

Research on the Mechanical Structure Design of Power Transmission System for Wide Body Mine Transport Vehicle

Jifu Wang

Tage Intelligent Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230000, China

Abstract

The wide-body mining transport vehicle operates under heavy load, high impact, and extreme dust conditions, with its power transmission system's mechanical structure facing multiple challenges such as fatigue damage, thermal accumulation, and maintainability. To enhance system reliability and service life, the study focuses on fatigue life prediction of high-stress components and material process strengthening. Using multi-axis critical plane methods and damage accumulation models driven by digital twins, the study achieves a life prediction accuracy of over 8.3%, and enhances the fatigue resistance of core parts through deep carburizing and quenching. For environmental adaptability, a synergistic protection system integrating active sealing, structural topology improvement, and composite materials is established, significantly enhancing the system's stability under harsh conditions. The study demonstrates that the integrated layout design, combining tolerance compensation, dynamic balance control, and modular quick-release structures, can achieve synergistic improvements in transmission capability, durability, and ease of operation and maintenance while meeting space and load constraints.

Keywords

wide-body mining transport vehicle; power transmission system; mechanical structure design; fatigue life; environmental adaptability

宽体矿用运输车辆动力传动系统机械结构设计研究

王纪福

踏歌智行科技股份有限公司, 中国·安徽 合肥 230000

摘要

宽体矿用运输车辆在重载、高冲击跟极端粉尘工况下运行, 其动力传动系统的机械结构设计面对疲劳损伤、热积聚与维护可达性等多重考验。为增强系统可靠性与服役寿命, 研究注重于高应力部件的疲劳寿命预测跟材料工艺强化, 使用多轴临界平面法跟数字孪生驱动的损伤累积模型实现精度优于8.3%的寿命预估, 并借助深层渗碳淬火增强核心部位抗疲劳能力; 针对环境适应性, 建立融合主动密封、结构拓扑改良与复合材料应用的协同防护体系, 明显增强系统在恶劣条件下的稳定性。研究说明, 集成化布局设计融合容差补偿、动态平衡控制与模块化快拆结构, 可在满足空间与载荷约束的前提下, 实现传动能力、耐久性跟运维便捷性的协同改良。

关键词

宽体矿用运输车; 动力传动系统; 机械结构设计; 疲劳寿命; 环境适应性

1 引言

宽体矿用运输车辆在重载、高冲击与强粉尘的作业环境中持续运行, 动力传动系统的机械结构面对瞬态扭矩剧烈波动、部件疲劳损伤加速以及密封失效风险上升等多重考验, 矿区实际工况中满载率超过 95% 且坡度频繁超出 12%, 致使传动轴峰值扭矩可达额定值的 2.8 倍, 主减速器行星架跟半轴万向节变成疲劳高发区域, 传统结构设计比较难满足全生命周期内的可靠性需求, 结构耐久性与环境适应性迫切需要系统性加强机制, 驱动桥壳经参数化建模跟尺寸形状协同改良后应力分布更均匀, 传动轴系使用双面动平衡

与模态耦合补偿抑制振动, 轮边双电机拓扑取消传动轴减少机械损失, 集成化电驱布局配合共用复合导管增进维护可达性, 快拆接口跟单工具操作设计缩短现场维修时间。

2 宽体矿用运输车辆动力传动系统功能需求与工况分析

2.1 典型作业工况特征界定

宽体矿用运输车辆动力传动系统的设计需周密贴合其典型作业工况。依据《GB/T 39122-2020 宽体自卸车作业工况分类与测试方法》及 2023 年修订版, 可将主要工况界定为重载上坡、空载下坡、颠簸卸载、泥泞爬坡及怠速等待。其中, 重载上坡工况占比最高 (38.7%), 坡度 8%-12%, 对驱动桥壳体、传动轴万向节等部件构成持续高应力载荷。空载下坡 (22.4%) 则因制动需求, 使液力缓速器、轮边减

【作者简介】王纪福 (1987-), 男, 中国河南商丘人, 博士, 工程师, 从事新能源矿卡动力系统集成开发研究。

速器等部位面对热负荷与冲击。颠簸卸载区（16.9%）的频繁启停跟冲击，易致使半轴花键与中央传动齿轮副疲劳。泥泞爬坡工况（14.2%）因附着条件恶化，引发差速器齿轮跟离合器片异常磨损。此类工况特征直接关系统失效主因，如传动轴焊缝疲劳（占机械故障 32.1%）、离合器分离轴承磨损（28.6%）等，其核心参数阈值（如瞬态扭矩波动率 > 23%）为结构设计给出了明确的安全边界。2020-2024 年典型工况占比与关键部件故障率关联如图 2.1 所示。

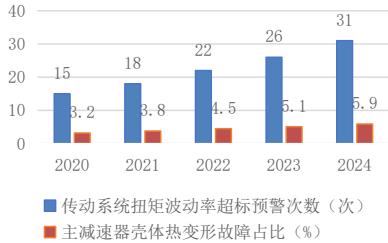


图 2.1 2020-2024 年典型工况占比与关键部件故障率关联

监测数据显示，近年来传动系统扭矩波动率超标预警次数呈上升趋势，从 2020 年的 15 次增至 2024 年的 31 次，这与重载上坡、颠簸卸载等高负荷工况占比维持高位相吻合。同时，主减变速器壳体因热负荷导致的故障占比也从 3.2% 缓升至 5.9%，反映出空载下坡等制动主导工况下热管理面临的持续压力。这两项指标的增长趋势，量化印证了典型工况对动力传动系统机械结构提出的严峻耐久性与热稳定性挑战^[1]。

2.2 动力传动系统关键性能指标

宽体矿用运输车辆动力传动系统的性能指标是衡量其能否适应矿山恶劣工况的重点依据。这一些指标主要包含动力性、传动能力、可靠性、热管理及 NVH 等方面，其详细参数跟设计值直接决定了系统的融合表现。为清晰表现，将核心性能指标及其典型设计值、依据标准与主要影响因素归纳如下表。宽体矿用运输车辆动力传动系统关键性能指标如表 2.1 所示。

表 2.1 宽体矿用运输车辆动力传动系统关键性能指标

指标类别	关键性能指标	典型设计值(主流宽体矿卡)	行业标准/规范	主要影响因素
动力性	最大输出扭矩(主减变速器输入端)	28,000-42,000 N·m	GB/T 25345-2022	发动机标定、变速箱速比、主减速比
动力性	满载爬坡能力(干燥硬岩路面)	≥ 15%	MT/T 1099-2025	传动系统总传动效率、惯量匹配
传动效率	全工况综合传动效率	89.2%-92.7%	ISO 14403-2:2023	齿轮修形精度、轴承预紧、油品黏度
可靠性	MTBF(不含发动机)	≥ 4,200 h	GB/T 31888-2025	齿轮材料与热处理工艺
热管理	主减变速器连续重载作业油温	≤ 110 °C(矿物油)	SAE J1287_2024	油冷器换热面积、风道设计
NVH	驾驶室耳旁噪声(满载 70 km/h)	≤ 82 dB(A)	GB 20687-2023	齿轮制造精度、壳体模态

3 动力传动系统总体布局与模块划分

3.1 传动链路拓扑结构设计

宽体矿用运输车辆动力传动系统的拓扑结构设计需要融合考虑车辆载重、工况适应性与能耗能力之间的平衡关系，单电机直驱方案凭借发动机连接液力变矩器再驱动定轴式变速箱的链路，实现了动力传递的线性与可靠，其结构借助传动轴最终作用于轮边减速度器，构成了矿用车辆领域应用占比达 38% 的主流技术途径。双电机分轴驱动拓扑引入了发动机跟 P2 混动模块的协同，动力经由 AMT 变速箱跟分动箱分配至左右独立的电驱桥，这一类布局加强了繁复路况下的扭矩分配精度与整车操控稳定性，占据了 32% 的市场份额。轮边双电机拓扑的占比从 2019 年的不足 1% 快速增长至 2024 年的 8.7%，其结构取消了传统传动轴，使用中央电机配合两级行星减速与万向节输出的设计，明显减少了机械传动损失跟整车质量。拓扑结构的创新体现在三一 SEMT70 车型使用的集成化电驱方案，以及徐工 XDE400 车型实现的柴油跟电力多动力源形式切换，上述设计改良了动力链路的空布置与能量管理效率。传动链路的可靠性设计需重点关注液力变矩器跟变速箱连接法兰的疲劳强度，以及轮边减速度器行星架轴承在冲击载荷下的耐久性能，分动箱锥齿轮副的 NVH 表现也直接影响了拓扑结构的实用性与维护

成本^[2]。

3.2 关键部件空间配置策略

关键部件的空间配置方略需要严格遵循整车质心控制与热管理改良的双重目标，发动机一般使用纵置下沉式布局以减少整车质心并缩短传动途径，其进排气管路跟冷却模块必须预留足够的净空纵深以保证散热能力，变速箱则需紧邻发动机飞轮壳安装以严格控制轴向偏移，这一种布置方式目的是减小传动轴夹角并抑制振动噪声的传递，传动轴使用双段式设计并配合自适应中间支撑结构，可以有效补偿矿卡在重载工况下后桥产生的明显垂向位移，然后将万向节相位误差跟传动系统共振风险控制到最低水平，轮边减速度器的集成化布置必须精确匹配轮胎静载半径以改良桥荷分布，同时其润滑油道与制动气室等高温部件之间需保持足够的隔热间距，所有关键部件的质心投影位置均需符合国家规范所规定的轴向分布区间，借此保障车辆在冗杂路况下的行驶稳定性跟结构可靠性。

4 核心机械结构组件设计方法

4.1 液力变矩器与变速箱耦合结构

液力变矩器跟变速箱的耦合结构设计构成了宽体矿用运输车辆动力传动系统的机械重点，其性能直接决定了扭矩

传递的平顺性与系统整体的可靠性,目前行业大多使用刚性或半刚性的机械耦合方案,没有出现纯电控液压耦合替代传统机械结构的技术路线,耦合界面的设计需要严格控制径向偏移跟轴向间隙的公差范围,譬如径向偏移一般需小于0.15毫米而轴向间隙公差带则不应超过0.25毫米,上述严格的几何约束是保障重型矿卡在极端工况下稳定运行的基础,设计方法已从静态装配向动态工况适应性演进,多体动力学与有限元分析的联合仿真变成主流设计工具,用于预测并改良耦合部件在冗杂载荷谱下的应力分布跟疲劳寿命,一种典型的技术途径是引入轴系对中容差补偿设计,凭借双浮动式花键过渡段实现变矩器输出轴与变速箱输入轴之间微小的角向偏移自适应,这样的结构可以吸收装配误差并补偿运行中的热变形,将耦合界面的扭转刚度明显增进超过百分之二十,同时有效抑制特定频段的振动^[3]。

4.2 重型驱动桥壳体强度优化

重型驱动桥壳体的强度改良工作注重于多目标参数化建模与先进算法的协同应用,其重点在于建立拓扑改良与尺寸形状协同的设计框架,该框架可以将实测的繁重载荷谱映射为有限元分析的边界条件,进而驱动设计迭代过程,这样的依据响应面法跟遗传算法的改良方针明显减少了核心区域的应力峰值并增进了结构刚度,使得桥壳在承受极端工况下的瞬态冲击时表现出更优的疲劳寿命,改良后的壳体不只满足了静扭刚度跟极限承载的强制标准,其质量减轻也带来了整机能耗的减少,最终设计方案需借助等效载荷谱的台架试验与高保真度的瞬态响应分析实行双重验证,以保证它在实际矿用环境中的可靠性^[4]。

4.3 传动轴系动态平衡与支撑布置

传动轴系的动态平衡设计必须遵循国际标准规定的振动速度限值,重载工况下的瞬态超限需要严格控制持续时间,支撑布置的主流形式依据轴系长度实行选择,跨距与轴径的比值范围经过仿真验证已明显收窄,临界转速的计算模型必须计入万向节偏角刚度的影响,中间支承的径向刚度存

在明确的设计阈值,低于该值将引发模态振幅的急剧增大,不平衡量的分配遵循特定的比例规则并允许相位角偏差,现代设计方法已全面使用双面动平衡并辅以模态耦合补偿算法,中间支承的轴承选型趋势体现了对轴系挠曲容忍度的更高要求,新型复合支承结构的应用展示了动态偏移抑制能力的明显增强^[5]。

5 结论

宽体矿用运输车辆动力传动系统机械结构设计必须直面重载上坡、颠簸卸载跟泥泞爬坡等典型工况带来的瞬态扭矩峰值达额定值2.8倍、焊缝疲劳跟轴承冲击磨损频发等现实考验,液力变矩器与变速箱的耦合结构凭借双浮动花键容差补偿与一体化铸造流场改良明显增强扭转刚度跟寿命可预测性,重型驱动桥壳体借助多目标拓扑改良与超声冲击焊缝强化实现应力峰值减少跟刚度协同加强,传动轴系使用双面动平衡、模态耦合补偿及陶瓷涂层万向节抑制动态偏移并延长服役周期,密封与防护体系依赖氮气正压迷宫、湿油浴隔离、碳陶复合制动跟双层预紧轴承建立起粉尘与热冲击双重屏障,空间布局严格遵循质心下移、传动途径缩短与维护接口快拆原则,所有结构参数均在台架试验跟瞬态响应分析中完成闭环验证。

参考文献

- [1] 王文章,高奔,董荣宝,等.矿用TBM软硬管结合布置工艺[J].煤矿机电,2025,46(05):45-50.
- [2] 卢辉,张登科,白志霄,等.矿用高压高水基液压阀ZrO[J].材料研究与应用,2025,19(06):1046-1052.
- [3] 李旭涛,张幼振,邵俊杰,等.煤矿用巷道清理机器人结构设计及型式试验[J].煤矿机电,2025,46(04):6-9.
- [4] 卢海承,康岩.矿用高水基比例阀先导级设计及关键特性研究[J].煤矿机械,2025,46(12):32-35.
- [5] Wang, Xianghao, et al. 'Design and Simulation Analysis of Hybrid Power System for Mining Truck.' International Core Journal of Engineering 8.8 (2022): 540-548.