

基于车体协同的铁路运输轮式货物轮挡设计

罗雅楠^{1,2}, 韩梅^{1,2}, 陈超^{1,2*}, 米希伟^{1,2}

(1.北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2.轨道交通协同创新中心, 北京 100044)

摘要: **目的** 为保证运输安全, 轮式货物在铁路运输过程中需要用轮挡限位。针对我国铁路运输轮式货物的现状及存在的问题, 提出车体与加固装置协同设计的理念, 设计一种轮挡可调式, 适用于多种规格的轮式货物, 存用一体、可靠性高、使用快捷。**方法** 利用 SolidWorks 建立轮挡三维模型, 通过铁路运输加固强度计算, 确定在最不利状况下对轮挡的强度要求, 进行载荷和约束分析, 利用有限元分析软件 SolidWorks simulation 进行仿真计算及强度分析。**结果** 得到该轮挡在最不利工况下的应力及位移情况。最大应力出现在轮挡底面与活动销连接部位, 最大应力值为 499.9 MPa, 不超出设计所用材料的许用应力 (585 MPa); 最大位移为 0.99 mm, 在允许范围内。**结论** 该轮挡的强度满足安全运输的要求, 用于多种轮式货物铁路运输装载加固, 可有效提高加固效率。

关键词: 铁路货运; 轮挡; 优化设计; SolidWorks; 有限元分析; 强度

中图分类号: U294.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)21-0094-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.012

Design of Wheel Chocks for Railway Transportation of Wheeled Goods Based on Vehicle Collaboration

LUO Ya-nan^{1,2}, HAN Mei^{1,2}, CHEN Chao^{1,2*}, MI Xi-wei^{1,2}

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Collaborative Innovation Center of Railway Traffic Safety, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: In order to ensure transportation safety, wheeled goods need to be limited by wheel chocks during railway transportation. In response to the current situation and existing problems in railway transportation of wheeled goods in China, the work aims to propose a concept of collaborative design between vehicle body and reinforcement device, and design an adjustable wheel chock, which is suitable for wheeled goods of various wheel diameters, with integrated storage and use, high reliability, and fast use. SolidWorks was used to establish a three-dimensional model of wheel chocks. The strength of railway transportation reinforcement was calculated. The strength requirements for wheel chocks under the most unfavorable conditions were determined. Load and constraint analysis were conducted. Finite element analysis software SolidWorks simulation was used for simulation calculation and strength analysis. The stress and displacement of the wheel chock under the most unfavorable working conditions were obtained. The maximum stress occurred at the connection between the bottom surface of the wheel chock and the movable pin, with a maximum stress value of 499.9 MPa, which did not exceed the allowable stress of the material used in the design (585 MPa); The maximum displacement was 0.99 mm, which was within the allowable range. In conclusion, the strength of the wheel chocks meets the requirements for safe transportation, and can be used for loading and reinforcement of various wheeled goods in railway transportation,

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (科技领军人才团队项目) (2022JBXT008)

*通信作者

effectively improving reinforcement efficiency.

KEY WORDS: railway freight; wheel chock; optimization design; SolidWorks; finite element analysis; strength

铁路运输是轮式货物长距离运输的主要途径。轮式货物在进行铁路运输时, 需要使用固定装置进行限位固定。轮挡是广泛用于轮式货物限位固定的一种装置, 由于其与车辆间的加固强度不足, 在使用过程中往往需要拉牵装置配合加固^[1]。目前国内外铁路运输普遍采用的是三角轮挡。材料上分为木制和钢制 2 类, 木制轮挡强度低、可靠性差且为一次性加固材料, 不符合环保理念。钢制轮挡强度比木质轮挡大, 但仍有存放不便、回送不及时等问题。我国大多为木制轮挡, 还有少量以三角挡为主的制式加固器材, 设计较为简单, 功能单一, 需配合拉牵使用; 国外常见的挡固装置包括止动块、垫木、止推棒等, 同样需要配合拉牵加固。特别地, 国际铁路联盟 (UIC) 利用支撑臂和伸缩式止动块等特殊装置对轮式货物装载加固、铁路合作组织 (OSJD) 将支撑方木用于轮式货物的加固。美国相关铁路公司为满足各类轮式货物加固需要, 使用种类规格繁多的木制轮挡, 各种尺寸和结构共 81 种^[2], 在使用时根据轮式货物的重量调节标准模块的数量以满足要求^[3]。

当前轮式货物运输需求增长快速, 普通铁路平车难以满足其运输需求, 各特种车辆逐步发展使用, 就需要车辆在设计时考虑加固, 为加固装置留出接口。为特定车型设计、专车专用的新结构轮挡应运而生, 如应用于 JSQ₅、JSQ₆ 型运输小汽车双层平车的各类止轮器和掩挡与尼龙带等加固装置, 强度较小, 仅用于小汽车的加固; 用于 D_{5A}、D₁₁ 型凹底平车的专用止轮器, 则通过不同的方式调节止轮座或止轮板, 使止轮座或止轮板与车轮接触, 从而达到限位的效果^[4], 但仍存在如装置位置固定时无法调整与车轮之间间隙, 以及位置可调时搬动不便、存放回送困难的问题。

据此, 本文基于车体协同进行轮挡的设计, 以保证装置的强度可靠性和通用性。不需拉牵, 仅使用挡固装置即可实现对各类轮式货物横纵两方向的掩挡加固, 同时兼顾操作快捷性, 考虑轮挡位置可调和装置随车存放, 设计包括车体部分在内的一体化轮式货物挡固装置。车体部分的设计包括车地板滑道、定位孔以及轮挡存放位。加固装置与车体一体化, 滑道实现纵向位置可调, 销孔配合实现掩挡位置固定。

1 总体设计要求

1) 广泛适用。我国各用途轮式货物型号众多, 重量、外形尺寸、轮径、轮距、轴距各异, 且当前我国所有轮式货物在铁路运输中均需使用掩挡, 故挡固装置的设计应当具有一定的普适性。本文所设计的轮挡纵向位置可调, 适应各轴距货物; 横向角度可调, 适应不同轮距; 挡体高度可掩固轮径范围大。

2) 安全可靠。铁路运输安全至关重要, 列车在加减速等情况下会产生很强的惯性冲击, 必须合理设计轮挡及轮挡与车体的接口结构, 保证轮挡自身以及与车辆的连接强度。

3) 存用一体。需解决挡固装置的回送及保障问题, 提高使用便捷性, 故在车地板上规划轮挡存放位置, 达到使用时将其拉出固定在车底板上, 不使用时可将其隐藏于车体内部的效果。

4) 操作简便。为保证轮式货物能快速、安全地安装固定, 轮挡的安装固定程序应尽量简单快捷, 在使用后能快速收好存放, 解决挡固过程中操作不便、耗费人力的问题。

2 总体方案

2.1 轮挡

该轮挡由挡体、活动销、中间销、铰接装置等组成, 材质选用高强度钢材 Q690。掩挡工作面上设置防滑纹以增大摩擦, 轮挡内部设 2 块筋板支撑挡体, 两端嵌有圆柱销, 一侧圆柱销为活动销, 另一侧为固定销, 圆柱销贯通底部钢板, 结构如图 1 所示。根据 800~1 500 mm 的轮径范围确定挡体尺寸, 根据调研所得轮式货物最大质量为 73 t, 以及加固时最少使用 4 对 (8 个) 轮挡来确定轮挡的设计强度。

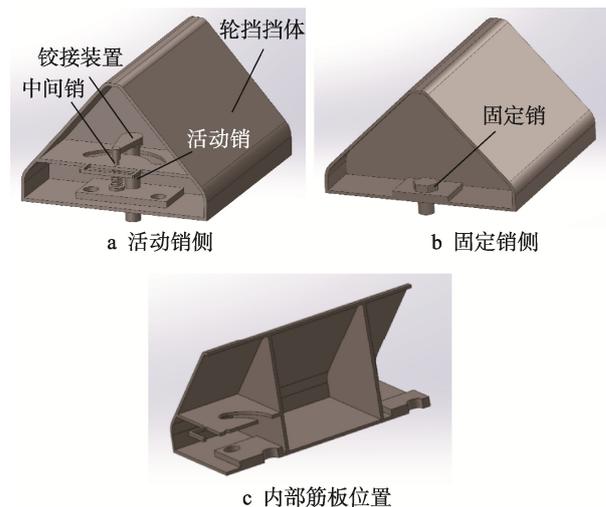


图 1 挡固装置结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of retaining device structure

2.2 车辆接口

为保证轮挡滑动、定位可靠性、耐用性及抗碾压性, 本轮挡采用销孔配合的固定方式, 依靠活动销、固定销, 利用车地板上的滑道与定位孔进行位置调节

和固定。使用时经滑道将轮挡从存放位中拉出、推放到位后，将活动销落入相应的定位孔中，即可实现限位和掩挡。根据轮式货物尺寸调研结果及轮挡结构，滑道和定位孔在车地板上的布局设计如图2所示。车地板对称开设两排通长滑道，滑道内外两侧分别设置通长定位条，小轮距货物选用内侧定位条对轮挡装置进行固定，较大轮距货物则选用外侧。

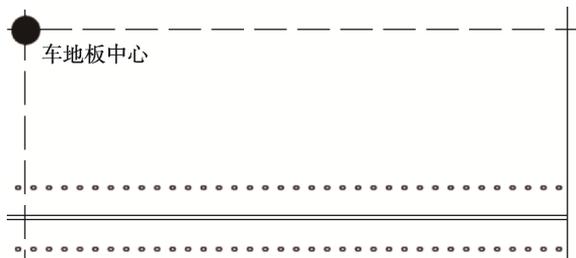


图2 滑道和定位孔在车地板上的布局图
Fig.2 Layout diagram of slide and positioning holes on the floor

为满足其他货物运输时的装载需求，轮挡的使用和存放不应与平车装运其他货物冲突。因此在不使用轮挡时，需保证车地板表面的平整性，即需随车隐藏式存放轮挡。轮挡与存放位关系如图3所示，滑道与存放位关系如图4所示。为保证运输安全，轮挡的使用和存放不应影响车体强度，因此存放位设置在车体底架的梁间空隙，滑道位置不与车体结构产生干涉。

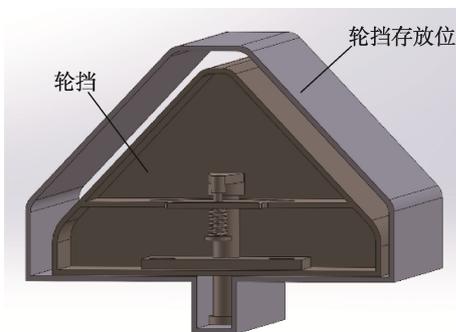


图3 可调式轮挡与轮挡存放位关系示意图
Fig.3 Schematic diagram of relationship between adjustable wheel chocks and wheel chock storage positions

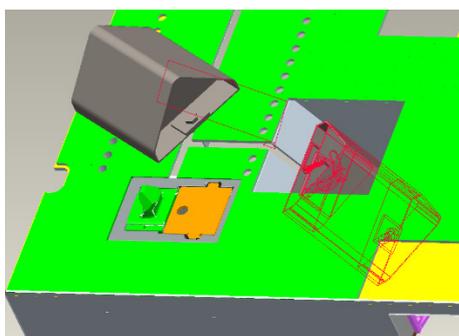


图4 滑道与存放位关系示意图
Fig.4 Schematic diagram of relationship between slide and storage positions

轮挡存放位置的数量和布局是依据轮挡挡固强度要求以及实际装载情况而确定的。首先，为满足轮挡挡固的强度要求，各型轮式货物应至少使用4对(8个)轮挡，在前后轮组的前后两端进行挡固。其次，存放位置不应与货物装载位置冲突，在实际装载时存在货物装载方向不同的情况，为方便取用，存放位置应当对称布置，尽可能均匀分布。并且轮挡存放位及滑道的开设不能影响车辆的整体强度。结合滑道位置，在车地板两端及中部共设置20个轮挡存放位。

3 关键部件方案

本研究设计了多种形式的可调式轮挡，进行比选分析及仿真论证，不断优化确定了一种操作方便、普适性强、安全耐用的挡固装置方案。下面将详细介绍各组成部分。

3.1 挡体

轮挡挡体设计经过三棱柱结构、曲面结构等版本优化改进而成，2种挡体结构如图5所示。三棱柱结构挡体侧面倾斜角度偏大，掩挡大轮径轮式货物时易被推翻，且轮挡内上部空间较小，操作困难；曲面结构挡体虽与大轮径货物轮胎接触面积更大但曲面与小轮径装备轮胎的贴合性较差，通用性差。

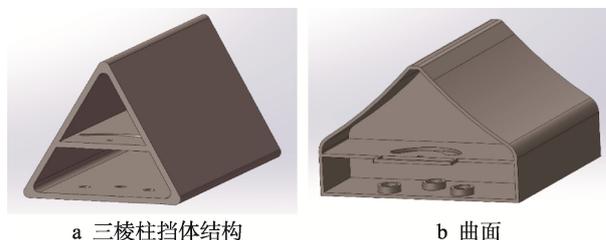


图5 轮挡挡体过程性结构示意图
Fig.5 Schematic diagram for process structure of wheel chocks

根据以上分析，改进后的轮挡挡体结构如图1所示。挡板侧面与底板呈47°倾斜角，为减小轮挡宽度，在50mm高度处截断曲面，截断处以圆弧平滑连接。挡体内部设置支撑平台以及便于提放的把手，两销轴侧增加垫板以增大受力强度。该挡体斜面适用于掩挡多种轮径的轮式货物，轮径在800~1500mm范围内的轮胎均可与其贴合。

分析调研所得的各轮式货物装载状态及位置，得到各型轮式货物的单侧轮胎接地宽度的最大值，据此计算出两侧销轴间距离的最小值。结合轮挡活动销侧的结构设计，最终设定可调式轮挡长为430mm，高为240mm，固定销与活动销的中心距为305mm，轮挡内部两筋板间距离为200mm。可调式轮挡主要部件参数如表1所示。

表 1 挡固装置各主要部件参数

Tab.1 Parameters of main components of retaining device

序号	部件名称	规格/mm	质量/kg	材质
1	轮挡挡体	430×380×240	27.9	Q690
2	固定销	φ30	0.3	Q690
3	活动销	φ30	0.7	Q690
4	中间销	φ10×90	0.1	Q690
5	铰接装置	φ _小 16, φ _大 42	0.3	Q690

3.2 活动销

为使轮挡能够根据轮式货物的装载位置和轴距调节横、纵向掩固位置, 进一步提高车轮加固的可靠性, 减小调整级差, 在轮挡上设置了 3 个销位, 以扩大轮挡的调节范围, 缩小与车轮间隙。活动销经传统三销结构优化为一销可转动结构, 结构如图 6 所示。当活动销于中间位置插入车地板定位孔时, 轮挡与车辆横中心线呈 30° 倾斜角, 两侧位置可使轮挡的角度变化范围扩大至 19°~41°。

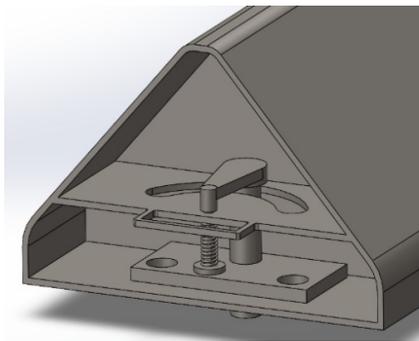


图 6 活动销示意图

Fig.6 Schematic diagram of movable pin

3.3 中间销

中间销是为方便调整活动销角度而设计的中间销轴, 结构如图 7 所示, 其主要作用是通过铰接装置与活动销相连。通过旋转中间销实现活动销的转动, 调节轮挡在车地板上的摆放角度, 以及防止活动销垂向跳起。

3.4 铰接装置

铰接装置是为方便调整轮挡摆放角度, 将中间销和活动销连接固定的结构。铰接装置由 2 个套筒和连接板组成, 套筒内侧设有螺纹, 组装时两套筒分别与中间销和活动销相连。



图 7 中间销示意图

Fig.7 Schematic diagram of intermediate pin

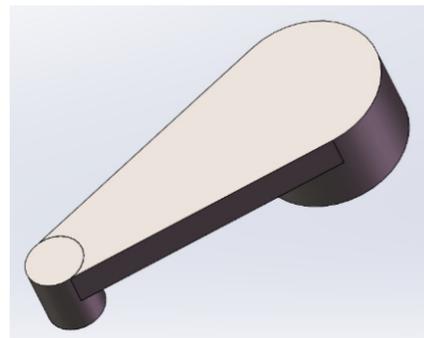


图 8 铰接装置示意图

Fig.8 Schematic diagram of articulated device

4 载荷及约束分析

运用 SolidWorks simulation 对挡固装置进行有限元强度仿真计算时, 首先需确定其所受到的载荷和约束条件。当列车在线路上运行时, 发生的多种振动会使货物产生横向惯性力, 导致横向运动状态变化; 突然启动、加速或制动以及在调车作业中车辆之间的相互冲击, 则会导致车辆及货物纵向运动状态变化^[5]。本轮挡同时实现对货物横向和纵向的限位和掩挡, 计算表明轮挡在纵向应承受的力值比横向要大得多, 应主要考虑纵向受力。研究与试验表明, 调车冲击时货物的纵向加速度最大, 故确定调车冲击工况为使用本轮挡的最不利工况^[6]。

4.1 车型选择

本文研究基于铁路现有车辆考虑配备轮挡及车体的设计改造, 方案可用于既有车型的改进或新车型的研发。由表 2 长大平车参数可知, 在铁地板车辆中,

表 2 长大平车参数

Tab.2 Parameters of long flat cars

型号	车地板材质	自质量/t	标记载质量/t	承载面尺寸/mm	车辆销距/mm
D _{22A}	钢	44	120	25 000×3 000	17 800
D _{22B}	木	48	120	25 000×3 000	17 800
D ₇₀	钢	26.6	70	19 462×2 950	15 500
DNX _{17K}	木	22	60	13 000×2 980	9 000

D₇₀型长大平车承载面小于D_{22A}型长大平车,且铁路现有D₇₀型长大平车数量较少^[9],D_{22A}型长大平车适用于轮式货物这样的大型机械设备,因此本文选取D_{22A}型长大平车为承载车^[10]。

4.2 载荷分析

4对8个轮挡于前后轮组的前后两端斜向掩挡轮胎,兼顾横向及纵向挡固,故对挡固装置受力分析时全面考虑车辆在横、纵向所受的各种外力。为尽可能模拟最不利的工况,对调研所得各型轮式货物进行调车冲击工况下的装载加固力值计算,得到最不利情况下挡固装置应承受的载荷大小。

目前,《铁路货物装载加固规则》中现有的货物纵向力计算标准是通过车辆冲击试验来确定每吨货物所受的纵向惯性力*t*₀,从而确定纵向惯性力*T*、纵向加速度与采取的加固方式种类有关^[7]。可调式轮挡

对轮式货物起阻挡作用,轮胎与挡固装置接触,橡胶轮胎压靠于钢制轮挡承载面之上,属于柔性加固。根据《铁路货物装载加固规则》(后文简称《加规》)附件2^[8],对各轮式货物分别进行力值计算,得到为防止货物移动,加固材料在纵、横方向应承受的力 ΔT 、 ΔN 。

摩擦因数根据《加规》,橡胶与钢板间的摩擦因数为0.5,在无重心偏移的情况下,计算结果如表3所示。在最不利的情况下,纵向惯性力为641.5 kN,纵向摩擦力为354.8 kN,故为使其不发生纵向移动加固材料需在纵方向上提供的力即加固材料纵向受力为286.7 kN,由4个轮挡共同承担,每部分大小为71.675 kN;横向惯性力为204.2 kN,纵向摩擦力为190.8 kN,故为使其不发生横向移动,加固材料需在横方向上提供的力即加固材料横向受力为105.5 kN,同样由4个轮挡承担,每部分大小为26.375 kN。

表3 力值计算结果
Tab.3 Table of force calculation results

车辆自质量/t	车辆销距/mm	货物质量/t	力值计算结果/kN							
			<i>T</i>	<i>N</i>	<i>Q</i> _垂	<i>W</i>	<i>F</i> _{纵摩}	<i>F</i> _{横摩}	ΔT	ΔN
44	17 800	73	641.5	204.2	328	32.8	354.8	190.8	286.7	105.5

4.3 约束分析

在SolidWorks simulation中进行有限元分析,对可调式轮挡的约束分析包括连结设置和夹具设置,对装配体进行有限元仿真时分析各个零件之间的接触设置及自由度约束是十分重要的^[11]。

该挡固装置主要是与车地板之间存在接触和约束,为模拟轮挡真实受力,加入车地板模型,依照现实情况施加约束。对车地板施加几何体固定约束,限定车地板在横向、纵向、垂向3个方向上的位移,即完全固定;可调式轮挡在横向和纵向上主要依靠活动销和固定销下落到车地板滑道及限位孔内的“锁闭”作用限制位移,因此在纵向和横向无须设置额外的夹具约束,其余部分连结设置为接触。

5 基于SolidWorks的有限元强度分析

5.1 有限元模型建立

SolidWorks是一款具有三维模型建立、零件装配、工程制图、有限元计算等功能的软件,可与多种设计软件相互转换^[12]。Simulation是SolidWorks的有限元分析模块,可以较快速地计算分析出给定约束和载荷的零部件或模型装配整体的应力分布^[13]。采用SolidWorks simulation对可调式轮挡进行结构强度分析,基本参数的设定是有限元分析成功的关键^[14-15],模

型材质均为Q690,定义材料属性后(屈服强度为690 MPa、密度为7 850 kg/m³、弹性模量为200 GPa、泊松比为0.29),进行静应力仿真分析,模拟最不利工况下的挡固装置承受载荷的情况。

5.2 网格划分

在实际运输过程中,活动销、固定销和轮挡挡体受力较大,中间销及铰接装置为调整角度以及防跳的作用,受力值影响较小,因此仅对轮挡主体结构进行有限元建模分析。将网格尺寸设置为38 mm,划分后的模型见图9,网格模型包含16 933个节点,8 885个单元。

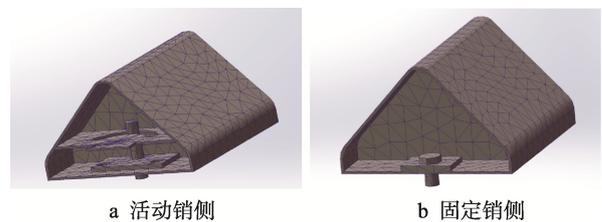


图9 有限元模型
Fig.9 Finite element model

5.3 加载与求解

根据第4节所分析的挡固装置受力及约束情况,对模型施加同等载荷及约束,如图10所示。对挡固装置施加的纵向载荷为71.675 kN,横向载荷为

26.375 kN, 均布加载在两筋板之间, 加载位置如图 11 所示。考虑轮挡结构在该工况载荷下的应力状况和变形, 根据材料特性, 判定该轮挡是否满足强度要求。

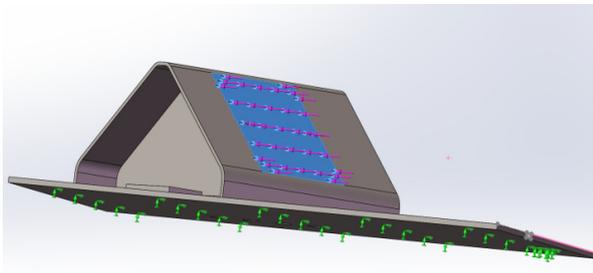


图 10 载荷及约束设置
Fig.10 Load and constraint settings

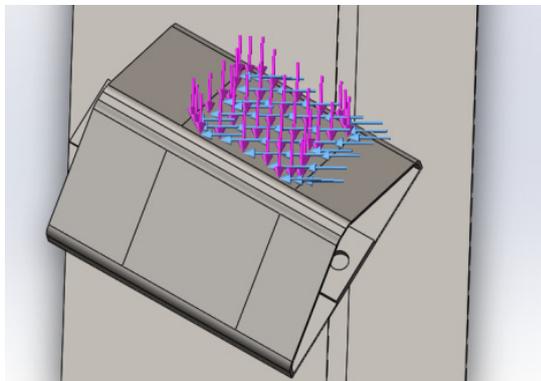


图 11 加载位置
Fig.11 Loading position

5.4 结果分析

在最不利工况下对可调式轮挡做仿真分析, 从整体聚焦局部, 重点分析等效应力和位移情况。由仿真可知, 轮挡整体所承受的最大应力值为 499.9 MPa, 小于材料的许用应力 (585 MPa)^[16], 最大应力出现在轮挡挡体底面与活动销连接部位, 见图 12, 初步判断该轮挡符合强度要求。轮挡在纵向载荷作用下的最大形变量为 0.99 mm, 较为合理, 见图 13。

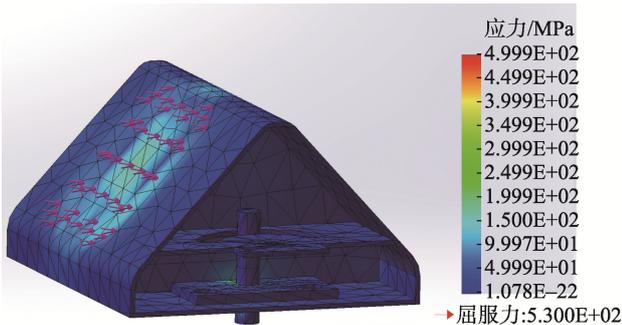


图 12 挡固装置应力云图
Fig.12 Stress pattern of retaining device

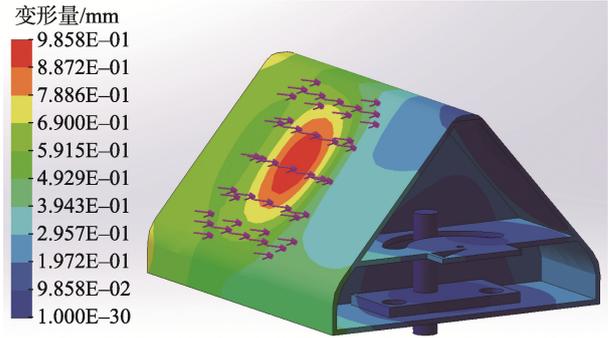


图 13 挡固装置变形
Fig.13 Deformation of retaining device

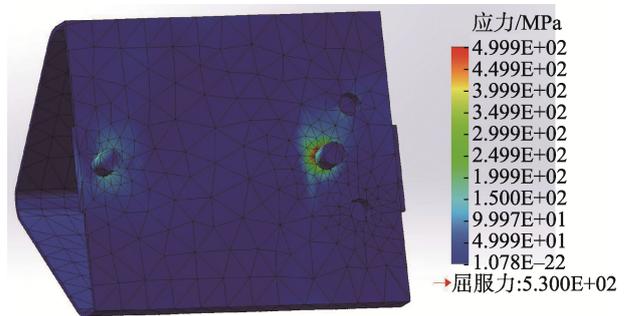


图 14 最大应力位置应力云图
Fig.14 Stress pattern of maximum stress position

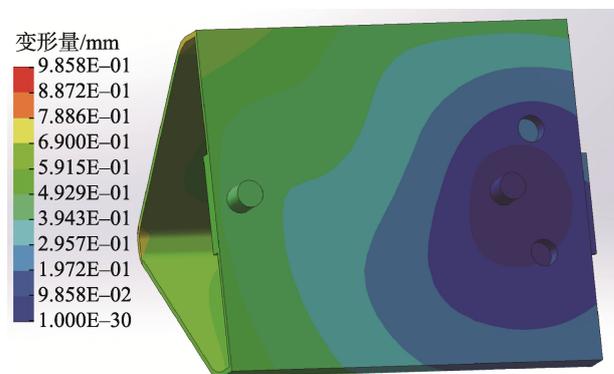


图 15 最大应力位置变形
Fig.15 Deformation at maximum stress position

结果表明, 轮挡底部与活动销接触区域的工作应力明显大于其他区域的工作应力, 整体应力云图及变形情况见图 14~15。这是由于轮挡受到的惯性力远大于车地板对其作用的摩擦力, 轮挡主要靠两侧销轴插入车地板限位孔产生相互作用防止纵向位移, 导致应力集中在轮挡底部销孔和活动销上, 如图 16 所示, 固定销所受最大应力为 326 MPa, 活动销为 315 MPa, 均小于材料许用应力, 满足强度要求。

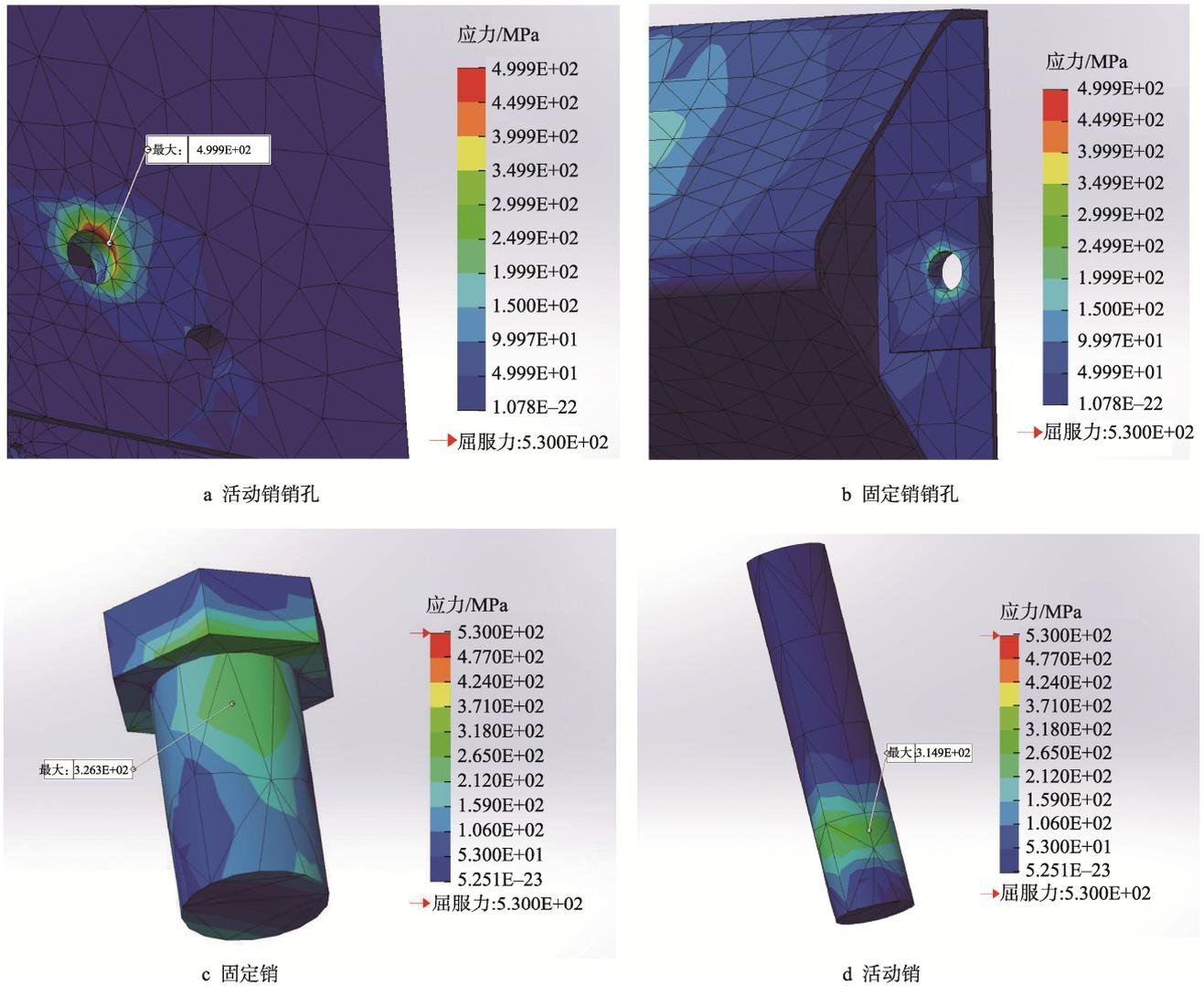


图 16 关键部位应力云图
Fig.16 Stress pattern of key parts

6 结语

随着科技及经济的高速发展,轮式货物也在不停发展,运输需求随之增大。铁路交通作为国民经济的重要支撑近年来快速发展,各类轮式货物依托铁路运输,运量增长,运输要求也随之提高,加强轮式货物运输安全问题研究十分必要。

本文将有限元仿真软件应用于挡固装置的设计,深入调研各方需求,主要考虑安全性、轮挡通用性及操作便捷性,秉持车体与加固装置协同设计的理念,在现有加固器材的基础上创新优化,形成一种专用于铁路运输轮式货物的挡固装置设计方案,可用于既有车型的改进或新车型的研发,具有实用价值。并且,对方案中的轮挡进行强度校核和结构优化,保证轮挡强度可靠,具有一定的准确性和经济性,能够起到辅助现场试验的作用。此外,该装置的使用可大大节省装载加固时间及人力耗费,对提升轮式货物运输能力具有重要意义。

参考文献:

- [1] 苏蒙,田毅,张欣. 基于 ABAQUS 的轮式货物用轮挡的设计与研究[C]// 中国机械工程学会可靠性工程分会. 2015 年全国机械行业可靠性技术学术交流会暨第五届可靠性工程分会第二次全体委员大会论文集, 2015: 4.
SU Meng, TIAN Yi, ZHANG Xin. Design and Research of Wheel Chocks for Wheeled Goods Based on ABAQUS[C]// Reliability Engineering Branch of the Chinese Society of Mechanical Engineering Proceedings of the 2015 National Machinery Industry Reliability Technology Academic Exchange Conference and the Second Plenary Session of the Fifth Reliability Engineering Branch, 2015: 4
- [2] 王海玉. 轮式装备运输装载加固方法探讨[J]. 铁道货

- 运, 2010, 28(6): 48-50.
- WANG Hai-yu. Discussion on the Reinforcement Method Used for the Transport of Wheeled Equipment[J]. Railway Freight Transport, 2010, 28(6): 48-50.
- [3] 钱润华, 刘兴前. 美军装备物资铁路运输装载方案[M]. 北京: 解放军出版社, 2004.
- QIAN Run-hua, LIU Xing-qian. The Loading Plan for Railway Transportation of US Military Equipment and Materials[M]. Beijing: People's Liberation Army Publishing House, 2004.
- [4] 曾运清, 王康, 辛昕, 等. 美军轮式和履带式装备铁路制式加固器材[J]. 国防交通工程与技术, 2011, 9(1): 49-52.
- ZENG Yun-qing, WANG Kang, XIN Xin, et al. Standardized Blocking and Bracing Devices for Railway Transportation of U.S.Army's Wheeled and Tracked Equipment[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2011, 9(1): 49-52.
- [5] 韩梅. 铁路货运技术[M]. 3版. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- HAN Mei. Technology of Railroad Freight Transportation[M]. 3rd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [6] 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.
- LIU Xiao-hua. Strength Simulation and Experimental Study of RUL-C1 Coil Steel Seat Frame of China Railway United Logistics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [7] 吴珊, 袁霞, 韩梅. 卷钢专用平台箱的三维建模及有限元分析[J]. 包装工程, 2021, 42(1): 129-135.
- WU Shan, YUAN Xia, HAN Mei. Three-Dimensional Parametric Modeling and Finite Element Analysis of Special Coil Steel Platform Container[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(1): 129-135.
- [8] 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: 18-21.
- China Railway Corporation. Rules for Railway Cargo Loading and Reinforcement[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015: 18-21.
- [9] 黄志文, 刘晓林. D70 型 70t 长大平车[J]. 铁道车辆, 2002, 40(11): 23-25.
- HUANG Zhi-wen, LIU Xiao-lin. The D70 Type 70 t Long and Big Flat Cars[J]. Rolling Stock, 2002, 40(11): 23-25.
- [10] 佚名. 推进技术创新满足市场需求——第3届特种货车学术研讨会综述(2005·重庆)[J]. 铁道车辆, 2006, 44(3): 31-32.
- Anon. Push on Technology Innovation to Meet Market Requirements—Survey on 3rd Academic Seminar for Special Freight Cars(2005·Chongqing)[J]. Rolling Stock, 2006, 44(3): 31-32.
- [11] 孙文峰. 长大平车运输履带式货物挡固装置的设计与强度仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- SUN Wen-feng. Design and Strength Simulation of Crawler-Type Cargo Retaining Device for Long Flat Car Transportation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [12] 李建华, 白岩柏. 一种基于 SolidWorks 二次开发的三维交互辅助装配方法[J]. 现代制造工程, 2020(1): 83-87.
- LI Jian-hua, BAI Yan-bai. Three-Dimensional Interactive Auxiliary Assembly Method Based on Secondary Development of SolidWorks[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(1): 83-87.
- [13] 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 Pei-jun, PAN Shuai, YUAN Shun, et al. Design of Pallet for Bare Glass in Railway Wagon Based on SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 143-150.
- [14] WANG Yan-ju, LU Jia-ping. ANSYS Based Analysis of Pallet Bending Performance and Its Experimental Verification[J]. Packaging Engineering, 2012(17): 66-72.
- [15] NAGASHIMA T. Sloshing Analysis of a Liquid Storage Container Using Level Set X-FEM[J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2009, 25(4): 357-379.
- [16] TB/T 3550.2—2019, 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[S].
- TB/T 3550.2-2019, Code for Strength Design and Test Appraisal of Rolling Stock Body Part 2: Freight Car Body[S].