

# 黄帝陵观光小火车供电系统设计

张明锐<sup>1</sup> 吴严严<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** 对黄帝陵观光小火车供电系统的外部电源以及中压网络、直流牵引供电系统、低压配电系统和防雷接地系统等部分的设计进行了探讨; 对方案设计中出现的技术问题及相应的解决办法进行了总结, 为国内景区观光线的供电系统设计提供了参考。

**关键词** 黄帝陵观光线; 供电系统; 设计方案

**中图分类号** U239.88

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.01.008

## Design of the Power Supply System for the Sightseeing Tourist Train of Huangdi Mausoleum

ZHANG Mingrui, WU Yanyan, ZENG Guofeng, WANG Guoqiang

**Abstract** The design scheme of power supply system for the sightseeing tourist train of Huangdi Mausoleum is discussed, including the external power supply, medium voltage network, traction power supply system, low-voltage distribution system, lightning protection and grounding system. The technical problems in the implementation of the program and the corresponding solutions are summarized, providing a reference in the engineering design of power supply system for the sightseeing lines in domestic scenic spots.

**Key words** Huangdi Mausoleum sightseeing line; power supply system; design proposal

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

目前, 陕西省黄陵县黄帝陵景区的公交运输能力已不能满足需求, 为此, 相关管理部门决定建设 1 套观光小火车交通系统(以下简为“观光线”), 以提供轻便快捷的客运服务, 又能为游客提供一个舒适的观光平台<sup>[1]</sup>。由于跨坐式单轨的造价和运营费用低、对环境影响小, 其维护简单, 且能适应小半径曲线、大坡度的特殊环境<sup>[2]</sup>, 故观光线选择了跨坐式单轨型式。考虑到系统的供电安全性和黄帝陵

景区的美观性要求, 跨坐式单轨系统采用接触轨供电方式。本文结合黄帝陵的线路工程特点, 参考地铁和有轨电车的设计经验, 对观光线供电系统的设计方案进行总结。

## 1 线路概况

黄帝陵观光线沿沮河在河道中行走。线路两端为灯泡线, 单线全长 10.8 km(见图 1)。其中, 并线段(即双线上下运行段)长约 5.0 km。线路设车站 2 座(即起点的游客中心站和终点的黄帝陵站), 维修基地 1 座(位于游客中心站), 并将控制中心与维修基地合建。基地内设 3 股轨道, 可同时停放 3 列车。正线最小曲线半径为 35 m, 不设缓和曲线, 线路最大纵坡不超过 40%, 最小竖曲线半径为 200 m, 列车最高行驶速度为 35 km/h。

## 2 外部电源及中压网络设计

### 2.1 外部电源方案

由于集中式供电与外界接口少, 供电能力强, 能满足大容量用电的需求。故本工程采用集中式供电方式。考虑到牵引负荷的重要性及供电的安全性, 外部电源拟采用 2 路独立的 10 kV 电源进线, 分别引至游客中心站和黄帝陵站, 用 10 kV 环网电缆将全线贯通, 中间利用环网联络开关分段。当 1 路电源退出运行时, 其环网联络开关闭合, 由另 1 路电源支援供电。

但受黄陵县的电源条件限制, 仅游客中心站具备电源引入条件。因此, 只在游客中心站引入 1 路 10 kV 电源, 并在黄帝陵站预留电源引入接口, 以待后期电源条件具备时引入第 2 路电源。

### 2.2 中压网络

对于 10 kV 中压环网, 通常有单环网或双环网两种结构。由于观光线供电系统的结构较为简单, 可靠性要求也远低于其他城市轨道交通, 故中压网络采用接线简单、投资成本较低的单环网。供电系



图 1 黄帝陵小火车工程线路图

统如图 2 所示。

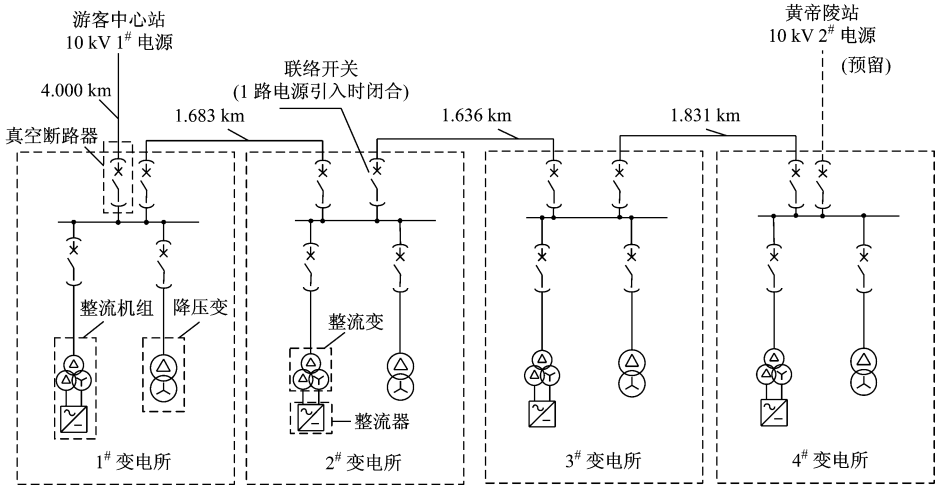


图 2 黄帝陵观光线供电系统简图

2.3 线路电压降计算

黄帝陵观光线工程的 10 kV 环网电缆选用 FZ-ZR-YJV<sub>22</sub>-10-3×400,其单位电阻及单位电抗分别为  $r=0.047\ \Omega/\text{km}$ , $x=0.085\ 2\ \Omega/\text{km}$ 。各区段电缆长度见图 2。

线路电压降由该段线路上的变电所容量及电缆阻抗共同决定：

$$\Delta u = \frac{PR + QX}{U}$$

(1)

式中：

- $\Delta u$ ——线路电压降；
  - $U$ ——线路额定电压；
  - $P$ ——线路输送的有功功率；
  - $Q$ ——线路输送的无功功率；
  - $R$ ——线路电阻；
  - $X$ ——线路电抗。
- 变电所容量  $S$  (牵引变电所与自用变电所容量

之和)为:1#、4#变电所均为 1 565 kVA,2#、3#变电所均为 1 100 kVA。

取功率因数  $\cos\varphi=0.85$ , $P=S\cos\varphi$ , $Q=S\sin\varphi$ 。则可得线路电压降：

$$\Delta u = \Delta u_1 + \Delta u_2 + \Delta u_3 + \Delta u_4 = 132\ \text{V}$$

(2)

根据 GB/T 12325《电能质量 供电电压允许偏差》,10 kV 及以下三相供电的用户受电端供电电压允许偏差为额定电压的  $\pm 7\%$ 。由式(2)计算结果可知,在初期 1 路电源供电时,10 kV 线路电压降可以满足要求。

3 直流牵引供电系统设计

3.1 接触轨选型

接触轨的常用类型有 C 型轨、工字轨和安全滑触线三种。安全滑触线成本相对较低,延展性好,适宜小半径线路,且不需要单独安装安全防护罩。安全滑触线主要材质有低碳钢和钢铝复合材料。

其中,钢铝复合材料重量轻、便于安装,单位电阻低,电能损耗小,维护工作量小,运营成本低<sup>[3]</sup>。所以观光线选择钢铝复合的安全滑触线。安全滑触线的安装如图 3 所示。

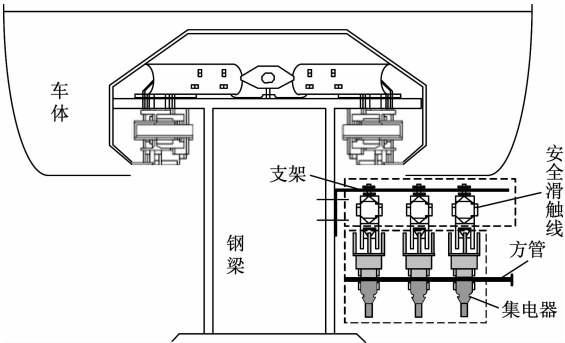


图 3 安全滑触线安装示意图

3.2 牵引变电所位置及容量

根据地铁和有轨电车建设的相关经验,对于 DC 750 V 供电系统,变电所间距宜设置为 1.5 ~ 2.0 km<sup>[4]</sup>。由于本观光线所用车辆传动系统的额定电压为 DC 630 V,直流牵引供电系统的牵引电压也为 DC 630 V,故变电所间距需更小。

线路从起点(游客中心站)至终点(黄帝陵站)的单程长度约 5 km,应设置 4 个牵引降压混合变电所。由于沿途为河道,可利用空间小,因而 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>变电所设置为箱式变电所。变电所位置见表 1。

表 1 变电所位置				
项目	1 <sup>#</sup> 变电所	2 <sup>#</sup> 变电所	3 <sup>#</sup> 变电所	4 <sup>#</sup> 变电所
变电所名称	游客中心站	箱式变电所 1	箱式变电所 2	黄帝陵站
里程标	K10 + 601	K8 + 918	K7 + 282	K5 + 577

通过对接触轨电压波动的仿真计算来验证变电所的分布是否合理。当正常双边供电时,仿真计算结果如表 2 所示。

表 2 牵引供电计算(正常供电时)						
供电距离/m	近期,5 min 发车间隔			远期,2.31 min 发车间隔		
	电压降/V	最低网压/V	压降百分比/%	电压降/V	最低网压/V	压降百分比/%
1 683	9.3	683.7	1.47	17.6	675.4	2.80
1 636	9.0	684.0	1.43	17.2	675.8	2.73
1 831	10.1	682.9	1.61	19.2	673.8	3.05

当任一牵引变电所解列时,计算结果如表 3 所示。

表 3 牵引供电计算(1 个牵引变电所解列时)

解列牵引变电所编号	近期,5 min 发车间隔			远期,2.31 min 发车间隔		
	电压降/V	最低网压/V	压降百分比/%	电压降/V	最低网压/V	压降百分比/%
1 <sup>#</sup>	40.6	652.4	6.44	70.6	622.4	11.21
2 <sup>#</sup>	34.8	658.2	5.52	68.2	624.8	10.89
3 <sup>#</sup>	36.4	656.6	5.77	68.6	624.4	10.89
4 <sup>#</sup>	44.2	648.8	7.01	76.8	616.2	12.19

观光线车辆对供电电压的要求较高,为 DC 630 V × (1 ± 10%),即要求任一点接触轨电压为 567 ~ 693 V。由表 3 ~ 4 可知:正常供电时,牵引电压满足要求;当任意 1 个牵引变电所解列时,直流压降明显加大,按照远期发车间隔运行时,压降已经超过 10%。抬高牵引变电所馈出电压可以补偿部分接触轨电压降,但当车辆制动时,又有过电压的问题。因此,在任意 1 个变电所故障情况下,建议适当加大列车行车间隔。

根据列车编组、发车间隔、供电轨参数及牵引变电所间距等参数,利用 PSSC2016V1.0. Net 软件,对牵引变电所峰值功率进行仿真计算。依据计算结果,并考虑一定的裕量,线路两端的 1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>牵引变电所容量取 1 250 kVA,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>牵引变电所容量取 1 000 kVA。

3.3 安全滑触线分段

观光线全线设置 4 个变电所。每个变电所出口处的安全滑触线设置电分段,以保证供电的可靠性和灵活性。正常运行时,正线区段采用双边供电。对于维修基地区域,其单开道岔与灯泡线的交界处、单开道岔、三开道岔及股道之间也设置了电分段,由 1<sup>#</sup>变电所供电。全线的电分段如图 4 所示。

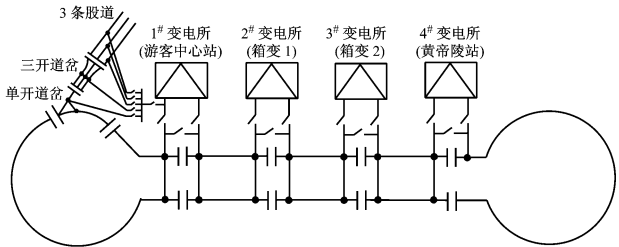


图 4 安全滑触线分段图

4 低压配电系统容量选取

观光线的低压负荷由变电所的 10 kV/0.4 kV 降压变电所供给 380/220 V 电源。按照观光线的运营和检修需要,配置了不同容量的低压负荷<sup>[5-6]</sup>。

为保证功率因数,在低压母线上,集中配置电容补偿装置。以 1<sup>#</sup>变电所为例,配电系统配置有 125 kVar 的电容补偿柜,其他负荷功率见表 4。

表 4 变电所负荷功率需求

负荷	所需功率/ kW	负荷	所需功率/ kW
单开道岔电源	5	线路检修电源 1	20
三开道岔电源	5	线路检修电源 2	20
车站照明	10	车辆基地检修电源	30
车站电梯	22	交流屏	15
车辆基地信号	25	车辆基地照明	38
车辆基地葫芦吊	13	空调	20
车辆基地空调	22	游客服务中心 站检修电源	20
车站信号	5		

根据线路工程特点,引入需要系数  $K_d=0.8$ ,同时系数  $K_p=0.95$ 、 $K_Q=0.97$ 。经计算可得,配电变电所的安装容量为 256 kVA。参照 10 kV 级的配电变标准容量,在满足变压器容量大于负荷计算容量的条件下,1<sup>#</sup>配电变电所容量选取 315 kVA。

同理可得,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>变电所的配电变电所容量选为 100 kVA,4<sup>#</sup>变电所的配电变电所容量选为 315 kVA。

5 防雷与接地系统设计

对于 10 kV 交流系统,观光线变电所在进线侧安装避雷器;对于直流系统,在正、负极母线及正、负极间安装避雷器;对于低压配电系统,在 0.4 kV 交流母线侧安装避雷器。

变电所采用综合接地系统。设备接地、防雷接地和电力监控系统接地共用接地装置。从而形成综合接地网,接地电阻不大于 1 Ω。在变电所基础上设置接地母排,变电所内各种接地均从该母排引接。变电所四周设置室外接地网,通过扁钢与室内接地母排连接。安全滑触线接地线与线路轨道梁的综合接地网连接。变电所综合接地网如图 5 所示。

图 5 中,垂直接地极采用 10 根直径 50 mm、长 2.5 m 的铜管布置在变电所周围(距变电所外墙不小于 1.5 m)。室外水平接地极采用 50 mm×5 mm 的铜带将这 10 根铜管串接起来。水平接地体采用 50 mm×5 mm 的热镀锌扁钢。三者组成复合接地

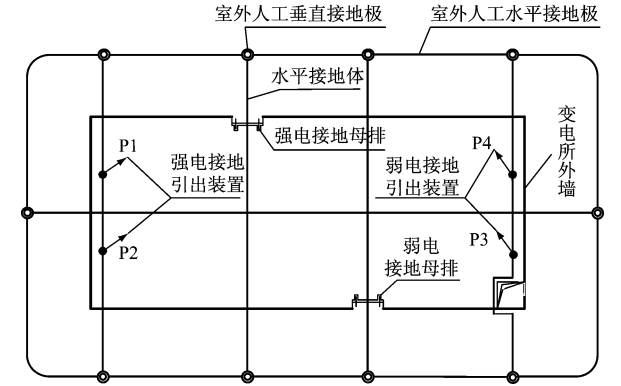


图 5 综合接地平面图

极,其顶端埋深 0.7 m。复合接地极的接地电阻计算式为:

$$R \approx \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{l}$$
 (3)

或者

$$R \approx 0.5 \frac{\rho}{\sqrt{A}} = 0.28 \frac{\rho}{r}$$
 (4)

式中:

- $R$ ——复合接地极电阻值,Ω;
- $\rho$ ——土壤电阻率,Ωm;
- $r$ ——面积为  $A$  的圆半径,m;
- $l$ ——接地网中水平、垂直导体的总长度,m;
- $A$ ——大于 100 m<sup>2</sup> 的、以水平接地极为主且边缘闭合的接地网面积,m<sup>2</sup>。

黄陵县绝大部分被黄土覆盖,是黄土地貌发育最典型的地区之一。其土壤电阻率  $\rho$  参考值见表 5。

表 5 黄土土壤电阻率参照表

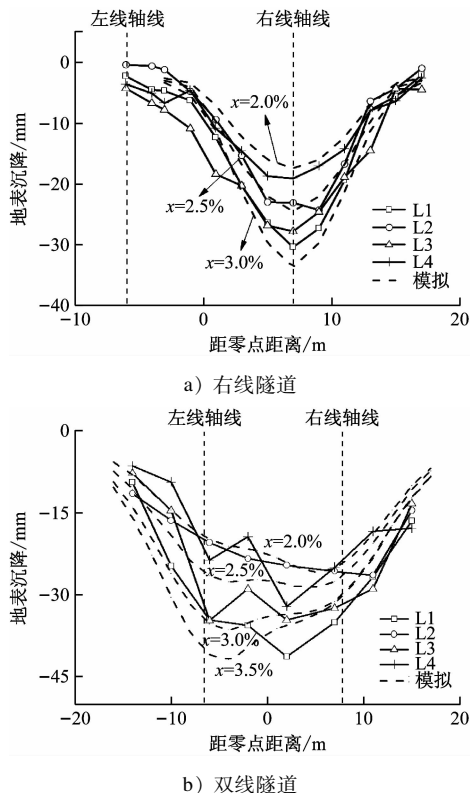
土壤条件	$\rho/(\Omega\text{m})$
较湿时	100 ~ 200
较干时	250
地下水含盐碱时	30
一般条件时	约 200

观光线中: $A \approx 260 \text{ m}^2$ , $r \approx 9.2 \text{ m}$ , $l \approx 140 \text{ m}$ 。当取  $\rho=200 \text{ Ωm}$  时,求得接地电阻  $R=6.087 \text{ Ω}$ ;当取  $\rho=30 \text{ Ωm}$  时, $R=0.913 \text{ Ω}$ 。当  $\rho$  过大,接地要求不满足时,可采用导电剂降低土壤电阻率。

6 结语

本文总结了黄帝陵观光线供电系统的设计方案,并通过对关键参数的计算验证了方案的可行性  
(下转第 43 页)

越时发生的地层损失略小于右线隧道,考虑左、右线施工时又具有一定的相似性,左线的体积损失率应该在 2.4% 左右。



注:  $x$  为体积损失率

图7 隧道断面沉降槽实测与模拟结果

## 4 结论

本文以广州地铁9号线4标段马莲盾构隧道施工为工程背景,通过数值计算分析了隧道施工过程中单线开挖和双线开挖地面沉降规律,研究了体积

损失率对近距离平行盾构隧道施工引起地面沉降的影响,并通过现场监测数据验证了数值计算的准确性。

## 参考文献

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//State of the Art Reports. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: SMFE, 1969:225.
- [2] 马可栓. 盾构施工引起地基移动与近邻建筑保护研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2008.
- [3] 陈春来, 赵城丽, 魏纲, 等. 基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J]. 岩土力学, 2014, 35(8):2212.
- [4] 邱明明, 杨果林, 吴镇清, 等. 双孔平行地铁隧道盾构施工地表沉降分布规律研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2):96.
- [5] 胡斌, 刘永林, 唐辉明, 等. 武汉地铁虎泉一名都区间隧道开挖引起的地表沉降研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5):908.
- [6] 谷拴成, 李敏. 西安地铁盾构施工地表沉降随机介质预测研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(3):110.
- [7] 王立忠, 吕学金. 复变函数分析盾构隧道施工引起的地基变形[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3):319.
- [8] 苏锋, 陈福全, 施有志. 深埋双隧洞开挖的解析延拓法求解[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2):365.
- [9] 糜瑞杰, 杨双锁, 鲍飞翔, 等. 双线盾构隧道断面及相对空间位置对地表沉降的影响[J]. 太原理工大学学报, 2018, 49(3):438.
- [10] 黄文君, 郑明新, 欧阳林, 等. 盾构施工工艺对铁路路基沉降影响的数值分析[J]. 隧道建设, 2015, 35(2):128.
- [11] 詹涛. 双线盾构隧道小净距下穿时既有隧道结构的变形数值分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015(11):23.
- [12] 潘宇平, 倪静, 李林, 等. 基于 LIB-SVM 的盾构隧道地表沉降预测方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3):231.

(收稿日期:2018-09-10)

(上接第37页)

性。在电源条件受限时,通过供电距离和系统容量的优化选取,1路外部电源基本可满足运营需求。景区观光线采用安全滑触线和箱式变电所,在景观协调和空间利用方面有较好的优势。对于没有成熟标准的观光线供电系统设计,建议参考地铁等相似性较高的供电系统设计标准。

## 参考文献

- [1] 刘勇. 烟台中央山地公园观光铁路供电系统方案浅析[J]. 铁道标准设计, 2009(1):101.

- [2] 杜伟, 郑魏婧. 浅谈重庆跨座式单轨车辆车下电气优化[J]. 科技展望, 2014(22):40.
- [3] 连鹏飞. DC 1500 V 接触轨关键技术和选型研究[J]. 电气化铁道, 2016(增刊1):9.
- [4] 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.
- [5] 侯红磊, 黄建霞. 城市轨道交通低压配电系统的设计总结[J]. 电子制作, 2017(增刊1):51.
- [6] 彭宏. 浅析地铁-接触网供电和低压配电、照明系统[J]. 科技视界, 2014(15):230.

(收稿日期:2017-11-22)