

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.013

轨道式巡检机器人 ABS 轮架轻量化设计和 FDM 制造

刘泽昊¹, 苏亮^{1,2}, 何雨桐¹, 王俊杰³, 姚婷菲¹, 张考¹

(1. 湘潭大学机械设计与力学学院, 湖南湘潭 411105; 2. 复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心, 湖南湘潭 411105;

3. 湘潭大学国际交流学院, 湖南湘潭 411105)

摘要: 针对巡检机器人轻量化设计, 对轨道式巡检机器人轮架进行丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)材料替换与拓扑优化, 并采用熔融沉积成型(FDM)工艺进行制造。首先将轮架更换为 ABS 材料; 其次采用固体各向同性材料惩罚模型对轮架进行拓扑优化并筛选出最优形状控制: 体积约束为 10% 下的 Radial (X -direction); 再重构出最优形状控制下的轮架模型。经仿真模拟获悉, 优化后的 ABS 轮架相较于优化前减重了 90.60%, 且满足安全需求。最后通过 FDM 工艺、使用太尔时代 UP 300 打印机、调整打印参数及模型摆放位置后制造出 ABS 轮架实物模型。轻量化设计后的 ABS 轮架与原轮架相比, 质量大幅减轻、安全系数符合设计要求、所受应力远小于 ABS 材料的屈服应力。研究结果表明, 通过更换 ABS 材料后再对轮架进行拓扑优化, 可在保证使用要求的前提下, 大幅度减轻轮架质量, 提升其运行效率与经济性并增强复杂环境下的适应性, 为轨道式巡检机器人轮架轻量化提供了新思路。

关键词: 轨道式巡检机器人; 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物轮架; 轻量化; 拓扑优化; 熔融沉积成型工艺

中图分类号: TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0098-08

Lightweight design and FDM manufacturing of wheel frame for rail inspection robots using ABS

LIU Zehao¹, SU Liang^{1,2}, HE Yutong¹, WANG Junjie³, YAO Tingfei¹, ZHANG Kao¹

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. Engineering Research Center of Complex Tracks Processing Technology and Equipment of Ministry of Education, Xiangtan 411105, China;

3. School of International Exchange, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract : A lightweight design of an inspection robot was pursued by replacing and topologically optimizing the wheel frame of a rail-type inspection robot, followed by fabrication via fused-deposition modelling (FDM). Initially, the wheel frame material was substituted with acrylonitrile butadiene-styrene copolymer (ABS). Subsequently, the solid isotropic material with penalization model was employed for topology optimization, and the optimal shape control Radial (X -direction) under a 10% volume constraint was selected. The wheel-frame geometry was reconstructed under this optimal control, and simulations revealed that the optimized frame has reduced its weight by 90.60% compared to the previous version, and it also meets safety requirements. Finally, an ABS prototype of the wheel frame was successfully printed with a Tiertime UP 300 machine by adjusting the printing parameters and model orientation. Compared with the original wheel frame, the lightweight ABS wheel frame has greatly reduced the mass, the stress is far less than the yield stress of ABS material, and the safety factor meets the design requirements. The research results show that the topology optimization of the wheel frame after replacing the ABS material can greatly reduce the quality of the wheel frame, improve its operation efficiency and economy and enhance the adaptability in complex environment under the premise of ensuring the use requirements, which provides a new idea for the lightweight of the wheel frame of the track inspection robot.

Keywords : orbital intelligent inspection robot ; acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer wheel frame ; lightweight ; topology optimization ; fused deposition modeling process

巡检机器人凭借高分辨率摄像头与传感器实时采集数据, 由中央智能平台完成分析、存储、共

享、诊断及预警功能, 其监控范围、灵活性与智能性远超人工^[1]。相比于巡检机器人, 人工巡检不仅

基金项目: 湖南省教育厅教学改革研究项目(HNJG-2022-0587)

通信作者: 苏亮, 高级实验师, 主要从事机械设计制造、创新创业教育的研究

收稿日期: 2025-10-17

引用格式: 刘泽昊, 苏亮, 何雨桐, 等. 轨道式巡检机器人 ABS 轮架轻量化设计 FDM 制造[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 98-105.

LIU Zehao, SU Liang, HE Yutong, et al. Lightweight design and FDM manufacturing of wheel frame for rail inspection robots using ABS[J].

Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 98-105.

开销大、效率低,还难以在第一时间捕捉设备异常,无法满足企业对生产与安全的更高要求^[2],因此,巡检机器人将逐步代替人工巡检。其中,轨道式巡检机器人由于定位精度高、运行稳定、长期运行成本低等诸多优点被广泛使用^[3]。轮架是轨道式巡检机器人的核心部件,承担支撑重量、导向与传力的功能,随着巡检速度提高、轨道跨距增大,其设计优劣将影响整机续航、定位精度与动态稳定性。

近年来,巡检机器人的轻量化研究不断发展。孟娜娜等^[4]提出了一种基于轨道摩擦式驱动和齿轮齿条啮合驱动混合的巡检机器人,对其关键承载零件(底板、托架)进行了有限元分析,并将底板的厚度减小了1 mm,以实现轻量化;宋克^[5]研究出一种TBM连续皮带机巡检机器人,在材料方面采用了6061铝合金,以保证强度、减轻质量;Jin等^[6]对于新型混合巡检机器人行走装置进行了优化,其中对主要承载结构(机械臂)进行了镂空设计以保证连接强度、减轻行走机构整体质量。上述研究者分别通过减薄关键承力截面、替换轻质合金以及引入镂空拓扑三项措施,对巡检机器人的主要承载构件实施轻量化改造。以上说明当前巡检机器人轻量化研究仍停留在碎片化阶段:仅通过局部减薄、换材或镂空等单一手段对承重件做减法,缺乏系统化流程,常导致效率低下、成本高昂^[7],且设计结果的强度常远高于预期的结构强度,导致轮架结构往往存在大量冗余,增加了设计和制造成本,因此有必要探索新的设计方案。

熔融沉积成型(FDM)工艺是用于3D打印的一种方法,这项技术属于增材制造工程类的制造方法之一,增材制造技术可以在适当管理材料的同时创建各种复杂的形状和结构,从而减少浪费,并在许多方面优于传统制造方式,因此越来越受欢迎^[8]。在FDM技术中常用的热塑性材料有:聚乳酸(PLA)、聚酰胺(PA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)和聚碳酸酯(PC)等^[9]。其中ABS材料具有良好的力学性能,例如抗冲击性、耐热性、耐化学性和耐磨性,因此适合于巡检机器人的承重结构^[10]。

涂晴等^[11]以越野车塑料休息踏板振动传递函数为目标进行拓扑优化,发现优化后的踏板振动传递函数灵敏度减小明显,显著改善了踏板振动问题;李恒等^[12]在四旋翼无人机机身设计中基于质量最小

原则进行了拓扑优化,在满足应力、位移和最小安全系数的前提下削减54%的结构质量;熊婷等^[13]针对四旋翼无人机实现轻量化和提升力学性能的需求,采用拓扑优化技术对承载能力最弱工况下的四旋翼无人机重新设计,优化后模型的质量比优化前减轻了48%。因此,拓扑优化不仅具备扎实的理论依据与充分的仿真验证,更在工程实践中表现出良好的通用性和扩展性,故适用于轨道式巡检机器人轮架的轻量化设计。

为了使轨道式巡检机器人轮架的设计效率更高、成本更低、结构冗余更少,本研究以轨道式巡检机器人的轮架为研究对象,采用Inspire软件的运动模块对轮架进行载荷分析,基于变密度法这一算法,对轮架进行拓扑优化设计,提出了基于Inspire的巡检机器人轮架拓扑优化设计方法。

1 拓扑优化理论基础

拓扑优化面向的是连续体或离散体这两类结构形式,且不依赖初始构型,在给定载荷、性能与体积约束下重新分布材料,可实现高性能、轻质、多功能结构的最佳布局,是机械制造节能减碳的核心手段^[14]。以轨道式巡检机器人轮架为研究对象、针对连续体结构,开展其优化设计方法的研究。这类最优化问题的数学建模方法有很多种,在结构拓扑优化领域,虽已发展出均匀变化法、变密度法、渐进结构优化法等多种算法,但在结构优化领域,该方法凭借高精度与计算效率,已成为应对复杂工程难题的利器^[15]。

变密度法是基于材料密度变化的优化方法,其核心在于构造一种虚拟材料,使其弹性模量随单元相对密度在0到1内连续可调,从而将离散拓扑问题转化为可微的连续优化问题。通过构建材料物理属性(例如弹性模量)与密度之间的函数关系,原本离散的拓扑优化问题被转化为一个连续变量的优化问题。在该方法中,设计区域被离散为若干单元,并以每个单元的相对密度作为设计变量进行优化^[16]。运用基于变密度法的固体各向同性材料惩罚(SIMP)模型,将拓扑优化表述为数学规划问题,并借助数学规划算法对设计变量进行迭代更新^[17]。其中,不同的优化目标能改变待优化对象的数学模型。将轮架的最大刚度视为优化目标,同时将结构设计空间的体积分数设定为优化过程中的约束条件,其数学模型见式(1)。

$$\min C = U^T K U, \frac{V}{V_0} \leq V_{\max},$$

$$0 \leq \rho_i \leq 1, (i = 1, \dots, N) \quad (1)$$

式中: C 为结构的柔度; U 为节点位移向量; K 为结构的整体刚度矩; V 为优化后结构的体积; V_0 为设计域初始体积; $V_{\max}$ 为体积分数上限; ρ_i 为第 i 个单元的相对密度^[18]。

在上述优化理论的指导下,对轨道式巡检机器人轮架开展拓扑优化分析,在既定设计域内探寻材料的最优分布方案,以同步提高结构强度并实现减重目标。轨道式巡检机器人轮架轻量化流程如图1所示。

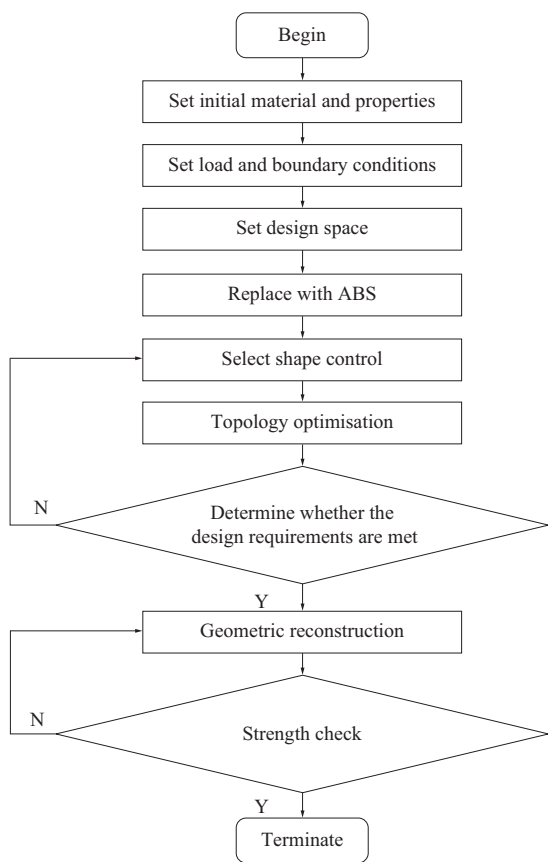


图1 轮架轻量化设计流程

Fig. 1 Wheel frame lightweight design process

2 行走机构约束与初始强度分析

2.1 轨道式巡检机器人的行走机构

图2为轨道式巡检机器人行走系统总装图,图3为轨道式巡检机器人行走机构。

Inspire把3D建模、运动仿真与拓扑优化合三为一,设定载荷与边界后,电脑即自动优选材料,大幅压缩设计工时^[19]。所有拓扑优化与轻量化分析均在Inspire上完成,使用全国大学生生成图大赛组委会统

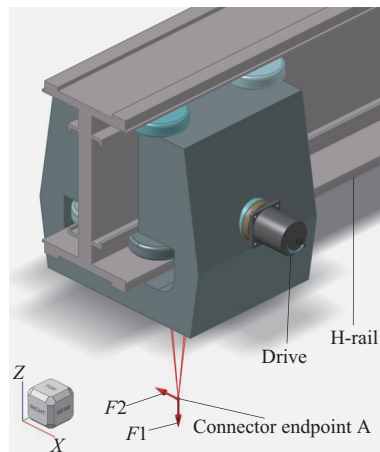
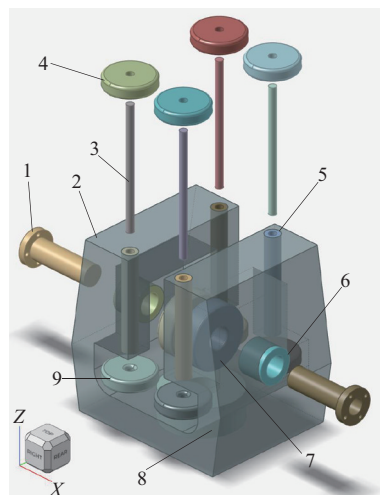


图2 总装图

Fig. 2 Final assembly drawing



1—Active axle; 2—Wheel frame; 3—Auxiliary wheel axle; 4—Upper auxiliary wheel; 5—Non-design space I; 6—Non-design space II; 7—Active wheel; 8—Non-design space III; 9—Lower training wheel

图3 行走机构爆炸图

Fig. 3 Exploded view of the running mechanism

一发放的教育授权账号。

结合轨道式巡检机器人的实际使用场景,对以下基础参数进行初始化配置。

(1)载荷设置。所受载荷通过柔性连接器连接, Connector Endpoint A 的坐标为 (7.52 mm, -70.75 mm, -100 mm), 在 A 点位置同时受到两个方向的力, 分别为 $F1$: 力大小为 100 N, 方向为 $-Z$; $F2$: 力大小为 100 N, 方向为 $-X$, 如图2所示。

(2)重力设置。设置重力方向为 $-Z$ 方向。

(3)驱动设置: 共计1个驱动, 如图2所示, 该驱动为转动驱动, 驱动施加于 Active axle, 驱动跟随机构运动, 取消中心轴约束。驱动方程曲线为单波, 驱动类型为速度, 趋势巡检机器人机构向 $+Y$ 方向

移动后返回原位。驱动的轮廓曲线的点击转速为 60 r/min,开始时间为 0 s,时间间隔为 5 s,增量时间为 0.05 s,结束时间为 5 s,输出率为 10 Hz。

(4)地面设置。设置“H-rail”为地平面,如图 2 所示。

(5)材料设置。设置轮架(Design space 与 Non-design space)材料为铝合金 7075-T6,其拉伸弹性模量为 7.45×10^4 MPa,泊松比为 0.33,密度为 2.8×10^{-3} g/mm³,屈服强度为 413 MPa,轮架原始质量为 2 989 g。

(6)刚体组设置。如图 3 所示,每个 Auxiliary wheel axle 与接触其的两个 Upper auxiliary wheel 为一个刚体组,共四组;每个 Active axle 与接触器的一个 Active wheel 为一个刚体组,共两组;Wheel frame (Design space)与 4 个 Non-design space I、2 个 Non-design space II、Non-design space III 为一个刚体组,共计七个刚体组。

(7)连接设置。每个 Auxiliary wheel axle 与接触其的 Non-design space I 为一个连接,共四个,连接方式为激活的圆柱;每个 Active axle 与接触其的 Non-design space II 为一个连接,共两个连接,连接方式为激活的合页。

(8)摩擦设置。每个主动轮与导轨为一个接触,共计两个接触,接触类型为滚动摩擦,其静态系数为 0.8、动态系数为 0.5、静摩擦转变速度为 1 mm/s、摩擦转变速度为 1.5 mm/s;每个辅助轮与导轨为一个接触,共计八个接触,接触类型为滚动摩擦,其静态系数为 0.15、动态系数为 0.01、静摩擦转变速度为 1 mm/s、摩擦转变速度为 1.5 mm/s。其余参数默认。

2.2 初始强度分析

添加上述载荷条件,对行走机构进行初始强度分析,分析单元尺寸设置为 6 mm,计算速度/精度选择更准确,勾选使用 5 个最大载荷点击运行进行分析。

借助 Inspire 软件完成初始结构的强度分析,表 1 汇总了由此获得的最大位移量、最小安全系数以及最大 Mises 等效应力。

表 1 初始强度分析结果

Tab. 1 Initial strength analysis results

Max displacement/mm	Min factor of safety	Max von Mises stress/MPa	Mass/g
4.736×10^{-2}	57.7	7.154	2 989

3 轨道式巡检机器人轮架的轻量化设计

3.1 ABS 材料

将轮架(包括 Design space 与 Non-design space)材料更改为 ABS,其拉伸弹性模量为 2×10^3 MPa,泊松比为 0.35,密度为 1.06×10^{-3} g/mm³,屈服强度为 45 MPa,更换材料后的轮架质量为 1 131 g,相比于原始材料实现了 62.16%的减重。对更换材料后的轮架进行强度分析,得到结果见表 2。由表 2 可知,更换 ABS 材料后仍满足轮架的设计要求。

表 2 更换材料后强度分析结果

Tab. 2 Strength analysis results after changing material

Max displacement/mm	Min factor of safety	Max von Mises stress/MPa	Mass/g
2.066	5.2	8.691	1 131

3.2 形状控制方案

考虑巡检机器人的整体装配要求,指定部件的主体为 Design space 进行拓扑优化,如图 4 所示。

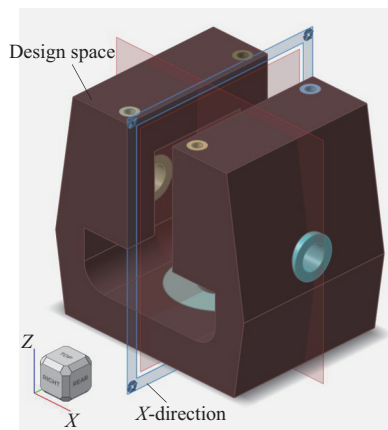


图 4 设计空间设置

Fig. 4 Design space settings

Inspire 软件中的形状控制功能是设计优化的主要工具,主要用于在拓扑优化过程中施加额外的设计约束,以确保生成的结构不仅能满足力学性能的要求,还符合制造工艺和设计意图。由于优化后的模型可能存在片状结构或不连续性,从而阻碍后续模拟的完成,因此有必要通过移动软件提供的拓扑滑块来调整质量,以满足要求。因此,优化后质量可能会出现偏差。设置体积约束为 30%,最小厚度为默认,优化目标为最大刚度。由于轮架为十字对称结构,故所有的形状控制方案都添加对称控制,且对称形式与轮架相同,各种形状控制方式的拓扑优化结果见表 3。由表 3 可知,方案 c 优化后的质量最小,质量为 419 g,因此形状控制方案选择 Radial (X-direction)。

表 3 形状控制方案及优化结果

Tab. 3 Shape control scheme and optimisation results

Scheme	Shape control	Max displacement/mm	Min factor of safety	Max von Mises stress/MPa	Mass/g
a	Single draw(X-direction)	3.835	3.3	13.50	471
b	Split draw(X-direction)	3.834	3.3	7.167	470
c	Radial(X-direction)	4.304	3.8	11.97	419
d	Single draw(Y-direction)	3.653	1.9	23.28	530
e	Split draw(Y-direction)	3.650	2.0	22.62	530
f	Radial(Y-direction)	3.342	3.8	11.95	543
g	Single draw(Z-direction)	3.643	3.0	15.10	522
h	Split draw(Z-direction)	4.117	2.9	15.47	457
i	Radial(Z-direction)	3.868	2.9	15.31	458
j	Milling	2.829	6.6	6.845	531
k	Overhang(base surface)	5.469	2.3	19.98	528
l	Overhang(top surface)	9.280×10 ⁷	1.6	28.05	535

3.3 拓扑优化方案

为了探究最优设计结果,以表 3 中的优化方案 c-Radial (X-direction)作为形状控制方案,并以最大刚度作为优化目标来制定优化方案。其体积约束分别设定为 10%,13%,15%,20%,30%,40%。

以 Radial (X-direction)为形状控制方式、厚度约束为 6 mm,采用不同质量目标的优化方案,进行拓扑优化,优化结果见表 4 和图 5。由表 4 与图 5 可知,随体积保留率由 10% 上升至 40%,结构质量由 279 g 上升至 560 g (增重 50.18%);最大位移随之从 8.815 mm 降至 2.970 mm,增幅约 3 倍,表明刚度随增材程度的加剧而明显增高,但均符合安全需求。最大 Mises 等效

应力整体呈下降态势(25.94 MPa 降至 10.92 MPa),但均远低于 ABS 材料的屈服强度 45 MPa,材料安全裕度充足;安全系数从 1.7 增至 4.1,说明即使保留 10% 体积,结构也未出现强度失效风险。

基于轻量化优化目标,体积保留率为 10% 的方案优化后的轮架质量最轻(279 g),且最小安全系数满足使用要求。该方案优化后的结构形状如图 6 所示。

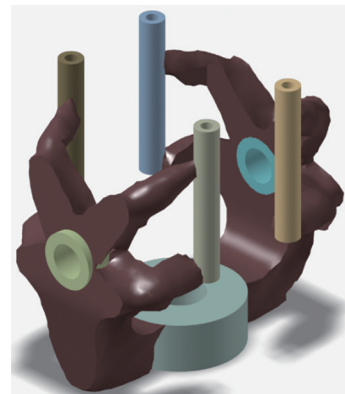


图 6 优化后结构

Fig. 6 Optimised post-structure

3.4 几何重构

由于轮架为十字对称结构,使用 Poly NURBS 进行手动重构难以保证对称性的精确实现^[20]。所以在对轮架进行几何重构时采用在原件上进行几何切除的方法来实现几何重构。最终几何重构后的模型如图 7 所示。

3.5 强度校核

对巡检机器人轮架结构的几何重构结果进行强度校核,单元尺寸设置为 6 mm,计算速度/精度选择更加准确,勾选使用 5 个最大载荷,点击运行进行分析。强度校核结果见表 5。

表 4 拓扑优化结果

Tab. 4 Topology optimization results

Volume restraint/%	Max displacement/mm	Min factor of safety	Max von Mises stress/MPa	Mass/g
10	8.815	1.7	25.94	279
13	8.321	2.2	20.76	283
15	7.105	2.2	20.66	337
20	6.066	2.0	22.19	337
30	3.697	3.5	13.03	477
40	2.970	4.1	10.92	560

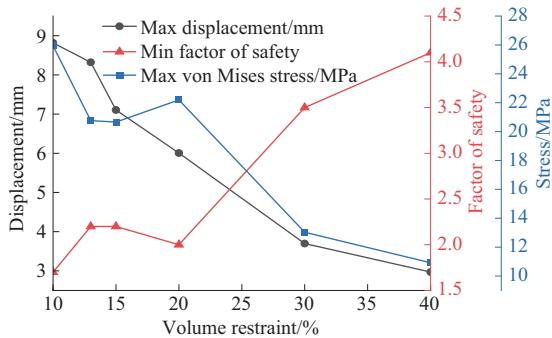


图 5 优化结果折线图

Fig. 5 Optimize result line chart

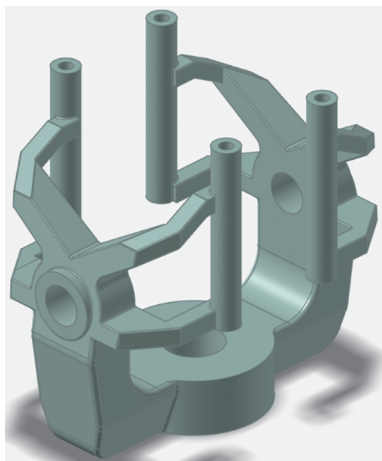


图7 手动几何重构模型

Fig. 7 Manual geometric reconstruction model

表5 强度校核结果

Tab. 5 Strength verification results

Max displacement/mm	Min factor of safety	Max von Mises stress/MPa	Mass/g
10.07	1.6	27.29	281

图8中的云图显示了位移、安全系数、Mises等效应力的变化情况。

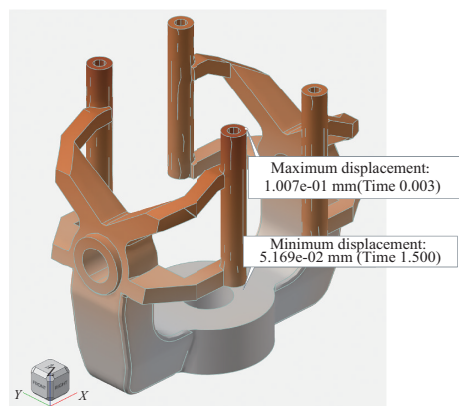
将表1中的初始强度分析结果与表5中优化后的强度分析结果进行比较,能明显看出优化后轮架的强度性能有所下降,但是轮架满足任务的要求,并且它们的质量得到了优化。与原始模型相比,优化后的轮架避免了结构强度的过度冗余。

通过选择形状控制方案、选择拓扑优化方案、几何重构,优化后的轮架质量为281 g (Design space 171 g+Non-design space 110 g),与初始轮架相比较(质量为2 989 g),质量减轻了90.60%。

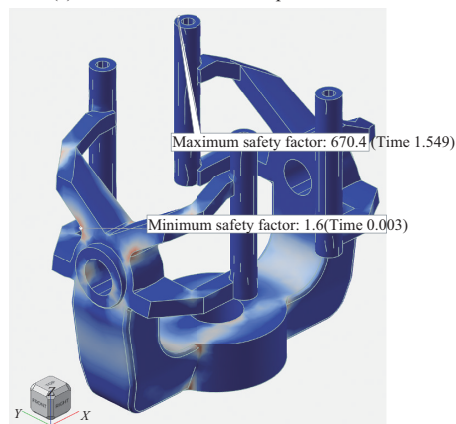
3.6 轻量化校核

轨道式巡检机器人轮架部件在优化前的质量为2 989 g,轻量化再设计之后的质量为281 g,实现了90.60%的减重,且最大位移为10.07 mm,最大Mises等效应力为27.29 MPa,最小安全系数为1.6,强度不超过材料的屈服应力,满足实际的强度需求。

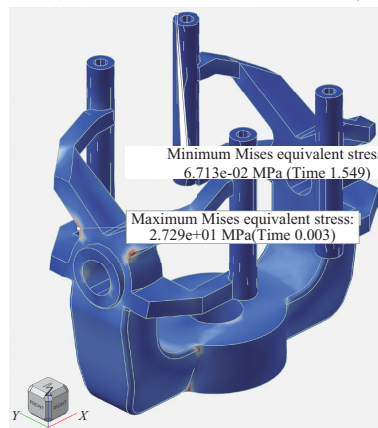
研究结果为轻量且低成本的轨道式巡检机器人轮架结构设计的实现提供了新方案。对轨道式巡检机器人的轮架进行轻量化设计,能够显著提升其运动灵活性和响应速度,降低能耗并延长续航时间,同时增强机器人在复杂环境下的稳定性和适应性,减少机械损耗。优化其整体结构并降低成本,从而实现更高的运行效率和经济性,为机器人在复



(a) Reconstructed model displacement



(b) Reconstructed model factor of safety



(c) Reconstructed model von Mises stress

图8 强度校核结果

Fig. 8 Strength verification results

杂巡检任务中的高效应用提供有力保障。

4 FDM增材制造

FDM工艺能够快速响应设计变更。如果在验证过程中发现设计有缺陷,能迅速修改设计文件并重新打印,而不需要像传统金属加工那样重新制作模具或者重新调整复杂的加工程序^[21]。

采用太尔时代的UP 300打印机,打印材料采用太尔时代的ABS材料,打印软件采用UPStu-

dio2.6.75.627,将轻量化再设计后的轨道式巡检机器人轮架结构模型进行3D打印制作。将模型的STL文件导入软件UPStudio2.6.75.627中,根据模型特点进行合理摆放,能够提高打印件强度、满足打印要求,并且容易进行后处理,摆放位置如图9所示。

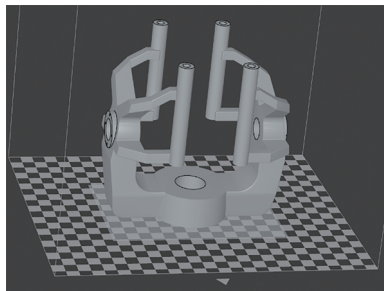


图9 优化模型摆放位置

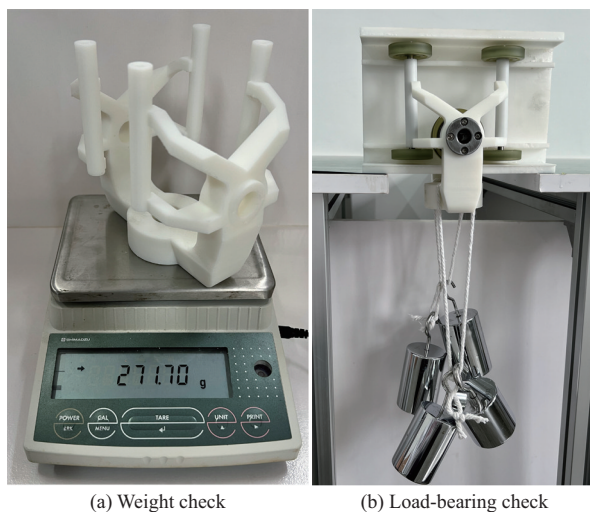
Fig. 9 Optimize model placement

根据受力分析,选定层片厚度为0.2 mm,调整比例1.00,保证其表面的光洁度;为满足其强度要求,轮廓设置1,原始模型采用99%的填充方式^[22],质量选择默认,补偿高度0,勾选非实体模型;设置密闭层数为3层,角度为45°;设置支撑层数为3层,角度为30°,面积为3 mm²,间隔为8 lines,合理设置打印参数,能提高打印件的强度^[23]。

由于模型在打印完成后还需经过去除支撑、砂纸打磨等后处理工序以降低表面粗糙度,因此其最终重量可能会与软件模拟结果存在一定差异^[24]。如图10a所示,处理后的轨道式巡检机器人轮架质量为271.70 g;如图10b所示,组装后的轨道式巡检机器人行走系统承受了4个1 kg砝码对其的竖直作用力。经检验,使用ABS材料通过FDM工艺制造出的优化后轨道式巡检机器人轮架的外观与尺寸符合设计要求、与其他零件配合合理且得到了显著的减重效果。

通过FDM制造出的ABS轮架相较于原始轮架显现出诸多优点。质量上大幅度减轻,可显著降低惯性力、提升能效;材料成本降低,ABS材料价格仅为铝合金的一半甚至更低;制造成本降低,使用FDM一次成型,减少去毛刺、钻孔等二次工序;内阻尼高,可吸收振动与噪声,提升噪声、振动与声振粗糙度(NVH)性能;FDM制造温度远低于压铸、锻造,可降低碳排放;制造速度快,20 h内即可交付,可用于小批量试制、个性化定制。

相较于传统金属结构,通过FDM一体化成型的



(a) Weight check

(b) Load-bearing check

图10 FDM制造的ABS轮架

Fig. 10 ABS wheel frame manufactured by FDM

ABS轮架,在质量、成本与能效方面表现出诸多优点:轮架质量显著减轻,惯性力随之减小,整车能耗下降;ABS原料价格仅为铝合金的50%甚至更低,直接压缩材料成本;通过调整FDM参数可以降低初始表面粗糙度,以减少轮架的后处理,制造费用同步降低;ABS内阻尼高,可有效吸收振动与噪声,改善NVH性能;成型温度远低于压铸或锻造,碳排放大幅降低;单件可在20 h内完成,亦适用于小批量试制及个性化定制。

5 结论

针对巡检机器人轮架轻量化需求,对目前应用较为广泛的轨道式巡检机器人轮架进行了综合性的轻量化设计,在满足轨道式巡检机器人使用性能的基础上进行ABS的材料更换与拓扑优化,基于优化方案以最大刚度为优化目标,采用形状控制方案为10%体积约束下的Radial(X-direction),厚度约束为6 mm,再经过几何重构,得到再设计的轻量化模型。最终在满足强度及安全系数的需求下,相对于原始模型实现了90.60%的减重,最后通过FDM工艺制造出轨道式巡检机器人ABS轮架,并校验其质量及合理性。研究结果为轨道式巡检机器人轮架结构轻量化再设计提供了一种新的设计思路,进而让轨道式巡检机器人获得更优的运行效能与经济回报,为它在复杂巡检场景中的高效运行奠定坚实支撑。

参考文献

- [1] KONIECZNA-FULAWKA M, KOVAL A, NIKOLAKOPOULOS G, et al. Autonomous mobile inspection robots in deep underground mining—The current state of the art and future perspectives[J].

- Sensors, 2025, 25(12). DOI:10.3390/S25123598.
- [2] 唐超权,佟秉航,唐玮,等.矿用钢丝绳捻向攀爬轮式巡检机器人设计[J].中国机械工程,2024,35(10):1 732–1 739.
TANG Chaoquan, TONG Binghang, TANG Wei, et al. Design of twisting climbing wheeled inspection robot for mining wire ropes [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(10):1 732–1 739.
 - [3] DONG L J, CHEN N C, LIANG J W, et al. A review of indoor-orbital electrical inspection robots in substations[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2023, 50(2):337–352.
 - [4] 孟娜娜,钟鹏程,雷超,等.基于功能分析的带式输送机自动巡检机器人设计[J].煤炭科学技术,2022,50(8):227–235.
MENG Nana, ZHONG Pengcheng, LEI Chao, et al. Design of automatic inspection robot for belt conveyor based on functional analysis[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8):227–235.
 - [5] 宋克. TBM连续皮带机托辊巡检机器人系统设计与实现[D].石家庄:石家庄铁道大学,2023.
SONG Ke. Design and implementation of inspection robot for rollers of TBM continuous belt[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
 - [6] JIN P, QIN X Y, LEI J, et al. Design and stability performance optimization of a novel hybrid inspection robot walking device for smart grid applications[J]. Alexandria Engineering Journal, 2024, 109:970–988.
 - [7] 王艳秋,郑宇飞,王雷,等.轨道交通车辆转向架模块化配置设计方法[J].城市轨道交通研究,2020,23(4):9–14.
WANG Yanqiu, ZHENG Yufei, WANG Lei, et al. Modular configuration design for rail transit vehicle bogie[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(4):9–14.
 - [8] KRISTIawan R B, IMADUDDIN F, ARIawan D, et al. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters[J]. Open Engineering, 2021, 11(1):639–649.
 - [9] DEWADA S S, TELANG A. A review of recently developed polymer composite materials for fused deposition modeling 3D printing[J]. Materials Research Express, 2021, 8(12). DOI:10.1088/2053-1591/AC3B13.
 - [10] IFTEKAR S F, AABID A, AMIR A, et al. Advancements and limitations in 3D printing materials and technologies: A critical review[J]. Polymers, 2023, 15(11). DOI: 10.3390/POLYM15112519.
 - [11] 涂晴,邓磊,申一方.某越野车塑料休息踏板振动问题的分析及优化[J].工程塑料应用,2025,53(4):69–75.
TU Qing, DENG Lei, SHEN Yifang. Analysis and optimization of vibration problem of plastic rest pedal of an off-road vehicle[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4):69–75.
 - [12] 李恒,严文凯,陈逸豪,等.基于拓扑优化的四旋翼无人机机身轻量化设计[J].工程塑料应用,2023,51(2):60–66.
LI Heng, YAN Wenkai, CHEN Yihao, et al. Lightweight design of four-rotor UAV fuselage based on topology optimization[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):60–66.
 - [13] 熊婷,钱波,胡珍涛,等.基于连续纤维增材制造工艺的四旋翼无人机拓扑优化[J].工程塑料应用,2023,51(10):76–84.
XIONG Ting, QIAN Bo, HU Zhentao, et al. Topology optimization of quadcopter unmanned aerial vehicle based on continuous fiber additive manufacturing process[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(10):76–84.
 - [14] 王磊佳.面向结构轻量化的拓扑优化方法及应用研究[D].湘潭:湖南科技大学,2023.
WANG Leijia. Research on topology optimization method for lightweight structure and its application[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2023.
 - [15] YAN L Z. Design of intelligent drill bit embedded structure based on multi-objective topology optimization method[J]. Journal of Engineering Research, 2025, 13(3):2 739–2 747.
 - [16] WAN C D, JIAO LV L, et al. Multi-material topology optimization based on multiple simp of variable density method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(2):749–759.
 - [17] LEIZ Z, DENGZ Y, LIANGY, et al. Hybrid method of SIMP and SAIP for reliability-based topology optimization considering strength failure under load uncertainty[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2025, 441. DOI: 10.1016/J.CMA.2025.117975.
 - [18] 高翔,王林军,杜义贤.改进的抑制灰度单元的拓扑优化方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2020,32(12):2 003–2 012.
GAO Xiang, WANG Linjun, DU Yixian. An improved topology optimization method for suppressing gray elements[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2020, 32(12): 2 003–2 012.
 - [19] 罗勇,杜平,朱丽君,等.基于Inspire软件的拓扑优化设计案例分析[J].制造技术与机床,2021(11):31–34.
LUO Yong, DU Ping, ZHU Lijun, et al. A case study of topology optimization design based on Inspire software[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(11):31–34.
 - [20] 段嘉晨.机翼一体化天线变形重构与传感器布局优化[D].西安:西安电子科技大学,2020.
DUAN Jiasheng. Deformation reconstruction and sensor layout optimization of wing integrated antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
 - [21] K. M. N, ACHARYA A, JAIN A, et al. Vibration and damping characteristics of 3D-printed lattice beams[J]. Mechanics of Materials, 2025, 210. DOI:10.1016/J.MECHMAT.2025.105448.
 - [22] JAWADH H, KORDANIN, BAGHERIA, et al. Optimization of 3D printing parameters for enhanced mechanical strength: Effects of glass fiber reinforcement and fill ratio using RSM and ANOVA [J]. Journal of Composites Science, 2025, 9(2). DOI: 10.3390/JCS9020063.
 - [23] MENCARELLI M, PUGGELLI L, INNOCENTI B, et al. Comparative analysis of the mechanical properties of eleven 3D printing filaments under different printing parameters[J]. Applied Mechanics, 2025, 6(3). DOI:10.3390/APPLMECH6030070.
 - [24] KANTAROS A, GANETSOS T, PETRESCU F I T, et al. Post-production finishing processes utilized in 3D printing technologies [J]. Processes, 2024, 12(3). DOI:10.3390/PR12030595.