

价依据,使能耗优化能够扩展至产品全寿命维度。

### 4.3 能耗预测与绿色设计指标体系

为提升机电产品绿色设计的前瞻性,本研究构建绿色设计指标体系,使设计阶段即可量化未来能耗与环境表现。指标体系包括单位功能能耗、碳排放强度、结构重量指数、材料使用效率、可回收性指数及资源占用强度等。通过建立基于历史数据与工况模拟的数据驱动预测模型,可对产品运行阶段能耗进行预估,包括不同任务周期、载荷状态与环境条件下的能耗变化趋势。模型利用多变量学习算法识别材料属性、结构参数与运行策略对能耗的敏感性,为设计方案优化提供数据支撑。绿色设计指标体系与能耗预测方法的结合,使绿色设计从经验式判断转向模型驱动决策,有利于在设计初期即实现材料、结构与能耗的协调优化。

## 5 材料—结构—能耗协同优化模型构建与应用

### 5.1 多目标协同优化模型的数学描述

机电产品绿色设计涉及材料、结构与能耗多维变量,需要通过统一数学模型实现综合协调。本研究构建多目标协同优化模型,以材料性能参数、结构几何参数及能耗行为参数为主要设计变量,以重量最小化、结构刚度满足约束、单位功能能耗最优及成本可控为核心目标。材料性能通过密度、杨氏模量与疲劳寿命等指标描述;结构变量由壁厚、截面尺寸与拓扑布局表征;能耗表现结合驱动、摩擦与热管理模型进行量化。基于多学科设计优化(MDO)框架,将三者耦合关系显式化,使模型能在多约束条件下实现全局协调。通过构建多目标函数集并引入 Pareto 前沿分析技术,对不同目标间的折中解进行筛选,为设计者在轻量化、绿色性能与可靠性间的平衡提供依据。

### 5.2 协同优化算法设计与求解策略

材料—结构—能耗协同优化问题具有高维度、强耦合与多约束特征,直接求解计算成本高。为提高计算效率,本研究采用遗传算法、粒子群算法与多目标进化策略协同求解。遗传算法用于全局搜索潜在优解区域,粒子群算法加速局部收敛,多目标进化算法用于构建高质量 Pareto 解集。由于材料性能仿真、结构有限元分析与多工况能耗模拟计算量巨大,研究引入代理模型技术,包括材料性能代理模型、结构等效刚度代理模型与能耗预测代理模型,以替代高成本计算。代理模型通过响应面法与机器学习方法训练得到,可在大范围设计空间保持高精度。代理模型与进化算法结合,

使优化过程在保证准确性的前提下大幅提速,提高了协同优化策略在工程中的可行性。

### 5.3 典型机电系统的协同优化案例分析

为验证协同优化模型的可用性,本研究以某机电执行器为案例对象,对材料替代、结构优化与能耗改善进行综合设计。优化变量包括材料类型(如铝合金、复合材料等)、结构拓扑形式及驱动系统能耗参数。协同优化模型综合评估材料更替引起的重量变化、结构刚度变化导致的动态性能差异及摩擦损失、加速度能量与热负载的变化。优化结果显示,执行器重量降低约 18%,运行能耗降低约 22%,生命周期碳排放减少约 19%,且结构可靠性满足设计要求,没有出现刚度不足或疲劳寿命下降等问题。同时,优化方案提升了加工性与装配简洁度,使后期制造与维护更加便利。结果证明该协同优化方法具备工程适用性,可有效实现多目标性能的协调,为绿色机电产品设计提供实践依据。

## 6 结语

材料选择、结构与运行能耗之间存在密切耦合关系,是机电产品绿色设计的关键影响因素。本研究构建材料—结构—能耗协同优化模型,通过跨学科方法实现多目标综合平衡,并以典型产品为例验证了模型的可行性。该模型为实现低碳、高性能与高可靠度的绿色机电产品提供了系统化方法,为绿色制造体系的建立奠定理论基础。未来可结合人工智能、数字孪生与实时优化技术进一步提升协同模型智能化与动态适应能力,使机电产品绿色设计迈向更高水平。

## 参考文献

- [1] 邢世雄.数据驱动的在役机电产品主动再制造方案决策研究[D].武汉科技大学,2023.
- [2] 曲艳峰.面向复杂机电产品的管路布局优化方法研究[D].上海交通大学,2016.
- [3] 杨自强.新质生产力驱动下机电产品模块化设计开发路径研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.杭州华丰巨箭工具有限公司,2025:152-153.
- [4] 陈河.信息化与绿色制造技术应用于机电产品设计和生产中的价值[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).杭州绅美科技有限公司,2025:64-67.
- [5] 张雷,方俊伟,苏金,等.基于FSRce模型的机电产品绿色概念设计方案生成方法[J].工程设计学报,2024,31(01):10-19.

# Design and improvement of front wall of explosion-proof electric engineering vehicle for mining

Xiangbin Wang Zhenyu Wang Xihao Xue

Shaanxi Construction Machinery Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710299, China

## Abstract

Currently, new energy explosion-proof trackless rubber-tired vehicles have emerged as a game-changer in coal mine transportation. Their high efficiency, eco-friendliness, and safety features effectively address the “four highs and one low” issues (high energy consumption, high emissions, high operational costs, high safety risks, and low operational efficiency) associated with traditional energy vehicles. These vehicles not only significantly improve underground working conditions but also reduce operational costs, gradually establishing themselves as the new standard in coal mine transportation. Meanwhile, with advancements in emerging technologies, these new energy mining vehicles are evolving toward greater reliability, enhanced efficiency, and smarter functionalities.

## Keywords

coal mine, railless rubber wheel car, front periphery, structural analysis, optimization design

## 矿用防爆电动工程车前围设计与改进

王向斌 王振宇 薛希豪

陕西建设机械股份有限公司, 中国·陕西 西安 710299

## 摘要

目前, 新能源防爆无轨胶轮车凭借其高效、环保、安全的特点, 能够有效解决目前传统能源车辆四高一低的问题, 极大的改善了井下作业环境且降低运营成本, 逐渐成为煤矿井下运输的新生力量。同时, 随着新兴技术的发展, 新能源矿用防爆无轨胶轮车也向着更可靠、更高效、更智能的方向发展。

## 关键词

煤矿; 无轨胶轮车; 前围; 结构分析; 优化设计

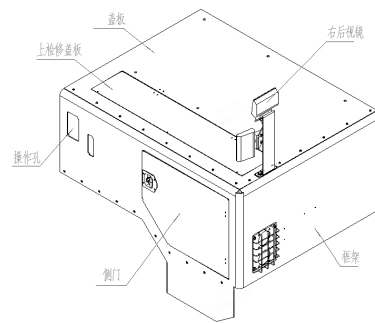
## 1 引言

无轨胶轮车前围作为车辆的重要部件, 其通常由骨架、盖板、蒙皮、检修盖板组成, 现有 WLL-5、WLL-8 无轨胶轮车普遍采用角钢搭建骨架, 盖板与车架整体焊接的方式, 存在整体质量大、检修不方便的问题, 本设计通过有效利用前围零部件及车架的特点, 设计一种拆卸方便, 轻量化且具备维修便利、安全防护的前围。

## 2 设计组成

在前围总成的设计过程中, 着重考虑轻量化、易拆卸及美观的目的, 目前常见车辆前围采用 6mm 钢板+角钢框架的方式整体与车架焊焊, 盖子采用拉手进行固定。新前围

充分考虑车辆结构特点, 进行优化设计:



### 2.1 高强度轻质材料应用, 实现轻量化与安全性平衡

轻量化是新能源车型提升续航能力、降低运营成本的主要途径, 前围作为整车前端重要零部件, 其重量的高低对整车能耗影响巨大。新前围放弃传统的厚重大板 6mm 普通钢板, 选用热成型高强度的新型材料为主材, 在保证抗拉强度、屈服强度不低于传统材料的前提下密度仅为普通钢材 1/3-2/3。通过新材料的应用和结构优化设计, 新前围比传统

【作者简介】王向斌(1988-), 男, 中国陕西富平人, 本科, 工程师, 从事机械设计与制造工艺矿用防爆电动工程车前围设计与改进研究。

方案减重 40%-50%，按整车前围占车身比重约为 3% 计算，可以实现整车减重 50-100kg，直接减少整车行驶过程中的能量消耗。根据实测数据可知在相同的作业工况条件下，整车续航里程可提高 5%-10%。同时选用的材料还具有很强的抗腐蚀性以及防爆性能，可以适应矿山作业中粉尘潮湿且可能受到冲击的工作环境，避免了传统钢材容易生锈从而影响到结构强度的问题。

## 2.2 模块化拆分设计，构建快速拆卸体系

针对传统拼焊结构拆卸难的痛点，新前围采用“面板+盖板+框架”的模块化拆分设计，分别采用 4mm 高强度轻质面板加 2mm 加强盖板的形式，与布置在车架及电池壳体上的安装孔位连接。所有部件之间的连接均使用高强度螺栓紧固替代传统的焊接工艺。从而形成了一套全新的“局部维修快速拆解”和“整体更换快速拆卸”的双重便捷体系，在对部分部件进行检修时，不用把整个前围全部拆掉，只需要打开侧门或者上盖板就可以进入内部对关键电气控件、管路接头等进行修理操作，时间从原来的 2-3 小时缩短到 0.5-1 小时；在需要将整辆汽车的前围更换或大修时，则只需拆除固定于车架及电池组上的 16 颗定位螺栓即可实现前围整体快速拆卸，仅需 1-2 人配合完成全过程耗时不超过 1 个小时，较之传统的切割拆卸方式提高 80% 以上效率。同时螺栓连接方式避免了焊接高温对材料性能的影响，并且方便后期各个部件的单独更换和维护，减少运维成本。

## 2.3 新前围在外观设计上，打破了以往传统的拉手固定方式

采用内侧合页+内嵌式门锁的组合形式。内侧合页使整个前围侧门和盖板的转动机构完全隐藏在前围内部，并且不会出现传统外置合页的凸出现象；而内嵌式的门锁则将锁体与前围表面齐平，消除了传统拉手的凸起部分，使得整个前围外侧面实现完全平整化的效果，在极大程度提升了前围整体外观的同时，也优化了整车气动性能—由于没有突出的结构，所以前围外部行车时会产生气流漩涡就少了，通过进行气动仿真测试，发现相比传统车型整车风阻系数降低了 10%-15%，帮助提升整车续航能力。同时，内嵌式门锁采用防爆结构设计，锁芯具有防尘防水功能，配合精密的锁舌咬合结构，在矿山颠簸路况下也能保证牢靠性，避免了传统拉手式门锁容易松动、容易损坏的问题。

## 2.4 工艺适配性优化，平衡成本与精度

新前围在保证设计性能的前提下，充分考虑制造工艺的经济性、可行性，在关键零部件上都使用板料折弯+拼焊这种成熟的工艺路线。板料折弯可实现复杂截面形状精确成型且加工效率高、成本低，比传统制造的成本降低了 30% 以上；而拼焊采用机器人气体保护焊方式，预设好焊接路径和参数后就能使接头一致性强、强度更高，焊接缺陷率被严格控制在 0.5% 以下。为了进一步提高结构强度，在框架和盖板的内侧使用点焊的方式布置加强筋，加强筋采用交叉

网格加纵向加强的形式，既满足了前围整体抗冲击、抗变形的要求，又避免了过度强化带来的重量增加。经过静载测试发现新前围在承受 50KN 横向冲击力时的最大变形量只有 2.5mm 远小于传统的 8mm 完全符合矿山工作环境下的冲击防护需求。

## 2.5 细节优化设计，提升舒适性与耐用性

新前围在细节上考虑了使用舒适性与结构耐用性，对于车辆运行时产生的噪音，在侧门以及上盖板挡条处加装专用减震密封条。密封条采用耐油、耐老化三元乙丙橡胶材质制作而成，具有良好的弹性恢复性能，车门关闭后能够紧密贴合在一起，并且提升了门锁和门框之间的咬合力，防止在颠簸路况下出现门锁松动的情况发生，也隔绝了车内部件震动所产生的声音还有外部气流带来的噪音干扰，在经过实际测试之后发现驾驶室内部的噪音比传统设计降低了 5-8 分贝左右，使得驾乘体验更加愉悦舒适。同时这种减震密封条还具备一定的防尘防水功能，可以避免矿山里飞来的粉尘颗粒物以及积水进入到前围内对零部件造成侵蚀破坏现象产生影响延长其使用寿命时间周期。

## 2.6 按照结构力学优化设计

框架和盖板内侧用高密度点焊工艺把加强筋固定起来，这样就形成了多重立体支撑结构。加强筋选用了高强度合金材料，经过精确剪裁然后折弯处理，能够完美契合内侧轮廓，保证它跟基体紧紧贴合在一起，并且受力均匀分布，点焊的时候利用智能控温技术控制电流大小以及每个焊点之间的距离，既不会对基材造成损伤又能使每一个焊点成为有力的着力处，密集排列的这些焊点同加强筋交织融合之后便形成起稳固的承重网络<sup>[1]</sup>。

当遭遇外界冲击或者压力的时候，加强筋就能立刻把部分应力分散开去，免得力量集中之后引发凹陷或者扭曲的情况出现，这样一来整体抵抗冲击的临界点就显著提高了，这种强化处理的方法同样也能很好地把控长时间使用带来的塑性改变，在那些频繁振动并且存在温差波动等非常复杂的作业环境中，依然可以保持住框架和盖板这两大部分构造上的准确度，并且其密封性能也并未因此受到破坏影响，所以这样整个产品的寿命便被延长了很长一段时间，在那种极度苛刻条件之下的结构稳定要求中完全达到了标准<sup>[2]</sup>。

## 3 提升装配精度

