

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电力牵引控制系统

王书林 赵 茜 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电力牵引控制系统

主 编 王书林 赵 茜
编 写 吴 刚 郁汉琪
主 审 郑建勇



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十五”规划教材。

本书共分八章,主要介绍了电力牵引的理论基础,电力电子器件的应用,四象限脉冲整流器和 PWM 逆变器的交—直—交变频器的工作原理、电路结构与控制,电力牵引闭环控制系统的分析与设计,电力牵引交流传动控制系统(包括转差控制、磁场定向控制和直接转矩控制)。对高速磁悬浮列车的工作原理和控制方式以及电磁兼容性也做了一些介绍。

本书可作为高等院校车辆电子电气、自动化、机电一体化等电类专业的本、专科教材,也可作为从事电力牵引控制系统设计、制造和运行的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力牵引控制系统/王书林,赵茜主编.——北京:中国电力出版社,2005

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-3733-6

I. 电... II. ①王 ②赵... III. 电力牵引—控制系统—高等学校—教材 IV. TM922

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 139854 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 12 月第一版 2005 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14 印张 325 千字

印数 0001—3000 册 定价 21.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业技术发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会

的有关专家评审，推荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416237）

中国电力教育协会

前 言

电力牵引控制在交通运输和城市交通客运中起着重要的作用,自19世纪90年代以来,电力牵引控制技术发生着日新月异的变化,各种先进技术已经被广泛应用到了电力牵引机车中。目前,随着电力电子技术、微电子技术和控制技术的发展,已将电力电子器件、控制、驱动、保护监测及计算机通信网络技术等集为一体,为电力牵引控制开辟了广阔的前景。数字脉宽调制(PWM)技术、微型计算机控制及各种现代控制技术,如自适应控制、最优控制、鲁棒控制、滑模变结构控制、模糊控制、神经网络控制及各种智能控制,已经深入到传统的电力牵引控制系统中,具有较高牵引—制动性能的电力牵引控制系统不断涌现。

在21世纪的今天,众多交流传动电力机车、内燃机车、高速列车、城市轨道车辆在不同的环境和条件下成功的运行着,这表明交流异步电动机牵引控制技术的成熟。本书主要介绍当代交流传动电力机车和电动车组的最新技术和发展、交—直—交变流器、电力牵引的开环与闭环控制等,这些技术不仅适用于其他铁路装备和城市运输车辆,也适用于一般的工业控制领域。

全书共分八章,第一章介绍了电力牵引控制系统的发展概况以及牵引控制的方式、结构和类型;第二章电力牵引理论基础,论述了轨道车辆的粘着、蠕滑的概念,以及与牵引和制动的关系;第三章电力电子器件及其应用,详细地介绍了GTO晶闸管和IGBT晶体管的应用技术;第四章电力牵引变流器,着重介绍了交—直—交变流器、PWM逆变器、三点式逆变电路和四象限脉冲整流器的工作原理、电路结构;第五章电力牵引闭环自动控制系统,重点介绍了直流牵引电机开环和闭环控制原理以及控制系统的设计方法;第六章电力牵引交流传动控制系统,论述了交流异步电机的标量控制和矢量控制,重点对电力机车上广泛采用的转差控制、磁场定向控制和直接转矩控制进行了介绍;第七章高速磁浮列车控制系统,简述了高速磁浮列车的工作原理和控制方式;第八章电力牵引传动与电磁兼容,主要介绍了牵引传动与电磁兼容的关系和影响。本书的部分内容还与MATLAB仿真软件相结合,对牵引电机的控制给出了MATLAB仿真模型和仿真结果分析。

本书第一、二、七、八章由王书林编写,第三、四章由赵茜编写,第五章由吴刚编写,第六章由郁汉琪编写。全书由王书林、赵茜统稿,东南大学郑建勇教授主审并提出了许多宝贵的意见。另外,感谢陈桂老师为本书提供了MATLAB仿真结果。

本书的出版得到了中国电力出版社和南京工程学院自动化系各位老师的鼓励和支持,在此表示衷心的感谢!此外,书中的部分内容还选用了其他作者的一些成果和文献,在此,亦向这些作者表示谢意!

由于编者的水平有限,错误和不当之处在所难免,殷切希望读者批评指正。

编 者

2005年8月于南京

目 录

序 前言

第一章 绪 论	1
第一节 电力牵引控制系统的发展概况	1
第二节 电力牵引供电方式	1
第三节 电力牵引传动控制方式	2
第四节 牵引电机的应用	4
第五节 电力牵引交流传动系统的结构及类型	4
第六节 电力牵引交流传动控制系统的硬件配置	6
复习思考题	7
第二章 电力牵引理论	8
第一节 粘着、牵引与制动	8
第二节 空转与滑行、粘着的控制	13
复习思考题	15
第三章 电力电子器件及其应用	16
第一节 可关断晶闸管(GTO)	16
第二节 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	25
第三节 功率集成电路及其他新型电力电子器件	31
复习思考题	33
第四章 电力牵引变流器	34
第一节 交—直—交变频器	34
第二节 逆变电路	42
第三节 正弦波脉宽调制逆变电路(SPWM)	47
第四节 感性负载下三相桥式逆变器的电流波形和能量反馈	56
第五节 三点式(三电平)逆变电路	57
第六节 IGBT 与 GTO 在逆变电路中的应用	61

第七节 缓冲电路	65
第八节 单流制电力机车和电动车组的主电路	68
第九节 多流制电力机车和电动车组的主电路	71
第十节 电力牵引整流器	73
第十一节 变频调速系统的仿真研究	90
复习思考题	95
第五章 电力牵引闭环自动控制系统	96
第一节 概述	96
第二节 直流电动机控制基础	96
第三节 直流电动机的 PWM 调速原理	103
第四节 H 型 PWM 变换器控制方法	108
第五节 单闭环直流电动机速度控制系统的组成和结构	111
第六节 单闭环直流电动机速度控制系统的性能分析	113
第七节 转速、电流双闭环直流电动机控制系统的组成和结构	127
第八节 转速、电流双闭环直流电动机控制系统的性能分析	128
第九节 用 MATLAB 对直流电动机速度控制系统进行仿真分析	133
复习思考题	136
第六章 电力牵引交流传动控制系统	138
第一节 电力牵引控制系统的分级管理与功能配置	138
第二节 电力牵引交流电动机的控制策略	144
第三节 交流电机的数学模型	145
第四节 感应电机的标量控制	162
第五节 感应电机的矢量控制	169
第六节 感应电机的直接转矩控制	174
第七节 感应电动机矢量控制系统的仿真研究	185
复习思考题	190
第七章 高速磁悬浮列车控制系统	191
第一节 概述	191
第二节 直线牵引电机	191
第三节 直线磁悬浮电动机	197
第四节 直线电机驱动的磁悬浮列车	200
复习思考题	206

第八章 电力牵引传动与电磁兼容	207
第一节 电磁兼容的基本概念	207
第二节 电磁干扰量及其传播途径	208
第三节 电气化铁路的电磁干扰问题	210
第四节 电力电子牵引系统的干扰	212
第五节 改善电磁兼容的措施	214
复习思考题	215
参考文献	216

第一章 绪 论

第一节 电力牵引控制系统的发展概况

在交通运输中,采用电动机驱动来满足车辆牵引的电气传动部分,称为电力牵引控制系统。它以牵引电机为控制对象,通过开环或闭环控制系统对电动机的牵引力和速度进行调节,以满足车辆牵引和制动特性的要求。比如,干线集中动力的电力机车、内燃电力传动机车、分散动力的干线客运电动车组、城市地铁和轻轨列车等。磁悬浮列车和电动汽车同样是采用电力牵引传动控制系统。

根据所采用传动电机是直流牵引电机还是交流牵引电机的不同,分为直流传动控制系统和交流传动控制系统两大类。交流电机与直流电机相比,结构简单、易于制造、价格便宜、无触点导流、维护量少,从而得到了广泛应用。但交流电机要满足车辆牵引特性要求的调速手段非常复杂。由于受技术条件的限制,交流电机长期没能在牵引领域得到实际应用。而直流电机很容易满足牵引特性要求,所以在交通领域的电力牵引传动系统中,长期以来一直采用直流传动控制系统。到了20世纪90年代初期,在电力电子器件和交流电机调速理论等相关技术充分发展的前提下,以交流电机作为牵引电机的交流传动系统开始取代直流传动系统,1995年前后,欧洲和日本等工业化国家已经停止生产直流传动控制系统。1997年,我国第一台国产交流传动电力机车研制成功。铁道部于1998年底宣布,电力牵引传动控制系统要用10年左右时间完成从直流传动到交流传动的转换。

第二节 电力牵引供电方式

当今世界各国电气化铁路采用的电流制,也就是牵引供电制主要有四种:直流3000V,直流1500V,交流单相15kV/16(2/3)Hz和交流单相25kV/50Hz。这些电流制的出现和延续与某一时期的经济、技术发展状况以及社会背景有关,这是历史遗留下来的。对今天仍然在使用的这些供电制进行全面改造,势必付出很大的人力、物力和费用,这似乎也没有必要。解决问题的一个方面是设计合适的电力机车,以适应供电的多流制。

为了简化接触网的结构和成本,牵引供电方式发展成了单相交流供电方式和直流供电方式两种。在干线铁路交通中,采用单相工频25kV交流电具有更好技术经济效益。20世纪50年代我国电气化铁路开始建设就采用了25kV/50Hz单相牵引供电方式。直流供电方式主要用于城市地铁和轻轨交通中,有采用第三轨供电的,也有采用高架接触网供电的。直流电压制式较多,我国地铁和轻轨主要采用直流750V(北京、天津和长春等北方地区,采用第三轨供电)和直流1500V(上海、广州和深圳等南方地区,采用高架接触网供电)两种制式。无轨电车采用直流600V供电制式。欧洲国家的部分干线铁路供电也采用了直流供电制式。目前世界上城市轨道交通中的直流牵引供电电压等级繁多,其发展趋向是 IEC

标准中的直流 600V、直流 750V 和直流 1500V；我国国家标准《地铁直流供电系统》规定为直流 750V 和直流 1500V 两种，其电压允许波动范围为 500~900V 和 1000~1800V。这两种直流供电电压制式（750V 和 1500V）都能满足城市轨道交通的要求。但是，从减少城市轨道交通牵引供电系统的电能损失和电压降，加大供电距离以降低牵引变电站数目及投资，降低受流接触网的悬挂质量、降低结构复杂性及投资，以及从提高列车再生制动的回收率而言，采用直流 1500V 的牵引供电电压制式比采用直流 750V 的牵引供电电压制式要经济得多。高耐压电力电子器件的不断发展，为城市轨道交通牵引系统采用直流 1500V 供电提供了可靠的技术保障。

1950 年以来，干线铁路牵引的供电，各国开始广泛采用单相工频 25kV 交流制和 15kV/16 (2/3) Hz 供电方式。后者主要是欧洲一些国家还在采用。城市地铁和轻轨牵引供电依然是直流供电，但各国都有提高供电电压的趋势。我国开始倾向采用 1500V 的直流制。

由于历史的延续，欧洲一些国家铁路供电采用多种电流制。为了满足国际联运和越区运营的需要，许多机车采用双流制或多流制供电方式，即同一机车在不同区域可分别采用不同频率和电压的交流供电和直流供电。

现代直流供电方式主要是在变电站中把三相交流电通过 Y, y0 和 Y, d11 联结变压器变为 6 相，经二极管整流，得到 12 波头的近似直流电压。然后通过车上的各种变换器供给牵引电机、辅助传动和照明等系统。

现代交流供电方式主要是通过安装在机车上的单相牵引变压器把电压变为机车所需的各种电压等级，然后通过车上的各种变换器供给牵引电机、辅助传动和照明等系统。由于牵引变压器很重，为此，人们提出了用变流器直接取代变压器的想法。通过多电平串接四象限变流器，和多重化中频 DC/DC 变换器来取代工频变压器和整流器，可使包括变压器、整流器和滤波器在内的直流侧之前的设备质量减轻 50%，效率也大大提高，这种新概念装置已经得到了应用。

第三节 电力牵引传动控制方式

电力牵引传动控制方式是指为实现电传动机车的启动、调速和制动特性要求的控制方式。机车在启动时希望有较大的牵引力，以得到较大的加速度或牵引更重的列车。但机车的牵引力（也包括制动力）受多种因素影响，如牵引电机本身的电气特性、电机的励磁方式、电机速度控制方式、电机之间的联结方式、机械悬挂方式和机械走行部分结构等。机车所能发挥的牵引力主要受牵引电机端电压、最大电流限制和轮轨间粘着条件限制。如果牵引电机是机械整流子的直流电机，机车牵引力还受电机换向的限制。因此，为了发挥电牵引机车中设备的极限能力，机车在低速区应受最大力矩（电流）的限制；当机车加速到一定速度时，应受到最大功率的限制，即进入恒功区。对于干线高速机车来说，为了给机车的高速运行留有裕量，还要求能运行在自然特性的降功率阶段。

电力牵引传动的控制方式随着牵引供电方式的变化而发展。

早期的交流传动采用绕线式电机，通过转子串接的变阻器实现转差调节。1950 年以来，

随着硅整流器电力机车的问世,标志着直流牵引时代的到来。1960年初期,大功率硅整流器迅速取代了引燃管(ignition),具有调压开关的硅整流器交一直流系统电力机车得到了广泛应用。电力机车在牵引工况下,牵引电机大多采用串励方式,也有采用他励和复励的情况;制动工况下,牵引电机大多采用他励方式。通过调压开关改变硅整流桥交流侧电压来改变牵引电机的端电压,实现机车的控制。

晶闸管(俗称可控硅)的发明并获得应用以后,出现了“经济多段”可控硅相控机车。电机端电压可以获得无级调节,从而实现了电力机车的无级调速。为了更好地提高网侧的功率因数和减少谐波污染,1990年前后提出了以二极管整流桥加GTO斩波器来调节电机电流和校正功率因数的“交一直一交电力机车”控制方式。

采用直流供电方式的地铁列车和无轨电车,在直传动控制系统的应用中,开始采用牵引电机串并联切换加凸轮调阻的方式进行调速和控制。20世纪70年代,国外采用晶闸管代替凸轮进行斩波调阻在地铁车上开始普遍应用,实现了串联电阻无级调节。无论凸轮调阻还是晶闸管调阻方案,牵引电机的连接方式基本上都采用4台电机串联起动,起动完毕后切换到两串两并的工作状态。

1971年,首辆采用电力电子技术的DE-2500交流电传动内燃机车在联邦德国试验成功,开始了现代交流传动时代。现代交流传动的控制方式,常见的有3种:一种方法是标量控制—转差频率电流控制;另两种方法是矢量控制—转子磁场定向控制和直接转矩控制。

转差频率电流控制的理论基础,是基于稳态下的电磁关系,实现了电动机调速控制过程中对电压、频率的平稳调节。控制原理简单,易于实现。但该方法实施控制时难以保证系统获得良好的动态特性。

转子磁场定向矢量控制采用电机的动态模型,从理论上讲可获得较理想的动态特性。根据转子磁场检测方式的不同,又分为间接转子磁场控制和直接转子磁场控制两种。通过磁场定向方式,借助矢量变换,将交流电动机三动态方程变化为旋转坐标系下的两相正交模型,从而控制变量分解成磁链分量和转矩分量。由于其中采用了许多线性调节器,而且对磁场定向的精度要求较高,对系统参数变化敏感,对系统参数辨识的精度要求高,所以实现起来有一定难度。

直接转矩控制以简明的物理过程为基础,不需要像矢量控制那样进行复杂的坐标转换计算,而是直接在定子坐标系中计算定子磁链与电机转矩,能极其方便地实现磁链与转矩的闭环控制,获得高动态响应调速特性。但直接转矩控制方法在低速时受定子绕组电阻及转速测量的影响很大,而且在低速走六边形轨迹时,转矩脉动也显得突出,且转矩频谱不断变化、不可预测。这使得变流装置的器件结温不易估算,从而影响到装置的优化设计。

对于提高轮轨之间的蠕滑率利用特性,改善粘着控制,一般希望1台电机接1台逆变器独立控制。国外有些干线交流传动列车已采用这种方式。在地铁和轻轨交通的传动系统中,往往采用4台电机接1台逆变器的方案,或2台电机接1台逆变器的方案。

第四节 牵引电机的应用

用于传动领域的电机形式主要有直流电机、感应电机、同步电机、开关磁阻电机和直线磁悬浮电机。至于采用那种形式的电机作为牵引电机,要综合考虑电机以及控制电机的变流器的总体技术有效性和成本。

直流传动的牵引电机采用的是直流电动机或脉流电动机,根据机车牵引和制动时不同特性的要求,牵引工况时一般采用串励工作模式,制动工况时切换到他励工作模式。单相交流供电方式的电力机车流过电机的电流,是一个含有直流分量和交流分量的脉动电流,交流电流分量的存在,会恶化直流电机的换向和降低电机的工作效率,故常采用专门设计的脉流牵引电机。脉流电动机在结构和电磁关系上与直流电动机基本一样,它主要是在结构设计上采取了一些有利于换向的措施。如采用叠片换向极极心、机座内壁敷设磁桥和采用叠片式机座等。

为了适应在牵引工况到制动工况转换时电机从串励到他励的切换,也有采用他励电动机作为牵引电动机的。其主要优点是:采用晶闸管等电力电子开关代替有触点的换向器和牵引制动转换开关,能实现无级磁场削弱和负荷分配,其控制电路比较复杂。

交流传动采用交流牵引电动机。交流电机没有直流牵引电机的环火故障,维修、运行费用低。交流牵引电机具有很硬的机械特性,当转速升高 $2\%\sim 4\%$ 时,其转矩下降为零,因此它比串励直流牵引电机具有更好的防空转性能,比他励直流牵引电机具有充分利用粘着质量,能满足重载起动的牵引性能。交流牵引电动机通常有同步电机和感应电机两种,同步电机应用较少。本书将着重叙述采用电压型变流器—感应电动机系统的电力机车或电动车组,即三相感应电机交流传动技术。

第五节 电力牵引交流传动系统的结构及类型

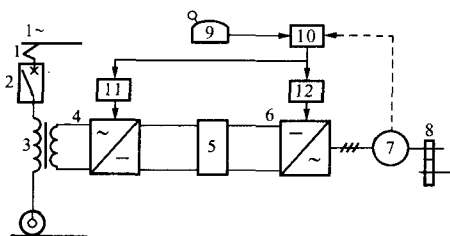


图 1-1 交流传动电力机车的系统结构

- 1—受电弓；2—主断路器；3—牵引变压器；
4—整流器（网侧）；5—中间回路；6—逆变器（电动机侧）；7—交流牵引电动机；8—传动齿轮；
9—司机控制器；10—电子控制装置；
11、12—触发脉冲发生器

图 1-1 所示为一台采用交流传动技术的电力机车的系统结构。

在现代交流传动电力机车上,把来自接触网的单相交流电在牵引变压器中变换成所需大小合适的电压,经整流器整流后供给中间回路。以后将会看到,从单相交流接触网来的功率是以脉动形式提供给中间回路的。但从传动特性来说,人们希望得到尽可能恒定的功率,从而得到尽可能恒定的转矩。所以,中间回路首先是一个能量存储和变换的装置,但它又是一个滤波器,在平衡功率波动方面起着决定性的作用。在电工技术领域,存在两种具有储能特

性的无源元件：电容器和电抗器。基于所选择的不同储能元件，交流传动相应地分为两种基本系统：电压型系统和电流型系统。相应地，把有关的交—直—交变流器称为电压型变流器和电流型变流器。

在电压型变流器中，电容器用作中间回路的储能器，它接受向中间回路供给的瞬时电流与从中间回路取用的瞬时电流之差，并使电压保持恒定。作为逆变器的电源，在其输入端提供一个实际上恒定不变的电压。由于这个电源具有低的内阻抗，所以逆变器的端电压不随负载变化而改变。这种逆变器称为电压源逆变器，对于单电动机传动或多电动机传动都同样适用。但是低的内阻抗使得时间常数也很小，在逆变器端子上出现的任何短路，都会使短路电流迅速上升，很难通过一般方法加以消除，必须采用快速熔断器或特殊的保护措施。

对于电流型变流器，采用电抗器作为中间回路储能器。它吸收波动形式的差电压，保持中间回路的电流强度恒定。由于这个作为逆变器电源的中间回路具有很大的内阻抗，逆变器输入端的电流在负载变化时保持恒定。这种逆变器称为电流源逆变器。但是，电流源逆变器的端电压明显地随负载变化而改变。如果用来向多台并联的电动机供电，那么其中任何一台电动机负载的变化都会影响到其他电动机的工作。所以，电流源逆变器对于多电动机传动系统来说是不适用的。

对于电力牵引交流传动，除了不同类型变流器的选择以外，人们还面临不同类型的交流牵引电动机的选择：同步型还是感应型。迄今，在电力牵引领域出现的交流传动系统基本上有以下两类：①电流型变流器供电的同步电动机或笼型感应电动机系统，如图 1-2 (a) 所示。②电压型变流器供电的笼型感应电动机系统，如图 1-2 (b) 所示。

电流型系统其实是从相控整流桥供电的脉流牵引电动机系统直接演变过来的，只不过在采用直流电动机的情况下，频率变换是由电动机上的机械式变频器——换向器来实现的，而在交流传动中，这项任务由逆变器完成。对于采用感应电动机的电流型系统，逆变器依靠电动机漏抗和谐振电容进行换相；而对于采用同步电动机的情况，则借助负载本身的换相电压（电动机反电动势）进行换相。在这两种情况下，电动机各个绕组都将流过方波电流，除了增大铜耗外，还使转矩中含有较明显的谐波成分，因此，需要采取特殊措施。

在使用同步牵引电动机的情况下，逆变器比较简单，也不需对晶闸管提出特殊的关断方面的要求。但是，当速度在接近于零的范围内，由于电动机反电动势的值太小，不足以使晶闸管换相。所以，当电力牵引采用这种系统时，在 3%~10% 额定速度值以下，仍然需要依靠附加的强迫换相装置进行工作。另外一方面，为了向同步电动机的励磁绕组供电，

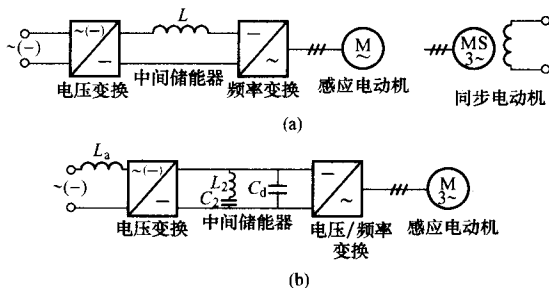


图 1-2 电力牵引交流传动系统类型

(a) 电流型；(b) 电压型

必须采用集电环和电刷,或者采用旋转整流器,结构比较复杂。

一个与上述系统不同的方案是,采用电压型变流器供电的异步牵引电动机系统。逆变器向牵引电动机输出频率和幅值可变的三相电压,通过适当地选择脉宽调制技术,能够进一步改善输出电压波形。在电动机漏抗的影响下,使电动机绕组中的电流尽可能接近于正弦波,并从而减小转矩的脉动程度。此外,网侧变流器通过中间回路储能设备(二次谐波吸收电路、支撑电容器)解耦,使得对接触网的反作用(如干扰电流和功率因数等问题)可以通过网侧变流器的设计技巧加以解决。在迄今开发的交流传动电力机车上,网侧变流器几乎全是采用四象限脉冲整流器。

电压型变流器供电的感应电动机系统的费用,总的来说比电流型系统更高,但是转矩脉动以及对电网的反作用较小,适用于较大功率的机车。迄今正在制造或已投入运营的干线交流传动电力机车,绝大部分都采用这种系统。

第六节 电力牵引交流传动控制系统的硬件配置

采用交流传动技术的电力机车或电动车组,为了实现能量的传输与变换,不可缺少的设备有以下三个部分:

(1) 车顶高压设备,包括受电弓、空气断路器或真空断路器、防止大气过电压的装置(如避雷器、放电间隙)和高压侧电压、电流检测装置。这部分设备的基本功能是保证通过弓、网动态接触,使机车从牵引变电所获得可靠的供电;

(2) 车内变流设备(主要包括牵引变压器和交—直—交或直—交变流器)以及相关的附加设备,如通风机、压缩机、泵等。它们的任务是实现电能形式的变换,以满足变频变压的要求;

(3) 转向架中的机电能量变换装置,也就是牵引电动机。当然,在转向架中还装有力的传递机构,如齿轮减速器、万向节空心轴传递装置等。

一般说来,迄今开发和生产的交流传动电力机车,除个别情况外,大都采用所谓的 B_0B_0 轴式。也就是说,每台机车有两个转向架,每个转向架包含两对装有牵引电动机的轮对。作为交流传动核心的主变流器及其控制装置,不论一个转向架的牵引电动机是由一台公共变流器供电,还是由各自独立的变流器供电,两个转向架的主变流器连同相应的热交换器,都是呈对称分布在以中间走廊隔开的左右两半。电子控制装置可能集中在一个屏柜中,也叫能分成多个具有独立功能的部分,分布在受控主体的附近,相互间通过总线进行通信。

为保证主传动系统正常、可靠地工作,特别是对于车载设备的电气和机械载荷强度非常接近极限值的情况下,配备适当的辅助传动系统是十分重要的,如牵引电动机的通风机、主变流器和牵引变压器的冷媒循环泵、冷媒与空气之间热交换器的通风机,以及列车安全运行所需的空气压缩机。在交流传动机车中,这些辅助机械几乎都是由辅助变流器供电的三相交流感应电动机拖动的。

在由交流接触网供电的具有交—直—交变流器的机车上,主要制动力来自再生制动,

机械式的闸瓦制动为辅助方式。而在完全由直流接触网供电的具有直—交主变流器的机车上，电气制动主要是采用电阻制动方式，所以在机车上还必须安装制动电阻及其冷却用通风机。

复 习 思 考 题

1. 什么是电力牵引控制系统？
2. 为什么说采用交流传动控制是电力牵引今后的发展方向？
3. 电力牵引交流传动控制系统的硬件配置有哪些？

第二章 电力牵引理论

第一节 粘着、牵引与制动

一、动轮与钢轨间的粘着

目前,绝大多数轨道交通车辆属于钢轮钢轨式,运行中的任何一种工况,都依赖于车轮和钢轨的相互作用力。

在钢轮钢轨式轨道车辆中,牵引动力由牵引电动机通过传动机构传递给动车的动力轮对(动轮),由车轮和钢轨的相互作用,产生使车辆运动的反作用力。根据物理学中关于摩擦力的概念,轮轨之间的切向作用力就是静摩擦力。最大静摩擦力是钢轨对车轮的反作用力的法向分力与静摩擦系数的乘积。但实际上,动轮与钢轨间切向作用力的最大值比物理学上的最大静摩擦力要小一些,情况也更复杂一些。在分析轨道车辆的轮轨相互作用时,通常引入两个十分重要的概念,即“粘着”和“蠕滑”。

1. 粘着

图 2-1 为动车以速度 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)。为了更清楚地表示,图 2-1 中将接触的动轮与钢轨稍稍分开画出。

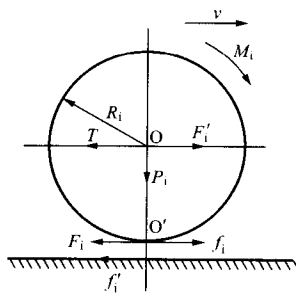


图 2-1 动轮对受力分析

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。 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

$$f_i = F_i \quad (2-1)$$

所以, O' 点保持相对静止,轮轨之间没有相对滑动,在力 F'_i 的作用下,动轮对作纯滚动运动。

由于正压力而保持动轮与钢轨接触处相对静止的现象称为“粘着”。粘着状态下的静摩擦力 f_i 又称为粘着力。

轮轨间的粘着与静力学中的静摩擦的物理性质十分相似。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