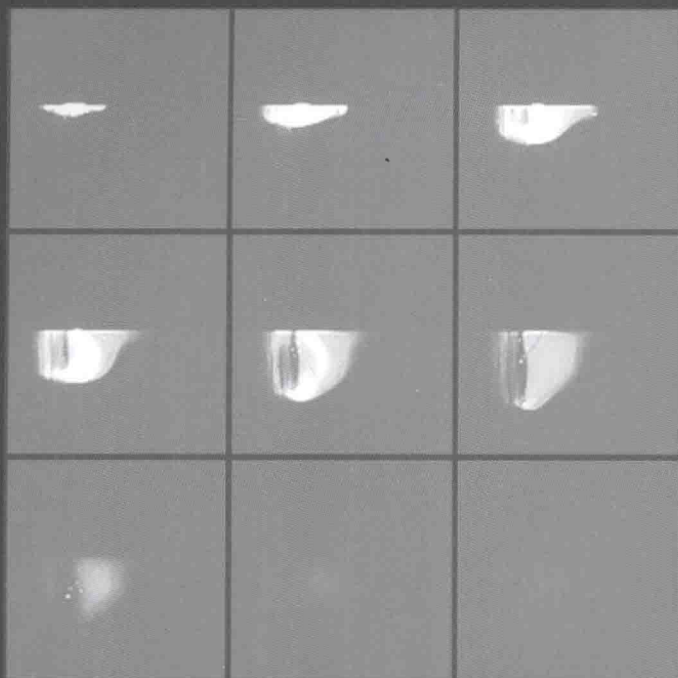




载流摩擦学

张永振 宋克兴 杜三明 等 著



科学出版社

载流摩擦学

张永振 宋克兴 杜三明 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书取材于载流摩擦学的最新研究进展以及作者和同事长期从事该领域研究的成果,以导电接触与摩擦接触的关联关系为主线,系统地阐述载流摩擦副的载流/摩擦特性及其损伤机制。全书共七章,专门介绍载流摩擦副特有的接触、损伤等摩擦学问题,并在最后一章介绍了载流摩擦学的研究方法,展示载流摩擦学研究的最新成果。

本书可作为高等院校教师和科研院所研究人员的参考用书,也可作为机械、材料类专业的研究生和高年级本科生的教学用书。

图书在版编目 CIP 数据

载流摩擦学 / 张永振等著. —北京:科学出版社,2016.9

ISBN 978-7-03-050043-4

I. ①载… II. ①张… III. ①摩擦-研究 IV. ①0313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 232874 号

责任编辑:孙伯元 罗 娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张:16

字数:323 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

载流摩擦学是研究摩擦接触同时兼有导电功能摩擦副相关行为的新兴摩擦学分支。与其他摩擦副相比,电因素的介入使载流摩擦副的行为更加复杂。这种复杂性不仅表现在其损伤形式与损伤机制的复杂性,而且表现为载流摩擦副往往要求同时具有良好的接触导电特性与摩擦接触特性。近年来,随着轨道交通的高速重载化、电力行业电力输送的高压化及控制行业的微型化,载流摩擦副不但服役条件日益苛刻,而且使用可靠性要求越来越高。因此,载流摩擦学理论及载流摩擦副设计日益受到人们的关注。

长期以来,人们对于载流摩擦学行为及其导电行为虽有一些研究,但总体来看,研究工作主要集中在某些具体摩擦副的材料探索方面,缺乏动态的、系统性的研究,更缺乏对导电接触与摩擦接触之间相互关联关系的研究,因此研究的深度与广度亟待加强。

本书作者长期进行载流摩擦学的研究工作,书中部分内容为作者长期研究工作的总结。本书以载流摩擦接触行为为主线,比较系统地介绍载流摩擦表面接触行为及其与导电/摩擦行为的关联;载流导电损伤的物理机制及其与服役条件的关系,全面展示目前载流摩擦学的研究现状及最新研究成果。

本书共七章。其中第1章由张永振撰写;第2章由杨正海撰写;第3章由国秀花撰写;第4章由逢显娟撰写;第5章由宋晨飞撰写;第6章由杜三明撰写;第7章由宋克兴、冀盛亚撰写。全书由张永振统稿。

在本书编写过程中,引用了国内外许多学者的研究成果,作者对此表示感谢。同时,对数十年来与作者一起工作的同事和研究生,对通读书稿并提出修改意见的上官宝教授、宋联美博士,表示真诚的感谢。

本书作者的研究成果得益于国家自然科学基金(U1034002、51375147、51405134、U1404504)、国家973项目(2010CB635113)、河南省创新型科技团队(No. C20150014)、河南省高校科技创新团队支持计划(No. 14IRTSTHN007)、河南省杰出青年科学基金(0412002100)、河南省杰出创新人才基金(0421000600)和铁道部有关项目的支持,作者对此谨表示感谢。

由于载流摩擦学为多学科交叉,涉及的知识面很宽,且作者的水平有限,对许多资料取舍和理解必然存在不妥和不足之处,敬请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 载流摩擦副的工程背景	2
1.1.1 轨道交通系统	2
1.1.2 开关系统	8
1.1.3 电刷系统	13
1.2 载流摩擦副的接触表面	14
1.2.1 摩擦接触表面	14
1.2.2 导电接触表面	17
1.3 载流摩擦副的特点	19
1.3.1 配副系统的耦合特性	19
1.3.2 配副系统的分类	21
1.3.3 配副系统的基本性能与评估	22
参考文献	24
第 2 章 载流摩擦学特性	27
2.1 载流摩擦学特性的一般规律	27
2.1.1 摩擦磨损特性	27
2.1.2 载流性能	30
2.1.3 载流摩擦的动态规律	31
2.2 滑动摩擦副的载流摩擦学特性	32
2.2.1 滑动载流摩擦的过程	32
2.2.2 稳定接触状态下滑动载流摩擦磨损特性	36
2.2.3 其他因素对载流摩擦磨损的影响	50
2.3 微动载流摩擦副的载流摩擦学特性	59
2.3.1 微动载流摩擦副的载流摩擦学过程	59
2.3.2 微动载流摩擦副稳定运行阶段的载流摩擦性能	62
参考文献	67
第 3 章 不同材料的载流摩擦学特性	72
3.1 铜系导电材料的载流摩擦学特性	72

3.1.1 铜合金	72
3.1.2 铜基复合材料	81
3.1.3 铜基粉末冶金	90
3.2 碳材料的载流摩擦学特性	92
3.2.1 纯碳	92
3.2.2 浸金属碳	93
3.2.3 C/C 复合材料	96
3.2.4 碳纳米管-银-石墨复合材料	100
3.3 钢铁材料的载流摩擦学特性	101
3.4 铝基复合材料载流摩擦学特性	104
3.5 陶瓷材料	108
3.6 开关电器触头材料	111
3.6.1 银基电接触材料	112
3.6.2 铜基电接触材料	115
参考文献	117
第4章 载流摩擦接触特性	123
4.1 粗糙表面的摩擦接触	123
4.1.1 赫兹接触理论	123
4.1.2 JKR、DMT 接触模型	124
4.1.3 粗糙接触 G-W 模型	125
4.1.4 粗糙接触分形模型	126
4.1.5 表面粗糙度对摩擦接触的影响	127
4.2 粗糙表面的电接触理论	129
4.2.1 静态电接触理论	130
4.2.2 运动状态下的电接触理论	133
4.3 载流/摩擦表面的热分析	138
4.3.1 载流摩擦过程中产生热量类型	138
4.3.2 热量对材料接触特性的影响	143
4.4 表面膜与导电/摩擦接触的匹配设计	145
4.4.1 天然膜	145
4.4.2 人工膜	148
参考文献	151
第5章 载流摩擦副电弧特性	154
5.1 载流摩擦副电弧的产生机制	154

5.1.1 电弧产生的物理基础	154
5.1.2 载流摩擦电弧的形成过程	156
5.1.3 电弧特征参数	158
5.1.4 摩擦电弧形成条件	170
5.2 载流摩擦电弧的特点	174
5.2.1 随机性	174
5.2.2 运动性	175
5.2.3 动态平衡性	178
5.3 电弧对导电品质和材料损伤的影响	179
5.3.1 载流品质	179
5.3.2 电弧对材料的损伤	184
5.3.3 载流摩擦电弧产生的主要工况	187
5.4 载流摩擦电弧的抑制	189
5.4.1 抑制电弧产生	189
5.4.2 约束电弧发展和维持	191
5.4.3 加速电弧熄灭	193
参考文献	194
第 6 章 载流摩擦接触表面的损伤机理	198
6.1 载流磨损的主要形式	198
6.1.1 机械磨损	198
6.1.2 氧化磨损	201
6.1.3 电气磨损	203
6.1.4 电气磨损机制	206
6.1.5 复合损伤机制	209
6.2 载流摩擦表面形貌特征	214
6.2.1 载流摩擦接触表面特征	214
6.2.2 载流摩擦副表面膜	217
6.2.3 载流摩擦副次表层组织变化	219
参考文献	223
第 7 章 载流摩擦的研究方法与手段	225
7.1 载流摩擦磨损性能的评估	225
7.1.1 载流摩擦副导电性能的评估	225
7.1.2 摩擦磨损性能的评估	227
7.1.3 载流摩擦磨损综合性能评估方法	229

7.2 载流摩擦磨损的试验方法	234
7.2.1 载流特性检测设备及方法	234
7.2.2 载流摩擦磨损性能的工程评估设备及方法	241
参考文献	245

第1章 绪 论

摩擦磨损是材料的主要失效形式和能源消耗机制。据统计,世界上 1/3 以上的一次性能源消耗于摩擦,60%以上的机械材料消耗于磨损^[1]。减少摩擦、降低磨损是节能降耗的有效技术手段之一,也是以研究相对运动、相互作用表面及其有关理论与实践为目标的摩擦学者的终身追求。2006 年,由谢友柏、薛群基、徐滨士等院士负责、中国工程院组织完成的《摩擦学科学及工程应用现状与发展战略研究》项目研究报告显示,在我国工业领域,合理应用摩擦学知识可节约能源、资源的潜力估计为 3270 亿元,占当年我国国内生产总值(gross domestic product, GDP)的 1.55%^[2]。例如,对于汽车工业,正确应用摩擦学技术可使汽车的燃油指标降低 5%~30%^[3]。因此,关注和重视摩擦学的理论研究及工程应用是可持续发展战略的有效组成部分和主要内容之一。

摩擦学以配副相互运动过程中的摩擦、损伤及润滑理论与技术为主要研究领域,是一门涉及材料、机械、力学、化学、表面等多学科理论与应用的交叉学科。针对以解决高承载与低摩擦为主要矛盾的传统摩擦副,润滑理论、磨损理论与粗糙表面接触理论的发展为解决摩擦学工程问题发挥了重要的理论指导作用^[4]。然而,随着科学技术的快速发展,摩擦副的使用条件日益苛刻化和复杂化。突出表现为,摩擦副的使用条件不但向高速、重载、高温、复杂环境气氛、真空等方向快速拓展,而且摩擦副的功能也由传统单一的承载向多种功能转变。例如,对于生物摩擦副,要求具有信息反馈的功能,关节摩擦副需具有对运动状态的感知和调控功能^[5],对摩擦副状态信息的感知及自动调控是生物摩擦学及仿生摩擦学的核心科学问题。

载流摩擦副是典型的功能摩擦副,其摩擦表面除具有承受载荷、传递机械运动的功能外,还承载电流传递的功能。与传统摩擦副相比,电因素的介入使得摩擦副接触表面出现了一系列特有的载流摩擦学现象。

(1)材料的摩擦学特性发生显著变化。在干摩擦条件下,电弧及电阻热的进一步作用,不但导致材料磨损的加剧、磨损形式的多样化,而且表面接触状态的复杂化使摩擦行为对摩擦条件的依赖更加敏感,表现为动态摩擦系数的波动程度更加显著。

(2)与静态电接触相比,摩擦副的运动使得其导电行为也出现了许多复杂的机制。对于运动状态下的粗糙接触表面接触,其导电形式可能是接触导电、等离子体电弧导电,或者二者的复合;其导电面积在名义接触面积的 0~100%变化,因此,

其微区温度与导电密度可能高至诱发电弧的形成。

(3)从对摩擦副性能的作用来看,电因素与摩擦学因素之间是耦合作用。这种耦合作用不但表现为载流条件对摩擦磨损特性的作用及摩擦学条件对导电载流特性的作用,而且表现为二者之间强烈的反馈效应,这种强烈的复杂耦合关系将导致载流摩擦副的载流导电行为和摩擦学行为出现许多特有的现象。

因此,载流摩擦副不是电接触与摩擦接触的简单叠加,其中的许多问题采用传统的摩擦学与电接触学理论已不能合理解释。为此,有必要对当前载流摩擦学行为研究结果进行分析、梳理,并对其其中的一些成熟结论进行总结,以便为载流摩擦副的安全服役、结构与材料设计等提供技术支持。

1.1 载流摩擦副的工程背景

工程实践中比较典型的载流摩擦副有轨道交通系统(包括受电系统和回流系统)、开关系统(包括高压开关和继电器)以及电刷系统。载流摩擦副不仅具备传动、承载等机械作用,而且兼具电能输送功能,其运行可靠性已成为交通、能源等行业技术进步的瓶颈。

1.1.1 轨道交通系统

从高效、安全与环保的角度分析,电气化铁路不用自身携带能源动力装置,降低了自重,因而牵引能力大幅度提高;同时运行时的废气及噪声污染很低,因此,电气化铁路成为世界各国铁路的主要建设模式,同时这些优点促使大量的城市轻轨及地铁也都采用电力机车驱动。

无论铁路、地铁,还是无轨电车,由于车辆的运动要求,地面供电系统为列车提供动力,必然具备从地面固定线路获取电力,经运动车辆的动力系统回流到地面固定线路的完整回路。对于铁路系统,钢轨是最经济的回流线路,其基本的电流回路为:电网单相向接触网供电,接触网电流经过受电弓滑板/电力线到机车内部电机,之后通过回流装置至钢轨,由轨道回到电网,形成回路。对于地铁,由于净空限制,一般采用第三轨,即地铁电动车辆通过安装在它侧面的受流器(接触靴),与第三轨滑动摩擦接触而获得电能,之后,通过回流装置经地面钢轨回到电网形成完整回路。对于城市无轨电车,其受流与回流均由安装在车辆顶部的两个集电器/电力线实现。总之,对于电力车辆系统,受电及回流两处导电均是通过载流摩擦副实现的,其供电原理如图 1-1 所示。

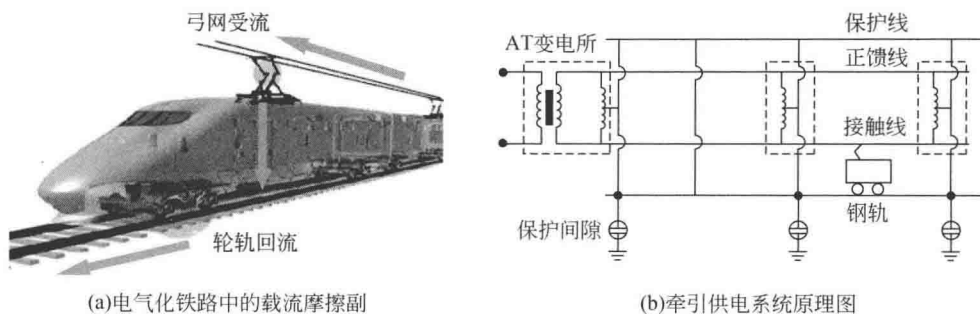


图 1-1 电力机车供电示意图

1. 受电系统

受电系统由固定的接触网系统与安装于机车的受电弓系统两部分组成(图 1-2)。

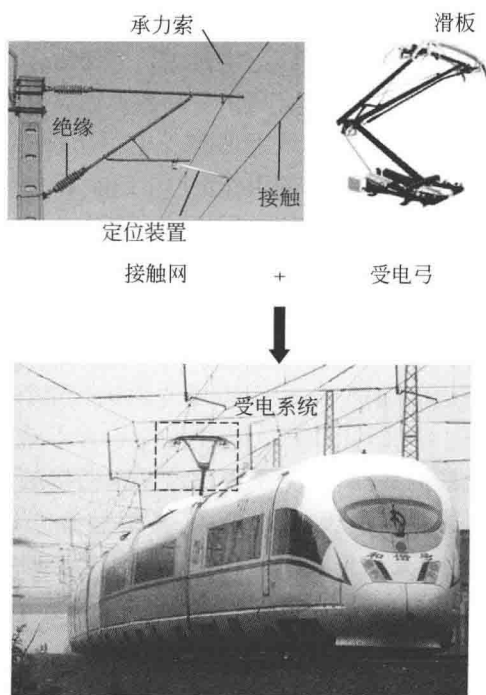


图 1-2 受电系统由接触网系统与受电弓系统两部分组成

接触网(overhead line)是电气化铁路常用的两种供电网络方式之一,也是公交无轨电车唯一的供电方式。接触网在欧洲称为 OCS(overhead contact system),在

英国称为 OLE 或 OHLE(overhead line equipment),在澳大利亚称为 OHW(overhead wiring),而在美国称为 catenary。各国的接触网结构虽有所差异,但大体上都包括接触悬挂、支持装置、定位装置、支柱与基础几部分。其中接触悬挂包括接触线、吊弦、承力索以及连接零件和绝缘子。接触悬挂通过支持装置架设在支柱上,其功用是将牵引变电所获得的电能输送给电力机车。从摩擦副的角度看,接触线与受电弓滑板共同组成了载流摩擦副。

高速电气化铁路接触网采用 25~30kV(对地而言)的单相工频交流电,对电力机车电压均为 25kV。城市轨道交通的接触网电压一般为直流 750V 或 1500V。接触网导线也称为电车线,是接触网中重要的组成部分之一。电力机车运行中其受电弓滑板直接与导线接触摩擦,并从接触线上获得电能。由于高铁、重载、城市轻轨对牵引供电的要求不同,其接触线的性能、接触线截面积也随之改变。



图 1-3 高速电气化铁路接触线

为了避免接触导线对受电弓滑板的集中磨耗,以提高滑板的使用寿命,并使滑板的受磨部位较为均匀,接触导线在直线区段均布置成之字形。但对于高铁,为避免导线的偏移不超出受电弓滑板的工作范围,接触导线均采用直线布线。接触线一般制成两侧带沟槽的圆柱状,其沟槽设计有利于安装线夹而又不影响受电弓滑板滑行受流。接触线下面与受电弓滑板接触的部分呈圆弧状,称为接触线的工作面(图 1-3)。

我国采用的铜接触线多为 TCG-110 和 TCG-85 两种型号,其字母 T 表示铜材,C 表示电车线,G 表示带沟槽形式,后面的数字表示该型铜接触线的截面积。部分电气化铁路采用钢铝接触线。钢铝接触线以铝和钢两种金属压接制成,以铝面作为导电部分,与受电弓滑板接触摩擦的是钢面,既保证了导电性能又提高了工作面的耐磨性,中国采用的钢铝接触线有 GLCA100/215 和 GLCB80/173 两种型号。字母 GLC 表示钢铝电车线,A、B 表示线型,后面分式中,分母表示该型钢铝接触线的截面积,分子表示该型钢铝接触线的载流量当量于铜接触线的截面积。高铁采用铜银接触线,代表型号有 CTHA-85、CTHA-110、CTHA-120 等,新建高速也开始采用铜镁合金接触线。主要国家高铁接触网材料特性列于表 1-1。

表 1-1 主要国家高铁接触网材料特性^[6]

国家	日本		法国		德国	意大利	
悬挂类型	复链	简链	弹链	简链	弹链	简链	复链
年代	20 世纪 60 年代	20 世纪 90 年代	20 世纪 80 年代初	20 世纪 90 年代	20 世纪 80 年代末	20 世纪 90 年代	20 世纪 80 年代末

续表

国家	日本		法国		德国	意大利	
运营速度 /(km/h)	270	270~300	270	300	250	300~400	250
材质	Cu170	CS110	CdCu120	SnCu150	AgCu120	MgCu120	2×Cu150
接触线 张力/kN	15	20	14	20	15	27	2×15
波动速度 /(km/h)	414	525	412	441	426	569	382
β 值	0.65	0.51	0.66	0.68	0.59	0.53~0.71	0.65

在机车与接触网之间,设置受电弓。与机车随动的受电弓滑板与接触网导线通过摩擦接触实现导电。受电弓与接触线之间为柔性接触,且受电弓在列车运动过程中的动力学状态十分复杂,因此受电弓的结构对于载流摩擦有显著的影响。按照结构分,世界各国的受电弓分为四大类:双臂式、单臂式、垂直式和石津式。双臂式受电弓是最传统的受电弓,因其形状为菱形,亦称菱形受电弓,但现因保养成本较高,加上故障时有扯断电车线的风险,部分新出厂的铁路车辆已改用单臂式受电弓。部分运营中的铁路车辆(如新干线 300 系列车)也从原有的双臂式受电弓改造为单臂式受电弓。单臂式的受电弓也称为之(Z)字形的受电弓,此款受电弓的优势是比双臂式受电弓噪声低,故障时也不易扯断接触网,为较普遍的受电弓类型。各铁路车辆制造厂的设计方式不同,在受电弓的设计上有些差异。除了上述两款受电弓,还有某些受电弓是垂直式设计,称为 T 形(或翼形)受电弓,其低风阻特性特别适合高速行驶,以减少行车时的噪声,所以主要用于高速铁路车辆。但是由于成本较高,垂直式受电弓已经退出使用(日本新干线 500 系改造时由垂直式受电弓改为单臂式受电弓)。石津式受电弓由日本冈山电气轨道的第六代社长石津龙辅 1951 年发明,又称为冈电式或冈轨式。

列车载流是通过安装于受电弓上的滑板实现的。因此滑板的材料一直是研究的热点。从使用性能出发,滑板材料既要具备良好的导电性能,又要具备良好的耐磨性能。目前应用的滑板材料有铜合金、浸金属碳材料、铜基粉末冶金材料及碳/碳复合材料。其中碳/碳复合材料滑板由于具有优异的润滑性能而广泛应用于高速铁路中。为进一步改善滑板的性能,人们目前正在开发 Ti-Si-C 导电陶瓷系列滑板。

除接触网外,低速的工业行车及特殊载流摩擦系统也常采用第三轨供电的供电方式。地下铁道由于净空限制,一般也采用第三轨,即在行车轨道的一侧,用绝缘支架架设一条离地约 400mm 高的第三轨。第三轨由高电导率的特殊软钢制成,

我国北京的地铁和其他一些国家的地铁都采用第三轨受电。导电轨可布置在地上、地下、空中(头顶上方),可与集电靴上接触、侧接触及底下接触,相应上有上接触式、下接触式集电靴以及受电弓、牵引犁等。图 1-4(a)为集电靴上接触式(与导电轨下表面接触)示意图。近年来,由于地下和地面联运以及接触网电压上升到 1500V 等原因,均采用较为安全并可充分利用隧道圆形截面顶部空间的架空接触网,再通过装在动车顶上的受电弓获得电能[图 1-4(b)]。

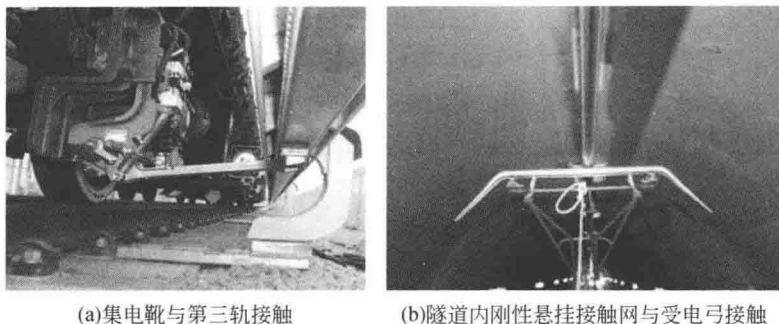


图 1-4 第三轨供电方式

传统的导电轨是用低碳钢材料制造的,如北京地铁和天津地铁导电轨所采用的材料就是低碳钢。20 世纪初,发达国家都采用低碳钢导电轨。地下铁道、轻轨交通、单轨交通等城市快速轨道交通的发展和工业技术的进步,对导电轨提出了更高的要求,人们一直在寻找能够增加导电轨导电性、减少电流损耗和加大导电轨的一次输电距离、减少变电站数量的新材料,为此,开发了钢铝复合导电轨^[7]。经过几十年的研究、开发和现场使用,已形成了一套比较成熟、可靠的加工工艺和技术,较广泛地应用于世界各地的地铁和轻轨中。如德国的汉堡、柏林、慕尼黑、纽伦堡,加拿大,日本,新加坡,泰国等。

复合导电轨通常由双金属材料复合而成,即型材本体和耐磨覆层。铝合金具有导电性好、结构强度较高、质量轻、成本低等优点,常通过挤压成型作为本体材料。目前多采用 Al-Mg-Si、Al-Mg-Mn 合金。耐磨覆层厚度一般为 4~6mm,多采用具有高强度、良好耐磨性和耐腐蚀性及导热性的 Cr-Ni 系列不锈钢。两者通过一定的复合方式牢固地结合在一起。由于不锈钢耐磨覆层的电阻比铝合金的大得多,沿纵向传送的电流主要通过铝合金本体来进行。只有在与集电靴相接触的部位,电流才从铝合金本体流经不锈钢耐磨覆层及滑动接触面,最后输送至电力机车上。

综上所述,从接触形式、服役条件及性能要求分析,受电系统主要有以下特点。

(1)接触形式多样化。受电弓滑板与接触网导线为柔性接触,而受流靴与第三

轨之间为刚性接触。

(2)接触形式的不稳定性。为保证与自然下垂的导线的动态匹配,受电弓必须有合适的动态抬升量。受弓动态抬升的产生冲击及在电力线中产生的振动波对接触有重要的影响。

(3)接触过程中,滑板与接触线之间的接触压力、速度及通过电流均随列车的运动变化而变化。

2. 回流系统

回流是保证电力系统形成回路的基本条件。一般电力机车、高铁的动车回流均通过车轮与钢轨的接触,将电流引入钢轨,通过变电所的回流线返回变压器,形成回路(图 1-5)。

为防止主回路电流对机车轴承的电损伤及对润滑状态的影响,隔断电流通过轴承的传输,一般在车轮与轴承之间加入一个专用绝缘装置,并专门设计一个回流装置,使电流经回流装置流向车轮,经车轮踏面流入钢轨(图 1-5)。回流装置一般由安装于车轮的集电环和安装于齿轮箱的回流电刷组成^[8]。改进的高铁回流装置在车辆上直接接入专用回流轨面(第四轨)^[9]。对于地铁,为防止杂散电流,通常也采用专门的回流轨(第四轨)回流。

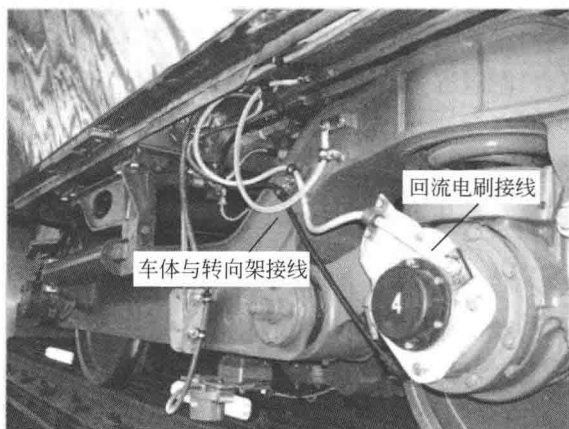


图 1-5 动车牵引回流装置

总体分析,回流系统的载流摩擦特点为:接触方式既有滑动接触,也有滚动接触,但回流系统均为刚性接触。对于铁路载流系统,世界各国从结构、材料等方面进行了大量的研究工作,但缺少从摩擦学角度的系统研究,导致目前的载流系统仍存在许多问题。其中最突出的问题表现在三个方面,摩擦副的使用寿命短、受流质量差、回流杂散电流干扰严重,这三方面的问题核心是如何解决载流摩擦副的接触

可靠性问题。因此,有必要从摩擦学与电接触学的耦合作用出发,深入研究铁路载流系统摩擦与导电接触之间的相互作用规律,探索电因素与摩擦学条件复合作用下的接触表面动态破坏规律,为进一步研究降低材料损伤与提高载流质量提供理论依据。

1.1.2 开关系统

开关是电力系统中具有切断/连通电路的基本元件,其结构一般包括动触头和静触头,通过动触头运动,实现动/静触头的接触/断开,从而达到电路导通/关闭功能。从载流摩擦学角度来看,动/静触头的接触/断开运动属于载流摩擦的范畴。

开关的主要性能指标包括以下几个。

额定电压:开关在正常工作时所允许的安全电压。开关两端的电压大于此值时会导致两个触点之间击穿而产生电弧。

额定电流:开关接通时所允许通过的最大安全电流。当超过此值时,开关的触点会因接触电阻热而烧毁。

接触电阻:开关在导通状态下每对触点之间的电阻值,一般要求在 0.5Ω 以下。

关合时间:从接到(合)闸指令瞬间起到任意一极中首先通过电流瞬间的时间间隔。

平均速度:分(合)闸过程中,动触头总行程的运动距离与时间之比的平均值。

最大速度:分(合)闸过程中,从动触头开始运动,直至动触头运动停止,整个行程中的最大速度即为分(合)闸最大速度。

从载流摩擦学的角度分析,开关最主要的电因素为额定电压、电流与接触电阻,这三个参数将决定开关在闭合/断开过程中的电弧与电阻热。最主要的摩擦学参数为开关的合闸时间与分闸时间,它们决定了动/静触头之间的运动速度。上述参量是载流摩擦学研究和性能评估必须关注的基本参量。

除上述参量外,与载流摩擦密切相关的技术参量还包括以下几种:绝缘电阻,指开关的导体部分与绝缘部分的电阻,绝缘电阻一般在 $100M\Omega$ 以上;耐压,指开关对导体及地之间所能承受的最低电压;寿命,是指开关在正常工作条件下能操作的次数,一般要求在 $5000\sim 35000$ 次。

问题最为突出,载流摩擦服役条件最为苛刻的开关为高压开关。高压开关是指用于电力系统发电、输电、配电、电能转换和消耗中起通断、控制或保护等作用的电器部件,其电压等级一般在 $3.6\sim 550kV$ 。主要包括高压断路器、高压隔离开关与接地开关、高压负荷开关、高压自动重合与分段器,高压操作机构、高压防爆配电装置和高压开关柜等几大类。其基本的摩擦学行为为载流条件下动/静触头的开/合运动,如图 1-6 所示。

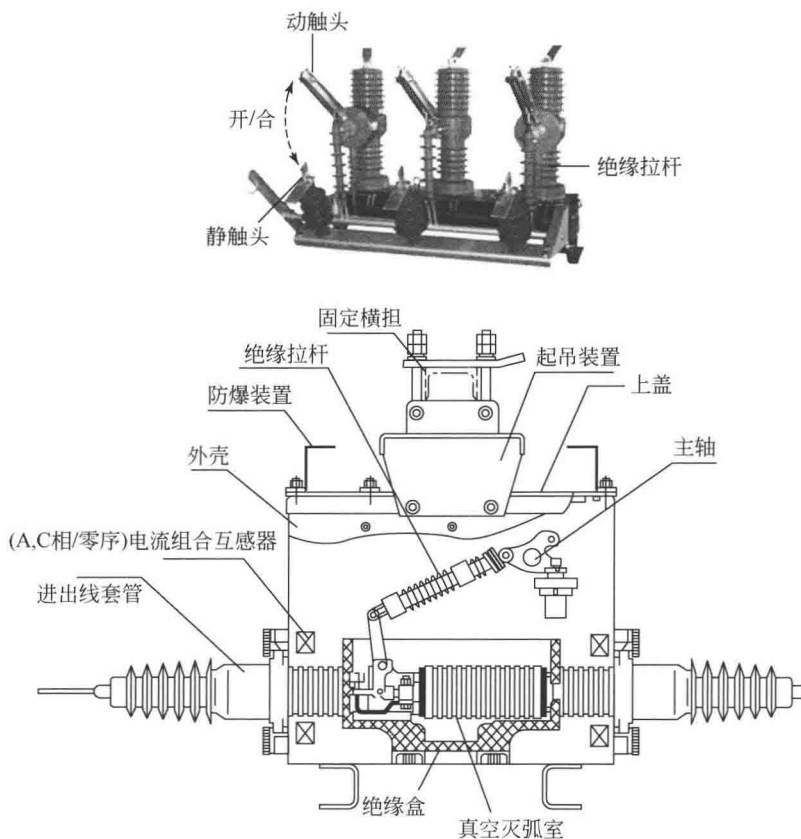


图 1-6 高压开关中的载流摩擦副和原理图

1. 高压开关

我国能源存储分布与能源需求分布之间存在严重的不匹配,采用低成本、高效率的高压、超高压方式,将西部丰富的水电、煤电、风电等送至工业发达的东部地区是最为科学的能源输送方式。高压、超高压送电被称为电力输送高速公路,它具有输送能力强、节约土地资源与建设成本低的明显优势。例如,一条 1150kV 输电线路,其输电能力可代替五六条 500kV 线路,或三条 750kV 线路;可减少铁塔用材 1/3,节约导线 1/2,节省包括变电所在内的电网造价 10%~15%。1150kV 高压线路走廊约仅为同等输送能力的 500kV 线路所需走廊的 1/4,这将给人口稠密、土地宝贵或线路走廊困难的国家和地区带来重大的经济和社会效益。

另外,高压送电输送损耗低、输送距离长。例如,500kV 超高压输电线路的经济输送距离一般为 600~800km,而 1000kV 特高压输电线路可达 1000~1500km