

292186

成都工學院圖書館
基本館藏

高等学校教学用书

电力机车控制

唐山铁道学院电力机车教研组编



人民铁道出版社

高等学校教学用书

电力机车控制

唐山铁道学院电力机车教研组编

人民铁道出版社

一九六二年·北京

1858

5093
18580

本书經铁道部教材編审委员会推荐为铁路高等学校教学用书，适用于电力机車专业，也可供电气化铁道方面有关技术人員参考之用。

全书共有三編。主要叙述电力机車的工作原理，内容包括电力机車的起动、速度調节和电气制动、主綫路及其保护、控制系統、輔助綫路，电力机車的总体設計和总体布置及試驗等。

本书主編单位：唐山铁道学院电力机車教研組

本书主編人：杜庆萱

参加編写人員：任与廷 荣德善 等

高等学校教学用书

电力机車控制

唐山铁道学院电力机車教研組編

人民铁道出版社出版

(北京市霞公府17号)

北京市书刊出版业营业許可证出字第010号

新华书店北京发行所发行

人民铁道出版社印刷厂印

书号1858 开本787×1092毫米 印張17 $\frac{1}{2}$ 插頁2 字數499千

1962年4月第1版

1962年4月第1版第1次印刷

印數0,001—1,000册 定价(10)2.45元

目 录

緒論	1
§ 0-1 电力机车在我国铁道运输事业中的地位与作用	1
§ 0-2 电力机车发展簡史与前瞻	3
§ 0-3 电力机车的工作特点与分类	3
第一編 电力机车的工作原理	
第一章 电力机车概述	6
§ 1-1 直流电力机车的工作原理	6
§ 1-2 单相整流子电动机电力机车的工作原理	7
§ 1-3 单相整流子电动机电力机车的电牵引特性	8
§ 1-4 整流器电力机车的工作原理	11
§ 1-5 异步电动机电力机车的工作原理	13
§ 1-6 电力机车的基本工作状态	13
第二章 电力机车的速度調节	14
§ 2-1 速度調节的基本要求和方法	14
§ 2-2 牵引电动机的激磁調节	15
§ 2-3 磁場削弱下的特性曲綫	21
§ 2-4 磁場削弱系数及調速級数的确定	24
§ 2-5 牵引特性可控的激磁調节綫路	25
§ 2-6 直流牵引电动机的組合及牵引特性的計算	26
§ 2-7 变压器电压調节	29
§ 2-8 变压器的高压側調压	29
§ 2-9 变压器低压側調压	34
§ 2-10 具有过渡电阻的电压調节綫路	34
§ 2-11 具有过渡电抗器的电压調节綫路	36
§ 2-12 具有增压变压器的电压調节綫路	41
§ 2-13 具有整流子調节器的电压調节綫路	42
§ 2-14 整流器电力机车的栅控調压	43
§ 2-15 异步电动机电力机车的速度調节	47
§ 2-16 供电频率的調节綫路	51
§ 2-17 各种速度調节方法的分析比較	54
第三章 电力机车的起动	54
§ 3-1 电力机车的起动概述	54
§ 3-2 平滑起动与分級起动	65
§ 3-3 平滑变阻起动	68
§ 3-4 直流牵引电动机的分級起动及起动特性的計算	60
§ 3-5 直流电力机车起动电阻的計算和起动图	62
§ 3-6 附加級及其求法	64

§ 3-7	異步电动机电力機車的变阻起動	66
§ 3-8	变阻起動的功率損失及起動效率	69
§ 3-9	$\Delta I =$ 常值时单相整流子电动机电力機車起動級的确定	72
§ 3-10	$\Delta U =$ 常值时单相整流子电动机电力機車起動級的确定	74
§ 3-11	整流器电力機車起動級的計算	76
§ 3-12	整流器电力機車的不对称調压起動	79
§ 3-13	整流器电力機車的栅控起動	82
§ 3-14	異步电动机电力機車的变频起動	83
§ 3-15	調車級和超压級	84
§ 3-16	电力機車各种起動方法的分析与比較	85
第四章 电力機車的电气制動		86
§ 4-1	电气制動的基本原理及分类	86
§ 4-2	电气制動的經濟技术意义	87
§ 4-3	直流串激电动机的变阻制動及其外部电稳定性	88
§ 4-4	直流串激电动机变阻制動的內部电稳定性及其稳定条件	90
§ 4-5	直流串激电动机变阻制動的联接綫路	91
§ 4-6	串激磁变阻制動特性	95
§ 4-7	串激磁变阻制動的界限	97
§ 4-8	串激磁变阻制動級及电阻的計算	98
§ 4-9	单相整流子电动机的变阻制動	101
§ 4-10	整流器电力機車的变阻制動	103
§ 4-11	再生制動的电稳定性	105
§ 4-12	并激磁再生制動	106
§ 4-13	复激电动机的再生制動	107
§ 4-14	具有差激磁激磁机的再生制動系統	109
§ 4-15	具有稳定电阻的再生制動系統	112
§ 4-16	单相整流子电动机电力機車的再生制動	114
§ 4-17	異步电动机电力機車的再生制動	117
§ 4-18	整流綫路的逆变流原理	118
§ 4-19	逆变流綫路的分析	119
§ 4-20	引燃管电力機車再生制動的自动調节基本原理	122
§ 4-21	整流器电力機車均衡电阻的計算及再生制動稳定性的分析	123
§ 4-22	整流器电力機車再生制動特性的計算	126
§ 4-23	$X_d =$ 常值时再生制動綫路的分析	128
§ 4-24	再生制動特性的界限	129
§ 4-25	合理選擇电力機車的制動方式	131

第二編 电力機車的控制

第五章 电力機車的主綫路		132
§ 5-1	主綫路的設計原則	132
§ 5-2	直流电力機車牽引电动机組合的轉換方法	134
§ 5-3	起動电阻的联接綫路	141
§ 5-4	故障电机的切除及其綫路	142
§ 5-5	工矿用直流电力機車的主綫路	144
§ 5-6	单相整流子电动机电力機車主綫路的特点	145

§ 5-7	整流器电力机车整流线路的选择	148
§ 5-8	整流线路的换相	153
§ 5-9	整流线路基本参数的确定	159
§ 5-10	X_d 有定值时整流线路的换相	161
§ 5-11	整流电流的脉动及平波电抗器电感值的确定	171
§ 5-12	整流器的并联工作及阳极分流器	174
§ 5-13	整流器电力机车特性的计算	176
§ 5-14	低压侧调压引燃管电力机车的主线路	179
§ 5-15	高压侧调压引燃管电力机车的主线路	182
§ 5-16	半导体整流器电力机车的主线路	183
第六章 电力机车的保护		187
§ 6-1	概论	187
§ 6-2	过电流保护	188
§ 6-3	接地保护	190
§ 6-4	空转保护	192
§ 6-5	过压与欠压保护	192
§ 6-6	逆弧保护	194
§ 6-7	整流器电力机车再生制动的保护	195
第七章 电力机车辅助设备的选择		196
§ 7-1	概论	196
§ 7-2	电动压缩机	198
§ 7-3	电动通风机	200
§ 7-4	分相机	202
§ 7-5	控制发电机	202
§ 7-6	采暖、照明及其他辅助设备	203
§ 7-7	整流器电力机车的冷却装置	204
§ 7-8	电力机车的辅助线路	206
第八章 电力机车的控制系统		211
§ 8-1	电力机车控制系统概述	211
§ 8-2	电力机车控制系统的設計原则	212
§ 8-3	控制系统的供电	213
§ 8-4	控制线路的习用符号	214
§ 8-5	联锁方法	215
§ 8-6	控制线路中的迂迴电路	223
§ 8-7	手动控制系统	224
§ 8-8	非連續自动控制的基本原理	226
§ 8-9	非連續自动控制系统的自动控制线路	227
§ 8-10	連續自动控制的基本原理	231
§ 8-11	連續自动控制系统的自动控制线路	232
§ 8-12	多机牵引的控制线路	236
§ 8-13	引燃管的控制系统	240
§ 8-14	引燃管的控制线路	244
§ 8-15	电力机车的自动駕駛	245
§ 8-16	直流工矿电力机车的控制线路	247
§ 8-17	低压侧调压引燃管电力机车的控制线路	250

§ 8-18 高压侧调压引燃管电力机车的控制线路 256

第三編 电力机车的总体布置与試驗

第九章 电力机车的总体設計和总体布置 260

§ 9-1 电力机车的总体設計 260

§ 9-2 电力机车总体布置的基本原则 262

§ 9-3 电力机车的总体布置 262

§ 9-4 电动車組的总体布置 265

第十章 电力机车的試驗 266

§ 10-1 試驗的目的与分类 266

§ 10-2 电力机车的出厂試驗 266

§ 10-3 电力机车的調整試驗 268

§ 10-4 电力机车牵引运行試驗 270

§ 10-5 电力机车动力与强度試驗 272

§ 10-6 电力机车試驗用的設備 273

附录 电气控制线路习用符号 277

緒 論

§0—1 电力机車在我国铁道运输事业中的地位与作用

我国是一个人口众多、幅員广闊、物产丰富的国家，解放以来，在党和政府的正确领导下，全国人民干劲冲天，发憤图强，工农业生产飞速发展，相应地铁路运输量也在迅速增长，这就要求铁路运输能力必須很快的提高，来适应这种新形势的发展需要。我国铁路现在采用的蒸汽机車牵引也越来越显得不能滿足客观的要求，必須尽快实现技术改造，其中一个主要环节即是采用新型的牵引动力——电力机車与內燃机車。我国电力机車制造事业是在党的社会主义建設总路綫、大跃进、人民公社三面紅旗光輝照耀下发展和成长起来的，今后在新的条件下它将得到更快的发展。

电力机車具有功率大、速度高的特点，并且容易实现多机牵引，由一台机車上的司机室同时控制几台电力机車。因之铁道运输改用电力机車牵引列車优点很多，可以提高列車运行速度，加大列車重量，提高机車車輛生产率，从而大大改进铁路运输能力与通过能力，并縮减从业人員的編制。苏联铁路的經驗证明，一台电力机車可以代替2~3台蒸汽机車的工作，电力机車每吨粘着重量的生产率約为蒸汽机車和內燃机車的二倍。在我国来說水力资源丰富，今后若利用水力发电供电力机車牵引之用，还可以大量节约燃料，降低运营費用。此外，电力机車运行时沒有煤烟与蒸汽排出，对車站与綫路的清洁卫生創造良好条件；电力机車乘务人員劳动条件良好；同时电力机車工作也不受严寒高温的影响，电力机車爬坡能力强、起动机快，特别适宜山区隧道多坡度陡的綫路，对大城市客货运繁忙的区段及严寒地带的綫路更能发挥其优越性。

綜合以上所述，电力机車的优越性十分显著。毫无疑问，随着国民經济的发展，电力机車在我国整个铁路运输总运量中所负担的牵引比重将会越来越大。

电力机車牵引除了在铁路干綫上应用外，我国城市交通運輸(包括地上的电車与地下铁道电动車輛)、工矿企业厂內运输等方面也都将起着日益重要的作用。

§0—2 电力机車发展簡史与前瞻

电力机車的发展历史，是与电力牵引的发展与应用、电机电器制造的发展分不开的。电力机車由小型的直流电車开始，逐漸发展到现代的大型交流电力机車。

最先把电能用于牵引方面的是俄国院士B. C. 雅可比，他在1834年創造了第一部有实用价值的电动机，并在1838年将他发明的电动机装在一只小船上，在涅瓦河上进行試航。这次試驗是以电能作为牵引动力的开始，并有力地证明了电能用于牵引的可能性。与此同时，雅可比也提出了机車用电力来牵引的問題。

电力机車最早是以城市电車的形式出現的。1876年俄国工程师Ф. A. 彼罗茨基沿軌道輸送电力試驗成功，并随后在彼得堡的馬車铁路上行駛了一节电动車輛，重7吨多，載旅客40人，时速12~14公里。电动机采用了电車式悬挂和齿輪傳动，利用变阻調速和反向控制。这是电力机車用于城市交通運輸的第一次試驗。

接着在德国与美国也先后試制了小型电力机車。1879年德国西門子公司在柏林工业展覽会上展出了一台装有电动机的雛形电力机車，它可乘載几个旅客在軌道上行駛，功率只有3馬力，用的是100伏直流电。在这一段时期內，由于供电电压低，电能的輸送距离很短，所以电力牵引只限于城市运输之用。

铁路干綫上采用电力牵引，是从1895年开始。当时，美国巴尔底摩—俄亥俄铁路靠近巴尔底摩的一个区段，首先实现了电气化。但是这条铁路，以及随后电气化的其他若干铁路区段，采用的是600伏直流。当时由于直流电机制造水平的限制，还不能将直流电压提得再高。供电距离太短，牵引变电所和接触网的建設需要大量投資，因而妨碍了干綫电力牵引的广泛应

用。

在直流电力牵引出现不久,由于三相交流电与三相异步感应电动机的发明,三相交流制电力牵引也接着在瑞士和意大利等国诞生。1898年瑞士电气化铁路上用的是750伏,42赫芝的三相交流电。1902年意大利范里齐林铁路上则采用3000伏15赫芝三相交流系统。在这个电气化区段有10节电动车辆,功率为500马力,9台电力机车,功率分别为900、1200、1500马力。三相交流电力机车因为需要由双接触导线的接触网悬挂来供电,因此使电力铁道接触网设备大大复杂化,不仅成本提高并且还限制了接触网的容许电压,这就不能充份发挥交流制的优点。故三相交流制电力牵引虽曾在意大利应用了一个时期,但不久还是为直流制电力牵引所代替而使其发展停顿下来。

为了克服直流电力牵引接触网电压低的缺点,差不多与三相交流电力牵引出现的同时,单相交流制电力牵引也开始引起人们的注意。在二十世纪初,电机制造的水平较低,单相工频整流子电动机的设计制造还存在不少困难,电机的整流问题没有很好解决,因之电力铁道开始采用的是单相低频交流系统。1906年美国第一台单相整流子电动机电力机车投入运用,电压为11仟伏,频率为25赫芝。

随着生产力的发展,电气化铁路的运输量日益增加,电力机车的功率也逐步加大,因之迫切需要提高直流电力牵引的接触网电压。直流电气化铁路发展到1914~1915年间,接触网电压已由过去的数百伏提高到3000伏。3000伏直流电牵引制为铁路电气化开辟了广阔的远景。在1950年以前,世界各国铁道电气化较大部分采用的是直流制。苏联过去电力铁道全部为直流制,接触网电压为3000伏。

苏联在十月革命之后,铁路电气化得到了迅速发展,1932年苏联首次试制了以列宁名字命名的ВЛ19型直流电力机车。卫国战争结束后,开始生产更加完善的ВЛ22^м型直流电力机车。从1932年起到目前,苏联生产的干线直流电力机车主要有Сс, ВЛ19, ВЛ19^м, ВЛ22, ВЛ22^м, Н8, ВЛ23等型号。功率由2000瓩增加到4200瓩。在城郊电动机组的制造方面,从1933年到1957年间曾先后制造了СД, СР, СР³, СМ, РС, ЭР1等型的电动机组,其功率由660瓩提高到800瓩。

电力机车的功率在不断增大,过去一度认为比较先进的3000伏直流制电力牵引,逐渐又不能满足生产发展的要求,在这种情况下单相工频交流制电力牵引的大量采用已成为客观形势发展的必然结果,而交流电力机车的研究工作在更早一个时期就已经开始了。

随着电力机车功率的增大,供电系统要求提高接触网电压,但直流电力机车的电压却受到牵引电动机整流子电压的限制。为了充分利用直流牵引电动机的优点,同时满足接触网电压提高的要求,就产生了整流器电力机车,使矛盾得到了统一。苏联早在1939年就已试制了一台单相-直流水银整流器电力机车,电压20仟伏,频率50赫芝,只是由于当时水银整流器制造技术水平的限制与战争的影响,这种电力机车没有大规模生产。

单相工频交流电力牵引在匈牙利虽然应用得比较早(1923年开始即有第一台单相-三相电力机车运行),但因所采用的异步电动机电力机车设备复杂,没有能够推广,单相工频交流电力牵引的大量采用大致在1950年开始,当年法国首先在18公里的铁路上试用单相工频交流电力牵引,电压20仟伏。由于试验成功,随后在363公里的铁路上采用了同一电流制电力牵引,电压提高为25仟伏,并为这一区段生产了105台交流电力机车。

苏联采用单相工频交流电力牵引是从1954年开始的。这一年苏联建造了交流电气化试验区段,并试制了试验用的H0型单相引燃管电力机车。1957年又开始试制功率4000瓩的H60型引燃管电力机车,现已投入成批生产。近年来半导体的研究和制造取得了很大成就,大功率半导体整流器用于电力牵引将是一个重要发展方向。半导体整流器电力机车苏联及其他国家均在积极进行研究与试制中。

从电力机车控制来看,也说明了科学技术与生产力间的相互促进关系。早期的电力机车(电车)由于功率小,电压低,采用的是直接控制系统。电力机车供电电压提高、功率增大后,由

司机操纵司机控制器直接切换电力机车主电路就发生困难，因而产生了间接控制系统。电力机车工作时，要求控制系统动作准确，避免发生故障影响行车，控制系统也就逐渐由线路较复杂的个别控制系统改进为更可靠的组合控制系统。手动控制的电力机车，其运行情况在很大程度上决定于司机工作的熟练程度，为了提高机车工作效率改善机车操纵质量，电力机车控制也不断向自动化方向发展。苏联在1958年以电子数字计算机自动驾驶电动车组试验成功。试验运行证明，不但列车运行安全正点，而且节约电能5~7%。电力机车的控制方式由直接控制发展为间接控制，由个别控制系统改进为组合控制系统，由手动控制发展为自动控制，乃至更进一步向自动驾驶、远距离控制发展，都是由于电力机车生产力发展的客观要求所促成的。反过来，电力机车控制技术的不断革新也将促使电力机车向功率大、速度高、性能好、技术新、成本低的方向发展。

回顾我国电力机车制造情况，解放以前，电力机车制造事业在我国可以说是一个空白点，城市电力牵引虽然应用较早，工矿企业也有若干处采用电力机车牵引，但在旧中国无论是城市中的电车或是工矿电力机车都是依靠国外进口的，国内工厂只能担任电气设备的维修工作。这种落后状态在解放之后才有了根本的改变。

解放以后，在党和政府的正确领导下，和其他各种工业一样，电力机车制造事业获得了迅速发展。在第一个五年计划期内，我国的电机制造厂已开始自制城市电车用的直流牵引电动机。特别是自从1958年大跃进以来，在党的三面红旗照耀下，在苏联无私帮助下，我国电力机车制造进入了一个新阶段。在极短的时间内，我国有关的制造工厂已先后试制出80吨工矿直流电力机车。1959年第一台138吨铁路干线电力机车——韶山型电力机车试制出来，为今后我国进一步发展电力机车制造事业，奠定了技术基础，这些机车有的已投入成批生产，有的正在积极进行研究试验，进一步提高产品质量。

此外，几年来通过工厂、科学研究机构及高等院校共产主义大协作，还对电力机车这一学科进行大量研究工作，取得了很大成绩。

虽然我国电力机车制造工业发展较晚，厂史很短，但社会主义制度为科学技术的发展创造了一切必要条件，在党的领导下，通过大家的努力，使我国电力机车制造事业在短期内迅速发展，并力争达到世界先进水平是有充分信心的。

§0—3 电力机车的工作特点与分类

机车牵引列车作功所需的能量，可以由机车本身产生，也可以由外部源源不断供给，前者我们称之为自给式机车，而后者称为非自给式机车。

电力机车、蒸汽机车或内燃机车（统称热力机车），性质上根本的不同点，也就在于电力机车是非自给式机车。它作功所需的电能是源源不断地由一次供电系统通过接触网而取得的。相反，热力机车是自给式机车，拿蒸汽机车来说，蒸汽机作功所需的热能是由装在机车上的锅炉产生的。

正由于电力机车具有这种非自给性，从而也就客观上决定了它具有一系列的特点，主要表现在下面几方面。

(1) 取用能量的万能性。

对于自给式的热力机车来说，只有蓄存有能量的物质（燃料如煤，石油等）才能作为它原始能量的来源。但是对于电力机车，它所需的电能，却可以由一切形式的能量如热能、水能、原子能等转换而来。电力机车这种取用能量的万能性，就使得在运输上有可能利用各种能量资源，特别是无穷无尽的水利资源，同时也决定了电力机车较热力机车有较高的效率。

每一台自给式机车平均效率的数值实际上是固定的，比如现在在蒸汽机车的平均试验效率不超过8—10%，其平均运用效率还要低，不超出3—4%，内燃机车平均运用效率在20—23%的范围内。

对于电力机车来说，它的平均运用效率不是常数，而与供电的特性有关。在由水电站供电

的情况下，其效率值在 65—70% 的范围内。如由高参数蒸汽的热电站供电，其效率为 21—26%，即使由一般的热电站供电，其效率也可达 16—18%。如果一次供电系统的电能平均 30% 来自水电站，10% 来自高参数蒸汽的热电站，而其余则来自一般的热电站，那么电力机车的效率将为 32—34%。

由上可见，电力机车取用能量万能的性质所产生的经济效果是难以估计的。

(2) 非自给式机车具有更高的过载能力。

机车起动列车和牵引列车通过限制坡道时，其过载能力具有很大的意义。在相同额定功率的情况下，机车过载能力愈高，则愈能满足多拉快跑的要求。

对于自给式机车来说，比如蒸汽机车，它的过载能力受两方面的限制：一方面受产生一次能量的装置（锅炉）过载能力的限制，另一方面受发动机（蒸汽机）过载能力的限制。对于非自给式电力机车来说，它的能量来自一次供电系统。一台电力机车的功率与一次供电系统的容量相比，是非常小的。因此电力机车的过载能力就不会受到这一方面的限制，而仅决定于牵引电动机的过载能力。但是牵引电动机的短时过载能力总是很高的。

(3) 非自给式机车具有较小的单位功率重量。

机车的技术水平，在很大的程度上，可以用单位功率的重量（机车总重对机车功率之比）来标志。机车的单位功率重量愈小，则它的技术条件也愈完善。

非自给式机车的单位功率重量较自给式机车小得多。这是由于在电力机车上没有沉重的产生能量的装置，也不需燃料储备。如果现代电力机车每一瓦额定功率的重量为 25—45 公斤，那么即使是对于较好的自给式机车（内燃机车）来讲，其单位功率重量亦不低于 60~80 公斤/瓦。

由于电力机车有较小的单位功率重量，因而有可能得到较高的运行速度，降低单位工作的运营费用以及其它一系列宝贵特点。

(4) 非自给式机车没有非生产的作业状态。

由前面的叙述可见，蒸汽机车的试验效率与平均运用效率之间有较大的差别。产生这种情况的根源，在于蒸汽机车有大量的非生产作业。比如说蒸汽机车在运行中间停车而不作有效功的时间内，其产生能量的装置（锅炉）必须保持着热的状态，因而有大量燃料耗用于非生产性的作业。对于内燃机车，这种情况虽然改善了很多，但在机车上终究装有产生能量的装置，故机车在运行之前，必要的非生产作业是不可避免的。

(5) 非自给式机车能采用再生制动

对于自给式机车来说，通常采用机械制动。当采用闸瓦制动时，伴随着制动过程不仅有大量的能量损失，而且还造成闸瓦、轮箍及其他零件的强烈磨损。电传动的内燃机车，虽然有可能采用变阻制动，因而可以大大减少零件的磨损。但是在这种情况下，制动能量也并不能反馈回去，使能量用于有益的目的，而是消耗在制动电阻内。

只有非自给式的电力机车才可能采用有益的再生制动。在采用这种制动时，牵引电动机作发电机运转，将列车的动能或位能转换为电能，然后反馈给接触网用于牵引的目的，或反馈给一次供电系统作其他有益之用。

再生制动是非自给式牵引系统的直接产物，自给式机车是不可能实现再生制动的。

电力机车的上述主要特点，从根本上来讲，都决定于它的非自给性。这些特点具体对每台电力机车来说是可能的，但并不是绝对的，也就是说，其中某些特点对于个别类型电力机车可能并不具备，比如某些类型电力机车并未采用再生制动。

在说明了电力机车总的工作特点之后，我们将对电力机车的类型作一简单介绍。这里所说的电力机车是电力机车与电动车辆的统称，既包括了牵引列车用的电力机车，也包括了担任旅客运输的城郊电动车辆与地下铁道电动车辆。

牵引列车的干线电力机车可按下列三方面进行分类：

(1) 按用途的不同电力机车可分为：

客运电力机车——用来牵引高速客运列车，其特点是速度快，但牵引力不大。

货运电力机车——用来牵引重载货物列车，特点是牵引力大，但速度不太高。

调车电力机车——站场上编组列车之用，速度与牵引力均较低，功率较小。

(2) 按传动的型式电力机车可分为：

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。这些轮对我们称之为动轮对。

具有组合传动的电力机车——电力机车上某几个轮对用连杆互相连接成组，然后由一台牵引电动机来驱动。

现代的电力机车，大都采用个别传动方式，而很少再采用组合传动的。

(3) 按电流制分类

现在电气化铁道主要采用两种电流制，即直流制与单相工频交流制。

(a) 直流制：

接触网上的电压为 1500、3000 伏直流电压。采用的电力机车为直流电力机车，机车装有直流串激牵引电动机。

(b) 单相工频(50 赫芝)交流制

接触网上电压为单相 50 赫芝 20 千伏或 25 千伏交流电压。在这种电流制下，电力机车可以有以下三种型式：

1. 整流器电力机车

这种电力机车亦称单相-直流电力机车。机车上装有变压器降压，整流器将单相交流变换为直流。牵引电动机采用直流串激电动机。

2. 单相整流子电动机电力机车

单相整流子电动机电力机车亦称直接式交流电力机车。这种电力机车采用单相整流子电动机作牵引电动机，接触网上的高压交流电先经过变压器降压后再供电给牵引电动机。

3. 异步电动机电力机车

这种型式的电力机车有时也称单相-三相电力机车。在这种机车上单相交流电首先要通过分相机变为三相交流电再供电给三相异步牵引电动机。

电力铁道如果采用单相低频(25 赫芝或 $16\frac{2}{3}$ 赫芝)交流制，则电力机车大都为单相整流子电动机电力机车。当然也可能采用其他类型的交流电力机车。

电动车组按其用途来分类有：城郊电动车组；城市间电动车组；及地下铁道电动车组。城郊电动车组与地下铁道电动车组的特点是有较大的起动加速度与制动减速度。城市间电动车组的起动加速度较低一些。电动车组按电流制分类与电力机车相同。

第一編 電力機車的工作原理

第一章 電力機車概述

§1—1 直流電力機車的工作原理

直流電力機車和電動車組(以下簡稱電力機車)在現代電氣牽引中仍占有重要的地位,它不但在地下鐵道及工礦企業運輸中得到了極其廣泛的採用,並且在不少國家的干綫電氣化鐵道電力機車中占有很大的比重。這種電力機車的基本特點是:結構簡單,工作可靠,性能良好;它是現代電力機車中結構比較簡單的一種。圖1—1中繪出了這種電力機車的原理綫路圖。工作時直流電流由接觸網(或接觸軌)導入,然後經牽引電動機、鋼軌而流回牽引變電所。

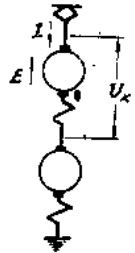


圖 1—1

直流牽引電動機是直流電力機車電氣設備中最主要的構成部分之一,它的作用在於:變電能為機械能,產生牽引力驅動列車運行。牽引電動機的工作特性直接地決定了電力機車的工作特性。直流牽引電動機的基本工作特性是它的轉速特性(表示轉速與負載電流的關係)和轉矩特性(表示轉矩與負載電流的關係)。

直流牽引電動機的轉速可按下式計算:

$$n = \frac{U_k - IR}{C_n \Phi} \quad \text{轉/分。} \quad (1-1)$$

式中, U_k ——作用於牽引電動機的整流子電壓(伏);

I ——牽引電動機的負載電流(安);

Φ ——牽引電動機的每極磁通(馬);

R ——牽引電動機電樞電路中的電阻(歐);

$C_n = \frac{Z}{a} \cdot \frac{p}{60} \cdot \frac{1}{10^8}$ ——牽引電動機的結構常數。其中 Z 為牽引電動機電樞中的導體數; a 為牽引電動機電樞繞組的並聯支路對數; p 為牽引電動機的極對數。

當不計磁損耗和機械損耗時直流牽引電動機的轉矩 M 可按下式計算:

$$M = 0.975 \frac{EI}{n} \quad \text{公斤-米。} \quad (1-2)$$

式中, E ——牽引電動機的反電勢(伏); 又因 $E = \frac{pm}{60} \cdot \frac{z}{a} \cdot \frac{\Phi}{10^8}$, 以此代入上式, 則得

$$\begin{aligned} M &= 0.975 \frac{pm}{60a} \cdot \frac{1}{10^8} \Phi I \\ &= C_m \Phi I \quad \text{公斤-米。} \end{aligned} \quad (1-2')$$

上式中 $C_m = 0.975 \frac{pz}{60a} 10^{-8} = 0.975 C_n$, 它也是一個由牽引電動機結構所決定的常數。

電力機車的走行速度 V 亦即為機車動輪的滾動圓周速度, 它與牽引電動機的轉速 n 成正比, 習慣上都以公里/小時來表示。設 D 為機車動輪滾動圓周的直徑, 度量單位以米計; μ 為齒輪傳動裝置的傳動比, 則

$$\begin{aligned} V &= \frac{60\pi D}{1000\mu} n = \frac{60\pi D}{1000\mu} \frac{U_k - IR}{C_n \Phi} \\ &= \frac{U_k - IR}{C_v \Phi} \quad \text{公里/小時。} \end{aligned} \quad (1-3)$$

比較公式(1—1)及(1—3), 知 $C_v = \frac{1000\mu}{60\pi D} C_n$ 。

電力機車每對動輪圓周上所產生的牽引力 F 與牽引電動機的轉矩 M 成正比, 當不計磁

損耗及机械損耗时

$$F_k = \frac{M\mu}{D/2} = \frac{2\mu}{D} C_m \Phi I$$

$$= C_F \Phi I \text{ 公斤。} \quad (1-4)$$

式中: $C_F = \frac{2\mu}{D} C_m = 0.367 C_V$.

每对动輪圓周上的功率 P_k 是牽引力 F_k 与圓周速度 V 的乘积, 即

$$P_k = F_k V \text{ 公斤公里/小时}$$

$$= \frac{1000}{3600} F_k V \text{ 公斤米/秒}$$

$$= \frac{1}{102} \cdot \frac{1000}{3600} F_k V = \frac{F_k V}{367} \text{ 瓩。}$$

同时每对动輪圓周上的功率 P_k 亦可通过电动机的功率来表示, 在不計磁損耗及机械損耗时

$$P_k = EI \text{ 瓩} = \frac{EI}{1000} \text{ 瓩。}$$

由此可见牽引力 F_k 亦可按下式来计算:

$$F_k = 367 \frac{P_k}{V} = 0.367 \frac{EI}{V} \text{ 公斤。} \quad (1-4')$$

实际上由于在牽引电动机工作时存在着磁損耗和机械損耗, 在傳动装置中亦存在着摩擦損耗, 所以每对动輪真正能發揮的牽引力要比按公式(1-4)和(1-4')計算的小些, 設 η_2 为傳动装置的效率, ΔP_M 为牽引电动机的磁損耗和机械損耗(瓩), 那么

$$F_k = 0.367 \eta_2 \left[\frac{EI - \Delta P_M}{V} \right] \text{ 公斤。} \quad (1-4'')$$

如已知牽引电动机激磁磁通与电流的关系 $\Phi = f(I)$, 則可根据公式(1-3)、(1-4'') 求出牽引电动机的速度特性曲綫 $V = f(I)$ 及牽引力特性曲綫 $F_k = f(I)$ 。激磁特性 $\Phi = f(I)$ 决定于牽引电动机的激磁方式。在直流电力機車和电动車組中常采用的串激及复激牽引电动机的速度特性曲綫和牽引力特性曲綫繪在图 1-2 中。設直流电力機車中共有 n 台牽引电动机, 联接成 p 条并联支路, 每支路上有 m 台牽引电动机串联联接, 那么 $I_p = pI, F = nF_k$,

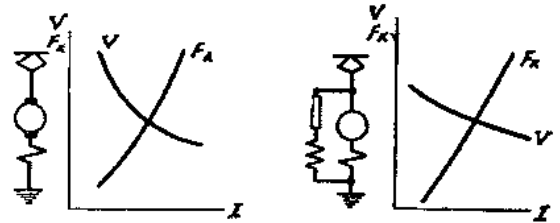


图 1-2

由此即可根据牽引电动机的速度特性曲綫 $V = f(I)$ 及牽引力特性曲綫 $F_k = f(I)$ 求出电力機車的速度特性曲綫 $V = f(I_p)$ 及牽引力特性曲綫 $F = f(I_p)$ 。

电力機車的牽引特性表示牽引力 F 与速度 V 間的关系, 在求得速度特性曲綫和牽引力特性曲綫后就不难求出牽引特性曲綫 $F = f(V)$ 。

§1-2 单相整流子电动机电力機車的工作原理

直流串激牽引电动机在电气牽引的长期实践中, 证明了它具有良好的牽引性能和較高的工作可靠性, 非常适合铁路牽引的需要。因而在交流电气牽引发展的历史上, 人們最先就想到把交流串激电动机用于列車的牽引上。但是由于当时科学技术和电机設計制造水平的限制, 交流单相工頻串激电动机(即单相工頻整流子牽引电动机)只是在較近年代才开始被采用于铁路牽引上。

单相整流子电动机电力機車的原理綫路如图 1-3 所示。单相交流电由接触导綫通过受电弓流入牽引变压器 T 的高压繞組, 然后經鋼軌流回牽引变电所。接触网电压經过变压器降压后作用于单相整流子牽引电动机 TN 。故可用改变变压器低压側的输出电压值来調节牽引

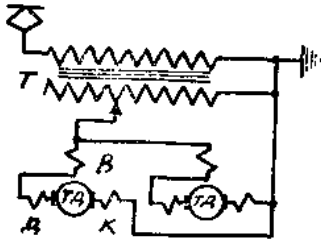


图 1-3

电动机的作用电压。这样接触网电压就不再受电动机整流子电压的限制，并且全部牵引电动机有可能作并联联接，以改善电力机车粘着的利用。但是在现代单相整流子电动机电力机车中牵引电动机并不总是全部作并联联接的，因为单相整流子电动机受到安全整流的限制它的整流子电压一般较低，在给定的功率下具有较大的电流，故在功率较大的电力机车上为了减小电气设备的电流容量，从而减轻它们的体积和重量，与直流电力机车相似，牵引电动机有时也作串并联联接的。

与直流牵引电动机相比较，单相整流子牵引电动机工作中最突出而最严重的问题是整流问题。在交变磁通作用下，在这种电机的整流元件中将会感应出变压器电势，从而增加了整流的困难。截至目前单相整流子电动机的整流问题尚未有完全妥善的解决办法。

单相整流子牵引电动机整流元件的变压器电势的大小与电动机的转速无关，它可按下式计算：

$$E_{Tp} = 2\pi f W \Phi \cdot 10^{-8} \text{伏。} \quad (1-5)$$

式中 f ——电流的频率(赫芝)；

W ——电枢绕组整流元件的匝数；

Φ ——牵引电动机每极的磁通(馬)。

显然，减小整流元件的变压器电势可以通过三种办法来达到：

1. 减小供电频率 f 。因此最早在电气化铁道上采用的单相整流子牵引电动机即系低频的单相整流子电动机，单相低频牵引电动机在欧洲和美洲国家中获得普遍的采用，在欧洲大都采用 $16\frac{2}{3}$ 赫芝的频率，而在美洲采用 25 赫芝的频率。

2. 减少整流元件的匝数 W 。实际上在单相整流子电动机中电枢绕组元件的匝数是很少的，一般取 1 匝，甚至有取 $\frac{1}{2}$ 匝的。

3. 减少每极磁通 Φ 。每极磁通的减少必然会引起电动机极数的相应增加。在低频单相整流子电动机中极对数往往达到 6，而在工频单相整流子电动机中则往往达到 8~9。

电动机电枢绕组元件匝数和每极磁通的减少限制了电动机整流子电压的增高。对于 $16\frac{2}{3}$ 赫芝的单相整流子电动机来说，它的整流子电压一般为 450~600 伏，对于 25 赫芝的电动机来说，约为 330~400 伏，工频单相整流子电动机约为 230~250 伏。如国产的工频单相整流子电动机的整流子电压即取为 245 伏。

改善单相整流子电动机整流的另一途径是设法增加整流元件的阻抗，用以限制整流元件中的短接电流。在现代单相整流子牵引电动机中采用的有以下几种办法：

1. 在整流片和电枢绕组之间接入限流电阻；
2. 采用高电阻的电刷；
3. 采用分层电刷。利用分层电刷来限制整流电流。

从电动机的结构上来说，为了减小由于涡流而引起的损耗和降低电机的发热，电机的定子必须是用电工铜片叠成的。此外，为了改善电动机的整流，除了采用附加极外，还采用了补偿绕组。电机的磁系统也设计得比较不易饱和。但以上因素都会使单相整流子牵引电动机的尺寸和重量较同容量的直流牵引电动机为大，这样就常会引起牵引电动机在安装和布置上的困难。

§1-3 单相整流子电动机电力机车的电牵引特性

单相整流子电动机的原理线路图如 1-4 所示，其中 B ——主极绕组； A ——附加极绕组； K ——补偿绕组。为了改善电动机的整流，附加极绕组还并联了分路电阻 $R_{m\kappa}$ 。

图 1-6 上绘出了单相整流子牵引电动机在牵引状态下工作时的向量图。设 I 为电动机

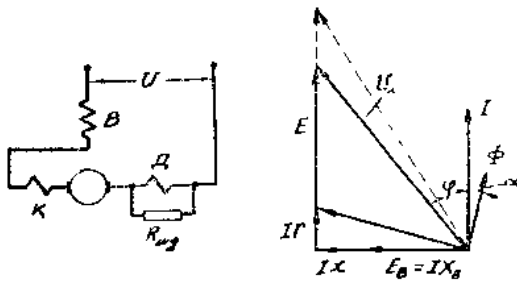


图 1-4

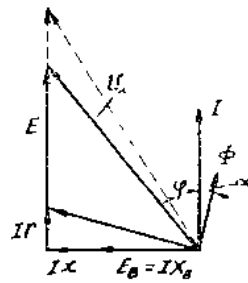


图 1-5

的负载电流，当电流 I 通过主极绕组时产生了交变磁通 Φ ，由于磁滞作用，使磁通 Φ 滞后于电流 I α 角。一般 α 角很小，在计算中可以略去不计。电动机的旋转电势 E 与磁通 Φ 同相，并且与磁通 Φ 及转速 n 成正比。与直流电动机相同， E 的数值可按下列式计算：

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{Z}{60} \cdot n \cdot \Phi \cdot 10^{-8} = C_n \Phi n = C_V \Phi V。$$

此外，当电流 I 通过电动机各绕组时产生了漏磁通所引起的电抗压降 $I(x_a + x_k + x_d + x_s)$ ，此电抗压降超前电流 I 90° 。其中 x_a, x_k, x_d 和 x_s 分别为电枢绕组、补偿绕组、附加极绕组和主极绕组的漏抗。与此同时交变磁通 Φ 在主极绕组中感应出自感电势 $E_s, E_s = 2\pi f W_s \Phi 10^{-8}$ 伏，它与磁通在相位上相差 90° ，并且由于电动机的磁路比较不易饱和，自感电势约与电流成正比，故也可视为一个电抗压降，以 IX_s 来表示。除了以上的电抗压降，电流通过各绕组时还产生电阻压降 IR ，它与电流同相。

变压器低压侧输出电压，亦即作用于电动机的整流子电压 U_k 将由上述感应电势和电抗、电阻压降来平衡，即

$$\dot{U}_k = \bar{E} + jI X_s + jI x + Ir = \bar{E} + I \bar{Z}。 \quad (1-6)$$

所以

$$V = \frac{|\bar{U}_k - I \bar{Z}|}{C_V \Phi}。 \quad (1-7)$$

式中 $r = r_a + r_k + r_d + r_s$ 是电动机的总电阻；
 $x = x_a + x_k + x_d + x_s$ 是电动机的总漏抗；
 $\bar{Z} = r + j(X_s + x)$ 是电动机的总阻抗。

由此可见，当作用于电动机的整流子电压 $U_k =$ 常值时， IX_s, Ix 及 Ir 将随电流 I 的增加而增加，而 E 及 V 将随 I 的增加而减小。因此单相整流子牵引电动机的速度特性 $V = f(I)$ 与直流串激电动机的速度特性相似，如图 1-6 所示。

由向量图可见，在给定的整流子电压 U_k 和负载电流 I 下，电抗压降的数值直接影响着牵引电动机的功率系数 $\cos \varphi$ 。 $IX_s = E_s$ 是电抗压降中的主要部分，所以 IX_s 对电动机的功率系数起着重要的影响。因此，为了提高电动机的功率系数就必须减小主极磁通 Φ 和主极绕组的匝数 W_s 。

主极绕组的匝数 W_s 是根据为产生必要的激磁磁通 Φ 所需的磁势来决定的。此磁势的数值又直接决定于磁路的磁阻。在磁系统不易饱和的单相整流子牵引电动机中，主极磁势极大部分消耗在空气隙的磁位降中。因此必须尽可能地减小单相整流子牵引电动机的空气隙。故在小型和中型的单相整流子牵引电动机中，空气隙的大小一般为 2~2.5 毫米，在大型单相整流子牵引电动机中约为 3~3.5 毫米，比同容量的直流牵引电动机空气隙值要小得多。

在主极磁通较少和空气隙很小的情况下，电动机的电枢反应将会产生很大影响，因而就必须采用补偿绕组，这就必然使电动机的结构复杂化，并使电机的用铜量增加 20~30%。

在美国的一些电动机组上采用了无补偿绕组的单相整流子牵引电动机，这些电动机的功率系数很低，最大也不过 0.65~0.70，而在一般工作状态下还要低得多。若采用补偿绕组，单相整流子牵引电动机，在额定负载下，功率系数可达到 0.8~0.92，甚至更高。例如国产的单相整流子牵引电动机在额定负载下的功率系数即达到 0.902。

此外，单相整流子牵引电动机的功率系数还是负载的函数，由向量图可知

$$U_k \cos \varphi = E \cos \alpha + Ir + E_s \sin \alpha。$$

所以

$$\cos \varphi = \frac{E \cos \alpha + E_s \sin \alpha + Ir}{U_k}。$$

当 α 忽略不计时，则

$$\cos \varphi \approx \frac{E + Ir}{U_k} \quad (1-8)$$

或由 $U_k \sin \varphi \approx I(x + X_a)$, $\sin \varphi \approx \frac{I(x + X_a)}{U_k}$ 得出,

$$\cos \varphi \approx \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} = \sqrt{1 - \left[\frac{I(X_a + x)}{U_k} \right]^2} \quad (1-9)$$

可見在給定的 U_k 下, 功率系数 $\cos \varphi$ 將隨負載電流 I 的增大而減小(見圖 1-6)。在給定的負載下, $\cos \varphi$ 將隨着 E, V, U_k 的增高而增大(見圖 1-5 中的虛線)。由此不難看出, 單相整流子牽引電動機是最適于在輕載、高速情況下運行的。

單相整流子電動機的牽引力不但與電流 I 及磁通 Φ 的大小有關, 並且與它們之間的相位差有關。設 ΔF 為由電動機的磁損耗和機械損耗而引起的牽引力損失, 則

$$\begin{aligned} F_k &= \eta_s [C_F \Phi I \cos \alpha - \Delta F] \\ &\approx \eta_s [C_F \Phi I - \Delta F] \end{aligned} \quad (1-10)$$

在磁路不能和的情況下, 牽引力約與電流的平方成比例。

應該注意, 當磁通和電流都按正弦規律變化時, 電動機的瞬時轉矩將是脈動變化的, 它的脈動頻率是供電頻率的 2 倍(圖 1-7)。當牽引電動機、傳動裝置的零部件自振頻率與轉矩的脈動頻率相同時, 則會產生危險的共振現象。

因此在單相整流子電動機電力機車和電動車組中, 應對可能產生共振現象的零部件, 特別是傳動裝置的彈簧部件及牽引電動機懸掛裝置的零件進行自振頻率的檢查, 以保證工作的安全。

已知單相整流子電動機的电牽引特性, 就不難求出單相整流子電動機電力機車的电牽引特性。

設電力機車上共有 n 台牽引電動機, 聯接成 p 條并聯支路, 每一支路中有 m 台電動機相串聯。在工作中由于考慮到變壓器中的電抗和電阻壓降, 實際作用在電動機上的電壓比變壓器的空載電壓為小, 設 r_{mp} 及 X_{mp} 分別為折合到低壓側的變壓器電阻和漏抗, 則在忽略磁滯損耗時的工作向量圖如圖 1-8 所示。圖中 $U_c = m U_k$ 為折合到變壓器低壓側的接觸網電壓, E' 為電動機的反電勢。

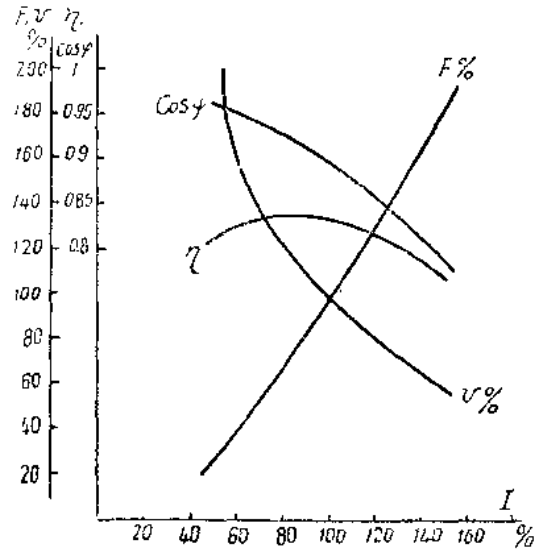


圖 1-6

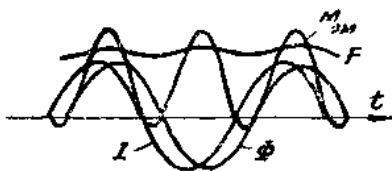


圖 1-7

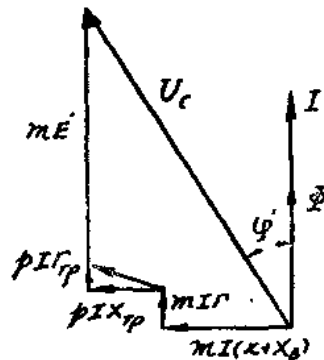


圖 1-8