

国家双高“铁道机车专业群”系列 活页工作手册式立体化教材
——铁道机车运用与维护专业

机车牵引控制系统

主 编 ◎ 张铁竹 张 远

副主编 ◎ 张琼洁 王秀清 钟恩松

主 审 ◎ 伏秀良

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

前言

党的二十大报告强调“深入实施科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略，开辟发展新领域新赛道，不断塑造发展新动能新优势”并首次提出“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”的重大论断，体现了教育、科技、人才在国家现代化建设全局中的极端重要性。

建设交通强国是以习近平同志为核心的党中央立足国情、着眼全局、面向未来作出的重大战略决策，是建设现代化经济体系的先行领域，是全面建成社会主义现代化强国的重要支撑，是新时代做好交通工作的总抓手。

作为国民经济大动脉和国家重要基础设施，铁路素来被称作国民经济的“先行官”。交通强国，铁路先行，中共中央、国务院印发的《交通强国建设纲要》提出，加强新型载运工具研发，实现3万吨级重载列车、时速250公里级高速轮轨货运列车等方面的重大突破；推进装备技术升级，推广新能源、清洁能源、智能化、数字化、轻量化、环保型交通装备及成套技术装备；推广应用交通装备的智能检测监测和运维技术。

教材是人才培养的重要支撑，必须紧密对接国家发展重大战略需求，不断更新升级，更好服务于高素质高技能人才培养。编者本着紧跟铁路机车新技术的发展，为铁路运输提供坚实可靠的人才保障，快速提升企业在职员工和职业院校学生实际运用和检修的专业水平的宗旨，收集了当前中国铁路网内广泛应用的具有世界先进技术水平和谐型与复兴型交流传动机车相关技术资料，结合实际，编写了本教材。

教材对照电力机车司机、机车电工（电力）、电力机车钳工等岗位应具备的电气系统操作、维护保养、检查检修、试验、故障应急处理等能力要求及标准选定教学内容，以专业岗位真实工作任务和真实工作过程为导向，开发出电力牵引传动系统整体认知、电力机车工作原理及速度调节、HXD型电力机车牵引电传动系统、HXD型电力机车辅助电气系统、HXD型电力机车控制电气系统和HXD型电力机车电气试验及常见故障判断与处理等6个项目，22个学习任务和7个实训任务。

教材以工作任务为中心，以技能训练为引导，以基础理论知识为背景，根据任务需要把背景知识融入各个项目之中，使理论知识与岗位实践有机融合，使技能训练与职业素养培育紧密结合。

教材编写过程中，中国铁路郑州局集团公司机务部、职培部、郑州机务段、新乡机务段、洛阳机务段给予了大量指导和帮助。在此致以深切的谢意。

全书由郑州铁路职业技术学院张铁竹、中国铁路郑州局集团公司职培部张远主编，郑州铁路职业技术学院张琼洁、王秀清、钟恩松任副主编，郑州机务段伏秀良任主审。张铁竹编写项目一、项目二，张远、中国通号（郑州）电气局张筱蔚编写项目三，钟恩松编写项目四，王秀清编写项目五，张琼洁编写项目六。

由于编写水平有限，加之时间仓促，书中难免有不妥之处，恳请读者给予批评指正并提出宝贵意见。

编 者
2023 年 3 月

数字资源列表

序号	数字资源名称	资源类型		页码	项目
		视频	PPT		
1	电力机车的基本组成与工作过程	√	√	4	项目一
2	电力机车的分类	√	√	5	
3	直-直型电力机车的工作原理	√	√	15	项目二
4	交-直型电力机车的工作原理	√	√	16	
5	交-直-交型电力机车的工作原理	√	√	17	
6	HXD 型电力机车的变频调速和起动	√	√	28	
7	HXD 型电力机车的再生制动	√	√	30	
8	HXD 型电力机车的牵引特性控制曲线	√	√	44	
9	HXD 型电力机车的制动特性控制曲线	√	√	45	项目三
10	HXD ₃ 型电力机车网侧高压电路	√	√	51	
11	HXD ₃ 型电力机车四象限整流电路	√	√	53	
12	HXD ₃ 型电力机车中间直流电路	√	√	54	
13	HXD ₃ 型电力机车逆变和牵引电机电路	√	√	55	
14	HXD ₃ 型电力机车牵引变流器	√	√	59	
15	HXD ₃ 型电力机车主电路保护——电流电压保护	√	√	87	
16	HXD ₃ 型电力机车主电路保护——接地保护	√	√	87	
17	HXD ₃ 型电力机车辅助变流器电路	√	√	94	项目四
18	HXD ₃ 型电力机车辅助电动机电路	√	√	97	
19	HXD ₃ 型电力机车辅助加热装置电路	√	√	97	
20	HXD ₃ 型电力机车辅助电路的保护	√	√	99	
21	机车控制监视系统 (TCMS) (一)	√	√	118	项目五
22	机车控制监视系统 (TCMS) (二)	√	√	120	
23	控制电源电路的电路原理框图	√	√	128	
24	控制电源电路的电路图之电源选择电路	√	√	130	
25	控制电源电路的电路图之预充电电路和 DC 750 V-DC 110 V 的变流电路	√	√	131	
26	预备控制电路	√	√	135	

续表

序号	数字资源名称	资源类型		页码	项目
		视频	PPT		
27	机车逻辑控制和保护电路之机车的逻辑控制电路 I	√	√	140	
28	机车逻辑控制和保护电路之机车的逻辑控制电路 II	√	√	140	
29	受电弓的控制	√	√	140	
30	主断路器的控制	√	√	140	
31	空气压缩机的控制	√	√	140	
32	主变流器、辅助变流器的控制电路	√	√	143	
33	主变流器逻辑控制	√	√	143	
34	辅助变流器逻辑控制	√	√	146	
35	全自动过分相装置及控制	√	√	158	
36	主断路器控制器	√	√	161	
37	HXD ₃ 型电力机车低压试验准备工作	√	√	187	项目六
38	HXD ₃ 型电力机车低压试验顺序及要求	√	√	188	
39	HXD ₃ 型电力机车高压试验（一）	√	√	191	
40	HXD ₃ 型电力机车高压试验（二）	√	√	191	
41	电力机车故障处理的目的、基本要求与方法	√	√	194	
42	电力机车电气故障的分类及处理方法	√	√	194	
43	HXD ₃ 型电力机车故障处理的基本操作和流程	√	√	194	
44	HXD ₃ 型电力机车受电弓故障处理	√	√	194	
45	HXD ₃ 型电力机车主断路器故障处理	√	√	195	

目录

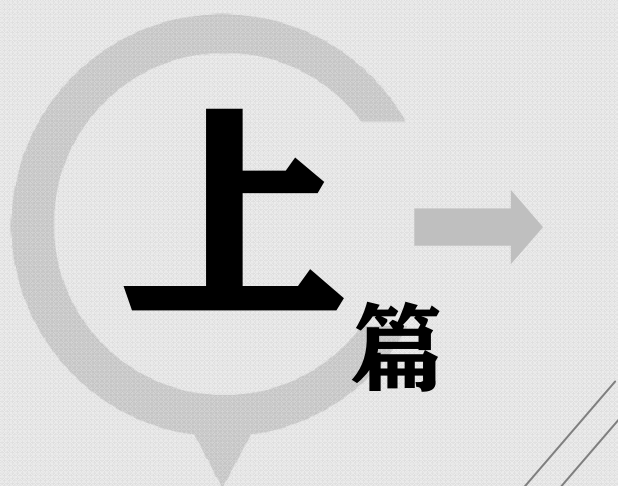
上篇 理论篇

项目一 电力牵引传动系统整体认知	3
任务一 电力机车基本组成与工作过程认知	3
任务二 电力牵引的优越性	6
任务三 我国电力牵引发展历程	8
思考与练习	12
项目二 电力机车工作原理及速度调节	14
任务一 电力机车的工作原理	15
任务二 电力机车的调速方法	19
任务三 电力机车的起动方法	26
任务四 电力机车的电气制动方法	29
任务五 电力机车的特性控制技术及特性曲线	40
思考与练习	47
项目三 HXD 型电力机车牵引电传动系统	49
任务一 牵引电路分析与检查	49
任务二 牵引变流器维护保养与检查	57
思考与练习	88
项目四 HXD 型电力机车辅助电气系统	89
任务一 辅助电路的分析与检查	89
任务二 辅助电器的维护与保养	100
任务三 电磁接触器的维护与保养	112
思考与练习	116

项目五 HXD 型电力机车控制电气系统	117
任务一 机车控制监视系统	117
任务二 机车控制电路分析	128
任务三 机车控制电器维护	155
思考与练习	169
项目六 HXD 型电力机车电气试验及常见故障判断与处理	171
任务一 HXD _{1C} 型电力机车低压试验	171
任务二 HXD _{1C} 型电力机车高压试验	174
任务三 HXD _{1C} 型电力机车常见故障判断与处理	177
任务四 HXD ₃ 型电力机车低压试验	187
任务五 HXD ₃ 型电力机车高压试验	190
任务六 HXD ₃ 型电力机车常见故障判断与处理	193
思考与练习	198

下篇 实训篇

实训一 识别我国电力机车类型，分析比较各型机车性能	201
实训二 探究电力机车控制方法	203
实训三 牵引变流器的维护保养和检查	204
实训四 辅助电路的分析与检查	209
实训五 电磁接触器的检修	210
实训六 机车控制监视显示屏操作练习	214
实训七 机械式继电器的检修	215
参考文献	219



理 论 篇



项目一 电力牵引传动系统整体认知

【项目描述】

本项目主要学习电力机车的基本组成、工作过程、电力牵引的优越性，展示我国主型电力机车的主要技术特征与性能指标，描绘电力牵引技术的发展历程与未来发展方向。

【教学目标】

1. 知识目标

- (1) 掌握电力机车基本组成与工作过程。
- (2) 了解电力牵引的优越性。
- (3) 了解我国电力牵引发展历程。
- (4) 了解电力牵引技术的进步与未来发展前景。
- (5) 了解最新交流传动大功率电力机车技术性能及技术参数。

2. 能力目标

- (1) 能画出电力机车简图并标出其主要组成部分。
- (2) 能阐明牵引传动系统的工作过程。
- (3) 能通过查阅资料、网上浏览收集各种电力机车的技术资料，整理出我国干线运用电力机车的主要性能指标；通过对比这些性能指标，从而总结我国电力机车技术进步与技术升级的主要特征，结合目前铁路牵引动力发展实际，洞悉我国牵引动力的发展方向。

任务一 电力机车基本组成与工作过程认知

【任务目标】

1. 知识目标

- (1) 掌握电力机车基本组成与工作过程。
- (2) 掌握电力机车的分类。

2. 能力目标

- (1) 能画出电力机车简图并标出其主要组成部分。
- (2) 能阐明牵引传动系统的工作过程。

【相关知识】

一、什么是电力机车

一般来说，电力机车就是本身不带原动机，靠升起的受电弓接受接触网送来的 25 kV 交流电流作为能源，经机车内部一系列变换环节后向机车的牵引电动机提供电源，由牵引电动机通过传动装置驱动机车的车轮转动，从而产生牵引动力的一种动力装置。图 1-1 所示为一台 HXD₃ 型电力机车的外形。



图 1-1 HXD₃ 型电力机车外形图

二、电力机车的组成与工作过程

如图 1-2 所示，电力机车的主要组成部分包括：受电弓、主断路器等高压电器部分；司机控制器、自动开关等低压电器部分；车体及转向架等机械部分；变流器与牵引电机等。从图中可以看出，其牵引传动系统的构成主要有受电弓、主断路器、主变压器、变流器及其控制电路、牵引电机等。接触网导线上的电流经受电弓进入机车后再经过主断路器进入主变压器，交流电从主变压器的牵引绕组经过变流装置后，向牵引电动机供电，使牵引电动机产生电磁转矩，将电能转变为机械能，经过传动装置的传递驱动机车动轮转动。

其工作流程为：接触网电能→受电弓→主断路器→主变压器降压→变流器→牵引电机→传动装置→驱动轮对产生电磁转矩→通过轮轨接触产生牵引力→牵引列车运行。



微课：电力机车的
组成与工作过程



PPT：电力机车的
组成与工作过程

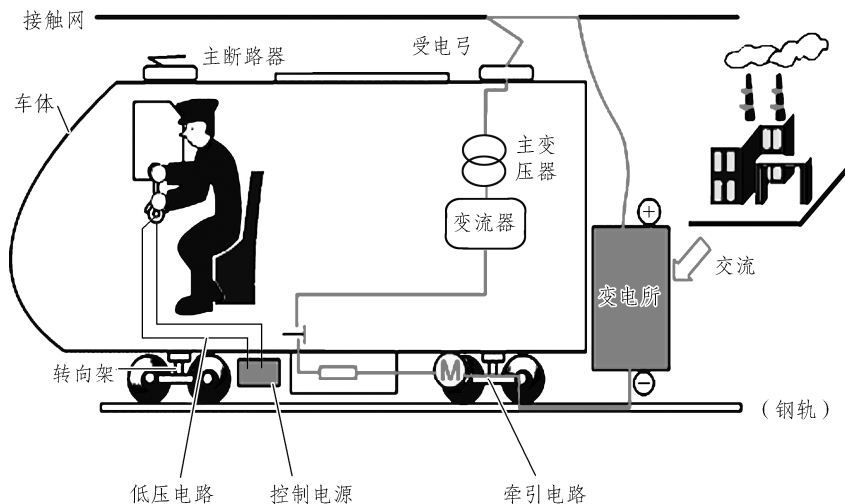


图 1-2 电力机车及其主要组成部分示意图

三、电力机车的类型

电力机车可按机车的不同技术指标、特征和用途进行分类。

1. 按用途分类

按用途可分为客运电力机车、货运电力机车、客货混用电力机车和调车电力机车等。

客运电力机车：用来牵引旅客列车。其特点是牵引力不大，运行速度高。

货运电力机车：用来牵引重载货物列车。其特点是牵引力大，运行速度不高。

客货混用电力机车：用来牵引旅客或货物列车。其牵引力和速度介于客、货电力机车之间。

调车电力机车：用来在站场上编组列车。机车的功率不大，牵引力和速度均较低。

2. 按传动方式分类

按传动方式可分为具有个别传动的电力机车和具有组合传动的电力机车。

具有个别传动的电力机车：电力机车每一轮对由单独的牵引电动机驱动。这些轮轴称为动轮或动轴。

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，然后由一台电动机来驱动。

3. 按机车动轴数分类

按机车动轴数不同可分为 4 轴、6 轴、8 轴和 12 轴等电力机车。一般动轴数较多的电力机车用作货运机车，动轴数较少的电力机车用作客运机车。

4. 按供电电流制-传动形式分类

按供电电流制-传动形式不同可分为以下几类。



微课：电力机车的分类 PPT：电力机车的分类

直流供电-直流牵引电机的直-直型电力机车。接触网供电电压为直流 1 500 ~ 3 000 V，机车牵引电机为直流串励牵引电机。

交流供电-直（脉）流牵引电机的交-直型电力机车，又称单相交直型整流器电力机车。其牵引电机为脉流串励或复励牵引电机。我国生产的韶山系列电力机车即属于此种形式。

交流供电-变流器环节-三相交流异步电机的交-直-交型电力机车。

交流供电-变频环节-三相交流同步电机的交-交型电力机车。

任务二 电力牵引的优越性

【任务目标】

1. 知识目标

了解电力牵引的优越性。

2. 能力目标

能对比蒸汽机车和内燃机车，找出电力机车的特点，总结电力牵引的优越性。

【相关知识】

一、电力机车的特点

在各种牵引动力中，电力机车与蒸汽机车、内燃机车的根本不同点在于它牵引列车时所需的能量不是由机车本身产生的，而是通过接触网（或其他供电装置）供给的，这种机车称为非自给式机车。而蒸汽机车、内燃机车在牵引列车时所需要的能量则是由机车本身装载的燃料（如煤、柴油等）燃烧而产生的，这种机车称为自给式机车。由于电力机车与其他机车这种根本的区别，客观上决定了它取用能量的万能性。对于自给式机车来说，只有机车上储存的燃料才能作为它能量的来源，这就决定了它取用能量的单一性。但对于电力机车来说，它所需要的电能却可以由一切形式的能量转换而来，如可以由热力、水力、天然气甚至于地热、原子能、太阳能、核能等转换而来，只要有相应的发电站，便可以利用相应的能量。由于这种取用能量的非自给性，使得电力机车具有一系列的特点。

1. 功率大

现代铁路运输的发展要求机车具有强大的功率。由于电力机车是非自给式机车，没有燃料储备，因而在同样的机车质量下，其功率要比自给式机车大。机车按单位质量所具有的功率称为比功率，这是衡量机车技术水平的一个标志。目前，电力机车的比功率一般达到 40 ~ 60 kW/t，而较好的内燃机车，其比功率也只有 25 ~ 30 kW/t。按每轴功率来说，交-直型电力机车已达到 900 kW，交流传动机车最高已达到 1 600 kW，较好的内燃机车的每轴功率为 440 ~ 580 kW。从整台机车来说，电力机车的轮周功率最高已达 9 600 kW 甚至 10 000 kW 以上，而我国生产的大功率内燃机车最高功率为 4 800 kW。

2. 速度快

提高机车运行速度是铁路运输的另一重要方向。由于电力机车功率大，因而可以获得较

高的速度。目前，客运电力机车运行速度已经可以达到 160~250 km/h，货运电力机车也可以达到 120~140 km/h，随着新型电力机车的不断出现，电力牵引的高速动车组运行速度已达到 300~400 km/h。1995 年，代表我国机车工业赶超世界先进水平的 SS8 型准高速电力机车落成，在环行道上创造了 212.6 km/h 的最高时速；1998 年 6 月，又在京广线郑武段上创造了 240 km/h 的试验速度。2022 年中国南车制造的 CIT500（CRH380AM）型高速动车组的试验速度达到了 605 km/h，打破了法国高速列车 TGV 在 2007 年 4 月 3 日创造的 574.8 km/h 的世界记录。

3. 效率高

机车效率的高低直接影响到铁路运输的经济指标。对于自给式机车来说，每台机车的平均热效率实际上是基本固定的，例如蒸汽机车的平均热效率为 8%~10%，内燃机车的平均效率为 25%左右。电力机车本身的效率是很高的，但考虑到整个电力牵引系统，其平均效率则不是固定的，它与供电系统的电能来源有关，在由水力发电站供电的情况下，电力牵引的效率可达到 60.70%，在由高参数火力发电站供电时，其效率为 25%左右，由低参数火力发电站供电时，其效率为 16%~18%。由此可见，在电力牵引的电能来源平均来自各种电站的情况下，其效率要高于内燃机车和蒸汽机车。

4. 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。自给式机车的过载能力要受两方面的限制：一方面受机车发动机（如蒸汽机、内燃机车的牵引发电机或液力变扭器）过载能力的限制；另一方面又受机车所带的能量装置（如锅炉、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。

二、电力牵引的优越性

由于电力机车具有上述一系列的特点，故在铁路运输中显示出很大的优越性和良好的运营效果。根据电力机车的运行经验，其优越性表现在下述几个方面。

1. 运输能力强

电力机车功率大、速度高，最符合铁路货运重载的要求，可以提高牵引定数，缩短区间运行时间，因而使线路通过能力大大提高，其完成铁路运量的效果更为显著。法国、德国、日本等国电气化铁路里程占全国总运量的 30%~40%，但完成铁路运量却达到全国总运量的 52%~83%。我国宝成铁路电气化后，完成的货运量为蒸汽机车牵引的 3 倍。1980 年开通的宝天电气化铁路，牵引定数由双机 2 600 t 提高到 3 250 t，年运输能力由 570 万 t 提高到 1 400 万 t。有资料表明，1 条电气化铁路的运输能力，相当于 1.5 条内燃机车或 3 条蒸汽机车牵引铁路的运输能力。此外，电力牵引还不受外界条件的限制，在山区和高寒地区比蒸汽机车和内燃机车更为优越。

2. 经济效益显著

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。据宝鸡电力机务段统计，电力牵引的成本仅为蒸汽牵引成本的 56%。仅石家庄电力机务段的 48 台电力机车，一个月即可节约 43.8 万元。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，为蒸汽机车牵引的 1/3。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目，实现长交路轮乘制改革，使机车乘务人员和使用的机车台数也相应减少，劳动生产率大大提高。

3. 能源利用合理

电力牵引的能源可以来自多方面，因而实行电力牵引可以合理地利用能源，特别是可以利用丰富而廉价的水力资源和天然气资源，即使由火力发电站供电，发电站也可以使用质量较差的煤作燃料，蒸汽机车则要消耗优质煤。

使用电力牵引时，燃料的消耗也较蒸汽机车和内燃机车低得多。我国宝成铁路使用电力牵引代替蒸汽牵引后，每年可节省优质煤 10 余万吨。在第二次世界大战后，由于石油价格低廉，使得一些国家采用了以内燃牵引为主的方针，但随着工业及国防对石油需求的日益增加，特别是 20 世纪 70 年代以来，世界性石油危机使石油价格暴涨，各国对铁路电力和内燃牵引重新进行了经济评价，电力牵引更加受到青睐，因而日本、法国、德国等发达国家都趋向发展电气化铁道和电力牵引。

4. 有利于环境保护

蒸汽机车和内燃机车工作时，均要排出大量的煤烟和有害气体造成空气污染。使用电力牵引时则排除了这种情况，增强了环境保护。特别是在机车运行中，当机车进入市区和人口稠密地区时，电力机车的噪声干扰也大大低于蒸汽牵引和内燃牵引，改善了乘务人员的劳动条件和铁路沿线居民的生活环境。因而使用电力牵引的交通工具被誉为绿色大众交通。

5. 提高了行车安全性

宝成铁路电气化后，列车正点率大幅度提高，1962—1964 年正点率为 98.2%，以后一直保持着较高的水平。电力牵引装有电气制动，提高了长大坡道上的运行速度，保证了行车安全，解决了由蒸汽牵引而带来的大量车辆、轮、轴等事故，并且大大减少了因使用空气制动而产生的闸瓦熔化引起的火灾事故，因此电力牵引使行车更安全。

任务三 我国电力牵引发展历程

【任务目标】

1. 知识目标

- (1) 了解我国电力牵引发展历程。
- (2) 了解电力牵引技术的进步与未来发展前景。
- (3) 了解最新交流传动大功率电力机车技术性能及技术参数。

2. 能力目标

- (1) 能通过查阅资料、网上浏览收集各种电力机车的技术资料，整理出我国干线运用电力机车的主要性能指标。

(2) 通过对比这些性能指标, 总结我国电力机车技术进步与技术升级的主要特征, 结合目前铁路牵引动力发展实际, 洞悉我国牵引动力的发展方向。

【相关知识】

自 1879 年 5 月在柏林举办的世界博览会上, 由德国西门子和哈尔斯克公司展出了世界第一条长约 300 m 的电气化铁路以来, 电力牵引已有了一百多年的历史。在电力牵引发展初期, 主要是采用直流电力机车, 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, 因此电力牵引初期发展速度较慢。直流制电力牵引经历了一个时期的运用和发展, 到 20 世纪 20 年代中期, 接触网电压由过去的几百伏提高到了 3 000 V, 世界各国电气化铁道大部分采用的都是直流制, 接触网电压为 1 500 ~ 3 000 V。为了克服直流电力牵引接触网电压低的缺点, 1904 年瑞士开始采用单相交流制电力牵引, 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, 此后德国、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, 从而使直流制电力牵引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善地结合起来, 形成了单相工频交-直流制电力牵引, 开辟了工频交流电气化的新纪元, 推动了电力牵引的迅速发展。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牵引供电系统, 接触网供电电压 25 kV。1958 年美国发明晶闸管后, 晶闸管相控机车于 60 年代中期问世, 至今交流供电、直流牵引的直流传动技术已完全成熟。晶闸管的发明使制造大功率机车变为现实。80 年代初德国率先成功研制出交-直-交电力机车, 之后英国、美国、苏联、法国、日本等国也都进行了研制。交流传动比直流传动具有极大的优越性, 目前世界先进国家新造的大功率电力机车几乎都采用了三相交流传动技术, 单轴功率达到 1 000 ~ 1 600 kW 的大功率客货通用型变频调速电力机车已广泛投入商业应用。在 250 ~ 300 km/h 及其以上的高速领域, 交流传动的电动车组独领风骚, 在 140 ~ 220 km/h 的快速客货运输领域, 交-直型电力机车(或其他直流传动车)也正在被三相交流传动技术所取代。

我国的电气化铁路从 1958 年开始筹建, 1961 年 8 月 15 日宝鸡—凤州段 91 km 电气化铁路通车, 经过近 60 多年的不懈努力, 我国的电气化铁路得到迅速发展。电气化里程在 2001 年末已达到了 1.7 万 km, 跃居亚洲第一, 世界第三, 电气化率为 24%; 2010 年底, 铁路营业里程达到 9.5 万 km, 其中电气化里程达到 4 万 km, 客运专线 9 800 km, 铁路电气化率达到 49.4%; 到 2022 年底全国铁路营业里程 15.5 万 km, 其中高速铁路 4.2 万 km, 电化率 73.8%。《新时代交通强国铁路先行规划纲要》提出, 到 2035 年, 全国铁路网将达到 20 万 km 左右, 其中高铁 7 万 km 左右。

我国电力机车的研究与电气化铁道同步, 也始于 1958 年。第一台干线交-直型电力机车 6Y1 型, 由湘潭电机厂(负责电气及总装)、株洲田心机车车辆工厂(负责机械部分)共同研制。1968 年, 经过对 6Y1 型 10 年的研究改进, 在中国半导体工业发展的条件下, 将引燃管整流改为大功率半导体整流, 试制出我国第一代电力机车, 命名为韶山 1 型, 代号 SS₁。1969 年株洲电力机车工厂与株洲电力机车研究所试制了一台韶山 2 型电力机车试验车, 在此基础上应用晶闸管可控整流技术, 1978 年研制成功韶山 3 型电力机车, 1984 年开始批量生产。

1985年试制韶山4型电力机车,1990年试制韶山5型、韶山6型电力机车,1994年研制出韶山8型准高速电力机车,1996年开始生产。截至20世纪90年代末期,我国电力机车的研究、生产已成为世界上主要力量,已形成了4、6、8轴的韶山型系列电力车型谱。已经有SS₁、SS₃、SS₄(SS_{4B}、SS_{4改})、SS₆(SS_{6B})、SS₇(SS_{7B}、SS_{7C}、SS_{7D}、SS_{7E})、SS₈、SS₉(SS_{9G})等交传动系列干线客货运电力机车投入运营。

进入20世纪90年代,国外交流传动的发展已经进入了成熟期,交流传动已占据了电力机车主导地位,尤其是在铁路高速和重载牵引方面显示了很大的优越性。我国交流传动电力机车的研制和生产也取得了重大进展,实现了牵引动力从交传动到交流传动的转换,使生产货运机车单轴功率1200~1600kW、客运机车单轴功率1200~1400kW的电力机车成为主流车。到2005年,我国已经有自主研发生产的九方、澳星、天梭号、SS₃等交流传动电力机车间世并进行试运,同时成功引进了世界上最先进的时速200km以上动车组技术,大功率交流传动电力机车技术,引进技术项目已转入国产化设计并大量生产和运用HXD₁、HXD₂、HXD₃“和谐型”大功率交流电力机车。

纵观我国电力牵引60年的发展历程,大体经历了四个阶段:

第一阶段是从1958年到70年代末,共20多年。这一阶段是我国电力机车发展的起步期。第一台干线交流电力机车由湘潭电机厂(负责电气和总装)、株洲田心机车车辆工厂(负责机械部分)共同研制。1958年试制成功韶山型引燃管整流器式电力机车,该车参照前苏联H60型电力机车设计。1969年株洲电力机车工厂与株洲电力机车研究所试制了一台SS₂型电力机车。从此,我国电力机车从无到有、从模仿前苏联的技术入手,经过三次大的技术改造,生产出了性能稳定、运行可靠的SS₁型电力机车,作为客货牵引动力的主型干线机车。到1988年止,共生产SS₁型机车828台。

第二阶段是从70年代末到80年代末,这是我国电力机车发展的成长期。这一阶段发展的主要目标是:研制我国自己的相控机车,提高机车功率和可靠性,充分发挥电力机车的优越性。这时期的代表机型是SS₃和SS₄型电力机车。

SS₃型电力机车采用调压开关级间平滑调压方式,是调压开关调压向相控调压过渡的方案。这种调压方式实现了调压开关无弧断开,提高了工作可靠性,既保留了调压开关调压功率因数高、整流电压脉动小、对通信干扰小的优点,又具有平滑无级调压、能充分利用机车黏着重量的优点。如改装后的SS₁型031号电力机车,采用级间平滑调压试验结果表明,与原来有级调压相比,起动牵引力提高了13%~18%,坡停起动时机车功率提高了2~4倍。但由于该调压方式仍采用调压开关作级间转换,主电路结构较复杂。目前SS₃机车已全部改成了全相控方式(即SS_{3B}型或SS₃₄₀₀₀型),改进的项目主要包括:8级级间平滑调压改为三段不等分桥相控调压、机车特性控制;两级电阻制动改为加馈电阻制动;中心销牵引装置改为低位平拉杆牵引装置等。

SS₄型电力机车是我国自行研究的第一代重载货运、全相控调压、Bo转向架机车。该车由相同的两节车组成,每节车上只有一台劈相机,用一台通风机作先导机,当劈相机故障时代替劈相机为辅助机组提供三相电源。由于该车从20世纪80年代初开始研制,其技术水平仍属70年代开发研究的层次,且由于运输需要,从样机到大批量生产的过程太短,初期生产的158台车至今留有些技术问题没有彻底解决。针对早期存在的质量问题,1993年对原SS₄型机车进行了重大改进,俗称SS₄改进型(SS_{4G}、SS_{4改})。改进的主要项目有:经济四段桥

相控改为不等分三段桥相控；加装功率因数补偿装置；二级电阻制动改为加馈电阻制动；恒流、恒压控制改为恒流准恒速特性控制；加装空转（滑行）保护装置，轴重转移补偿装置；Z形低位斜杆牵引装置改为推挽式低位斜杆牵引装置等。

第三阶段从20世纪90年代中期到21世纪初这段时间，是电力牵引发展的全盛期。通过消化吸收和应用6K、8K等国外电力机车的先进技术、自主研发交流传动技术，我国电力机车的研发水平有了长足进步。在这一阶段，电力机车的开发年年出新，机型全面换代，是我国电力机车发展的全盛时期。所采用的新技术主要有：8K机车的电子控制柜、大功率晶闸管及硅机组、受电弓、空气断路器、预布线、预布管工艺、单边刚性齿轮传动及滚动抱轴承结构；6K机车的3Bo转向架；SS_{6B}机车的ZD114型牵引电动机；8G机车的牵引装置；车载微机控制系统；列车供电技术；轮对空心轴高速传动技术；LCU逻辑控制单元等。结合我国传统的牵引电动机并联的主电路型式，应用新技术相继研制或改进了SS₅、SS₈、SS_{3B}、SS₆、SS_{6B}、SS₇、SS₄改、SS_{4B}、SS_{7C}、SS_{7D}、SS_{7E}、SS₉等交直传动电力机车和AC4000型交-直-交传动原型电力机车及DJ、DJ1、DJ2等型交流传动电力机车。我国研制生产的交直传动电力机车简表如表1-1所示。

表 1-1 国产交直传动电力机车简表

型号	轴式	功率/kW	速度/(km/h)	调压方式	传动方式	电机电压/V	首台出厂日期	备注
SS ₁	C ₀ C ₀	3 900	100	33级有级调压	抱轴悬挂，双边斜齿	1 500	1961	
SS ₃	C ₀ C ₀	4 800	100	8级加级间无级调压	抱轴悬挂，双边斜齿	1 500	1978	
SS _{3B}	C ₀ C ₀ +C ₀ C ₀	4 800	100	3段顺控桥	抱轴悬挂，双边斜齿	1 500	2002	
SS ₆	C ₀ C ₀	4 800	100	2段桥	抱轴悬挂，单边直齿	1 500	1990	带功补
SS _{6B}	C ₀ C ₀	4 800	100	3段顺控桥	抱轴悬挂，单边直齿	1 020	1994	功补，加馈制动
SS ₇	B ₀ B ₀ B ₀	4 800	100	2段桥	抱轴悬挂，单边直齿	1 020	1992	功补，再生
SS _{7D}	B ₀ B ₀ B ₀	4 800	170	3段顺控桥	轮对空心轴	1 030	1999	复励电机，加馈
SS _{7E}	C ₀ C ₀	4 800	170	3段顺控桥	轮对空心轴	1 030	2002	复励电机，加馈
SS ₄	B ₀ B ₀ +B ₀ B ₀	6 400	100	3段顺控桥	抱轴悬挂，双边斜齿	1 020	1985	
SS _{4G}	B ₀ B ₀ +B ₀ B ₀	6 400	100	3段顺控桥	抱轴悬挂，双边斜齿	1 020	1993	功补，加馈
SS _{4B}	B ₀ B ₀ +B ₀ B ₀	6 400	100	3段顺控桥	抱轴悬挂，单边直齿	1 020	1995	功补，加馈
SS ₈	B ₀ B ₀	3 600	177	3段桥	轮对空心轴	950	1994	加馈
SS ₉	C ₀ C ₀	5 400	177	3段桥	轮对空心轴	990	1999	加馈

第四阶段，自2004年以来，我们与日本、德国、法国等合作，引进了世界一流大功率交流传动技术和动车组技术，同时进行一些国产化改造工作。北车大连机车车辆有限公司与日本东芝、南车株洲与德国西门子、北车大同与法国阿尔斯通等公司合资研发生产我国新一代大功率交流传动电力机车，最大持续功率为9 600~10 000 kW、轴重(23+2)t、牵引定数2万t、

最高时速为 120 km 的大功率交流传动重载电力机车，命名为“和谐型”（HXD₁），HXD₃ 为我国大连机车车辆有限公司与日本东芝联合设计生产的 6 轴交流传动机车，HXD₁、HXD₂ 为我国株洲机车厂与德国西门子、大同机车厂与法国阿尔斯通公司联合设计生产的 8 轴交流传动机车。从 2006 年开始到“十一五”末，有超过 1 000 列的大功率交流传动电力机车陆续下线投入运用，拉开了我国牵引动力从交直传动到交流传动转换的序幕，对我国牵引动力技术进步和运输能力的快速提高起到了极大的促进作用，引发我国铁路牵引动力和运载工具发生深刻、巨大的变革。目前我国已形成 HXD₁（HXD_{1B}、HXD_{1C}、HXD_{1D}、HXD_{1F}、HXD_{1G}）、HXD₂（HXD_{2B}、HXD_{2C}、HXD_{2D}、HXD_{2F}）、HXD₃（HXD_{3B}、HXD_{3C}、HXD_{3D}、HXD_{3A(E)}、HXD_{3G}）系列大功率交流传动电力机车。我国研制生产的交直交传动电力机车简表如表 1-2 所示。

表 1-2 国产交-直-交传动电力机车简表

型号	轴式	功率/kW	最高速度/(km/h)	轴重/t	客/货
HXD ₁	2 (B ₀ B ₀)	9 600	120	23/25	货运
HXD _{1B}	C ₀ C ₀	9 600	120	25	货运
HXD _{1C}	C ₀ C ₀	7 200	120	23/25	货运
HXD _{1D}	C ₀ C ₀	7 200	160	21	客运
HXD _{1F}	2 (B ₀ B ₀)	9 600	100	30	重载货运
HXD _{1G}	2 (B ₀ B ₀)	11 200	210	19.5	客运
HXD ₂	2 (B ₀ B ₀)	9 600	120	23/25	货运
HXD _{2B}	C ₀ C ₀	9 600	120	23/25	货运
HXD _{2C}	C ₀ C ₀	7 200	120	23/25	货运
HXD _{2D}	C ₀ C ₀	7 200	160	22	客运
HXD _{2F}	2 (B ₀ B ₀)	9 600	100	30	重载货运
HXD ₃	C ₀ C ₀	7 200	120	23/25	货运
HXD _{3B}	C ₀ C ₀	9 600	120	25	货运
HXD _{3C}	C ₀ C ₀	7 200	120	23/25	货运
HXD _{3D}	C ₀ C ₀	7 200	160	21	客运
HXD _{3A(E)}	2 (B ₀ B ₀)	9 600	120	25	货运
HXD _{3G}	2 (B ₀ B ₀)	11 200	210	19.5	客运

【思考与练习】

1. 收集我国干线运营电力机车的外形图片和技术资料。
2. 分析比较我国干线各型机车的技术特点和参数。
3. 简述我国电力牵引技术进步和升级的主要方面。
4. 撰写我国牵引动力现状与发展的分析报告。
5. 什么是电力机车？

6. 试述电力机车的工作原理。
7. 电力机车如何分类?
8. 电力牵引有哪些特点?
9. 电力牵引有哪些优越性?
10. 列出 HXD₁ 型、HXD₂ 型和 HXD₃ 型电力机车主要技术参数。



项目二 电力机车工作原理及速度调节

【项目描述】

列车的整个运行过程，概括起来只存在起动、调速、制动三种基本的运行状态。这三种基本运行状态实质都是速度的调节，起动和制动不过是调速的两种特殊形式而已。因此，电力机车速度调节是牵引列车运行时最为根本的任务之一。电力机车是以牵引电动机为传动设备的，所以电力机车的调速本质上是牵引电动机的调速。电力机车一般有两套制动系统：一是空气制动系统即机械制动系统，包括闸瓦制动和盘形制动；二是电气制动系统，包括电阻制动和再生制动。根据如何消耗发电机所产生的电能划分出两种电气制动方式，即电阻制动和再生制动。通过本项目对电力机车的基本组成、工作原理和调速方法的学习，初步掌握机车的起动、运行和制动操作。

【教学目标】

1. 知识目标

- (1) 掌握四类电力机车的工作过程。
- (2) 掌握直流电力机车磁场削弱调速的方法。
- (3) 掌握直流电力机车移相调压调速的方法。
- (4) 掌握交流电力机车的变频调速方法。
- (5) 掌握电力机车的起动方法。
- (6) 掌握电力机车的电气制动方法。
- (7) 理解电力机车特性控制曲线与控制方法。

2. 能力目标

- (1) 能分析各类电力机车的工作过程。
- (2) 能分析直流电力机车磁场削弱调速的方法和技术特点。
- (3) 能分析直流电力机车移相调压调速的方法及技术特点。
- (4) 能分析交流电力机车的变频调速方法。
- (5) 能分析电力机车的起动方法。
- (6) 能分析电力机车的电气制动方法。
- (7) 会起动电力机车并对其速度进行调节。
- (8) 能撰写特性控制曲线与控制方法的总结报告。

任务一 电力机车的工作原理

【任务目标】

1. 知识目标

掌握四类电力机车的工作过程。

2. 能力目标

(1) 能分析各类电力机车的工作过程。

(2) 能根据各类电力机车的工作原理，总结各类电力机车的优缺点。

【相关知识】

一、直-直型电力机车

直-直型电力机车通常称为直流电力机车，是现代电力机车最为简单的一种。它使用的是直流电源和直流串励牵引电动机。目前有些工矿电力机车、地铁电动车组和城市无轨电车仍采用这种型式。



微课：直-直型电力
机车的工作原理



PPT：直-直型电力
机车的工作原理

图 2-1 所示为一般工矿用四轴直流电力机车的工作原理示意图。工作过程为：机车由受电弓 AP 从接触网取得直流电，经断路器 QF、起动电阻 R 向 4 台直流牵引电动机 $M_1 \sim M_4$ 供电，牵引电流经钢轨流回变电所。当 4 台牵引电动机接通电源后即行旋转，把电能转变为机械能，再分别通过各自的齿轮传动装置，驱动机车动轮牵引列车运行。

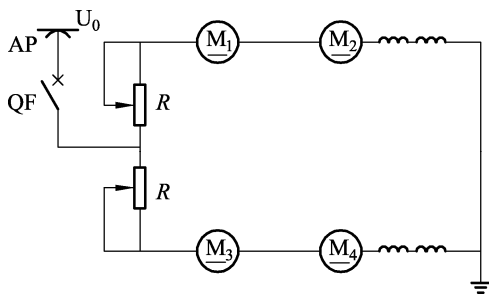


图 2-1 直流电力机车工作原理图

通过分析直流电力机车的工作原理，可以得出直流电力机车具有以下特点。

(1) 机车结构简单，造价低，经济性好。

(2) 采用适合于牵引的直流串励电动机，牵引性能好，调速方便。

(3) 控制简单，运行可靠。

(4) 供电效率低。由于受牵引电动机端电压的限制，接触网电压一般为 1 500 ~ 3 000 V。传输一定功率时电流较大，接触网导线耗电量较大，因此供电效率低。

(5) 基建投资大。为了减少接触网上的电压降，电气化区段的牵引变电所数量较多，造成基建投资大。

(6) 有级调速。由于早期机车使用调压电阻起动、调速，因此调节过程中的能量损耗使效率降低，同时也难以实现连续、平滑的调节。随着电力电子技术的发展，应用直流斩波技术进行调速，可以对牵引电动机端电压进行连续、平滑地调节，从而实现无级调速。

综上所述，直流电力机车由于受牵引电动机端电压的限制，网压不可能太高，从而限制了机车功率的进一步提高。随着现代铁路运输事业的发展，直流电力机车显然已不适应干线大功率的要求，一般应用于工矿及城市交通运输。

二、交-直型电力机车

交-直型电力机车即整流器电力机车，其能量传递是将接触网供给的单相工频交流电，经机车内部的牵引变压器降压，经整流装置将交流电转换为脉动直流电，经平波电抗器后向直流（脉流）牵引电动机供电，从而产生牵引力牵引列车运行。其工作原理简图如图 2-2 所示。



微课：交-直型电力
机车的工作原理



PPT：交-直型电力
机车的工作原理

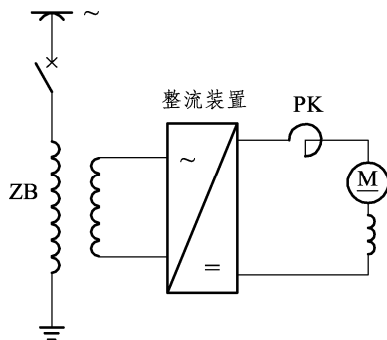


图 2-2 整流器电力机车工作原理示意图

因为牵引电动机取得的电能是经降压、整流获得的，故牵引电动机的端电压受牵引变压器、整流线路的影响，其机车特性区别于直流电力机车。

(1) 整流器电力机车的变流过程在机车内完成，而直-直型电力机车的变流过程在牵引变电所进行，因此整流器电力机车是一个集变压、变流、牵引为一体的综合装置，不仅大大简化了牵引变电所的供电设备，而且由于采用交流供电，提高了接触网的供电电压，使一定功率的电能得以采用小电流输送，这样既可减小接触网导线的截面、节省有色金属用量，也可减少电能损耗，提高电力机车的供电效率。

(2) 由于机车内设有变压器，调压十分方便，因此牵引电动机的工作电压不再受接触网电压的限制，可以选择最有利的工作电压，使牵引电动机的重量/造价比降低，工作更为可靠。

(3) 牵引电动机采用适合牵引的串励电动机，可以获得良好的牵引性能和起动性能，尤其起动时采用调节整流电压的方式，省略了起动电阻，不仅减轻了电气设备的重量、降低了起动能耗，而且改善了电力机车的起动性能，提高了机车的运行可靠性。

但是，由于整流器电力机车整流装置的输出电压为一脉动电压，因而流过牵引电动机的电流是一脉动电流。脉动电流不仅使牵引电机的损耗增加，而且使牵引电机换向恶化，因此

在整流器电力机车上需装设平波电抗器 PK 和固定分路电阻以限制电流的脉动，改善电动机的工作条件。同时，在牵引电动机的结构上亦作了特殊设计。

三、交-直-交型电力机车

交-直-交型电力机车属于交流传动电力机车，由各种变流器供电，机车和动车组采用同步或异步电机做牵引动力。目前现有的交-直-交型机车和动车组有电压型、电流型两种基本结构。



微课：交-直-交型
电力机车的工作原理



PPT：交-直-交型
电力机车的工作原理

1. 具有异步牵引电机电力机车的工作原理

仅以电压型交-直-交变流器供电、三相异步电机作牵引电机的机车为例进行分析，其原理如图 2-3 所示。

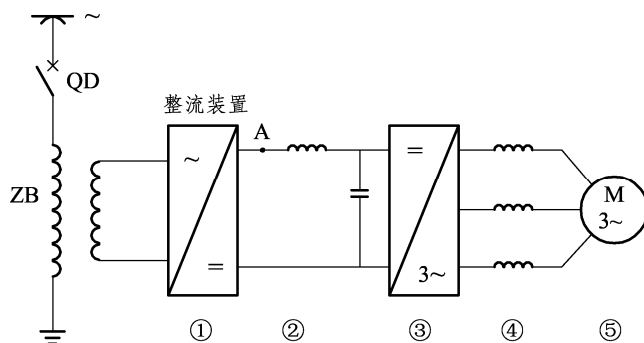


图 2-3 电压型异步电动机电力机车原理图

机车在工作时，受电弓将网压引入机车变压器一次侧绕组，经变压器二次侧绕组降压后送入①环节，将交流电转换为脉动直流电，经②环节平滑 A 处的脉动，送入③环节，将直流电逆变为电压和频率可调的三相交流电，经④环节平波电抗器，供给⑤环节三相异步牵引电动机，实现牵引运行。在这个系统中，机车先将电网的交流能量转换为直流能量，然后进一步转换成电压和频率可调的交流能量。

各环节的作用分述如下：

① 整流电路，基本作用是将交流电转换为直流电。实现电路可以是不可控整流桥、相控整流桥、四象限脉冲变流器。

② 直流环节滤波器，基本作用是平滑 A 处的纹波（脉动），消除或减少谐波含量（5 次谐波），改善机车的功率因数。

③ 逆变器，用于将直流电转换为三相交流电，同时为了机车调速的需要，它应具有较宽的调频范围和调压范围，一般采用正弦波脉宽调制（PWM）。随着电力半导体器件（GTO）的开发，可以采用电压相量控制技术（VVC PWM），降低电机损耗，减少网压波动的影响。

④ 平波电抗器，有三大作用，即降低电机、电缆中高频成分；控制噪声传播；抑制电机起动过程中的谐波分量，使频繁断开电机电路时不损坏变频器。三者通过三相霍尔电流传感

器对变频器输出端采取完善的短路保护措施。

系统的工作特点为：

(1) 由于异步电动机无换向器，所以对于相同功率的电机，异步电动机重量较轻、体积小，使机车转向架簧下部分重量相应减少，在机车通过曲线时，轮轨之间侧向压力也相应减少，这对高速行车尤为重要。同时，由于电动机体积小，能选择更为合适的悬挂方式，从而简化了转向架结构。

(2) 机车能发挥较高的输出功率。异步牵引电动机不存在换向问题，所以高速行车时电机效率较高；同时，牵引电动机因无换向器，空间利用好，使机车功率得以进一步提高。再生制动时亦能输出较大的电功率。

(3) 机车具有优异的牵引性能和制动特性。由于异步电动机具有很稳定的机械特性，因而有自然防空转和防滑行的性能，黏着利用好，既减少了轮箍的损伤，同时又有利于提高列车的加速度，缩短机车起动和制动时间。

(4) 简化了主线路。异步电机的正、反转及牵引、制动状态的转换，通过机车控制电路就能实现，不需要改变主线路，所以机车主线路中的两位置转换开关可省去。

2. 具有同步牵引电机电力机车的工作原理

同步电机电力机车是一种交-交型电力机车，工作原理如图 2-4 所示。

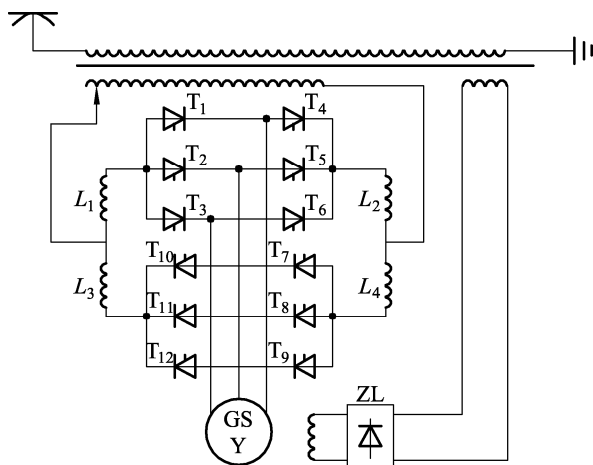


图 2-4 同步电动机电力机车工作原理图

机车工作时，单相交流电由接触网经受电弓送入牵引变压器的高压绕组，再经轨道电路流回牵引变电所。接触网电压经变压器降压后送入变频变流装置，变频变流装置将单相交流电转换为三相交流电，供给三相同步电动机使用。同步电机的励磁绕组由变压器的单独绕组供电，经整流装置，提供可调的直流电压。

变频变流装置利用两组反并联整流桥中可控制的触发电路，按一定相序使同步电机三相绕组依次通电，从而使电机的定子获得旋转磁场。改变变频变流装置的输出电压和频率可以调节机车速度。同时调节同步电机的励磁电流也可以实现机车调速。

与异步电机电力机车相比，交流同步电机电力机车没有中间环节，直接由变频变流装置

将单相交流电变为三相交流电，因此结构简单，并能获得在工频电流下较宽的调频范围。但是，由于同步电机仍有滑环和电刷装置，在结构、空间利用、维修等方面都不及异步电机。

任务二 电力机车的调速方法

【任务目标】

1. 知识目标

- (1) 了解电力机车调速的基本要求。
- (2) 掌握直流电机的调速方法和交流电机的调速方法。
- (3) 掌握直流电力机车磁场削弱调速的方法。
- (4) 掌握直流电力机车移相调压调速的方法。
- (5) 掌握交流电力机车的变频调速方法。

2. 能力目标

- (1) 能分析直流电机和交流电机调速方法的区别。
- (2) 能分析直流电力机车磁场削弱调速的方法和特点。
- (3) 能分析直流电力机车移相调压调速的方法和特点。
- (4) 能分析交流电力机车的变频调速方法。
- (5) 会采用电力机车的调速方法对机车速度进行调节。

【相关知识】

电力机车无论采用何种调速方式，从运行的角度出发，必须满足下列基本要求。

- (1) 宽广的调速范围。只有具备宽广的调速范围，才能满足列车运行速度范围广的需要。
- (2) 冲击力小，牵引力变化平滑。速度调节应力求平稳，不间断牵引电动机的供电，并且有尽可能多的速度运行级，从而避免电流和牵引力的冲击。
- (3) 调速经济。在保证速度范围的情况下，附加设备要少，且无附加能量损耗。
- (4) 运行可靠，控制简单，操作方便。

一、具有直（脉）流牵引电机机车的调速方法

直-直型和交-直型电力机车上采用直（脉）流牵引电动机。其转速公式为

$$n = \frac{U_d - I_a \Sigma R}{C_e \Phi} \quad (\text{r/min})$$

式中 U_d ——牵引电动机电压（V）；

I_a ——牵引电动机电枢电流（A）；

ΣR ——牵引电动机电路总电阻（ Ω ）；

Φ ——牵引电动机每极磁通（Wb）；

C_e ——牵引电动机结构常数，其值为 $PN/60a$ （ a 为电枢绕组支路数）。

由此可知，直-直型和交-直型电力机车的调速方案有下列几种。

(一) 改变牵引电动机回路电阻 ΣR

在牵引电动机回路中串入起动电阻，通过改变电阻阻值的方法来调节机车的速度。因为牵引电机回路电压较高，电流较大，附加调节电阻的损耗使电机效率降低，所以用这种方法调速不经济；又因为调节电阻调速是有级的，造成机车牵引力有冲击。因此，在大功率电力机车上不采用这种方法，而广泛采用改变牵引电动机的端电压以及削弱牵引电动机磁场的调速方法。

(二) 改变牵引电动机的端电压 U_d

直流电力机车的牵引电动机电源直接取自接触网，所以可以采用改变牵引电动机的组合方式（串联、串-并联、并联）来改变牵引电动机的端电压。这种调速方法无能量消耗，但只能做有级调节，且调速级有限（一般为 2~3 级），还要配合相应的转换电路。

在交-直型整流器电力机车上，接触网电压需经变压器降压和整流装置整流后，再供给牵引电动机，因而这种机车可用改变变压器一次侧、二次侧电压的方式进行有级调速，或者利用晶闸管整流元件，通过改变晶闸管控制角的方法来改变整流输出电压，从而进行平滑无级调速。

1. 变压器高压侧调压

变压器低压绕组（二次侧）匝数不变，通过改变高压绕组（一次侧）匝数来调节变压器输出电压的方法叫高压侧调压，原理如图 2-5 所示。

2. 变压器低压侧调压

变压器高压绕组匝数不变，通过改变低压绕组匝数来调节变压器输出电压的方法叫低压侧调压，原理如图 2-6 所示。

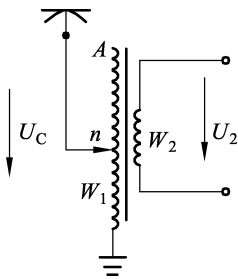


图 2-5 高压侧调压原理图

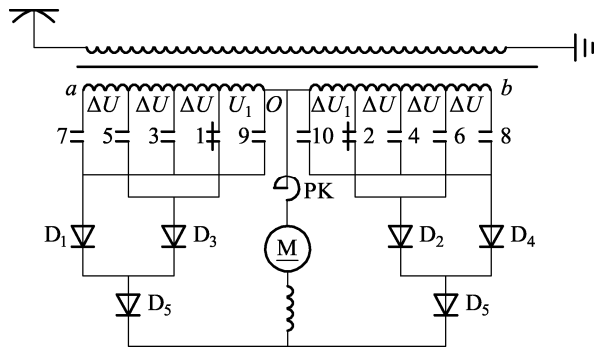


图 2-6 低压侧调压原理图

3. 交-直型整流器电力机车的相控调压

采用无级调速的电力机车，整流电路为可控整流。根据整流元件是否完全可控，又分为半控整流和全控整流电路。

1) 全控整流电路

图 2-7 (b) 所示为理想全控桥，晶闸管 T_1 、 T_4 组成一对桥臂，晶闸管 T_2 、 T_3 组成另一对桥臂。当变压器二次侧电压 u_2 为正半周时，控制角为 α 的瞬间给 T_1T_4 发送触发脉冲， T_1 、

T_4 即导通，这时电流从电源 a 端经 T_1 、 L_d 、 M 、 T_4 流回电源 b 端，这期间 T_2 、 T_3 均承受反压而截止。当电源电压过零变负时，因平波电抗器 L_d 的作用，使 T_1 、 T_4 仍承受正向电压而导通，因而 u_d 波形出现负值部分，此时晶闸管 T_2 、 T_3 上虽都已承受正向电压，但由于触发脉冲尚未到来而未导通；当 $\omega t = \pi + \alpha$ 时，触发 T_2 、 T_3 使之导通， T_2 、 T_3 导通后立即使 T_1 、 T_4 承受反向电压而关断，电流从电源 b 端经 T_3 、 L_d 、 M 、 T_2 流回电源 a 端。

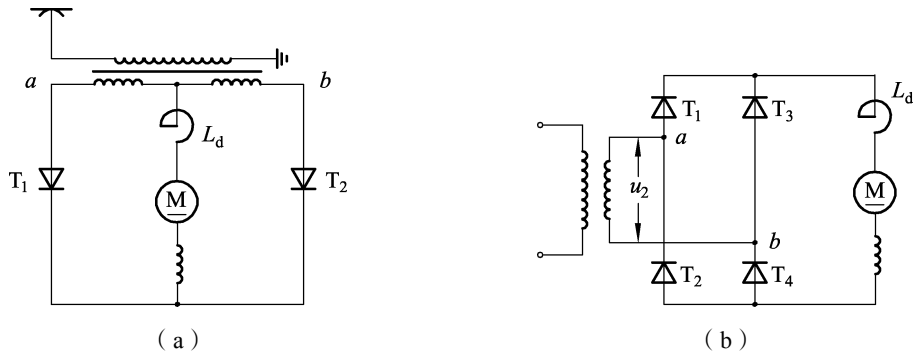


图 2-7 单相全控整流电路

2) 半控桥式整流电路

图 2-8 给出了两种接法的半控桥式整流电路，图 (a) 为不共阴极整流电路接法，图 (b) 为共阴极整流电路接法。其中，不共阴极半控桥式整流电路在电力机车上被广泛采用。

分析图 (a) 可以看出，在正半周控制角为 α 时触发晶闸管，则 T_1 、 D_2 导通，整流电流流过，桥臂 T_2 、 D_1 承受反向电压截止。当电源电压 u_1 下降到零并变负时，由于电感的作用，二极管 D_1 导通，晶闸管 T_1 关断，而晶闸管 T_2 尚未触发，因此二极管 D_1 、 D_2 同时导通，此时回路电流不经过变压器绕组而是经 L_d 、电机 M 、二极管 D_1 、 D_2 构成回路。在此期间 D_1 、 D_2 仅起续流作用，变压器绕组电流为零，输出电压为零，牵引电机端电压为零。

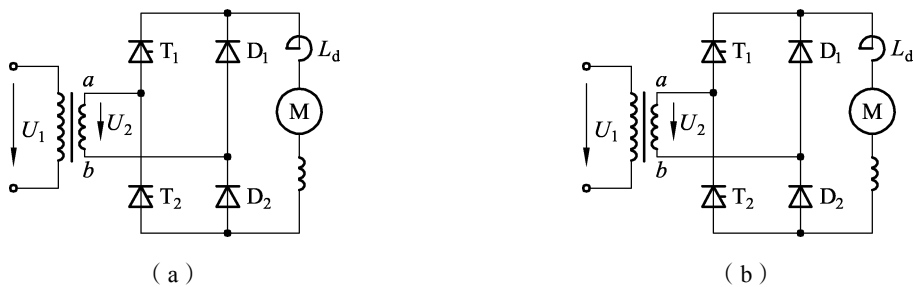


图 2-8 半控桥式整流电路

当电源电压 u_2 在负半周时， T_2 承受正向电压，在相应控制角为 α 时触发 T_2 导通， D_2 承受反压截止，电流经 D_1 、 L_d 、 M 、 T_2 流回变压器。到电源电压 u_2 又变正时，仍由 D_1 、 D_2 提供续流回路，变压器输出变为零，直到下一个周波晶闸管触发脉冲到来。

3) 多段桥顺序控制

为了改善机车的功率因数，降低谐波干扰，机车上广泛应用多段整流桥顺序控制，即把桥段数增加到 n 段， n 越大，效果越好。下面介绍理想情况下三段不等分桥。

随着桥段数的增多功率因数将有所提高，但是段数增多会使牵引变压器二次侧绕组的分

段数相应增加，整流臂数、元件数量增多，因而引起机车主电路复杂、控制复杂。在实际应用中，一般采用多段不等分桥整流电路。图 2-9 所示为三段不等分桥。变压器二次侧绕组由两段 a_4x_4 、 a_2x_2 组成，其中一段 a_4x_4 接成中抽式半控桥，另一段 a_2x_2 接成一般半控桥整流电路，因中抽式绕组可看作两段绕组 a_4b_4 、 b_4x_4 ，故实际变压器二次侧绕组是三段不等分，各

段绕组的电压分配比例为 1 : 1 : 2，即 $U_{a_4b_4} = U_{b_4x_4} = \frac{1}{2}U_{a_2x_2} = \frac{1}{4}U_2$ 。

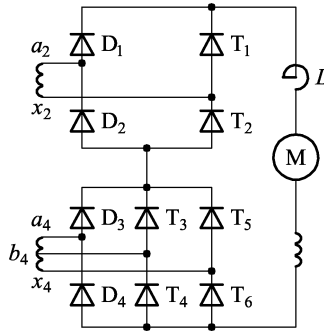


图 2-9 三段不等分半控桥整流调压电路图

$D_1 \sim D_4$ 提供直流续流通道。三段不等分半控桥式调压整流电路的升压顺序控制如下：

第 I 段： a_2x_2 - $T_1T_2D_3D_4$ 工作，大桥调压， $T_3 \sim T_6$ 晶闸管封锁，负载电流流过 D_3D_4 、 $T_1T_2D_1D_2$ 、 a_2x_2 。整流输出电压的平均值为

$$U_d = 0.9U_{a_2x_2} \frac{1 + \cos \alpha_1}{2} = \frac{1}{2} 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha_1}{2}$$

$$0 \leq \alpha_1 \leq \pi, \quad \alpha_2 = \alpha_3 = \pi$$

当 $\alpha_1 = \pi$ 时， $U_d = 0$ ； $\alpha_1 = 0$ 时， $U_d = 0.45U_2$ 。

第 II 段：维持 T_1 、 T_2 满开放， a_4b_4 - $T_3T_4D_3D_4$ 四臂小桥调压； T_5 、 T_6 封锁，负载电流流过 $T_1T_2D_1D_2$ 、 a_2x_2 、 $D_3D_4T_3T_4$ 、 a_4b_4 。整流输出电压平均值为

$$\begin{aligned} U_d &= 0.45U_2 + 0.9U_{a_4b_4} \frac{1 + \cos \alpha_2}{2} \\ &= 0.45U_2 + 0.9 \times \frac{1}{4}U_2 \frac{1 + \cos \alpha_2}{2} \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = 0, \quad 0 \leq \alpha_2 \leq \pi, \quad \alpha_3 = \pi$$

当 $\alpha_2 = \pi$ 时， $U_d = 0.45U_2$ ； $\alpha_2 = 0$ 时， $U_d = 0.675U_2$ 。

第 III 段：维持 $T_1 \sim T_4$ ，满开放， b_4x_4 - $T_5T_6D_3D_4$ 调压桥调压，负载电流流过三段变压器绕组和三段半控桥。此时整流电压平均值为

$$\begin{aligned} U_d &= 0.675U_2 + 0.9U_{b_4x_4} \frac{1 + \cos \alpha_3}{2} \\ &= 0.675U_2 + 0.9 \times \frac{1}{4}U_2 \frac{1 + \cos \alpha_3}{2} \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0, \quad 0 \leq \alpha_3 \leq \pi$$

当 $\alpha_3=\pi$ 时, $U_d=0.675U_2$; $\alpha_3=0$ 时, $U_d=0.9U_2$ 。

三段不等分桥的功率因数比二段桥较高, 波形畸变偏小了。此种整流调压方案被广泛采用。国产 SS₄、SS₈、SS₃4000、SS₉ 系列电力机车均采用此种调压方案。8K 机车也采用三段不等分桥, 所不同的是 8K 机车调压整流的第一段桥为全控桥, 移相范围为 $\frac{\pi}{2} \sim 0$ 。当 $\alpha_1=0$ 时, 顺序开放第二段桥, 此时维持全控桥满开放, 即相当于工作在不控桥状态。

(三) 改变磁通量 Φ

这种方法在直流电力机车和整流器电力机车上都得到应用, 即所谓的磁场削弱调速。一般情况下, 要进行磁场削弱调速, 是在牵引电动机端电压已达到额定电压、而牵引电动机电流尚未达到额定值时实施。磁场削弱的目的是扩大机车的运行范围, 充分利用机车功率。

磁场削弱的方法主要有改变励磁绕组匝数和改变励磁绕组的电流两种。

改变励磁绕组匝数可将牵引电动机励磁绕组分段, 通过改变牵引电动机励磁绕组的有效匝数, 使牵引电动机电枢电流只通过一部分励磁绕组(有效匝数)来进行磁场削弱。通常直流电力机车可以利用牵引电动机励磁绕组分段法进行磁场削弱调速。采用励磁绕组分段法的优点是磁场削弱系数精确, 但使电机内部结构复杂。一般采用电机串-并联转换法获得, 但用此法获得的磁场削弱级数有限, 并要求各电机励磁绕组的电阻值精确, 否则, 电机励磁绕组电阻值的微小差别, 都将引起电机磁场削弱系数不一致。

改变励磁绕组的电流, 也就是使牵引电动机电枢电流中的一部分流过牵引电动机的励磁绕组, 从而完成磁场削弱。

改变励磁绕组的电流可以用以下几种方法。

1. 电阻分路法(磁场分路法)

电阻分路法就是在励磁绕组的两端并联电阻进行分路, 从而达到削弱磁场的目的。

电阻分路法因为电路结构简单, 磁削系数调节非常方便, 同时附加电能损耗很小, 调速后的效率不致降低, 是一种经济的调速方法, 因而在电力机车上得到广泛应用。应当指出, 电阻分路法要求各电机的分路电阻值必须精确一致, 否则会造成各电机磁场削弱程度不一致。当电路处在过渡过程时, 应充分考虑励磁绕组的电感值。例如, 当网压波动时, 如网压突然上升造成机车工作电流突增, 使电机电枢电流增加, 励磁绕组的自感电势将阻止流过绕组的电流增长, 而分路电阻支路没有电感元件, 故电机中增加的电流大部分从分路电阻中流过。这样主极磁场便不能很快加强, 造成反电势不足, 致使电机严重过载, 电枢电流过大, 还有可能引起牵引电机环火。

2. 磁感应分路法

为了弥补电阻分路法的不足, 采用在分路电阻支路串入适当的电感线圈, 使磁削时分路支路的电路性质与励磁绕组的属性一致, 便能顺利度过过渡过程。这种磁场削弱方法称为磁感应分路法。目前, SS_{6B} 型电力机车就采用这种方法。

无论采用励磁绕组分段法或电阻(磁感应)分路法磁削, 通过改变励磁绕组的段数或改变分路电阻值, 均可获得不同程度的磁场削弱, 但是若磁场削弱时由满磁场一次过渡到最深度的削弱磁场, 就会产生很大的电流冲击和牵引力冲击, 因此, 通常采用分级磁削。级数越

多，磁场削弱时电流和牵引力的冲击越小，但是级数过多会造成控制线路复杂、附加设备增多，故一般磁场削弱取三级左右。从充分利用机车黏着的角度看，即使采用分级磁场削弱，也仍然会造成负载电流的冲击，使机车特性不连续，对牵引电机运行带来不利影响，同时影响机车黏着的充分利用。

3. 无级磁场削弱法

无级磁场削弱就是利用晶闸管元件的连续、实时、可控，对牵引电动机的励磁电流根据要求的 β 值进行分路，从而达到无级削弱磁场的目的，此种方法也称晶闸管分路法。利用晶闸管分路法可以使牵引电动机进行平滑无级的磁场削弱。法国的 8K 型机车，国产的 SS₅、SS₈、SS₉ 型准高速机车均采用无级磁场削弱。

使用励磁调节方法调节机车速度是以牵引电机主极磁场的减少来获得机车高速运行的，并且磁场削弱越深，机车的速度越高。但是磁场削弱深度是有限的，否则由于牵引电机主极磁通过分削弱，在机车高速运行、大电流情况下会使牵引电机换向恶化，容易发生电机环火。因此，一般情况下脉流牵引电机的最小磁场削弱系数 β_{\min} 应为 0.35 ~ 0.40。实用值为 0.44 ~ 0.50，保留一定的裕量。

无论调节电压或调节磁通量，都不产生附加的能量损耗，因而得到的速度级称为经济运行级。机车在经济运行级上可以长时间运行。

二、具有交流牵引电机机车的调速方法

交-直-交型交流传动电力机车采用三相异步牵引电动机，其转速公式为

$$n = (1-s)n_1 = (1-s) \frac{60f_1}{p}$$

式中 n ——牵引电动机转子转速；

s ——异步电动机的转差率；

p ——定子极对数；

f_1 ——电源频率；

n_1 ——异步电动机同步转速。

由此可知，可以采用下列方法进行机车调速：

- ① 改变定子磁极对数 p ；
- ② 改变转差率 s ；
- ③ 改变电源频率 f_1 。

改变定子磁极对数即改变电机定子绕组的接法，会使异步电机结构复杂，换接电路过于复杂，且为有级调速，以致丧失运用的可靠性。

改变转差率调速包括转子串电阻调速、串极调速和定子调压调速。串极调速是在转子回路中串入附加电势进行调速，串电阻和串极调速只适合绕线转子异步电动机。改变转差率调速级数有限，因而无法实现宽广的调速范围。

经济可行的方法就是改变异步电动机供电电源频率，即所谓的变频调速方法。在磁极对数 p 一定的条件下，如果能平滑改变 f_1 ，就可以平滑调节电动机的转速 n 。且 f_1 变化范围越大，异步电机调速范围也越宽广，这就可以满足机车牵引电动机转速从零到最大值的调速要

求。但是对于异步电机，调频与调压是相联系的，输出电压应随着输出频率的改变而改变。随着大功率半导体器件的开发应用，近代交直交型电力机车已经很好地解决了变频问题，使得机车的调速具有平滑无级的特性。

连续调节电源频率，可以平滑地调节同步转速 n_1 ，从而使电动机获得平滑调速。但工程实践中，仅仅改变电源频率还不能达到满意的调速特性，因为只改变电源频率，将导致电动机运行性能的恶化，其原因可分析如下：

电动机正常运行时，由于 $U_1 \approx E_1 = 4.44f_1 N_1 K_{p1} \Phi_m$ ，若 U_1 不变，则当频率 f_1 减小时，主磁通 Φ_m 将增加，这将导致磁路过分饱和，励磁电流增大，功率因数降低，铁心损耗增大；而当频率 f_1 增大时，主磁通 Φ_m 将减少，电磁转矩及最大转矩下降，过载能力降低，电动机的容量也得不到充分利用。因此，为了使电动机能保持较好的运行性能，要求在调节 f_1 的同时，改变定子电压 U_1 ，以维持 Φ_m 不变 ($U_1/f_1 = \text{常量}$)，或者保持电动机的过载能力不变。

一般认为，在任何类型负载下变频调速时，若能保持电动机的过载能力不变，则电动机的运行性能较为理想。为使变频调速时保持过载能力不变，即

$$\lambda_m = \frac{T_m}{T_N} = \frac{T'_{\max}}{T'_N} = \lambda'_m$$

三相异步电动机最大转矩的参数表达式可写成

$$T_{\max} = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (X_1 + X'_2)} = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 \times 2\pi f_1 (L_1 + L'_2)} = C \frac{U_1^2}{f_1^2} \propto \frac{U_1^2}{f_1^2}$$

则
$$\frac{T_{\max}}{T'_{\max}} = \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \bigg/ \left(\frac{U'_1}{f'_1} \right)^2 = \frac{T_N}{T'_N}$$

即
$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U'_1}{f'_1} \sqrt{\frac{T_N}{T'_N}} \quad (2-1)$$

式 (2-1) 表明了变频调速时，欲使过载能力保持不变，电压随频率变化的规律。

变频调速时， U_1 与 f_1 的调节规律是和负载性质有关的，通常分为恒转矩变频调速和恒功率变频调速两种情况。

1. 恒转矩变频调速

对于恒转矩负载， $T_L = \text{常数}$ ，所以 $T_N = T'_N$ ，则式 $\frac{U_1}{f_1} = \frac{U'_1}{f'_1} \sqrt{\frac{T_N}{T'_N}}$ 可写成

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U'_1}{f'_1} = \text{常数}$$

即对于恒转矩负载，只要满足电压与频率成正比调节，则电动机在变频调速时，既可保持过载能力不变，又可使主磁通保持不变，因而变频调速最适合于恒转矩负载。

2. 恒功率变频调速

对于恒功率负载， $p_2 = T_N n_N / 9.55 = T'_N n'_N / 9.55 = \text{常数}$ ，所以

$$\frac{T_N}{T'_N} = \frac{n'_N}{n} \approx \frac{f'_1}{f_1}$$

将此式代入式 (2-1), 得

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_1'}{\sqrt{f_1'}} = \text{常数}$$

即对于恒功率负载, 如果保持 $U_1/\sqrt{f_1} = \text{常数}$ 的调节, 则电动机的过载能力可保持不变, 但主磁通将发生变化。也就是说, 对于恒功率负载, 在采用变频调速时, 无法使电动机的过载能力和主磁通同时保持不变。

变频调速具有优异的调速性能, 机械特性硬, 调速范围较大, 平滑性较高, 可以适应同负载特性的要求。如图 2-10 所示为三相异步电动机变频调速时的机械特性。

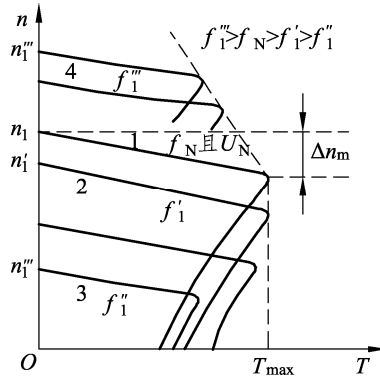


图 2-10 三相异步电动机变频调速时的机械特性

变频调速是异步电动机尤其是笼型异步电动机调速的发展方向。要实现异步电动机的变频调速, 必须有能够同时改变电压和频率的供电电源。现有的交流供电电源都是恒压恒频的, 所以必须通过变频装置才能获得变压变频电源。变频装置可分为间接变频和直接变频两类。间接变频装置先将工频交流电通过整流器变成直流, 然后再经过逆变器将直流变成频率可控的交流, 通常称为交-直-交变频装置。直接变频装置则将工频交流一次变换成频率可控的交流, 没有中间直流环节, 也称为交-交变频装置。

交-交型交流传动电力机车采用三相同步牵引电动机, 其调速方法和直流电动机的调速原理相同, 只要改变电机端电压, 即改变输入电机的功率, 就可以调节电动机的转速, 从而获得与直流电机相同的调速特性。同时, 同步电机也可用调节激磁磁通的方法实现调速。在调节电机端电压或磁通时, 必须调节电机端电压的频率, 保证使该频率与绕组中产生的感应电势的频率相适应。因而, 同步电机电力机车的调速必须采用自动调频的晶闸管调压变频器, 同时在电机转轴上装置检测器, 根据检测器送出的信号去控制晶闸管, 以保证电机同步。

任务三 电力机车的起动方法

【任务目标】

1. 知识目标

- (1) 了解电力机车起动的基本要求。

(2) 掌握电力机车的起动方法。

2. 能力目标

会利用电力机车的起动方法平稳起动电力机车。

【相关知识】

电力机车的起动是机车运行中最先实现的工作状态。电力机车在其起动牵引力作用下，克服列车静止时所受的阻力并产生加速度，最终运行在机车的自然特性上，这一过程称为机车的起动过程。机车起动过程实质是调速的一种特殊方式。因此，前述调速的基本原理对起动都是适用的。

一、对起动的要求

对机车起动的基本要求是：起动快和起动平稳。机车起动快可以减少起动时间，提高平均运行速度，对铁路运输有很大的意义，特别是对起动频繁的电动车组来说，意义更为重大。为了使机车起动得快，就要求机车有较大的起动电流，产生较大的起动牵引力。

机车起动平稳可以使机车内部设备免受电流冲击，机车和列车免受机械冲击，因此希望列车以匀速运动的形式运行。为此，要求起动时应尽量减少起动电流、起动牵引力的摆动。

起动电流过大时，会使电机安全整流受到破坏；启动牵引力过大时，会超出线路黏着条件，使轮对发生空转，结果反而丧失了牵引力。不同形式的电力机车，所受限制因素的主次也不同。对于直流电力机车和整流器电力机车，由于牵引电动机的不断发展和完善，已能保证在黏着条件许可范围内牵引电动机有良好的整流，其主要限制条件就是线路的黏着条件。采用交流牵引电动机的电力机车，由于电机不存在整流问题，仅受线路黏着条件的限制。对于单相整流子牵引电动机电力机车，由于这种电机整流困难，由电机安全整流决定的最大许可电流要比黏着条件决定的最大电流小，故主要受机车安全整流的限制。

此外，在机车起动过程中，不应有附加的能量损耗，若有也应尽量减小。

在机车起动操纵时，对于有级调速电力机车，要求司机逐级调速，禁用快速升级，防止牵引电机电流一次性摆动过大造成机车起动失败。

二、起动方式

机车在起动时处于静止状态，牵引电机在得到电压时，由于其反电势为零，因此，电机电枢电流仅由电压及电机回路的阻抗来决定，即

$$I_a = \frac{U_d}{Z}$$

显然，由于回路阻抗值很小，必然产生很大的电流，以致破坏牵引电机的安全换向，超越线路黏着条件限制，而且这么大的电流必然会产生很大的电流冲击和机械冲击，使机车和列车都受到损伤。因此，必须采用适当的起动方法来限制起动电流和起动牵引力。

1. 变阻起动

电力机车起动时，在牵引电动机回路中串入起动电阻，以减小起动电流，随着起动过程

的进行逐步切除启动电阻，待启动电阻全部切除后，启动过程结束，这种方法称为变阻启动。
变阻启动一般是有级启动，在启动过程中启动电阻有一定的能耗，因此是不经济的。

2. 降压启动

在电力机车启动时，降低加在牵引电动机上的电压，这种方法称为降压启动。直流斩波器电力机车、整流器电力机车、单相整流子式电力机车及异步牵引电动机电力机车均采用此种方法。其启动原理与调速原理相同，启动过程与调速过程之间无严格的界限。

采用有级调速的整流器电力机车，启动过程是有级的。对于采用晶闸管移相调压的整流器电力机车和采用斩波器调压的直流电力机车，由于调速是平滑的，其启动过程也是平滑的，可以使启动电流沿着黏着限制条件平滑地变化或维持一定值，因此机车不仅启动平稳，而且启动牵引力也可以在满足黏着条件要求下维持较大数值。但是，启动时机车的功率因数大为降低，整流电流的脉动也将增加。

3. 变频启动

异步牵引电动机电力机车利用改变电流频率的方法启动，称为变频启动。变频启动能充分利用电机的最大转矩，而且在各种速度下均不增加损耗，也不降低机车的功率因数。如果在启动过程中，频率随机车的运行速度呈正比变化，启动牵引力将保持为恒定值，做到理想的平稳启动。

三、启动电流和启动牵引力的限制

机车启动时，轮对发生空转前所能发挥的最大牵引力称为启动牵引力。机车启动牵引力受线路黏着条件的限制。启动牵引力应满足下列条件：

$$F_{st} \leq 9.8P_j\mu_j \text{ (kN)}$$

式中 P_j ——机车黏着质量（整备质量）(t)；

μ_j ——机车牵引黏着系数；

$9.8P_j\mu_j$ ——机车黏着牵引力(kN)。

机车黏着系数并不是一个恒定值，它随线路条件、轨面情况、机车启动方式等因素而变化，是一个范围值。因此黏着限制曲线也非一条，而是一条限制带。为使机车启动时有较大的启动牵引力，就应有效、充分地利用机车的黏着条件，即机车启动时，启动牵引力应尽可能靠近黏着限制线。

启动牵引力对应的牵引电动机的电枢电流称为最大启动电流 $I_{st \max}$ ，这一电流应小于电机本身的最大允许温升电流。整流器电力机车已经能够保证在黏着条件的许可范围内电机安全换向，故 $I_{st \max} < I_{a \max}$ 。



微课：HXD 型电力机车的变频调速和启动



PPT：HXD 型电力机车的变频调速和启动

任务四 电力机车的电气制动方法

【任务目标】

1. 知识目标

- (1) 了解电力机车电气制动的基本要求。
- (2) 掌握电气制动的基本原理和电气制动形式。
- (3) 了解电气制动的优越性。
- (4) 掌握直流电机和交流电机电气制动的原理。
- (5) 掌握电阻制动的原理、特性和控制方法。
- (6) 掌握加馈电阻制动的原理。
- (7) 掌握直流电机和交流电机再生制动的原理。

2. 能力目标

- (1) 能分析电阻制动和再生制动原理。
- (2) 会对各类电力机车进行电气制动。

【相关知识】

一、概 述

制动是机车运行的基本工作状态之一。当列车需要减速、停车或在长大下坡道运行需要限制列车的速度时，都必须采取制动措施，以控制机车的运行速度。现代铁路运输的安全性在很大程度上取决于其制动性能的好坏。随着铁路运输的发展，客、货运量越来越大，列车牵引重量与运行速度不断提高。高速客运及重载货运列车的发展对机车的制动性能提出了更高的要求，以保证列车高速运行时的安全性和可靠性。

1. 电气制动的基本原理

电气制动利用的是电机的可逆性原理。电力机车在牵引工况时，牵引电机做电动机运行，将电网的电能转变为机械能，轴上输出牵引转矩以驱动列车运行。电力机车在电气制动时，列车的惯性带动牵引电机，此时牵引电机将做发电机运行，将列车动能转变为电能，输出制动电流的同时，在牵引电机轴上产生反转矩并作用于轮对，形成制动力使列车减速或在下坡道上限速。

2. 电气制动的形式

根据电气制动时电能消耗的方式不同，电气制动有电阻制动和再生制动两种形式。如果电气制动时将产生的电能利用电阻使之转化为热能消耗掉，称之为电阻制动；如果将电气制动时产生的电能重新反馈到电网去加以利用，称之为再生制动。

3. 电气制动的优越性

(1) 提高了列车运行的安全性。列车除机械制动系统外，由于配备了电气制动系统，因而提高了列车运行的安全性。机械制动通常是利用闸瓦与车轮的机械摩擦形成制动力来降低

机车的运行速度，而机械摩擦系数随着温度升高明显下降，因此机械制动的性能和效果随着列车速度、载重和长度的提高而下降，且在高速时列车的机械制动呈现不稳定性。电气制动则相反，速度越高制动效果越明显，而且与制动时间无关。

(2) 减少了闸瓦和车轮磨耗。机械制动时，接触表面温度很高，闸瓦和轮缘的磨耗十分严重，因为机械制动的磨耗主要决定于制动力的强度，高速时制动强度大，磨耗就大，低速时则相反。所以高速时用电制动、低速度时用机械制动，可以大大降低机车车辆的车轮磨耗，大量节约制动闸瓦。

(3) 提高了列车下坡运行速度。机械制动由于需要在每次排风制动后，充风缓解至少约 1 min 待风压恢复后才能进行下一次制动，从而造成下坡速度波动大，使列车的平均速度下降；电制动因其性能与制动时间无关，由此可使列车下坡速度提高 8%，因而可提高运输能力。

4. 机车采用电气制动时应满足的基本要求

(1) 具有电气稳定性，并保证必要的机械稳定性。

(2) 具有广泛的调节范围，冲击力小。

(3) 机车由牵引状态转换为电气制动状态线路简单，操纵方便，具有良好的制动性能，负载分配力求均匀。

二、电阻制动和再生制动原理

1. 直流牵引电动机的电气制动原理

直流发电机的励磁方式有串励和他励两种。

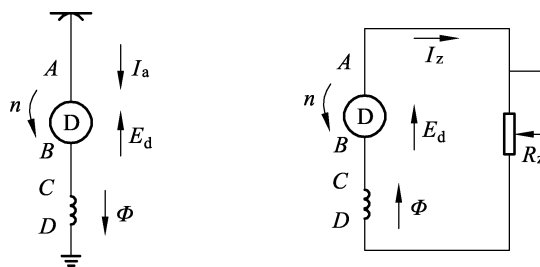
采用串励牵引电机的电力机车在进行电阻制动时，必须首先切断牵引电机电枢与电网的连接，使电机电枢与制动电阻接成回路，其工作原理如图 2-11 所示。



微课：HXD 型电力机车的再生制动



PPT：HXD 型电力机车的再生制动



(a) 牵引工况

(b) 制动工况

n —电机转速； Φ —电机主极磁通； R_z —制动电阻； E_d —电机电枢绕组中产生的感应电势； I_a —电机电枢电流（制动时为 I_z 制动电流）。

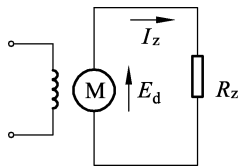
图 2-11 串励牵引电机电阻制动原理

由于串励发电机的激磁建立是依靠电机的剩磁，比较图 2-11 (a) 和 (b) 可知，在牵引工况和制动工况时，通过牵引电机电枢的电流方向相反，因此必须设法使电机励磁绕组的磁势与剩磁方向相同，通常采用改换励磁绕组的接法来实现。

串励式电阻制动不需要额外的励磁电压，用改变制动电阻 R_z 的大小来调节制动电流和制动力。在高压大电流情况下，制动电阻要求有许多抽头和相应的开关电器，造成线路复杂，

设备增多，且调节是有级的。同时制动电阻不能取值过大，否则会使电机不能自激。当多台电机并联共用一个制动电阻时，还会出现不稳定状态。所以在整流器电力机车上使用电阻制动时，一般不采用串励式电阻制动，而采用他励式电阻制动，用改变励磁电流的方式来调节机车的制动电流和制动力，以控制机车的运行速度。

采用他励电机电阻制动时，首先切断牵引电机电枢与电网的连接，使电枢绕组与制动电阻接成回路，而电机原来的串励绕组由另外电源供电，电机作他励发电机运行，其工作原理如图 2-12 所示。



R_z —制动电阻； I_z —电机制动电流； E_d —电机发电电势。

图 2-12 他励电阻制动原理电路

制动电流 $I_z = \frac{E_d}{R_z}$ ，由于这时的电流方向与牵引状态下的电流方向反向，因此其转矩与电机的转速方向相反，形成制动转矩。

2. 交流电动机电气制动原理

交流异步电动机的电气制动原理可以表述如下：电磁转矩可以用定子磁链和转子磁链的叉乘 $M = \psi_s \times \psi_r$ 表示。在牵引工况下，定子磁链 ψ_s 带动转子磁链 ψ_r 旋转，定子磁链在空间位置上超前转子磁链，电机输出正转矩。在制动工况下，转子旋转频率超过定子频率，转子电流与牵引状态下方向相反，使得气隙磁场幅值增大。为保持气隙磁场恒定，定子电流需要反向以减小气隙磁场，定子电流流向中间直流环节，在空间位置上滞后于转子电流，电机输出负转矩。

我们也可以用电机的机械特性曲线来说明交流异步电动机的电气制动原理。如图 2-13 所示，在定子频率为 f_1 时，电动机工作在特性曲线第 1 象限的 A 点，这时电机输出正转矩为牵引状态。如果降低定子供电频率为 f_2 ($f_2 < f_1$)，由于车辆惯性，电机转速不能发生突变，电机工作点转移到第 4 象限 f_2 曲线上的 B 点。在这个象限中电机进入发电状态，电磁转矩为负值，并在负载转矩作用下沿 f_2 曲线减速。这就是异步电动机的制动工况，若不断地按照某种规律降低定子供电频率，即可获得预定的制动特性。

另外一种情况也可以使交流异步电动机进入电气制动状态。电机运行中由于外力作用迫使转子加速，电机工作点 A 沿着定子供电频率 f_1 特性曲线进入第 4 象限（例如达到 C 点），这时电机的转速 $n_1' > n_1$ ，电磁转矩为负，电机为发电制动状态。

于是我们也可以这样来说明交流异步电动机电气制动的原理：当交流异步电动机的转子转速大于定子磁场转速时， s 为负值，这时电动机输出负转矩，即阻力矩。由于相对速度的方向倒转，转子电流和转子电势的方向也已倒转，这时定子电流中用以抵消转子电流的磁化作用的分量也就跟着倒转。于是定子电流 I_1 中的有功分量 I_a 与 U_1 相反，即电网提供的有功功率为负值，也就是说由电机向电网输出一有功功率。但是异步电动机这时仍然从电源吸取无

功率，即吸取无功感性电流，也就是异步电动机的励磁电流。因此这时异步电动机的一些基本公式仍然适用。

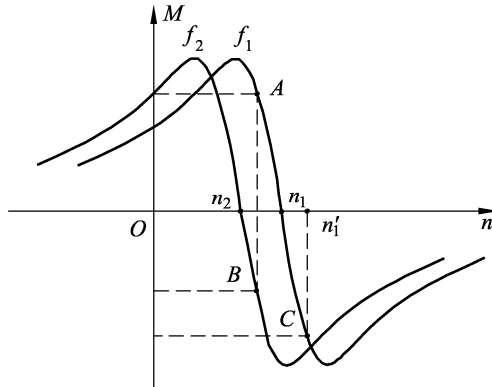


图 2-13 交流异步电动机的机械特性曲线

由此可见，交流异步电动机的电气制动也是利用电机的机械特性，实现交流异步电动机的可逆运行。交流异步电动机的工作状态转换平稳，且状态过渡方便。

三、电阻制动

将牵引电动机转变为发电机状态后，将其产生的电能消耗在电阻上（转换成热能），从而产生制动力的方式称为电阻制动。电阻制动方式实现简单、易行，且控制方便、灵活，因而获得广泛的应用。

（一）直流牵引系统的电阻制动

直流牵引系统在实施电阻制动时一般均采用他励方式，在电阻制动时有如下电枢回路方程和电磁转矩公式：

$$E_d = C_e \Phi_d n_d = I_z (R_z + \sum R_d) = I_z R'_z \quad (2-2)$$

$$M_d = C_m \Phi_d I_z \quad (2-3)$$

由式（2-2）和式（2-3）可得

$$M_d = \frac{C_m C_e \Phi_d^2 n_d}{R'_z} = \frac{C_m C_e}{R'_z} \Phi_d^2 n_d = \frac{C_{mz}}{R'_z} \Phi_d^2 n_d \quad (2-4)$$

由式（2-2）和式（2-3）还可得

$$M'_d = C_m \cdot \frac{I_z R'_z}{C_e n_d} \cdot I_z = \frac{C_m R'_z}{C_e} \cdot I_z^2 \cdot \frac{1}{n_d} = C'_{mz} \cdot I_z^2 \cdot \frac{1}{n_d} \cdot R'_z \quad (2-5)$$

将式（2-4）和式（2-5）中的电动机转速 n_d 和电动机转矩 M_d 用速度 v 和制动力 B 来表示，则有表达式如式（2-6）、式（2-7）所示。

$$B_1 = C_\Phi \cdot R'_z \cdot I_z^2 \cdot \frac{1}{v} \quad (2-6)$$

$$B_2 = \frac{C_z \Phi_d^2}{R'_z} \cdot v \quad (2-7)$$

式中 Φ_d ——电动机的磁通；
 I_z ——制动电流；
 R'_z ——制动电阻。

式(2-6)和式(2-7)是电阻制动中的两个基本表达式，分别表示在不同的给定条件下电阻制动时列车速度与制动力的关系。这种制动力与列车速度间的关系称为电阻制动特性曲线。

1. 电阻制动特性曲线

由式(2-6)和式(2-7)可以获得电阻制动工况的电机特性曲线，如图2-14所示。由式(2-7)可知，若保持磁通 Φ_d 不变，依据 Φ_d 的不同取值，可得速度和制动力的关系表现为一组过零的直线，如图2-14中的曲线1。图中的曲线1是最大励磁电流时的恒磁通时制动特性。式(2-6)则从另一个角度获得速度和制动力的关系，即保持制动电流 I_z 不变，速度和制动力的关系为一组双曲线，如图2-14中的曲线3，因此曲线3是最大恒制动电流时的制动特性。恒磁通制动特性和恒制动电流制动特性都是电阻制动的特性曲线。

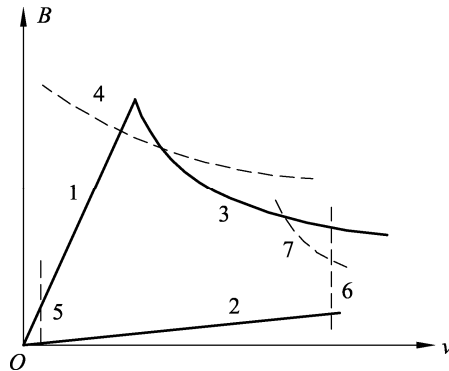


图 2-14 电阻制动特性及限界

2. 电阻制动特性的工作范围

电阻制动特性曲线在 v - B 平面上的工作范围受到一些条件的限制，这些条件主要如下。

(1) 最大黏着限制，即轮轨间的最大制动力不能超过轮轨间的极限黏着力，如图2-14中的曲线4。

(2) 最大速度限制，即为电阻制动时允许的列车最高速度，如图2-14中的曲线6。

(3) 最大制动电流限制，这是 $I_{z \max}$ 确定的限制线，由式(2-6)所获得的最高一条双曲线。 $I_{z \max}$ 主要受到电枢的最大电流和制动电阻的发热限制。

(4) 最大励磁电流限制，根据式(2-7)，由励磁回路的电流最大值可以得到最大励磁电流时的制动特性曲线，如图2-14中的曲线1。

(5) 最小励磁电流限制，励磁电流减小，引起主磁场减弱，使电枢反应强烈，造成主磁场畸变，从而使换向器表面电势分布不均匀，产生火花。最小励磁电流限制曲线如图2-14中的曲线2。

(6) 换向条件限制，即在较高的速度下，若励磁电流小而制动电流较大时，会引起平均

电抗电势的增大，形成换向器表面的火花。图 2-14 中的曲线 7 是换向条件限制。

3. 电阻制动的控制

电阻制动特性曲线如图 2-15 所示。图中 $Oabc$ 曲线是一种典型的制动特性曲线， Oa 段是恒励磁电流（恒磁通）的特性， ab 段是恒制动力的特性， bc 段是恒制动电流的特性。图 2-15 中还有 v_1 和 v_2 两条恒速制动特性曲线。恒励磁电流（恒磁通）特性和恒制动电流特性是基本特性，不同的励磁电流和不同的制动电流可以分别获得一族曲线。而恒制动力特性和恒速制动特性是调节特性，则是由两个基本特性的曲线来构筑，也即需要由控制系统不断地调节励磁电流或制动电流来实现的。图 2-15 说明理论上可以由一族恒制动电流曲线上的 1、2、3、4 点构成恒制动力特性；而由一族恒励磁电流曲线上的 5、6、7、8 点构成恒速制动特性 v_1 。反之也可以由恒励磁电流曲线构成恒制动力特性；由恒制动电流曲线构成恒速制动特性。

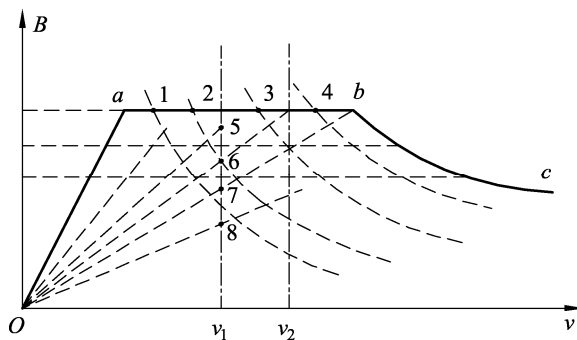


图 2-15 电阻制动特性曲线

1) 恒制动力模式控制

根据式 (2-7)，可以得到恒制动力时磁通的表达式

$$\Phi_d^2 = \frac{B \cdot R'_z}{C_1 \cdot v}, \quad \Phi_d = \sqrt{\frac{B \cdot R'_z}{C_1 \cdot v}}$$

在电动机磁通不饱和的条件下，磁通与励磁电流成正比

$$\Phi_d = K \cdot I_L$$

将上述两个表达式合并，可以得到在确定的制动电阻下，恒制动力控制时励磁电流与列车速度的关系式

$$I_L = \frac{1}{K} \cdot \sqrt{\frac{B \cdot R'_z}{C_1 \cdot v}} \quad (2-8)$$

从式 (2-8) 已经得到 B 为恒值时励磁电流 I_L 与速度 v 的关系，控制系统根据检测的实际列车速度 v 可以得到励磁电流的给定值 I_L ，然后与检测到的 I_L 进行比较后进行闭环控制，获得恒制动力特性。

如图 2-16 所示为恒制动力控制的结构示意图。其中 B_R 是给定的制动力， I_L 是根据公式 (2-8) 计算的励磁电流给定， I_z 和 v 是检测的制动电流和列车速度，环节 B 则根据检测的 I_z 和 v 计算当前的制动力，并与制动力给定值 B_R 相比较，来实现恒制动力的控制。从图中可以得到恒制动力控制的最外环是制动力，而环内还包含着两个内环，制动电流 I_z 环和励磁电

流 I_L 环（恒磁通环）。但在实际过程中，恒制动力的实现主要是由恒励磁电流特性来完成，制动电流这个闭环主要用于最大制动电流 $I_{z\max}$ 的限制。

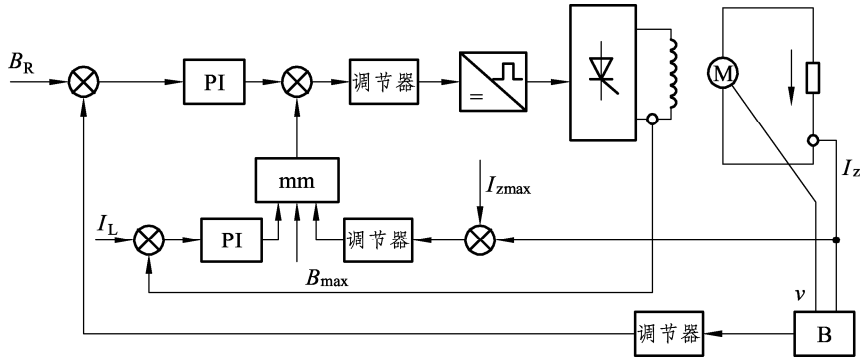


图 2-16 恒制动力控制模式

2) 恒速控制模式

制动工况下的恒速条件为： $F = 0$ ， $B + W = 0$ 。由于阻力 W 的不可预知性，例如列车运行在长大坡道上，因而要求制动力 B 随着外界阻力的变化而变化。根据式 (2-8) 可知，当速度 v 为恒值时，随制动力 B 变化而调节 I_L 可以达到恒速。如图 2-17 所示是恒速控制的结构示意图。

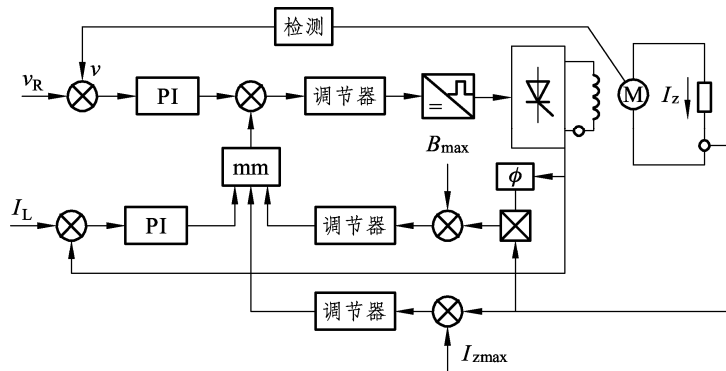


图 2-17 恒速控制模式

恒速制动控制的系统中，闭环系统的最外环肯定是速度控制环。图 2-17 的调节手段是励磁电流，因此励磁电流控制是一个内环。另外在内环中还包括有最大制动力限制和最大制动电流限制。

4. 电阻制动的不足及其克服方法

电阻制动时控制电路比较简单，制动力调节十分方便，因而易于实现制动力的自动控制，使电阻制动的性能得以充分发挥。但是，电阻制动的最大缺点，从特性曲线上看是低速时制动力直线下降，制动效果不明显，目前一般采用两种方法加以克服。

1) 分级电阻制动

分级电阻制动利用改变制动电阻阻值来改变制动特性，即将制动电阻分成两级。低速时由于发电机电势随速度的降低而成正比的降低，对于一定的制动电阻，制动电流亦成正比减小，

因而不能维持一定制动力时所需电流，若将制动电阻短接（减小）一部分，则尽管由于机车速度的降低使发电机电势下降了，但由于制动电阻减小了，制动电流仍能保持较大的值，以维持低速时有较大的制动力。例如国产 SS₃ 型电力机车制动电阻分成 1.005 2 Ω 和 0.60 Ω 两级，称为半电阻制动。图 2-18 所示为 SS₃ 型电力机车的制动特性，图中虚线表示“低速制动”时的制动特性。

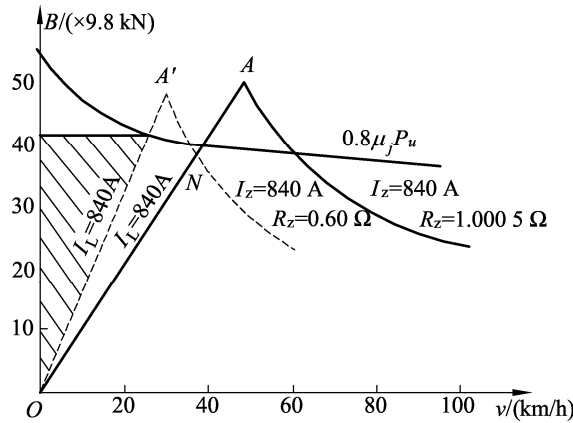


图 2-18 SS₃ 型电力机车电阻制动特性曲线

2) 加馈电阻制动

加馈电阻制动又称“补足”电阻制动，电阻制动在低速时由于制动电流减小而制动力下降。为了维持制动电流不变，克服机车制动力在低速区减小的状况，在制动回路外附加制动电源来补足。图 2-19 所示为相控机车加馈电阻制动原理，根据原理图写出回路方程式为

$$U_j + E_d = I_z R_z$$

所以制动电流为

$$I_z = \frac{U_j + E_d}{R_z}$$

因需要根据实际制动电流及时补足减少部分，故要求附加制动电源连续可调。一般相控机车上不另设加馈电源，而是使用牵引时的整流调压电路在制动工况作为加馈电源，如图 2-19 (a) 所示。

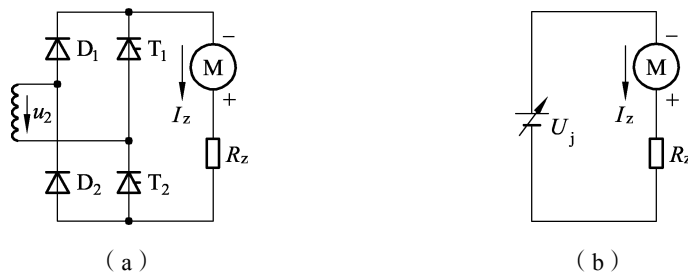


图 2-19 加馈电阻制动原理

根据图 2-19 (a) 电路，上式又可改写为

$$I_z = \frac{0.9U_2 \frac{1+\cos\alpha}{2} + E_d}{R_z}$$

只需调节半控整流电路中晶闸管的移相角 α ，即可调节加馈电源输出，及时补足制动电流的减小部分，使制动电流维持不变。显然加馈电阻制动要消耗额外电能。图 2-18 所示阴影部分的面积代表采用加馈电阻制动、维持低速时制动力 B 等于常数、使列车制动停车时所需要外加的功率。

从理论上讲，加馈电阻制动可使机车制停。而实际上由于牵引电机整流器不允许静止不动长时间流过额定电流，以防整流器过热而烧损，故在机车速度低于一定值时，将切除加馈制动，改用空气制动使机车停车。国产 SS_{3B}、SS_{4G}、SS₈ 等机车均采用此种电阻制动方式。

四、再生制动

将列车运行的机械能转变成电能后，以适当的方式反馈到电网上去，从而产生制动力，这种制动方式称为再生制动。目前也有一些牵引系统采取适当的方式将产生的电能给蓄电池充电或直接反馈给其他系统使用，因此也可以称为能量回馈制动。再生制动适用于电网供电的车辆，回馈制动方式也适用于自给式供电的车辆。

再生制动除了电气制动的特点外，突出的是有较好的经济效益，从节能的角度来说是最佳电气制动方式，一般认为可以节能 10%~15%。另外，再生制动方式几乎不需要在列车上增加任何部件，因此目前在交流牵引系统中普遍采用再生制动，特别是在高速列车上。但再生制动时机车的功率因数较低，对电网的谐波干扰增大，另外控制系统复杂，再生制动时对控制系统的稳定性要求比较高。

无论是交-直系统还是交-直-交系统，再生制动时都是将中间直流电压转变成频率为 50 Hz 的单相交流电反馈到电网上去。电网侧的变流器在牵引时作为整流器，在再生制动时作为逆变器。在作为逆变器运行时输入电压极性不变，电流反向，实现功率的反向传送，这也是四象限变流器名称的由来。

1. 交-直牵引系统的再生制动

交-直牵引系统的变流器只有在全控桥的条件下，才能进行再生制动，因为它具有整流和逆变两种功能。全控桥对称控制时，当控制角 $\alpha > 90^\circ$ 时，整流电压的平均值 U_d 变为负值，实现再生制动，即

$$U_d = 0.9U_2 \cos\alpha \quad (\alpha > 90^\circ) \quad (2-9)$$

制动电流可表示为

$$I_z = \frac{E + U_d}{R} = \frac{C_e \Phi n + U_d}{R} \quad (2-10)$$

式中 $E = C_e \Phi n$;

U_d ——逆变电势（此时为负值）；

R ——制动回路总电阻。

制动回路总电阻包括：电动机电枢、平波电抗器和稳定电阻 R_τ 三者电阻之和。从式(2-9)

可见，调节制动电流 I_z 可采用调节磁通 Φ （励磁）或者逆变器电压 U_d （控制角 α ）的方法来实现。式（2-10）中转速 n 取决于列车速度，而再生制动回路电阻一般不变，其中稳定电阻 R_F 取值要从制动电气稳定性和反馈电能二者综合考虑，一般消耗 10%~15% 制动功率。再生制动的原理可用图 2-20 来说明。

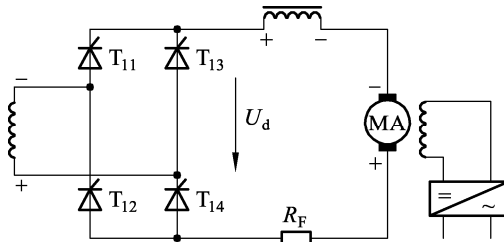


图 2-20 再生制动原理

再生制动时为了改变电动机的电势方向，需要改变励磁电流的方向或改变电枢电流的方向。根据图 2-20 分 4 个时间间隔给予说明，其中整流器认为是理想的、变压器漏抗为零且平波电感器电感为足够大。

(1) 电源正半波过零之前， T_{13} 、 T_{14} 是最早导通的（续流）， $\omega t = \pi - \beta_0$ 时给 T_{11} 触发脉冲，此时加在 T_{11} 两端为正向电压，所以 T_{11} 被触发导通，实现 T_{13} 与 T_{11} 的换流（即 T_{11} 导通， T_{13} 关断）。此时 T_{11} 、 T_{14} 维持导通，一直持续到电源的负半波 $\omega t = \pi + \alpha$ 时 T_{12} 被触发导通为止。在这个时间间隔内， U_d 的平均值为负，发动机电势 E 要克服变压器电势 U 。而维持工作，即逆变运行，变压器电势与电流反向，变压器向电网反馈电能，如图 2-21 所示。

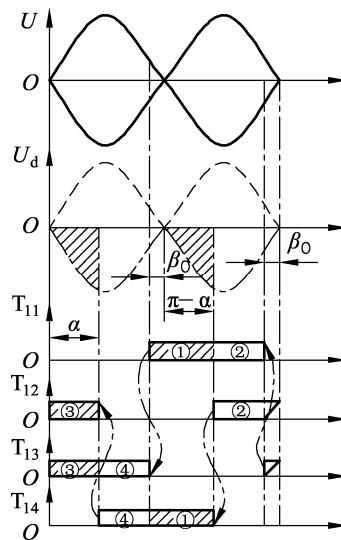


图 2-21 再生制动原理波形

(2) 电源负半波 $\omega t = \pi + \alpha$ 时，给 T_{12} 门极触发信号，因 T_{12} 阴极具有负电位而触发导通， T_{14} 、 T_{12} 换流，这样 T_{11} 、 T_{12} 导通，逆变结束而进入续流工况，此时间间隔内变流器输出电压为零，直到 $\omega t = 2\pi - \beta_0$ 时 T_{13} 触发导通为止。

(3) $\omega t = 2\pi - \beta_0$ 时给 T_{13} 触发，因 T_{13} 被施加正向电压，所以 T_{13} 导通， T_{11} 与 T_{13} 换流，此

间隔内 T_{13} 、 T_{12} 维持导通，一直到电压过零、变压器电势进入正半波（对 T_{13} 、 T_{12} 是反电压） $\omega t = \pi$ 时 T_{14} 导通为止，此间隔发电机电势又必须克服变压器电势工作，即又进入逆变工况。

(4) 在电源正半波 $\omega t = \alpha$ 时， T_{14} 被触发导通， T_{12} 、 T_{14} 换流，即 T_{13} 、 T_{14} 导通一直到 $\omega t = \pi - \beta_0$ 时 T_{11} 导通为止，此间隔逆变结束而为续流工况。以后重复上述过程。逆变工况中 T_{11} 、 T_{13} 维持最小逆变角 β_0 ($\beta_0 = \gamma + \delta$, $\delta = \text{常数}$)，用调节 T_{12} 、 T_{14} 的控制角 α 来控制逆变工况的结束时刻，从而达到调节逆变输出电压值即调节制动电流的目的。4 个桥臂导通时间都是半波，这和牵引工况一致，各桥臂元件的负载是均匀的。由于分析时作了一定的假定，所以图 2-21 中表示的电流波形是瞬时换流，且电流为平直方波。

根据上述的分析，为了提高交流-直流牵引系统再生制动时的稳定性，需要注意 2 个参数的取值问题。

① 最小逆变角的取值问题。

再生制动时，应在再生安全可靠运行的条件下，尽可能缩小 δ ，并保持 δ 为一常数，以达到尽可能高的再生功率因数。这种方法比固定 β_0 角控制先进，在谐波分量及功率因数等供电指标方面要好，而控制技术要求复杂些，要能及时响应电网突变的控制，否则容易出现再生颠覆故障。

② 再生稳定电阻取值问题。

稳定电阻一般消耗 10% ~ 15% 的制动功率，高值稳定电阻有较好的再生电气稳定性、有利于限制再生颠覆电流、再生逆变器容量减小。当然稳定电阻 R_e 的增大降低了再生反馈能量的效果。

常规再生制动难以达到列车制停，可以采用加馈电气制动的方法来实现，即由发电机电势和电网电势联合提供电能的电制动。当速度趋向零时，制动功率逐步变为全部由电网提供，这时需要消耗电网的电能，且功率因数很低。

2. 交-直-交牵引系统的再生制动

交-直-交牵引系统的再生制动由电网侧变流器实现，通常这是一个四象限脉冲整流器，在牵引状态下作为整流器输出直流电压给中间直流环节，再生制动时成为一个单相逆变器向电网反馈能量。四象限变流器的原理结构如图 2-22 所示。

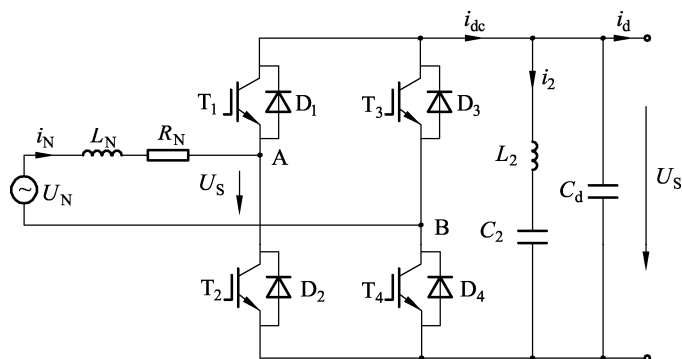


图 2-22 四象限变流器的原理结构

再生制动时变压器副边绕组的电压 U_N 与电流 I_N 反向，其相量图如图 2-23 (b) 所示。

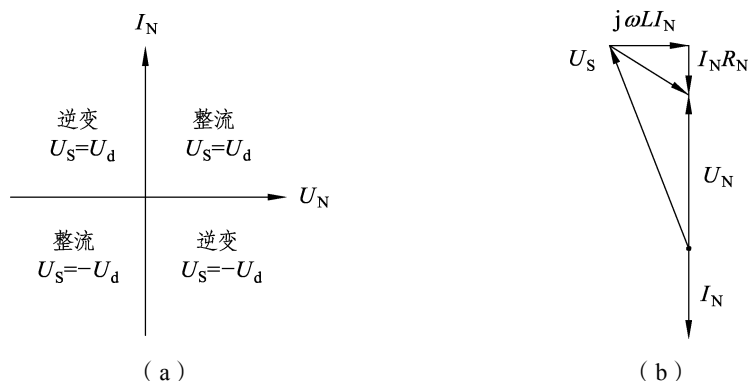


图 2-23 再生制动能量反馈与矢量图

在图 2-23 (a) 中表示了四象限脉冲整流器能量反馈时的四种工作状态, 另外严格来说还有两种 $U_d = 0$ 时的状态。同样整流时也有 6 种状态。从图中不难得到再生制动时的工作状态应该在第二和第四象限。

任务五 电力机车的特性控制技术及特性曲线

【任务目标】

1. 知识目标

了解直流和交流传动电力机车的基本特性。

2. 能力目标

会利用电力机车的基本特性平稳操纵电力机车。

【相关知识】

一、直流电力机车的基本特性

直流电力机车的基本特性包括机车的速度特性、牵引力特性、牵引特性。

在以前的课程中, 我们已经了解了直流串励电动机的转速特性、转矩特性和效率特性。在研究电力机车的运行行为时, 需将电机的转速 n 换算为机车动轮轮周的线速度 v 、电机的转矩 M 换算为机车动轮轮周的牵引力 F , 从而得到机车的速度特性、牵引力特性和牵引特性。

1. 速度特性

机车运行速度与牵引电动机电枢电流的关系, 称为机车速度特性。即 $v=f(I_a)$ 。机车速度特性计算公式的推导过程如下。

机车动轮轮周线速度 v 与电机转速 n 有如下关系:

$$v = \frac{\pi D}{60 \mu_c} n \quad (\text{m/s})$$

电机转速公式：

$$n = \frac{U_d - I_a \Sigma R}{C_e \Phi} \quad (\text{r/min})$$

由上两式得出机车速度特性计算式：

$$v = \frac{\pi D}{60 \mu_c} \cdot \frac{U_d - I_a \Sigma R}{C_e \Phi} = \frac{U_d - I_a \Sigma R}{C_v \Phi} \quad (\text{m/s})$$

式中 C_v ——机车常数，其值为 $C_v = 60 C_e \mu_c / (\pi D)$ ；

D ——机车动轮直径（m）；

μ_c ——机车齿轮传动比；

U_d ——牵引电动机端电压（V）；

I_a ——牵引电动机电枢电流（A）；

ΣR ——牵引电动机回路总电阻（ Ω ）；

Φ ——牵引电动机每极磁通量（Wb）；

C_e ——牵引电动机结构常数，其值为 $C_e = P_N / 60a$ （ a 为电枢绕组并联支路数）。

从推导结果来看，机车速度特性曲线与牵引电动机的转速特性曲线形状相似，为下降的曲线。

2. 牵引力特性

机车轮周牵引力与牵引电动机电枢电流的关系，称为机车的牵引力特性，即 $F=f(I_a)$ 。机车牵引力特性计算公式推导如下。

牵引电动机功率：

$$P = \frac{U_d I_a}{1000} \eta_d \quad (\text{kW})$$

机车轮周功率：

$$P_j = Fv \quad (\text{kW})$$

根据功能原理：

$$P_j = mP\eta_c$$

故牵引力特性计算式为

$$F = \frac{1}{1000} U_d I_a \eta_d m \eta_c \frac{1}{v} = \frac{m}{1000} \cdot \frac{U_d I_a}{v} \eta_d \eta_c \quad (\text{kN})$$

式中 v ——机车速度（m/s）；

η_d ——牵引电动机效率；

η_c ——传动装置效率；

m ——机车配用电动机数目，对于个别传动机车为机车动轴数；

F ——机车轮周牵引力（kN）。

也可以用以下方法来定性分析机车牵引力特性（忽略传动效率等因素）。

机车总功率： $P_j = Fv$

牵引电动机功率： $P_d = U_d \cdot I_a$

机车总功率为各牵引电动机功率之和： $P_j = mP_d$

$$m \cdot U_d \cdot I_a = F(U_d - I_a \cdot \sum R) / C_V \Phi$$

作近似忽略： $m \cdot U_d \cdot I_a = F U_d / C_V \Phi$

得 $F = m C_V \Phi \cdot I_a = C_F \Phi \cdot I_a$

从推导结果看，机车动轮轮周牵引力与牵引电动机电枢电流近似成正比，为近似的上升直线。

由于机车速度特性和牵引力特性均是从牵引电动机的特性归算至轮周的特性，所以机车的速度特性曲线和牵引力特性曲线与牵引电动机的转速特性曲线和转矩特性曲线具有相同的趋势。在对机车作定性分析时，只要改变牵引电动机特性曲线上的坐标和比例，就可以得到机车的速度特性曲线和牵引力特性曲线。

3. 牵引特性

机车轮周牵引力与运行速度的关系，称为机车的牵引特性。即 $F = f(v)$ 。机车牵引特性的计算公式仍为

$$F = \frac{m}{1000} \cdot \frac{U_d I_a}{v} \eta_d \eta_c \quad (\text{kN})$$

机车牵引特性曲线一般由机车型式试验测出，或在已知机车速度特性曲线和牵引力特性曲线后，给定一电机电枢电流 I_a 值，可求出机车牵引特性的一组 $F-v$ 值。根据不同负载下的数组 $F-v$ 值，就可以绘出机车牵引特性曲线。

图 2-24、图 2-25、图 2-26 分别给出了 SS_{3B} 型电力机车的速度特性、牵引力特性和牵引特性曲线。需要指出的是，图中所给的曲线为电力机车特性控制下的特性曲线，非自然特性曲线。

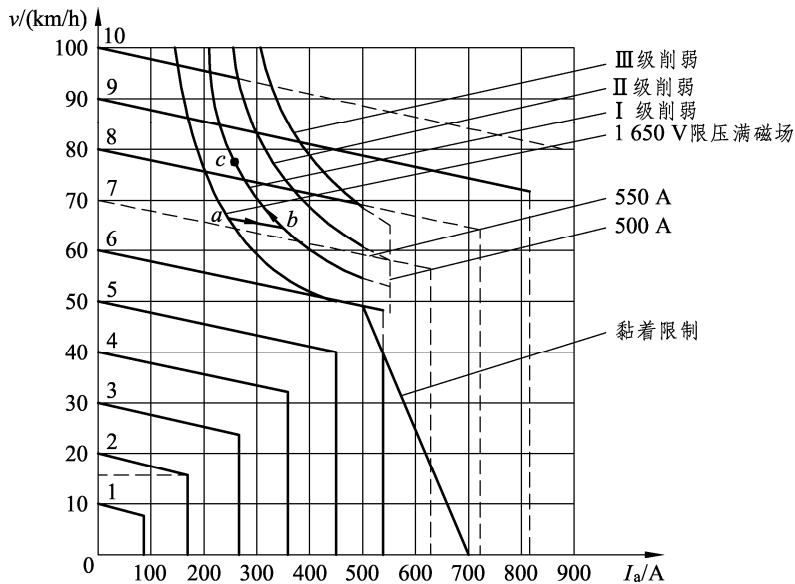


图 2-24 SS_{3B} 型机车速度特性曲线 $v=f(I_a)$

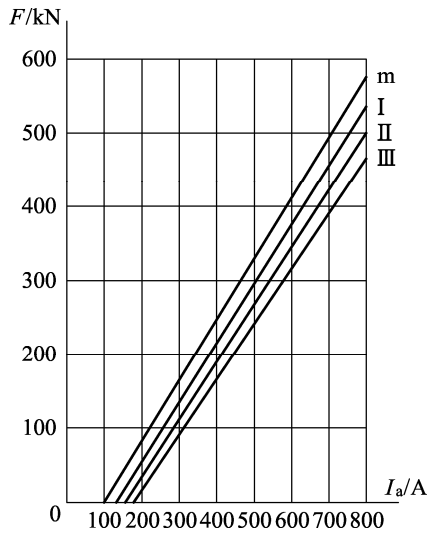


图 2-25 SS_{3B} 型机车牵引力特性曲线 $F=f(I_a)$

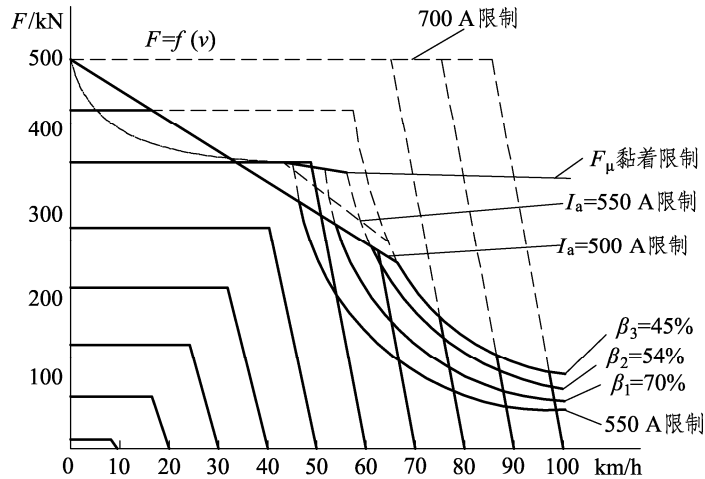


图 2-26 SS_{3B} 型机车牵引特性曲线 $F=f(v)$

为了保证机车牵引运行的安全，使机车充分发挥其牵引力高速运行，无论采用何种调速方式的机车，机车的工作特性必须控制在一定范围内。限制机车特性工作范围的因素有以下几方面。

1) 机车构造速度的影响

机车安全运行速度必须小于机车走行部的构造速度。

2) 机车牵引电动机安全换向的限制

机车在各种运行状态下均应保证牵引电动机有良好的换向条件。一般讲，机车在其自然特性情况下运行，实行最深一级磁场削弱的特性曲线为限制曲线。

3) 黏着条件限制

机车动轮与钢轨之间的黏着状态决定了机车所能发挥的最大牵引力，因此机车的轮周牵引力必须小于机车黏着允许的极限牵引力。

4) 牵引电动机电枢电流的限制

机车牵引力与牵引电动机电枢电流有关，而电枢电流受电机绕组发热的制约，其最大电流被限制在一定范围内，所以牵引电动机最大电枢电流限制了机车牵引力。但是这种限制对于整流器电力机车来说，往往高于黏着条件所决定的限界。

二、HXD₃型交流传动电力机车的基本特性

(一) 牵引特性

HXD₃型机车的牵引、制动控制采用恒牵引力（制动力）、准恒速特性控制方式。

1) 牵引特性控制要求

- (1) 采用恒牵引力、准恒速特性控制。
- (2) 牵引控制司机控制器手柄为13级，级间能平滑调节。
- (3) 每级牵引力变化设定为 $\Delta F=80$ kN。



微课：HXD型电力机车的牵引特性控制曲线 PPT：HXD型电力机车的牵引特性控制曲线

2) 23 t轴重时的牵引力计算（见图 2-27）

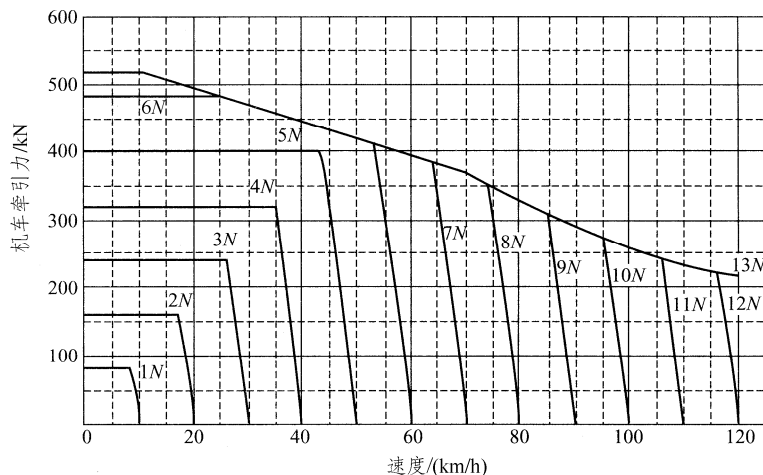


图 2-27 HXD₃型大功率交流传动电力机车牵引特性控制曲线（23 t轴重）

(1) 基本公式：扭矩值（kN）=换级触点号×80 kN。

(2) 最大扭矩值。

速度 <10 km/h时，扭矩值（kN）=520；

10 km/h \leq 速度 <70 km/h，扭矩值（kN）=544.8 - [2.48×速度（km/h）]；

速度 ≥ 70 km/h时，扭矩值（kN）=25 970/速度（km/h）。

(3) 缩减扭矩值。

扭矩值 (kN) = (640 × 换级触点号) - [64 × 速度 (km/h)];

计算结果为负时, 视为 0 kN。

(4) 输出扭矩值 (传输到 CI 的扭矩值): 以上 (1) ~ (3) 中, 最小值成为输出扭矩值。

3) 25 t 轴重时的牵引扭矩计算 (见图 2-28)

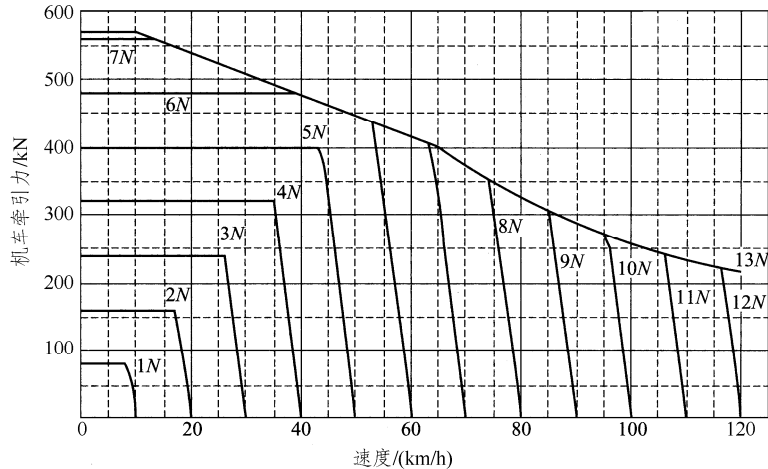


图 2-28 HXD₃ 型大功率交流传动电力机车牵引特性控制曲线 (25 t 轴重)

(1) 基本公式: 扭矩值 (kN) = 换级触点号 × 80 kN。

(2) 最大扭矩值。

速度 < 10 km/h 时, 扭矩值 (kN) = 570;

10 km/h ≤ 速度 < 65 km/h, 扭矩值 (kN) = 600.9 - [3.09 × 速度 (km/h)];

速度 ≥ 65 km/h 时, 扭矩值 (kN) = 26 000 / 速度 (km/h)。

(3) 缩减扭矩值。

扭矩值 (kN) = (640 × 换级触点号) - [64 × 速度 (km/h)]; 计算结果为负时, 视为 0 kN。

(4) 输出扭矩值 (传输到 CI 的扭矩值): 上文 (1) ~ (3) 中, 最小值成为输出扭矩值。

(二) 制动特性

1. 制动特性控制要求

(1) 采用准恒速特性控制。

(2) 制动控制司机控制器手柄为 12 级, 级间能平滑调节。

(3) 每级速度变化 $\Delta v = 10$ km/h。



微课: HXD 型电力机车的制动特性控制曲线 PPT: HXD 型电力机车的制动特性控制曲线

2. 23 t 轴重时的制动扭矩计算 (见图 2-29)

1) 速度 < 70 km/h 时

换级触点为 1N, 输出扭矩值 (kN) = $[33.7 \times \text{速度 (km/h)}] - 134.8$;

换级触点在 1N 以外, 输出扭矩值 (kN) = $[33.7 \times \text{速度 (km/h)}] - [337 \times (\text{换级触点号} - 1)]$ 。

计算结果为负时, 视为 0 kN; 计算结果超过 370 kN 时, 视为 370 kN。

2) 速度 ≥ 70 km/h 时

(1) 最大扭矩值。

扭矩值 (kN) = $25\,970 / \text{速度 (km/h)}$ 。

(2) 缩减扭矩值。

换级触点为 1N, 输出扭矩值 (kN) = $[33.7 \times \text{速度 (km/h)}] - 134.8$;

换级触点在 1N 以外, 输出扭矩值 (kN) = $[33.7 \times \text{速度 (km/h)}] - [337 \times (\text{换级触点号} - 1)]$ 。

计算结果为负时, 视为 0 kN; 计算结果超过 370 kN 时, 视为 370 kN。

(3) 输出扭矩值: 在上文 (1) 和 (2) 中, 最小值成为输出扭矩值。

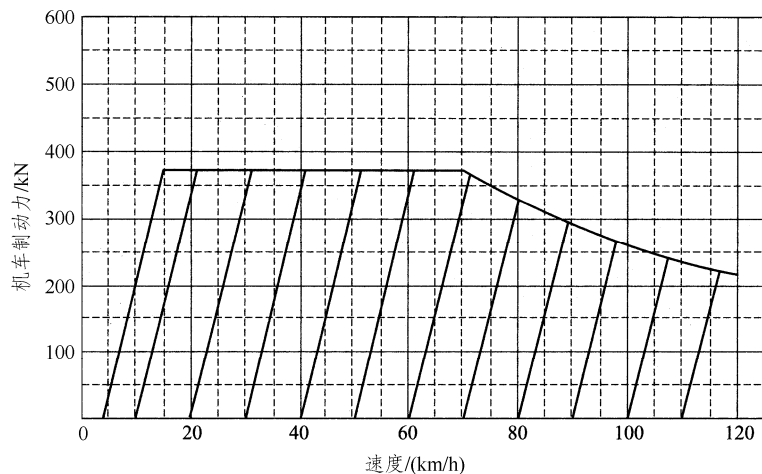


图 2-29 HXD₃ 型大功率交流传动电力机车制动特性控制曲线 (23 t 轴重)

3. 25 t 轴重时的制动扭矩计算 (见图 2-30)

1) 速度 < 65 km/h

换级触点为 1N, 输出扭矩值 (kN) = $[36.4 \times \text{速度 (km/h)}] - 145.6$;

换级触点在 1N 以外, 输出扭矩值 (kN) = $[36.4 \times \text{速度 (km/h)}] - [364 \times (\text{换级触点号} - 1)]$ 。

计算结果为负时, 视为 0 kN; 计算结果超过 400 kN 时, 视为 400 kN。

2) 速度 ≥ 65 km/h

(1) 最大扭矩值。

扭矩值 (kN) = $26\,000 / \text{速度 (km/h)}$ 。

(2) 缩减扭矩值。

换级触点为 1N, 输出扭矩值 (kN) = $[36.4 \times \text{速度 (km/h)}] - 145.6$;

换级触点在 1N 以外, 输出扭矩值 (kN) = $[36.4 \times \text{速度 (km/h)}] - [364 \times (\text{换级触点号} - 1)]$ 。

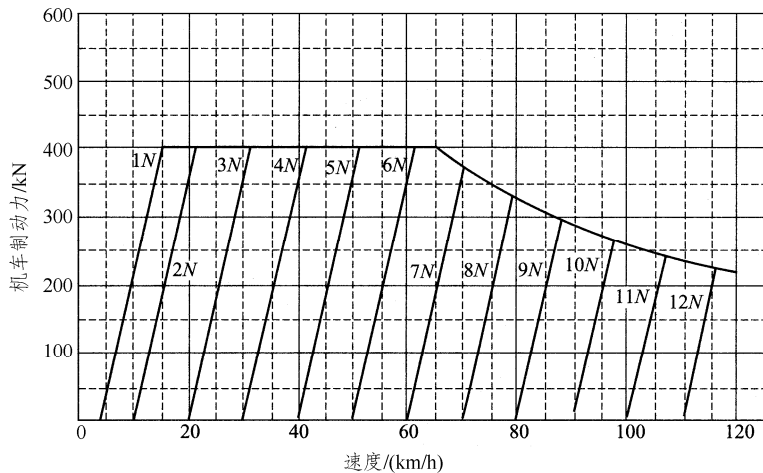


图 2-30 HXD₃ 型大功率交流传动电力机车制动特性控制曲线 (25 t 轴重)

计算结果为负时, 视为 0 kN; 计算结果超过 400 kN 时, 视为 400 kN。

(3) 输出扭矩值: 在上文“(1)”和“(2)”中, 最小值成为输出扭矩值。

【思考与练习】

1. 叙述直-直型电力机车的工作原理。
2. 直-直型电力机车有哪些工作特点?
3. 叙述交-直型电力机车的工作原理。
4. 交-直型电力机车有哪些工作特点?
5. 叙述具有异步牵引电动机的交-直-交型电力机车的工作原理。
6. 叙述具有异步牵引电动机的交-直-交型电力机车各环节的作用。
7. 具有异步牵引电动机的交-直-交型电力机车有哪些工作特点?
8. 叙述具有同步牵引电动机的交-交型电力机车的工作原理。
9. 直(脉)流牵引电动机有哪些调速方法?
10. 直传动电力机车有哪些调速方法?
11. 直传动电力机车的磁场削弱有哪些方法?
12. 交-直型电力机车的相控调压方法有哪些?
13. 叙述交-直型电力机车三段不等分半控桥式整流电路的工作过程。
14. 叙述交-直型电力机车三段不等分半控桥式整流的电压调节(升速)过程。
15. 三相异步牵引电动机有哪些调速方法?
16. 变频调速有哪些方法?
17. 叙述恒转矩变频调速原理。
18. 叙述恒功率变频调速原理。
19. 电力机车有哪些起动方法?
20. 电力机车起动有哪些要求?
21. 电力机车起动电流和起动牵引力有哪些限制?

22. 叙述电气制动的基本原理。
23. 电气制动有哪些形式？
24. 电气制动有哪些优越性？
25. 电气制动有哪些基本要求？
26. 叙述直流牵引电动机电气制动原理。
27. 叙述交流牵引电动机电气制动原理。
28. 直流电力机车有哪些电阻制动特性？各特性曲线如何？
29. 直流电力机车电阻制动特性有哪些限制（工作范围）？
30. 直流电力机车电阻制动的控制方式有哪些？
31. 直流电力机车电阻制动的不足是什么？如何克服？
32. 叙述加馈电阻制动的原理。
33. 叙述再生制动的原理。
34. 直流电力机车有哪些特性？各特性曲线如何？
35. 交流电力机车有哪些特性？各特性曲线如何？
36. 分析HXD₃型电力机车的牵引特性。