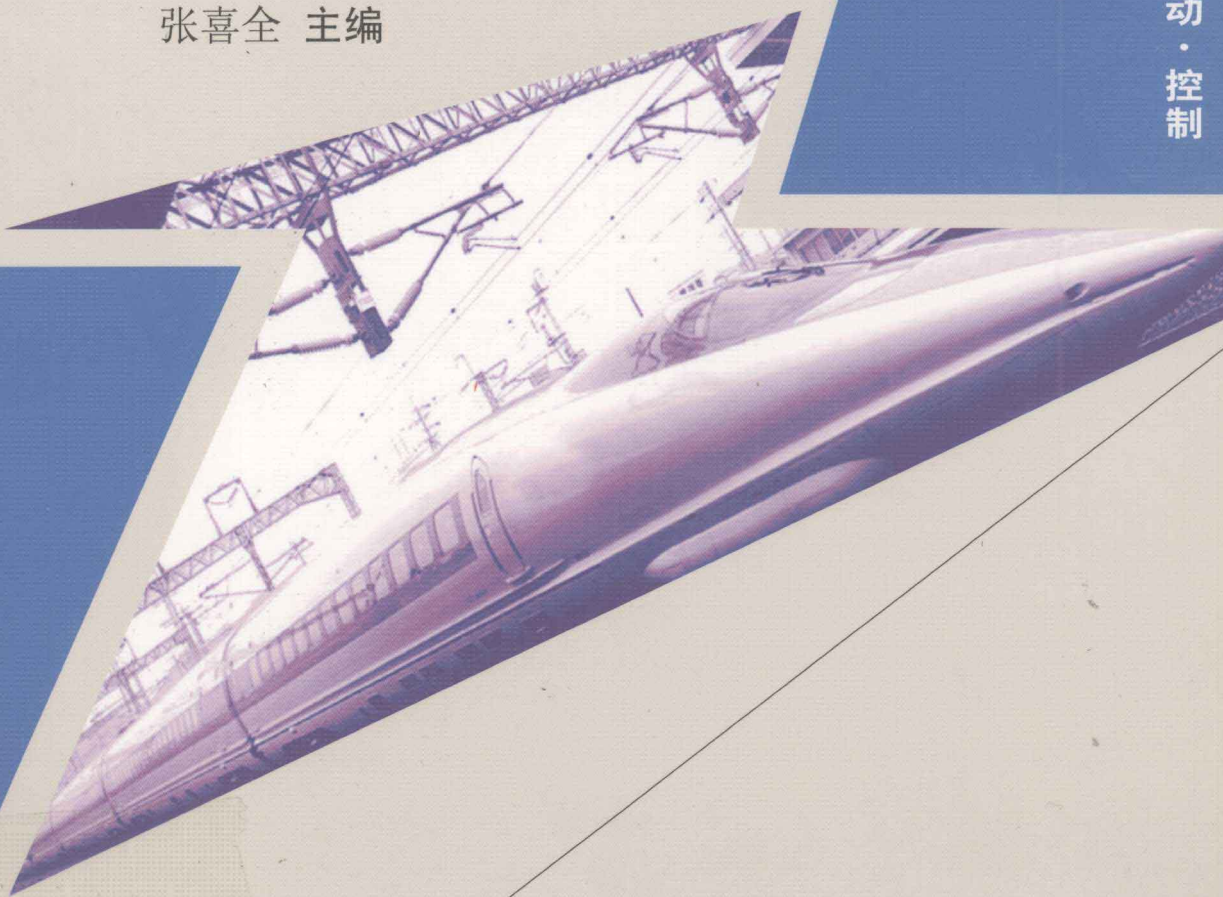


现代铁路新技术丛书
—— 电力传动·控制

列车电力传动与控制

LIECHE DIANLI CHUANDONG YU KONGZHI

张喜全 主编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

现代铁路新技术丛书——电力传动·控制

列车电力传动与控制

张喜全 主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

全书由绪论和九章内容组成,绪论部分介绍了电力传动系统的基本类型及发展趋势;第1章介绍了交-直流传动电力机车的基本运行过程及性能评价体系;第2章分析了交-直流传动电力机车的控制特性及电路;第3章介绍了现代交流传动技术的基本组成模式及异步牵引电动机的调速;第4章介绍了牵引变流器电路及设计;第5章介绍了牵引变流器控制策略;第6章分析了和谐系列电力机车、动车组交流传动控制系统;第7章介绍了直流传动内燃机车恒功率励磁控制系统;第8章介绍了电力传动装置调节参数与机车电路;第9章介绍了交流传动内燃机车恒功率调速系统。

本书可作为高等院校车辆工程牵引动力方向(电力机车、动车组、内燃机车、城市轨道交通列车等)的专业教材,还可供相关专业研究生及从事电力传动工程的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

列车电力传动与控制 / 张喜全主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2010.8
(现代铁路新技术丛书. 电力传动·控制)
ISBN 978-7-5643-0686-1

I. ①列… II. ①张… III. ①列车—电力传动—研究
②列车—控制系统—研究 IV. ①U284.48

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第103864号

现代铁路新技术丛书——电力传动·控制

列车电力传动与控制

张喜全 主编

*

责任编辑 李芳芳

特邀编辑 胡芬蓉

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

成都市二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 23.375

字数: 582千字

2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5643-0686-1

定价: 39.80元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

列车电力牵引传动控制系统作为电气传动控制系统的一个独立分支，在轨道交通运输牵引动力领域发挥着重要作用。轨道交通运输具有大运量、快捷、安全、舒适、节能与环保等优点，已经成为交通运输的重要组成部分，在国民经济中占据着非常重要的地位。根据铁路 2020 年中长期发展规划中的牵引动力发展目标，结合我国高速路网建设步伐及和谐系列机车、动车组引进项目的国产化，交流传动已成为我国牵引动力发展的主流。交流传动技术作为现代牵引动力的核心技术与标志，在现代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、动车组技术的吸收、消化与再创新中，攻克交流传动控制技术壁垒，将国外先进技术为我所用是关键，专业人才是根本。

本书突出铁路专业特色，以和谐系列电力机车、高速动车组、内燃机车为主，结合城市轨道交通车辆，对交流传动控制系统进行剖析，同时对具有代表性的车型加以分析，反映列车电力牵引传动控制技术的最新发展。

本书从电气传动与控制原理出发，根据电能供给形式的差异，融合电力传动内燃机车与电力机车的共同点，以大机车的视角，系统介绍列车电力牵引传动控制系统的基本概念、高速动车组和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的变革和现场运用实际，处理电力传动技术的延续性和继承性，以继承现有技术，对交-直流传动主型机车的技术特征加以归纳分析。

全书由绪论和 9 章内容组成，各章节相对独立，兼顾专业共性，教学时可根据专业培养的侧重差异进行删选，以满足专业教学的需要。

本书由兰州交通大学张喜全主编。参加编写的有张喜全（绪论、第 3 章、第 5 章）、李永昶（第 1 章、第 2 章）、王红（第 4 章、第 7 章）、张永贵（第 6 章）、耿幸福（第 8 章、第 9 章）。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者指正。

编 者

2010 年 2 月

目 录

绪 论	1
0.1 列车电力传动系统基本类型	1
0.2 电力传动技术的发展趋势	9
第 1 章 交-直流电力传动系统	12
1.1 电力牵引传动系统的组成	13
1.2 直流传动电力机车速度调节	14
1.3 交-直流传动电力机车/EMU 的调压方式	21
1.4 电力机车/EMU 的启动与动力制动	34
1.5 相控调压电力机车功率因数的改善	42
思考题	50
第 2 章 交-直流传动控制牵引特性与电路分析	51
2.1 交-直流传动控制	51
2.2 相控电力机车/EMU 控制与牵引特性	61
2.3 相控电力机车基本技术特征	66
2.4 相控电力机车传动系统电路分析	71
思考题	92
第 3 章 交流传动技术	93
3.1 概 述	93
3.2 列车交流传动系统组成模式	98
3.3 交流异步牵引电动机变频调速	104
3.4 列车牵引特性与控制策略	132
思考题	141
第 4 章 牵引变流器	142
4.1 两电平式牵引变流器	143
4.2 三电平式牵引变流器	161
4.3 变流器设计	171
思考题	173

第 5 章 牵引变流器控制策略	174
5.1 SPWM 控制技术	175
5.2 转子磁场定向控制——矢量控制	193
5.3 直接转矩控制 (DTC)	204
思考题	215
第 6 章 电力机车及 EMU 交流传动系统分析	216
6.1 交流传动发展现状	216
6.2 “和谐”系列电力机车交流传动系统分析	225
6.3 CRH 系列动车组交流传动系统分析	249
思考题	271
第 7 章 直流传动内燃机车电力传动系统	272
7.1 内燃机车电力传动装置的功能	272
7.2 同步牵引发电机	274
7.3 恒功率调速系统	281
7.4 采用联合调节器的恒功率励磁控制系统	292
7.5 电子恒功率励磁控制系统—CHEC 系统	303
7.6 微机控制的恒功率励磁系统	314
7.7 牵引电动机磁场削弱	323
思考题	325
第 8 章 电力传动装置调节参数与机车电路	327
8.1 电力传动装置主要调节参数及其选择	327
8.2 内燃机车持续工况参数的确定	333
8.3 牵引电机的容积功率和牵引电动机的通用问题	334
8.4 主电路及保护	336
8.5 内燃机车电气线路	340
思考题	361
第 9 章 交流传动内燃机车恒功率调速系统	363
9.1 异步牵引电动机控制规律的选择	364
9.2 牵引逆变器电路分析	365
思考题	366
参考文献	367

绪 论

列车电力牵引传动控制系统作为电气传动控制系统的一个独立分支，在交通运输牵引动力领域发挥着重要作用。它以牵引电动机为控制对象，通过开环或闭环控制系统对牵引电动机的转速和转矩实施控制，以达到对驱动对象的控制与调节。根据牵引电动机工作电流性质的不同，电力传动系统可分为直传动系统和交流传动系统。电力传动控制系统的覆盖范围很广，包括铁道机车与动车组、城市轨道交通车辆和电动车辆等领域的电气传动控制。铁道机车主要有电力机车、电传动内燃机车；铁道动车组主要有内燃动车组（DMU）和电力动车组（EMU）；城市轨道交通车辆主要有地铁、轻轨及中低速磁悬浮列车等；电动车辆主要包括无轨电车、有轨电车、电动汽车及双动力汽车等。铁道机车、动车组和城市轨道交通车辆在传动方式上具有相似性，一般将它们统称为轨道列车。

本课程主要以轨道列车为主线，分析电传动内燃机车、电力机车/EMU、城轨列车的电力传动与控制系统。列车电力传动系统是一个需要广调速的传动系统，调速系统要保证列车在可运行速度范围内实现高效、平滑的速度调节，具有良好的静态性能和动态性能，以满足列车牵引的需要。

0.1 列车电力传动系统基本类型

列车电力传动系统一般由能源供给单元、变换单元、动力输出单元和控制单元等部分组成。能源供给单元为系统提供适当的工作能源，一般有一次能源石油和二次能源电能。一次能源主要为柴油，二次能源电能通过接触网线提供；变换单元是将工作能源通过相应的装备变换成动力输出单元（负载）所需要的电能，提供给动力输出单元。柴油机将一次能源柴油转换为机械能，拖动牵引发电机组工作产生电能。接触网线上的二次能源电能通过车载受电装置引入车内，经变流环节变换为合适的电能，供给动力输出单元；动力输出单元主要由牵引电动机、传动装置和转向架轮对组成，牵引电动机接受电能并将其转换为机械能从转轴上输出，通过传动机构带动车轮旋转，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部分，承担着整个系统各单元内部及相互间的控制和通信任务。列车电力传动系统的基本组成如图 0.1 所示。

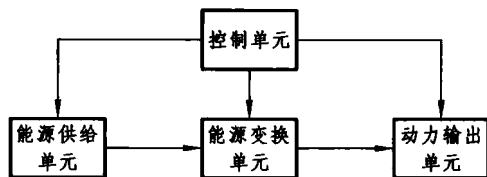


图 0.1 列车电力传动系统基本组成框图

0.1.1 列车电力传动系统分类

列车电力传动系统的分类方法很多，可以按能源供给方式分类，也可以按牵引电动机工作电流的性质分类。

1. 按能源供给方式分类

按能源供给方式的不同，列车电力传动系统可分为自备能源系统和外接能源系统。自备能源系统主要有电力传动内燃机车；外接能源系统的外接能源为电能，主要有电力机车、电动车组（EMU）、城市轨道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，受国情和技术习惯的影响，各个国家采用的传动方式以及对这两种传动方式的认识有所不同。液力传动具有质量轻、耗铜量少、运营维护保养简单及成本低等优点；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、液压技术制造能力强的国家倾向于生产和应用液力传动内燃机车，如德国、奥地利、日本等，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，曾经生产、进口过一些液力传动内燃机车，现已全部退出国铁干线牵引，目前服役和生产的内燃机车全部采用电力传动。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，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驱动一台牵引发电机，将柴油机输出的机械能转换为电能供给变流装置，经变流装置变换后向转向架上的牵引电动机供电，牵引电动机获得电能后将其转换为机械能，通过传动齿轮箱驱动机车动轮旋转，在轮轨之间产生牵引力驱动列车运行。

电力机车、电动车组为外接能源的动力装置。现代电力机车、电动车组均采用单相交流供电制式，通过受电弓从接触网线上受流，将电能引入车内，经过适当地变流后输出给牵引电动机，牵引电动机将电能转换为机械能驱动轮对旋转，在车轮与钢轨间产生牵引力，从而驱动列车运行。

城市轨道列车、中低速磁悬浮列车也为外接能源的动力装置，由于功率相对较小，一般采用直流供电方式。

2. 按工作电流性质分类

按牵引电动机工作电流的不同，列车电力传动系统可分为直流传动系统和交流传动系统。结合牵引发电机输出电压或接触网电压的不同性质，在内燃机车中，牵引发电机、牵引电动机都有直流、交流之分，其电力传动系统可进一步划分为直-直流传动、交-直流传动和交流传动。城市轨道列车、中低速磁悬浮列车电力传动系统可分为直-直流传动系统和直-交流传动系统。

在单相交流供电制式下，电力机车、电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。

根据工作电流性质的不同，综合能源供给方式的差异，列车电力传动系统总体上可分为直流传动系统和交流传动系统两个大的类别，而直流传动系统又可进一步划分为直-直流传动

和交-直传动。因此,列车电力传动系统由直-直流电力传动系统、交-直流电力传动系统和交流电力传动系统组成。

列车电力传动系统的基本类型如图 0.2 所示。

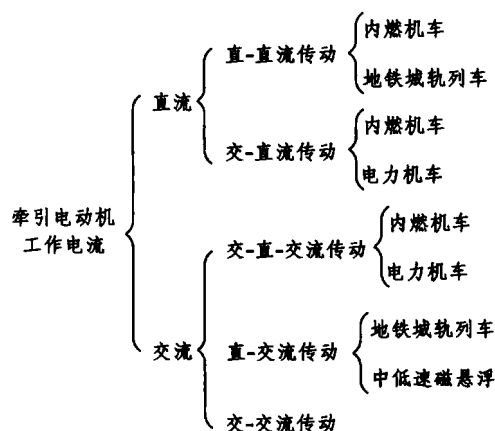


图 0.2 列车电力传动系统的基本类型

0.1.2 直流电力传动系统

直流电力传动系统以直流牵引电动机作为驱动电动机,实现机电能量转换,驱动转向架上的动轮对旋转,在车轮与钢轨的作用下产生牵引力,完成列车牵引。由于电源性质不同,直流电力传动系统由直-直流电力传动系统和交-直流电力传动系统组成。

长期以来受电源技术的限制,列车电力传动系统主要采用直流电力传动系统,以直流牵引电动机作为驱动电动机,主要是由直流牵引电动机具有优异的调速性能所决定的。直流牵引电动机从电磁过程来看是一个双端励磁的电动机,其磁场电流和电枢电流可独立进行控制,调节控制很方便,其启动、调速性能和转矩控制特性比较理想,并容易获得良好的动态响应。特别是交-直流电力传动系统,曾经是列车电力传动系统的主要传动模式,在列车电力传动以及其他工业电气传动领域发挥了重要作用,至今仍在许多国家和地区的列车牵引中充当着主力军的作用,我国干线列车牵引机车仍以交-直流电力传动系统为主,交-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,然而不可否认,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,运行中不可避免地会产生换向火花,很容易发生环火(正负电刷间短路)故障,在一定程度上降低了电动机运行的可靠性。为了保证电动机能够可靠换向,严格限制换向器上各换向片间的电压,同时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,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,从而制约了直流传动机车功率和速度的进一步提高。

1. 直-直流电力传动系统

直-直流电力传动系统就是采用直流电源供电的直流传动系统,牵引发电机输出电压或接触网供电电压为直流。直流牵引电动机将直流电能转换为机械能来驱动轮对旋转,在轮轨之

间产生牵引力。牵引电动机采用直流串励电动机,这是由直流串励电动机的优点所决定的。直流串励电动机具有适合牵引的软特性,过载能力强,通过改变电枢两端电压或对其磁场进行削弱,即可调节电动机转速。因此,曾被普遍应用于内燃机车、小电力机车、地铁列车和城市电车上。

直-直流传动内燃机车采用直流牵引发发电机和直流牵引电动机。柴油机拖动直流牵引发发电机发电,将输出的直流电能供给数台直流牵引电动机,牵引电动机将直流电能转换为机械能,通过传动齿轮箱驱动车轮旋转,在轮轨间产生牵引力。在该传动系统中,牵引发发电机采用他励直流发电机,通过调节励磁电流来改变发电机的输出电压、电流;牵引电动机采用直流串励电动机,通过改变电枢两端电压或对其磁场进行削弱,即可调节电动机转速。早期的内燃机车使用直-直流电力传动方式,由于当时对机车功率要求不高,直流牵引发发电机的性能、容量能够满足需要,故使这种传动方式持续了很长时间,生产了许多直-直流传动的内燃机车,如我国的 $DF_1 \sim DF_3$ 型、进口的 ND_1 、 ND_2 型等内燃机车都属于此类传动方式。直-直流电力传动装置如图 0.3 所示。

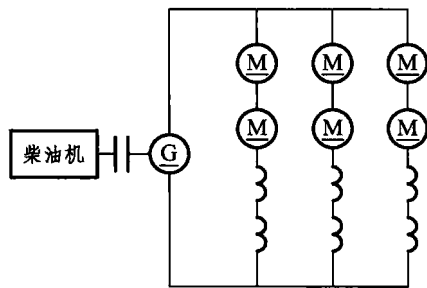


图 0.3 直-直流传动系统原理图

直流牵引发发电机因受换向条件、机车限界尺寸及轴重等因素的限制,单机功率被限制在 2 200 kW 以下,致使机车功率受限制。从 20 世纪 60 年代后期,随着柴油机制造技术、交流电机技术和电力电子技术的不断进步,为发展大功率内燃机车提供了技术支持。交流牵引发发电机的应用克服了直流牵引发发电机存在的不足,满足了内燃机车朝着更大功率发展的需要,形成了交-直流电力传动方式,推动了内燃机车电力传动技术的进步。

地铁列车与城市电车采用直流外供电源,由于单机功率较小,直流牵引电动机的工作定额一般为短时制,在许多城市应用比较成熟。

2. 交-直流电力传动系统

交-直流电力传动系统就是采用交流电源供电的直流电力传动系统。交-直流电力传动内燃机车与电力机车的电源均为交流电,但在性能上存在着较大的差异。内燃机车牵引发发电机输出三相交流电,频率较高,一般为工频的 2 倍以上,但电压较低;电力机车与 EMU 通过接触网获得单相高压工频交流电,需经牵引变压器降压。

对于内燃机车,三相同步发电机作为牵引发发电机,由柴油机驱动产生三相交流电能,通过大功率硅整流器将三相交流电变换为直流电,供给数台直流牵引电动机,如图 0.4 所示。交-直流电力传动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-直流传动系统中的直流牵引发发电机,使传动系统结构简单、运行可靠、省铜、维护保养简单。在功率相同的条件下,交流牵引发发电机的质量只有直流牵引发发电机的 1/2。交流牵引发发电机的功率不受 2 200 kW 的限制,在总体布置限界范围内,发电机的功率都可以满足需要。因此,在交-直流电力传动系统中,牵引发发电机的功率不再是制约机车功率增大的因素。交-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,曾研制生产了许多型号的此类机车,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 型内燃机车均属于此类传动方式。

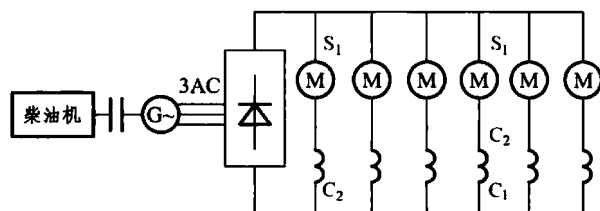


图 0.4 交-直流电力传动系统原理图

对于电力机车与电动车组,由接触网提供单相工频高压交流电能,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。其工作过程如图 0.5 所示。

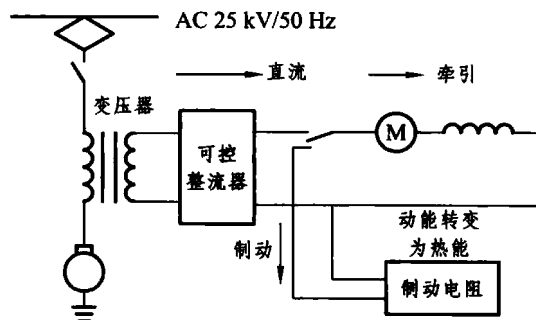


图 0.5 交-直流传动电力机车工作原理图

交-直流传动电力机车牵引电动机采用脉流电动机,励磁方式主要为串励方式,少数系统也采用他复励方式,具有较大的启动能力和较好的恒功率性能。此类机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_{9G} 型机车都属于此类电力机车,仍在担当着繁重的客货运输列车的牵引任务。

交-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,但因直流(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,依然制约着电动机单机功率、转速的进一步提高,影响了此类机车的应用,不能适应高速、重载运输对牵引动力的更高要求。要解决这一问题,只有从提高牵引电动机的功率、转速入手,采用交流牵引电动机是最理想的选择。事实证明:只有交流传动才能使内燃、电力机车再创辉煌。

0.1.3 交流传动系统

随着铁路运输向高速、快捷化方向发展的需要,对牵引动力装置提出了高速、大功率要求,具体体现在牵引电动机上就是要提高转速、增加单机功率,这对直流传动系统而言是致命的弱点。

相对于直流牵引电动机而言,三相交流笼式转子异步电动机结构简单,没有换向器,不存在换向问题,惯量小,运行可靠,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不足,

满足现代列车牵引传动系统对于高速、大功率的需求。目前交流异步牵引电动机单机设计制造水平可超过 2 000 kW, 运行转速超过 4 000 r/min, 最高试验转速达到 7 100 r/min, 已装车最大功率达到 1 840 kW。从功率、转速上看, 交流异步牵引电动机具有很大优势, 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, 电动机工作所需的磁场及做功能量均要由定子绕组上输入, 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, 即定子磁场与转子磁场之间存在相互耦合, 不能对其分别进行独立控制, 使得调速特别是平滑调速异常困难。在“电机与拖动”课程中, 曾讨论过交流异步电动机可能的调速方法有三种, 即改变磁极对数调速、改变转差率调速和改变频率调速。改变磁极对数调速最多只能得到 3~4 个转速等级, 属于有级调速; 改变转差率调速是在不改变电动机同步转速的前提下进行的调速, 只适合于绕线式转子异步电动机, 调速范围很有限, 调速过程存在着效率低、损耗大等不足; 改变频率调速就是通过改变电动机输入电源的频率, 进而改变电动机的同步转速实现调速的一种方法, 与改变磁极对数调速和改变转差率调速有着本质的不同, 在高低速范围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, 但需要一套高性能的变频电源。也就是说, 交流异步牵引电动机实现平滑调速的关键是变频电源, 也是交流传动技术发展的关键。

寻求新的电力传动方式是解决铁路运输高速、重载发展的关键要素之一。为此, 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对交流传动技术、变频电源的工程研究与应用, 在异步牵引电动机的研发、控制方式等方面取得了突破性的进展。1971 年德国 DE2500 型内燃机车的研制成功, 揭开了交流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传动技术在牵引动力领域的广泛应用。80 年代, 交流传动技术以法国 TGV 列车及德国 E120 型电力机车的成功应用为起点, 其优越性能得到了充分发挥, 开始在全球广泛应用。德国在 90 年代基本完成了从直流传动技术向交流传动技术的过渡与跨越, 实现了交流传动技术的工程化与产业化, 相继研制了许多系列的交流传动机车、动车组及城市轨道交通列车, 满足了铁路运输发展需要, 提升了牵引动力装置的技术水平。交流传动技术无可争议地成为现代列车的主流牵引传动方式, 正在快速替代直流传动系统。

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, 从传统的控制方式进入到了微机网络控制时代, 微机网络控制已成为主流控制模式, 正在发挥着重要作用。列车走行部作为列车运行的重要载体, 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, 采用交流传动技术、现代转向架技术和网络控制技术是现代列车的主要技术标志。

列车交流传动系统就是采用三相交流异步牵引电动机作为驱动电动机的电力传动系统, 主要有交-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供给变频器, 经逆变器变换以后, 可获得频率可调的交流电源, 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,此交流传动系统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,此类变频器的输出频率总是低于其输入频率,一般最高输出频率仅为输入频率的三分之一。因此,它适合于调速范围很小、运行转速很低的系统。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,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。

对于自备发电装置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最高频率,满足牵引调速的需要。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。

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-交流传动系统是由整流器和逆变器组成,即网侧(电源)整流器和电动机(负载)侧逆变器,逆变器直接从中间直流环节取得电能。

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。采用电容器作为滤波元件时,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;采用电感元件作为滤波元件时,中间直流环节的电流始终维持恒定,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。现代机车和动车组牵引电动机一般为异步电动机,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。电流型逆变器的电路结构相对简单一些,它更适合于为同步电动机供电,由于受习惯影响,电流型逆变器只在一些采用交流同步牵引电动机的系统或在一些城市、市郊运输装备中使用。在未来发展中,随着永磁同步电动机的成熟应用,电流型逆变器将会得到快速发展和应用。

20世纪90年代,交流传动技术成为机车技术热点,被认为是现代机车的主要标志而日益风靡世界。美国厂商研发交流传动内燃机车异军突起,1992年GM公司率先推出SD60MAC型交流传动内燃机车,之后又相继推出SD70MAC、SD80MAC、SD90MAC型交流传动内燃机车。在80年代一直静默的GE公司也不甘示弱,相继推出AC4000、AC6000型交流传动内燃机车。中国北车大连机车公司引进生产的HX_N3型交流传动内燃机车以SD90MAC为原型车,中国南车戚墅堰机车公司引进生产的HX_N5型交流传动内燃机车是以AC6000为原型车。HX_N3、HX_N5型均为6000马力(4474kW)大功率干线货运机车,最高运行速度为

120 km/h。HX_N3 型采用转向架集中供电方式（架控式），HX_N5 型采用牵引电动机独立供电方式（轴控式）。

交-直-交流传动内燃机车采用交流牵引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，再经过数台电压型逆变器将直流电变为频率、电压均可调的三相交流电，供给三相交流牵引电动机。中间的直流环节使逆变器输出的三相交流电的频率与牵引发电机发出的三相交流电的频率之间没有任何关系，并起到隔离换流影响的作用。在机车启动和调速的整个工作范围内，逆变器输出的三相交流电的频率和电压都能平滑地调节。在启动过程中为了充分利用黏着质量，逆变器的输出特性必须使电动机要按恒转矩方式运行，而在正常运行时则要按恒功率方式控制。此类机车都设置有电阻制动装置，实施电阻制动时，交流牵引电动机将作为发电机工作，将机车的惯性能量转换为三相交流电能，经牵引逆变器转换为直流电能，通过开关与制动电阻接通，对机车进行制动，最终将机车惯性能量转换为热能，通过通风机散失在大气中。交-直-交流传动内燃机车工作原理如图 0.6、图 0.7 所示。

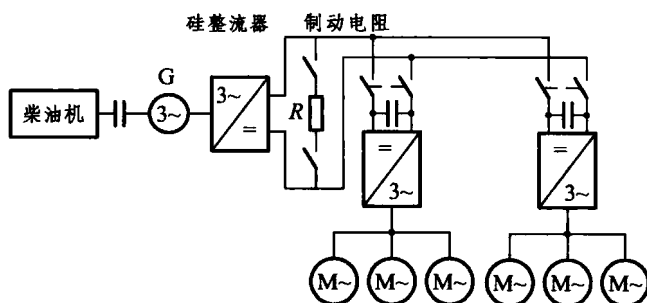


图 0.6 交-直-交流型内燃机车主电路原理图（架控式）

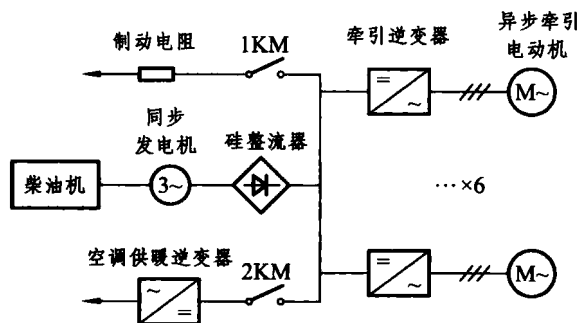


图 0.7 交-直-交流传动内燃机车主电路原理图（轴控式）

交-直-交流传动电力机车和电动车组的工作原理相同，如图 0.8 所示。其系统通过受电弓将单相高压交流电源从接触网引入车内，经牵引变压器降压，由传动控制单元控制四象限整流器完成交流到直流的变换，再控制逆变器完成直流到三相交流的 VVVF（变压变频）变换，向异步牵引电动机供电，对其转矩、转速进行控制。牵引时，系统从电网取用单相高压交流电，经牵引变压器降压、牵引变流器变流后，输出频率、电压可调的三相交流电供给牵引电动机，将电能转化成机械能产生牵引力。制动时过程相反，机车惯性机械能被转化成电能，通过牵引变流器变换和牵引变压器升压，将电能回馈到电网，产生制动作用。

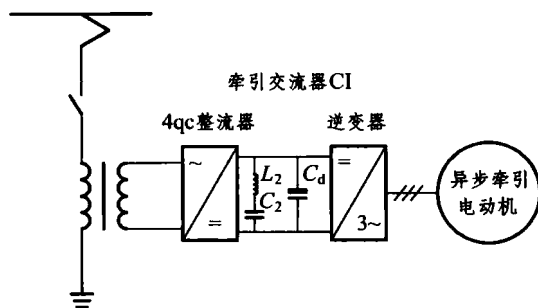


图 0.8 电力机车及 EMU 交流传动系统原理图

3. 直-交流传动系统

直-交流传动系统主要应用于地铁、城轨列车和中低速磁悬浮列车中，都采用直流供电方式。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，实现对异步牵引电动机转速与转矩的控制，完成机电能量转换，产生牵引动力并达到调速的目的。

地铁、城轨列车交流传动系统工作原理如图 0.9 所示。

交流传动地铁、轻轨列车设置了电制动系统，电制动优先采用再生制动，也可采用电阻制动。

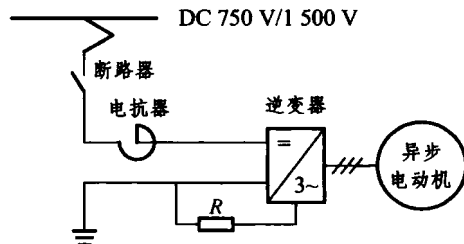


图 0.9 地铁、城轨列车交流传动系统工作原理图

0.2 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，列车电力传动系统主要采用直流传动系统，以直流牵引电动机作为驱动电动机，主要是由直流牵引电动机具有优异的调速性能所决定的。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的运行可靠性，进一步提高单机功率、转速面临着很多困难，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，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，控制理论的不断完善，变频调速电源技术取得了突破性进展，为交流异步电动机的平滑调速提供了可靠支撑，使交流传动技术日趋成熟，其优良的技术性

能完全可以与直流传动媲美,引领列车电力传动技术的发展潮流,在铁路高速、重载运输中发挥着巨大作用。

0.2.1 交流传动技术是发展趋势

交流传动是一门跨学科的综合技术,它涉及电力电子器件、变流器电路、交流牵引电动机、控制理论及微电子学等诸多学科领域。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器件的发展而发展,新器件的出现,都使交流传动技术向前迈进一步。20 世纪下半叶,电力电子器件的不断更新和迅猛发展,为采用交流电动机驱动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、强耦合的系统,输入量一般为电压和频率,输出量则是转速、位置和转矩,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环节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、直接转矩控制都是在现代控制理论基础上发展起来的很有前景的控制方法。因此,控制策略的发展,为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诸如控制信号的产生、运行参数的检测、传动方式的选择与转换以及信号的变换运算、存储等一般的控制,而且能够快速、高精度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。微型计算机技术的广泛应用和现代控制手段的进步,为变流技术(传动技术)的进步提供技术保证,加速了交流异步电动机在广调速领域的应用。

20 世纪 70 年代初,DE2500 型交流传动内燃机车的研制成功,揭开了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,交流传动技术以法国 TGV 列车及德国 E120 型电力机车的成功应用为起点,其优越性能得到了充分发挥,开始在全球广泛应用。90 年代以来,发达国家新造的高速机车、动车组、重载机车以及客货通用机车已经全部采用交流传动技术。展望未来,交流传动机车(动车组)必将成为主型牵引动力,交流传动技术必然成为电力牵引传动系统的核心技术(关键技术)。

迄今为止,交流异步鼠笼式电动机已成为运输装备交流传动系统主要的牵引电动机,甚至说是唯一仍在得以继续拓展中的电动机,其性能将更加优良。但随着稀土永磁材料技术的突破和普及,采用新型稀土永磁材料钴、钕制成的交流同步永磁电动机,将会对异步鼠笼式电动机产生严重挑战。

0.2.2 模块化使内燃、电力机车平台通用

采用新的工艺,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方向发展,提高动力车主要部件的工作可靠性,延长其工作寿命。

在采用新技术、新工艺的同时,融合内燃机车、电力机车结构平台,将内燃机车与电力机车结构平台通用,通过更换柴油机-发电机组或牵引变压器,就可同一平台上实现内燃机车与电力机车的相互转换。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,在一定功率等级的机车上将会实现主要零部件的通用化,诸如牵引电动机、牵引变流器、控制及通信系统、辅助器件、制动系统、转向架、司机室等在电力机车与内燃机车上完全通用,简化使用和降低运营维修成本,其经济效益将是很显著的。

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,可供客运、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。

0.2.3 双动力通用机车适应性更强

铁路可分为电气化铁路与非电气化铁路,两者之间由于能源供给的原因需使用不同类型的机车,故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、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的通用,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,就是在一台机车上同时设置牵引变压器和柴油发电机组,既可作电力机车使用,也可作内燃机车使用,实现真正意义上的通用机车。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 年将有 46 台双动力通用机车在北美地区投入运营。当此机车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 5 360 马力 (3 942 kW);当按内燃机车运行时,将由两台 2 100 马力 (1 544 kW) 的柴油发电机组提供动力。

0.2.4 预测设计将引领设计潮流

随着设计思维方式的改变,由过去的“经验设计”逐步转变为“预测设计”。采用并行模式,即除传统学科(电机工程学、电子学、控制工程、空气及流体力学和机械学等)外,还要利用其他诸如可靠性、维修性、保障性、安全性、价值工程和人机工程等专业学科的知识和经验,审查和修改由传统学科得出的设计方案。同时在整个开发过程中,还要把销售、用户服务、制造、供货和组装结合起来,并对各个部件的成本进行核算,估计出电力传动装置的寿命周期成本(LCC),以便在供货时,对用户提出的可靠性、维修性、有效性,所能达到的指标及其寿命周期成本等做出承诺,为用户使用、进行状态修提供指导依据。