

# 组合式地铁轨道电动小车轻量化设计与研究

赵旺<sup>1</sup>, 杨志军<sup>2</sup>, 吴文海<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京市地铁运营有限公司线路分公司, 北京

<sup>2</sup>西南交通大学, 四川 成都

收稿日期: 2022年5月31日; 录用日期: 2022年8月9日; 发布日期: 2022年8月16日

## 摘要

针对地铁维检过程中需要对少量人员和小型设备进行转运的问题, 在现有一体式轨道电动小车的基础上进行了轻量化设计和研究。采用组合式设计替代原有的一体式结构, 优化各模块间的组装方式, 通过人力可短距离搬运, 极大地提高了作业区域的可达性; 采用差动驱动方式替换传统的定轴驱动方式, 提高轨道小车对地铁线路的适应能力; 利用有限元软件对其主体结构进行静态强度计算和分析, 在不降低结构强度的情况下, 减轻了整体和单个模块的重量、简化了拆装工艺流程。通过对轨道小车的轻量化设计和研究, 形成了一套适用于地铁维检作业的组合式轨道电动小车装载平台, 具有分模块携带、快速现场组装、操作便捷可靠、运行稳定、快速现场分解、短时间撤线等特点, 为地铁维检作业提供了一个通用型的便携式小型移动平台。

## 关键词

轻量化, 组合式, 轨道电动小车

# Lightweight Design and Research of Combined Metro Track Electric Trolley

Wang Zhao<sup>1</sup>, Zhijun Yang<sup>2</sup>, Wenhai Wu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Line Branch of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing

<sup>2</sup>Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: May 31<sup>st</sup>, 2022; accepted: Aug. 9<sup>th</sup>, 2022; published: Aug. 16<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Aiming at the problem that a small number of personnel and small equipment need to be

文章引用: 赵旺, 杨志军, 吴文海. 组合式地铁轨道电动小车轻量化设计与研究[J]. 机械工程与技术, 2022, 11(4): 374-383. DOI: 10.12677/met.2022.114043

transferred during the maintenance and inspection of metro, the lightweight design and research are carried out on the basis of the existing integrated track electric trolley. The combined structure design is adopted to optimize the assembly mode between modules, which can be lifted in a short distance by manpower, greatly improving the accessibility of the operation area; The traditional fixed axle drive mode is replaced by the differential drive mode to improve the adaptability of the rail car to the subway line; The static strength of the main structure is calculated and analyzed by using the finite element software. Without reducing the structural strength, the weight of the whole and single module is reduced, and the disassembly process is simplified. Through the lightweight design and research of the track trolley, a set of combined track electric trolley loading platform suitable for metro maintenance and inspection is formed. It has the characteristics of sub module carrying, rapid on-site assembly, convenient and reliable operation, stable operation, rapid on-site decomposition, short-time line withdrawal, etc., and provides a universal portable small mobile platform for metro maintenance and inspection.

## Keywords

Lightweight, Combined Type, Track Electric Trolley

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

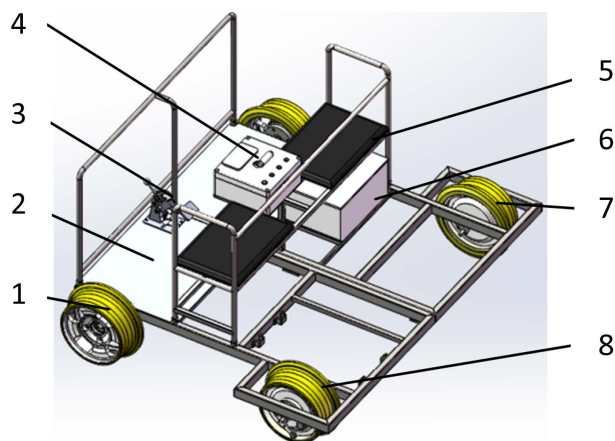
## 1. 引言

随着我国城市轨道交通迅速发展,地铁维检行业随之兴起和发展,地铁维检包含多个领域,需要用到的仪器设备和物料种类繁多,使用频繁、运输不便。对于少量物料或小型设备,大多采用人工搬运的方式,运输路程远、设备体积大小不一、重量较重、所需人工多,劳动强度大。针对这一问题,文献[1]提出采用中大型机械或车辆参与维检过程,但不可避免会出现资源浪费、效率低的现象;文献[2]提出采用模块化移动平台结构,可在作业现场进行拆解和组装,但其自重较重,单个模块的重量无法由单人携带;文献[3]提出了一种新型的走行轮改进机构,为四轮小车在轨道上依靠自身动力运行提出了建议;文献[4]对在轨道上运行的小车典型工况进行了受力分析;文献[5]用有限元法对维检小车关键部件进行结构轻量化分析;文献[6]在保证足够结构强度的前提下,以组合式轨道小车重量最轻为优化目标进行了研究。

目前我国轨道电动小车的研发处于高速发展阶段,已有一体式轨道小车样车进行了试用,但其性能仍不能满足维检作业的实际需要,一种适应现场作业工况的轻量化电动轨道小车的研发势在必行[7]。通过对现有轨道小车进行总结分析,根据其质量重、体积大、运输困难的不足,结合轻量化和组合式的设计原则,利用 ANSYS 分析软件对结构进行优化,提出一种新的改进方案,以提高轨道小车对地铁维检作业实际工况的适应能力。

## 2. 组合式轨道小车整体结构

组合式地铁轨道电动小车由底架、走行轮、驱动轮、脚刹装置、前端栏杆、电池组、双人座椅和控制盒等部件组成,作为一个移动装载平台,可搭载少量人员、物料或小型仪器设备在地铁轨道上运行,满足各类维检作业的需要,组合式地铁轨道电动小车整体结构示意图见图 1。



1.走行轮；2.底架；3.脚刹装置；4.控制盒；5.双人座椅；6.电池组；7.右驱动轮；8.左驱动轮

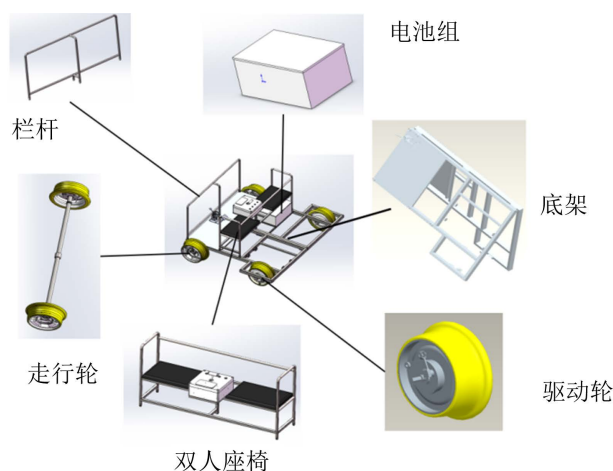
**Figure 1.** Structural diagram of combined metro track electric trolley

**图 1.** 组合式地铁轨道电动小车结构示意图

承载区域位于电动小车的后部，配备多个标准化快速连接接口，可匹配多种连接方式，小型仪器设备的安装和拆卸方便快捷，预留空间大，装载能力强，可满足各类不同小型维检设备的装载需求。同时，电动小车配备的锂电池可为小型维检设备提供电力支持，适用范围广，走行系统运行平稳可靠，噪音小，对所装载仪器设备影响小。

### 3. 组合式轨道小车设计优化

轨道小车仅用于地铁维检作业，在没有中大型机械设备辅助参与的情况下，需能通过人力进行短距离搬运，以实现作业区域的可及性要求；轨道小车需要在地铁轨道上依靠自身动力运行，要求其走行动力必须满足地铁轨道最大坡道的需求，同时应能适应地铁线路最小转弯半径的要求；地铁维检作业可用时间有限，轨道小车上线和撤线时间短，作业完成后需快速撤离，不影响地铁线路的正常使用，因此在要求轨道小车拆装简单便捷，同时要求主体结构强度高，变形量小、稳定性好。



**Figure 2.** Exploded schematic diagram of each module of combined track trolley

**图 2.** 组合式轨道小车各模块分解示意图

### 3.1. 以轻量化为目标的组合式车体结构设计

组合式地铁轨道电动小车采用模块化组合式的整体结构设计,各模块均采用可快速拆装的结构连接,整个小车拆分为多个模块后,各模块重量较轻,携带方便,到达作业区域后可快速完成组装成套、使用完后可迅速进行拆解撤线。组合式轨道小车各模块分解示意图见图 2。

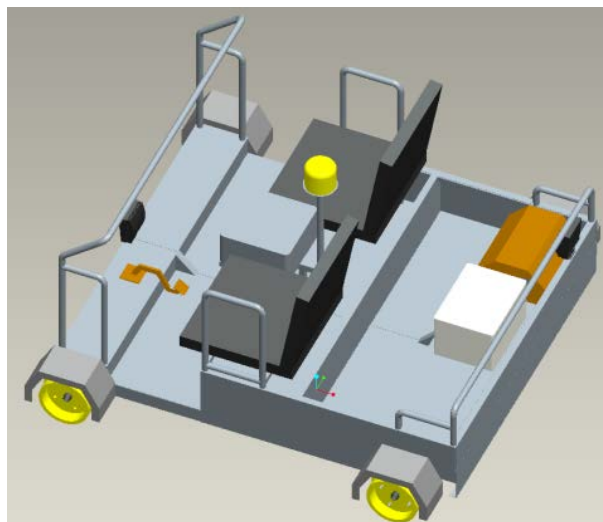


Figure 3. Structural diagram of integrated track trolley  
图 3. 一体式轨道小车结构示意图

传统的一体式地铁轨道电动小车为整体式结构设计,结构示意图见图 3,在使用过程中不可进行拆卸,如需进入到作业区域,需要中大型机械设备的辅助运输,人力很难进行搬抬。而组合式地铁轨道电动小车整个小车由底架模块、前栏杆、走行轮、电池组、双人座椅、驱动轮等 6 个模块组成,以底架模块为基础,其他 5 个模块分别采用销钉、U 型卡槽等快速连接方式与底架模块进行固定,即保证了结构的可靠性,又能进行快速拆解和组装。传统的一体式和新型的组合式地铁轨道电动小车重量和体积对比见表 1。

Table 1. Comparison of weight and overall dimensions between integrated and combined rail trolley  
表 1. 一体式和组合式轨道小车重量及外形尺寸对比

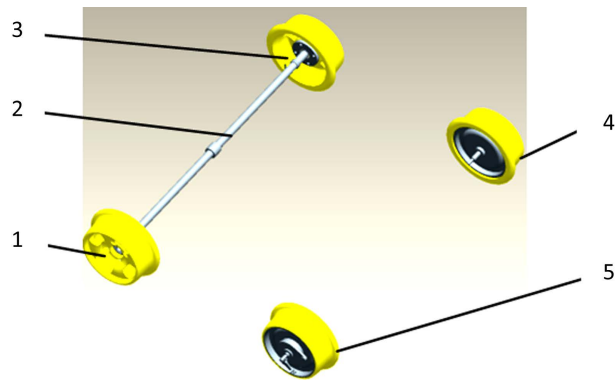
参数项	一体式		参数项	组合式	
	尺寸(m)	重量(kg)		尺寸(m)	重量(kg)
整车(不可拆分)	1.6 × 1.6 × 1.5	170	底架	1.5 × 1 × 0.1	20
			前栏杆	1.3 × 0.13 × 0.7	3
			走行轮	1.7 × 0.4 × 0.4	26
			电池组	0.4 × 0.3 × 0.25	40
			双人座椅	1.3 × 0.43 × 0.7	25
			驱动轮	0.4 × 0.4 × 0.15	25

通过轻量化设计,组合式轨道小车总重量由原来的 170 kg 降低到了 139 kg,减重效果显著。为保证单个模块可以通过人力进行短距离搬抬,组合式轨道电动小车的 6 个模块均采用最简单可靠的结构方式,保证每个模块的重量在 40 kg 以内,通过组合式可拆卸的结构设计,整个轨道小车可根据需要在组合或分解状态之间进行快速转换。组合式轨道小车减少了对中大型车辆的依赖,减少了在使用大量人力或机

械设备进行搬抬过程中可能出现的碰撞损伤，减少了作业前后的辅助时间，提升了工作效率。

### 3.2. 组合式轨道小车驱动模块设计优化

组合式轨道小车驱动模块由 2 个走行轮和 2 个驱动轮组成 4 轮结构，2 个驱动轮都具有动力，相互独立形成差动驱动结构，可通过最小曲线半径为 160 米，组合式轨道小车驱动模块结构示意图见图 4。

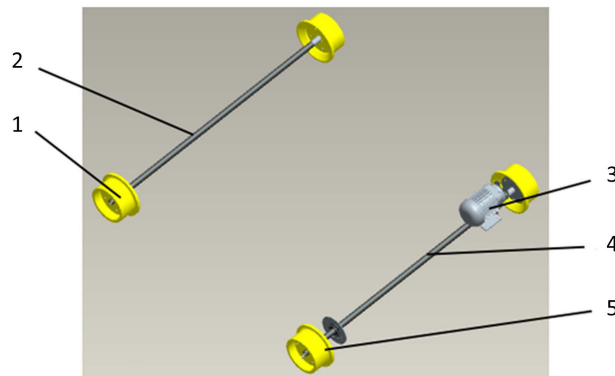


1.左走行轮；2.轮轴；3.右走行轮；4.右驱动轮；5.左驱动轮

Figure 4. Structural diagram of combined rail trolley drive module

图 4. 组合式轨道小车驱动模块结构示意图

传统的一体式轨道小车前后的走行轮和驱动轮均通过轮轴进行连接，驱动电机通过链条将动力传递给后轮轴，这种结构方式不利于通过有弯道的路段，不能满足最小曲线半径的通过要求，一体式轨道小车驱动模块结构示意图见图 5。一体式和组合式轨道小车两种不同驱动结构的对比分析见表 2。



1.走行轮；2.前轮轴；3.驱动电机；4.后轮轴；5.驱动轮

Figure 5. Structural diagram of driving module of integrated rail trolley

图 5. 一体式轨道小车驱动模块结构示意图

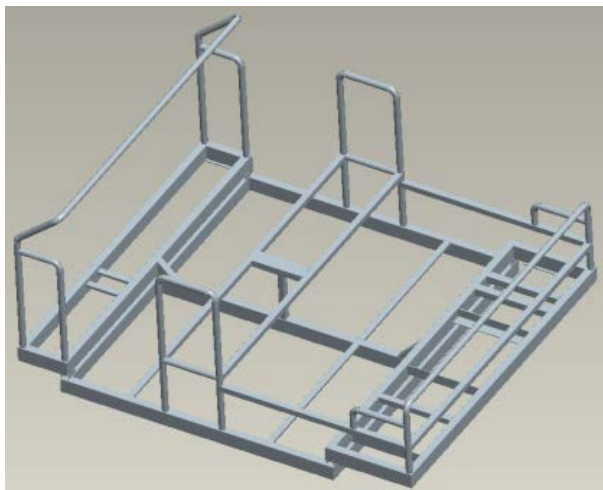
Table 2. Comparison of driving modes of integrated and combined rail trolley

表 2. 一体式和组合式轨道小车驱动结构对比

名称	一体式	组合式
驱动结构	定轴式	差动式
驱动动力	驱动电机	轮毂电机
轮轴	2 根	1 根
能通过的最小曲线半径	—	160 米

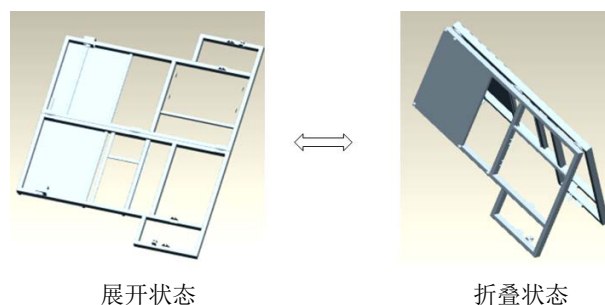
### 3.3. 组合式轨道小车主主体结构设计优化

组合式轨道小车的主体结构是底架,底架是整个电动小车的组装基础和承重部件,考虑到制造工艺成熟、重量轻和强度高等要求,采用框架式结构,使用壁厚为 3 mm 钢制型材焊接而成。为适应地铁轨道的宽度以及满载时的稳定性,如图 6 所示,底架外形尺寸达到了  $1.8 \times 1.5$  米,不便于搬运,因此设计了折叠式结构的底架,两种不同状态结构示意图见图 7,经过折叠后,底架外形尺寸减小至  $1.5 \times 1$  米,便于搬运和存储。



**Figure 6.** Schematic diagram of underframe structure of integrated track trolley

**图 6.** 一体式轨道小车底架结构示意图



**Figure 7.** Schematic diagram of the structure of the underframe of the combined rail trolley in the unfolded and folded state

**图 7.** 组合式轨道小车底架展开及折叠状态结构示意图

通过 ansys 对小车底架进行静态结构强度分析,采用六面体对一体式和组合式轨道小车的底架模型进行网格划分,均以 4 个轮子与底架连接的位置为约束点,载荷列表见表 3。

**Table 3.** Load list of electric trolley

**表 3.** 轨道小车载荷列表

名称	一体式	组合式
	载荷(kg)	
乘员 2 人	180	180
自重(电池 + 前栏杆 + 双人座椅 + 底架)	110	87.5
载重	400	400



底架材料为 Q235，弹性模量  $E = 201 \text{ GPa}$ ，密度  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ ，泊松比  $\mu = 0.26$  [8]。根据上述参数和载荷进行加载计算获得底架应力分布见图 8 和图 9。

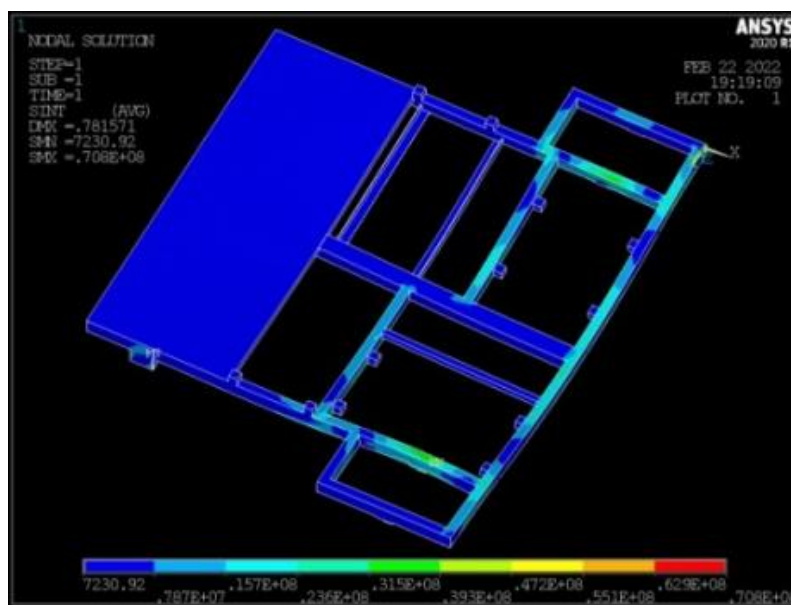


Figure 8. Nephogram of stress distribution on underframe of combined track trolley  
图 8. 组合式轨道小车底架应力分布云图

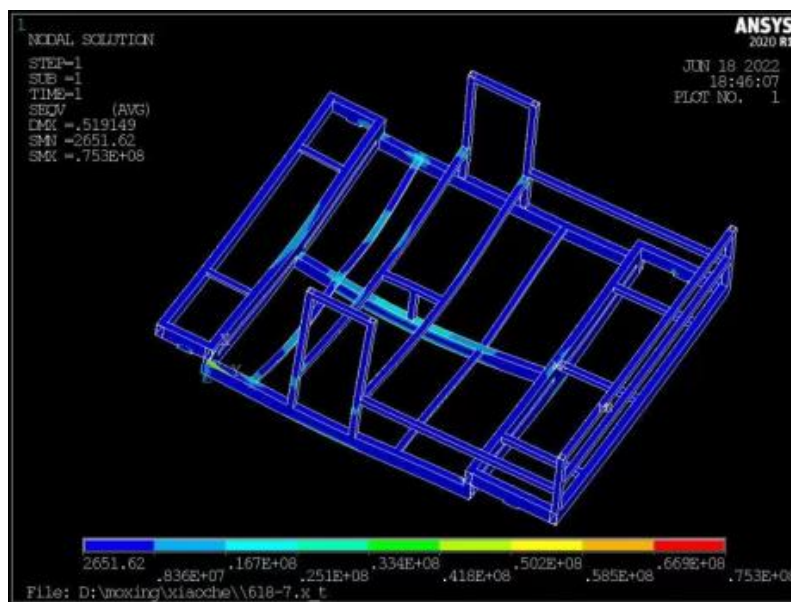


Figure 9. Nephogram of stress distribution on underframe of integrated track trolley  
图 9. 一体式轨道小车底架应力分布云图

组合式轨道小车底架最大应力为 70.8 Mpa，一体式轨道小车底架最大应力为 75.3 Mpa，两者差别不大，均远小于材料的屈服极限 235 Mpa，仍有继续优化的空间，最大应力处与四周并未发生应力突变，不存在应力集中情况，结构设计较为合理。

底架应变云图见图 10 和图 11，底架最大的形变发生在载荷装载区域的中间位置，组合式轨道小车

底架最大形变量为 0.78 mm，一体式轨道小车底架最大形变量为 0.51 mm，在满载情况下对整体结构形状改变均非常微弱，不影响小车的正常运行。

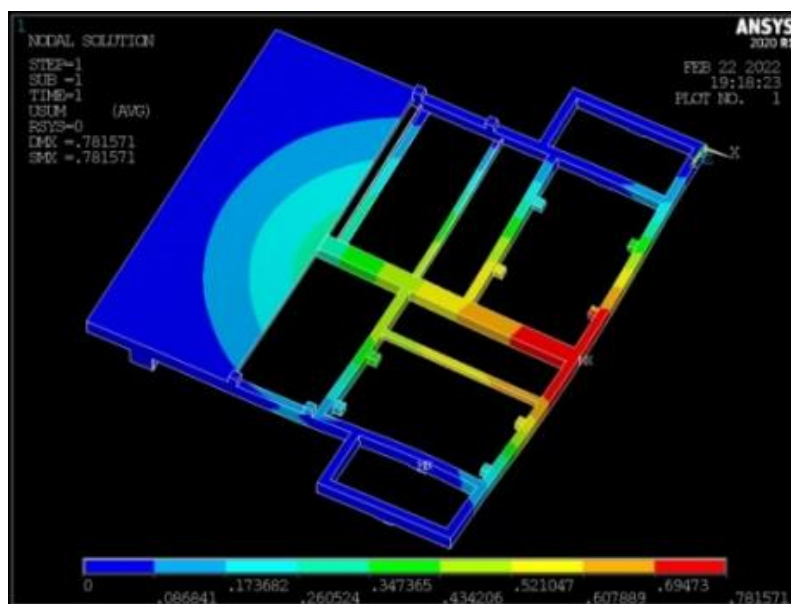


Figure 10. Strain nephogram of combined track trolley underframe

图 10. 组合式轨道小车底架应变云图

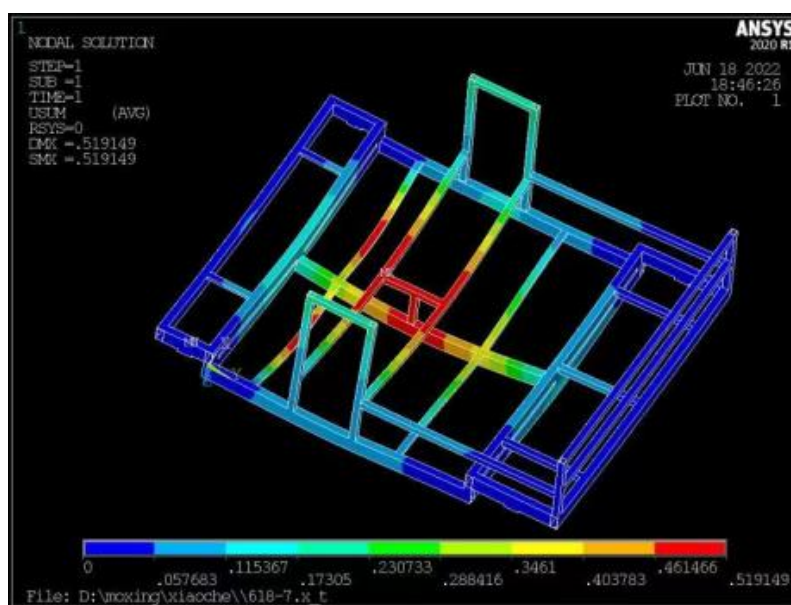


Figure 11. Strain nephogram of integrated track trolley underframe

图 11. 一体式轨道小车底架应变云图

新型组合式轨道电动小车和传统一体式轨道电动小车主部分静态结构强度分析情况见表 4。

新型组合式轨道电动小车经过轻量化设计后，最大应力值和形变量与传统的一体式结构差别不大，均处于安全范围内。通过轻量化设计达到了减轻重量，结构强度高、可进行现场快速拆装的目的。



**Table 4.** Structural analysis and comparison of integrated and combined rail trolley  
**表 4.** 一体式和组合式轨道小车结构强度分析对比

名称	一体式	组合式
最大应力值(MPa)	75.3	70.8
最大形变量(mm)	0.51	0.78

#### 4. 样机试验



**Figure 12.** Prototype test of combined metro track electric trolley  
**图 12.** 组合式地铁轨道电动小车样机试验

根据上述技术方案,完成了组合式地铁轨道电动小车的样机,并在地铁轨道上进行了测试,测试现场见图 12。样机试验在地铁隧道实际工况下进行,按照正常作业流程,分别进行了各模块分散携带至工作区域、现场快速组装、功能调试、地铁维检作业、走行速度测试、制动功能及刹车距离测试、现场快速拆解、快速撤离线路等多个环节,实验结果见表 5。

**Table 5.** Prototype test results  
**表 5.** 样机试验结果

测试项	测试结果
单个模块重量	≤40 kg, 可单人携带
最大尺寸	≤1.5 米 × 1 米
组装上道时间	2 人, <4 分钟
拆解撤线时间	2 人, <3 分钟
最大运行速度	25 km/h
最大载重	400 kg
平路制动距离	<15 m
33%下坡路制动距离	<25 m

#### 5. 结论

组合式轨道电动小车各部件采用轻量化设计,选用便于拆装的模块化结构设计方案,相较于传统的

一体式结构, 作业前后不需要中大型机械的辅助转运, 可在 3~4 分钟内快速完成组装和拆解撤线, 极大提高了地铁维检作业的工作效率。

组合式轨道电动小车采用差速驱动方式, 可通过最小曲线半径为 160 米, 相较于传统的一体式结构的定轴驱动方式, 对地铁线路的适应能力大为提高, 可更为有效地完成少量人员、小型物料和仪器设备在作业区域内快速运输需要, 降低了人工搬运的劳动强度。

组合式轨道电动小车的主体结构经过轻量化设计, 相较于传统的一体式结构, 在减小了体积并减轻了重量的情况下, 满载工况时最大应力值和形变量并没有发生明显变化, 达到了组合拆装、轻量化、通用化的优化目的, 为地铁维检作业提供了一个通用型的小型移动平台。

## 参考文献

- [1] 杜茂金. 轨检车在地铁轨道设备养修中的运用[J]. 现代城市轨道交通, 2009(4): 72-74.
- [2] 赫磊, 王彬, 张志新. 一种便携式轨道小车的研制[J]. 现代制造技术及装备, 2021, 239(4): 138-139.
- [3] 植立才, 杨雪荣, 成思源, 杨世峰. 传统 T 型轨检小车走行轮结构的改进设计[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(1): 23-26.
- [4] 杜少杰, 李扬, 王少英. 基于有限单元法车辆车体结构优化设计[J]. 机械设计与制造, 2021(16): 196-200.
- [5] 任晓路, 姚新港. 基于有限单元法铰接式车身结构轻量化分析[J]. 机械设计与制造, 2021(12): 224-229.
- [6] 杨雪荣, 孟欢, 姚丽娟, 成思源. 基于 TRIZ 理论的轨检小车机械结构创新设计[J]. 包装工程, 2016, 37(14): 16-20.
- [7] 王海英, 林涛. 基于 Isight 的双梁桥式起重机小车架轻量化设计[J]. 煤矿机械, 2021, 42(10): 191-193.
- [8] 周杭, 丁晓红. 基于 OptiStruct 的交叉带分拣小车轻量化设计[J]. 电子科技, 2017, 30(8): 122-123.