



铁路货运列车自供能泛在定位系统设计 与实现

屠迪龙¹, 秦勇¹, 刘梦洲¹, 贾海霞¹, 刘霞², 孟宪洪³
(1. 北京交通大学 先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 北京 100044;
2. 国家铁路局装备技术中心, 北京 100891;
3. 国能朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 肃宁 062350)

摘要: 近年, 铁路货物运输服务能力和范围都在进一步扩大, 城际与跨境货运班列的数量均在增加, 故实时了解、追踪列车的位置信息对于提升货运安全性、增加运营灵活性至关重要。文章提出了一种集走行部能量自供给、全球通用定位信息采集、数据无线传输、后台分析与预警等多功能于一体的自供能泛在定位技术及其系统。其中, 电磁式能量收集模块负责高效采集货运车辆行驶时的动能, 并为后续节点供电; 采用定位模块与无线传输模块实现对列车在全球范围内位置信息的实时监测、传输与处理, 并通过上位机实现人机交互, 完成数据访问与异常数据监测与预警功能。测试结果表明, 能量收集模块可在6~66 Hz的宽频范围内收集列车振动能量, 系统瞬时总功耗低, 可实现对位置信息的实时监测, 满足系统能量自供给的要求。

关键词: 铁路货运列车; 自供能; 泛在定位终端; 振动能量收集; 电磁式; 有限元

中图分类号: U292.92

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)05-0157-08

0 引言

在当前快速发展的全球经济背景下, 铁路货运作为连接不同地区、不同国家的重要物流方式, 承担着庞大的运输任务^[1]。其特有的运输效率高、成本相对低廉、适合长距离大宗货物运输等优势, 使其成为国际贸易和内陆运输不可或缺的部分^[2]。然而, 随着城际、多式联运、国际班列数量的不断增加, 以及运输产品附加值不断提升^[3], 货运系统需进一步提高运输效率、保障货物安全, 并实现跨国实时监控与管理^[4-5]。在这一背景下, 运用先进技术优化铁路货运体系, 特别是利用自供能技术提高货运列车的监控与管理能力, 显得尤为重要和迫切。

自供能技术的出现为货运领域相关问题提供了创新解决方案^[6]。这种技术通过利用环境中的能量并将其

转化为电能^[7], 为货运列车上的监控设备、传感器等设备提供持续稳定的能量供应, 大幅减少了对锂电池、线束供电的依赖^[8]。这对于提高货运列车的实时监控能力、确保货物运输安全、降低运营成本具有重要意义, 尤其在跨国贸易、偏远地区或者环境恶劣等情况下, 自供能技术能够确保货运系统的高效稳定运行, 提高其抵御风险的能力^[9]。

至今, 自供能技术已经发展出多种能量转换路线, 包括但不限于太阳能光伏转换^[10]、风力发电^[11]和振动能量转换^[12]等, 其中振动能量转换技术因其与铁路运输的天然契合性而备受关注。通过能量收集器, 货运列车运行中产生的振动能被高效捕获并将其转换为电能, 不仅可以为车载设备供电, 还能提高整个铁路运输系统的能源利用效率^[13]。振动能量转换技术的应用, 特别是电磁式振动能量收集器的研究与开发, 成为当前自供能技术研究的热点之一^[14]。

基金项目: 全国重点实验室自主研究课题 (RA02023ZZ003)

通信作者: 秦勇, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事轨道交通主动安全保障与运输组织、智能交通系统方面的研究; E-mail: yqin@bjtu.edu.cn

引用格式: 屠迪龙, 秦勇, 刘梦洲, 等. 铁路货运列车自供能泛在定位系统设计与实现[J]. 机车电传动, 2025(5): 157-164. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.105.

Citation: TU Dilong, QIN Yong, LIU Mengzhou, et al. Railway freight self-powered ubiquitous positioning technology and system[J]. Electric drive for locomotives, 2025(5): 157-164. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.105.

电磁式振动能量收集器利用法拉第电磁感应定律,将货运列车运行时产生的振动能量转化为电能^[15-16]。与其他能量收集技术相比,电磁式振动能量收集器具有以下2个显著优势:①转换效率相对较高,能够更有效地利用货运列车在运行过程中产生的振动能;②适应性强,能在广泛的振动频率和强度范围内稳定工作,特别适合铁路货运中复杂的动态环境。本文通过深入分析和比较不同原理的能量收集器^[17],最终确定电磁式振动能量收集器作为货运列车自供能泛在定位终端的最佳能量供给选择。

与轨旁能量收集装置相比,车载式电磁能量收集器能够产生大量、连续的电力输出。文献[18]提出的基于磁体阵列的“振动-旋转”转换机制能量收集器可与列车转向架主减振器并联连接,起到充当阻尼器的作用,可有效为车辆轨道状态监测的低功率电子设备供电。文献[19]提出了基于曲柄滑块机构和棘爪机构的货运列车能量收集减振器,其可安装在货运列车悬架上,与螺旋弹簧平行,将货运列车的振动能转化为电能。文献[20]设计了一种非接触式惯性能量收集装置,通过引入一种新型紧凑高效的机械纠偏系统将主轴的双向旋转转化为发电机的单向旋转,可安装在列车转向架系统两侧的悬架上。文献[21]提出了一种适用于重载铁路的“H”形车钩能量收集器,解决了联轴器之间巨大冲击力导致的机械结构损坏问题,通过发电机将动能转化为电能后存储在能量转换模块的超级电容器中,为铁路车载监测传感器网络提供电力供给。进一步地,电磁式振动能量收集器的应用不再限于提供能量。文献[15]提出了一种紧凑式惯性摆电磁振动能量收集器与一种带超级电容的DC-DC升压电路的能量收集系统,其可以驱动一个集成的商用传感器单元(带有压力传感器和三轴MEMS加速度计),并作为自供能传感器节点,用于货运铁路运输的状态监测系统。文献[22]提出一种由可变磁阻能量收集器和电源管理电路组成的能量收集系统,能够有效地将旋转能量转化为电能,智能获取铁路轴箱轴承的温度、应力、转速、振动加速度等健康状态信息。随着技术的进步,这些系统有潜力成为智能铁路系统的一个重要组成部分。

综上,本文将提出一种货运列车自供能泛在定位系统,通过振动能量收集实现自供能定位终端的闭环运行,其技术逻辑分为三部分:①能量自主供给:基于电磁式振动能量收集器,将转向架振动能转化为电能,并通过能量管理模块实现稳定供电。②泛在定位与数据传输:集成多模卫星定位模块与NB-IoT通信模块,实现全球范围内实时位置追踪与低功耗数据传输。③智能分析与预警:通过后台系统对定位数据进行实时分析,结合阈值判断实现异常预警。通过回收铁路货运列车运输过程中产生的振动能实现位置信息采集系统的能量自供给,不仅可以提升货运列车的效率和

安全性,还有助于实现能源的可持续利用,推动铁路运输行业的绿色转型。

1 系统总体方案

自供能泛在定位系统构建了一个高效的监控网络,该系统由三大主要部分组成:自供能泛在定位终端、服务器和后台数据分析平台。定位终端集成了能量收集、定位、核心处理、无线传输等关键功能,构成系统前端,被安装在转向架侧架上,可适配不同类型的货运列车,安装位置灵活,如图1所示。利用能量收集模块和能量管理电路可实现系统自供能,将转向架运行产生的振动能转换成电能并将其存储起来,为后续的电路节点供电。卫星定位模块可实现货运列车的实时位置追踪,而无线传输模块则负责将收集到的位置信息发送到服务器。服务器接收到数据后,进行解码、节点识别和信号解析,对收集到的定位数据进行存储、处理和深度分析。通过这一过程,系统能够在控制面板上实现人机交互,为用户提供直观的数据访问和管理功能。这个系统不仅提高了铁路运输领域的管理效率和安全性,还通过实时数据分析支持更加智能的运营决策制定。

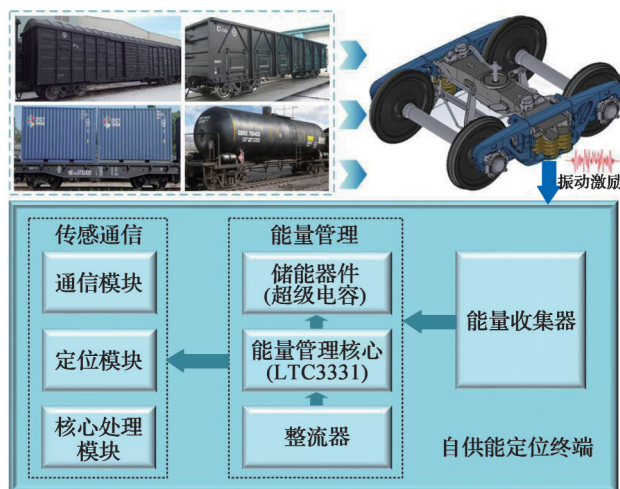


图1 自供能定位终端应用及系统框图

Fig. 1 Application and system block diagram of self-powered positioning terminal

2 系统硬件设计

自供能定位终端安装于货运列车转向架上,其由5个核心部分组成:能量收集模块、能量管理模块、主控电路、定位模块、无线传输模块,如图1所示。其中,能量收集模块负责捕获转向架在运行过程中产生的振动能,并将其转换成电能;能量管理模块对电能进行整流、稳压与存储,输出稳定的电能;定位模块采集转向架的实时位置数据,而主控芯片则负责指挥各模块的运作,对定位模块收集到的信息进行必要的

处理;无线传输模块对系统处理后的数据进行远程传输,实现数据的即时共享和通信。这一系列高度协同的操作确保了自供能定位终端能够有效地进行实时监测,并报告货运列车的位置信息。

2.1 能量收集器模块设计

针对转向架的宽频带振动问题,文献[15]对装载23 t货物的罐车进行了研究,模拟了其转向架的垂向振动情况。仿真结果显示,加速度的时域变化区间为 $-3g\sim 2g$,而在频域分析中,振动能量主要分布于频段 $2\sim 50\text{ Hz}$,能量峰值出现在 36.97 Hz 处。为了有效地收集这些振动能量,系统采用了一种特殊的电磁式双稳态振动能量收集器,该设计旨在优化能量俘获,收集器的结构如图2所示。

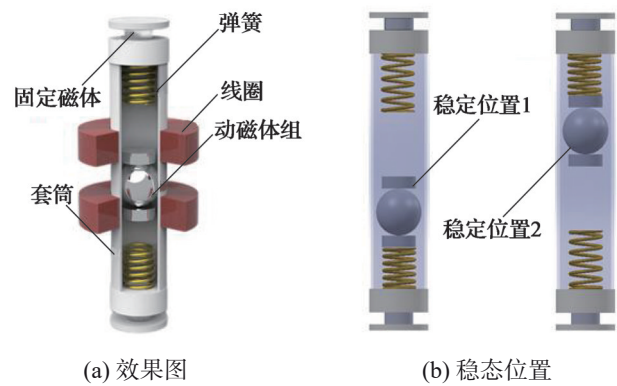


图2 能量收集器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy harvester

由图2可知,能量收集器模块由动磁体组、线圈和弹簧等部件构成。相对于传统的磁悬浮收集器设计,这种设计利用重力、弹簧弹力和吸引磁力产生2个平衡位置,实现了在更宽的工作频率范围内的高效响应。同时,导电线圈被巧妙地布置在这2个平衡位置的径向外围,以便在磁铁运动时捕捉最大的磁通量变化。

对这个能量收集模块进行有限元模拟分析,可以观察到当磁铁在其轴向上下移动时,穿过导电线圈的磁通量会发生变化,如图3所示,其中白框即为线圈。根据法拉第电磁感应定律,这种磁通量的变化将在线圈中产生感应电动势,进而产生感应电流。这个过程有效地将机械能转换为电能,为定位终端其他部件的正常运行提供了必要的电力。

2.2 能量管理模块设计

针对转向架复杂振动工况下能量波动剧烈、供电连续性难以保障的难题,本系统设计了一套多级协同能量管理机制,如图4所示。该机制通过振动能量采集、动态存储与智能调控的闭环链路,实现了从能量捕获到负载供电的全流程优化:首先,多通道整流电路对多源振动能量进行同步整合与初级滤波,将原本离散、脉动的电能转化为具备初步稳定性的直流输出;

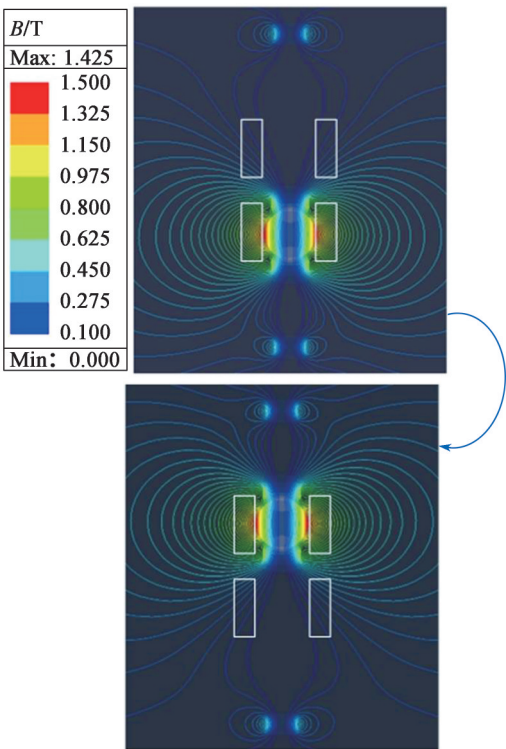


图3 能量收集模块运行时内部磁场变化

Fig. 3 Changes in the internal magnetic field during operation of the energy harvesting module

随后,前级大容量储能电容作为功率缓冲池,通过电容的快速充放电特性吸收瞬时能量尖峰,有效抑制因振动频率突变引发的功率振荡;当电容储能达到预设阈值时,系统启动自适应充放电控制策略,以恒流模式向锂电池输送能量,同时基于电压动态监测实时调整充放电阈值,避免电池因过充、过放或负载突变导致的性能衰减。在负载供电环节,系统采用二级稳压与分布式电容阵列设计,通过宽输入范围DC-DC模块将电池输出电压稳定在设备工作电压区间。

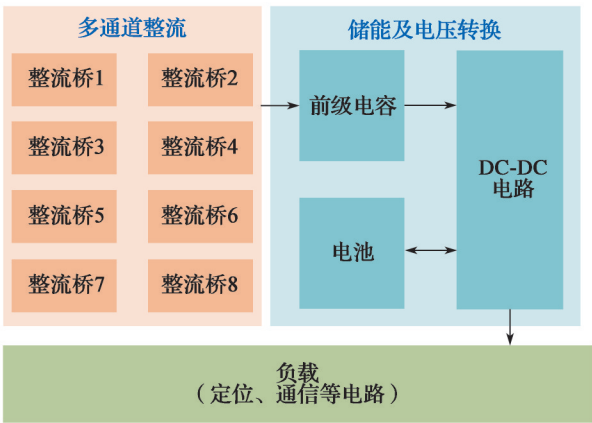


图4 能量管理电路设计框图

Fig. 4 Block diagram of energy management circuit design

2.3 主控/定位和通信模块设计

定位终端的核心控制单元负责协调能量管理、定

位与通信模块的协同工作，并完成数据处理与决策任务，系统架构如图4所示。主控模块采用低功耗嵌入式处理器，支持宽温域运行环境（-40~150℃），在保障高计算性能的同时显著降低系统整体功耗，满足车载设备对可靠性与能效的双重要求。

定位功能通过集成多模卫星导航（支持北斗、GPS和GLONASS等全球主流卫星导航系统）与低功耗广域通信（LPWAN）的模块实现，确保能实时追踪货运列车在跨国或偏远地区的位置。通信模块基于窄带物联网（NB-IoT）技术，结合冗余传输机制，即使在网络覆盖较弱区域仍可稳定上传定位数据至云服务器，并通过动态功率调节技术优化通信能耗。

主控模块通过实时调度策略平衡定位、通信与能量管理的任务优先级。例如，在振动能量充足时优先执行高频定位与数据传输；能量受限时则切换至低功耗模式，延长系统续航。试验表明，该设计在典型工况下可实现定位误差不大于5 m、通信丢包率小于1%，并且主控模块在休眠模式下的待机电流低至1.4 μA，充分验证了系统在自供能场景下的高效性与实用性。

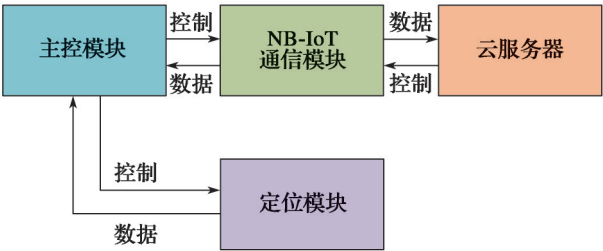
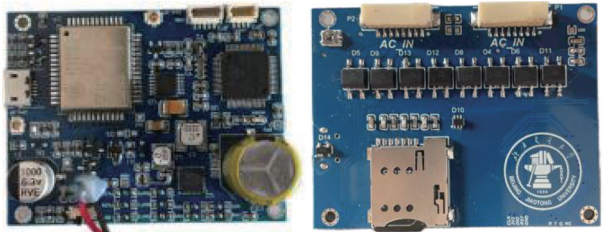


图 5 主控/定位和通信模块逻辑关系图

Fig. 5 Logic relationship diagram of master control/positioning with communication module

2.4 电路集成设计

考虑系统结构尺寸、无线收发一体集成的需求，需把所有的功能电路进行集成。主板主要包括能量管理电路、主控电路、定位电路、无线收发电路，根据外壳形状将主板设计为方形，便于与其他模块集成；定位与无线收发电路主要包括定位芯片、射频芯片和2个PCB天线，电路置于主板上，便于传输数据。加工完成的电路PCB板如图6所示。



(a) PCB 正面 (b) PCB 背面
图 6 集成PCB实物图

Fig. 6 Photo of integrated PCB

3 系统软件设计

自供能泛在定位系统的泛在定位终端采用主控芯片管理系统各模块之间的工作与通信，使用上位机进行定位数据的实时显示、存储与预警。因此，在软件层面需要完成终端边缘程序与系统上位机软件的设计。

3.1 节点程序设计

自供能定位终端边缘程序流程图如图7所示，工作流程开始于系统的初始化，这一阶段包括电源和时钟配置、外设与中断系统配置、I/O端口配置、内存管理等关键步骤，以及操作系统环境的准备。一旦系统初始化完成，主控芯片即指挥定位模组开始捕获并追踪卫星信号，并计算当前的位置信息。定位数据计算后，通信模块启动并向云服务器传输数据。数据发送完成后，系统转入低功耗休眠状态，以节约能量。休眠周期结束后，系统自动唤醒，开始新一轮的工作流程，不断重复上述过程。此流程不仅确保了系统在能量管理电路稳定供电前提下高效运行，而且通过定时更新和传输位置信息，满足了持续定位和通信的需求。

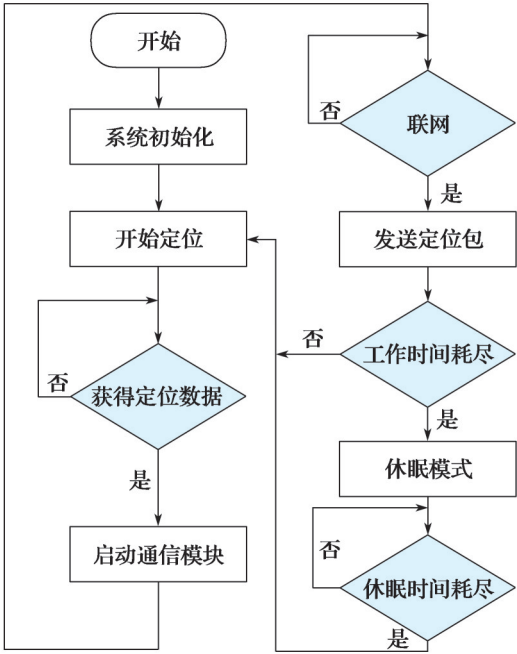


图 7 自供能定位终端边缘程序流程图

Fig. 7 Flowchart of edge program for self-powered positioning terminal

3.2 服务器后台和界面部署

该系统实现了定位信息通过部署服务器软件即时上传的功能，并可通过人机界面完成交互。系统流程如图8所示，服务器首先对收集到的货运列车定位数据进行解码、节点识别和数据库更新，进而对这些数据进行加工、分析和保存。经过处理的定位信息和速度

信息在控制面板上实时展示,并在检测到位置或速度信息异常时发出警报。此外,控制面板允许用户直接修改检测阈值,确保系统能够满足不同货运列车设备在不同工作环境下的监测需求。数据库的应用不仅使得监测数据的储存与查询成为可能,而且还支持数据的回调功能,能为货运列车智能调度和运维研究提供重要的数据基础。

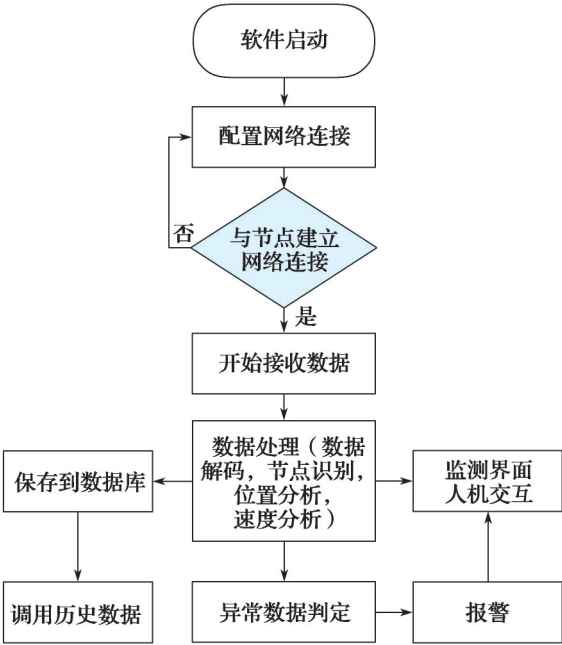


图8 上位机系统流程图
Fig. 8 Flowchart of upper computer system

4 试验和集成测试

4.1 收集器输出测试

研究团队搭建自供能泛在定位系统的测试平台,对能量收集模块输出特性进行测试,如图9所示。采用信号发生器、线性电源、功率放大器控制振动台,模拟不同的振动环境,使用示波器和数字万用表测量能量收集模块的输出信号。图10为单个收集器在不同激励加速度(2g、4g和6g)扫频下(5~80 Hz)的输出性能参数曲线。由图10可知,在加速度2g激励下,工作频带范围为9.5~45.1 Hz;在加速度4g激励下,工作频带范围为6.0~57.0 Hz;在加速度6g激励下,工作频带范围为8.3~66.4 Hz。

图11为输出电压与输出功率随负载电阻的变化曲线图。由图11可知,当振动激励频率为40 Hz、负载电阻为1.2 kΩ时,可与能量采集模块实现最佳阻抗匹配,达到最大输出功率9.1 mW。

4.2 发电与能耗联动测试

在系统各个功能模块中,需要供电的单元主要包括定位终端中的单片机、定位模块和通信模块。表1为

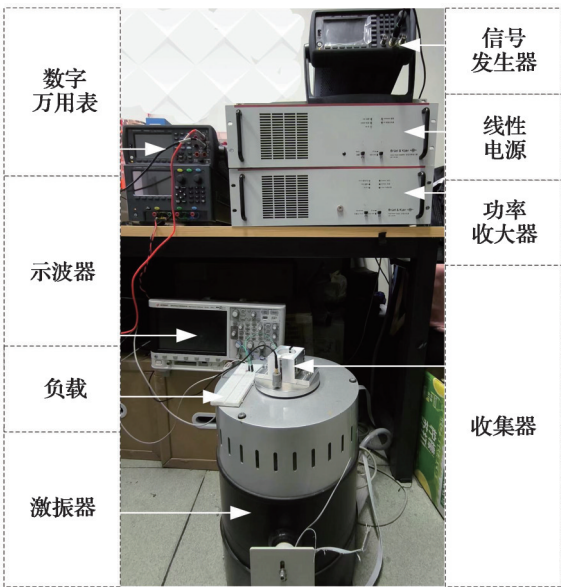


图9 试验平台
Fig. 9 Experimental platform

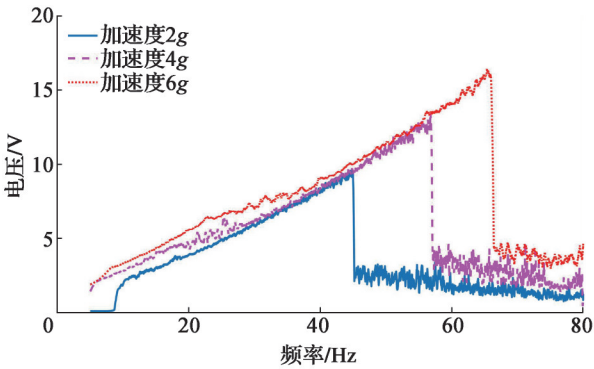


图10 收集器在不同频率下的输出性能参数曲线
Fig. 10 Parameter curve of output performance of harvester at different frequencies

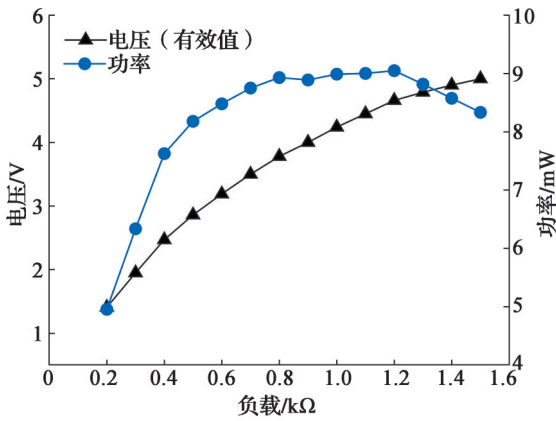


图11 阻抗匹配测试
Fig. 11 Impedance matching test

系统各模块的瞬时功耗,设备状态分为休眠模式和工作模式。在工作模式下,单片机全程工作,经历5 s左右的系统初始化后,定位模块开始工作;当定位数据确定后,启动通信模块开始发送定位数据。当设备处于深度休眠模式时,各模块的功耗会较低,因此提高休眠周期在整体工作周期的比例会显著降低系统整体

功耗。

表1 系统各模块瞬时功耗

Table 1 Instantaneous power consumption of system modules

参数名称	单片机	定位模块	通信模块
工作时间/s	100	95	10
休眠时间/s	3 600	3 605	3 690
工作电压/V	3.3	3.3	3.3
工作电流/mA	2.9	35.4	114.0
休眠电流/ μ A	1.4	110.0	3.7
工作功耗/mW	9.57	116.82	376.20
休眠功耗/ μ W	4.62	363.00	12.21

为验证自供能系统的能量动态平衡能力，开展了充放电联动测试。试验采用200 mAh锂电池与6组并联能量收集器，设定工作周期为1 h（“定位-通信”激活时长为10 min，休眠时长50 min）。测试表明，在单

次工作循环中，定位终端因数据采集与传输消耗电能0.52 J，导致电池电压从3.7 V降至3.6 V；随后通过振动能量收集阵列充电1 h，系统回收能量0.58 J，电压回升至3.7 V，实现能量净盈余0.06 J。进一步分析表明，在日均运行12次的典型工况下，系统可持续工作超过30天无须外部补电。

针对长时间停车场景（如振动中断超过72 h），系统通过超级电容暂存最后一次定位数据，并进入深度休眠模式（待机电流0.1 μ A），确保关键信息不丢失。重启后优先完成数据补传，避免监控盲区。关于安装策略方面，每节货运列车均独立部署定位终端，通过车载NB-IoT模块与列控中心构建星型通信网络。该设计既可实现全列车实时位置监控，又能通过冗余通信链路规避单点故障风险，显著提升系统鲁棒性。图12展示了终端硬件、上位机界面和定位数据验证结果，实测轨迹与实际路线偏差不大于5 m，验证了系统的高精度与可靠性。



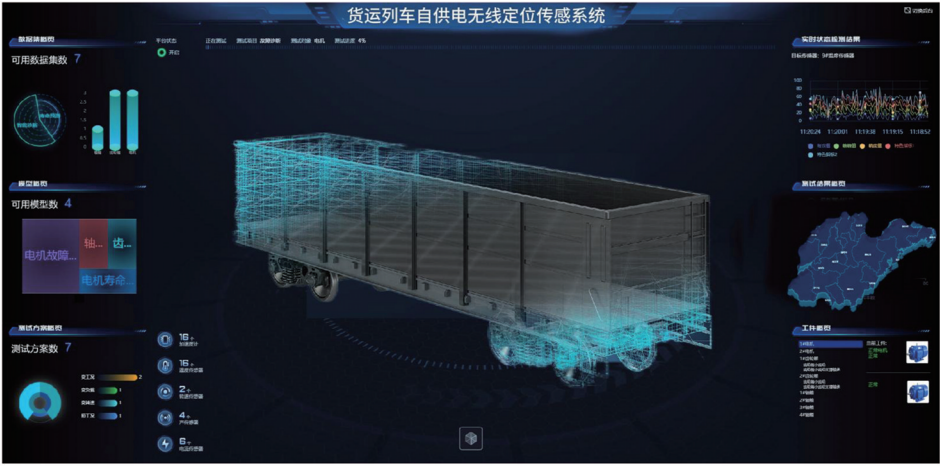
(a) 实物装备图

数据	创建时间
116.3347, 39.9504	2023-11-08 05:49:18
116.3347, 39.9504	2023-11-08 05:48:54
116.3347, 39.9504	2023-11-08 05:48:32
116.3347, 39.9504	2023-11-08 05:48:21
116.3347, 39.9504	2023-11-08 05:48:09
116.3347, 39.9504	2023-11-08 05:47:54
116.3347, 39.9502	2023-11-08 04:47:36
116.3347, 39.9502	2023-11-08 04:47:27

(b) 定位数据接收



(c) 定位数据实际位置



(d) 上位机界面

图12 上位机界面及定位测试结果

Fig. 12 Upper computer interface and positioning test results

5 结论

本文提出并实现了一种面向多车型货运列车的自供能泛在定位系统架构，其核心在于通过双稳态电磁能量收集器在6~66 Hz振动频段内实现峰值功率9.1

mW（负载1.2 k Ω ）的能量转换，结合动态能量管理策略中的“电容-电池”协同充放电机制，有效应对间歇性振动导致的能量波动，确保系统在无外部电源供电时持续运行超过65 h；同时，系统融合多模卫星定位（北斗/GPS/GLONASS）与NB-IoT冗余通信技术，实现在复杂环境下的高可靠性监控。试验表明，该系统

能够实时采集货运列车位置与速度信息, 通过NB-IoT无线传输至后台平台, 并基于阈值分析对位置偏移超限或速度突变等异常情况发出预警, 显著提升了铁路运输安全性与调度效率。未来的研究将进一步扩展系统功能, 集成转向架健康状态监测(如振动模式分析)、货物实时状态参数采集(如温度、湿度、冲击载荷), 为铁路货运智能化与多维度安全管控提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 王臻杰, 张得志, 秦进, 等. 考虑运输规模效应与网络拥堵的中欧班列运输网络优化[J]. 铁道学报, 2021, 43(11): 18-28.
WANG Zhenjie, ZHANG Dezhi, QIN Jin, et al. Transportation network optimization of China railway express considering transportation scale effect and congestion[J]. Journal of the China railway society, 2021, 43(11): 18-28.
- [2] 郑琬钰, 何永兵. 中老铁路国际联运货物运输优化对策探讨[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(11): 76-81.
ZHENG Wanyu, HE Yongbing. Optimization strategy of international intermodal cargo transportation of China-Laos railway[J]. Railway transport and economy, 2022, 44(11): 76-81.
- [3] 杨云飞. 国铁集团: 加速推进铁路货运向现代物流转型[J]. 中国物流与采购, 2024(6): 27-28.
YANG Yunfei. National railway group: accelerating the transformation of railroad freight transportation to modern logistics[J]. China logistics and purchasing, 2024(6): 27-28.
- [4] 叶飞, 刘启钢, 石磊, 等. 基于5M1E的铁路货运作业安全风险关联推理研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(1): 34-41.
YE Fei, LIU Qigang, SHI Lei, et al. Research on correlation inference of safety risks and accidents in railway freight operations based on 5M1E[J]. Journal of the China railway society, 2024, 46(1): 34-41.
- [5] 冯陈程, 关庆华, 赵鑫. 偏载对重载货运列车运行安全性的影响[J]. 机车电传动, 2019(2): 20-23.
FENG Chencheng, GUAN Qinghua, ZHAO Xin. Influence of partial load on running safety of heavy haul train[J]. Electric drive for locomotives, 2019(2): 20-23.
- [6] 刘严超. 我国铁路货运列车供电方式讨论[J]. 铁道车辆, 2020, 58(9): 33-34.
LIU Yanchao. Discussion of the mode of power supply for railway freight cars in China[J]. Rolling stock, 2020, 58(9): 33-34.
- [7] 冯守智, 王禹, 李智泽, 等. 铁路货运列车轴端发电机技术研究[J]. 机车电传动, 2021(1): 75-80.
FENG Shouzhi, WANG Yu, LI Zhize, et al. Research on technology of railway freight car shaft end generator[J]. Electric drive for locomotives, 2021(1): 75-80.
- [8] WU Xiaoping, ZHANG Tingsheng, LIU Jianyang, et al. A vibration energy harvesting system for self-powered applications in heavy railways[J]. Sustainable energy technologies and assessments, 2022, 53(A): 102373. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102373.
- [9] 吴昊. 高寒地区铁路防风屏障无线传感自供电技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2024.
WU Hao. Research on wireless sensors self-power supply technology for railroad wind barriers in alpine region[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2024.
- [10] 周新军. 太阳能在铁路行业中应用现状及展望[J]. 中国能源, 2016, 38(6): 44-47.
ZHOU Xinjun. Situation and prospects of solar energy application in the railway industry[J]. Energy of China, 2016, 38(6): 44-47.
- [11] FU Xianpeng, BU Tianzhao, LI Chenglin, et al. Overview of micro/nano-wind energy harvesters and sensors[J]. Nanoscale, 2020, 12(47): 23929-23944. DOI: 10.1039/D0NR06373H.
- [12] LIU Mengzhou, ZHANG Yuan, FU Hailing, et al. A seesaw-inspired bistable energy harvester with adjustable potential wells for self-powered internet of train monitoring[J]. Applied energy, 2023, 337(6): 120908. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120908.
- [13] 李智泽, 徐世锋, 段仕会, 等. 铁路货运列车转向架自发电技术研究[J]. 智慧轨道交通, 2024, 61(2): 47-55.
LI Zhize, XU Shifeng, DUAN Shihui, et al. Study on the self-generation technology for bogies of railway freight cars[J]. Intelligent rail transit, 2024, 61(2): 47-55.
- [14] 张允, 王战江, 蒋淑兰, 等. 振动能量收集技术的研究现状与展望[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(7): 985-1018.
ZHANG Yun, WANG Zhanjiang, JIANG Shulan, et al. Retrospectives and perspectives of vibration energy harvest technologies[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2019, 38(7): 985-1018.
- [15] GAO Mingyuan, CONG Jianli, XIAO Jiuling, et al. Dynamic modeling and experimental investigation of self-powered sensor nodes for freight rail transport[J]. Applied energy, 2020, 257(C): 113969. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113969.
- [16] PAN Yu, LIU Fengwei, JIANG Ruijin, et al. Modeling and onboard test of an electromagnetic energy harvester for railway cars[J]. Applied energy, 2019, 250(5): 568-581. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.182.
- [17] QI Lingfei, PAN Hongye, PAN Yajia, et al. A review of vibration energy harvesting in rail transportation field[J]. iScience, 2022, 25(3): 103849. DOI: 10.1016/j.isci.2022.103849.
- [18] WANG Yifeng, WANG Peigen, LI Shoutai, et al. An electromagnetic vibration energy harvester using a magnet-array-based vibration-to-rotation conversion mechanism[J]. Energy conversion and management, 2022, 253: 115146. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115146.

- [19] WANG Shengxin, PENG Wumao, KONG Weihua, et al. An energy harvesting shock absorber for powering on-board electrical equipment in freight trains[J]. *iScience*, 2023, 26(9): 107547. DOI: 10.1016/j.isci.2023.107547.
- [20] FANG Zheng, TAN Xing, LIU Genshuo, et al. A novel vibration energy harvesting system integrated with an inertial pendulum for zero-energy sensor applications in freight trains[J]. *Applied energy*, 2022, 318(1): 119197. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119197.
- [21] FAN Chengliang, LI Hai, ZHANG Zutao, et al. An H-shaped coupler energy harvester for application in heavy railways[J]. *Energy*, 2023, 270: 126854. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126854.
- [22] GONG Yun, WANG Sijia, XIE Zhengqiu, et al. Self-powered wireless sensor node for smart railway axle box bearing via a variable reluctance energy harvesting system[J]. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2021, 70: 9003111. DOI: 10.1109/TIM.2021.3076857.

Design and application of self-powered ubiquitous positioning system for freight wagons

TU Dilong¹, QIN Yong¹, LIU Mengzhou¹, JIA Haixia¹, LIU Xia², MENG Xianhong³

- (1. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Equipment Technology Center of National Railway Administration, Beijing 100160, China;
3. CHN ENERGY Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Suning, Hebei 062350, China)

Abstract: Recent years have seen a further expansion of railway cargo services in both capacity and coverage, particularly with the increasing number of intercity and cross-border freight trains. This ongoing growth makes it crucial to monitor and track the position of each train in real time for improving the safety and operational flexibility of freight transport. This paper presents a self-powered ubiquitous positioning system that integrates multiple functions, including the self-supply of energy sourced from the running gear, the collection of global universal positioning information, the wireless transmission of data, as well as the back-end analysis and warning. This system comprises an electromagnetic energy harvesting module that efficiently collects kinetic energy from the operating freight trains to power subsequent nodes. The incorporation of a positioning module and wireless transmission module enables the real-time monitoring, transmission, and processing of train positional information on a global scale. Additionally, this system supports human-computer interaction through upper computers to implement the functions of data access, abnormal data monitoring, and warning. Test results demonstrate the system's capability in the real-time monitoring of positional information while achieving energy self-supply by the energy harvesting module that can collect train vibration energy within a wide frequency range of 6 to 66 Hz, aided by the low total instantaneous power consumption of the system.

Keywords: freight wagons; self-powered; ubiquitous positioning terminal; vibration energy harvesting; electromagnetic; finite element