

电力机车 牵引与运用

卢锁平 徐水祥 刘 斌 钱 强 合编
北方交通大学 教材编审

● 中国铁道出版社

前 言

随着铁路牵引动力的不断改革和发展,电力机车日益增多,培养大批高质量的电力机车专业技术工人,已成为当务之急。

为适应铁路运输动力发展的要求,满足技工学校对教材及现场铁路职工学习上的需要,根据全路司机学校一九八九年元月于宝鸡召开的电力机车专业教学会议的精神,武汉铁路司机学校在组织编写了《DK-1型电空制动机》、《电力机车总体及走行》、《电力机车控制》、《电力机车电机电器》四本教材的基础上,又指定有关专业教师编写了《电力机车牵引与运用》、《电力机车检修》两本教材。

《电力机车牵引与运用》一书以铁道部教育司一九九〇年五月石家庄会议同意的司机学校电力机车专业教学计划为依据,由武汉铁路司机学校卢锁平、徐水祥、刘斌、钱传贤四位同志执笔编写。编写分工是:绪论、第一、三、四、五、六、十章及附表由卢锁平编写;第二、七、八章由徐水祥编写;第九、十一、十二章由刘斌编写;第十三章由钱传贤编写;全书由卢锁平统稿。

该书在编书过程中,参考了铁路中专电力机车《牵引计算》试用教材、《电力机车技术》和《机车电传动》杂志及《东风₄型内燃机车操纵和保养》等书,并得到铁道科学研究院孙振声研究员、王楨研究员和六里坪电力机务段有关同志的大力支持。全书经北方交通大学饶忠教授精心审阅,并提出许多宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢。

另外,为适应铁路运输发展的需要,全书采用了国际单位制,书中有些计算公式的系数也作了相应变化。为了照顾过去的使用习惯,有些仍采用原有的名称和符号,但“重量”一词均表示质量,而不再表示重力。如SS₁型电力机车计算重量138(t),即表示其质量为138(t),其所受的重力应为138g(kN)。

由于编者水平有限,书中难免有谬误之处,敬请读者批评指正。

编 者

一九九一年二月

目 录

绪 论	(1)
上篇 牵引计算	(5)
第一章 电力机车牵引力	(5)
第一节 机车牵引力的基本概念	(5)
第二节 牵引力的粘着限制	(7)
第三节 电力机车牵引特性	(11)
第四节 电力机车牵引计算标准的确定	(15)
第二章 列车运行阻力	(19)
第一节 概 述	(19)
第二节 基本阻力的分析	(20)
第三节 基本阻力的计算	(24)
第四节 附加阻力	(25)
第五节 起动阻力	(28)
第六节 列车阻力的计算	(29)
第七节 减少列车运行阻力的措施	(32)
第三章 列车制动力	(33)
第一节 概 述	(33)
第二节 闸瓦摩擦系数	(34)
第三节 闸瓦压力	(36)
第四节 列车制动力的实算法	(40)
第五节 列车制动力的换算法	(41)
第六节 电阻制动	(47)
第四章 列车运动方程及其应用	(54)
第一节 作用在列车上的合力及合力曲线图	(54)
第二节 列车运动方程	(61)
第三节 列车运动方程的应用	(62)
第四节 列车运行距离和运行时分的计算	(63)
第五章 列车制动问题的解算	(67)
第一节 列车制动距离	(67)
第二节 列车制动距离的计算	(68)
第三节 列车制动距离的等效计算法	(71)
第四节 列车紧急制动限速的解算	(74)

第五节 列车换算制动率的解算.....	(75)
第六章 列车牵引重量的计算.....	(78)
第一节 概 述.....	(78)
第二节 列车牵引重量的计算.....	(78)
第三节 列车牵引重量的验算.....	(81)
下篇 电力机车操纵及运用.....	(83)
第七章 电力机车的运用管理组织、配置与分类.....	(83)
第一节 电力机车的运用管理组织.....	(83)
第二节 机车的配置与分类.....	(84)
第三节 电力机车的贮备与回送.....	(86)
第八章 机车运用基本知识.....	(87)
第一节 列车运行图.....	(87)
第二节 机车交路及运转制.....	(89)
第三节 机车乘务组及机车乘务制.....	(92)
第四节 机车运用工作指标.....	(95)
第五节 机车周转图.....	(101)
第六节 机车防寒与防火.....	(110)
第九章 列车操纵及机车在站、段的作业.....	(113)
第一节 保证列车安全运行.....	(113)
第二节 段内作业及发车准备.....	(114)
第三节 途中作业.....	(117)
第四节 空转的原因、危害及预防措施.....	(120)
第五节 列车的正点运行和速度观测.....	(121)
第六节 坡道操纵.....	(123)
第七节 特殊条件下的操纵.....	(126)
第八节 终点站和入段的作业.....	(131)
第十章 制动机的操纵.....	(134)
第一节 制动机操纵基本知识.....	(134)
第二节 旅客列车制动机操纵.....	(139)
第三节 货物列车制动机操纵.....	(141)
第四节 紧急制动的操纵.....	(146)
第五节 电空制动机空气位的操纵.....	(146)
第六节 制动机操纵的其他有关问题.....	(148)
第十一章 机车检查与给油.....	(150)
第一节 机车检查的基本知识.....	(150)
第二节 日常检查.....	(152)
第三节 定期检查.....	(157)
第四节 机车给油.....	(169)

第十二章 机车故障的应急处理.....	(174)
第一节 概 述.....	(174)
第二节 SS ₃ 型电力机车途中故障的应急处理.....	(174)
第十三章 机车主要部件的保养.....	(195)
第一节 概 述.....	(195)
第二节 牵引电动机的日常保养.....	(195)
第三节 劈相机及辅助电动机的保养.....	(196)
第四节 牵引变压器及平波电抗器的保养.....	(197)
第五节 牵引电器的保养.....	(198)
第六节 接触器、继电器、蓄电池的保养.....	(199)
第七节 机车走行部主要部件的保养.....	(200)
附表 1 有关量的名称、符号及计量单位表.....	(201)
附表 2 SS ₁ 型电力机车牵引计算主要数据表.....	(206)
附表 3 SS ₃ 型电力机车牵引计算主要数据表.....	(207)
附表 4 SS ₄ 型电力机车牵引计算主要数据表.....	(208)
附表 5 主要货车规格表.....	(209)
附表 6 主要客车规格表.....	(210)

绪 论

一、我国铁路牵引动力发展概况

铁路是国民经济的大动脉，是全国交通综合运输的纽带。它具有高度集中（半军事性），各个工作环节紧密联系协同动作的特点。它担负着全国60%和70%的客、货运量。在满足城乡物资和文化的交流、促进工农业、国防科学及文化教育、卫生事业的发展，改善人民的物质生活水平及更好地满足社会需要等方面，它起着重要的先行作用。作为列车的牵引动力，机车则是先行的先行。

解放初期，旧中国遗留下来的铁路设备十分落后。机车全部是外国生产的蒸汽机车，而且性能差，功率小，机型杂（达174种）。在当时全路拥有的4609台机车中，有1324台是不能运用的“死机”。解放后，我国铁路的牵引动力就是在这样困难的条件下起步的，以后通过加强养护维修，先后修复了785台机车并投入运用。1952年开始批量生产蒸汽机车，开创了我国铁路自造机车的历史，到1988年9月停造干线蒸汽机车止，36年间共新造蒸汽机车9600台，旧中国遗留下来的杂型机车已全部淘汰。

随着铁路运输事业的不断发展，蒸汽机车性能差、效率低、能耗大、牵引力小、污染严重等缺点越来越突出，已不能满足铁路运量日趋增长的需要，迫使我国牵引动力必须积极进行改革，去寻求新的牵引形式，使用新型机车来牵引列车，以代替陈旧的蒸汽机车。内燃牵引力和电牵引就是性能好、能耗低、功率大的两种较先进的牵引形式。而电力牵引又因具有速度快，污染少以及可以利用多种一次能源等一系列优点而显示出更大的优越性，成为目前牵引动力改造和发展的方向。

积极地采用牵引性能好，能耗低的电力、内燃牵引是铁路实现安全正点，扩大运能的主要手段，也是铁路现代化的重要标志。

早在1956年，我国就已根据对国际牵引动力发展趋势和经验的研究提出过牵引动力的改造要迅速地有步骤地由蒸汽机车转到电力机车和内燃机车上来。后来在以内燃牵引为主还是以电力牵引为主的问题上发生过争论和变化。六十年代初期，由于我国石油资源的开发，牵引动力的技术政策定为大力发展内燃牵引。随着工业其它部门及国防对石油的需求日益增加，特别是七十年代以来，世界性的能源危机使石油价格暴涨，使得一些已基本实现了内燃化的国家又重新第二次改造，转向电气化。我国在进行牵引动力现代化时，也应该根据我国的实际情况，充分发挥我国水利资源丰富的优势，并且越是在能源紧张和建设资金有限的情况下，越是应优先发展电力牵引，以便尽早发挥电力牵引的经济效益。

1978年铁道部党组回顾了我国牵引动力改革的历史，经过广泛的调查和认真分析，又确定了牵引动力发展要“内电并举，以电为主”的方针。我国进行牵引动力现代化改革的起步并不晚，与苏联、西德、日本、法国等开始大规模进行牵引动力改革的国家时间大致相同，它们经过15~20年的时间后，在进入二十世纪八十年代之前都已完成了这项改革。

而我国二十多年来,虽然在实现牵引动力现代化,用电力和内燃牵引取代蒸汽牵引的总方针未变动过,但由于在牵引动力改革的进程中出现的长期内、电摇摆不定,因而在一定程度上也影响了牵引动力现代化的速度。从1958年我国开始着手动力改革到1978年,内燃、电力机车只占机车总台数的21%,承担的运量只占总运量的17%,还没有改变以蒸汽机车牵引为主的状况。党的十一届三中全会以后,在改革开放形势的推动下,内燃、电力机车的研制、生产和运用管理体系都加快了步伐,到1988年全路拥有内燃机车5107台,电力机车1381台,两种新型机车已占机车总台数49.7%,10年中新造机车的台数是1978年的2.5倍。内燃、电力机车承担的运量已占总运量的66.1%,是10年前的3.8倍,机车总功率达到3850万马力,比1949年的515万马力增加了7倍。

1988年,根据我国二十多年牵引动力改革的经验和教训,以及能源的储备和合理开发使用的状况,我国制定了既符合我国国情,又合乎世界科学技术发展方向的牵引动力技术政策,即“大力发展电力牵引,合理发展内燃牵引,继续发挥蒸汽牵引的作用”的方针。多年来一直在内、电之间摇摆和争论的问题也得出了比较一致的结论,这就是由于电力机车的牵引性能好,机车效率高,在繁忙干线、运煤专线、长大坡道、长隧道等线路上采用电力牵引,具有明显的优越性和良好的经济效益。同时,我国今后电力发展的前景较好,每年电气化1000km,也有投资承受能力。因此,必须坚定不移地推进电气化建设,把大力发展电力牵引作为今后牵引动力改革的重点。内燃机车机动灵活、投资少、上马快、比蒸汽机车输送能力大,目前内燃机车牵引发展较快,正处于上升趋势。特别是在蒸汽牵引已不能适应运输发展的需要,而电力牵引一时又不能大幅度地上马的情况下,许多繁忙干线都先后采用内燃牵引,内燃牵引必将出现发展高峰,而且要持续一个较长的时间,由于我国石油资源短缺,柴油供应困难,内燃牵引的发展要受国家能源政策的制约,因此,内燃牵引发展速度和规模必须适度。由于蒸汽机车效率低,牵引性能差,输送能力小,从发展的观点看,必将逐步被内燃、电力机车所取代,但又因为铁路牵引动力改革要有一个过程,在较长时期内,继续用好、修好、改造好蒸汽机车是必要的。目前我国铁路已停止干线蒸汽机车制造,但保留了一定的生产能力,以适应向路外提供蒸汽调车机车,对路内保证零部件供应和战备的需要。

综上所述,三种牵引动力今后发展的基本趋势:蒸汽牵引比值逐步下降,电力牵引逐步上升,内燃牵引承担的绝对运量虽逐步上升,但其所占比值则呈先升后降的趋势。

二、学习本课程的目的

作为铁路司机学校电力机车乘务专业的学员,是铁路运输的主要技术工作人员,铁路运输任务完成的质量好坏,与我们技术水平的高低关系极大,因此,如何科学地使用好电力机车,充分发挥它的效能,掌握它的运行规律,以提高列车牵引重量和运行速度,多拉快跑,安全正点地完成运输任务,是我们必须研究的课题。只有了解和掌握了机车的牵引性能,列车运行的一般规律和有关运用知识,才能正确操纵机车,爱护机车,合理运用机车功率,安全正点、多快好省地完成运输任务。

三、本课程的内容

本课程是在熟知机车总体及走行、DK-1型电空制动机、机车控制、电机电器等专业知

识的基础上,研究影响列车运行的各种因素,认识列车运行的规律,从而达到合理地驾驶机车,提高操纵技术,充分发挥机车的效能,提高机车的经济性和运用效率的目的。

本课程可分为:列车牵引计算;电力机车操纵及运用两部分。

牵引计算是本课程的理论基础。在这一部分中,主要是分析机车的牵引性能,列车运行阻力和调节列车速度的列车制动力,分析影响它们的各种因素,了解和掌握在它们的相互作用下列车运行的一般规律,以及列车制动问题的解算方法和列车牵引重量的确定方法。它的主要依据是:

1. 理论力学的基本定律;
2. 专门的机车、车辆试验;
3. 先进的运用经验。

可以说牵引计算是理论与实际结合最密切的一门实用科学,有些国家以及在我国大学、中专都把它单独地作为一门学科,它不但对铁路运输和铁路设计有着关键性的重大作用,并且为现有机车的改造和新造机车的设计提供有价值的参考资料,它是从事铁路工作的广大职工和铁路学校学员,特别是有关机务、运输和铁路设计工作人员所必须学习的一门重要课程。

列车操纵技术是以牵引理论为依据,在列车不同的运行条件下,因地制宜的采取合理的手柄操纵方法以及制动机的使用方法,达到安全、迅速、经济的效果。

机车运用常识,概括地介绍了机车运用组织的有关知识和机车运用的一些重要指标,目的在于了解机务工作与整个铁路运输的关系,为提高铁路运输能力和增强全局观念。

四、《列车牵引计算规程》与《机车操作规程》

1957年,我国首次颁布了《蒸汽机车牵引计算规程》。它在铁路运营、设计中起到了重要作用。随着科学技术水平的不断提高,我国牵引动力已由单一的蒸汽牵引发展为电力、内燃、蒸汽三种牵引动力;新型客货车辆相继出现,制动技术不断改进;线路质量、行车调度、通信信号都有较大改善。因此,1957年的《蒸汽机车牵引计算规程》已远远不能适应我国铁路的实际需要,铁道部于1982年7月12日颁布了新的《列车牵引计算规程》,以下简称《牵规》,它是进行牵引计算的主要依据,它规定了问题的解算方法和原则,提供了有关技术数据和标准。但是,这些计算标准并不是固定不变的,随着科学技术的发展、设备的更新、管理操纵水平不断提高,原来的试验条件改变了,这就需要用新的设备,新的测试方法进行新的试验。同时,计算技术的发展,从计算方法上有可能考虑更多的因素,这样,用发展了的计算方法和新的试验结果,又可以得出新的计算标准,作为新的一段时期内牵引计算的依据。牵引计算就是这样在不断地发展和完善。

为使机车乘务员操作规范化、标准化,在原发《蒸汽机车操作规程》、《内燃机车操纵和保养手册》和《电力机车操纵和保养守则》的基础上,总结了多年来实际工作的经验,结合蒸汽机车实行包乘制,内燃、电力机车实行轮乘制的乘务制度,铁道部1988年重新颁布了《机车操作规程》,同时将原有的《蒸汽机车操作规程》、《内燃机车操纵和保养手册》及《电力机车操纵和保养守则》即行废止。

《机车操作规程》,以下简称《操规》,它是机车乘务员乘务作业的标准,是机车乘务员正确驾驶、精中保养机车和平稳操纵列车的依据。除本课程中的列车操纵部分以该规

程为标准外,机车乘务员和有关运用干部都必须认真学习和严格执行本规程的规定。与《牵规》同样,《操规》也并不是固定不变的,它也随着科学技术的发展、设备的更新,管理和操纵水平的提高不断地发展和完善。

五、牵引计算中采用的符号与主要量的单位

牵引计算的特点前已所述,它是理论与实践相结合最密切的一门实用科学,具体表现在它的计算公式和原始数据大部分是根据试验研究得出来的。

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,采用一定的符号代表一定的物理量。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。基本符号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。为了便于区别不同概念、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。国际通用中没有的,选用汉语拼音字母。

牵引计算中采用的符号及主要量的单位见附表1。

上篇 牵引计算

第一章 电力机车牵引力

第一节 机车牵引力的基本概念

一、作用在列车上的力

在力学中我们知道，运动着的物体，它的运动状态——诸如相对位置、速度等之所以会发生变化，就在于运动着的物体受到了其他物体的力的作用。奔驰在铁路线上的列车也不例外，它的起、停以及途中运行速度的提高或降低，都是由于外力作用在列车上的结果。弄清楚这些力的形成和影响这些力的因素，掌握他们的变化规律，就能用来指导自己的实践，合理的操纵机车，安全、迅速、高效地完成铁路运输任务。

列车运行中，作用在列车上的力是多种多样的。在牵引计算中，并不研究一切作用于列车上的力，而只研究直接引起列车运动状态发生变化的力，即与列车运行方向相平行的外。这些力有：

(一) 机动牵引力 (F)：是由机车动力装置引起的，通过机车动轮与钢轨之间的相互作用而产生的，与列车运行方向相同的，可由司机控制其大小和方向的外力。

(二) 列车运行阻力 (W)：是列车运行中由许多自然原因引起的，与列车运行方向相反，而且司机又不能随意操纵的外力。

(三) 列车制动力 (B)：是由机车车辆制动装置引起、通过车轮与钢轨之间的相互作用而产生的，与列车运行方向相反的，司机可以根据需要调节其大小的外力。

上述三种力在一般情况下并不同时作用在列车上，而是根据机车的三种不同工况互相配合作用在列车上的。如：

1. 机车牵引 (带电) 运行时，有机车牵引力 F 和列车运行阻力 W ，其合力 $C = F - W$ 。
2. 机车惰力 (断电) 运行时，有列车运行阻力 W ，此时合力 $C = -W$ 。
3. 列车制动运行时，有列车运行阻力 W 和列车制动力 B ，此时合力 $C = -(W + B)$ 。

作用在列车上的合力决定着列车运动的性质和加速度的大小。因此，了解作用于列车上各种外力的形成和变化规律，是研究列车运动的基础。

从以上的三种工况可看出，不论列车在何种情况下运行，列车运行阻力总是存在的，而机车牵引力与列车制动力却不同时存在。司机操纵机车牵引列车，就是控制和改变作用在列车上的力，人为地改变机车牵引力和列车制动力的有无和大小，以适应列车运行的要求，同时做到更好地发挥机车的效能，多快好省地完成铁路运输任务。

二、机车牵引力的形成

电力机车牵引力的产生过程是：接触网的高压交流电由机车受电弓引入主变压器的原边绕组，再经动轮、钢轨，回到牵引变电所构成回路；机车上的主变压器将高压交流电变为低压交流电，由次（副）边绕组经整流器整流后变为直流电供给牵引电动机，牵引电动机转轴输出转矩 M_d ，并通过齿轮传给动轮，再通过轮轨间的相互作用，引起钢轨对动轮的切向反作用力，即机车轮周牵引力。所以，它的实质是电能变为机械能，内力引起外力的过程。

下面我们用力学的方法对这一过程加以分析（图1—1）。

机车通过轮对将重量 P （包括轮对自重）压在钢轨上，通过轮轨接触点 c ，有一个钢轨对车轮的法向反作用力 N 。

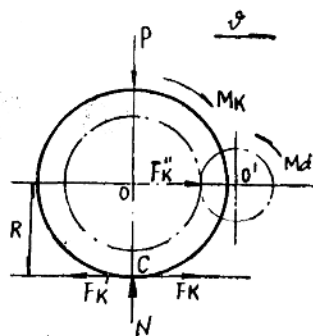


图1—1 机车牵引力的形成示意图

设机车牵引电动机转轴上输出的转矩以 M_d 表示，在计入齿轮传递过程中各种损耗的条件下，则在机车动轮轴上引起一个和转矩 M_d 方向相反的转矩 M_k ，在数值上 $M_k = M_d \cdot \mu \cdot \eta$ （ μ 为大小齿轮传动比， η 为传动效率）。根据力学原理：一个转矩可以用一个作用在同一平面内，并且有相同的旋转方向和大小相等的转矩的一对力偶来代替，而不改变原来的转矩对物体的作用。因此，作用在动轮上的转矩 M_k 可以用作用在 c 点（轮轨接触点）的力 F'_k 和 O 点（动轮中心）的力 F_k 一对力偶来代替，力偶臂为动轮半径 R ，力偶矩为 $M_k = F'_k \cdot R$ 。因为力 F'_k 和 F_k 对于机车来说都是内力，它是不能使机车前进的，只是由于动轮以一定的重量压在钢轨上，在动轮和钢轨间有一种防止它们发生相对滑动的静摩擦作用。当动轮受到转矩 M_k 作用时，在轮轨接触点 c 处动轮就以力 F'_k 推钢轨，同时引起了钢轨对动轮的切向反作用力 F_k ，它与 F'_k 大小相等方向相反。显然，力 F_k 是钢轨作用于机车上的唯一符合牵引力定义的外力，正是由于它的存在，才使动轮在钢轨上得到了必要的切向支承，使动轮与钢轨接触点 c 处没有切向的相对滑动，如果动轮得不到这个必要的切向支承，则机车动轮将发生空转，前进的力将大大减少。从力学可知： c 点是动轮沿钢轨滚动的瞬时中心，作用于动轮中心点的力 F_k 使动轮绕瞬时中心 c 点转动；同时，使动轮轴箱推动转向架的构架，并通过机车车架将此力传至车钩，从而使整个列车发生运动。由于对机车而言， F'_k 也是内力，使机车发生运动并能牵引整个列车的外力只有轮轨接触点钢轨对车轮的切向反力 F_k ，所以，我们把力 F_k 称为机车牵引力，由于它是作用在轮周上的，所以又称轮周牵引力。

机车运行时，为克服机车本身的阻力，不可避免地要消耗掉一部分轮周牵引力，因此，实际传到机车后车钩牵引车列的力总是小于轮周牵引力。通常将前者称为挽钩牵引力或车钩牵引力。即：

$$\text{挽钩牵引力} = \text{轮周牵引力} - \text{机车阻力}$$

根据我国《牵规》的规定，在进行牵引计算时，按轮周牵引力作为计算标准。这是因为车钩牵引力不但取决于轮周牵引力和机车车身走行部的状态，而且还受线路纵断面变化的影响。故在以后的论述和计算中，除特殊说明外，凡是遇到机车牵引力时，都是指轮周牵引力。

第二节 牵引力的粘着限制

一、摩擦与粘着

在一般物理学中，我们研究的是静止与滑动，静摩擦与滑动摩擦等现象。我们知道，当一个静止的物体受到外力作用时，随着外力的加大，静摩擦力也加大，直到超过静摩擦力的最大值时，物体开始移动，这时物体就处于滑动状态。

机车动轮与钢轨的接触和受力情况如图 1—2 所示。动轮轴重 P 通过轮轨接触点 c 作用于钢轨上，则钢轨有一法向反作用力 N ，通过 c 点作用于动轮。当牵引电动机通电后，在力矩 M_k 的作用下，动轮对钢轨有一切向作用力 F_1 。力 F_1 的作用是要向后推钢轨。由于钢轨是被固定在道床上的，在 F_1 尚未超过静摩擦力最大值时，动轮与钢轨不会产生滑动。随着牵引电动机电流的增加，动轮作用于钢轨的力 F_1 继续加大，钢轨作用于动轮的切向反力 F_2 也随之加大（图 1—2）。但当力 F_1 和 F_2 达到静摩擦力的最大值时，如再加大力 F_1 ，则动轮与钢轨间的静摩擦状态就要遭到破坏而产生相对滑动， F_2 不再是静摩擦力，而是滑动摩擦力，并远远小于 F_1 。角加速度将突然增大，即发生空转（机车速度不高而动轮转速很高）。

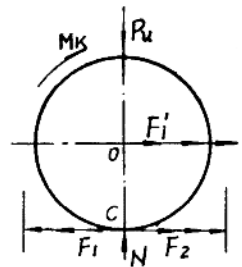


图 1—2 轮轨间的受力状况

机车动轮空转的危害性是很大的，首先由于轮轨间静摩擦被破坏，牵引力下降，使运行时间延长，可能造成列车晚点，严重时甚至发生坡停事件；另外，使机车动轮踏面和钢轨表面擦伤，起动时原地空转，严重的甚至能“啃”掉钢轨头；由于车轮转速可达到很高，发生强烈震动，使机车走行部受到损坏，影响使用寿命；当超过牵引电动机最大转速时，还可能造成电机环火、击穿绝缘或甩绑线等严重事故。

在物理学上说的最大静摩擦力是一个与运动状态无关的常量，它等于法向反作用力 N 与静摩擦系数 μ 的乘积。实际上问题比较复杂：1. 车轮和钢轨在高压作用下都有变形，轮轨间实际上是椭圆面接触而不是点接触，即不存在理想的瞬时转动中心；2. 列车运行中不可避免的要产生各种冲击和振动，车轮在钢轨上滚动的同时还伴随着有微量的纵向和横向的滑动，即实际上不是纯粹的静摩擦状态；3. 在加速和减速过程中，机车各轴车轮作用于钢轨的法向载荷是不相等的，在不断变化的。所以，轮轨间切向反作用力的最大值实际上与运动状态有关，而且比物理中的“最大静摩擦力”小得多。因此，铁路上分析轮轨间受力问题不用“静摩擦”这一概念，而以“粘着”来代替之。相应地，轮轨间切向反作用力的最大值称为“粘着力”，该力与轮轨间法向载荷的比值称为粘着系数。而且，为便于应用，还假定在列车运行中轮轨间法向载荷固定不变，即粘着力的变化完全是粘着系数变化所引起的，即粘着力与运动状态的关系被简化成了粘着系数与运动状态的关系，粘着系数成了个假定计算值。由于它和假定不变的法向载荷的乘积等于实际的粘着力，所以这个假定用于计算是可行的，实际上都是这么用的（以后凡是提到粘着系数或计算粘着系数，只要没有特殊说明，均指假定值）即：

$$F_N = N \cdot \mu, \quad (N)$$

式中 F_N ——粘着力, (N);

N ——钢轨对车轮的法向反作用力, (N);

μ_j ——轮轨间计算粘着系数。

二、粘着限制及粘着牵引力

为了使机车动轮不发生空转, 必须把主动力 F_t 控制在粘着极限的范围内, 即在任何时候, 任何速度下, 机车真正能够实现的牵引力不可能超过轮轨间的粘着力。即

$$F \leq (P_\mu \cdot g) \cdot \mu_j \quad (\text{kN}) \quad (1-1)$$

式中 P_μ ——机车粘着重量, 对电力机车, 它等于计算重量 (t);

g ——重力加速度, (m/s^2)*;

$(P_\mu \cdot g)$ ——机车受到的重力, 即所有动轴荷重之和, 以下简称“粘着重力”。

上式也是机车动轮不发生空转的条件, 一旦发生空转, 司机应迅速降低调速手柄级位, 减少转矩 M_k , 使牵引力恢复到粘着限制的范围内, 以制止空转。

铁路上习惯将机车按轮轨间粘着条件所能实现的最大牵引力称为粘着牵引力。并表示为

$$F_\mu = 1000(P_\mu \cdot g) \cdot \mu_j \quad (\text{N}) \quad (1-2)$$

三、粘着系数的影响因素

电力机车按能量转换部分工作能力的限制可以分为: 牵引电动机牵引力和粘着牵引力, 但由于近年来, 电机生产制造水平的不断提高, 各种新型绝缘材料的普遍使用, 牵引电动机单位重量、单位体积的功率都有很大提高, 因而牵引电动机完全可以根据需要加大其容量, 以提高牵引电动机牵引力, 因而机车牵引力 (尤其是在低速时) 的充分发挥往往不受牵引电动机的限制, 而受限于粘着牵引力。

由式 1-2 可知, 若要提高粘着牵引力, 应从粘着系数和粘着重量这两方面来着手。

对于运用中的机车来说, 机车粘着重量是一个常数。就是新设计制造的机车, 如轴重增加过多, 不仅需要大量的加重铁, 而且使机车结构复杂化, 还提高了对线路的要求。因此, 尽可能地增大轮轨间的粘着系数, 以充分发挥机车牵引能力, 是机车运用部门切实可行的办法。

影响粘着系数的主要因素有

(一) 接触表面的状态。动轮踏面与钢轨表面愈平整, 机车运行接触点的振动愈小, 则粘着系数就愈大。天气对粘着系数影响很大, 潮湿、降雾、霜或小雨天气以及当轨面有油污、冰霜等不清洁时, 粘着系数下降, 但在下大雨钢轨被彻底清洗之后, 或适量撒砂、钢轨上有薄锈时, 粘着系数将增加; 厚锈, 特别是有点湿润的锈层, 可能使粘着系数大大降低。

(二) 运行速度。运行速度低时, 由于轮轨间接触点的持续时间相对要长一些, 机车振动弱, 因而粘着系数较大; 当运行速度增大时, 加剧了机车震动, 并增加了车轮滚动时伴随的滑动现象, 轮轨接触状态变坏, 因而粘着系数下降。

* g 的数值一般取为 9.8 m/s^2 , 简化计算也可取为 10 m/s^2 。

四、粘着系数的计算公式

由于粘着系数的影响因素复杂多变,很难用理论方法进行计算。一般先通过试验求得
不破坏粘着的最大牵引力 $F_{\mu_{max}}$,将它除以机车粘着重力

$$\mu_i = \frac{F_{\mu_{max}}}{P_{\mu} \cdot g} \quad (1-3)$$

然后,根据 μ_i 和速度的关系,通过整理、修正后得出粘着系数的计算公式。

《牵规》规定电力机车的计算粘着系数 μ_j 按下式计算:

$$\mu_j = 0.24 = \frac{12}{100 + 8v} \quad (1-4)$$

式中 v ——运行速度 (km/h)。

式(1-4)是在直线地段综合了各种不同轨面条件的试验结果。这个公式适用于我国现有各型六轴交流电力机车。由于SS₄型电力机车为八轴,故它的计算粘着系数还有待通过试验以后才能确定。按式(1-4)可得出不同速度下的计算粘着系数值,列入表1-1中。

电力机车计算粘着系数表

表1-1

$$\mu_j = 0.24 + \frac{12}{100 + 8v}$$

V	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
μ_j	0.36	0.326	0.307	0.295	0.286	0.280	0.275	0.272	0.269	0.266	0.264	0.262	0.261

机车在曲线上运行时,由于运动的不稳定性,动轮在滚动时同时发生纵向滑动和横向滑动的现象都有所加剧,因而使粘着系数下降。经过试验,当曲线半径小于600m时,对粘着系数的影响较大,在这种情况下需对计算粘着系数进行修正。其粘着系数按下式计算:

$$\mu_r = \mu_j (0.67 + 0.00655R) \quad (1-5)$$

式中 μ_r ——曲线上的计算粘着系数;

R ——曲线半径 (m)。

电力机车的计算粘着系数 μ_j 、计算粘着牵引力 F_{μ} 及不同小半径曲线上的计算粘着牵引力 $F_{\mu r}$ 值见表1-2。

电力机车计算粘着牵引力

表1-2

速度 (km/h)	计算粘着 系数 μ_j	计算粘着 牵引力 F_{μ}	不同小半径曲线上计算粘着牵引力 $F_{\mu r}$					
			550	500	450	400	350	300
10	0.307	415.50 (42350)	404.4 (41250)	392.0 (40000)	381.2 (38900)	369.0 (37650)	358.2 (36550)	346.4 (35350)
20	0.286	387.1 (39500)	375.8 (38350)	365.1 (37250)	355.7 (36300)	345.0 (35200)	334.2 (34100)	323.4 (32900)
30	0.275	372.4 (38000)	362.6 (37000)	351.8 (35900)	341.0 (34800)	331.2 (33800)	320.5 (32700)	311.2 (31750)
40	0.269	363.6 (37100)	354.3 (36150)	343.5 (35050)	334.2 (34100)	323.4 (33000)	313.6 (32000)	304.3 (31050)
50	0.264	357.7 (36500)	347.4 (35450)	336.6 (34350)	327.3 (33400)	318.0 (32450)	308.2 (31450)	297.4 (30350)
60	0.261	352.8 (36000)	343.5 (35050)	334.2 (34100)	324.4 (33100)	313.6 (32000)	304.3 (31050)	295.0 (30100)

• 括号外单位为kN、括号内单位为kgf。

隧道内由于通风不良和漏水，一般轨面较潮湿、较脏，因此引起隧道内机车粘着系数降低，降低的百分率列入表 1—3 中。

隧道内粘着系数降低值

1—3

隧道长度(m)	401~1000	1001~3000	3001~5000	>5000
粘着系数降低值 (%)	5	10	15	20

五、提高粘着牵引力的措施

近年来，随着电力、内燃牵引的不断发展，机车功率的不断加大，以及牵引电动机制造水平的日益完善，以往并不引起人们十分重视的粘着问题开始逐渐被重视起来，因为粘着能力越来越不能满足牵引力正常发挥的要求，尤其是在低速和中速运行时，粘着问题已成为限制牵引力、制动力的关键问题。

为此，除了理论上对轮轨间的粘着进行探讨研究外，还要在实际运用中掌握机车动轮空转的规律，采取预防措施，以提高粘着系数，并使粘着重量充分利用，具体措施如下：

(一) 改善轮轨接触面的状态

1. 撒砂。这是目前常用，也是最简单的一种方法。在细雨、下雾、下霜、下雪及冰冻的情况下，轮轨粘着系数会降低20~30%；在油污的情况下能降低50%。如良好的撒砂，可使粘着系数达到0.225左右。这就要求机车乘务员掌握好撒砂时机，同时，正确调整砂管位置，保证撒砂装置作用良好。

如在早晨钢轨上有一层露水或薄霜时，列车在车站起动后，经过道岔或道口，由于振动或轨面污脏，引起粘着系数下降而易发生空转时，当列车在起动以及运行在困难坡道上或困难坡道上有曲线、隧道等易发生空转时，应及时适量撒砂。当机车已发生空转，撒砂只会加剧车轮磨损。撒砂在高速行车时效果较差，因为砂子不能成功的撒在轮轨之间；在有霜、降雪、落叶和相当厚的油污情况下，撒砂效果很小，甚至可能无用。为了得到预期的效果，必须使用质量良好（颗粒大小、成份、硬度和温度适合）的砂子，但大量地撒砂或频繁地撒砂会影响到轨道电路的信号传输，并且会增加以后通过列车的运行阻力，而且还对滚动轴承不利，因此，在高速列车上采用撒砂来增加粘着系数的方法尽管比较简单、经济，但并不是十分理想的。

2. 用机械方法来清洗钢轨。用某些机械方法来清除钢轨上的油污，可以使轮轨恢复正常的粘着系数，但是，采用这个方法是比较麻烦的，况且这种清洗方法究竟解决多大问题，迄今还未见有详细的报导。

3. 化学药剂清洗。用化学药剂清洗钢轨表面，以提高粘着系数的试验工作，很多国家都在积极地进行。然而到目前为止，尚未见有正式采用的报导。如果药剂价格不高，取材也容易，则这种方法也是比较简单的。不过，化学反应要有一定时间，很难设想撒下的药剂能立即发生作用，因此，其清洗效果也还是个未知数。

4. 电火花处理。用电火花来清除钢轨表面油污的方法，近年来有的国家也在积极进行试验，然而，这种试验目前仅用于改善机车牵引起动时的轮轨粘着系数。

(二) 提高机车走行部质量

1. 使机车经常处于良好的技术状态，尽可能使所有的动轮具有相同的轮径；保持弹

簧装置的良好状态,使各动轴具有均衡的荷重。

2. 保持机车走行部的清洁,特别是注意调整好轮缘喷油器的喷头角度,以防止将油喷到动轮踏面与钢轨上。

3. 在设计新机车时,应合理选择机车牵引电动机的布置方式,降低牵引点高度,减少簧下重量以减少轴重转移,提高粘着重量的利用率。把多台电动机在机械上连接起来以降低空转的可能,采用牵引电动机的无级控制,使牵引力变化均匀。

(三) 加装空转保护装置

目前SS₁型机车司机只能根据电流表和速度表的急剧下降和急剧上升来判断机车动轮的空转。空转发生后,撒砂已不起作用,只能通过司机手动降级来降低机车牵引力以抑制空转。待空转制止后,再施行撒砂,以增大粘着系数。

现代机车上,多装有防空转检测保护装置,使机车在空转刚刚发生时,就能检测出来,并能自动采取措施消除空转,以保证机车正常运行。SS₁型机车曾装置过以电流变化率为信号的空转保护装置;SS₁型机车也曾装过防空转装置,但由于该系统控制性能还不太完善,目前我国株洲电力机车工厂正在积极研究改进其控制性能,以使其日趋完善,早日投入运用。

第三节 电力机车牵引特性

根据铁路运输的特点,必须对机车牵引性能提出一定的要求:即能产生足够大的起动牵引力,能方便和广泛地调节速度,有较高的过载能力,在速度变化的范围内,能充分发挥机车功率,以及应该具备先进的经济技术指标等。

电力机车是由牵引电动机直接驱动的,因此,对机车技术经济牵引性能的要求,实质上也就是对牵引电动机性能的要求。在粘着限制的范围内,机车真正实现的轮周牵引力决定于牵引电动机输出功率,习惯上将它称为电动机牵引力。

对某一台机车来说,只有在特定条件下,才能充分发挥其功率。在不同工作条件下其功率发挥情况主要决定于机车的牵引特性。所谓机车牵引特性是指机车的牵引力与运行速度间的关系。这一关系主要是由机车内部结构决定的。当一台机车制成后,其牵引特性也就固定下来了,不同类型机车的牵引特性各不相同。

电力机车可按机械功率和电功率相等推导出它的牵引特性公式。但由于公式本身应用价值不大,因而电力机车的牵引特性通常都是用曲线表示。

牵引特性曲线可用计算和试验两种方法来绘制。在某些近似计算,或初步研究一些问题及新设计机车需预测其牵引特性时,采用计算方法。实际上,由于影响牵引电动机转速和转矩及机车速度和牵引力的因素是多方面的,在计算中又很难精确地考虑这些因素的影响程度和决定它们的大小,所以机车牵引特性都是通过试验的方法得到的。在试验过程中,各试验点的机车牵引力、速度以及牵引电动机的电流和电压可通过动力计、速度表以及其它仪表测出,并自动记录下来,然后将原始试验资料经过整理、修正、平衡后绘成曲线。

一 机车牵引特性曲线

1. 图1—3是SS₁型电力机车的牵引特性 $F=f(v)$ 曲线图。

图中共有三种曲线。

第一种带有阴影的曲线是粘着牵引力曲线。这条曲线是按式(1—2)得到的。

第二种是牵引电动机不同级位和不同磁场削弱的牵引特性曲线。其29级和33m级位线在 $v > 49.5 \text{ km/h}$ 以上相重合。33m、33-I、33-II、33-III四条曲线是额定电压1500V时等电压限制线。

第三种是牵引电动机受发热条件限制的牵引力的电流限制线。它是依牵引电动机发热条件(允许温升)所规定的额定电流而绘制的。这组曲线共有三条:

(1) 第一条电流限制线, 是一条由速度为41.2km/h、电流525A的粘着点(33m的特性曲线和粘着牵引力曲线的交点)向33-III曲线上小时电流500A

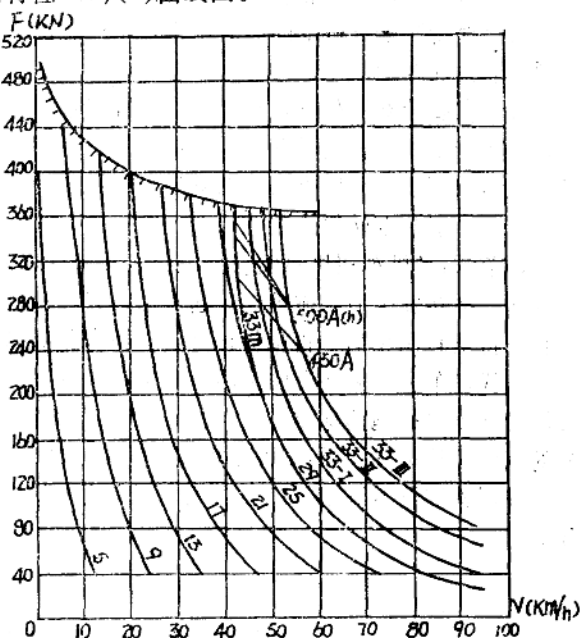


图1—3 SS₁型机车牵引特性曲线图

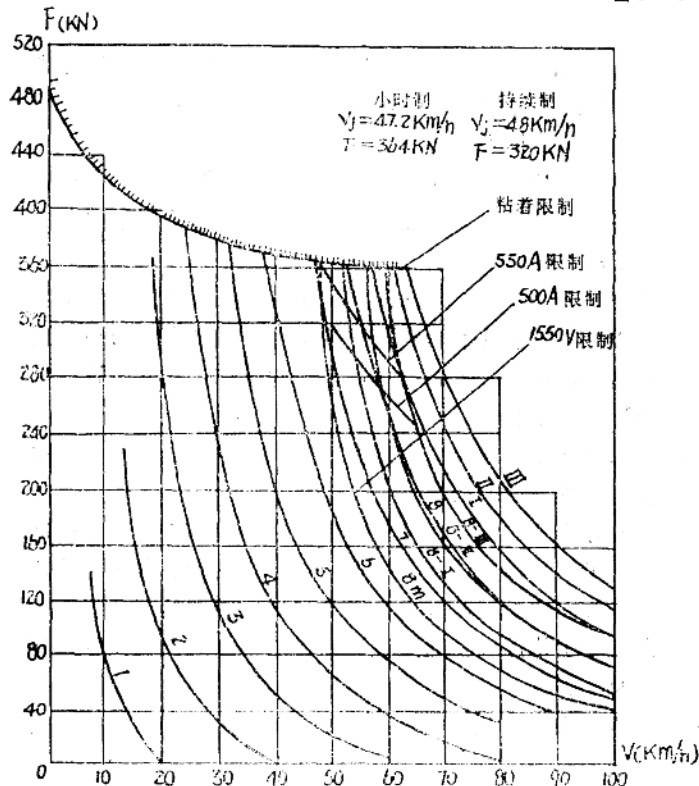


图1—4 SS₂型机车牵引特性曲线图

的点过渡的过渡线。如采用此条过渡线的牵引力值进行牵引计算, 称为粘着制。

(2) 第二条电流限制线是小时额定电流为500A的等电流线。它是 $I_d = 500 \text{ A}$ 的条件下从33m、33-I、33-II、33-III四条线上所得到的牵引力值而绘制的。如采用此线的牵引力值进行牵引计算称为小时制。

(3) 第三条电流限制线是持续额定电流为450A的等电流线。它是 $I_d = 450 \text{ A}$ 的条件下从33m、33-I、33-II、33-III四条线上所得到的牵引力值而绘制的。如采用此线的牵引力值进行牵引计算称为持续制。

2. 图1—4是SS₂型机车牵引特性曲线图。图中只有小时额定电流550A和持续额定