

轧机机架参数敏感性分析及顺序优化的研究

赵升吨, 申亚京, 尚万峰

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种基于参数敏感度分析的顺序优化方法, 利用 ANSYS 软件建立了 550 轧钢机机架的参数化模型, 并对轧机机架尺寸进行了优化设计. 采用顺序优化的方法, 首先对轧机机架的体积进行最小优化, 然后在优化参数进行敏感性分析的基础上, 针对优化结果存在的潜在问题, 进一步以横向位移最小作为目标函数优化. 这种敏感度分析和顺序优化相结合的策略克服了传统单目标函数优化结果不精确的不足, 也避免了多目标优化权重系数难以确定的问题, 从而简化了求解过程. 采用该优化方法制造的轧机机架, 已投入实际使用 1 年, 工作状况良好. 优化结果和实际应用效果表明, 该混合方法是行之有效的, 并具有一定的实用价值.

关键词: 轧机机架, 敏感度分析, 顺序优化

中图分类号: TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0001-04

Hybrid Method Involving Parameter Sensitivity Analysis and Sequential Optimization for Mill Housing

ZHAO Shengdun, SHEN Yajing, SHANG Wanfeng

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A hybrid method was proposed based on the combination of parameter sensitivity analysis and sequential optimization, a parameter model for 550 mill housing was established, and the dimensions were optimized with ANSYS, where minimizing volume was considered as the first objective function. According to the optimized results and the sensitivity analysis, a further optimization was carried out for minimizing displacement in x direction as the second objective function, which is more precise than the conventional single strategy, and avoids the difficulty due to determination weight coefficients in multi-objective method to show the validity and effectiveness.

Keywords: mill housing; sensitivity analysis; sequential optimization

轧钢机机架是轧钢机的重要零件, 它的刚度直接影响工件轧制的精度, 而强度决定了轧钢机的工作寿命. 长期以来, 对轧钢机机架的设计是依据材料力学的经典理论分析进行的, 由于经典力学采用的模型过分简化, 在计算时, 轧钢机机架静强度安全系数^[1]取值高达 10~15, 但采用这种方法只能求出轧钢机机架某些有限部位的数值, 而得不到轧钢机机架各部位的具体数值以及应力场与变形场的分布规律. 因此, 计算时安全系数虽然取得很高, 但仍不能保证机架充分安全可靠地工作, 甚至轧钢机机架发

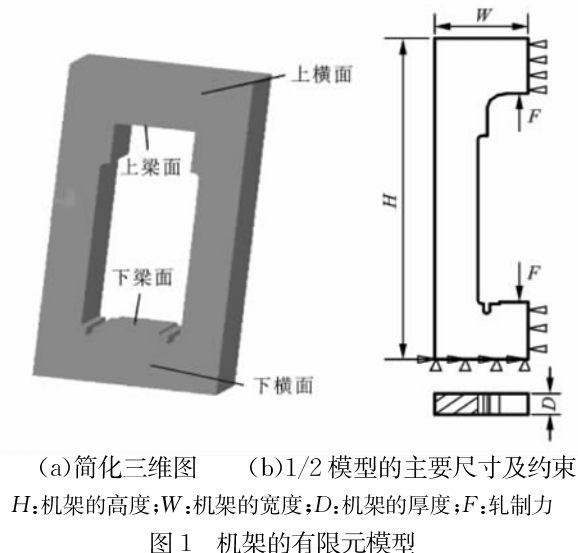
生断裂现象^[2-3]. 为此, 本文在对轧钢机机架受力和变形正确分析的基础上, 应用有限元法建立相应的参数化有限元分析模型, 并以 550 型二辊轧机机架结构为例, 对其结构尺寸进行了优化设计.

目前, 对机架优化的方法主要有 2 种: ①以轧钢机机架的变形量、质量和应力(最小)作为目标函数, 用其他 2 个变量作为约束函数进行单目标优化; ②采用变量加权的方法进行多目标优化. 单目标优化能保证目标函数得到最优解, 但是不能保证约束变量取得最优值. 多目标优化虽然能使各个变量都取

得较合理的值,但是权系数的确定比较困难^[4].因此,本文提出了一种基于参数敏感度分析的顺序优化策略,在建立二辊轧机机架参数化模型的基础上,采用有限元法,以质量最小作为第 1 次优化的目标函数,然后对设计变量进行敏感性分析,根据分析结果重新确定设计变量和约束变量的取值范围.最后,以机架变形量最小,即刚度最大作为目标函数进行第 2 次优化.

1 轧钢机机架的 ANSYS 软件建模

采用 ANSYS 软件的 APDL 语言对机架进行参数化建模,从而为不同规模、同一结构类型的轧钢机机架的有限元分析提供通用模式.图 1a 为轧钢机



轧轮的一个支撑面的机架(俗称牌坊)简化细节后的外形图,图 1a 中轧钢机机架结构左右对称,且承受的载荷也完全对称,为减小计算量,取模型的 1/2,并在对称面上施加对称约束.根据机架的工作情况,在机架底面施加全位移约束,在模型的上梁面和下梁面分别施加相应的轧制力 F ,对本文中的算例

550 型二辊轧钢机机架,取 $F=900$ kN.机架的内框尺寸由轧钢机轧轮的尺寸决定,所以选取 3 个关键尺寸作为机架的设计变量,如图 1b 所示,选取弹性模量 $E=210$ GPa,泊松比^[5] $\mu=0.3$.

2 以机架质量最小作为目标函数

2.1 建立优化模型

本次优化的目标是使轧机机架在满足一定的强度和刚度条件下质量最小,选取机架所用材料最省,即体积最小作为目标函数,而机架的强度和刚度作为约束条件.选取机架的高度、宽度和厚度作为设计变量,为了保证机架正常工作,要求机架整体的最大范氏应力 σ_s 小于所用钢材材料的许用应力 $[\sigma]$,水平方向最大位移 δ_x 小于许用值 $[\sigma_x]$,竖直方向最大位移 δ_y 小于许用值 $[\sigma_y]$.本文以 550 型二辊轧机为算例,则优化问题的数学模型为:

设计变量

$$\mathbf{X}=[H,W,T]=[x_1,x_2,x_3]$$

目标函数

$$\min F_1(\mathbf{X})=\sum_{i=1}^n V_i; \mathbf{X} \in R^n \quad (1)$$

约束条件

$$\begin{aligned} g_1(\mathbf{X}) &= \sigma_s - [\sigma] \leq 0; g_2(\mathbf{X}) = \delta_x - [\sigma_x] \leq 0 \\ g_3(\mathbf{X}) &= \delta_y - [\sigma_y] \leq 0; g_4(\mathbf{X}) = 3\,500 - x_1 \leq 0 \\ g_5(\mathbf{X}) &= x_1 - 3\,800 \leq 0; g_6(\mathbf{X}) = 650 - x_2 \leq 0 \\ g_7(\mathbf{X}) &= x_2 - 800 \leq 0; g_8(\mathbf{X}) = 200 - x_3 \leq 0 \\ g_9(\mathbf{X}) &= x_3 - 300 \leq 0 \end{aligned}$$

式中: V_i 为第 i 单元的体积; n 为单元总数.

2.2 550 型轧机机架优化结果分析

为保证优化结果的稳定性,优化时设计变量分别从表 1 中 4 组不同的初始点取值并进行迭代计算.其中:第 1 组的设计变量值取现有尺寸;第 2 组的设计变量取较小的尺寸;第 3 组的设计变量取较

表 1 质量最小的 550 型轧机机架优化结果

分组数	W/mm	H/mm	D/mm	σ_s/MPa	δ_x/mm	σ_y/mm	$F_1(\mathbf{X})/\text{m}^3$
	650~850 [△]	3 500~3 800 [△]	200~300 [△]	50 [△]	0.150 [△]	1.000 [△]	
1	735	3 650	240	37.608	0.124	0.264	0.426
	727*	3 659*	200*	44.762*	0.149*	0.317*	0.350*
2	660	3 550	220	45.875	0.200	0.347	0.316
	718*	3 673*	200*	44.866*	0.149*	0.319*	0.348*
3	800	3 600	290	35.025	0.098	0.210	0.572
	732*	3 648*	200*	44.713*	0.149*	0.317*	0.352*
4	650	3 800	200	49.606	0.175	0.352	0.312
	719*	3 674*	200*	45.575*	0.149*	0.319*	0.348*

△:各变量的许用值;* :每组优化的最优解.

大的尺寸;第4组的设计变量随机取值。

从表1中可以看出,4组解的设计变量优化结果基本相同,其中机架宽度的最大误差为1.9%,机架高度的最大误差为0.7%,机架厚度的值与4组解一致,这说明从不同的方向迭代求解时,最终收敛到同一点,程序并没有陷入局部最优解,优化过程比较稳定,结果可靠。取第4组优化结果作为本次优化的最优解 X^* ,即 $W=719\text{ mm}$, $H=3\ 674\text{ mm}$, $T=200\text{ mm}$,此组结果在满足刚度、强度、尺寸参数的基础上,使机架体积从原来的 0.426 m^3 降低到 0.348 m^3 ,质量减小了18.3%,即减小了612 kg,达到了本次质量最小的优化目标。

3 变量敏感性分析

如图2所示,在横坐标内对设计变量进行扫描,然后对横坐标进行归一化处理,使设计变量表示的取值在0~1之间变化,寻求对状态变量和目标变量影响最大的设计参数,这种方法就是敏感度分析^[6]。图2描述了3个设计变量对水平方向最大位移、竖直方向最大位移、机身最大应力和机身体积的影响。从图2中可以看出:① H 、 W 、 D 对 δ_x 、 δ_y 和 σ_s 的影响与对 $F_1(X)$ 的影响趋势相反,随着 H 、 W 或 D 的增大, $F_1(X)$ 逐渐增大,而 δ_x 、 δ_y 和 σ_s 却呈下降趋势;② H 、 W 和 D 对 δ_x 的影响趋势一致,影响程度也相似,其中 H 的影响相对更大一些;③ H 、 W 、 D

对 δ_y 的影响趋势一致, D 、 W 、 H 对 δ_y 的影响程度却依次下降;④ H 、 W 、 D 对 σ_s 的影响趋势一致, D 、 H 、 W 对 σ_s 的影响程度且依次下降;⑤随着 H 、 W 、 D 值的增大, $F_1(X)$ 的值也增大, D 、 H 、 W 对 $F_1(X)$ 的影响程度依次下降,从而验证了以体积最小作为目标函数时,优化后的机身高度能够达到设计变量的下限值。

本文优化的目的是使机架的体积最小,但在体积达到最小的同时,不能保证其他状态变量的值得到优化,这是单目标优化的固有缺陷。从表1中可以看出,优化设计后的 δ_x 接近许用值,从敏感性分析中得知, H 对 δ_x 的影响最大,所以在以下的设计中,可采用增加高度的方法来降低 δ_x 。同时,优化设计后的 D 也取得了下限值,所以可以适当地加大 D 。随着 H 和 D 的增大, $F_1(X)$ 也必然会增大,因此可以采用减小 W 的办法来使 $F_1(X)$ 保持在一个较小值上。

4 以水平方向的变形量最小作为目标函数

根据前面的敏感性分析,重新限定550型二辊轧机机架的 H 、 W 和 D 的取值范围,即 $H \in (3\ 600\text{ mm}, 3\ 800\text{ mm})$, $W \in (650\text{ mm}, 750\text{ mm})$, $D \in (200\text{ mm}, 250\text{ mm})$ 。参照表1的结果,给定 $F_1(X)$ 的上限 $[V]=0.370\text{ m}^3$ 作为约束条件,取

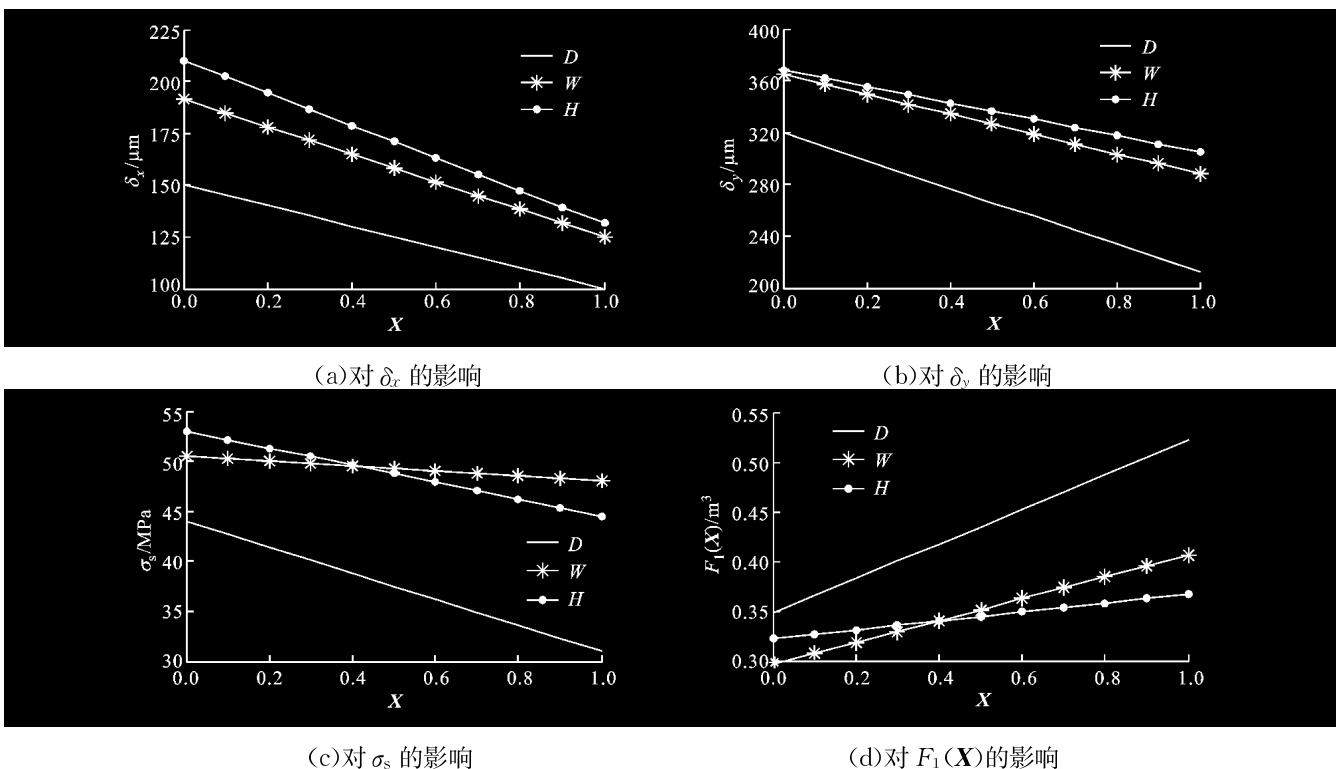


图2 设计变量的变化对状态和目标变量的影响

$\mathbf{Y}^0=\mathbf{X}^*=[3\ 674\ \text{mm},\ 719\ \text{mm},\ 200\ \text{mm}]$,则本次优化问题的数学模型如下.

设计变量

$$\mathbf{Y}=[H,W,D]=[y_1,y_2,y_3]$$

目标函数

$$\min F_2(\mathbf{Y})=\delta_x;\mathbf{Y}\in R^n\tag{2}$$

约束条件

$$g_1(\mathbf{Y})=\sigma_s-[\sigma]\leqslant 0;g_2(\mathbf{Y})=F_1(\mathbf{X})-[V]\leqslant 0$$

$$g_3(\mathbf{Y})=\delta_y-[\delta_y]\leqslant 0;g_4(\mathbf{Y})=3\ 600-y_1\leqslant 0$$

$$g_5(\mathbf{Y})=y_1-3\ 800\leqslant 0;g_6(\mathbf{Y})=650-y_2\leqslant 0$$

$$g_7(\mathbf{Y})=y_2-750\leqslant 0;g_8(\mathbf{Y})=200-y_3\leqslant 0$$

$$g_9(\mathbf{Y})=y_3-250\leqslant 0$$

将第 1 次优化得到的结果作为本次优化的初始值进行迭代计算,得到的最优解见表 2. 从表 2 中可以看出, $F_2(\mathbf{Y})$ 的值从第 1 次优化后的 0. 149 mm 降低到 0. 137 mm, $F_1(\mathbf{X})$ 从 0. 348 m³ 增加到了 0. 358 m³,在体积增大 2% 的前提下使 $F_2(\mathbf{Y})$ 下降了 8. 1%,并且其他性能指标也变得更加安全,因此达到了本次的优化目的.

5 优化结果比较

表 3 数据为轧机机架的许用值、初始参数、第 1 次优化后的参数和第 2 次优化后的参数. 进一步分析不同设计变量对 550 型轧机机架性能的影响,得到以下结果.

表 2 550 型轧机机架的第 2 次优化结果

	W/mm	H/mm	D/mm	σ_s/MPa	$F_1(\mathbf{X})/\text{m}^3$	δ_y/mm	$F_2(\mathbf{Y})/\text{mm}$
初始值	719	3 674	200	45. 575	0. 348	0. 319	0. 149
优化解	707	3 774	203	44. 467	0. 358	0. 309	0. 137

表 3 设计变量不同的取值对 550 型轧机机架性能影响的对比

	W/mm	H/mm	D/mm	σ_s/MPa	δ_x/mm	δ_y/mm	V/m^3
许用值	650~850	3 500~3 800	200~300	50. 000	0. 150	1. 000	
第 1 次优化解	719	3 674	200	45. 575	0. 149	0. 319	0. 348
第 2 次优化解	707	3 774	203	44. 467	0. 137	0. 309	0. 358

6 结 论

本文利用 ANSYS 软件建立了 550 型二辊轧机机架的参数化模型,针对目前单目标和多目标函数优化存在的问题,采用了顺序优化和参数敏感性分析相结合的优化求解策略,对轧机机架尺寸进行了

(1)原始尺寸和优化后的结果相比,除了 H 略低于优化解外, W 和 D 都远大于优化解,说明计算结果过于安全,但却浪费了材料.

(2)第 1 次优化的结果是以体积最小为目标函数,优化结果和初始值相比降低了 18. 3%, δ_x 、 δ_y 和 σ_s 的计算结果也在许用值的范围之内,但厚度取到了许用值的下限值,水平方向的 δ_x 也接近于上限值.

(3)第 2 次优化结果和初始值相比, W 减小了 3. 8%, D 减小了 15. 4%, H 增加了 3. 3%,机架体积减小了 16. 0%,因此达到了减小体积的目的,并且 δ_x 、 δ_y 和 σ_s 也在许用值范围内,与许用值的距离适当,这样既不会浪费材料,也不会产生危险.

(4)第 2 次与第 1 次的优化结果相比, H 增加了 2. 7%, W 减小了 1. 7%, D 增加了 1. 5%. 从敏感性分析中可知,通过增加 H 来提高水平方向的刚度,是比较经济的方法. 第 1 组解的 D 已经达到了下限,而第 2 组解的 D 也有了一定幅度的提升,从而保证了冗余. 由于 W 的减小是为了保证体积不会变化太大,和 H 相比, W 对刚度的提高贡献较小,所以在优化时,程序选择了增大 H 来提高刚度,降低 W 来减小体积的设计方案,以使设计结果达到最优. 第 2 次优化结果和第 1 组优化解相比,体积增大了 2%,但 δ_x 、 δ_y 和 σ_s 均有不同幅度的下降,尤其 δ_x 从 0. 149 mm 下降到了 0. 137 mm,使设计结果更加安全.

优化设计. 这种方法既克服了传统单目标函数优化不精确的缺点,也避免了多目标优化权系数难以确定的不足,不仅简化了优化求解过程,而且极大地提高了参数的综合性能. 目前,该机架在新兴铸管厂已无故障运行 1 年,证明了该优化方法的可行性与可靠性.

参考文献:

- [1] 王海文. 轧钢机械设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1984: 23-27.
- [2] 赵清安. 1 200 mm 薄板轧机机架断裂焊接修复[J]. 江苏冶金, 2000(5): 55-56.
ZHAO Qing'an. Fractures welding repair of 1 200 mm plate mill [J]. Jiangsu Metallurgy, 2000(5):55-56.
- [3] 姜世平,许崇勇. 1 500 mm 冷轧机组机架有限元分析计算 [J]. 重型机械, 2007(1): 49-51.
JIANG Shiping, XU Chongyong. The roll housing finite element program of 1 500 reduction mill unit [J]. Heavy Machinery, 2007(1): 49-51.
- [4] GUNTER N, ERWIN E. Development of beams and universal beam mills [J]. Metallurgical Plant and Technology, 1986(6):42-45.
- [5] 徐灏. 机械设计手册:2 [M]. 北京:机械工业出版社, 2000:102-103.
- [6] 刘涛,杨凤鹏. 精通 ANSYS [M]. 北京:清华大学出版社, 2002:112-115.

(编辑 管咏梅)