

城市轨道交通职业教育系列教材

# 城市轨道交通 列车牵引与操纵

CHENGSHI  
GUIDAO JIAOTONG  
LIECHE QIANYIN YU CAOZONG

主编 © 芦建明 罗 闯



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

城市轨道交通职业教育系列教材

# 城市轨道交通列车牵引与操纵

主编 芦建明 罗 闯

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

-----  
**图书在版编目 ( C I P ) 数据**

城市轨道交通列车牵引与操纵 / 芦建明, 罗闯主编.  
—成都: 西南交通大学出版社, 2011.1  
城市轨道交通职业教育系列教材  
ISBN 978-7-5643-0993-0

I. ①城… II. ①芦…②罗… III. ①城市铁路—列车—牵引—计算—高等学校: 技术学校—教材②城市铁路—列车—操纵—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①U260.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 251570 号  
-----

城市轨道交通职业教育系列教材  
**城市轨道交通列车牵引与操纵**

主编 芦建明 罗闯

责任编辑	李芳芳
特邀编辑	宋彦博
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	<a href="http://press.swjtu.edu.cn">http://press.swjtu.edu.cn</a>
印 刷	四川经纬印务有限公司
成品尺寸	185 mm×230 mm
印 张	14.75
字 数	320 千字
版 次	2011 年 1 月第 1 版
印 次	2011 年 1 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-0993-0
定 价	25.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

城市轨道交通诞生于 19 世纪中叶的英国伦敦,已经历了 140 多年的发展历史。它技术成熟、安全可靠、形式多样、用途广泛,以其大载客量、快捷、准时、环保等优点而成为解决日益严重的城市交通堵塞的最有效手段。

改革开放以来,随着经济的发展,我国内地城市化进程加快,城市交通问题成为制约城市发展的重要因素。为此,国家确立了优先发展城市公共交通的城市发展战略,建立以大容量快速轨道交通为骨干、以公共交通为主体的综合交通体系,以此来解决城市交通拥挤的问题,从而实现可持续发展这一治本之策。

未来 10 年,我国内地将新建城市轨道交通线路 60 多条,新建线路里程近 1 700 km,北京、上海、广州更是以每年新增线路 30~50 km 的速度在发展。

城市轨道交通迎来了最好的发展时机,抓住这一历史机遇,内地许多城市纷纷开始轨道交通的规划和建设。

城市轨道交通的发展,急需大量德才兼备的人才。为了满足人才培养特别是高、中级技能型人才培养的迫切需要,武汉铁路司机学校组织编写了适合高、中级职业学校城市轨道交通类专业的系列教材。

本书结合当前地铁列车运用的实际情况,紧扣职业教育的特点,在讲述基本专业知识的基础上,注重实际操作技能的培养。内容力求实用、简洁明了,文字通俗易懂。为配合教学的需要,每章还配有适量的复习思考题。因地铁是一项新兴产业,新技术、新设备、新工艺被广泛应用,技术装备不断更新,加之各地铁公司车辆型式不同,管理制度、操纵方法、故障处理可能不尽相同,本书尽可能突出重点,兼顾通用性和理论联系实际,书中个别内容与实际情况有出入,仅供参考。

本书由芦建明和罗闯编写。在编写过程中参阅了大量专业书籍和报刊上的专题文章,书末列出了参考文献,在此向所有作者表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,得到了武汉地铁公司、南京地铁运营分公司、上海申通公司培训部、广州地铁公司等单位及武汉铁路司机学校的大力帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间紧促,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2010 年 8 月

## 目 录

绪 论	1
-----	---

## 上篇 列车牵引计算

第一章 动车牵引力	5
第一节 动车牵引力概述	5
第二节 动车牵引力的产生、计算和传递	10
第三节 黏着限制、动轮空转及改善方法	12
第四节 动车牵引特性	16
复习思考题	17
第二章 电客车运行阻力	18
第一节 阻力概述	18
第二节 基本阻力	20
第三节 附加阻力	23
第四节 减小电客车运行阻力的措施	28
复习思考题	28
第三章 电客车制动力	29
第一节 制动力概述	29
第二节 闸瓦制动力的产生和计算	34
第三节 动力制动力的产生和计算	38
复习思考题	40
第四章 电客车运动方程式	41
第一节 作用于列车的合力及合力曲线	41
第二节 电客车运动方程式及应用	44
第三节 牵引运行模式的选择	46
复习思考题	47

## 下篇 列车操纵

<b>第五章 地铁运行安全与行车管理基础</b> .....	48
第一节 安全基本知识.....	48
第二节 地铁列车运行安全.....	54
第三节 行车管理基础.....	59
第四节 驾驶员个性心理与调适.....	64
复习思考题.....	70
<b>第六章 电客车司机乘务作业标准</b> .....	71
第一节 出乘准备与出勤.....	71
第二节 列车出库前检查（静态检查）.....	73
第三节 列车功能试验.....	78
第四节 出、入车场及正线作业标准.....	84
复习思考题.....	95
<b>第七章 列车操纵</b> .....	96
第一节 列车操纵概述.....	96
第二节 轻轨列车操作及驾驶.....	98
第三节 地铁列车操作及驾驶.....	112
第四节 车辆调试与洗车作业.....	127
第五节 调车作业与工程车开行.....	129
复习思考题.....	136
<b>第八章 列车故障处理</b> .....	137
第一节 排故基本知识.....	137
第二节 电客车故障应急处理指南.....	141
第三节 地铁列车常见故障处理.....	150
第四节 轻轨客车正线运营故障应急处理.....	166
复习思考题.....	173
<b>第九章 非正常行车组织及事故处理</b> .....	175
第一节 非正常情况下行车组织.....	175
第二节 列车突发事件的处理.....	183
第三节 正线列车救援.....	187

---

---

第四节 行车事故与事故案例分析·····	191
复习思考题·····	196
附录 1 地铁、轻轨司机通用知识问答·····	197
附录 2 电客车司机(中级工)应知应会·····	205
附录 3 电客车司机(高级工)应知应会·····	213
附录 4 缩略语对照表·····	222
附录 5 专业用语说明·····	223
附录 6 站间电话闭塞法组织行车时车站接发车作业程序·····	224
附录 7 正线呼唤应答用语·····	226
附录 8 车场内呼唤应答用语·····	227
参考文献·····	228

# 绪 论

## 一、学习列车牵引与操纵的目的

社会的文明与进步，推动着城市的繁荣与发展。大城市的公共交通是城市活力和投资环境的一个重要标志，也是确保居民正常工作、学习、生活的重要手段。随着科学技术的发展和城市化进程的加快，大运量的轨道交通在现代大城市中起着越来越重要的作用，发达国家的城市交通发展历史告诉我们，只有采用大客运量的地铁和轻轨交通系统，才能从根本上改善城市公共交通状况。我国的北京、上海、深圳、广州等特大型城市的地铁运营实践则有力地证明了这一点。

我国经济的快速发展，使一些大城市具备了发展城市轨道交通的经济实力。特别是近年来，武汉、南京、成都、杭州等城市先后修建了轻轨或地铁。城市轨道交通正如雨后春笋般蓬勃发展，成为一座城市发展的标志与名片。城市轨道交通是一个庞大而又复杂的系统，作为其主要技术工种之一的电客车司机，一年四季，无论是酷暑，还是寒冬，总是驾驶着列车行驶在城市旅客运输线上，而驾驶人员的理论知识与操作技能与安全、正点、优质、高效地完成旅客运输任务关系极大。因此，如何科学地使用城市轨道交通车辆，掌握它的运行规律，充分发挥它的效能，以提高列车运用质量和运行速度，安全正点地完成运输任务，是我们必须研究的课题。学习“列车牵引计算与操纵”这门课程，有助于我们了解和掌握列车的牵引性能、运行规律和有关操纵知识，正确及时地判断和处理车辆故障。这样才能合理运用动车功率，正确的操纵和爱护车辆，安全正点、多快好省地完成旅客运输任务。

## 二、本课程的内容和任务

本课程是一门与实际密切结合的实用性、综合性学科。它是在熟知行车安全规章、车辆构造、牵引控制、制动技术、电机电器等专业知识的基础上，研究影响电客车运行的各种因素，认识电客车运行规律，从而达到提高电客车经济性和运用效率，发挥车辆效能的目的。

《城市轨道交通列车牵引与操纵》一书分上下两篇：列车牵引计算和列车操纵。

上篇“列车牵引计算”专门研究列车在外力作用下沿轨道运行的规律及其有关问题。它以力学为基础，以科学实验和先进操纵经验为依据，分析列车运行过程中的各种现象和原理，



进而解决一系列与列车运行有关的实际问题。其主要内容包括：运用有关知识，分析、研究动车牵引力、列车阻力、列车制动力产生的原因、过程、变化规律及其对列车运动的影响；了解和掌握在各种力的相互作用下，电客车运行的一般规律。这是使电客车司机站在一个较高的起点上，提高操纵技术，充分发挥列车效能，熟练平稳地操纵列车的理论基础。

下篇“列车操纵”以牵引理论为依据，系统介绍了司机在操作前必须进行的规范作业和对车辆系统检查的目的和任务，在正线或车辆段区域驾驶列车时所需要的信息，所有操作部件及其功能，列车有效操作模式的渐进步骤，以及在应急情况下可采取的措施和处理方法。设置“列车操纵”，是为了使学生全面掌握车辆运用、电客车司机一次作业标准、列车驾驶操纵、列车检查、故障应急处理等基本知识，提高分析问题和综合运用专业知识的能力，培养良好的专业心理素质，以便在较短时间内适应电客车司机的特殊要求，掌握电客车运用的特殊规律，成为技术水平高、应变能力强的地铁司机。

需要说明的是，随着我国经济和国内轨道交通技术的飞速发展，许多大中城市都开始规划和发展地铁和轻型轨道交通，超前的发展使得城市轨道交通的牵引理论研究显得滞后。现有的《列车牵引计算规程》（以下简称《牵规》）和《机车操作规程》是主要针对普通铁路线路和机车车辆设备的技术规范。针对城市轨道交通，目前有相对较少的牵引计算模型和软件，但是没有自己的《牵规》和《机车操作规程》。由于城市轨道交通与普通铁路都是轨道交通，服从轮轨运动学的普遍规律，因而现阶段城市轨道交通系统在作一般牵引计算时，仍然借鉴和参照普通铁路《牵规》的计算公式和计算方法。但在分析事故或精确计算时，不能直接将《牵规》应用于地铁和轻轨，而需要进行专门的研究和专题计算。因此，开展包括城市轨道交通牵引计算在内的城市轨道交通理论研究有较大的理论意义和现实意义。

铁路领域的牵引计算研究已经取得了丰硕的成果，如铁道部科学研究所的牵引电算软件、北方交通大学饶忠教授的列车牵引计算、西南交通大学朱金陵等人的列车牵引计算及操纵示意图计算机软件等，其中前者在铁路行业得到了普遍的应用。但是列车牵引计算在城市轨道交通方面的应用与发展与在干线铁路方面的应用与发展之间还存在一定的差异，使得有必要加强城市轨道交通这一领域的牵引计算问题的研究。

### 三、列车牵引计算的用途

列车牵引计算的用途体现在以下诸多方面：

#### 1. 铁路运输

为了使铁路运输做到高速、重载、安全、高效，在每年修订列车运行图时都要进行大量的牵引计算和必要的牵引试验。列车运行图中的区间纯运行时分、区间（区段）目标速度、列车牵引质量、限制坡度、制动能力等运营必需的技术数据，需要由列车牵引计算和牵引试验来确定。

## 2. 车辆运用

除了配合运输方面做好上述工作外,为了节约能源、优化操纵,也必须通过牵引计算寻找最佳操纵方案,为车辆运用、司机学习指导提供有力的支持和帮助。

## 3. 选线设计

为了计算通过能力和输送能力、布置车站和车辆段、确定线路平纵断面、安排车辆交路,在进行线路设计时,有必要进行牵引计算。不同的线路,其坡度条件是不同的,不同的坡度条件直接影响到牵引计算的结果。通过比较不同线路的计算结果,可以选择合适的线路,使其满足输送能力和通过能力的要求,达到近期和远期运营目标。

## 4. 通信信号

为了合理布置轨道信号设备,必须进行牵引计算。通信信号设备的位置不同,可能使得线路的限速位置发生变化,从而影响牵引计算的结果。反过来,通过改变通信信号设备的布局,可以产生不同的牵引计算结果,从中选择合适的通信信号布局也是进行牵引计算的依据。

## 5. 运输经济

计算设备投资和运营支出时,需要进行各种方案的经济比较选择,这也需要进行牵引计算甚至牵引试验。

从前面的论述可以知道,牵引计算的结果影响到运行图铺画、车辆运用、线路选择以及通信信号设置等,因此从牵引试验或牵引计算中得到基本的技术参数,是进行线路技术经济比较、可行性研究的基础。

# 四、牵引计算符号的制定原则

在列车牵引计算中,为了便于表达物理量之间的数学关系,并便于今后的书写、阅读、校对和记忆,严格规定以一定的符号代表一定的物理量。所用符号是按下列基本原则制定的:

(1) 按照《牵规》的规定选取,尽量符合国际标准和国家标准,并适当照顾过去的使用习惯。

(2) 一般用拉丁字母表示有单位的量,用希腊字母表示无单位的量。量符号必须用斜体印刷。

(3) 为了便于区别不同条件或不同使用范围等情况下的同一物理量,用下角标作为区别标志。下角标尽量采用国际通用的,若没有国际通用的,选用汉语拼音字母。

各主要的量的名称、符号、单位及取值规定,将在以后各章节中陆续介绍。

# 五、作用于列车上的力和操纵的关系

地铁列车的启动、运行、停车,都是作用在列车上的力使其运行工况发生变化。弄懂了

这些力的形成以及影响这些力的因素，掌握这些力的变化规律，就能用来合理地操纵列车，做到起车稳、加速快、无冲动、不空转。

列车在运行中，受着各种力的作用，但本书只研究与列车运行方向平行且和列车运行有关的外力，这些力分为以下三种：

- (1) 动车牵引力  $F$ ；
- (2) 列车运行阻力  $W$ ；
- (3) 列车制动力  $B$ 。

上述三种力在一般情况下并不是同时存在的，而是在列车的不同工况下以下列组合形式之一作用在列车上：

动车牵引运行时，有动车牵引力和列车运行阻力；

动车惰力运行时，只有列车阻力；

列车制动运行时，有列车制动力和列车阻力。（动力制动时，动车有制动力，而拖车没有；摩擦制动时，全列车均有制动力。）

列车在上述每一工况下受到的作用力的代数和称为作用于列车上的合力，以大写  $C$  表示。它决定着列车运行的性质——列车的加速、减速或停车。因此，了解作用于列车上的各种外力的形成和变化规律，是研究列车运动的基础。

动车牵引力是可以控制的使列车前进的外力，而列车阻力是客观存在的阻止列车前进的外力，这两个力的大小和方向决定了列车的加速或减速。动车牵引列车运行的过程，就是用动车牵引力克服列车阻力的过程。列车制动力是由人工控制的使列车减速或停车的外力。

司机操纵列车，就是控制作用于列车的力，人为改变动车牵引力和列车制动力的大小，以适应列车运行的要求；同时做到充分利用动车功率，最大限度地节省能源，全面地完成旅客运输任务。

# 上篇 列车牵引计算

## 第一章 动车牵引力

### 本章提要

- (1) 基本概念：黏着与蠕滑、摩擦力与黏着定律。
- (2) 牵引力的分类、产生过程，黏着系数，黏着牵引力计算。
- (3) 动轮空转：空转的危害及改善方法，提高黏着牵引力的措施。
- (4) 动车牵引特性。

### 第一节 动车牵引力概述

#### 一、城市轨道交通车辆的运用特点

城市轨道交通车辆的牵引力来自于动车，而拖车没有牵引力，所以称之为动车牵引力。从牵引电气化、自动化角度来看，城市轨道交通列车（简称电客车）和普通铁路的电力机车都是由受流器接受来自接触网的电能，再在控制系统的指挥下，经主回路、牵引电机将电能转换为驱动列车所需的机械能，并且在必要时使车辆实施制动。但为了满足城市公众对大容量快速交通的需求，主要在市內和市郊运行的城市轨道交通车辆，需要在地下隧道、高架和地面轨道运行，而且具有如下特点：站距短，线路曲线半径小，坡度大；客流量大而集中，乘客上下车频繁，高峰时可能严重超载；为了尽量缩短乘客的乘坐时间，要求有较高的运行速度，特别是较大的启动加速度和制动减速度；传动系统应效率高、能耗少，尽量减少发热，减轻自重；控制系统应可靠、精确，并有良好的适应能力；对乘坐舒适性和对城市环境无公

害的要求也越来越高。因此，城市轨道交通相对于普通铁路运输在编组形式、动力配置、铁路线路、操纵方式上仍有一定的区别。这些区别如下：

### 1. 列车动力配置与编组形式不同

对于中国铁路而言，普通客运列车动力集中在一个或两个机车上，编组辆数一般为 14~20 辆，编组辆数比较灵活，运营过程中，可以随着客流量的变化而调整。而城市轨道交通的列车一般是动力分散的，编组辆数一般为 4~8 辆，在运用过程中，列车编组基本固定。动力分散型与动力集中型两者不同的特性以及编组辆数的不同，决定了两种轨道交通在列车启动加速性能、爬坡性能、调速制动性能等控制性能上的差异。因此，在理解相关概念时要注意上述两者的区别。

### 2. 区间长度短、线路纵横断面变化大

城市轨道交通为了方便人们出行，市区站间距为 0.8~1.8 km，市郊线路站间距为 1~3 km，远远小于普通铁路的站间距。另外，坡度变化较大，20%左右的大上坡及大下坡较普通铁路多，造成线路附加阻力较大；曲线半径较小，一般在 1 000 m 以下，甚至困难地段有 300 m 以下的曲线半径。因此，城市轨道交通的线路条件，决定了地铁列车在运行中存在启动频繁、启动加速和制动减速快、目标速度低等特点。

### 3. 城轨列车紧急制动距离短、操纵要求更加严格

普通铁路的普速列车在一般条件下的紧急制动距离规定为 800 m，地铁列车在一般条件下的紧急制动距离是 180 m。同时，地铁列车要体现公交的特点，对乘坐舒适要求较高，运行要平稳。它的制动方式主要是电制动与闸瓦制动相结合的形式，对停站要求更严格，要停得准、停得稳。实际的停站误差在米级甚至在 20 cm 以下。因此，城市轨道交通对列车操纵方式的要求更加严格。

城市轨道交通电力牵引系统荟萃了电力电子、计算机检测与控制、电机与电器制造等多学科的先进技术，正朝着智能化、模块化、轻量化、节能型、免维修方向发展。特别是地铁列车，普遍具有自动保护 (ATP)、自动驾驶 (ATO)、自动监控 (ATS) 等功能，其对安全性、舒适性以及正点率都有较高要求，这些都对城市轨道交通车辆运用提出了更高的标准。

## 二、动轮与钢轨间的黏着

轨道交通很早就作为公共交通在城市中出现了。目前，绝大多数城市轨道交通车辆属于钢轮钢轨式，其运行的任何一种工况，都依赖于车轮和钢轨的相互作用力。

在钢轮钢轨式城市轨道交通车辆中，牵引动力由牵引电动机通过传动机构，传递给动车的动力轮对（动轮），由车轮和钢轨的相互作用，产生使车辆运动的反作用力。根据物理学中关于摩擦的概念，轮轨之间的切向作用力就是静摩擦力。最大静摩擦力是钢轨对车轮的反作用力的法向分力与静摩擦系数的乘积。但实际上，动轮与钢轨间切向作用力的最大值比物理

学上的最大静摩擦力要小一些,情况也更复杂一些。在分析轨道车辆的轮轨相互作用时,通常引入两个十分重要的概念:“黏着”和“蠕滑”。

### (一) 黏 着

图 1.1 所示为动车以速度  $v$  在平直线路运行时一个动轮对的受力情况(忽略内部各种摩擦阻力)。为了更清楚地表示,图中将接触的动轮与钢轨稍稍分开画出。

$Q_i$  为一个动轮对作用在钢轨上的正压力,又称为轮对的轴重。牵引电动机作用在动轮上的驱动转矩  $M_i$ ,可以用一对力形成的力偶代替。力  $F_i'$  和  $F_i$  分别作用在轮轴中心的  $O$  点和轮轨接触处的  $O'$  点,其大小为  $F_i = F_i' = M_i / R_i$ ,  $R_i$  为动轮半径。

在正压力  $Q_i$  的作用下,车轮和钢轨的接触部分紧压在一起。切向力  $F_i$  使车轮上的  $O'$  点具有向左运动的趋势,并通过  $O'$  点作用在钢轨上。 $f_i'$  表示车轮作用在钢轨上的力,其大小  $f_i' = F_i$ 。由于轮轨接触处存在着摩擦,车轮上  $O'$  向左运动的趋势将引起向右的静摩擦力  $f_i$ ,即钢轨对车轮的反作用力,

其大小  $f_i = f_i'$ ,  $f_i$  称为轮周牵引力。因此,车轮上的  $O'$  点受到两个相反方向的力  $f_i$  和  $F_i$  的作用,而且

$$f_i = F_i \quad (1.1)$$

所以,  $O'$  点保持相对静止,轮轨之间没有相对滑动。在力  $F_i'$  的作用下,动轮对作纯滚动运动。

由于正压力而保持动轮与钢轨接触处相对静止的现象称为“黏着”。黏着状态下的静摩擦力  $f_i$  又称为黏着力。

轮轨间的黏着与静力学中的静摩擦的物理性质十分相似。驱动转矩  $M_i$  产生的切向力  $F_i$  增大时,黏着力  $f_i$  随之增大,并保持与  $F_i$  相等。当切向力  $F_i$  增大到某一数值时,黏着力  $f_i$  达到最大值。此后切向力  $F_i$  如再继续增大,  $f_i$  反而迅速减小。试验证明,黏着力最大值  $f_{\max}$  与动轮对的正压力  $Q_i$  成正比,其比例常数称为“黏着系数”,用  $\mu$  表示,即

$$\mu = \frac{f_{\max}}{Q_i} \quad (1.2)$$

式 (1.2) 表明,在轴重一定的条件下,轮轨间的最大黏着力由轮轨间黏着系数的大小决定。当轮轨间出现最大黏着力时,若继续加大驱动转矩,一旦切向力  $F_i$  大于最大黏着力,动轮上的  $O'$  将向左移动,轮轨间出现相对滑动,黏着状态被破坏,动轮与钢轨的相对运动由纯滚动变为既有滚动又有滑动。此时钢轨对动轮的反作用力  $f_i$  由静摩擦力变为滑动摩擦力,其

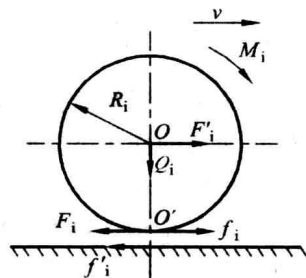


图 1.1 动轮对受力分析

值迅速减小，并使动轮的转速上升。这种因驱动转矩过大，破坏黏着关系，使轮轨间出现相对滑动的现象，称为“空转”。动轮出现空转时，轮轨间只能依靠滑动摩擦力传递切向力，传递切向力的能力大大削弱，同时造成动轮踏面和轨面的擦伤。因此，牵引运行应尽量防止出现动轮的空转。

黏着系数是由轮轨间的物理状态确定的。加大每轴的正压力，即轴重，可以提高每轴牵引力，但轴重要受到钢轨、路基、桥梁等的限制。动力分散型的城市轨道交通车辆，动轴数较多，很容易达到整列车所需的牵引力，因而轴重较小，这对保护轮轨的正常作用是有利的。

## (二) 蠕滑

分析牵引工况轮轨接触处的弹性变形，可以进一步深化对黏着的认识。如图 1.2 所示，在动轮正压力的作用下，轮轨接触处产生弹性变形，形成椭圆形的接触面。从微观上看，两接触面是粗糙不平的。由于切向力  $F_t$  的作用，动轮在钢轨上滚动时，车轮和钢轨的粗糙接触面产生新弹性变形，接触面间出现微量滑动，即“蠕滑”。

蠕滑的产生是由于在车轮接触面的前部产生压缩，后部产生拉伸，而在钢轨接触面的前部产生拉伸，后部产生压缩。车轮上被压缩的金属，在接触表面的前部与钢轨被拉伸的金属相接触。随着动轮的滚动，车轮上原来被压缩的金属陆续放松，并被拉伸，而钢轨上原来被拉伸的金属陆续被压缩，因而在接触面的后部出现滑动。

轮轨接触面存在两种不同区域：接触面的前部，轮轨间没有相对滑动，称为滚动区，在图 1.2 中用阴影线表示；接触面的后部，轮轨间有相对滑动，称为滑动区。这两个区域的大小随切向力的变化而变化。当切向力增大时，滑动区面积增大，滚动区面积减小。当切向力增大到一定程度时，滚动区面积变为零，整个接触面间出现相对滑动，轮轨间的黏着被破坏，即出现空转。

蠕滑是滚动体的正常滑动。动轮在滚动过程中必然会产生蠕滑现象。伴随着蠕滑产生静摩擦力，轮轨之间才能传递切向力。由于蠕滑的存在，牵引时动轮的滚动圆周速度将比其前进速度高。这两种速度的差称为蠕滑速度，蠕滑的大小用蠕滑率  $\sigma$  表示：

$$\sigma = \frac{\omega R_1 - v}{v} \quad (1.3)$$

式中  $v$ ——动轮的前进速度；  
 $\omega$ ——动轮转动的角速度。

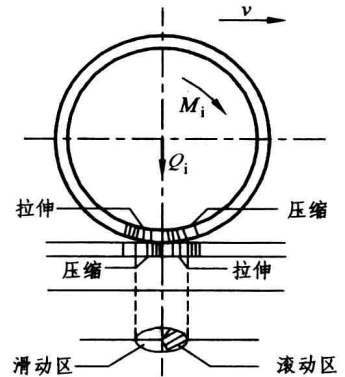


图 1.2 牵引工况轮轨接触处的弹性变形

轮轨间由于摩擦产生的切向力反过来作用于驱动机构。随着切向力的增大，驱动机构内的弹性应力也增大。当切向力达到极限时，由于蠕滑的积累波及整个接触面，发展为真滑动。积累的能量使车轮本身加速，这时驱动机构内的弹性应力被解除。由于车轮的惯性和驱动机构的弹性，在轮轨间出现滑动→黏着→再滑动→再黏着的反复振荡过程，一直持续到重新在驱动机构中建立起稳定的弹性力为止。

### 三、动车牵引力的分类

城市轨道交通电客车的牵引力来自于其中的各个动车。动车的本质是一个能量转换机构，它通过牵引电动机，将电能转换为机械能，传递到动车的动轮上，动轮通过与钢轨的接触和摩擦，产生对钢轨的作用力，同时钢轨对于动轮有一个与动车运动趋势方向相同的反作用力，造成动车的启动和加速运动。目前，世界上的地铁和轻轨一般采用电力拖动作为电客车的动力。

#### （一）按照动车变能部分的能力划分

由上述讨论得知，动车牵引力的形成，须经过两个主要的连续阶段来实现：牵引电机将电能变为机械能；传动装置将机械能变为动车动轮周的内机械功，依靠轮轨间的黏着条件，实现了动轮周的内机械功转变为动车轮周牵引力。

根据动车变能的顺序，得到两个牵引力概念：

- （1）牵引电动机牵引力——按牵引电动机容量所能得到的牵引力。
- （2）黏着牵引力——根据动车动轮与钢轨间的黏着能力而确定的最大牵引力。

以上两种牵引力，分别属于牵引电机、轮轨间的黏着条件这两个变能部分。这两个变能部分都有一定的变能能力，二者能力相匹配，对于一台动车来说是比较理想的，否则，动车牵引力就要受到能力最小者的限制。

#### （二）按照机械功传递过程中的不同作用点划分

（1）指示牵引力  $F_i$ ：在动轮转动一周所做的功等于牵引电机轴上的机械功的条件下，计算得到的牵引力，即不计传动装置机械损失的情况下，所得到的牵引力。

（2）轮周牵引力  $F$ ：在动轮转动一周所做的功等于牵引电机轴上的机械功减去动轮转动一周内传动装置的阻力功的条件下，所得到的牵引力，即作用在动轮周上的牵引力。显然，轮周牵引力等于指示牵引力与传动装置效率  $\eta$  的乘积。

$$F = F_i \eta \quad (\text{kN}) \quad (1.4)$$



(3) 车钩牵引力  $F_g$ : 作用在动车车钩上的力, 其值等于轮周牵引力减去动车运行阻力。  
即

$$F_g = F - W' - am_m \quad (\text{kN}) \quad (1.5)$$

式中  $W'$ ——动车车身阻力 (kN);

$m_m$ ——动车质量 (t);

$a$ ——动车加速度 ( $\text{km/h}^2$ )。

当  $a=0$  时

$$F_g = F - W'$$

即电客车匀速运行时, 车钩牵引力等于电客车总阻力。由于车钩牵引力的作用点是在动车车钩上, 动车运行时, 为克服其自身阻力, 以及各种附加阻力, 不可避免地要消耗一部分轮周牵引力, 所以, 车钩牵引力永远小于轮周牵引力。

综上所述, 可得出结论:

$$F_i > F > F_g$$

我国及一些国家, 以轮周牵引力为计算标准, 用来衡量和表示动车牵引力的大小。

## 第二节 动车牵引力的产生、计算和传递

与在轨道上运行的列车接触的主要是空气、受流器和钢轨, 真正能使列车运动和加速的外力, 目前只能来自于钢轨 (轮轨接触点)。不论是电能还是燃料的化学能都是通过动力传动装置的作用最终转变成机械能, 并传递到动轮上。但是, 动力传动装置作用在动轮上的力矩是车辆的内力矩。如果动轮不压在钢轨上, 那么, 动轮只能自身旋转, 而不能使车辆运动。因此, 使车辆沿轨道运行的外力肯定来自钢轨和轮周。这个力的产生必须具备下列两个条件: ① 动轮与钢轨接触并存在黏着作用; ② 动轮上有动力传动装置传来的旋转力矩。所以称由动力装置引起的与列车运行方向相同的外力为牵引力。

### 一、牵引力的产生和计算

传动装置中的主动齿轮轴通过联轴节与电机轴固定在一起, 从动齿轮固定在车轴上, 而主动齿轮、从动齿轮是相互啮合的。如图 1.3 所示, 当牵引电动机得电输出力矩  $M_d$  时, 首先经联轴节传递到主动齿轮上, 因此, 在轮齿啮合点上, 主动齿轮给从动齿轮一个推力  $P_0$ :