

高等学校试用教材

电 牵 引 基 础

北方交通大学	朱 世 麟	主 编
上海铁道学院	蒋 影 斐	
上海铁道学院	邵 丙 衡	主 审

中 国 铁 道 出 版 社

1990年·北京

内 容 简 介

本书讲述列车牵引理论基础；列车牵引运行、制动以及运行能耗的基本理论及计算；各类电传动机车牵引和制动原理；列车牵引电算及微机在电牵引中的应用。为了便于学习，书中提供了简易电算程序，供上机练习使用。北方交通大学备有成套软件及使用说明的磁盘。书后附录提供了近期我国主要电传动机车的参数及特性，可供查用。

本书为高等院校电力牵引与传动控制专业的教材，亦可作为其它有关专业的教材及供机车电传动、铁路运营，线路设计等方面的工程技术人员参考。

高等学校试用教材

电 牵 引 基 础

北方交通大学 朱 世 麟 主编
上海铁道学院 蒋 影 斐

*

中国铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

责任编辑 方军 封面设计 王毓平

中国铁道出版社发行 各地新华书店经售

北京顺义燕华营印刷厂印

开本：787×1092mm1/16 印张：13.25 字数：327 千

1990 年 8 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数：1—1200 册

ISBN 7-113-00846-1/U·268 定价：2.65 元

目 录

绪 论	(1)
第一章 列车牵引理论基础	(4)
第一节 轮轨相互作用原理	(4)
第二节 列车运行阻力	(13)
第三节 列车运动方程式	(21)
第二章 直流电传动机车牵引原理	(23)
第一节 直流电传动机车的分类和工作原理	(23)
第二节 各种励磁方式直流牵引电动机牵引性能的分析比较	(26)
第三节 直流电传动机车的牵引特性	(34)
第四节 直流电传动机车的调速方法	(36)
第五节 直流电传动机车的基本参数	(44)
第三章 交流电传动机车牵引原理	(50)
第一节 交流电传动机车的分类和工作原理	(50)
第二节 交流牵引电动机的牵引性能分析	(53)
第三节 交流电传动机车的基本调速方法	(56)
第四节 交流电传动机车的牵引性能简析	(60)
第四章 动车牵引原理	(65)
第一节 概 述	(65)
第二节 直流斩波动车的牵引原理	(65)
第三节 高速动车牵引	(70)
第四节 磁悬浮电动车辆的牵引原理	(74)
第五章 列车制动	(79)
第一节 概 述	(79)
第二节 闸瓦制动	(80)
第三节 电阻制动	(86)
第四节 再生制动	(96)
第五节 电磁制动	(106)
第六章 列车牵引运行参数的计算	(109)
第一节 合力曲线	(109)
第二节 牵引重量的计算	(113)
第三节 牵引重量的校验	(115)
第四节 牵引定数的确定	(117)
第五节 分析计算法求解速度曲线和时间曲线	(119)
第六节 图解法求速度时分曲线	(121)

第七节 线路纵断面的化简	(126)
第七章 列车运行的能耗与牵引电动机的发热校验	(129)
第一节 列车在运行中的能量消耗	(129)
第二节 列车运行的节能	(133)
第三节 电传动机车的能耗计算	(137)
第四节 牵引电动机的发热校验	(141)
第八章 列车牵引电算	(148)
第一节 牵引电算的基本概念	(148)
第二节 工况初选和速度时分试算	(151)
第三节 退回重算	(155)
第四节 进站停车试凑	(157)
第五节 简易牵引电算程序	(159)
第九章 微型计算机在电牵引中的应用	(176)
第一节 微机控制的特点和对车载微机的要求	(176)
第二节 列车节能运行微型计算机系统	(177)
第三节 电动车组的运行和故障监视装置	(180)
第四节 微型计算机在机车和动车自动控制上的应用	(183)
第五节 列车自动驾驶的微型计算机系统	(186)
附录一 机车主要数据	(189)
附录二 韶山 ₁ 型电力机车特性曲线	(190)
附录三 我国部分电力机车特性曲线	(196)
附录四 我国部分电力传动内燃机车特性曲线	(200)

绪 论

《电牵引基础》是研究电传动机车牵引与列车运行的基础理论和计算方法的一门专业课，是电力牵引与传动控制专业的必修课程之一。它应用动力学、电工学等的基本原理，分析研究这类机车牵引的理论问题和实际问题。这些问题大致包括以下三方面内容：

- (1) 电动机车的牵引特性，调速和制动原理以及牵引运用特点；
- (2) 电传动机车牵引列车运行的运动规律及其牵引计算方法；
- (3) 对电牵引具有深远影响的新的应用技术。

通过本课程的学习，可以达到以下目的：

1. 掌握电牵引的基础理论，奠定必要的专业基础。

铁路运输的直接生产手段是列车的牵引运行，铁路的车、机、工、电各部门都在为列车运行服务。列车牵引理论几乎为各部门的共同基础理论。以电动机车的设计而论，进行牵引计算是确定机车功率、速度等主要参数，提出设计任务书的基本手段；粘着重量的利用是充分发挥机车的功率、进行传动装置和机械部分设计的必要理论基础之一；掌握机车的起动、调速、制动各运行状态和线路情况对电路和电气部分工作的影响，是设计高质量的主、控电路的必要条件之一。所以，象运输、经济、建筑、机车等方面的不少专业均开设有关列车牵引的课程，一方面为本专业服务，另一方面起到拓宽专业知识面的作用。

2. 为后续的专业课程提供必要的基础知识。

电传动机车是以电力传动方式来实现能量变换及传递的机车的总称。它既包括了电力机车、电传动内燃机车和高速动车等干线机车，也包括地铁的电动客车及工矿用电力机车。因此，电牵引也是一个广义的概念。它是指以电传动机车为动力的各类牵引方式，如包括以电力机车为动力的电力牵引和以电传动内燃机车为动力的热力牵引。

本书力求在电力传动共性的基础上，较为全面地分析研究列车牵引的问题，并以铁路干线的列车牵引为主要研究对象。关于牵引的一些基本理论对地铁和工矿牵引也都是适用的，只是在一些具体的牵引计算上有所区别。为了论述方便，书中没有对干线与非干线铁路作进一步区分。

铁路运输与现代生活的各个方面有着紧密的联系。为了适应现代社会迅速发展的需要，列车牵引正在向着高速、重载、舒适性和低能耗的方向发展。

人们生活节奏的快速化和各类交通运输的竞争机制促使高速客运的不断发展。目前一些国家的高速列车，其速度已达200km/h以上，如法国、日本、西德、英国等。法国巴黎至里昂的426km的高速铁路，使用TGV高速电动车组以213km/h的平均时速走完全程。该车组运行最高速度已达380km/h，创世界铁路的最高速度记录。铁路货运量的迅速增加，使得发展重载运输已成为当今铁路运输的发展趋势之一。美国、苏联、加拿大等国都有4000~10000t的重载列车，有的甚至组织20kt和30kt的重载列车。改善劳动条件，提高服务的舒适性是现代社会的特征之一，铁路运输也不例外。不少国家已在技术和设备上作了大量努力，在提供

舒适的旅行条件上，达到了相当高的水平。降低列车牵引的能耗是各国普遍关心的问题。从制定能源政策到各项具体节能措施，各国都做出了巨大努力，并取得了显著效果。上面提到的TGV列车的能源消耗，每一旅客公里只消耗标准燃料16g，比普通旅客列车大得不多。传统机车牵引的列车以160km/h的速度运行消耗的能量，供给TGV列车使用时，却能以260km/h的高速运行。

电力牵引具有功率大、效率高、可以反馈能量、适应性强、易广泛应用新技术等许多优点，能适应现代列车牵引的需要。因此，铁道电气化很快为世界上绝大多数国家所接受，不少国家迅速发展电力牵引，充分发挥其优越性，使铁道运输取得了巨大进展。表1列出了世界上铁道电气化发展较快的一些国家和我国的电气化里程及其占全国运营里程的百分比，从表中所列数字可以粗略地看出各国大力发展电力牵引的总趋势。

部分国家1988年铁路电气化里程 表1

国 家	电气化里程(km)	电化率(%)	国 家	电气化里程(km)	电化率(%)
苏 联	49300	33.9	波 兰	9452	36.9
日 本	14011	55.6	瑞 典	7377	62.3
西 德	11882	38.8	瑞 士	5139	99.2
法 国	11644	30.9	印 度	6466	43.4
意大利	9974	51.2	中 国	5738	10.9

许多国家以占铁路运营里程1/3~1/2的电气化里程，完成全国铁路1/2~2/3货运周转量。法国以约占全国铁路网1/3的电气化铁路，完成全国运量80%以上。苏联铁路在交通运输系统中占有主导地位，它承担其国内货运量的2/3和客运量的1/2。近年来，苏联铁路采取了一系列的技术组织措施，以适应运量的不断增长。其中起重要作用的是铁道电气化和推广重载运输技术，而铁道电气化又是重载运输的重要保证。苏联铁路电气化的里程虽只占全路的1/3，但完成的货运任务却占总量的2/3。它的总运营里程约占世界铁路的12%，而其所完成的货物周转量却占世界铁路的52%。这些表明，苏联铁路已具有很高的运输能力和设备使用效率。西德在大规模铁道电气化的三十年中，铁路总周转量提高了30%，但由于电气化，使一次能源消耗绝对值却降低了约70%，即由900万t单位煤燃料降低到300万t以下。大量事实说明，发展电力牵引对提高铁路运输能力和运输效率具有重大的作用。

电力牵引也存在一些缺点，如机动性差，对通信干扰较大，一次投资大等。电力牵引虽然一次投资大，但是，机车可靠性较高，运营费用较低，能源利用经济，运行性能好，长远地综合考虑其经济效益，电力牵引仍然是可取的。

解放后，我国铁路运输有了相当大的发展。铁路营业里程从1952年的22900km增长到1988年的52767km。1988年完成货物周转量为986,000×10⁶t·km，比1952年增长17.7倍；完成旅客周转量为325,000×10⁶万人·km，比1952年增长15倍。这期间我国牵引动力的数量和质量均大为改观。蒸汽机车大幅度增加，内燃机车、电力机车从无到有。到1988年底，全路保有机车13163台，比1950年增加2.1倍，机车总功率增加了5倍左右。目前，我国已能生产功率为6400kW相控调压的韶山₄型八轴干线货运电力机车和功率为2720kW的东风₃型电传动内燃机车。目前，我国铁路承担了国内交通运输总量中60%的旅客周转量和70%的货物周转量。可以看出，铁路运输在我国交通运输中起着十分重要的作用。

目前,我国三种牵引方式,其里程和占总运营里程的百分比分别为:蒸汽机车牵引32662km,占61.9%;内燃机车牵引14335km,占27%;电力机车牵引5738km,占10.9%。所承担运输工作量的比重分别为:蒸汽机车牵引为39.5%,内燃机车牵引为47.1%,电力机车牵引为13.4%(1988年底的统计数字)。1988年我国列车的平均牵引重量为2365t。

为了适应我国经济建设和人民生活的需要,缓和运能和运量的矛盾,必须加速铁路电气化建设,大力发展电力牵引,实现牵引动力的现代化,推动我国铁路运输事业的发展。

今后电牵引的发展为我们提出了一系列艰巨的任务。例如,对我国所用机车的机型、功率等级的配置、各类机车的比重、年生产量等远近期目标,进行充分的科学论证,进一步制定适合我国国情的牵引动力发展规划;各类机车和动车的设计、制造以及新车的研制;牵引动力的能源合理利用和牵引运行节能;机车牵引能力和运用效率的提高;列车牵引理论和牵引电算的研究及应用等。所有这些任务的完成,都与电牵引的基础理论有着紧密的联系。努力加强电牵引领域的学科建设,不断提高我国电牵引的理论水平,无疑将对我国电牵引的发展起到积极的作用。

第一章 列车牵引理论基础

第一节 轮轨相互作用原理

自世界上第一条铁路诞生以来,铁路技术不断发展,铁路运输的形式日趋多样化,应用日益广泛。牵引动力出现了蒸汽机车、内燃机车、电力机车;铁路有地面铁路、地下铁路、高架铁路;铁路运输在干线运输,工矿运输和城市交通中得到广泛应用。

但是,无论采用哪一种牵引动力和哪一种运输方式,铁路运输都依赖于车轮和钢轨的相互作用实现列车的运行。因而,车轮和钢轨的相互作用成为铁路运输区别于其他运输方式的基本特点;轮轨相互作用的理论成为铁路运输的基础理论。

一、动轮与钢轨间粘着的概念

(一) 粘着与空转

电传动机车的牵引动力由牵引电动机通过传动机构传递给机车轮对。这些传递牵引能量的机车轮对(车轮),称为动轮对(动轮)。

图1-1 为机车以速度 v 在平直线路上运行时一个动轮对的受力情况(忽略内部各种摩擦阻力)。为了清楚起见,图中将动轮与钢轨分离。

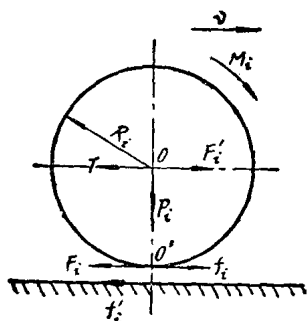


图1-1 动轮对受力

P_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 P_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。用 f_i' 表示车轮作用在钢轨上的力,其值 $f_i' = F_i$ 。由于轮轨接触处存在着摩擦,车轮上 O' 点有向左运动的趋势,将引起向右的静摩擦力 f_i ,即钢轨对车轮的反作用力,其值 $f_i = f_i'$ 。 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,动轮对作纯滚动运动。

动轮与钢轨接触处,由于正压力而出现的保持轮轨接触处相对静止,而不相对滑动的现象称为“粘着”。粘着状态下的静摩擦力 f_i 又称为粘着力。

试验研究表明,轮轨间的粘着与静力学中的静摩擦具有十分相似的物理性质。驱动转矩 M_i 产生的切向力 F_i 增大时,粘着力 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,粘着力 f_i 达到最大值。若使切向力 F_i 再继续增大, f_i 反而迅速减小。试验证明,粘着力 f_i 的最大值 $f_{i,max}$ 与动轮对的正压力 P_i 成正比,即

$$f_{\max} = \mu P_t \quad (1-2)$$

最大粘着力与轮对正压力的比例常数称为粘着系数，用 μ 表示。上式表明，在轴重一定的条件下，轮轨间的最大粘着力由轮轨间粘着系数的大小决定。

轮轨间出现最大粘着力时，若继续加大驱动转矩，切向力 F_t 将大于最大粘着力，动轮上的 o' 点将向左移动，轮轨间出现相对滑动，粘着状态被破坏。动轮由纯滚动变为既有滚动，也有滑动。此时，钢轨对动轮的反作用力 F_t 由静摩擦力变为滑动摩擦力，其值迅速减小；与此同时，动轮的转速上升。这种因驱动转矩过大，轮轨间的粘着关系被破坏，使轮轨间出现相对滑动的现象，称为“空转”。动轮出现空转时，轮轨将依靠滑动摩擦力传递切向力，这就大大削弱了传递切向力的能力，同时造成动轮踏面的擦伤。因此，机车在牵引运行中，应尽量防止出现动轮的空转。

(二) 摩擦力与蠕滑

粘着的弹性变形理论对粘着现象的解释，提出了摩擦与蠕滑的关系，有利于深化对粘着的认识。我们利用图1-2作简要说明。

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弹性变形，接触面间出现微量滑动，即所谓“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，车轮上被压缩的金属陆续地被放松，并伸展开来，而钢轨上相应的被拉伸的金属被压缩，因而在接触面的后部出现滑动。

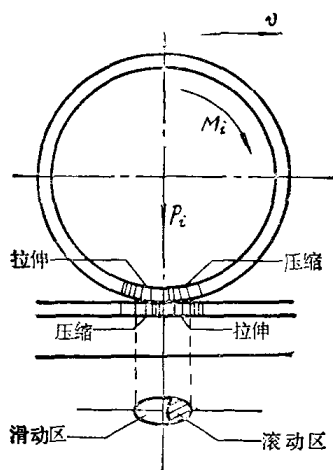


图1-2 牵引工况轮轨接触处的弹性变形

轮轨接触面存在两种不同状态：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。这两个区域的大小将随切向力的变化而变化。当切向力增大时，滑动区面积增大，滚动区面积愈来愈小，直到为零。当滚动区面积为零时，整个接触面间出现相对滑动，轮轨间的粘着被破坏，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，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，用蠕滑率 σ 表示蠕滑的大小。

$$\sigma = \frac{\omega R_t - v}{v} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 v ——动轮的前进速度；

ω ——动轮转动的角速度。

图1-3示出了试验所得摩擦-蠕滑曲线。曲线的纵坐标为摩擦力与轴重之比的百分数，即摩擦系数 φ ，曲线的横坐标为蠕滑率 σ 。

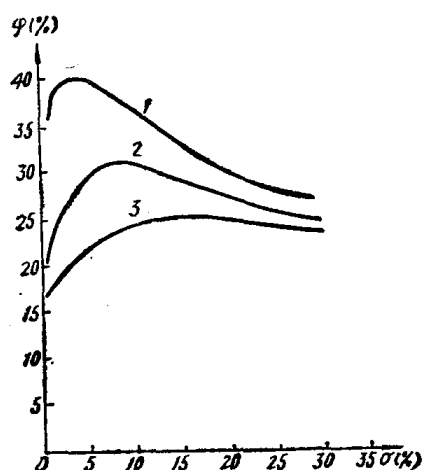


图1-3 直线线路的摩擦-蠕滑曲线(平均值)

1—干燥轨面撒砂；2—干燥轨面；3—潮湿轨面。

摩擦-蠕滑曲线受许多因素影响，具有很宽的值域范围。轨面状态对摩擦-蠕滑曲线的峰值影响很大。图中绘出了三种轨面状态下的平均曲线。

曲线说明，蠕滑率很小时，摩擦力随蠕滑的增大迅速加大。如果机车动轮的蠕滑值大于1%，轮轨间的摩擦力通常就会有很大提高。而这个1%的蠕滑值是一般的防空转装置所允许的。当蠕滑达到某一值时，如正常干燥轨面为8%左右，摩擦力出现最大值，其值由粘着系数确定。当蠕滑继续增大，即发生相对滑动，摩擦力反而减少，其值由滑动摩擦系数确定。

对蠕滑的研究表明，蠕滑是影响粘着的主要因素。在粘着状态下，利用蠕滑产生摩擦力应保持适当的蠕滑值，以便尽量获得最大的摩擦力。允许的最大蠕滑值是在防空转系统的设计中应该研究确定的。

二、机车牵引力的形成与限制

(一) 牵引力的形成

机车牵引力是机车驱动装置产生的一种使列车向前运动的外力，其作用方向与列车运动方向相同。牵引力的大小可根据需要由司机控制。

牵引力的形成建立在轮轨间粘着的基础上。仍以图1-1说明一个动轮对牵引力的形成过程。

由于轮轨间存在粘着，静止的动轮对受驱动转矩 M_i 的作用以后，在动轮上的 O' 点，受到大小相等，方向相反的切向力 F_i 和粘着力 f_i 的作用。 O' 点保持相对静止，成为动轮的瞬时转动中心。作用在轮轴中心 O 点的力 F_i' ，将使动轮绕 O' 点转动，引起轴承对轮轴的水平反作用力 T 。只要驱动转矩 M_i 足够大，能够克服动轮的转动惯量，动轮即绕瞬时转动中心转动。动轮不断转动，瞬时转动中心沿钢轨不断前移，机车产生平移运动。

从整个机车来看，驱动转矩归算到轮心的作用力 F_i' 和轴承对轮轴的反作用力 T 是一对内力，而钢轨对动轮的摩擦反作用力 f_i 是动轮受到的唯一水平外力。只有 f_i 的存在机车才有可能产生平移运动。故这个外力称为动轮的轮周牵引力。

按图1-1所示可列出动轮质心的平移运动方程式和动轮绕轴心转动的转动运动方程式，即

$$f_i - T = m_i a \quad (1-4)$$

$$M_i - f_i R_i = J_i \beta \quad (1-5)$$

式中 m_i ——动轮对的质量；

a ——动轮平移的质心加速度；

J_i ——动轮对及其传动机构的转动惯量；

β ——动轮的转动角加速度。

当牵引电动机断电不产生转矩时， $M_i = 0$ ， $f_i = 0$ ， $T = 0$ ，由式(1-5)得 $\beta = 0$ ，即动轮

不转动。由式(1-4)得 $\alpha=0$ ，机车不能前进。由此说明，尽管车轮与钢轨间具备粘着条件，如果机车内部没有驱动转矩产生，动轮既不能转动，机车也不会产生平移运动。

反之，当牵引电动机通电发挥转矩，而如果轮轨间呈现理想的光滑状态，虽然 $M_i \neq 0$ ，但是由于轮轨间不具备粘着条件，即 $f_i=0$ ，由式(1-5)得 $\beta=M_i/J_i$ ，说明动轮上 O' 点的速度不为零，即 O' 点不是瞬心，动轮只是绕轴心转动。动轮不绕 O' 点转动，则 $T=0$ ，由式(1-4)得 $\alpha=0$ 。因此，即使机车内部有驱动转矩产生，如果不能同时具备外部的粘着条件，同样不能形成轮周牵引力，只能使轮对空转，机车也不会产生前进运动。

一个事物的变化，内因是根据，外因是条件，二者缺一不可。机车的运动也不例外。电传动机车牵引电动机产生的驱动转矩，是机车前进运动的根据；钢轨的摩擦反作用力是机车前进运动的条件，两者必须同时存在机车才能前进。

依据式(1-5)可以定量分析轮周牵引力。当忽略动轮对的转动惯量 J_i 时，轮周牵引力等于驱动转矩归算到轮缘的作用力，即

$$f_i = \frac{M_i}{R_i} \quad (1-6)$$

这里还应指出，式(1-5)是在忽略了摩擦阻力的条件下建立的近似关系式。驱动转矩在动轮的加速过程中，不仅要克服轮对的转动惯量，而且还要克服轮轴与轴承的摩擦力和动轮滚动的摩擦力，其剩余部分才能在轮缘形成轮周牵引力。显然，轮周牵引力 f_i 与驱动转矩归算到轮缘的作用力 M_i/R_i 是不相等的。只是在以上近似的条件下式(1-6)才能成立。

机车的轮周牵引力 F 为机车各动轮对轮周牵引力之和，即

$$F = \sum F_i \quad (1-7)$$

机车的轮周牵引力克服机车的各种阻力，通过转向架、车体传递到车钩，牵引列车前进。车钩上的那部分牵引力称为挽钩牵引力，以 F_w 表示，则

$$F_w = F - W' \quad (1-8)$$

式中 W' ——机车总阻力。

机车的起动牵引力是在限制条件下，机车起动时所能发挥的最大牵引力。机车运行速度在 $0 \sim 2.5 \text{ km/h}$ 之间时，起动牵引力应基本保持不变，以保证全列车由静止进入运动状态。韶山1型电力机车的起动牵引力受粘着条件的限制，故其计算起动牵引力用速度等于零时粘着力值。

我国铁道部颁布的《列车牵引计算规程》(简称《牵规》)规定，牵引计算中的机车牵引力 F ，均按动轮轮周牵引力计算，单位为N。

(二) 粘着对牵引力的限制

如上所述，调节牵引电动机驱动转矩的大小，可以改变切向力 F_i 的值，通过轮轨粘着，得到不同的轮周牵引力 f_i 。但是，机车所能实现的最大牵引力受粘着条件的限制。由粘着条件决定的最大粘着力，也就是机车动轮不空转所能实现的最大牵引力，称为机车的粘着牵引力，用 F_μ 表示。其值为

$$F_\mu = 1000 \mu_i P_\mu \text{ (N)} \quad (1-9)$$

式中 μ_i ——机车的计算粘着系数；

$P_\mu = \sum P_i$ ——各动轮对正压力之和，其相应的机车质量称为粘着重量。*

* 注：本书在文字和符号上一般将不区分质量及其相应的重力的概念，文字上均用“重量”一词表示，仅在单位上加以区分：用t(吨)表示质量，用kN(千牛)表示重力。

机车粘着牵引力的大小受到轮轨间粘着性能和机车粘着重量的影响。在粘着重量一定的条件下,粘着牵引力由计算粘着系数决定。

由于粘着条件的限制,机车在牵引运行时所能发挥的牵引力的范围为

$$F \leq 1000 \mu_i P_\mu \text{ (N)} \quad (1-10)$$

按照式(1-6)的关系,一旦机车各动轴驱动转矩归算到轮缘的作用力之和超出上式的限制时,粘着条件相对最差的动轮就会产生空转,机车的牵引力立即下降。

机车在牵引运行中,动轮与钢轨间由粘着状态发展成真正的动轮空转,往往要经过一个滑动、粘着、再滑动的所谓粘着滑动振动过程。这是由摩擦力的突然变化引起传动机构弹性应力的变化而产生的。这个过程将对粘着的恢复产生一定影响。

三、粘着系数与计算粘着系数

单个轮对与钢轨之间的粘着系数, μ 仅决定于轮轨接触面之间的物理状态,是一理论值。机车的走行部分包括多个轮对,机车粘着牵引力能否充分发挥,受到各个轮对粘着情况的影响。机车每个轮对的粘着状态又与机车的结构和运行状态有关。因此,用计算粘着系数 μ_i 表示整台机车的粘着系数,以示与单个轮对粘着系数的区别。不过,通常提到的粘着系数往往也是指机车的计算粘着系数。

计算粘着系数是可以通过机车试验得出的实验值。机车在不空转的运行情况下,所能得到的最大牵引力 F_μ 与机车粘着重量 P_μ 之比称为计算粘着系数,即

$$\mu_i = \frac{F_\mu}{P_\mu} \quad (1-11)$$

为了进一步掌握粘着的性能,下面分别对影响轮对和机车粘着系数的因素进行分析。

(一) 影响轮对粘着系数的因素

影响轮对粘着系数的因素很多,情况也较复杂,下面主要从两方面作简要介绍,其他因素归在对计算粘着系数的影响中讲述。

1. 轨面状态 许多研究和运行经验说明,气候和污染对粘着系数有很大影响。

干燥轨面粘着系数高,而毛毛细雨使粘着系数降低。但是,在下大雨钢轨被彻底清洗后,粘着情况却与干燥轨面差不多。轨面有薄冰时,粘着系数减小。

列车漏油是时有发生,有油膜的轨面使粘着系数减小。轨面上的落叶对粘着很不利。轨面上有砂子或金属微粒以及轨面有薄锈时,将改善粘着。

2. 轮轨材质 为了减少磨损,现代有采用硬质钢做车轮和钢轨的趋势。从一些研究的结果来看,似有粘着系数随着硬度而增加的倾向。另外,使轮轨钢的某些物理特性相互配合,对粘着也许是有利的。目前的有关研究表明,对此问题的看法还不甚统一。

由于影响粘着系数的因素很多,其值具有很广的随机变化范围。

(二) 影响计算粘着系数的因素

对机车计算粘着系数的影响包括两个方面,其一是每个轮对粘着系数的高低;其二是各个轮对粘着利用的程度。

粘着利用是指轮对粘着能力的发挥是否充分。机车运行时,只要有一个轮对首先发生空转,机车的功率就要受到限制,其他轮对即使还有粘着潜力,也无法发挥。由于各种原因,机车的各个轮对实际上不可能同时达到粘着极限。因此粘着利用的问题总是存在的,显然,机车的计算粘着系数要小于轮对的粘着系数。

下面仅就影响机车粘着系数的主要因素作简要分析。

1. 运行速度 许多研究结果都表明,粘着系数是随着速度的增长而下降的。我国根据不同的机车类型,试验制定出计算粘着系数的相应计算公式。

韶山₁型电力机车的计算公式为

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

东风₄型内燃机车的计算公式为

$$\mu_i = 0.25 + \frac{8}{100 + 20v} \quad (1-13)$$

式中 v ——运行速度 (km/h)。

机车在曲线上运行时,由于外轨超高以及内外侧动轮走行距离不同所引起的横向和纵向滑动等原因,计算粘着系数减小。试验证明,当曲线半径小于600m时,对粘着系数的影响较大,需要对粘着系数的计算进行修正。

电力机车和电传动内燃机车在曲线半径 R 小于600m的曲线上运行时,其计算粘着系数 μ_r 均按下式计算:

$$\mu_r = \mu_i (0.67 + 0.00055R) \quad (1-14)$$

2. 线路质量 线路垂直刚度愈小,粘着系数愈小。线路垂直和水平方向的线性误差,保养情况好坏,都将影响粘着系数。

3. 强迫硬性滑动 机车在正常运行时,动轮作滚动运动。实际上,动轮在滚动过程中,不仅存在正常的蠕滑现象,而且总是伴随着强迫硬性滑动。只不过这些硬性滑动仍属连续稳定或断续的性质,一般不会导致动轮的空转。但是,它会引起粘着系数下降。

圆锥形的车轮踏面,轮缘与钢轨间存在间隙以及车轮直径的差异等均是引起强迫硬性滑动的因素。

值得注意的是,逐渐扩大的硬性滑动,会导致动轮发生空转。实际运行中应当避免产生这种情况。

4. 牵引电动机特性的差异 牵引电动机的特性由于制造的原因不可能完全相同。因此,在同一运行速度下各轮对受到的驱动转矩会有差异。在轴重及轮对粘着系数相同的条件下,驱动转矩大的轮对发挥牵引力大。在机车提高牵引力的过程中,驱动转矩最大的轮对将首先发生空转,这样就限制了机车牵引力的提高,机车的计算粘着系数将减小。

5. 动轮直径的差异 机车制造时,动轮的直径存在一定的允许误差,这同样会引起各轮对发挥的牵引力不同,导致机车的计算粘着系数减小。

6. 轴重转移

(1) 轴重转移的概念

机车的轴重是指机车在静止状态时,每个轮对加于钢轨的正压力。实际上,在牵引运行时,由于轮周牵引力与车钩处作用的列车阻力不在同一水平线上,使得各轮对的轴重发生变化,有的增载,有的减载。这种机车运行时的轴重重新分配称为牵引力作用下的轴重转移。当然,机车总的粘着重量是不会改变的。

图1—4为四轴电力机车牵引运行时的受力情况(忽略机车阻力)。机车垂直力的传递是通过轮对与转向架之间的一系弹簧和转向架与车体之间的二系弹簧实现的。水平力则是通过动轮的轴箱以及中央支承传递。

设机车各动轮所发挥的轮周牵引力相等。

机车处于静止状态时, 力 f_i 均为零。由图1-4 (a) 可得

$$N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = \frac{P}{4} \quad (1-15)$$

各轮对的轴重 P_i 均匀分配, 等于钢轨的反作用力 N , 为机车重量 P 的四分之一。

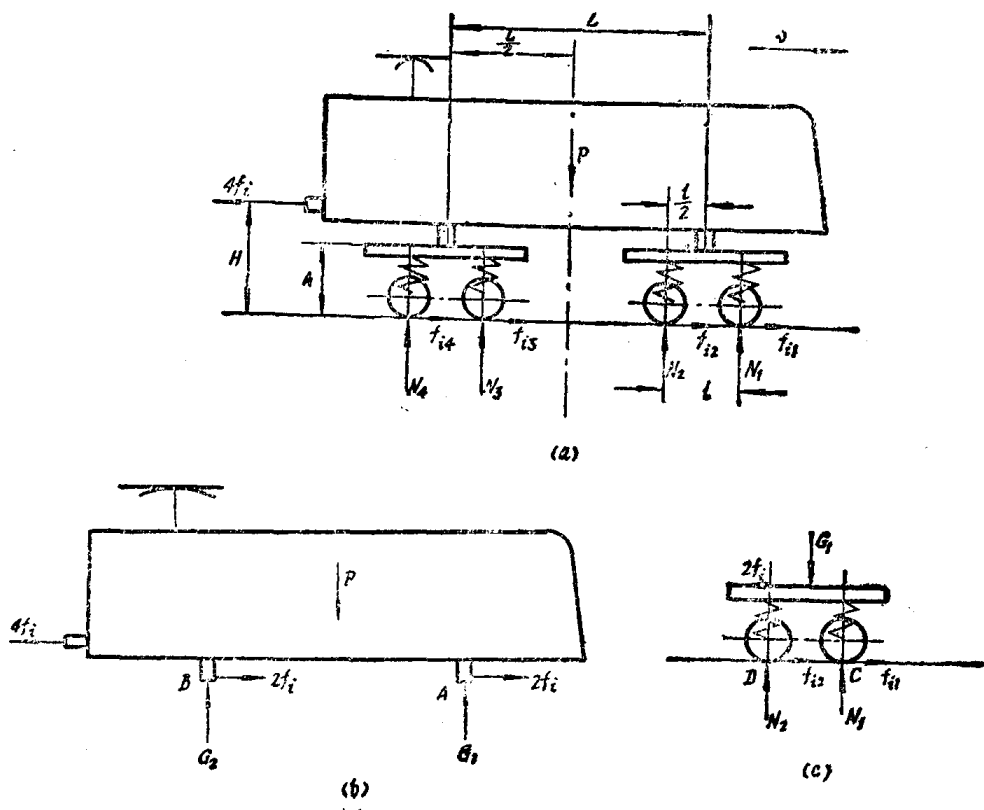


图1-4 四轴电力机车受力分析

(a) 机车; (b) 车体; (c) 前转向架。

牵引状态下, 车体与转向架的受力情况如图1-4 (b)、(c) 所示。

以车体为隔离体, B点的力矩方程式为

$$4f_i (H-h) + G_1 L - P \frac{L}{2} = 0$$

得

$$G_1 = \frac{P}{2} - \frac{4f_i (H-h)}{L} \quad (1-16)$$

同理, 由A点的力矩方程式可得

$$G_2 = \frac{P}{2} + \frac{4f_i (H-h)}{L} \quad (1-17)$$

以前转向架为隔离体, D点的力矩方程式为

$$2f_i h - G_1 \frac{l}{2} + N_1 l = 0$$

得

$$N_1 = \frac{G_1}{2} - \frac{2f_i h}{l} \quad (1-18)$$

原
书
缺
页

有重要意义。我国韶山₄型电力机车采用低位斜拉杆，设计了轴重转移的电气补偿环节，使机车在发挥最大起动牵引力时，粘着重量利用系数能达到90%以上，获得了较好的粘着利用性能。

(三) 提高计算粘着系数的途径

随着现代机车功率的不断增大，如何充分发挥机车的牵引能力，提高粘着系数和改善粘着利用的问题，愈来愈受到人们的重视，成为人们十分关心的研究课题之一。

根据国内外的运行经验和研究结果，主要可以采取如下措施来提高机车的计算粘着系数：

- (1) 采用撒砂来提高粘着系数，是机车上最常用并且较为有效的方法之一。
- (2) 对钢轨进行各种处理，以除去轨面的杂物。例如用水流、气流、化学清洗剂、电弧或机械方法清洁轨面。
- (3) 注意机车走行部分的清洁，防止润滑油漏到轨面上。
- (4) 在机车设计中选择轴重转移的最佳参数。如降低车钩高度 H 和转向架牵引点高度 h 等；牵引电动机采用顺向布置；采用组合传动以提高机车粘着重量利用系数等。
- (5) 提高制造水平，尽可能减小动轮直径的误差以及牵引电动机特性的误差。
- (6) 在机车上装设防空转、防滑装置。
- (7) 司机正确驾驶机车，起动平稳。

四、列车制动力的形成

制动力是通过机车和车辆产生的一种阻止列车运动的外力，作用方向与列车运动方向相反，并能够由司机调节力的大小。

与机车牵引力一样，轮轨间的粘着也是列车制动力形成的基础。图1-5是一个轮对的闸瓦制动力形成的示意图。

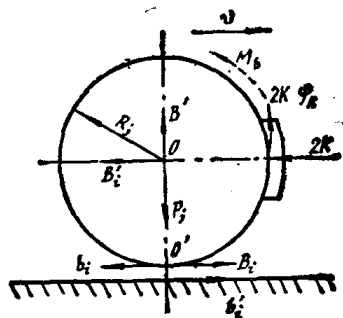


图1-5 闸瓦制动力形成

设一个轮对上有两块闸瓦，在忽略其他各种摩擦阻力的情况下，轮对在不平、直道上滚动前行。

若每块闸瓦以力 K 压向车轮踏面，闸瓦与踏面间引起与车轮转动方向相反的滑动摩擦力 $2K\varphi_K$ （ φ_K 为轮、瓦间的滑动摩擦系数）。对于列车来说，此摩擦力是内力，不能使列车减速。可是，它是使列车减速的内因。它通过轮轨间的粘着，引起与列车运动方向相反的外力，实现列车的减速。

摩擦力 $2K\varphi_K$ 对车轮的作用效果，相当于作用在轴心的力 B' 和制动转矩 M_b 的合成。 B' 和 M_b 分别满足以下关系：

$$B' = 2K\varphi_K$$

$$M_b = 2K\varphi_K R_i$$

用类似分析牵引力形成的方法，转矩 M_b 可以用作用在轴心和轮轨接触处和轴心的力偶 (B_i, B_i') 代替。力偶的力臂为车轮半径 R_i ，作用力 $B_i = B_i' = M_b / R_i = 2K\varphi_K$ 。轮轨接触处因轮对的正压力 P_i 而存在粘着，切向力 B_i 将引起钢轨对车轮的静摩擦反作用力 b_i ，则 $b_i = B_i = 2K\varphi_K$ 。 b_i 作用在车轮踏面的 O' 点，作用方向与列车运行方向相反，是阻止列车运行的外力，称为制动力。制动力 b_i 也是轮轨间的粘着力，因而也受到粘着条件的限制，即

$$b_i \leq 1000 P_i \mu_b \text{ (N)} \quad (1-27)$$

式中 P_i ——机车或车辆轮对的轴重 (kN)；

μ_b ——制动时轮轨间的粘着系数，推荐计算式： $\mu_b = 0.096 + \frac{2.4}{v+30}$ ，式中 v 为运行速度 (km/h)。

整个列车总的闸瓦制动力为机车、车辆所有轮对闸瓦制动力之和。即

$$B = \sum b_i \quad (1-28)$$

制动力的大小可以在轮轨粘着限制范围内由司机进行调节。闸瓦压力增大，则制动力增大。当车轮制动力达到粘着所允许的最大值时，若仍继续加大闸瓦压力，则同样会破坏轮轨间的粘着。此时轮轨产生相对滑动，车轮的制动力变为滑动摩擦力，数值立即减小，车轮迅速被闸瓦“抱死”，轮子在钢轨上继续向前滑行，这种现象称为“滑行”。列车制动时产生滑行，列车的制动力大为降低，而且车轮与钢轨的接触面还会被擦伤。因此，应尽量防止发生这种现象。

第二节 列车运行阻力

一、概 述

列车运行时，除前面分析的制动力外，还会受到与列车运行方向相反的另一类外力的作用。这些力与列车的运行条件、机车车辆的结构以及保养质量等因素有关，而且不能由司机进行控制。这类阻止列车运行的外力称为列车运行阻力，简称阻力，用 W 表示。

阻力分为两大类：

1. 基本阻力——列车在任何运行情况下都存在的阻力，用 W_0 表示。列车在空旷地段沿平直轨道运行时受到的阻力一般只有基本阻力。

2. 附加阻力——列车在某些特定情况下运行时，额外产生的阻力。例如：列车在坡道上运行时有坡道附加阻力 W_i ，在曲线上运行时有曲线附加阻力 W_r ，在隧道内运行时有隧道空气附加阻力 W_s 等。

列车运行时，作用在列车上的总阻力为基本阻力和附加阻力之和。如列车在坡道上运行时作用在列车上的阻力为

$$W = W_0 + W_i \quad (1-29)$$

为了便于计算，将作用在列车上的阻力分为机车和车辆两部分计算，分别称为机车阻力 W' 和车辆阻力 W'' ，即

$$W = W' + W'' \quad (1-30)$$

试验表明，作用在机车车辆上的阻力，绝大部分都与其重量成正比。因此，牵引计算中常用单位重量的阻力，称为单位阻力（用 w 表示），来计算机车、车辆的阻力，单位为 N/kN。

机车的单位阻力为

$$w' = \frac{W'}{P} \text{ (N/kN)} \quad (1-31)$$

车辆的单位阻力为