

彭其渊 石红国 魏德勇 著

城市轨道交通

列车牵引计算

chengshi guidao jiaotong lieche qianyin jisuan

责任编辑 刘娉婷

责任校对 李 梅

封面设计 王 可

ISBN 7-81104-084-0



9 787811 040845 >

ISBN 7-81104-084-0/U • 011

定价: 12.00 元

城市轨道交通列车牵引计算

彭其渊 石红国 魏德勇 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

城市轨道交通列车牵引计算 / 彭其渊, 石红国, 魏德勇著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2005.6
ISBN 7-81104-084-0

I. 城... II. ①彭... ②石... ③魏... III. 城市铁路 — 列车 — 牵引 — 计算 IV. U260.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 053777 号

城市轨道交通列车牵引计算

彭其渊 石红国 魏德勇 著

责任编辑 刘婷婷

责任校对 李梅

封面设计 王可

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 850 mm × 1 168 mm 1/32 印张: 4.625

字数: 116 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7-81104-084-0 / U · 011

定价: 12.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

随着我国城市化进程的发展，大、中城市均在调整产业结构，扩大城市区域；通过开发大城市的主中心区和副中心区，发展卫星城镇等方面重新规划各城市，大城市巨大的空间范围和交通需求，使其对交通的依赖程度日趋提高。城市交通从配套性的服务正转变为引导大城市发展的决定因素。同时，由于土地、能源、路网容量等资源因素的约束，轨道交通已被世界各国公认为城市交通的发展方向。它在大城市中心区功能的完善及维持大城市中心区的强大、引导城市结构的调整、缓解交通拥挤等方面发挥着重要的作用。

本书选择城市轨道交通列车牵引计算这一论题，以理论研究和系统开发为主，充分借鉴和参考以往的研究成果，对城市轨道交通列车的重量、运行速度、制动距离以及能耗等方面进行了系统深入的研究。石红国在本书的写作过程中承担了主要的资料搜集和写作工作，本书统稿由彭其渊负责。

在资料搜集、调研和写作过程中，得到了西南交通大学谢小淞、郭寒英，铁道第二勘察设计院崔延渠助理工程师等人的大力支持和热情帮助。在此，谨向他们表示诚挚的谢意！

本书参阅了大量的国内外著作和有关文章，在此谨向这些文献的作者们表示深深的谢意。

由于作者水平有限，书中不妥之处敬请指正。

作 者

2005 年 4 月 18 日

于成都

目 录

第 1 章 结 论	1
1.1 牵引计算概述	1
1.2 国内外牵引计算研究现状	5
第 2 章 城市轨道交通列车牵引计算的力学模型	11
2.1 牵引力	12
2.2 运行阻力	16
2.3 制动力	24
第 3 章 列车运动方程及时分解算	38
3.1 列车运动的定性分析——合力曲线	38
3.2 列车运动的定量分析——运动方程	40
3.3 列车时分计算与运动曲线绘制	45
第 4 章 牵引计算的电算模型研究	48
4.1 牵引计算算法与模型概述	48
4.2 牵引计算的单质点模型	49
4.3 牵引计算的多质点模型	63
第 5 章 UMTTCS 系统设计	75
5.1 系统整体构思	75
5.2 系统模块分析	77
第 6 章 UMTTCS 系统实现	81
6.1 系统界面设计	81

6.2	数据结构设计	85
6.3	程序代码设计	92
第 7 章	UMTTCS 系统测试	93
7.1	测试目的	93
7.2	安装测试	93
7.3	使用测试	94
7.4	问题与解决	106
7.5	结 论	106
附录 1	部分地铁机车、车辆的技术参数	108
附录 2	UMTTCS 技术手册	115
参考文献		140

第1章 绪 论

1.1 牵引计算概述

提高列车的运行速度和牵引重量，保证列车的运行安全和尽量节约能耗，是扩大运输能力、提高运输效益的重要内容。因此，必须讲究科学的管理模式、经济合理的机车操纵方式，要研究列车的牵引重量、运行速度、制动距离以及机车能耗的相关因素。总之，怎样在保证行车安全的前提下，多拉快跑，节省能耗，是进行牵引计算研究的初衷。具体地说，对牵引计算的研究，可以解决城际铁路和城市轨道交通在运营和设计中的的一些主要技术问题和经济问题。如：牵引重量、列车运行速度和区间运行时分、列车制动距离、制动限速、制动能力以及机车能耗等。

列车牵引计算的用途表现在以下诸多方面：

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、列车牵引重量、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确定。

2. 机车运用

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。牵引计算的模型是牵引计算结果的内核。在当前计算机牵引计算迅速普及的情况下，设计安全、节能、舒适、准点、停车准确的牵引计算和运行模拟模型是可能的。在这些优化操纵的牵引计算模型中，找到合适的模型可以为机车运用、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，布置车站和机务段，确定线路平纵断面，安排机车交路，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，通过比选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选，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，牵引计算的结果可以影响到运行图铺画、机车运用、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。

随着机车车辆和计算机技术的迅速发展，一方面为利用计算机进行大量烦琐的自动化牵引计算提供了可能，另一方面，原有的手工解析算法和图解算法效率低、精度低的弊端越来越不能满

足铁路采用新技术、新设备和提速、重载的要求。同时，标准的提高、设备的更新，在进行新的线路建设时对牵引计算的要求也越来越高。不但要求列车模型和线路模型等牵引计算的关键模型更加贴近实际目标，而且对计算结果也要求更加准确、可靠，输出形式更加丰富，处理更加便捷。因此，采用计算机进行牵引计算已经是当前牵引计算领域的基本要求。

铁路领域的牵引计算研究已经取得了丰硕的成果，如铁道部科学研究院的牵引电算软件、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。但是基于城际铁路的牵引电算软件对于城市轨道交通的应用有很大的局限性，城际铁路和城市轨道交通（特别是地铁与轻轨）之间的较大差异，使得有必要专门研究城市轨道交通的牵引计算问题。

随着近年来城市规模的扩大，人们生活水平的提高，大城市的交通问题日益成为人们关注的问题。解决大城市的交通拥挤问题的一个重要途径是大力发展以城市轨道交通为代表的城市公共交通系统。

从图 1.1 可以看出，地铁、轻轨等城市轨道交通方式，相对其他出行方式而言，无论在出行者利用密度，还是出行距离上，都占据着较大的适应范围。

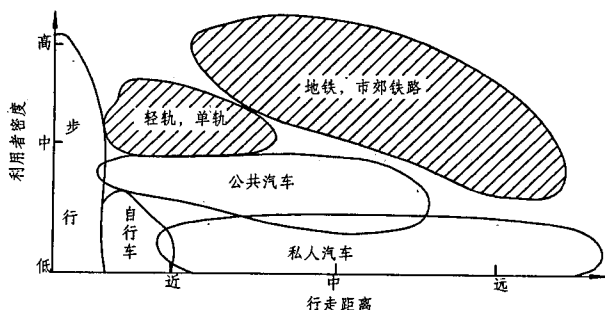


图 1.1 城市各种交通出行方式的适应范围

具体说来，城市轨道交通相对其他城市交通方式的优越性体现在以下几个方面：

1. 城市轨道交通运量较大

地铁属于大型运量的公共交通系统，轻轨属于中型运量的公共交通系统，较之传统的公共电、汽车和出租车而言，它们的运量要大得多。从每一列车乘坐人数，每天乘坐的总人次来讲，城市轨道交通相对其他运输方式，是比较典型的大运量交通方式。这种大运量的交通方式是解决大城市交通拥挤的有效途径之一。

2. 城市轨道交通对环境的影响小，单位能耗低

地铁和轻轨主要是采用电力牵引，无化学污染。由于效率较高，故单位能耗较低。另外，地铁处于地下，环境噪声小。

3. 城市轨道交通乘坐舒适、安全

由于现在的城市轨道交通特别是地铁列车，普遍具有自动保护（ATP）、自动驾驶（ATO）功能，其安全性、舒适性以及正点率相对城际铁路有较大的优势，特别是对技术相对落后、客货混跑的国内铁路线而言有较大的优势。

这些优点是近年来城市轨道交通在大中城市纷纷建设的原因之一。

但是，超前的发展使得城市轨道交通的理论研究显得滞后。特别是中国城市轨道交通系统大多采用国外设备成套进口的办法，使得已经建成很多条地铁轻轨线路，却没有关于城市轨道交通的成套技术规范。《列车牵引计算规程》（简称《牵规》）是城际铁路的牵引计算国家规范，直接应用于地铁和轻轨是不适合的。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。

1.2 国内外牵引计算研究现状

1.2.1 国外情况

最早的轨道交通源自英国, 1863 年, 英国开通了世界上第一条地铁线路。随后世界上工业发达的国家先后在一些大型城市建立了城市地铁系统以及市郊列车系统。

当今世界发达国家的城市轨道交通系统已经相当庞大并且现代化程度很高。到 1995 年, 日本地下铁道的总运营里程达到 572.9 km; 莫斯科地铁始建于 1933 年, 该市第一条线路于 1935 年投产, 到 1993 年, 有运营线路 230 km, 车站 140 座, 车辆 3 600 辆, 年客运量 26.13 亿人次。目前, 莫斯科地铁是世界上运量最大的地铁系统之一, 东京、墨西哥的地铁运量也较大。

国外城市轨道交通系统发展得较早, 牵引计算的理论和实践的成果也比较多。因为牵引计算理论可以作为列车操纵模拟、列车运行仿真、列车自动停车、列车自动驾驶的基础理论, 所以在这些领域中, 牵引计算理论都得到了发展, 特别是在列车自动控制领域。

对于列车牵引计算与操纵仿真领域, 国外比较成熟的系统有北美的 TPC (Train Performance Calculator) 系统, RAILSIM 系统 (铁路模拟系统), 欧洲的 TrainStar 系统, 日本的 UTRAS 系统等。

1. RAILSIM 与 TPC 系统

TPC 系统是根据线路平纵断面以及列车编组, 计算列车运行时分, 评价机车牵引性能, 评价各因素, 如列车编组、线路条件等变化后产生的效果。它可以计算分析列车在长大上坡道、长大下坡道的启动以及停车制动性能, 也包括列车的最大牵引重量。RAILSIM 系统是北美铁路常用的一套铁路牵引计算与运行模拟

软件，它以 TPC 为基础，可以精确地模拟许多铁路系统中多种列车的运行。

2. TrainStar 系统

TrainStar 系统是一个机车工程师辅助系统，它提供了新一代的智能列车控制系统。TrainStar 将 WABCO 导航系统技术和列车模拟技术相结合，为机车工程师提供了智能辅助系统。系统目标是改善机车操纵，降低能耗，增加安全性等，其关键技术是提供了自适应的列车行为预测，可以在当前运营条件下预测列车的运动行为，并预测牵引和制动等问题。

3. UTRAS 系统

UTRAS 系统是日本交通控制实验室在 20 世纪 80 年代开始研制的新一代具有通用意义的铁路牵引计算与模拟系统，在 20 世纪 90 年代开始得到应用。该系统从研究新干线的交通控制系统出发，可以进行列车牵引计算、列车模型对运营的影响分析、延误恢复及分析、不同通信信号制式的影响分析、多列车运行能力及效果评价等。该模拟系统已经在日本得到了较多应用，如被东芝公司用于研究新干线的改造。

国外对于牵引计算的研究，除了应用于列车优化操纵外，现在更多地应用于列车的自动控制和列车自动驾驶的研究中。ATO 作为列车自动控制系统的—个重要的子系统，利用车载固化信息和地面信息实现对列车牵引、制动的控制，使列车经常处于最佳或较好的运行状态，提高乘客的舒适度，提高列车准点率，节约能源。目前，国外的高速铁路技术日趋成熟，如日本的新干线各系列车控制系统、德国的 ICE 系统、法国的 TGV 系统等，无不采用自动控制系统。因为只有自动控制系统，才能使列车的运行质量满足高速、安全、正点、停车准确等比普通线路高得多的要求，而 ATC 系统中自动驾驶系统的核心算法的理论基础就是牵引计算理论。

1.2.2 国内情况

国内对于牵引计算的研究相对落后于国外，但是发展速度很快，从最初的人工计算，发展到现在的多质点列车模型为基础的自动计算。而且列车的运行模型已经开始应用于列车自动运行和自动控制之中。总的来说，国内牵引计算理论与应用可以分为人工计算和图解方法、单质点列车模型的电算方法、多质点列车模型的详细电算方法 3 个发展阶段：

1. 人工计算和图解方法的发展阶段

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。例如在计算启动牵引力、牵引重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；还有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。所以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，该方法受到试验误差的严重影响，也不能反映机车车辆装置的发展情况；采用手工计算时（例如制动距离分段计算）更不能排除计算效率低的缺点。在 20 世纪 60 年代曾对此改进，创造了牵引计算用的合力线图和制动计算用的分段累加图解法、等效一次图解法、有效制动距离二段算图等简化计算方法。但这些方法的计算精度都不高，比较烦琐，仍需要一定的假设条件，因此未被推广使用。正式列入《牵规》中并被广泛使用的仍然是按单质点运动力学模型的牵引和制动计算公式。

问题的实质在于手工计算条件下无法对复杂的牵引和制动过程进行精确计算，而只能按等效原则采用“假算”的方法。以制动距离计算为例，其空走时间、换算闸瓦摩擦系数、传动效率都是假想的，主要来自现车溜放试验结果的换算，并考虑有适当的安全裕量，所以最后换算得到的制动距离结果并不能吻合试验结果。在不考虑列车纵向动力学，不求过程，只求结果——制动距离的简单要求下，尚能符合设计、运用部门的需要，并且具有简单易学的优点，因此仍被新《牵规》保留使用。

2. 单质点列车模型的电算方法发展阶段

应用人工计算和图解方法的手算方法对于牵引重量、牵引长度的计算比较简单，但对制动距离仍要分段计算，因此相当烦琐。还有各种运行阻力、换算摩擦系数和机车与车辆的计算，涉及许多计算公式应用。简单的电算方法就是按计算流程将相关计算公式编成电算程序，输入需要的计算条件并采用按时间或速度分段积分计算制动距离和时间的方法，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。从 20 世纪 80 年代至今，我国曾先后有济南、呼和浩特等铁路局和各设计院编制使用的列车牵引计算程序，包括一些高校在列车操纵模拟装置中使用牵引电算软件，虽然在采用的硬件和数据处理、图像显示等软件上各有不同的特色，但是在列车牵引和制动计算方面大体上仍然相当于国外 20 世纪 60 年代的简单牵引计算水平，例如美国的 TPC 程序，均属于上述简化计算方法。

3. 多质点列车模型详细电算方法的发展阶段

由于列车牵引和制动计算的重要性，特别是随着高速、重载列车技术的迅速发展，旧的简化计算方法已不能满足需要。例如在 1998 年公布的新《牵规》中，制动公式已由 1978 年《牵规》

中的 18 个增加到 32 个之多, 尚未能包括 200 km/h 以上高速列车制动系统的有关计算条件和方法。其主要问题可归结如下:

(1) 计算功能有限, 无法完成调速制动计算特别是重载列车长大下坡道的运行计算, 也不能对普通列车空电联合制动或高速列车的复合制动方式进行计算, 因此不能满足重载和提速列车的计算要求。

(2) 不能精确模拟实际列车的牵引和制动操纵运行, 包括司机自动制动和单独制动的复合作用。

(3) 对于设计部门要求的线路纵断面设计不能精确计算。

(4) 空走时间的换算方法不能正确反映列车实际运用的制动减速变化情况。

(5) 在单质点模型的基础上不可能进行列车纵向动力学的精确计算。

鉴于单质点计算方法的局限性, 从 20 世纪 80 年代开始, 根据国外经验和我国的实际情况, 我国在大秦线 5 000 t 级重载列车研究中自行编制的计算机牵引计算软件已采用了列车动力学多质点模型。该模型的基本特点是将重载列车视为非刚性连接的多质点震动系统, 并用节点分块计算各车辆之间的车钩力。为此还需要建立比较精确的制动机、缓冲装置数学模型, 加上列车编组条件、各机车车辆参数和线路参数的数据库等。该程序主要由主程序、绘图程序、涉及的专业模型和基本数据库构成。多质点电算方法除具有一般电算方法所共有的优点——计算速度快和精度高以外, 还具有下述优点:

(1) 对列车可按实际编组情况进行逐辆编组的详细计算, 包括对不同车型、制动机和缓冲装置、空重车辆的混编均可模拟。

(2) 对线路断面包括坡道和曲线均可精确模拟, 而无需简化换算。

(3) 可考虑多个变量函数并进行实时模拟, 例如对制动机、

缓冲装置的性能和列车管压力梯度均可仿真，而受假设条件和限制较少。

(4) 有相当完善的人机接口功能，可随时观察和研究列车的运行过程，并便于今后进一步开发自动操纵和列车纵向动力学的计算功能。

由于多质点电算方法具有上述特点，故其作为牵引电算的发展方向，已在国内外得到了日益广泛采用，并在铁道部的重载和提速专题研究中发挥了重要的作用。

国内多质点牵引计算软件开发成功的并不多，铁道部科学研究院的牵引电算软件为典型的多质点牵引计算软件。

另一方面，随着国内轨道交通技术和中国经济的飞速发展，许多大中城市都开始发展城市轨道交通，主要是地铁和轻型轨道车辆。但是，现有牵引计算的模型和软件主要针对普通铁路线路和机车车辆设备进行设计，而针对城市轨道交通的牵引计算模型和软件比较少。一般相关单位在进行城市轨道交通牵引计算时，主要采用基于单质点模型的手算方法，或者专门针对地铁或者轻轨线路设计一个专门的牵引计算软件，当项目结束时，这种软件也就没用了。