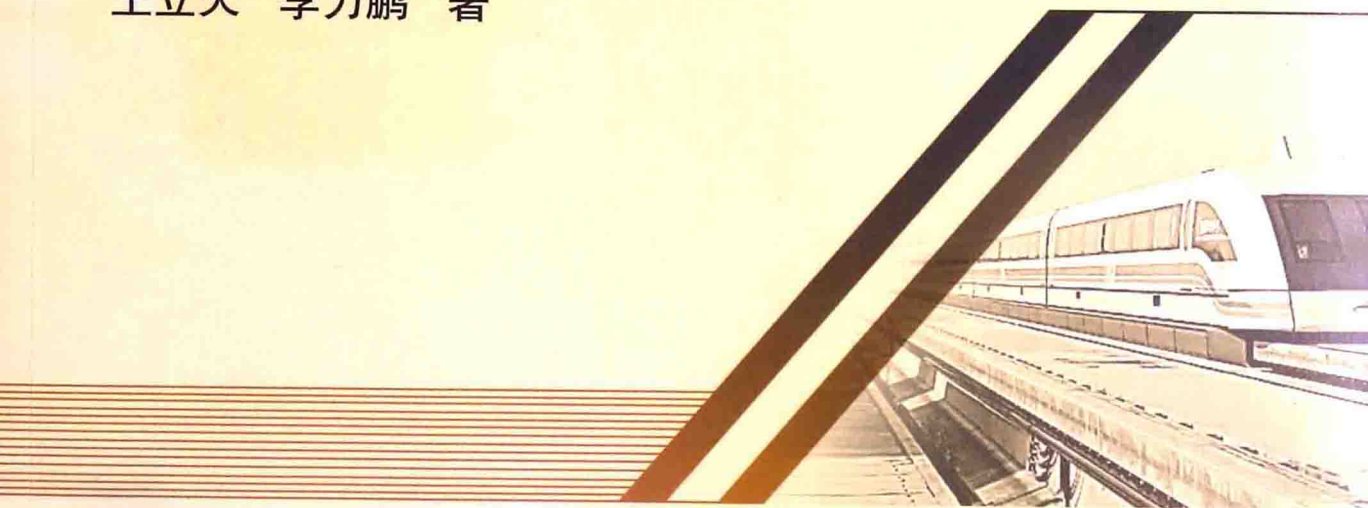


High-speed Maglev Traction Power Supply System

高速磁悬浮牵引供电系统

王立天 李力鹏 著



北京交通大学出版社

<http://www.bjtup.com.cn>

高速磁悬浮牵引供电系统

王立天 李力鹏 著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书分上、下两篇，上篇结合上海磁悬浮示范线介绍常导高速磁悬浮供电系统的一般概念、构成、供电系统保护及接地系统，并对上海磁悬浮示范线供电系统进行优化研究，介绍其核心技术分析方法及设计技术。下篇则结合上海磁悬浮示范线介绍常导高速磁悬浮牵引供电模拟。

本书主要面向有志于高速磁悬浮牵引供电系统研究的设计院、设计人员、科研院校及其他相关人员。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

高速磁悬浮牵引供电系统/王立天,李力鹏著. —北京:北京交通大学出版社,2014.8

ISBN 978-7-5121-2039-6

I. ①高… II. ①王…②李… III. ①高速铁路—磁悬浮列车—牵引供电系统 IV. ①U292.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 179550 号

责任编辑:陈跃琴

特邀编辑:宋英杰

出版发行:北京交通大学出版社

电话:010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街44号

邮编:100044

印刷者:北京艺堂印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170×235 印张:12.5 字数:210千字

版 次:2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-2039-6/U·177

印 数:1~800册 定价:58.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。

投诉电话:010-51686043,51686008;传真:010-62225406;E-mail:press@bjtu.edu.cn。



前 言

磁悬浮列车的出现是 20 世纪高速交通运输业上的一项杰出成就，其依靠电力将机车悬浮于轨道上，用直线电机推动前进，它没有车轮及相应的传动机构，与地面无机械接触，突破了传统轮轨铁路中轮与轨之间的约束关系，以及受电弓与接触网之间的约束关系，可以高速、平稳地运行。目前高速磁悬浮列车设计运行速度可以达到 400 ~ 550 km/h，并保持较高的经济性。近年来，世界上许多国家诸如德国、日本、美国、俄罗斯、法国、英国、中国、韩国等都相继开展了磁悬浮列车技术的研究工作。随着世界上第一条商业运营线——上海快速磁悬浮列车线的建成与商业运营，推动了磁悬浮技术在中国和世界的发展步伐。中低速磁悬浮方面北京的 S1 线采用了直流接触轨供电、直线电机驱动的形式。另外，随着近些年永磁技术的不断成熟，采用永磁和电励磁混合悬浮电磁铁结构的悬浮牵引控制方式的研究和实践也越来越多。据资料显示，使用永磁电机在中低速永磁悬浮的应用，其工程造价和悬浮运行损耗方面较其他城市公共交通工具都具有比较明显的优势。

1. 磁悬浮铁路的分类

总的来说，根据着眼点的不同，磁悬浮铁路可以划分为以下几种类型：

①从应用范围划分：磁悬浮铁路可以划分为干线磁悬浮、城际磁悬浮和城市磁悬浮铁路。

②根据直线电机线圈绕组是否使用超导材料划分：磁悬浮铁路可以分为超导磁悬浮和常导磁悬浮。常导磁悬浮使用普通材料制成线圈绕组，采用普通导体通电励磁，产生电磁悬浮力和导向力。德国的运捷 TR、日本的 HSST 及我国上海磁悬浮、北京 S1 线等大部分磁悬浮研究都属于常导磁悬浮的范畴。超导电磁铁能产生强大的磁场，日本的 ML 技术属于超导磁悬浮的范畴。

③按直线电机的定子长度划分：根据直线电机的定子长度的不同，直线电机

可以划分为长定子直线电机和短定子直线电机。据此，磁悬浮也分为长定子直线电机磁悬浮和短定子直线电机磁悬浮。

④按直线电机的磁场是否同步划分：导轨磁场与车辆磁场可以同步运行，也可以异步，那么驱动电机可分为直线同步电机（LSM）和直线感应电机（LIM）两大类。

⑤按驱动方式划分：列车的运行是由定子绕组中的行波磁场控制的，那么按照定子线圈的安装位置不同，磁悬浮铁路可以分为导轨驱动和列车驱动两种类型。

⑥按导轨结构形式划分：磁悬浮铁路所使用的导轨结构有多种形式，常用的有“T”形，“L”形，“U”形和“—”字形。目前采用较多的是德国磁悬浮吸力“T”形悬浮和日本磁悬浮斥力“U”形悬浮。

2. 磁悬浮技术

磁悬浮技术共包括轨道、车辆、牵引供电、运行控制4大子系统，磁悬浮整个运行线路中分为多个牵引供电区段，每个区段内又分为若干个长定子绕组段，对磁悬浮列车线路进行分段供电的牵引控制系统设置在沿线的牵引变电所中，通过多套大功率变流器直接对列车的位置、速度和加速度进行控制。所以，磁悬浮技术中牵引供电和牵引控制是相关联的。

掌握磁悬浮牵引供电技术，编写可以对悬浮牵引供电系统进行准确模拟计算的软件系统，对于包括牵引变电所、馈电电缆、开关站及定子电缆等设备容量选型优化设计、磁悬浮系统无功补偿设计和再生能量的利用等工作具有非常重要的意义。

3. 本书主要内容

本书分上、下两篇。上篇系统阐述了高速磁悬浮系统的基本构成、子系统功能、直线电机系统、数学模型及牵引供电系统模拟仿真计算的多种方法，全面介绍了高速磁悬浮牵引供电系统的理论、设备及应用。

高速磁悬浮系统采用长定子直线同步电机，其控制分为转子、定子、气隙磁链等。要解决高速磁悬浮牵引供电问题，就需要掌握磁悬浮牵引供电系统的结构和功能，并通过研究电机的牵引特性得到某种运行方式下机车所需要的牵引力及电机电气参数的变化，进而得到整个高速磁悬浮牵引供电系统电气参数的变化。因此本书下篇的主要内容包括：

①研究分析列车在运行过程中所受的阻力，研究建立列车运行阻力模型；

②研究分析高速磁浮系统直线同步电机的模型，研究建立包括电机有效气隙、励磁电流、励磁电流产生的气隙磁密、定子电流、定子电阻电抗、空载电势等电气参数计算模型；

③编写软件用于计算高速磁悬浮机车某一运行速度下机械特性及电气参数；

④在确定列车行进过程中的步进机制，通过供电网络等效理论，等效出整个磁悬浮牵引供电系统的牵引供电计算模型，并通过编写的软件求得各牵引变电所对应输出的电压、电流、功率因数等电参数便于设计分析。

目 录

上篇 常导高速磁悬浮供电系统的结构

第 1 章 磁悬浮供电系统的一般概念及构成	3
1.1 概述	3
1.2 主变电所	5
1.3 牵引供电系统	6
1.3.1 牵引模块	6
1.3.2 安全切断开关	7
1.3.3 馈电电缆	8
1.3.4 定子开关站	9
1.3.5 定子绕组电缆	10
1.4 动力供电系统	10
1.4.1 主要动力负荷种类及其供电可靠性要求	10
1.4.2 中压环网电缆	11
1.4.3 轨旁变电所	12
1.4.4 道岔开关站	13
1.4.5 动力轨系统	13
第 2 章 上海磁悬浮示范线供电系统描述	14
2.1 供电系统概述	14
2.2 主变电所	15

2.2.1	主接线描述	15
2.2.2	滤波器及动态无功补偿装置	17
2.3	牵引供电系统	27
2.3.1	概述	27
2.3.2	牵引模块	28
2.3.3	定子开关站	41
2.3.4	馈电电缆	42
2.3.5	定子绕组及其连接方法	43
2.3.6	牵引供电分区的划分	43
2.3.7	牵引控制系统 (ARS)	44
2.3.8	监视与诊断系统	52
2.3.9	数据通信系统	53
2.3.10	牵引控制系统 (ABS) 与 OCS 的接口	54
2.4	动力供电系统	54
2.4.1	轨旁变电所	54
2.4.2	中压环网电缆	55
2.4.3	道岔开关站	56
2.4.4	动力轨系统	56
2.4.5	动力供电控制系统	60
2.5	供电系统设备技术规格	60
2.5.1	110 kV 进线断路器	60
2.5.2	主变压器	61
2.5.3	110 kV 中性点接地装置	61
2.5.4	配电变压器	61
2.5.5	动力轨整流机组	62
2.5.6	20 kV 输入开关装置	62
2.5.7	安全切断开关	63
2.5.8	输入变压器	63
2.5.9	高功率变流器单元	64

2.5.10	中功率变流器单元	65
2.5.11	低功率变流器单元	66
2.5.12	输出变压器	66
2.5.13	真空接触器	66
2.5.14	制动电阻	67
2.5.15	定子段绕组	67
2.5.16	动力轨	68
2.5.17	滤波器及动态无功补偿装置	68
第3章	供电系统保护及接地系统	71
3.1	供电系统保护措施	71
3.1.1	过电压保护及绝缘配合	71
3.1.2	防雷措施	72
3.1.3	接地系统	72
3.2	动力供电系统继电保护	75
3.2.1	继电保护设置原则	75
3.2.2	保护设备配置的总体要求	75
3.2.3	上海磁悬浮示范线保护和自动设备配置情况	76
3.3	牵引系统保护配置	80
第4章	既有线供电系统优化研究	81
4.1	主变电所	81
4.2	20 kV 环网系统	82
4.3	车站降压变电所及轨旁变电所	83
4.4	动力轨系统	85
4.5	馈电电缆敷设	86
4.6	总结	86
第5章	供电系统的核心技术分析方法及设计技术	88
5.1	核心技术分析	88
5.1.1	牵引计算模拟、牵引供电系统网络容量计算及模拟	88

5.1.2	变流器设计制造和控制技术	91
5.1.3	定子开关站内的真空接触器	92
5.2	供电系统的设计技术	92
5.2.1	专业定位及接口关系	92
5.2.2	动力轨的沿线位置分布研究	93
5.2.3	供电系统设计流程	95

下篇 常导高速磁悬浮牵引供电模拟

第6章	常导高速磁悬浮牵引供电系统研究	101
6.1	磁悬浮直线同步电机的结构与工作原理	101
6.2	牵引供电系统的结构	103
6.2.1	牵引供电方式	103
6.2.2	牵引变电所	106
6.2.3	馈线电缆	108
6.2.4	定子开关站	108
6.2.5	定子绕组电缆	108
第7章	常导高速磁悬浮牵引供电系统计算理论研究	109
7.1	常导高速磁悬浮列车牵引供电系统的数学模型	109
7.1.1	三相静止坐标系上的同步电机原始模型	110
7.1.2	坐标变换矩阵	110
7.1.3	两相坐标系上的同步电机模型	112
7.1.4	长定子直线同步电机模型	112
7.2	磁场定向控制理论	114
7.2.1	长定子直线同步电机转子磁场定向控制	114
7.2.2	长定子直线同步电机定子磁场定向控制	116
7.2.3	长定子直线同步电机气隙磁场定向控制	117
7.3	直线同步电机参数计算	119

7.3.1	有效气隙的计算	119
7.3.2	电枢参数计算	120
7.3.3	励磁参数计算	123
7.4	运行阻力特性和机械系统的数学模型及参数	124
7.5	各控制方式下磁悬浮牵引电机计算	125
7.5.1	转子磁场定向控制方式	125
7.5.2	定子磁场定向控制方式	126
7.5.3	气隙磁场定向控制方式	128
7.6	定子和气隙磁场定向模拟计算校正控制	129
7.7	二端口网络理论用于磁悬浮牵引供电的研究	131
7.7.1	概述	131
7.7.2	二端口的方程和参数	132
7.8	功率因数校正控制方式	137
7.8.1	校正控制矢量图及计算方程	137
7.8.2	功率因数校正控制算法增大直轴电流的影响	139
第8章	牵引供电系统模拟计算软件架构	141
8.1	参数输入	141
8.2	开关站电气参数计算	144
8.3	磁悬浮牵引供电系统能量分配及电参数超标影响处理	144
第9章	不同运行方式下的模拟计算分析	147
9.1	某速度下同步电机一段长定子牵引计算结果	147
9.2	磁悬浮牵引供电系统计算	149
9.2.1	牵引供电系统计算输入	149
9.2.2	牵引供电系统各模拟工况设置及模拟输入	150
9.3	牵引供电系统计算结果与实测结果对比分析	151
9.3.1	龙阳路站牵引变电所模拟计算与现场实测数据结果对比	151
9.3.2	浦东机场牵引变电所模拟计算与现场实测数据结果对比	153
9.3.3	模拟计算与实测能耗对比分析	154

9.3.4 牵引变电所各功率模拟计算结果对比分析	155
第 10 章 结论与展望	162
附录 A 附图	164
A1 电机采用转子磁场定向方式控制电参数模拟结果图	164
A2 电机采用定子磁场定向控制方式电参数模拟结果图	170
A3 电机采用气隙磁场定向控制方式电参数模拟结果图	176
A4 电机采用功率因数校正控制方式电参数模拟结果图	181
参考文献	188



上 篇

常导高速磁悬浮供电系统的结构

- 第 1 章 磁悬浮供电系统的一般概念及构成
- 第 2 章 上海磁悬浮示范线供电系统描述
- 第 3 章 供电系统保护及接地系统
- 第 4 章 既有线供电系统优化研究
- 第 5 章 供电系统的核心技术分析及设计技术

第 1 章

磁悬浮供电系统的一般概念及构成

1.1 概述

磁悬浮轨道交通供电系统从功能上可划分为主变电所、牵引供电系统、动力供电系统三部分。主变电所将电力系统 110 kV 电源经主变压器降压为 20 kV 中压电源后，对牵引供电系统及动力供电系统进行供电。牵引供电系统将 20 kV 中压电降压后整流为直流电，再经过逆变器变换为可调压、调频、调流及相角的三相交流电后，馈电至沿线定子绕组，用于列车的牵引或制动；动力供电系统将主变电所 20 kV 电源，通过 20 kV 中压环网电缆送至沿线轨旁变电所，轨旁变电所将 20 kV 降压或整流后对车站及沿线动力负荷进行供电。

从设备结构单元上划分，主变电所包括 110 kV 断路器、主变压器、20 kV 馈线断路器、滤波器及动态无功补偿装置；牵引供电系统包括牵引变电所（含牵引模块、输入开关、输出开关等）、馈电电缆、定子开关站、定子段绕组；动力供电系统包括轨旁变电所、中压环网电缆、道岔开关站、动力轨系统等。当轨旁变电所设在车站或维修基地处时，则称为车站或维修基地降压变电所。主变电所、牵引供电系统、动力供电系统之间的关系及构成如图 1-1 所示。

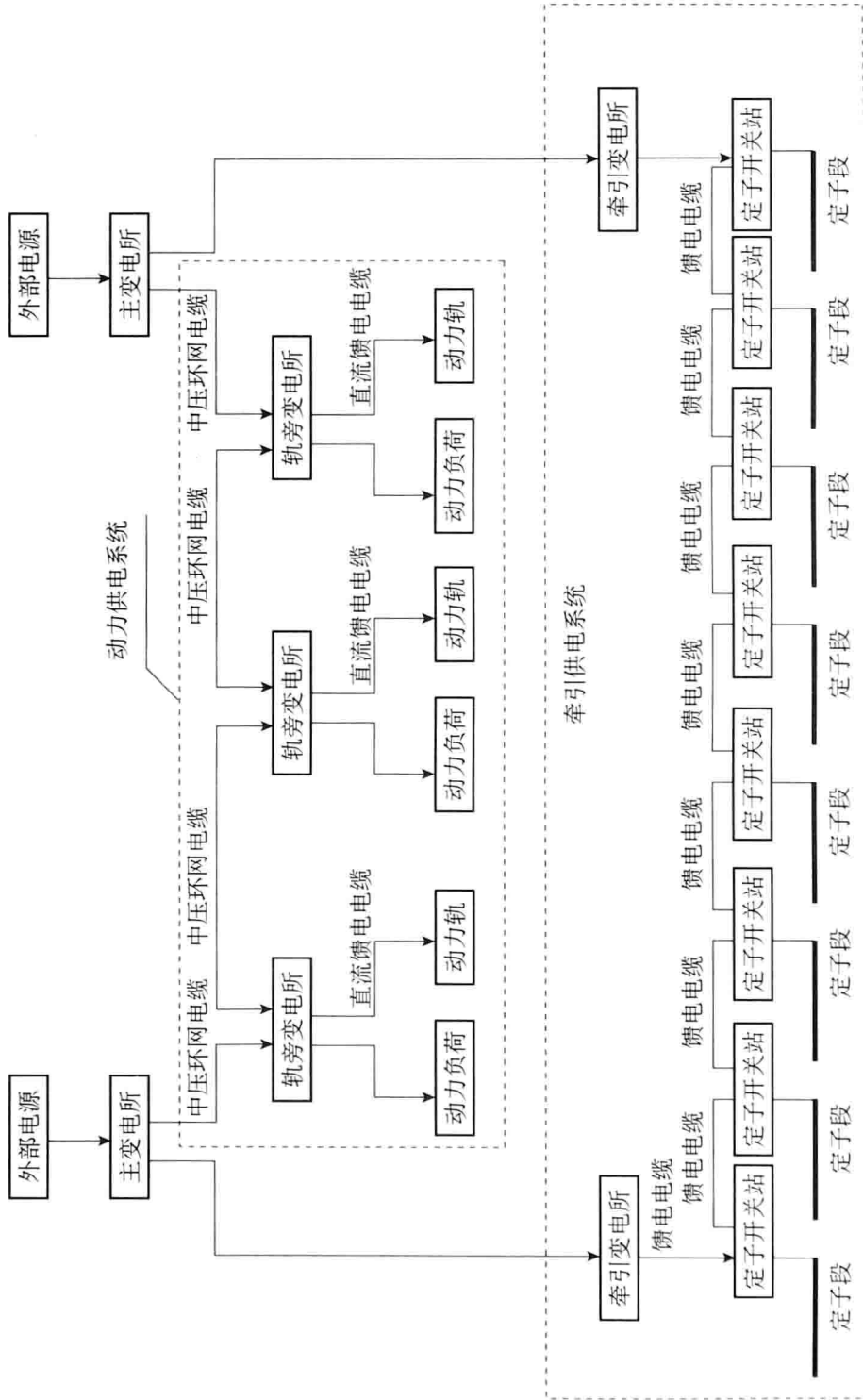


图1-1 磁悬浮供电系统概念图

1.2 主变电所

主变电所将从电力系统引入的 110 kV 或 220 kV 电源通过主变压器降压后转换成磁悬浮系统所需的中压电源。主变电所沿轨道交通系统的布置及数量与牵引变电所的布置相一致。主变电所除向牵引变电所供电外，还通过中压环网电缆向沿线轨旁变电所供电，通过该中压环网电缆以环串形式将沿线轨旁变电所及邻近主变电所母线进行连接，可实现两主变电所之间动力供电的相互支援。主变电所的主接线图如图 1-2 所示。

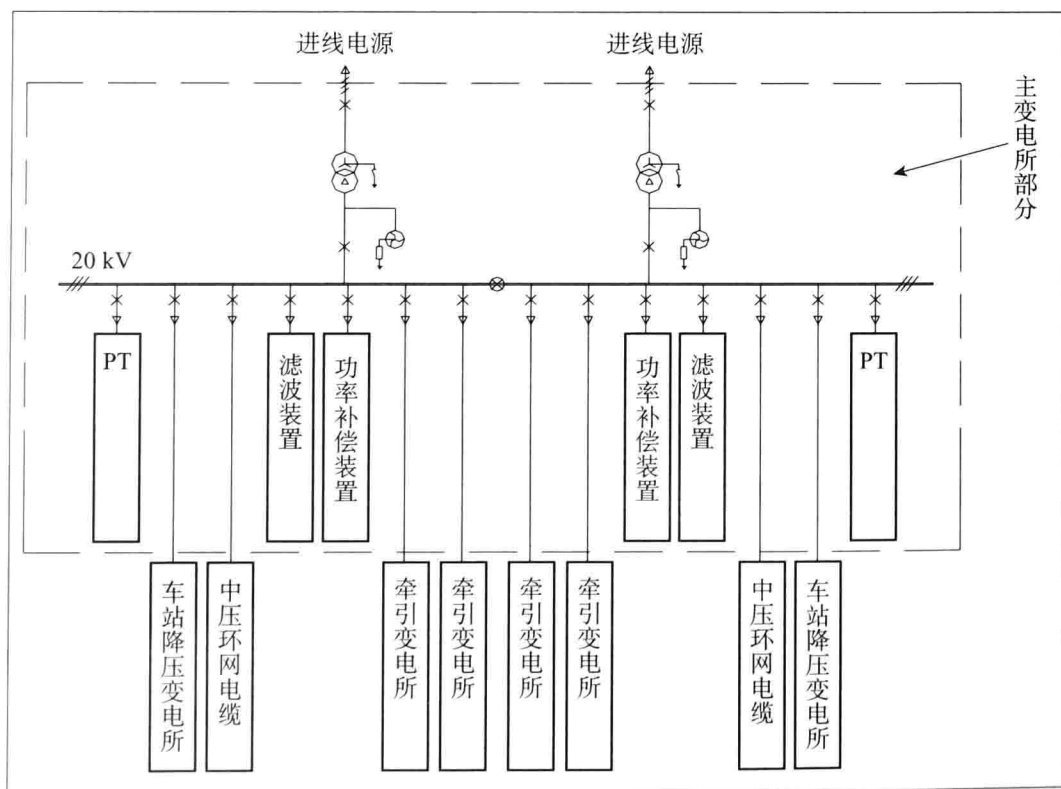


图 1-2 主变电所主接线图

若主变电所设在车站位置，其 20 kV 母线还向车站降压变电所提供双回电源。由于牵引负荷及动力轨负荷产生高次谐波，20 kV 母线上还设了滤波装置及功率补偿装置。20 kV 中压系统采用小电阻接地方式，故在 20 kV 侧设接地变压