

孙佳锋,余朝刚,朱文良. 轨距精调车夹爪结构分析与优化设计[J]. 智能计算机与应用,2025,15(10):29-38. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.251005

轨距精调车夹爪结构分析与优化设计

孙佳锋,余朝刚,朱文良

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 针对目前轨距精调施工作业中效率低、精度不够的问题,设计一种应用于铁路系统的轨距精调车,并以其夹爪部件为对象进行拓扑优化,二次设计后提出一种响应面法与多目标遗传算法(MOGA)相结合的优化设计方法以实现优化设计。建立夹爪部件的有限元模型,并进行静力学分析,知其满足刚度强度要求的条件下有冗余。以Workbench的拓扑优化模块对夹爪进行优化,二次设计夹爪结构并进行静力学分析验证,以确保夹爪满足优化目标,但仍存在优化潜力。使用中心复合试验(CCD)设计方法对夹爪的7个设计变量进行试验仿真,建立设计变量与质量、最大变形量、最大等效应力之间的响应面代理模型,建立数学模型,以多目标遗传算法优化求解。结果表明:夹爪质量相比于二次设计减少了16.8%,最大变形量增加了0.00693 mm,最大等效应力减小了8.63 MPa,远小于许用值。优化效果显著,优化后的夹爪满足轨距精调作业的使用要求。

关键词: 轨距精调; 夹爪部件; 拓扑优化; 响应面法; 多目标遗传算法

中图分类号: TH122 文献标志码: A 文章编号: 2095-2163(2025)10-0029-10

Structure analysis and optimization design of track fine-tuning clamp

SUN Jiafeng, YU Chaogang, ZHU Wenliang

(School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and insufficient precision in the current construction work of gauge fine adjustment, a gauge fine adjustment train applied to railway system is designed, and topological optimization is carried out with its clamp parts as the object. After the secondary design, an optimization design method combining response surface method and Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) is proposed to realize the optimal design. The finite element model of the clamp part is established, and the static analysis is carried out to show that it has redundancy under the condition of meeting the rigidity and strength requirements. The topological optimization module of Workbench is used to optimize the gripper, and the gripper structure is designed twice and verified by statics analysis to ensure that the gripper met the optimization objectives, but there is still optimization potential. The Central Composite Design (CCD) method is used to simulate 7 design variables of the gripper, and the response surface proxy model between the design variables and the mass, the maximum deformation and the maximum equivalent stress is established. The results show that the mass of the claw is reduced by 16.8%, the maximum deformation is increased by 0.00693 mm, and the maximum equivalent stress is reduced by 8.63 MPa, which is far less than the allowable value. The optimization effect is remarkable, and the optimized gripper can meet the requirements of the track fine adjustment operation.

Key words: fine adjustment of gauge; clamp parts; topology optimization; response surface method; Multi-Objective Genetic Algorithm

0 引言

轨道的高平顺性是铁路系统设计中的一个重要指标,对于提升铁路运输的整体性能、保证列车运行的安全性和乘客的舒适度至关重要。通过施工质量的严格控制,可以确保轨道的原始平顺性达到标准,但存在列车长时间运行、轨道磨损、结构老化等因素影响,轨道平顺性逐渐降低。为确保轨道维持高平

顺性,需定期对轨道进行检测、维护和必要的调整^[1]。轨距是控制轨道平顺性的一项重要参数,保证轨距的变化率和偏差值也是进行轨道养护维修的重点^[2]。当前的轨距精调施工中,一般是采用全站仪配合静态检测车测得轨道几何参数后制定相应精调方案,作业人员再使用改道器及人工撬棍配合进行轨距的调整。这种方式需要人工为改道器提供液压助力,及人力使用撬棍扳动钢轨,利用此方法不仅

作业人员劳动强度大、智能化程度低,而且也无法精确控制调整精度。本文设计一种自动化轨距精调车,可实现轨距的测量、轨距的调整和轨距的固定等步骤于一体的自动化作业方式,提高轨距调整的精度和效率。轨距精调机构的夹爪部分是受力核心部件,工作时在丝杆螺母的带动下夹紧钢轨对轨距进行调整。因此,应对夹爪进行有限元仿真分析和优化设计。

有限元分析是利用数学方法模拟物理系统,用单一问题取代复杂问题进行求解的工程分析技术^[3]。对零部件优化设计,包括形状优化、拓扑优化和尺寸优化,国内外诸多学者对此都有所研究。

部分学者从零件形状出发,对其进行优化改进设计。如,王学良等学者^[4]对转轮式日粮混合机的搅拌架叶板形状进行优化设计,通过离散元仿真分析,验证了可靠性。马新武等学者^[5]对锻件坯的形状进行了优化设计,增加了材料使用率。部分学者通过拓扑优化的方式,将轻量化的设计应用于诸多领域。如,陈鹏等学者^[6]对标准护栏进行拓扑优化,经护栏-车耦合有限元模型碰撞分析,实现防撞性能的优化提升。张宇等学者^[7]提出了一个多场景多目标动力学拓扑优化方案,优化了横梁减重孔分布达到轻量化目的。部分学者将尺寸优化与算法相结合,提出智能优化方法。如,万长东等学者^[8]利用神经网络拟合及 NSGA-II 优化算法求解进行了轻量化分析。沈仙法等学者^[9]通过多目标遗传算法对停车装置框架横梁和立柱进行多目标优化。部分学者在工程应用问题中引入响应面法,对零部件进行优化分析。如,张希恒等学者^[10]将响应面融入到遗传算法中,优化了球阀阀座的结构强度。Kang 等学者^[11]采用了移动最小二乘法的响应面法对结构进行可靠性分析。

本文以夹爪部件作为优化设计目标,在其静力学分析基础上,对其进行拓扑优化,发现夹爪结构存在的基础设计问题,进行改进设计和仿真验证。稍后将响应面法融入到多目标遗传算法中进行优化设计,先建立设计变量和质量、变形量、等效应力之间的响应面代理模型,再用 MOGA 遗传算法求解,得到 Pareto 最优解集,对比优化前后结果,实现夹爪优化设计。

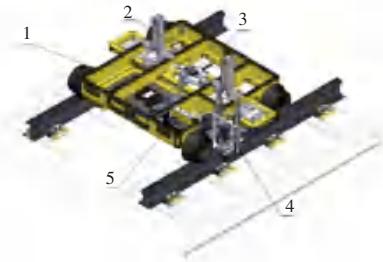
1 轨距精调结构设计与工作原理

1.1 精调结构设计

通过分析轨距精调施工流程,可知精调步骤主

要包括测量区间段轨距、修订调整方案、标记调整量、调节轨距及复测、固定螺栓^[12]。据此得知,轨距精调车设计的核心要求是搬动松开螺栓一侧的钢轨,从而使轨间距达到调整方案的修订值。

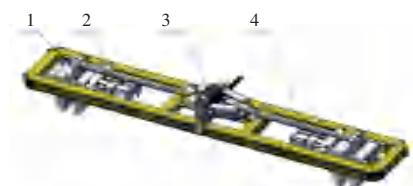
本文设计轨距精调车主要由走行机构、激光测距模块、轨距精调机构、螺栓松紧机构、控制系统模块等组成。其中,走行机构用于整车在轨道上行驶;轨距精调机构用于调整轨距;螺栓松紧机构用于紧固扣件螺栓;激光测距模块用于实时测量轨距并将数据传递给控制系统。轨距精调车结构如图 1 所示。



1—走行机构; 2—激光测距模块; 3—轨距精调机构; 4—螺栓松紧机构; 5—控制系统模块

图 1 轨距精调车结构
Fig. 1 Gauge fine-tuning structure

由图 1 可知,精调工作的核心为搬动钢轨,调整轨距,其余为辅助功能机构,轨距精调机构为重要受力部件,尤其是夹爪部位。因此,对轨距精调机构及其夹爪部分设计进行分析。轨距精调机构总体方案如图 2 所示。



1—夹爪部件; 2—丝杆螺母电机; 3—伺服电机连杆机构; 4—机架

图 2 精调机构结构设计

Fig. 2 Structure design of fine-adjusting mechanism

1.2 精调工作原理

该精调机构的调距部位以伺服电机为驱动,可以精确控制调整量,并且具有一定的过负载能力。步进减速电机通过丝杆螺母控制夹爪在 H 形连接件的槽内直线移动开合。左右夹爪在梯形丝杆的自锁功能下锁死钢轨。H 形连接件与横梁之间设有滑台与导轨,在伺服电机连杆机构的驱动下沿导轨方向水平移动,从而夹爪带动钢轨的轨距的调整。工作原理如图 3 所示。

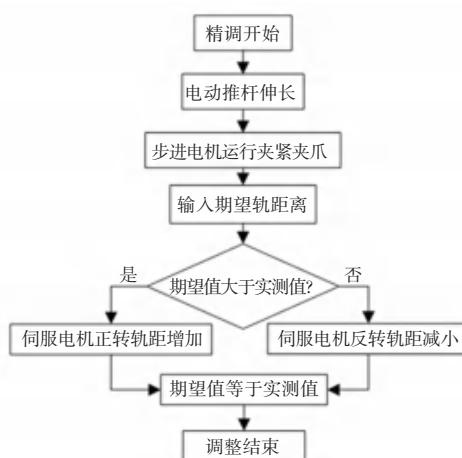


图 3 精调机构工作原理

Fig. 3 Working principle of fine-adjusting mechanism

2 夹爪有限元分析及拓扑优化

2.1 夹爪部件三维模型初设计

夹爪为核心受力部件,设计其结构时,需先研究钢轨的形状、尺寸及受力点。钢轨规格不同,尺寸不同,但断面形状相同,以 60 kg/m 钢轨为例,钢轨截面由轨头、轨腰和轨底三部分组成,为最佳抗弯性能的工字形断面^[13]。

钢轨重心位于轨腰处,轨底面与轨下垫板接触,为使钢轨沿截面方向水平移动,且轨底与轨下垫板

不产生角度偏移,则钢轨受力点需在轨腰中心轴处或以下位置。初期设计夹爪部件的三维结构模型如图 4 所示。

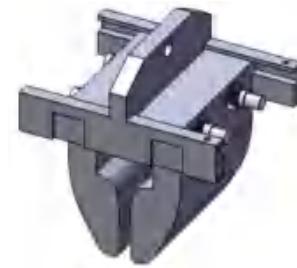


图 4 夹爪部件初设计

Fig. 4 Initial design of clamp parts

2.2 夹爪部件有限元模型的建立

为使后期网格质量更好,建立有限元模型时需要进行预处理。在不影响整体结构情况下,对微小细节的地方进行模型简化,除去非重要受力部位的圆角、圆孔,合并一些小的边缘、小的平面。在锁紧状态时,梯形丝杆将左右两夹爪锁紧于 H 形连接件的前后平面内,可将各零件之间视为刚体接触。将简化模型导入至 Workbench 软件中进行仿真分析。

2.3 材料定义及网格划分

对各零件进行材料定义。夹爪部件各零件材料物理特性见表 1。

表 1 夹爪材料物理特性

Table 1 Physical characteristics of gripper material

零件名称	材料名称	种类	弹性模量/ 10^5 MPa	泊松比	密度/(10^3 kg·m $^{-3}$)	屈服强度/MPa
夹爪	Q235	碳素结构钢	2.06	0.288	7.86	235
H 形连接件	Q235	碳素结构钢	2.06	0.288	7.86	235
梯形丝杆	40Cr	合金结构钢	2.11	0.277	7.85	785
螺母	H85	黄铜	1.15	0.340	8.75	120

网格划分是有限元分析中重要的一步,网格划分质量越高,分析求解得到的结果就越精确,但过于精细化的网格运算求解时运行时间也越长。因此,根据不同结构划分合适的网格精度就显得尤为重要。分别对夹爪采取四面体网格、H 形连接件采取六面体网格为主导的网格划分,并对夹爪进行网格局部细化。网格过渡速度上选择缓慢过渡,网格划分完成后,节点数为 1 610 517,单元数为 1 054 794。网格形状如图 5 所示。

2.4 载荷约束与求解分析

对精调机构结构设计进行受力分析。精调工作时,夹爪被丝杆锁紧后扣紧钢轨,在 H 形连接件的圆孔处受长杆拉力搬动钢轨,则夹爪会受到钢轨给

予夹爪内侧的反作用力。轨距的调整量存在正负,所以精调作业存在压缩轨距和拉伸轨距两种工况,左右夹爪分别受到钢轨的反作用力。

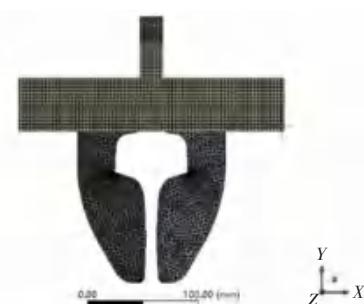


图 5 夹爪部件网格

Fig. 5 Clamping parts grid

精调作业时会一次性松开若干个扣件螺栓, 夹爪需克服钢轨与轨下垫板之间的静摩擦力, 则钢轨给予夹爪的反作用力为:

$$F = f = \mu G = \mu mg \quad (1)$$

其中, μ 表示摩擦系数, 取 0.6; m 表示钢轨质量, 取长度为 25 m 的 60 kg/m 钢轨; g 表示重力加速度, 取 9.8 N/kg。

将各参数代入公式得摩擦力为 9 555 N, 取作用力为 10 kN。

由结构可知, 夹爪上平面和前面分别限制于 H 形连接件内, 且夹爪由丝杆螺母锁紧于孔内。因此在夹爪的上平面、前表面以及螺母安装孔内添加固定约束, 并添加上表面的转动自由度约束, 限制上表面的旋转。

对压缩轨距工况下(拉伸轨距工况类似)的夹爪部件进行静力学分析, 求解可得夹爪部件的合位移云图如图 6 所示, 等效应力云图如图 7 所示。

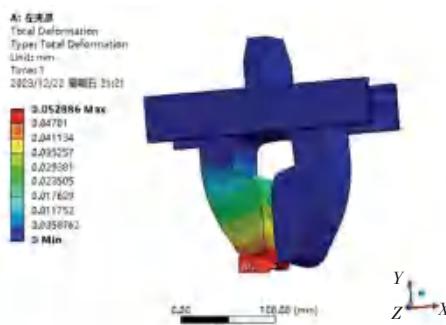


图 6 左夹爪合位移云图

Fig. 6 Displacement cloud image of left clamp claw

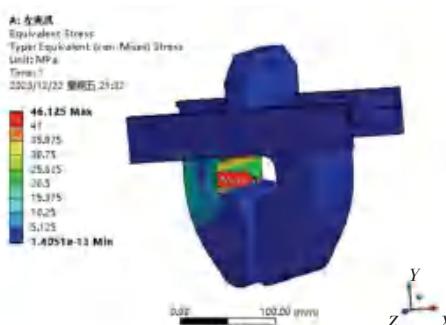


图 7 左夹爪等效应力云图

Fig. 7 Equivalent stress nephogram of left clamp claw

通过图 6、图 7 可知, 夹爪最大变形量是 0.052 899 mm, 无砟轨道静态铺设精度轨距的允许偏差为 ± 1 mm^[14], 所以该结构的设计符合轨距验收的精度标准。夹爪最大等效应力为 46.125 MPa, 远低于屈服强度 235 MPa。

在以上夹爪部件的静力学分析的基础上, 发现

夹爪部件在满足变形量以及材料屈服强度的条件下, 存在较大冗余, 因此可对结构进行拓扑优化。两夹爪为对称结构, 只需着重考虑一个, 对左夹爪进行拓扑优化。响应约束为质量, 保留 50% 材料, 拓扑结果如图 8 所示。



图 8 左夹爪拓扑优化结果

Fig. 8 Topology optimization results of left gripper

拓扑优化是理论结果, 实际生产中无法加工制造, 需根据优化结果, 重新设计夹爪。夹爪结构进行二次设计如图 9 所示。对其进行静力学仿真分析, 可得结果夹爪合位移云图(见图 10)、夹爪等效应力云图(见图 11)。

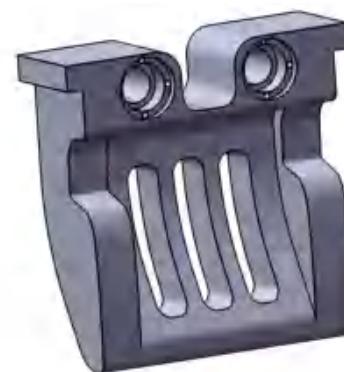


图 9 夹爪二次设计结构

Fig. 9 Secondary design structure of the gripper

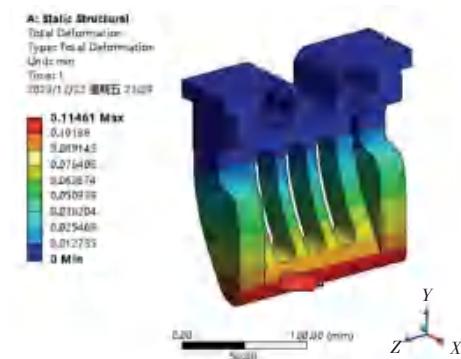


图 10 夹爪二次设计合位移云图

Fig. 10 Displacement cloud image of the secondary design of the claw

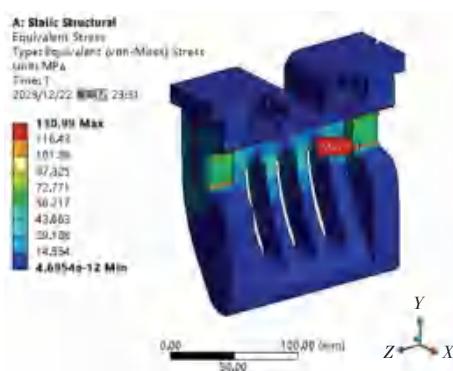


图 11 夹爪二次设计等效应力云图

Fig. 11 Equivalent stress cloud diagram of secondary design of the gripper

经静力学仿真分析, 优化设计后的夹爪最大合位移为 0.11461 mm, 最大等效应力为 130.99 MPa。从结果来看, 不管是合位移、还是等效应力, 相比于初期设计都有明显增大, 但都符合强度和刚度要求, 且远小于许用值, 因此可以对夹爪进行响应面和多目标遗传算法相结合的参数优化。

3 基于响应面和多目标遗传算法的优化设计

此次优化设计的目标是轻量化, 同时尽可能保证夹爪变形量及最大应力符合设计要求, 且提升有安全系数。为提升夹爪结构可靠性, 对其多个尺寸进行优化。本文将影响夹爪性能较大的尺寸选为设计变量, 以质量、最大变形量和最大等效应力为目标; 运用中心复合试验(CCD)设计方法进行 DOE 试验获取样本点; 根据样本点及其响应值构造目标函数和约束函数得到多项式近似模型, 构建响应面代理模型^[15]; 最后, 建立数学模型, 以多目标遗传算法(MOGA)来进行优化求解, 得到 Pareto 最优解。优化设计流程如图 12 所示。

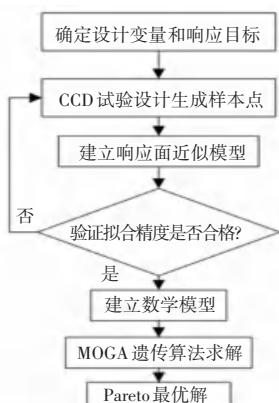


图 12 优化设计

Fig. 12 Optimal design

3.1 确定设计变量及取值范围

分析夹爪二次设计, 以夹爪宽(P_1)、左右筋厚(P_2)、主板厚(P_3)、上槽宽(P_4)、上槽高(P_5)、中心槽孔高(P_6)、中心槽孔宽(P_7)为设计变量; 以夹爪质量(P_8)、最大变形量(P_9)和最大等效应力(P_{10})为响应目标。夹爪各优化设计参数尺寸分布如图 13 所示。

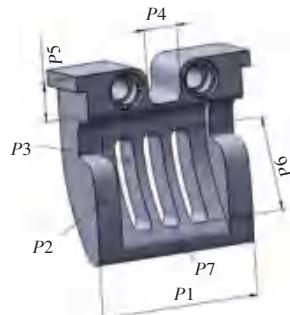


图 13 设计变量分布图

Fig. 13 Distribution of design variables

夹爪设计变量的取值范围应遵循不改变整轨距调整机构尺寸的原则, 在此范围内对夹爪尺寸进行适当改变, 且各设计变量之间的取值不应改变夹爪的整体结构, 以免造成结构的大幅度变化。设计变量初始值和取值范围见表 2。

表 2 夹爪各设计变量初始值及取值范围

Table 2 Initial value and value range of each design variable of the clamp

设计变量代号	设计变量名称	初始尺寸	取值范围
P_1	夹爪宽	165.0	145 ~ 170
P_2	左右筋厚	25.0	15 ~ 30
P_3	主板厚	25.0	20 ~ 30
P_4	上槽宽	35.0	32 ~ 42
P_5	上槽高	37.5	34 ~ 44
P_6	中心槽孔高	85.0	80 ~ 110
P_7	中心槽孔宽	20.0	16 ~ 24

3.2 试验设计

为了寻找出“最佳区域”, 确定使夹爪质量(P_8)、最大变形量(P_9)、最大等效应力(P_{10})三个目标响应值在满足约束条件下的设计变量取值, 需要进行若干个样本的 DOE 试验设计。

DOE 试验设计方法中, 中心复合试验设计方法(CCD)是最普通的响应面设计试验, 可以高效估计一阶和二阶项, 提高对试验误差的精确估计, 减小预测值与实际值的误差^[16]。本文选用 CCD 试验设计方法选取样本点, 对夹爪进行 7 因素的 DOE 试验设计, 得到 79 组样本数据, 见表 3。

表 3 CCD 试验设计样本及目标响应值
Table 3 CCD test design samples and target response values

组别	设计变量/mm							响应值		
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8/kg	P9/mm	P10/MPa
1	157.50	22.50	25.00	37.00	39.00	95.00	20.00	6.25	0.12	145.60
2	145.00	22.50	25.00	37.00	39.00	95.00	20.00	5.73	0.13	151.68
3	170.00	22.50	25.00	37.00	39.00	95.00	20.00	6.76	0.12	140.02
...
50	150.88	26.46	22.35	34.35	36.35	102.93	22.11	5.83	0.13	133.35
...
77	164.11	18.53	27.65	39.65	41.65	102.94	17.88	6.55	0.13	148.95
78	150.89	26.47	27.65	39.65	41.65	102.94	17.88	6.17	0.12	126.36
79	164.11	26.47	27.65	39.65	41.65	102.94	22.12	6.45	0.12	127.14

3.3 构建响应面近似模型

响应面法通过对局部点进行试验,回归拟合全局范围内变量与目标间的函数关系,取得各变量最优水平值,是一种结合试验设计和数学建模的优化设计方法。在优化设计方案中,应用响应面法得到设计变量与响应目标关系的同时,还可以得到优化方案、即最优的设计变量组合,使目标函数实现最优化^[17]。

目前建立响应面的方法有多项式、指数函数、对数函数和神经网络等^[18]。多项式近似模型能以少量试验数据较精确地描述函数关系,从而拟合复杂的响应关系。因此在本文中,采用多项式近似模型描述设计变量和目标函数之间的关系。

本文通过对此前经 CCD 实验设计得到的试验样

本点以及对应响应值进行分析,采用实际工程应用中最常用的二阶多项式近似模型,基函数的公式为:

$$y(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

其中, $y(x)$ 表示拟合函数; x_i 表示设计变量 ($i = 1, 2, \dots, n$); β 表示待定系数; ε 表示精度误差。

在 WorkBench 软件中对响应面模型进行回归方程求解。先对各参数灵敏度进行分析。参数灵敏度分析是指采用相关数学方法求解出状态变量随设计变量改变的灵敏程度,从而判断各设计变量对目标函数的影响程度^[19]。各参数对目标响应值的灵敏度如图 14 所示。

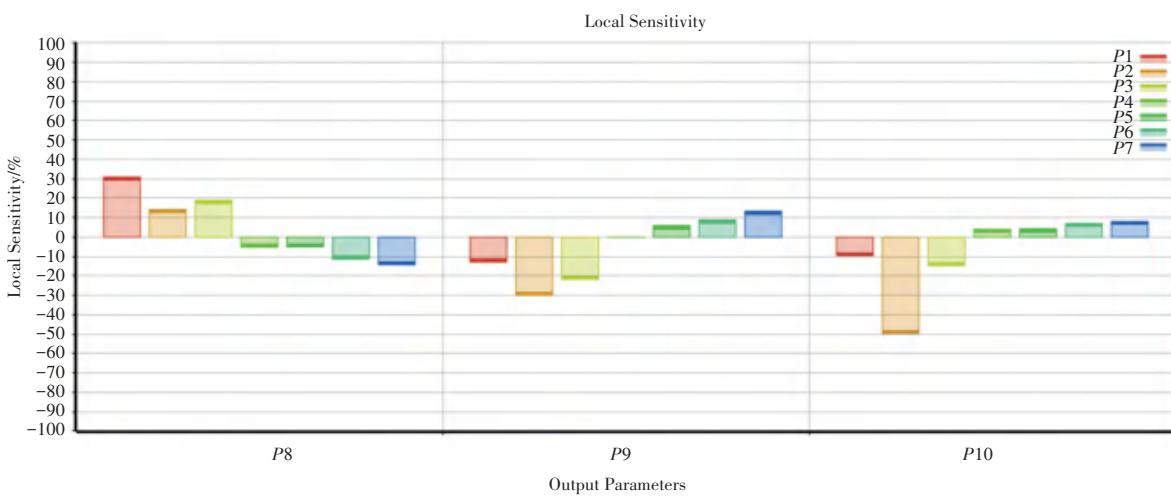


图 14 灵敏度分析图
Fig. 14 Sensitivity analysis diagram

从图 14 中可得知:

(1) $P1, P2, P3$ 与夹爪质量呈正相关,其余变量呈负相关,且夹爪宽($P1$)对质量变化显著性最大,上

槽宽($P4$)、上槽高($P5$)对质量变化显著性最小。

(2) $P1, P2, P3$ 与夹爪最大变形量呈负相关,其余变量呈正相关,且左右筋厚($P2$)对最大变形量变化显

著性最大, 上槽宽($P4$)对最大变形量变化显著性最小。

(3) $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ 与夹爪最大等效应力呈负相关, 其余变量呈正相关, 且左右筋厚($P2$)对最大等效应力变化显著性最大, 上槽宽($P4$)、上槽高($P5$)对最大等效应力变化显著性最小。

根据分析出的各参数对目标响应值的灵敏度, 列出各目标响应函数与其显著性较高的变量间的响应曲面, 如图 15~图 17 所示。

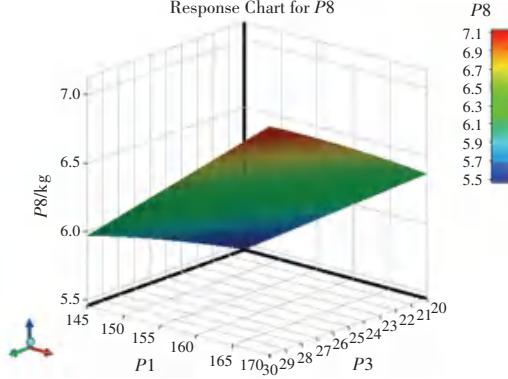


图 15 $P1$ 、 $P3$ 与夹爪质量的响应面

Fig. 15 Response surfaces of $P1$, $P3$ and gripper mass

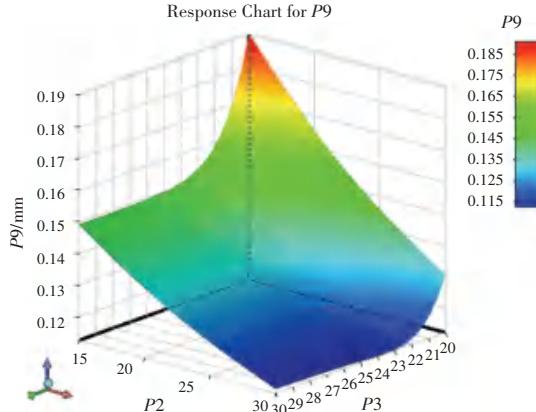


图 16 $P2$ 、 $P3$ 与最大变形量的响应面

Fig. 16 Response surfaces of $P2$, $P3$ and maximum deformation

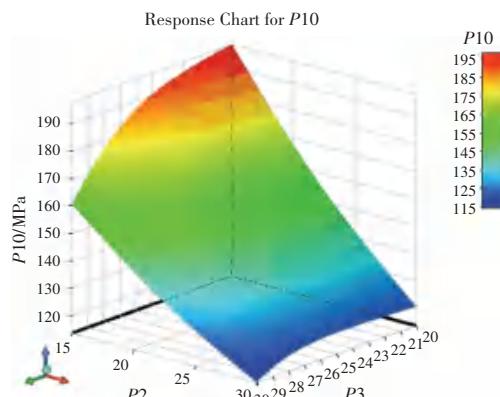


图 17 $P2$ 、 $P3$ 与最大等效应力的响应面

Fig. 17 Response surfaces of $P2$, $P3$ and maximum equivalent stress

为了判断构造的响应面二阶多项式近似模型与实际模型的拟合程度, 需进行精度检验。采用决定系数(R^2)作为评价指标判定构建的响应面近似模型是否符合精度要求。决定系数(R^2)最大值为 1, 最小值为 0, 当 R^2 越接近 1 时, 表示拟合精度越高; 相反, R^2 越接近 0 时, 表示拟合精度越低。 R^2 的计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (3)$$

其中, y_i 表示试验点响应目标的真实值; \hat{y}_i 表示近似模型对试验点的预测值; \bar{y}_i 表示试验点响应目标真实值的平均值。

经式(3)求解, 二阶多项式响应面近似模型的拟合精度见表 4, 响应目标实际值与预测值拟合结果如图 18 所示。

表 4 响应面拟合精度

Table 4 Response surfaces fitting accuracy

响应目标	$P8$	$P9$	$P10$
	R^2	0.999 99	0.976 55

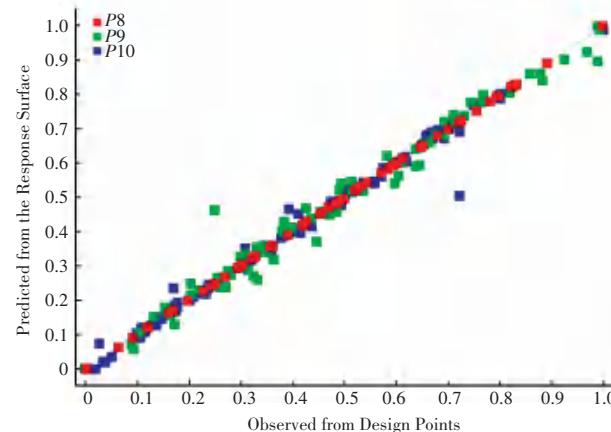


图 18 各响应目标实际值与预测值拟合图

Fig. 18 The actual value and predicted value of each response target

从图 18 分析来看, 夹爪质量($P8$)拟合最好, 而最大变形量($P9$)和最大等效应力($P10$)拟合出现偏差, 但从总体试验点结果来看拟合度较高; 从响应面拟合精度表 4 分析可知, 表 4 中各响应目标的决定系数均达到 0.9 以上, 满足工程运用的需要。分析表明, 本文构建的二阶多项式响应面近似模型可代替实际模型进行优化计算求解。

3.4 建立夹爪优化数学模型

对夹爪进行优化时, 需保证其能够稳定运行精调轨距施工作业, 即夹爪需要满足强度和刚度要求。选

定约束条件为轨距精调允许偏差值和 Q235 材料许用应力,即最大变形量不能超过轨距精调允许偏差值,最大等效应力不超过材料的许用应力;夹爪质量(P_8)为第一目标函数,最大变形量与允许偏差值之间的余量远大于等效应力的余量,因此选取最大等效应力(P_{10})为第二目标函数,最大变形量(P_9)为第三目标函数;夹爪的参数尺寸 $P_1 \sim P_7$ 作为目标函数的自变量,可建立夹爪优化数学模型为:

$$\begin{aligned}
 P = P_i &= [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7] \\
 P_i &\leq P_i (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) \leq \bar{P}_i \\
 \min f_1(P) &= m(P) = \min m_{\max}(P) \\
 \min f_2(P) &= F_{\max}(P) = \min F_{\max}(P) \\
 \min f_3(P) &= X_{\max}(P) = \min X_{\max}(P) \\
 \text{s. t. } f_2(P) &= F_{\max}(P) \leq [\sigma] \\
 \text{s. t. } f_3(P) &= X_{\max}(P) \leq [\chi]
 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, P_i 表示设计变量; \bar{P}_i 表示设计变量下限; \bar{P}_i 表示设计变量上限; $m(P)$ 表示夹爪质量; $F_{\max}(P)$ 表示夹爪最大等效应力; $X_{\max}(P)$ 表示夹爪最大变形量; $[\sigma]$ 表示许用应力,即 Q235 材料屈服强度 235 MPa; $[\chi]$ 表示轨距精调允许偏差值,为 1 mm。

3.5 多目标遗传算法求解

对夹爪进行优化设计,首要目标是减轻其质量、即轻量化设计,其次是等效应力和变形量。质量降低时,会在某种程度上致使等效应力或变形量变大,这是个多变量间负相关的多目标优化问题。

多目标优化问题可用传统和智能两种优化方法求解。传统方法是将多目标优化问题转化为单目标优化问题,逐一求解单目标,进而解决多目标问题,但各目标之间的权重不易分配,通常受试验者主观影响较大;智能优化方法则是利用遗传算法、粒子群算法等进行求解。

Holland^[20]在 20 世纪 60 年代首次提出一种可以模仿生物演化过程的全局寻优算法,即遗传算法。遗传算法可在求解时对搜索过程进行控制,寻找到

最优解。其中,多目标遗传算法(MOGA)是 Fonseca 等学者^[21]在其基础上提出来的。MOGA 具有可同时优化多个目标函数的特点,执行容易且效率高,是目前求解优化问题常见的算法之一。MOGA 算法优化流程如图 19 所示。

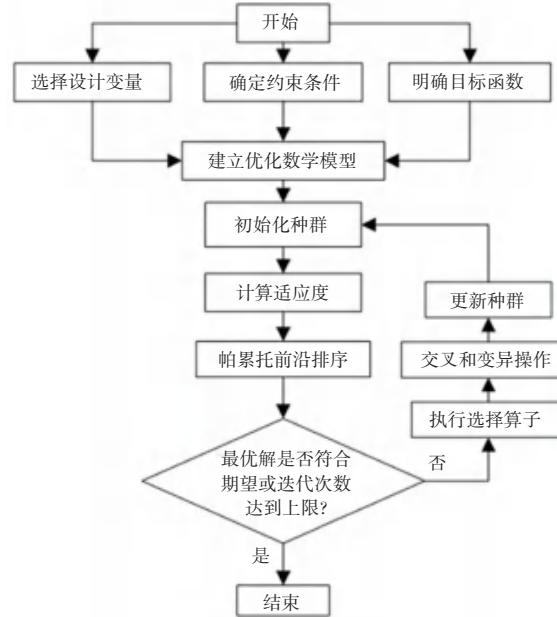


图 19 MOGA 遗传算法优化流程

Fig. 19 Optimization process of MOGA genetic algorithm

在前述响应面代理模型的基础上,用 MOGA 遗传算法对夹爪优化数学模型进行求解,设置参数评估次数为 2 000,初始样本点数为 100,迭代样本数为 100,最大迭代数为 3。

因多目标优化问题的目标函数之间有冲突性,所以无法出现一个解使所有的目标函数达到最优。Pareto 最优解是满足主要优化目标的同时,必削弱其他至少 1 个优化对象的解。多目标优化问题的解不具有唯一性,是一个集合,也称为 Pareto 最优解集^[22]。需要在解集中找出一个最佳平衡点,在 Response Surface Optimization 模块中会生成 3 组优化推荐候选点,见表 5。

表 5 设计优化结果前后对比

Table 5 Comparison of results before and after design optimization

方案	设计变量/mm							响应目标		
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8/kg	P_9/mm	P_{10}/MPa
1	147.61	29.872	21.558	40.965	34.146	102.710	23.425	5.6710	0.12195	109.29
2	145.27	29.872	21.562	38.784	34.234	83.017	16.225	6.1881	0.10911	102.95
3	147.63	29.501	21.566	41.957	42.040	106.550	23.675	5.4289	0.12996	112.62

表 5 为通过多目标遗传算法求解后生成的 3 组优化设计方案,综合考虑夹爪的制造工艺以及本次

优化设计的目标函数。首要目标为质量优化,其次为夹爪等效应力优化。选择候选方案 1 为设计变量

的最佳参数方案。

但由于设计方案的尺寸不规整, 不利于加工制造, 需对数据进行圆整。在进行尺寸圆整时, 应根据具体情况进判断和选择, 以确保设计符合加工制造条件, 并满足国家和行业标准的要求^[23]。对方案 1 的设计变量数据进行圆整处理后再次进行静力学仿真, 得到合位移云图和等效应力云图如图 20、图 21 所示。

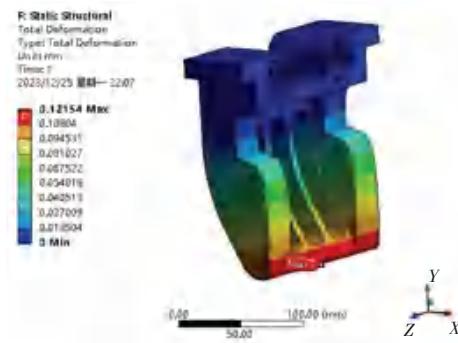


图 20 圆整尺寸夹爪合位移云图

Fig. 20 Cloud image of the displacement of the rounded gripper

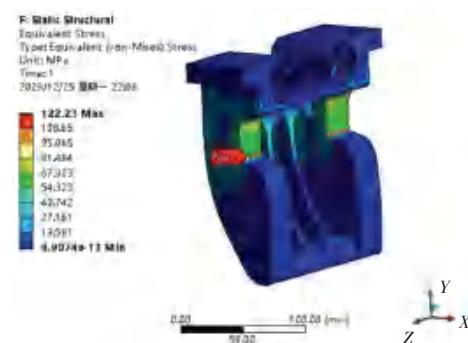


图 21 圆整尺寸夹爪等效应力云图

Fig. 21 Equivalent stress cloud diagram of the rounded gripper

将优化前后尺寸的夹爪对应的性能指标罗列在一起进行对比, 见表 6。

由表 6 可知, 多目标遗传算法优化后的夹爪最大变形量增加了 0.006 93 mm, 最大等效应力减小了 8.63 MPa, 远小于材料的许用应力。夹爪质量相比于二次设计减少了 16.8%, 优化设计效果明显, 满足优化目标。

表 6 2 次优化前后各参数与性能指标对比结果

Table 6 Comparison results of parameters and performance indexes before and after two optimizations

方案	设计变量/mm							性能指标		
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8/kg	P9/mm	P10/MPa
优化前	165.0	25.0	25	35.0	37.5	85.0	20	6.826 3	0.114 61	130.86
优化后	148.0	30.0	21	41.0	35.0	103.0	23	5.679 9	0.121 54	122.23
变化值	17.0	-5.0	4	-6.0	2.5	-18.0	-3	1.146 4	-0.006 93	8.63
变化率/%	10.3	-16.7	16	-17.1	6.7	21.2	-15	16.800 0	-6.050 00	6.59

4 结束语

(1) 本文通过对轨距精调流程以及施工情况的分析, 设计一种轨距精调车。并针对其上的轨距精调机构, 对其夹爪部件进行了初设计及有限元静态仿真。

(2) 对夹爪静态特性分析, 满足刚度强度要求, 并有冗余。据此可对夹爪进行拓扑优化, 结果分析后再次设计夹爪进行静力学分析验证, 夹爪满足优化目标, 但还存在优化空间。

(3) 使用 CCD 试验设计方法对设计变量进行试验制定, 并根据所得 79 组试验数据建立设计变量与目标响应值, 即夹爪质量、最大变形量、最大等效应力之间的响应面代理模型, 为夹爪的下步优化提供数学模型条件。

(4) 以夹爪的参数尺寸为自变量, 轨距允许偏差

值和许用应力为约束条件, 夹爪质量、最大等效应力、最大变形量为目标函数构建数学模型, 利用 MOGA 遗传算法求解。对结果分析可知, 夹爪质量相比于优化前减少了 16.8%, 最大等效应力减小了 8.63 MPa, 远小于许用值。优化效果显著, 且优化后的夹爪满足轨距精调作业的使用要求。

参考文献

- [1] 李阳腾龙. 高速铁路轨道精测精调及其平顺性优化研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [2] 秦鑫, 余朝刚, 许悦, 等. 无砟轨道轨距精调小车的控制系统 [J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(7): 115-118.
- [3] 朱毅然. 无砟轨道轨距精调车的设计与优化研究 [D]. 上海: 上海工程技术大学, 2023.
- [4] 王学良, 董奥辉, 黄会男, 等. 转轮式日粮混合机叶板结构优化设计 [J]. 饲料工业, 2024, 45(5): 7-16.
- [5] 马新武, 赵昌德, 王广春, 等. 高压共轨锻件预制坯的形状优化设计 [J]. 锻压技术, 2021, 46(12): 1-5.

- [6] 陈鹏,雷正保. 基于拓扑优化超高性能混凝土护栏多目标稳健性设计[J]. 机械强度,2023,45(6):1371-1379.
- [7] 张宇,林毓培,舒雷,等. 激光切割机横梁多工况多目标动力学拓扑优化[J]. 制造技术与机床,2022(11):65-70.
- [8] 万长东,戴晨旭,鲁春艳,等. 电动汽车电池箱体结构分析与轻量化设计[J]. 电源技术,2023,47(9):1235-1238.
- [9] 沈仙法,郁锦涛,张月,等. 半地半轨双层立式停车装置框架多目标结构优化[J]. 机械设计与制造,2024(4):248-253.
- [10] 张希恒,鱼荣芳,张弛,等. 基于响应面法的超低温球阀 PCTFE 阀座结构优化设计分析[J]. 机械强度,2023,45(5):1166-1173.
- [11] KANG S C, KOH H M, CHOO J F. An efficient response surface method using moving least squares approximation for structural reliability analysis[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2010, 25(4): 365-371.
- [12] 马明正. 高速铁路无砟轨道钢轨精调过程控制关键技术[J]. 铁道标准设计,2014,58(3):21-24.
- [13] 戴成新,郑磊,黄小根,等. 铁路基础设施综合维修·综合知识[M]. 北京:中国铁道出版社,2021.
- [14] 中铁八局集团有限公司. 高速铁路轨道工程施工质量验收标准[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.
- [15] 朱毅然,余朝刚. 轨距调整器夹爪轻量化优化设计[J]. 机械设计与研究,2021,37(1):195-199.
- [16] MONTGOMERY D C. Design and analysis of experiments[M]. 6 版. 傅钰生,张健,王振羽,等译. 北京:人民邮电出版社,2009.
- [17] 周萍. 基于响应面法的车内结构噪声控制研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.
- [18] 李莉,张赛,何强,等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索,2015,34(8):41-45.
- [19] 李昆,王宗彦,李梦龙,等. 基于 MOGA 的拉拔机主机框架轻量化设计[J]. 锻压技术,2023,48(11):151-158.
- [20] HOLLAND J H. Outline for a logical theory of adaptive systems[J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1962, 9(3): 297-314.
- [21] FONSECA C M, FLEMING P J. Genetic algorithms for multi-objective optimization: Formulation discussion and generalization [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. New York: ACM, 1993:416-423.
- [22] 张志远,朱祥龙,董志刚,等. 基于多目标优化的砂轮杆结构轻量化设计研究[J]. 制造技术与机床,2023(10):72-76.
- [23] 刘兴燕,侯皎建,张一博. 防汛抢险装袋机车架结构受力分析与优化设计[J]. 人民黄河,2023,45(12):47-53.