

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.043

自动化米饭生产线的桁架机器人滑台优化设计

朱淳清^{1a,1b}, 张洪^{1a,1b}, 徐峻²

(1. 江南大学 a. 机械工程学院; b. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

2. 南京乐鹰科技股份有限公司, 江苏 南京 211151)

摘 要:桁架机器人用于自动化米饭生产线的搬运工序中, 为了提高其驱动系统工作效率并确保桁架机器人的滑台有较高的动态特性, 采用添加减质量区和优化结构关键参数这两种方式, 对滑台进行多目标优化设计。将导轨半间距、滑块间距、减质量区长度、导轨规格、滑台长度作为待优化变量, 通过正交试验结合极差分析、方差分析以及有限元分析的方式探讨以上变量对优化目标影响的显著性; 基于 Box-Behnken Design 响应面分析对滑台进行优化设计。仿真结果表明: 优化后滑台的动态特性效率上升了 14.02%, 滑台整体质量下降了 14.32%; 优化后 1 阶固有频率的变化可以忽略, 二者都处于较高水平。

关键词:滑台; 有限元仿真; 响应面优化; 正交试验; 轻量化设计

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)06-0232-07

Optimization Design of Slide Table of Truss Robot in Automated Rice Production Line

ZHU Chunqing^{1a,1b}, ZHANG Hong^{1a,1b}, XU Jun²

(1. a. School of Mechanical Engineering; b. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment &

Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Nanjing Leying Technology Co., Ltd., Nanjing 211151, China)

Abstract: Truss robots are commonly employed in the handling processes of automated rice production lines. To improve the efficiency of the motor drive system and ensure high dynamic characteristics of the main carriage of the truss robot, two methods, namely adding a lightening zone and optimizing key structural parameters, were adopted for the multi-objective optimization design of the carriage. Half of the distance between guide rails, spacing between sliders, length of the weight reduction zone, guide rail specifications and slide table length were taken as the variables for optimization to explore their significance in influencing the optimization objective with orthogonal experiments and through range analysis, variance analysis and finite element analysis. The slide table was optimized using the Box-Behnken Design response surface analysis method. The simulation results indicate that the optimized dynamic characteristics efficiency of the slide table increased by 14.02%, the overall mass of the slide table decreased by 14.32%, and the change in the first-order natural frequency after optimization could be neglected, as both were at a relatively high level.

Keywords: slide table; finite element simulation; response surface optimization; orthogonal experiment; lightweight design

0 引言

自动化米饭生产线在中央厨房中使用频繁, 为提高人们就餐的效率和质量做出了一定的贡献^[1]。桁架机器人则常用于自动化米饭生产线的锅具搬运动作中。为了适应桁架机器人的速度和定位精度^[2], 需要保证其移动机构的高动态特性, 同时又需要对移动机构进行轻量化设计从而降低电机驱动系统的能耗。但是减质量后的移动机构会因为质量减少而出现动态特性下降的问题。因此在确保结构的动态特性处于较高水平下, 进行

轻量化设计是人们追求的目标^[3]。何睿^[4]以质量最小为目标, 利用 Isight 软件集成的优化程序, 对货车载车架的结构参数进行了优化设计, 优化后车架总质量降低了 9.3%, 车架动态性能则能高于最低要求。信桂锁等^[5]以机床床身质量最小为优化目标, 以第 1 阶固有频率为约束条件, 采用最小二乘法建立的二次多项式响应面近似模型对机床结构参数进行了优化设计。优化后的床身质量减少了 11.2%, 其余特性均能超过设计最低要求。

上述研究中学者利用多种优化方式对车架等结构进行了轻量化的优化设计, 但是在优化过程

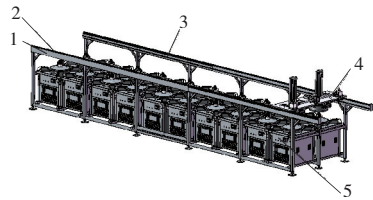
第一作者简介:朱淳清(1998—), 男, 江苏常州人, 硕士, 研究方向为自动化生产线的结构设计及优化, 1093787886@qq.com。

中,优化目标只考虑了系统质量最小,动态特性等参数仅作为限制条件,这不符合本文的目标。基于上述原因,本文选择以滑台的动态特性较大和质量较小两个目标进行多目标优化设计,但为了简化优化过程^[6],引入滑台的动态特性效率 η 作为优化目标。该优化目标为系统的1阶固有频率和质量的比值。通过这种方式可以将多目标问题简化为单目标问题,从而简化优化过程。在此基础上,本文对桁架机器人的主滑台进行了模态分析、待优化参数的显著性分析以及响应面模型优化,最终实现滑台的多目标优化设计。

1 物理模型与结构验证

1.1 构建物理模型

自动化米饭生产线中的桁架机器人所搬运物体的质量较小,但配套零件质量较大,因此使用承重滑台代替横梁作为滑台的移动组件。其总体装置如图1所示。

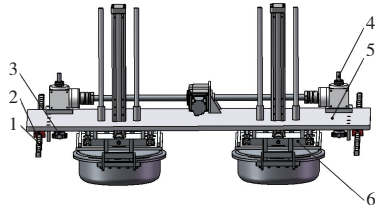


1—框架;2—轨道;3—齿条;4—滑台;5—炊饭单机。

图1 桁架机器人整体示意图

图2则是结构优化前滑台的三维物理模型。滑台的动力由位于中心的电机通过直角换向器带动的水平齿轮与齿条啮合提供。为了防止滑台在运动过程中出现偏移,维持直线运动,采用了滚动

导轨作为轨道,并依靠滚动导轨的线性运动能力进行水平限位^[7]。这种驱动方式能够最大程度地保证滑台在移动过程中不出现水平偏移。



1—导轨;2—滑块;3—齿轮;
4—齿轮轴;5—主滑台;6—抓取系统。

图2 优化前滑台三维模型

1.2 模态分析

由于驱动电机转速为1 000 r/min,因此滑台的低阶固有频率远离16 Hz时就能避免在运动时产生共振。本文利用Abaqus对方案进行了前3阶的模态分析^[8]。滑台为多自由度的振动系统,固定在滑块上。而安装滑块的轨道又受到安装螺栓的位移限制,因此在进行模态分析时,要固定导轨底面的 x 轴、 y 轴、 z 轴位移^[9]。

进行分析前,首先对模型进行简化,以此来减少运算难度和网格划分难度^[10-11],简化掉不必要的电机部件和支撑部件,并压缩所有固定件。在简化后的模型中,滑台部分材料采用6061-T4,材料的密度设置为 $2\,700\text{ kg/m}^3$,弹性模量设置为 $6.9\times 10^{10}\text{ Pa}$,泊松比设置为0.33。其余部分材料均采用304不锈钢,材料属性设置为质量密度 $7\,930\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $1.9\times 10^{11}\text{ Pa}$,泊松比0.29。在上述设置下,分析出系统的1阶振型如图3所示,滑台1阶固有频率和振型如表1所示。

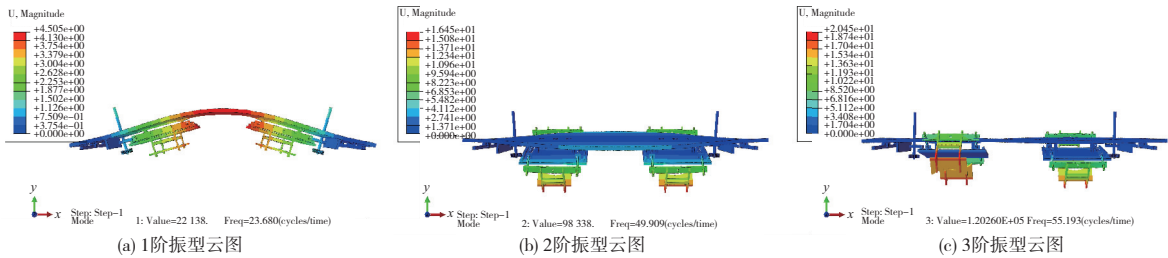


图3 滑台低阶模态振型云图

表1 滑台1阶固有频率和振型

模态阶次	直线导轨固有频率/Hz	振型
1	23.680	z 轴弯曲
2	49.909	x 轴扭曲
3	55.193	x 轴扭曲

分析图3和表1的仿真结果可以得知,方案的第1阶固有频率远离了外界激励的激振频率,因此该滑台的刚性较大,运行稳定性较高。但是此时滑台的质量达到了155.65 kg,动态特性效率仅为152.13。单位质量对动态特性的贡献度较低,需要对其进行优化。

2 基于数值模拟的参数显著性分析

滑台的关键结构参数对整个系统的动态特性和质量影响很大。为了进行后续的轻量化设计,首先需要找出对系统目标特性灵敏度最显著的关键参数作为待优化变量。

在原设计方案的基础上添加减质量区用于减少滑台质量。在固定减质量区宽度的前提下,由于减质量区长度 A 、导轨规格 M 、滑台长度 L 的参数变化明显影响了系统的质量和固有频率,因此选择他们作为待优化变量。而根据研究,导轨半间距 S 、滑块间距 d 这样的系统分布参数虽然无法影响质量,但却是影响系统动态特性的重要因素,因此也选择他们作为待优化变量。

试验前,引入 1 阶固有频率 f_1 和对应方案质量 m 的比值 η 作为正交试验的响应目标 $\left(\eta=\frac{f_1}{m}\right)$,称这个比值 η 为系统的动态性能效率。在这个优化目标下如果设计方案的 1 阶固有频率较高,且质量较小,则 η 值自然会变大。以该特性值作为优化目标,可以找出轻量化设计和动态特性配合最优的设计方案。关键结构参数示意图如图 4 所示。

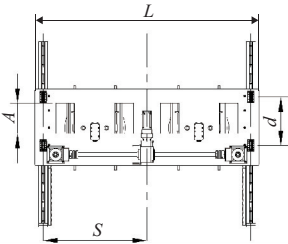


图 4 关键结构参数示意图

2.1 正交试验

依据上述分析,设计了五因素四水平的正交试验表 $L_{16}(4^5)$,并根据正交表进行仿真试验^[12],得到的结果如表 2 所示。其中滚动导轨选择上银导轨的 HGH 系列,导轨规格用导轨滑块的长度表示,61.40 代表 HGH15CA,77.50 代表 HGH20CA,84.00 代表 HGH25CA,97.40 代表 HGH30CA。正交试验设计及结果如表 3 所示。

表 2 试验因素水平选取 单位:mm

因素水平	导轨半间距 S	滑块间距 d	减质量区长度 A	导轨规格 M	滑台长度 L
1	882.00	427.60	230.00	61.40	1 925.00
2	892.00	457.60	280.00	77.50	2 025.00
3	902.00	487.60	330.00	84.00	2 125.00
4	912.00	517.60	380.00	97.40	2 225.00

表 3 正交试验设计及结果

项目	导轨半间距 S/mm	滑块间距 d/mm	减质量区长度 A/mm	导轨规格 M/mm	滑台长度 L/mm	目标 $\eta \times 10^{-3}/(\text{Hz/kg})$
1	892.00	457.60	280.00	77.50	1 925.00	167.38
2	892.00	517.60	330.00	61.40	2 125.00	145.02
3	882.00	457.60	330.00	97.40	2 025.00	162.80
4	902.00	487.60	330.00	84.00	1 925.00	157.46
5	882.00	427.60	230.00	61.40	1 925.00	162.19
6	882.00	517.60	280.00	84.00	2 225.00	151.69
7	902.00	427.60	280.00	97.40	2 125.00	157.65
8	882.00	487.60	380.00	77.50	2 125.00	153.52
9	912.00	487.60	280.00	61.40	2 025.00	147.88
10	892.00	487.60	230.00	97.40	2 225.00	155.98
11	902.00	517.60	230.00	77.50	2 025.00	161.71
12	892.00	427.60	380.00	84.00	2 025.00	151.28
13	912.00	427.60	330.00	77.50	2 225.00	144.58
14	902.00	457.60	380.00	61.40	2 225.00	136.05
15	912.00	517.60	380.00	97.40	1 925.00	154.02
16	912.00	457.60	230.00	84.00	2 125.00	149.97
K 均值 1	157.55	153.92	153.93	147.78	160.26	—
K 均值 2	154.92	154.05	156.15	156.80	155.92	—
K 均值 3	153.21	153.71	152.46	152.60	151.54	—
K 均值 4	149.11	153.11	148.72	157.61	147.07	—
R	8.44	0.94	8.75	9.83	13.19	—

2.2 极差分析

利用有限元仿真进行正交试验常常通过极差分析来判断各个因素的显著性大小。极差分析计算简单,分析结果如表3所示,趋势图则如图5所示。从中不难看出, S 、 d 、 A 、 M 和 L 这5个因素的极差值分别为8.44、0.94、8.75、9.83、13.19,因此对于目标值 η 而言各个因素的极差大小顺序为 $L > M > A > S > d$ 。显然对滑台1阶固有频率和质量影响最显著的因素是滑台长度,接着依次是导轨规格、减质量区长度,导轨半间距和滑块间距。

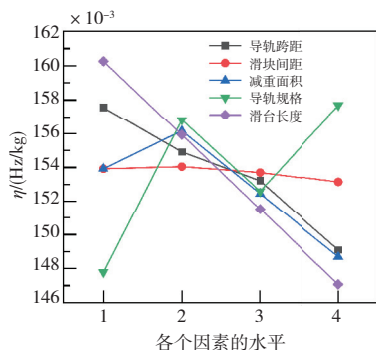


图5 极差分析趋势图

2.3 方差分析

极差分析本身较为简略,通过极差分析得出的数据往往不具备统计学意义,一般而言可以通过方差分析^[13]的方法对极差分析进行验证和补充。单因素方差分析(简称ANOVA)是一种统计分析方法,用于比较3个或3个以上不同处理组之间的均值是否存在显著差异。这种方法通常用于确定因素对于目标值是否有显著影响。在为数据增加自由度补充了4组试验点后,本文通过SPSS软件的方差分析模块,对上述试验得到的数据进行了显著性验证,结果如表4所示。

表4 方差分析

源	组间均方	F	显著性
导轨半间距 S	49.835	75.616	0.003
滑块间距 d	0.558	0.846	0.553
减质量区长度 A	62.256	94.462	0.002
导轨规格 M	82.407	125.037	0.001
滑台长度 L	137.266	208.275	<0.001

从表4不难看出,滑台长度 L 、导轨规格 M 、减质量区长度 A 以及导轨半间距 S 的显著性均小于0.005,因此这些参数对于目标而言是显著的,

且具有统计学意义。而滑块间距 d 并不显著。此外经过方差分析得到的显著性排序和极差分析一致,因此试验结果可信。接下来的响应面分析应当选择具有显著性和连续性的因素作为变量,导轨规格与滑块间距不符合要求,故而剔除。这样,进行响应面分析时考虑的因素为滑台长度 L 、减质量区长度 A 和导轨半间距 S 。其余的两个参数则进行单因素试验,从而寻找各自的最优解。

2.4 单因素试验寻优

单因素试验即控制一个变量不断改变,其余因素保持不变,从而用试验的方式研究该变量对于目标的影响。在本文中利用这样的试验设计寻找被剔除的不显著参数的最优值^[14]。

1) 导轨规格单因素试验寻优

控制除了导轨规格以外的其他条件不变化,选取HGH15CA、HGH20CA、HGH25CA和HGH30CA 4种导轨,探究他们对滑台的动态特性效率 η 的影响。结果如图6所示。

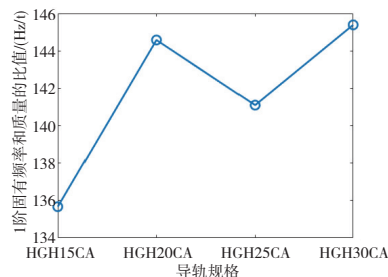


图6 导轨规格选择

从图6可以看出,随着导轨规格的不断增大, η 值呈现波动的特点。虽然计算结果显示,导轨规格选择HGH30CA时,系统的动态特性效率最大,但选择HGH20CA时,系统的动态特性效率只比最大值小了0.8,因此从成本和受力范围考虑,最终导轨规格选则了HGH20CA。

2) 滑块间距单因素试验寻优

控制除导轨半间距外的其他条件不变化,并固定导轨规格的值刚刚寻找到的最优值。选取427.60 mm、457.60 mm、487.60 mm、517.60 mm这4个值,探究其对滑台的动态特性效率 η 的影响。结果如图7所示。

从图7可以看出,随着滑块间距不断增加, η 值出现先增加后减小的特点。当滑块间距为457.60 mm时, η 值达到了最大。这说明滑块间距应当选择457.60 mm才会使得滑台系统达到较好的动态特性效率。

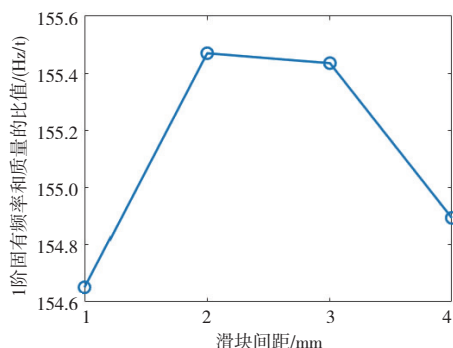


图7 滑块间距选择

3 基于响应面法的轻量化设计

通过上述的试验设计和结果分析,确定了各个因素对优化目标 η 的显著性排序,并通过单因素试验寻找出了在本设计允许范围内,1个不显著因素和1个离散因素的最优解。后续的3个显著因素则采用响应面分析的方式寻找最优解^[15]。

设置响应面法优化设计的变量为滑台长度 L 、减质量区长度 A 、导轨半间距 S 。对应的数学模型和限制参数如下:

$$\begin{aligned} & \text{find } L, A, S \\ & \text{maxy} = \eta(L, A, S) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} 1\ 925 \leq L \leq 2\ 325 \\ 0 \leq A \leq 420 \\ 882 \leq S \leq 930 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

响应面法(RSM)优化设计是一种典型的代理模型(SBO)优化设计方法。该方法采用多项式拟合的方式,可以用较少的试验次数和数据,反应出多因素和目标值之间复杂的数学关系,这极大地减少了实验成本,并提升了实验效率^[16]。此外

RSM依据多项式回归检验的方法^[17]可以分析在多个因素一致性和不一致性作用下目标值的变化情况,并通过响应面图的方式可以直观观察出拟合多项式的极值点。基于以上的优点,多项式响应面法在优化设计中被广泛使用。

在响应面法中,约束条件限制空间内目标值 y 与设计变量 x 之间的多项式关系^[18]可以表示为

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j=n+1}^{2n} b_j x_j^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

式中: n 为设计试验的最大次数; b_0 为常数项回归系数; b_i 为一次项回归系数; b_j 和 b_{ij} 为二次项回归系数。在上述分析的基础上,采用 Box-Behnken Design 响应面优化分析试验方法设计试验^[19]。通过得出的目标值分析出系统的响应面模型如下:

$$y = 154.78 - 9.27x_1 - 7.47x_2 - 7.13x_3 - 0.275\ 1x_1x_2 + 0.817\ 2x_1x_3 + 1.15x_2x_3 + 1.05x_1^2 - 5.41x_2^2 + 1.01x_3^2 \quad (3)$$

式中: x_1 为滑台长度 L ; x_2 为减质量区长度 A ; x_3 为导轨半间距 S 。为了验证模型的精度,一般建立模型的单因素方差分析表(ANOVA)进行验证(表5)。

表5 响应面模型的方差分析

源	P	变异系数/%	R^2	调整后 R^2
模型	<0.000 1	0.621 4	0.9	0.98

从表5中可以看出,模型 P 值小于 0.000 1, 因此模型具有极其显著的统计学意义。而模型的 R^2 与调整后 R^2 均大于 0.8 且两者的差值小于 0.2, 因此可以推断模型具有较好的全局近似度。通过上述分析可以确认,该模型精度较高,结果较为可靠。绘制的响应曲面如图8所示。

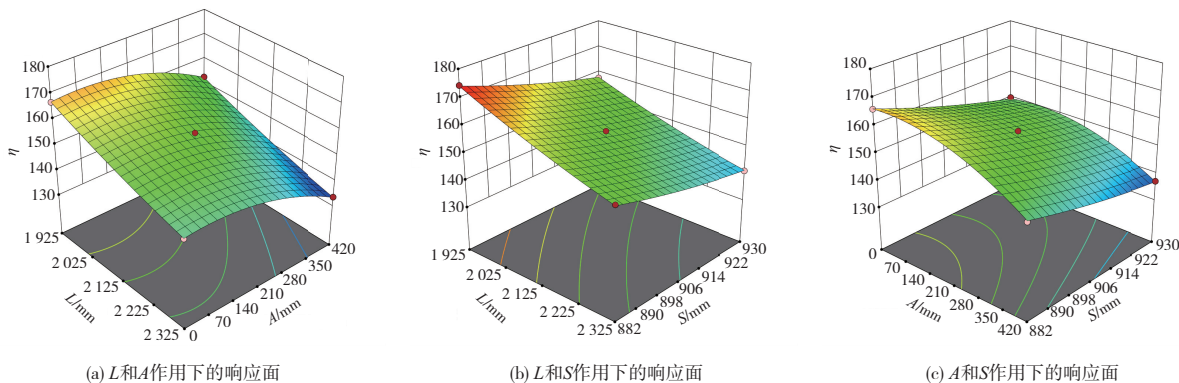


图8 交互因素对动态性能效率响应面图

根据分析到的响应面模型以及各参数的变量,提取了两组最佳数据,结果如表6所示。

表6 最优数据

组别	滑台长度 L/mm	减质量区 长度 A/mm	导轨半间距 S/mm
1	1 933.40	85.20	883.60
2	1 925.50	227.60	882.00

4 优化结构有限元分析

经过建模并测算模型质量,选择质量较小的组2作为最终的优化结果。对优化后的模型再次进行模态分析(图9)。从仿真结果来看,优化后模型的动态特性效率大幅上升,优化后动态特性效率上升了14.02%,为177.48 kg。滑台整体质量下降了14.32%,为133.36 kg,而滑台的1阶固有频率较优化前仅仅下降0.011 Hz,几乎没有明显变化。因此本文设计的优化方案达到了良好的优化效果。

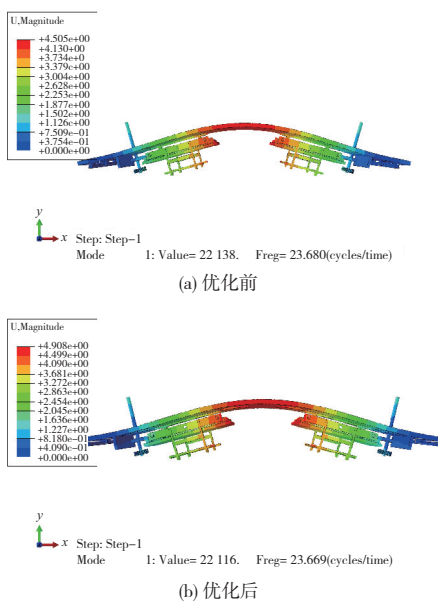


图9 优化前后1阶模态对比图

5 模态试验验证

为了验证优化后有限元仿真计算得到的模态分析结果可靠,搭建了实物平台,并对桁架机器人实物平台进行了模态试验^[20]。测试设备连接和测试点位置如图10所示。

采用单输入单输出法进行了试验模态分析^[21],示波记录仪采集的信号利用Matlab进行快速傅里叶变换(FFT)得到频域波形,最终的频响

函数曲线如图11所示。实验得到的系统1阶固有模态为25.13 Hz,与仿真结果相比偏差了6.17%,仿真结果可靠性较高。

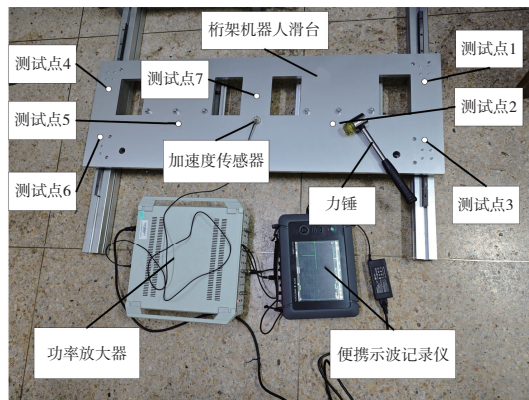


图10 模态试验连接图

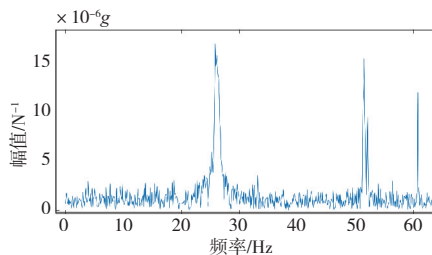


图11 频响函数曲线

6 结语

本文以自动化米饭生产线中桁架机器人的滑台为研究对象,通过Abaqus有限元分析结合正交试验和响应面分析等方法,对其进行了优化设计。得出以下结论。

1)对优化前的滑台进行了模态分析,验证了其1阶固有频率为23.680 Hz,该值远离了外部激振频率,有效避免了共振。运动平稳性也较大。

2)研究了5个待优化变量对优化目标的显著性。得到了5个参数的显著性排序为,滑台长度>导轨规格>减质量区长度>导轨半间距>滑块间距,并且滑块间距 d 并不显著,导轨规格 M 不是连续变量,因而剔除。剔除的参数通过单因素试验后寻找到的最优解为滑块间距为457.60 mm,导轨规格选择HGH20CA。

3)在获得因素显著度排序的情况下,对剩余的因素采用响应面分析的方法,进行优化设计,优化后滑台长度为1 925.50 mm,减质量区长度为277.20 mm,导轨半间距为882.00 mm。优化后滑台的动态特性较高,滑台整体质量下降了

14.32%,动态特性效率大幅上升了14.02%。和优化前比较,结构的1阶固有频率变化可以忽略不计,都处于较高水平,因此实现了优化目标。

上述试验和分析过程,为桁架机器人滑台的轻量化设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 赵雪. 米饭生产线的无线远程监控系统设计与应用[J]. 粮食与饲料工业, 2016(4): 37-39.
- [2] 张晓龙, 艾学崇, 李海南, 等. 伺服滑台的精度控制[J]. 汽车工艺与材料, 2021(12): 57-60.
- [3] 崔新霞, 赵明, 江红祥, 等. 堆垛机器人末端执行机构轻量化设计[J]. 机械设计与制造, 2024(11): 335-340, 345.
- [4] 何睿. 基于多学科多目标的车架结构轻量化设计[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(2): 173-178.
- [5] 信桂锁, 薄瑞峰, 冯超, 等. 基于多岛遗传算法和响应面模型的机床床身的轻量化设计[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(5): 102-106.
- [6] 龙江启, 周平, 郑金品, 等. 考虑多工况刚度和模态灵敏度的全地形车车架轻量化设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(7): 109-118.
- [7] 许凤华, 向正新, 施雷, 等. 基于偏载作用下的齿轮齿条啮合仿真研究[J]. 石油机械, 2019, 47(5): 50-55.
- [8] 裴彬, 米洁, 杨庆东. 磨床导轨的动态特性分析及结构优化设计[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(6): 110-113, 119.
- [9] 陈桂平. 高速磨床动态特性及结构优化设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [10] FU Z, LIU G. Simulative analysis for static and dynamic behaviour of QT8002 ductile iron crankshaft [J]. Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications, 2014, 8(1): 115-120.
- [11] PALANIVELU S, NARASIMHA RAO K V, RAMARATHNAM K K. Determination of rolling tyre modal parameters using Finite Element techniques and Operational Modal Analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 64: 385-402.
- [12] 周诗雨, 安鲁陵, 赵聪, 等. 几何因素对蜂窝夹层构件固化变形的影响研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(4): 96-100.
- [13] HAN Y, MI L H, SHEN L, et al. Numerical study on optimal structural parameters of train wind barrier based on orthogonal design [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(8): 2706-2718.
- [14] LI Y R, CHEN X, LIU A, et al. Preparation of aerogels from corn stalks and research on their properties and gelation behavior [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 203: 117211.
- [15] 李华雄, 王晖, 刘璇, 等. 响应面法多目标优化 FDM 工艺 ABS-GF 参数与力学性能 [J]. 塑料科技, 2025, 53(4): 145-150.
- [16] 陈佳明, 朱涛, 肖守讷, 等. 地铁车辆蜂窝式防爬器的结构设计及优化 [J]. 机械科学与技术, 2023, 42(5): 657-664.
- [17] 陶厚永, 曹伟. 多项式回归与响应面分析的原理及应用 [J]. 统计与决策, 2020, 36(8): 36-40.
- [18] 吴佳敏. 基于响应面分析法的斜齿轮齿廓修形研究及其动力学特性分析 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [19] 卢一铭, 金成哲, 王俊杰, 等. 基于 Box-Behnken 设计的增材制造 TC4 铣削参数优化 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2025(4): 157-160.
- [20] 高志彬, 陈守佳, 刘志红, 等. 汽车排气系统吊钩位置优化 [J]. 机械设计与制造, 2023(12): 45-48.
- [21] 王若平, 李文武. 基于 MIMO 模态实验法对某 MPV NVH 性能研究 [J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(5): 122-125.

收稿日期: 2023-10-23

(上接第 217 页)

- [14] 付玉鹏, 李取浩, 臧云飞. 电极直径对连续点焊熔核的影响 [J]. 金属加工(热加工), 2025(4): 79-86.
- [15] 张志春, 王晓庆, 吴明海, 等. 加热模式对 Cu-Al 微电阻点焊过程中电极烧损行为的影响 [J]. 材料导报, 2025, 39(4): 122-130.
- [16] 袁荣, 方军, 张涛, 等. 工艺参数对高温合金电阻点焊熔核尺寸及变形的影响研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(17): 131-135, 146.
- [17] 沈绍嵘, 彭星艺, 郭子蒙. 高强钢电阻点焊动态电阻信号标准化研究 [J]. 机械设计与研究, 2025, 41(2): 116-121.
- [18] 叶铭海. 电阻焊工艺对掺钨钨棒焊点性能的影响 [J]. 福建冶金, 2024, 53(1): 62-66.
- [19] 李娅娜, 简志松, 刘嘉浩, 等. SUS301L 不等厚薄板点焊熔核与残余应力 [J]. 焊接, 2021(12): 7-11, 16, 63.
- [20] 罗家元, 李鑫, 谭超. 焊接残余应力对高强钢点焊接头裂纹扩展及疲劳性能的影响 [J]. 机械强度, 2024, 46(2): 439-445.

收稿日期: 2024-04-09