

校企合作双元开发“互联网+”立体化教材
高等职业院校铁道机车专业“十四五”技能型人才培养新形态教材

电力机车牵引与控制

(智媒体版)

主 编 李作奇 罗林顺
主 审 华 亮



电力机车牵引与控制
在线开放课程学习平台

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

电力机车牵引与控制: 智媒体版 / 李作奇, 罗林顺
主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2022.3
ISBN 978-7-5643-8569-9

I. ①电… II. ①李… ②罗… III. ①电力机车—牵
引设备—控制系统—高等职业教育—教材 IV. ①U264.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 004509 号

Dianli Jiche Qianyin yu Kongzhi

电力机车牵引与控制

(智媒体版)

主 编 / 李作奇 罗林顺

责任编辑 / 黄淑文

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)
发行部电话: 028-87600564 028-87600533
网址: <http://www.xnjdcbs.com>
印刷: 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm
印张 17 字数 361 千
版次 2022 年 3 月第 1 版 印次 2022 年 3 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-8569-9
定价 46.00 元

课件咨询电话: 028-81435775
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

近年来我国电力机车牵引与控制技术发展迅速,大功率交流传动电力机车拥有最新的电力电子技术、车载微机控制技术、网络控制技术、交流传动技术,已成为我国牵引动力发展的主流。本书结合我国目前铁路牵引动力的实际,既包括传统直流传动SS₄改型电力机车的控制理论和电气线路,也包括新型大功率交流传动HXD_{1C}型、HXD₃型电力机车的控制理论和电气线路。

“电力机车牵引与控制”课程是铁道机车运用与维护专业的核心课程。本课程要求学生已经在掌握电工电子技术、电力电子技术、电力机车电机与电器等基础知识和基本技能的基础上,通过课堂讲授、实验、实习等教学环节,掌握电力机车工作原理、调速技术,并能够分析机车电气线路;能够操作、维护和检修机车电气线路,具备从事机车运用与维护的高素质技能型人才所必需的基本技能,并为今后的专业课学习打下良好的基础。

本书以电气控制技术为基础,以机车电力牵引控制理论为核心,以机车电气线路分析为载体,以项目化教学为模式,以工作过程为导向,融入机车电工的职业标准,实现理论与实践一体化;其内容涵盖了电力机车工作原理、调速技术、电气制动技术,典型电力机车的电气线路分析,电力机车高、低压试验程序及常见故障处理等知识。本书在内容的编排上,注意实用性,理论与实践相结合,突出分析、解决问题和实作能力的培养;在内容组织上,注意准确、精炼、通俗易懂。本书在编写过程中借鉴了许多相关书籍,搜集了大量现场资料,既适合理论教学,又贴近生产实际,可满足高职铁道机车运用与维护专业学生以及企业相关技术人员学习专业理论知识和实作技能的需要。

本书由南京铁道职业技术学院李作奇、四川铁道职业学院罗林顺担任主编,中国铁路上海局集团有限公司南京东车辆段王锐参编。南京铁道职业技术学院华亮主审。教材编写分工如下:罗林顺编写项目1、项目2,李作奇编写项目3至项目7,并负责全书统稿及校对,王锐编写项目8。

本书虽经编写人员多次讨论、修改,但由于编者水平有限,难免存在疏漏和不足之处,敬请各位专家、读者批评指正。

编 者

2022年3月

《电力机车牵引与控制（智媒体版）》视频资源索引

序号	视频名称	书中页码
1	电力牵引系统组成	002
2	交-直型电力机车工作原理	014
3	交-直-交型电力机车工作原理	044
4	SS ₄ 改型电力机车主电路	090
5	SS ₄ 改型电力机车主电路保护电路	097
6	SS ₄ 改型电力机车辅助电路	101
7	SS ₄ 改型电力机车辅助电路的保护	106
8	SS ₄ 改型电力机车控制电源	115
9	SS ₄ 改型电力机车受电弓控制电路	118
10	SS ₄ 改型电力机车主断路器合闸控制电路	120
11	SS ₄ 改型电力机车劈相机手动控制电路	122
12	SS ₄ 改型电力机车压缩机控制电路	123
13	SS ₄ 改型电力机车牵引通风机控制电路	124
14	SS ₄ 改型电力机车制动风机控制电路	126
15	SS ₄ 改型电力机车牵引控制电路	127
16	SS ₄ 改型电力机车制动控制电路	129
17	SS ₄ 改型电力机车风速延时控制电路	129

续表

序号	视频名称	书中页码
18	SS ₄ 改型电力机车预备环节控制	130
19	SS ₄ 改型电力机车线路接触器控制	133
20	SS ₄ 改型电力机车磁场削弱控制	134
21	SS ₄ 改型电力机车励磁接触器控制	135
22	SS ₄ 改型电力机车功补接触器控制	136
23	HXD _{1C} 型电力机车主电路	150
24	HXD _{1C} 型电力机车网络控制系统结构	164
25	HXD _{1C} 型电力机车网络控制系统功能	169
26	HXD ₃ 型电力机车主电路	183
27	HXD ₃ 型电力机车辅助电路	192
28	HXD ₃ 型电力机车控制电路	200
29	HXD ₃ 型电力机车控制电源电路	211
30	HXD ₃ 型电力机车常规司机指令控制	215
31	HXD ₃ 型电力机车故障复位控制	217
32	HXD ₃ 型电力机车逻辑控制和保护电路	219
33	HXD ₃ 型电力机车主变流器控制电路	222
34	HXD ₃ 型电力机车辅助变流器控制电路	223

项目 1 电力牵引控制系统认知	001
任务 1.1 电力牵引系统组成及特点认知	001
任务 1.2 电力牵引发展历程认知	005
复习思考题	012
项目 2 交-直型电力机车调速控制分析	013
任务 2.1 交-直型电力机车工作原理认知	013
任务 2.2 交-直型电力机车调速方式分析	019
任务 2.3 交-直型电力机车励磁调节分析	021
任务 2.4 交-直型电力机车相控调压分析	026
任务 2.5 交-直型电力机车功率因数的改善	031
任务 2.6 交-直型电力机车的起动及控制方式	035
复习思考题	041
项目 3 交-直-交型电力机车调速控制分析	042
任务 3.1 交-直-交型电力机车工作原理认知	042
任务 3.2 交-直-交型电力机车调速方式分析	046
任务 3.3 电压型四象限脉冲整流器认知	048
任务 3.4 电压型牵引逆变器认知	054
任务 3.5 交-直-交型电力机车牵引特性控制分析	063
复习思考题	068
项目 4 电力机车电气制动分析	069
任务 4.1 交-直型电力机车电阻制动分析	069
任务 4.2 交-直型电力机车再生制动分析	076
任务 4.3 交-直-交型电力机车再生制动分析	082
复习思考题	086

项目 5	SS ₄ 改型电力机车电气线路分析	087
任务 5.1	SS ₄ 改型电力机车主电路分析	087
任务 5.2	SS ₄ 改型电力机车辅助电路分析	098
任务 5.3	SS ₄ 改型电力机车控制电路分析	108
复习思考题		148
项目 6	HXD _{1C} 型电力机车电气线路分析	150
任务 6.1	HXD _{1C} 型电力机车主电路分析	150
任务 6.2	HXD _{1C} 型电力机车辅助电路分析	160
任务 6.3	HXD _{1C} 型电力机车网络控制系统认知	164
任务 6.4	HXD _{1C} 型电力机车控制电路分析	171
复习思考题		182
项目 7	HXD ₃ 型电力机车电气线路分析	183
任务 7.1	HXD ₃ 型电力机车主电路分析	183
任务 7.2	HXD ₃ 型电力机车辅助电路分析	192
任务 7.3	HXD ₃ 型电力机车微机网络控制系统认知	200
任务 7.4	HXD ₃ 型电力机车控制电路分析	210
复习思考题		232
项目 8	电力机车高、低压试验	234
任务 8.1	电力机车高、低压试验认知	234
任务 8.2	SS ₄ 改型电力机车高、低压试验	236
任务 8.3	HXD _{1C} 型电力机车高、低压试验	244
任务 8.4	HXD ₃ 型电力机车高、低压试验	249
任务 8.5	电力机车常见故障判断与处理	255
复习思考题		263
参考文献		264

电力牵引控制系统认知

项目描述

电力机车是一种通过外部接触网或钢轨供给电能，由牵引电动机驱动的现代化牵引动力，包括铁路运输中牵引车列的电力机车和担任客运任务的城际电动车组，以及城市交通运输中的地下铁道电动车组、无轨电车等。我们这里主要讨论铁路运输中牵引车列的电力机车。

本项目主要学习电力牵引控制系统的概念、电力机车的分类、电力牵引的特点，展示国内外电力牵引的发展历程，洞悉我国牵引动力的发展方向。

任务 1.1 电力牵引系统组成及特点认知

【任务目标】

知识目标	1. 了解电力牵引控制系统的概念。
	2. 了解电力牵引系统的组成及电力牵引的特点。
	3. 了解电力机车的分类。
素质目标	1. 培养学生养成严谨认真、精益求精的态度，促使学生职业素养的养成。
	2. 培养学生具有自主学习能力，具有一定的分析能力，善于总结经验。
	3. 能客观、公正地进行学习效果的自我评价。
能力目标	1. 能够根据不同的划分标准说出电力机车的分类。
	2. 能根据电力牵引的特点阐述电力牵引的特点。

【相关知识】

1.1.1 电力牵引控制系统的概念

在轨道交通运输中，采用电动机驱动来满足机车牵引的电气传动部分，称为电力牵引控制系统。它是以牵引电机作为控制对象，通过控制系统对电动机的速度和牵引力进行调节，以满足机车牵引和制动特性的要求。

根据驱动电机的型式不同，控制系统分两大类：采用直流（脉流）牵引电动机作驱动设备的称为直流（脉流）传动控制系统，直-直型、交-直型电力机车也称为直流传动电力机车。采用交流牵引电动机作驱动设备的称为交流传动控制系统，交-直-交型和交-交型电力机车也称为交流传动电力机车。

国产直流传动电力机车控制系统随着电力电子技术、微电子技术、计算机技术的发展而不断发展，经历了有接点控制（SS₁型电力机车）、模拟控制（SS₃型、SS₄型电力机车）、微机控制（SS₈、SS_{4B}、SS₉、SS_{7D}和SS_{7E}型电力机车）。

随着电力电子技术和交流电机调速理论等相关技术的发展，以交流电机作为牵引电机的交流传动控制系统开始取代直流传动控制系统。由于机车控制功能的复杂化和多样化，单台微机已很难完成控制任务，而是需要多台微机并行工作，一般通过网络系统实现分布式的多级控制。微机网络控制系统能综合各种信号进行机车牵引与制动的控制，实现各种自动保护，如机车防空转、防滑行保护，接地保护，过流过压保护等。此外，微机网络控制系统还对机车的重要部件进行状态监控及故障维护，其结果由中央诊断单元通过图像、文字的形式显示。



电力牵引系统组成

1.1.2 电力牵引系统的组成

电力牵引系统是由电力机车和牵引供电装置两大部分组成，电力牵引系统的组成如图 1-1-1 所示。

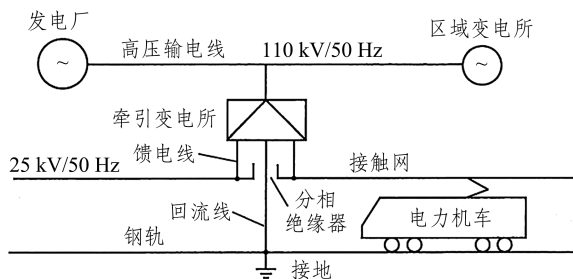


图 1-1-1 电力牵引系统的组成

牵引变电所将来自发电厂（站）或区域变电所的三相高压交流电（线电压 110 kV/50 Hz）变换成单相交流电（25 kV/50 Hz），经馈电线送入接触网；电力机车车顶上的受电弓与接触网接触，将电压引入到电力机车牵引变压器的一次侧绕组（原边线圈），经车轴上的接地电刷装置、轮对、钢轨、回流线返回牵引变电所，这样就构成电力牵引高压侧回路。

牵引变压器属降压变压器，通过牵引变压器的二次侧绕组（副边线圈）获得所需的电压。变压器一次侧与二次侧的电压比是由它们的匝数比所决定的。二次侧绕组所获得的电压再送入牵引变流装置进行变换后，向牵引电动机供电，由牵引电动机驱动轮对使机车运行。

电力机车的电气线路按其作用不同,可分为主电路、辅助电路和控制电路三大部分。

牵引电动机及其相连接的电气设备和导线组成了机车主电路,应满足机车起动、调速及制动三个基本工作状态的要求。起动、调速及制动是列车运行的基本规律,它们是通过机车主电路、辅助电路和控制电路共同作用实现的。为了充分发挥机车的功率,实现多拉快跑,就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得到不同的速度。由此可以看出,机车主电路必须保证牵引电动机的转矩和转速都可作独立的调节,而且要有宽广的调节范围。

机车主电路是电力机车上高电压、大电流的大功率动力回路。通过主电路的功率传递,将变电所的电能转变成适用于列车牵引所需要的牵引力。主电路的结构在很大程度上决定着机车的基本性能。电力机车性能的好坏,技术上难易的程度、投资的多少以及运行费用的高低和可靠性等重要技术经济指标,均与主电路的设计密切相关。

1.1.3 电力机车的分类

电力机车可按机车的不同技术特征和用途进行分类。

1. 按用途分

- (1) 客运电力机车:用来牵引客运列车。其特点是牵引力不大,运行速度高。
- (2) 货运电力机车:用来牵引重载货物列车。其特点是牵引力大,速度不高。
- (3) 客货两用电力机车:用来牵引客运或货运列车。其特点是牵引力和速度介于客、货运电力机车之间。
- (4) 调车电力机车:用来在站场上编组列车。其特点是机车的功率不大,速度和牵引力均较低。

2. 按传动形式分

- (1) 具有个别传动的电力机车:电力机车每一轮对都由单独的牵引电动机驱动。这些轮对(轴)称为动轮或动轴。
- (2) 具有组合传动的电力机车:电力机车上某几个轮对(通常为同一转向架上的几个轮对)互相连接成组,然后由一台牵引电动机驱动。

3. 按机车动轴数分

可分为四轴、六轴、八轴等电力机车。一般动轴数较多的电力机车用作货运机车,如国产干线货运电力机车 SS₄ 改型为 8 轴电力机车,轴列式 2(B₀-B₀)。动轴数较少的电力机车用作客运机车,如国产准高速机车 SS₈ 型为 4 轴电力机车,轴列式 B₀-B₀。

4. 按供电电流制-传动型式分

- (1) 直流供电-直流牵引电动机驱动的直-直型电力机车。接触网供电电压为直流 1 500 ~ 3 000 V,机车牵引电动机为直流串励牵引电动机。

(2) 交流供电-直(脉)流牵引电动机驱动的交流-直型电力机车, 又称交流-直型整流器电力机车。我国生产的韶山系列电力机车即属于此种型式。

(3) 交流供电-变流器环节-三相交流异步电动机驱动的交流-直-交型电力机车。我国生产的和谐系列大功率电力机车即属于此种型式。

(4) 交流供电-变频器环节-三相交流同步电动机驱动的交流-交型电力机车。

交流供电按接触网供电频率的不同可分为单相低频制和单相工频制。单相低频制是指供电频率为 25 Hz 或 $16\frac{2}{3}$ Hz 的交流电网供电制, 单相工频制是指供电频率为 50 Hz 的交流电网供电制。目前, 包括我国在内的世界绝大多数国家都采用供电频率为 50 Hz 的工频交流电网供电。

此外, 世界上还有多电流制电力机车, 这是针对具有不同电力牵引供电系统的铁路, 为了在两种或多种供电系统衔接区段的连续运输或其他特定需要而生产的, 主要为交直流两用电力机车。

1.1.4 电力牵引的特点

电力机车是非自带能源式机车, 电力牵引具有内燃牵引所不及的一系列优越性, 主要表现在以下几方面:

1. 功率大

内燃机车的功率受到一次能源设备(柴油机)本身容量、尺寸和重量的限制, 故机车功率不能过大。而电力机车不受上述条件的限制, 机车功率(或单位重量功率)要大得多, 目前单轴功率已达 1 000 kW(若为交流牵引电动机, 则可达 1 600 kW)。一台电力机车的牵引能力相当于 2 台(或更多一些)内燃机车的牵引能力。由于电力机车功率大、起动快、允许速度高, 所以能够多拉快跑, 极大提高了线路的通过能力和输送能力。

2. 效率高

机车效率的高低直接影响铁路运输的经济指标。由于电力牵引所需的电能是由发电厂(或电站)集中产生, 因此燃料的利用率要比内燃牵引高得多。由火电厂供电的电力牵引的效率高达 35%, 由水电站供电的电力牵引则超过 60%。对于自给式的内燃机车来说, 每台机车的热效率约为 25%, 而且柴油价格昂贵, 燃烧排放污染。

3. 过载能力强

机车在起动、牵引重载列车和通过困难区段时, 具有一定的过载能力是十分重要的。自给式的内燃机车, 一方面受牵引发电机过载能力的限制, 另一方面又受机车柴油机过载能力的限制。对于非自给式电力机车, 其能量是来自较强大的供电系统, 因而机车的过载能力是较高的。实践表明, 电力机车所需的启动加速时间约为内燃机车的 1/2, 从而能够提高列车速度。

4. 运营费用较低

使用电力牵引容易实现多机重联牵引，因而使得运输中各项经济技术指标大为提高。同时，由于电力机车的检修周期长、检修工作量少，从而减少了维修费用和人力，使机务成本大大降低。有资料表明，电力机车牵引万吨公里能耗仅为内燃机车牵引的2/3。此外，由于电力机车整备作业少，宜于长交路行驶，这样就可以减少机务段的数量，而且乘务人员和使用的机车台数也相应减少，使劳动生产率大大提高。一般情况下，电力机车的运营费用比内燃机车要低15%左右。

当然，电力牵引在应用中也存在以下问题：

(1) 离不开牵引变电所和接触网等沿线的供电设施，使其机动性较差，且线路电气化投资较大。

(2) 电力机车工作过程中产生的电流谐波对通信方面所带来的干扰问题。

(3) 晶闸管相控调压所引起的功率因数较低的问题。

一般在客货运输繁忙的主要铁路干线，线路坡道陡、隧道多又长的山区铁路干线，大运量的集中运煤专线，适宜采用电力机车牵引。

任务 1.2 电力牵引发展历程认知

【任务目标】

知识目标	1. 了解国外电力牵引的发展。
	2. 了解国内电力牵引的发展。
	3. 了解国产和谐系列大功率电力机车应用情况。
素质目标	1. 培养学生勇于创新、开拓进取的意识。
	2. 培养学生的民族自豪感，激发学生爱国热情。
	3. 能客观、公正地进行学习效果的自我评价。
能力目标	1. 能够总结国产四代电力机车的特点。
	2. 能阐述和谐系列大功率交流电力机车的应用情况。

【相关知识】

1.2.1 国外电力牵引发展历程

自1879年5月31日德国西门子和哈尔斯克公司在柏林举办的世界博览会上展出世界第一条长约300 m的电气化铁路以来，电力牵引已有一百多年的历史。

1. 电力牵引发展初期，直流制电力机车的应用

在电力机车发展初期，世界各国电气化铁道大部分采用的都是直流制电力机车，另外也有一部分三相交流制和单相低频制电力机车。由于当时科学技术条件的制约，直流制电力机车供电电压不高，三相交流制接触网设备过于复杂，单相低频制电力机车又需要单独的供电电网，因此电力机车早期发展速度较慢。

2. 单相工频交-直流制电力机车的迅速发展

为了克服直流电力机车接触网电压低的缺点，1904年瑞士开始采用单相交流制电力机车，用以提高接触网供电电压。但因工频电源使牵引电动机换向困难，所以采用单相低频交流制。1932年匈牙利试验成功了单相工频交流电力机车，引起世界各国的重视，而后德国、法国相继进行研制，1950年法国试制了引燃管整流器式电力机车，从而使直流制电力机车中牵引电动机的一系列优点和单相工频交流制供电电压较高的特点完美结合起来，形成了单相工频交-直流制电力机车，开辟了工频交流电气化的新纪元，推动了电力机车的迅速发展。从1960年德国制成半导体整流器式电力机车以来，目前世界各国电气化铁道大部分已采用单相工频交流制电力机车，接触网供电电压为25 kV。1958年美国发明晶闸管后，60年代中期晶闸管相控机车开始问世，至今已达到成熟阶段。

3. 随着电力电子技术的发展，交流传动电力机车成为现实

20世纪60年代后期，电力电子器件的不断更新和发展，使得制造大功率机车用逆变器变为现实。80年代初德国研制了采用异步电动机驱动的交流-直-交型电力机车，英国、美国、苏联、法国、日本等国也都进行了研制。我国在1991年开始研制4 000 kW交流传动电力机车，1995年完成组装，进入整机试验阶段，成为世界上少数能研制该机车的国家之一。交流传动电力机车简单、可靠，具有良好的防空转性能、牵引特性和制动特性。这些均预示着机车性能的深刻变革，因而成为了今后电力牵引的一个发展方向。

1.2.2 我国电力牵引发展历程

自1958年试制成功第一台电力机车以来，在60多年的发展历程中，我国电力牵引发展经历了四个阶段，形成了四代产品。

第一代，二极管全波整流和调压开关调幅式有级调压；

第二代，调压开关粗调和晶闸管相控微调相结合的级间平滑调压；

第三代，多段桥晶闸管相控无级调压的交流-直传动系统；

第四代，变频调速交流传动系统。

1. 国产第一代电力机车

1949年以前中国基本没有电气化铁路。中华人民共和国成立后，从1958年6月

起，对宝成铁路（宝鸡—成都）进行了电气化改造工程。1961年8月15日宝鸡—凤州段91 km电气化铁路通车。为满足新建宝成铁路采用电力牵引的需要，铁道部田心机车车辆工厂（现中车株洲电力机车有限公司）在湘潭电机厂等单位的协助下，以苏联H60型电力机车为基础，试制国产电力机车。1958年12月28日第一台电力机车试制成功，并定型为6Y₁型机车（“6Y₁”型号中的“6”代表机车有6根车轴，“Y”代表采用引燃管整流，“1”代表第一种型号）。6Y₁型机车设计为客、货两用干线电力机车，采用低压侧调压开关调压，引燃管整流，C₀-C₀轴式，机车持续功率3 410 kW，最大速度为100 km/h。由于引燃管整流器、牵引电机、调压开关等关键部件存在技术和质量问题，虽经技术改进，先后试制了7台6Y₁型电力机车，但未能投入批量生产。

随着我国电力电子工业的发展，大功率整流二极管开始进入工程实用阶段，为机车电传动技术的发展提供了必要条件。在6Y₁型电力机车基础上，我国第一代有级调压、交-直传动电力机车——SS₁型电力机车于1968年试制成功，1969年开始小批量生产。SS₁型机车采用调压开关对变压器牵引绕组进行有级调压，有33个调压级位；主整流器采用中抽式全波整流电路；C₀-C₀轴式，机车的持续功率提高到3 780 kW，最高运行速度90 km/h。至1978年止，SS₁型机车共经历了3次重大技术改造，并最终成为我国电气化铁路干线的第一代（有级调压，交-直传动）主型电力机车，为我国电力机车的发展奠定了坚实的基础。

1969年，田心机车车辆工厂在吸取法国6Y₂型机车大量先进技术的基础上进行设计制造，试制了一台SS₂型电力机车。SS₂型电力机车采用高压侧调压开关32级调压，硅整流器整流和弹性齿轮驱动，C₀-C₀轴式，持续功率4 440 kW，最高速度100 km/h。虽然由于相关技术当时还不具备批量生产的条件，SS₂型电力机车并未投入正式运营，但为我国直流传动电力机车的发展积累了宝贵的经验。

2. 国产第二代电力机车

可控型器件——晶闸管的出现，使机车电传动技术跨上了一个新台阶。为满足宝成铁路运营需要，1972年，我国从法国进口了42台6G型电力机车。1978年，在学习6G型机车先进技术和总结SS₁、SS₂型电力机车成熟经验的基础上，由株洲电力机车厂和株洲电力机车研究所共同研制的SS₃型001号机车获得成功，并开始投入小批量生产。SS₃型电力机车采用了牵引变压器低压侧调压开关8级调压与级间晶闸管相控调压相结合的平滑调压调速新技术；C₀-C₀轴式，持续功率4 320 kW，最高速度100 km/h；采用2级电阻制动；综合性能与SS₁型机车相比大幅提高。1988年，SS₃型机车开始大批量生产，成为我国第二代干线主型电力机车（级间相控调压、交-直传动）。此后，SS₃型机车进行了多次技术改进，并在此基础上设计了固定重联的SS_{3B}型机车和由SS₃型机车经固定重联改造的SS_{3C}型机车。SS₃型机车及其派生车型也成为中国当时运用最多的电力机车。

3. 国产第三代电力机车

随着大功率晶闸管性能的提高，相控技术成熟应用到机车电传动领域。

1985年9月，SS₄型机车试制成功。SS₄型机车功率6400 kW，2(B₀-B₀)轴式，最高速度100 km/h。机车采用经济四段半控桥调压，两级电阻制动和恒速、恒励磁控制等技术，牵引制动性能优良，黏着利用充分。以此为开端，我国第三代（无级调压、交-直传动）主型电力机车系列逐步形成。

20世纪80年代中后期，随着电气化铁路的大规模发展，我国分别从欧洲进口150台8K型电力机车、从日本进口85台6K型电力机车、从苏联进口150台8G型电力机车。通过学习进口机车的先进技术，我国第三代电力机车技术有了长足的进步。1993年，株洲电力机车厂对SS₄型机车进行改造，采用不等分三段桥相控调压实现了相控无级调压，设有功率因数补偿，提高了机车的功率因数；采用恒流恒速特性控制保证机车平稳起动加速和恒速运行的牵引性能；采用架控方式有利于实现机车的轴重电气补偿；采用加馈电阻制动改善了机车低速时的电制动性能；这些都进一步提升了机车的整体性能。在SS₄改进型机车的基础上，株洲电力机车厂还设计制造了采用微机控制的SS_{4B}型机车和25 t轴重的SS_{4C}型机车。SS₄系列机车广泛用于大秦、朔黄等重载线路和京广、哈大等干线的货物列车牵引，成为我国主力货运电力机车。

1990年，最高速度140 km/h、功率3200 kW、B₀-B₀轴式的SS₅型客运电力机车2台样车下线。该机车采用了大功率晶闸管和整流管组成的两段桥相控调压、无级磁场削弱、再生制动、功率因数补偿和牵引电机空心轴驱动等新技术，但由于可靠性等原因未能批量生产。在其基础上设计制造的TM1、TM2型机车曾出口伊朗，用于城际列车牵引。

1990年，为陇海铁路电气化国际招标设计的SS₆型电力机车试制成功。SS₆型机车功率4800 kW，速度100 km/h，C₀-C₀轴式，采用两段桥相控调压、功率补偿、加馈电阻制动、高压牵引电动机等技术，于1991年开始批量生产。在SS₆型机车基础上，株洲、大同工厂还设计制造了SS_{6B}型电力机车，用于陇海（兰州—连云港）、京广（北京—广州）和宝成等铁路客货列车牵引。

在吸收进口6K型机车技术的基础上，为满足山区铁路小半径曲线区段牵引需要，采用B₀-B₀-B₀轴式的SS₇型电力机车于1992年在大同机车工厂（现中车大同电力机车有限责任公司）试制成功。SS₇型机车功率4800 kW，最高速度100 km/h，采用两段桥相控调压、功率补偿、再生制动和全叠压片复励牵引电动机等技术，用于南昆铁路列车牵引。在此基础上，大同厂设计制造了25 t轴重的SS_{7B}型机车，满足120 km/h旅客列车牵引需要的SS_{7C}型机车和最高运行时速为170 km的SS_{7D}型机车。此外，还设计制造了采用C₀-C₀轴式、最高运行速度为170 km/h的SS_{7E}型机车。SS₇系列电力机车采用的转向架模式和牵引电机架悬轮对空心轴驱动装置，使其能够较好地满足山区线路货运列车、提速列车和干线提速列车的牵引需求。

为发展我国快速客运电力机车技术，1994年试制成功2台最高速度为170 km/h的SS₈型客运电力机车。SS₈型机车功率3 200 kW，B₀-B₀轴式，采用900 kW半叠片空心轴牵引电动机，采用不等分三段桥相控调压电路，具备微机控制的恒流准恒速控制特性。1998年6月24日，SS₈-0001机车在京广线许昌—小商桥间最高试验速度达到239.7 km/h，创造了中国铁路机车的最高试验速度。SS₈型机车于1997年开始批量生产，用于京广（北京—广州）、广深（广州—深圳）等线路的旅客列车牵引。

SS₉型客运电力机车于1998年12月26日竣工完成。机车持续功率为4 800 kW，最高运行速度170 km/h，C₀-C₀轴式，采用不等分三段半控桥相控调压电路，具备微机控制的恒流准恒速控制特性，并具备向旅客列车车厢供电功能。自0044号机车起，SS₉型机车进行了重大技术改进。SS₉型机车主要用于干线提速列车、直达特快列车的牵引，是我国铁路第五次大面积提速的主力车型。表1-2-1为国产韶山（SS）系列电力机车一览表。

表 1-2-1 国产韶山（SS）系列电力机车一览表

产品	年份	机型	轴列式	功率	速度/(km/h)	传动方式
第一代	1968	SS ₁	C ₀ -C ₀	3 780	90	开关有级低压侧调压，交-直传动
	1969	SS ₂	C ₀ -C ₀	4 440	100	开关有级高压侧调压，交-直传动
第二代	1978	SS ₃	C ₀ -C ₀	4 320	100	级间平滑调压，交-直传动
第三代	1985	SS ₄	2(B ₀ -B ₀)	6 400	100	相控调压，交-直传动
	1990	SS ₅	B ₀ -B ₀	3 200	140	相控调压，交-直传动
	1991	SS ₆	C ₀ -C ₀	4 800	100	相控调压，交-直传动
	1992	SS ₇	B ₀ -B ₀ -B ₀	4 800	100	相控调压，交-直传动
	1992	SS _{3B}	C ₀ -C ₀	4 320	100	相控调压，交-直传动
	1993	SS _{4改}	2(B ₀ -B ₀)	6 400	100	相控调压，交-直传动
	1994	SS ₈	B ₀ -B ₀	3 200	170	相控调压，交-直传动
	1995	SS _{6B}	C ₀ -C ₀	4 800	100	相控调压，交-直传动
	1997	SS _{4C}	2(B ₀ -B ₀)	6 400	100	相控调压，交-直传动
	1998	SS ₉	C ₀ -C ₀	4 800	170	相控调压，交-直传动

4. 国产第四代电力机车

大功率电力电子器件性能的不提高和微机控制技术的发展，在使相控机车走向成熟的同时，也为现代交流传动技术的发展提供了必要条件。交流传动是当今世界高速、重载机车技术的发展趋势，也是我国第四代电力机车的典型特征。

20世纪70年代起,我国就开始了对交流传动技术的跟踪研究。1996年,我国首台干线交流传动电力机车原型车——AC4000型交-直-交流传动电力机车试制成功,该机车功率4000kW,最高速度120km/h, B₀-B₀轴式,但未投入批量生产。

在AC4000型样车的基础上,株洲、大同、大连等工厂又试制了DJ型、DJ₁型、DJ₂型、DJ₃型等机车。2001年,株洲电力机车厂与德国西门子公司合作生产了20台DJ₁型双机重联货运电力机车,先后用于宝成、大秦(大同一秦皇岛)铁路。

此外,株洲电力机车厂还向哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦分别出口了最高运行速度为210km/h的B₀-B₀轴式KZ4A型和用于货运牵引的B₀-B₀-B₀轴式O'ZBEKISTON交流传动电力机车。

2003年铁道部根据国家经济发展的总体需求,提出跨越式发展的总体思路,进而提出中国的机车车辆装备现代化及装备制造业现代化。在铁路技术装备跨越式发展的形势下,交流传动技术的发展开始进入“快车道”,通过技术引进、消化吸收和再创新,加速了我国机车电传动技术从直流传动到交流传动的重大技术变革。

2004年4月国务院《研究铁路机车车辆装备有关问题的会议纪要》,明确了“引进先进技术、联合设计生产、打造中国品牌”基本原则,确定了引进少量原装、国内散件组装和国内生产为主的项目运作模式。根据“先进、成熟、经济、适用、可靠”的技术方针,铁道部启动了铁路动车组和大功率机车项目。在此背景下,中国中车集团与国外企业合作,引进先进技术,启动了国产化的新一代交流传动货(客)运机车——和谐系列电力机车的研制和生产。目前,和谐系列电力机车的成功下线并投入运用,标志着我国电气化铁路牵引动力达到了世界先进水平。

1.2.3 国产大功率交流传动电力机车简介

HXD₁型电力机车由株洲电力机车有限公司与德国西门子公司联合设计制造,消化吸收了德国西门子公司先进的“欧洲短跑手”系列电力机车设计与制造技术。HXD₁型机车具有交流传动牵引系统,由两节相同的4轴机车重联组成,最高运行速度120km/h,2(B₀-B₀)轴式。机车总功率为9600kW,轴重23t(加压铁后25t),电制动方式为再生制动。HXD₁型机车用于大秦铁路重载列车牵引,满足大秦线煤炭年运4亿吨牵引要求。

HXD₂型机车由大同电力机车有限责任公司与法国阿尔斯通公司联合设计制造,消化吸收了阿尔斯通公司PRIMA系列电力机车设计与制造技术,并充分考虑了中国铁路重载运输和实际环境、驾驶操控特性和信号特点。HXD₂型机车具有交流传动牵引系统,由两节相同的4轴机车重联组成,最高运行速度120km/h,2(B₀-B₀)轴式。机车总功率为10000kW,轴重23t(加压铁后25t),电制动方式为再生制动。HXD₂型机车也用于大秦铁路重载列车牵引,满足大秦线煤炭年运量4亿吨牵引要求。

HXD₃型机车由大连机车车辆有限公司和日本东芝公司联合设计制造。HXD₃型机车具有交流传动牵引系统，为采用C₀-C₀轴式的6轴机车，最高运行速度120 km/h。机车总功率为7 200 kW，轴重23 t（加压铁后25 t），电制动方式为再生制动。HXD₃型机车用于干线货物列车的牵引，可在平原线路牵引6 000 t重载货物列车。

在此基础上，株洲电力机车有限公司、大同电力机车有限公司和大连机车车辆有限公司又设计生产出轴功率1 600 kW、C₀-C₀轴式、最高运行速度120 km/h的6轴9 600 kW的HXD_{1B}型、HXD_{2B}型、HXD_{3B}型大功率交流传动电力机车，轴功率1 200 kW、C₀-C₀轴式，最高运行速度120 km/h的6轴7 200 kW的HXD_{1C}、HXD_{2C}、HXD_{3C}型大功率交流传动电力机车，以及轴功率1 200 kW、C₀-C₀轴式，最高运行速度160 km/h的6轴7 200 kW的HXD_{1D}、HXD_{3D}型大功率交流传动客运电力机车。

为满足中国铁路运输及经营发展要求，提高铁路运输服务品质，充分利用既有运输资源和机车、客车的检修资源，2015年在国家铁路集团有限公司和中车集团统一指挥下开始研制生产时速160 km动力集中动车组。目前，时速160 km动力集中动车组已正式投入商业运营，并已正式纳入“复兴号”序列，将逐步全面取代普速线路既有机车车辆。时速160 km动力集中动车组动力车是在HXD_{1G}八轴交流传动快速客运电力机车基础上进行设计的，机车轴重20 t，总功率5 600 kW，运营速度160 km/h，构造速度210 km/h。

表 1-2-2 为和谐（HXD）系列电力机车型号一览表。

表 1-2-2 和谐（HXD）系列电力机车型号一览表

型号	轴列式	功率/kW	速度/(km/h)	用途	生产厂家
HXD ₁	2(B ₀ -B ₀)	9 600	120	货运	中车株洲电力机车有限公司、德国西门子公司、中车大同电力机车有限公司、中车资阳机车有限公司
HXD _{1B}	C ₀ -C ₀	9 600	120	货运	
HXD _{1C}	C ₀ -C ₀	7 200	120	货运	
HXD _{1D}	C ₀ -C ₀	7 200	160	客运	
HXD ₂	2(B ₀ -B ₀)	10 000	120	货运	中车大同电力机车有限公司、法国阿尔斯通公司
HXD _{2B}	C ₀ -C ₀	9 600	120	货运	
HXD _{2C}	C ₀ -C ₀	7 200	120	货运	
HXD ₃	C ₀ -C ₀	7 200	120	货运	中车大连机车车辆有限公司、日本东芝公司、加拿大庞巴迪公司、中车大同电力机车有限公司、中车北京二七机车有限公司
HXD _{3B}	C ₀ -C ₀	9 600	120	货运	
HXD _{3C}	C ₀ -C ₀	7 200	120	客货	
HXD _{3D}	C ₀ -C ₀	7 200	160	客运	



复习思考题

1. 何谓电力牵引控制系统？如何分类？
2. 电力牵引有何特点？
3. 电力机车是如何分类的？
4. 简述我国四代电力机车的技术特点。
5. 列出 HXD₁ 型电力机车主要技术参数。
6. 列出 HXD₂ 型电力机车主要技术参数。
7. 列出 HXD₃ 型电力机车主要技术参数。