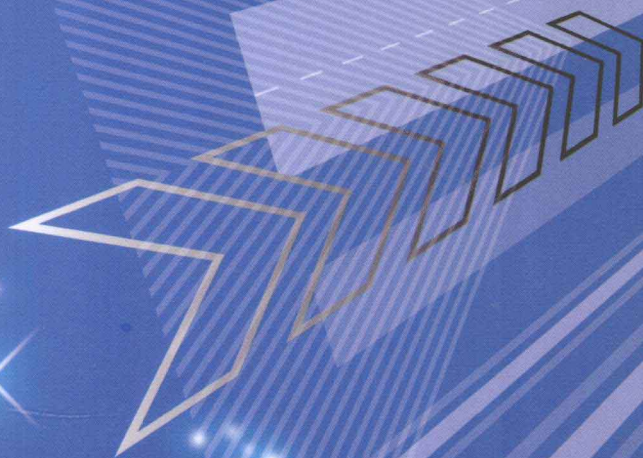


高等学校教材

电力牵引传动及控制

张喜全 主编

DIANLI QIANYIN CHUANDONG JI KONGZHI



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书突出轨道列车牵引动力专业特色,以现代轨道列车电力传动与控制为主线,全面分析了电力传动与控制系统的工作原理。全书由7章内容组成,分别介绍了轨道列车电力传动系统的基本组成与发展趋势;交—直流传动系统的基本运行过程控制基础;相控电力机车、EMU电路与控制特性;现代交流传动系统的基本组成模式及异步牵引电动机的调速问题;牵引变流器电路及设计;牵引变流器的控制策略;HXD、CRH系列电力机车、EMU的交流传动控制系统。

本书可作为高等院校车辆工程牵引动力类各专业方向(电力机车、动车组、内燃机车、城市轨道交通等)的专业教材,也可供相关专业研究生及从事电力拖动的有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力牵引传动及控制/张喜全主编. —北京:中国铁道出版社, 2012. 8
高等学校教材
ISBN 978-7-113-15029-7

I. ①电… II. ①张… III. ①电力牵引—电力传动系统—高等学校—教材 ②电力牵引—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TM922

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第169548号

书 名: 电力牵引传动及控制

作 者: 张喜全 主编

策 划: 阚济存

责任编辑: 阚济存 编辑部电话 010-51873133 电子信箱: td51873133@163.com

封面设计: 郑春鹏

责任校对: 孙 玫

责任印制: 李 佳

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.51eds.com>

印 刷: 航远印刷有限公司

版 次: 2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 14.75 字数: 368千

印 数: 1~3000册

书 号: ISBN 978-7-113-15029-7

定 价: 32.00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,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010)51873170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前 言

轨道列车电力传动控制系统作为电气传动控制系统的一个分支,已经历了直流传动、交流传动两个主要阶段。直流传动系统由于受直流牵引电动结构、容量等因素的限制,已不能满足现代列车牵引传动的需要,正在被先进的交流传动系统所取代,交流传动系统已成为牵引动力的主流。交流传动技术作为现代轨道列车的核心技术与标志,在轨道列车传动控制领域占据着十分重要的地位。在“和谐”系列机车、电动车组关键技术的吸收、消化与再创新中,涉及很多关键技术问题,有许多技术壁垒需要突破。交流传动及控制技术在各关键技术中占据了很大的比重,构建轨道列车自主研发平台,占领技术产业链的高端以至掌控整个产业链,攻克交流传动及控制技术壁垒是关键之一。

本书将突出轨道列车牵引动力专业特色,重点讨论轨道列车的交流传动控制系统,以“和谐”系列机车、电动车组为主线,兼顾城市轨道交通列车。以典型车型为例,对交流传动控制系统进行全面剖析,尽可能反映轨道列车电力传动控制技术的最新发展。

本书以电气传动控制基本原理为基础,根据电能供给形式方面存在的差异,融合电动车组与电力机车的共同点,以大机车的视角,探讨各类牵引动力装置的本质及内在联系,系统讨论了轨道列车电力传动控制系统的基本理论、高速动车组 and 现代机车交流传动控制的工作原理;同时结合铁路牵引动力技术的变革和现场运用实际,继承现有技术,对交—直流传动主型机车的技术特征加以归纳分析,方便读者全面了解轨道列车电力传动控制技术发展的脉搏。

本书由7章内容组成,各章节相对独立,兼顾车辆工程各专业方向共性,系统地分析了轨道列车的交—直流传动与交—直—交流传动系统。教学安排时可根据车辆工程各专业方向培养侧重点、差异性进行删选,以满足专业教学需要。

本书由兰州交通大学张喜全主编,其余参编也均来自兰州交通大学。参加编写的有张喜全(第1章、第2章、第7章)、王保民(第3章)、穆渭荣(第4章)、刘雁翔(第5章)、熊力(第6章)。

由于编者水平有限,书中难免会有疏漏和不足之处,恳请广大读者指正。

编 者

2012年4月

目 录

1 轨道列车电力传动系统概述	1
1.1 轨道列车电力传动系统基本组成	1
1.2 电力传动技术的发展趋势	7
2 交—直传动系统	10
2.1 交—直传动系统的速度调节	11
2.2 交—直传动系统的起动	17
2.3 交—直传动系统的动力制动	17
2.4 交—直传动系统控制基础	24
思考题	32
3 相控电力机车、EMU 电路与控制特性	33
3.1 交—直传动电力机车、EMU 工作原理	33
3.2 交—直传动电力机车、EMU 的调压方式	34
3.3 交—直传动电力机车、EMU 功率因数的改善	47
3.4 相控电力机车、EMU 控制与牵引特性	54
3.5 国产相控电力机车基本技术特征分析	60
3.6 相控电力机车电路分析	64
思考题	81
4 交流传动系统	82
4.1 轨道列车交流传动系统组成模式	83
4.2 交流异步牵引电动机变频调速	88
4.3 交流传动系统的牵引特性与控制策略	108
思考题	114
5 牵引变流器电路	116
5.1 四象限脉冲整流电路	117
5.2 中间直流环节	131
5.3 电压型牵引逆变器	134
5.4 牵引变流器设计	143
思考题	145

6 牵引变流器控制策略	146
6.1 SPWM 控制技术	147
6.2 矢量控制(VC)	159
6.3 直接转矩控制(DTC)	172
6.4 VC 与 DTC 控制策略特点	184
思考题	187
7 电力机车、EMU 交流传动系统分析	188
7.1 交流传动控制系统发展现状	188
7.2 HXD 系列电力机车交流传动系统分析	193
7.3 CRH 系列 EMU 交流传动系统分析	209
思考题	228
参考文献	229

1 轨道列车电力传动系统概述

在交通运输领域采用电动机驱动的电气传动系统,是以牵引电动机作为控制对象,通过开环或闭环等手段对牵引电动机的转速、转矩实施控制,达到对驱动对象的控制与调节的目的,这种电气传动控制系统称为电力传动控制系统。根据牵引电动机工作电流的不同,电力传动系统可分为直流传动系统和交流传动系统。电力传动控制系统作为电气传动控制系统的一个独立分支,其覆盖范围包括干线铁道牵引动力装置、城市轨道交通列车和非轨道电动车辆等领域的电气传动控制。干线铁道牵引动力装置主要有电力机车、电传动内燃机车和动车组,动车组主要有电力动车组(EMU)和内燃动车组(DMU);城市轨道交通列车主要有地铁、轻轨、有轨电车及中低速磁悬浮列车等;非轨道电动车辆主要有无轨电车、双动力汽车及电动汽车等。干线铁道机车、动车组和城市轨道交通列车在传动控制方式上具有相似性,一般将它们统称为轨道列车。轨道列车电力传动系统是一个需要广调速的大功率传动系统,调速系统要保证列车在可运行速度范围内实现高效、平稳的速度调节,具有良好的静态、动态性能,满足列车牵引运行需要。

本书将以轨道列车为主线,系统分析电力机车、EMU、城轨列车的电力传动与控制系统。

1.1 轨道列车电力传动系统基本组成

轨道列车电力传动系统一般由能源供给单元、能源变换单元、动力输出单元和控制单元等几部分组成,如图 1.1 所示。能源供给单元为系统提供合适的一次或二次工作能源,一般为石油或电能。一次工作能源主要为柴油,二次工作能源主要为电能,通过接触网线供给;能源变换单元是将工作能源通过相应的装备变换成为负载所需要的电能,提供给动力输出单元。柴油机将柴油的化学能转换为机械能,拖动牵引发电机组工作产生电能。接触网线上的二次工作能源电能通过车载受电装置引入车内,经交流处理变换为合适的电能,提供给动力输出单元。动力输出单元主要由牵引电动机、传动装置和动力轮对组成,牵引电动机接受电能并将其转换为机械能从转轴上输出,通过传动装置带动车轮旋转,在轮轨之间产生牵引力,牵引列车运行。控制单元是电力传动系统的中枢神经,承担着整个系统各单元内部及相互间的控制和通讯任务。

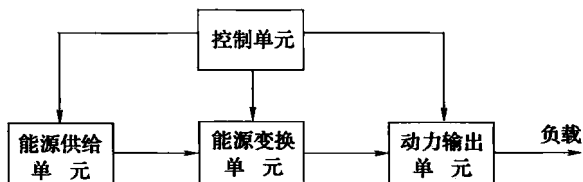


图 1.1 轨道列车电力传动系统的基本组成

1.1.1 轨道列车电力传动系统分类

轨道列车电力传动系统可以按电能供给方式、牵引电动机工作电流的性质进行分类。

1. 按电能供给方式分

按电能供给方式的不同,轨道列车电力传动系统可分为自备电源系统和外供电源系统。

自备电源系统主要为电力传动内燃机车,外供电系统主要有电力机车、电力动车组(EMU)、城市轨道交通列车和中低速磁悬浮列车等。

内燃机车为自备能源的机车,目前大功率内燃机车的传动装置主要有电力传动和液力传动两种传动方式。受制造能力和技术习惯的影响,不同国家对两种传动方式的认识也有所不同。液力传动具有质量轻、铜耗少、运营维护简单及成本低等诸多优点;电力传动具有效率高、工作可靠、自动化程度高和综合性能优异等优点。一般机械制造、液压技术能力强的国家,如德国、奥地利、日本等,倾向于生产和应用液力传动内燃机车,其他绝大多数国家主要生产和使用电力传动内燃机车。我国一直以发展电力传动内燃机车为主,曾经也生产、进口过一些液力传动内燃机车,现已全部退出干线牵引。曾经倾向于液力传动的国家,由于受市场销售影响以及电力传动技术的不断进步,也逐步放弃液力传动而转向电力传动内燃机车的研制与应用,因此,电力传动已成为内燃机车的主流传动模式。电力传动内燃机车是由柴油机拖动一台牵引发电机,将柴油机输出的机械能转换为电能供给变流装置,经变流装置变换后供给牵引电动机,牵引电动机获得电能后将其转换为机械能,通过传动装置驱动机车动轮旋转,在轮轨之间产生牵引力,驱动列车运行。

电力机车、电力动车组及城市轨道交通列车为外供电能的动力装置。现代电力机车、电力动车组均采用单相交流供电制式,城市轨道交通列车一般采用直流 750/1 500 V 供电方式。

2. 按牵引电动机工作电流性质分

按照牵引电动机的工作电流性质不同,轨道列车电力传动系统可分为直流传动系统和交流传动系统。结合外供电电压或牵引发电机输出电压的不同性质,电力传动系统可有多种组合形式。在单相交流供电制式下,电力机车、电力动车组的电力传动系统可分为交—直流传动系统和交流传动系统;城市轨道交通列车的电力传动系统可分为直—直流传动系统和直—交流传动系统。在内燃机车中,牵引发电机、牵引电动机都有直流、交流之分,其电力传动系统可分为直—直流传动、交—直流传动和交流传动系统。

1.1.2 直流电力传动系统

直流电力传动系统是以直流串励电动机作为牵引电动机的传动系统。轨道列车以直流串励电动机作为牵引电动机,主要由其优异的调速性能所决定。从电磁过程来看,直流牵引电动机是一个双端励磁的电动机,其磁场电流与电枢电流无耦合关系,可独立进行控制,其起动、调速性能和转矩控制特性符合牵引需要,动态性能良好。由于电源性质不同,直流电力传动系统可分为直—直流和交—直流电力传动系统两种模式。

1. 直—直流电力传动系统

直—直流电力传动系统是由直流电源向直流牵引电动机供电的传动系统,在我国电气化铁路中没有采用过这种供电方式。在内燃机车中,直—直流传动曾经是主要的传动形式,牵引发电机采用直流发电机,曾生产和进口了 DF₁、DF₂、DF₃ 和 ND₁、ND₂ 型内燃机车。直流牵引发电机因受换向条件、机车限界尺寸及轴重等因素限制,单机功率被限制在 2 200 kW 以下,致使机车功率受限制。直—直流传动内燃机车工作原理如图 1.2 所示。在城轨列车

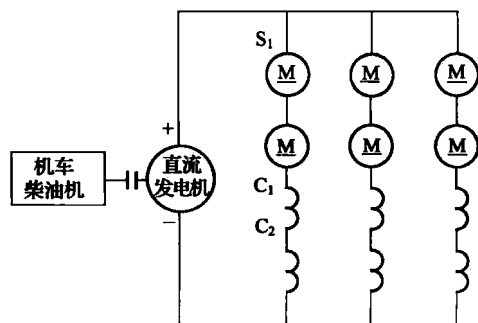


图 1.2 直—直流传动内燃机车工作原理

牵引中,直一直流传动作为主要传动形式持续了很长时间。

2. 交一直流电力传动系统

交一直流电力传动系统是由交流电源经整流后向直流牵引电动机供电的传动系统,是继直一直流传动之后的又一直流传动模式,作为轨道列车电力传动系统的主要传动模式,至今仍在许多国家和地区使用。我国干线列车牵引机车仍以交一直流电力传动系统为主,交一直流电力传动机车保有量很大。尽管直流电力传动系统具有理想的牵引性能,但不可否认,直流牵引电动机由于电枢结构复杂、惯量较大,存在接触式的机械换向器,换向过程复杂,运行中不可避免地产生换向火花,很容易发生环火故障,这在一定程度上降低了牵引电动机运行的可靠性;同时,直流牵引电动机又受电枢机械强度的限制,其输出功率和最高转速都基本达到了极限值,使直流传动系统遇到了不可逾越的障碍。至今直流牵引电动机的设计制造能力很难超过 1 000 kW,最高运行转速均在 3 000 r/min 以下,制约了直流传动机车功率的进一步增加。

交一直流电力传动系统中,电力机车与内燃机车的电源均为交流电,但在性能上存在着较大的差异。电力机车通过接触网获得单相高压交流电,需经牵引变压器降压;内燃机车采用三相同步发电机,输出电压较低、频率较高的三相交流电,额定频率一般为工频的 2 倍以上。

电力机车由接触网提供单相高压交流电能,通过车载受电弓将单相高压交流电引入车内牵引变压器原边绕组,经变压器降压后在副边绕组上输出 1 000 V 左右的单相交流电,供给可控整流器,进行相控调压,输出交流分量较大的脉动电压,经平波处理后送给直流(脉流)牵引电动机,完成机电能量转换,驱动列车运行。交一直流传动电力机车的工作原理如图 1.3 所示。交一直流传动电力机车

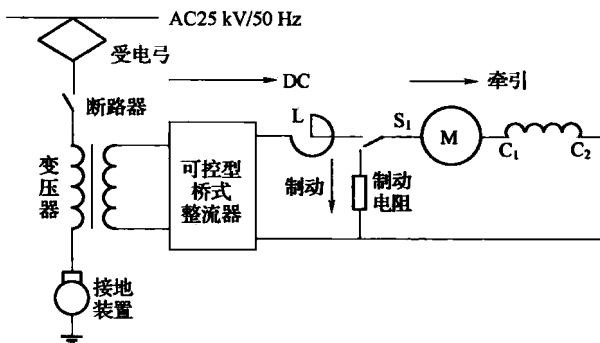


图 1.3 交一直流传动电力机车工作原理

车曾经持续发展了许多年,技术非常成熟,成为许多国家客货运输的主型电力机车。我国生产的 SS_{3B} ~ SS_{9C} 型机车都属于此类电力机车,仍在承担着繁重的客货运输列车的牵引任务。

交一直流传动内燃机车是由柴油机驱动三相同步发电机产生三相交流电,通过大功率硅整流器将三相交流电变换为直流电,供给各直流牵引电动机,其工作原理如图 1.4 所示。该型内燃机车既保留了直流牵引电动机,又采用交流牵引发发电机与硅整流器取代了直一直流电力传动系统中的直流牵引发发电机,使得传动系统结构简单、运行可靠、省铜、维护保养简单。在同等功率条件下,交流牵引发发电机的质量只有直流牵引发发电机的 1/2。在总体布置限界范围内,交流牵引发发电机的功率不受 2 200 kW 的限制,不再制约机车功率的增大。因此,交一直流电力传动一度成为国内外大功率内燃机车的主要传动方式,曾研制生产了许多用途的此类机车,保有量巨大,在许多国家至今仍为主型机车。美国 GE 公司的 Dash8 系列、GM 公司的 EMD—60 系列,我国生产的 DF₄ ~ DF_{11G} 型以及进口的 ND₄、ND₅ 型内燃机车均采用交—

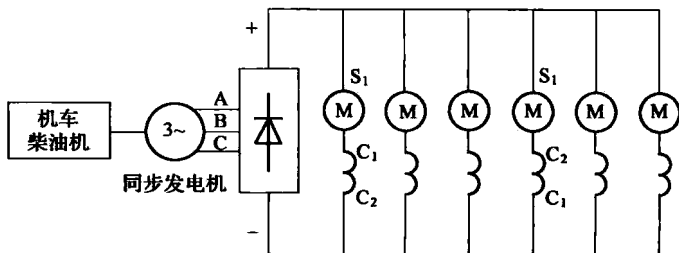


图 1.4 交一直流传动内燃机车工作原理

直流电力传动方式。

交一直流传动的内燃机车、电力机车,由于供电电源方面的差异,其电流变换、调压电路结构不同,供给牵引电动机的电源品质差异较大,导致主电路结构不尽相同。牵引电动机同为直流(脉流)串励电动机,能够获得良好的牵引性能,但直流(脉流)牵引电动机固有的不足,诸如电枢结构复杂、换向问题及可靠性等,制约了其单机功率、转速的进一步提高,不能适应高速、重载运输对牵引动力的更高要求。解决这一问题,只有从提高牵引电动机的功率、转速着手,采用交流牵引电动机是最佳选择。只有采用交流传动才能使电力机车、内燃机车再创辉煌。

1.1.3 交流电力传动系统

随着铁路运输向着高速化、重载化方向发展,对牵引动力装置也提出了速度、功率的更高要求,即提高牵引电动机单机功率与转速,这对直流电力传动系统而言是难以实现的。

寻求新的电力传动方式是解决铁路运输高速、重载发展的关键之一。从 20 世纪 70 年代开始,以德国、法国、日本为代表的发达国家相继开展了交流电力传动技术、变频电源的工程研究与应用,在异步牵引电动机的研发、控制策略方面取得了突破性进展。1971 年德国 DE2500 型内燃机车的研制成功,揭开了交流电力传动技术发展的序幕,其优异的技术性能极大地促进了交流电力传动技术在牵引动力领域的广泛应用。80 年代,交流电力传动技术以法国 TGV 列车和德国 E120 型电力机车的成功应用为起点,开始在全球范围内广泛应用。德国、法国等在 90 年代已基本完成了从直流电力传动技术向交流电力传动技术的过渡与跨越,实现了交流电力传动技术的工程化与产业化,相继研制了许多系列的交流电力传动机车、动车组及城市轨道交通列车,满足了轨道运输发展的需要,并提升了牵引动力装置的技术水平。所以交流电力传动系统正在快速替代直流电力传动系统,并无可争议地成为现代轨道列车的主流牵引传动方式。

与此同时,随着微型计算机技术、网络技术的发展与广泛应用,列车控制技术也发生了革命性的变化,计算机网络控制已成为主流控制模式。作为列车运行的重要载体,轻量化流线型车体、高性能走行部设计制造技术取得了重大突破,以高速转向架、径向转向架为代表的现代转向架技术,在高速、重载列车的发展中发挥着重要作用。因此,采用交流电力传动技术、现代转向架技术和网络控制技术已成为现代列车的主要技术标志。

轨道列车交流电力传动系统就是采用交流牵引电动机作为驱动电动机的电力传动系统,其优点主要由交流牵引电动机的优点而体现出来。牵引电动机以三相异步牵引电动机为主,同步牵引电动机应用较少,永磁同步牵引电动机正在发展中。

目前,交流牵引电动机大都采用三相交流异步笼式转子电动机,其相对于直流牵引电动机而言,具有结构简单、惯量小、转速高、功率大以及运行可靠等优点。因其没有换向器,故不存在换向问题,且单机功率大,可在更高转速下运转。因此采用三相交流笼式转子异步电动机作为牵引电动机,可以很好地解决直流牵引电动机存在的问题,能满足现代列车牵引对于高速、大功率的要求。交流异步牵引电动机单机设计制造水平已超过 2 000 kW,运行转速超过 4 000 r/min,最高试验转速可达到 7 100 r/min,已装车最大轴功率达到 1 840 kW。从功率、转速上看,交流异步牵引电动机完全能够满足现代列车对速度、牵引力的需求;但从调速性能方面来看,交流异步牵引电动机实现平滑调速比较困难。交流异步电动机属于单端励磁的电动机,其工作所需的磁场及做功能量均需由定子绕组上输入,建立磁场的无功电流与对外输出机械功率的有功电流都来自定子同一电流,相互耦合在一起,不能对励磁电流与有功电流进行独立控制,使得平滑调速异常困难。改变频率调速是异步电动机实现平滑调速的唯一途径。与

改变磁极对数调速和改变转差率调速有着本质上的不同,改变频率调速在高低速范围内都可以保持很小的转差率,具有调速范围大、效率高、调速精度高等优点,是交流异步电动机最理想的平滑调速方法。但这需要一套高性能的变频电源,即交流异步牵引电动机实现平滑调速的关键是变频电源,这也是交流电力传动技术发展的关键。

根据供电电源性质及变流方式的不同,交流电力传动系统主要可分为交—交流传动、交—直—交流传动和直—交流传动三种形式。

1. 交—交流传动系统

交—交流传动系统是将某一频率的交流电源直接经逆变器变换以后,获得频率可调的三相交流电源,供给交流牵引电动机。对于采用单相交流供电的系统,变频器只能改变频率提供单相变频电源,不能向三相交流牵引电动机供电,所以此交流传动方式不适合作为电力机车的传动。对于三相交流电源而言,经过变频器可直接改变输出频率,为交流牵引电动机供电,从工作原理上看适合内燃机车的交流传动。

在交—交流传动中,变频器的输入频率与输出频率之间有着直接的关系,变频器的输出频率一般仅为输入频率的 $1/3$ 。对于自备发电系统的牵引动力装置而言,当原动机的转速足够高时,交流同步发电机将可输出频率较高的三相交流电,经直接变频后可获得调速所需的频率范围,满足牵引调速需要。因此,交—交流传动系统适合于由高速原动机驱动的动力系统,如燃气轮机驱动的牵引动力系统—燃气轮机车等。以柴油机作为原动机的传统内燃机车,因柴油机额定转速较低,三相交流同步发电机的输出电压频率很有限,使牵引电动机的最高运行转速很低,因此不能满足机车调速要求。也就是说,交—交流传动系统不适合作为当前内燃机车的传动系统,至今也没有应用的范例。

2. 交—直—交流传动系统

交—直—交流传动系统是具有中间直流环节的间接变流系统,输入的交流电源与输出的交流电源之间完全独立,在频率上没有任何关系,其变流过程由交—直流变换和直—交流变换两部分组成。交—直流变换是将输入交流电源通过变流器变换为直流电,此变换为整流过程;直—交流变换是将平直的直流电通过变流器转换为频率、电压均可调节的三相交流电,即 VVVF,供给三相交流牵引电动机实现机电能量转换和对转速、转矩的控制,为列车运行提供动力,此变换为逆变过程。因此,交—直—交流传动系统是由电源侧整流器、中间直流环节和负载侧逆变器组成的,逆变器直接从中间直流环节获得电能。

根据中间直流环节采用的滤波元件不同,其性能及逆变器的工作特性也不同。滤波元件采用电容器时,中间直流环节的电压始终维持稳定,相当于电压源,此时的逆变器称为电压型逆变器;滤波元件采用电感时,中间直流环节的电流始终维持稳定,相当于电流源,此时的逆变器称为电流型逆变器。电压型逆变器与电流型逆变器的工作过程和输出特性完全不同,电路结构差异很大。在交—直—交流传动系统发展之初采用的是电压型逆变器,此传统一直延续至今。电压型逆变器更适合于异步电动机工作,故交—直—交流传动系统基本都采用电压型逆变器。电流型逆变器电路结构相对简单一些,它更适合为同步电动机供电。

交—直—交流传动的电力机车、EMU 以及内燃机车都具有动力制动能力。电力机车、EMU 采用再生回馈制动,将列车的惯性能量最终变换为电能,回送到接触网以供再利用;内燃机车只能采用电阻制动,将列车的惯性能量变换为直流电能,输入到车载制动电阻被消耗掉。

交—直—交流传动的电力机车、EMU 以及内燃机车一般采用架控方式或轴控方式供电。

交—直—交流传动电力机车、EMU 的工作原理相同,如图 1.5 所示。通过受电弓从接触

网受电,将单相高压交流电源引入车内牵引变压器,经降压后输入到四象限脉冲整流器,完成交流到直流的变换。经中间直流环节的滤波、稳压处理,得到稳定的直流电压,供给逆变器。控制逆变器输出频率、电压可调的三相交流电,供给牵引电动机,对其转矩、转速进行控制,将电能转化成机械能产生牵引力。

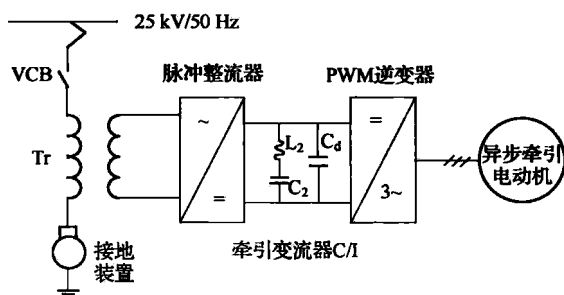


图 1.5 交—直—交流传动电力机车、EMU 工作原理

同步发电机和交流牵引电动机,同步发电机输出的三相交流电通过硅整流器整流为直流电,经稳压、滤波处理后,输入数台电压型逆变器,将稳定的直流电变换为频率、电压均可调的三相交流电,供给三相交流牵引电动机。牵引电动机将电能转换为机械能,产生牵引力,驱动机车运转。交—直—交流传动内燃机车工作原理如图 1.6 所示。

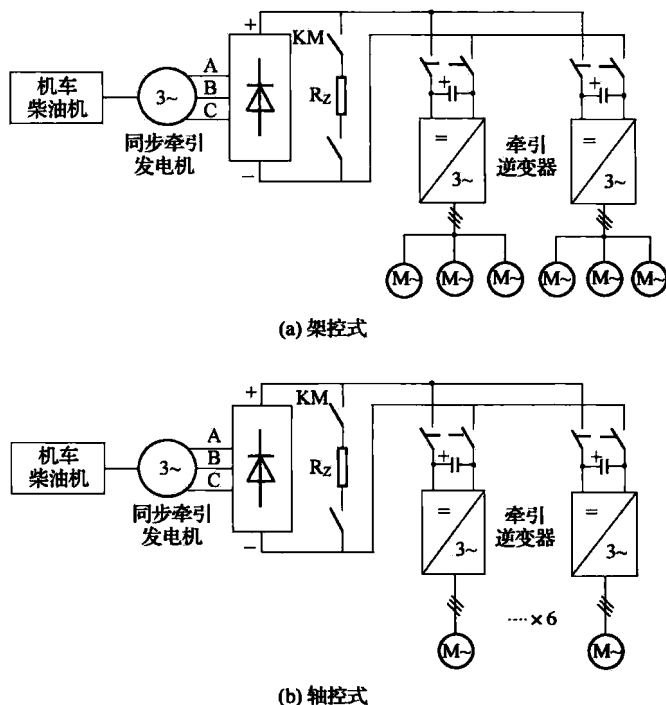


图 1.6 交—直—交流传动内燃机车工作原理

3. 直—交流传动系统

直—交流传动系统是指采用直流电网供电的交流传动系统,主要应用于地铁、轻轨列车和中低速磁悬浮列车。直流电源通过受电弓或第三轨从电网引入,经高速断路器、滤波电抗器等高压电器再接入逆变器。在传动控制单元的控制下,逆变器将输入的直流电能变换成频率、电压可调的三相交流电,供给异步牵引电动机,完成机电能量转换,产生牵引动力,实现对异步牵引电动机的转速与转矩控制。

地铁、轻轨列车直—交流传动系统的工作原理如图 1.7 所示。直—交流传动地铁、轻轨列车设置了再生制动和电阻制动,使用时,优先采用再生制动,电阻制动作为备用、补充。

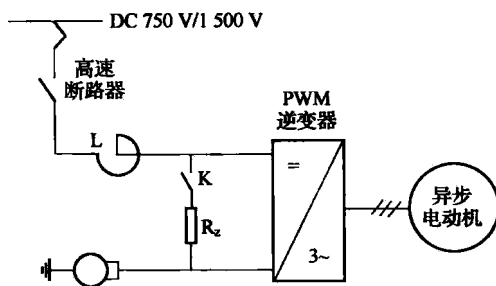


图 1.7 直—交流传动城轨列车工作原理

1.1.4 高速列车动力配置模式

高速列车动力配置模式可分为动力集中和动力分散两大类。动力集中是将列车动力集中于列车两端动力车的动轴上,形成推挽式牵引。在动力集中配置模式中,法国 TGV、德国 ICE 列车和摆式动车组最具代表性。动力分散就是将列车动力分散置于各车辆轴或大部分车辆轴上的一种牵引方式。日本新干线高速列车是动力分散的典型。

动力集中型高速列车为世界许多国家广泛采用,其运行速度可达 330 km/h。在现行电气化铁路的技术条件下,动力集中型列车完全能满足目前和今后很长一段时间内铁路运营的需要,可与普通铁路运营管理模式实现无缝隙对接。动力集中型列车技术成熟,编组较动力分散型动车组更为灵活;另外在成本方面优势明显,动力集中型动车组两端为动力车,设备集中布置、动力设备数量少,设备成本及维护费用较低;在车内环境方面,动力集中型列车驱动装置集中在两端,远离旅客坐席区,噪声小、舒适性较好。

动力分散型高速列车轴重小,牵引动力大,起动加速快,驱动轴多,黏着性能比较稳定,容易实现高速运转;其动力设备均可安装于地板底下,所有车辆(包括头车和中间车)均可作为客车使用,这样可提高列车定员。但其驱动设备分布在动力车底板之下,存在一定的振动因素,在舒适性方面也有一定影响。

动力集中与动力分散模式各有特点。运行速度为 200 km/h 等级的高速列车,动力集中模式可以成为主要动力配置模式;运行速度在 250 ~ 300 km/h 之间,两种模式均可应用;运行速度在 300 km/h 及以上时,动力分散模式具有显著的优势。

一贯坚持动力集中模式的德、法两国,在新一代高速动车组的开发中,已放弃了动力集中模式,转为动力分散模式。德国 ICE3 新一代高速动车组采用动力分散方式(2M2T),最高运行速度达 330 km/h;法国 AGV 动车组也改用动力分散模式,速度在 320 ~ 360 km/h 之间。CRH 系列高速动车组全部采用动力分散模式。

由此可见,运行速度在 300 km/h 以上的高速列车采用动力分散模式是发展趋势,也是新型高速列车的发展方向。

1.2 电力传动技术的发展趋势

电力传动技术诞生于 19 世纪,20 世纪初被广泛应用于工业、农业、交通运输和日常生活中。受当时科学技术的制约,直流电力传动应用于高性能的可调速传动系统,而交流传动多用于不需要平滑调速的传动系统。

自 1879 年世界上出现第一条电气化铁路以来,电力牵引经历了将近 60 年交流传动的初期探索,20 世纪 50 年代初整流器电力机车的诞生,使交流传动的研究暂告一段落。至此,直流传动成为电力牵引无可争辩的主体。长期以来,轨道列车电力传动系统以直流牵引电动机作为驱动电动机。尽管直流传动系统具有理想的牵引性能,但直流牵引电动机由于电枢结构复杂、惯量较大、存在着复杂的换向问题,在一定程度上降低了电动机运行可靠性,进一步提高单机功率、转速面临着很多困难,限制了直流传动系统的发展,直流传动已不能满足现代铁路高速、重载的需要。

随着电力电子技术的发展、控制理论不断完善以及微型计算机技术的广泛应用,变频电源技术取得了突破性进展,为交流电动机的平滑调速提供了可靠支撑。交流传动技术性能完全可以和直流传动相媲美,在铁路高速、重载运输中发挥着巨大作用。

1.2.1 交流传动技术是发展方向

交流传动技术是一门跨学科的综合技术,涉及电力电子器件、变流器电路、交流牵引电动机、控制理论及计算机网络等诸多学科领域。电力电子器件是交流传动技术发展的基础与支柱,传动技术的发展总是随着新型器件的应用而发展。20 世纪下半叶,高性能电力电子器件的不断更新和迅猛发展,为交流传动技术提供了重要的物质基础。交流传动系统是一个多变量、非线性且强耦合的系统,输入量与输出量之间以及与气隙磁链、转子磁链、转子电流等内部变量之间都是非线性耦合,使得系统模型非常复杂,而且在运行中又不可能准确测定。传统控制理论都是基于反馈来实现对传动系统的控制,只能保证系统的静态性能,并不能保证其动态性能。现代控制理论解决了传统控制理论所不能解决的问题,矢量控制、直接转矩控制都是建立在现代控制理论基础上的很有发展前景的控制方法,因此控制策略的发展,为交流传动技术提供了坚实的理论基础。微型计算机不仅能够实现对控制参数的检测、处理、存储等一般控制,而且能够快速、精确地对建立在现代控制理论基础上的复杂控制算法及方案进行优化。微型计算机及网络控制技术的广泛应用,为交流传动技术发展提供了技术保证,推动并加速了交流牵引电动机在广调速领域的应用。

20 世纪 70 年代初,德国 DE2500 型交流传动内燃机车的研制成功,揭开现代交流传动技术发展的新篇章,开创了交流传动技术应用的先河。80 年代,以德国 E120 型电力机车、法国 TGV 列车的成功应用为起点,交流传动技术开始在全球范围内广泛应用。90 年代以来,发达国家已经全面实现了交流传动,采用交流传动系统的机车、动车组已成为主型牵引动力。

交流牵引传动技术在不断完善性能的基础上,向着结构简单、运行可靠和轻量化的方向发展,已在无速度传感器控制技术、软开关技术、永磁同步电动机直接驱动技术、变压器小型化和轻量化技术、无变压器技术等方面取得一定的进步。

迄今为止,三相交流异步笼式电动机是唯一仍在得以继续拓展中的牵引电动机,其性能将会更加优良。随着稀土永磁材料技术的突破和产业化,采用新型永磁材料钴、钕制成的交流同步永磁电动机,性能更好。永磁同步牵引电动机相对于交流异步电动机,具有极对数多、转矩密度高的特点,在同等条件下,其体积、质量可减小约 1/3。永磁电动机没有励磁电流,功率因数较高,特别在低速时尤为突出;在稳态运行时无转子铜耗,总损耗较低,其效率可提高 2% ~ 8%,同时在 25% ~ 120% 额定负载范围内均可以保持较高的功率因数与效率,在宽负载范围持续运行时节能效果显著。永磁同步牵引电动机将会挑战异步笼式电动机,引领交流传动技术发展潮流。法国新一代高速列车 AGV 已采用永磁同步牵引电动机,节能 15%,效果明

显,技术经济性能优越。

1.2.2 电力、内燃机车平台通用化

采用新技术、新工艺改进控制系统,使电力传动装置趋向小型化、微型化及组件模块化,提高其工作可靠性及性价比。同时,融合电力机车、内燃机车结构平台,将电力机车与内燃机车结构平台通用,通过更换牵引变压器或柴油机—发电机组,就可同一平台上实现电力机车与内燃机车的相互转换。将各种功率等级以及不同类型的机车采用统一、通用的零部件,实行集中规模化生产,充分利用先进工艺设备,提高产品质量。在电力机车与内燃机车上实现主要零部件完全通用,诸如牵引电动机、牵引变流器、控制及通信系统、辅助系统、制动系统、转向架、司机室等,降低运营及维修成本。

庞巴迪公司的 TRAXX 平台首次将内燃机车与电力机车结构平台通用,只需更换柴油发电机组或牵引变压器就可实现机车类型的转换。在 TRAXX 平台上,车体、转向架、牵引电动机、牵引变流器、司机室及操作台、控制通信系统均完全相同。TRAXX DE 内燃机车有 70% 的部件与 TRAXX AC 电力机车相同,可作为客运、货运机车使用,牵引相同定数的列车时可产生 300 kN 的牵引力。

1.2.3 内电型双动力通用机车

电气化铁路与非电气化铁路之间由于能源供给形式不同,不能实现一种机车贯通牵引,需要更换适合的机车来完成牵引任务,需要配置大量的电力机车、内燃机车,从机务管理、运输组织上来看都是不经济的。如何实现机车在电气化铁路与非电气化铁路间的通用问题,采用双动力机车就是一个很好的解决方案。所谓双动力机车,就是在同一台机车上同时设置柴油发电机组和牵引变压器,在不同的线路区段进行切换,既可作为内燃机车使用,也可作为电力机车使用,实现真正意义上的通用。由庞巴迪公司研制的世界上第一台双动力机车已在北美地区应用,2011 年,北美地区有 46 台双动力通用机车投入运营。该双动力机车当按电力机车方式运行时,采用单相交流 25 kV 接触网供电,轮轴功率可达到 3 942 kW;当按内燃机车运行时,将由 2 台 1 544 kW 的柴油发电机组提供动力。

纵观交流传动技术的发展以及寿命周期成本、可靠性、可维护性等新的设计理念的应用,将进一步提高轨道列车传动系统性价比,将会有更多、更先进的交流传动系统不断出现,满足轨道交通日益发展的需要。

2 交一直流传动系统

交一直流传动系统是指采用交流电源供电的机车、动车组,经整流器将交流电压变换为直流电压供给直流牵引电动机,驱动机车、动车组运行的传动系统,它是轨道列车直流传动系统的主要传动方式。由于交流电源供给方式分为外供电源与自备电源 2 种,相应的牵引动力装置也分为电力机车、EMU 与内燃机车、DMU 两大类。

交一直流传动的电力机车、EMU 属于采用外部单相高压交流电源供电的直流传动系统,一般采用可控式整流器,通过调节可控元件的控制角大小,完成整流及输出电压的调节。随着变流器件技术性能的不断提高,整流调压电路的结构、形式相应地发生了变化,先后经历了调压开关与二极管组合的有级调压、调压开关与晶闸管结合的级间平滑调压和相控无级调压 3 个阶段。调压开关与二极管组合的有级调压属于单拍全波整流方式,在早期的电力机车、EMU 上曾有应用,国产电力机车 SS₁、SS₂ 型及日本新干线 0 系动车组均采用此电路。因调压开关为机械式有触点开关,其结构复杂、输出电压不连续、可靠性低等原因,早已被淘汰。调压开关与晶闸管结合的级间无级调压属于双拍全波整流方式,是介于有级调压与无级调压方式之间的一种过渡调压方式,应用较少,国产电力机车中只有 SS₃ 型电力机车采用此电路。晶闸管相控无级调压属于双拍全波整流方式,它作为交一直流传动电力机车、EMU 的主要调压方式,技术成熟、运行可靠,仍有大量的相控调压电力机车、EMU 在应用,国产电力机车 SS_{3B} ~ SS_{9C} 型及日本新干线 100、200、400 系动车组均采用相控无级调压方式。

直流传动内燃机车经历了直一直流传动、交一直流传动 2 个阶段。直一直流传动内燃机车因受直流牵引发电机容量、技术性能的限制,已被淘汰。交一直流传动内燃机车、动车组是采用交流同步发电机供电的直流传动系统,具有技术成熟、性能可靠等优点,保有量很大,目前仍在许多国家、地区作为主型机车继续服役。

纵观电力牵引传动技术的发展历程,它随着电力电子技术、控制理论以及计算机技术的发展而发展。欧、美、日等发达国家在 20 世纪 90 年代已经实现了向交流传动系统的转换与跨越,全面实现了交流传动系统的产业化,其交流传动机车、动车组的应用已很成熟。我国目前在线运用的机车大多数仍属于交一直流传动机车。交流传动机车、动车组在我国还处于起步发展阶段。在铁路跨越式发展之前,我国曾研发了一些采用交流传动系统的机车、EMU,但由于受关键技术、成本等因素制约,只在机车型谱里占据了一个位置,没有形成批量。我国已停止了交一直流传动机车的生产,当前正在发展的和谐系列机车、动车组均采用了先进的交流传动系统,这将成为我国牵引动力装置的发展方向。

交一直流传动系统由许多特定功能的电气线路组成,按其功能作用可分为主电路、辅助电路和控制电路 3 部分。

主电路是产生牵引力和制动力的主体大功率动力回路,其结构、性能在很大程度上决定着机车的性价比。主电路由交流电源供给、电源变换装置、工况转换开关、牵引电动机、制动电阻等组成,具有功率大、控制复杂、工作条件恶劣及空间受限制等特点。电力

机车、EMU 依靠接触网获得单相高压交流电源,经由受电弓、主断路器、避雷器、高压互感器将电源引入主变压器,通过牵引变流装置获得脉流,由平波电抗器滤波后供给牵引电动机;内燃机车依靠三相同步发电机提供三相交流电源,经三相桥式硅整流器,将交流变换为直流供给牵引电动机。牵引电动机输入直流电流后,将电能转换为机械能,驱动动轮旋转,在轮轨之间产生牵引力,驱动机车运转。主电路应满足机车起动、调速及制动 3 个基本工作状态的要求。

辅助电路是为机车的辅助机械装置提供电能的电路,属于机车自用电部分,不会产生牵引力,是保证主电路发挥功率和实现牵引性能所必需的电路。在交—直流传动电力机车、EMU 中,主要由产生三相交流电的劈相装置和各辅助机械的拖动电动机等组成,其辅助电路依靠劈相装置将单相交流电变换为三相交流电,供给各辅助机械拖动电动机,驱动通风机、油泵、空压机等装置工作,为保障主电路的正常工作提供冷却条件以及控制动力。劈相装置是一个单—三相交流电源变换装置,一般有旋转机组劈相机和静止变流劈相机 2 种形式。旋转机组劈相机是一台单相异步电动机与一台三相发电机的组合,静止变流劈相机是一套交—直—交流变换装置。国产 SS 系列电力机车主要采用旋转机组劈相机;在交—直流传动内燃机车系统中,辅助电路主要由起动发电机提供 DC110 V 电能。

控制电路是执行司机的控制命令或意图,完成对主电路、辅助电路间接控制的低压主令电路。它由各种主令电器及功能控制模块组成,承担着机车传动系统的控制以及与外部行车指挥系统的信息传输、储存任务。

起动、调速及制动是列车运行的基本规律,是通过机车主电路、控制电路和辅助电路共同作用实现的。起动、调速及制动过程也是电力传动控制系统的主要任务,与主电路结构、牵引电动机的配置与供电方式、调速方式、动力制动方式都有着密切关系。

为了充分发挥机车的牵引性能,实现多拉快跑,要求机车不仅能在不同的线路和载荷条件下改变牵引力,而且还要求在相同的牵引力下能得到不同的速度。因此,机车主电路必须要保证牵引电动机具有宽广的调速范围。

2.1 交—直流传动系统的速度调节

调速是指人为地改变牵引电动机的工作参数使其转速发生改变的运行过程,它区别于因外部扰动(如接触网电压变化、线路纵断面参数变化等偶然因素)引起的转速适应性变化。

交—直流传动系统的速度调节是主电路的重要任务之一,是通过调节直流(脉流)牵引电动机的转速来实现的,因此,机车、动车组的调速问题归根到底就是对牵引电动机如何调速的问题。

调速时要求:调速应平滑且牵引力连续变化,尽量减小冲击;调速范围要尽可能大一些,能够满足列车牵引要求;调速的经济性能指标要高,调速系统要求简单、运行可靠。

2.1.1 直流牵引电动机的特性分析

直流牵引电动机的性能取决于励磁方式,即励磁绕组的供电方式,不同励磁方式的牵引电动机,性能差异很大。电力机车、EMU 采用的直流牵引电动机在结构上与普通直流电动机基本相同,一般采用串励方式,只有个别系统采用他复励方式。直流牵引电动机的励磁方式如图

2.1 所示。直流牵引电动机的运转状态取决于机车的运行工况。对于串励牵引电动机而言,当机车工作在牵引工况时,牵引电动机将按照电动机状态运转;当机车工作在动力制动工况时,牵引电动机将按他励发电机状态运转。他复励牵引电动机的主磁极上有 2 套励磁绕组:一套与电枢绕组串联,称为串励绕组;另一套与电枢绕组无连接关系,称为他励绕组。他复励牵引电动机的特性总是介于串励与他励电动机特性之间,主要以串励成分为主,既保持了串励和他励方式的优点,又克服了各自的缺点与不足,可以灵活地获得优异的工作特性。

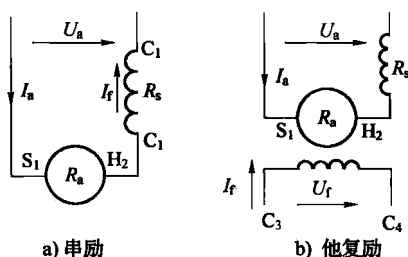


图 2.1 直流牵引电动机的励磁方式

1. 直流牵引电动机的工作特性

直流电动机的工作特性是指当电源电压及励磁电流不做人为调节时,电动机的转速 n 、电磁转矩 T_{em} 随电枢电流 I_a 的变化关系。工作特性由速率特性 $n = f(I_a)$ 和转矩特性 $T_{em} = f(I_a)$ 组成。

(1) 速率特性 $n = f(I_a)$

由直流电动机电势公式 $U_a = E_a + I_a R_a$ 及 $E_a = C_e \Phi n$ 可得出转速为:

$$n = \frac{U_a - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a$$

对于他励电动机,若不计电枢反应的影响, $\Phi = C$, 则有:

$$n = n_0 - \beta' I_a$$

式中 $n_0 = U_a / C_e \Phi$ ——理想空载转速;

$\beta' = R_a / C_e \Phi$ ——特性曲线的斜率。

显然,他励电动机其速率特性是一条斜率为 β' 的直线,斜率的大小取决于电枢回路的总电阻值。

对于串励牵引电动机, $I_f = I_a$, 即气隙主磁通随电枢电流而变化。若不考虑磁路饱和的影响, $\Phi = K_f I_f = K_f I_a$

$$n = \frac{U_a - I_a R'_a}{C_e \Phi} = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_s}{C_e \Phi} I_a = \frac{U_a}{C_e K_f} \cdot \frac{1}{I_a} - \frac{R_a + R_s}{C_e K_f} \quad (2.1)$$

式中 R'_a ——电枢回路总电阻, $R'_a = R_a + R_s$, 其中 R_s 为串励绕组的电阻。

由式(2.1)可看出,串励牵引电动机的速率特性是一条等边双曲线,即软特性。当负载电流 I_a 增加时,其转速随负载的增加而迅速下降。当负载电流很小时,主磁通也很小,使其转速很高,将产生“飞速”失控现象,后果十分危险。因此,串励牵引电动机不允许空载运行或轻载运行。在选择传动方式时不允许采用皮带传动或链条传动等间歇传动方式。

(2) 转矩特性 $T_{em} = f(I_a)$

对于串励牵引电动机,若不考虑磁路饱和因素的影响, $\Phi = K_f I_a$, 则有 $T_{em} = C_T K_f I_a^2$, 即转矩特性是一条关于电枢电流的二次方函数曲线。

当磁路高度饱和以后, $\Phi = C$, $T_{em} = C_T \Phi I_a \approx C'_T I_a$, 此时电磁转矩与电枢电流成正比。所以,串励牵引电动机其电磁转矩与电枢电流之间的关系总是大于一次方而小于二次方,即 $T_{em} \propto I_a^\alpha$, $1 < \alpha < 2$ 。也就是说,在相同条件下,串励牵引电动机的起动能力、过载能力都大于其他电动机。