

NEIRANJICHE

高等学校试用教材

DIANLICHUANDONG

童春辉 曹国瑞 主编

内燃机车 电力传动

中国铁道出版社

高等学校试用教材

内燃机车电力传动

童春辉 曹国瑞 主编

中国铁道出版社

内 容 提 要

书中系统地叙述了内燃机车电力传动装置的原理、结构及设计。重点讨论了交-直流电力传动内燃机车的恒功率调速系统,并列举了数种国内外恒功励磁控制实例,对交-直-交流恒功率调速系统,也作了较全面的介绍。

全书共分八章。前六章除上述重点讨论的内容外,还较详细地介绍了直流牵引电机的原理和交流同步牵引发电机、感应子励磁发电机的结构及特性,电阻制动原理及其计算,以及设计内燃机车电力传动装置的主要参数。第七章还专门介绍了国内外数种电压调整器的电路和调节过程。第八章介绍了机车控制电路的设计原则和控制程序。

本书为铁路高等院校内燃机车专业教材,也可供从事机车电传动工作的科研人员、工程技术人员和有关中等专业学校师生参考。

高等学校试用教材

内燃机车电力传动

董春辉、曹国瑞 主编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 17.5 插页: 1 字数: 435千
1981年8月 第1版 1981年8月 第1次印刷

印数: 0001—4,000册 定价: 1.85元

科技新书目 1—110 统一书号: 15043·5212

前 言

本书是根据一九七八年四月铁道部委托召开的教材会议上制订的内燃机车电力传动教材大纲编写的。它是铁路高等院校内燃机车专业的一门专业教材。

由于近十年来，内燃机车电力传动技术有了飞速发展，因此本书在反映国内外科学技术的新成就方面，作了一些努力。例如，本书突出了电力传动装置整个系统的概念，着重论述了目前普遍采用的交-直流电力传动内燃机车的恒功率调速系统，并按各种不同的特点，例举了数种国内外电子恒功励磁控制方案。对于新型交-直-交流恒功率调速系统，则例举了西德首创的DE-2500型机车的控制方案；同时也例举了电压调整器的多种方案。这不仅开阔了学生的思路，而且对科研和现场部门的读者，也有参考价值。

本书打破了过去围绕典型产品来叙述的体系，同时注意了本专业各门课程之间的衔接，避免了与“机车柴油机”、“电工学”等课程的脱节或重复。

本书还介绍了内燃机车牵引电机的原理及特性、电力传动装置主要调节参数及其选择、主电路的设计与保护、电阻制动功率的计算方法和制动特性范围的计算等内容，为电力传动装置的设计，打下了一定的理论基础。

本书取材较新，内容较丰富，努力做到理论联系实际。

本书由兰州铁道学院童春辉、曹国瑞、大连铁道学院陈启璠、周美玉主审。编写分工如下：第一章由童春辉执笔，第二章由北方交通大学赵爱菊执笔，第三章由曹国瑞执笔（其中自饱和磁放大器工作原理由赵爱菊执笔），第四章和第八章由上海铁道学院张鑫执笔，第五章由周美玉执笔，第六章和第七章由大连铁道学院张景芦执笔。此外，大连铁道学院吴玉兰、兰州铁道学院张清韦等同志，也参加了部分编写工作。

在编写本书的过程中，大连机车车辆工厂冯瀚湘同志、大连内燃机车研究所的同志，对部分章节提出了宝贵意见，谨此致谢。

编 者

1980.9

目 录

第一章 内燃机车电力传动概述	1
§ 1—1 内燃机车电力传动装置的功用	1
§ 1—2 内燃机车电力传动装置的分类	2
§ 1—3 国内外内燃机车电力传动发展简介	5
第二章 牵引电机	9
§ 2—1 直流牵引电动机	9
§ 2—2 同步牵引发电机	42
§ 2—3 感应子励磁发电机	62
第三章 交-直流恒功率调速系统	69
§ 3—1 同步牵引发电机的理想外特性	69
§ 3—2 牵引发电机恒功率励磁系统的基本工作原理	73
§ 3—3 主要控制元件介绍	85
§ 3—4 采用液力调节器的恒功率励磁系统举例	106
§ 3—5 电子恒功率励磁装置举例	118
§ 3—6 牵引电动机磁场削弱及串-并联换接	148
第四章 电力传动装置调节参数和主电路的设计与保护	160
§ 4—1 电力传动装置主要调节参数及其选择	160
§ 4—2 内燃机车持续工况参数的确定	165
§ 4—3 牵引发电机和牵引电动机的容积功率及牵引电动机的通用问题	167
§ 4—4 主电路的设计及保护	169
§ 4—5 机车预期牵引特性曲线的绘制	180
第五章 电阻制动	188
§ 5—1 电阻制动的基本概念	188
§ 5—2 制动特性及范围	189
§ 5—3 电阻制动功率	193
§ 5—4 制动特性范围计算及预期制动特性	195
§ 5—5 电阻制动电路及其控制方法	197
§ 5—6 内燃机车电阻制动装置举例	200
第六章 交-直-交流恒功率调速系统	205
§ 6—1 异步牵引电动机的调速	205
§ 6—2 牵引逆变器电路分析	214
§ 6—3 分谐波法——脉冲宽度调制原理的应用	227
§ 6—4 交-直-交流恒功率调速系统实例	233
第七章 电压调整器	239

§ 7—1 电压调整器概述	239
§ 7—2 晶体管电压调整器	241
§ 7—3 可控硅电压调整器	250
§ 7—4 磁放大器电压调整器	257
第八章 控制电路	259
§ 8—1 机车控制电路的作用及设计原则	259
§ 8—2 柴油机启动电路的控制程序	260
§ 8—3 机车起动及运行电路的控制程序	267
§ 8—4 电阻制动电路的控制程序	272
§ 8—5 内燃机车上主要辅助设备电路的控制程序	273

第一章 内燃机车电力传动概述

§ 1—1 内燃机车电力传动装置的功用

内燃机车的原动机是柴油机。从柴油机到机车轮对之间，需要一套速比可变的中间环节，这一中间环节我们称为传动装置。由一整套电气设备组成的这个中间环节，就叫做电力传动装置。

内燃机车为什么要传动装置呢？

我们知道，对于任何机车的要求是能经常利用其动力装置的额定功率，这就要求机车的牵引力与机车的运行速度接近于成反比的变化关系。

令 F 为机车在任一速度 V 时的牵引力，柴油机的额定功率为 N ，自柴油机至机车轮周的传动效率为 η ，则

$$N \cdot \eta = \frac{FV}{270}$$

按我们对机车的要求，为保持内燃机车柴油机额定功率不变，且假设传动效率 η 不变时，可用一等边双曲线来表示 F 与 V 之间的关系，即 $F \cdot V = C$ （式中 C 为常数），如图 1—1 所示。图中，最大牵引力受机车动轮和钢轨之间粘着牵引力的限制，最大速度受机车结构速度的限制。这一曲线通常称为内燃机车理想牵引特性。

当机车按理想牵引特性曲线运行时，柴油机的功率则应按图 1—1 中 $N = f(V)$ 所示的曲线变化。由图可见，柴油机功率在机车主要的运行速度范围内都应保持恒定，也就是说柴油机功率经常能被充分利用。

如果在内燃机车上不采用任何传动装置，而将柴油机曲轴直接或通过传动比不变的机构与机车动轴连接，即构成所谓直接驱动。这样一来，机车运行速度 V 和轮周牵引力 F 与柴油机的转速 n 和扭矩 M 之间的关系，可用下列公式表示：

$$V = \frac{60\pi Dn}{\mu 10^3} \quad \text{公里/小时}$$

$$F = \frac{2M\mu\eta}{D} \quad \text{公斤}$$

式中 D ——机车动轮直径，米；
 n ——柴油机转速，转/分；
 M ——柴油机扭矩，公斤·米；
 μ ——柴油机与机车动轮之间的传动比；
 η ——传动效率。

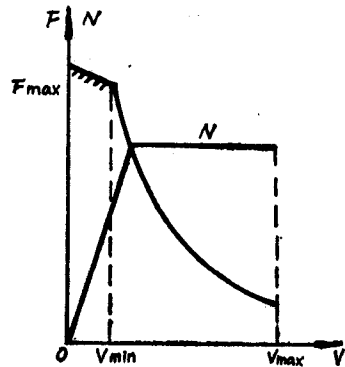


图 1—1 对内燃机车要求的理想牵引特性曲线和所对应的柴油机功率曲线

公式表明，如忽略传动效率 η 的变化，则可用柴油机扭矩和转速之间的关系来代表直接

驱动的内燃机车牵引特性。

柴油机的扭矩特性（即扭矩和转速之间的关系）和功率特性（即功率和转速之间的关系）如图 1—2 所示，该图也即直接驱动时的内燃机车牵引特性和柴油机功率变化曲线。显然，它不符合图 1—1 所示的理想牵引特性的要求。这是因为柴油机功率是随着转速接近成正比关系变化，只有当柴油机达到额定转速时，才能发出额定功率。所以当采用直接驱动方式时，机车只有在最高速度时柴油机功率才能得到充分利用，而在其它速度运行时，柴油机功率都得不到充分发挥，而且机车速度愈低时柴油机功率利用也愈低。

此外，由于柴油机有一个最小工作转速，低于这个最小转速时，柴油机就不能工作。因此，直接驱动的内燃机车也不能使列车起动。

内燃机车采用直接驱动方式还存在其它不适应理想要求的问题，但上述几点足以证明在内燃机车上采用直接驱动方式是不行的。为此，必须在柴油机与机车动轴之间装设专门的传动装置。

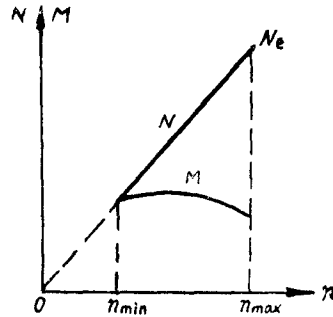


图 1—2 直接驱动的内燃机车牵引特性和柴油机功率变化曲线

为了使内燃机车在宽广的速度范围内都能充分地、经济地利用柴油机的功率，因此传动装置的主要任务是：在保持柴油机功率恒定的条件下，对机车运行速度进行调节。通常我们称这种类型的传动装置为内燃机车恒功率调速装置。

由于内燃机车运行性能的好坏直接决定于传动装置的性能，因此对传动装置的要求除了进行恒功调速外，还有其它一系列要求，一般可概括为下列几点：

（1）当机车运行在需要柴油机发挥满功率情况时，电力传动装置应能在尽可能大的速度范围内，保证柴油机在额定工况下工作，既不过载，也不欠载，以充分利用柴油机的功率；当机车仅需柴油机部分功率运行时，传动装置则应使柴油机按其经济特性运行。

（2）电力传动装置应保证柴油机在无载情况下启动。

（3）机车起动时，传动装置要保证有足够大的牵引力，使机车具有良好的起动加速性能，同时还应保证在机车起动过程中的平稳性。

（4）电力传动装置应具有较高的效率，功率损失要小。

（5）电力传动装置必须工作可靠、结构紧凑、重量轻、维修方便、造价便宜。

§ 1—2 内燃机车电力传动装置的分类

内燃机车电力传动就是由柴油机带动牵引发发电机，并经一套电气控制装置向安装在机车转向架上的牵引电动机供电，再经过传动齿轮驱动机车的动轮。可见内燃机车电力传动装置有两个最主要的部件，即牵引发发电机和牵引电动机。按照牵引发发电机和牵引电动机所用电流制的不同，电力传动装置可分为三大类，即直流电力传动装置、交-直流电力传动装置和交-交流电力传动装置，下面就来介绍这几种传动装置的基本概念。

（1）直流电力传动装置

这种传动装置是采用直流牵引发发电机和直流牵引电动机。如图 1—3 所示，柴油机直接

驱动一台直流牵引发电机 F ，它把柴油机的机械能转变为电能，并供给数台直流牵引电动机 D 。牵引电动机又把电能转变成机械能，并通过传动齿轮驱动机车动轮。

直流电力传动装置的特点是调速方法比较简单，通常用改变直流电动机端电压的方法即可达到调速目的。在直流电力传动装置中，牵引电动机一般都是采用直流串励电动机，这是由于直流串励电动机的转速特性较软，因此比其它类型的直流电动机更适合机车牵引特性的要求，它被普遍用在内燃机车、电力机车、地下铁道车辆和城市电车上。

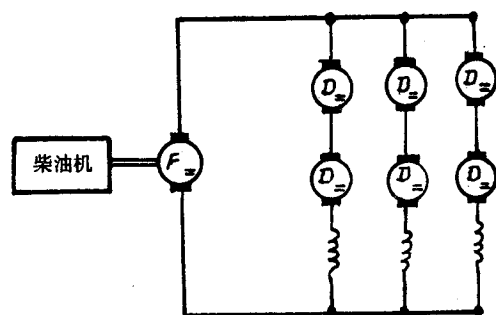


图 1-3 直流电力传动装置示意图

在内燃机车上，由于牵引电动机是直流电机，因而很自然地就配有直流牵引发电机作为电源，从而形成了直流电力传动装置。自电力传动内燃机车问世以来的几十年内都沿用这种传动方式，目前国内外仍有大量这种传动装置的内燃机车。例如我国东风型、东风₂型、东风₃型以及进口的ND₁、ND₂等型内燃机车都是采用直流电力传动装置。

但是，从六十年代以来，随着内燃机车不断向单机大功率发展，柴油机的功率和转速也不断提高，由于大功率直流牵引发电机受到换向条件和机车限界尺寸及机车轴重等限制，使功率大于3000马力的直流电力传动装置的设计和制造出现了困难，从而产生了交-直流电力传动装置。

(2) 交-直流电力传动装置

这种传动装置是采用交流牵引发电机，通过大功率硅整流器使交流电变为直流电，然后再供给数台直流牵引电动机，如图 1-4 所示。

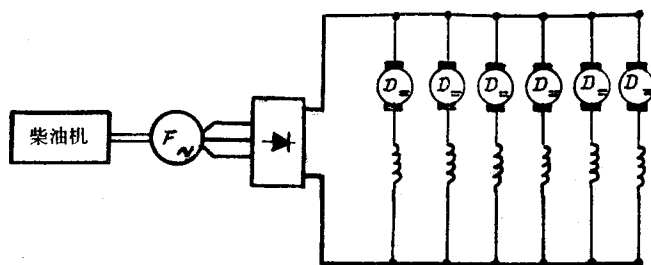


图 1-4 交-直流电力传动装置示意图

在这种传动装置中，一方面保留了上述采用直流电动机作为牵引电动机的特点，另一方面又采用了交流牵引发电机加以整流来取代直流传动装置中的直流牵引发电机，以克服制造大功率直流牵引发电机时所出现的困难。可见，交-直传动和直流传动在本质上并无差别，两者同属直流调速。但交流发电机与直流发电机相比，前者无换向器，故结构简单、运用可靠、省铜、重量轻、维护简便，在功率相等的条件下，交流牵引发电机的重量约为直流牵引发电机的一半。因此，它的功率可以做得远比直流牵引发电机大。

目前国内外对3000马力以上的电力传动内燃机车，已经普遍采用了交-直流电力传动装置。我国东风₄型内燃机车以及进口的ND₄型内燃机车就是交-直流电力传动内燃机车。

(3) 交流电力传动装置

若牵引发电机和牵引电动机都采用交流电机，则把这样的系统称为交流电力传动装置。

前面已指出，直流串励牵引电动机具有很好的调速性能。但直流电动机主要的缺点是因为它具有换向器，所以不仅重量、尺寸大，费铜，而且维护麻烦，这样就限制了它不能制成大功率高转速的牵引电动机。交流电动机则相反，它无换向器，故不存在直流电机所具有的

这些缺点。交流电动机用在内燃机车上，不但可以提高单节机车的功率，而且还具有良好的防止机车动轮打滑的性能。但交流电动机的转速特性为硬特性（即当负载增加时，转速下降很少），而且调速困难。其转速特性主要和电源频率有关，当电源频率不变时，异步电动机的转速变化范围很小，不能适应机车调速范围宽广的要求。因此，必须使电源频率能在大范围内改变才能很好的调节交流牵引电动机的转速。

在交流电力传动中，交流牵引发发电机的频率是由其转速（即柴油机转速）决定的。由于柴油机在一定功率下工作时的转速是不变的，所以交流牵引发发电机在一定功率值下的频率也是不变的。因此，交流电力传动装置的关键在于交流牵引发发电机和交流牵引电动机之间要设置一个大功率、宽调频范围的变频装置，以满足交流牵引电动机的调速要求。当前大功率可控硅变频装置的迅速发展，为在内燃机车上采用交流电力传动提供了可行的途径。

按可控硅变频方式，交流电力传动装置又可分为两种形式：

1) 交-直-交流电力传动装置

具有中间直流环节的间接变频的交流电力传动装置，称为交-直-交流电力传动装置，其示意图如图 1—5 所示。柴油机直接驱动交流同步牵引发发电机，发出的三相交流电经过硅整流器 Z 转变成直流电，再经可控硅逆变器 N ，把直流电转变成频率可调的交流电，然后供给数台交流牵引电动机使用。在机车起动和调速的整个工作范围内，牵引电动机的三相电源的频率都应平滑地调节，而且在起动时为了充分利用粘着重量，必须使电动机具有恒转矩的调频性能，而在运行过程中则要求有恒功率的调频性能，这些要求都需由可控硅整流装置和逆变装置的自动调节来实现。

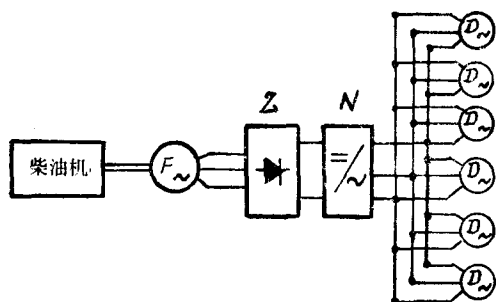


图 1—5 交-直-交流电力传动装置示意图
 Z ——硅整流器； N ——可控硅逆变器

必须指出，经可控硅逆变器逆变之后的三相交流电的频率和交流牵引发发电机所发出的三相交流电的频率没有关系。

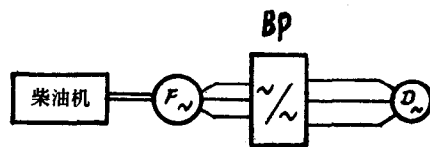


图 1—6 交-交流电力传动装置示意图
 BP ——变频装置

西德Henschel工厂和BBC公司合作，于1971年成功地制成了采用交-直-交流电力传动装置的DE-2500型内燃机车。

2) 交-交流电力传动装置

没有中间直流环节的直接变频的交流电力传动装置，称为交-交流电力传动装置，如图 1—6 所示。交流电从交流牵引发发电机送出，经一个或数个变频装置后，直接成为三相变频电源，供给交流牵引电动机。

当采用交-交流变频方案时，由于其变频装置输出的最高频率只能达到输入频率的三分之一，因而要求交流发电机能输出较高的频率，因此通常认为这一方案比较适合于原动机转速较高的场合（如燃气轮机）。至于内燃机车的交-交流变频装置，目前尚未见到实用的方案。

§ 1—3 国内外内燃机车电力传动发展简介

目前,大功率内燃机车的传动装置主要有电力传动和液力传动两种型式,所以各个国家在发展内燃机车时,都必然涉及对这两种传动型式的选择问题。由于各国条件不同,内燃机车的技术水平与发展特点也各不相同,因此,各国对采用何种传动方式的看法也不尽一致。

液力传动具有省铜、重量较轻和维护保养较简单等优点,在西德、日本、奥地利等国发展较早,特别是西德在液力传动的设计制造方面都积累了较丰富的经验。电力传动则具有效率高、工作可靠等优点,而且它发展的历史最长,因此应用很广。美国自1925年制造出第一台电力传动内燃机车之后,其全部内燃机车几乎都采用电力传动型式。英国在内燃化初期是同时发展电力传动和液力传动,1962年英国铁道总局宣称,今后不再制造液力传动内燃机车,并认为这两种传动装置虽各有利弊,不能判定孰优孰劣,但为配合将来铁路全盘电气化起见,仍以采用电力传动为上策。法国的内燃机车多数采用电力传动,他们认为电力传动的功率大、工作可靠、便于应用电子技术,许多部件可与电力机车通用。苏联的内燃机车对这两种传动方式都有采用。

国外的电力传动装置自内燃机车发展以来的三十多年中,一直采用直流电力传动。直到1964年才由法国首先创制出一台BB67036型交-直流电力传动内燃机车,这是电力传动装置发展中的一项巨大进步。后来法国又制造了两台具有双转子交流发电机的交-直流传动内燃机车,该机车装有两台柴油机,分别拖动交流牵引发电机的定子和转子相对转动,该机车还采用单电机转向架,因此机车重量大大减轻。对同样都采用高速柴油机的4000马力机车而言,这种交-直流传动机车重量仅为114吨,比西德同轴式液力传动机车轻36吨,这对电力传动在内燃机车上的地位影响甚大。此后,各国交-直流电力传动就有了很大的发展,大功率电力传动内燃机车几乎都采用交-直流传动装置。例如美国C36-7型(牵引发电机的输入功率为3600马力)、DD-40X型(装有两台柴油机,机车功率达7000马力),法国CC72000型(4000马力)、CC78000型(5000马力),英国Kestrel型(4000马力),苏联ТЭП75型(6000马力)、2ТЭ121型(2×4000马力)等。

由于交流牵引电动机在功率、体积、重量、制造工艺、成本及运行维护等方面,比直流牵引电动机有一系列优点,因此,长期以来人们曾对机车采用交流牵引电动机进行了许多试验研究工作。采用三相交流牵引电动机的技术关键在于平滑地变频调速,早期因限于使用旋转变流机组来解决调速问题,而这些机组笨重、昂贵、复杂,效率又低,所以使交流电力传动迟迟得不到发展。自从可控硅变流技术迅速发展以后,六十年代初便相继造出了功率大、重量轻、效率高的硅整流器和可控硅变频器,为交流电力传动开辟了新途径。接着世界各国为采用交流电力传动先后进行了大量的试验研究工作,异步牵引电动机的调速问题逐步得到解决,这在机车发展史上具有重大意义。

1965年英国Brush公司制造成功第一台采用半导体静止式变频器的Hawk型交-直-交电力传动内燃机车,该车功率为1400马力,最大速度为120公里/小时。试验表明,异步电动机的变频调速和防空转性能良好,但由于逆变器的工作尚欠可靠,控制系统和元件的性能不够完善,因而该机车没有获得推广和应用。

在交流电力传动的发展中,西德Henschel工厂和BBC公司联合研制的DE-2500型机车具有一定的代表性,被认为是较完善的新型内燃机车电力传动装置。该公司从1965年开始进

行交-直-交电力传动的研究试验,前后经过了方案研究、1:10 模拟试验、1:1 样机试验和装车试验等四个阶段,共用了五年多时间,于1971年试制成功第一台 DE-2500型 交-直-交电力传动内燃机车。该机车功率为2500马力,六轴,总重80吨,最大速度为140公里/小时。后经试验改进,于1973年又制造了两台这样的机车,一台是六轴80吨,轨距为1000毫米;另一台是四轴76吨,轨距为1435毫米。图1—7为 DE-2500 型内燃机车主回路原理示意图,柴油机 1 驱动功率为1800千瓦的三相同步牵引发电机 2,当转速为1500转/分时额定电压为1250伏,发电机 2 发出的交流电经整流器 3 变成直流电,中间直流环节的额定电压为1500伏,电压稳定的直流电对牵引逆变器 4 供电,逆变器输出电压和频率可变的三相交流电供给交流牵引电动机 5。该机车还可实行列车电取暖,取暖时将开关 8 闭合,中间直流环节即可经列车取暖逆变器 7 对列车取暖器供电,取暖逆变器 7 输出的是稳频电流。DE-2500型机车还具有电阻制动装置,当实行电阻制动时,由交流牵引电动机发出的交流电经牵引逆变器 4 转变成直流电,再经开关 9 向制动电阻 6 供电,电阻制动时也可实现列车取暖。

实践证明,DE-2500 型机车不仅重量指标赶上了液力传动,而且性能也优于液力传动,其起动粘着性能、牵引性能、电制动性能和防空转特性都很好,充分证明该传动装置的技术措施是成功的。1973年经改装后,又把这种交流传动系统应用到电力机车上。1977年又改装成电力、内燃两用机车。通过在内燃机车、单相电力机车和直流电力机车上的各项试验,证明这种交流传动系统不仅具有良好的牵引性能和动

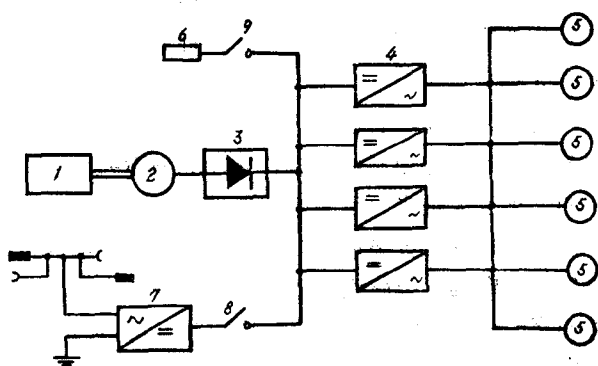


图1—7 DE-2500型内燃机车主回路原理示意图

1——柴油机；2——三相同步牵引发电机；3——整流器；4——牵引逆变器；5——交流牵引电动机；6——制动电阻；7——列车取暖逆变器；8、9——开关。

力指标,而且对各种机车具有广泛的适应能力。在这些试验研究的基础上,西德和瑞士联邦铁路又设计和试制了一种大功率客货通用的交流传动干线电力机车,型号为E120,功率达5600千瓦,最大速度为160公里/小时,总重84吨,是目前世界上轴功率最大的电力机车,其牵引性能和各项技术指标,也是当前最先进的一种电力机车。

除西德之外,世界上很多国家都进行了交流电力传动机车的研制工作。美国于1972~1973年间,在600伏直流电气化铁道上,采用三台600马力电动车组,装用了异步牵引电动机,在逆变器输出1~60赫范围内实行分谐波法控制,维持异步电动机在恒转矩工况下运行,以利机车的起动和加速;在60~150赫范围内实行矩形波法控制,以维持恒功率运行。该车组最大速度为90公里/小时。

瑞士在1972~1973年间对一台1200千瓦的电力机车进行改装,成为交-直-交流传动的电力机车,在 $16\frac{2}{3}$ 赫的交流电气化铁道上进行试验研究。着重探讨了减少传动系统中出现的高次谐波电流和对通讯信号电路的干扰方法,并在此试验的基础上,于1976年制造了两种机车,一种是功率为1800千瓦的交-直-交传动的调车内燃机车,另一种是功率为1100千瓦的交-直-交传动的调车电力机车,以继续试验研究,积累经验。

苏联在发展交流电力传动机车过程中,除采用异步牵引电动机外,还对采用同步牵引电

动机进行了研究试验。同步电动机也是一种无换向器电机，其结构与同步发电机相同。同步电动机转子的转速与定子磁场转速同步，如采用一种变频装置把交流电源（如交流发电机）的定频电流转换成频率可变的交流电，然后对同步电动机供电，则随着供电频率的变化，就可改变同步电动机定子磁场的转速，因而转子的转速随之改变，这样便实现了调速目的。同步电动机的转矩除与定子电流有关外，还与转子磁密有关，因此，用改变转子磁极绕组励磁电流的方法，就能改变气隙中的磁密，从而可改变同步电动机的输出转矩，达到调节牵引力的目的。所以同步电动机也可用于交流电力传动机车。

苏联在1967~1975年间，先后将三台БЛ80型电力机车和一台БМЭ1型调车内燃机车改装为交流电力传动装置。其中БЛ80Б、БЛ80В装有同步牵引电动机，БЛ80А和БМЭ1机车装有异步牵引电动机。1976年已将БЛ80Б和БЛ80В两种机车定型，并改为БЛ83型，该机车小时功率为7200千瓦，持续功率为6700千瓦，最大速度为110公里/小时，传动装置总效率为82%。БЛ80А型机车的传动系统与DE-2500型机车相似，该机车共有8根动轴，每根动轴上安装一台功率为1200千瓦的异步牵引电动机，整台机车功率达9600千瓦。

除上述各国之外，还有法国、意大利、芬兰、奥地利、日本等国都进行了交流电力传动机车（包括内燃机车、电力机车和燃气轮机车）的研究试验工作，以致从1965年到1977年已制成和订购的交流电力传动机车达90余台，总功率在14万千瓦以上。

我国内燃机车是1958年诞生的。当时长辛店、大连、戚墅堰机车车辆工厂分别试制成功600马力和2000马力直流电力传动内燃机车，从此开创了我国制造电力传动内燃机车的历程。到1964年，东风型和东风₂型内燃机车开始批量生产。为适应我国铁路运量不断增长的需要，大连机车车辆工厂于1969年设计并试制成功东风₄型4000马力交-直流电力传动内燃机车，不久就投入了批量生产。此后，我国又在改进和完善交-直流电力传动机车方面进行了许多工作，同时各有关科研部门和高等院校在交-直-交和交-交流传动方面积极地开展了研究试验，为早日制造出我国自己的交流电力传动机车而努力。

总之，从目前国内外情况来看，大功率内燃机车电力传动发展的特点主要有以下几个方面：

（1）普遍采用交-直流电力传动装置，并发展交流电力传动。

目前国内外生产的各种大功率电力传动内燃机车，几乎都是采用交-直流传动方式。这是因为在一定功率和一定速度范围内，直流牵引电动机的调速性能仍将保留其简单、经济等特点的缘故。但须指出，从近十多年的试验研究经验来看，发展交流电力传动的方向是肯定无疑的，这不仅仅由于交流牵引电动机的结构简单、使用方便，运行可靠性高、维护工作量很小、功率大、重量轻，而且交流电力传动可以适应各种机车车辆的牵引要求，并具有良好的牵引性能、电制动性能和防空转性能，因而它首先会在大功率干线机车和轻型高速动车方面发挥其优越性，并将逐步发展成熟。交流电力传动的某些技术关键虽已基本解决，但仍在不断发展和提高，随着技术的发展，交流电力传动的生产成本也必然会得到更合理的解决。

（2）广泛采用新型电子技术。

牵引发电机励磁系统的自动调节，是保证充分利用柴油机功率、实现比较理想的牵引特性的关键。将电子技术用于励磁调节系统是各国普遍注意的发展方向。应用电子技术可以准确、迅速、可靠地实现机车恒功率励磁调节、自动调速、自动制动，同时电子调节系统还能综合各种信号进行控制，实现各种自动保护。

此外，在机车上还运用电子技术进行“监视”和故障检测，以便迅速发现故障和查找故

障。例如1973年以后生产的 DE-2500 型机车就装设了一套自动“诊断”装置,能使操纵者很方便地监视传动装置及其它系统的运行过程。

(3) 改进结构工艺,提高可靠性并使检修方便。

在国外机车上已普遍注意机组组合化和控制系统组件化。例如 DE-2500 型机车分为三组:第一组主要是柴油机-交流牵引发电机组;第二组为辅助设备和冷却器组;第三组为整流器及制动电阻,它们均可在车外成套组装后再吊入车内。这种成组式结构,便于装拆和维修。又例如美国GM公司的机车,从1972年开始采用了组件化的控制系统,它把大部分控制单元分为十七个组件,每种组件都安装在密封电器柜内,当某个环节出现故障时,可成组地将组件拆下,既方便装拆也易于发现故障,从而提高了工作可靠性。

国内外内燃机车除了采取上述措施外,还不断改进电力传动的结构和工艺。例如改进直流牵引电动机的电刷结构;电机的电枢线圈与换向器的焊接采用氩弧焊新工艺;采用H级聚酰亚胺薄膜绝缘材料和新型通风结构等等。从而大大提高了牵引电动机的工作可靠性,延长了使用寿命,同时还提高了电机功率,减轻了重量。

(4) 简统化和通用化。

在各种不同功率乃至不同类型的机车上,采用统一的、通用的零部件,可以实现集中生产、利用先进工艺设备,这样不仅可提高产品质量、减少材料消耗、降低产品成本,而且还可大大简化使用部门和维修部门的工作,因而可降低运行和维修费用,其经济效果是很显著的。如美国GE公司非常强调标准化、通用化和系列化,各种功率的机车都采用同一种GTA-11型牵引发电机和GE-752型牵引电动机,以及同一系列的柴油机。该公司所用的CHEC机车恒功率励磁系统的FL138励磁控制板也能互相通用,此控制板的前九个插件在各种机车上都是相同的,第十个称为基准插件则按不同功率的机车作相应的改变。美国GM公司也是如此,在各种机车上都有程度相当高的通用化、统一化的零部件。法国的同型牵引电动机可通用于内燃机车和电力机车,所有机车都采用同一的继电器、接触器、反向器和辅助转换装置。此外,还采用统一的车体和同一型号的制动系统,所有电力机车和内燃机车的司机室几乎完全一样。ALSthom公司的三轴转向架既可适用于内燃机车,又可与电力机车通用。

第二章 牵引电机

§ 2—1 直流牵引电动机

一、直流牵引电动机的工作原理

目前，在交-直流电力传动装置中，广泛采用直流串励电动机作为驱动机车车辆的牵引电动机，它的工作原理与一般直流串励电动机相同。

直流牵引电动机主要由静止的定子和旋转的电枢（转子）两大部分组成。定子的作用是产生磁场、提供磁路和作为电机的机械支撑，它由主磁极、换向极、机座、端盖及轴承等部件组成。电枢是用来产生感应电势和电磁转矩而实现能量转换的主要部件，它的组成部分有：电枢铁芯、电枢绕组、换向器和转轴等。电枢通过轴承与定子保持相对位置，使两者之间有一个空气隙。此外，直流牵引电动机还有一套电刷装置，电刷和换向器接触，使电枢电路和外电路相连。图2—1和图2—2为直流电动机横向和纵向剖面图。

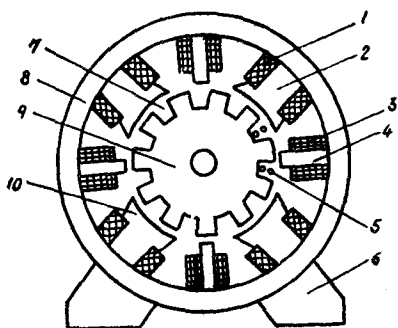


图 2—1 直流电动机横向剖面示意图

1——主极线圈；2——主磁极；3——换向极线圈；4——换向极；5——电枢绕组；6——底脚；7——电枢槽；8——机座（磁轭）；9——电枢铁芯；10——极靴。

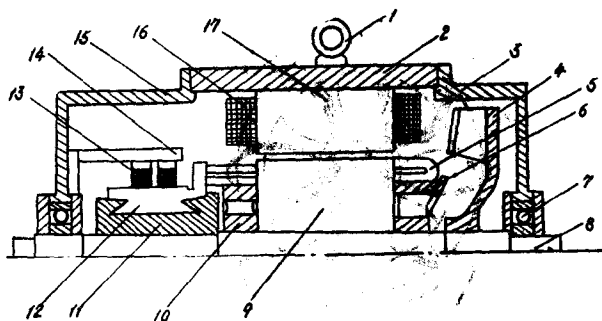


图 2—2 直流电动机纵向剖面示意图

1——吊环；2——机座；3——端盖；4——风扇；5——电枢绕组；6——后压圈；7——轴承；8——轴；9——电枢铁芯；10——前压圈；11——换向器压圈；12——换向器；13——电刷；14——刷握装置；15——前端盖；16——主极线圈；17——主极铁芯。

直流电动机的工作原理如图2—3所示。图中 A 和 B 为静止的电刷。通过换向器与电刷的滑动接触，将线圈接至电压为 U 的直流电源上，此时电枢线圈中将流过直流电流，该电流经正电刷 A 和 N 极下的导体流入，而经过 S 极下的导体和负电刷 B 流出。根据电磁力定律可以看出，线圈导体所受到的电磁力 f 在电枢上构成了一个单方向的转矩 M （称作电磁转矩），从而驱动电枢转动，这就是直流电动机的工作原理。显然，当电刷 A 、 B 与电源正负极之间的联接对调时，线圈中的电流及导体所受的电磁力都将反向，电枢将反向旋转。

在实际的直流电动机中，电枢上都不只有一个线圈，而是有许多个线圈牢固的嵌放在转子铁芯槽中。图2—4表示一台由八个线圈组成的直流电动机，这八个线圈均匀地绕在圆筒形的铁芯上（称为环形绕组）。换向器则由八个互相绝缘的换向片组成，每个线圈的两个有

效边分别接到相邻的换向片上,如图2—4 a 所示。所有线圈通过换向片连接起来构成了一个闭合的绕组,两个电刷装在磁极之间的中性线上,可见两个电刷将闭合的绕组分成了两个并联的支路,如图2—4 b 所示。

当电动机由电源得到电能时,如果每根导体中流过的电流(即支路电流)为 i_s , 导体所在处的主极磁通密度为 B_s , 则在该导体的有效长度 l 上所产生的电磁力为:

$$f_s = B_s l i_s$$

由于主极磁场磁力线均系垂直进入电枢表面,而导体沿轴向布置,根据左手定则可见电磁力的方向为切线方向。如果电枢直径用 D_s 表示,那么所产生的电磁转矩为:

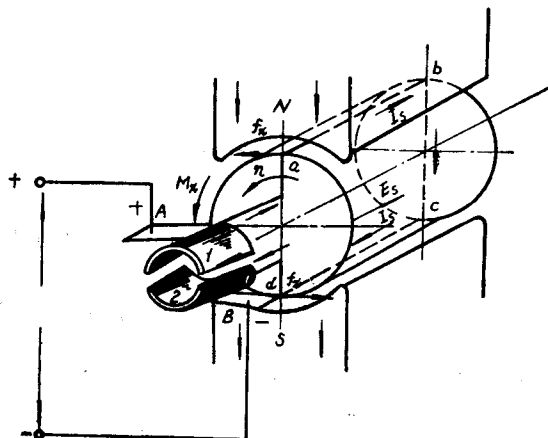
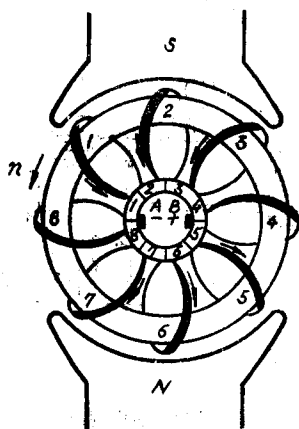
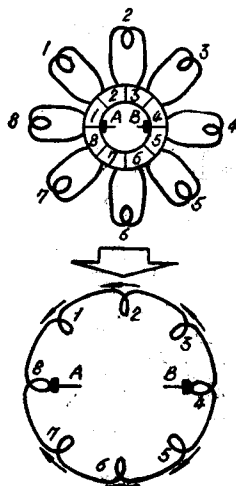


图 2—3 直流电动机的工作原理



(a)



(b)

图 2—4 具有八个线圈的直流电动机

$$M_s = f_s \frac{D_s}{2}$$

电机总的电磁转矩 M 是电枢绕组各导体上的电磁转矩的总和。由于电机气隙(磁场表面)磁场的实际分布是不均匀的,所以磁极表面各处的每根导体上的电磁力和电磁转矩大小各不相同,取磁通密度的平均值 B_p 来计算每根导体所受的平均电磁力,即

$$F_p = B_p l i_s$$

每根导体在平均电磁力的作用下产生的电磁转矩即为:

$$M_p = F_p \frac{D_s}{2} = B_p l i_s \frac{D_s}{2}$$

如果电枢上导体的总数为 N , 则电机总的电磁转矩 M 为:

$$M = M_p N = B_p I_i \frac{D_i}{2} N$$

主磁极下的平均磁通密度 $B_p = \frac{\phi}{\frac{\pi \cdot D_i l}{2p}} = \frac{2p\phi}{\pi D_i l}$, 其中, p 为电机的磁极对数, $2p$

则为磁极数, ϕ 为每极磁通量, $\frac{\pi D_i l}{2p}$ 为与每个磁极相对的电枢表面积。又如果电枢总电流为 I_i , 电枢绕组有 $2a$ 条并联支路, 那么每一条支路中的电流为 $i_i = \frac{I_i}{2a}$, 故

$$M = \frac{2p\phi}{\pi D_i l} \cdot l \cdot \frac{I_i}{2a} \cdot \frac{D_i}{2} N = \frac{pN}{2\pi a} \phi I_i = C_m \phi I_i \quad (2-1)$$

式中 $C_m = \frac{pN}{2\pi a}$ 为决定于电机结构的常数, 称为转矩常数。

由式 (2-1) 可见, 对已制成的电机, 其电磁转矩的大小与电枢电流成正比, 与每极磁通量成正比。在电动机中, 电磁转矩是拖动转矩, 它克服负载的阻力转矩 (负载转矩), 拖动负载旋转, 向外输出机械功率。

式 (2-1) 中, 若磁通单位为韦伯, 电流单位为安培, 则转矩单位为牛顿·米。若将式 (2-1) 除以 9.81, 转矩单位即为公斤力·米。

在直流电动机中, 当接通直流电源后, 如果电枢电流 I_i 的方向如图 2-3 所示, 根据左手定则判断, 这时电枢将按逆时针方向旋转, 也就是说电枢导体按逆时针方向在主磁场中运动, 于是在导体中必然要产生感应电动势, 根据右手定则, 这个感应电动势 E_i 的方向与电枢导体中电流方向相反, 称为电枢反电动势。电源要向电枢输入电流, 就必须克服反电动势的作用。

导体在磁场中运动时, 导体中产生的感应电动势为:

$$e = B_z l v$$

式中 B_z 是该导体所在处的磁通密度; l 是导体有效长度; v 是导体运动速度, 它可以用电枢转速来表示为 $v = \frac{\pi D_i}{60} n$ 。

同样, 由于电机气隙各处的磁通密度并不相同, 故在计算感应电动势的大小时, 也采用平均磁通密度 B_p 。于是, 每根导体中的平均感应电动势为:

$$e_p = B_p l v$$

如果电枢绕组一条支路中串联的导体数目为 $\frac{N}{2a}$, 则在一条支路内所产生的感应电动势为:

$$\begin{aligned} E_i &= e_p \frac{N}{2a} = B_p l v \frac{N}{2a} \\ &= \frac{2p\phi}{\pi D_i l} \cdot \frac{\pi D_i}{60} \cdot \frac{N}{2a} n l \\ &= \frac{pN}{60a} \phi n = C_e n \phi \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中 $C_e = \frac{pN}{60a}$ 为决定于电动机结构的常数, 称作电动势常数。

由电动势公式可以看出, 对于已制成的电机电枢反电动势的大小与每根磁通量成正比, 与电机转速成正比。在电动势公式中, 如果磁通的单位为韦伯, 转速的单位为转/分, 则所得的电动势的单位为伏。