

基于混合因素均匀设计的槽式聚光器结构优化^{*}

吴红华[†], 米慧敏

(湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:为控制槽式聚光器的成本,以镜面位移和杆件应力为约束条件,以主三角桁架和拉翅的截面尺寸为连续变化的定量参数,拉索初拉力为状态变化的定性参数,采用均匀设计法对聚光器进行了优化. 根据优化得到的参数取值,采用 BIM (Building Information Modeling) 技术进行槽式聚光器三维模型的建立,并依据模型包含的钢材种类、数量、长度、质量等信息进行钢材成本的计算. 结果表明:均匀设计法可以用于含有定性和定量因素的聚光器结构优化,在满足既定约束条件下聚光器的钢材成本可降低 10.32%,用钢量可减少 11.86%,优化效果较好. 本文提出的方法对于同时包含定量参数和定性参数的复杂优化问题具有一定参考价值,借助于聚光器三维 BIM 信息模型对钢材成本的计算,进一步证明了该优化方法的可行性.

关键词:槽式聚光器;均匀设计;结构优化;BIM

中图分类号:TU399

文献标志码:A

Structural Optimization of Trough Condenser Based on Uniform Design of Mixed Factors

WU Honghua[†], MI Huimin

(Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To control the cost of trough condenser, uniform design method was adopted to optimize its structure. Displacement and stress were considered as constraints, triangular truss's rod sizes and the wing's rod sizes were taken as quantitative parameters, and the initial tension of cable was set as qualitative parameter. Then, according to the optimized parameters, the three-dimensional model of trough condenser including steel types, quantity, length, quality and other information was established by BIM technology to calculate the cost of steels. The result indicates that uniform design method can be used to optimize the structure of condenser with qualitative and quantitative factors. Under the constraints, the cost of the condenser is reduced by 11.76% and the amount of steel is saved by 11.86%, which shows that the optimization is effective. The proposed method has a certain reference value for the complex optimization problems including quantitative parameters and qualitative parameters. The cost of steels according to the 3D BIM information model further proves the feasibility of the method.

Key words: trough condenser; uniform design; structural optimization; BIM

^{*} 收稿日期:2017-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278190,51478179), National Natural Science Foundation of China(51278190,51478179)

作者简介:吴红华(1967-),女,湖北武汉人,湖南大学副教授

[†] 通讯联系人, E-mail: wuliyy@126.com

20 世纪 70 年代起,作为一种绿色环保的可再生能源,太阳能因其适用范围广且效益显著而逐渐得到重视^[1]. 槽式太阳能热发电系统作为可以转化太阳能为热能的专门设施已经有了广泛的应用,与其相关的结构性能优化研究也越来越多. 孔祥兵等^[2]对聚光器支架结构进行拓扑优化,提升了支架性能;颜昭等^[3]设计了一种新型的槽式太阳能支架,并对该支架的应力与变形特性进行了研究;李廉洁^[4]通过对槽式聚光器进行有限元分析,对预应力刚拉索、角支座支点位置及主体结构杆件截面尺寸进行了优化.

另外,聚光器可观的用钢量使得其成本占热发电系统全部投资的比重超过 50%^[5]. 因此,在提升聚光器性能的同时,有必要在满足系统正常工作的条件下对聚光器进行结构优化,通过减少用钢量来降低聚光器的成本,为规模较大的太阳能聚光系统带来更大的经济效益.

作为统计试验设计的方法之一,均匀设计通过试验点在试验范围内的“均匀散布”来以最少的试验获得最多的信息^[6-7],因此对于多因素、多水平以及系统模型完全未知的试验,均匀设计可使优化过程大为简化,提高优化效率^[8]. 均匀设计方法的应用范围已从最初的军事领域逐渐扩展到医药、电子、农业等领域,在解决岩土工程土层力学参数反演、钢框架结构抗震可靠度分析和刚性穹顶结构近似优化等工程问题中也取得显著成效^[9-11]. 通常,利用均匀设计对试验结果进行优化分析时只考虑连续变化的定量因素,但很多情况下状态变化的定性因素对试验结果有很大的影响. 为使优化结果更为可靠,在使用均匀设计解决此类问题时需要综合考虑定性因素和定量因素的影响,本文就是基于含有定性因素和定量因素的混合因素均匀设计法展开对聚光器结构的优化.

近年来,作为一种引领建筑行业发展趋势的先进理念,BIM 获得了迅速的发展. BIM 技术能够将项目中所有的数据信息存储到三维参数模型中,实现整个项目的数据信息的交换与共享;BIM 的参数化建模使得在原有模型的基础上进行快速修改和提取信息成为可能,极大提高了设计效率. 有人通过对美国的 32 个不同类型的工程项目进行调查,发现 BIM 技术的应用可使项目的建造工期缩短 7%,碰撞引起的合同费用减少 10%,工程预算资金降低 40%^[12-13]. 本文正是利用 BIM 技术可以建立三维参数模型这一特点,在对聚光器进行结构优化的基

础上,通过建立 BIM 三维参数模型快速、准确地提取材料清单来进行钢材成本的计算.

首先,本文基于均匀设计法设计的试验方案,不同试验点代表不同的参数组成方案,利用 MIDAS 对不同组成方案进行自重和风荷载作用下的静力分析,得出每一种组成方案下镜面的最大位移和最大应力等指标;其次,建立回归模型对试验结果进行回归分析,以镜面变形及杆件应力为控制条件,对聚光器用钢量进行优化,减少用钢量;再次,基于以上优化结果,采用 Tekla Structures 建立槽式聚光器的三维 BIM 信息模型,自动统计模型的钢材型号、数量、长度、质量等信息,进而进行聚光器结构所需钢材成本的计算,进一步证明本文方法对降低聚光器结构成本的可行性.

1 槽式聚光器有限元分析

1.1 聚光器结构概述

在太阳能热发电系统中,作为将太阳光聚焦到集热管上的集热装置,聚光器通过随太阳光角度的变化调整仰角来实现对太阳能的高效利用. 由于槽式聚光器一般安装在多风的空旷场地,风荷载是造成镜面变形的主要荷载,镜面变形过大会降低聚光器对太阳能的利用率,甚至使其无法正常工作. 聚光器结构杆件示意图如图 1 所示.

图 1 聚光器结构杆件示意图

Fig. 1 The structure of the trough condenser

注:相邻拉翅之间设有横梁,采用等边角钢.

当聚光器镜面垂直于地面、镜面的水平角和竖向角均为 0°(镜面同来流风向夹角为 90°)时体型系

数最大^[14],故在此最不利工况下进行聚光器的优化分析。1 号、2 号杆件组成聚光器的主三角桁架,4 号、5 号杆件组成两侧支架,3 号拉翅和 6 号拉索是控制结构变形的主要构件,在满足聚光器正常工作的条件下,减小构件截面尺寸来减小结构用钢量、降低成本,是进行结构优化的目标。图 2 所示为聚光器角度示意图。

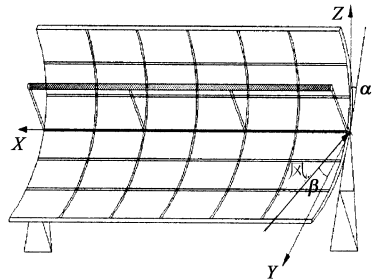


图 2 聚光器角度示意图

Fig. 2 Sketch of angle of the trough condenser

1.2 基于 MIDAS 的槽式聚光器有限元分析

聚光器模型主要由镜面板(6 行 6 列,共 36 块)、主三角桁架、拉翅、拉索及底部支撑组成。其中,镜面板为板单元,主三角桁架、拉翅和底部支撑为梁单元,拉索为索单元并采用直径为 6.2 mm、强度等级为 1 270 MPa 的镀锌钢绞线,其他组成部分的材料属性及力学特性见表 1。

表 1 聚光器材料属性及力学特性

Tab. 1 The material and mechanical properties of condenser

组成部分	材料	E/GPa	泊松比 γ	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$
支架	Q235	206	0.3	7 850
镜面	普通钠钙玻璃	73	0.2	2 550

相对于上部结构,混凝土浇筑基础的刚度很大,所以建模过程中将支撑底部考虑为完全固结的情况,主三角桁架与底部支撑刚性连接,镜面板与拉翅刚性连接并释放板端约束。图 3 所示为聚光器水平角和竖向角均为 0°时的有限元模型。

由于聚光器结构相对刚度较大,自振频率与风荷载的主要频率段相比较,自振周期较小^[15],因此本文有限元分析中作用于聚光器结构上静力风荷载标准值按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[16]中围护结构的风荷载计算公式 8.1.1—2 进行计算。

在聚光器正常工作的情况下,其杆件的最大应力应该不大于 215 MPa(钢材的设计容许值)^[17],拉索应力不超过 1 270 MPa。根据静力分析得到的整

体变形云图如图 4 所示,最大变形值为 16.136 mm,位于下部镜面板的跨中;根据钢构件组合应力云图(如图 5 所示),较大的局部应力出现在两端支架与地面连接处、两端支架与主梁相接触,最大压应力值为 148.817 MPa。

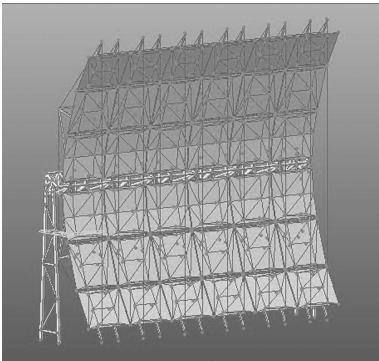


图 3 聚光器有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the trough condenser

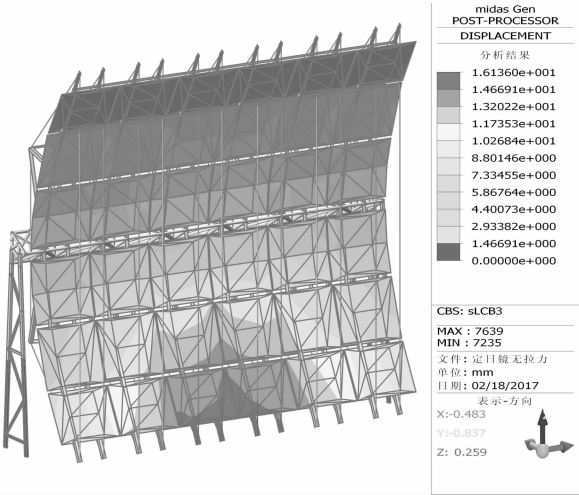


图 4 整体变形云图

Fig. 4 Nephogram of the entirety deformation

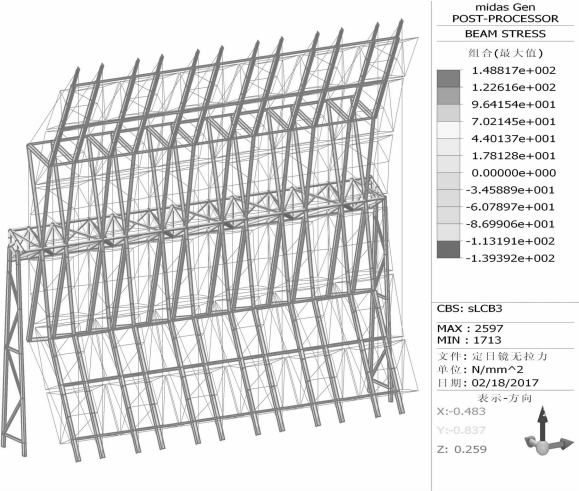


图 5 钢构件组合应力云图

Fig. 5 Combined stress nephogram of steel members

2 基于混合因素均匀设计法对聚光镜结构的优化

2.1 试验安排及试验结果

试验参数共 4 个,1 号主三角桁架顶部杆件截面的外径 P_1 、2 号主三角桁架其余杆件截面的外径 P_2 、3 号拉翅截面的肢宽 P_3 为 3 个连续变化的定量因素,6 号拉索的初拉力 P_4 为状态变化的定性因素. 其中,1 号、2 号杆件截面的外径 P_1 、 P_2 和 3 号杆件截面的肢宽 P_3 均考虑 6 个水平;定性因素拉索初拉力 P_4 包含 2 个水平,即有拉索初拉力和无拉索初拉力两种状态. 另外,1 号、2 号圆管厚度分别为 4 mm、2.5 mm,3 号角钢厚度为 3 mm,4 号支撑两边杆件,5 号支撑中间杆件分别采用截面为 60 mm×30 mm×2 mm 和 30 mm×20 mm×1.5 mm 的矩形钢管. 聚光器结构的其他主要参数见表 2.

表 2 聚光器结构的主要参数

Tab. 2 The main parameters of condenser

物理特性	主要参数
开口尺寸	6 m
抛物面方程	$x^2 = 8\ 000y$
立柱高度	3.2 m
聚光器长度	6.1 m

由于本文引用的均匀设计表中是按照所有因素的水平数均为 6 来安排试验的,因此将定性因素拉索初拉力的水平数也考虑为 6 个,有初拉力和无初拉力 2 种状态均出现 3 次,水平表见表 3.

表 3 参数水平表

Tab. 3 Table of factors and levels

序号	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	P_4/kN
1	50	39	36	15
2	52	42	38	16
3	54	45	40	17
4	56	48	42	18
5	58	51	44	19
6	60	54	46	20

注:拉索初拉力 P_4 不为零时按 15 kN 进行试验,为零时按照拉索无初拉力进行试验.

本文选用均匀设计表 $U_{18}(6^4)$ 来安排试验,偏差 CD_2 为 0.014 58,见表 4. 考查的指标为镜面最大位移 $W_{\max}$ 和用钢量 G ,钢材最大应力值 $\sigma_{\max}$ 用来判断聚光器是否安全可靠. 试验方案及试验结果见

表 5.

表 4 $U_{18}(6^4)$ 均匀设计表

Tab. 4 Uniform design table $U_{18}(6^4)$

NO					NO					NO				
$s=4$					$s=4$					$s=4$				
1	3	2	3	6	7	2	3	4	1	13	5	3	6	6
2	2	1	6	3	8	5	6	3	4	14	1	2	1	4
3	4	5	6	1	9	1	4	3	2	15	5	1	2	1
4	3	6	1	2	10	6	2	5	2	16	1	6	5	5
5	3	4	5	4	11	4	3	2	3	17	6	4	1	5
6	4	1	4	5	12	6	5	4	3	18	2	5	2	6

表 5 试验方案及试验结果

Tab. 5 Experimental scheme and results

试验 序号	试验因素及水平				试验结果		
	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	P_4/kN	$W_{\max}/\text{mm}$	G/kg	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$
1	54(3)	42(2)	40(3)	为零(6)	16.94	847.24	151.66
2	52(2)	39(1)	46(6)	不为零(3)	12.04	867.04	157.35
3	56(4)	51(5)	46(6)	不为零(1)	10.75	913.06	109.30
4	54(3)	54(6)	36(1)	不为零(2)	10.99	861.22	108.38
5	54(3)	48(4)	44(5)	为零(4)	15.22	888.67	121.82
6	56(4)	39(1)	42(4)	为零(5)	17.44	844.80	171.00
7	52(2)	45(3)	42(4)	不为零(1)	11.48	864.18	149.23
8	58(5)	54(6)	40(3)	为零(4)	14.46	888.27	114.41
9	50(1)	48(4)	40(3)	不为零(2)	11.34	866.63	111.06
10	60(6)	42(2)	44(5)	不为零(2)	11.52	870.41	139.11
11	56(4)	45(3)	38(2)	不为零(3)	11.57	842.04	148.95
12	60(6)	51(5)	42(4)	不为零(3)	10.79	890.92	108.97
13	58(5)	45(3)	46(6)	为零(6)	15.51	892.45	135.41
14	50(1)	42(2)	36(1)	为零(4)	17.70	815.20	151.87
15	58(5)	39(1)	38(2)	不为零(1)	12.16	821.43	158.29
16	50(1)	54(6)	44(5)	为零(5)	14.33	908.06	114.86
17	60(6)	48(4)	36(1)	为零(5)	16.09	843.06	122.05
18	48(2)	51(5)	38(2)	为零(6)	15.57	858.98	114.53

注:括号内的数字代表均匀设计表中参数水平的序号,其中拉索初拉力 P_4 为零、不为零的意义同表 3.

2.2 试验数据的回归及评价

对于含有定性因素的问题,常用的解决方法是将定性因素定量化,用虚拟变量来表示定性因素^[18]. 由表 4 列出的 18 次试验对应的拉索初拉力 P_4 为包含不为零和为零两种状态的定性变量,本文中可以认为它们对应着 2 个特征变量(0 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1 0 0 0)’和(1 0 0 0 1 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1)’,也称为虚拟变量或伪变量. 分别用 Z_1 、 Z_2 标记. 显然有:

$$\begin{cases} Z_1 + Z_2 = 1; \\ Z_i Z_j = 0, i \neq j, i, j = 1 \text{ 或 } 2; \\ Z_i^2 = Z_i, i = 1 \text{ 或 } 2. \end{cases} \quad (1)$$

$Z_1、Z_2$ 不互相独立,考虑如下回归方程:

$$Y = a + bP_1 + cP_2 + dP_3 + eZ_1 + D. \quad (2)$$

利用 Matlab 编写程序对试验结果进行多元线性回归分析,得到回归方程如式(3):

$$\begin{cases} W_{\max} = 28.496\ 1 - 0.027\ 6P_1 - 0.153\ 6P_2 - \\ \quad 0.095\ 0P_3 - 4.573\ 0Z_1; \\ G = 421.199\ 7 + 0.489\ 3P_1 + 3.595\ 3P_2 + \\ \quad 6.110\ 2P_3 + 0.111\ 4Z_1. \end{cases} \quad (3)$$

在多元线性回归中,常用修正自由度的决定系数 $\bar{R}^2$ 作为评价模型拟合优劣的指标^[15]. $\bar{R}^2$ 定义如下:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{\sum e_i^2 / (n - k - 1)}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2 / (n - 1)} = 1 - \frac{n - 1}{n - k - 1} (1 - R^2). \quad (4)$$

式中: n 表示样本容量; k 表示模型中回归系数的个数; R^2 是决定系数; $\sum e_i^2$ 是残差平方和; $\sum (Y_i - \bar{Y})^2$ 是总离差平方和; $(n - k - 1)$ 和 $(n - 1)$ 分别是残差平方和及总离差平方和的自由度. $\bar{R}^2$ 越接近 1 表示模型拟合得越好.

本文采用相关系数 r 、修正的决定系数 $\bar{R}^2$ 以及 F 统计量 3 个参数对回归方程的拟合程度和显著性进行检验. 假设显著性水平 $\alpha = 0.05$,而样本容量 n 为 18,模型中回归系数 k 为 5,查 F 分布表得: $F_\alpha(k, n - k - 1) = F_{0.05}(5, 12) = 3.11$.

表 6 给出了回归模型的相关系数 r 、修正的决定系数 $\bar{R}^2$ 以及 F 统计量,其中 r 和 $\bar{R}^2$ 都非常接近于 1, F 统计量值均远大于 F_α ,说明回归方程的拟合程度较好.

表 6 回归结果评价指标

Tab. 6 Evaluation indexes of regression results

回归方程	相关系数 r	修正的决定系数 $\bar{R}^2$	F
$W_{\max}$	0.983 7	0.976 5	195.983 6
G	0.999 9	0.995 5	1 028.0

图 6 给出了试验值与回归值的比较, $W_{\max}$ 、 G 的回归值与试验值的最大相对误差分别为 4.63%、

0.18%,回归值与试验值十分接近.

为更直接地反映回归分析结果的优劣,现用后验差法^[19]对回归结果进行统计检验.

用 $g_a(i)$ 表示有限元计算的 $W_{\max}$ 、 G ,对应的回归方程的预测结果用 $g_r(i)$ 表示,则二者之间的残差:

$$e(i) = g_a(i) - g_r(i), i = 1, 2, n. \quad (5)$$

$g_r(i)$ 、 $e(i)$ 的方差分别用 S_1^2 、 S_2^2 表示如下:

$$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_a(i) - \bar{g})^2, \quad (6)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e(i) - \bar{e})^2, \quad (7)$$

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_a(i), \bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e(i). \quad (8)$$

后验差比值:

$$C = \frac{S_2}{S_1}. \quad (9)$$

小概率误差:

$$P = P\{|e(i) - \bar{e}| < 0.647\ 5S_1\}. \quad (10)$$

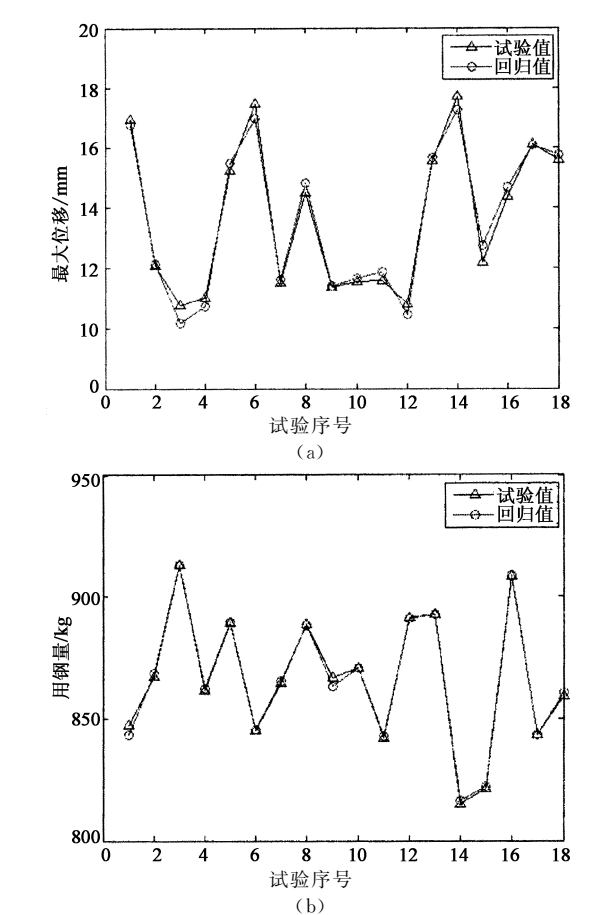


图 6 试验值与回归值的比较

Fig. 6 Comparison of experiment and regression values

P 、 C 反映了回归模型的精度,当 P 较大、 C 较小时模型的拟合效果较好. 表 7 为模型精度的评价标准. 表 8 列出了根据上述理论得到的回归方程的 P 、 C 值,两个回归方程的 $P=1>0.95, C<0.35$.

表 7 回归精度评价标准

Tab. 7 Evaluation criteria of regression accuracy

回归方程	P 值	C 值
优	≥ 0.95	≤ 0.35
良	≥ 0.80	≤ 0.50
合格	≥ 0.70	≤ 0.45
不合格	≤ 0.70	≥ 0.65

表 8 评价指标 P 、 C 分析结果

Tab. 8 The analysis results of P and C

评价指标	$W_{\max}$	G
P	1	1
C	0.127 7	0.056 1

通过回归分析,说明式(3)可近似用来表示聚光器试验参数与试验指标的函数关系,镜面的最大位移 $W_{\max}$ 、结构的用钢量 G 与试验参数 (P_1, P_2, P_3, P_4) 均呈线性关系. 随着 $P_1、P_2、P_3、P_4$ 的增大, $W_{\max}$ 变小,其中是否具有拉索初拉力对其影响最为明显,即对拉索施加一定的初拉力可明显减小镜面的位移. 随着 $P_1、P_2、P_3、P_4$ 的增大, G 变大,拉翅和主梁桁架节间杆件对其影响较主梁桁架主杆件更大,拉索初拉力对其影响最小.

表 9 优化结果及检验

Tab. 9 Optimization results and inspection

推荐的参数取值				最大位移 $W_{\max}/\text{mm}$		用钢量 G/kg		最大应力检验值	钢材成本/元
P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	Z_1	式(3)值	检验值	式(3)值	检验值	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	
52	39	36	1	12.078	12.420	806.939	805.51	190.556	3 976.460
50	39	36	1	12.133	12.471	805.960	804.29	190.527	3 974.912
51	40	36	1	11.952	12.329	810.045	808.47	182.462	3 997.133
55	39	36	1	11.995	12.349	808.407	807.35	190.569	3 987.414
51	39	36	1	12.105	12.445	806.449	804.90	190.542	3 977.581
53	39	36	1	12.050	12.395	807.428	806.12	190.570	3 982.513
50	40	36	1	11.979	12.355	809.555	807.96	182.448	3 994.337

3 基于 BIM 技术统计钢材成本

减少用钢量的最终目的是控制成本. 但由于本文讨论的聚光器结构由圆管、角钢、矩形钢管等不同截面种类的钢材组成,且每一种钢材均包含多种规格、不同种类的钢材,同种类不同规格的钢材价格并不相同,用钢量最小并不能代表钢材成本最低. 在

2.3 初步优化及设计检验

对聚光器的优化,即为在一定约束条件下对目标函数求极值的过程,如式(10):

Minimize $G(P_1, P_2, P_3, Z_1)$

s. t.
$$\begin{cases} W_{\max} \leq W_{\lim} \\ \sigma_{\max} \leq 215 \text{ MPa} \\ 50 \text{ mm} \leq P_1 \leq 60 \text{ mm} \\ 39 \text{ mm} \leq P_2 \leq 54 \text{ mm} \\ 36 \text{ mm} \leq P_3 \leq 46 \text{ mm} \\ 0 \leq Z_1 \leq 1 \\ P_1, P_2, P_3, Z_1 \in \text{Integers} \end{cases} \quad (10)$$

在水平角和竖向角均为 0° 的情况下,现有聚光器镜面的最大位移为 16.136 mm,用钢量为 912.55 kg. 若规定允许的最大位移限值为 16.136 mm,将式(10)与回归方程组(3)相结合,利用 IstOpt 软件求解目标函数得到推荐的参数取值,推荐的参数取值以及 $W_{\max}$ 和 G 的计算值与检验值、 $\sigma_{\max}$ 的检验值见表 9. 由表 9 可知, $W_{\max}$ 和 G 的最大相对误差均在 3% 以内,回归值与检验值比较接近,充分说明了均匀设计的有效性;优化后结构的最小用钢量为 804.29 kg,比现有结构减少了 11.86%;对应的结构最大位移为 12.471 mm,比现有结构减小了 18.63%. 同时,最大应力 $\sigma_{\max}$ 均小于 215 MPa,满足应力约束条件.

某些情况下,某种规格钢材用钢量的减小会导致另一规格钢材用钢量的增大,如果用钢量增大的钢材的价格较高,就有可能导致总的钢材成本的上升. 因此,为进一步证明本文优化方法对聚光器提高经济效益的作用,对比挑选最经济的参数组合,需要对不同优化组合下聚光器结构的钢材成本进行统计. 分别按照原始截面和表 9 给出的槽式聚光器优化之后的参数取值在 Tekla Structures 中创建包含构件

截面、材质等信息的 BIM 模型,如图 7 所示.

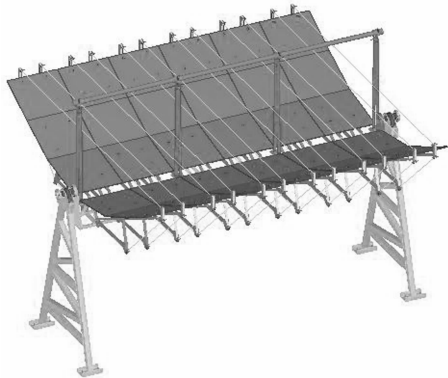


图 7 Tekla Structures 构建的模型
Fig. 7 The model built in Tekla Structures

统计材料清单,得到每种组合下所有型号钢材的数量、长度、横截面积、质量等信息,同时参考某城市镀锌钢管的市场价格,据此计算聚光器建造过程中的钢材成本. 结果表明,优化后聚光器结构的最低钢材成本只有 3 974. 912 元,较现有结构的钢材成本 4432. 246 元节省了 10. 32%,且该钢材成本最低的组合恰好与用钢量最省的组合为同一组合,如表 9 中所示. 同时,对比原结构,表 9 中不同组合对应的钢材成本均有大幅度降低且比较接近,充分证明了对含有混合因素的聚光器优化问题进行均匀设计有助于其经济效益的提高. 表 10 为 BIM 模型生成的部分构件材料清单.

表 10 部分构件材料清单

Tab. 10 Partial material statistics

型材	材质	数量	长度 /mm	面积 /m ²	质量 /kg
L40×3	Q235A	3	562	0. 1	1. 0
L40×3	Q235A	12	1 218	0. 2	2. 3
L40×3	Q235A	12	1 264	0. 2	2. 3
L40×3	Q235A	12	3 046	0. 5	5. 6
			73 084	11. 5	135. 3
PIP45×2. 5	Q235A	1	478	0. 1	1. 3
PIP45×2. 5	Q235A	1	481	0. 1	1. 3
PIP45×2. 5	Q235A	5	691	0. 1	1. 8
PIP45×2. 5	Q235A	6	540	0. 1	1. 4
PIP45×2. 5	Q235A	13	410	0. 1	1. 1
PIP45×2. 5	Q235A	26	460	0. 1	1. 2
PIP45×2. 5	Q235A	2	6 180	0. 9	16. 2
			37 296	5. 3	97. 8
PIP54×4	Q235A	1	6 180	1. 0	30. 5
			6 180	1. 0	30. 5
			合计:		263. 6

4 结 论

基于含有混合因素的均匀设计方法,本文按照聚光器结构优化的基本步骤对聚光器进行了优化分析,得到以下结论:

- 1) 利用均匀设计法对最不利工况下的聚光器进行自重和风荷载作用下的静力分析与优化,得到了结构变形、用钢量与各截面参数、拉索初拉力之间的线性回归方程,并得到了在变形限值下各杆件的推荐截面规格,对聚光器的钢结构设计有一定的借鉴意义.
- 2) 在规定允许的位移限值为 16. 136 mm 的条件下,优化之后结构的用钢量较现有结构减少了 11. 86%;优化后结构的钢材成本较现有结构降低了 10. 32%,优化参数组合可以为大规模的太阳能聚光系统提高经济效益提供参考.
- 3) 在优化结果推荐的参数组合中,拉索初拉力全部为不为零的状态,结构的最大位移较原结构均明显减小. 根据用钢量最小原则选择的优化后结构的最大位移较拉索无初拉力的现有结构减小了 18. 63%,说明对拉索施加一定的初拉力可明显减小聚光器镜面的位移.
- 4) 含有混合因素的均匀设计方法简单,适用范围较广,可应用于含有定性因素的聚光器结构优化,在有关新能源结构的优化中有较好的应用前景.

参考文献

[1] 鄂加强,苏秀超, YANG W M,等. 碟式太阳能聚光器气动特性和最大风压分布仿真分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(2):8—16.
E J Q, SU X C, YANG W M, *et al.* Simulation analysis on the aerodynamic characteristics and maximum wind pressure distribution of dish solar concentrator [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015, 42(2): 8—16. (In Chinese)

[2] 孔祥兵,陈小安,吴国洋,等. 槽式太阳能聚光器支架结构的拓扑优化设计[J]. 现代制造工程,2013(2):121—126.
KONG X B, CHEN X A, WU G Y, *et al.* Topological optimization design of trestle structures based on parabolic trough solar concentrator [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(2): 121—126. (In Chinese)

[3] 颜昭,肖洪,曹飞,等. 外掠横风下槽式聚光器应力与变形特性研究[J]. 机械设计与制造工程,2016,45(7):84—87.
YAN Z, XIAO H, CAO F, *et al.* Study on the stress and de-

formation of trough condenser under the action of horizontal wind [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(7): 84—87. (In Chinese)

[4] 李廉洁. 槽式聚光器结构的分析与优化[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院,2015:57—74.

LI L J. Research on the structural analysis and optimization of groove type condenser [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2015: 57—74. (In Chinese)

[5] Sargent & Lundy LLC Consulting Group. Assessment of parabolic trough and power tower solar technology cost and performance forecasts[R]. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2003: 4-10—4-11.

[6] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 101—103.

FANG K T. Uniform design and uniform design table [M]. Beijing: Science Press, 1994: 101—103. (In Chinese)

[7] 刘永才. 均匀设计及其应用[J]. 战术导弹技术,2002(1):58—61.

LIU Y C. Uniform design and its application [J]. Tactical Missile Technology, 2002(1): 58—61. (In Chinese)

[8] 李正农,梁笑寒,吴卫祥,等. 基于均匀设计与线性回归的定日镜结构优化设计[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2012,39(12):1—6.

LI Z N, LIANG X H, WU W X, *et al.* Research on the optimization design of heliostat structure based on uniform design and linear regression[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2012, 39(12): 1—6. (In Chinese)

[9] 吴朝阳,李正农,钟旻. 基于均匀设计的基坑土层参数反演和周边沉降预测[J]. 建筑结构,2014,44(3):84—89.

WU Z Y, LI Z N, ZHONG M. Back analysis on soil parameters and forecast on settlement of foundation pit based on design method [J]. Building Structure, 2014, 44(3): 84—89. (In Chinese)

[10] 吕大刚,贾明明,李刚. 基于均匀设计响应面法的钢框架结构抗震可靠度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(4):1—5.

LÜ D G, JIA M M, LI G. Seismic reliability analysis of steel frame structures based on uniform design response surface method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(4): 1—5. (In Chinese)

[11] 吴慧,岑迪钦,高博青. 刚性穹顶结构的近似优化与性能分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2011,45(11):1966—1971.

WU H, CEN D Q, GAO B Q. Approximate optimization and performance analysis of rigid cable dome structure [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2011, 45(11): 1966—1971. (In Chinese)

[12] FURNEAUX C, KIVIT R. BIM: implications for government [R]. Brisbane: CRC Construction Innovation, 2008: 12—13.

[13] LOVE P E D, SIMPON L, HILL A, *et al.* From justification to evaluation: building information modeling for asset owners [J]. Automation in Construction, 2013, 35: 208—216.

[14] 邹琼,李正农,吴红华. 槽式聚光镜风压分布的风洞试验与分析研究[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(6):227—235.

ZOU Q, LI Z N, WU H H. Wind tunnel test and analysis of the wind pressure distribution of curved mirror solar condenser [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(6): 227—235. (In Chinese)

[15] 郑晶. 槽式聚光镜结构关键技术研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院,2014:42—43.

ZHENG J. Research on the key technology of groove type condenser structure[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2014: 42—43. (In Chinese)

[16] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:30—31.

GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 30—31. (In Chinese)

[17] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003:25—26.

GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2003: 25—26. (In Chinese)

[18] 王柱,方开泰. 含有定性因素的均匀设计[J]. 数理统计与管理,1999,18(5):11—19.

WANG Z, FANG K T. Measures of uniformity for uniform designs with qualitative factors [J]. Application of Statistics and Management, 1999, 18(5): 11—19. (In Chinese)

[19] 林云,张荣飞,王岳能. 现代统计分析方法[M]. 杭州:浙江大学出版社,1991:180—181.

LIN Y, ZHANG R F, WANG Y N. Modern statistical analysis method [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1991: 180—181. (In Chinese)