

弹性底板上的液压支架整体尺寸参数优化

王 志,王朝雅,杨 飞

(郑州大学 力学与工程科学学院,河南 郑州 450001)

摘 要:基于弹性地基梁理论,建立了弹性底板上的液压支架底座受力分析模型,以前后连杆力最小、结构尺寸最小、掩护梁弯矩最小、支护效率最高、弹性底板比压最小为 5 个优化目标函数,通过序列二次规划法对液压支架的整体尺寸设计参数进行优化,实现了不同底板状况下的整体尺寸参数优化,基于 MATLAB/GUI 可视化编程,实现了程序的可视化.算例分析表明,将底板比压作为优化目标函数对液压支架整体进行优化,在结构尺寸变化不大的前提下,优化结果不仅能满足设计要求,而且力学特性有较大的改善,前后连杆轴力、底板比压、掩护梁弯矩 4 个参数较优化前平均减少了 31.95%.

关键词:弹性底板;底板比压;多目标优化;整体尺寸参数;液压支架

中图分类号:TD355 **文献标志码:**A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.002

0 引言

关于液压支架整体参数优化,国内的许多学者对此进行了大量的研究,如王国法等^[1-2]提出了一种液压支架总体参数优化设计的数学模型及用修正解析法确定支架四连杆机构初始参数的有效方法,设计了优化设计实用软件并进行了实例验证.杜小勇^[3]利用 Pro/Toolkit 底层函数接口实现了三维软件 Pro/E 和程序开发软件 Visual C++ 2005 的连接,设计开发了“二柱掩护式液压支架参数化设计系统”.李庆国^[4]结合多学科设计优化的理论与方法,基于优化软件 ISIGHT,建立了动力学模型、静力学模型及液压支架设计优化的目标函数、设计参数和约束条件,对支架进行了优化设计.白秀琴等^[5]选取影响液压支架性能的 12 个参数,确定了 4 个目标函数,对掩护式液压支架进行了总体优化,但该文主要考虑的是底板为塑性底板,没有考虑弹性底板影响的多目标问题的优化.另外,许多国内外学者采用层次分析法、遗传算法等方法对各种机械结构进行了研究,得到了较好的优化结果.

液压支架支撑于煤层上,煤岩性质差异很大,将底板假设为塑性底板在有些情况下不能真实反

映底座与底板的接触情况,对于液压支架的精细化设计产生不利的影响,再加上作业工况的不确定性,使得支架底座与底板的接触力学特性呈现较为复杂的随机性.笔者在王国法^[1]、白秀琴^[5]等模型的基础上,假设底板为弹性,将底板比压作为第 5 个目标进行优化设计,以达到精细化设计的目的.

1 弹性底板上的底座受力模型

假设液压支架底板为弹性体,底板与底座相互作用的关键点是在接触面上满足变形和位移协调.将底板视作梁,可采用弹性地基梁的解法.Winkler 模型^[6-8]和双参数模型^[9-12]是最常见的弹性地基梁模型.假设梁表面任一点的压力 p 与该点的位移 w 成正比:

$$p(x, y) = kw(x, y). \quad (1)$$

弹性地基梁模型如图 1 所示,在梁 OB 上作用一组外荷载,假设坐标原点 O 与梁的一端重合,在这种情况下,梁的基本方程可以写为:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw = qb. \quad (2)$$

式中: k 称为地基基床系数; q 和 p 分别为梁所受分布荷载及地基反力; b 为梁的宽度.

收稿日期:2016-06-04;修订日期:2016-08-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51404212);河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目.

通信作者:王志(1981—),男,内蒙包头人,郑州大学副教授,博士,主要从事工程力学研究,E-mail:wangzhi@zhu.edu.cn

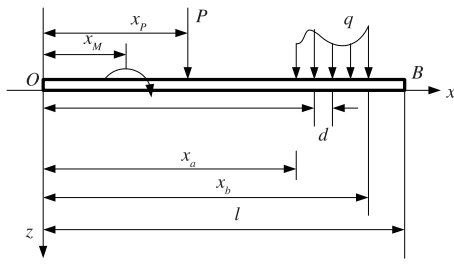


图1 弹性地基梁模型受力示意图

Fig.1 The stress diagram

式(2)是 Winkler 弹性地基梁的控制方程,该方程只考虑了一个参数即基床系数 k . Winkler 把地基看成是由独立且互不影响的弹簧组成的,不能考虑土体抗剪能力. 于是考虑土体剪切能力的参数 G_p 被引入到 Winkler 模型中,形成了双参数模型,其控制方程为^[13]:

$$EIw^{(4)} - G_p b^* w'' + kb^* w = bq(x). \quad (3)$$

该方程的齐次解可以写为:

$$w(x) = c_1 F_1(x) + c_2 F_2(x) + c_3 F_3(x) + c_4 F_4(x).$$

其中: $b^* = b[1 + (G_p/k)^{1/2}/b]$; $F_1(x) = \cos(\alpha_1 \lambda x) \operatorname{sh}(\alpha_2 \lambda x)$, $F_2(x) = \cos(\alpha_1 \lambda x) \cdot \operatorname{ch}(\alpha_2 \lambda x)$, $F_3(x) = \sin(\alpha_1 \lambda x) \operatorname{ch}(\alpha_2 \lambda x)$, $F_4(x) = \sin(\alpha_1 \lambda x) \operatorname{sh}(\alpha_2 \lambda x)$, $\lambda = [kb^*/(4EI)]^{1/4}$.

而 $\alpha_1 = [1 - G_p \lambda^2/k]^{1/2}$, $\alpha_2 = [1 + G_p \lambda^2/k]^{1/2}$, θ 为截面转角, M 为弯矩, V 为广义剪力, w 为挠度,且满足关系: $\theta = w'$, $M = -EIw''$, $V = -EIw''' + G_p b^* w'$.

方程可通过初参数求解,初参数解可写为^[13]

$$\begin{aligned} \theta(x) = & w_0 \lambda \left(\frac{F_1}{\alpha_2} - \frac{F_3}{\alpha_1} \right) + \theta_0 \left[F_2 + \left(\frac{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) F_4 \right] - \\ & \frac{M_0}{2\lambda EI} \left(\frac{F_1}{\alpha_2} + \frac{F_3}{\alpha_1} \right) - \frac{V_0}{\lambda^2 EI} \left(\frac{F_4}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) - \frac{M}{2\lambda EI} \cdot \\ & \left[\frac{F_1(x - x_M)}{\alpha_2} + \frac{F_3(x - x_M)}{\alpha_1} \right] + \frac{P}{\lambda^2 EI} \cdot \\ & \left(\frac{F_4(x - x_p)}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) + \frac{b}{\lambda^2 EI} \int_{x_a}^x q \left(\frac{F_4(x - \xi)}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) d\xi; \quad (4) \\ w(x) = & w_0 \left[F_2 - \left(\frac{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) F_4 \right] + \frac{\theta_0}{2\lambda} \left(\frac{F_1}{\alpha_2} + \frac{F_3}{\alpha_1} \right) - \\ & \frac{M_0}{\lambda^2 EI} \left(\frac{F_4}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) + \frac{V_0}{4\lambda^3 EI} \left(\frac{F_1}{\alpha_2} - \frac{F_3}{\alpha_1} \right) - \\ & \frac{M}{\lambda^2 EI} \left(\frac{F_4(x - x_M)}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) - \frac{b}{4\lambda^3 EI} \cdot \\ & \int_{x_a}^x q \left(\frac{F_1(x - \xi)}{\alpha_2} - \frac{F_3(x - \xi)}{\alpha_1} \right) d\xi - \\ & \frac{P}{4\lambda^3 EI} \left(\frac{F_1(x - x_p)}{\alpha_2} - \frac{F_3(x - x_p)}{\alpha_1} \right); \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M(x) = & 4w_0 EI \lambda^2 \left(\frac{F_4}{2\alpha_1 \alpha_2} \right) - \frac{\theta_0 EI \lambda}{2} \cdot \\ & \left[\left(\frac{3\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{\alpha_2} \right) F_1 + \left(\frac{2\alpha_2^2 - 3\alpha_1^2}{\alpha_1} \right) F_3 \right] + M_0 \cdot \\ & \left[F_2 + \frac{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2} F_4 \right] + \frac{V_0}{2\lambda} \left(\frac{F_1}{\alpha_2} + \frac{F_3}{\alpha_1} \right) + \\ & M \left[F_2(x - x_M) + \frac{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2} F_4(x - x_M) \right] - \\ & \frac{P}{2\lambda} \left(\frac{F_1(x - x_p)}{\alpha_2} + \frac{F_3(x - x_p)}{\alpha_1} \right) - \\ & \frac{b}{2\lambda} \int_{x_a}^x q \left(\frac{F_1(x - \xi)}{\alpha_2} + \frac{F_3(x - \xi)}{\alpha_1} \right) d\xi. \quad (6) \end{aligned}$$

其中: $r = 2G_p l^2/k$, w_0, θ_0, M_0, V_0 可根据两端的初始支承条件确定,如两端为自由端,则可由 $M_0 = M_l = 0$, $V_0 = G_p b^* \alpha w_0$, $V_l = -G_p b^* \alpha w_l$, $\alpha^2 = k/G_p$ 来确定.

以上就是双参数弹性地基梁的基本方程,当剪切模量 G_p 为 0 时,双参数模型退化为 Winkler 模型.

底板上的底座受力示意图如图 2 所示,取液压支架底座为单独受力体,将其放置于双参数弹性底板上,通过液压支架平面受力分析程序^[14],可以得到立柱作用力 P 、前后连杆作用力 F_k 和 F_R . 根据式(4)可解得位移 w 、比压 p 以及弯矩 M 和剪力 V .

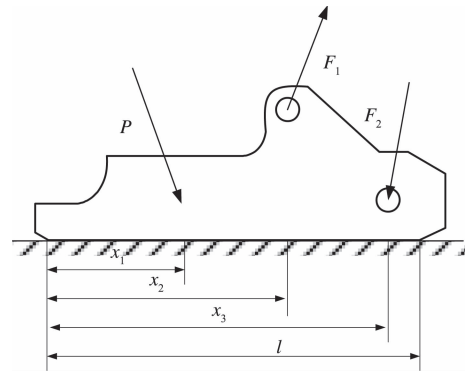


图2 底板上的底座受力示意图

Fig.2 The stress diagram of the base on the floor

2 液压支架整体尺寸参数优化模型

梁柱掩护式液压支架整体外观尺寸如图 3 所示. 影响液压支架性能的主要参数共有 12 个:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}]^T = [L_1, L_2, L_3, L_4, L_{15}, L_{18}, H_0, x_K, y_K, y_R, L_5, x_D]^T.$$

$g_{14}(X) = [y_{R\min}] - y_R \leq 0.$

(10) 限制连杆上铰点位于掩护梁中心线以下,即

$$g_{17}(X) = -L_{18} \leq 0.$$

(11) O 点与前连杆间水平距离约束,即

$$g_{18}(X) = [\Delta x_{\min}] - (x_o - x_K) \leq 0,$$
$$g_{19}(X) = (x_o - x_K) - [\Delta x_{\max}] - \leq 0.$$

(12) 底座长度及柱窝位置约束,即

$$g_{20}(X) = 2/3[(H - 2y_D) \sin \beta + x_D] - L_{15} \leq 0,$$
$$g_{21}(X) = (D_L + S_p) - (x_D - x_K) \leq 0.$$

(13) 顶梁长度及柱窝前后配比应满足:

$$g_{22}(X) = L_5/(L_{13} + L_0) - R_{l\max} \leq 0,$$

式中: D_L 为立柱外径; S_p 人行道宽度; $R_{l\max}$ 为允许 $L_5/(L_{13} + L_0)$ 的最大值.

综上,两柱掩护式液压支架总体参数优化数学模型是一个具有 12 个设计变量、5 个优化子目标函数和 22 个约束条件的优化问题,可表达为:

$$\min f(X) = \sum_{j=1}^5 \frac{f_j(X)}{f_{j0}},$$

$$X = [x_1, x_2, \cdots, x_{12}]^T;$$

$$\text{s. t } g_u(X) \leq 0 \ (u = 1, 2, \cdots, 22).$$

3 基于 MATLAB/GUI 可视化编程

采用 MATLAB/GUI 编写液压支架整体参数优化设计程序. 用户直接面对窗口, 具有良好的人机交互功能, 可以实现参数优化和优化结果动态显示合二为一. 本程序设计共编写了 1 个主程序,

6 个子程序, 包括目标函数、运动学、连杆受力、底板比压、约束条件、优化模型, 每个子程序下面又将设置一些输入输出子程序可供相互调用, 使大量的功能在子程序中实现, 最大程度实现主程序的简洁, 同时利用了 MATLAB 优化工具箱中关于 SQP 算法的程序语句. 程序设计流程如图 4 所示.

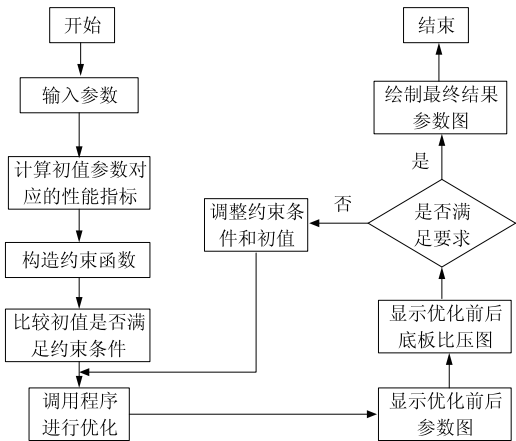


图 4 优化程序设计流程

Fig. 4 The design process of the optimizer

4 算例分析

对 ZY18000/32/70D 型两柱掩护式支架进行总体参数优化设计. 该支架的设计要求为: 最大高度 $H_{\max} = 7\ 000\ \text{mm}$, 最小高度为 $H_{\min} = 3\ 200\ \text{mm}$, 每柱工作阻力 $9\ 000\ \text{kN}$. 优化前后的尺寸及性能对比见表 1 和表 2.

表 1 优化前后尺寸参数对比

Tab. 1 Size parameters before and after optimization											mm	
项目	L_1	L_2	L_3	L_4	L_{15}	L_{18}	H_0	x_K	y_K	y_R	L_5	x_D
优化前	3 100	2 900	750	3 100	3 700	0	240	1 100	1 200	480	1 500	2 100
优化后	3 111	2 964	720	3 142	4 297	49	302	1 135	1 244	498	1 728	2 100
变化量/%	0.35	2.22	-3.98	1.35	16.13	100	25.92	3.21	3.67	3.78	15.18	0

表 2 优化前后性能参数对比

Tab. 2 The performance parameters before and after optimization					
项目	双链线摆幅/mm	前连杆力/kN	后连杆力/kN	比压/MPa	掩护梁弯矩/(kN · m)
优化前	210.71	-4 840.70	4 986.36	1.91	-2 965.02
优化后	60.00	-3 074.30	2 990.24	1.62	-1 885.14
变化量/%	-71.52	-36.49	-40.03	-14.88	-36.42

由优化结果可知, 该优化不仅能满足设计要求, 而且力学特性有较大的改善, 可以保证液压支架的整体性能最优. 同时, 根据优化结果, 底板比压在优化后有所减少, 分布规律与优化前一致, 优化过程中可随时根据优化对比结果以及底板比压

分布状况调整参数重新进行优化, 直到达到满意的优化结果.

5 结论

基于弹性底板假设, 选取底板比压等 5 个目

标函数,通过 SQP 算法对液压支架的整体尺寸设计参数进行了优化,编制了基于 MATLAB/GUI 的可视化程序界面,实现了不同底板状况的整体尺寸优化,得到如下主要结论:

(1)通过液压支架整体尺寸参数的优化,不仅能满足设计要求,而且力学特性有较大的改善,可以保证液压支架的整体性能最优,底板比压分布更为均匀。

(2)将底板比压作为优化目标函数,参与整体尺寸的优化,在结构尺寸变化不大的前提下,前后连杆轴力、底板比压、掩护梁弯矩 4 个主要力学特性参数较优化前平均减少了 31.95%,使得液压支架整体性能考量更加完整与具体,液压支架的整体力学性能更佳。

参考文献:

- [1] 王国法. 掩护式液压支架参数优化设计方法的研究[J]. 煤炭学报,1995,20(S1):27-32.
- [2] 王国法,马胜存. 液压支架总体结构参数的模糊聚类分析和模糊优化[J]. 煤炭学报,1999,24(6):628-633.
- [3] 杜小勇. 二柱掩护式液压支架参数化设计系统的构建[D]. 石家庄:河北工程大学机电工程学院,2013.
- [4] 李庆国. 液压支架多学科设计优化平台研究与实现[D]. 济南:山东科技大学机械电子工程学院,2007.
- [5] 白秀琴,李清. 掩护式液压支架总体参数优化的数学模型[J]. 煤矿机械,2009,30(5):34-36.
- [6] 赵宝生,王敏中,于新. Winkler 弹性地基上梁的精细化理论[J]. 应用力学学报,2005,22(4):602-605.
- [7] MOHANTY S C, DASH R R, ROUT T. Parametric instability of a functionally graded Timoshenko beam on Winkler's elastic foundation[J]. Nuclear engineering and design, 2011, 241(8):2698-2715.
- [8] WANG J L, ZHANG C. Three-parameter, elastic foundation model for analysis of adhesively bonded joints[J]. International journal of adhesion and adhesives, 2009, 29(5):495-502.
- [9] 卢正,姚海林,罗海宁,等. 双参数黏弹性地基上连续配筋混凝土路面振动参数分析[J]. 岩土力学, 2008,29(8):2177-2182.
- [10] 何芳社,钟光珞. 双参数弹性地基上变截面梁的弯曲[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005,37(2):251-254.
- [11] WU J X, LI X F, TANG G J. Bending wave propagation of carbon nanotubes in a bi-parameter elastic matrix[J]. Physica B: condensed matter, 2012, 407(4):684-688.
- [12] WANG J L, C ZHANG. A three-parameter elastic foundation model for interface stresses in curved beams externally strengthened by a thin FRP plate[J]. International journal of solids and structures, 2010, 47(7/8):998-1006.
- [13] 黄义. 弹性地基上的梁、板、壳[M]. 北京:科学出版社,2005:3-40.
- [14] 王志,倪和平,赵明峰. 弹性底板上的液压支架底座力学性能分析[J]. 科学技术与工程,2014,14(7):94-98.

Overall Parameter Optimization of the Hydraulic Support on the Elastic Foundation

WANG Zhi, WANG Chaoya, YANG Fei

(School of Mechanics & Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A stress analysis model of hydraulic support base on elastic floor was established based on the theory of beam on elastic foundation. The optimal variables including connecting rod force, structure size, bending moment of the cover beam, floor pressure and support efficiency were taken as five optimization objectives. Hydraulic support overall size of the design parameters were optimized under different floor conditions through the sequence quadratic planning method. The application of visualization was realized based on MATLAB/GUI visual programming. The example analysis showed that the optimization results not only could meet the design requirements but also could improve the mechanical properties. The four main mechanical parameters include the axial force of the connecting rod, the pressure of the floor and the bending moment of the cover beam decreased by 31.95% on average.

Key words: elastic foundation; pressure of base plate; multi-objective optimization; overall size parameters; hydraulic support.