

中等专业学校试用教材

电力机车控制

吕 庆 马德育 合编

中国铁道出版社

中等专业学校试用教材

电 力 机 车 控 制

吕 庆 马德育 合编

中 国 铁 道 出 版 社

1981年·北京

内 容 简 介

全书共分十二章，内容包括：机车原理部分，机车线路部分，机车自动控制部分和机车试验部分。其中机车原理和线路理论部分只为一般性的介绍，具体线路以介绍韶山1型电力机车为主，同时介绍了韶山3型和6G型电力机车。

本书为铁路中等专业学校电力机车专业的试用教材，也可供电力机车检修工人和乘务人员学习参考。

前 言

本书是根据铁道部1978年1月铁路中等专业学校教学会议所通过的《电力机车专业教学计划》，及1978年7月铁道部中等专业学校电力机车专业教材会议通过的《电力机车控制教学大纲》编写的。

本课程是电力机车专业的一门专业课。书中内容包括四大部分：第一部分（一至五章）为机车原理部分；第二部分（六至十章）为机车线路部分；第三部分（十一章）为自动控制部分；第四部分（十二章）为机车试验部分。其中有关机车原理及线路理论部分为一般分析，具体线路部分则以韶山1型电力机车为主，同时介绍了韶山3型和6G型电力机车的线路。至于电力机车电子线路部分由《电力机车电子技术》课程讲授，不包括在本书中。

本书由西安铁路运输学校吕庆、马德育二同志编写。初稿曾由西安铁路局科研所电气化研究室审阅，提出了宝贵的修改意见。修订后由审稿会议通过。参加审稿会议的有内江铁路技术学校、北京铁路机械学校、太原铁路机械学校、包头铁路技术学校和郑州铁路司机学校的有关同志。在编写本书的过程中，曾得到株洲电力机车工厂、株洲电力机车研究所、铁道部科学研究院、宝鸡电力机务段等单位的大力支持，在此一并致以衷心的感谢。

由于我们水平有限，书中难免存在不少错误之处，望读者予以批评指正，并在教学中纠正。

编 者

一九八〇年十二月

目 录

绪论.....	1
第一章 直流电力机车的工作原理及性能.....	6
第一节 直流电力机车的工作原理.....	6
第二节 直流电力机车的速度特性和牵引力特性.....	6
第三节 直流电力机车的牵引特性和特性曲线的绘制.....	12
第四节 直流电力机车牵引电动机的选择.....	13
第二章 整流器式电力机车的工作原理及性能.....	23
第一节 整流器式电力机车的工作原理.....	23
第二节 整流器式电力机车的整流系统.....	24
第三节 整流器式电力机车的特性和特性曲线.....	30
第三章 其它型式电力机车的工作原理.....	32
第四章 电力机车的起动与调速.....	37
第一节 概述.....	37
第二节 激磁调节.....	39
第三节 磁场削弱下的牵引电动机特性曲线.....	42
第四节 电压调节.....	46
第五节 低压侧调压各级电压下的特性.....	57
第六节 电力机车的起动.....	58
第五章 电力机车的电气制动.....	62
第一节 概述.....	62
第二节 电阻制动.....	63
第三节 再生制动.....	67
第四节 电阻制动力的计算.....	73
第六章 电力机车的主线路.....	77
第一节 概述.....	77
第二节 电力机车主线路的结构特点.....	78
第三节 韶山 1 型电力机车的主线路.....	87
第四节 韶山 3 型电力机车的主线路.....	90
第七章 电力机车的辅助线路.....	93
第一节 电力机车的辅助设备.....	93
第二节 分相设备.....	94
第三节 韶山型电力机车的辅助线路.....	96
第八章 电力机车的保护线路.....	100
第一节 概述.....	100

第二节 电力机车的各种保护设施	100
第三节 韶山型电力机车的保护线路	105
第九章 电力机车的控制线路	108
第一节 概述	108
第二节 联锁方法	111
第三节 迂回电路及防止方法	114
第四节 韶山 1 型电力机车的控制线路	115
第五节 韶山 1 型电力机车电气线路综述	129
第六节 韶山 3 型电力机车的控制线路	130
第七节 电力机车的重联和重联线路	139
第十章 6G型电力机车电气线路	141
第一节 主线路	141
第二节 辅助线路	144
第三节 控制线路	147
第十一章 电力机车的自动控制	158
第一节 自动控制的基本原理	158
第二节 电力机车的自动控制系统	167
第三节 电力机车的自动驾驶	173
第十二章 电力机车的试验	175
第一节 概述	175
第二节 新制电力机车的试验	175
第三节 定检中的试验	177
第四节 韶山 1 型电力机车的高、低压试验	177
第五节 韶山 1 型电力机车电气线路故障处理	182

绪 论

一、电力牵引在国民经济中的地位及发展

铁路运输在国民经济中占有重要的地位，它担负着城乡、工矿各种物资和人员交流的主要运输任务，是国民经济的大动脉。随着工、农业生产的飞速发展，铁路运输量也相应地迅速增长，这就要求铁路运输能力必须很快的提高，即要求铁路运输趋于现代化。目前，铁路运输向现代化发展的一个主要环节就是实行牵引动力的改革，即使用新型机车来牵引列车，以代替陈旧的蒸汽机车，而实现电力牵引已成为世界公认的牵引动力改革的主要方向。从世界范围来看，电气化铁道日益剧增，各种新型的电力机车不断出现，有些工业较发达的国家已由蒸汽机车牵引为主过渡到电气牵引为主，即使已基本实现了内燃化或以内燃牵引为主的国家，如美国、英国、加拿大等，也已经和正在转向电气化。

我国当前以及今后相当长时期的主要任务，就是要在本世纪内实现四个现代化。要适应四个现代化的发展，就必须努力克服铁路运输这一薄弱环节，必须加快主要铁路干线的技术改造，提高运输能力。根据我国具体情况和世界铁路运营的经验，牵引方向定为“大力发展电力牵引和内燃牵引，以电力牵引为主”的方针。今后，在新的形势和条件下，电力牵引在我国铁路运输中所担负的任务将越来越大，铁道电气化事业将飞速发展。

电力机车除在铁路干线上应用外，城市交通运输，包括城郊客车电动车组、地下铁道电动车组和地面电车以及工矿企业内运输等方面也都起着重要的作用。

电力牵引自1879年德国第一条电气化铁道和第一台电力机车问世以来，已有整整一百年的历史。在电力牵引发展初期，主要采用的是直流制电力机车，另外也有一部分三相交流制和单相低频交流制电力机车，但直流制的电力机车，其供电电压较难提高，三相交流制接触网设备过于复杂，单相低频机车又需单独的供电电网。因而，随着生产的发展，1932年在匈牙利试验成功了单相工频制电力机车，实现了电力牵引的一次重大改革，引起了世界各国的注意，随即就出现了整流器式机车，并在五十年代得到了迅速的推广。1960年西德首先将半导体应用在电力机车上，制成了第一台半导体电力机车，又为电力机车的发展开创了一条新的道路，特别是在七十年代，可控硅得到广泛应用，从而使铁路运输进入了牵引动力现代化的新阶段。

电力牵引已成为各国发展的主要趋向，目前世界共有电气化铁路15万公里，约占世界铁路营业里程的12%，瑞士全部铁路实现了电气化，瑞典、挪威、荷兰、意大利等国电气化铁路都占营业里程的一半以上，苏联已有30%以上的铁路实现了电气化，日本、法国、西德等国的电力机车都达到了较高的水平。

随着科学技术的发展和电气化铁道运营经验的不断丰富，电力牵引中的一些重大课题逐步得到解决，更展现出了广阔的发展前景。目前，世界范围的电力牵引正在向高速和自动化方向发展，机车自动控制程度越来越高，已出现了全自动控制的无人驾驶机车。很多国家正在试制具有交流电机的高速机车，并开始研究更新型的机车，如具有时速500公里的磁悬浮

机车等。

我国的干线电力牵引始自1958年，一开始便采用了先进的单相工频交流制，1959年试制成功第一台韶山型电力机车，1960年第一条电气化区段宝（鸡）～凤（州）段（91公里）建成。随着我国牵引方针的制订，铁道电气化已提到主要的地位，目前正在修建和计划修建一些电气化线路，也正在试制新型机车，可以预料，我国的电气化铁道事业也将进入一个新的发展时期。

二、电力牵引的特点

在电力牵引中，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（或其它供电装置）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。由于电力机车与其它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，只有在机车上储存的燃料，才能作为它能量的来源，这就表现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万能性，使得电力机车具有一系列的特点。

1. 功率大

在现代铁路运输发展的趋势中，一个重要的方面就是要求机车功率大。由于在电力机车上没有产生能量的装置，也没有燃料储备，因而在同样的机车重量下，其功率要比自给式机车大。机车按单位重量所具有的功率称为机车的比功率，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40～60千瓦/吨，而较好的内燃机车，其比功率也只有25～30千瓦/吨；按每轴功率来说，电力机车已达到1,100～1,200马力，最高达到1,800马力（瑞士生产的Re型机车），较好的内燃机车每轴功率为600～800马力；从整台机车来说，电力机车的轮周功率最高已达10,000马力以上，内燃机车最高功率为6,600马力（指柴油机功率，若折算到机车轮周，则还要降低20%～30%）。

2. 速度高

提高机车运行速度是铁路运输发展的一个重要方面。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达250公里/小时，货运电力机车也达到120公里/小时，随着新型机车的不断出现，机车运行速度将进一步提高，有些国家的电力机车在试验线路上已能达到300公里/小时以上的速度。

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，而在我国这样的水利资源丰富的国家，电力牵引的

效率显然更高。

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。对于非自给的电力机车，其能量是来自较强大的供电系统，因而机车的过载能力仅受牵引电机的限制，而牵引电机的过载能力是较高的。

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，最符合铁路运输多拉快跑的要求，这样就可以提高牵引定数，缩短区间运行时间，因而使线路通过能力大大提高。在运输繁忙的铁路干线和长大坡道困难区段上使用电力牵引，其完成铁路运量的效果更为显著。法国、西德、日本等国电气化铁路里程占全国铁路的30~40%，但完成铁路运量却达到全国铁路总运量的70~85%，我国宝成铁路电气化后，完成的货运量为蒸汽机车牵引时的三倍。此外，电力牵引还不受外界条件的限制，在山区和高寒地区较之蒸汽机车和内燃机车更为优越；

2. 经济效果显著

使用电力机车牵引不但拉得多、跑得快，而且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。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，如我国宝成铁路使用蒸汽牵引时，全线共有四个机务段，电气化后仅设两个机务段，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；

3. 合理利用能源

由于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的利用能源，特别是可以利用丰富而廉价的水力资源和天然气资源，即使是由火力发电站供电，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，燃料的消耗量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，每年可节省优质煤十余万吨。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内燃为主的方针，但随着工业其它部门及国防对石油的需求日益增加，特别是七十年代以来，世界性的石油危机使石油价格暴涨，因而这些国家也趋向于向电气化方面发展。我国水力资源居于世界前列，为发展电力牵引创造了有利的条件；

4. 劳动条件好

在使用蒸汽牵引和内燃牵引时，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，改善了乘务人员和线路养护人员的劳动条件，同时也大大减轻了乘务人员的劳动强度；

5. 有利于实现城乡的电气化

发展电力牵引是整个国民经济电气化的一个组成部门，对城乡及其它部门的电气化也有一定的推动作用，特别是在一些发展中国家，农村电气化程度较低，使用电力牵引后，就使沿线农村可以方便地修建电网，促进了城乡的电气化。

三、电力机车的分类

目前,世界上使用的电力机车种类繁多,这里所说的电力机车是指电力机车和电动车组的总称,实际上包括牵引列车用的电力机车和担任客运的城郊电动车组与地下铁道电动车组。我们这里主要讨论牵引列车的电力机车。

干线用的电力机车可按不同的方面进行分类。若按其用途来分,可分为客运、货运、客货两用电力机车等几种;若以机车轴数来分,可分为四轴、六轴、八轴电力机车等。但一般是按照电力机车的供电电流制及所采用的牵引电机型式来进行分类的,电气化铁道可采用直流制和交流制供电,因而电力机车也可分为直流电力机车和交流电力机车两大类。

直流制供电的电气化铁道采用直流电力机车,它是发展最早的电力机车。在电力牵引发展初期,直流电力机车一直居于主导地位,只是在单相工频交流牵引的优越性充分显示出来之后,直流牵引的发展速度才相对减慢,但仍在电力牵引中占有重要位置。目前直流制电气化铁道里程占全部电气化铁道的一半,意大利、西班牙、波兰等国仍全部采用直流制牵引,苏联、日本、法国也都有相当数量的电气化铁道采用直流制牵引。

直流电力机车采用直流牵引电机,机车的结构简单,控制方便,易于维修,运用也比较可靠,而且容易实现再生制动。但由于接触网电压不高,一般为1,500~3,000伏,而使得送电距离受到限制,变电所数目较多,接触网结构复杂、笨重。尤其是机车逐渐向大功率方向发展,上述缺陷便更严重。因而,直流电力机车适用于较小功率牵引。除干线电力机车外,各种电动车组也多采用直流制系统。

早期的直流电力机车采用调节起动电阻和改变电机联接方式的方法进行调速,这种方法能量损耗较大,且有一定的冲击。由于可控硅技术的发展,目前已大量使用可控硅斩波调速,从而克服了上述缺点,为直流电力机车的发展开辟了一条新的道路。

在采用交流制供电的电气化铁道中,又可分为单相低频制和单相工频制两种。在电力机车发展初期,曾使用过三相供电的交流制系统,但由于供电系统过于复杂和机车不易调速,便为单相低频交流系统所取代。当时在此系统中采用的是单相整流子牵引电机,为了保证该

种电机的整流,不得不采取较低的供电频率 $\left(25\text{赫或}16\frac{2}{3}\text{赫}\right)$ 。但这种机车的出现使得供电电压大大提高,一般为11~15千伏,这就使接触网结构减轻,变电所间距离延长,能适应大功率牵引的要求。而且,采用单相整流子牵引电机,其性能也适合铁路运输的要求。只是由于供电频率与工业用电不同,因而需专用发电厂,或在工业系统与电力铁道供电系统之间设置复杂的变频设备。在单相工频制出现之后,单相工频制电力机车的原理和电路应用到了单相低频电力机车中,两种机车除供电频率不同外,其间已无大的区别。单相低频交流制在早期发展电气化的国家中延用至今,西德、瑞士、瑞典、挪威等国的交流电气化铁道全部采用单相低频交流制,世界上单相低频制的电气化铁道占全部电气化铁道里程的20%。

单相工频交流制自五十年代以来,受到世界各国的重视,发展很快。最初单相工频交流制使用的是整流器式电力机车,也是直至目前最主要的一种交流制电力机车。它由接触网受入单相交流电,经机车内的整流器整流后,供给直流(脉流)牵引电机进行工作,接触网供电电压一般为20~25千伏。这种机车既采用了高压交流供电,又采用了性能良好的直流牵引电机,且供电系统与工业系统频率相同,故具有更大的优越性。早期的整流器式电力机车

采用水银整流器（引燃管等），以后迅速地为半导体整流器所取代；可控硅广泛应用后，又使整流器式机车有了进一步发展，不仅整流系统采用可控硅，而且还打破了多年来整流器式机车采用串激牵引电机的传统，开始采用它激牵引电机。同时，在单相工频交流制中又有了新的突破，研制成功了同步型交流牵引电机电力机车和异步电机电力机车，这两种机车虽刚刚问世，但已显示出其优越性，终将进入机车牵引系统中。

单相工频交流制目前已成为电气化铁道中普遍采用的系统，一些后发展电气化的国家多采用这种系统，就连一些早期电气化的国家，如法国、苏联等国，也将它放在了优先的地位。目前单相工频制电气化铁道约占电气化铁道总里程的25%。

除了以上各种机车以外，还有少量的多电流制机车。这是由于有些国家存在着不同的电力牵引供电系统，为了在两种或多种供电系统衔接区段的连续运输或其它特定需要而少量生产了这种机车，其中主要为交、直流两用的电力机车。

第一章 直流电力机车的工作原理及性能

第一节 直流电力机车的工作原理

直流电力机车是现代电力机车中最简单的一种，它的简单原理如图 1—1 所示。工作时，直流电源由接触网（或接触轨）经受流器导入，再经断路器、调压电阻 R 、直流牵引电动机 D 、钢轨流回变电所。当牵引电动机接通电源后即行旋转，通过传动装置，带动机车动轮牵引列车运行。

直流电力机车具有下述主要优点：

1. 结构比较简单；
2. 由于采用直流串激牵引电动机，故牵引性能良好；
3. 运行比较可靠；
4. 易于实现电气制动。

但直流机车也有一些缺点：

1. 由于牵引电动机端电压的限制，接触网电压不能提得很高，则传输一定功率时电流就比较大，有色金属的耗量较多、供电效率低；

2. 为了减小接触网上的压降，全线牵引变电所的数量较多，因而基建投资较大；

3. 对于使用调压电阻的机车，起动调速时要有能量损耗，且电阻的调节一般是有级的，因而调速是不平滑的。

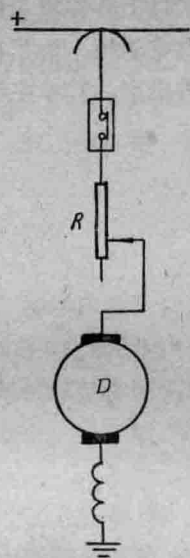


图 1—1 直流电力机车的工作原理

第二节 直流电力机车的速度特性和牵引力特性

在直流电力机车中，牵引电动机是最主要的部件，它把机车由接触网获得的电能转变为机械能，产生牵引力牵引列车运行。因此，牵引电动机的性能直接影响着电力机车的运行情况，机车的特性就决定于牵引电动机的工作特性。因而，反映机车工作能力的很多数据和曲线均是由牵引电动机的特性来确定的。我们要研究机车的特性，就必须先了解牵引电动机的特性。

直流牵引电动机的特性包括内容很多，这里，我们主要讨论一下与机车运行密切相关的几种基本工作特性。

一、直流牵引电动机的电气机械特性

直流牵引电动机的电气机械特性是指：在固定的端电压下，电机的转速、转矩、功率、效率与电枢电流的关系。即

转速特性 $n = f(I_a)$

转矩特性 $M = f(I_a)$

功率特性 $P_2 = f(I_a)$

效率特性 $\eta = f(I_a)$

在这里，我们重点分析牵引电动机最基本的工作特性——转速特性、转矩特性和效率特性。

(一) 转速特性

根据电机学中的分析，直流电动机电压平衡关系为

$$U = E_a + I_a \Sigma R_a$$

而直流电动机电枢的反电势 E_a 为

$$E_a = C_e n \Phi$$

从以上两式的关系可得出直流牵引电动机的转速公式

$$n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{C_e \Phi} \quad (\text{转/分}) \quad (1-1)$$

式中 U ——作用于牵引电动机的电压（伏）；

I_a ——牵引电动机的负载电流（安）；

ΣR_a ——牵引电动机电枢电路中的总电阻（欧）；

Φ ——牵引电动机每极磁通（韦伯）；

C_e ——牵引电动机结构常数，其值为 $C_e = \frac{pN}{60a}$ 。

其中 p ——牵引电动机的极对数；

N ——牵引电动机电枢中总的有效导体数；

a ——牵引电动机电枢绕组的并联支路对数。

由公式（1—1）可以看出，当电机负载发生变化时，即电枢电流 I_a 发生了变化，电机的转速按照上式的关系也要相应变化。但这一变化情况比较复杂，因为式中还包括磁通 Φ 这个量，由于磁通量的改变是由激磁电流来决定，并按照磁化曲线而变化的，因而对于采用不同方式激磁的电机，当负载电流变化时，磁通的改变是不同的。所以，电机的转速公式一般用于定性分析，运用实践中常用的是转速特性曲线。

转速特性曲线是用实验的方法或计算的方法求出在各种负载下的转速进行绘制而得到的一些曲线，图 1—2 表示几种不同激磁方式的直流电动机的转速特性曲线。

(二) 转矩特性

根据电机学中的分析，直流电动机的转矩公式为

$$M = C_M I_a \Phi \quad (1-2)$$

式中 I_a ——牵引电动机的负载电流（安）；

Φ ——牵引电动机的每极磁通（韦伯）；

C_M ——牵引电动机的转矩常数，与电动机的结构有关，其值为

$$C_M = \frac{pN}{2\pi a}$$

注意式（1—2）的单位，若磁通单位为韦伯，则力矩单位为牛顿·米。若力矩单位用公斤·米表示，则（1—2）表示为

$$M = \frac{1}{9.81} \cdot \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \quad (\text{公斤} \cdot \text{米}) \quad (1-3)$$

同样，转矩特性也常用转矩特性曲线来表达。图 1—3 中绘出了几种不同激磁方式下电动机的转矩特性曲线。

对于并激电动机，磁通不随电枢电流变化，故转矩与电枢电流成正比例关系， $M = f(I_a)$ 是一条直线。实际上由于电枢反应的去磁效应，使电机的转矩在电枢电流较大时稍微降低些。

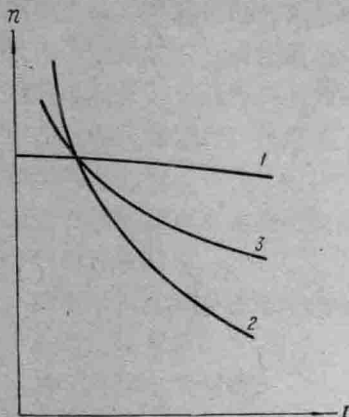


图 1—2 直流电动机的转速特性

1——并激电动机；2——串激电动机；3——加复激电动机。

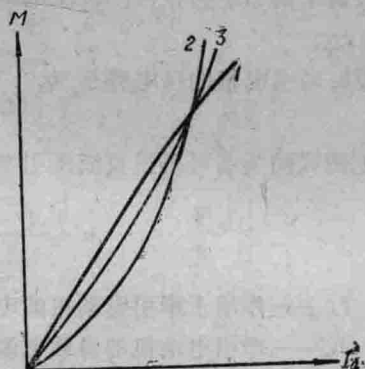


图 1—3 直流电机的转矩特性

1——并激电动机；2——串激电动机；3——加复激电动机。

对于串激电动机，在轻载时，磁路尚未饱和，故可认为

$$\Phi \propto I_a$$

则转矩与电枢电流关系可变为

$$M = C_M \Phi I_a \propto I_a^2$$

所以转矩特性 $M = f(I_a)$ 是一条抛物线。当负载增加时，随着电流 I_a 的增大，磁路饱和程度亦渐增加，电枢反应的去磁效应也随之加强，这就使 I_a 增大时，磁通的上升减慢，导致转矩的上升也慢下来。

如上所述，串激电动机在轻载时，转矩特性是按电枢电流平方关系增长的曲线，负载增大后，亦是按大于电枢电流一次方的比例增长。这样就得到了串激电动机以下两个可贵的性能：

1. 在许可的起动电流下，可以得到较大的起动转矩；
2. 过载能力较大。

加复激电动机的转矩特性是介于并激和串激电动机之间的。

(三) 效率特性

电机在工作时会产生各种损耗，其中包括电损耗（又称铜耗）、磁损耗（又称铁耗）、机械损耗和附加损耗。

根据电机负载变化对损耗的影响关系，可以将上述损耗分为两类：第一类为铜耗和附加损耗，它们都是随电流变化而变化的，而且和电流平方成正比，这类损耗称为变值损耗，可以用比例关系 $K' I^2$ 来表示；第二类为铁耗和机械损耗，它们的总和几乎与负载变化无关，这类损耗称为定值损耗，用系数 K 来表示。因此，电机的总损耗 ΣP 为

$$\Sigma p = K' I^2 + K$$

电机的效率可以用下式表示

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{UI - \Sigma p}{UI} \\ &= \frac{UI - (K' I^2 + K)}{UI} \quad (1-4) \end{aligned}$$

式中 I —— 电动机的输入电流。

根据式 (1-4) 画成曲线, 就得到电机的效率特性曲线, 如图 1-4 所示。

牵引电动机效率特性曲线的形状取决于变值损耗和定值损耗之间的比例关系。由图 1-4 可以看出电机效率有一个最大值, 根据数学极值问题分析, 它出现在 $\frac{d\eta}{dI} = 0$ 时, 此时

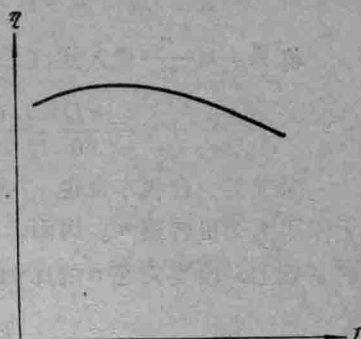


图 1-4 直流电机的效率特性

$$\begin{aligned} \frac{d\eta}{dI} &= \frac{UI(U - 2K' I) - U(UI - K' I^2 - K)}{U^2 I^2} \\ &= 0 \end{aligned}$$

化简后得

$$K' I^2 = K$$

上式说明, 电机的最大效率发生在变值损耗和定值损耗相等时。因此, 合理地选择电机的电负荷和磁负荷, 用调整变值损耗和定值损耗比例的方法, 能够使牵引电动机在负载变化的范围内, 获得最大的效率, 这是在设计电机时必须考虑的。

电机额定状态时的效率与电机额定功率大小有关。一般, 额定功率越大的电机, 它的效率也越高。例如: 200 千瓦以上的直流牵引电动机, 额定效率大约为 91% ~ 95%。

二、归算到电力机车动轮轮周的

牵引电动机电气机械特性

上面谈了牵引电动机的转速特性、转矩特性和效率特性。但在研究电力机车的运行情况时, 所需要的是归算到机车动轮轮周的电气机械特性。电机的转速 n 应换算为机车动轮轮周的线速度 V_K , 电机的转矩应换算为机车动轮轮周的牵引力 F_K , 电机的效率 η 应换算为机车的效率 η_K , 从而得到与牵引电动机的特性相对应的机车速度特性 $V_K = f(I_a)$ 、牵引力特性 $F_K = f(I_a)$ 和效率特性 $\eta_K = f(I_a)$ 。

(一) 速度特性

电力机车动轮轮周线速度 V_K 与动轮转速 n_K 有下面的关系

$$V_K = \frac{\pi D}{60} n_K \quad (\text{米/秒}) \quad (1-5)$$

式中 D —— 机车动轮直径 (米);

n_K —— 动轮转速 (转/分)。

轮对的转速是由牵引电机的转速 n 决定的。电机轴上装有小齿轮, 轮对轴上装有大齿轮, 电机转速与动轮转速之比即为齿轮的传动比 μ , 即

$$\mu = \frac{n}{n_K}$$

将 $n_K = \frac{n}{\mu}$ 代入式 (1-5)，并将速度单位换算为公里/小时，即得

$$V_K = \frac{\pi D}{60} \cdot \frac{n}{\mu} \cdot \frac{3600}{1000} = \frac{6\pi D}{100\mu} \cdot n \quad (\text{公里/小时}) \quad (1-6)$$

对于某一台机车来说， μ 和 D 均为常数，所以，由式 (1-6) 可知，机车速度 V_K 正比于牵引电动机转速 n 。因而，欲求机车的速度特性，只要在牵引电动机转速特性 $n = f(I_a)$ 的基础上，改变转速 n 的比例尺（乘以 $\frac{6\pi D}{100\mu}$ ），就得到机车的速度特性 $V_K = f(I_a)$ 。即

$$\begin{aligned} V_K &= \frac{6\pi D}{100\mu} \cdot n \\ &= \frac{6\pi D}{100\mu} \cdot \frac{U - I_a \sum R_a}{C_e \Phi} \\ &= \frac{U - I_a \sum R_a}{C \Phi} \quad (\text{公里/小时}) \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中 C —— 与牵引电动机及机车本身结构有关的常数，其值为

$$\begin{aligned} C &= \frac{100\mu}{6\pi D} \cdot C_e = \frac{100\mu}{6\pi D} \cdot \frac{pN}{60a} \\ &= \frac{\mu p N}{3.6\pi a D} \end{aligned}$$

(二) 牵引力特性

牵引电机产生在轴上的转矩 M 被传到动轮轴上，在不考虑传动损耗时，转矩 M 可用下式表示

$$M = F_z \cdot \frac{d_z}{2} \quad (\text{公斤} \cdot \text{米}) \quad (1-8)$$

式中 F_z —— 小齿轮齿上所受的切向力；

d_z —— 小齿轮节圆直径。

机车动轮对上的转矩为

$$M_K = F_K \cdot \frac{D}{2} = F_z \cdot \frac{D_z}{2} \quad (\text{公斤} \cdot \text{米}) \quad (1-9)$$

式中 F_K —— 机车动轮轮周和钢轨接触处所产生的切向牵引力；

D_z —— 大齿轮节圆直径。

为求出机车动轮轮周牵引力 F_K 与牵引电动机转矩之间的关系，可将式 (1-8) 中 F_z 代入式 (1-9)，得

$$F_K \cdot \frac{D}{2} = \frac{2M}{d_z} \cdot \frac{D_z}{2} = \frac{D_z}{d_z} \cdot M \quad (\text{公斤} \cdot \text{米}) \quad (1-10)$$

由于齿轮传动比 $\mu = \frac{D_z}{d_z}$ ，并考虑到传动装置的效率 η_g （即考虑齿轮传动和电机电枢轴承的机械损耗），可以由式 (1-10) 得到以牵引电机转矩 M 所表示的机车动轮轮周牵引力 F_K 。即

$$F_K = \frac{2\mu}{D} \cdot \eta_g \cdot M \quad (\text{公斤}) \quad (1-11)$$

由于牵引电机的转矩 M 及机车传动装置的效率 η_g 均与负载电流的变化有关，故机车的牵

引力也是负载电流的函数。

在设计中, 机车牵引力常以牵引电动机的功率来计算。机车每对动轮轮周上的功率 P_K 等于每对动轮轮周牵引力 F_K 与机车轮周线速度 V_K 的乘积, 即

$$\begin{aligned} P_K &= F_K \cdot V_K \quad (\text{公斤} \cdot \text{公里/小时}) \\ &= 9.81 F_K \cdot \frac{1000}{3600} V_K \quad (\text{瓦}) \\ &= \frac{F_K V_K}{367} \quad (\text{千瓦}) \end{aligned} \quad (1-12)$$

在抱轴式悬挂的机车上, 每对动轮轮周上的功率又等于每台牵引电动机的输出功率 P_2 与齿轮传动效率 η_g 的乘积, 则每轴轮周牵引力为

$$F_K = \frac{0.367 P_2}{V_K} \eta_g \quad (\text{公斤}) \quad (1-13)$$

而 $P_2 = U I_g \eta \quad (\text{瓦})$

则 $F_K = 0.367 \frac{U I_g}{V_K} \eta \eta_g \quad (\text{公斤}) \quad (1-14)$

式中 η ——牵引电动机本身的效率;

I_g ——牵引电动机输入电流, 在串激电机中也就是电枢电流 I_a 。

此外, 机车的牵引力特性公式还可以用牵引电动机电磁牵引力 F_a 来表达。

牵引电动机的电磁功率为

$$\begin{aligned} P_a &= F_a \cdot V_K (\text{公斤} \cdot \text{公里/小时}) \\ &= \frac{1}{0.367} F_a \cdot V_K \quad (\text{瓦}) \end{aligned}$$

而 $P_a = E I_a = (U - I_a \Sigma R_a) I_a$

则
$$\begin{aligned} F_a &= 0.367 \frac{(U - I_a \Sigma R_a) I_a}{V_K} \\ &= 0.367 \frac{(U - I_a \Sigma R_a) I_a}{\frac{U - I_a \Sigma R_a}{C \Phi}} \\ &= 0.367 C \Phi I_a \quad (\text{公斤}) \end{aligned} \quad (1-15)$$

如果考虑到牵引电动机本身的损耗以及传动装置的损耗, 轮周牵引力公式可写为

$$\begin{aligned} F_K &= F_a - \Delta F \\ &= 0.367 C \Phi I_a - \Delta F \end{aligned} \quad (1-16)$$

式中 ΔF ——把牵引电动机的铁耗、机械损耗及传动装置的损耗折算成的力的损耗。

ΔF 与电磁牵引力比起来是很小的, 因此, 一般在计算中常忽略不计。即使要考虑这一部分时, 由于 ΔF 的值受很多因素的影响, 具体计算非常繁琐, 通常简化地认为 ΔF 是一个常数。

由式(1-16), 并在已知 $\Phi = f(I_a)$ 的情况下, 可得出 $F_a = 0.367 C \Phi I_a$ 的值, 假定 ΔF 为常数, 可用图解法求得 $F_K = F_a - \Delta F$ 的值, 从而得到机车的牵引力特性曲线 $F_K = f(I_a)$ 。

在上述分析过程中, 所提到的牵引力都是指一台电机而言, 对于整台机车, 则要考虑到所用牵引电动机的数目, 假设机车上共用 m 台牵引电动机, 各牵引电动机的特性也完全相同, 即在运行中各牵引电动机的转速和牵引力都是相同的, 则整台机车的轮周牵引力为