基于结构优化技术的皮带输送机辊筒性能改进

于宁波,黄中玉

(湖北三峡职业技术学院,湖北 宜昌 443000)

摘要:目的 为了改善食品包装生产线中的皮带输送机结构力学性能,提高皮带输送机的工作寿命,通 过结构优化技术对主动辊筒进行结构设计。方法 首先,对主动辊筒进行结构分析和力学分析;然后, 运用拓扑优化技术对辊筒辐板进行力学性能改进和轻量化设计;其次,基于 HyperMorph 对主动辊筒有 限元模型进行空间节点的预变形,并进行形状优化求解。结果 优化结果分析可得,主动辊筒的柔度从 1340.304 mm/N 降至 791.1324 mm/N,一阶固有频率从 849.344 Hz 增大到 980.046 Hz,结构质量从 1.235 t 减小到 0.806 t。结论 优化结果表明,基于结构优化技术的主动辊筒结构,不仅有效地提高了结构的静 刚度特性,一阶固有频率的提高说明加强了抑制振动的能力,还实现了结构的轻量化,节省了结构生产 制造成本。该方法对于现代工程领域中的结构优化设计具有重要的借鉴意义。 关键词:皮带运输机;主动辊筒;拓扑优化技术;形状优化;轻量化 中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2019)23-0156-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.23.023

Performance Improvement of Belt Conveyor Roller Based on Structural Optimization Technology

YU Ning-bo, HUANG Zhong-yu

(Hubei Three Gorges Polytechnic, Yichang 443000, China)

ABSTRACT: The work aims to design the structure of driving roller based on the structural optimization technology, so as to improve the structural mechanical performance and increase the working life of the belt conveyor in food packaging production line. Firstly, the structure of the driving roller was analyzed and its mechanics was analyzed. Then, the improvement of mechanical properties and lightweight design of the roller's wheel disk were carried out via topology optimization technology. Secondly, the pre-deformation of the spatial node about the finite element model of the driving roller was conducted based on the HyperMorph, and the shape optimization solution was obtained. The analysis on the optimization results showed that, the compliance of the driving roller reduced from 1340.304 mm/N to 791.1324 mm/N, the first-order natural frequency increased from 849.344 Hz to 980.046 Hz, and the structural mass decreased from 1.235 t to 0.806 t. The optimization results show that, not only does the driving roller structure based on the structural optimization technology effectively improve the static stiffness of the structure, and the enhancement of the first-order natural frequency indicates that the vibration suppression ability is increased, but also the lightweight structure is achieved, which saves the manufacturing cost of the structure. The proposed method provides significant reference for the structural optimization design in modern engineering field.

KEY WORDS: belt conveyor; driving roller; topology optimization technique; shape optimization; lightweight

随着工业技术的重大改革,工程应用领域的装备 结构和性能的要求也随之变高,皮带输送机因能运输 大量的物品,大大地减少了人力的投入,且具有空间 结构简单、运输距离较长、运输效率高和工作环境安 全等优点,已被广泛应用于各工程领域,如煤矿场、 机械制造厂和泥沙场等^[1-2]。

近年来,皮带输送机已被国内外相关企业所重视,相关学者也进行了大量的研究,并取得了一些成果。目前,国内也有相关学者对皮带输送机进行了研究,较好地填补了国内该方向研究的空白。如张彦超等^[3]对带式输送机进行了结构原理研究,并对整机进行了强度分析;胡月^[4]对塔式皮带机进行了结构有限 元分析和运动学与动力学的分析;彭博^[5]基于 Ansys 对移动伸缩式皮带输送机进行了整机结构的强度分析,虽引入了结构优化设计,但仅对机架进行了优化。 然而,对于皮带输送机的研究大多仅停留在对设备结构的力学分析,并采用传统设计经验对其进行改进, 该方法常会使设备设计流程变长,且设计过程中易产 生较多的报废零件等。

随着计算机技术的不断发展以及 CAE 技术的推 广和应用,使得寻找一种计算机辅助的现代设计方法 是亟待解决的问题[6]。然而,结构优化技术[7-9]是依 据确定的工况条件和设计要求,基于某种方法对结构 优化问题进行数值模型的构建,并通过相关优化算法 进行求解,使得结构材料分布最佳,且力学性能在局 部空间内达到最优。文中对某款用于食品包装的皮带 输送机中,连接驱动电机的主动辊筒进行研究,基于 辊筒力学分析,采用拓扑优化技术对辊筒辐板进行结 构轻量化设计 ,运用形状优化技术对主动辊筒结构进 行形状优化设计。此外,通过优化改进设计可得,结 构优化技术有效地改善了主动辊筒的结构力学性能, 且还实现了结构轻量化。 同时 , 结构优化设计在皮带 输送机设计初期的引入,大大地缩短了皮带输送机的 研发和设计周期,有效地节省了皮带输送机的生产和 制造成本,该方法对于实际工程结构改进设计具有重 要的参考价值。

1 辊筒力学分析

1.1 皮带输送机结构原理

研究的皮带输送机主要用于食品包装生产线,见 图 1。该生产线中具有2个皮带输送机,一个运输某 糕点,另一个运输包装盒,并通过皮带的转动,将糕 点转移进包装盒内。该生产线中的2个皮带输送机由 机架、主动辊筒(简称辊筒)被动辊筒、摩擦型皮 带和其他零部件等组成,两者传动部分相同,仅机架 尺寸规格不同。



图 1 皮带输送机几何模型 Fig.1 The geometric model of belt conveyor

1.2 辊筒的受力情况

对于辊筒在工作时的受力情况,设计师常以筒外 壁轴向均布载荷的理想化模式处理。然而,正常工作 状况下,食品常处于皮带输送机的皮带中部位置,因 此,辊筒在输送机工作过程中所受的载荷^[10]主要来自 于自重和食品的重量,辊筒受载状况为中间载荷偏大 的弧形受载,见图 2。



Fig.2 Distribution form of roller load

基于《材料力学》^[11—12]和对辊筒载荷的测试实 验等,运用载荷的一次正弦曲线,依据辊筒的最大径 向力,见图2,可推出不计摩擦力的辊筒表面载荷分 布函数:

$$P_{z1} = \frac{\pi F_z}{2BR} \sin \frac{\pi (0.5B - Z)}{B} \tag{1}$$

式中: *F*₂为最大径向压力 *N*; *B*为皮带总宽度 (mm); *R*为辊筒的有效半径 (mm)。

2 辊筒有限元前处理模型

设计的皮带输送机,采用 SolidWorks 辊筒结构的 CAD 几何模型,见图 3。可得,辊筒结构由 2 个相同的辊筒辐板与中间圆筒焊接而成,辊筒两端安装在机架上的轴承上。



Fig.3 Geometric model of roller structure



辊筒的材料为 Q235-A,相关力学性能参数:弹性模量为 205 GPa, 泊松比为 0.3,材料密度为 7.85× 10⁻³ g/mm³,受载情况见辊筒力学分析,屈服强度为 235 MPa。

对图 1 的辊筒结构,运用 HyperMesh 对其进行 模型几何修复和有限元网格离散处理,并进行模型的 材料属性赋值,可得到辊筒结构的有限元模型,见 图 4。



b 辊筒辐板

图 4 辊筒结构有限元模型

Fig.4 Finite element model of roller structure

3 辊筒辐板拓扑优化设计

为了改进辊筒结构性能,采用了结构优化技术, 使皮带输送机的辊筒结构不仅能提高静刚度特性并 具备一定的抑制外界振动干扰能力,实现辊筒结构的 轻量化,节省皮带输送机结构设计的材料使用率。

3.1 拓扑优化模型

依据固体各向同性材料惩罚模型(SIMP)^[13], 对辊筒辐板结构以辐板结构柔度最小化作为优化目标,以优化前后结构体积比和一阶固有频率最低阈值 为约束条件,构建辐板的优化数值模型:

$$\begin{cases} \min C = \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{K} \boldsymbol{U} = \sum_{e=1}^{N} (x_{e})^{p} u_{e} k_{0} u_{e} \\ s.t. \quad V = \mu V_{0} = \sum_{e=1}^{N} x_{e} v_{e} \\ F = \boldsymbol{K} \boldsymbol{U} \\ f \ge f_{0} \\ 0 < x_{\min} \le x_{e} \le x_{\max} \end{cases}$$
(2)

式中:C为结构柔度值;U为节点位移阵;K为 结构总刚度阵; x_e 为单元e的单元材料密度; u_e 为单 元e的节点位移阵;N为离散单元数;V为结构体积; μ 为体积分数; V_0 为结构原始体积; v_e 为单元e的体 积;F为外载荷;f为结构一阶固有频率; f_0 为一阶固 有频率阈值; x_{min} 为单元的最小密度; x_{max} 为单元的 最大密度。

依据修正的优化准则法,对式(2)进行修正, 得到关于设计变量优化迭代更新的 SIMP 优化 模型:

$$\begin{cases} \min \ C = \sum_{e=1}^{N} (x_e^{\text{new}})^p u_e k_0 u_e \\ s.t. \quad V = \mu V_0 = \sum_{e=1}^{N} x_e^{\text{new}} v_e \\ F = \mathbf{K} \mathbf{U} \\ f \ge f_0 \\ 0 < x_{\min} \le x_e^{\text{new}} \le x_{\max} \end{cases}$$
(3)

式(3)中, x_e^{new}为 Sigmund 教授对初始优化准则法^[14]的研究并进行修正所得,修正后的优化准则法 是优化模型关于设计变量的一种启发式调整法。

3.2 拓扑优化结果

依据式(3)中辊筒辐板的优化数值 SIMP 模型, 采用优化准则法进行求解,可得辐板最佳材料分布形

式,见图 5;优化前后的结构应力分布情况见图 6。 辊筒辐板结构优化前后的相关性能参数见表 1。 由表 1 可得,采用拓扑优化技术,辊筒辐板的柔 度值从 402.1765 mm/N 降到了 319.2678 mm/N,减少



Fig.5 Optimization result of roller wheel disk



图 6 辊筒辐板优化前后应力情况 Fig.6 Stresses of roller wheel disk before and after optimization

	表 1	辊筒辐板的力学性能
Tab.1	Mechanical	performance of roller wheel disk

状态	柔度/ (mm·N ⁻¹)	应力/ MPa	质量/ kg	一阶固有 频率/Hz
优化前	412.176	288.4	1.235	423.141
优化后	309.268	221.6	0.806	502.926

了 20.62%, 说明辐板的刚度有了较大的提高;一阶 固有频率从 423.141 Hz 增加到 502.926 Hz,提高了约 18.85%, 表明优化过程中辐板的动态特性有所提升。 最大应力从优化前的 288.4 MPa 下降到 221.6 MPa, 减少了 23.16%, 说明结构应力集中效应有较大的缓 解,可避免过早的结构疲劳。此外,结构质量的降低 表明,拓扑优化技术还实现了辐板结构的轻量化。

4 辊筒结构形状优化设计

拓扑优化技术在辊筒辐板结构设计中的应用,局 部性地改善了辊筒结构性能。为了能有效地改进辊筒 整体结构的力学性能,延长辊筒的使用寿命,采用了 结构形状优化技术^[15—16],通过有限元模型节点在空 间的自适应优化,实现结构几何形状的改变,促进结 构力学性能的改善。

4.1 HyperMorph 介绍

形状优化中, HyperMorph 常对已存在的有限元 模型节点进行空间位置调整和范围的制定,并将节点 空间位置作为优化问题的设计变量,优化算法可在优 化问题的约束条件下,对节点空间位置进行调整,直 到结构性能相对最佳的位置。

运用 HyperMorph 可对有限元模型的节点空间位 置进行移动等调整,见图 7。

对图 7 的节点位置改变,运用表达式表示:

$$\begin{cases}
p_{\text{init}} = \{p_{\text{init1}}, p_{\text{init2}} \cdots p_{\text{initN}}\} \\
\Delta p = \{\Delta p_1, p_2 \cdots p_N\} \\
\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2 \cdots \lambda_N\} \\
p = p_{\text{init}} + \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \Delta p_{\text{init}(i)}
\end{cases}$$
(4)





4.2 形状优化模型

依据文中辊筒的几何模型,运用 HyperMorph 有限元模型进行空间节点位置设定,见图 8。



图 8 中,箭头方向即为辊筒有限元模型的空间节 点位置移动方向,记 Width, Radius_1, Radius_2, mm

mm

Radius_3。其设计变量的范围见表 2,表 2 中的参数 为辊筒模型初始尺寸和空间节点移动的上下限。

表 2 辑筒的设计变量 Tab.2 Design variables of roller

设计变量	Width	Radius_1	Radius_2	Radius_3
初值	60	92	40	79
上限	5	3	3	8
下限	-5	-3	-3	-2

综上所示,以辊筒结构应力最小化为优化目标, 辊筒寿命为约束条件,构建辊筒的形状优化数值模型:

min : S	
find : $L \leq \Delta L$	
$p_i \leqslant \Delta p$	(5)
$\left f_{2}-f_{1}\right \leq \Delta f_{1}$	
$\left f_{3}-f_{2}\right \leq \Delta f_{2}$	

式中:*S* 为辊筒结构应力;*L* 为疲劳寿命; *p_i* 节 点 *i* 的空间移动位置,作为设计变量。

4.3 形状优化结果

依据式(5)中辊筒的优化模型,采用 OptiStruct 进行优化求解,经过4步优化迭代可得到辊筒的形状 优化结果,见图9。



Fig.9 Shape optimization result of roller

通过图 9 中的辊筒形状优化结果,可知其设计变 量终值均发生了一定的改变,见表 3。

由表 3 中的参数可得,采用形状优化技术的辊筒 改进设计,其设计变量 Width, Radius_1, Radius_2, Radius_3 分别从初始值 60,92,40,79 mm 变为 62, 95,41,73 mm。

通过形状优化设计,可得到辊筒的一阶固有频率 及相应的模型振型,见图 10;辊筒整体应力分布情 况见图 11;此外,相关性能参数见表 4。

根据优化结果, 辊筒的一阶固有频率从 849.344 Hz 增加到 980.046 Hz, 提高了约 15.39%, 此外, 对 应的模态振型从优化前的 9.292 降低至 6.090, 说明 其动态特性提高较大。辊筒的柔度从 1340.304 mm/N 降至 791.132 mm/N,减少了 40.97%, 说明辊筒的静 刚度特性改善明显,该现象对辊筒结构乃至皮带输送 机整机的性能提升具有重要的作用。此外, 辊筒的最

表 3 设计变量变化状况 Tab.3 Changes in design variables

Tuble Changes in design variables				mm
设计变量	Width	Radius_1	Radius_2	Radius_3
优化前	60	92	40	79
优化后	62.329	94.890	40.773	73
精准值	62	95	41	73



图 10 辊筒一阶固有频率及模态振型

Fig.10 First-order natural frequency and modal vibration mode of roller



Fig.11 Stress distribution of roller before and after optimization

表 4 辊筒的一阶固有频率值及模态振型 Tab.4 First-order natural frequency value and modal vibration mode of roller

状态	一阶固有 频率/Hz	柔度值/ (mm·N ⁻¹)	应力/ MPa	振型
优化前	849.344	1340.304	285.8	中间
优化后	980.046	791.132	246.8	弯曲

大应力从不符合材料力学性能条件的 285.8 MPa 减低 至 246.8 MPa,优化后的最大应力值处于材料的许用应 力值范围,符合辊筒结构的设计要求,且最大应力值的 下降能较大程度地改善结构过早的疲劳损坏现象。

5 结语

以皮带输送机中的主动辊筒为研究对象,引入了 拓扑优化和形状优化技术。通过优化前后的对比可 得,主动辊筒的静刚度特性具有明显的提升,一阶固 有频率显著增强,表明主动辊筒提升了抑制外界振动 的能力,此外,还实现了主动辊筒的结构轻量化。文 中通过拓扑优化和形状优化技术在工程结构中的联 合应用,为工程领域中结构优化设计提供了切实可行 的现代优化设计方法,也便于设计师提高研发准确 性,提高设计效率和降低研发成本。

参考文献:

 [1] 谢晓鹏.铜川某煤矿皮带输送机制动系统改造[D]. 西安:长安大学,2015.
 XIE Xiao-peng. The Design of Brake System for a Coal Mine Belt Conveyor in Tongchuan[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

- [2] HARRISON. Belt Conveyor Research 1998—2000[J].
 Bulk Solids Handing, 2001, 21(2): 159—164.
- [3] 张彦超,林福严,李文洋.带式输送机传动机架的结构强度分析[J].现代矿业,2016,561:203—207.
 ZHANG Yan-chao, LIN Fu-yan, LI Wen-yang. Structural Strength Analysis of the Transmission Rack of Belt ConvEyor[J]. Modern Mining, 2016, 561: 203—207.
- [4] 胡月. 塔带机结构及运动性能仿真分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 17—69.
 HU Yue. Tower-Belt Structural and Dynamic Characteristics Simulation Analysis[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 17—69.
 [5] 彭博. 基于 ANSYS 的移动伸缩式皮带输送机布料臂
- [5] 彭博.基于ANSYS的移动伸缩式皮带输送机布料臂 架关键技术研究[D].郑州:华北水利水电大学, 2016.

PENG Bo. Research on Key Design Technologies of the Placing Boom of Mobile Telescopic Belt Conveyor Based on ANSYS[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.

[6] 朱大昌,宋马军.平面整体式三自由度全柔顺并联

机构拓扑优化构型设计及振动频率分析[J]. 振动与 冲击, 2016, 35(3): 27—34.

ZHU Da-chang, SONG Ma-jun. Configuration Design with Topology Optimization and Vibration Frequency Analysis for 3-DOF Planar Integrated Fully Compliant Parallel Mechanism[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(3): 27—34.

- [7] SIGMUND O, MAUTE K. Topology Optimization Approaches: A Comparative Review[J]. Struct Multidisc Optim, 2013, 48: 1031–1055.
- [8] BENDSOE M P. Optimization of Structural Topology, Shape and Material[J]. Shape & Material, 1995.
- [9] 李传江, 尹松海, 毕梦然. 基于 OptiStruct 的开卷机 主轴疲劳特性优化设计[J]. 锻压技术, 2018, 43(1): 140—145.
 LI Chuan-jiang, YIN Song-hai, BI Meng-ran. Optimal

Design on Fatigue Property of Uncoiler Spindle Based on OptiStruct[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(1): 140—145.

- [10] 严欣.改向滚筒疲劳寿命的有限元分析及优化设计
 [D].武汉:武汉理工大学,2015.
 YAN Xin. Finite Element Analysis and Optimization
 Design Based on Turnabout Drum's Fatigue Life[D].
 Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [11] 李晓丽, 袁圆. 基于 Cosmos/Works 的带式输送机传 动滚筒的有限元分析[J]. 煤矿机械, 2010(9): 95—96.
 LI Xiao-li, YUAN Yuan. Finite Element Analysis of Driving Drum of Belt Conveyor Based on COSMOS/ Works[J]. Coal Mine Machinery, 2010(9): 95—96.
- [12] 张雪峰. 带式输送机滚筒的有限元分析及二次开发
 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010.
 ZHANG Xue-feng. Finite Element Analysis and Secondary Development of Pulley on Belt Conveyor[D].
 Fuxin: Liaoning Technical University, 2010.
- [13] 洪清泉,赵康,张攀,等. OptiStruct&Hyper Study 理论基础与工程应用[M].北京:机械工业出版社, 2012.
 HONG Qing-quan, ZHAO Kang, ZHANG Pan, et al. OptistruCt&HyperStudy Theoretical Basis and Engineering Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [14] SIGMUND O. A 99 Line Topology Optimization Code Written in Matlab[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4573(21): 120–127.
- [15] 宋卫生,卢芳芳. 正交试验法优化矿泉水瓶瓶体凹 槽结构的形状[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 137—141.
 SONG Wei-sheng, LU Fang-fang. Optimization of the Shape of the Groove Structure on the Mineral Water Bottle with Orthogonal Test Method[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 137—141.
- [16] 李晓敏.基于 OptiStruct 形状优化的空调散热器稳态 传导及基频研究[J].真空科学与技术学报,2017, 37(9):845—850.

LI Xiao-min. Simulation of Heat Radiation and Fundamental Frequency of Rib-Type Radiators in Air-Conditioner[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(9): 845–850.