

陕西黄帝陵跨坐式单轨观光线牵引供电系统设计

张明锐<sup>1</sup> 张海龙<sup>1</sup> 曾国锋<sup>2</sup> 王国强<sup>2</sup>

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海;  
2. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海//第一作者, 教授)

**摘 要** 为缓解黄陵县交通压力,提高黄帝陵景区游客疏散能力,拟沿黄帝陵前沮河走向建设一条跨坐式单轨观光线。通过对黄帝陵观光线牵引供电系统的触网电压、牵引变容量、短路电流等关键参数的仿真计算,结合黄帝陵观光线的工程特点,对外部电源的供电方式、牵引变电所的设置数量及位置、接触轨、电力监控(SCADA)系统等的方案进行了综合比较,选定了适用于黄帝陵观光线的供电系统初步方案,为观光线牵引供电系统设计提供了依据。

**关键词** 黄帝陵观光线;跨座式单轨;牵引供电系统

**中图分类号** U232.8

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2019.03.029

Design of the Traction Power Supply System for the Sightseeing Straddle Monorail of Huangdi Mausoleum in Shaanxi Province

ZHANG Mingrui, ZHANG Hailong, ZENG Guofeng, WANG Guoqiang

**Abstract** In order to alleviate the traffic pressure of Huangling County in Shaanxi Province and improve the tourist evacuation capacity in Huangdi Mausoleum Scenic Area, a sightseeing straddle type monorail along the Ju River in front of the Huangdi Mausoleum is planned. Through simulation of key parameters of the traction power system, including the contact voltage, capacity of traction substation and short-circuit current, and combined with the engineering characteristics of the Huangdi Mausoleum sightseeing line, various schemes including the external power supply, the number and position of traction substation, contact rail, SCADA system and so on are comprehensively compared, a preliminary power supply scheme suitable for Huangdi Mausoleum is selected, which provides a good reference for the engineering design of traction power supply system for sightseeing lines.

**Key words** sightseeing line of Huangdi Mausoleum; straddle monorail; traction power supply system

**First-author's address** College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China

0 引言

国内景区多采用电瓶车、无轨电车、公交车来疏运游客,这些交通方式运量小、安全性较低。为保障游客安全,提升景区交通运输能力,解决旅游旺季游客出入难的问题,国内已有西安曲江、北京双龙峡、深圳欢乐谷等多个景区建设了观光火车。

根据陕西黄帝陵观光项目需要,配套建设一套观光火车交通系统。各种用于景区观光的交通制式比较见表1<sup>[1-3]</sup>。陕西黄帝陵观光项目选择了跨坐式单轨交通,其特点主要表现为:①适宜山区小转弯半径、坡度大的特殊环境;②维护简单、对景观影响小;③独立于地面交通,安全性较高。该系统主要用于游客集散中心至黄帝陵景区的短途接驳;在旅游淡季,兼备县内交通运输的功能。一方面解决了景区的交通疏散问题,同时提升了县域的交通能力。

表1 各种用于景区观光的交通制式比较表

比较指标	轻轨	公交车	齿轨铁路	电动观光车	跨坐式单轨
爬坡性能	低	中	高	较低	较高
转弯半径	大	小	较小	小	中
成本	高	较低	较高	低	较高
安全性	较高	较低	较高	低	高
景观影响性	大	较小	大	小	小

1 黄帝陵观光线线路概况

黄帝陵观光线(见图1)全长10.6 km,其中并线段为4.9 km。为了不影响黄陵县交通,全线采用高架,沿沮河走行。全线设置黄帝陵和游客中心2座车站以及1个控制维修中心(位于黄帝陵车站)。

2 黄帝陵观光线供电系统方案

2.1 外部电源供电方式



图1 黄帝陵观光线工程线路图

方案一:采用集中式供电,引入两路 10 kV 电源。中压网络采用 10 kV 电缆全线贯通,中间采用环网联络开关,当一路电源退出运行时,由另一路电源支援供电。其优点是外界干扰少、供电能力强,能满足大容量用电的需求。其缺点是占地面积大、工程总投资较高、技术经济性较差。

方案二:采用分散式供电,每一个牵引变电所引入一路 10 kV 电源。中压网络采用环网联络开

关,一路电源退出运行时,相邻电源支援供电。其优点是无需建设主变电所,牵降变电所的电源全部由电业部门提供。其缺点是电源引入较多,协调及电源建设不确定因素较多。

集中式供电受外界干扰小、可靠性较高,因此黄帝陵观光线外部电源采用集中式供电方案,由游客中心站和黄帝陵站引入两路 10 kV 电源,中压网络采用单环网接线方式,如图 2 所示。

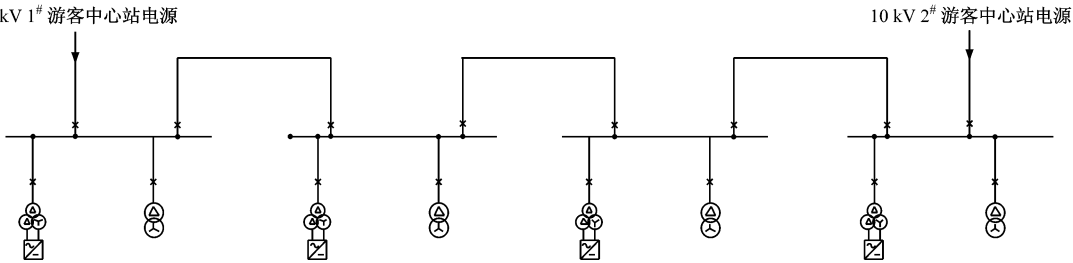


图2 黄帝陵观光线外部电源供电方案

2.2 车辆选型

设计初期,为了缩短发车间隔,工程线路采用环线,线路两头设计为圆形“灯泡线”。正常情况下,列车无需入库,只有在检修时才进入车库,能够大大缩短发车间隔。虽然“灯泡线”的设计避免了入库影响列车发车间隔的问题,但随之而来的是小转弯半径问题(两端“灯泡线”的曲线半径为 35 m),因此,在车辆选型时需选用能在转弯半径较小

的线路上运行的车辆。

黄帝陵地区的游客数量呈现季节性变化,清明、国庆、春节节假日期间游客较为集中。根据黄陵县政府网站发布的游客数据显示,2015 年“十一”黄金周黄帝陵景区共接待海内外游客 113 648 人,仅国庆节当天景区就接待游客 9 594 人。因此在车辆选型时,还需考虑其运量是否能够满足旅游旺季的交通需求。选用车辆参数如表 2 所示。

表 2 车辆参数

列车自重/t	供电制式	功率/kW	最小转弯半径/m	定员/人	车辆编组	运行速度/(km/h)	列车长度/m
20	DC 630 V	220	25	58	1 动 3 拖	30	23.35

列车行车组织如表 3 所示。由表 3 可见,车辆适用线路的最小转弯半径符合黄帝陵工程参数要求。当发车间隔为 3 min、列车数量为 12 列时,全天运量为 10 080 人,能够满足节假日客流高峰期的运

能需求。

2.3 接触轨选型

黄帝陵观光线供电制式为 DC 630 V,若采用接触网供电,会大大影响黄帝陵景区的景观。为了降

表 3 黄帝陵观光光线列车行车组织

方案 编号	列车运行 间隔	列车数 量/列	运输能力/ (人/h)	全天运量/人 (08:00—17:00)
1	5 min	7	672	6 048
2	3 min 45 s	9	896	8 046
3	3 min	12	1 120	10 080

低对景区沿线景观的影响,选择了接触轨供电方式。接触轨材料的电阻直接影响着全线接触轨电压降,其耐流值决定着同一区间内可同时启动的最大列车数。因此,接触轨的选型需和牵引变的数量、发车间隔等因素同时考虑。表 4 为不同类型的接触轨参数。

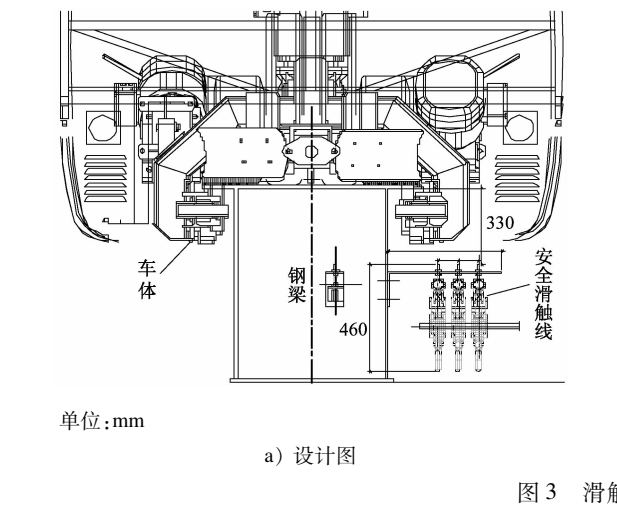


表 4 接触轨参数

类型	C 型轨	工字轨	安全滑触线
耐流值/A	>3 000	>3 000	1 000
电阻/(Ω/km)	<0.011 23	<0.008 50	0.051 00
总截面/mm <sup>2</sup>	≥3 250	≥4 236	631

从表 4 中可看出,C 型轨和工字轨都具有较高的耐流值和较低的电阻,但是它们都存在成本较高、截面积大、可弯曲程度小、不适宜小转弯半径线路、需要单独安装安全防护罩等问题。故在设计时选用了延展性好、无需安装安全防护罩的钢铝复合安全滑触线。安全滑触线安装示意图如图 3 所示。



图 3 滑触线安装示意图

2.4 牵引变电所位置及容量

黄帝陵观光光线参考了地铁建设的经验,采用 DC 1 500 V 供电时,牵引变电所的间距一般设置为 3~4 km;采用 DC 750 V 供电时,牵引变电所间距一般设置为 1~2 km<sup>[5]</sup>。考虑到黄帝陵观光光线供电采用的是 DC 630 V,因此牵引变电所间距设置应与采用 DC 750 V 供电时的相当,以保证列车的正常起动。

方案一:全线设置 3 个牵引变电所,每隔约 1.35 km 设置 1 个牵引变电所,黄帝陵站和游客中心站不设牵引变电所。选取型号为 081319 的安全滑触线,进行牵引供电仿真计算,计算结果如表 5、表 6 所示。

方案一电压降基本能够满足 GB 50157—2013《地铁设计规范》的要求,较为理想。经实地考察,游客中心站设有车辆维修库,且后期需和黄帝陵站同时建设商业中心,需要设置牵引降压混合变电站;如果直接在站点增加 2 个牵引降压混合变电站,将会使全线供电系统成本增加 10%~20%。

表 5 方案一牵引供电仿真计算(正常供电)

供电距离/m	单边供电		双边供电	
	电压降/V	电压降比/%	电压降/V	电压降比/%
1 350	32.359 5	5.14		
1 350	32.359 5	5.14	8.089 875	1.28
1 350	32.359 5	5.14	8.089 875	1.28
1 350	32.359 5	5.14		

表 6 方案一牵引供电仿真计算(任一牵引变电所解列)

供电距离/m	单边供电		双边供电		解列牵引变电所标号
	电压降/V	电压降比/%	电压降/V	电压降比/%	
2 700	101.898	16.17			1 <sup>#</sup>
2 700			25.474 5	4.04	2 <sup>#</sup>
2 700	101.898	16.17			3 <sup>#</sup>

方案二:全线设置 4 个牵引降压混合变电所(见图 1 中 4 个白色实心圆点),在黄帝陵站和游客中心站各设 1 个,另外 2 个等间距设置在线路中。牵引供电仿真计算结果如表 7、表 8 所示。

表 7 方案二牵引供电仿真计算(正常供电)

供电距离/m	单边供电		双边供电	
	电压降/V	电压降比/%	电压降/V	电压降比/%
1 677	51.795 151 2	8.22	12.948 787 8	2.06
1 413	37.069 207 2	5.88	9.267 301 8	1.47
2 015	57.548 400 0	9.13	14.387 100 0	2.28

表 8 方案二牵引供电仿真计算(任一牵引变电所解列)

供电距离/m	双边供电		解列牵引变电所标号
	电压降/V	电压降比/%	
3 120	36.597 600 0	5.81	2 <sup>#</sup>
3 428	38.217 400 8	6.07	3 <sup>#</sup>

注:端头 1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>牵引变电所解列时,分别与表 6 中供电距离 1 677 m 和 2 015 m 对应的单边供电电压降相同

参照 GB 50157—2013《地铁设计规范》对于触网电压波动的要求,采用 DC 630 V 供电时,任一点触网电压应不低于 DC 419 V。从表 7、表 8 的数据来看,方案二能够较好地满足要求。按照黄帝陵观光线路的需求,两个站点空间较大,用电也较大,可设置牵引降压混合变电所。沿途为河道,可利用的空间较小,可设置 2 个箱式变电站。根据车辆参数、列车编组、发车间隔、供电轨、牵引变电所间距等参数,在笔者开发的 PSSC 2016 V 1.0. Net 软件中进行仿真计算,结果如图 4 所示。依据仿真计算结果,选定了牵引变电所的容量(见表 9)。

2.5 电力监控系统

由于黄帝陵观光线牵引变电所距车站较远,手



图 4 仿真计算软件计算结果图

表 9 牵引变电所容量

牵引变电所 编号	牵引变电所 位置	牵引变电所 容量/(kVA)	自用变电所 容量/(kVA)
1	K 0 + 300	1 250	315
2	K 2 + 007	1 000	100
3	K 3 + 420	1 000	100
4	K 5 + 435	1 250	315

动分合闸操作不便,所以需设置电力监控(SCADA)系统。黄帝陵观光线属于观光旅游线路,对于 SCADA 系统要求较为简单,具备遥控、遥测、遥信的功能即可。SCADA 系统由服务器、智能

测量仪表、保护装置、操作软件等组成,系统结构图如图 5 所示。

2.6 短路计算

直流侧稳态短路计算是牵引供电系统设计中必不可少的环节,是确定直流保护整定值等参数的重要依据,对观光线 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>牵引变电所进行直流侧稳态短路计算。取一次侧短路容量为 150 MVA,双边供电仿真结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,短路电流随着距离的增大而减小。牵引变电所提供的最大短路电流值为 15.588 kA,该值出现在变电所端口附近;最小短路

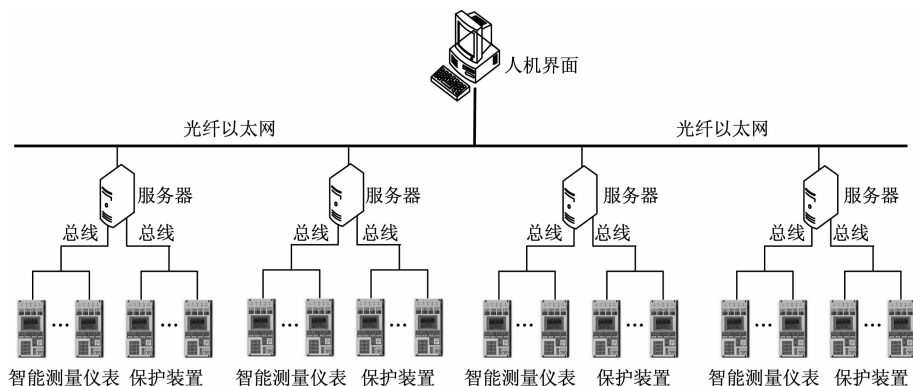


图5 SCADA系统结构图

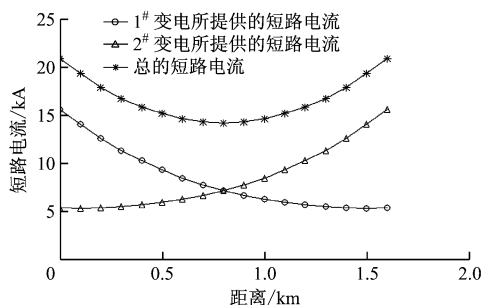


图6 牵引变电所直流侧稳态短路仿真计算结果

电流值出现在相邻变电所附近,为5.312 kA。

### 3 结语

利用笔者开发的 PSSC 2016 V 1.0. Net 软件,对黄帝陵观光线的牵引供电系统的关键参数进行了仿真计算。依据仿真结果及工程特点,提出了合

(上接第74页)

全天候运营的要求,对运行计划和运输秩序要求极高,且随着客运专线里程的迅猛增长,少维修乃至免维修日益成为铁路养护维修部门的迫切需要,因此铁路桥梁的设计长期以来采取了相对较高的标准。通过与城市轨道交通桥梁设计标准进行对比,并结合桥梁长期使用性能的监测结果,发现铁路桥梁部分刚度控制标准仍存在优化空间,今后应加强这一方面的研究。

### 参考文献

- [1] 智研咨询集团. 2016—2022 年中国城市公交行业发展态势及

理的方案,完成了黄帝陵观光线牵引供电系统各部分的初步设计。对于今后国内景区观光线供电系统的设计有较好的借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 陈厚文. 山地森林景区旅游观光轨道交通发展研究[J]. 交通科技, 2013(1): 72.  
 [2] 负虎. 观光列车的分类与特点[J]. 铁道车辆, 2015(8): 38.  
 [3] 冯帅. 对齿轨铁路在旅游观光铁路上的适用性分析[J]. 交通企业管理, 2015(1): 66.  
 [4] 戴建龙. 环长白山旅游产业开行观光小火车可行性及主要技术特征探讨[J]. 铁道建筑技术, 2013(1): 1.  
 [5] 王会丰, 江志忠. 城市轨道交通牵引供电制式的比较与选择[J]. 铁道经济研究, 2014(2): 43.

(收稿日期: 2018-05-20)

投资战略咨询报告[R]. 北京: 智研咨询集团, 2016.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市轨道交通桥梁设计规范: GB/T 51234—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
 [3] 中华人民共和国铁道部. 新建时速 200~250 公里客运专线铁路设计暂行规定: 铁建设[2005]140 号[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.  
 [4] 魏亚辉, 徐鹤寿, 牛斌. 梁端无砟轨道扣件力学行为室内试验研究和数值仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(6): 43.

(收稿日期: 2018-01-29)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: [tougao. umt1998. com](http://tougao. umt1998. com)