

机 车 牵 引 与 运 用

王树槐 编著

杨居漳 审阅

王忠孚

中 国 铁 道 出 版 社

1991年·北京

前 言

目前,我国铁路运输能力不能适应运量要求的矛盾日趋严重,因而加强运输组织工作,挖掘设备潜力,充分发挥机车能力,组织开行超长重载、客货列车,合理地使用机车,提高运输效率,是缓和运能不足矛盾的有效办法。因此,机车牵引与运用这门专业知识,必将得到广泛应用。

本书是根据上述形势,为满足机务部门从事机车牵引运用工作的职工、干部以及工程技术人员实际工作需要而编写的;同时也为蒸汽、内燃、电力机车司机学习牵引理论,提高操纵技术提供材料。此外,也可作为铁路设计、科研、教学人员工作参考。

在列车牵引计算的含义中,包括两个方面,而机车是牵引计算的主要对象。为了区别不同型机车的牵引计算,本书命名为《机车牵引与运用》。

本书的编除法令性资料,如《铁路技术管理规程》、《铁路机车运用规程》以及《机车统计规程》外,还参考了现有蒸汽、内燃、电力机车牵引理论,并根据作者几十年从事这方面的工作经验和体会,提出了一些新内容和新概念,用以简化计算并使理论接近实际。例如,对小半径曲线粘着或列车限速运行,机车使用部分功率时,采用附加阻力法绘画速度曲线;当要求精算制动距离时,使用当量修正算法;对非单一坡度坡道的制动距离计算,采用逐次逼近法;对计入列车长度影响时,提出了平均坡度算法;对分析牵引试验曲线,使用面积法等等。此外,还对内电机车给予临界速度,对电力机车给予功率曲线等的新概念。

关于计量单位,本书采用了法定计量单位。力的单位换算,牛顿(N);公斤力(kgf),采取9.80665:1换算;压强、压力的单位,采用千帕斯卡(kPa)。于是,本书对于机车牵引特性曲线图纵轴力值值和机车、车辆每辆换算闸瓦压力,分别按现行《牵规》直接以9.80665:1换算的;对于车管规定压力为便于应用,换算后以100kPa为最小单位进整(包括与此有关的制动管减压量及制动缸空气压力),这样对于在《牵规》原规定的充风时间曲线产生的误差,是可以略的。

此外,在牵引计算内容的编排顺序上,先蒸汽,次内燃,最后是电力机车,以适应现有蒸汽机车牵引工作者,伴随动力改革的进程进行知识过渡。在内容的论述上,着重实用理论和实用方法,列举大量例题和应用数据,以便读者查阅。因此,本书是一门理论联系实际,重点突出实用,给机关、现场使用的教材。

本书的读者对象,一般内容适合具有初中毕业文化程度且掌握初级技术基础知识的铁路机务人员;个别章节超出了这个范围,本书作为参考内容,以小一号字体表示,供中专以上文化程度的读者,进行精确计算或专题研究时参考。

本书承蒙铁道科学研究院杨居涛同志对牵引计算部分,铁道部机务局王忠孚同志对机车运用部分进行审阅并得到沈阳铁路局机务处、运输处一些同志的大力支持,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

一九八六年四月

内 容 简 介

本书分两篇。第一篇共九章，阐述了蒸汽、内燃及电力机车实用牵引理论和计算方法，不包括热工内容。第二篇共四章，阐述了铁路运输基本知识、机车运用知识以及机车运用和乘务员组织管理工作方法，其中包括机车整备作业，但不包括整备设备。

该书可供铁路机务部门工作人员使用，亦可供各学校有关专业的师生参考。

机车牵引与运用

王树槐 编著

杨居德 审阅

王念孚

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 朱长顺 封面设计 王毓平

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：26 插页：1 字数 637 千

1991年2月 第1版 第1次印刷

印数：1—1500 册

ISBN7-113-00842-9/U·264 定价：13.80 元

目 录

第一篇 机车牵引计算

第一章 机车牵引力	1
第一节 机车牵引力的形成	1
第二节 能量转换过程和限制机车牵引力的相关因素	2
一、蒸汽机车	2
二、内燃机车	6
三、电力机车	13
第三节 机车牵引特性曲线	15
一、理想牵引特性曲线	15
二、实际机车牵引特性曲线	16
第四节 机车牵引力计算值的选取	43
一、机车牵引力标准值	43
二、计算牵引力的粘降、修正及特定	48
第五节 机车功率特性	56
第二章 列车运行阻力	59
第一节 概 述	59
第二节 列车运行阻力产生原因的定性分析及阻力的计算	60
一、机车、车辆的基本阻力	60
二、坡道附加阻力	65
三、曲线附加阻力	68
四、隧道空气附加阻力	69
五、起动阻力	70
六、根据计算需要阻力的计算式	71
第三节 当量基本阻力	73
一、当量基本阻力计算公式的推导	73
二、当量基本阻力值	76
第三章 列车制动力	77
第一节 概 述	77
第二节 机械制动力	77
一、制动力的产生	77
二、制动力的实算法	78
三、制动力的换算法	86
四、制动力的当量修正法	91
第三节 动力制动力	99

一、电力制动力	99
二、液力制动力	104
第四章 列车运动方程式及其解法	106
第一节 作用于列车的合力及合力曲线	106
第二节 列车运动方程式的解析法	111
一、加速度与加速力的关系	111
二、加速度与速度及时间的关系	113
三、运行时间与速度及加速力的关系	114
四、列车走行路程与时间及速度的关系	114
五、列车走行路程与速度及加速力的关系	115
第三节 列车运动方程的图解法原理和方法	115
一、已知任一速度间隔内的平均合力用图表表达速度与路程的关系	115
二、已知任一速度间隔的初速度和终速度及其路程增量 用图表表达时间与路程的关系	116
第四节 列车运动方程在列车牵引计算中的应用	118
第五章 牵引定数	124
第一节 概 述	124
第二节 牵引重量的计算	125
一、限制区间、限制坡道的选择	125
二、限制坡度的计算	127
三、计算速度的确定	130
四、牵引重量的计算方法	131
第三节 机车牵引重量的校验	145
一、按起动条件牵引重量的校验	145
二、按长大下坡道制动条件限制牵引重量的校验	146
三、按牵引电机最高允许温升牵引重量的校验	149
四、按车站到发线有效长度牵引重量的校验	156
五、按小半径曲线粘降牵引重量的校验	158
六、按通过隧道最低速度牵引重量的校验	164
第四节 牵引定数的查定	164
一、合理规定列车运行条件提高牵引定数的措施	165
二、统一牵引定数	167
三、上下行牵引定数与运量的匹配	167
四、制定空重混编列车的牵引定数	167
第六章 列车运行速度和运行时间的计算	170
第一节 概 述	170
第二节 线路纵断面的化简	170
第三节 计算列车运行速度和运行时间的图解法	176
一、垂直线法	178
二、计算列车运行时间的杰格杰列夫法	183

三、样板描绘法	184
第四节 区间运行时分查定的查定	190
一、区间通时分及起停车附加时分的查定	190
二、慢行附加时分的查定	191
第七章 列车制动	194
第一节 概 述	194
第二节 制动空走时间与制动空走距离	194
第三节 制动有效距离的普通算法——分段累加法	196
第四节 制动有效距离的当量修正算法	202
一、单一坡度制动距离的计算	203
二、非单一坡度制动距离的计算	204
第五节 已知制动距离求解列车闸瓦压力当量修正法的应用	221
第八章 机车能耗计算	225
第一节 概 述	225
第二节 蒸汽机车耗水量及耗煤量	225
一、蒸汽机车锅炉蒸发量的计算	225
二、蒸汽机车耗水量的计算	231
三、蒸汽机车耗煤量的计算	231
四、图解蒸汽机车耗水、耗煤量的样板描绘法	234
五、蒸汽机车标准燃料	237
第三节 内燃机车燃油消耗量	238
一、燃油消耗量解析算法	239
二、燃油消耗量垂直线图解法	241
第四节 电力机车区段电能消耗量	242
一、区段耗电量的解析算法	243
二、耗电量的垂直线图解法	253
第五节 能耗定额的查定	255
一、列车机车每万总重吨公里能耗定额的计算	255
二、单机运行每百机车公里能耗定额的计算	257
三、调车机车作业每小时能耗定额的查定	257
四、蒸汽机车有火停留每小时耗煤定额的查定	257
五、蒸汽机车点火一次煤耗定额的计算	257
六、内燃机车整备打温耗油定额的查定	258
第九章 运营列车检查试验	259
第一节 概 述	259
一、机车性能试验	259
二、机车车辆阻力及制动试验	259
三、运营列车检查试验	259
第二节 运营列车检查试验	260
一、关于动力试验车及试验曲线的基本知识	260

二、运营列车检查试验的作法、检查项目及试验曲线的计算与分析	262
-------------------------------------	-----

第二篇 机车运用

第一章 铁路运输基本知识	272
第一节 铁路运输生产过程及行车组织原则	272
第二节 车站及列车的分类	272
一、车站的分类	272
二、列车的分类	273
第三节 铁路运输主要指标	274
一、货物运输指标	274
二、货车运用指标	274
第四节 铁路运输计划、技术计划和运输方案	280
一、铁路运输计划、技术计划、运输方案的性质与任务	280
二、技术计划的主要内容及编制依据	280
三、运输方案的主要内容	281
第五节 列车运行图和区间通过能力	282
一、列车运行图	282
二、铁路区间通过能力	288
第二章 机车运用及乘务组织	294
第一节 机车配属与使用分类	294
一、机车配属原则	294
二、配属机车的分类	294
三、支配机车	295
四、非支配机车	297
五、各种机车使用分类的转变时分	297
第二节 机车交路及其运转制和乘务制度	298
一、机车交路及其设置目的	298
二、确定机车交路的原则	299
三、确定机车交路的具体作法	299
四、机车交路的种类	299
五、机车运转制	300
六、乘务制度	301
七、机车交路、机车运转制及乘务员换班方式的相互关系	304
第三节 机车运用指标及其相互关系	309
一、数量指标	309
二、质量指标	310
第四节 机车乘务员组织管理	320
一、机车乘务组的组成及其职责	320
二、机车乘务工作人员的任用及提职	320
三、机车乘务员技术等级	321

四、机车乘务员的技术教育和技术考核	322
五、机车乘务员的劳动条件及劳动时间标准	322
第五节 机车特备队的组成	328
第六节 机务段运用车间	328
一、运用车间的基本任务	328
二、职务分工	328
三、运用值班员的任务及其职责	329
第七节 机车整备作业及整备设备通过能力的查定	330
一、整备作业内容、方式和过程	330
二、整备设备通过能力的查定	333
第三章 机车周转图	337
第一节 概 述	337
一、机车周转图的作用及其原则要求	337
二、机车周转图的格式及其表示方法	337
三、机车周转图的分类	338
第二节 编制机车周转图前的准备工作	340
一、机务编图资料的编制、审定与提报	340
二、图定机车运用指标的估算	341
第三节 包乘制机车周转图的编制	351
一、基本机车周转图的编制	351
二、分号机车周转图的编制	368
第四节 轮乘制机车及乘务员周转图的编制	378
一、机车周转图及机车运用计划表的编制	378
二、机车乘务组周转图及出乘计划周转表的编制	379
三、轮乘制机车周转图指标计算	381
第四章 机车运用计划、统计、分析与调度	384
第一节 机车运用计划概述	384
一、全面安排铁路运输过程中各个环节之间的关系	384
二、正确处理机车运用与行车安全、机车维修的关系	385
三、保有必要的后备能力	385
第二节 机车运用生产计划的编制	385
一、配属机车台数的计算	385
二、机车乘务员需要人数的计算	389
三、年、月度机车运用计划的编制	390
第三节 机车工作情况的统计与分析	399
一、机车工作情况的统计与报表	399
二、机车运用分析	400
第四节 机车调度	404
一、组织领导及职务分工	404
二、日计划机车周转图的编制和掌握	405

第一篇 机车牵引计算

机车牵引计算,是参照蒸汽、内燃和电力机车牵引计算学的实用部分,用来解决铁路运营和设计上关于牵引计算方面的四大课题——查定列车重量、制订标准;计算列车运行速度及运行时间;解算列车制动问题;确定能量消耗定额。由此藉以经济合理地使用铁路运输设备,提高铁路运能,降低运输成本和基建投资等等。

列车是由机车及许多车辆以车钩连接在一起而组成的弹性连结体,它在钢轨上运行是由于内力引起的外力作用的结果。如从动力学角度分析作用在列车上诸力的话,采用电算技术求解并不是很难的问题,许多发达国家已采用电子技术模拟列车,特别是重载长大列车在运行中所产生的各种动力,用以指导司机操纵和事故分析。本篇按照我国当前的实际情况,仍是介绍传统的牵引计算方法。即把列车视为一个整个刚体,将其整个质量集中到一点(通常取列车长度中心点作为质点)上,按牛顿第二定律进行计算。实践证明,采用这样的力学模型,求解列车重量、运行速度和运行时间等牵引计算中的几个主要问题,误差很小,而可以避免繁重的计算。

作用在列车各个单元上的一切力,通常分为外力和内力。在牵引计算中并不考虑作用在列车上所有的力,而只考虑直接影响列车重心沿钢轨纵向运动的外力,即牵引力、运行阻力以及制动力。这三种力在一般情况下,并不同时作用在列车上,即

1. 机车牵引运行时,机车牵引力和列车运行阻力同时作用在列车上,但两者方向相反;
2. 机车惰力运行时,只有列车阻力作用在列车上;
3. 列车制动运行时,制动力和列车运行阻力同时作用在列车上,两者的方向一致。

第一章 机车牵引力

第一节 机车牵引力的形成

机车利用一定的能源,借助原动机转化作功,再经过传动装置把所作的功传递给动轮,使动轮回转产生扭矩 M ,从而施力于钢轨。这个施于钢轨的力,对机车来说是内力,它不能使机车产生平移运动。但是,由于轮轨间的粘着作用,在动轮施力于钢轨的同时,只要这种粘着作用不被破坏,则钢轨对动轮产生反作用力,这种反作用力对于机车是外力,它是克服列车运行阻力能使列车加速前进的力,称它为机车牵引力。

图1-1(a)是蒸汽机车依汽缸活塞的往复运动所作的功,经曲柄连杆机构传递到动轮,给动轮以扭矩 M 的示意图。图1-1(b)是内燃机车依柴油机或电力机车依牵引电动机输出的功率,经传动装置传递到动轮,给动轮以扭矩 M 的示意图。下面按图说明机车牵引力的形成过程。

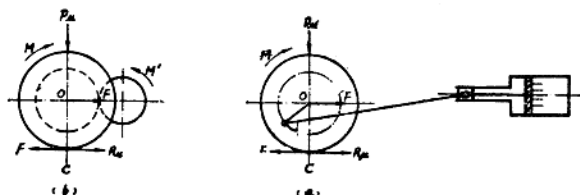


图 1—1 机车牵引力形成示意图

设以力偶 F 取代力矩 M ，以车轮半径 R 为力偶臂，组成力偶的两个力 F ，一个作用在车轮旋转中心点 O ，另一个作用在车轮轮周上的轮轨接触面粘着区中心点 C ，力图使车轮绕车轴中心向右旋转，但是在力 F 作用在动轮周上的同时也作用在钢轨上，由于轮轨间粘着力存在，引起钢轨对动轮产生粘着反作用力 R_A ，力 F 与力 R_A 大小相等，方向相反，作用线重合，在轮轨接触点 C 处平衡，从而动轮被支持在钢轨上，车轮轴中心力偶 F 迫使车轮轴以 C 点为瞬时中心向右旋转，瞬时中心不断地移动，不断地带动轴箱、车架、车体沿钢轨向右移动。这种推动车辆向右移动的原动力是扭矩 M 。而推动车辆移动的作用力，则是由于轮轨粘着区中心所产生的粘着反作用力 R_A 形成的，它的大小等于力偶 F ，故在牵引计算中称 F 为机车轮周牵引力。但 R_A 受限于轮轨粘着力 $P_A \cdot \mu$ ，受到粘着力限制的牵引力称为粘着牵引力。

从力的传递阶段来看，如果原动机所作的功毫无损失地传到动轮，则表现在动轮周上的力，叫作轮周指示牵引力 F_z 。事实上原动机所作的功，经过传动装置的传递，不可避免地要损失一部分，扣除这部分损失而实际传到动轮周上的力，才是轮周牵引力 F 。从轮周牵引力扣除移动机车本身所消耗的阻力，剩下的真正能够牵引车辆作用在机车后钩的力，叫作车钩牵引力 F_h 。

轮周指示牵引力的含义，对蒸汽、内燃和电力机车是不同的：蒸汽机车的原动机是汽机，其指示牵引力是由汽机指示功率折算的；内燃机车的原动机是柴油机，其指示牵引力是由柴油机输出轴指示功率折算的；电力机车的原动机是牵引电动机，其指示牵引力是由牵引电动机电磁功率折算的。

第二节 能量转换过程和限制机车牵引力的相关因素

任何机车都可以看作是输入其中的能量转换为牵引力的一种工具。蒸汽、内燃和电力机车都经过几个能量转换阶段，并相应地有几个能量转换部分。

一、蒸汽机车

(一) 汽缸牵引力

蒸汽机车的原动机是汽机，原动力是蒸汽压力，能源是燃料——主要是煤炭。锅炉和汽机是能量转换装置。传动装置是十字头摇杆和曲柄的连动机构。把燃料投入炉床上燃烧发出热量，煤中含有的化学能转变成热能；热量经钢板传给锅水，使水变成压力蒸汽，于是热能又转变成压能；一旦把蒸汽引入汽机，则蒸汽在汽缸内经过进汽、膨胀、排汽和压缩过程，

完成一个工作循环,从而推动鞣棒移动做功,压能转变为内机械功。这一过程从汽缸鞣棒两面间隔 180° 交错进行。

在汽缸内做功的平均蒸汽压力的大小,在一定的蒸汽质量下和汽门开度 ρ 、遮断比 ε 成正比,与机车速度成反比。当机车速度高到一定程度,锅炉能够蒸发的蒸汽供不应求时,势必要提高手把减小遮断比,以节省供汽量,与此同时适当地调节汽门,从而汽缸内的蒸汽压力也随之下降。

动轮滚动一周, F_s 所作的功为 $F_s \pi D_l$; 如以单胀式两汽缸机车为准,则蒸汽在两个汽缸鞣棒所作的功为 $4 \times \frac{\pi}{4} d^2 p_s l$ (忽略鞣棒杆面积)。根据轮周指示牵引力的定义,两种功应相等,即

$$F_s \pi D_l = \pi d^2 p_s l$$

式中 d ——汽缸内径, m;

l ——汽缸鞣棒行程, m;

p_s ——平均指示压力, kPa;

D_l ——动轮计算直径(轮箍厚度半磨损状态), m;

F_s ——轮周指示牵引力, N。

由此得出两汽缸单胀式机车的 F_s ,

$$F_s = \frac{d^2 l p_s}{D_l}$$

由于鞣棒杆直径约占汽缸内径的3.0%,两侧平均按1.5%计算,则上式乘以0.985进行修正得

$$F_s = 0.985 \frac{d^2 l}{D_l} p_s$$

平均指示压力 p_s , 应理解为汽缸鞣棒在往返各一个行程中接受的平均有效蒸汽压力,如以锅炉规定压力 p_a 的函数表示之,则

$$p_s = p_a \xi$$

因而

$$\xi = \frac{p_s}{p_a}$$

ξ 为平均指示压力系数,简称指示压力系数。以 $p_a \xi$ 代替 p_s , 则上式变为

$$F_s = 0.985 \frac{d^2 l}{D_l} p_a \xi \quad (1-1)$$

从公式(1-1)可以看出,当 ξ 一定时,则 F_s 与 d^2 、 l 、 p_a 成正比,与 D_l 成反比。

指示压力系数 ξ 可从示功图(见图1-2) $abcde$ 面积除以行程 l 求出。它的大小在蒸汽质量一定时,主要与遮断比 ε 和汽门开度 ρ 成正比地有较大变化;当 ρ 、 ε 一定时,随机车速度的提高而下降。主型机车计算遮断比(指进行牵引计算时采用的额定遮断比)的指示压力系数与速度的关系,如图1-3所示。

当机车型式一定后,公式(1-1)中的 $0.985 \frac{d^2 l}{D_l} p_a$ 为常数,它基本决定了机车牵引力的最大限界,称之为模数牵引力,用 M_l 来表示。

于是

$$F_s = M_l \xi \quad (\text{N}) \quad (1-2)$$

如果计入力在传递过程中的损失,并以 η 表示传动机械效率,则轮周牵引力 F 可用下式

表示

$$F = F_s \eta = 0.985 \frac{d^2 l}{D_s} p_s \xi \eta \quad (\text{N}) \quad (1-3)$$

或

$$F = M_s \xi \eta \quad (\text{N}) \quad (1-4)$$

主型蒸汽机车，计算遮断比及计算供汽率的机械效率与速度的关系分别如图 1-4 和图 1-5 所示。

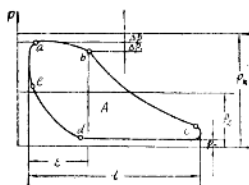


图 1-2 示功图示意图

b——遮断点；c——排汽点；d——压缩点；e——进汽点；eab——进汽线；bc——膨胀线；cd——排汽线；de——压缩线；A——示功图面积； Δp_s 、 Δp_e ——压力降； p_s ——平均指示压力； p_e ——排汽压力。

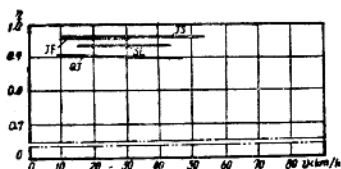


图 1-4 主型蒸汽机车计算遮断比的机械效率与速度的关系曲线

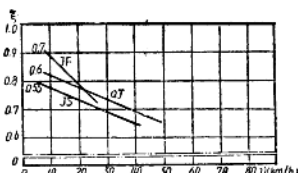


图 1-3 主型机车计算遮断比的指示压力系数与速度的关系曲线

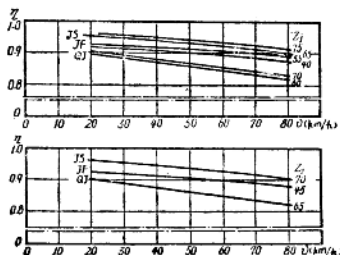


图 1-5 主型蒸汽机车计算供汽率的机械效率与速度的关系曲线

应该指出，在动轮回转一周中的每一瞬时，作用于汽缸鞣面上的蒸汽压力都在变化，同时由于主曲拐销位置的不同，摇杆倾斜角也不同，在同一时间内，两侧汽缸传给各自动轮周上的力也不同。因此，机车的瞬时牵引力是在不断变化的。依公式 (1-1) ~ 公式 (1-4) 计算的牵引力，是两汽缸机车动轮回转一周的平均值。

机车轮周牵引力，在较低速度范围内锅炉蒸发能力有富余，汽缸大小限制着机车牵引力。受汽缸限制的牵引力，称之为汽缸牵引力，以 F_s 表示。汽缸牵引力是以汽门全开条件下的不同遮断比来表示的。

(二) 粘着牵引力

前已述及过，动轮施于钢轨的力是内力，它要借助于轮轨间的粘着作用，才能使机车前进。因此，粘着力也限制着机车牵引力。受粘着力限制的牵引力，称之为粘着牵引力，以 F_z 表示。

粘着力等于静态粘着重量与轮轨间理论粘着系数的乘积。考虑到：(1) 在牵引力的作

用下动轮轴上的载荷发生增减载作用，粘着重量有时比静态要低；（2）轮周牵引力在动轮回转一周中存在波动，在时间上约有50%的机率超过或低于平均值；（3）在机车运行中的轮轨间发生着纵向和横向滑动以及垂向动力，因此在计算粘着牵引力时，应采用比理论粘着系数低的计算粘着系数 μ_1 ，即

$$F_s = 1000gP_s\mu_1 \quad (\text{N}) \quad (1-5)$$

式中 P_s ——计算粘着重量，t；

g ——重力加速度， m/s^2 。

主型机车的计算粘着重量列于表1-1。

主型蒸汽机车计算粘着重量表

表1-1

机 型	前 进	FD	建 设	解 放	人 民	胜 利
计算粘着重量 $P_s(t)$	100.5	100.7	80.0	80.0	63.1	62.2

粘着系数的变化范围较大，根据试验验证，计算粘着系数在中华人民共和国铁道部部标准TB1407-82《列车牵引计算规程》（以下简称《牵规》）中规定，除胜利型机车以外的蒸汽机车采用

$$\mu_1 = \frac{30}{100 + v} \quad (1-6)$$

式中 v ——机车运行速度， km/h 。

胜利型机车采用

$$\mu_1 = \frac{27}{100 + v} \quad (1-7)$$

各速度下的计算粘着系数值如表1-2。

主型蒸汽机车计算粘着系数表

表1-2

速度 $v(\text{km/h})$ 机 型	0	5	10	15	20	25	30	35	40
前进、FD、建设、解放、人民	0.3000	0.2857	0.2727	0.2609	0.2500	0.2400	0.2308	0.2308	0.2143
胜利	0.2700	0.2571	0.2455	0.2348	0.2250	0.2160	0.2077	0.2000	0.1929

（三）锅炉牵引力

在机车给汽运行中，当机车速度提高到一定程度后，如果汽门开度较大，且遮断比较大时，锅炉能够蒸发的蒸汽将供不应求，汽压和水位必然下降。因此，必须提高手把，适当调节汽门开度，以减少供给汽机的蒸汽量，从而机车牵引力也随之下降，机车牵引力开始受锅炉蒸发能力的限制。受锅炉蒸发能力限制的牵引力，称之为锅炉牵引力，以 F_b 表示。

锅炉蒸发能力一般以每小时所蒸发的蒸汽量来量度，简称锅炉蒸发量。锅炉蒸发的蒸汽，一小部分供给锅炉附件使用，绝大部分供给汽机。每小时供给汽机使用的蒸汽量，叫作锅炉供汽量。为了表示锅炉的蒸发强度，锅炉蒸发量和供汽量平分到每平方米蒸发传热面积上的量，分别称它们为锅炉蒸发率和汽机供汽率，前者以 Z_b 表示，后者以 Z_s 表示。

如以 B_b 表示锅炉蒸发量（ kg/h ），以 A_b 表示锅炉蒸发传热面积（ m^2 ），则

$$B_b = Z_b \cdot A_b$$

$$\text{或} \quad Z_s = \frac{B_s}{A_s} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad (1-8)$$

如以 U 表示锅炉供汽量, 则

$$U = B_s - \Sigma b = Z_s \cdot A_s \quad (\text{kg/h})$$

$$\text{或} \quad Z_s = \frac{B_s - \Sigma b}{A_s} = \frac{U}{A_s} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad (1-9)$$

式中 Σb ——锅炉附件用汽量, kg/h 。

一定型式的机车, 其供汽率的大小主要与燃煤量的多少、煤质好坏、锅炉传热面状态、通风强弱, 以及焚火技术优劣有关。燃煤量的多少常以燃烧率 (y_p) 表达。所谓燃烧率, 就是在每平方米炉床面积上每小时以千克表示的平均燃煤量。

由上述可知, 供汽率越大, 可能实现的机车牵引力也越大; 供汽率一定时, 速度越高, 则机车牵引力越小。因此, 如果知道每轮周千瓦小时的耗汽量 ($U/\text{kW} \cdot \text{h}$), 则锅炉功率 P 可用下式表达

$$P = \frac{Z_s \cdot A_s}{U/(\text{kW} \cdot \text{h})} \quad (\text{kW})$$

设机车运行速度为 v (km/h), 则牵引力 F (N) 与速度 v 的乘积 ($F \cdot v$) 表示功率, 把功率的单位换成千瓦, 由于 1 kW 等于 $1 \text{ kN} \cdot \text{m/s}$, 所以

$$P = \frac{F \cdot v \cdot 1000}{1000 \times 3600} = \frac{F \cdot v}{3600} \quad (\text{kW})$$

令以上两式相等, 则

$$\frac{F \cdot v}{3600} = \frac{Z_s \cdot A_s}{U/(\text{kW} \cdot \text{h})}$$

从而得

$$F_s = F = \frac{3600 Z_s \cdot A_s}{U/(\text{kW} \cdot \text{h})} \cdot \frac{1}{v} \quad (\text{N}) \quad (1-10)$$

式中 F_s ——锅炉牵引力, N 。

蒸汽机车的汽缸牵引力、粘着牵引力和锅炉牵引力, 俗称蒸汽机车牵引力三因子。

二、内燃机车

(一) 柴油机牵引力

内燃机车的原动机有多种, 本书所讲述的只是柴油机内燃机车。柴油机内燃机车的原动力是燃气压力, 能源是柴油。柴油机是第一阶段能量转换装置。柴油机设有汽缸、活塞、连杆和曲轴, 构成曲柄连杆机构。输出功率的过程与蒸汽机车的汽机类似。柴油在汽缸内作功, 要经过进气、压缩喷油、燃烧膨胀和排气这样一个工作循环来完成。完成一个工作循环, 四冲程柴油机需要四个冲程, 二冲程柴油机需要两个冲程。把柴油喷入汽缸中燃烧后, 化学能转变成热能, 生成压力燃气推动活塞作功, 再经曲柄连杆机构使柴油机输出轴产生扭矩输出功率, 将热能又转变为内机械功, 完成内燃机车第一阶段能量转换。

在燃气膨胀过程中, 形成正压力推动活塞作正功; 在压缩和排气过程中, 活塞推动气体以及在进气过程中缸内压力低于大气压, 对活塞来说, 三者都形成负压力作负功。正压力和负压力在各自的冲程中是不断变化的, 综合一个工作循环中正负压力的代数和, 折算为一个工作冲程 (即燃烧膨胀冲程) 的平均值, 称为平均指示压力 p_i (kPa)。 p_i 值的求法同蒸汽

机车一样, 将示功图(图 1-6)中两个正负功面积 W_1 及 W_2 的差值除以冲程 l 即得。

平均指示压力 p_i 的大小, 主要受供油量的限制。如果每冲程供油量不变时, 在柴油机工作转速范围内, p_i 基本不变, 也就是说, p_i 几乎与柴油机电转速无关, 可是柴油机输出的功率 P 将随转速的增加而增大, 如图 1-7 所示。

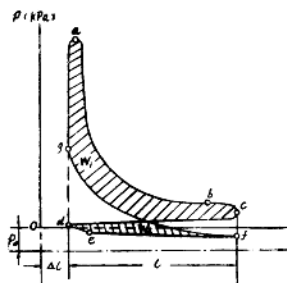


图 1-6 四冲程柴油机示功图
bcd——排气线; def——进气线; gab——燃烧膨胀线; fg——压缩线; w_1 ——正功; w_2 ——负功。

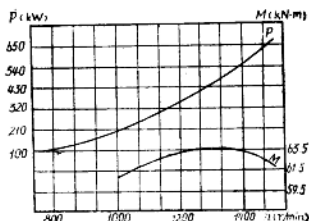


图 1-7 柴油机功率与转速特性示意图

柴油机指示功率 P_i 的计算式, 可从下述导出。

设机车速度为 v (km/h), 则机车轮转动数 n_d 为

$$n_d = \frac{v}{60\pi D_i} \times 10^3 \quad (\text{r/min})$$

式中 D_i ——机车轮计算直径, m。

设柴油机转速 n_e 与机车轮转动数 n_d 的比为 i_{ed} , 则机车速度为 v 时, 柴油机转速 n_e 为

$$n_e = n_d \cdot i_{ed} = \frac{v}{60\pi D_i} \times 10^3 i_{ed} \quad (\text{r/min})$$

因为柴油机轴旋转一周, 一个汽缸的活塞移动两个冲程, 所以机车速度为 v 时, 一个汽缸活塞每小时的冲程数 n_s 为

$$n_s = 2n_e = \frac{v}{\pi D_i} \times 10^3 \cdot i_{ed} \times 2$$

设柴油机完成一个工作循环的冲程数为 c , 则机车速度为 v 时, 每小时一个汽缸的工作循环数 n_c 为

$$n_c = \frac{n_s}{c} = \frac{v}{\pi D_i} \times 10^3 \cdot i_{ed} \times 2 \cdot \frac{1}{c}$$

再设柴油机汽缸活塞直径为 d (m), 活塞冲程长度为 l (m), 则一个工作循环活塞所作的指示功 L_A 为

$$L_A = \frac{\pi}{4} d^2 p_i \cdot l \quad (\text{kJ})$$

如若每台机车有 m_e 个原动机, 且一个原动机有 m_c 个汽缸, 则每台机车每秒输出的指示功率 P_i 为

$$P_i = m_e m_c n_c L_A \cdot \frac{1}{3600}$$

$$\begin{aligned}
 &= m_p \cdot m_s \cdot \frac{v}{\pi D_l} \times 10^3 \times i_{ed} \times 2 \times \frac{1}{C} \cdot \frac{\pi}{4} d^2 p_s \cdot l \times \frac{1}{3600} \\
 &= m_p \cdot m_s \cdot \frac{d^2 l}{2 D_l} \cdot p_s \cdot \frac{i_{ed}}{c} \cdot \frac{v}{3.6} \quad (\text{kW}) \quad (1-11)
 \end{aligned}$$

设柴油机产生的指示功率 P_i , 毫无损失地传到动轮周上, 则动轮周上完成的指示功率 $\frac{F \cdot v}{3600}$ 应等于 P_i , 即

$$\frac{F \cdot v}{3600} = P_i$$

由此得指示牵引力 F_i

$$\begin{aligned}
 F_i &= \frac{3600 P_i}{v} \\
 &= m_p \cdot m_s \cdot \frac{d^2 l}{2 D_l} \cdot p_s \cdot \frac{i_{ed}}{c} \times 10^3 \quad (\text{N}) \quad (1-12)
 \end{aligned}$$

在柴油机作功的过程中, 机械摩擦损失是不可避免的, 设其机械效率为 η , 则柴油机输出的有效功率 P_e 为

$$\begin{aligned}
 P_e &= P_i \eta \\
 &= m_p m_s \frac{d^2 l}{2 D_l} p_s \frac{i_{ed}}{c} \cdot \frac{v}{3.6} \cdot \eta \quad (\text{kW}) \quad (1-13)
 \end{aligned}$$

实际上柴油机指示功率除有一部分消耗在柴油机本身机械损失外, 还有一部分消耗在柴油机附属装置 (油泵、水泵、燃料泵等), 以及由柴油机驱动的辅助设备上 (空气压缩机、冷却风扇、启动发电机等), 在力的传递过程中, 柴油机与动轮间的传动装置又要损失一部分。设包括附属装置损失在内的机械效率为 η_m , 辅助设备的扣除系数为 β , 从柴油机到动轮的机械传动效率为 η_{ed} , 则考虑这些损失后的机车轮周牵引力 F 为

$$\begin{aligned}
 F &= F_i \beta \eta_m \eta_{ed} \\
 &= m_p m_s \frac{d^2 l}{2 D_l} p_s \frac{i_{ed}}{c} \times 10^3 \times \beta \eta_m \eta_{ed} \quad (\text{N}) \quad (1-14)
 \end{aligned}$$

从公式 (1-14) 可以看出, 内燃机车的指示牵引力 F_i 或轮周牵引力 F , 主要受柴油机结构的限制。受柴油机结构限制的牵引力, 称之为柴油机牵引力, 以 F_s 表示。

从公式 (1-14) 又可见, 在一定速度下传动比 i_{ed} 、机械效率 η_m 、传动效率 η_{ed} 为常数, 设辅助设备扣除系数 β 恒定时, 则轮周牵引力 F 的大小, 和原动机个数 m_p 、一个原动机的汽缸个数 m_s 、汽缸直径 d 的平方、冲程长度 l 及平均指示压力 p_s 成正比, 与动轮计算直径 D_l 和一个工作循环的冲程数 c 成反比。当机车型式一定后, 在一定速度下 m_p 、 m_s 、 $\frac{d^2 l}{2 D_l}$ 、 $\frac{i_{ed}}{c}$ 、 η_m 和 η_{ed} 为常数, β 可视为常数, 故 F 的大小将只依平均指示压力 p_s 的大小而变化。欲改变 p_s , 则需要调节每一冲程的供油量。

每一冲程中可能燃烧的最大供油量, 决定于吸入汽缸内的空气重量。超过与空气量相应的供油量, 将引起不完全燃烧, 并不能提高 p_s 。因此欲提高 p_s , 首先应设法增加吸入的空气重量。柴油机采用增压器就是为了这个目的。

应当指出, 空气重量依赖于它的密度, 而密度又依赖于环境温度和大气压力。因此, 外界环境温度高, 大气压力低的高原地区, 都能使柴油机牵引力下降。

(二) 传动装置牵引力

现代内燃机车的传动装置主要分为两大类——电力传动和液力传动。

1. 电力传动装置

电力传动装置目前有直—直流电力传动装置、交—直流电力传动装置、交—直—交流电力传动装置和交—交流电力传动装置。东风型、东风₄型以及ND₂型内燃机车均采用直—直流电力传动装置；东风₄型、东风₆型以及ND₄型内燃机车采用的是交—直流电力传动装置；交—直—交流电力传动装置、目前国内外仍处在科研、试制、试用阶段；而交—交流电力传动装置尚处在探索阶段。本书只介绍前两种，即直—直流和交—直流电力传动装置。

直—直流电力传动装置，主要由直流主发电机和直流牵引电动机组成。交—直流电力传动装置，主要由交流主发电机、硅整流装置和直流牵引电动机组成。两种装置都设有辅助电机，及用以调节和控制电机工作的必要电器设备。

柴油机输出轴与主发电机轴相连，驱动主发电机电枢旋转而发电，将机械能转换为电能；发电机发出的电流（交流发电机时经硅整流器整为直流）经导线供电给安装在各动轴上的直流牵引电动机，电动机获得电流后，电枢旋转，并经传动齿轮驱动动轮转动，将电能又转换为内机械功。

内燃机车直流主发电机端子上，或交流主发电机整流后的输出功率 P_f 可用下式表达

$$P_f = \beta P_s \eta_f \quad (\text{kW}) \quad (1-15)$$

$$\text{或} \quad P_f = \frac{U_f I_f}{1000} \quad (\text{kW}) \quad (1-16)$$

式中 U_f ——发电机端电压，V；

I_f ——直流主发电机发出的电流或交流发电机整流后的电流，A；

η_f ——发电机（交流发电机时包括整流器）效率。

设内燃机车上装备 m_d 台牵引电动机，则 m_d 台牵引电动机在动轮周共同发挥的功率为

$$P = P_f \eta_d \eta_{dd} = \beta P_s \eta_f \eta_d \eta_{dd}$$

$$\text{或} \quad P = \frac{U_f I_f}{1000} \cdot \eta_{fd} \quad (\text{kW}) \quad (1-17)$$

式中 η_d ——牵引电动机效率；

η_{dd} ——从牵引电动机到动轮的齿轮传动效率；

η_{fd} ——从发电机到动轮的传动效率

$$\eta_{fd} = \eta_d \eta_{dd}$$

在另一方面，机车速度为 v (km/h) 时，轮周牵引力 F 所完成的功率 P 为

$$P = \frac{Fv}{3600} \quad (\text{kW})$$

于是

$$\begin{aligned} F &= \frac{3600 P}{v} \\ &= \frac{3600}{v} \beta P_s \eta_f \eta_d \eta_{fd} \quad (\text{N}) \end{aligned} \quad (1-18)$$

或

$$\begin{aligned} F &= \frac{3600}{v} \cdot \frac{U_f I_f}{1000} \eta_{fd} \\ &= 3.6 v I_f \eta_{fd} \cdot \frac{1}{v} \quad (\text{N}) \end{aligned} \quad (1-19)$$

从公式(1-19)可见，在一定速度下，从发电机到动轮传递效率 η_{fd} 不变，因此牵引