DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.06.010　　文章编号：1000-128X(2023)06-0079-09

轻型观光旅游磁浮列车总体设计研究

耿庆厚[1]，宗凌潇[2]，杨　君[1]，马卫华[3]，张　硕[1]
（1.中车唐山机车车辆有限公司，河北 唐山　063000；
2.中铁磁浮交通投资建设有限公司，湖北 武汉　430000；
3.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都　610031）

摘　要：文章通过分析对比大、中运量磁浮列车和轻型观光旅游磁浮列车的应用场景、服务人群特点，以功能、安全、环境、经济等要素为出发点，定义轻型观光旅游磁浮列车的顶层设计指标，开展车辆总体和主要系统方案设计研究。基于列车牵引、悬浮能力需求，对走行机构进行总体架构设计，确定单节车配置双悬浮架方案，减小了列车的簧下质量和设备维护难度，同时增大了车底设备布置空间；响应“双碳”目标提出车载蓄电池为轻型观光旅游磁浮列车供电方案，取消供电轨受流，降低了线路建设成本；利用理论和仿真等方法对列车各子系统的设计方案进行了验证，证明了列车总体设计的可行性。该轻型观光旅游磁浮列车方案具有较好的创新性、经济性、可行性和实用性，可为各型磁浮列车的设计提供思路和方法。

关键词：轻型磁浮；观光旅游；双悬浮架；低成本；车载储能
中图分类号：U237　　**文献标识码：**A

Research on general design of light tour maglev train

GENG Qinghou[1], ZONG Lingxiao[2], YANG Jun[1], MA Weihua[3], ZHANG Shuo[1]

(1. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063000, China;
2. China Railway Maglev Transportation Investment Construction Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China;
3. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: By analyzing and comparing the application scenarios and service targets of the large-capacity and medium-capacity maglev trains and light tour maglev trains, the top-level design indicators of the light tour maglev trains was defined based on the elements such as functions, safety, environment and economy, and studied the general design and the main system design of the train. Based on the requirements of train traction and levitation capacity, the overall framework of the running mechanism was designed and developed a scheme of a single car being equipped with two levitation frames, reducing the unsprung weight of the train and the difficulty of equipment maintenance and increasing the space for the equipment under the car. To achieve the goal of "reaching peak carbon emissions and carbon neutrality", a plan to supply power for the light tour maglev train by train-mounted batteries was proposed, which avoided the current receiving of power supply rail and reduced the cost of line construction. The design scheme of each subsystem of the train by theory and simulation was verified, proving the feasibility of the general design of the train. The scheme of the light tour maglev train is innovative, economical, feasible and practical, which can provide inspirations and methods for the design of various types of maglev trains.

Keywords: light maglev; tour; two levitation frames; low cost; train-mounted energy storage

通信作者：耿庆厚（1988—），男，高级工程师，主要从事城市轨道交通磁浮车辆方面的研究；E-mail: qinghou1988@163.com

引用格式：耿庆厚, 宗凌潇, 杨君, 等. 轻型观光旅游磁浮列车总体设计研究[J]. 机车电传动, 2023(6): 79-87.
Citation: GENG Qinghou, ZONG Lingxiao, YANG Jun, et al. Research on general design of light tour maglev train[J]. Electric drive for locomotives, 2023(6): 79-87.

0 引言

磁浮交通系统无轮轨接触，与轮轨制式交通系统相比，具有振动噪声低、爬坡能力强、曲线通过性能好、维护量小等优势，已经成为城市绿色智能人文一体化交通的典型代表[1-2]。在“十三五”期间，中国中车承担了科技部重大专项——《磁浮交通系统关键技术研究》项目，完成了速度为 200 km/h 和 600 km/h 的常导电磁悬浮车辆研制，攻克了一系列关键技术，形成了大量的技术成果；应用方面，国内已开通运营上海机场线高速磁浮、长沙机场中低速磁浮及北京 S1 线中低速磁浮等 3 条线路，即将开通广东清远磁浮旅游专线；“十四五”期间，将开通多条中低速磁浮线路，高速磁浮也已列入相关规划，磁浮交通产业进入蓬勃发展时期[3-6]。

高速化、轻型化是磁浮列车技术应用的两大发展方向。2021 年在青岛下线的速度为 600 km/h 的高速磁浮列车填补了高铁与飞机之间的速度空白，面向长大干线运输，对于构建全国 123 出行交通圈具有重大意义[7]；轻型磁浮列车具有综合造价低、配置灵活、线路适应性强等特点，可应用于城市内商圈、交通枢纽、医院、学校等功能区旅客运输，解决“最后一公里”问题，具有广阔的应用前景[8-13]。综上，研究提出一种可应用于旅游景区的轻型观光旅游磁浮列车总体设计方案。

1 服务对象和运营特点分析

《城市公共交通分类标准》将城市轨道交通分为地铁系统、轻轨系统、单轨系统、有轨电车系统、磁浮系统、自动导向轨道系统、市域快速轨道系统共 7 类，其服务对象主要为旅客[14]。磁浮旅游交通系统的服务对象主要为游客，磁浮旅游列车与城市轨道交通车辆的特点对比如表 1 所示。

表 1 服务对象和运营特点对比

Table 1 Comparison of service targets and operation characteristics

对比项目	城市轨道交通车辆	磁浮旅游列车
服务对象	旅客	游客
出行要求	高效，准时	慢节奏，轻松
乘车体验	安全，舒适	视觉、听觉、感觉要求高
旅客界面	标准功能	适应观光、家庭出行
旅行时间	短，长	短
客流特征	日潮汐	季节/阶段性潮汐
运营组织	固定	相对灵活
极端气候适应性要求	高	较低

综上，与城市轨道交通车辆相比，归纳出磁浮旅游列车设计要点如下：

①慢节奏、轻松出行：旅行速度较低，车辆加减速性能要求较低。

②视觉、听觉、感觉要求高：大开度车窗、低噪声、低振动、车内图案色彩搭配合理。

③适应观光、家庭出行：可采用对向座椅布置，营造独立空间。

④客流变化大：车辆灵活编组、配置灵活。

⑤极端气候适应性要求较低：减配置、降成本。

2 车辆总体设计

轻型观光旅游磁浮列车作为一款面向景区、服务游客的交通工具，其总体设计应当紧扣旅游列车的特点。游客乘坐旅游列车除了有空间位移的需求外，还需要有良好的车外观景体验，列车最高运营速度可视景区线路长短设定，应在 40~80 km/h 之内，乘坐时间不宜超过 30 min；景区游客量具有季节性和阶段性潮汐特性，轻型观光旅游磁浮列车可进行灵活编组，满足不同时段的运输需求——列车可根据实际载客需求进行 2~6 辆编组，相应载客量为 72~232 人（为保证舒适的乘车环境，列车载客主要考虑座席情况）。

相比城市地形，景区地形更加复杂多变，列车需要有更好的爬坡性能、更好的曲线通过能力以适应景区线路；相比城市轨道交通，旅游车辆运营可靠性要求较低、极端气候适应性要求低，可以对车辆进行简化配置，降低车辆成本，降低车辆重量。此外，磁浮车辆与轨道不存在物理接触，“贴地飞行”，振动小，静音舒适性好。旅游列车行车密度低，行车时间间隔长，列车宜采用车载储能方式运行。

图 1 为某大运量中低速磁浮列车车辆平面布置图，该列车作为城市公共交通工具，考虑到载客需求，车内座椅采用类似于地铁车辆的纵向布置形式，增加了站立面积（车内设置扶手）；每辆车设置 4 对双扇门，提升乘客上下车效率；为满足悬浮力要求，每辆车下方满布了 5 台悬浮架。该车作为磁浮列车，在载客设计方面更多地贴近了城市地铁车辆，高效的旅客运输是其本质特征。

将轻型观光旅游磁浮列车与大运量中低速磁浮列车的主要特征进行对比，可以发现两者的明显差异，对比情况如表 2 所示。

轻型观光旅游磁浮列车载客量少，车辆配置要求低，车辆重量小，对悬浮力要求低，可以设置更少的悬浮架，降低车辆制造成本，提升车下设备检修维护空间。乘客上下车效率要求低，可以设置更少的车门，但对乘坐舒适性要求高，车内应尽可能多布置座席。车辆平面、断面布置如图 2~图 3 所示。

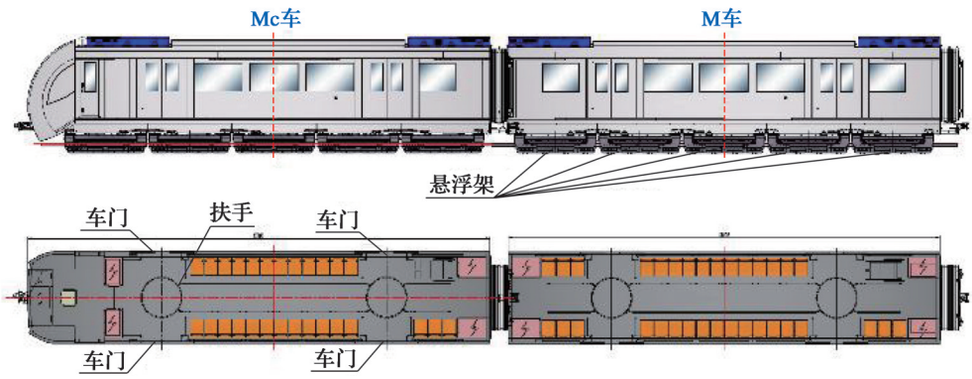


图 1　某大运量中低速磁浮列车车辆平面布置图

Fig. 1　Vehicle plane layout of a medium and low speed maglev train with large volume

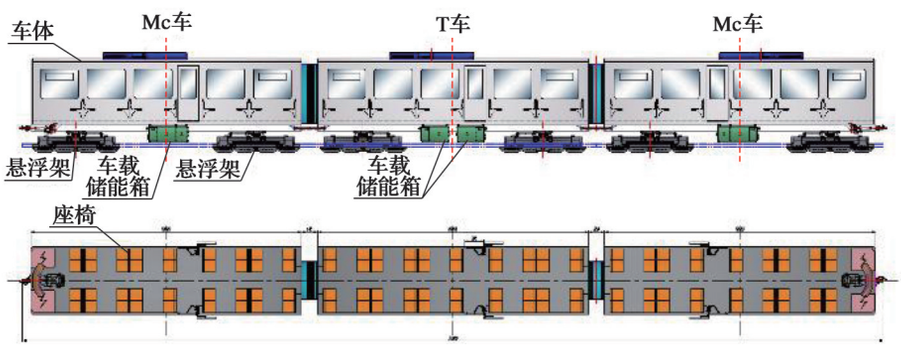


图 2　车辆平面布置图(轻型观光旅游磁浮列车)

Fig. 2　Plan layout of the light tour maglev train

表 2　大运量中低速磁浮列车与轻型观光旅游磁浮列车对比

Table 2　Comparison of large-capacity and medium-and-low-speed maglev train and light tour maglev train

对比项目	大运量中低速磁浮列车	轻型观光旅游磁浮列车
载客量	大	小
车辆配置	高	低
车辆重量	大	小
悬浮力要求	高	低
运行速度	较高	较低
列车加速性能	高	低
线路适应能力	一般	强
能量供应	供电轨	车载储能
乘车空间要求	较小	较大
乘客上下车效率	高	低

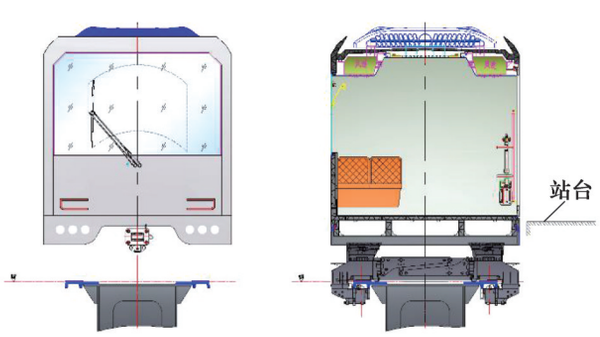


图 3　车辆断面布置图(轻型观光旅游磁浮列车)

Fig. 3　Section layout of the light tour maglev train

本文主要针对双悬浮架形式的轻型观光旅游磁浮列车进行总体设计研究。以 3 编组列车为例，轻型观光旅游磁浮列车车辆之间设置贯通道，车顶布置空调机组，每车设置 2 台悬浮架，电气设备、制动设备以及储能单元吊装在车体底架上，客室座椅采用横排对向布置的形式，每排座椅旁都布置了大面积车窗，每辆车左右侧各设置一对车门。

车辆相关主要技术参数如表 3 所示。

表 3　车辆相关主要技术参数

Table 3　Main train-related technical parameters

项目	数值
轨距/mm	1 500~1 700
最小水平曲线半径/m	25~75
最小竖向曲线半径/m	800~1 200
最大坡度	60‰~80‰
最高运行速度/（$km \cdot h^{-1}$）	40~80
车体长度/m	8~10
车辆宽度/m	2.1~2.5
车辆高度/mm	< 3 370
车辆重量（AW0）/t	9~12
单悬浮架悬浮能力/t	6.5~8.5
额定悬浮间隙/mm	9
平均加速度/($m \cdot s^{-2}$)	≥0.5
常用制动平均减速度/($m \cdot s^{-2}$)	≥0.7
紧急制动平均减速度/($m \cdot s^{-2}$)	≥1.2

3　悬浮系统和悬浮架

3.1　悬浮系统

每辆车布置有 2 个悬浮架，每个悬浮架有 2 个悬浮

模块，每一个悬浮模块的控制由一套悬浮控制系统实现。

车辆采用电磁永磁混合的F轨吸力型悬浮模式，可同时满足悬浮和导向功能，如图4所示。电磁永磁混合悬浮具有电流较小、有效减小温升、节能等优点。悬浮间隙控制在9 mm左右。悬浮系统能适应车辆从空载到满载的负荷变化，单个悬浮电磁铁额定悬浮能力不小于4.25 t（单悬浮架悬浮能力不小于8.5 t），考虑动载系数和法向力，单个电磁铁静态额定悬浮力需达到5.2 t才能满足要求。

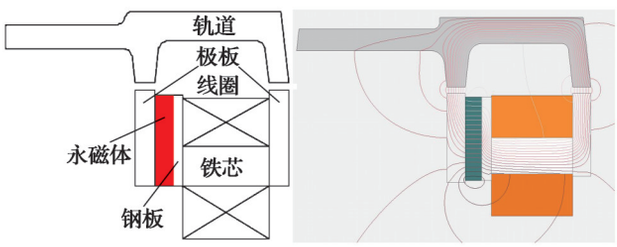


图4　混合悬浮电磁铁结构及磁力线示意图

Fig. 4　Structure and magnetic field line diagram of hybrid suspension electromagnet

采用理论计算和软件仿真结合的方式对混合悬浮电磁铁的悬浮能力进行分析。为求其数学模型，首先定义基本参数气隙长度为δ、气隙磁路面积为S、永磁体的矫顽力为H_c、相对磁导率为μ_m、永磁体厚度为d、永磁体在磁路方向上的面积为S_m、线圈匝数为N、线圈电流为I、真空的磁导率为μ_0。忽略铁磁材料的磁饱和效应，不考虑线圈和永磁体漏磁所带来的影响。采用等效磁路法进行分析，磁路模型如图5所示。

电磁铁的磁动势为

$$U=U_i+U_p=NI+H_cd \tag{1}$$

永磁体在磁路方向上的面积为

$$S_m=lh \tag{2}$$

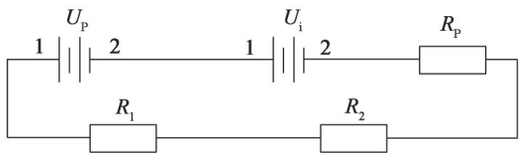


图5　混合悬浮电磁铁等效磁路模型

Fig. 5　Magnetic equivalent circuit model of hybrid suspension electromagnet

永磁体的磁阻为

$$R_p=\frac{d}{\mu_0\mu_m SS_m} \tag{3}$$

气隙磁阻为

$$R_1=R_2=\frac{\delta}{\mu_0 S} \tag{4}$$

气隙磁通为

$$\phi=\frac{U}{R_p+R_1+R_2} \tag{5}$$

悬浮力为

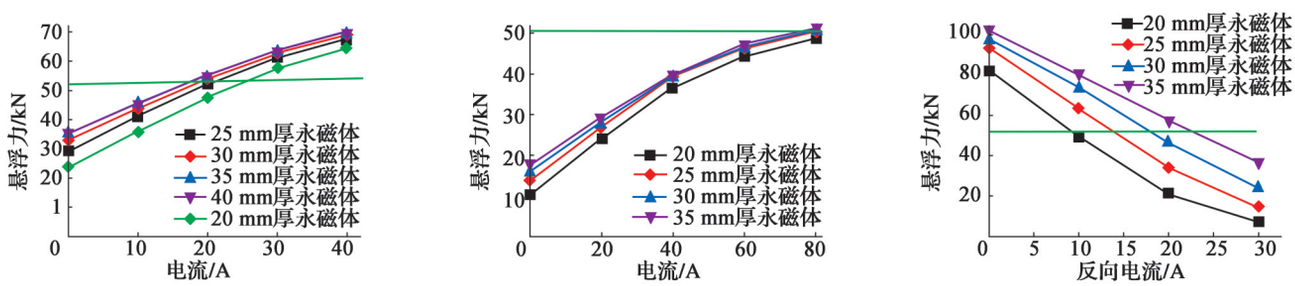
$$F=\frac{\phi^2}{\mu_0 S} \tag{6}$$

由式(1)~式(5)可得悬浮力的表达式为

$$F=\frac{\mu_0}{S}\left(\frac{H_c\pm NI}{\frac{2\delta}{S}+\frac{d}{\mu_m hl}}\right)^2 \tag{7}$$

式中：真空磁导率$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ N/m^2；永磁体相对磁导率μ_m=1.099 8；永磁体在磁路方向的面积S_m= 0.234 6 m^2；气隙磁路面积S = 0.057 12 m^2；永磁体矫顽力H_c= 890 000 A/m；线圈匝数N=320。

式(7)中的“−”号表示通入反向电流的情况，在式中视悬浮间隙、永磁体厚度及电流为变量，改变悬浮间隙值及永磁体厚度就可以得到不同工况下悬浮力与电流的关系。在额定间隙悬浮、起浮及吸死3种典型悬浮工况下，悬浮力与电流关系如图6所示。



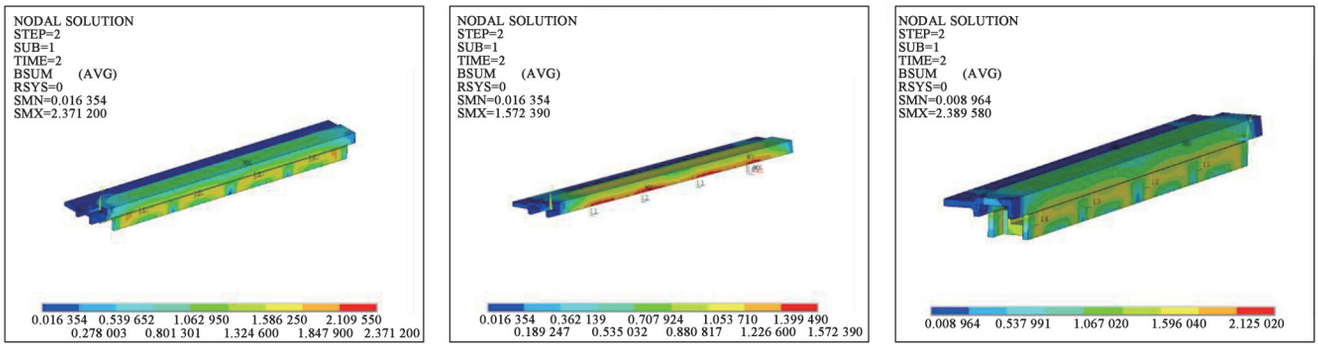
(a) 额定悬浮工况　(b) 起浮工况　(c) 吸死工况

图6　3种典型悬浮工况下悬浮力与电流关系图

Fig. 6　Relationship between suspension force and current under three typical suspension conditions

综合考虑各个工况悬浮力与电流的关系，得出结论为：永磁体过厚，控制难度大；永磁体过薄，需要的电流大。当永磁体厚度为25 mm、钢板厚15 mm时，考虑动载及电机法向力，额定间隙满载工况下需要提供的电流为20 A，永磁体提供的悬浮力占比56%，各项数据均为合适值。因此选取永磁体厚度为25 mm。

采用ANSYS软件对电磁场进行有限元仿真，计算悬浮质量为5.2 t时电磁铁的磁通密度，在额定间隙悬浮、起浮及吸死3种典型悬浮工况下，仿真云图如图7所示。



(a) 额定悬浮工况　　(b) 起浮工况　　(c) 吸死工况

图 7　3 种典型悬浮工况下电磁铁的磁通密度云图

Fig. 7　Nephogram of magnetic flux density of electromagnet under three typical suspension conditions

从图 7 可以看出，当悬浮质量为 5.2 t 时，电磁铁的磁通密度仅在很小区域达到饱和状态，电磁铁悬浮能力达到要求。

3.2　悬浮架

由悬浮架组成的磁浮列车走行机构将为列车提供悬浮力、导向力和驱动力。每节车辆走行机构由 2 个悬浮架组成，每个悬浮架纵向长度为 3 200 mm，前后悬浮架之间的距离为 6 650 mm。2 个悬浮架均为固定滑台形式，悬浮架与车体固定连接。每个悬浮架呈“工”字形布置，由左右模块组成，二者之间通过一套特殊设计的防侧滚梁装置耦合连接，悬浮架结构图如图 8 所示。该防侧滚梁装置的特殊之处在于既能防止左右模块的侧滚运动，又能实现左右模块间的相对运动解耦，即磁浮列车在实际运行中单侧悬浮模块遇到冲击振动将不会影响到另一侧悬浮模块，从而提高了整个悬浮架的悬浮稳定性，同时有利于提高磁浮列车的运行平稳性。

为保证悬浮架各主要受力部件机械强度满足设计要求，对悬浮架进行有限元仿真分析。悬浮架整体为实体模型，使用四面体单元与六面体单元进行网格划分。

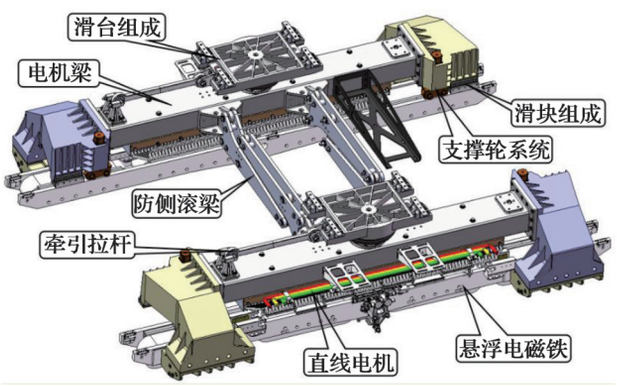


图 8　悬浮架结构图

Fig. 8　Structure of levitation frame

悬浮架处于不同运用工况下时，约束条件和加载情况不同。分析计算中，分为满员落车（工况 1）、满员启动（工况 2）、满员电制动（工况 3）、满员机械制动（工况 4）、满员静悬（工况 5）共 5 个工况。采用 ANSYS 软件对 5 种工况下的悬浮架各零部件变形和应力进行有限元仿真，其中满员启动（工况 2）工况下，悬浮架总变形与等效应力云图如图 9 所示。

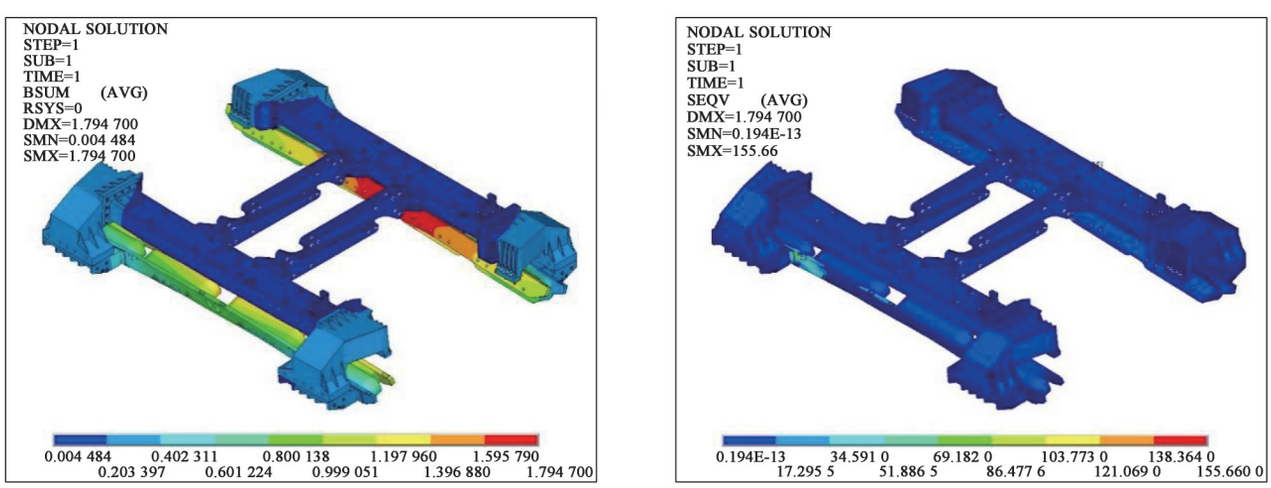


图 9　悬浮架总变形与等效应力（工况 2）

Fig. 9　Total deformation and equivalent stress of levitation frame (condition 2)

5种工况下，各主要零部件受到的最大应力如表4所示。

表4　各零部件最大应力计算结果

Table 4　Calculation results of maximum stress of each component

工况	部件名称	许用应力/MPa	计算最大应力/MPa	最大变形/mm
工况1（落车）	垂向滑橇座	287	194.14	0.04
工况5（超员静悬）	托臂连接件上	278	45.59	0.36
工况2（正常行驶）	托臂连接件下	278	188.07	0.51
工况4（机械制动）	纵梁	278	57.61	0.32
工况1（落车）	抗侧滚梁安装座	204	97.70	0.60
工况1（落车）	片梁	204	33.39	0.45
工况1（落车）	片梁吊杆	204	53.23	0.38
工况5（超员静悬）	外极板	204	51.81	1.22
工况3（电制动）	内极板	204	35.53	2.28
工况4（机械制动）	滑台	235	49.53	0.50
工况4（机械制动）	牵引拉杆	204	6.67	1.34

由表4可知，双悬浮架轻型磁浮列车悬浮架具有较好的力学性能，在各种工况下，零部件的最大应力值均远小于所选用材料的许用应力值，满足设计要求。

4　牵引系统

列车采用3辆编组，其编组型式为Mc-T-Mc （其中Mc为动车，T为拖车）。车辆自重为：Mc车13.0 t，T车12.5 t，车辆载客为全座席形式，满载状态下车辆质量为：Mc车15.5 t，T车15.3 t。列车的最高运行速度为40 km/h，0~40 km/h平均加速度不小于0.5 m/s^2。列车额定供电电压为DC 600 V，每辆动车配置一套独立的动力单元，牵引时从动力蓄电池取电经牵引逆变器带动直线电机运行；电制动时，直线电机回馈能量逆向输送给动力蓄电池。

高压主回路电气设备主要包括高压分线箱、牵引逆变器箱。其中高压分线箱为高压系统提供短路保护；牵引逆变器（集成电抗器功能）驱动牵引电机为整车提供牵引力和电制动力；列车牵引系统配置如表5所示。

表5　列车牵引系统配置表

Table 5　Configuration of train traction system

设备名称	整列数量/台	列车配置/（台·套$^{-1}$）		
		Mc1	T	Mc2
高压分线箱	2	1	0	1
牵引逆变器箱	2	1	0	1
直线电机	8	4	0	4

列车牵引传动系统采用VVVF逆变器–直线牵引电机构成的交流电传动系统。牵引逆变器采用双模块冗余设计，每个模块驱动2台直线牵引电机（两串）。牵引逆变器额定容量为2×180 kV·A。

磁浮列车采用直线电机作为动力输出单元，列车牵引力不受轮轨黏着限制，具有更强的爬坡能力。列车正常运行时，直线电机滑差频率12 Hz，限流300 A，最大牵引力约为3.6 kN。列车故障运行时，由于需要较大启动牵引力，将滑差频率降为8 Hz，限流350 A，满足启动牵引力大于5.5 kN要求，可确保在AW1载客工况下，当列车丧失1/2动力时，列车仍然可以在线路最大60‰坡道上启动，并能以正常运行方式完成一个单程运营。

5　辅助供电系统

辅助供电系统主要由车辆动力电池（车载储能单元）、DC/DC模块（DC 110 V电源）构成，其系统框图如图10所示。

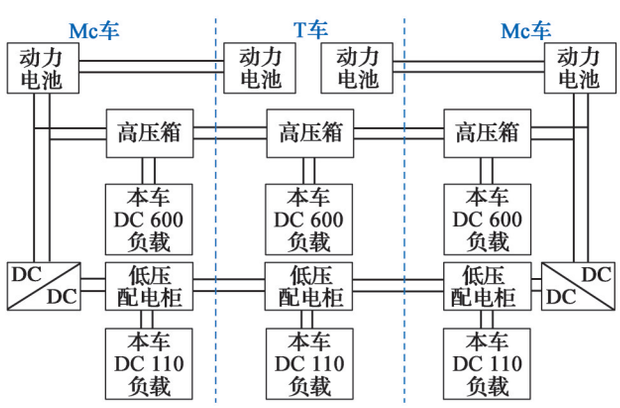


图10　辅助供电系统框图

Fig. 10　Block diagram of auxiliary power supply system

Mc车上设置1个电池箱，T车上设置2个电池箱，Mc车上的电池箱和T车上其中一个电池箱组成一个电池，整列车设置2个电池，2个电池并联通过供电母线向整列车输出DC 600 V电源，给全列牵引及辅助设备（悬浮、空调、空压机）供电。DC/DC变流器将DC 600 V电能逆变输出DC 110 V电源，提供给各低压用电设备（信号主机、门控器、动态地图、客室照明等）以及高压设备控制系统（悬浮控制器、牵引控制器）。

轻型观光旅游磁浮列车采用车载储能方式运行，取消线路受流轨，降低线路造价，消除行车受流噪声，进一步体现磁浮车辆静音舒适的特性，同时也免去受流轨后期维护，提升线路安全性。

作为公共交通，轻型观光旅游磁浮列车对车载动力电池的安全性提出了很高的要求，同时，车辆质量相对较大，因而需要动力电池具有良好的性能。

目前，常见动力电池主要有铅酸电池、镍镉电池

和锂电池，不同类型蓄电池的特性[15]对比见表6。

表6　不同类型蓄电池特性对比

Table 6　Comparison of characteristics of different types of batteries

对比项目	铅酸电池	镍镉电池	锂电池
能量密度/（W·h·kg^{-1}）	30~45	30~60	80~300
功率密度/（W·kg^{-1}）	30	1 000	3 000
循环寿命/（100%DOD）	500次	1 000次	3 000~20 000次
自放电率/（%·月$^{-1}$）	10	20	<2
低温放电能力（–25 ℃）	0	40%	>85%
记忆效应	无	有	无

100%DOD为电池每次充放电容量达到100%。

从表6可以看出，锂电池能量和功率密度更高，在满足车辆牵引性能需求的条件下，锂电池系统的体积和质量最小，低温性能优良，无污染，同时完全免维护，因而锂离子动力电池是当前车载储能器件的最佳选择。

不同类型的锂离子电池有不同的化学体系。目前的锂离子电池主要有三元锂电池、磷酸铁锂电池和钛酸锂电池，其具体参数对比如表7所示。

表7　不同类型锂离子电池参数对比

Table 7　Parameters comparison of different types of lithium-ion batteries

对比项目		钛酸锂电池	磷酸铁锂电池	三元锂电池
正极材料		镍钴锰	磷酸铁锂	镍钴锰
负极材料		钛酸锂	石墨	石墨
能量密度/（W·h·kg^{-1}）		80~110	130~170	180~300
功率密度/（W·kg^{-1}）		1 500~3 000	500~1 500	500~1 000
低温性能（温度）	充电	高于–40 ℃	高于0 ℃	高于–10 ℃
	放电	高于–40 ℃	高于–10 ℃	高于–10 ℃
高温性能		50 ℃以上时对电池寿命有较大影响		
循环寿命/次（25 ℃, 100%DOD, 1C）		15 000~20 000	2 000~4 000	1 000~2 000
成本/（元·(kW·h)$^{-1}$）		10 000	4 000	3 000
安全性		好	较好	差

钛酸锂电池具有安全可靠、充放电电流大、寿命长和耐低温性能好等优点，因此，轻型观光旅游磁浮列车储能单元采用钛酸锂动力电池。

全列车设置2个蓄电池单元，每个蓄电池单元分为2个电池箱，分别布置在端车和中间车（中间车设置2个蓄电池箱）。2个电池单元并联，通过供电母线向全列牵引及辅助设备（悬浮、空调、空压机等）供电。

以某旅游景区规划环形线路（长度约10.33 km）为例，计算列车能耗情况，以配备列车储能单元。列车辅助系统分为DC 110 V负载和DC 600 V负载2种，其中DC 110 V负载总功率约为11.9 kW, DC 600 V负载总功率约为97.2 kW，结合环形线路（3个站点）计算出列车能耗如表8所示。

表8　列车能耗计算

Table 8　Calculation of train energy consumption

运行区间	站间距/km	牵引总能耗/（kW·h）	辅助总能耗/（kW·h）
站点A—站点B	1.72	13.88	5.54
站点B—站点C	2.43	2.26	7.33
站点C—站点A	6.18	13.44	17.82

另外，考虑停站期间能耗、应急启动等情况，列车储能装置电量不应小于65 kW·h（寿命末期）。列车可在站点A处进行充电补能，储能装置保证列车可运行一圈即可，综合考虑充电时间，储能装置配置如下：列车储能单元为钛酸锂模组通过21串2并组成，单电池组系统电量为69 kW·h。系统配置BMS管理系统、隔离开关、主接触器、熔断器、电压传感器、电流传感器、绝缘检测模块、配套连接器以及其他配套附件。

储能单元系统参数如表9所示，蓄电池单体参数如表10所示。

表9　储能单元系统参数

Table 9　System parameters of the energy storage unit

项目	参数值或说明
系统串并联方式	21串2并
工作直流电压范围/ V	403~693
额定工作电流/ A	300
系统额定容量/ (A·h)	120
系统额定电压/ V	579
系统电量/（kW·h）	69
寿命末期电量/（kW·h）	55
环境温度范围/℃	–25~45
工作温度范围/℃	–25~55
尺寸/mm	2 300×1 500×600（大箱） 2 300×1 000×600（小箱）

表10　蓄电池单体参数

Table 10　Unit-cell parameters of batteries

项目	参数值或说明
单体电芯种类	钛酸锂
单体额定容量/ (A·h)	10
单体标称电压/V	2.3
单体工作电压/V	1.60~2.75
最大持续放电电流/A	150
单体电池质量/kg	0.298
外形尺寸/mm	6.1×220×126
自放电率	<5% (25 ℃，28天，100%SOC)
单体交流内阻/mΩ	≤1.2
单体电池能量密度/（W·h·kg^{-1}）	77
单体电池体积比能量/（W·h·L^{-1}）	134

注：SOC(state of charge)指蓄电池荷电状态，其取值范围为0~1，100%SOC表示电池完全充满。

6 制动系统

制动系统由电机械制动控制单元、电机械制动夹钳单元、线路等组成。在车辆不同载荷工况下，在平直干燥轨道上，列车从最高运行速度到停车，制动性能满足：紧急制动平均减速度不小于1.2 m/s²；紧急制动响应时间不大于1 s。

整车采用架控式制动系统，每车配置2台电子制动控制单元（EBCU），它接收硬线信号、网络信号并进行制动力计算，控制制动夹钳输出相应的制动力，实现机械制动的目的，同时将自身的故障或警告信息反馈给列车控制单元（VCU）。每车2个悬浮架左右电磁铁配置4套制动夹钳，通过与EBCU配合执行输出制动所需夹紧力。

基础制动为电机械制动。电机械夹钳单元是电机械制动系统的执行机构，采用电机驱动摩擦制动方式，设计最大夹紧力为20 kN以上。电机械制动夹钳技术参数如表11所示。

表11 电机械制动夹钳技术参数

Table 11 Technical parameters of electromechanical brake clamp

参数项目	工作温度/℃	制动输出力/kN	额定功率/W	极限功率/W	防护等级
参数值或说明	–25~55	10	200	300	IP67

7 车体和车内设备

车体可选用目前在轨道交通领域应用广泛的薄壁筒型整体承载结构，车辆主体结构材料采用铝合金大断面组合式中空挤压型材，该材料生产工艺成熟可靠，焊接成型后车辆密封性能好，同时铝合金材料可回收再利用，绿色环保。

车体也可采用底架承载的结构，底架选用铝合金或钢材拼焊而成，承载车上、车下各种载荷，车体侧墙、端墙和车顶采用钢骨架+复合材料的组合形式，该结构更有利于车辆轻量化，隔热保温性能好。

车辆内饰设计简约大方，为游客提供轻松、舒适的乘车环境。车内设备可根据景区具体特点进行专业化定制，体现旅游主题。车辆布置大面积车窗，为游客提供良好观景条件。

8 结束语

本文在已经成熟应用的中低速磁悬浮列车技术基础上，结合轻型观光旅游磁浮列车的实际应用场景，分析了列车顶层参数，着重细化研究了悬浮架、悬浮、车载储能等关键系统，计算结果表明，系统各项指标满足技术要求，对轻型磁浮列车的可行性进行了必要的理论验证。此外，本文在研究当中首次提出了双悬浮架形式的轻型磁悬浮列车，车辆具有更好的检修维护空间、更轻的重量，同时也会带来更低的车辆造价和线路工程造价，为中低速磁浮列车的拓展应用提供了一种可能。

参考文献：

[1] LIU Zhigang, LONG Zhiqiang, LI Xiaolong. Maglev trains: key underlying technologies[M]. Heidelberg: Springer, 2015.

[2] HAN H S, KIM D S. Magnetic levitation: maglev technology and applications[M]. Dordrecht: Springer, 2016.

[3] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
ZHAI Wanming, ZHAO Chunfa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2016, 51(2): 209-226.

[4] 徐飞, 罗世辉, 邓自刚. 磁悬浮轨道交通关键技术及全速度域应用研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 40-49.
XU Fei, LUO Shihui, DENG Zigang. Study on key technologies and whole speed range application of maglev rail transport[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41 (3): 40-49.

[5] 马卫华, 罗世辉, 张敏, 等. 中低速磁浮车辆研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 199-216.
MA Weihua, LUO Shihui, ZHANG Min, et al. Research review on medium and low speed maglev vehicle[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1): 199-216.

[6] NAGASHIMA K, SASAKAWA T. Research and development of maglev and application of related technologies to conventional railways[J]. Quarterly report of RTRI, 2021, 62 (3): 163-166.

[7] LIU Jianxin, XIE Ming, GUO Feng, et al. Adaptability study of maglev vehicle bogie frame at 600 km/h[C]//American Society of Civil Engineers. 13th Asia Pacific Transportation Development Conference. Shanghai: ASCE, 2020: 617-626.

[8] 曾国保. 中低速磁浮交通的适应性及工程化发展方向[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(10): 111-115.
ZENG Guobao. The adaptability and the improvement in engineering of the lower-medium speed maglev transit system [J]. Journal of railway engineering society, 2016, 33(10): 111-115.

[9] 刘武斌. 中低速磁浮轨道交通旅游特性下系统优化研究——以清远磁浮旅游轨道交通为例[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(6): 16-22.
LIU Wubin. Research on system optimization of medium-

low speed maglev rail transit tourism characteristics: a case study of Qingyuan maglev tourism rail transit[J]. Railway standard design, 2020, 64(6): 16-22.

[10] 赵丰年, 邱冰, 彭立, 等. 中低速磁浮在旅游交通领域适应性研究[J]. 铁道勘察, 2021, 47(1): 59-63.
ZHAO Fengnian, QIU Bing, PENG Li, et al. Study on the adaptability of medium-low speed maglev in tourism transportation[J]. Railway investigation and surveying, 2021, 47 (1): 59-63.

[11] 汪科任, 罗世辉, 马卫华, 等. 磁浮列车静悬浮车轨耦合振动对比分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(2): 282-289.
WANG Keren, LUO Shihui, MA Weihua, et al. Vehicle-guideway coupling vibration comparative analysis for maglev vehicles while standing still[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2020, 55(2): 282-289.

[12] 肖飞. 中低速磁浮交通的技术经济性分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(3): 99-105.
XIAO Fei. Techno-economic analysis of low and medium-speed maglev transport[J]. Journal of railway engineering society, 2017, 34(3): 99-105.

[13] 章致, 宗凌潇, 任忠华. 中低速小型磁浮系统设计及其应用研究[J]. 机车电传动, 2020(6): 75-79.
ZHANG Zhi, ZONG Lingxiao, REN Zhonghua. Design of medium and low speed small maglev system and its application[J]. Electric drive for locomotives, 2020(6): 75-79.

[14] 城市建设研究院. 城市公共交通分类标准: CJJ/T 114—2007[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Urban Construction Research Institute. Standard for classification of urban public transportation: CJJ/T 114—2007[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

[15] 姚海英, 单宇, 程中国, 等. 城市轨道交通车辆无电网自走行技术的应用与探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23 (12): 148-154.
YAO Haiying, SHAN Yu, CHENG Zhongguo, et al. Application and discussion of urban rail transit vehicle netless self-running technology[J]. Urban mass transit, 2020, 23 (12): 148-154.

收稿日期：2021-11-10
修回日期：2023-05-11