



DWL-32 连续式双枕捣固稳定车电传动系统

马占川

(中国铁路昆明局集团有限公司, 云南 昆明 650011)

摘要: 为解决捣固稳定车内燃液压/液力驱动存在的能耗高、力矩响应滞后、作业效率低、维护不便等问题, 文章以DWL-32双枕连续式捣固稳定车为研究对象, 创新性引入电牵引技术, 构建永磁电传动系统方案, 实现整车高低速一体化牵引、高精度低恒速作业。文章首先针对捣固稳定车作业工况需求进行分解计算, 并展开牵引/制动特性计算; 其次, 结合牵引走行特性, 基于永磁电传动技术搭建电传动系统拓扑结构, 完成电传动系统的计算分析与关键部件设计; 再次, 针对高精度低恒速作业工况, 对永磁牵引电机进行优化设计, 并选定变流器传动控制方式; 最后, 基于研制的电传动系统关键部件样机开展台架及整车试验验证。台架试验结果表明, 电传动系统可满足高速拖行的温升需求; 整机试验结果显示, 所设计的电传动系统结构合理、性能可靠, 满足整车牵引运行及作业走行的工况要求, 可高效响应低恒速控制需求, 较传统液压/液力传动技术路线作业效率提升15%, 为新一代大型养路机械电动化升级转型提供有力支持。

关键词: 大型养路机械; 连续式捣固稳定车; 电传动; 高速牵引; 低恒速作业; 永磁牵引电机

中图分类号: U273; U216.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2026)01-0148-09

0 引言

随着全球轨道交通向绿色化、智能化加速转型, 大型养路机械从传统内燃液压/液力驱动向电传动牵引升级迭代, 已成为轨道工程领域的关键技术发展方向。作为有砟道床维护的核心装备, 连续式捣固稳定车(以下简称捣稳车)在提升线路平顺性与道床密实度方面发挥着不可替代的作用。传统内燃液压/液力驱动存在能耗高、跑冒滴漏污染大、低速控制精度不足、20‰坡道牵引制动性能不足等问题, 难以满足“双碳”目标下绿色高效作业的需求^[1]。国际上, 奥地利Plasser & Theurer公司推出的E³(Economic, Ecologic, Ergonomic)系列产品率先采用混合动力电传动系统, 通过柴油发电机组与接触网取电双动力源结合, 实现高速走行电牵引与作业静液压驱动的协同技术路线^[2-3]; 2025年, 国际认可论坛(international accreditation forum, IAF)发布E³系列最新产品道岔捣稳车, 兼顾柴油发电机组、接触网、动力电池3种动力源, 标志着道床维护装备正逐步迈向全面电动化。我国铁建装备自

2002年起便探索电力驱动在捣固车、稳定车等设备中的应用, 但现有产品仍以“内燃液力+静液压”驱动为主, 电传动技术在“捣稳筛”领域的研究与应用尚属空白。

连续式捣固车采用卫星小车与主车协同作业模式, 其周期性冲击易导致传统液压系统响应滞后、部件磨损加剧, 进而影响作业精度与效率^[4]。电动化技术的引入, 不仅为施工作业效率提升提供了全新突破, 而且为动力源绿色化、装备运维智能化提供了广阔平台, 有望彻底解决内燃液压/液力驱动能耗高、响应滞后、作业效率低、维护不便等问题。本文以中国铁建高新装备股份有限公司与中车株洲电力机车研究所有限公司下属的株洲时代电子有限公司联合开发的DWL-48型捣稳车为原型, 聚焦基于电传动系统实现高低速一体化牵引、高精度低恒速作业的需求, 首次在DWL-32连续式双枕捣稳车上创新性匹配设计电传动系统方案, 旨在突破传统驱动方式的局限, 推动有砟道床维护装备向高效、绿色、智能化方向升级, 为我国大型养路机械电动化升级迭代提供理论与实践参考。

通信作者: 马占川, 男, 主要从事铁路工务机械车产品监造工作; E-mail: ma_zc@qq.com

引用格式: 马占川. DWL-32连续式双枕捣固稳定车电传动系统[J]. 机电传动, 2026(1): 148-156. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.202.

Citation: MA Zhanchuan. Design of electric drive system for the DWL-32 continuous dual-sleeper tamping and stabilizing vehicle[J]. Electric drive for locomotives, 2026(1): 148-156. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.202.

1 需求分析与计算

1.1 工况需求分析

捣稳车在连续式捣固作业工况下, 需实现 0.3 ~ 1.6 km/h 的高精度低速走行; 在区间运行工况下, 需实现不低于 100 km/h 的牵引走行。传统液压系统因滑移齿轮切换机构存在模式切换延迟, 且高速段传动效率衰减显著, 难以实现无级调速; 液压系统力矩响应较慢, 从发出车辆启动指令到车辆开始动作的延时约为 250 ms, 其最高作业效率约为 1.4 km/h; 电传动系统借助牵引电机的宽速域特性, 可实现 0 ~ 100 km/h 全范围连续牵引。

在连续式捣固作业走行工况中, 整车以低恒速运行, 卫星小车则做步进式运动。整车通过加/减油缸为卫星小车提供加/减速力矩, 导致大车承受反向周期性作用力; 卫星小车作为捣固装置、钢轨夹持装置等核心部件的载体, 是实现捣固作业的关键。传统液压系统中, 阀组响应延迟与机械传动间隙易造成实际速度波动大、响应性低, 严重制约低速运行精度。因此, 电传动系统需在 0.3~1.6 km/h 内, 且承受卫星小车周期性作用力的前提下, 保障整车恒速控制精度, 参照液压传动的控制标准, 稳态时速度偏差需控制在±0.1 km/h 内, 瞬态偏差需控制在±0.3 km/h 内。

综合工况分析可知, 捣稳车在低恒速工况下对牵引电机低转速区段的控制精度要求较高, 所设计的电传动系统需能快速响应转速变化, 以确保恒速精度达标。经对比分析, 永磁牵引技术可有效满足响应精度需求, 且永磁牵引电机具有高效能、高功率密度和低噪声等优势, 已在众多领域得到广泛应用。因此, 本文结合工况特性分析, 以永磁牵引系统为基础开展 DWL-32 连续式双枕捣稳车电传动系统的设计。

1.2 整车基本参数及性能指标

捣稳车由捣固车、稳定车两节车组成 (如图 1 所示), 行进方向上捣固车位于前端, 稳定车位于后端, 参考文献[5]提出的既有连续走行捣固车相关要求, 确定整车基本参数如表 1 所示。作业时, 捣固车优先对轨枕底部道砟进行高频振动捣固, 消除轨道几何偏差; 稳定车随后施加水平振动与垂向压力, 促使道砟颗粒二次密实, 避免扰动已修复区段。

捣稳车在连续式捣固作业时, 驱动系统需在承受卫星小车周期性作用力的前提下实现高精度低恒速走行, 确保捣固振动相位同步与道砟密实强化; 转场时切换至高速牵引模式, 提升干线转移效率。基于作业与牵引工况, 需实现高低速一体化牵引, 达成精准捣固与快速转场的协同目标, 其具体工况性能指标如表 2 所示。



图1 DWL-32 连续式双枕捣稳车
Fig. 1 DWL-32 continuous dual-sleeper tamping and stabilizing vehicle

表1 捣稳车基本参数

Table 1 Basic parameters of the tamping and stabilizing machine

技术参数	参数数值或说明
轮径/mm	840/810 (半磨耗)
轴列式	B0-2-A1
捣固车质量/t	82
稳定车质量/t	52
轴质量/t	< 23
适应最大坡道值/‰	33
齿轮箱速比	5.53

表2 工况性能指标

Table 2 Performance indicators under various conditions km/h

参数项目	参数值
最高自运行速度	100
最高连挂速度	≤132
低恒速速度	0.3 ~ 1.6
捣稳车稳态速度偏差	±0.1
捣稳车瞬态速度偏差	±0.3

1.3 牵引及制动特性计算

轮轴牵引力及轮轴功率与坡道附加阻力、曲线附加阻力、隧道风阻、列车速度、黏着系数等密切相关, 本文暂不考虑曲线附加阻力和隧道风阻, 总阻力 W 计算公式^[5]如下:

$$W = W_o + W_i \tag{1}$$

$$W_i = 9.81 \times 10^{-3} \times (M + G) \cdot i \tag{2}$$

$$\left. \begin{aligned} W_o &= 9.81 \times 10^{-3} \times (MW'_o + GW''_o) \\ W'_o &= 1.05 + 0.0014v + 0.000718v^2 \\ W''_o &= 0.92 + 0.0048v + 0.000125v^2 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中: W_o 为整车基本阻力, kN; W_i 为整车坡道附加阻力, kN; W'_o 、 W''_o 分别为牵引车与被牵引车基本阻力, kN; M 为整车整备质量, t; G 为被牵引车质量, t; v 为车辆速度, km/h; i 为坡道千分数, 最大为 33%。

总牵引力 ΣF 计算公式为

$$\Sigma F = (M + G) \cdot a \tag{4}$$

$$\sum F = F_q - W \quad (5)$$

式中: F_q 为轮轴牵引力, kN; a 为车辆加速度, m/s^2 。

轮周功率 P 计算公式为

$$P = F_q \cdot v / 3.6 \quad (6)$$

车辆启动时, W'_0 取 5 kN ^[6]; 基于轴列式设计, 确定捣固车、稳定车固定编组且均配置动力单元, 无被牵引车, 因此 W'_0 取 0 kN 。已知捣固车整备质量为 82 t , 稳定车整备质量为 52 t , 根据式(1)~式(3)可计算出在不同速度及不同坡道下的阻力特性曲线; 结合 $i = 33\%$ 确定启动牵引力为 84 kN , 再根据启动牵引力、需求功率及式(4)~式(6)计算不同牵引工况下的牵引特性曲线, 具体牵引特性和坡道阻力曲线如图2所示。

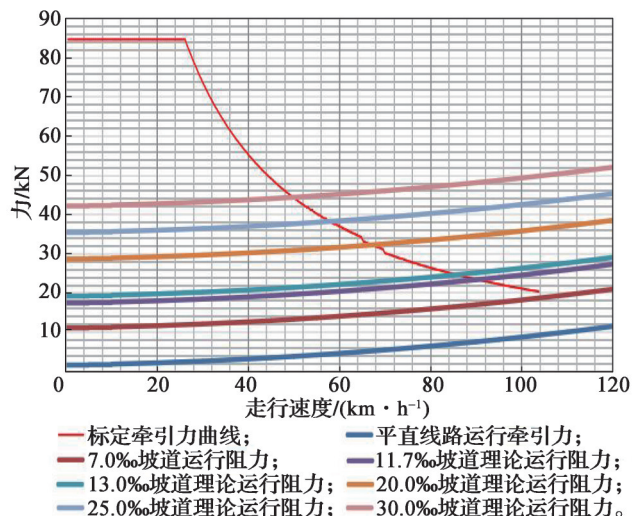


图2 捣稳车牵引特性和坡道阻力曲线

Fig. 2 Curves of traction characteristics and grade resistance

最大电制动力按照制动黏着限制设定为 $1\,600 \text{ N} \cdot \text{m}$ (对应轮周制动力 62 kN), 最大电制动轮周功率设定为 792 kW , 据此制定整车最大电制动特性曲线, 如图3所示。实际制动力与功率可通过制动手柄电压百分比进行无级调节, 当车速低于 0.3 km/h 时, 电制动力线性降至0。

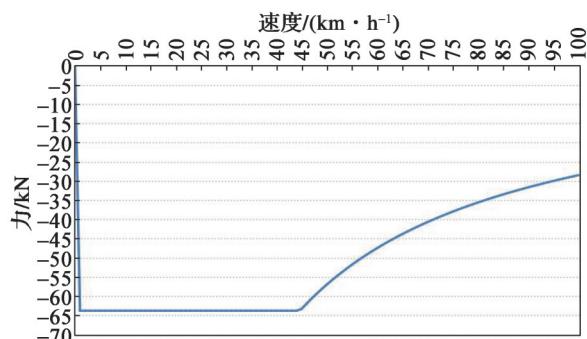


图3 捣稳车制动特性曲线

Fig. 3 Curve of braking characteristics

2 电传动系统主电路及主要技术参数

2.1 主电路框图及原理

基于捣稳车的牵引及作业走行需求与性能指标, 搭建电传动系统拓扑结构, 以柴油发动机为机械动力源, 通过电传动系统完成电能转换, 实现牵引电机的机械转矩输出, 电传动系统结构框图如图4所示。电传动系统主要由1台柴油发电机组、1台牵引变流器、1台辅助变流器、2台制动电阻、3台永磁同步牵引电机、1台励磁控制箱组成。

捣稳车由柴油发动机提供动力源, 柴油发电机组控制单元 (engine control unit, ECU) 结合挡位信息, 通过励磁控制器控制单元 (excitation control unit, EXU) 调节励磁电流, 实现不同转速下三相交流电的输出。牵引变流器集成整流、逆变与制动斩波功能, 利用传动控制单元 (traction control unit, TCU) 对柴油发电机组输出的交流电进行变换, 通过调节输出频率和电压控制牵引电机的转矩与转速, 并通过齿轮箱为整车轮对提供牵引力。辅助变流器集成逆变、隔离变压与滤波功能, 通过辅助逆变控制单元 (auxiliary control unit, ACU) 将直流母线电压逆变为三相交流电, 为辅助负载供电。在电制动工况下, 牵引电机将

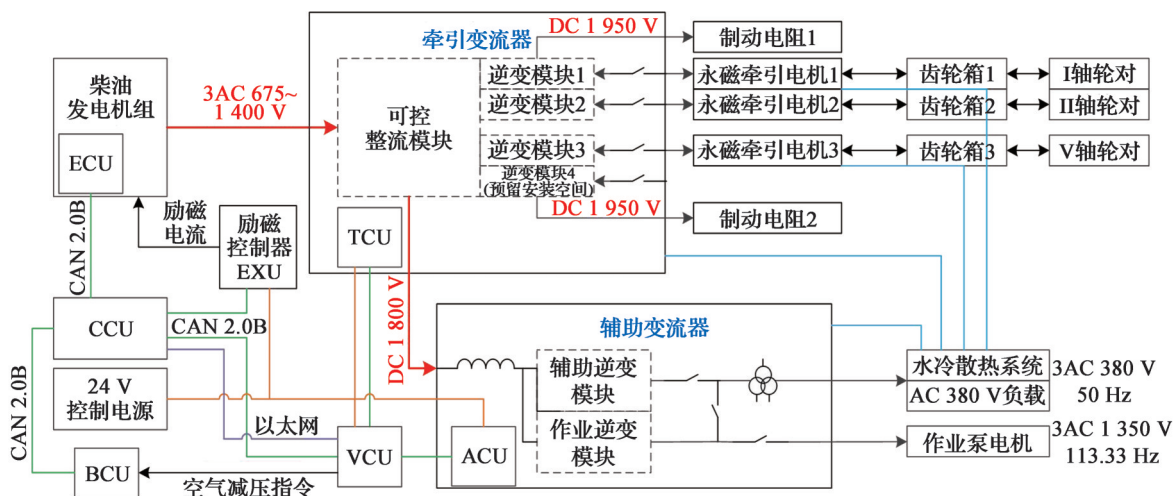


图4 电传动系统框图

Fig. 4 Block diagram of electric drive system

列车动能转化为电能并反向输入直流母线,此时制动斩波单元开通,电能通过制动电阻以热能形式耗散。牵引控制单元(verchie control unit,VCU)负责电牵引系统的相关逻辑控制;外部关联的整车控制单元(control control unit,CCU)实现整车作业及辅助相关控制;制动控制单元(brake control unit,BCU)实现整车制动相关控制。

2.2 牵引变流器设计

牵引变流器包含充电接触器(KM1)、短接接触器(KM2)、充电电阻(R1、R2)、整流模块(CON1)、牵引逆变模块(INV1、INV2、INV3、INV4)、制动斩波模块(INV)、支撑电容(C1、C2)、固定放电电阻(R3、R4)、隔离接触器(KM3、KM4、KM5)、TCU

及传感器等,其主电路拓扑详见图5。

柴油发电机组通过励磁控制器输出三相交流电,经预充电回路后,通过整流模块和中间直流稳压电路将直流电压稳定在DC 1 800 V;牵引逆变模块将中间直流电逆变为频率、电压可调(variable voltage and variable frequency,VVVF)的三相交流电输入牵引电机(TM1、TM2、TM3),实现电机转速与轮轴功率的实时调节,完成由电能到机械转矩的转化;牵引电机转矩采用矢量控制法^[7-8]。动力制动时,牵引电机切换至发电机工况,输出三相交流电,经逆变模块反向整流后输入直流母线;开通制动斩波模块,电能通过制动电阻(R5、R6)以热能形式耗散,实现电阻制动;同时,在内部配置永磁牵引电机隔离接触器,避免高速拖行过程中反电势对牵引变流器造成影响。

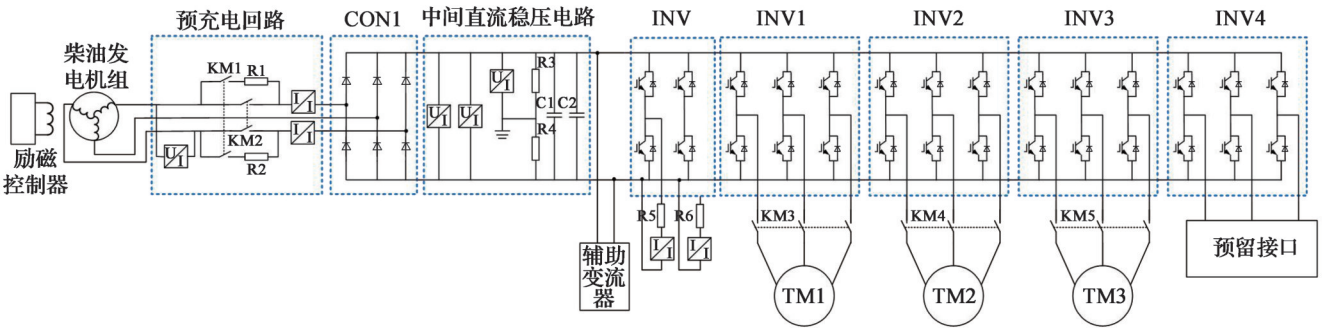


图5 牵引变流器主电路拓扑

Fig. 5 Main circuit topology of traction converter

捣稳车配置一台牵引变流器,基于轮周功率需求,3个逆变模块即可满足整机牵引需求,预留一个逆变模块以兼顾平台化拓展;内部模块采用水冷循环散热方式,冷却液为去离子水和乙二醇的混合液,其主要参数如表3所示。

表3 牵引变流器主要技术参数

Table 3 Main technical parameters of traction converter

参数项目	参数值或说明
输入电压/V	3AC 1 350 (3AC 600 ~ 1 400)
额定输入频率/Hz	90
输出电压/V	3×3AC 0 ~ 1 400
输出最大电流/A	≥3×460
输出额定电流/A	≥3×380
最大开关频率/Hz	500
输出频率/Hz	0 ~ 290
效率/%	≥98
控制方式	矢量控制
冷却方式	水循环冷却(外置水冷装置)

2.3 辅助变流器设计

辅助变流器包含线路电抗器(L1)、熔断器(FU1、FU2)、辅助逆变模块(FINV1)、作业逆变模

块(FINV2)、ACU、支撑电容(C3、C4)、固定放电电阻(R7、R8)、输出接触器(KM7、KM8、KM9)、变压器(T1)、滤波电容(C5)、断路器(QF)及传感器等,其主电路拓扑详见图6。

辅助变流器从牵引变流器中间直流回路取电,辅助逆变模块将中间直流电逆变为恒压恒频(constant voltage and constant frequency,CVCF)的工频三相交流电,经变压器隔离变压及滤波电容滤波后输出3AC 380 V/AC 220 V工频交流电,供给牵引辅助系统、空调等辅助负载;作业逆变模块通过VVVF方式启动,最终稳定输出AC 1 350 V/113.33 Hz交流电,为作业电机供电,并为作业装置建立液压力。当辅助逆变模块发生故障且检测到故障切换硬线信号时,辅助变流器ACU自动断开辅助逆变接触器(KM7)和作业逆变输出接触器(KM9),闭合输出切换接触器(KM8),并控制作业逆变模块输出辅助逆变模块所需的电压与电流,经隔离变压后输出AC 380 V/50 Hz交流电,确保与牵引相关的辅助负载正常工作,保障整车牵引走行功能正常。

基于整车辅助负载、作业负载的用电容量需求及供电制式,设计辅助变流器主要技术参数,具体参数如表4所示。

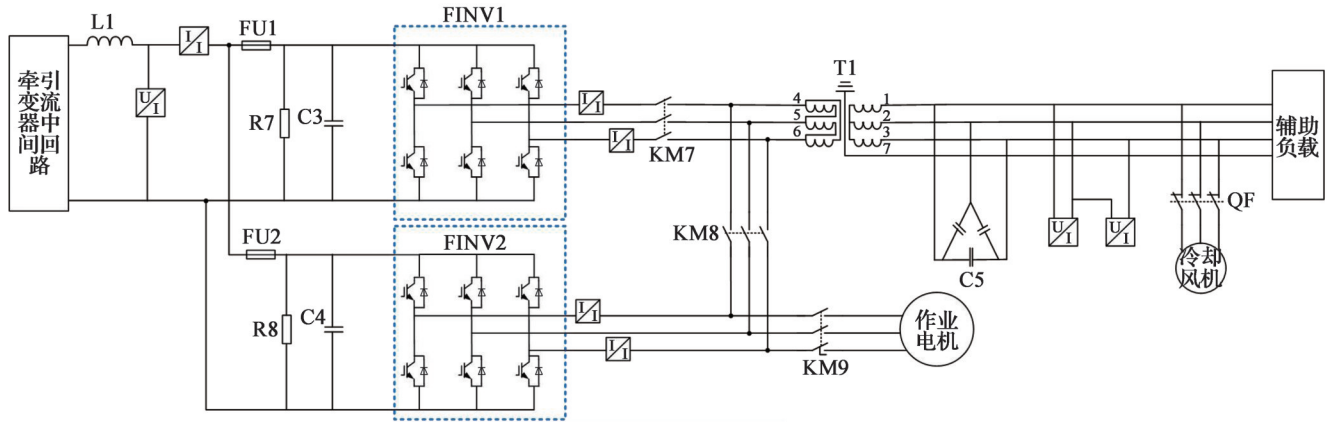


图 6 辅助变流器主电路拓扑
Fig. 6 Main circuit topology of auxiliary converter

表 4 辅助变流器主要技术参数

Table 4 Main technical parameters of auxiliary converter

参数项目	参数值或说明
输入电压/V	DC 1 800 (DC 1 200 ~ 2 000)
辅助逆变输出容量/(kV·A)	330
辅助逆变输出电压/V	3AC 380 (1±5%)
辅助逆变输出频率/Hz	50±1
作业逆变输出容量/(kV·A)	450
作业逆变输出电压/V	3AC 1 350 (1±5%)
作业逆变输出频率/Hz	113.33
效率	≥98%
冷却方式	水循环冷却 (外置水冷装置)

2.4 永磁同步电机设计与优化

永磁同步电机采用水冷全封闭结构，单台车配置 3 台牵引电机，采用单轴架悬结构，通过齿轮箱传递机械转矩，其主要参数如表 5 所示。

表 5 牵引电机主要技术参数

Table 5 Main technical parameters of traction motor

参数	数值
额定功率/kW	260
额定转矩/(N·m)	2 500
最大启动转矩/(N·m)	3 000
最大自运行转速/(r·min ⁻¹)	4 510
最大被拖转速/(r·min ⁻¹)	4 548
最高使用转速/(r·min ⁻¹)	4 600
频率范围/Hz	0 ~ 290
额定效率	≥95%
功率因数	≥0.9
最大反电势	AC 1 850 V @4 600 r/min
额定电流/A	380
最大电流/A	460
绝缘等级	200
极对数	4

本文针对捣稳车高精度超低恒速运行与高速拖行工况，开展永磁同步电机的控制性能优化、拖行温升

抑制、反电势控制适应性设计与优化。

2.4.1 超低恒速工况下的控制性能优化

针对超低恒速工况（10 ~ 60 r/min）的高精度转矩需求，通过电磁拓扑优化设计实现性能优化。采用整数槽分布绕组，定子为斜槽结构，有效削弱齿谐波磁场产生的谐波电动势，将齿槽转矩脉动控制在小于 0.5% 额定转矩内，同时提升低速工况下磁场的正弦性。

2.4.2 高速拖行工况下的损耗抑制与热管理

当变流器隔离接触器断开时，转子永磁体磁场与定子绕组相互作用，产生铁耗与永磁体涡流损耗，需通过材料与散热系统协同设计降低风险^[9]。具体措施如下：采用超薄无取向硅钢片，减少涡流损耗；在两端轴承处加装冷却风扇，强化轴承散热；采用 0.3 MPa 压力循环泵优化循环系统，并结合乙二醇混合冷却液的高沸点特性，避免高温下冷却液沸腾泄漏。

2.4.3 拖行工况下的反电势抑制策略

为解决高速拖行工况下的高反电势问题，提出磁路-电路协同优化策略。采用分段式永磁体布局，将永磁体沿轴向分为多段，并通过磁桥结构补偿漏磁，使反电势幅值降低 20%。

2.5 制动电阻设计

制动电阻采用强迫风冷方式，依托动力制动功能发挥电传动系统的核心优势，可在列车快速转场时参与电制动减速，或在低恒速捣固作业时实时调节输出制动力矩，保障恒速控制；单台车配置 2 台制动电阻。当永磁同步电机处于发电状态时，电阻单元可将反馈电能转化为可控热能，有效抑制直流母线电压过冲，减少闸瓦磨耗。该装置采用双风机、多级温敏监测及保护设计；低恒速工况下，TCU 根据反馈速度与目标速度的差值，调控斩波单元高实时性响应电制动转矩输出，保证控速精度。主要技术参数如表 6 所示。

通过建立制动电阻温升动态方程评估热稳定性，并根据低恒速、最大坡道控速需求建立稳态温度热平衡方程，推导得出稳态温度为 392.6 ℃，显著低于电阻

表 6 制动电阻主要技术参数

Table 6 Main technical parameters of braking resistor

参数项目	参数值或说明
电阻值/ Ω	6.0(1 $\pm$ 5%)@20 $^{\circ}\text{C}$
持续功率/kW	375
开启电压/V	DC 1 950
最高电压/V	DC 2 150
风机供电电压/V	3AC 380
风机供电频率/Hz	50
风机功率/kW	2 $\times$ 1.5
冷却方式	强迫风冷

带允许最高温度 640 $^{\circ}\text{C}$ ，表明设计裕量充足。该制动电阻装置通过精细化热设计、高耐温材料选型，实现温升安全裕度不小于 247.4 K，满足连续制动需求，且符合 IP65 防护与双重绝缘标准，为捣稳车动力制动工况提供可靠保障。

2.6 柴油发电机组

基于捣稳车整车性能参数、电传动系统及关键部件设计，结合高速运行与低恒速作业走行工况需求，计算牵引走行、辅助负载、作业负载容量，并校核柴油发电机组容量。

2.6.1 高速运行工况牵引电机容量计算

高速运行工况下，基于车辆质量、最大坡道值、轴列式、最大走行速度、启动牵引力等关键指标，计算确定轮轴最大需求功率 P_{11} 为 3 $\times$ 205 kW（详见牵引特性和坡道阻力曲线），高速运行工况牵引电机需求容量 Q_{11} 为

$$Q_{11} = P_{11} / (\eta_{11} \eta_{21} \eta_3) \quad (7)$$

式中： η_{11} 为牵引电机功率因数，取 0.90； η_{21} 为牵引电机效率，取 0.95； η_3 为牵引变流器整流逆变效率，取 0.97。

根据式(7)计算得到 Q_{11} =741.5 kV $\cdot$ A。

2.6.2 低恒速作业走行工况牵引电机容量计算

作业走行工况下，捣稳车以 1.6 km/h 恒速走行，根据式(1)~式(6)计算确定轮轴最大需求功率 P_{12} 为 22.5 kW，牵引电机需求容量 Q_{12} 为

$$Q_{12} = P_{12} / (\eta_{12} \eta_{22} \eta_3) \quad (8)$$

式中： η_{12} 为牵引电机功率因数，取 0.95； η_{22} 为牵引电机效率，取 0.66。

根据式(8)计算得到 Q_{12} =37.0 kV $\cdot$ A。

2.6.3 3AC 380 V 辅助负载容量计算

捣稳车 3AC 380 V 辅助负载主要包括冷却系统、空压机、空调、照明等，经统计总需求功率 P_{21} 为 84 kW，考虑辅助负载不同时满功率工作，取共用系数 n =0.8，计算需求容量 Q_{21} 为

$$Q_{21} = n \cdot P_{21} / (\eta_4 \eta_5 \eta_6 \eta_3) \quad (9)$$

式中： η_4 为辅助负载综合功率因数，取 0.85； η_5 为辅助

负载综合效率，取 0.95； η_6 为辅助变压器效率，取 0.95。

根据式(9)计算得到 Q_{21} =90.3 kV $\cdot$ A。

2.6.4 3AC 380 V 作业负载容量计算

捣稳车 3AC 380 V 作业负载主要包括卫星小车驱动电机、捣固振动电机、稳定振动电机、夯拍振动电机、清扫装置电机、涂油装置电机及镐窝回填电机等，经统计总需求功率 P_{22} 为 228.9 kW，取共用系数 n =0.85，计算需求容量 Q_{22} 为

$$Q_{22} = n \cdot P_{22} / (\eta'_4 \eta'_5 \eta_6 \eta_3) \quad (10)$$

式中： η'_4 为作业负载综合功率因数，取 0.85； η'_5 为作业负载综合效率，取 0.95。

根据式(10)计算得到 Q_{22} =253.6 kV $\cdot$ A。

2.6.5 液压泵电机容量计算

捣稳车通过电机驱动液压泵建立液压系统高压，为起拨道、捣固等作业装置提供动力，选定液压泵电机功率 P_3 为 400 kW，计算作业装置需求容量 Q_3 为

$$Q_3 = P_3 / (\eta_7 \eta_8 \eta_3) \quad (11)$$

式中： η_7 为液压泵电机功率因数，取 0.955； η_8 为液压泵电机效率，取 0.950。

根据式(11)计算得到 Q_3 =454.5 kV $\cdot$ A。

综上所述，高速运行工况下仅牵引电机与辅助负载工作，作业负载及液压泵电机不工作；作业走行工况下所有负载和电机均工作。两种运行工况下，柴油发电机组总容量需求分别如下：

$$Q_g = Q_{11} + Q_{21} \quad (12)$$

$$Q_z = Q_{12} + Q_{22} + Q_3 \quad (13)$$

经过计算对比发现，高速运行工况容量需求大于作业走行工况，柴油发电机组输出容量需要大于 831.8 kV $\cdot$ A。经匹配选型，确定柴油发动机功率为 858 kW，发电机标定功率为 800 kW（容量为 842.1 kV $\cdot$ A），其主要技术参数如表 7 所示。

表 7 柴油发电机主要技术参数

Table 7 Main technical parameters of diesel generator

参数项目	参数值
最大功率/kW	800
输出三相交流电压范围/V	600 ~ 1 350
输出电压频率/Hz	90
输入最大电流/A	360
启动短时最大电流/A	420
定子绕组漏电感/mH	0.501 2
励磁绕组漏电感/mH	0.652 5

3 试验验证

3.1 高速运行工况

为验证捣稳车的区间高速运行性能，在昆明局正

线（石林南—罗平）开展往返试验。试验要求车辆以 100 km/h 的速度行驶，行驶总里程不低于 30 km。高速运行工况实际测试牵引特性曲线如图 7 所示。

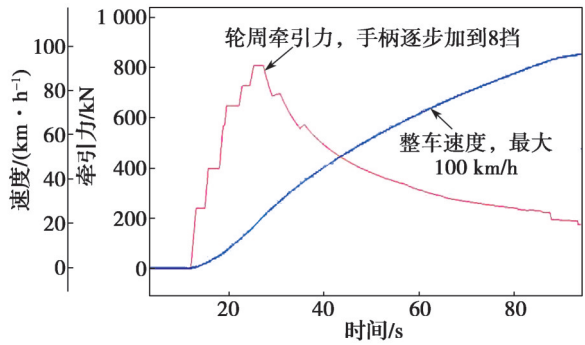


图 7 高速运行实际牵引特性曲线

Fig. 7 Curve of actual traction characteristics during high-speed operation

试验结果表明，研究团队设计的电传动系统最大运行速度可达 100 km/h，且满足图 2 所示的捣稳车牵引特性，运行性能满足高速工况需求。

3.2 低恒速作业走行工况

当捣稳车整车以低恒速运行时，卫星小车会以周期性反作用力冲击大车，影响整车低恒速运行精度。恒速运行时，所设计的整车电传动控制系统可根据卫星小车作业踏板信号，高频实时响应并传递 TCU 输出的反向力矩，对冲反向力矩对低恒速控速精度的影响；同时，调节卫星小车与整车的相对位置，以减小冲击力，缩短作用时间。为进一步验证系统性能，基于整车开展低恒速作业试验。

试验条件如下：大车以恒速模式 1.6 km/h 运行；卫星小车以 22 辆/min 作业运行；卫星小车反向冲击力为 30 kN，作用时间约 300 ms。试验过程中，电传动系统牵引变流器控制输出牵引/制动转矩，辅助变流器为辅助负载及液压泵电机供电，制动电阻参与响应电制动力矩输出，牵引电机将电能转化为机械能；冷却系统为电传动系统维持适宜的温度环境。

试验过程中 TCU 监测转矩、速度响应曲线如图 8 所示。试验结果表明，低恒速作业走行工况下，稳态恒速精度可达 ± 0.1 km/h，卫星小车冲击时的瞬态控速

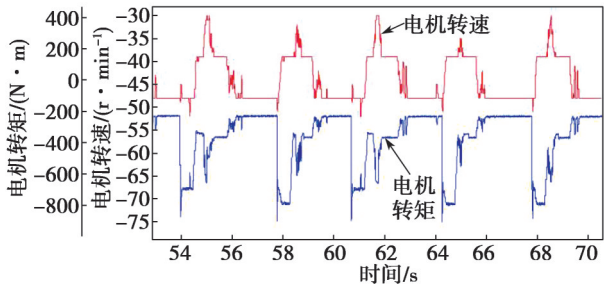


图 8 作业走行工况下速度和转矩曲线

Fig. 8 Curves of speed and torque under working and running conditions

精度保持在 ± 0.3 km/h，且能在 300 ms 内恢复至稳态；其中最大转矩 3 000 N·m 的响应时间约为 80 ms，较液压转矩 250 ms 的响应时间性能有显著提升；作业效率方面，原有液压传动道岔捣固车最高作业效率约为 1.4 km/h，而本文设计的捣稳车效率可达 1.6 km/h 以上，效率提升约 14%。因此，所设计的电传动系统在低恒速工况下满足表 2 提出的工况性能指标，其作业效果满足实际需求。

3.3 高速拖行工况

基于高速拖行工况下永磁同步电机的设计与优化方案，研制样机并在台架上开展高速拖行温升试验。试验条件如下：通过对拖电机拖动试验电机以 4 610 r/min（对应新轮 132 km/h）旋转，拖行时间为 22.5 h；采用工业风扇吹风模拟走行风，平均风速为 5 m/s；环境温度为 32 ℃；采用装车散热系统及冷却液，水管长度、散热器高度、水泵位置等均模拟实际装车情况；试验期间电机水冷却系统不运行。

试验中的温升曲线如图 9 所示，其中电机运行 5 h 后达到温度平衡^[10]（1 h 内温度变化小于 2 K），短暂观察现场情况后继续拖行 17.5 h。

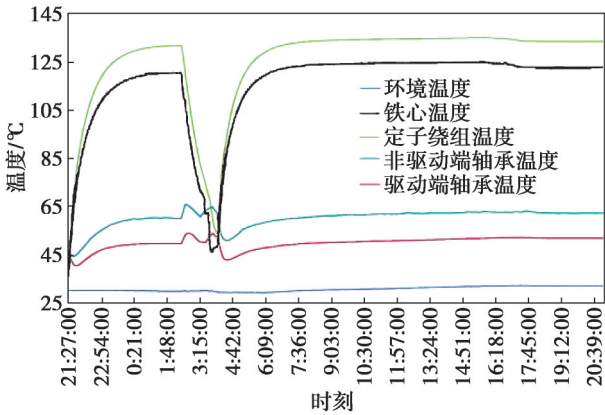


图 9 高速拖行温升曲线

Fig. 9 Curve of temperature rise during high-speed towing

根据《电力牵引 轨道机车车辆和公路车辆用旋转电机 第 4 部分：与电子变流器相连的永磁同步电机》（GB/T 25123.4—2015）^[10]及《铁路大型养路机械 通用技术条件》（GB/T 25337—2018）^[11]确定温升边界限值，结合试验温升数据得出的试验结果如表 8 所示。结

表 8 高速拖行工况温升试验数据

Table 8 Test data of temperature rise under high-speed towing K

项目	温升数据	温升边界限值
传动端轴承温升	19.8	55
非传动端轴承温升	30.2	55
铁心温升	90.7	175
绕组温升	101.6	175
电机内冷却水温升	47.3	67

果表明,经损耗抑制与热管理优化设计的永磁牵引电机,温升数据均未超过边界限值,可满足高速拖行工况需求。

4 结束语

本文针对DWL-32连续式双枕捣稳车传统驱动系统存在的技术瓶颈,构建了基于永磁同步电机的电传动系统解决方案,创新性地采用电传动技术替代液压/液力驱动,填补了国内该领域的空白。该捣稳车依托交流传动技术,充分发挥电牵引转矩响应快、控速精度高、长大坡道动力制动性能优异等优势,在设计过程中对整车电气参数和性能指标进行严格评估,兼顾了可靠性、安全性与兼容性。目前,该套电传动系统已完成出厂试验,进入运行考核阶段,运用情况良好^[12]。试验结果表明,采用电传动技术不仅可消除机械脱挂风险,还能实现0.3~1.6 km/h作业速度下 ± 0.1 km/h的精度控制,有效解决液压系统驱动能耗高、转矩动态响应慢的问题;因无须使用液压油,可显著降低维护复杂度;与原有液压传动方式相比,作业效率提升约14%。DWL-32连续式双枕捣稳车的成功研制,为后续大型养路机械的电动化升级迭代提供了重要借鉴与实践经验^[13-15],将有力推动我国大型养路机械向绿色化、电动化方向发展。

参考文献:

- [1] 刘学海,胡亚娟.捣固车动力传动系统[J].内燃机车,2008(12):26-27.
LIU Xuehai, HU Yajuan. Power transmission system for tamping car[J]. Diesel locomotives, 2008(12): 26-27.
- [2] 许建明.电力/内燃双动力铁路大型养路机械研究[J].机车电传动,2015(2):77-80.
XU Jianming. Research on electric/diesel dual-power railway heavy maintenance machinery[J]. Electric drive for locomotives, 2015(2): 77-80.
- [3] 马亚春.混合动力轨道养路机械牵引传动分析[J].内燃机与配件,2022,(24):94-96.
MA Yachun. Analysis of traction drive of hybrid power railway maintenance machinery[J]. Internal combustion engine & parts, 2022(24): 94-96.
- [4] 李石平.连续式捣固车作业小车智能控制系统设计与实现[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
LI Shiping. The design and realization of intelligent control system of the satellite in continual tamper[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [5] 任宇杰.DCL-32型连续走行捣固车[M].成都:西南交通大学出版社,2016.
REN Yujie. DCL-32 continuous tamping vehicle[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2016.
- [6] 中国铁道科学研究院标准计量研究所.列车牵引计算第1部分:机车牵引式列车:TB/T 1407.1—2018[S].北京:中国铁道出版社,2018.
Institute of standards and metrology, China academy of railway sciences. Railway train traction calculation-Part 1: trains with locomotives: TB/T 1407.1—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [7] 冯凌,付建国,廖丽诚,等.一种改进的永磁同步牵引电机低开关频率模型预测直接转矩控制策略[J].中国电机工程学报,2021,41(21):7507-7517.
FENG Ling, FU Jianguo, LIAO Licheng, et al. An improved low switching frequency model predictive direct torque control strategy for traction permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7507-7517.
- [8] 伊建辉,矫利业,田久东,等.基于初速识别HFI的永磁牵引电机带速启动研究[J].机车电传动,2024(2):25-32.
YI Jianhui, JIAO Liye, TIAN Jiudong, et al. A study on starting of permanent magnet traction motor in rotating state based on HFI for initial speed recognition[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 25-32.
- [9] 崔玲.永磁同步牵引电机高速惰行时反电势问题的研究[D].北京:北京交通大学,2012.
CUI Ling. Study on back EMF of permanent magnet synchronous traction motor when it idles at high speed[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [10] 全国牵引电气设备与系统标准化技术委员会(SAC/TC 278).电力牵引 轨道机车车辆和公路车辆用旋转电机 第4部分:与电子变流器相连的永磁同步电机:GB/T 25123.4—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
National technical committee 278 on electric equipment and systems for railways of standardization administration of China(SAC/TC 278). Electric traction-rotating electrical machines for rail and road vehicles-part 4: permanent magnet synchronous electrical machines connected to an electronic converter: GB/T 25123. 4—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [11] 国家铁路局.铁路大型养路机械 通用技术条件:GB/T 25337—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
Rail heavy-duty maintenance machinery-general technical specifications: GB/T 25337—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [12] 赵汉斌,张伟明,吴杰.国产智能大型养路机械在昆明“首秀”[N].科技日报,2025-06-14(03).
ZHAO Hanbin, ZHANG Weiming, WU Jie. Domestic intelligent large maintenance machinery makes debut in Kunming[N]. Science and technology daily, 2025-06-14(03).
- [13] 牛学信,白欢.氢燃料混合动力调车机车动力系统及能量管理策略[J].机车电传动,2023(3):65-72.
NIU Xuexin, BAI Huan. Power system and energy management strategy for hydrogen fuel hybrid power shunting locomotive[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 65-72.

- [14] 张雷,胡震凡,卓海军,等. 面向 DCL-32 型捣固车的自动捣固控制技术及其运用[J]. 控制与信息技术,2023(2):15-20.
ZHANG L, HU Z F, ZHUO H J, et al. Automatic tamping control technology for DCL-32 tamping truck and its application[J]. Control and Information Technology, 2023(2): 15-20.
- [15] 卓海军,肖鑫,胡震凡,等. 基于 BP 神经网络的捣固卫星小车制动距离预测方法研究[J]. 控制与信息技术,2023(3): 39-44.
ZHUO H J, XIAO X, HU Z F, et al. Research on braking distance prediction method of satellite car for tamping based on BP neural network[J]. Control and Information Technology, 2023(3): 39-44.

Design of electric drive system for the DWL-32 continuous dual-sleeper tamping and stabilizing vehicle

MA Zhanchuan

(China Railway Kunming Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650011, China)

Abstract: Current diesel-hydraulic/hydrodynamic drive systems for tamping and stabilizing vehicles suffer from high energy consumption, lagging torque response, low working efficiency, and inconvenient maintenance. This paper addresses these issues in the context of the DWL-32 continuous dual-sleeper tamping and stabilizing vehicle. It proposes a permanent magnet electric drive system solution that innovatively introduces electric traction technology to achieve integrated high- and low-speed traction of the complete vehicle and high-precision working at constant low speeds. Firstly, requirements for various working conditions were decomposed and quantified, and further calculations were conducted to derive traction/braking characteristics. Secondly, based on the traction and running characteristics, an electric drive system topology was built using permanent magnet electric drive technology, followed by the calculation and analysis for the electric drive system and the design of key components. Thirdly, for high-precision working at constant low speeds, the permanent magnet traction motor design was optimized, and the converter drive control mode was selected. Finally, key component prototypes developed for the electric drive system were tested on the bench and complete vehicle tests were carried out. Bench test results show that the electric drive system meets the temperature rise requirements during high-speed towing. Complete vehicle test results show that the designed electric drive system is rationally structured and delivers reliable performance that meets the requirements in complete vehicle traction as well as working and running conditions and achieves efficient response to control requirements at constant low speeds. Compared with the traditional technology route of hydraulic/hydrodynamic drive, the proposed solution improves working efficiency by 15%, providing strong support for the electrification upgrade and transformation of new-generation large-scale track maintenance machinery.

Keywords: large-scale track maintenance machinery; continuous tamping and stabilizing vehicle; electric drive; high-speed traction; low-constant-speed operation; permanent magnet traction motor