

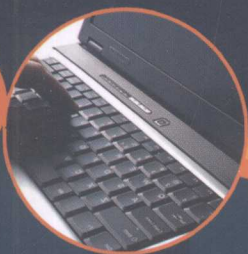


高等轨道交通
系列教材

LIECHE YUNXING
JISUAN YU SHEJI

列车运行 计算与设计

丁 勇 / 主编



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等教育城市轨道交通系列教材

列车运行计算与设计

丁 勇 主编

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书依据《列车牵引计算规程》(TB/T 1407—1998),全面系统地阐述了轨道交通列车运行计算与设计的理论与方法,主要内容包括:电力、内燃机车牵引力的产生过程及机车牵引特性;列车牵引力、运行阻力及制动力的计算;列车运动方程推导及其应用;列车运行速度时分与制动问题解算;列车牵引质量与运行能耗的计算;列车运行计算的计算机仿真方法及国内外典型列车运行计算仿真软件系统;最后应用计算仿真系统对城轨列车运行进行计算与设计。

本书可作为交通运输、铁道工程、机车车辆专业及相关专业的本科生、专科生的教材或教学参考用书,并可供轨道交通部门相关技术人员参考使用。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

列车运行计算与设计/丁勇主编. —北京:北京交通大学出版社,2011.8

高等教育城市轨道交通系列教材

ISBN 978-7-5121-0719-9

I. ①列… II. ①丁… III. ①列车-运行-计算-高等学校-教材 ②列车-运行-设计-高等学校-教材 IV. ①U292.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第176003号

责任编辑:贾慧娟 陈跃琴

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:北京泽宇印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:12 字数:300千字

版 次:2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-0719-9/U·72

印 数:1~2500册 定价:25.00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。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

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

《高等教育城市轨道交通系列教材》

编 委 会

顾 问：施仲衡

主 任：陈 庚

副 主 任：朱晓宁 司银涛 章梓茂

委 员：郑光信 毛保华 韩宝明

赵晓波 贾慧娟 李 菊

本书主编：丁 勇

《城市轨道交通专业教材系列》出版说明

会 委 员 会

为促进城市轨道交通专业教材体系的建设,满足目前城市轨道交通专业人才培养的需要,北京交通大学交通运输学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究、教学的一线老师为主体、联合其他交通院校教师,并在北京地铁公司、广州市地下铁道总公司、南京地下铁道有限责任公司、北京市轨道交通建设管理有限公司、香港地铁公司等单位有关领导和专家的大力支持下,编写了本套“高等教育城市轨道交通系列教材”。

教材编写突出实用性,本着“理论部分通俗易懂,实操部分图文并茂”的原则,侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者,本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式,配套有教学课件、习题库、自学指导书,并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本系列教材的出版受到施仲衡院士的关注和首肯,多年从事城市轨道交通研究的毛保华教授和朱晓宁教授对本系列教材的编写给予具体指导,《都市快轨交通》杂志社主办和协办单位专家也给予本系列教材多方面的帮助和支持。在此一并致谢。

本系列教材自2011年8月起陆续推出,首批包括:《城市轨道交通设备》、《列车运行计算与设计》、《城市轨道交通系统运营管理》、《城市规划》、《轨道交通需求分析》、《交通政策法规》、《城市轨道交通规划与设计》、《企业发展战略》、《城市轨道交通土建工程》、《城市轨道交通车辆概论》、《城市轨道交通牵引电气化概论》、《城市轨道交通通信信号概论》、《城市轨道交通列车运行控制》、《城市轨道交通信息技术》、《城市轨道交通运营统计分析》、《城市轨道交通安全管理》、《交通运营统计分析》、《城市轨道交通客流分析》、《城市轨道交通服务质量管理》、《轨道交通客运管理》。

希望本套“高等教育城市轨道交通系列教材”的出版对城市轨道交通的发展、对城市轨道交通专业人才的培养有所贡献。

教材编写委员会

2011年6月

序

近年来,中国经济飞速发展,城市化进程逐步加快。在大城市中,地面建筑越来越密集,人口越来越多,交通量越来越大,交通拥堵对社会效益和经济效益都带来了很大影响。据统计国内每年由于交通拥堵造成的损失将近一千多亿元。

解决交通拥堵,有各种各样的方法,其中城市轨道交通由于在土地利用、能源消耗、空气质量、景观质量、客运质量等方面的优势,正逐步成为许多大城市交通发展战略中的骨干,并形成以地铁、城市快速铁路、高架轻轨等为主的多元化发展趋势。

我国城市轨道交通从20世纪50年代开始筹划。1965年7月,北京市开始兴建中国第一条地下铁道。经过近50年,特别是近十年的发展,截至2010年底,仅在中国内地,已有13个城市拥有49条运营线路,总里程达1425.5km。另有16个城市,总计96条、2000余公里的线路正在建设中。目前已发展和规划发展城市轨道交通的城市总数已经接近50个,全部规划线路超过300条,总里程超过10000km。

随着城市轨道交通在全国范围的迅猛发展,各地区均急需轨道交通建设、运营管理的大批技术人员和应用型人才。目前全国有近百所高等院校和高等职业院校开设或准备开设城市轨道交通及相关专业。全国几十家相关企业,也都设立自己的培训中心或培训部门。

从目前的情况来看,在今后几年城市轨道交通人才的培养应该是各大专院校的学历教育与企业、社会的能力培训相结合的状态。但现实情况是相关的教材,特别是培养应用型人才的优质教材、教学指导书的建设和出版严重不足,落后于城市轨道交通发展的需要。

2011年初,北京交通大学远程与继续教育学院、交通运输学院和北京交通大学出版社共同筹划出版了“高等教育城市轨道交通系列教材”。这套教材的出版,恰逢其时。首先,这套教材的作者是由国内该领域的学术界和企业界的知名专家执笔。他们的参与,既保证了对中国轨道交通探索与实践的传承,同时也突出了本套教材的实用性。其次,它丰富、实用的内容和多样性的课程设置,为行业内“城市轨道交通”各类人才的培养,提供了专业的、实用的教材。

祝愿中国轨道交通事业蓬勃发展,也祝愿北京交通大学出版社这套“高等教育城市轨道交通系列教材”能够为促进我国城市轨道交通又好又快发展提供支撑!

中国工程院院士

张仲衡

2011年5月

前 言

当前,我国已经进入了轨道交通快速发展的时期。截至2010年底,我国已有13个城市建成城市轨道交通并投入运营,运营总里程达1 425.4 km,另有16个城市已开工建设城市轨道交通。未来,我国将拥有超过5 000 km地铁、轻轨等的庞大城市轨道交通网络。2010年底,全国铁路营业里程达到9.10万公里,居世界第二;高铁投入运营里程达8 358 km,高速铁路运营里程高居世界第一。根据国家《中长期铁路网规划》,到2020年,全国铁路营业里程达到10万公里,建设客运专线1.2万公里以上,客车速度目标值达到200 km/h以上。

随着轨道交通建设的蓬勃发展,各种类型轨道交通技术装备的不断涌现,带来了一系列轨道交通设计与运营的新问题。列车运行计算作为轨道交通设计与运营部门必不可少的一门应用科学,其应用范围与发挥的作用也逐渐扩大与加强,它也成为轨道交通企业广大工程技术人员必须掌握的科学知识。本书是笔者多年来关于列车运行计算学科研究与教学的成果总结,在本书中,系统阐述了以下内容:列车的牵引、制动特性,牵引力、阻力及制动力的计算,列车运动方程,列车速度时分与制动问题解算,列车牵引质量、能耗的计算。此外,本书还介绍了当前国内外最著名的列车运行仿真计算系统,探讨了基于仿真计算的城轨列车运行设计与案例。

为方便读者学习和理解,每章前面都有学习重点及主要内容介绍,后面都附有思考题与作业题。根据笔者多年的教学经验,每章均提供了大量的例题,并在书后附有两套模拟试题,供读者学习与自测使用。

本书在编写过程中,得到了北京交通大学交通运输学院的毛保华教授、刘海东副教授、陈绍宽副教授、陈建华老师、王保山老师以及栢贇博士后、周方明博士的支持与帮助,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中会有缺点和不足之处,衷心地希望广大读者批评指正。

丁 勇

2011年4月

目 录

第1章 绪论

1.1 学科性质与内容	2
1.2 列车牵引计算规程	2
1.2.1 发展历程	2
1.2.2 主要内容	3
1.3 列车运行计算方法与技术的进展	4
1.4 列车运行过程受力分析	5
1.4.1 影响列车运行过程的因素	5
1.4.2 列车运行过程计算模型	6

第2章 列车牵引力

2.1 牵引力的形成及分类	8
2.2 粘着牵引力	9
2.2.1 轮轨间的摩擦	9
2.2.2 轮轨间的粘着	10
2.2.3 粘着牵引力计算	10
2.3 内燃机车的牵引特性与计算标准	12
2.3.1 内燃机车牵引特性	12
2.3.2 内燃机车牵引力计算标准	13
2.3.3 内燃机车牵引力计算修正	22
2.4 电力机车的牵引特性与计算标准	24
2.4.1 电力机车牵引特性	24
2.4.2 电力机车牵引力计算标准	25
2.5 牵引力计算的线性插值法	35

第3章 列车运行阻力

3.1 概述	38
3.2 基本阻力	38
3.2.1 基本阻力的分析	38
3.2.2 基本阻力的计算	41
3.3 起动阻力	44
3.4 附加阻力	45

3.4.1 坡道附加阻力	45
3.4.2 曲线附加阻力	46
3.4.3 隧道附加阻力	47
3.4.4 加算附加阻力	48
3.4.5 考虑列车长度的附加阻力计算	49
3.4.6 其他附加阻力	50
3.5 列车运行阻力计算	50

第4章 列车制动力

4.1 制动力的概念	54
4.2 列车制动方式	54
4.3 列车制动力的形成及限制	55
4.3.1 制动力的形成	55
4.3.2 制动力的限制	56
4.4 闸瓦摩擦系数	57
4.4.1 影响闸瓦实算摩擦系数的因素	57
4.4.2 计算闸瓦摩擦系数的经验公式	58
4.5 闸瓦压力计算	59
4.5.1 计算公式	59
4.5.2 基础制动装置计算传动效率 η_x	60
4.5.3 紧急制动时制动缸的空气压力	60
4.5.4 常用制动时制动缸的空气压力	61
4.5.5 列车管有效减压范围	61
4.6 列车制动力计算	62
4.7 列车制动力的实算法	63
4.8 列车制动力的换算法	63
4.9 列车制动力的二次换算法	71
4.10 机车动力制动力	74
4.10.1 机车动力制动力及其限制	75
4.10.2 动力制动特性曲线与数据表	76
4.10.3 动力制动控制	79

第5章 列车运动方程与速度时分计算

5.1 列车合力与单位合力计算	82
-----------------------	----

5.2 列车合力曲线图绘制	84
5.2.1 单位合力曲线图的绘制	84
5.2.2 单位合力曲线图的应用	87
5.3 列车运动方程	89
5.4 计算列车运行速度、时分的分析法	91
5.5 计算列车运行速度、时分的图解法	92
5.5.1 速度-距离曲线 $v=f(S)$ 的 绘制	93
5.5.2 时间-距离曲线 $t=f(S)$ 的 绘制	97
5.5.3 列车速度-距离及时分-距离 曲线图	98
5.6 线路纵断面化简	99

第6章 列车制动问题解算

6.1 列车制动问题	105
6.2 制动距离及其计算	106
6.2.1 空走距离与空走时间的计算	107
6.2.2 有效制动距离的计算	108
6.2.3 列车制动距离计算例题	112
6.3 列车紧急制动限速计算	114
6.4 列车所需换算制动率计算	115
6.5 列车紧急制动限速表及其应用	117

第7章 牵引质量确定

7.1 概述	127
7.2 牵引质量的计算	127
7.2.1 按限制坡度计算	127
7.2.2 按平直道最高运行速度下的 保有加速度计算	129
7.2.3 按起动地段的加算坡度计算	130
7.2.4 按车站到发线有效长度计算	131
7.2.5 按小半径曲线“粘降”计算	132
7.3 牵引质量的验算	132
7.3.1 按“动能闯坡”验算	132
7.3.2 按长大下坡道缓解充风时间及 制动空走时间验算	133

7.3.3 按内燃机车隧道最低限速 验算	135
7.3.4 列车追踪时间间隔的限制	135
7.4 区段内限制坡道的确定	135
7.5 牵引定数的确定	137

第8章 列车运行能耗计算

8.1 电力机车耗电量计算	139
8.2 内燃机车耗油量计算	142

第9章 列车运行计算软件系统

9.1 列车运行仿真计算	148
9.1.1 仿真计算方法	148
9.1.2 仿真计算模型	149
9.2 国外列车运行计算仿真系统	152
9.2.1 RAILSIM	152
9.2.2 RailSys	154
9.2.3 Opentrack	156
9.2.4 Dynamis	158
9.3 国内列车运行计算仿真系统	159
9.3.1 通用列车运行计算系统	159
9.3.2 牵引电算程序	162
9.3.3 城市轨道交通牵引计算系统	163

第10章 基于仿真计算的城轨列车运行设计

10.1 城轨列车运行计算	167
10.2 城轨列车运行设计	171
10.2.1 节能坡设计	171
10.2.2 列车节能运行设计	173

附录A 列车运行计算与设计模拟试题

A1 模拟试题1	180
A2 模拟试题2	180

参考文献

1

第1章 绪论

主要内容

本章介绍了“列车运行计算”学科的性质与主要研究内容，概述了《列车牵引计算规程》的发展历程、主要内容及主要物理量的单位和取值规定，分析了列车运行计算方法与技术发展的三个阶段，在探讨影响列车运行过程主要因素的基础上，介绍了列车运行过程的计算模型。

学习重点

1. 理解“列车运行计算”学科的性质与内容。
2. 了解“列车运行计算”的用途及发展。
3. 掌握“列车运行计算”主要物理量的单位及取值规定。
4. 重点掌握对列车运行有直接影响的三种力。
5. 掌握不同机车工况条件下的列车合力计算。

1.1

学科性质与内容

列车运行计算（或称列车牵引计算）是专门研究铁路列车在外力的作用下，沿轨道运行及其相关问题的实用学科。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，并以此解算铁路运营和设计上的一些主要技术问题和技术经济问题。

列车运行计算最大的特点就是理论与实际紧密结合。计算应用到的数据、图表、经验公式都是根据大量实验得出。没有实验作为基础，就没有列车运行计算学科的发展。

列车运行计算主要的研究内容包括：

- ① 作用于列车上的外力；
- ② 列车运动方程；
- ③ 列车运行速度和运行时间；
- ④ 机车牵引质量；
- ⑤ 列车制动距离、制动限速、制动能力；
- ⑦ 机车能耗。

列车运行计算学科研究的相关问题直接关系到铁路运输能力、运量、成本、效率和安全，在路网规划、选线设计、行车设备与信号布置、机车设计和选型、牵引定数确定、列车运行速度与时间计算、列车运行能耗计算、列车优化操纵、制动距离计算、确定制动限速、实施列车监控、制定安全规章和事故分析等方面，都离不开列车运行计算的理论与知识。

1.2

列车牵引计算规程

列车运行计算主要包括列车运行过程中的牵引和制动计算，该计算直接涉及铁路的运输能力和运行安全性，是制订《铁路技术管理规程》的基本依据之一。历年来《列车牵引计算规程》（简称《牵规》，下同）是我国铁路与轨道交通企业的主要技术规范，它规定了牵引计算的基本原则、方法、计算公式，并提供了大量的计算数据资料，是进行列车运行计算的依据和准则。

1.2.1 发展历程

我国先后颁布过三部牵引计算规程。早在新中国铁路创建初期的1957年，我国第一部

《牵规》就对列车蒸汽牵引和制动的计算方法作了明确的规定。此后随着我国铁路运输和牵引动力的发展,从1978年开始又由铁道部科学研究院等单位开展试验研究,对第一部《牵规》进行修订,于1983年制订并实施了第二部《牵规》。但从20世纪80年代以后,由于我国机车车辆及技术装备的迅速发展,该部《牵规》已不能适应铁路设计和运用部门的需要。因此,铁道部于1983年开始组织铁道部科学研究院等有关单位再次进行了修订工作,并于1999年开始实施第三部《牵规》(TB/T 1407—1998)。

第三部《牵规》不仅根据我国铁路机车车辆的现状,充实了各种新型机车车辆和制动装备的计算数据和方法,可以适应于客、货列车提速的计算应用,而且实现了电算方法的重大改进,包括详细电算方法和简化编组的电算方法,还有丰富的人机接口和动画显示功能,可适应于不同用户的要求。第三部《牵规》修改、补充和增加的内容包括:全面采用了新的以国际单位制为基础的国家法定计量单位制;增加了新型机车车辆的数据和曲线,修改和增加了新型内、电机车的单位基本阻力公式;修订了内、电机车粘着系数和小半径曲线粘着系数的计算公式;修订和增加了内燃机车牵引力修正系数;修订和增加牵引质量(牵引重量)计算公式;增加滚动轴承货车和新型客车的单位基本阻力公式;增加了高磷铸铁闸瓦、低摩合成闸瓦、高摩合成闸瓦和客车盘形制动闸片的摩擦系数和闸瓦压力的计算公式;修订了客、货列车制动空走时间和机车单机空走时间的计算公式;明确地规定“以电算为主”。

随着我国铁路和城市轨道交通技术装备及运用技术的快速提高和发展,《牵规》也要根据新的实验和运用经验不断地补充完善和修订。

1.2.2 主要内容

《牵规》规定了计算方法和使用数据的标准,包括:机车车辆的计算公式和图表,计算牵引质量、绘制速度线、时间线、确定区间运行时分的原则和方法等。进行列车运行计算,必须遵照《牵规》规定牵引计算方法及所用主要技术参数,《牵规》是确定牵引质量、运行速度和运行时间的依据,并且是计算机车用电、油、煤、水消耗量的基础。《牵规》适用于标准轨距1435 mm铁路列车的牵引计算。

列车运行计算过程中所涉及的所有参数的符号及计量单位均采用国家法定计量单位。主要物理量的单位及取值规定见表1-1。

表1-1 列车运行计算所用主要物理量的单位及取值规定

主要物理量的名称	单 位	取 值 规 定
区间距离	km	取至2位小数
坡段长度	m	以整数计
坡道坡度	‰	取至2位小数
牵引力、制动力	kN	取至1位小数
单位牵引力、单位阻力、单位制动力	N/kN	取至2位小数
速度	km/h	取至1位小数
牵引质量	t	取10的整倍数

续表

主要物理量的名称	单 位	取 值 规 定
区间运行时间	min	取至 1 位小数
电 流	A	以整数计
电力机车区段耗电量	kW · h	以整数计
单位时间耗电量	kW · h/min	取至 2 位小数
单位耗电量	kW · h/(万 t · km)	取至 1 位小数
内燃机车区段燃油消耗量	kg	以整数计
单位时间燃油消耗量	kg/min	取至 2 位小数
单位燃油消耗量	kg/(万 t · km)	取至 1 位小数

1.3

列车运行计算方法与技术的进展

列车运行计算以列车的纵向运动为计算对象，并以非稳态运动的牵引和制动工况作为重点，因此涉及有列车编组条件、机车车辆的牵引和制动装置、线路状况、司机操纵方法等多方面，是一个复杂的系统工程问题。其计算方法基本上可以分为下述 3 个发展阶段。

(1) 人工计算和图解方法阶段

人工计算和图解方法的特点是采用单质点的简化物理模型，并且必须假设有各种换算的取值条件。例如在计算起动牵引力、牵引质量甚至能耗时均不考虑列车的长度或编组辆数；对于曲线和坡道引起的附加阻力只能在假设条件下进行计算，而不能按实际线路条件详细计算；对制动力的计算，首先是将实际的列车制动过程假设分为无制动作用和有制动作用并且闸瓦压力恒定的 2 个阶段，为了不直接涉及摩擦系数与闸瓦压力的关系，又用换算闸瓦压力和换算摩擦系数来进行简化计算；基础制动传动装置效率等都是根据试验结果假设的取值，即采用来自试验、经验的等效原则的换算方法。计算结果和实际情况相比有很大的失真性，加上实际试验次数和列车编组、线路条件有限的局限性，该方法受试验误差影响严重，也不能反映机车车辆装置的发展情况，采用手工计算的计算效率也比较低。

(2) 单质点列车模型的电算方法的发展阶段

20 世纪 80 年代初，随着计算机技术的普及，人们开始进行列车运行模拟系统的研究与开发。早期的软件系统重点在于模拟手工计算过程，目的是将工程师手工的经验通过计算机再现出来，提高计算效率，减少手工计算的工作量。该方法只是在计算方式上以电算代替了手工计算，从而可有效地提高计算速度和精度，但没有改变单质点列车模型的基本计算原理。

(3) 新一代的列车运行计算系统

20 世纪 90 年代后，通过同国内外模拟系统的交流，人们进一步考虑在精度和通用性等方面的问题。列车运行模拟系统的研究已经涉及机、车、工、电、辆的各个方面。作为通用的列车运行模拟系统，应当具有模拟列车运行行为、模拟列车运行环境、模拟驾驶员操纵机

车、模拟列车运行监控、模拟铁路运营组织以及模拟列车运行自动驾驶等多方面的功能,同时它还可以应用在自动编制列车操纵示意图以及交通工程设计等多个领域。

我国也开发了许多列车运行计算系统,开发了可分析城市间单列车条件下牵引计算的软件以及从工程设计角度探讨单列车条件下牵引计算的专用软件系统。目前研制的模拟器主要包括单列车与多列车两种。单列车模拟的目的在于牵引计算,即校验列车在不同运行条件下区间运行速度、时分、最大牵引质量、安全性等,也可以探讨列车运行过程中的最优操纵(节能)方法,以作为运营管理的参考单列车模拟器;还可用于对线路进行技术改造时的方案比选,评价降低限坡、改进机车类型或采用双机牵引等措施的运营效果。多列车仿真的重点是列车在相互作用条件下的移动轨迹,如验证列车在一定时刻表下运行的可行性和安全性,模拟列车在不同牵引类型、不同牵引质量、不同闭塞方式下保证列车运行安全的最小间隔,检验并确定区段运输能力等。

1.4

列车运行过程受力分析

1.4.1 影响列车运行过程的因素

列车的运行是在一个复杂多变的环境下,由多因素共同作用的结果。这些环境与作用既有静态的,也有动态的。在环境因素中,主要包括下列因素。

(1) 线路条件

铁路线路是列车运行的基础,它既涉及坡道、曲线、桥梁、隧道、车站等土木方面的问题,也有轨道电路、分相绝缘器、变电所等电气方面的问题。

(2) 列车条件

列车是列车运行计算与操纵优化模拟系统研究的主要对象之一,但列车编组本身又是多变的因素之一。它涉及机车类型(影响到牵引及制动能力)、车辆类型及数量(影响列车质量、长度及制动性能)等。

(3) 信号条件

当存在多列车时,信号影响着列车的运行,列车运行特性又是确定信号机位置的重要方面。

(4) 供电参数

供电参数包括牵引供电方式、供变电所的位置及主要参数,重点针对电力牵引环境。

(5) 计算原则

列车运行有许多计算前提条件,如注重运输成本的经济性节能操纵,注重效率的节时操纵,以及其他因素等。

1.4.2 列车运行过程计算模型

列车在运行过程中受到方向和大小不同的力的作用,受力情况非常复杂,但一般在进行列车运行过程的计算时,通常只考虑列车沿轨道前进方向(纵向)的作用力。与列车运行速度有关的纵向力有三种:机车牵引力 F 、列车运行阻力 W 、列车制动力 B 。列车纵向受力示意图见图 1-1。

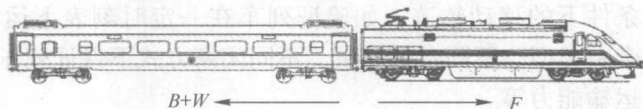


图 1-1 列车纵向受力示意图

(1) 列车牵引力 F

列车牵引力是由动力传动装置引起的与列车运行方向相同的外力。这是司机可以控制的使列车发生运动或加速的力。

(2) 列车运行阻力 W

列车运行中由于各种原因自然发生的与列车运行方向相反的外力。它的大小是司机不能控制的。它的作用是阻止列车发生运动或使列车自然减速。

(3) 列车制动力 B

列车制动力是由制动装置引起的与列车运行方向相反的外力。它是人为的阻力,它的大小是司机可以控制的。它的作用是使列车产生较大的减速度或者在长大下坡道防止列车超速运行,或者防止列车在车站停车时由于坡度或大风而自然溜走。

作用于列车上的合力 C 为:

$$C = F - (W + B) \quad (1-1)$$

列车在线路上运行时有 3 种工况:牵引、惰行及制动。牵引运行时,作用于列车上的力有列车牵引力和列车运行阻力, $C = F - W$; 惰行时,作用于列车上的力只有列车运行阻力, $C = -W$; 制动运行时,作用于列车上的力有列车运行阻力和列车制动力, $C = -(W + B)$ 。

任何情况下,列车运行阻力都作用于列车上,机车牵引力和列车制动力不能同时使用。当 $C > 0$ 时,列车将加速运行;当 $C < 0$ 时,列车将减速运行;当 $C = 0$ 时,列车将匀速运行或静止不动。

本章思考题与作业题

1. “列车运行计算”是个什么样的学科?它包括哪些内容?
2. “列车运行计算”的用途有哪些?
3. 对列车运行有直接影响的力有哪些?
4. 当列车运行在牵引、惰行、制动三种不同工况时,其合力如何计算?

2

第2章 列车牵引力

主要内容

本章首先分析了列车牵引力的形成过程，介绍了列车牵引力的概念与分类。在分析轮轨间摩擦与粘着特点的基础上，介绍了粘着牵引力的计算方法。本章重点介绍了内燃机车与电力机车的牵引特性与计算标准、内燃牵引力的计算修正方法，并提出了牵引力计算的线性插值计算方法。

学习重点

1. 列车轮周牵引力产生条件。
2. “粘着”与“静摩擦力”的区别与联系。
3. 列车牵引力的计算标准及不同速度下的列车牵引力取值。
4. (最低) 计算速度、(最大) 计算牵引力、持续速度、计算起动牵引力的概念、取值。

2.1

牵引力的形成及分类

列车牵引力是由动力传动装置产生的、与列车运行方向相同、导致列车运行并且可由司机根据需要进行调控的外力。

动力装置产生的机械能（热力牵引）或直接由接触网获得的电能（电力牵引），通过传动装置产生使动轮回转的扭矩，在动轮轮周上形成切线方向力，依靠轮轨间的粘着产生由钢轨作用于轮周上的反作用力，从而使列车产生平移运动，这种轨作用于动轮轮周上的外力就是列车牵引力。对于动车组、城市轨道交通列车而言，动力集中装置的，称为动车牵引力更为合适。根据机械功传递过程，牵引力分为车钩牵引力、轮周牵引力与指示牵引力三类。

(1) 车钩牵引力

机车牵引力为机车牵引客、货车辆的纵向力，此力通常也称为车钩牵引力或挽钩牵引力，以 F_g 表示，如图 2-1 (a) 所示。欧美一些国家以车钩牵引力作为牵引力计算标准，原因是其容易测量。计算牵引质量时用车钩牵引力也比较方便。但是在计算列车运行速度和运行时间的时候要以整个列车为分离体，而车钩牵引力是机车和车辆之间相互作用的内力。在机车牵引车辆时，车辆对机车还存在一个反作用力 F'_g ， F_g 与 F'_g 大小相等，方向相反，如图 2-1 (b) 所示。因此车钩牵引力 F_g 不是使整个列车发生运动或加速的外力。

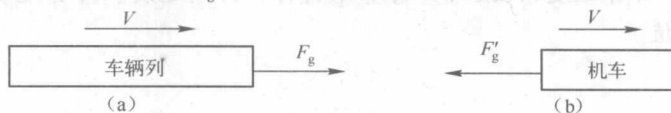


图 2-1 车钩牵引力

(2) 轮周牵引力

在钢轨上运行的列车与外界接触的对象主要是空气和钢轨（电力牵引时还有接触网），真正能使列车发生运动的外力，只能来自钢轨（轮轨接触点）。

《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牵引力的大小，因此《牵规》又规定，机车牵引力按轮箍半磨耗状态进行计算。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。

机车是一种能量转换装置。机车通过动力传动装置的作用，将电力机车的电能或者内燃机车的燃料化学能最终转变成机械能，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机车的一种内力矩，如果动轮不作用于钢轨上，则动轮只能自身旋转，而无法使机车运动。因此，使机车牵引车辆沿轨道运行的外力来自钢轨和轮周，称为轮周牵引力。轮周牵引力产生有两个必须具备的条件：

- ① 机车动轮上有动力传动装置传来的旋转力矩；
- ② 动轮与钢轨接触并存在摩擦作用。

轮周牵引力的产生过程为：当机车的动轮在力矩 M 的作用下，轮轨间出现相对运动趋