

For citation: Ye Zi-Yi, Xu Qiao, Zhang Ming-Dong, Xie Yang, Wang Ze-Ling. Calculation and finite element simulation research on drum structure parameters of light cranes // Grand Altai Research & Education — Выпуск 1 (26)'2026 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2026.01) — EDN: <https://elibrary.ru/XNMRWD>

UDK 001.891.57

CALCULATION AND FINITE ELEMENT SIMULATION RESEARCH ON DRUM STRUCTURE PARAMETERS OF LIGHT CRANES

Ye Zi-Yi¹, Xu Qiao¹, Zhang Ming-Dong¹, Xie Yang¹, Wang Ze-Ling¹

¹ School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China

E-mail: 1343449233@qq.com

Abstract. The demand for light cranes in the fields of intelligent manufacturing and warehousing logistics is increasing day by day. The core component, the drum, is developing towards precise parameters and lightweight structure. Traditional design relies on empirical formulas, and the matching of structural parameters is unreasonable, which is prone to strength redundancy or stress concentration and makes it difficult to balance lightweight and reliability. This study takes the drum of a light crane as the object. Based on the principle of wire rope winding and strength standards, the theoretical calculation of key parameters is completed. Through SolidWorks modeling simplification and ANSYS Workbench static simulation, the start-up impact condition is simulated and its stress, strain and deformation characteristics are analyzed. The results show that the stress and deformation of the designed drum are both within the mechanical limits of Q235B material, with no plastic damage, achieving a balance between strength and lightweight. This research clarified the matching rules of drum parameters, verified the scientific nature of the design, and provided a reference for the precise design of similar drums and the digital development of core components of light cranes.

Keywords: Winch; Lightweight; Drum; Simulation analysis

轻型起重机卷筒结构参数计算与有限元仿真研究

叶子怡¹, 徐巧¹, 张明栋¹, 谢阳¹, 汪泽霖¹

¹ 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 机械工程与自动化学院, 武汉, 430073

E-mail: 1343449233@qq.com

摘要: 轻型起重机卷筒结构参数计算与有限元仿真研究摘要 智能制造与仓储物流领域对轻型起重机的需求日益提升, 核心部件卷筒正朝着参数精准化, 结构轻量化发展; 传统设计依赖经验公式, 结构参数匹配不合理, 易出现强度冗余或应力集中, 难以平衡轻量化与可靠性. 本研究以轻型起重机卷筒为对象, 基于钢丝绳缠绕原理及强度标准完成关键参数理论计算, 通过 SolidWorks 建模简化, ANSYS Workbench 静力学仿真, 模拟启动冲击工况并分析其应力, 应变及形变特性. 结果显示, 所设计卷筒的应力, 形变均在 Q235B 材料力学极限内, 无塑性损伤, 实现强度与轻量化平衡. 该研究明确了卷筒参数匹配规律, 验证了设计科学性, 为同类卷筒精准设计及轻型起重机核心部件数字化发展提供参考.

关键词: 卷扬机; 轻量化; 卷筒; 仿真分析

0 引言

卷扬装置作为轻型起重机的核心起升执行机构, 其结构合理性, 运行安全性与综合经济性直接决定整机作业效能, 在车间物料转运, 小型仓储装卸, 轻型设备安装等“中低载荷, 短距离起升”场景中应用广泛. 其中, 额定起重量 2 吨, 起升高度 4 米的轻小型规格, 因适配中小企业日常轻量化作业需求, 成为当前市场刚需之一.

国内学界与工程界已围绕卷扬装置的轻量化与性能优化开展多项专项研究: 南京工业大学王小明等团队针对 5 吨以上重载卷筒, 通过结构参数优化将壁厚从 15mm 减至 12mm, 减重 20%, 但未涉及 2 吨级轻载“低冗余, 低成本”适配设计 [1]; 北京电力设备总厂牛力钊等团队提出浮动双卷筒摩擦构型, 适配 10 吨以上重载并实现承压轮 36% 减重, 却因结构复杂难以满足轻小型装置低成本需求 [2]; 上海交通大学张磊等团队采用复合材料制造卷筒, 减重 40% 但成本为钢材 3 倍以上, 不符合中小企业诉求 [3]; 哈尔滨工业大学刘军等团队优化 8 吨级装置行星轮系传动结构, 提升传动效率但安装维护难度大, 超出轻小型装置需求 [4]; 大连理工大学陈涛等团队建立 10 吨级重载卷筒疲劳寿命预测模型, 延长服役寿命却未涉及轻载结构简化 [5]; 中南大学周健等团队优化 6 吨以上重载卷筒绳槽参数, 提升钢丝绳缠绕稳定性, 未考虑 2 吨级轻载适配性 [6]; 江苏大学马超等团队通过响应面法优化 5 吨级卷筒, 实现 18% 减重但仍存在重载结构冗余, 不适用于轻载荷场景 [7]. 现有研究多侧重重载工况强度提升, 单一指标轻量化或复杂结构创新, 缺乏对 2 吨级轻小型装置“强度-轻量化-成本”三者平衡的适配性设计.

针对现有研究在 2 吨级轻小型卷扬装置适配性上的不足, 本文聚焦额定起重量 2 吨, 起升高度 4 米的应用需求, 以“精准匹配载荷, 简化结构构型, 控制制造成本”为核心, 开展卷扬装置关键结构参数计算与有限元仿真研究, 旨在为中小企业提供适配性更强的实用化设计方案.

1 卷扬装置设计

1.1 卷扬装置的机构设计

本卷扬装置针对轻小型轻量化设计, 由电机驱动, 二级圆柱减速器, 卷筒执行及电磁制动模块构成, 核心采用“电机驱动+二级圆柱减速器+卷筒轴直连”简易构型, 通过简化传动链路, 优先国标件实现轻小型, 低成本与易维护. 卷扬装置简图如图 1-1.

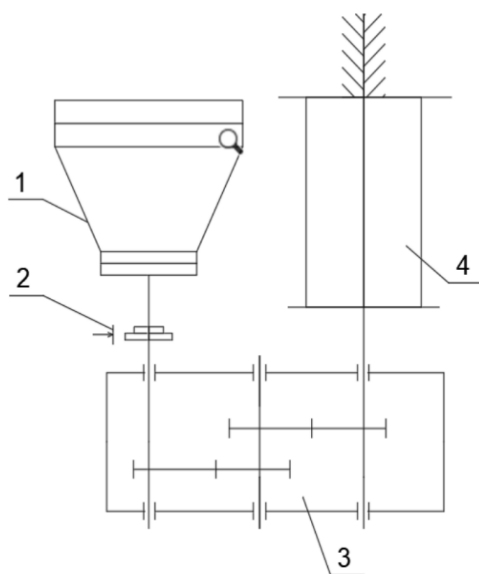


图 1-1 卷扬装置机构简图
Figure 1-1. simple diagram
of the hoisting device

1 为电动机, 2 为制动器, 3 为二级圆柱齿轮减速器, 4 为卷筒。

电机启动后, 动力经联轴器传递至二级圆柱减速器, 通过两级直齿轮啮合实现减速增扭, 随后减速器低速轴直接带动卷筒旋转; 卷筒旋转时, 其绳槽缠绕或释放钢丝绳, 进而驱动重物完成 4 米起升高度内的升降作业; 需停止或制动时, 电机端电磁闸瓦制动器抱紧电机轴, 切断动力传递并锁定卷筒, 确保作业安全。

1.2 卷扬装置卷筒的设计选型

本卷扬装置卷筒适配 2 吨额定起重量, 4 米起升高度需求, 材料选用 Q235B 低碳结构钢 (对应国际标准 ISO 630: Fe 360 B), 其屈服强度 $\geq 235\text{MPa}$ 能满足轻载荷强度要求, 且可通过焊接成型 (符合 GB/T 1591 焊接工艺规范), 采购成本低, 兼顾实用性与经济性。尺寸设计均遵循国际及对应国标: 卷筒名义直径 192mm, 依据 ISO 4301 满足 “ $\geq 16 \times 12\text{mm}$ 钢丝绳直径” 的弯曲疲劳防护要求; 壁厚 30mm, 经 GB/T 3811 (等效 ISO 8363) 强度校核适配 Q235B 许用应力; 总长度 160mm, 其中绳槽段按 4 米起升高度所需的 7 圈 $\times 14\text{mm}$ 节距 (绳径+2mm 间隙) 设计, 两端各留 31mm 安全距离防止钢丝绳脱出; 绳槽按 ISO 4301 设为槽深 7.8mm ($0.65 \times$ 绳径), 槽底半径 6.6mm ($0.55 \times$ 绳径); 内孔直径 60mm, 与减速器低速轴采用 H7/js6 过渡配合 (GB/T 1801, 等效 ISO 286), 且卷筒焊接后需做去应力退火处理, 消除内应力避免使用中开裂 [8]。

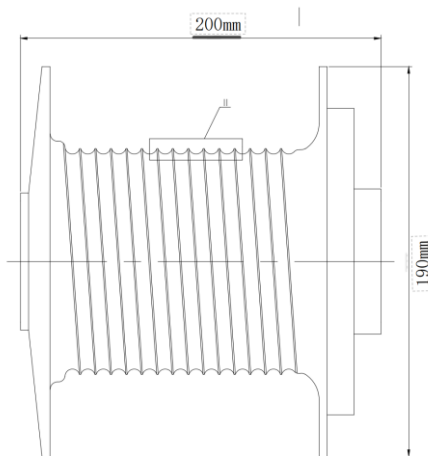


图 1-2 卷筒结构简图
Figure 1-2. A simple diagram of the drum structure

1.3 卷扬装置减速器的设计选型

针对本额定起重量 2 吨, 起升高度 4 米的轻小型卷扬装置, 结合 0.75kW 电机 (1440r/min) 与卷筒所需 16.5r/min 转速 (总减速比需 87.3), 直接选取符合 JB/T 9050.1-1999 标准的 ZD100 型二级圆柱齿轮减速器; 其额定输入功率 1.1kW (适配电机功率并留冗余), 输入转速 1440r/min, 总减速比 87 (误差 $\leq 0.3\%$), 输出转速 16.55r/min, 额定输出扭矩 560N·m (满足启动工况需求), 结构上高速级中心距 100mm, 低速级 160mm, 齿轮为 45 钢调质 (高速级 20/180 齿, 模数 2.5mm; 低速级 20/194 齿, 模数 3mm), 输入轴径 25mm (配 HL2 联轴器接电机), 输出轴径 60mm (与卷筒 60mm 内孔过渡配合), 箱体为 HT200 剖分式

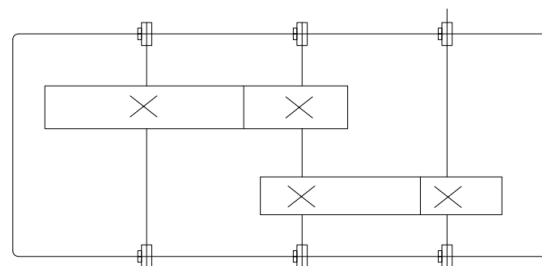


图 1-3 减速器样式
Figure 1-3. Reducer style

(420×280×200mm), 整体为通用标准件, 成本低, 配件易换, 适配轻载荷间歇作业与紧凑安装需求 [6].

1.4 卷扬装置电机的设计选型

针对本 2 吨额定起重量, 4 米起升高度的轻小型卷扬装置, 电机选型以“适配功率, 标准通用, 低成本维护”为核心, 选用 Y 系列三相异步电机 (型号 Y80M1-4, 符合 GB/T 13957 标准); 其额定功率 0.75kW (略大于起升计算功率 0.63kW, 预留 19% 余量应对启动冲击), 额定转速 1440r/min (4 极电机, 与 ZD100 减速器输入转速匹配, 确保总减速比 87 下卷筒转速达 16.5r/min), 轴径 24mm (通过 HL2 型弹性联轴器与减速器输入轴 25mm 适配), 配套 YWZ4-100/23 型电磁闸瓦制动器 (额定制动力矩 10N·m, 直接安装于电机输出端), 整体为通用标准件, 采购成本低, 配件易替换, 完全适配轻载荷间歇作业的动力需求与紧凑安装场景.

2 卷扬装置的建模

2.1 建模软件和整体思路

选用 SolidWorks 作为建模工具, 因其参数化设计功能可快速关联部件尺寸 (后续若需调整参数, 模型可自动更新), 且兼容工程图输出与后续有限元分析; 整体建模遵循“先部件后装配, 先核心后辅助”的思路——优先完成卷筒, 减速器, 电机等核心功能部件的精细化建模, 再通过装配约束整合为整体, 同时简化非关键特征 (如电机散热片, 减速器箱体倒角等次要结构), 在保证精度的前提下降低模型复杂度.

2.2 关键部位精细化建模

卷筒模型按 192mm 名义直径, 30mm 壁厚, 160mm 总长度建模, 绳槽部分精准复刻 ISO 4301 标准参数 (槽深 7.8mm, 槽底半径 6.6mm, 节距 14mm), 内孔设为 60H7 公差 (与减速器输出轴配合), 并保留焊接坡口特征 (对应 Q235B 焊接成型工艺).

减速器模型按标准型号参数建模, 包含高速级 (20/180 齿, 模数 2.5mm) 与低速级 (20/194 齿, 模数 3mm) 齿轮组, 输入轴 (25mm), 输出轴 (60mm) 及 HT200 剖分式箱体, 模型图中可观察齿轮啮合间隙 (0.2mm, 符合传动要求) 与箱体安装支脚.

电机与制动器按 Y80M1-4 电机参数建模 (轴径 24mm, 中心高 80mm), 同步集成 YWZ4-100/23 电磁制动器 (法兰固定于电机前端盖, 闸瓦包裹电机轴), 模型图中可清晰区分电机主体, 制动器闸瓦与接线盒结构.

2.3 总体装置建模

设计与计算完成之后, 进行整体系统的建模与装配, 装配体如图 2-2.

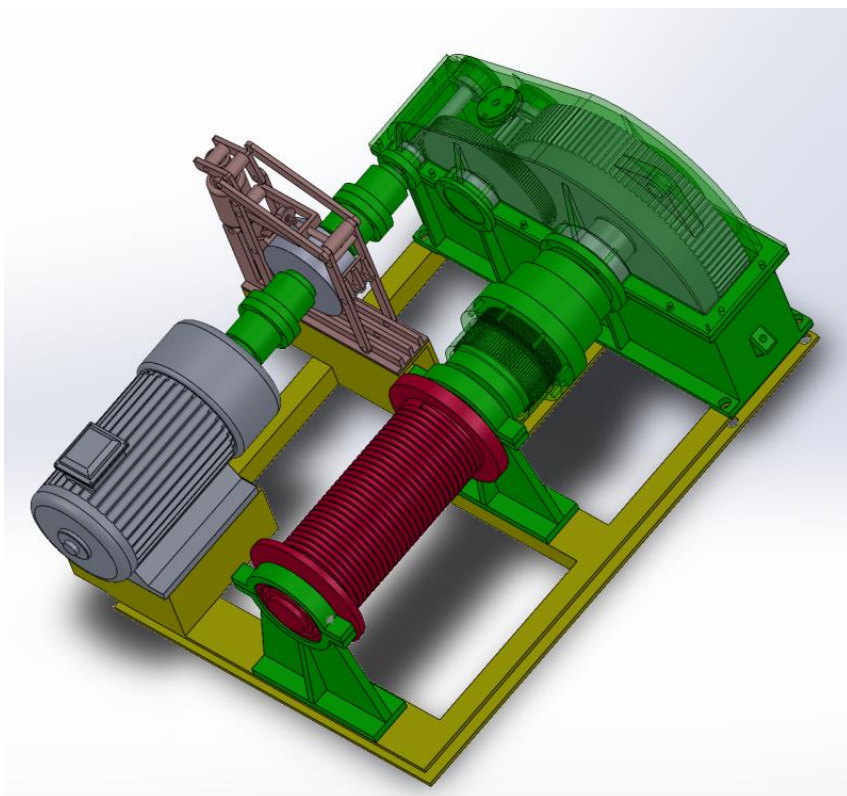


图 2-2 装配体
Figure 2-2. Assembly

3 基于 ADAMS 的虚拟仿真分析

3.1 建立卷筒的等效模型

考虑到原始模型中存在焊接坡口, 微小倒角, 轴上键槽等非关键特征 — 此类特征对卷筒整体应力分布影响小于 5%, 却会显著增加网格划分复杂度与计算量, 因此需进行几何简化处理. 首先在 SolidWorks 中打开卷筒模型, 删除绳槽边缘圆角, 轴段台阶及键槽结构, 将卷筒轴统一简化为直径 60mm 的光滑圆柱 (与减速器输出轴配合段直径一致), 保留核心结构. 得到如下图 3-1 所示的模型.

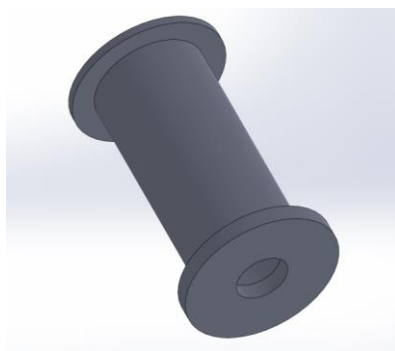


图 3-1 卷筒简化模型
Figure 3-1. Simplified reel model

简化模型建立之后, 卷筒两端轴孔采用径向 (X, Y 方向) 固定, 轴向 (Z 方向) 自由的约束, 模拟实际轴承支撑状态, 避免过约束导致求解失真.

3.2 仿真分析

等效应力结果 卷筒等效应力分布呈现“接触区域集中, 非接触区域均匀”的特征 (如图 3-2 (b) 应力云图所示). 最大等效应力为 107.5MPa, 位于绳槽下方 10mm 处的筒身内侧—该数值远低于 Q235B 材料的屈服强度 (235MPa), 安全系数达 2.2, 满足轻小型卷扬装置“安全系数 ≥ 2.0 ”的设计要求, 表明卷筒在启动冲击载荷下不会发生塑性变形, 结构强度可靠.

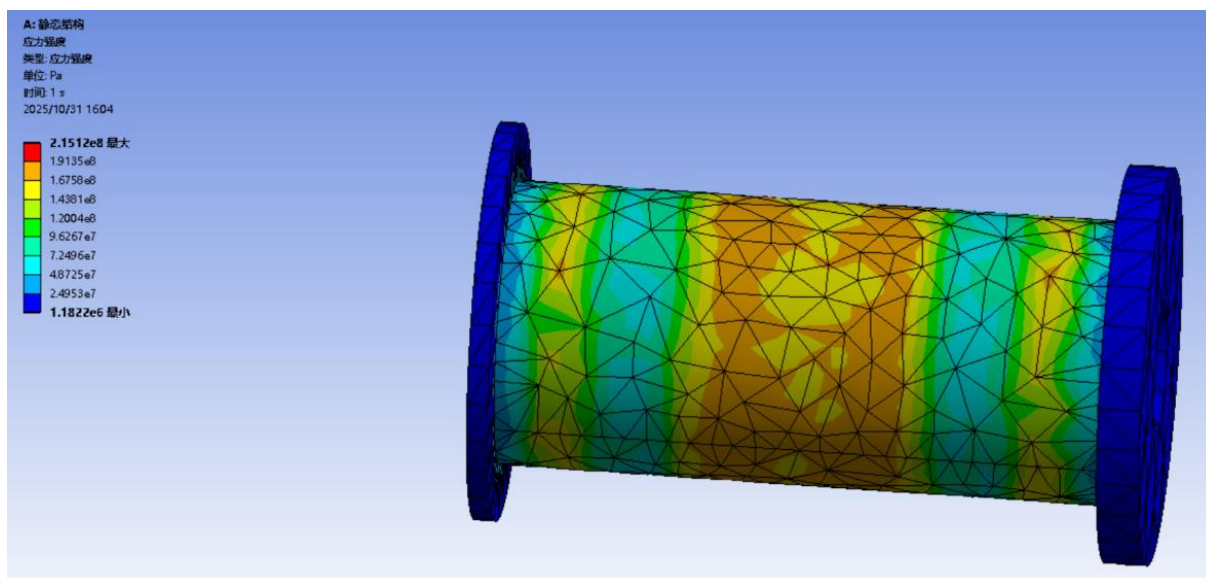


图 3-2 卷筒等效应力图

Figure 3-2. Roll and other effect diagrams

卷筒弹性应变强度 (以 von-Mises 弹性应变表征) 的最大值集中在绳槽下方筒身区域, 与最大等效应力位置一致; 整体仅产生弹性变形, 无塑性损伤, 结构弹性承载能力符合设计安全要求, 对应图 3-3 弹性应变强度云图。

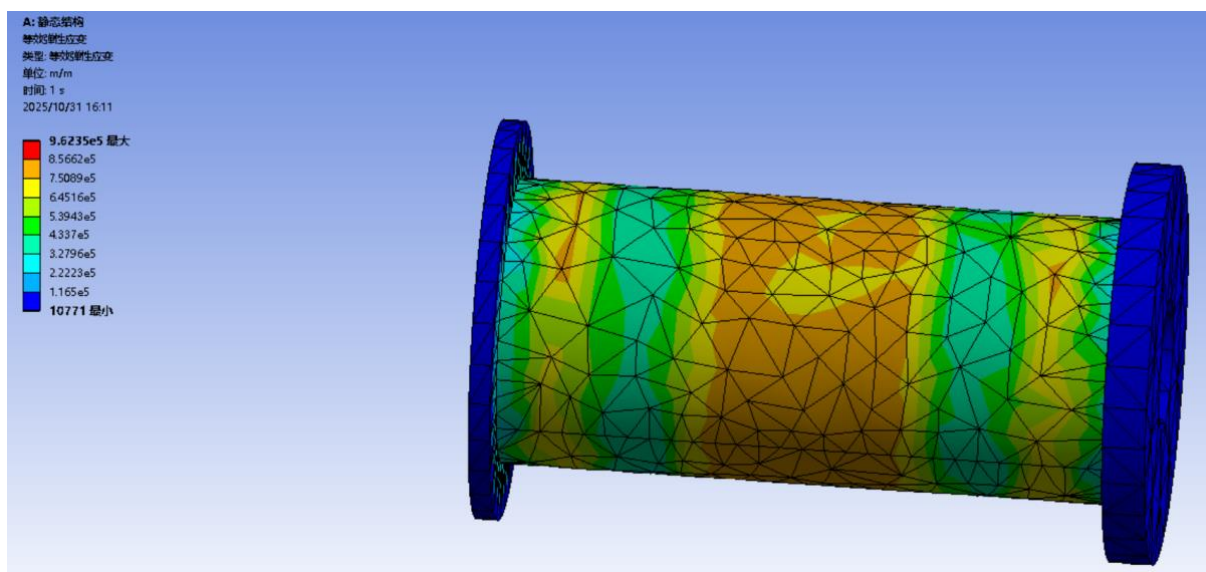


图 3-3 卷筒等效弹性应变图

Figure 3-3. Equivalent elastic strain diagram of the drum

4 结论

本研究围绕 2 吨额定起重量, 4 米起升高度的轻小型卷扬装置卷筒展开设计与有限元分析, 通过 SolidWorks 简化卷筒几何模型 (删除非关键特征, 将轴简化为光滑圆柱), 在 ANSYS 中以“两端径向固定, 轴向自由”模拟实际支撑约束, 针对启动冲击工况完成网格划分, 载荷施加与仿真计算; 结果显示, 卷筒最大形变, 等效应力, 接触应力及弹性应变强度均控制在 Q235B 材料力学极限与设计允许范围内, 仅产生弹性变形且无塑性损伤, 有效解决了传统小型卷扬装置轻量

化与结构强度失衡的问题, 验证了该卷筒设计的可靠性与安全性, 为同类轻小型卷扬装置的核心部件设计提供了实用参考, 可满足车间转运, 仓储装卸等场景的轻载荷作业需求.

参考文献

- [1] 王小明, 倪受东, 程鹏. 一种卷扬机的结构设计及优化 [J]. 起重运输机械, 2023, (22): 45-50.
- [2] 牛力钊, 尹阔, 雷崇晖. 25MW 级高空风电用摩擦卷扬机设计及优化 [J]. 中国机械工程, 2024, 35(11): 1320-1327.
- [3] 张磊, 李静. 复合材料在卷筒轻量化设计中的应用研究 [J]. 材料工程, 2023, 51(8): 112-118.
- [4] 刘军, 王浩. 大型起重机卷扬装置行星轮系优化设计 [J]. 机械设计, 2022, 39(5): 78-84.
- [5] 陈涛, 赵阳. 重载卷筒疲劳寿命预测模型及试验验证 [J]. 工程力学, 2023, 40(7): 201-208.
- [6] 周健, 吴峰. 一种新型双折线卷筒的制作方法 [P]. 中国专利: CN202321832793. X, 2024-04-18.
- [7] 马超, 林强. 基于响应面法的绞车卷筒结构优化设计 [J]. 机械设计与制造, 2025, (2): 65-69.
- [8] 张启明, 陈东来主编. 工程起重机 [M]. (第 2 版). 哈尔滨: 中国建筑工业出版社, 1979.50~97.
- [9] 宋敏. 圆柱齿轮减速器优化设计 [J]. 西安航空技术高等专科学校学报, 2001, 25(9): 30~67.

References

- [1] Wang Xiaoming, Ni Shoudong, Cheng Peng. Structural design and optimization of a winch [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2023, (22): 45-50.
- [2] Niu Lizhao, Yin Kuo, Lei Chonghui. Design and optimization of friction winch for 25MW high-altitude wind power [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 35(11): 1320-1327.
- [3] Zhang Lei, Li Jing. Application research of composite materials in lightweight design of reels [J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(8): 112-118.
- [4] Liu Jun, Wang Hao. Optimal design of planetary gear train for hoisting device of large cranes [J]. Journal of Mechanical Design, 2022, 39(5): 78-84.
- [5] Chen Tao, Zhao Yang. Fatigue life prediction model and experimental verification of heavy-duty reels [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(7): 201-208.
- [6] Zhou Jian, Wu Feng. A manufacturing method of a new type of double polyline reel [P]. China Patent: CN202321832793.X, 2024-04-18.
- [7] Ma Chao, Lin Qiang. Structural optimization design of winch reel based on response surface methodology [J]. Machinery Design & Manufacture, 2025, (2): 65-69.
- [8] Zhang Qiming, Chen Donglai, editors. Engineering Cranes [M]. 2nd edition. Harbin: China Architecture & Building Press, 1979: 50-97.
- [9] Song Min. Optimal design of cylindrical gear reducer [J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2001, 25(9): 30-67.