

# 悬挂式单轨交通牵引供电系统方案研究\*

陈 洁

(中国铁建电气化局集团有限公司技术开发部,100043,北京//高级工程师)

**摘 要** 悬挂式单轨交通是一种客运量较小的轨道交通,它是大中城市道路交通系统的延伸和补充,虽历史悠久,但其在国内尚无国家及行业技术标准。依托河南省开封市空轨示范段悬挂式单轨交通,通过综合比选分析,采用了直流牵引供电+锂电池备用的供电系统方案,以侧接触式受流方式为列车提供稳定可靠动力。

**关键词** 悬挂式单轨交通;牵引供电系统;直流牵引供电;锂电池供电

**中图分类号** U232.8

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2020.10.031

## Research on Traction Power Supply System of Suspended Monorail Transit

CHEN Jie

**Abstract** Suspended monorail transit is a kind of rail transit with small passenger volume, the extension and supplement of road traffic system in large and medium sized cities. Despite of the long history, the suspended monorail transit does not have national and industrial technical standards in China yet. Taking the suspended monorail transit on the air rail demonstration section in Kaifeng City as the research subject, and through synthetic comparative analysis, a DC traction power supply+lithium battery backup power supply system is adopted to provide stable and reliable power for trains with side contact current collection mode.

**Key words** suspended monorail transit; traction power supply system; DC traction; lithium battery

**Author's address** China Railway Construction Electrification Bureau Group Co., Ltd., 100043, Beijing, China

悬挂式单轨交通作为一种现代公共交通体系的有益补充,目前国内是一个重要的研究领域。中国铁建股份有限公司、中国中车股份有限公司、中国铁路工程总公司等单位纷纷对该领域开展研究。依托河南省开封市空轨示范段对悬挂式单轨交通的供电方式进行研究,通过对比分析及可行性

论证,综合各项技术经济指标得到悬挂式单轨交通供电系统方案<sup>[1-2]</sup>。

## 1 悬挂式单轨交通供电技术需求

### 1.1 供电系统特性需求

1) 运量小。悬挂式单轨交通一般应用于支线,因此列车运量较小,对供电系统的容量需求不大。

2) 空中悬挂。由于悬挂式单轨交通列车在空中行驶,其供电方式要求列车与电源之间需要以特殊方式连接,既保证施工的可行性,又保证列车运行的稳定性。

3) 箱体封闭。由于悬挂式交通箱梁为钢结构,且空间封闭狭小,需要供电方式满足绝缘需求,同时应方便后期检修需求。

### 1.2 主要气象条件

开封市空轨示范段悬挂式单轨交通供电系统的最高计算温度为+60℃;当地最高气温为+40℃,最低气温为-20℃;开封市的地震烈度为7度,覆冰厚度为0;雷暴区级别为中雷区,污秽等级为重污区。

### 1.3 电气技术需求

悬挂式单轨交通的电气技术需求如下:供电系统标称电压为DC 750 V/DC 1 500 V,电压允许波动范围为DC 500~900 V/DC 1 000~1 800 V;静态时空气绝缘间隙为25 mm,动态时其为25 mm;绝缘子爬电距离不小于100 m。

## 2 悬挂式单轨交通供电方式比选

### 2.1 锂电池供电

锂电池已经广泛应用于汽车行业,但在轨道交通列车上一直作为储能装备和备用电源使用。目前,中唐空铁集团有限公司在四川省建造的悬挂式单轨交通采用动力锂离子电池供电。锂离子电池

\* 中国铁建股份有限公司科技研发计划项目(2018-B09)

作为储能装置,其能量密度比飞轮电池和超级电容要高,但缺点在于其功率密度较小,且使用周期很短,需要定期更换。虽然采用动力锂离子电池使整个供电系统建造更为简单,但由于锂电池有一定质量并占据一定空间,对列车结构和箱梁的钢结构设计都影响较大,反而导致整个工程的建造复杂性提升,因此锂电池更适合作为备用电源,当主供电方式失效后利用锂电池驱动列车<sup>[3]</sup>。

## 2.2 超级电容供电

目前,国内部分城市有轨电车采用超级电容充电模式,即通过引入两路 10 kV 市电至箱式变电所,经箱式变电所内整流变压器和整流器组整流降压至 750 V 直流电。750 V 直流电经箱式变电所内直流开关柜和上网隔离开关柜至车站充电装置输入端。在列车进入车站前充电轨处于无电状态,列车开始进站,充电装置通过站台读卡器和列车顶部射频卡检测列车位置信号,以及通过充电轨检测到列车车载电容的残余电压信号。列车只有同时检测到列车位置信号和列车残余电压信号才启动充电,且以恒定电流对列车电容进行充电。车载电容电压达到标定值后,充电装置自动切开充电回路,则充电结束。整个充电时间为 30 s 左右,完全能在乘客上下车的过程中完成。充电结束后,充电轨处于无电状态,车辆驶离车站。但超级电容的优势与劣势一样明显,不但成本较高,且放电速度过快、内阻过低、不耐高温,可靠性还需要作进一步验证<sup>[4]</sup>。

## 2.3 接触式牵引供电

目前,大多数轨道交通采用接触式牵引供电,主要为柔性接触网(高铁或城市轨道交通露天地段)、刚性接触网(隧道内)及接触轨(第三轨)供电。这 3 种供电模式目前应用广泛,成熟度高,可靠性强。但由于悬挂式单轨列车转向架位于箱梁内,受限于箱梁内空间及结构,无论柔性还是刚性接触网的结构空间需求都无法被满足,而接触轨形式的供电方式最为合适<sup>[5]</sup>。

对于相同的线路工程,接触轨和电池供电的供电方式所需要配备的供电设备设施上是有差异的。就本线而言,相比于蓄电池供电方式,接触轨供电系统需要增设的供电相关设备设施主要有正线牵引变电所、全线接触轨以及部分环网电缆等。

而蓄电池供电方式下,列车需要增设蓄电池及机械和电气安装设施;车辆段需要增设电池充电设施、电池换装库,以及相应地延长线路长度和增设

道岔组数;结合蓄电池充放电周期和行车开行需求,远期全线需增加列车备用数。

由于蓄电池及充电设施的寿命(约 5 年)相对于牵引变电所等设备设施的寿命(约 30 年)要短,在相同运营年限情况下,蓄电池供电方式相关设备设施的更换频次高,投资逐渐加大,其总投资与初期接触轨供电方式的投资基本相当。另外,蓄电池本身的特性决定了其充电效率比接触轨供电方式的供电效率低,蓄电池供电方式的日常耗电量也相对大些。因此,考虑运营过程中的耗能和工程总投资,两种供电方式相差不大。

在运营可靠度和安全方面,悬挂式单轨列车的转向架运行于箱型轨道梁内,空间相对密闭,炎热季节箱梁内温度较高,这对于散热量较大的蓄电池而言是不利的;针对基本无减振措施的电池小车而言,其振动和噪音易于被箱型轨道梁放大,从而影响乘客乘坐舒适性。

综上所述,从技术经济角度分析可知,经投资、可靠性及乘客舒适性角度等方面对比,采用直流牵引供电+锂电池备用供电的方式为列车供电,可以保障列车运行的可靠性<sup>[6]</sup>。

## 3 牵引供电系统方案

本项目设计的牵引供电系统包含了变配电系统方案和接触轨系统方案,其中变配电系统方案包含牵引变电所和配电系统。牵引变电所在线路上的设置位置、数量和容量,应根据线路资料、车辆选型与列车编组、行车组织、牵引网构成等条件,通过牵引供电计算,并经多方案比选后确定。

### 3.1 变配电方案

悬挂式单轨交通中压供电网络的电压等级采用 10 kV(若外部条件具备,可采用 35 kV),外部电源的供电方案(采用集中式供电、分散式供电或混合式供电)可根据线路外部环境、用途、外电网状况及工程概算等进行设计。直流牵引供电系统电压等级宜为 750 V 或 1 500 V,其波动范围为 500~900 V 或 1 000~1 800 V,具体需要根据实际情况进行技术经济方案比选。

基于开封市悬挂式单轨交通示范段的线路工程特点和外电条件,以及集中供电方式具有供电可靠性高、有专用供电回路、供电质量高的特点,再加上箱式变电所整体尺寸较小,与周围的景观结合较好,占用土地面积较少,比土建变电所可减少约

50%以上的土地占用,且其所有设备可以在工厂里一次安装、调试合格,现场安装仅需进行箱体定位、箱体间电缆联络、出线电缆连接、保护定值校验等,可实现工厂化生产、缩短施工周期,因此本项目采用了集中式供电方案。该方案建立箱式变电所,从城市公共电网取得 2 路 10 kV 电源进线,并用 10 kV 环网电缆将全线进行贯通,通过箱式降压所为接触轨系统提供 750 V 直流供电。考虑到工程造价且是试验线路故而只采用了单环网。根据变配电方案,为确保接触轨系统的冗余设计,同一供电臂由 2 个相邻牵引变电所构成双边供电方式;当 1 座牵引变电所退出运行时,其对应供电分区的接触轨应由相邻牵引变电所通过直流母线或纵向联络开关等方式越区供电,实现大双边供电。

### 3.2 接触轨系统方案

接触轨系统由两部分组成,分别为正极供电网和负极回流网。正极供电网由接触轨、弯头、连接板、膨胀接头、绝缘子支撑件、电缆等组成;负极回流网由回流轨、有关电气设备及回流电缆等组成。

由于悬挂式单轨列车采用的是胶轮,结合本项目箱梁的空间结构、电压等级以及胶轮车辆的结构特点,接触轨的结构布置方式及接触方式对整个供电系统的安全可靠至关重要。本项目采用接触轨正极供电电流轨和负极回流轨同侧安装的结构形式,以及车辆受流器正负极滑块接触正负极接触轨侧面的侧接触受流方式。

#### 3.2.1 接触轨的组成

接触轨零部件主要由钢铝复合接触轨、中间接头、中心锚结、电连接、膨胀接头、端部弯头和绝缘底座等构成。各部件作用如下:

- 1) 钢铝复合接触轨:提供滑触面以传导电能。
- 2) 中间接头:作为固定连接件连接两个接触轨,并贯通牵引电流。
- 3) 中心锚结:为防止接触轨因热胀冷缩而产生横向窜动,安装在绝缘支座两侧。
- 4) 电连接:连接接触轨与上网电缆,向钢铝复合接触轨提供电能。
- 5) 膨胀接头:补偿接触轨因环境温度变化导致热胀冷缩而产生的长度变化,并保证电流续接良好。
- 6) 端部弯头:用于在道岔、电分段等接触轨断开部位,确保集电靴在断开部位的平滑过渡。
- 7) 绝缘支撑件:固定、支撑接触轨及其附件,实现机械电气固定、电气绝缘。

#### 3.2.2 接触轨选择及安装结构形式

自 1978 年德国采用钢铝复合轨为轨道交通列车供电后,经过几十年的发展,钢铝复合材料已经成为接触轨广泛采用的材料。该材料具备强度高、导电性好、导热性好且耐磨损、耐腐蚀等特点,满足接触轨技术要求。

接触轨主要有 C 型钢铝复合轨、工字型钢铝复合轨、T 型汇流排+滑触线等型式。鉴于 C 型钢铝复合轨有效授流面宽,满足本工程受流靴安全取流要求且占空小,同时 C 型钢铝复合轨使用旋转式内卡固定,具备安装方便、定位准确、安装精度高等特点,本项目采用 C 型钢铝复合轨。将接触轨设计为“C”型,剖面图如图 1 所示。

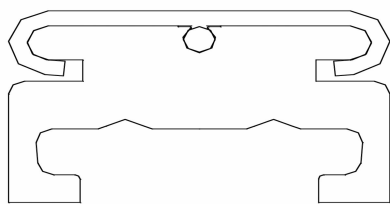


图 1 C 型钢铝复合接触轨剖面图

接触轨的授流方式为侧接触式。正负极接触轨在同侧设置,接触轨载流及授流部分由铝轨本体和不锈钢带组成。接触轨授流面距箱型梁纵向中心线距离、供电轨授流面中心与箱型梁走行轨垂直距离以及回流轨授流面中心与箱型梁走行轨垂直距离及供电轨与回流轨授流面中心距离,均根据车辆受电靴限界要求确定。其在箱梁上的结构安装形式<sup>[7-9]</sup>如图 2 所示。其中,正极接触轨的授流面中心线距承载轮面的距离为 785 mm(承载轮面方向为负误差),负极接触轨的授流面中心线距承载轮面的距离为 682.5 mm(承载轮面方向为负误差),正、负极接触轨的授流面距离箱梁安装面的距离为 110 mm。

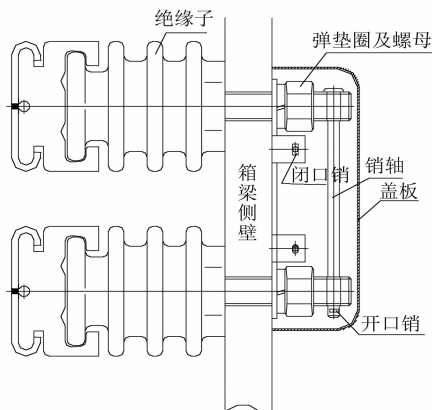


图 2 接触轨在箱梁上的结构安装形式

### 3.2.3 电分段设置

为提高接触轨系统供电的灵活性和安全性,在列车所出入线与正线连接处、具备牵引变电所车站的车辆惰行处、列车所内不同功能线路连接处设置电分段装置,以满足系统检修需要。

接触轨应按照不断轨或少断轨的原则进行设置,以满足密闭箱体免维护或少维护的要求。接触轨在箱型梁需旋转断开处、电分段处设置断轨,断轨处需安装接触轨端部弯头,机械断轨处需通过电缆将断轨进行电气连接。

### 3.3 锂电池备用方案

该方案采用锂离子电池作为悬挂式单轨列车的备用动力,设置直流断路器,当列车检测到直流供电接触轨断电后,由司机手动开启锂电池作为列车驱动动力。出于列车的空间及安全性,锂电池动力包不宜过大,具体容量建议以列车满载状态下可行驶 2 km 为宜。

## 4 结语

目前国内研究的悬挂式单轨交通的供电方式多种多样,国家及行业都未有明确的技术标准及规范。本项目借鉴多种供电方式形成的直流牵引供

电+锂电池备用的供电系统方案已应用于河南省开封市悬挂式单轨交通示范段,经过 2 万 km 的列车运行试验,该示范段供电质量稳定,接触轨系统运行平滑,证明了该方案的可靠性。

## 参考文献

- [1] 李芾,许文超,安琪.悬挂式单轨车的发展及其现状[J].机电传动,2014(2): 21.
- [2] 肖立君,向光海.悬挂式单轨交通供电系统经济性分析[J].中国科技纵横,2018(7): 146.
- [3] 钱良国,郝永超,肖亚玲.锂离子等新型动力蓄电池成组应用技术和设备研究最新进展[J].机械工程学报,2009(2): 8.
- [4] 陈怀鑫,王似玉.城市轨道交通车载混合储能装置新型控制方案及策略研究[J].电气化铁道,2018(1): 65.
- [5] 张茂帆,刘瑶,王孔明,等.悬挂式单轨列车辅助供电系统方案研究[J].铁道机车车辆,2016(2): 95.
- [6] 马沂文,白秀梅.城市轨道交通供电接触网类型的比较[J].城市轨道交通研究,2003(1): 20.
- [7] 徐小宁.钢铝复合接触轨在轨道交通中应用的技术探讨[J].市政技术,2009(增刊2): 112.
- [8] 邢甲第,吴文军.钢铝复合接触轨的典型结构及其制造工艺[J].城市轨道交通研究,2004(4): 71.
- [9] 李峰.直流 1 500 V 接触轨端部弯头的研究[J].城市轨道交通研究,2011(6): 83.

(收稿日期:2020-03-04)

(上接第 128 页)

## 6 结论

1) 当激励频率等于螺旋弹簧各阶垂向共振频率时,点刚度急剧下降,出现谷值;当激励频率高于各阶垂向共振频率后,传递刚度及点刚度急剧上升,出现峰值;随着激励频率的增加,动刚度的峰值、谷值交替出现,在总体上呈现波动上升的趋势。

2) 预压缩量及位移激励幅值的大小对弹簧的固有频率和动刚度特性没有十分显著的影响;提高材料的阻尼比可以显著降低垂向动刚度的峰值,减小波动范围。

3) 对于双卷并联弹簧组,并联整体受载与单个弹簧受载时的垂向传递特性具有相似的变化规律,且并联整体的垂向动刚度峰值较内、外圈弹簧单独受载时的放大倍数均有所降低。在中高频激励下,并联刚度公式同样适用。对于弹簧串联橡胶垫,可显著降低动刚度峰值放大倍数。在弹簧两端均串联橡胶垫可进一步减小动刚度的波动范围。可以

通过改变橡胶材料的阻尼来改变动刚度极值点对应的激励频率。

## 参考文献

- [1] 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].北京:科学出版社,2007.
- [2] 丁军君,李芾.螺旋钢弹簧刚度频变仿真及等效算法研究[J].内燃机车,2009(7): 8.
- [3] BRUNI S, VINOLAS J, BERG M, et al. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(7): 1021.
- [4] 刘丽,张卫华.金属弹簧刚度频变分析及等效算法[J].交通运输工程学报,2007(5): 25.
- [5] 王时龙,雷松,周杰,等.两端并圈多股弹簧的冲击响应研究[J].振动与冲击,2011(3): 64.
- [6] 孙文静,宫岛,周劲松,等.一系螺旋弹簧动刚度对车辆-轨道耦合振动影响分析[J].振动与冲击,2015(5): 49.
- [7] 尹太国,李伟,张鹏,等.地铁车辆一系钢簧中高频动态特性分析[J].机械,2019(6): 1.

(收稿日期:2020-03-09)