

# 混凝土布料机主梁多目标优化

张珂<sup>1</sup>, 雒笑阳<sup>1</sup>, 张世英<sup>1,2</sup>

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 北方重工集团有限公司, 辽宁 沈阳 110141)

**摘要** 目的 研究优化混凝土布料机的结构性能,在保证满足混凝土布料机整机动静态性能的前提下,提高混凝土布料机一阶固有频率,减少主梁质量。**方法** 对混凝土布料机进行建模,应用 ANSYS workench 作为分析工具,对混凝土布料机进行静力学分析;在 ANSYS 仿真软件的响应面优化模块中,对主梁参数变量进行设定,根据各试验设计点建立参数变量与优化目标之间的响应面模型;运用 Screening 算法以及 MOGA 算法对应力、一阶固有频率以及主梁质量进行多目标优化,通过对比得出最优解;对优化前的结构进行模态分析,对比优化前后混凝土布料机一阶固有频率以及主梁质量。**结果** 通过优化算法得出了一组最优解,优化后的质量减少了 11.5%,一阶频率提高了 3.7%。**结论** 优化得出的最优解可以在保证满足混凝土布料机整机动静态性能的前提下,提高了混凝土布料机一阶固有频率,减少了主梁质量,减少了制造成本,可为混凝土布料机的结构研究提供借鉴。

**关键词** 混凝土布料机;主梁;模态分析;响应面优化

中图分类号 TU64

文献标志码 A

## Multi-Objective Optimization of the Main Beam of the Concrete Distributor

ZHANG Ke<sup>1</sup>, LUO Xiaoyang<sup>1</sup>, ZHANG Shiyong<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Northern Heavy Industries Group Co. Ltd., Shenyang, China, 110141)

**Abstract:** The structural performance of the concrete distributor are studied and optimized in order to ensure the concrete distributor static and dynamic performance, and improve the concrete distributor first order inherent frequency, while reduce the weight of the main beam. The concrete distributor is modeled, and ANSYS workench is used as the analysis tool to analyze the statics of the concrete distributor; In the response surface optimization module of ANSYS simulation software, the parameter variables of the main beam are set, and the response surface model between

收稿日期:2021-07-22

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0704003);辽宁省自然科学基金指导计划项目(20180551119)

作者简介:张珂(1969—),男,教授,博士研究生导师,主要从事现代建筑产业技术装备方面研究。

the parameter variables and the optimization target is established according to each test design point; Screen algorithm and MOGA algorithm are used for multi-objective optimization of stress, first-order natural frequency and main beam quality, and the optimal solution is obtained through comparison; The modal analysis of the structure before and after optimization is carried out, and the first-order natural frequency of the concrete distributor and the mass of the main beam are compared before and after optimization. A set of optimal solutions is obtained through the optimization algorithm. The optimized mass is reduced by 11.5%, and the first-order frequency is increased by 3.7%. The optimal solution obtained can meet the purpose of increasing the first-order natural frequency of the concrete distributor and reducing the weight of the main beam under the premise of ensuring the overall dynamic and static performance of the concrete distributor.

**Key words:** concrete distributor; main beam; modal analysis; response surface optimization

近年来,关于混凝土预制构件的研究发展速度日益增快,布料机是预制混凝土构件工业生产流水线里不可缺少的主要机械设备。与传统的混凝土布料方法对比,混凝土布料机通过运用多螺杆结构的重型混凝土布料机进行强行输出布料,对于混凝土具有极强的包容性和适应性、操作简单可靠、布料运行迅速、整个生产线的效率较高,同时还具备整个布料过程精确性高,布料运行过程自动化水平高等优越的结构性能<sup>[1]</sup>。

优化设计是近年来发展起来的一门新学科,是最优化技术和计算机计算技术在设计领域应用的结果<sup>[2-4]</sup>。在设计过程中,往往要综合考虑多种因素,最终确定不同的设计参数。比如:产品本身质量、设计过程中的具体成本、产品所要必须具备的性能、产品在一定工况下所需的承载要求等。围绕产品设计后期优化提升性能,增强产品的整体性能质量、减少设计的设计周期以及通过使用现代计算机进行辅助设计是当前研究热点。作为一款应用范围极其广泛的计算机有限元分析应用软件,ANSYS 本身内置了成熟而强大的预处理功能、后处理系统同时还具备较强的计算分析能力。可以通过 ANSYS 自带的参数化设计语言达成调整修改复杂结构设计参数的目的,这个过程可以大大地缩短改进三维模型以及重新进行产品结构性能分析的耗费时长<sup>[5-7]</sup>。

目前对于结构优化的研究众多:戴磊

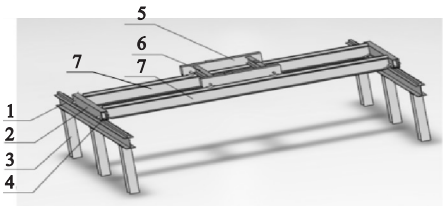
等<sup>[8]</sup>对特定机床的三维机械结构的设计参数展开了形状优化的设计研究;李洁等<sup>[9]</sup>对机床立柱机构进行了有限元模态分析及设计优化,提高了立柱结构的固有频率;蒋荣超等<sup>[10]</sup>基于熵权 TOPSIS 方法对车身整体的动力学结构特性展开了多目标优化研究。姜衡等<sup>[11]</sup>基于响应面优化方法对立式机床的加工中心展开了结构静态性能、动态性能研究,同时还进行多目标优化设计,大大减少了机床加工中心的整体质量,进一步提升了加工中心本体的一阶固有频率。上述研究是对固有频率或质量进行了单独优化,但没有进行综合考虑。在现有对混凝土布料机的研究基础上,如何降低布料机质量,同时还能不降低布料机的力学性能是研究的关键。基于此,笔者结合有限元分析软件 ANSYS 强大的有仿真分析性能,首先对混凝土布料机主梁展开有限元模态计算,再对混凝土布料机的结构参数进一步优化;把混凝土布料机的主梁质量、一阶固有频率以及应力作为优化目标进行多目标优化,并得出混凝土布料机结构参数的最优方案;笔者所得的研究成果可为后续混凝土布料机整机性能的进一步优化研究提供借鉴。

## 1 混凝土布料机结构有限元分析

### 1.1 混凝土布料机建模及模型简化

建立简单完整的三维模型是进行有限元

分析的重要前提,在混凝土布料机整体的建模过程中,由于大部分的部件复杂而且对有限元分析的结果影响不大,因此在对这些部件进行建模时要进行相应的简化,减少建模时间和运算浪费。笔者采用 Solidworks 对混凝土布料机进行实体建模,同时删除了一些不必要的部件,三维结构如图 1 所示。



1.布料机大车行走轨道;2.大车方钢;3.布料机底座;  
4.大车车轮;5.小车方钢;6.小车工字梁;7.大车主梁。  
图1 布料机三维结构

Fig. 1 Three-dimensional structure of distributor

1.2 利用 Hypermesh 进行单元剖分

对几何模型的工艺圆角等非承载特征进行简化处理,可以保证良好的单元质量和均匀的单元尺寸,并控制单元数量。采用 Hypermesh 高性能网格划分软件作为网格划分的工具。Hypermesh 前处理软件在计算机辅助工程领域中众所周知的是其杰出的网格单元划分性能,其提供了多种单元剖分和质量控制方法。通过自动和手动控制的方式,对布料机结构进行单元剖分,最终得到有限元模型的单元数量为 284 272 个,节点数量为 421 968 个。混凝土布料机的大车主梁与小车接触结构处的单元剖分后的细节如图 2 所示。

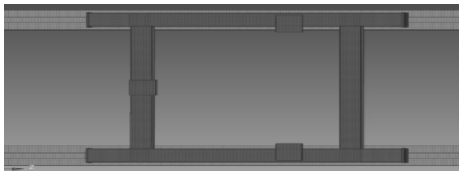


图2 单元剖分

Fig. 2 Model meshing

1.3 约束条件的施加

施加约束条件是对模型进行模态分析前的一个重要步骤,根据模型在真实工况下的结构受力对分析结构施加相同的约束状态,确保整个待分析模型约束状态的可靠性。由

于混凝土布料机在整个布料的运动过程中主梁的实际作用既是整机的支撑梁同时还是单独的运动梁,因此按照实际状态考虑,可以将主梁简化成为一个受到简支梁约束的状态,简支梁的受力情况如图 3 所示。

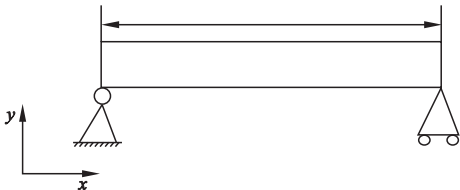


图3 受力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of force

1.4 布料机静态刚度和强度计算

选取极限工况状态,行走小车位于布料机主梁中间段时,将小车与主梁绑定。考虑小车的自重,料斗的满载(30kN)状态,等效为质量点,考虑主梁的自身质量。

混凝土布料机的应力云图以及受力变形图如图 4、图 5 所示。由图可知,布料机主梁下缘的最大位移为 2.4 mm,最大的等效应力为 55.6 MPa,位于小车和主梁接触的区域。主梁上的最大应力值小于许用应力 235 MPa,因此布料机主梁的强度储备比较好。

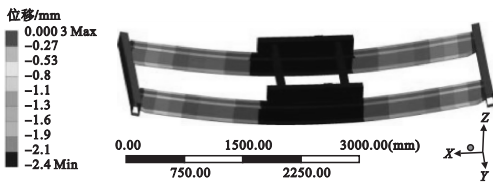


图4 竖向位移云图

Fig. 4 Static deformation contours

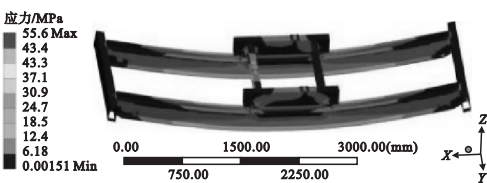


图5 等效应力云图

Fig. 5 Von-Mises stress contours

2 响应面优化

2.1 优化方法原理

ANSYS 软件拓扑优化、形状优化、尺寸

优化等多种优化方法及优化功能,可供用户进行多种选择。笔者采用响应面优化,包含了多种优化算法,例如 Screening 算法、MOGA 多目标遗传算法等。如 Screening 算法主要用作筛选运算,大多作为多目标优化的必要内容<sup>[12-15]</sup>;MOGA 为多目标遗传算法,主要还是用于多目标优化。ANSYS 提供的有限元优化分析系统可以实现分析—评估—修正的多次循环效果,当循环优化结果最终达到最初的优化设计目标时优化循环自动结束。最优化问题的技术路线如图 6 所示。

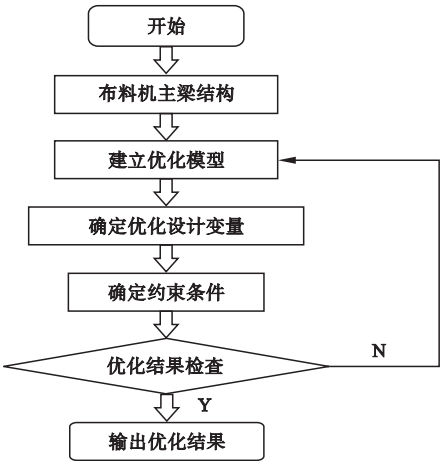


图 6 优化分析技术路线图

Fig. 6 Process optimization diagram

多目标优化问题的一般数学模型可以表示为

$$V - \min$$

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \cdots, f_n(x)]^T \quad (1)$$

其中,  $x \in X, X \subseteq R^m$ 。

Pareto 最优解:  $X \subseteq R^m$  是多目标优化模型的约束集,  $f(x) = R^m$  是多目标优化时的向量目标函数;若有解  $x_1, x_2 \in X$ , 并且  $k = 1, 2, \cdots$ , 都有  $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$ , 则称  $x_1$  比解  $x_2$  更加优越。若  $x_1$  比  $X$  中所有的其他不同解都更加优越, 那么则称  $x_1$  是多目标优化模型的最优解。当解  $x_1$  并不能使得所有的  $f_i(x)$  都能达到最优, 但是同时又不存在比  $x_1$  更加优越的解的时候, 那么则称  $x_1$  是多目标最优

化模型的 Pareto 最优解。

2.2 优化变量

在整个混凝土布料机结构中不仅仅主梁是工字钢梁, 而且还有不少部件也是工字钢, 占据了不小的比例, 同时工字梁还承担着重要的支撑作用以及连接作用。笔者将重点对混凝土布料机主梁的工字钢腹板厚度  $P4 \times 2$ , 工字钢底边宽度  $P5 \times 2$ , 工字钢翼缘宽度  $P6$  以及工字钢高  $P8$  尝试展开参数优化分析<sup>[16]</sup>, 主梁截面如图 7 所示。

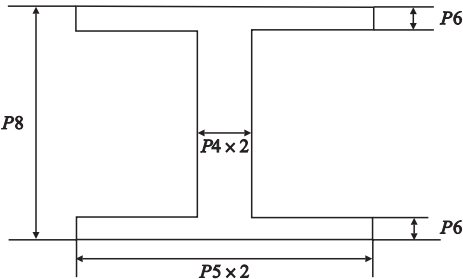


图 7 主梁截面参数

Fig. 7 The section parameters of main beam

在三维软件 Solidworks 中对已经确定的设计尺寸进行对应的标准参数化设置, 再通过连接模块, 达到与 ANSYS Workbench 耦合的效果。变量的取值范围如表 1 所示。

表 1 设计变量取值范围

Table 1 Designed variables ranges				
取值	P4/mm	P5/mm	P6/mm	P8/mm
初始值	3.7	87.5	11	250
最小值	2.8	70	9	200
最大值	4.2	105	13	300

2.3 响应面分析

有限元响应面优化在目前的 ANSYS 优化分析方法中是主体的优化类型, 重点对比分析输入变量和输出变量对应关系, 并通过数学中统计学的分析思路来优化计算, 能够较大幅度地减少复杂的优化流程。笔者通过有限元响应面优化对混凝土布料机主梁结构展开了响应面优化分析, 采用 OSFD 方法来作为试验设计点的生成方法, 这是因为由 OSFD 方法生成的试验设计点在空间中整体的分布相较于其他方法更加的均匀, 得到的结果会更加可靠。

在得到试验设计点之后,进一步建立此模型的参数响应面。ANSYS 为用户提供了多种不同的响应面,笔者根据优化的需求建立了 Full 2nd Order Polynomials 响应面,也被称作标准二阶响应面。这是由于标准二阶响应面在模型整体的生成的试验设计点越多的环境中,建立的响应面的精度会越高,同时对于不同的试验设计点,标准二阶响应面同样具备高度非线性。软件建立的响应面可以从维度上分为 2D 响应面,3D 响应面等。2D 响应面表示两两设计点之间的对应关系,3D 响应面则表示任意 2 个试验设计点与优化目标之间的关系。

由于应变不是主梁结构性能的主要研究对象,可不作为优化考虑目标,因此将应力  $P9$ ,质量  $P10$ ,一阶频率  $P11$  作为三个优化目标,设计变量与  $P9$ 、 $P10$ 、 $P11$  的敏感性分析见图 8。

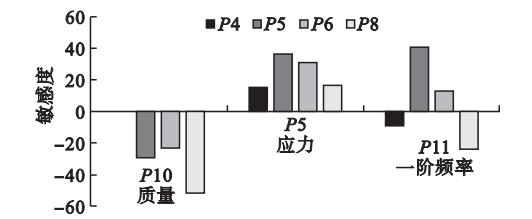


图 8 敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis

由图 8 可知,参数  $P5$ 、 $P8$  对结构应力的整体影响程度是较大的; $P5$ 、 $P6$  对主梁质量的影响程度较大; $P5$ 、 $P8$  对频率的影响程度较大。

在优化视图选择 2D 对应关系,即可得出为  $P5$ 、 $P8$  对应应力  $P9$ ;  $P5$ 、 $P6$  对应质量  $P10$ ;  $P5$ 、 $P8$  对应一阶频率  $P11$  的 2D 关系图 (见图 9 ~ 图 14)。

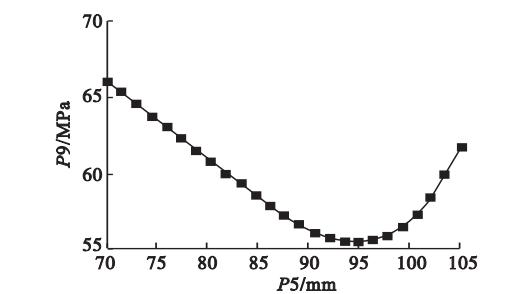


图 9  $P5$  与  $P9$  的关系图

Fig. 9 Relationship between  $P5$  and  $P9$

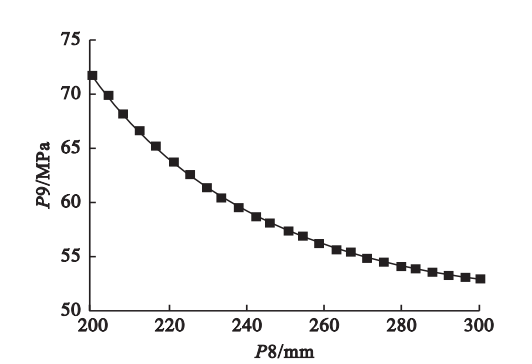


图 10  $P8$  与  $P9$  的关系图

Fig. 10 Relationship between  $P8$  and  $P9$

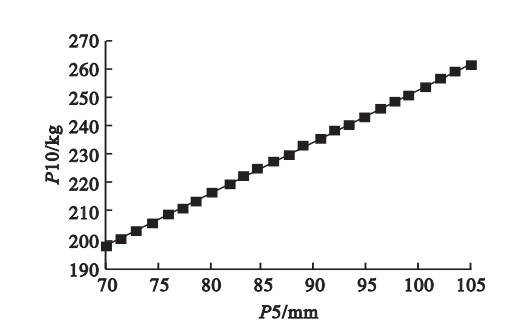


图 11  $P5$  与  $P10$  的关系图

Fig. 11 Relationship between  $P5$  and  $P10$

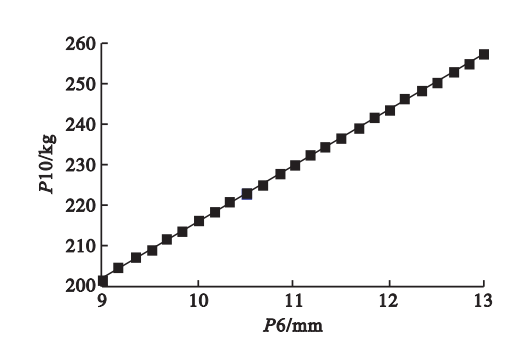


图 12  $P6$  与  $P10$  的关系图

Fig. 12 Relationship between  $P6$  and  $P10$

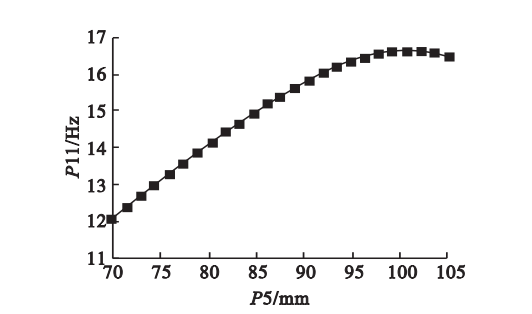


图 13  $P5$  与  $P11$  的关系图

Fig. 13 Relationship between  $P5$  and  $P11$



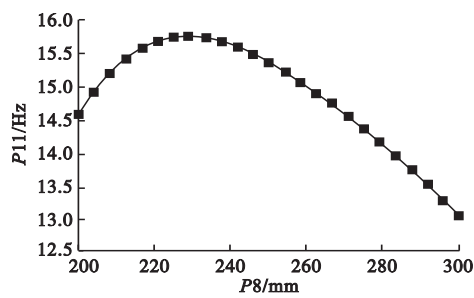


图 14 P8 与 P11 的关系图

Fig. 14 Relationship between P8 and P11

由图 9、图 10 可以得出,应力随着  $P5$  的逐渐增大呈现出先下降后上升的趋势。同时,应力随着  $P8$  逐渐增大呈现出逐渐下降的趋势。

由图 11、图 12 可以得出,主梁的质量与  $P5$  和  $P6$  之间呈现正比关系,但不能单纯地为了减少质量而过度减少设计变量的值,而是要在考虑到约束条件以及优化函数的基础上进行综合的权衡,最后选取最优解。

由图 13、图 14 可以得出,主梁频率的数值随着  $P5$  的逐步提高呈现出了先升高后减少的整体趋势。同样,主梁频率的数值随着  $P8$  的逐步提高呈现出了先上并且升后下降的整体趋势。

为了能直观地显示出两个设计变量相互作用下对输出变量之间的影响,还可以利用三维响应面的方式来显示(见图 15~图 17)。

同样,根据响应关系还可以得到优化设计设计变量和输出变量即优化目标之间的拟合优度如图 18 所示。

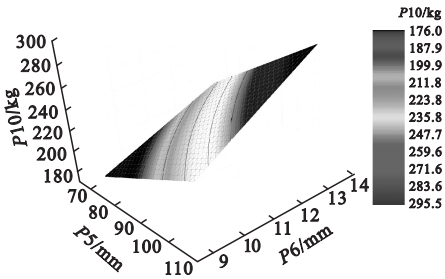


图 16 P5、P6 对应 P10 的关系图

Fig. 16 The relationship between P5、P6 and P10

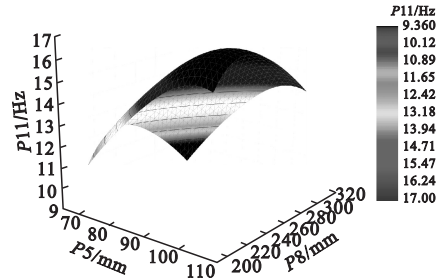


图 17 P5、P8 对应 P11 的关系图

Fig. 17 The relationship between P5、P8 and P11

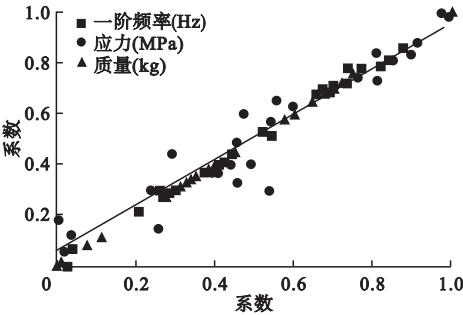


图 18 拟合优度

Fig. 18 The goodness of fit

拟合优度主要是表示将实验数据拟合成的回归直线相对于数据观测值的拟合匹配水平。图中代表拟合优度的统计量是整组数据的可决定系数,同样如果可决定系数的值越接近 1,那么表示该组实验设计点对于观测值的拟合程度越好;反之,如果可决定系数的值越接近 0,那么表示该组实验设计点对于观测值的拟合程度越差。通过图 18 可以得出,响应面中的试验设计点大体上都拟合在同一条斜线上,这就表明该组模型的实验设计点拟合优度良好,此模型与实际模型较为符合,可代表实际模型。

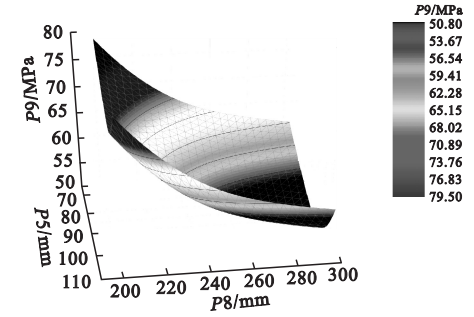


图 15 P5、P8 对应 P9 的关系图

Fig. 15 The relationship between P5、P8 and P9

2.4 优化分析

利用以上对响应面试验设计点的计算,再结合有限元模态分析,将混凝土布料机主梁的质量,一阶固有频率和最大应力设置为优化目标。根据优化要求将质量设置为求最小值,一阶频率设置为求最大值,应力设置为求最大值(见表2)。

通过利用 Screening 算法和 MOGA 多目标算法对混凝土布料机主梁质量,一阶固有

频率频率和最大应力进行多目标优化分析,通过多次循环优化计算,可以得出以下优化结果(见表3、表4)。

表2 优化目标设置

Table 2 Optimization target settings

优化目标	优化类型
P9	最大值
P10	最小值
P11	最大值

表3 Screening 算法优化结果

Table 3 The optimization result of Screening algorithm

候选点	P4/mm	P5/mm	P6/mm	P8/mm	优化目标 P9/MPa	优化目标 P10/kg	优化目标 P11/Hz
1	2.989 7	100.78	9.117 2	208.21	71.546	203.4	14.914
2	3.535 7	94.114	9.654 9	201.49	71.07	208.06	14.881
3	3.397 1	81.707	9.781 1	222.13	68.241	193.71	14.153

表4 MOGA 算法优化结果表

Table 4 The optimization result of MOGA algorithm

候选点	P4/mm	P5/mm	P6/mm	P8/mm	优化目标 P9/MPa	优化目标 P10/kg	优化目标 P11/Hz
1	3.447 8	104.63	9.266 7	204.61	76.016	217.97	15.097
2	3.157	90.956	9.236	201.38	72.912	191.13	14.006
3	3.269	84.472	9.211	220.54	68.401	187.92	14.037

由表3、表4可知,将 MOGA 多目标算法和 Screening 算法优化得出的候选点进行综合对比,综合考虑可以发现 Screening 算法得出的结果在混凝土布料机主梁质量,一阶固有频率频率和最大应力三个优化目标的最后优化效果上更为突出,例如混凝土布料机主梁质量减少的更多。由于在 Screening 算法循环优化后得到的三组不同候选点中里,候选点1对于的最终优化质量相对其他候选点最小同时一阶固有频率频率提升的也是最高的,因此将候选点1的值作为整个模型的最终优化值。

3 模态分析

连续弹性体有无穷多个自由度,它的固有频率也是无穷多的。但在通常情况下,只

研究低阶的固有频率或特定阶的固有频率,是由于固有频率越低,越容易被外界所激励,发生共振。另外结构受到特定的激励(如在某恒定转速下运行)时,就只考虑特定阶的固有频率。

以大车主梁和小车为整体进行预应力模态仿真。前6阶模态频率,具体的模态频率及振型如图19~图24所示。

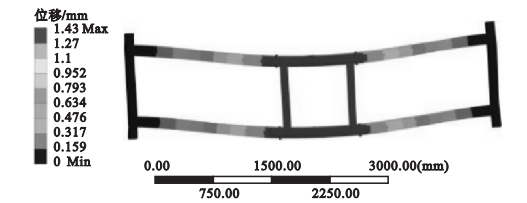


图19 一阶频率及振型

Fig. 19 The first order frequency and mode shape

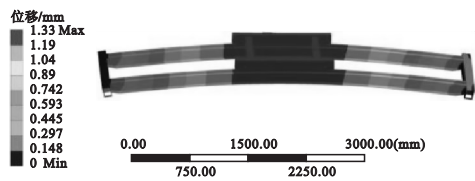


图 20 二阶频率及振型

Fig. 20 The second order frequency and mode shape

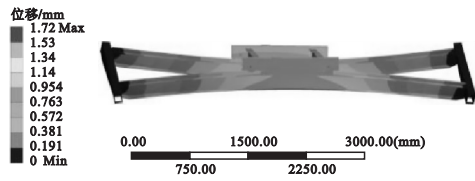


图 21 三阶频率及振型

Fig. 21 The third order frequency and mode shape

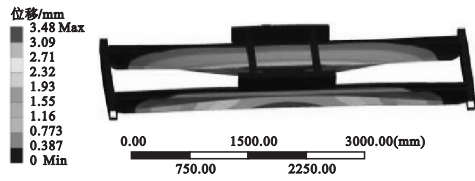


图 22 四阶频率及振型

Fig. 22 The fourth order frequency and mode shape

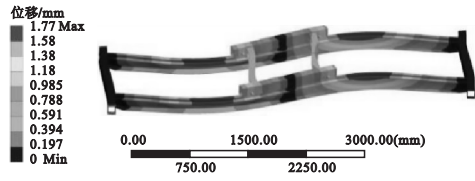


图 23 五阶频率及振型

Fig. 23 The fifth order frequency and mode shape

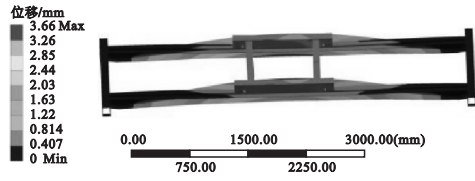


图 24 六阶频率及振型

Fig. 24 The sixth order frequency and mode shape

通过以上振型可以看出,混凝土布料机主梁的振型主要表现为水平振动、垂直振动、水平扭转。从振型上看最大的幅度发生在主梁的中间位置。所以,在对混凝土布料机主梁进行结构设计时应当相应的加强对应部位的刚度。

为了验证优化结果的可靠性,将优化前的一阶固有频率,质量与优化后的进行对比

分析(见表 5)。

表 5 优化前后对比

Table 5 Comparison results before and after optimization

项目	质量/kg	一阶频率/Hz	应力/MPa
优化前	229.94	14.370	55.8
优化后	203.40	14.914	71.5

注:质量优化比例为 11.5%,一阶频率优化比例为 3.7%。

根据实际尺寸取值进行取整(见表 6)。

表 6 参数取整

Table 6 Parameter rounding

参数	P4/mm	P5/mm	P6/mm	P8/mm
初始值	3.70	87.50	11.00	250.00
优化值	2.98	100.78	9.11	208.21
取整	3	100	9	210

根据优化结果对比可以看出,主梁质量有所减少,同时一阶固有频率提高了,且同时满足整体结构的可靠性。

## 4 结 论

(1)从敏感性关系表中可以看出,在优化参数中,宽度 P5 和高度 P8 对三个优化目标的影响相对最大;当优化目标为一阶频率时,宽度 P5 对其影响最大;随着高度 P8 的逐渐增大一阶频率呈现先上升后下降的趋势。

(2)通过对主梁进行多目标优化,选取两种优化算法进行对比分析,最终确定了布料机的优化改进方案;优化后的主梁实现了布料机在满足静态特性的条件下,减少质量、提高频率、减少了制造成本,也为混凝土布料机的结构研究提供了借鉴。

## 参考文献

[1] 邹德芳,周鹏,孙健,等.大型智能 PC 外墙板混合生产线工艺及成套设备[J].混凝土与水泥制品,2017(4):37-41.  
(ZOU Defang,ZHOU Peng,SUN Jian,et al. Large-scale intelligent PC exterior wall board mixing production line process and complete



- sets of equipment [J]. Concrete and cement products, 2017(4):37-41.)
- [2] 于梦阁,潘振宽,蒋荣超,等.基于近似模型的高速列车头型多目标优化设计[J].机械工程学报,2019,55(24):178-186.  
(YU Mengge, PAN Zhenkuan, JIANG Rongchao, et al. Multi-objective optimization design of the high-speed train head based on the approximate model [J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(24):178-186.)
- [3] 沈佳兴,徐平,于英华,等.BFPC 机床龙门框架组件优化设计及综合性能分析[J].机械工程学报,2019,55(9):127-135.  
(SHEN Jiaying, XU Ping, YU Yinghua, et al. Optimization design and comprehensive performance analysis of BFPC gantry machine framework components [J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(9):127-135.)
- [4] 王立权,李松羽,弓海霞,等.海上张力腿平台张力筋腱连接器构型设计与优化[J].机械工程学报,2019,55(18):196-205.  
(WANG Liquan, LI Songyu, GONG Haixia, et al. Configuration design and optimization of TLP tendon connectors [J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(18):196-205.)
- [5] 刘成颖,谭锋,王立平,等.面向机床整机动态性能的立柱结构优化设计研究[J].机械工程学报,2016,52(3):161-168.  
(LIU Chengying, TAN Feng, WANG Liping, et al. Research on optimization of column structure design for dynamic performance of machine tool [J]. Journal of mechanical engineering, 2016, 52(3):161-168.)
- [6] 刘世豪,叶文华,陈蔚芳,等.基于正交试验法和灰色关联的机床主轴箱优化设计[J].振动与冲击,2011,30(7):127-132.  
(LIU Shihao, YE Wenhua, CHEN Weifang, et al. Optimization design for headstock of machine tool based on orthogonal experimental method and grey relational analysis [J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(7):127-132.)
- [7] 刘延杰,吴明月,王刚,等.硅片传输机器人手臂结构优化设计方法[J].机械工程学报,2015,51(1):1-9.  
(LIU Yanjie, WU Mingyue, WANG Gang, et al. Method for structural optimization design of wafer handling robot arms [J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(1):1-9.)
- [8] 戴磊.基于 CAD/CAE 集成技术的开放式参数化结构形状优化设计平台[D].大连:大连理工大学,2008.  
(DAI Lei. An open platform of parameterized shape optimization based-on CAD/CAE integration technique [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.)
- [9] 李洁,蹇兴东,史庆春.机床立柱结构动态特性分析及优化设计[J].现代制造工程,2007(9):129-131.  
(LI Jie, JIAN Xingdong, SHI Qingchun. Structural dynamic behaviors analysis and optimization-design of a machine tool's vertical pole [J]. Modern manufacturing engineering, 2007(9):129-131.)
- [10] 蒋荣超,刘大维,王登峰.基于熵权 TOPSIS 方法的整车动力学性能多目标优化[J].机械工程学报,2018,54(2):150-158.  
(JIANG Rongchao, LIU Dawei, WANG Dengfeng. Multi-objective optimization of vehicle dynamics performance based on entropy weighted TOPSIS method [J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(2):150-158.)
- [11] 姜衡,管贻生,邱志成,等.基于响应面法的立式加工中心动静态多目标优化[J].机械工程学报,2011,47(11):125-133.  
(JIANG Heng, GUAN Yisheng, QIU Zhicheng, et al. Dynamic and static multi-objective optimization of a vertical machining center based on response surface method [J]. Journal of mechanical engineering, 2011, 47(11):125-133.)
- [12] ZHANG Xiaolong, WU Ti, SHAO Yan, et al. Structure optimization of wheel force transducer based on natural frequency and comprehensive sensitivity [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2017, 30(4):973-981.
- [13] 张珂,李志刚,于文达,等.混凝土布料机打散棒的能耗分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(6):1121-1127.  
(ZHANG Ke, LI Zhigang, YU Wenda, et al. Energy consumption analysis of the scattering-rod of concrete distributor [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(6):1121-1127.)
- [14] 宫文峰,黄美发,张美玲,等.基于灵敏度及层次分析法的键合头多目标结构优化[J].振动与冲击,2015,34(16):128-134.  
(GONG Wenfeng, HUANG Meifa, ZHANG Meiling, et al. Multi-objective optimization of bonding head based on sensitivity and analytic hierarchy process [J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 34(16):128-134.)
- [15] 焦洪宇,周奇才,吴青龙,等.桥式起重机箱型主梁周期性拓扑优化设计[J].机械工程学报,2014,50(23):134-139.  
(JIAO Hongyu, ZHOU Qicai, WU Qinglong, et al. Periodic topology optimization of the box-type girder of bridge crane [J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(23):134-139.)
- [16] OZBASARAN H. Optimal design of I-section beam-columns with stress, non-linear deflection and stability constraints [J]. Engineering structures, 2018, 171:385-394.  
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)