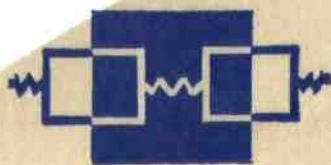


【苏】П.Т.格列别纽克著

陈方昌 樊连波译

超重列车 制动动力学



CHAOZHONG LIECHE
ZHIDONG DONGLIXUE

中国铁道出版社

超重列车 制动动力学

〔苏〕П.Т.格列别纽克著

陈方昌 樊连波译

夏寅荪审校

中 国 铁 道 出 版 社

1984年·北京

内 容 提 要

本书阐述了超重货物列车在制动时所产生的纵向动力的理论和实验研究成果；制订了利用电子计算机计算纵向动力的方法，计算中考虑了车辆连接器所具有的各种不同特性，以及在不稳定的制动和缓解过程中车辆制动力的变化特点；指出了纵向力与制动系统和自动车钩缓冲器特性曲线之间的关系；指出了采用空气制动机及电空制动机的货物列车提高其制动效能的方法。

本书可供设计、运用铁路机车车辆制动机的有关科研和工程技术人员参考。

ДИНАМИКА ТОРМОЖЕНИЯ ТЯЖЕ ЛОВЕСНЫХ Поездов

И. Т. ГРЕВЕНЮК

超重列车制动动力学

(苏) И. Т. 格列别维克著

陈方昌 樊连波译

夏寅荪 审校

中国铁道出版社出版

责任编辑 林连照 封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 印张：5.5 字数：124千

1984年2月第1版 1984年2月第1次印刷

印数：0001—3,000册 定价：0.60元

目 录

序	1
绪 论	3
第一章 列车制动动力学的研究方法	9
I · 1 研究过渡运动工况时所采用的 列车计算简图的分析	9
I · 2 研究列车制动动力学的各种 解析法的概述	12
I · 3 列车的电模型及电子模型	18
第二章 超重货物列车制动时纵向动力的 理论研究	22
II · 1 列车制动时的运动微分方程式	22
II · 2 车辆连接装置的计算简图及其 特性曲线的数学描述	28
II · 3 车辆制动装置特性曲线的 数学描述	34
II · 4 列车运动方程组的数值积分	46
II · 5 扰动源运动时列车中纵向扰动 的传播	51
II · 6 扰动源不动时列车中纵向扰动 的传播	61
II · 7 超长单编和合并列车中纵向扰 动的研究	65
第三章 超重货物列车中产生的纵向力的 试验研究	70

Ⅲ·1	力的测量方法	70
Ⅲ·2	均质货物列车制动动力学的研究	74
Ⅲ·3	混编及合并列车制动动力学的研究	83
Ⅲ·4	超重列车中产生扰动的某些共同规律及最大纵向力的大小	87
第四章	制动机性能对列车纵向动力的影响	98
IV·1	空气分配阀性能对列车制动动力的影响	98
IV·2	纵向动力与闸瓦摩擦性能的关系	109
IV·3	制动机操纵方法对列车纵向力的影响	115
IV·4	车辆制动力增长的理想速度	125
IV·5	车列特性对制动过渡过程的影响	129
第五章	提高超重货物列车制动效能和制动平稳性的途径	137
V·1	从允许的纵向力和制动距离出发对制动机提出的要求——理想的制动缸充气曲线	137
V·2	提高列车制动效能的途径和步骤	143
V·3	采用新型制动系统对提高货物列车重量的技术经济效果	152
结 论		157
参考文献		165

序

苏联铁路运输的发展，可以用货运量的高速增长来表征，而完成不断增长的运输计划的主要方法是增加列车的重量。根据铁路发展规划，今后10~15年间列车重量的增长速度将持续提高。正在建设中的贝加尔湖-阿穆尔铁路干线，其运营的第一阶段即计划使用重量为7000~10000吨的列车。因此就必须对处于不稳定运动状态的超重货物列车所发生的动力过程进行广泛的理论和试验研究。这些研究成果对于完善机车车辆的计算及设计方法都有很重要的意义。

技术科学硕士И.Т.格列别纽克的这部专题著作，研究了超重列车制动时的纵向动力，并探讨了通过改善制动系统及其操纵方法以降低纵向力的途径。作者制订了列车纵向动力的研究方法，在研究中考虑了制动缸的实际充气曲线和车辆连接器在缓冲器自身变形方面的非线性特性。除研究了现行的弹簧-摩擦式缓冲器所具有的刚性特性外，还研究了车辆连接器的柔性特性。

本书研究了具有很大质量及单位长度载荷的车辆所组成的未来列车，在扰动源运动和固定不动的情况下，其纵向扰动沿列车的传播过程。还总结了重量达10000~15000吨的均质货物列车*和混编货物列车**，其中也包括合并列车***的

-
- 均质列车 (Однородный Поезд) —— 由同一车型且载货重量相同的车辆组成的列车。——译者注。
 - 混编列车 (Неоднородный Поезд) —— 由不同车型或不同载货重量或车型、载货重量均不相同的车辆组成的列车。——译者注。
 - 合并列车 (Соединенный Поезд) —— 由两列或两列以上的车列组成，且机车分散置于列车头部和中部的列车。——译者注。

制动动力学多年来的试验研究成果。

在列车纵向动力学的试验研究中，采用了现代化的试验及记录测量值的方法，用这些方法能获得超重列车中纵向力的数值和传播特性方面的可靠资料。

在纵向动力理论和试验研究的基础上，提出了能使纵向力降低和制动距离缩短的未来的空气和电空制动机的理想特性；还拟定了提高超重货物列车制动效能的步骤；并确立了列车过渡运动工况中动力过程的某些基本规律。

铁道运输科学研究院副院长

技术科学博士 В.Г.伊诺泽姆采夫

自动制动机室主任

技术科学硕士 В.Ф.亚先采夫

绪 论

苏共二十五大通过的1976~1980年苏联国民经济发展的基本方向中规定铁路运输的货运量将提高约22%。

今天苏联铁路的货运量是世界上最高的。例如，美国铁路1974年的总长为30.75万公里，其所完成的货运量为12423亿吨公里，即比苏联铁路的货运量约少一半（苏联铁路总长为13.75万公里，其货运量为30977亿吨公里）。

在铁路货运量急速增长的情况下，完成运输计划的主要措施是增加列车重量和提高列车运行速度。依照铁路运输发展规划，在今后的10~15年内要加快列车重量的增长速度。铁路上采用电力和内燃机车牵引，有助于实现这一目的。现在电力和内燃的牵引里程为13.05万公里，其货运量占99.6%。

增加货物列车的重量和提高其运行速度所导致的铁路运输能力的提高以及大载重车辆的运用，能使运输成本降低很多。据全苏铁道运输科学研究院的资料介绍：采用单位长度载荷增加到8.3吨/米的八轴货车能使运输成本大约降低5%。苏联铁路的货物列车的平均总重在过去的50年内，增长了3倍。1975年为2732吨，而现在运营线路上的单编列车*的最大重量已达6000吨。

今后，列车的重量将增加到10000~15000吨，使用合并货物列车时，可达15000~20000吨。这样的超重列车在美国、加拿大、澳大利亚和巴西等国均在运用。现在，苏联的合并列车的重量为8000~10000吨，且双列合并列车在单线

区段上运行就能使通过能力提高25~30%。

车辆的容量、载重量和轴数的急剧增加，机车车辆轴载重的提高，这些都使得列车的重量增加了。美国铁路列车的平均重量为3557吨，站内线路长为2公里，车辆平均载重量达62吨，而1970年投入运营的车辆平均载重量则高达72吨。美国主要靠使用轴重为25~30吨，个别达36吨的四轴大载重车辆来提高车辆的载重量。苏联车辆平均载重量约为60吨。它主要是靠增加车辆的轴数来提高载重量的，其轮轨间的许用轴重也增加到22~25吨。

一般来说，随着列车重量的提高，车辆连接器中的纵向力也随之增大。当列车处于过渡运动工况（不稳定工况）时，即在较短的时间内，列车从一种状态过渡到另一种状态时，纵向力增到最大。属于这种过渡运动工况的有：调车作业中车辆的碰撞，列车起动，急剧地增加或卸除牵引力，制动，以及列车通过坡度起伏的线路纵断面时的运动。

机车车辆制动系统所应满足的要求，由所给定的铁路的运营条件来决定。苏联和美国铁路的货物列车都是很重和很长的，机车车辆中均装有自动车钩、自动制动机和直径为32毫米的列车管，约三分之一的车辆装有滚动轴承。

西欧铁路的货物列车的重量都不大（1000~2000吨），机车车辆中装有螺旋车钩，二轴车占有相当大的数量，部分车辆未装制动机，大多数车辆的列车管直径为25毫米，采用直通式空气制动机，其制动缸充气时间在重车位为20~28秒。制动机作用的不衰减性是通过采用阶段缓解来获得的，阶段缓解的过程取决于列车管压力增加的大小。在不太长的列车中采用这种型式的制动装备还是有效的。

• 单编列车（Однарный Поезд）——机车仅置于列车前头的列车。——译者注。

在苏联铁路上，随着货物列车重量的增加和速度的提高，对制动效能、制动平稳性和制动与缓解的灵敏度要求也随之提高了。为了满足这些要求，曾使用了№135和№270-002型空气分配阀，这些分配阀中设有无阶段缓解的平道位和有阶段缓解的坡道位。现在机车车辆中使用了合成闸瓦，它有良好的摩擦性能，列车运行速度对闸瓦的摩擦性能影响不大。

苏联铁路上运行速度为80~100公里/小时的货物列车，其制动距离视线路纵断面的不同，规定为1000~1500米。美国铁路上货物列车的制动距离为2000~2400米。这就使得美国铁路车辆可以采用一级工况（指空重车）的空气分配阀，因而在重车时制动率（闸瓦压力系数）较低，因此，就比较容易保证列车制动的平稳性。美国铁路列车重量的急剧增长，导致作用于车辆上的计算纵向作用力高达450吨力。

苏联铁路为了满足最小制动距离的要求，必须使货物列车在整个运行速度范围内，均具有受轮轨间粘着限制的最大的制动力。

现在的空气制动机在满足制动动力作用的要求方面可确保运用重量为6000吨的单编列车。而从列车起动工况时的车钩强度方面看，货物列车的最大重量也大约限制为这个数值。因为，运用几年后，自动车钩装置中的磨损件在160吨的负荷作用下就开始屈服了。因此，研制能够降低超重货物列车在过渡运动工况时的纵向力的自动制动机和自动车钩缓冲器是极为迫切的任务。列车纵向动力学的研究成果，对于机车车辆和制动装置的设计以及解决与货物列车牵引有关的一些问题均有着重要的意义。

从事列车过渡运动工况中纵向振动研究工作的有：H. E. 茹科夫斯基、B. A. 拉扎良、C. B. 维尔欣斯基、Л. H. 尼

格爾斯基、Н. А. 帕尼金、Е. П. 勃洛欣、О. Г. 鮑伊切夫斯基、С. В. 杜瓦爾揚、А. У. 加列耶夫、Е. И. 庫齊米娜等。在發展列車制動科學以及完善自動制動技術方面做出顯著貢獻的有：В. Ф. 葉戈爾欽科、Б. П. 卡爾瓦茨基、В. М. 卡扎里諾夫、В. Г. 伊諾澤姆采夫、Д. Э. 卡爾明斯基、И. К. 馬特羅索夫、Н. А. 阿爾別戈夫、Е. В. 克雷科夫、В. Н. 克雷洛夫等。在完善自動制動機方面正在進行重要的研究工作的有：В. Ф. 亞先采夫、Л. А. 武科洛夫、М. Д. 福金、Б. Д. 尼基福羅夫、А. М. 諾熱夫尼科夫、Л. В. 科久林、Н. С. 布納科夫等。

在大多數研究列車動力學的理论著作中，研究了列車的起動過程以及列車在機車牽引力作用下在平道上和在坡度起伏區段上的運動。同時，所研究的車列是由同型和載重量相同的車輛組成的，並設車輛連接裝置中不存在間隙，雖然考慮了自動車鉤摩擦式緩衝器的撓力特性曲線，但認為緩衝器中力與變形的關係是線性的。有了這些假設就可以在研究中使用線性微分方程組，因而就可以比較容易地採用解析關係式來研究所探討的過程的主要特點，以及計算不考慮列車連結器中的間隙對過渡工況的影響情況下的縱向力。

還研究過列車運動的穩定工況，即在不變的或緩慢變化的牽引力或制動力的作用下，做勻速或減速運動的列車的運動工況。這時，認為縱向力僅決定於在該瞬間所施加的外力，而與車輛連結器的特性無關。

曾利用桿件的線性振動理论研究由若干組車輛所組成的混編列車的某些過渡運動工況，這若干組車輛中每一組車輛都是由一些相同的車輛組成的，而且，把每一組車輛看作是均質桿件。對於該系統中的每一個桿件，列出各段的連接條件（作為對邊界條件的補充）。這樣，得出來的方程組是極

为复杂的，且只有系统中的杆件数量不太多时，方能求解。在研究混编列车的过渡运动工况时，如将列车视为具有集中连接的变截面杆系时，对解决问题是很有益的。

采用模拟计算机上拟制的电子模型，解决了线性连续的和间断的力学系统的过渡运动工况中的某些问题。采用结构模型研究了由通常的车辆和具有滑动中梁的车辆所组成的列车的起动问题。确定了弹簧-摩擦式缓冲器吸收不可复原的能量的最佳值，并指出了列车头部的几台机车在不同时间施加牵引力以及碰撞对列车动力作用的影响。

当考虑车辆连结器间隙对过渡工况的影响时，列车应视为非线性系统。这个系统当处于不稳定运动状态时，由于车辆连结器的特性为非线性的，扰动将以非线性波的形式进行传播，在列车中所形成的逐车不断增长着的纵向冲击力，可能比外加的牵引力或制动力要大好几倍。

在制动动力学的理论研究中，选择好数学模型，最精确地描绘列车中制动力的产生及其传播过程具有重要的意义。在有些研究中曾提出了这样的假设：当扰动传到所研究的截面的瞬间，制动力达到最大。

另一些研究者认为：制动力是以不变的速度沿列车传播的，且经一段时间后方能达到最大值，并认为列车中的各个车辆的制动力增长规律是相同的，而实际上车辆制动力增长曲线取决于空气分配阀的特性、列车的长度和制动的工况。

车辆缓冲器的特性和车钩间隙，对于货物列车的不稳定运动工况有较大的影响。通常缓冲器的特性为非线性的，自动车钩装置中的间隙在运用中高达60~80毫米。由于不稳定制动工况的研究涉及到多质点系的振动问题，且在这个多质点系中传播着的扰动是不断变化着的，因此这个问题是一个非线性问题，不可能用解析法求解。

为此在本书中使用电子计算机进行理论研究，其目的是研究超重货物列车制动动力学和确定未来制动系统所应具备的最佳特性，即：使列车中的纵向力为最小，制动距离为最短。本书与前述研究的不同之处是：在对列车动力过程的研究中，考虑了制动装置的工作和自动车钩缓冲器的工作上的相互联系；第一次在研究列车制动动力学时，将列车看作为这样的一个系统，在这个系统中缓冲器的自身变形所导致的车辆连接装置的特性是非线性的。除了分析了现行的弹簧-摩擦式缓冲器所具有的刚性特性外，本书还研究了车辆连结器的特性为柔性时的列车动力作用的过程。

在列车纵向力的理论研究中，利用了不稳定制动过程中计算制动力的解析关系式，这些解析关系式是在考虑了列车实际制动曲线后得出的。研究的特点是：第一次分析了长大货物列车中大小不同且不断增长着的制动力，以其各自对应的不同速度沿列车传播的制动动力作用过程。

对所研究的非线性系统作上述理论研究后，就能获得反映车辆连接器中的纵向力与制动系统和自动车钩缓冲器的特性之间的定性和定量关系的可靠资料。

在理论和试验研究的基础上，找出了降低纵向力的方法；提出了对新型制动系统的要求；并指出了提高制动效能的措施，这些措施实现后就能使货物列车的重量增加到10000~15000吨，此外还得出各种不同制动工况下，反映货物列车纵向动力学一般规律的若干结论性意见。

列车不稳定运动工况的试验研究是由全苏铁道运输科学研究院自动制动机室和车辆研究室及第聂伯彼得罗夫斯克铁路运输工程师学院共同完成的。布良斯克运输机械制造学院、莫斯科铁路运输工程师学院及全苏车辆制造科学研究院也参加了这项试验研究工作。

第一章 列车制动动力学的 研究方法

I. 1. 研究过渡运动工况时所采用的 列车计算简图的分析

对货物列车过渡运动工况所采取的理论研究的方法，是由所选用的列车计算简图来决定的。为研究列车不稳定的制动工况而选择计算简图时，须考虑到：现今货车的车辆连接装置是由自动车钩和缓冲器所组成的非贯通式车钩装置。

卓越的俄罗斯力学家 H. E. 茹科夫斯基开创了列车过渡运动工况的理论研究工作。他曾研究了列车的起动过程和列车初始的运动过程，并研究了非贯通式和贯通式连接装置的螺旋链钩上的作用力。对于贯通式螺旋链钩，当穿过整个车列的是一根贯通的杆，各车辆通过弹簧与这根杆固结时，对这种链钩可以得到满意的解答，曾提出了计算受拉和受弯的车钩中所承受的作用力的计算公式。对于非贯通式螺旋链钩，它与各个车辆的端梁弹性连结，其传递车辆间作用力的方式与带有缓冲器的现今自动车钩相同。H. E. 茹科夫斯基曾将同型和载重相同的车辆组成的列车视为带有单个机车质量的弹性杆，或视为用弹性连结器相连接的由若干个车辆形成的许多单个质点，这些弹性连结器在车钩松弛时可以自由地相对移动。

H. E. 茹科夫斯基还研究了列车起动时振动的传播，并指出这种振动具有波动性。这一点是 H. 列扎里的论著中〔31〕所没有的。H. 列扎里将各车辆视为由弹簧连接着的

若干个单个质点。需要指出，H. E. 茹科夫斯基是在假设连结器中不耗散机械能的条件下去研究列车的。可是实际上车辆连结器中由于具有摩擦元件，耗散能量的能力是很大的，正是这个原因，振动才得以衰减。

H. E. 茹科夫斯基提出的两种计算简图，即两种列车模型（连续的和间断的），为后来的许多学者在解决纵向动力学的各种问题时所采用。

A. M. 戈迪茨基-茨维尔科和И. К. 克维尔克维利研究了具有非贯通式车钩的列车起动时的应力波，他们将列车视为一个长弹性杆，所得到的应力波传播图与 H. E. 茹科夫斯基所获得的结果相吻合。

B. A. 拉扎良曾全面地研究了列车过渡运动工况并揭示了扰动沿列车传播的波形特性的一般规律。为计算列车系统的耗能性质和评定阻力对车辆相互间位移的影响，B. A. 拉扎良建议将车列视为弹-粘性杆，或者视为具有滞后特性的弹性杆进行研究。

M. M. 普罗托季亚科诺夫、C. A. 鲍戈莫洛夫、C. A. 沃利弗松在研究线路纵断面坡度起伏对列车纵向动力的影响时，以及 B. M. 穆奇尼科夫和Л. Н. 格瓦拉马德兹在分析混编列车起动过程中所产生的纵向力时，均将连续的弹性杆作为列车的计算简图。C. B. 维尔欣斯基在分析列车通过坡度起伏的线路区段的运动时，将列车视为连续的和不可拉伸的柔性杆，并在杆端有集中质量（机车），即如 C. A. 恰普雷金所曾指出的那样，将列车当作长度不变的力学系统。C. B. 维尔欣斯基利用质点系的质心运动定理，提出了货物列车在稳定运动时，作用于自动车钩上的纵向力的计算方法。

H. A. 帕尼金曾采用连续的和均匀的列车模型，并将车辆连结器的状态方程视为非线性方程，从而定性地阐述了强

扰动沿列车的传播特性。他指出在具有非线性不可逆连结器的列车中，强扰动的传播过程与小扰动的传播过程是根本不同的，他还确立了列车中形成冲击波的条件。

A.勃洛赫和 A.兰格在研究装有贯通式链钩的列车起动车时列车中的纵向波时，采用弹性杆件作为列车的计算简图，对于这个问题，H.E.茹科夫斯基早已完全解决了。A.И.米哈列夫斯基和 T.П.戈罗杰茨卡娅在研究为数不多的车辆（8~13节车辆）所组成的车列的起动过程时，采用由弹性连结器相连接的刚性系统作为列车计算简图，要知道对于更多车辆组成的车列，采用解析计算法是很困难的。

A.Y.加列耶夫和 Ю.И.佩尔希茨在研究列车力学时，采用了间断的模型，即视为车辆连结器中具有间隙的刚性系统，而且认为在顺序冲击后，机车和上述车辆将象一个刚性体一样继续移动，在再次冲击时，这些连结器也不再承受附加载荷了，但这与列车的实际情况也是不相符的。B.A.杰尼索夫在研究列车通过线路坡度起伏区段的纵向动力学时及 A.П.诺维科夫在研究列车起动过程时，均采用了这样的计算简图。

使用电子计算机就能进一步完善列车的计算简图，可以更确切地描述各车辆连结器及车辆本身的特性。B.A.拉扎良、E.И.勃洛欣、C.B.杜瓦尔扬、Ю.M.切尔卡欣的研究中，不仅考虑了自动车钩中现行的弹簧-摩擦式缓冲器的特性，而且还计入了车辆结构的弹性。他们将车辆视为两种质量构成的模型，并且将货物视为一个质量散布的系统，这样就能计算固态和液态货物对列车纵向振动的影响了。

I. 2. 研究列车制动动力学的各种 解析法的概述

列车中的纵向力与闸瓦和车轮间的闸瓦压力所引起的制动力有关，制动力是钢轨作用于车轮的外力。列车制动力的这种概念首先由俄罗斯学者 H. П. 佩特罗夫提出。苏联以及国外在研究制动所产生的纵向振动时，都采用 H. E. 茹科夫斯基所提出的两种列车计算简图。这种类型的不稳定运动工况的特点是：制动时扰动源沿着列车移动。

由于所研究的问题是很复杂的，研究人员不得不采用抽象的方法，并引入一些假设，以使得所研究的过程近似于已知的以往曾研究过的现象。研究中最大的困难是计算制动力，要知道，即使在制动缸压力不变的情况下，制动力也是变化的，它与制动过程中列车运动速度的减慢程度有关。

Б. П. 卡尔瓦茨基将不稳定的制动工况划分为几个阶段 [17]。第一阶段：第一辆车（首车）中的闸瓦压紧车轮后，其它车辆的制动机依次开始动作。当最后一辆车上的闸瓦压紧车轮时（该时间由制动波传播时间所决定），列车中前部各车辆的制动缸已经产生了很大的作用力了。在第二阶段里，车列中所有制动缸的压力都均匀地增长，各缸的压力均保持第一阶段末所形成的压力差。当首车制动缸的压力达到最大值时，第二阶段结束，当所有车辆的制动缸压力趋于一致并达到最大值时，列车不稳定运动过程即告结束。

Б. П. 卡尔瓦茨基采用了相互间以弹簧连接的、没有间隙的刚性系统作为列车的计算简图，弹簧按虎克定律计算，亦即他研究了车辆连结器具有可逆特性的受压缩的列车。

为计算列车中的最大准静态力，Б. П. 卡尔瓦茨基提出了下列公式：