ABAQUS 软件进行了数值模拟。刘阳等^[7]利用 COPRAFEA 有限元仿真软件对车门中导轨成形过程进行分析,研究了轧辊圆角半径、成形速度及策略等对圆角减薄率的影响,并结合有限元分析手段不断优化工艺参数,以实现中导轨 Z 字筋圆角精确成形,取得了较好结果。张衡等^[8]创建了一个铝型材截面面积与惯性矩的参数化模型,并运用 AUTOCAD 的面域命令辅助验证,通过应用序列二次规划算法,成功完成了铝型材截面的优化设计工作。汪栋成等^[9]对机床立柱进行了研究,优化了立柱结构整体布局,达到了减轻立柱质量及提高立柱动静态特性的目的。马朝鹏等^[10]针对双立柱堆垛机存在的问题进行了研究,并提出了优化方案,实现了堆垛机的轻量化设计。王娟等^[11]通过有限元分析与实际应力测试相结合的方法,对立柱结构进行了设计与分析,并利用混合罚函数法对立柱结构进行了优化。

不难发现,上述众人对结构的优化多集中在对其性能上,少数对结构的质量进行了思考。因此,本文拟通过参数化设计,对立柱结构的截面面积以及长细比进行统筹优化,以满足其更佳的性能要求。

2 货架立柱截面参数优化

货架立柱的结构设计,主要涉及两个关键要素:截面设计和孔型设计。为了增强货架立柱的刚度和稳定性,通常会在其较长的基本型边上增设弯折。这样的设计不仅增强了立柱的整体强度,还有助于抵抗侧向力,确保货架在各种负载条件下的稳定性。

尽管孔型设计对货架立柱的短柱承载能力有一定影响,但考虑到本次研究的重点在于优化货架立柱的截面结构,因此在设计过程中暂不考虑孔型的变化。这意味着,在保持其他参数不变的情况下,同一系列产品可以采用相同的优化策略,以实现结构的标准化和模块化,简化生产工艺,提高生产效率。这样的设计方法有助于减少材料消耗,降低制造成本,并便于后续的组装和维护。通过这种方式,货架立柱的截面优化设计能够在不影响其基本功能的前提下,实现更好的力学性能和经济性。

货架结构中的承载能力是其性能关键,不同立柱截面有着不同的性能差异。常见立柱有 C 型立柱及西格玛(Σ)型立柱。本研究的 N90 型立柱截面类型为西格玛(Σ)型,见图 1,其截面最宽处为 90 mm。该立柱为国标冷轧钢制成。

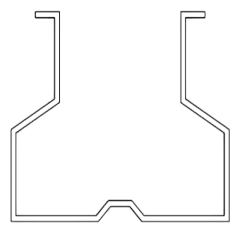


图 1 N90 型立柱截面

Fig. 1 N90 column cross section

对该截面进行参数化设计,根据结构左右对称的特点,可以使用 9 个相互独立的参数 $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, y_1, y_2, y_3, y_4\}$ 来表示该截面形状,不同的截面参数决定不同的货架截面形状,而不同的截面形状组合起来将对货架立柱的性能产生重大影响,具体参数代表如图 2 所示。图 2 中, x_1 为立柱开口处折板两侧的距离; x_2 为立柱细腰之间的距离; x_3 为立柱内折最窄处的尺寸; x_4 为立柱内折最宽处的尺寸,一般来说, x_4 和 x_3 之间无必然联系,但一般情形下 $x_4 \geq x_3$; x_5 为截面最宽处尺寸,同时该处尺寸决定了货架立柱的型号,如本文的 N90 型立柱,则表示该立柱最宽处为 90 mm,即 $x_5=45$ mm。 y_1 为立柱截面的总高度; y_2 为立柱截面除去细腰处高度; y_3 为立柱截面粗腰处高度; y_4 为立柱截面内折处高度。

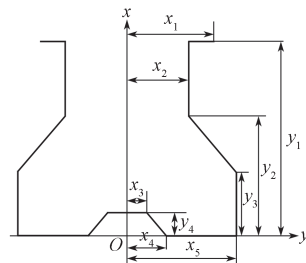


图 2 N90 型立柱截面参数化

Fig. 2 Parameterization of N90 column sections

3 截面优化目标与约束条件

前人对立柱截面的优化,往往单纯考虑并优化截面面积或长细比,缺乏对两研究目标的统筹思考。

3.1 优化目标

1) 立柱长细比。长细比越大构件稳定性越差。

$$\lambda = \mu l_0 / i_0$$

式中: l_0 为构件有效长度; i 为构件截面的回转半径,且 $i = \sqrt{I/A_n}$, 其中, I 为惯性矩, A_n 为截面面积; μ 为长度因数,这里 $\mu=1$ 。

2) 目标函数 F 的确定。目标函数要求截面面积与长细比最小。

$$F = f_1 + f_2; \begin{cases} \min f_1 = \min A_n, \\ \min f_2 = \max \{\lambda_x, \lambda_y, \lambda_w\}, \end{cases}$$

$$\lambda_x = l_{0x} / i_x, \lambda_y = l_{0y} / i_y,$$

$$\lambda_w = \lambda_y \sqrt{(s^2 + i_0^2) / s^2 + \sqrt{((s^2 + i_0^2) / 2s^2)^2 - (i_0^2 - \alpha e_0^2) / s^2}};$$

$$s^2 = (\lambda_y^2 / A_n) \cdot (I_w / l_w^2 + 0.039 I_t); i_0^2 = e_0^2 + i_x^2 + i_y^2。$$

以上各式中: f_1 为要求截面面积最小; f_2 为要求优化后长细比的值中最大的一个比之前小,一般取 λ_x ; λ_x 、 λ_y 、 λ_w 分别为 x 向、 y 向、换算的长细比; I_w 为截面惯性矩; e_0 为截面的弯心在对称轴上的坐标; l_w 为扭转屈曲的计算长度; I_t 为毛截面抗扭惯性矩。

3.2 约束条件

由于冷弯型材在轧制和安装等多个方面,对立柱的截面存在着不同的条件要求,这些条件可以作为立柱截面优化过程中的限制。

1) N90 型立柱截面最宽处为 90 mm, 因此参数 x_5 不变, 为 45 mm, 即 $x_5=45$ mm。

2) 加工尺寸约束。具体如下:

$20 \leq x_1 \leq 45, 60 \leq y_1 \leq 100, 20 \leq x_2 \leq 35, 42 \leq y_2 \leq 58, 25 \leq y_3 \leq 50, 3 \leq x_3 \leq 30, 3 \leq y_4 \leq 20, x_1 - x_2 \geq 3。$

3) 优化后的形变和应力相较于优化前小。

$$\begin{cases} \max BX_{后} < \max BX_{前}; \\ \max YL_{后} < \max YL_{前}。 \end{cases}$$

式中: BX 、 YL 分别为优化前后的变形量大小和应力大小。

4 立柱优化与分析

截面优化包含两层关系: 节点尺寸参数、各种截面特性。如果将优化分为两部分, 很难将这个优化关系的结果达到统一, 而且有可能使两者的优化结果产

生矛盾。为此, 将立柱截面的各种截面特性作为中间变量, 将进行截面优化的两个部分有机地结合起来。前人的研究多聚集在单一的尺寸优化或者性能优化方面, 缺乏减少立柱截面面积同时提升立柱性能的统筹优化。

4.1 立柱强度分析

立柱截面的改变影响着立柱性能的变化, 为观察不同参数改变对立柱性能的影响。本研究采用单一变量的方法, 在只改变单一参数的情况下, 观察截面面积 A_n 与截面惯性矩 I 的变化, 并由此推导出立柱的长细比。总结后得到如表 1 所示的规律。

表 1 截面参数与截面特性间变化趋势

Table 1 Variation trends between cross-sectional parameters and properties

变量	A_n/mm^2	I_x/mm^4	I_y/mm^4	$\lambda_x/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	$\lambda_w/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$
$x_1 \uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
$x_2 \uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
$x_3 \uparrow$	不变	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
$x_4 \uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
$y_1 \uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
$y_2 \uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
$y_3 \uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
$y_4 \uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$

注: I_x 为绕 x 轴截面惯性矩; I_y 为绕 y 轴截面惯性矩; $\uparrow$ 表示增加; $\downarrow$ 表示减少。

在进行有限元分析前, 需要建立几何模型。可以采用 ANSYS 中自带的建模软件进行直接建模, 也可以采用其他三维绘图软件建模完成后导入 ANSYS 中进行分析。本文首先使用 SolidWorks 建模软件设计原 N90 型立柱的三维模型, 同时对其进行了必要的简化处理, 去除了所有非必要的细节, 删除圆角、倒角以及孔洞。并且将 ANSYS 与 SolidWorks 两个软件建立关联,

在 SolidWorks 中直接将简化后的模型导入 ANSYS 中, 方便后续的立柱截面优化。为尽可能接近立柱的真实负载工作条件, 立柱的两侧绘制横梁, 方便在仿真时施加力, 用以模拟立柱在真实负载下立柱的工作情况。优化时, 网格单元设置为 soild186, 由于在 SolidWorks 中将立柱进行了简化, 因此立柱较为规整, 可以采用六面体网格划分, 划分后具有 76 298 个节点以及 11 595 个六面体单元, 见图 3。

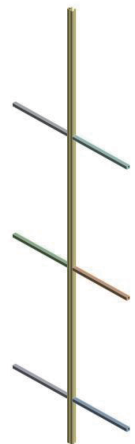


图 3 立柱与横梁建模

Fig. 3 Column and beam modeling

已知单个货位的最大承受质量为 1.5 t, 且货架所受重力可以均分到两个导轨上。一个导轨跨越两个货位, 其重力加速度为 10 N/kg, 则折算为单根导轨负载为 $(1.5 \times 10^3 \times 2 \times 10)/2 = 15\,000$ N。一个货位有两个横梁支撑, 则一个货位负载 1.5 t, 相当于单个横梁负载质量为 0.75 t。即单根横梁的负载为 $[(1.5 \times 10^3)/2] \times 10 = 7\,500$ N。单根横梁连接两个立柱, 因此分析单根立柱时, 横梁负载为 3 750 N。模型材料选用结构钢, 主要力学性能如下: 弹性模量为 200 GPa; 泊松比为 0.3; 密度为 7.85 g/cm³。

优化计算时, 首先需要确定边界条件。设置立柱底端固定, 同时顶端自由, 定义载荷均匀地施加于货架立柱两侧的横梁顶面上, 方向垂直于地面且其大小为 3 750 N。

对原 N90 型立柱进行有限元分析, 得到其在满载下的变形和应力情况, 如图 4 所示, 并以此为基础对优化后的立柱性能进行对比。

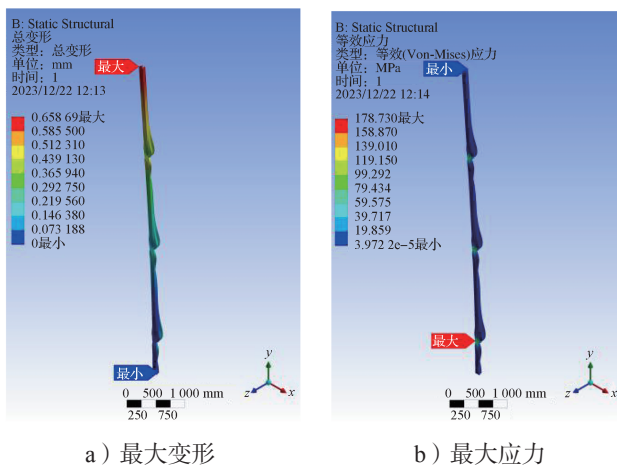


图 4 立柱有限元分析结果

Fig. 4 Finite element analysis results of columns

通过有限元软件分析, 得到原 N90 型货架立柱在极限工作条件下的变形以及应力情况, 其最大变形约为 0.659 mm, 最大应力为 178.730 MPa。并以此为基础, 要求优化后最大形变以及最大应力不超过原 N90 型立柱的对应值。

选取输入参数和输出参数, 为获得较高的货架立柱承载能力, 将货架立柱的最大等效应力和总变形设定为输出参数。为减少货架立柱截面面积, 将货架立柱截面尺寸设定为输入参数。在 ANSYS 分析模块几何结构中选择需要的几何体, 并在 CAD 参数中选择需要的几何参数作为需要优化的目标数据, 以及求解方案中总变形和等效应力中的最大变形、最大等效应力作为约束的数据, 这些选择数据会在软件中自动计入数据集中, 方便后续优化, 如图 5 所示。

	A	B	C	D
1	ID	参数名称	值	单位
2	输入参数			
3	Static Structural (B1)			
4	P1	D1@草图1@优化一体立柱.Part	4	
5	P2	D2@草图1@优化一体立柱.Part	9	
6	P3	D10@草图1@优化一体立柱.Part	5	
7	P4	D8@草图1@优化一体立柱.Part	35	
8	P5	D4@草图1@优化一体立柱.Part	40.9	
9	P6	D5@草图1@优化一体立柱.Part	30.7	
10	P7	D6@草图1@优化一体立柱.Part	27	
11	P8	D7@草图1@优化一体立柱.Part	70	
*	新输入参数	新名称	新表达式	
14	输出参数			
15	Static Structural (B1)			
16	P9	等效应力 最大	178.73	MPa
17	P10	总变形 最大	0.65869	mm
*	新输出参数		新表达式	
18	图表			

图 5 数据的选择与导入

Fig. 5 Data selection and import

将数据导入 ANSYS 的“Direct Optimization”模块中, 并设置好约束条件, 图 6 给出了部分优化约束。如针对输出参数, 可要求并约束优化后 N90 型立柱的等效应力和总变形均不超过原性能, 误差为 10%。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Parameter	Objective	Target	Tolerance	Type	Constraint	Lower Bound	Upper Bound
2									
3	P9 <= 178.62 MPa	P9 - 等效应力 最大	No Objective			Values <= Upper Bound		178.62	0.1
4	P10 <= 0.65131 mm	P10 - 总变形 最大	No Objective			Values <= Upper Bound		0.65131	0.1
*		Select a Parameter							

图 6 部分优化约束设置

Fig. 6 Partial optimization of constraint settings

根据计算的 155 组设计, 记录 155 组截面形状时立柱的最大应力和最大变形。根据计算结果从中选取 5 组最佳且满足需求的数据, 其记录结果见图 7、8。

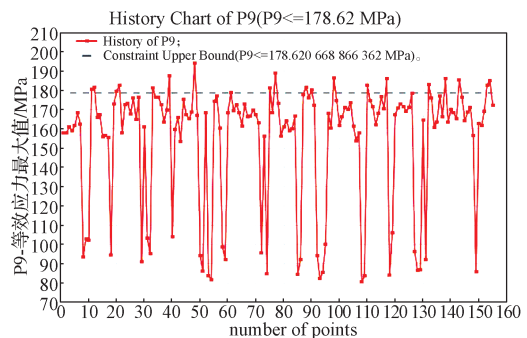


图 7 最大等效应力变化曲线

Fig. 7 Maximum equivalent stress variation curves

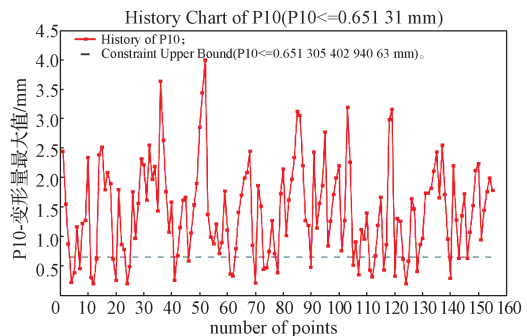


图 8 最大变形变化曲线

Fig. 8 Maximum deformation change curves

由图 7、8 可见, 在得到的 155 组数据样本中,

存在着变优或变劣的情况,因此可以在其中找到同时满足优化条件的参数,并不存在无解的情况。

计算不同参数对于立柱性能的影响,设定样本数为155。运用ANSYS软件分析计算在155个案例中选取最优的5个截面数据,结果如表2所示。

表2 截面优化数据

Table 2 Cross-sectional optimization data mm

模型	截面参数							
	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4
原型	35	27	4	9	70	40.90	30.70	5
优化一	35.82	25.40	3.61	9.50	65.51	39.88	28.93	4.22
优化二	37.42	25.86	3.62	8.25	66.33	41.17	29.56	4.89
优化三	32.94	26.78	3.63	8.75	67.98	43.74	30.84	4.45
优化四	34.86	29.55	3.66	8.38	72.92	42.64	27.71	4.30
优化五	36.78	26.36	3.69	8.56	63.91	41.53	31.53	4.15

设置约束条件后,用ANSYS分析155个数据,并自动从155个方案中选取5个最佳方案,将两项输出参数评价均为三星(最佳)方案呈现出来,见图9。

	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3	Candidate Point 4	Candidate Point 5
P1-D1@草1@化一体立柱.Part	3.6181	3.6232	3.6335	3.6645	3.6955
P2-D2@草1@化一体立柱.Part	9.5065	8.2565	8.7565	8.3815	8.569
P3-D10@草1@化一体立柱.Part	4.2287	4.8953	4.4509	4.3027	4.1546
P4-D8@草1@化一体立柱.Part	35.626	37.426	32.946	34.866	36.786
P5-D4@草1@化一体立柱.Part	39.886	41.172	43.743	42.641	41.539
P6-D5@草1@化一体立柱.Part	28.932	29.568	30.841	27.717	31.535
P7-D6@草1@化一体立柱.Part	25.404	25.866	26.789	29.558	26.363
P8-D7@草1@化一体立柱.Part	65.516	66.339	67.986	72.928	63.917
P9-等效应力最大(MPa)	159.09	161.57	162.56	165.8	172.72
P10-总变形最大(mm)	0.22236	0.38744	0.45647	0.61726	0.62177

图9 系统计算最佳参数与评价

Fig. 9 Systematic calculation of optimal parameters and evaluation

观察图9发现,许多参数达到了小数点后4位。

但在实际加工过程中不可能精确到小数点后4位,因此只需考虑到小数点后一位即可满足生产条件。故应结合之前提出的加工尺寸约束进行考虑。综合考虑分析后,最终采用优化四型作为优化型,得到优化后的N90型立柱,其截面参数如图10所示,图中数据单位为mm。

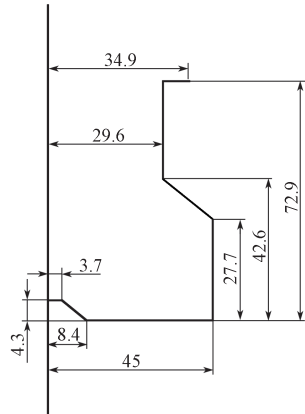


图10 优化后的N90型立柱截面

Fig. 10 Optimized N90 column section

计算优化后截面数据,并与原N90型货架立柱进行比较。计算所得优化前后立柱截面面积、两个方向的惯性矩以及长细比等数据如表3所示。通过分析表3中数据,可发现总优化相较于之前提升了6.1%。其中优化后的面积相较于优化前减少了

3.2%,长细比相较于优化前的长细比降低了2.9%。

表3 N90型货架立柱截面优化分析对照表

Table 3 Comparison table of optimization analysis of N90 series rack column sections

截面类型	A_n/mm^2	I_x/mm^4	I_y/mm^4	I_0/mm^4	i/mm	$\lambda_w/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$
原型	534.241	305 587.717	860 170.175	6 200	23.916 59	259.234 2
优化型	517.594	314 054.907	868 962.985	6 200	24.632 48	251.700 2

图11、12分别给出了应力相关参数和变形相关参数的敏感性仿真结果。由于各项参数变化对立柱整体性能有所影响,在应力响应方面,参数 y_2 (P5)的敏感度为0.446 07,参数 x_2 (P7)的敏感度为0.386 58,表明它们对应力变化的影响最为显著。在变形响应方面,参数 y_2 (P5)的敏感度为-0.181 88,而参数 y_1 (P8)的敏感度为0.250 10,同样显示出它们对立柱变形影响的突出性。因此选取小数点后一位的立柱优化型立柱截面,建模仿真后得到的结果与ANSYS评价的性能存在差异,所以对于优化后的N90系列立柱需要重新建模仿真,重新进行性能评价。

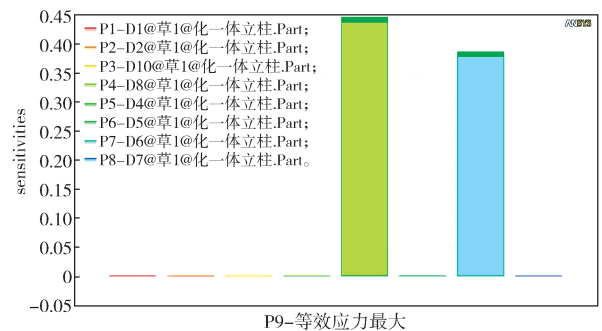


图11 应力相关参数敏感性仿真结果

Fig. 11 Simulation of stress related parameter sensitivity

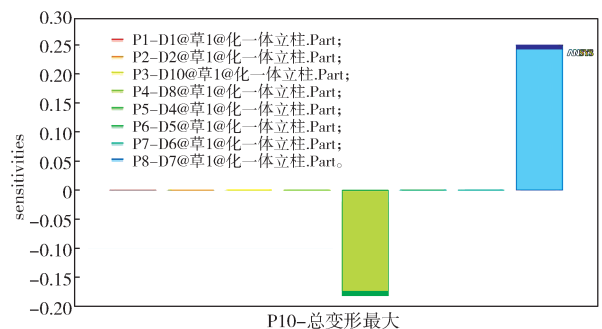
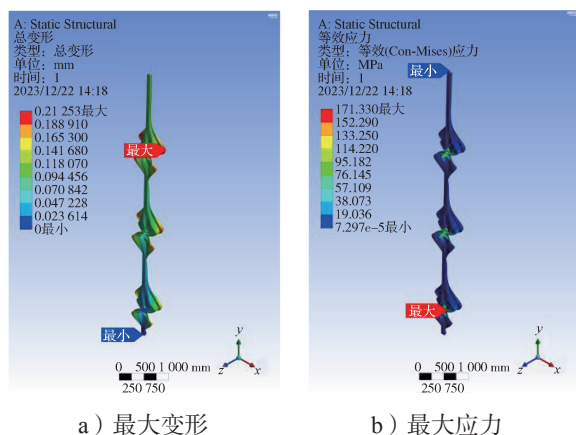


图12 变形相关参数敏感性仿真结果

Fig. 12 Simulation of deformation related parameter sensitivity

建模后对优化后的立柱进行仿真分析,根据图13,得知优化后立柱最大形变约为0.212 mm。最大应力为171.330 MPa。优化后的形变以及最大应力相较于优化前均降低,形变量减少了67.7%,受力减少了4.1%。



a) 最大变形 b) 最大应力

图 13 优化后的立柱仿真结果

Fig. 13 Column simulation results after optimization

根据分析结果发现, 优化后的立柱相比于优化前有着明显的效果。同时分析不同厚度下立柱的截面特性, 归纳总结后如表 4 所示。图 14 所示为厚度改变截面性能变化曲线。

表 4 N90 系列货架立柱厚度优化分析对照表

Table 4 Comparison table for optimization analysis of N90 series rack column thickness

厚度	A_n/mm^2	I_x/mm^4	I_y/mm^4	i/mm	$\lambda_w/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$
1.5	389.695	238 535.426	662 133.419	24.740 82	250.598 0
1.8	466.555	284 080.651	787 042.035	24.675 70	251.259 4
2.0	517.594	314 054.907	868 962.985	24.632 48	251.700 2
2.3	593.853	358 439.059	989 841.442	24.567 91	252.361 7

注: I_0 均为 6 200 mm。

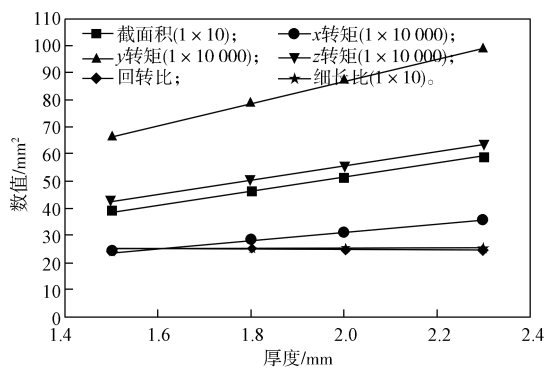


图 14 厚度改变截面性能变化曲线

Fig. 14 Thickness change section performance change curves

通过表 4 和图 14 得知: 优化后的货架立柱在理论分析上, 长细比均比优化前优异。但在截面的力矩分析下, 力矩越大性能越优异, 因此, 1.5 mm 以及 1.8 mm 厚度的立柱虽然在长细比单项性能下, 相较于原立柱优异, 但力矩却不能满足目标条件。综合考虑下, 确认 2 mm 厚度的优化立柱更加优异、性能更好。

4.2 立柱疲劳分析

前文对货架立柱的优化设计中, 对立柱进行的形变和应力分析, 仅代表该结构的刚度满足设计需求,

而立柱作为长期受力的部件, 还应当考虑其优化后的使用寿命。运用 S-N 曲线法计算优化前后货架立柱的使用寿命及安全系数, 得到的 S-N 曲线见图 15。

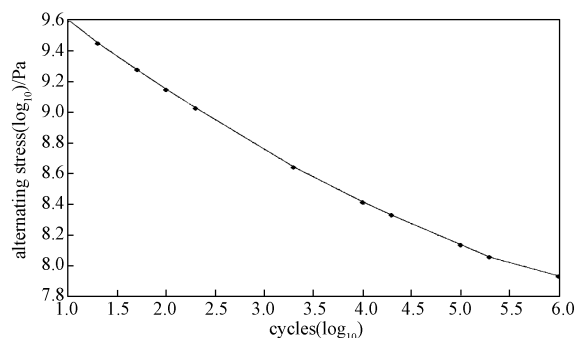
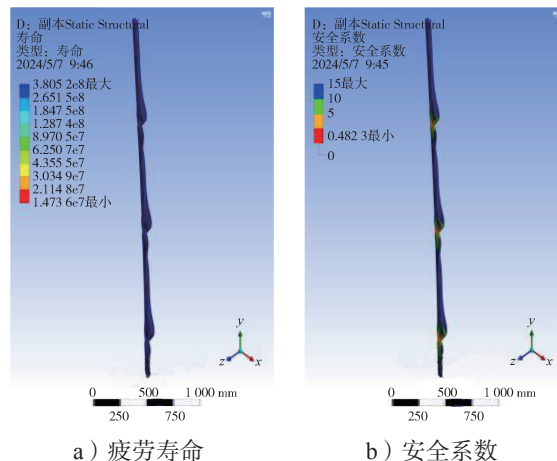


图 15 S-N 曲线

Fig. 15 S-N curve

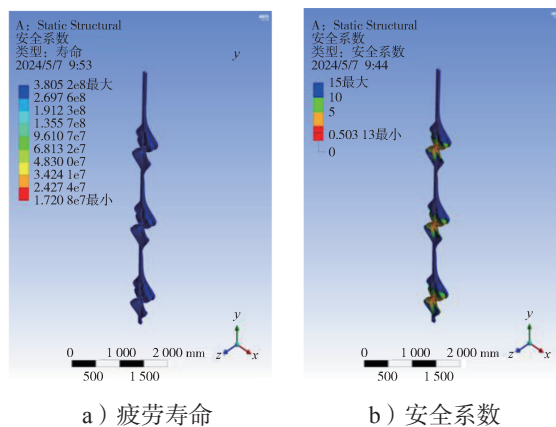
基于图 15 所示曲线, 在 ANSYS 中计算优化前后货架立柱的寿命及安全系数, 得到的结果如图 16 和 17 所示。



a) 疲劳寿命 b) 安全系数

图 16 优化前货架立柱寿命以及安全系数分析云图

Fig. 16 Cloud diagram of safety factor analysis and fatigue life analysis before optimization



a) 疲劳寿命 b) 安全系数

图 17 优化后货架立柱寿命以及安全系数分析云图

Fig. 17 Cloud diagram of safety factor analysis and fatigue life analysis after optimization

设定货架立柱的使用寿命为 100 000 000 次循环, 随后运用 ANSYS 分析, 得到优化前货架立柱的疲劳

寿命为 14 736 000 次循环,安全系数为 0.482 3,位于立柱与横梁的连接处,表明该处最容易发生损坏。

运用 ANSYS 分析得到优化后货架立柱的疲劳寿命为 17 208 000 次循环,可认为该结构稳定可靠。同时计算出立柱的最小安全系数为 0.503 13,主要是由于施加力时出现应力集中的现象。对比图 18 所示优化前后的立柱疲劳寿命以及安全系数,发现优化后的货架立柱疲劳寿命和安全系数相较于优化前均得到了提升。疲劳寿命提升约 16.77%,最小安全系数提升约 4.32%。但在实际加工中,精度达到小数点后一位虽然可以达到,但是其带来了加工上的难度。

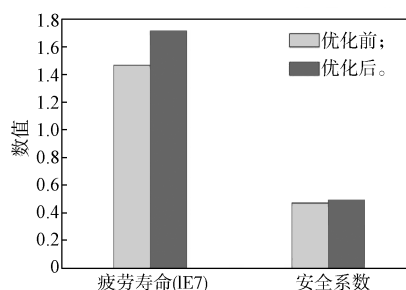


图 18 优化前后立柱性能对比

Fig. 18 Comparison of column performance before and after optimization

5 结语

本文采用复合形优化方法,对货架立柱进行了参数优化。以满足加工要求、安装要求等为约束条件,以截面惯性矩最大以及截面面积最小为目标函数,对 N90 型的货架立柱进行截面优化,虽然在实际加工中,精度达到小数点后一位虽然可以达到,但是其带来了加工上的难度。改进参数后使得总优化达到了 6.1%,兼顾了截面面积减小,长细比减小的目的。其中立柱截面面积减少了 3.2%,长细比降低了 2.9%;疲劳寿命提升了 16.77%,最小安全系数提升了 4.32%。且优化后的立柱满足设计使用需求。

参考文献:

- [1] GUO Y L, FUKUMOTO Y. Theoretical Study of Ultimate Load of Locally Buckled Stub Columns Loaded Eccentrically[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 38(3): 239-255.
- [2] KWON Y B, KIM B S, HANCOCK G J. Compression Tests of High Strength Cold-Formed Steel Channels with Buckling Interaction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2): 278-289.
- [3] SARAWIT A T, KIM Y, BAKKER M C M, et al. The Finite Element Method for Thin-Walled Members-Applications[J]. Thin-Walled Structures, 2003, 41(2/3): 191-206.
- [4] CHOU S M, CHAI G B, LING L. Finite Element Technique for Design of Stub Columns[J]. Thin-Walled Structures, 2000, 37(2): 97-112.
- [5] FREITAS A M S, FREITAS M S R, SOUZA F T. Analysis of Steel Storage Rack Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(8): 1135-1146.
- [6] PRABHA P, MARIMUTHU V, SARAVANAN M, et al. Evaluation of Connection Flexibility in Cold Formed Steel Racks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(7): 863-872.
- [7] 刘阳, 李庆达, 高亚南, 等. 复杂截面冷弯成形圆角减薄率工艺优化研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(11): 171-178.
LIU Yang, LI Qingda, GAO Yanan, et al. Optimization of Fillet Thinning Rate Process for Cold Bend Forming with Complex Sections[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(11): 171-178.
- [8] 张衡, 凌四营, 张志豪, 等. 基于序列二次规划法的铝型材截面优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(9): 129-132.
ZHANG Heng, LING Siying, ZHANG Zhihao, et al. Optimization Design of Aluminum Profile Section Based on Sequential Quadratic Programming[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(9): 129-132.
- [9] 汪栋成, 王宇, 刘淑莲, 等. 基于逆向工程的小型钻床立柱结构优化[J]. 制造技术与机床, 2024(3): 94-101.
WANG Dongcheng, WANG Yu, LIU Shulian, et al. Optimisation of the Column Structure of a Small Drilling Machine Based on Reverse Engineering[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2024(3): 94-101.
- [10] 马朝鹏, 谢晖. 双立柱堆垛机结构分析与优化[J]. 机电工程, 2022, 39(8): 1152-1159.
MA Zhaopeng, XIE Hui. Structural Analysis and Optimization of Double Column Stacker[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(8): 1152-1159.
- [11] 王娟, 李冯杰, 高鑫龙, 等. 树枝形立体停车库立柱结构优化设计与仿真计算[J]. 机械强度, 2022, 44(3): 658-665.
WANG Juan, LI Fengjie, GAO Xinlong, et al. Design and Optimization of Column Structure of Tree Shaped Parking Garage[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(3): 658-665.

(责任编辑: 廖友媛)