

基于轻量化设计的编码器安装座动刚度研究

韩键美

(永城职业学院, 永城 476600)

摘要: **目的** 为了提高编码器的检测精度, 对编码器安装座的频率拓扑优化进行研究, 以实现结构轻量化, 并提高其动刚度特性。**方法** 依据编码器安装座的实际工况, 利用 HyperMesh 对编码器安装座进行有限元前处理。以编码器安装座受载节点的频响位移最小化为优化问题的目标函数, 以优化前后结构的体积比为约束条件来构建编码器安装座的频响优化模型, 并使用 OptiStruct 进行求解, 同时, 采用 OSSmooth 高效地对优化结果进行 CAD 模型的提取和再分析。**结果** 由优化前后结果对比可得, 编码器安装座的动刚度值在 x 方向忽略不计, y 方向由 2564.25 增大到 5932.11, z 方向由 62 500.36 增大到 109 792.54; 一阶固有频率由 3860.664 Hz 显著增大到 8380.32 Hz。**结论** 该方法不仅改善了编码器安装座在工作过程中的动态特性, 还降低了编码器安装座的制造材料, 实现了结构轻量化的目的。

关键词: 编码器安装座; 动态特性; 频率拓扑优化; 轻量化设计

中图分类号: TB486.3; TH11 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)23-0170-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.029

Dynamic Stiffness of Encoder Mounting Bracket Based on Lightweight Design

HAN Jian-mei

(Yongcheng Vocational College, Yongcheng 476600, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the encoder detection accuracy, study the frequency topology optimization of encoder mounting bracket to achieve lightweight structure and improve its dynamic stiffness characteristic. According to the actual working condition of the encoder mounting bracket, the finite element pre-processing was conducted on the encoder mounting bracket based on HyperMesh. With the loading node frequency response displacement of encoder mounting bracket minimized as the objective function of optimization, and the structural volume ratio before and after optimization as the constraint condition, the frequency response optimization model of the encoder mounting bracket was constructed and solved based on OptiStruct. Meanwhile, the OSSmooth was adopted to extract and reanalyze the CAD model of optimized results. The comparison of results before and after the optimization showed that, the dynamic stiffness of the encoder mounting bracket could be ignored in x direction and the value increased from 2564.25 to 5932.11, and from 62 500.36 to 109 792.54 respectively in y and z directions. The first order natural frequency was significantly increased from 3860.664 Hz to 8380.32 Hz. The proposed method not only improves the dynamic property of encoder mounting bracket in the working process, but also reduces its manufacturing material, thus achieving the lightweight structure.

KEY WORDS: encoder mounting bracket; dynamic properties; frequency topology optimization; lightweight design

罐头包装盒定长输送机工作过程中, 编码器安装座常出现严重的抖动现象, 影响其定长测量精度。文中以编码器安装座为研究对象, 主要对其动刚度特性进行分析, 基于拓扑优化技术对编码器安装座的结构进行改进设计, 改善编码器安装座的动态性能, 提高

其测量精度。

编码器是一种对角位置检测的器件, 具有高精度和抗扰能力强等优点, 已广泛应用于控制工程领域^[1-3]。如运用编码器可直接测量角位置信息, 并对其角速率辨识; 工程中常用编码器对一些产品进

收稿日期: 2018-04-23

作者简介: 韩键美 (1982—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为机械设计与制造。

行长度测量等。

编码器测量精度的高低,不仅受其控制系统精度的影响,编码器安装座结构的合理性也对其测量精度产生一定的影响。近年来,为了提升编码器的测量性能,学者们除了改进编码器的控制结构,还将编码器安装座的结构改进作为研究热点之一,并取得了一定的成果。如阎宏伟^[4]对编码器安装座,采用了反复配装的方式,提高了激光测角机构的自动化性能。高利强^[5]等对数控机床主轴的编码器安装结构进行了优化设计和改进,节省材料成本,提高结构的稳定性和可靠性,确保编码器的精度;卡尔曼滤波器的使用,可提高编码器码盘的工作性能,按照时间和测量更新的循环计算实现系统状态的最优估计^[6-7]。然而,基于现代优化技术对编码器安装座的结构改进等研究起步较晚且成果也偏少。随着制造业的发展,工程师对结构件设计要求的提高,如何设计出性能良好且又节省成本的结构件已成为亟待解决的问题。

文中依据动力学和拓扑优化理论^[8-11],对罐头包装盒定长输送机的编码器安装座进行了结构轻量化设计,同时,改善其结构的动刚度特性,提升抑制振动的能力。首先,对编码器安装座的工况进行分析,并运用 HyperMesh 进行有限元前处理;然后,定义编码器安装座在受载位置的位移为目标函数,优化前后体积分数比为约束条件构建其频率响应优化模型,并运用 OptiStruct 进行优化求解,最后,通过 OSSmooth 提取优化结果并构造其 CAD 模型,运用 OptiStruct 对优化后处理的构型进行动刚度特性分析。

1 编码器安装座有限元前处理及工况分析

文中以罐头包装盒定长输送机的编码器安装座为研究对象,见图 1。为了使其在真实工况条件下具有一定的刚度和抗振动性能,引入结构拓扑优化技术,对编码器安装座结构进行改进设计,提升各项性能参数^[12-13]。该编码器安装座的 CAD 模型见图 2。

编码器安装座的材料属性和几何设计参数见表 1。

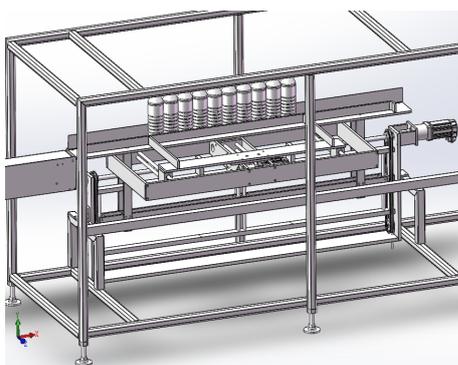


图 1 罐头包装盒定长输送

Fig.1 Fixed length transport of can packaging box

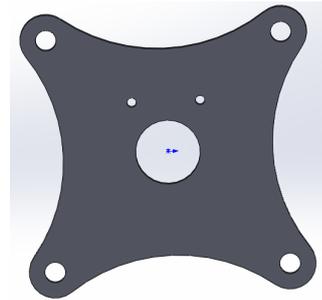


图 2 编码器安装座 CAD 模型

Fig.2 CAD model of encoder mounting bracket

表 1 材料属性

Tab.1 Material property

属性	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
数值	Q235-A	210	0.3	7.9

图 2 中 4 个角孔为编码器的安装孔,常与机架间接;中间 2 个小圆孔与编码器通过螺钉连接;半圆形凸台是对编码器起到一定的支撑,均为非设计区域。约束部位主要受到扭矩,为编码器自重所产生。

所选取欧姆龙编码器的结构尺寸见图 3,编码器质量约 0.5 kg,设编码器质量集中于机体的中心,即 $G=5\text{ N}$ 。依据力学知识可得,编码器头部与编码器座安装处受到扭矩 $M\approx 100\text{ N}\cdot\text{mm}$ 和向下的集中载荷 $F=G$ 。

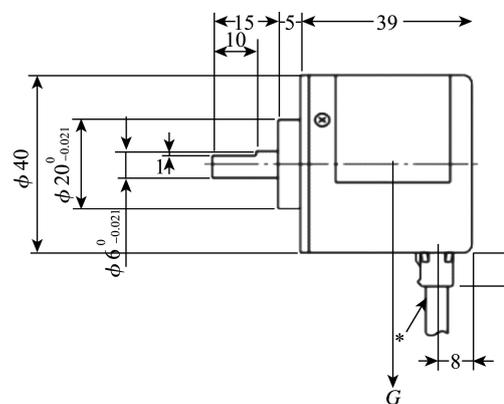


图 3 编码器结构几何尺寸

Fig.3 Geometric dimension of encoder structure

基于 HyperMesh 对编码器安装座的 CAD 模型进行几何修复,以尺寸为 2.5 mm 的单元对其进行网格离散化,得到模型的六面体网格数目为 39 352 个,单元网格节点为 45 887 个,见图 4。

2 动刚度特性

实际工程结构中,常对结构在静载荷作用下所得的静刚度值来衡量结构性能优劣。然而,结构除了所受的静载荷外,还常受外界激励对结构动态特性的干

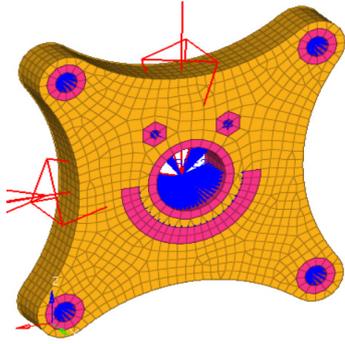


图4 编码器安装座有限元模型

Fig.4 Finite element model of encoder mounting bracket

扰。动态特性是动态载荷作用下，结构产生的相对位移量，常用动刚度值衡量。由动力学理论可得单自由度系统额振动方程为：

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F(t) \tag{1}$$

式中： $[M]$ 为结构质量矩阵； $[C]$ 为结构阻尼矩阵； $[K]$ 结构刚度矩阵； $F(t)$ 为随着时间变化的外载荷， $F(t) = F_0 \cos(\omega t)$ ； x 为结构节点的位移矩阵，依据相关文献可知：

$$x = - \frac{F_0 / [K]}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{[C]\omega}{[K]}\right)^2}} \tag{2}$$

式中： ω 为结构的激励频率； ω_n 结构固有频率，其值为 $\omega_n = \sqrt{[K]/[M]}$ 。

3 编码器安装座频率响应分析

依据第1节分析的工况条件，结合编码器安装座的有限元模型，运用OptiStruct对编码器安装座进行了频率响应分析其动刚度特性，见图5。

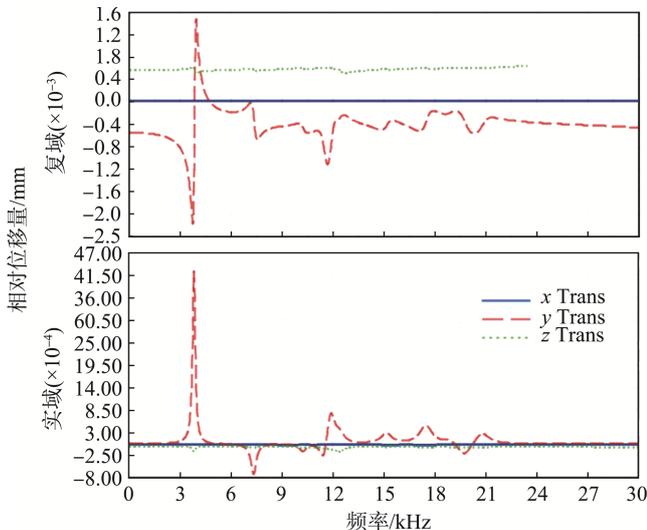


图5 基于 OptiStruct 的编码器安装座动态特性曲线

Fig.5 Dynamic characteristic curve of encoder mounting bracket based on OptiStruct

由图5可知，频率带3018~6016 Hz为编码器安装座受外界激励产生最大相对位移量。编码器安装座在一阶固有频率处的 x, y, z 方向动刚度值，见表2。

表2 编码器安装座动态特性参数
Tab.2 Dynamic characteristic parameter of encoder mounting bracket

动态特性	动刚度			质量 /kg	一阶固有频率/Hz
	x	y	z		
数值	忽略不计	2564	62 500	0.51	3860.664

4 编码器安装座频响拓扑优化

4.1 SIMP 材料插值模型

固体各向同性材料插值模型^[14]是将结构离散单元作为一种人工材料密度，结合惩罚因子与材料的弹性模量构建为：

$$E_e = \rho_e^p \cdot E_0 \tag{3}$$

式中： E_e 为单元 e 的弹性模量； ρ_e^p 为单元 e 的相对密度； E_0 为初始材料的弹性模量； p 为密度惩罚因子，中间密度材料的惩罚因子 p 的取值范围为：

$$p \geq \max\left\{\frac{2}{1-\mu}, \frac{4}{1+\mu}\right\} \tag{4}$$

式中： μ 为材料的泊松比，通常取值为0.3；常取 $p=3$ 。从式(3)可得，单元的人工材料密度与其弹性模量间是一种显性非线性关系。为了对优化结果的中间密度值进行“惩罚”，引入惩罚因子 p 能有效地进行(0 1)二值化处理，改善优化结果的边界清晰度，提高优化设计的准确度。

为使所设计的编码器安装座具有足够的动刚度特性，文中基于SIMP模型，以编码器安装座受载点的位移最小化，以优化前后体积比作为约束条件，构建编码器安装座结构的SIMP优化模型：

$$\begin{cases} \min d_f \\ \text{条件 } V = fV_0 = \sum_{e=1}^N \rho_e V_e \\ F = KU \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho_e \leq \rho_{\max} \end{cases} \tag{5}$$

式中： d_f 为编码器安装座受载点的位移； V 为编码器安装座优化后的体积； f 为编码器安装座优化前后的体积比； V_0 为轴承座的初始体积； ρ_e 为第 e 个单元的密度， $e=1,2,\dots,N$ 为单元数量； F 为轴承座受载点所作用的激励载荷； K 为结构的整体刚度矩阵； U 为结构的整体位移矩阵； ρ_{\min} 为单元最小密度，常取 $\rho_{\min}=0.001$ ，为了避免整体刚度矩阵发生奇异。

4.2 优化结果

依据式(5)的优化模型，采用OptiStruct中的

优化准则法^[15]对编码器安装座进行优化求解。经过 15 次优化迭代，得到编码器安装座优化后的结构，见图 6。编码器安装座的动刚度特性曲线，见图 7。

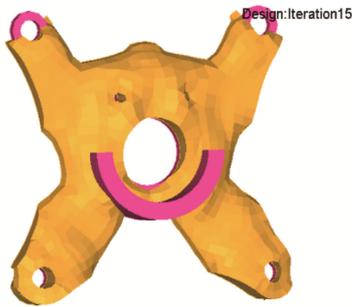


图 6 基于 OptiStruct 的编码器安装座优化结果
Fig.6 Optimization result of encoder mounting bracket based on OptiStruct

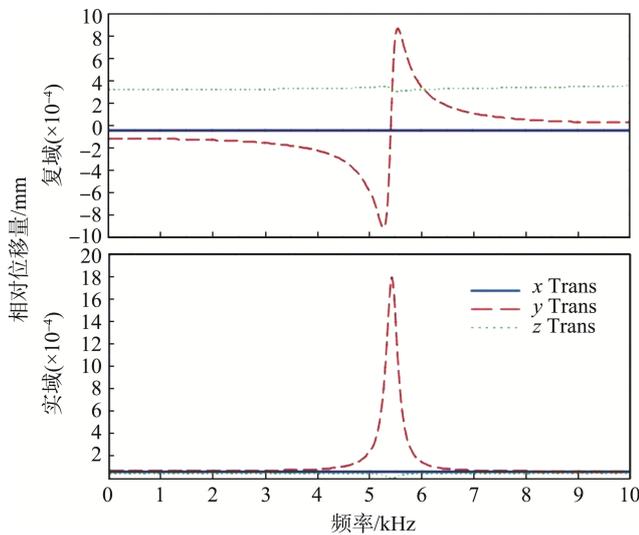


图 7 基于 OptiStruct 优化后编码器安装座动态特性
Fig.7 Dynamic characteristic curve of encoder mounting bracket after optimization based on OptiStruct

从图 7 中可知，基于频响拓扑优化技术对编码器安装座的轻量化设计，优化后编码器安装座产生最大相对位移量的激励范围提升至 5010~6008 Hz 频率带。优化后编码器安装座在一阶固有频率处的 x, y, z 方向动刚度值，见表 3。

表 3 编码器安装座优化前后动态特性

Tab.3 Dynamic characteristic of encoder mounting bracket before and after optimization

动态特性	动刚度			质量 /kg	一阶固有频率/Hz
	x	y	z		
优化前	忽略	2564.25	62 500.36	0.51	3860.664
优化后	不计	4854.37	136 798.91	0.18	5420.074

通过编码器安装座优化前后的相关性能参数对比：优化后的一阶固有频率从 3860.664 Hz 大大地提高到 5420.074 Hz；外界激励接近结构一阶固有频率时， y 方向动刚度从 2564 上升到 4761， z 方向动刚度

从 62 500 上升到 136 799；此外，编码器安装座的质量从 0.51 kg 下降至 0.18 kg。基于频率响应拓扑优化技术的编码器安装座，实现了结构的轻量化设计，其受载点方向的动态刚度特性得到大幅度提高。

5 优化结构仿真分析

5.1 基于 OSSmooth 的 CAD 模型

OSSmooth 可对结构拓扑或形貌优化结果提取 CAD 模型。OSSmooth 是一个半自动化工具，能将 CAE 模型转成 CAD 模型并在 CAD 软件对优化结果进行结构修改和重设计等。设定单元密度阈值为 0.3，见图 8，运用 OSSmooth 对编码器安装座优化结果提取 CAD 模型，采用 SolidWorks 对模型进行修复或重设计，得到新的编码器安装座 CAD 模型，见图 9。

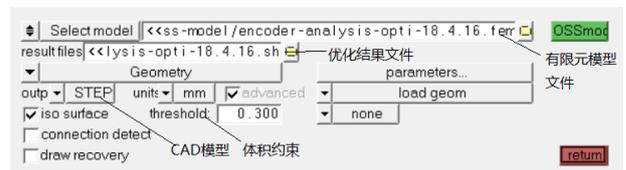


图 8 OSSmooth 界面
Fig.8 OSSmooth interface

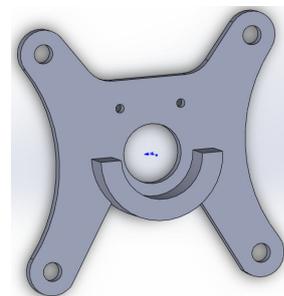


图 9 基于 OSSmooth 的 CAD 模型
Fig.9 CAD model based on OSSmooth

5.2 优化结构频响分析

基于 HyperMesh 对图 9 中的编码器安装座 CAD 模型进行有限元前处理，见图 10。

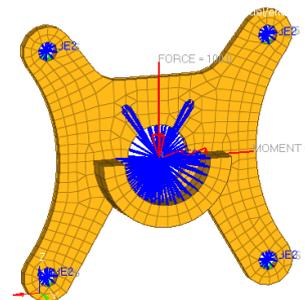


图 10 有限元模型
Fig.10 Finite element model

对图 10 的有限元模型定义相同的材料属性, 见表 1。对其施加相同的边界条件和工况条件, 并运用 OptiStruct 进行频率响应分析, 计算结果见图 11。光滑处理后结构的动态特性参数见表 4。

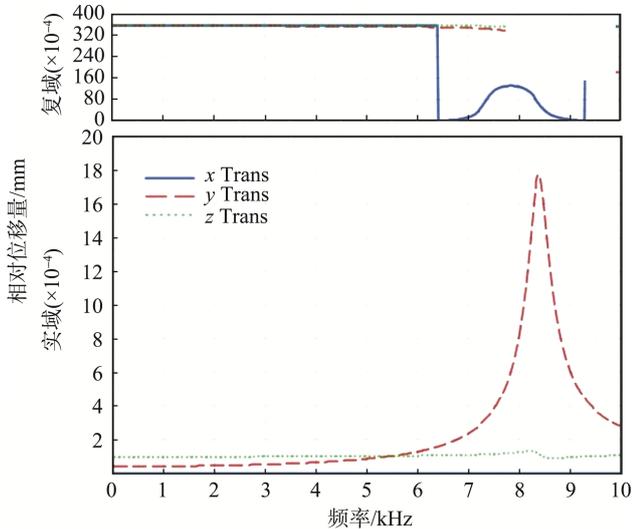


图 11 基于 OptiStruct 编码器安装座动态特性曲线
Fig.11 Dynamic characteristic curve of encoder mounting bracket based on OptiStruct

表 4 优化处理后力学性能参数对比

Tab.4 Contrast of mechanical property parameter after optimization

方向	动刚度			一阶固有频率/Hz
	x	y	z	
优化前	忽略	2564.25	62 500.36	3860.664
优化后	不计	4854.37	136 798.91	5420.074
光滑后		5932.11	109 792.54	8380.32

从图 10 和表 4 中可得, 较优化前编码器安装座的动态特性, 优化处理结构的一阶固有频率提高到 8380 Hz, y 和 z 方向动刚度分别上升到 5932.11 和 79 792.54。基于频率响应拓扑优化技术对编码器安装动态性能的提升具有明显的效果, 且 OSSmooth 的引入便于对优化结果的 CAD 模型提取、修改和再分析。该方法大大地提高了工作效率, 缩短了结构的研发周期。

6 结语

以罐头包装盒定长输送机中的编码器安装座为研究对象, 基于频率响应拓扑优化技术并结合动力学原理对结构进行分析和改进设计。首先, 运用 HyperMesh 对编码器安装座进行网格划分和工况条件设定; 其次, 基于 SIMP 材料插值模型对编码器安装座构建以受载点的激励位移最小化为优化目标, 以

体积比为约束条件的优化模型, 并运用 OptiStruct 进行优化求解; 最后, 利用 OSSmooth 提取优化结果的 CAD 模型并运用 OptiStruct 进行频率响应分析。

编码器安装座优化前后的频响分析可得: 一阶固有频率从 3860.664 Hz 提高到 5420.074 Hz, 且其对应的 y 方向动刚度从 2564.25 上升到 4854.37, z 方向动刚度从 62 500.36 上升到 136 798.91, 大大地改善了编码器安装座的动态特性, 符合第 1 节中编码器安装座受绕 x 轴转矩 M 和沿 z 轴重力 F 的力学分析。此外, 优化前后的编码器安装座质量从 0.51 kg 下降至 0.18 kg, 实现了编码器安装座的结构轻量化设计。基于 OSSmooth 提取优化结果的 CAD 模型, 并对其进行修正后的再次频响分析可得, 编码器安装座的一阶固有频率提高到 8380 Hz, y 和 z 方向动刚度分别上升到 5932.11 和 79 792.54。该方法大大地提高了工作效率, 缩短了结构的研发周期, 对考虑振动条件下的结构刚度改进等具有重要的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 董莉莉, 熊经武, 万秋华. 光电轴角编码器的发展动态[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 198—202.
DONG Li-li, XIONG Jing-wu, WAN Qiu-hua. Development of Photoelectric Rotary Encoders[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(2): 198—202.
- [2] 方道, 余成发, 郑美琴, 等. 高精度编码器在凹印生产线连线分切精度改进中的应用[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 80—83.
FANG Qiu, YU Cheng-fa, ZHENG Mei-qin, et al. Application of High-precision Encoder in Improvement of On-line Slitting Accuracy of Cerutti Rotogravure Production Line[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 80—83.
- [3] 陈超, 唐善华. 基于 LabVIEW 压力试验机测试系统的设计与实现[J]. 包装工程, 2008, 29(8): 91—93.
CHEN Chao, TANG Shan-hua. Design and Implementation of Test System of Pressure Tester Based on LabVIEW[J]. Packing Engineering, 2008, 29(8): 91—93.
- [4] 阎宏伟, 任一峰, 鲜浩, 等. 手持激光观测仪编码器安装系统设计[J]. 华北工学院学报, 2003, 24(1): 34—37.
YAN Hong-wei, REN Yi-feng, XIAN Hao, et al. Design of the Encoder Assembling System Used in the Hand-hold Lidar Instrument[J]. Journal of North China Institute of Technology, 2003, 24(1): 34—37.
- [5] 高利强, 牟群力. 数控机床主轴编码器安装结构优化设计及改进[J]. 制造业自动化, 2017, 39(6): 89—90.
GAO Li-qiang, MU Qun-li. Perfect Design and Improvement for The Installation of The Main Spindle's Encoder on CNC Lathe[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(6): 89—90.

- [6] OVASKA S J. Improving The Velocity Sensing Resolution of Pulse Encoders by FIR Prediction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1991, 40(3): 657—658.
- [7] YANG Y G, REES N, CHUTER T. Reduction of Encoder Measurement Errors in UKIRT Telescope Control System Using a Kalman Filter[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(1): 149—157.
- [8] 王西珍, 李言, 成刚虎. 模切机主切机构刚柔耦合动力学特性研究[J]. 包装工程, 2010, 31(21): 68—73.
WANG Xi-zhen, LI Yan, CHENG Gang-hu. Research of Dynamic Property of Die Cut Machine Main Mechanism with Rigid-flexible Coupling[J]. Packing Engineering, 2010, 31(21): 68—73.
- [9] 姚艳春, 杜岳峰, 朱忠祥, 等. 基于模态的玉米收获机车架振动特性分析与优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 46—53.
YAO Yan-chun, DU Yue-feng, ZHU Zhong-xiang, et al. Vibration Characteristics Analysis and Optimization of Corn Combine Harvester Frame Using Modal Analysis Method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19): 46—53.
- [10] LIU Z, KORVINK J G, HUANG R. Structure Topology Optimization: Fully Coupled Level Set Method via FEMLAB[J]. Structural Multidisciplinary Optimization, 2005, 29(6): 407—417.
- [11] 朱大昌, 宋马军. 基于多目标拓扑优化的全柔顺并联机构构型固有振动频率研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13): 1794—1800.
ZHU Da-chang, SONG Ma-jun. Research on Natural Vibration Frequency of Fully Compliant Parallel Mechanism Configuration based on Multi-objective Topology Optimization[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(13): 1794—1800.
- [12] 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—33.
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—33.
- [13] 戚社苗, 耿海鹏, 虞烈. 动压气体轴承的动态刚度和动态阻尼系数[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 91—98.
QI She-miao, GENG Hai-peng, YU Lie. Dynamic Stiffness and Dynamic Damping Coefficients of Aerodynamic Bearings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 91—98.
- [14] LIN J G, LUO Z, TONG L Y. A New Multi-objective Programming Scheme for Topology Optimization of Compliant Mechanism[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 40(1—6): 241—255.
- [15] 宋马军. 基于静/动多目标拓扑优化理论的弹性微变形并联机构构型综合与设计[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
SONG Ma-jun. Configuration Synthesis and Design of Elastic Micro Deformation Parallel Mechanism Based on Statics/Dynamics Multi-objective Topology Optimization Theory[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.