

LIECHE YOUHUA YUNXING YU CAOZONG

列车优化运行与操纵

韩长虎 刘杰民 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

列车优化运行与操纵

主 编 韩长虎 刘杰民
副主编 高 军 谭南林 杜志辉
主 审 单力军 曹松荫

中国铁道出版社

2012年·北京

内 容 简 介

本书共分八章,内容包括列车优化运行(操纵)基本观点;机车牵引及动力制动特性;列车牵引、惰行、制动节能运行基本问题;列车两种宏观优化操纵方法;列车跟踪运行优化(操纵)问题;优化列车运行(操纵)环境问题;列车微观优化操纵方法;列车优化操纵示意图。

本书可作为机车乘务员学习机车优化操纵基本观点及应用技术的参考教材,也可作为优化调度、优化工电施工等教学科研的参考资料,还可作为机车优化操纵、列车优化调度计算机软件开发设计的参考资料。

本书所提供的观点、知识和方法仅作为参考。

图书在版编目(CIP)数据

列车优化运行与操纵/韩长虎,刘杰民主编. —北京:中国铁道出版社,2012.9 (2012.10 重印)
ISBN 978-7-113-15103-4

I. ①列… II. ①韩…②刘… III. ①列车-操纵
IV. ①U292.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 216643 号

书 名:列车优化运行与操纵

作 者:韩长虎 刘杰民 主编

策划编辑:王风雨

责任编辑:孙 楠

编辑部电话:021-73421

电子信箱:tdpress@126.com

编辑助理:侯跃文 王佳琦

封面设计:郑春鹏

责任校对:王 杰

责任印制:陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京新魏印刷厂

版 次:2012年9月第1版 2012年10月第2次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:11.5 字数:285 千

印 数:3 001~7 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-15103-4

定 价:30.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

编委会

主 编:韩长虎 刘杰民

副主编:高 军 谭南林 杜志辉

编 委:王慧林 沈 泓 张 勇 苏树强

王建彪 李忠富 张天清 徐浩东

梁绍敏 郭洪忠 许振国 徐 强

魏 旭 李宇光 李玉山 陈永林

尹义伟 李 文 曲 冰 方海鹏

刘明杰 汪朋辉 陈全有 史东升

韩 飞 刘胜伟 宋宇平 王军委

侯寿疆 周 原 潘京勋 常永清

董 晖 郝建杰 王志刚 韩丙国

主 审:单力军 曹松荫

前 言

列车优化运行(操纵)理论是实践性很强的一门应用软科学,它不仅具有理论意义,更具有现实安全和经济意义。

济南铁路局对列车优化操纵理论及应用技术研究已开展多年,从最初的经济操纵、节能操纵到在国内提出优化操纵,其研究不断深入,并结合实际制定和采取了多项措施。

对该项问题的有关研究,在1999年曾引发济南铁路局以节能、降耗、提效为目的“三项攻关”活动,该活动在济南铁路局持续数年,取得巨大成功。

济南铁路局在2006年7月1日开始使用电力机车,由于机车司机操纵技术等方面的问题,HXD₃型机车牵引的重货列车运缓、坡停等问题时有发生,这些问题也亟待研究解决。

针对列车优化操纵问题,国内外研究大多数只限于节能问题的研究,并且这些研究大多停留在理论探讨上,而对于节能驾驶指导装置目前还没有进入大面积推广使用阶段。由于大多数学模型是依据给定的运行时间作为约束条件,而这一时间多为图定时间,所以数学模型只能给出在给定时间或前方信号显示状态下的驾驶指导,因此目前对于普通客车、货物列车还无法适时给出对应于实际限制条件的优化驾驶方案。

现阶段由于列车运行限制条件的复杂性等客观条件限制,货物列车在相当长时间内是离不开人工控制的。对以人工控制为主的列车优化运行(操纵)理论及应用技术进行研究是非常有必要的。

本书是铁道部科技立项课题“机车乘务员优化操纵及节能技术研究”(课题编号2010Z002-D)研究成果的一个重要组成部分。出版本书主要目的有两个,一是向机车乘务员培训机车优化操纵基本知识、观点和具体的操纵方法,纠正错误操纵习惯,提高优化操纵技术水平;二是通过本书出版,促进国内对列车优化运行(操纵)问题的研究。

本书作为机车乘务员培训教材时,对机车优化操纵基本知识方面,可只重点要求掌握有关结论;而对具体的操纵方法,应详细进行培训。

本书得以面世,得益于许多领导和同志的支持与帮助,第七章第九节内容由济南机务段提供,在此也一并表示感谢。

由于经验不足,加之我们水平所限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正,以便使之不断改进完善。

编者

2012年6月

目 录

第一章 列车优化运行(操纵)基本观点	1
第二章 机车牵引及动力制动特性	5
第一节 机车牵引特性	5
第二节 机车动力制动特性	18
第三节 恒力准恒速电力机车牵引力、动力制动力解析及手柄级位问题	23
第四节 HXD ₃ 型电力机车的黏着性能	32
第三章 列车牵引、惰行、制动节能运行基本问题	39
第一节 列车牵引运行节能基本问题	39
第二节 列车惰行节能运行基本问题	69
第三节 列车制动运行节能基本问题	76
第四节 综合问题	81
第四章 列车两种宏观优化操纵方法	87
第一节 列车功能关系式	87
第二节 开放式和保守式操纵方法	89
第三节 开放式和保守式操纵的具体应用	90
第四节 经济控制点和中间站经济类型	92
第五章 列车跟踪运行优化(操纵)问题	95
第一节 列车跟踪运行的几个概念及定义	95
第二节 列车跟踪运行(操纵)有关结论的得出	96
第三节 列车跟踪运行的问题、目的和原则	98
第六章 优化列车运行(操纵)环境问题	101
第一节 优化列车运行是一个复杂的系统工程	101
第二节 车机联控制度优化重点	105
第三节 站场、线路、道岔、信号、运行径路、提速等优化重点	110
第四节 行车组织指挥及政策、考核、评价等优化重点及建议	118
第五节 防止运缓坡停的优化重点及措施建议	121
第七章 列车微观优化操纵方法	123
第一节 列车宏观与微观优化操纵方法的关系	123

第二节	数种列车微观优化操纵方法简介.....	123
第三节	站间大锯齿波微观优化操纵方法.....	131
第四节	减少因黏着牵引力不足造成运缓、坡停的操纵方法	133
第五节	重货列车困难上坡道起停微观优化操纵方法.....	137
第六节	防止或处理折角塞门关闭的微观优化操纵方法.....	140
第七节	HXD ₃ 型、SS ₄ 改型机车几种操纵方法	144
第八节	货物列车运行中突起非常停车的综合判断处理方法.....	151
第九节	CRH ₂ 型动车组平稳操纵方法	155
第八章	列车优化操纵示意图.....	160
第一节	列车优化操纵示意图的编制要求.....	160
第二节	列车优化操纵示意图设计举例.....	162
参考文献		176

第一章 列车优化运行(操纵)基本观点

一、列车优化运行(操纵)理论及应用研究的对象

列车优化运行(操纵)(即机车优化操纵以下简称优化操纵)理论及应用是研究列车在一定运行(操纵)环境条件下,使列车运行安全(平稳、减少断钩、坡停、分相区停车等)、经济(节省能源)、效率(减少运缓提高技术速度、旅行速度)相统一的一门科学。

在优化操纵方面,按操纵方法适用的层次不同可分为宏观和微观操纵方法两类(参见第七章第一节);按操纵目的或侧重点的不同优化操纵可分为经济(节能)操纵、平稳操纵、安全操纵等;按操纵环境优化度来分,可分为广义和狭义两种。

1. 列车运行(操纵)环境

列车运行(操纵)环境的定义参见第六章第一节第四部分内容。

2. 广义和狭义的优化操纵

优化操纵从广义上讲是指列车运行(操纵)环境和列车(机车)司机(以下称列车司机)操纵技术同步进行优化,使列车运行各系统得到整合,产生出最佳的安全、效率、经济成果。

优化操纵从狭义上讲,就是仅从列车司机单方面挖潜,存有局限性。

通常我们所讲的优化操纵是从狭义上讲的,主要靠列车司机自身的素质。鉴于列车运行(操纵)环境的重要性,正日益受到铁路各级领导及科研部门的关注。

3. 安全、效率、经济在优化操纵中的涵义

安全、效率、经济效益在优化操纵理论中存在一定的联系,安全是前提,效率是根本,经济效益是中心。其内涵主要如下。

所谓安全主要是指列车司机应严格按信号显示要求运行,并严格遵守各种限制速度,使列车平稳运行,遇有紧急情况,果断采取措施,防止事故发生。

所谓效率是指在安全的前提下,列车司机要尽可能提高列车运行速度,缩短运行时间,加速机车、车辆周转,提高社会效益。在列车密度高的区段,尤其要掌握好列车跟踪操纵技术,在优化运行秩序上狠下工夫,这是提高运行效率的关键。

所谓经济是指依据实际限制条件,只有当采用与之相对应的优化操纵方法时,才能使列车运行得到优化,达到相对应运行条件下的最佳节能状态。节能是明显且直接的经济效益,而效率是间接的经济效益,如旅行速度提高会加速机车、车辆周转,减少机班供应,减少空载耗能;运行秩序优化会减少制动损失。其实效率所产生的间接经济效益比直接经济效益更为广泛。

4. 列车运行限制条件

列车运行是有一定限制条件的,这种限制条件主要是列车运行某段距离时的限定时间。在不同的限定条件下,列车司机要采用与之相对应的优化操纵方法,才会产生出最佳的效益。列车运行限制条件从宏观上可分为理想和非理想条件两类。

理想条件是指列车在较长的距离范围内按列车运行图规定的运行时刻运行且不受任何波及(阻碍影响);或列车司机早已知道前方站安排停车,并且前方站进路能及时准备妥当。

非理想条件是指列车按运行图规定的运行时刻通过某一地点必将受到柔性或刚性波及(柔性波及为弱阻碍影响、刚性波及为强阻碍影响,参见第五章第一节);或当前方站安排停车,并且进路不能及时准备妥当。

列车运行限制条件是优化操纵理论的重要内容之一,优化操纵理论反复强调机车司机在操纵列车时必须以实际限制条件为依据,针对不同限制条件,适时采用与之对应的优化操纵方法。另外,比较任意两种操纵方法优劣与否,也是离不开列车运行限制条件的。

二、列车优化运行(操纵)理论及应用研究采用的方法

1. 列车优化运行(操纵)在节能方面寻求的是满意解

关于优化操纵在节能方面寻求解(解在此指耗能量)的问题,历来存有争议。有人可能认为不寻求最优解或寻不到最优解的操纵就不能算做优化操纵。理性分析表明,无论是人工控制,还是计算机寻求最优化方案,都很难得到真正的最优解。因此,通常优化操纵所得到的满意解,而不是真正的最优解。

满意解不同于一般解。满意解是采用优化操纵方法才能取得的,它接近于真正的最优解。但其接近真正的最优解的程度取决于列车司机的优化操纵技术水平或计算机寻优所采集的各种约束条件(参数)的真实性或准确性。

通常在一定时间和路程限制下的操纵组合方式(包括牵引手柄位的组合,牵引、惰行、制动工况的组合)可以有很多种。因此,要寻求真正的最优解的操纵方式是相当困难的。以计算机动态寻优为例,暂且不谈它所依据的理论分析模型如何,它只能够利用此模型取得在其计算条件下的最优解。但这个最优解却不能等同于真正的最优解。这是因为在计算条件下,计算机所取用的各种参数,如运行基本阻力特性参数、机车油耗或机车总效率特性参数等都是经验数据,难以准确反映当时、当地的真实情况;加之某些区间运行时分不合理或列车运行在非理想条件下运行限制时间难以确定等,都给得到真正的最优解造成很大困难。

2. 列车优化运行(操纵)理论主要研究工具和方法

列车牵引计算理论是优化操纵理论研究的主要工具,它还要借鉴数学、力学、热力学等各种学科的研究成果。它主要是采用系统的、宏观的、逻辑的、辩证的、抓主要矛盾的、具体问题具体分析的、试验和比较的研究方法。

列车优化运行(操纵)理论及应用技术研究就是实事求是、具体问题具体分析。它反对一刀切,反对形而上学;它是辩证地、系统地、全面地去看问题。因为现实中在运输繁忙的铁路干线,非理想条件也是经常存在的。如果不区分列车运行限制条件,只是盲目地、一味地采用开放式操纵追求所谓高技速,将遭受客观规律惩罚。不仅无经济、效率可言,也无安全可言。

三、列车优化运行(操纵)理论、应用研究现状及展望

1. 列车优化运行(操纵)理论及应用研究现状

在列车节能操纵方面,国内最早出现的提法是经济操纵、节能操纵,后来也有人把经济或节能操纵称为优化操纵,应当说这种提法是不准确的。优化操纵应涵盖所有的操纵(涉及安全、节能、效率等各个方面),不应把节能操纵和优化操纵混为一谈,也不应把优化操纵简单地等同为节能或经济操纵。

在理论上,国内外对此都已有较多的理论探讨,但大多较为分散,还没有形成完整的、系统的理论体系,更没有形成这方面较为系统完整的培训教材。

在应用上,国内外不少机构或个人也已进行了较多的探索,但进行节能数学模型、节能算法的研究较多,进行节能驾驶指导装置研究的较少。目前节能驾驶指导装置还没有进入应用阶段,至少还没有大面积推广使用。因为大多数数学模型是依据给定的运行时间作为约束条件,而这一时间多为图定时间,所以数学模型只能给出在给定时间或前方信号显示状态下的驾驶指导。目前对于在普通线路上运行的旅客列车、货物列车,因为无法得到列车运行前方足够远的准确的列车运行限制信息,所以无法适时给出对应于实际限制条件的优化驾驶指导方案。因此,也就使推广应用受到了限制。

对于在客运专线或高速铁路上运行的动车组,目前已具备适时给出优化驾驶方案的客观条件,即动车组能够适时得到列车运行前方足够远距离的准确的列车运行限制信息。但是由于缺乏优化调度和优化操纵装置(系统)的研究,目前仍然不能适时给出优化驾驶方法的指导。

2. 列车优化运行(操纵)理论及应用研究展望

(1) 首先应进行以人工控制为主的列车优化运行(操纵)理论及应用研究

采用优化操纵方法,不仅能节省大量的能源,减少闸瓦、车轮磨耗,减少列车冲动,提高旅行速度,优化运行秩序,提高运输效率;而且能延长机车使用寿命,减少冲突、追尾、冒进、溜逸等事故的发生。因此优化操纵理论及应用研究是一项极具有理论和应用价值的课题。

现阶段由于列车运行限制条件的复杂性等客观条件限制,尤其是货物列车和普通旅客列车在相当长时间内是离不开人工控制的;并且货物列车优化操纵在节能方面弹性空间很大,因此对以人工控制为主的优化操纵理论及应用研究是非常有必要的。

以人工控制为主的优化操纵理论及应用研究取得的成果,主要可产生以下几方面影响。

一是可据此成果编制较为系统的优化操纵培训教材,作为机车司机培训的必学教材,不断提高机车司机优化操纵技术水平。

二是促进列车运行(操纵)环境的优化,带动列车优化调度、站场、线路、信号、运行径路优化设计等相关课题的研究发展。

三是为优化调度、优化操纵装置(包括软件、硬件组成的系统)研究积累经验。

(2) 列车优化运行(操纵)理论及应用研究应和列车运行(操纵)环境结合起来

因操纵环境对优化操纵有巨大反作用,如果外部制约条件即操纵环境不进行优化,在节能和效率方面仅凭列车司机单方面采用优化操纵,潜力将很有限。因此,优化操纵理论及应用研究应和操纵环境结合起来,以便及时使机车操纵的外部制约条件得到优化。

(3) 优化调度、优化操纵装置(系统)应结合起来进行研究

要利用计算机参与列车优化操纵指导或具体控制,应进行以下几方面研究。

① 应进行列车运行限制条件的深入研究

包括前方足够远距离内各信号机显示状态;距前行列车距离和前行列车运行速度;各种限制速度;调度指令数据(调度指令应数据化,包括前方站是安排正线还是侧线通过或跟踪通过,是正线还是侧线停车,前方站安排停车时的到达时限等)。

② 应进行列车运行限制条件相关数据传输的研究

前方足够远距离是指能使列车有用动能得到充分利用的距离,在此距离内的运行经路上的地面各信号机显示状态应通过有关装置传输到车载计算机上;前行列车位置和运行速度的检测和数据传输(可利用卫星技术);各种限制速度可参照 LKJ 或 ATP 方式取得;调度指令数据可参照 GSMR 的方式取得。

③ 应进行优化操纵数学模型的研究

参照优化操纵理论有关成果建立数学模型,在节能方面应以尽量避免不必要的制动损失为侧重点。

此数学模型必须以安全为前提,应遵循导向安全原则。其目的是得出在列车运行各种限制条件下的优化方案,在确保安全和保证效率的情况下,以便取得在这些限制条件下的最优节能效果。

车载计算机根据机型、列车编组、运行线路、图定时间及列车运行限制条件的各种参数,利用分析模型适时进行比对计算形成优化操纵指导方案或实施自动驾驶。

④优化调度、优化操纵装置(系统)应结合起来进行研究

列车优化运行离不开优化调度和优化操纵,只研制优化操纵装置,因得到的列车运行限制条件数据少、范围窄,推广价值不大,只有将优化调度、优化操纵装置(系统)结合起来进行研究,才具有巨大经济价值和推广应用价值。

优化操纵装置(系统)的研究可在 LKJ 或 ATP 功能的基础上进行功能扩展,显示屏应共用。优化调度装置(系统)的研究可在 CTCS、GSMR 功能的基础上进行功能扩展,并且这两个系统应有机联系起来。

在优化操纵装置(系统)的研究方面,可先进行优化操纵指导装置研究,在 LKJ 或 ATP 显示屏安全速度限制线下形成优化操纵指导速度线或有关指导提示。条件成熟后,再进行优化操纵自动驾驶装置的研究。

第二章 机车牵引及动力制动特性

第一节 机车牵引特性

一、机车牵引力的定义

机车牵引力是由动力传动装置产生的,与列车运行方向相同,使列车运行并可由司机根据需要调节的外力。

动力装置产生的机械能(热力牵引)或直接由接触网获得的电能(电力牵引),通过传动装置产生使动轮回转的扭矩,在动轮轮周上形成切线力,依靠轮轨间的黏着产生由钢轨作用于动轮轮周上的反作用力,从而使列车发生平移运动。这种由钢轨作用于动轮轮周上的切向反力,即为机车牵引力。

对于动车组,城市轨道交通和地铁列车而言,动力集中配置的,可称为动车牵引力;动力分散配置的,称为列车牵引力更为合适。

二、机车牵引力的几个概念

1. 按能量传递顺序对机车牵引力的分类

(1) 指示牵引力 F_i

假定原动机(内燃牵引时就是柴油机)所做的指示功毫无损失地传到动轮上所得到的机车牵引力。指示牵引力是个假想的概念。

(2) 轮周牵引力 F

实际作用在轮周上的机车牵引力, $F < F_i$ 。

(3) 车钩牵引力 F_g

除去机车阻力的消耗,实际作用在机车车钩上的牵引力。

在列车作等速运行时,车钩牵引力与轮周牵引力关系如式(2-1)所示。

$$F_g = F - W' \quad (2-1)$$

式中 W' ——机车阻力。

我国《列车牵引计算规程》(以下简称《牵规》)规定,机车牵引力以轮周牵引力为计算标准,即以轮周牵引力来衡量和表示机车牵引力的大小。

由于动轮直径的变化会影响轮周牵引力的大小,《牵规》规定,机车牵引力按轮箍半磨耗状态计算。机车轮箍半磨耗状态的动轮直径叫做计算动轮直径。我国常速电力机车的计算动轮直径是 1 200 mm;常速内燃机车的计算动轮直径是 1 013 mm;动力分散式动车组的动轮直径与客车轮径相同,计算动轮直径是 880 mm。

2. 按能量转换过程的限制关系,对机车牵引力的分类

(1) 电力机车

① 牵引电动机牵引力:受牵引电动机功率限制的轮周牵引力。

②黏着牵引力:受轮轨间黏着能力限制的轮周牵引力。

(2)热力机车

①原动机牵引力:受原动机功率限制的轮周牵引力,内燃机车为受柴油机功率限制的轮周牵引力。

②传动装置牵引力:受传动装置能力限制的轮周牵引力。

③黏着牵引力:受轮轨间黏着能力限制的轮周牵引力。

实际条件下,能够实现的机车牵引力,是上述这些牵引力中的最小者。

三、机车黏着牵引力

1. 黏着牵引力

轮周上的切线力大于轮轨间的黏着力时动轮就要发生空转。在不发生空转的前提下,所能实现的最大轮周牵引力称为黏着牵引力,如图 2-1 所示。其计算公式为:

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

式中 F_{μ} ——计算黏着牵引力,kN;

P_{μ} ——机车黏着质量,t;

μ_j ——计算黏着系数;

g ——重力加速度, $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

也即黏着牵引力的大小与机车计算黏着质量成正比,与计算黏着系数成正比。

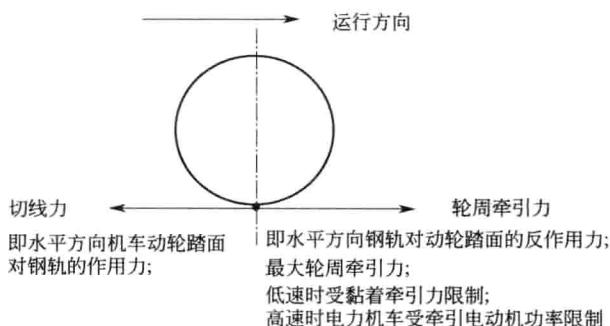


图 2-1 切线力、轮周牵引力示意图

2. 计算黏着系数

计算黏着系数小于理论黏着系数(轮轨间的最大静摩擦系数),它包含了机车轴重和牵引力的分配不均、运行中轴重增减载、牵引力的波动、轮轨间的滑动(纵向和横向的)等不利因素的影响,并且主要与轮轨表面清洁状况和机车运行速度有关。

黏着条件不好时可以用撒砂来改善。采用交流传动及改进机车走行部结构可以提高黏着系数。采用径向转向架可以提高曲线上的黏着系数。采用防空转装置可以提高黏着系数利用程度。

计算黏着系数的影响因素复杂,只能用专门试验得出的试验公式表达。试验公式表示在正常黏着条件下计算黏着系数和机车运行速度的关系。

我国《牵规》规定的计算黏着系数公式如下:

(1)电力机车

国产各型电力机车

$$\mu_j = 0.24 + 12 / (100 + 8v) \quad (2-3)$$

$$6K \text{ 型电力机车} \quad \mu_j = 0.189 + 8.86 / (44 + v) \quad (2-4)$$

$$8G \text{ 型电力机车} \quad \mu_j = 0.28 + [4 / (50 + 6v)] - 0.0006v \quad (2-5)$$

HXD₃ 型交流传动货运机车培训教材推荐的交流传动电力机车的黏着系数公式为:

$$\mu_j = 0.31 + 3 / (30 + 10v) \quad (2-6)$$

式中 v ——运行速度, km/h。

机车在曲线上运行时, 黏着系数比直线上有所降低, 尤其在小半径曲线上更为明显。三轴转向架电力机车在曲线半径 R 小于 600 m 的线路上运行时, 曲线上的计算黏着系数 μ_r 按式 (2-7) 计算

$$\mu_r = \mu_j (0.67 + 0.00055R) \quad (2-7)$$

(2) 内燃机车

$$\text{国产各型电传动内燃机车} \quad \mu_j = 0.248 + 5.9 / (75 + 20v) \quad (2-8)$$

$$\text{ND}_5 \text{ 型内燃机车} \quad \mu_j = 0.242 + 72 / (800 + 11v) \quad (2-9)$$

内燃机车在曲线半径 R 小于 550 m 的线路上运行时, 曲线上的计算黏着系数 μ_r 按式 (2-10) 计算

$$\mu_r = \mu_j (0.805 + 0.000355R) \quad (2-10)$$

从表 2-1 中可见, 随着运行速度的提高, 各种机车的计算黏着系数都有所下降。不同类型机车的区别, 主要是因它们的走行部结构不同。直流传动机车随着运行速度提高黏着系数降幅较大, 交流传动机车降幅较小。交流传动比直流传动机车的黏着系数要大些, 在 40 km/h 以下国产电力机车比交流传动电力机车黏着系数平均低 12.1%。直流传动的电力机车 6K 型计算黏着系数最高, 与它所采用的 B₀—B₀—B₀ 转向架和低位牵引拉杆等结构有关。运行速度在 40 km/h 以下时, 6K 型的计算黏着系数比国产电力机车高 10% 以上。不同类型机车的区别, 主要是因它们的走行部结构不同。

表 2-1 各种机车不同运行速度下的计算黏着系数

速度 (km/h)	0	10	20	30	40	50	60
国产各型电力机车	0.360	0.307	0.286	0.275	0.269	0.264	0.261
6K 型电力机车	0.390	0.353	0.327	0.309	0.294	0.283	0.274
8G 型电力机车	0.360	0.310	0.292	0.279	0.270	0.261	0.254
交流传动电力机车	0.410	0.333	0.323	0.319	0.317	0.316	0.315
国产电传动内燃机车	0.327	0.269	0.260	0.257	0.255	0.253	0.253
ND ₅ 型内燃机车	0.332	0.321	0.313	0.306	0.300	0.295	0.291

我国尚缺交流传动机车计算黏着系数的正规资料。对于 HXD₃ 型电力机车的计算黏着系数建议采用 HXD₃ 型交流传动货运机车培训教材推荐的交流传动电力机车的黏着系数公式进行计算。

3. 黏着牵引力曲线

将表 2-1 中的计算黏着系数和机车黏着质量带入式 (2-2), 即可得出各型机车的计算黏着牵引力。根据各型机车不同速度下的黏着牵引力, 可以在坐标图中绘出黏着牵引力与速度的关系曲线, 称为黏着牵引力曲线, 如机车牵引特性曲线图中带阴影的曲线。由于客运机车的黏着牵引力一般要比传动装置牵引力大许多, 机车牵引力不受黏着牵引力的限制, 所以客运机车的牵引特性曲线图上通常不把黏着牵引力曲线画出来。

四、电力机车牵引特性

1. 电力机车牵引电机牵引力

(1) 牵引电机的电流特性

牵引电机的电流特性,是指在一定的电压下牵引电机电流 I_d 与运行速度 v 的关系。

① 采用恒压控制

采用恒压控制的电力机车,其牵引电机电流 I_d 与运行速度 v 的关系可以由牵引电机电压平衡方程式和机车速度与牵引电机转速的关系导出。

$$I_d = \frac{U_d - C v \Phi}{R_d} \quad (2-11)$$

式中 I_d ——牵引电机电流, A;

U_d ——牵引电机端电压, V;

C ——机车常数;

v ——运行速度, km/h;

Φ ——牵引电机主磁通, Wb;

R_d ——牵引电机电枢绕组电阻, Ω 。

式(2-11)说明,当机车和牵引电机的某些结构参数一定时,牵引电机的电流由牵引电机的端电压和机车速度决定。牵引电机的端电压由手柄级位决定,当手柄级位一定,机车速度提高时,牵引电机电流减少。

② 采用恒力(流)准恒速控制

机车的牵引、制动控制采用恒牵引力(制动力)、准恒速特性控制方式。我们称具有这种牵引特性的机车为“恒力准恒速机车”(也称恒流准恒速机车)。

采用恒流准恒速控制的电力机车,其牵引电机电流 I_d 随运行速度 v 和手柄级位数 n 变化,由微机实行特性函数控制。如 SS₄ 改、SS_{4B} 型电力机车特性控制函数为:

$$I_d = \begin{cases} 150n & \text{①} \\ 6 \times (100n - 9v) & \text{②} \\ 1096 & \text{③} \end{cases} \text{取最小值} \quad (2-12)$$

(2) 机车牵引力特性

机车牵引力特性,是指机车牵引力 F 与牵引电机电流 I_d 的关系。

机车牵引力 F 与牵引电机电流 I_d 的关系,可以由电机的电磁转矩公式和牵引力转矩的关系导出。

$$F = \frac{2}{D} m C_m \Phi I_d \eta_d \eta_c \times 10^{-3} \quad (\text{kN}) \quad (2-13)$$

式中 D ——动轮直径, m;

m ——牵引电机个数;

C_m ——电机的转矩常数(仅与电机结构有关);

Φ ——每极磁通量, Wb;

I_d ——电枢电流, A;

η_d ——牵引电机效率;

η_c ——齿轮传动效率。

由式(2-13)可见,机车牵引力 F 和牵引电机电流 I_d 以及磁通量 Φ 成正比。

(3) 机车牵引特性

机车牵引特性是指机车轮周牵引力 F 与运行速度 v 之间的关系 $F=f(v)$ 。由于牵引力与牵引电机电流成正比,所以机车牵引力 F 与运行速度 v 之间的关系线 $F=f(v)$ 的形状和牵引电机电流 I_d 与运行速度 v 的关系线 $I_d=f(v)$ 的形状极为相似。

2. 电力机车牵引特性曲线

电力机车牵引电机牵引力由专门试验得出。未经试验的新造机车,可参考由生产厂家提供的通过理论计算得出的预期特性曲线。预期特性曲线一般和试验曲线相当接近。

将牵引电机牵引力和黏着牵引力与速度的关系绘在一张图上,构成电力机车牵引特性曲线,如图 2-2 所示。

牵引特性曲线图中带阴影的是黏着牵引力曲线,另有若干条标明级位的是牵引电机牵引力曲线。在采用有级磁场削弱的 SS_4 型电力机车牵引特性曲线图上(图 2-2),满级位的牵引力曲线右上方有三条(I 级、II 级、III 级)磁场削弱工况下的牵引力曲线。采用无级磁场削弱的机型,其牵引特性曲线图上最外方的曲线是最深磁场削弱工况。连接最高级位满磁场和 III 级(或最深)磁场削弱牵引力曲线上方的一段曲线表示受牵引电机持续电流限制的牵引力。

采用恒力(流)准恒速控制方式的机车,牵引特性曲线图上所标的级位是名义级位。实际级位是连续(无级)的。另外,采用这种控制方式的货运机车,其牵引特性曲线图上往往缺少黏着牵引力曲线,图 2-3~图 2-5 上“外包线”低速段的直线,就是按照黏着限制设定的控制函数所决定的牵引力,这一段直线大体上代表黏着限制。

恒力(流)准恒速机车牵引特性有一个值得注意的特点,即在某一名义级位下,低速段是一段水平线,即牵引力为常数,然后转为沿斜线下降,到一定速度,机车牵引力会降为 0。牵引力开始下降和降为 0 的速度与名义级位之间都有一定关系。这种关系是由该型机车的特性控制函数决定的。

SS_4 型电力机车牵引特性控制函数为:

$$I_d = \begin{cases} 110n & ① \\ 88 \times (10n - v) & ② \\ 1305 & ③ \end{cases} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{取最小值} \quad (2-14)$$

8K 型电力机车牵引特性控制函数为:

$$I_d = \begin{cases} 200n & ① \\ 88 \times (10n - v) & ② \\ 1670 & ③ \end{cases} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{取最小值} \quad (2-15)$$

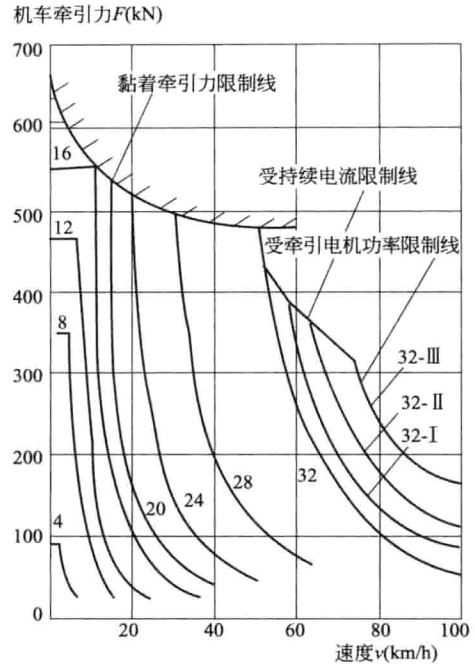


图 2-2 SS_4 型电力机车牵引特性曲线

HXD₃ 型(23 t 轴重)电力机车牵引特性控制函数为:

$$F = \begin{cases} 80n & \text{①} \\ 640n - 64v & \text{②} \\ \begin{cases} 520 & (v < 10 \text{ km/h}) \\ 544.8 - 2.48v & (10 \text{ km/h} \leq v < 70 \text{ km/h}) \\ 25\,970/v & (v \geq 70 \text{ km/h}) \end{cases} & \text{③} \end{cases} \left. \vphantom{\begin{matrix} 80n \\ 640n - 64v \\ \begin{cases} 520 \\ 544.8 - 2.48v \\ 25\,970/v \end{cases} \end{matrix}} \right\} \text{取最小值} \quad (2-16)$$

式②计算结果为负数时,视为 0。

HXD₃ 型(25 t 轴重)电力机车牵引特性控制函数为:

$$F = \begin{cases} 80n & \text{①} \\ 640n - 64v & \text{②} \\ \begin{cases} 570 & (v < 10 \text{ km/h}) \\ 600.9 - 3.09v & (10 \text{ km/h} \leq v < 65 \text{ km/h}) \\ 26\,000/v & (v \geq 65 \text{ km/h}) \end{cases} & \text{③} \end{cases} \left. \vphantom{\begin{matrix} 80n \\ 640n - 64v \\ \begin{cases} 570 \\ 600.9 - 3.09v \\ 26\,000/v \end{cases} \end{matrix}} \right\} \text{取最小值} \quad (2-17)$$

式②计算结果为负数时,视为 0。

式中 I_d ——牵引电机电枢电流, A;

F ——机车牵引力, kN;

n ——级位;

v ——机车速度, km/h。

式(2-14)~式(2-17)表示牵引电机电流(HXD₃ 型电力机车为牵引力)与级位和运行速度的关系。当级位和速度一定时取三者中的最小值。其中式③决定牵引电机电流(HXD₃ 型电力机车为牵引力)的最大值,式①决定水平段的电流值(HXD₃ 型电力机车为牵引力值),式②决定斜线段的速度范围。

牵引特性曲线图上牵引力水平线与斜线的交点速度与级位的关系可以由式①和式②相等的条件求得,如 HXD₃ 型电力机车:

$$\begin{aligned} 80n &= 640n - 64v \\ v &= 8.75n \end{aligned}$$

即当速度值等于级位数的 8.75 时出现水平线与斜线的交点,如主手柄 4 级时的交点速度是 35 km/h。

用同样方法可解出其他型机车牵引特性曲线图上牵引力水平线与斜线的交点速度和级位的关系为:

$$\text{SS}_4 \text{ 改、SS}_{4B} \text{ 型电力机车} \quad v = 8.33n$$

$$\text{SS}_9 \text{ 型电力机车} \quad v = 8.75n$$

$$\text{8K 型电力机车} \quad v = 7.5n$$

部分高级位的牵引力水平线和斜线的交点在图上没有显示出来,是因为超出了牵引力的“外包线”。

牵引特性曲线图上牵引力降为 0 的速度与级位的关系可由式(2-14)~式(2-17)中的式②等于 0 的条件导出,如 HXD₃ 型电力机车:

$$\begin{aligned} 640n - 64v &= 0 \\ v &= 10n \end{aligned}$$

HXD₃ 型电力机车牵引特性曲线图上所标名义级位数字乘以 10,就是该级位牵引力降为