doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.03.017

小型集材挂车满载工况下的有限元建模与分析

韩东涛[1,2,3],马跃威[2,3],刘晋浩[2,3*],崔小青[2]
(1.呼伦贝尔学院, 内蒙古 呼伦贝尔 021000; 2.北京林业大学 工学院,北京 100083;
3.国家林业和草原局林业装备与自动化重点实验室,北京 100083)

摘　要:小型集材挂车于林间作业存在多种工况,包括满载弯曲、满载扭转、紧急制动和急速转弯。为解决挂车在满载工况下车载系统的可靠性与安全性较差的问题,建立小型集材挂车的三维装配模型,进行静态分析。通过有限元分析,研究挂车在 4 种典型工况下的结构变形和应力分布。研究表明,满载弯曲工况下,最大位移为 4.517 7 mm,最大应力为 115.19 MPa,安全系数为 3.08;满载扭转工况下,最大位移为 0.984 48 mm,最大应力为 71.929 MPa,安全系数为 4.935;满载制动工况下,最大位移为 4.994 6 mm,最大应力为 120.05 MPa,安全系数为 2.957;紧急转弯工况下,最大位移为 4.365 8 mm,最大应力为 104.64 MPa,安全系数为 3.39。结果显示研究设计的小型集材挂车在林间作业时满载工况下稳定性较强,确保木材的可靠采集和运输。基于该结果可进一步优化挂车设计和性能,以适应不断变化的需求和环境要求。

关键词:小型集材挂车;ANSYS 仿真;集材工况;林木集材; 结构稳定性分析; 材料力学
中图分类号:S776.32+5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)03-0170-08

Finite Element Modeling and Analysis of a Small Logging Trailer under Full Load Conditions

HAN Dongtao[1,2,3], MA Yuewei[2,3], LIU Jinhao[2,3*], CUI Xiaoqing[2]
(1. Hulunbuir College, Hulunbuir 021008, China; 2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Forestry Equipment and Automation of State Forestry and Grassland Bureau, Beijing 100083, China)

Abstract: Trailers need to operate under various conditions, including full load bending, full load twisting, emergency braking, and sharp turns. In order to solve the problem of poor reliability and safety of the on-board system of the trailer under full load condition, a three-dimensional assembly model of a small logging trailer was established, and static analysis was performed. Through finite element analysis, we studied the structural deformations and stress distributions of the trailer under four typical working conditions. Under full load bending conditions, the maximum displacement was 4.517 7 mm, the maximum stress was 115.19 MPa, and the safety factor was 3.08. Under full load twisting conditions, the maximum displacement was 0.984 48 mm, the maximum stress was 71.929 MPa, and the safety factor was 4.935. Under full load braking conditions, the maximum displacement was 4.994 6 mm, the maximum stress was 120.05 MPa, and the safety factor was 2.957. Under emergency turning conditions, the maximum displacement was 4.365 8 mm, the maximum stress was 104.64 MPa, and the safety factor was 3.39. Results showed that the small skidding trailer designed in this study had strong stability under full load working conditions in the forest, which ensured the reliable collection and transportation of wood. Future research can further optimize trailer design and performance to meet evolving needs and environmental requirements.

Keywords: Small logging trailer; ANSYS simulation; logging conditions; logging of timber; structural stability analysis; material mechanics

---

收稿日期:2023-11-09
基金项目:2020 年内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY20309);2021 年呼伦贝尔学院重点项目(2021FDZD04)。
第一作者简介:韩东涛,博士,副教授。研究方向为森林工程装备及其自动化。E-mail: hdt@hlbec.edu.cn
*通信作者:刘晋浩,博士,教授。研究方向为林业装备与信息化。E-mail: liujinhao@bjfu.edu.cn
引文格式:韩东涛,马跃威,刘晋浩,等. 小型集材挂车满载工况下的有限元建模与分析[J].森林工程, 2024,40(3):170-177.
HAN D T, MA Y W, LIU J H, et al. Finite element modeling and analysis of a small logging trailer under full load conditions [J]. Forest Engineering, 2024, 40(3):170-177.

0　引言

集材是指将伐区的木材从伐木地点汇集到装车场或山上楞场的作业。我国集材作业建国以前主要以人力集材、畜力集材为主[1]。中华人民共和国成立后机械化采伐的研究逐渐增多,国内像松江拖拉机厂、哈尔滨林机所、常州林机所、临江林业局与东北林业大学等科研院所研制了 J-50 集材拖拉机[2]、J-80 折腰轮式拖拉机[3]、林海-35 拖拉机[4]、CD12 集采拖拉机[5]、小型履带式集材拖拉机[6]和 XC360 集材机[7]等集材机型。国内林木集材的研究大多停留在 20 世纪末,近些年国内有关林木集材装备的研究较少且较为分散,小型集材车辆研究较多[7-12],大型集材车辆的研究较为停滞[13],国外关于集材机(Skidder)的研究主要从森林经理[14-15]、环境友好[16]等方面开展。基于以上背景,针对主力的木材集材挂车机构进行设计与仿真,研究在采伐车主要工况下的关键部件受力模型以适应不断变化的环境要求。

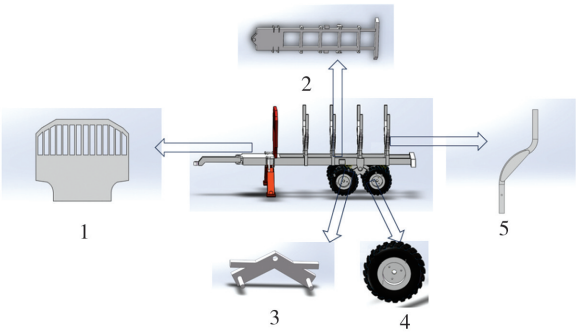
1　小型集材挂车总体设计

本研究需要设计一款小型集材拖车,主要作业是承载、组捆、归堆集中和运输原木(或原条)到林地的伐区楞场,需要满足以下要求。

1)抚育间伐的木材集材地点较为分散,单株材积小,需要设计的小型挂车灵活、有较大的运载量;2)林区地势条件恶劣,要求该小型集材挂车,整体外形尺寸小,且具备一定爬坡、越障和通过能力;3)挂车安装合理,操作简单,工作稳定;4)挂车满足绿色化设计,降低对生态环境的破坏,所以要求质量轻;5)同时满足制造方面的设计要求,挂车绝大部分是由机械材料焊接而成,因此对机械性能方面要求较高,机械及其零件部分必须满足其使用刚度、强度和稳定性要求。

根据上述 5 点关键技术要求,通过 SolidWork 软件对小型集材挂车进行设计三维装配,如图 1 所示。集材拖车主要由集材车架、集材底盘、前侧挡板和车立柱等部分组成。

1)集材车架:轻量化的设计要求,车架结构由 2 根纵梁以及多根横梁焊接而成,车立柱和车架之间通过铆钉连接,总体尺寸长、宽、高为 3 395、900、215 mm。同时运载量大,可根据需求调节运载量大小,最后作为集材拖车的承载基体,该车架结构满足强度和刚度要求,提高了集材挂车可靠性以及寿命。



1-前侧挡板;2-集材车架;3-平衡轴;4-车轮;5-车立柱

1- Front side panel; 2- Logging trailer frame; 3- Balance shaft; 4- Wheels; 5- Vehicle uprights

图 1　小型集材挂车三维装配图

Fig. 1 Three-dimensional assembly diagram of a small logging trailer

2)集材底盘:该底盘是集材拖车的核心部件,其本身不具有动力性,结构简单,主要包括平衡轴[17]和车轮。平衡轴是连接 2 个车轮的装置,由 2 根方管焊接和摆臂挡板而成,这种设计的主要优点是可以减小障碍物对集材拖车的冲击,增强集材拖车的通过性能,同时减少对地面的压力。在质心位置不变的情况下,通过平衡轴联系的车轮稳定性和平顺性也大大提高。

3)前侧挡板设计:集材挂车前面需要设计 1 个挡板,而且需要具有一定的高度,防止小型挂车受到强烈冲击,木材从前面滑出,对操作人员造成伤害。本研究取 1 400 mm,在保证小型化的同时,也能保证每次集材运输的数量。

4)车立柱设计:车立柱设计为弧形,主要是为了增加集材量,集材挂车单次集材 5 000 kg,每次可大约集材 8 根,间伐材的平均胸径为 14.8 cm,将木材打捆后,整捆木材的直径大约在 500 mm,因此搭载板内部可搭载木材最小宽度设为 450 mm,最大宽度 670 mm,整个搭载板宽度 800 mm,为防止木材搭载时从侧面滑出,侧板高度因该大于整捆木材高度一半,本研究取 195 mm。

2　小型集材挂车技术指标分析与有限元参数设计

2.1　挂车技术指标分析

典型的静力学 4 个工况包括满载弯曲工况、满载扭转工况、满载制动工况和满载转弯工况,以校核其挂车的强度和刚度,避免材料失效。

在挂车结构设计中,首先要计算结构强度是否

足够,因为挂车结构在承载时常常会出现脆性损伤和塑性损伤的情况,而强度是指结构抵抗断裂和塑性变形的能力,所以强度是判断结构安全性能的重要指标。挂车在正常行驶过程中,会承受来自不同方向的力,如果挂车结构强度较低或外部力太大,都会造成结构的断裂和变形。所以要确保无论在什么工况下,挂车的结构要有足够的强度才能安全平稳地运行。

静态分析是研究挂车在不同工况下受到的载荷作用,结构所承受的最大应力值。在静态分析中通常采用 Von Mises 等效应力[18]对结构的静强度进行评价。该等效应力公式为

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^3+(\sigma_3-\sigma_1)^2]}。\tag{1}$$

式中:σ_e 为等效应力,N;σ_1、σ_2、σ_3 分别为第一、二、三主应力,N。

材料不发生失效的前提为

$$\sigma_e \leqslant [\sigma]。\tag{2}$$

$$n = \frac{\sigma_e}{[\sigma]} \geqslant 1。\tag{3}$$

式中:$[\sigma]$ 为许用应力,N;n 为安全系数。

本小型集材挂车使用的材料是 510 L。屈服强度是 355 MPa,根据有限元分析得到的等效应力值与材料的屈服强度进行对比分析,判断结构的静强度是否满足要求。

刚度指结构或材料在一定载荷作用下抵抗弹性形变的能力。刚度相对于强度来说主要突出结构的抗弯和抗扭性能,在满足强度的同时也需要满足刚度的要求。材料的弹性模量和剪切模量越大,刚度也就越大,结构的刚度可以根据式(4)进行计算。

$$K = \frac{F}{\delta}。\tag{4}$$

式中:K 为刚度;F 为外部作用力,N;δ 为变形量。

集材车在行驶中承受各种载荷影响,刚度不足会导致车内噪声、振动以及不平顺性都较大,严重的可能导致结构发生变形。挂车的刚度作为一项硬性要求是必须要保证的。

本研究将围绕 4 种典型工况(满载弯曲、满载扭转、紧急制动和紧急转弯)对集材挂车进行静态分析。

2.2 挂车有限元模式设置

集材拖车是一个复杂的装配体,这样一个复杂结构若全部考虑是很困难的,从而必须对其进行简化,有效的简化对结构分析十分重要。本课题对挂车进行分析过程中将对受力情况影响不大的零件轮胎、支撑架、挡板以及零件中较小的圆角和倒角等删掉,将在 Solid works 中处理好的整体装配体模型导入 ANSYS Workbench 中,图 2 是整车的简化模型。

模型导入 ANSYS Workbench 软件中后,在软件中设置对应的性能参数,其中包括泊松比、密度、弹性模量和屈服强度等,如图 2 所示。本课题挂车的各零件均选为 510 L 结构钢,表 1 为该材料的性能参数。规定长度单位均为毫米(mm),力单位均为牛顿(N),应力单位均为兆帕(MPa)。

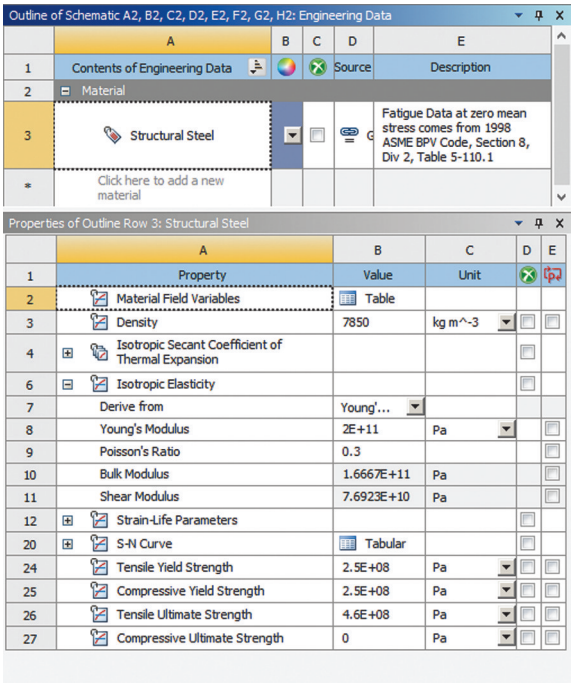


图 2 性能参数的设置

Fig. 2 Setting of performance parameters

表 1 材料性能参数表

Tab. 1 Table of material performance parameters

材料 Material	弹性模量/GPa Elastic modulus	密度/(kg·m^{-3}) Density	泊松比(μ) Poisson's ratio	屈服强度/MPa Yield strength
510L	212	7 850	0.3	355

网格质量的好坏直接决定了分析结果的精确与否,但在划分网格之前需要准备的工作有很多,首先就是选定合适的单元尺寸。如果单元尺寸设置过大会导致分析精度很低,得出的结果可能会严重偏离真实情况,分析结果就会没有意义;如果设置过小会将计算结果精度提高,计算量就会增大,

可能会导致无法计算出结果,所以只有设置一个合适的尺寸才会准确地分析出结果[19-20]。本研究划分时进行了很多次的尝试,最终选择单元尺寸大小为 30 mm。然后选择自由网格划分的好处在于后续分析中可以自行调节网格尺寸大小来达到要求的精度。由于本研究所设计的结构比较规整,没有特别复杂的曲面,所以采用六面体单元进行有限元网格划分,得到有限元模型如图 3 所示。

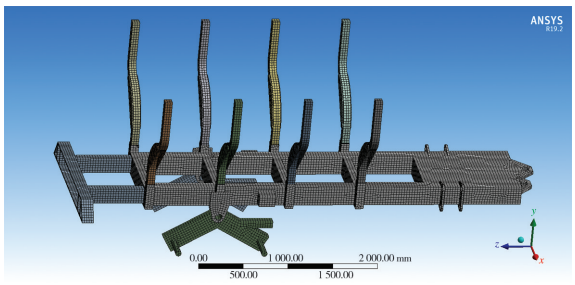


图 3　网格划分

Fig. 3 Mesh division

3　基于有限元的多工况林业集材挂车结构强度分析

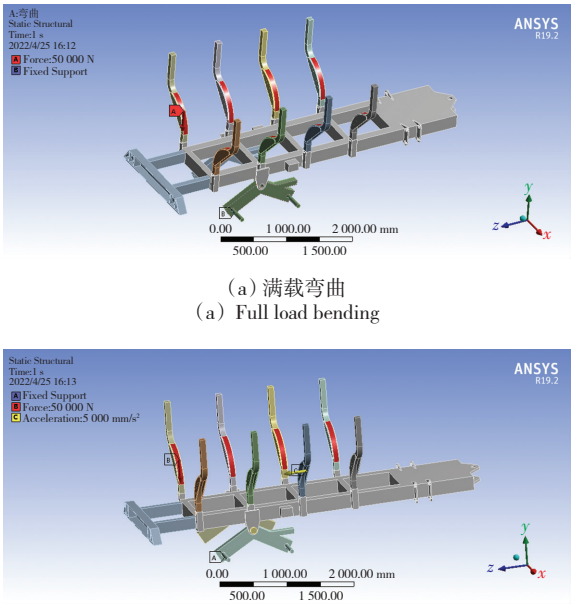
3.1　仿真试验

利用 ANSYS 对满载弯曲、满载扭转、满载制动及满载紧急转弯 4 种工况在给定材料性能参数以及网格划分后,分别得到 4 种工况下载荷及边界条件施加图(图 4)、4 种工况下挂车结构变形示意图(图 5)和 4 种工况下挂车结构应力示意图(图 6)。本研究着重分析平衡轴与底盘在满载条件下的局部应力,结果如图 7 所示。

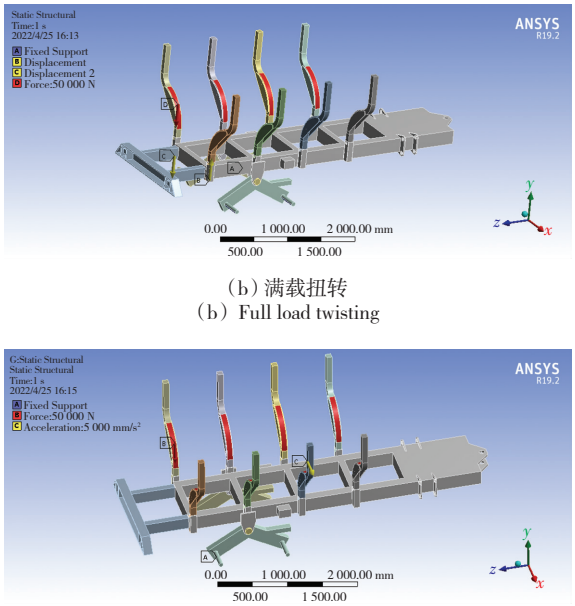
3.2　结果分析

挂车在满载弯曲工况下,由图 4—图 7(a)可以看出,发生弯曲时最大位移值位于与牵引部分连接的地方,其变形量为 4.517 7 mm,主要原因这部分位置处于悬空状态,离车架支撑处最远,然后变形量逐渐减小直至轮胎处,其中车架轮胎处位移值最小,主要是此处设有车架支撑结构;应力分布为车架前、后部分等效应力值均较小,较大应力区域集中在车架两块钢板处,其最大值为 115.19 MPa,产生的原因是工作过程中载荷主要由此处传递给底盘,但未超过挂车材料 510L 结构钢的屈服强度 355 MPa,故其安全系数为 3.08。

挂车在满载扭转工况下,图 4—图 7(b)可以看出,发生弯曲时最大位移值位于车架两边的车立柱最上面处,其变形量为 0.984 48 mm,主要原因该工况处于非对称支撑导致木材往两边挤压,所以两边



(a)满载弯曲
(a) Full load bending



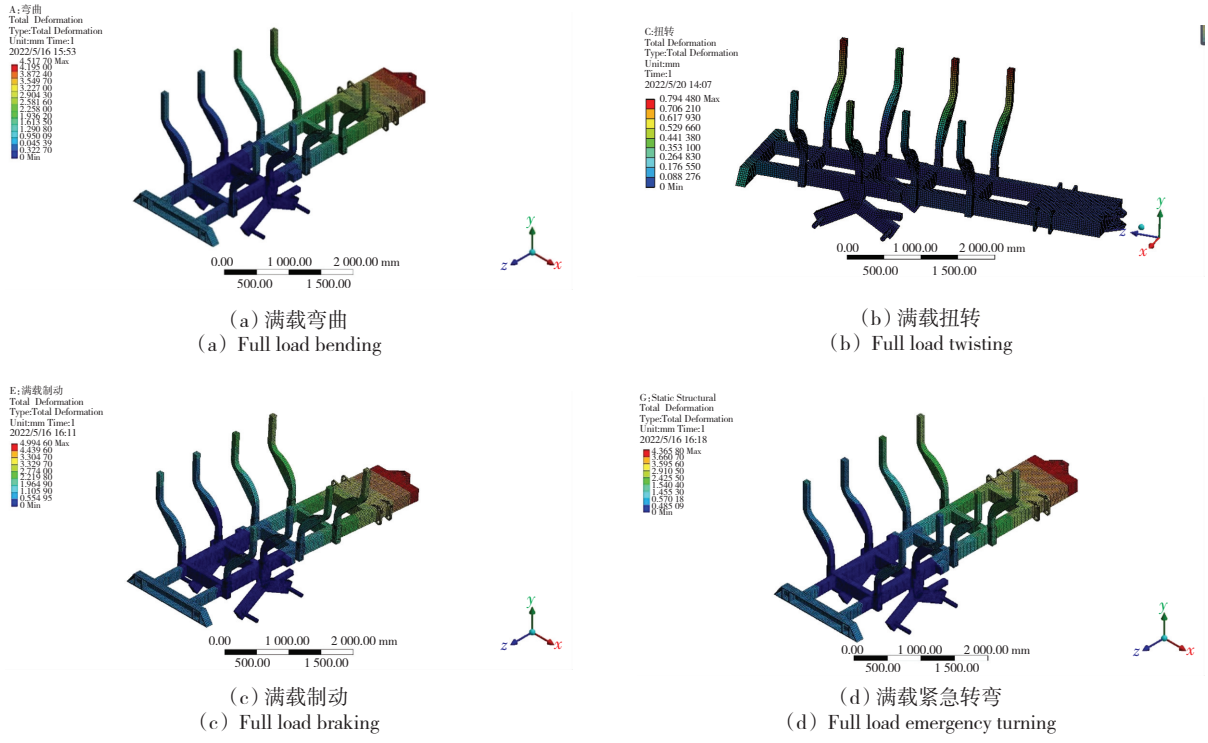
(b)满载扭转
(b) Full load twisting

(c)满载制动
(c) Full load braking

(d)满载紧急转弯
(d) Full load emergency turning

图 4　4 种工况下载荷及边界条件施加图

Fig. 4 Load and boundary condition application diagram under four working conditions



（a）满载弯曲
（a）Full load bending

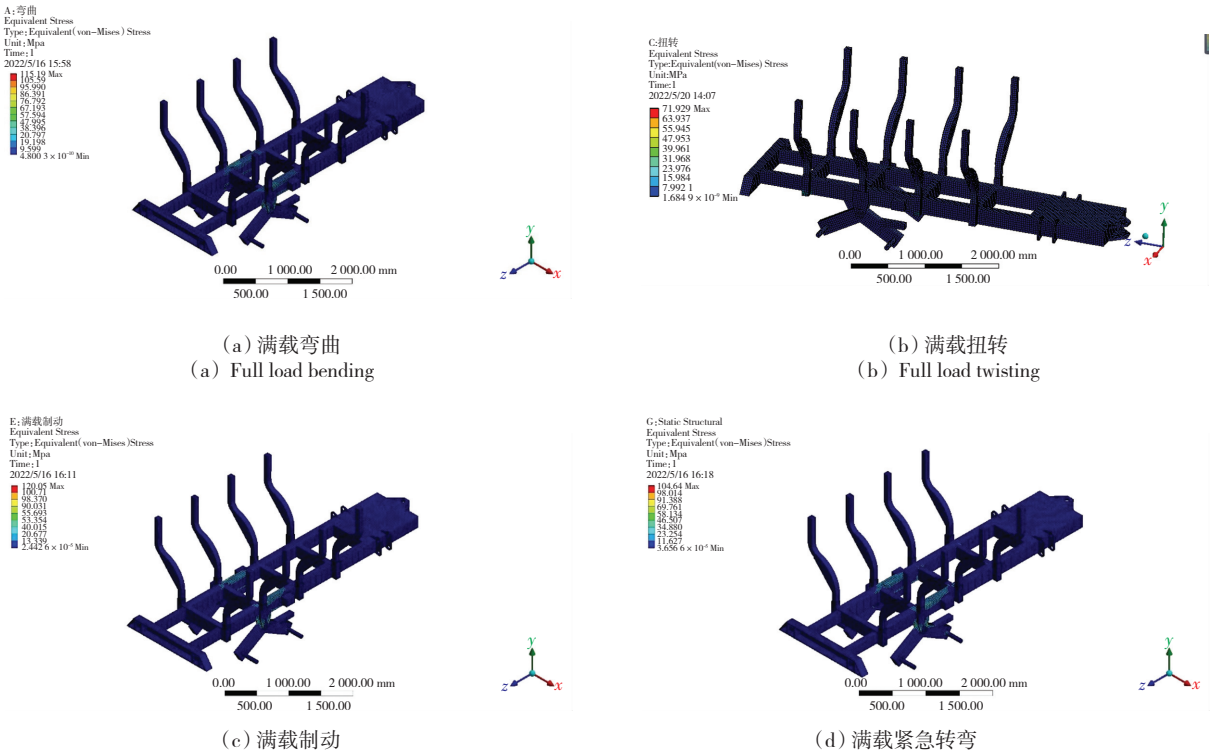
（b）满载扭转
（b）Full load twisting

（c）满载制动
（c）Full load braking

（d）满载紧急转弯
（d）Full load emergency turning

图 5　4 种工况下挂车结构变形示意图

Fig. 5 Schematic diagram of trailer structure deformation under four working conditions



（a）满载弯曲
（a）Full load bending

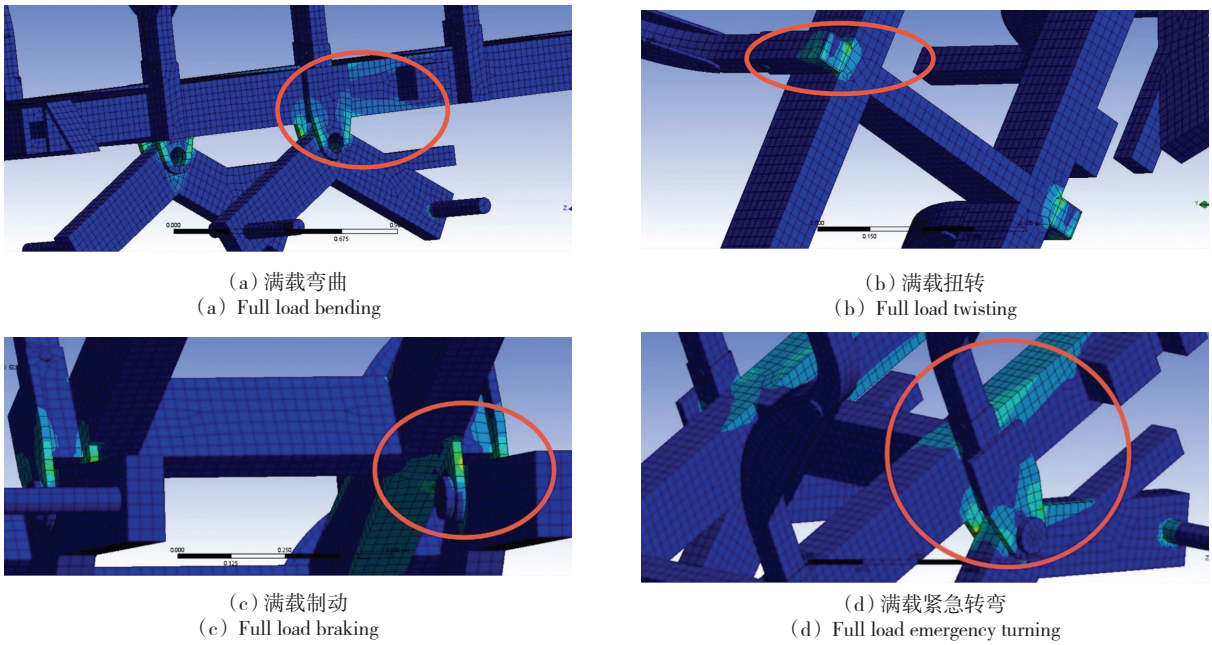
（b）满载扭转
（b）Full load twisting

（c）满载制动
（c）Full load braking

（d）满载紧急转弯
（d）Full load emergency turning

图 6　4 种工况下挂车结构应力示意图

Fig. 6 Schematic diagram of trailer structural stress under four working conditions



(a) 满载弯曲
(a) Full load bending

(b) 满载扭转
(b) Full load twisting

(c) 满载制动
(c) Full load braking

(d) 满载紧急转弯
(d) Full load emergency turning

图 7　4 种工况下挂车结构局部应力示意图

Fig. 7 Schematic diagram of local stress in trailer structure under four working conditions

变形最大,然后变形量从上往下逐渐减小,其中车架轮胎处位移值最小,主要是此处设有车架支撑结构;应力分布为车架前、后部分等效应力值均较小,较大应力区域集中在车架两边车立柱的底部,其最大值为 71.929 MPa,产生的原因是工作过程中处于非对称支撑导致两边受力增大,但远远小于挂车材料 510L 结构钢的屈服强度 355 MPa,故其安全系数为 4.935。

挂车在满载制动工况下,由图 4—图 7(c)可以看出,发生弯曲时最大位移值位于与牵引部分连接的地方,其变形量为 4.994 6 mm,主要原因这部分位置处于悬空状态,离车架支撑处最远,然后变形量逐渐减小直至轮胎处,其中车架轮胎处位移值最小,主要是此处设有车架支撑结构;应力分布为车架前、后部分等效应力值均较小,较大应力区域集中在车架两块钢板处,其最大值为 120.05 MPa,产生的原因是工作过程中载荷主要由此处传递给底盘,但未超过挂车材料 510L 结构钢的屈服强度 355 MPa,故其安全系数为 2.957。

挂车在紧急转弯工况下,由图 4—图 7(d)可以看出,发生弯曲时最大位移值位于与牵引部分连接的地方,其变形量为 4.365 8 mm,主要原因这部分位置处于悬空状态,离车架支撑处最远,然后变形量逐渐减小直至轮胎处,其中车架轮胎处位移值最小,主要是此处设有车架支撑结构;应力分布为车架前、后部分等效应力值均较小,较大应力区域主要集中在车架的两块钢板及周围纵梁处,以及连接底盘和轮胎的轴上,其最大值为 104.64 MPa,产生的原因是工作过程中受到了 0.5 g 的向心力,向心力通过轮胎传递到了轴上,同时挂车上的木材发生偏转。但未超过挂车材料 510L 结构钢的屈服强度 355 MPa,故其安全系数为 3.39。

根据前面的分析计算将 4 种工况的最大位移与最大应力总结,见表 2。

表 2　4 种工况下最大位移和最大应力

Tab. 2 Maximum displacement and maximum stress under the four working conditions

工况 Working condition	最大位移/mm Maximum displacement	最大应力/MPa Maximum stress
满载弯曲 Full load bending	4.517 70	115.190
满载扭转 Full load bending	0.794 48	71.929
满载制动 Full load braking	4.994 60	120.050
满载转弯 Full load turning	4.365 80	104.640

挂车结构采用的材料是510L结构钢,其屈服强度为355 MPa,对4种工况静力分析后得到的4种工况最大应力和最大位移值计算出相对应工况的安全系数。

由材料力学可知,安全系数(n)为

$$n=\frac{\sigma_s}{\sigma_m}。\tag{5}$$

式中:σ_s 为材料屈服强度,MPa;σ_m 为最大复合应力,MPa。

计算出的4种工况安全系数见表3。

表3 4工况的安全系数

Tab. 3 Safety factor of four working conditions

工况 Working condition	满载弯曲 Full load bending	满载扭转 Full load torsion	满载制动 Full load braking	满载转弯 Full load turning
安全系数 Safety factor	3.08	4.935	2.957	3.39

根据特种装备对材料的要求可知,脆性材料的安全系数为 $n=2$,因此如果 $n>2$,则表明挂车结构的安全性好。反之如果 $n<2$,则表明挂车结构的安全性不够。挂车结构在这4种工况下应力均小于材料的屈服强度,因此挂车结构满足强度和刚度的校核;由于各工况安全系数均大于2,因此挂车结构满足安全性要求。

4 结论

本研究通过设计、仿真和分析,成功开发满足森林运输特殊需求的小型集材挂车。通过SolidWork三维装配设计,本挂车展现了优化的灵活性、强度、轻量化和操作便利性。关键发现包括,在满载弯曲、扭转、紧急制动和急速转弯等多种工况下,小型集材挂车展示了出色的结构稳定性,如最大位移不超过4.994 6 mm和最大应力控制在120.05 MPa内,安全系数均超过2.957。这些结果证明小型集材挂车在各种工况下均能保持足够的强度和刚度,并满足安全性要求。因此,该小型集材挂车为森林伐木作业中木材集材的可靠性和安全性提供了坚实保障。展望未来,小型集材挂车设计和性能的进一步优化将更好地适应不断变化的需求和环境挑战。

【参 考 文 献】

[1] 邱仁辉,周新年,杨玉盛. 森林采伐作业环境保护技术[J]. 林业科学,2002,38(2):144-151.
QIU R H, ZHOU X N, YANG Y S. Environmental protection technology for forest harvesting[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(2): 144-151.

[2] 毕有志. 谈利用ZJ-50型和J-50型集材机集材[J]. 林业勘查设计,2011(3):107-108.
BI Y Z. ZJ-50 and J-50 type skidder[J]. Forest Investigation Design, 2011(3): 107-108.

[3] 集材—80拖拉机冬季试验及使用情况[J]. 林业机械,1982,10(1):8-10.
Winter test and application of skidding-80 tractor[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 1982, 10(1): 8-10.

[4] 营林拖拉机课题组. 林海-35拖拉机简介[J]. 林业机械,1978,6(2):1-3.
Forestry Tractor Research Group. Brief introduction of Linhai-35 tractor[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 1978, 6(2): 1-3.

[5] 葛树欣,王红捷,雒鹏,等. CD12型营林集材拖拉机的研制[J]. 林业机械,1994(4):11-12.
GE S X, WANG H J, LUO Y, et al. Development of CD12 type forest skidding tractor[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 1994(4): 11-12.

[6] 张建伟,王立海. 小型环境友好集材装备的研究进展[J]. 森林工程,2012,28(4):31-36,40.
ZHANG J W, WANG L H. Research progress of mini-type environmental-friendly skidding machine[J]. Forest Engineering, 2012, 28(4): 31-36, 40.

[7] 钟俊伟,郭军胜,杜晓琳. 原木集材技术研究及徐工XC360集材机研发[J]. 中小企业管理与科技,2020(28):160-161.
ZHONG J W, GUO J S, DU X L. Research and development of log collecting technology and XC360 collecting machine[J]. Management & Technology of SME, 2020(28): 160-161.

[8] 刘铁男,王立海,张广晖,等. 集材机用三角履带轮关键参数的优化设计[J]. 林业科学,2020,56(6):94-102.
LIU T N, WANG L H, ZHANG G H, et al. Optimization design of key parameters of a triangular pedrail wheel system for log skidders[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(6): 94-102.

[9] 孟庆凯,王立海,刘铁男,等. 林业集材用牵引式搭载装置整体设计及其性能分析与运动仿真[J]. 东北林业大

学学报,2021,49(7):105-110.
MENG Q K, WANG L H, LIU T N, et al. Overall design and performance analysis, and its motion simulation of towed carrying device for forestry skidding[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(7): 105-110.

[10] 战丽,朱晓亮,马岩,等. 间伐伐区小型集材机的设计[J]. 林业工程学报,2016,1(3):97-102.
ZHAN L, ZHU X L, MA Y, et al. The design of small skidder for intermediate cutting area[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(3): 97-102.

[11] 张广晖,王立海,许明贤,等. 三角履带式集材机的设计与分析[J]. 林产工业,2019,56(9):31-36.
ZHANG G H, WANG L H, XU M X, et al. Design and analysis of triangular crawler skidding machine[J]. China Forest Products Industry, 2019, 56(9): 31-36.

[12] 战丽,张志文,杨春梅,等. 履带式林间剩余物集材机关键部件设计与试验研究[J]. 森林工程,2023,39(3):131-139.
ZHAN L, ZHANG Z W, YANG C M, et al. Design and experimental study on key components of crawler forest residue skidder[J]. Forest Engineering, 2023, 39(3): 131-139.

[13] 孙术发,张山山,李禹璇,等. 国内外林区几种大型作业车辆研究进展及车型设计展望[J]. 北京林业大学学报,2019,41(6):154-166.
SUN S F, ZHANG S S, LI Y X, et al. Studies of several large-scale forestry operating vehicles at home and abroad and prospect of vehicle type design[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(6): 154-166.

[14] MIYAJIMA R H, SIMOES D, FENNER P T, et al. The impact of felling method, bunch size, slope degree and skidding area on productivity and costs of skidding in a Eucalyptus plantation[J]. Croatian Journal of Forest Engineering, 2021, 42(3): 381-390.

[15] SPINELLI R, MAGAGNOTTI N, VISSER R, et al. A survey of the skidder fleet of Central, Eastern and Southern Europe[J]. European Journal of Forest Research, 2021, 140(4): 901-911.

[16] RICHMOND T, GERMAIN R H, BROWN K, et al. Comparing single-wheel attachable tracks to chains and bare tires on skidders for mitigating soil disturbance during harvesting operations[J]. International Journal of Forest Engineering, 2023, 34(1): 100-109.

[17] 张建伟. 带平衡轴的小型环境友好集材拖车设计与实验分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2012.
ZHANG J W. Design and experimental analysis of mini-type environment-friendly skidding trailer with balance shaft attached[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.

[18] MASLAK T, KARUSKEVICH M. Introduction of crystallographic factor into the von Mises equivalent stress calculation[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2023, 46(3): 1211-1214.

[19] 阎春利,张希栋,王先军. 利用 ANSYS 进行参数化有限元网格剖分[J]. 森林工程,2004,20(2):32-33.
YAN C L, ZHANG X D, WANG X J. Dividing parameter FEA web with ANSYS[J]. Forest Engineering, 2004, 20(2): 32-33.

[20] 杨洋,吴欣,刘文劼. 基于 K-L 展开的断层-节理边坡随机有限元分析[J]. 公路工程,2023,48(6):106-113,123.
YANG Y, WU X, LIU W J. Stochastic finite element analysis of faulted-nodular slopes based on K-L expansion[J]. Highway Engineering, 2023, 48(6): 106-113, 123.