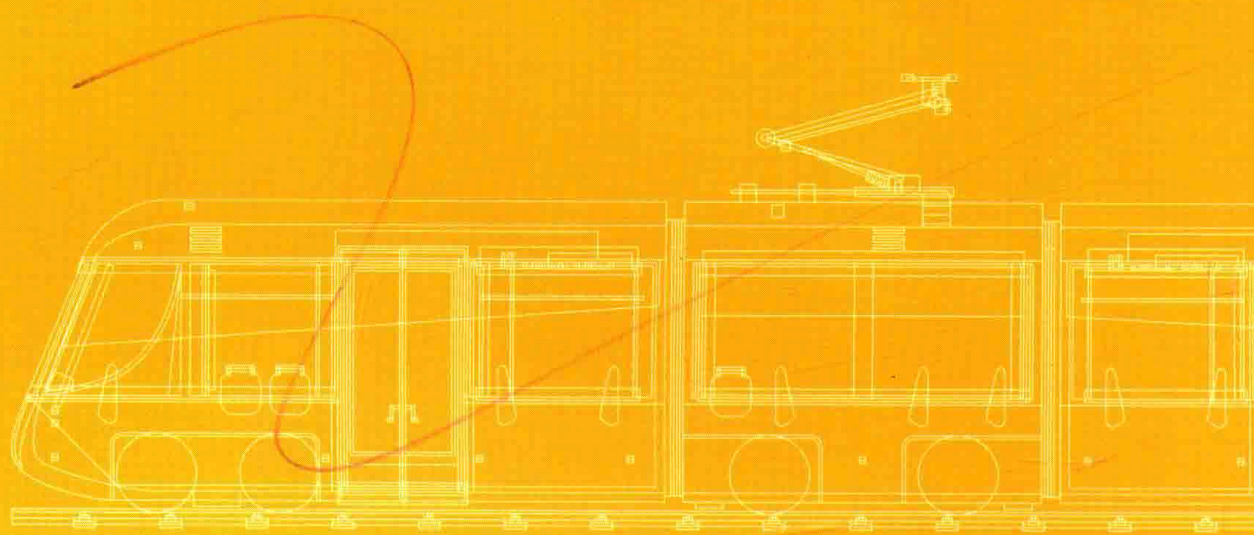




全国工程专业学位研究生教育国家级规划教材

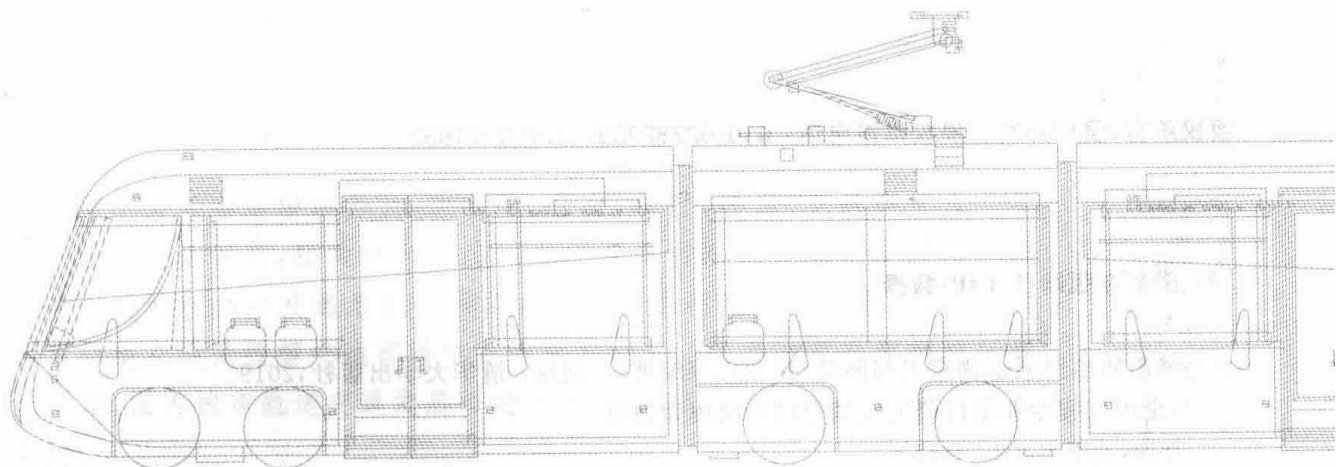


城市轨道交通车辆 牵引与制动

杨建伟 姚德臣 张军 李熙 编著

清华大学出版社

全国工程专业学位研究生教育国家级规划教材



城市轨道交通车辆 牵引与制动

杨建伟 姚德臣 张军 李熙 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书从城市轨道交通车辆牵引与制动系统的基本概念出发,全面阐述了城市轨道交通牵引与制动系统的组成和功能、工作原理、信号传输的设备与模式、牵引制动的相关计算及其发展。

本书从基本概念入手,强调理论与实际的结合以及系统概念的建立,希望能够帮助读者更好地理解相关知识。本书可作为高等院校相关专业的教材,也可供从事城市轨道交通相关领域的技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通车辆牵引与制动/杨建伟等编著. —北京:清华大学出版社,2019

(全国工程专业学位研究生教育国家级规划教材)

ISBN 978-7-302-52347-5

I. ①城… II. ①杨… III. ①轻轨车辆—牵引系统—研究生—教材 ②轻轨车辆—车辆制动—研究生—教材 IV. ①U270.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 034497 号

责任编辑:许 龙

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.5

字 数:347千字

版 次:2019年5月第1版

印 次:2019年5月第1次印刷

定 价:45.00元

产品编号:073401-01

城市轨道交通具有运输能力大、速度快、安全、准时、环保、节能等优点。世界各国普遍认识到,解决城市交通问题的根本出路在于优先发展以轨道交通为骨干的城市公共交通系统。国外大城市的轨道运营经验也表明,大力发展城市轨道交通是缓解交通拥堵难题的重要途径。随着城市交通拥堵问题的日益严重,国内城市轨道交通发展将进一步提速,我国城市轨道交通未来发展空间大。

为了适应现代城市轨道交通车辆牵引与制动技术的发展,满足高等院校城市轨道交通相关专业学生及专业人员对城市轨道交通车辆牵引与制动技术学习的要求,编者编写了本书作为教材及参考书。

全书共11章。第1章介绍城市轨道交通车辆牵引与制动系统基本概念、组成和特点;第2章介绍城市轨道交通车辆牵引与制动系统工作原理和组成;第3章介绍牵引与制动指令及传输,包括其功能设置、指令模式与控制模式;第4章介绍电空制动控制原理;第5章介绍列车牵引力及牵引特性;第6章介绍列车制动问题计算,包括制动距离与限速的计算;第7章介绍列车运动方程与速度时分计算,包括列车运行速度、时分的分析法和图解法;第8章介绍牵引重量计算,包括牵引重量的校验、牵引定数的确定;第9章介绍列车运行能耗计算;第10章介绍列车运行相关问题计算;第11章介绍牵引计算方法研究与发展。

本书可作为普通高校城市轨道交通车辆专业课程教学的专业教材,也可供从事城市轨道交通车辆相关工作人员学习和参考。

由于时间仓促和作者水平有限,本书难免有不足之处,欢迎广大读者和专家提出宝贵建议,我们表示真诚的感谢。

作者

2018年8月

第 1 章 城市轨道交通车辆牵引与制动系统概述	1
1.1 牵引的相关概念	1
1.2 牵引系统的组成和特点	4
1.3 制动的相关概念	7
1.4 制动系统的组成和特点	10
习题	13
第 2 章 城市轨道交通车辆牵引与制动系统工作原理和组成 ...	14
2.1 电力牵引控制系统的类型和控制方式	14
2.2 直流牵引系统	19
2.3 交流牵引系统	27
2.4 电制动系统	47
2.5 空气制动系统	53
2.6 防滑装置	63
2.7 制动控制系统	68
习题	76
第 3 章 牵引与制动指令及传输	77
3.1 牵引操纵及牵引功能设置	77
3.2 制动操纵及制动功能设置	79
3.3 电气指令模式	80
3.4 电气指令的传输	82
3.5 指令模式与制动控制模式	85
习题	86
第 4 章 电空制动控制原理	87
4.1 电气制动的基本原理	87
4.2 电阻制动	92
4.3 再生制动	97

4.4	空气制动力控制	100
4.5	模拟型 EP 阀及其控制	105
4.6	开关型 EP 阀及其控制	113
4.7	中继阀	115
	习题	120
第 5 章	列车牵引力及牵引特性	121
5.1	牵引力及其形成	121
5.2	黏着特性及黏着利用	123
5.3	地铁电动车组的牵引特性	127
5.4	牵引力计算标准和取值规定	132
	习题	134
第 6 章	列车制动问题计算	135
6.1	列车制动问题	135
6.2	制动距离与计算	136
6.3	列车紧急制动限速计算	143
6.4	列车所需换算制动率计算	145
	习题	146
第 7 章	列车运动方程与速度时分计算	147
7.1	列车合力与单位合力计算	147
7.2	列车合力曲线图的绘制	149
7.3	列车运动方程	153
7.4	计算列车运行速度、时分的分析法	156
7.5	计算列车运行速度、时分的图解法	157
7.6	线路纵断面化简	162
	习题	167
第 8 章	牵引重量计算	168
8.1	牵引重量的计算方法	168
8.2	牵引重量的校验	173
8.3	牵引定数的确定	176
	习题	177
第 9 章	列车运行能耗计算	178
9.1	内燃机车用油量计算	178
9.2	电力机车耗电量计算	182
9.3	列车运行能耗的其他计算方法	184

习题	186
第 10 章 列车运行相关问题计算	187
10.1 地铁电动车组的故障运行能力分析计算	187
10.2 试车线最短长度计算	188
10.3 技术速度与旅行速度的计算	194
10.4 列车运行参数计算	201
10.5 列车配置数量的计算	202
10.6 列车编组计算	204
习题	204
第 11 章 牵引计算方法研究与发展	205
11.1 牵引计算的研究背景	205
11.2 国内列车牵引计算的研究	207
11.3 国外列车牵引计算的研究	210
参考文献	211
附录	212
附录 A 城市快速轨道交通工程项目建设标准	212
附录 B 地铁线路纵断面实例	217

第1章 城市轨道交通车辆牵引与 制动系统概述

1.1 牵引的相关概念

1. 机车牵引力的定义

机车牵引力是由动力传动装置产生的、与列车运行方向相同、驱动列车运行并可由司机根据需要调节的外力。它是由机车动力装置发出的内力(不同类型机车的原动力装置不一样),经传动装置传递,通过轮轨间的黏着而产生的由钢轨反作用于机车动轮轮周上的切向力。

2. 机车牵引力的分类

按照不同条件可以把机车牵引力作如下分类。

1) 按能量传递顺序分类

(1) 指示牵引力 F_i : 假定原动机(内燃牵引时就是柴油机)所做的指示功毫无损失地传递到动轮上所得到的机车牵引力。指示牵引力是一个假想的概念。

(2) 轮周牵引力 F : 实际作用在轮周上的机车牵引力, $F < F_i$ 。

(3) 车钩牵引力 F_g : 除去机车阻力的消耗,实际作用在机车车钩上的牵引力。

在列车作等速运行时,车钩牵引力与轮周牵引力有如下关系:

$$F_g = F - W' \quad (1-1)$$

式中: W' ——机车阻力。

我国《列车牵引计算规程》(以下简称《牵规》)规定,机车牵引力以轮周牵引力为计算标准,即以轮周牵引力来衡量和表示机车牵引力的大小。

由于动轮直径的变化会影响轮周牵引力的大小,《牵规》规定,机车牵引力按轮箍半磨耗状态计算。不论是设计还是试验资料,所提供的轮周牵引力和机车速度数据必须换算到轮箍半磨耗状态。机车轮箍半磨耗状态的动轮直径叫做计算动轮直径。我国常速电力机车的动轮直径原形是 1250mm,计算动轮直径是 1200mm;常速内燃机车的动轮直径原形是 1050mm,计算动轮直径是 1013mm。动力分散式动车组的动轮直径与客车轮径相同,即 915mm,计算动轮直径是 880mm。

2) 按能量转换过程的限制关系分类

任何机车都是把某种能量转化成牵引力所做外机械功的一种工具,这种能量转换要经过若干互相制约的环节。机车一般都有几个能量转换阶段,并相应地有几个变能部分。电力机车的电能由牵引变电所供给,可以认为它的容量是足够大的,电力机车牵引力的发挥不会受牵引变电所电能供给者的限制,进入机车的单相交流电经过变压整流后输入牵引电动机(交传动电力机车),将电能转变为带动轮对转动的机械功,然后借助于轮轨间的黏着转变为动轮轮周上的牵引力所做的机械功。因而电力机车牵引力将要受到牵引电动机和轮轨间黏着这两个变能部分工作能力的限制,而内燃机车牵引力则受到柴油机、传动装置和轮轨间黏着的限制。对应这些限制,机车的牵引力可分为以下类型。

(1) 电力机车牵引力的分类

- ① 牵引电机牵引力:受牵引电机功率限制的轮周牵引力。
- ② 黏着牵引力:受轮轨间黏着能力限制的轮周牵引力。

(2) 内燃机车牵引力的分类

- ① 柴油机牵引力:受柴油机功率限制的轮周牵引力。
- ② 传动装置牵引力:受传动装置能力限制的轮周牵引力。
- ③ 黏着牵引力:受轮轨间黏着能力限制的轮周牵引力。

实际条件下,能够实现的机车牵引力是上述这些牵引力中的最小者。

3. 黏着牵引力

轮周上的切线力大于轮轨间的黏着力时动轮就要发生空转。在不发生空转的前提下,所能实现的最大轮周牵引力称为黏着牵引力,其值按下式计算:

$$F_{\mu} = P_{\mu} g \mu_j \quad (1-2)$$

式中: F_{μ} ——计算黏着牵引力, kN;

P_{μ} ——机车计算黏着质量, t;

g ——重力加速度, $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$;

μ_j ——计算黏着系数。

4. 计算黏着系数

计算黏着系数不同于(小于)理论黏着系数(轮轨间的静摩擦系数),它考虑了机车轴重和牵引力分配不均、运行中轴重增减载、牵引力的波动、轮轨间的滑动(纵向的和横向的)等不利因素的影响,并且主要与机车转向架结构、轮轨表面清洁状况和机车运行速度等因素有关。

影响计算黏着系数的因素比较复杂,不可能用理论方法计算,只能用专门试验得出的试验公式表达。试验公式表示在正常黏着条件下计算黏着系数和机车运行速度的关系。黏着条件不好时可以用撒砂来改善,采用交流传动以及改进机车走行部结构可以提高黏着系数,采用径向转向架也可以提高曲线上的黏着系数,采用防空转装置可以提高机车黏着利用程度。

我国《牵规》规定的计算黏着系数公式如下：

1) 电力机车

(1) 国产各型电力机车

$$\mu_j = 0.24 + \frac{12}{100 + 8v} \quad (1-3)$$

(2) 6K型电力机车

$$\mu_j = 0.189 + \frac{8.86}{44 + v} \quad (1-4)$$

(3) 8G型电力机车

$$\mu_j = 0.28 + \frac{4}{50 + 6v} - 0.0006v \quad (1-5)$$

式中： v ——运行速度，km/h。

机车在曲线上运行时，由于运动更不平稳以及轮轨间的滑动加剧等原因，黏着系数比直线上有所降低，尤其在小半径曲线上更为明显，在这种情况下需要对计算黏着系数进行修正。三轴转向架电力机车在曲线半径 $R < 600\text{m}$ 的线路上运行时，曲线上的计算黏着系数 μ_r 按下式计算：

$$\mu_r = \mu_j(0.67 + 0.00055R) \quad (1-6)$$

2) 内燃机车

(1) 国产各型电传动内燃机车

$$\mu_j = 0.248 + \frac{5.9}{75 + 20v} \quad (1-7)$$

(2) ND₅型内燃机车

$$\mu_j = 0.242 + \frac{72}{800 + 11v} \quad (1-8)$$

内燃机车在曲线半径 $R < 550\text{m}$ 的线路上运行时，曲线上的计算黏着系数 μ_r 按下式计算：

$$\mu_r = \mu_j(0.805 + 0.000355R) \quad (1-9)$$

上述式(1-3)、式(1-4)、式(1-5)、式(1-7)和式(1-8)表达的计算黏着系数与速度的关系见表1-1。

表 1-1 各种机车不同运行速度下的计算黏着系数

机型	运行速度 $v/(\text{km/h})$	0	10	20	30	40	50	60
	国产各型电力机车		0.360	0.307	0.286	0.275	0.269	0.264
6K型电力机车		0.390	0.353	0.327	0.309	0.294	0.283	0.274
8G型电力机车		0.360	0.310	0.292	0.279	0.270	0.261	0.254
国产各型电传动内燃机车		0.327	0.269	0.260	0.257	0.255	0.253	0.253
ND ₅ 型内燃机车		0.332	0.321	0.313	0.306	0.300	0.295	0.291

从表1-1可见，随着运行速度的提高，各种机车的计算黏着系数都有所下降。不同类型机车的计算黏着系数有所区别，主要原因是它们的走行部结构不同。电力机车中6K型机

车的计算黏着系数最高,与它所采用的 $B_0-B_0-B_0$ 转向架和低位牵引拉杆等结构有关。

我国尚缺交流传动机车计算黏着系数的正规资料,必要时可参阅国外资料。

5. 黏着牵引力曲线

将表 1-1 中的计算黏着系数和机车计算黏着质量代入式(1-2),即可得出各型机车的黏着牵引力。根据各型机车不同速度下的黏着牵引力,可以在坐标图中绘出黏着牵引力与速度的关系曲线,称为黏着牵引力曲线,如机车牵引特性曲线图中带阴影的曲线。由于客运机车的黏着牵引力一般要比传动装置牵引力大许多,机车牵引力不受黏着牵引力的限制,所以客运机车的牵引特性曲线图上通常不把黏着牵引力曲线画出来。

由上述内容可以看出,机车黏着牵引力是机车牵引力的一个限制值,牵引电机牵引力、原动机牵引力是机车本身所具有的能力,这两部分牵引力必须很好地配合才能使机车牵引力发挥在最佳状态。对电力机车来说,如牵引电动机能力过大而超过黏着牵引力,则牵引电动机功率不能充分发挥,机车真正能实现的牵引力是按黏着牵引力限制值得到的黏着牵引力;反之,如牵引电动机的牵引力小于黏着牵引力,则机车牵引力受牵引电动机能力的限制,机车能实现的牵引力为牵引电动机牵引力。总之,不同条件下机车真正能实现的牵引力为以上两种牵引力的小者。例如,SS₄型机车 $v=60\text{km/h}$ 时,黏着牵引力为 470.6kN,而牵引电动机在 32-I 级时,其牵引力为 319.8kN,在这种情况下,轮周上得到的轮周牵引力为牵引电动机牵引力,其值是 319.8kN。



牵引系统的组成和特点

1. 城市轨道交通电力牵引概念

城市轨道交通电力牵引是指以电力系统城市电网的电力为动力源,在车辆上将电能转换为机械能,从而牵引列车组在轨道上运行的一种城市交通牵引动力形式。

2. 城市轨道交通电力牵引系统的构成及功能

城市轨道交通电力牵引系统主要由牵引供电系统和电动列车牵引控制装置两大部分组成,其结构见图 1-1。

1) 牵引供电系统

牵引供电系统是由牵引变电所(见图 1-2)和牵引网组成的向列车提供电力的系统,其中牵引变电所包括主降压变电站、直流牵引变电所,牵引网包括馈电线、接触网(接触轨)、走行轨道、回流线。其中,接触轨与受电器连接方式见图 1-3,馈电线见图 1-4。

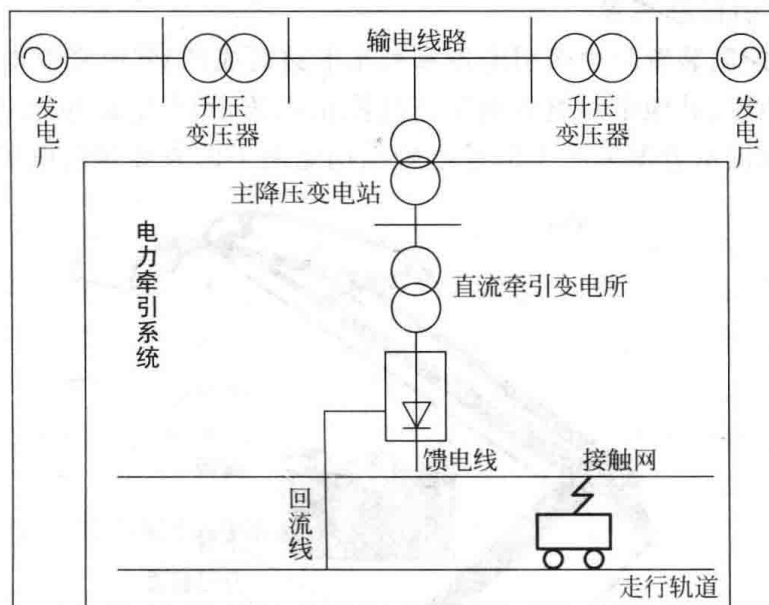


图 1-1 城市轨道交通电力牵引系统结构



图 1-2 牵引变电所

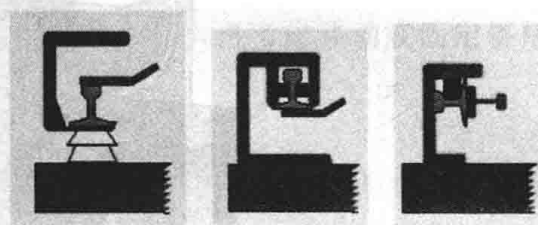


图 1-3 接触轨与受电器连接的三种方式

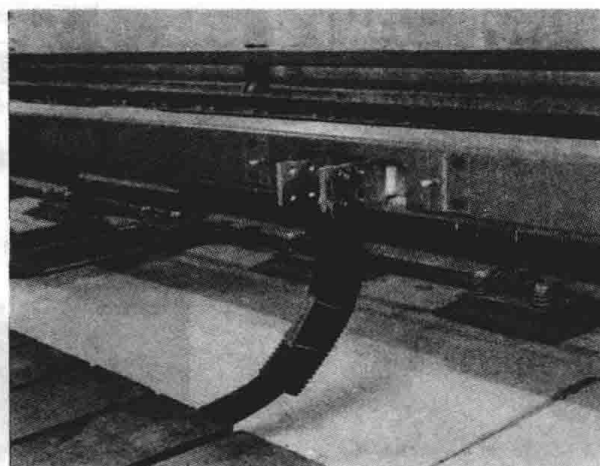
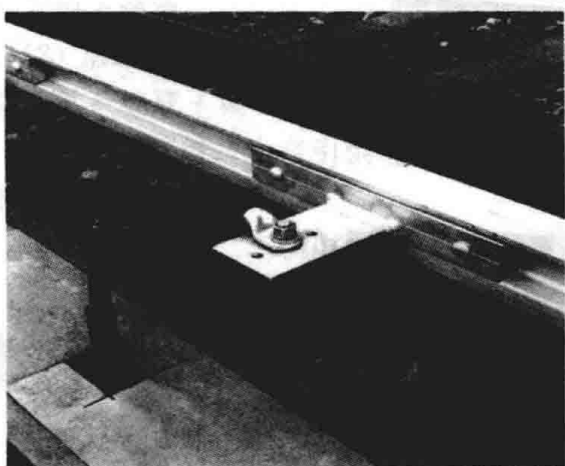


图 1-4 馈电线

2) 电动列车牵引控制装置

电动列车牵引控制装置是由牵引电器和列车电路构成的,其中牵引电器包括受流器、牵引电机、传动控制装置、其他牵引电力电子转换控制系统,列车电路包括主电路、辅助电路、控制电路,受电弓结构示意图见图 1-5,受电靴结构示意图见图 1-6,直线牵引电机的应用见图 1-7。

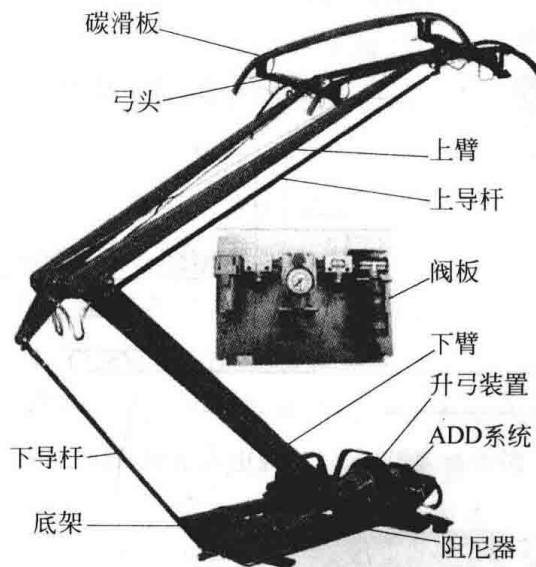


图 1-5 受电弓结构示意图

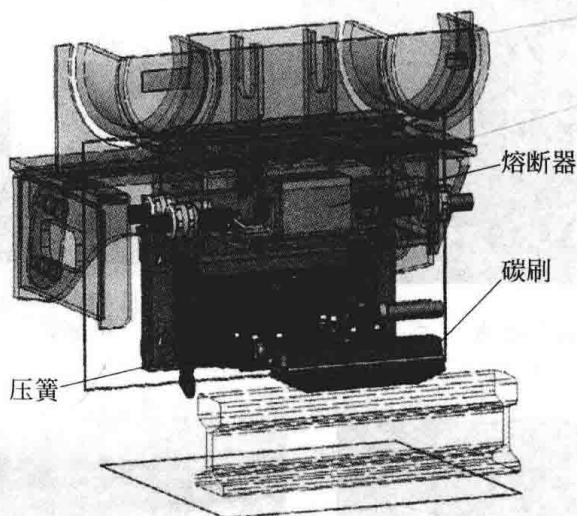


图 1-6 受电靴结构示意图



图 1-7 直线牵引电机在列车上的应用

3. 电力牵引的技术特性

电力牵引的优点主要有:

- (1) 电力牵引为非自给式牵引动力。
- (2) 电力牵引的总功效(做功效率)最高,可显著节省能源并降低运营成本。
- (3) 电力牵引列车和车辆噪声小,不排出废气和有害气体,有利于环境保护。

(4) 电力牵引各主要组成环节均为独立的电气系统,且又连成整体,它们与电子技术和计算机控制手段相结合,易于实现全面自动化和信息化。

电力牵引存在的缺陷是:由于增加了供电系统装置,其一次投资费用比其他牵引动力形式要高。

电力牵引在现实生活中最好的体现就是电力机车。

4. 牵引变电所容量的计算和确定

1) 确定牵引变压器的容量

- (1) 确定计算容量。
- (2) 确定校核容量。
- (3) 确定安装容量。

2) 牵引变压器的安装容量

牵引变压器的安装容量是在计算容量和校核容量的基础上,再考虑移动或固定备用方式,最后按变压器的产品规格确定变压器台数与容量。

5. 电力牵引的其他概念

(1) 地下迷流。在直流牵引供电中,牵引电流并非全部由钢轨直接流回牵引变电所,而是有一部分由钢轨杂散泄漏流入大地,再由大地流回钢轨和牵引变电所,这种地下杂散电流被称为地下迷流。

(2) 谐波。由于牵引变电所大功率整流设备和其他变流装置等的非线性负荷特性,使牵引供电系统成了城市电网的一个重要谐波源。

(3) 电动车组。由牵引供电系统供给电能,驱动车辆上的电动机产生牵引力牵引在轨道上行驶的列车组。

(4) 车辆电气。车辆电气包括车辆上各种电气设备及其连接导线。

1.3 制动的相关概念

1. 制动的基本概念

列车制动是人为地利用制动力使列车减速、停车、阻止其运动或加速的统称。

要改变运动物体的运动状态,必须对它施加外力。对于列车,人为地使其减速或阻止其加速的外力是由列车制动装置产生的,它与列车运动方向相反,由轨道作用于车轮轮周的这种外力,称为制动力。

为了能对列车施行制动作用,需要在列车上安装一套完整的制动系统(装置)。

对传统的机车车辆运行模式而言,列车制动装置是指机车制动装置、车辆制动装置的组合。通常制动装置是指能产生制动作用的整套机构,包括制动机、基础制动装置、停放制动(驻车制动)装置。

制动机是制动装置中受司机直接控制的部分,通常包括从制动软管连接器至最终产生制动力的制动缸的一整套机构。

基础制动装置是整个制动装置中用于传递、放大制动力的一整套机构。

停放制动(也叫驻车制动或停车制动)装置是使列车在停车状态下(无动力)依然能保持制动力,避免列车溜逸的制动装置。这种制动功能也可以借助于常规制动(行车制动)系统的全部,或其中一部分(或某些部件)来实现。

制动装置是通过操纵司机制动控制器(简称司控器)发出的制动指令,指挥制动控制部分,向基础制动的制动缸送风,使制动缸获得必需的空气压力,经基础制动装置的放大变换,最终形成列车制动力。

制动作用的解除叫做缓解,包括分步操纵的部分解除(或称阶段缓解)和一次操纵的彻底解除(或称一次缓解)。

2. 制动力的产生

1) 制动力的产生

(1) 制动力是由制动装置引起的与列车运行方向相反的外力,是纵向力。

(2) 制动力比列车运行阻力(自然产生的)大得多。

(3) 列车制动减速过程中,制动力起主要作用。

(4) 与牵引力一样,制动力同样受黏着限制(非黏制动除外)。

2) 制动力的产生

制动力可以有多种产生方式,以最传统的空气制动为例,用闸瓦压紧在车轮踏面上(见图 1-8),或用闸片压紧在制动盘面上(见图 1-9),可以获得所需要的制动力。以轮对为隔离体,闸瓦摩擦力、制动力 B 与轮对角减速度 θ 的关系为

$$\sum K\phi_k R - BR = I\theta \quad (1-10)$$

式中: K ——每块闸瓦的压力, N ;

ϕ_k ——闸瓦摩擦系数;

B ——由轨面反作用于车轮踏面的制动力, N ;

R ——车轮滚动圆半径, m ;

I ——轮对的转动惯量, $kg \cdot m$;

θ ——轮对的角减速度, rad/s^2 。

图 1-8 中的 B' 是由车轮踏面作用于轨面的摩擦力。

在式(1-10)中,忽略轮对的转动惯量,则制动力为

$$B = \sum K\phi_{\kappa}$$

盘形制动装置的制动力 B 按式(1-10)计算,则有

$$\sum K\phi_{\kappa}r - BR = I\theta$$

式中: r ——每块闸片所处的制动盘平均摩擦半径, m 。

忽略轮对的转动惯量,则盘形制动的制动力为

$$B = \frac{r}{R} \sum K\phi_{\kappa}$$

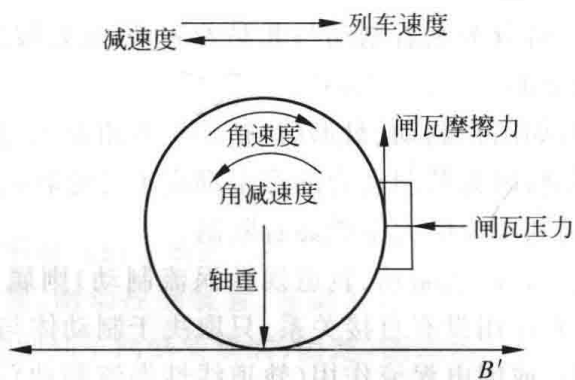


图 1-8 制动力产生示意图(踏面制动)

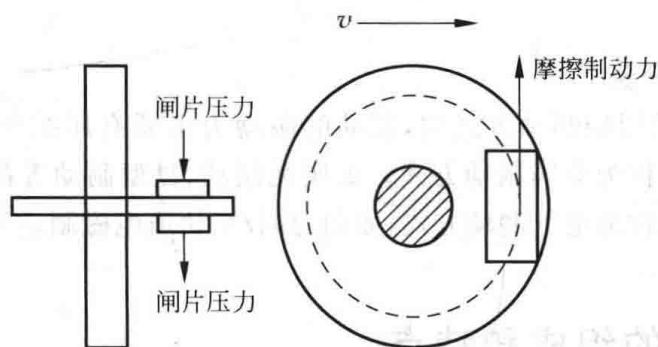


图 1-9 制动力产生示意图(盘形制动)

3. 制动方式

制动方式可以按制动时电动车组动能转移方式、制动力获取方式和制动源动力的不同进行分类。

1) 按动能转移方式分类

按制动时动能的转移方式不同,城轨列车的制动可以分为两类:一类是摩擦制动方式,即通过摩擦把动能转化为热能,然后消散于大气;另一类是动力制动方式,即把动能通过发电机转化为电能,然后将电能从车上转移出去。

(1) 摩擦制动

城轨列车常用的摩擦制动方式主要有闸瓦制动和盘形制动,在高速列车组中,往往还要

采用磁轨制动来辅助紧急制动。磁轨制动属于轨道电磁制动方式中的一种,也属于摩擦制动。

(2) 动力制动

城轨列车在制动时,将牵引电动机转变为发电机,将列车动能转化为电能,对这些电能的处理方式不同又可将制动分成电阻制动和再生制动两种形式。

电阻制动是把由列车动能转化出来的电能直接消耗在随车安装的制动电阻上转变为热能,然后再通过通风设备把热散掉;再生制动是把这种电能通过牵引传动的变流器逆向变换,再返回电网。

2) 按制动力形成方式分类

按制动力的形成方式,可分为黏着制动与非黏着制动,这是按照制动力形成是否依赖于轮轨之间的黏着关系而划分的。

在传统的制动方式中,如闸瓦制动、盘形(包括油压卡钳盘式、涡流盘式)制动、电阻制动和再生制动均属于黏着制动,因为其制动力的产生都离不开轮轨间的黏着关系,即轮轨接触区域必须有黏着作用,并且制动力的大小受黏着限制。

相比而言,轨道电磁制动(磁轨制动、轨道线性涡流制动)则属于非黏着制动,因为其制动力的产生与轮轨间的黏着作用没有直接关系,只取决于制动体与钢轨之间因接触摩擦(如磁轨制动)所产生的制动力,或因电涡流作用(轨道线性涡流制动)而产生的电磁力。

目前处于研究阶段的高速城轨列车制动方式中还有一种是在高速下通过车体伸出的迎风扰流板而产生空气作用力的制动方式,也称翼板制动。就制动力的形成而言,翼板制动也属于非黏着制动。

3) 按制动源动力分类

目前城轨列车所采用的制动方式中,制动的源动力主要有压缩空气和电力。以压缩空气为源动力的制动方式称为空气制动方式。如闸瓦制动、盘型制动等都为空气制动方式。以电为源动力的制动方式称为电气制动方式,如动力制动、轨道电磁制动等均为电气制动方式。

1.4 制动系统的组成和特点

1. 城轨车辆制动系统的组成

通常把机车车辆制动系统划分成供风系统、制动控制、基础制动三大部分。城轨列车制动系统由电气制动与空气制动两种方式复合而成,其组成示意图见图 1-10。

从列车的角度,城轨列车采用电气指令微机控制的空电复合制动,即空气制动与电气制动复合形成列车的制动力。电气制动,简称电制动,在城轨列车上大都以再生制动方式存在。由于再生制动功能是通过牵引传动系统由牵引变流器控制牵引电机来实现的,且其基本构成在各个车型上是一致的,但其性能、控制、实际有效与否又与很多因素有关,故从传统的列车制动的概念及当今制动技术的发展来看,空气制动方式一直是铁路机车车辆(包括城轨列车在内)最根本的制动方式。因此,从制动系统自身的角度看,空气制动部分,以其指令方式、指令传输载体、空气制动力控制方式以及基础制动装置的不同而具有较大差异,形成