

# 基于 SolidWorks 和 Ansys 的铁路卷状货物横向限位运输座架设计

袁舜<sup>1</sup>, 潘帅<sup>2</sup>, 刘毛毛<sup>2</sup>, 田志强<sup>1</sup>

(1.兰州交通大学 交通运输学院, 兰州 730070; 2.九江职业技术学院, 江西 九江 332007)

**摘要:** **目的** 针对卷状货物在铁路运输途中常发生横向窜动, 造成货物损伤、危及行车安全等问题, 基于当前主流运输座架和技术经验, 设计一款安全可靠、适用多种车型、可叠放回送、可循环使用、适合多种规格卷状货物、带有横向限位装置的运输座架。**方法** 根据《铁路货物装载加固规则》, 制定最不利工况下的卷状货物装载加固方案; 依据《钢结构设计标准》及敞车、平车的结构, 确定运输座架的结构和材料; 通过 SolidWorks-Ansys 对运输座架进行建模和有限元分析, 得到卷钢座架变形及应力的变化情况。**结果** 通过分析可知, 运输座架会受到垂向力、纵向力, 其最薄弱部分的应力分别为 355.14、341.99 MPa, 位移变形量分别为 0.55、1.069 mm, 符合规定; 在最不利工况下, 横向限位挡件的最大应力为 28.89 MPa, 最大变形量为 0.04 mm, 符合规定。**结论** 设计的铁路横向限位运输座架安全可靠, 可有效防止货物发生横向窜动; 叠装回送, 可实现重去重回。该设计填补了现有运输座架对卷状货物无法进行横向刚性加固的空白, 对当下卷状货物运输发展具有较大的促进作用。

**关键词:** 铁路; 卷状货物; 横向限位装置; 运输座架; 装载加固方案; SolidWorks-Ansys

**中图分类号:** TB482.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)07-0289-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.07.036

## Design of Railway Rolled Goods Lateral Stopper Steel Frame Based on SolidWorks and Ansys

YUAN Shun<sup>1</sup>, PAN Shuai<sup>2</sup>, LIU Maomao<sup>2</sup>, TIAN Zhiqing<sup>1</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Jiujiang Vocational and Technical College, Jiangxi Jiujiang 332007, China)

**ABSTRACT:** The work aims to design a safe, reliable, widely applicable and recyclable, stacked return, suitable for different specifications of rolled goods and steel frame with lateral stopper seat frame in combination with the current mainstream steel frame and existing technical experience, to solve problems such as the lateral movement of rolled goods that often occurs during railway transportation, causing damage to the goods and endangering the safety of driving. According to the "Railway Cargo Loading and Strengthening Rules", a rolled cargo loading and strengthening scheme under the most unfavorable working conditions was formulated. According to the "Steel Structure Design Standard" and the open car and flat car structure, the structure and material of the steel frame was determined. Through SolidWorks-Ansys modeling and finite element analysis on the steel frame, the deformation and stress changes of the steel frame were obtained. The analysis showed that the steel frame was subject to vertical force and longitudinal force, the stress of the weakest part was 355.14 MPa and 341.99 MPa respectively, and the displacement and deformation were 0.55 mm and

收稿日期: 2023-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(71761023); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(N2020X015); 甘肃省教育厅“双一流”科研重点项目(GSSYLXM-04)

1.069 mm respectively, which met the requirements. Under working conditions, the maximum stress of lateral stopper was 28.89 MPa, and the maximum deformation was 0.04 mm, which met the regulations. The railway horizontal limit steel seat frame is safe and reliable, which can effectively prevent the goods from moving laterally; Stacking and returning can realize repeated removal and return. It fills the gap that the existing steel seat frame cannot carry out lateral rigid reinforcement for rolled goods, which will greatly promote the development of the current roll cargo transportation.

**KEY WORDS:** railway; rolled goods; lateral stopper; steel frame; loading reinforcement scheme; SolidWorks-Ansys

铁路运输具有安全、运量大、环保、高效等特点, 占据着矿石、煤炭、机械设备等主要大宗货物的运输市场<sup>[1]</sup>。铝卷、卷钢等货物属于铁路大宗货物, 在运输途中, 因其密度较大, 故存在易滚动、光滑无栓节点、加固困难等问题<sup>[2-3]</sup>。目前, 我国铁路运输卷状货物尚无专用车型, 常采用木地板平车和敞车运输, 优先使用钢座架卧装卷钢<sup>[4]</sup>。

现有运输座架的研制主要集中于多槽结构设计、运输组合方式配搭、叠装回送等方面, 未考虑卷状货物的横向窜动风险。尤其是每年秋冬季, 受到雨雪天气的影响, 铁路运输座架表面易结冰, 加之线路坡度、方向及车辆蛇行运动等引起的轮轨作用力的变化, 卷状货物在钢座架上存在横向窜动风险, 造成车辆偏载或偏重, 易发生列车脱轨或颠覆等行车事件<sup>[5-7]</sup>。

针对铁路卷状货物运输座架的研究主要集中于钢座架疲劳结构分析, 以及优化、强度有限元分析、新型运输座架多槽结构设计等方面。赵诣<sup>[8]</sup>建立了 70 t 通用敞车 (以下简称 C<sub>70</sub>) 卷钢动力学模型, 根据载荷-时间序列和钢座架的有限元分析结果, 计算了包钢集团 LZ 型钢座架在不同线路等级下的疲劳寿命和疲劳损伤。方哲<sup>[9]</sup>根据攀钢集团 TX-C-I 型卷钢座架疲劳寿命评价点的应力时间序列, 以及测点在试验中的疲劳损伤, 预测了钢座架的整体疲劳寿命, 并对薄弱处进行了补强。刘晓华<sup>[10]</sup>对中铁联合物流股份有限公司 RUL-CI 型卷钢座架进行了三维建模及有限元强度分析, 将冲击试验结果与有限元分析进行了对比, 并提出了改进意见。高俊平<sup>[11]</sup>对某公司 A 型卷钢座架进行了三维建模、有限元仿真分析和强度试验, 并提出了改进意见。辛海琳等<sup>[12]</sup>基于 70 t 平车 (以下简称 NX<sub>70A</sub>) 结构, 研制了一款单车三槽卷钢座架, 提高了 70 t 平车的满载率。梁伟明<sup>[13]</sup>结合 NX<sub>70A</sub>、C<sub>70</sub> 的内部结构, 研制了一款四槽卷钢集装托架, 通过有限元分析和试验结果比较, 验证了该款托架的安全可靠性。目前, 针对卷状货物横向窜动风险的研究较少。

文中根据现有技术<sup>[14-15]</sup>, 结合《钢结构通用规范》<sup>[16]</sup>、《机车车辆强度设计及试验鉴定规范 车体 第 2 部分: 货

车车体》<sup>[17]</sup>、铁总运[2015]296 号《铁路货物装载加固规则》<sup>[4]</sup>, 以及敞车、平车的结构, 设计一款安全可靠、适用车型广 (敞车全路保有量为 475 481 辆, 占总保有量的 60.64%; 平集两用车的保有量为 57 602 辆, 占总保有量的 7.35%<sup>[3]</sup>)、可循环使用、适合多种规格卷状货物、带有横向限位装置的运输座架 (简称铁路横向限位运输座架), 以填补现有运输座架对卷状货物无法进行横向刚性加固的空白, 可弥补铁路货运边境站车型的不足, 增强铁路运输的市场竞争力, 促进卷状货物运量加速回流铁路。

## 1 铁路横向限位运输座架整体结构设计

卷状货物属于低附加值重载货物, 呈圆柱状, 易滚动, 表面光滑, 无栓节点, 加固困难。货车在非稳态运行时, 车辆受到的纵向作用力会急剧变化, 卷状货物易发生纵向滚动。货车在过曲线地段时, 卷状货物受到横向力的作用, 加之秋冬季节运输座架表面易结冰, 易出现横向位移, 易导致货物发生横向窜动<sup>[5,18]</sup>。

### 1.1 材料性能

铁路横向限位运输座架的主承载结构采用 Q700 高强度钢, 材料的性能见表 1。Q700 高强度钢具有强度高、硬度大、抗腐蚀性强等特点, 广泛应用于桥梁主梁、机械轴承机座、建筑塔吊、石油输送管道等领域<sup>[19-20]</sup>。

### 1.2 技术参数

铁路横向限位运输座架的技术参数见表 2, 运输座架的三维立体仿真如图 1 所示。运输座架包括底座、支撑架、横向挡件等部分。支撑架是整个运输座架的承重部位, 与卷状货物直接接触。底座将来自支撑架的力分散至车底板及补强座, 避免出现集重现象。横向挡件装置可根据卷状货物的规格尺寸进行调节, 用来阻挡卷状货物在运输途中发生的横向窜动, 操作简单, 安全可靠。

表 1 材料的性能  
Tab.1 Material properties

| 材料         | 用途   | 容重/(t·m <sup>-3</sup> ) | 弹性模量/GPa | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa |
|------------|------|-------------------------|----------|----------|----------|
| Q700 高强度钢板 | 运输座架 | 7.85                    | 206      | ≥ 650    | 700~880  |

表 2 运输座架的技术参数  
Tab.2 Technical parameters of steel frame

| 名称         | 自质量/kg | 承载卷钢最大质量/t | 适用卷径/mm     | 径宽比  | 外形尺寸/mm         | 适用板宽/mm   |
|------------|--------|------------|-------------|------|-----------------|-----------|
| 铁路横向限位运输座架 | 506    | ≤34.4      | 1 000~2 200 | ≤2.2 | 2 178×2 800×515 | 890~2 290 |

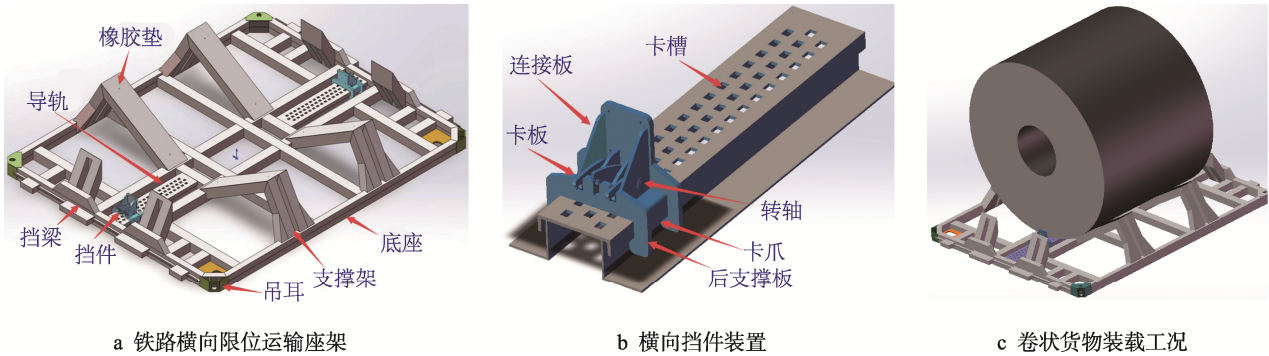


图 1 运输座架三维立体仿真  
Fig.1 Three-dimensional simulation of steel frame

### 1.3 铁路横向限位运输座架结构设计

#### 1.3.1 底座

底座包括边框、横梁、纵梁、侧梁、吊耳、加固环、角件、卡板、棘轮紧固器、定位卡槽等。纵梁外侧吊耳可用于起吊,也可栓结钢丝绳,可将其捆绑在车辆丁字铁上,从而加固运输座架与车辆。在纵梁中部内侧设有棘轮紧固器和加固环,钢丝绳穿过货物中心孔,通过棘轮紧固器和加固环固定两端,防止重心较高的货物发生纵向滚动。纵梁两侧定位卡槽可卡在敞车补强座上,防止运输座架在敞车内部发生纵向移动。将角件卡在平集两用车蘑菇头上,可防止运输座架在平集两用车上发生纵向移动。运输座架适用于敞车、平集两用车,可缓解因货车调配能力不足造成的边境货运站运力紧张等问题。

#### 1.3.2 支撑架

支撑架用于防止卷状货物纵向滚动,主要由 V 形支架、加强筋、多层夹线耐磨橡胶垫组成。V 形支架与水平面的夹角为 38°。在支架内侧用工业胶粘贴厚度 10 mm 的橡胶垫进行缓冲。

#### 1.3.3 横向挡件

横挡主要用于防止卷状货物的横向窜动,主要包括导轨、挡板、卡槽、转轴、后支撑板、连接板、卡爪、侧支撑板、垫板、挡梁等。其中,在导轨沿长度方向,等间距设置 3 排卡槽,中间一排卡槽与两侧卡槽错位排列。根据卷状货物规格,将卡板与卡槽配合,即当中间卡板卡入卡槽内时,两侧卡板无法卡入卡槽内,与导轨上表面接触;反之,当两边卡板卡入卡槽内,中间卡板无法卡入卡槽内,与导轨上表面接触。当中间卡板被卷状货物冲击力冲断后,两侧卡板可作为备用,后退卡入卡槽,再次阻挡卷

状货物的横向窜动。

## 2 装载加固方案论证

### 2.1 卷状货物装载加固方案

针对全路运用车保有量最多的敞车(C<sub>70</sub>)制定装载加固方案,主要技术参数见表 3。一车两件,分别装载在车辆两枕梁上方,每件卷状货物的质量不大于车辆标记质量的 1/2,2 件卷状货物的质量之差不大于 2 t<sup>[21-23]</sup>。按最不利情况进行计算,即每件货物质量为 34.4 t,外径为 2 200 mm,内径为 550 mm。货物在敞车中装载加固仿真如图 2 所示。

表 3 C<sub>70</sub>的主要技术参数  
Tab.3 Main technical parameters of C<sub>70</sub>

| 标记载质量/t | 自质量/t | 车体内长度/mm | 车体内宽度/mm |       | 车体内高度/mm |
|---------|-------|----------|----------|-------|----------|
|         |       |          | 上侧板      | 连铁    |          |
| 70      | ≤23.8 | 13 000   | 2 900    | 2 792 | 2 050    |

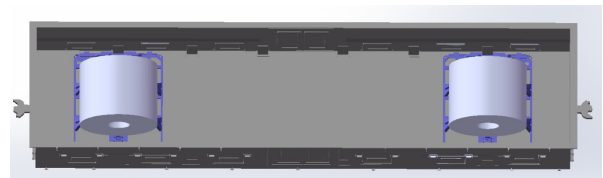


图 2 卷状货物装车工况  
Fig.2 Schematic diagram of loading rolled goods

### 2.2 卷状货物装载加固计算

在运行或调车作业时,铁路货车受到车辆、线路特性的影响,卷状货物会受到不规则持续的振动。在货车加速、制动时,卷状货物会受到更大的冲击。此

外,在列车过曲线地段时,卷状货物会受到横向力的作用,因此作用于卷状货物的外力主要有横向惯性力、垂直惯性力、纵向惯性力、风力、摩擦力。

### 2.2.1 作用于货物的力

卷钢座架通过两侧卡挡和敞车补强座进行加固,属于刚性加固<sup>[4, 21-23]</sup>。按照铁总运[2015]296号《铁路货物装载加固规则》<sup>[4]</sup>计算,受力情况见表4。

### 2.2.2 检查货物的稳定性

运输座架纵向不平衡力的计算见式(1)。

$$\Delta F_{纵} = F_{纵横} - F_{纵摩} = 404.86 \text{ kN} > 0 \text{ 不稳定} \quad (1)$$

纵向不平衡力通过运输座架卡板传递给车辆侧墙补强座,其焊缝长度不应小于某值。根据铁总运[2015]296号《铁路货物装载加固规则》<sup>[4]</sup>计算可知,焊缝长度至少为21.5 cm,但运输座架两侧任一卡板焊缝的最小周长为38 cm,可见运输座架卡挡的焊缝长度符合要求。

运输座架横向不平衡力的计算见式(2)。

$$\Delta F_{横} = 1.25(F_{横横} + W) - F_{横摩} = 105.9 \text{ kN} > 0 \text{ 不稳定} \quad (2)$$

卷状货物由于运输座卡板与车辆补强座为刚性连接,因此纵向稳定,而横向会发生窜动。

## 3 基于 SolidWorks 和 Ansys 的运输座架有限元分析

车辆在运行或调车作业中,卷状货物会受到各种外力的作用,这里以调车冲撞为最不利的工况<sup>[5, 24]</sup>。在此工况下,支撑架直接承载卷状货物,受到了货物纵向惯性力、垂向惯性力和重力的作用。由2.2节装载加固计算可知,纵向惯性力为506.0 kN,垂向惯性力与重力的合力为523.91 kN。在 Ansys Workbench 中,对模型网格进行划分,网格质量为0.85。依次施加上述力,垂向等效应力如图4a所示,垂向总变形如图4b所示,纵向等效应力分析如图5a所示,纵向总变形如图5b所示。

表4 力值计算  
Tab.4 Force analysis

| 纵向惯性力<br>$F_{纵横}/\text{kN}$ | 横向惯性力<br>$F_{横横}/\text{kN}$ | 垂向惯性力<br>$F_{垂横}/\text{kN}$ | 风力<br>$W/\text{kN}$ | 横向摩擦力<br>$F_{横摩}/\text{kN}$ | 纵向摩擦力<br>$F_{纵摩}/\text{kN}$ |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 506.0                       | 134.85                      | 186.79                      | 1.75                | 31.88                       | 101.14                      |

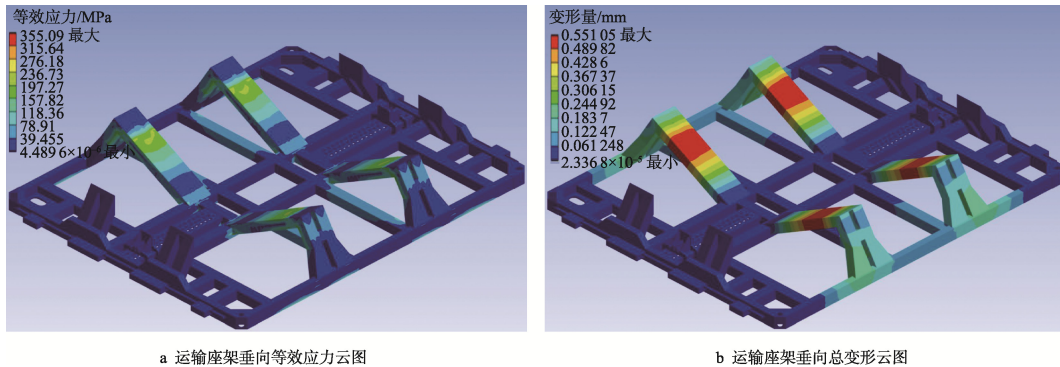


图4 运输座架垂向载荷分析  
Fig.4 Vertical load analysis of steel frame

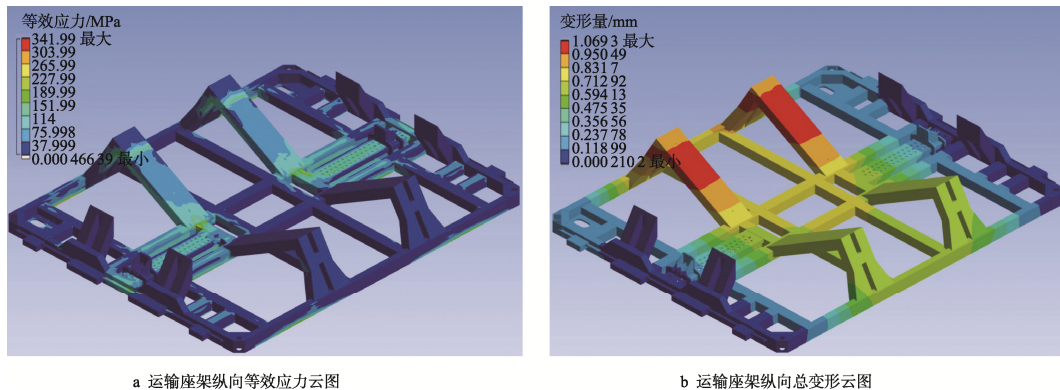


图5 运输座架纵向载荷分析  
Fig.5 Longitudinal load analysis of steel frame



由图 4a 可知, 在施加垂向合力后, 支撑面上的应力分布较规律、对称, 最薄弱部分为支撑架支撑面与卷状货物接触的位置, 其应力为 355.14 MPa, 小于 Q700 高强度钢板的屈服强度 (表 1), 满足要求。支撑架是受力部件, 主要受到卷状货物重力和垂向惯性力的作用, 其余区域受力较小或可忽略。由图 4b 可知, 在施加垂向合力后, 支撑面上的变形较对称, 最大变形发生在支撑架支撑面与卷状货物接触的位置, 变形量约为 0.55 mm, 小于 2 mm, 满足规定; 其余区域的变形量较小, 或可忽略。

由图 5a 可知, 在施加纵向力后, 两侧支撑面上的应力分布差别较大, 最薄弱部分是与冲击方向相反的支撑架支撑面与卷状货物接触位置上方, 其应力为 341.99 MPa, 小于 Q700 高强度钢板的屈服强度 (表 1), 满足要求。在纵向冲击时, 一端支撑架受到的力明显增大, 另一端支撑架受到的力较小。由图 5b 可知, 在施加纵向力后, 最大变形发生在与冲击方向相反的支撑架支撑面和卷状货物接触位置上方, 变形量为 1.069 mm, 小于 2 mm, 满足规定。在纵向冲击时, 一端支撑架变形明显增大, 另一端支撑架变形较小。

卷状货物在运输座架中所受横向不平衡力  $\Delta N$  为 105.9 kN, 通过横向挡件传递给导轨卡槽时抵消。在施加横向不平衡力后, 横向等效应力分析如图 6a 所示, 横向等效位移分析如图 6b 所示。

由图 6a 可知, 在施加横向不平衡力后, 最薄弱部分是挡件卡板与导轨卡槽接触的位置, 其应力为

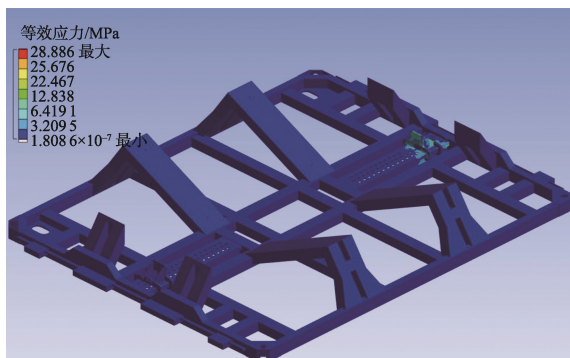
28.89 MPa, 小于 Q700 高强度钢板的屈服强度 (表 1), 满足要求。由图 6b 可知, 在施加力后, 最大位移发生在挡件卡板与导轨卡槽接触位置边沿, 位移变形量为 0.04 mm, 小于 2 mm, 满足规定。

## 4 结论

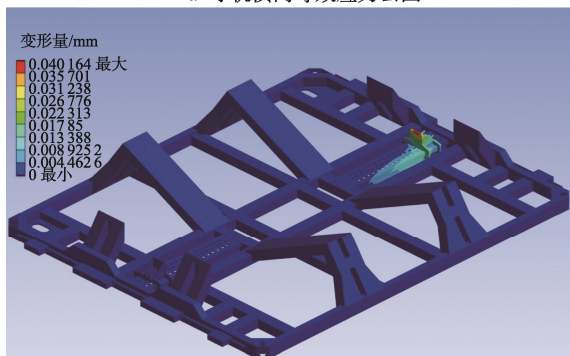
在既有技术的基础上设计了运输座架, 完全满足卷状货物的运输需求, 能够防止货物在运输途中发生横向窜动, 具有安全可靠、适用车型广泛、可循环使用、适合不同规格卷状货物、可叠装回送、可重去重回等优势。利用 SolidWorks 设计了铁路横向限位运输座架, 制定了在最不利条件下货物装载加固的方案, 计算了运输途中作用于货物上的各种力, 通过 Ansys 进行了有限元分析。结果表明, 设计的运输座架填补了传统运输座架对卷状货物无法进行横向刚性加固的空白, 可有效缓解铁路货运边境站运力紧张等问题, 增强铁路运输市场的竞争力, 促进卷状货物运量加速回流铁路, 具有良好的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 中国铁路总公司. 铁路货车基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2020: 1-7.  
China Railway Corporation. The Basics of Railway Freight Cars[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2020: 1-7.
- [2] 中国建筑材料联合会. 中国建筑材料工业年鉴[M]. 北京: 人民出版社, 2021: 511-524.  
China Building Material Federation. Almanac of China Building Materials Industry[M]. Beijing: People's Publishing House, 2021: 511-524.
- [3] 中国铁路总公司. 中国铁道年鉴[M]. 北京: 中国铁路总公司, 2021: 236-247.  
China Railway. China Railway Yearbook[R]. Beijing: China Railway Press, 2021: 236-247.
- [4] 中国铁路总公司. 铁路货物装载加固规则[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 160-168.  
China Railway. Railway Freight Loading Reinforcement Rules[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015: 160-168.
- [5] 吴育俭. 铁路货运技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000: 43-51.  
WU Y J. Railway Freight Transport Technology[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000: 43-51.
- [6] YOON S C, KIM Y S. A Study on the Safety of Carbody for Railway Vehicles[J]. Key Engineering Materials, 2014, 627: 409-412.
- [7] YOON S C, KIM J. Experimental Study on the Fatigue



a 导轨横向等效应力云图



b 导轨横向等效位移云图

图 6 横向挡件装置受横向不平衡力分析  
Fig.6 Analysis of transverse unbalanced force on transverse stopper device

- Strength of a Running Equipment in Railway Applications[J]. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2016, 33(9): 739-744.
- [8] 赵诣. 包钢集团 LZ 型立装卷钢座架疲劳寿命研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 70-75.  
ZHAO Y. Study on Fatigue Life of LZ Vertical Coil Steel Seat Frame in Baotou Steel Group[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 70-75.
- [9] 方哲. 攀钢集团 TX-C-1型卷钢座架疲劳寿命研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 69-73.  
FANG Z. Fatigue Life Study of Rolled-Steel Pallet[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016: 69-73.
- [10] 刘晓华. 中铁联合物流 RUL-C1 型卷钢座架强度仿真及试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 19-20.  
LIU X H. Simulation and Test Analysis on Mechanical Property of the RUL-C1 Coil Steel Pallet of China Railway United Logistics Co Ltd[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 19-20.
- [11] 高俊平. 铁路卧装运输卷钢座架强度仿真分析与试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 43-51.  
GAO J P. Study on Simulation Analysis and Test of Strength of Rolled-Steel Pallet Transported by Railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012: 43-51.
- [12] 辛海琳, 徐海涛, 朱丽. 三卷卷钢装载加固座架的研制[J]. 机械工程师, 2016(3): 185-186.  
XIN H L, XU H T, ZHU L. Development of Three-Coil Steel Loading and Strengthening Seat Frame[J]. Mechanical Engineering, 2016(3): 185-186.
- [13] 梁伟明. 卷钢集装托架结构设计与优化研究[J]. 铁道货运, 2020, 38(9): 46-52.  
LIANG W M. A Study on Structural Design and Optimization of Container Pallet for Rolled-Steel[J]. Railway Freight Transport, 2020, 38(9): 46-52.
- [14] 邱培军, 潘帅, 袁舜, 等. 基于 SolidWorks 的铁路敞车裸包装玻璃集装架设计[J]. 包装工程, 2021, 42(3): 143-150.  
QIU P J, PAN S, YUAN S, et al. Design of Pallet for Bare Glass in Railway Wagon Based on SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 143-150.
- [15] 袁舜, 潘帅, 卢泓坤, 等. 基于 SolidWorks 和 ANSYS 的铁路卷状货物横向限位钢制座架设计[J]. 包装工程, 2022, 43(21): 130-136.  
YUAN S, PAN S, LU H K, et al. Design of Steel Seat Frame for Railway Coiled Cargo Transportation Based on SolidWorks and ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(21): 130-136.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构通用规范: GB 55006—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General Code for Steel Structures: GB 55006-2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [17] 国家铁路局. 机车车辆强度设计及试验鉴定规范 车体 第2部分: 货车车体: TB/T 3550.2—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.  
National Railway Administration of the People's Republic of China. Strength Design and Test Accreditation Specification for Rolling Stock-Car Body-Part 2: Freight Car Bodies: TB/T 3550.2-2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.
- [18] 邵国霞, 尹紫红, 朱波, 等. 铁路超重货物作用下轨道基动态响应试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(7): 1685-1692.  
SHAO G X, YIN Z H, ZHU B, et al. Research on Dynamic Response of Railway Track and Subgrade under the Action of Overweight Goods[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(7): 1685-1692.
- [19] 郑舒丹, 郭强, 王军. 中外金属材料手册[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2022: 161-193.  
ZHENG S D, GUO Q, WANG J. Handbook of Chinese and Foreign Metal Materials[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2022: 161-193.
- [20] 张耀, 曹小平, 王春芬, 等. 材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 18-24.  
ZHANG Y, CAO X P, WANG C F, et al. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 18-24.
- [21] 中国铁路总公司. 铁路货物装载加固定型方案[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 155-159.  
China Railway. Railway Cargo Loading, Reinforcement and Finalization Scheme[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015: 155-159.
- [22] LI X H. Factors Analysis of Affecting Loading and Reinforcing Scheme of Large Goods in Railway[J]. World Journal of Engineering and Technology, 2016, 4(3): 60-68.
- [23] KIM J G, YOON S C, SEO J W, et al. Structural Safety Assessment of Railway Freight Car during Static Loading[J]. Key Engineering Materials, 2008, 385: 653-656.
- [24] 盖宇仙. 铁路货运组织[M]. 4版. 北京: 中国铁道出版社, 2010: 180-181.  
GAI Y X. Railway Freight Organization[M]. 4th ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2010: 180-181.