



技工学校电机与变压器课 教 学 参 考 书



第二版

中国劳动出版社

技工学校电机与变压器课 教学参考书

(第 二 版)

龚如林 编

中国劳动出版社

(京)新登字 114 号

本书是根据全国技工学校电工类通用教材《电机与变压器》(第二版)编写的教学参考书。本书针对教材中的重点和难点内容作了必要的补充论述,对其教学方法和应注意的问题提出了一些见解。为拓宽教师的思路,本书提供了部分更深层次的教学参考资料。

本书是技工学校有关教师的应备用书,也可作为工人培训时教师的参考书。

本书由龚如林编写,赵承获、熊光奎、朱行南审稿,赵承获主审。

图书在版编目(CIP)数据

技工学校电机与变压器课教学参考书/龚如林编. —2版. 北京:中国劳动出版社,1995

ISBN 7-5045-1630-9

I. 技… II. 龚… III. ①电机-技工学校-教学参考书②变压器-教学参考书 N. ①TM3-67②TM4-67

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 16490 号

技工学校电机与变压器课

教学参考书

(第二版)

龚如林 编

责任编辑 赵庆鹏

中国劳动出版社出版

(100029 北京市惠新东街1号)

北京怀柔东茶坞印刷厂印刷 新华书店总店北京发行所发行

1995年3月北京第1版 1995年3月北京第2版

1995年3月北京第1次印刷 开本:787×1092毫米

1/32 印张5.75 字数:124千字 印数:3000

定价:4.00元

目 录

第一章 直流电机的基本理论与结构	(1)
一、教材分析	(1)
二、教学建议	(3)
第二章 直流发电机	(16)
一、教材分析	(16)
二、教学建议	(17)
第三章 直流电动机	(29)
一、教材分析	(29)
二、教学建议	(33)
第四章 变压器的原理	(52)
一、教材分析	(52)
二、教学建议	(54)
第五章 变压器的联接与并联运行	(69)
一、教材分析	(69)
二、教学建议	(71)
第六章 其它用途的变压器	(90)
一、教材分析	(90)
二、教学建议	(92)
第七章 三相异步电动机	(100)

一、教材分析.....	(100)
二、教学建议.....	(104)
第八章 三相异步电动机绕组.....	(131)
一、教材分析.....	(131)
二、教学建议.....	(132)
第九章 单相异步电动机.....	(147)
一、教材分析.....	(147)
二、教学建议.....	(148)
第十章 同步电机.....	(159)
一、教材分析.....	(159)
二、教学建议.....	(160)

第一章 直流电机的基本理论与结构

一、教材分析

这一章主要是阐述直流电机共性的问题。直流电机无论是作为发电机运行或作为电动机运行，实质上只是装了换向装置的交流电机。这就很容易让人联想到，直流发电机在换向装置之前，发出的还是交流电势，而经过换向装置后，才变成刷间的直流电势；直流电动机在换向装置之前是直流电流，经过换向装置后变成了电枢绕组中的交变电流。这就是说，直流发电机电枢中的电势是交变的，直流电动机电枢中的电流也是交变的，从而可以分析直流发电机的工作原理就是利用动磁生电的电磁感应定律借助换向装置变成不变电势输出，直流电动机流入的直流电流借助换向装置变成交流电流，在磁场的作用下，使电枢旋转。

应注意突出直流电机电枢绕组的特点，即由相同的绕组元件通过换向器联接成一个闭合回路。具体的联接方法应依据有关的节距而决定，从反映联接规律的展开图中画出并联支路图，就可明显地得出不同绕组型式的特点。教材中所介

绍的单叠、单波绕组是实用中常见的基本绕组型式，应分析透彻。

上面已经分析到，直流电机电枢绕组的特点，在闭合的电枢绕组中电势之和是为零的，必须要有电刷，才能把电势引出。所以，直流电机的电枢电势的大小就是支路电势的大小，在计算支路电势值时，由于直流电机的磁极都是凸极式，使磁极表面的磁通密度不均匀，在一个极下所有的导体中所感应的电势大小不一样。为了解决这个问题，只能先求出一个极下的平均磁通密度，这样，每根导体中所感应的电势就是一样的，然后，依据每一条支路所串联的导体数，就可求出一条支路的电势大小。它的方向取决于直流电机的运行方式，作为发电机运行，自然是电源电动势，作为电动机运行，自然就是反电动势了。

直流电机的电磁转矩和电磁功率是一个很重要的物理量。电磁转矩的大小是电枢绕组各导体所产生的电磁转矩的总和。由于主磁极下的磁场分布不均匀，所以应先求出一根导体所产生的电磁转矩的平均值，然后再求出所有导体形成的总电磁转矩。在这里应注意导体中的电流概念，如果并联支路只有一条，电枢总电流即为导体中流过的电流，如果有 $2a$ 条并联支路，那么导体中流进的电流数值应为 $I = \frac{I_a}{2a}$ (I_a —电枢总电流)。它的方向对发电机来说是与电枢转向相反的，属于制动力矩；对电动机来说是与电枢转向相同的，属于驱动力矩，从而完成能量转换的任务。

电磁功率系指能量转换过程中的那部分功率。对发电机是针对把机械能转换成电能的那一部分功率，对电动机是针

对把电能转换成机械能的那一部分功率，它们是能量转换的关键物理量。这两个物理量的物理意义，主要放在发电机和电动机中论述。在这一章主要是建立一个基本概念，但应引起必要的重视。

电枢反应是直流电机接带负载后必不可少的一种物理现象，它实质上是负载电流建立的电枢磁场对主磁极磁场的影响的一种反应现象。由于该反应在直流电机中是受电刷位置和运行方式的因素影响，所以应从这两个方面给予论述，至于所造成的后果，也因电刷的位置和运行方式的不同而有所不同，只有这样，才能把直流电机的电枢反应分析透彻、完整。

直流电机的换向是决定直流电机能否正常运行的关键部分，目前还没有完整的成熟理论，教材中只是介绍了换向的基本概念以及阻碍换向的主要电磁方面的因素。对于什么是换向元件以及换向元件在换向过程中所产生的电势应予充分的分析。只有在了解这些的前提下，才能比较顺利地介绍有关的几种改善换向的措施。

二、教学建议

第一节 直流电机的工作原理和基本结构

重点要求掌握直流电机的工作原理，了解直流电机主要部件的功能和结构特点。

研究直流电机的工作原理，由于它有作为发电机、电动机的两种运行状态，所以必须分别从两种不同的运行状态给予论述。

直流发电机，它是依据电磁感应定律、导线切割磁力线

而感生电势的原理，借助于换向装置的作用，将电枢绕组内的交变电势变成电刷间的直流电势送至负载进行工作的。这里必须指出电枢绕组内的电势是交变的概念。直流电动机，它是将外部电源的直流电，借助于换向装置变成交流电后送至电枢绕组内，依据载流导体在磁场中受到电磁力的作用，使之旋转而进行工作的。这里必须突出的概念：正因为直流电动机电枢绕组内的电流是交变的，所以，电枢电流与定子磁场的相互作用而产生的电磁转矩才会有恒定的方向，从而驱动电枢旋转。在此分析的基础上，可得出一个重要的结论：直流电机本质上就是装有换向装置的交流电机。讲述直流电机工作原理，建议注意突出换向装置这一特殊功能，换句话说，换向装置是直流电机必不可少的部件，也是直流电机结构上的一个特点。

讲述直流电机的基本结构，首先要明确的一个概念：直流电机是旋转电机的一种。自然，它的主要结构就是定子和转子两大部分，但必须注意交代清楚，由于直流电机需要换向，致使直流电机只能做成电枢旋转式，即定子是磁极，转子是电枢。这与以后要讲的交流同步电机定子是电枢、转子是磁极（现代同步电机的结构）是不同的。而且，也应该交代清楚，直流发电机和直流电动机的结构是完全一样的。定子的主要部分是主磁极和换向极，转子的主要部分是电枢；定子部分的电刷和转子部分的换向器统称为换向装置，共同实现机械整流。

第二节 电枢绕组

重点要求通过最基本的单叠、单波绕组认识直流电机电枢绕组的组成、连接规律及电刷位置、支路数等特点。

直流电机的电枢绕组是电机的一个很重要的部件，因为它是产生电势、实现能量转换的关键部件之一。

讲述直流电机的电枢绕组时，建议首先明确直流电机的电枢绕组都是双层的，即电枢的每个虚槽中嵌放两层元件边，每个绕组元件的一边置于一个虚槽的上层（称为上层边，习惯上又称为第一元件边），另一边则置于另一虚槽的下层（称为下层边，习惯上又称为第二元件边）。然后明确它的分类为叠绕组和波绕组两大类，讲述时仅以最基本的单叠和单波绕组为例，介绍直流电机的电枢绕组构成的原则和特点。要求讲这部分内容时，重点应突出：直流电机的电枢绕组构成的原则和特点是，无论是单叠绕组或单波绕组，都是由若干个结构相同的绕组元件（即线圈），按一定规律通过换向片连接成一个闭合回路。闭合回路本身没有固定的引出端，而是当电枢旋转时，各元件依次通过电刷作为引出端的，如果电刷不与外电路接通，整个闭合回路的电势之和为零，即电枢绕组中没有环流产生，这是与交流电机电枢绕组的根本区别之处。直流电机电枢绕组电路如图 1-1 所示。

在明确了单叠、单波绕组共性特点之后，紧接着就应以各自的不同之处，如绕组的连接、支路数的确定以及放置电刷的数目等给予讲解。

所谓单叠绕组就是指合成节距等于换向片节距等于 ± 1 的电枢绕组。根据它的定义可得出其连接规律为：每个绕组元件的两个线端连接到相邻的换向片上，所有相邻虚槽中的绕组元件依次串联，亦即每个元件的首端均与前一虚槽中元件的末端相连，最后一个元件的末端与第一个元件的首端相连，形成一个闭合回路。从联接规律中要清晰地分析由于单

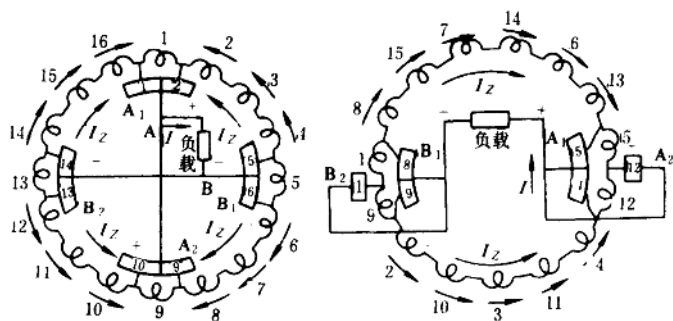


图 1-1 直流电机电枢绕组电路图

叠绕组在任何瞬间，一个极下的所有上层边和异极性的相邻极下的所有下层边串联成一条支路(如图 1-2 所示)的现象，这就很自然地可以得出结论：有多少个主磁极，就应该有多少条支路，这就是单叠绕组的第一个特点。

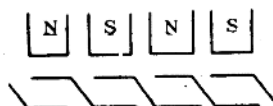


图 1-2 单叠绕组各支路所属元件边串联

因为电刷是支路的分界线，所以有几条支路就应该有几组电刷，这就是单叠绕组的第二个特点。如果缺一组电刷，电枢绕组将不能正常工作。

单波绕组的特征是换向片节距大于第一节距，所以每个元件的首、尾端相隔较远，它的合成节距等于换向片节距，要求接近 2τ ，但不能等于 2τ ，否则，串联几个元件绕电枢一周

后,又会回到出发点而闭合,第二周就无法再绕下去。讲清这个概念就可明确单波绕组的绕法必须按下述方法进行,即从某一换向片出发,沿电枢圆周和换向器绕一周后,回到原来出发的换向片相邻

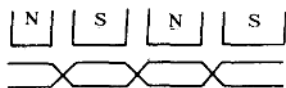


图 1-3 单波绕组各支路所属元件边串联

的一片(左边或右边)上,由此再继续第二周、第三周地绕下去,直至最后把全部元件串联完毕,并与最初的出发点相连接而构成闭合回路。从连接规律中要分析出波绕组是把所有N极下的上层元件边都串起来,形成一条支路,再把所有S极下的上层元件边都串联起来,形成另一条支路,如图1-3所示。这就是说,不论主磁极的数目多少,单波绕组只有两条支路。这就得出了单波绕组的第一个特点。因为只有两条支路,所以只需放置两组电刷,这是单波绕组的第二个特点。在这里应交代使电刷组数等于主极数的原因,即为了节省铜材。除此以外,对于单叠、单波绕组的采用情况,建议进行必要的比较。当电机采取了单叠绕组时,由于支路多,可以输出较大的电流,但刷间的电压是较低的(因为每条支路串联的元件少)。而采用单波绕组时,由于并联支路数少,在相同元件数的情况下,单波绕组比单叠绕组有较高的刷间电压(因为每条支路串联的元件多)。

在这一节中第二个要交代清楚的问题是如何确定电刷安放的位置。电刷放置的位置,应明确根据电机空载时正、负刷间能获得最大电势为原则给予确定。为了达到这个目的,电刷应与电势为零的元件所连的换向片接触,只有这样,正负

刷间每段电路所串联的元件的电势方向才都相同,显而易见,正负刷间的电势就可达最大值。如果偏离这一位置,则正负刷间每段所串联的元件电势,或有的方向相反,或有的电势为零,自然,正负刷间电势就会减少。同时还要交代,被电刷短接的元件中电势要为零的第二个原因,这就是如果被电刷短接的元件中电势不为零时,在被短接的元件中将会产生环流,引起不良的换向后果。基于上述两种原因,必定要使电刷与电势为零的元件所连的换向片接触,在这方面一定要分析透彻,总结出电刷放置位置的两条原则。

如何达到这个原则,还得作出进一步的论述,那就是对于端部对称的元件(对叠绕组是指元件的中心线与该元件所接的换向片的分界线重合,对波绕组是指每一元件所接的两换向片对称地位于该元件中线的左右两边,亦即元件所接的换向片之间的中心线与元件中线重合),如图 1-4 所示;不论是整距元件还是短矩元件,只要掌握

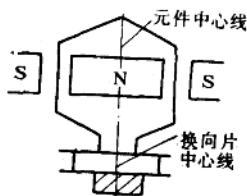


图 1-4 端部对称元件

把元件的中线与主磁极轴线重合,则该元件的电势必定为零。从中可得出这样的结论:正常情况下电刷应放在元件的中线与主磁极轴线重合的元件所连接两换向片的分界线上。由于电刷放在两换向片的分界线上,这就意味着电刷与几何中性线的导体相接触,通常我们把这种放置电刷的原则称为“电刷放在几何中性线上”。

最后要明确指出:一般装有换向极的电机,电刷必须放

在几何中性线上。

第三节 直流电机的电枢反应及换向

重点要求熟悉直流电机作为发电机和电动机工作时的电枢反应，掌握电刷位置不同时，电枢反应磁场对主磁场的作用，明确电枢反应对电机运行的影响。对换向内容重点要求定性地认识换向的电磁理论，从而认识产生火花的原因，掌握改善换向的方法。

讲述直流电机的电枢反应，重点应突出：电枢反应的性质是取决于电刷在换向器上的位置和电机的运行方式。它同以后讲到的同步电机的电枢反应的性质取决于负载的性质是截然不同的，但就电枢反应的含义来说两者是完全相同的。电刷在换向器上的位置有两种情况，一种电刷处于几何中性线上，另一种电刷不处于几何中性线上。这里应作一解释，如前所述，凡是装有换向极的直流电机其电刷都是放在几何中性线上的，之所以还要讨论电刷不在几何中性线上的情况是为分析电刷偏离这一位置所产生的后果而服务的。

为了弄清这个概念，建议有必要介绍一下直流电机模型的问题，即为了简化直流电机图形，可以从实际的直流电机中抽象出直流电机模型。在实际电机中的电刷，前面已经阐述过，通常置于主磁极的轴线处，并与转动到该处的换向片接触，这样被电刷短接的绕组元件的两个边正好处于（对整距绕组）或接近于（对短距绕组）几何中性线，元件中是没有电流的。从并联支路图中可以看出，由于正负电刷间每一条支路的元件电流方向相同，被电刷短路的元件便成为电枢表面上绕组元件边电流方向的分界线。为简明起见，画图时省略掉换向器，而把电刷就放在几何中性线上，直接与被其短路的

元件相接触,这种情况简称“电刷位于几何中性线上”,如图 1-5 所示。

在直流电机模型中,每一根电枢导体可代表同槽中的上、下层元件边或者代表一个元件。但要注意,电枢中电流的分界并不就是电枢中电势方向的分界,电枢中电势方向的分界是物理中性线(即通过磁通密度为零的点并与电枢表面垂直的

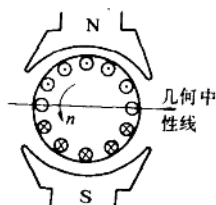


图 1-5 直流电机模型

直线)。以下就以电机模型来研究问题。当电刷处于几何中性线时,电枢磁势的轴线恰与主磁极轴线相垂直,称为横轴电枢磁势,这是电枢磁场的特点,它决定了电刷处于几何中性线时的电枢反应只能有横轴电枢反应,这一点应确切地交代清楚。应用叠加原理分析直流电机作为发电机运行时的电枢反应的结果是,前极尖减磁,后极尖增磁,造成气隙磁场的畸变,物理中性线不与几何中性线重合,而是顺电枢旋转方向自几何中性线偏移一个角度;作为电动机运行时,气隙磁场同样产生畸变,只不过前极尖为增磁,后极尖变为减磁,物理中性线逆着电枢旋转方向自几何中性线偏移一个角度。如果电机磁路不饱和,在每个磁极的前、后极端上,气隙磁通的增减是相当的,因此,每极下的总磁通保持不变。实际工作中,磁路通常都在饱和程度下,于是半个磁极内磁通的增加不足以补偿另半个磁极内磁通的减少,所以横轴电枢反应不仅能使主磁场分布畸变,而且对主磁极起到一定的去磁作用。如果把电刷从几何中性线顺着发电机转向或逆着电动机转向移动一个角度 β ,那么,电枢导体电流方向的分界线、电

枢磁势的轴线位置都将随着移动 β 角,如图 1—6 所示。此时,不但有横轴电枢反应,而且还存在一个直轴(纵轴)电枢反应。如图示,把电枢导体划分为两部分,即 2β 范围内的导体产生的磁势,其轴线与主磁极轴线重合,这部分称为直轴电枢磁

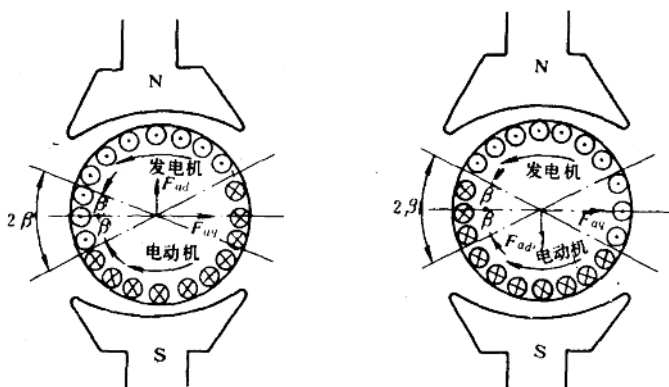


图 1—6 电刷不在几何中性线的电枢反应

势,用 F_{ad} 表示,其方向与主磁场方向相反。显然,直轴电枢反应是起去磁作用的,在 2β 范围以外的导体产生的磁势,轴线与主磁极轴线垂直,为横轴电枢磁势,用 F_{aq} 表示。此时的横轴电枢反应使气隙磁场畸变,同时起到一定的去磁作用。反之,电刷从几何中性线逆着发电机转向或顺着电动机转向移动一个 β 角,除了横轴电枢反应外,还有一个起到增磁的直轴电枢反应。综合上述,我们可以得出直流电机电枢反应的结论。由于电刷只能放在几何中性线上,直流电机的电枢反

应只存在一个交轴(横轴)电枢反应,这是问题的一个方面。装设换向磁极的目的之一也就是为了消去横轴电枢反应的影响,从而改善换向。但是,在装设了换向磁极的直流电机中,如果电刷偏离了几何中性线的位置,就会多出一个直轴(纵轴)电枢反应,这是问题的另一个方面,会导致换向情况的变坏。所以,电刷的位置不能随便移动。研究电枢反应主要是考虑它对直流电机的运行有着一定的影响,即横轴电枢反应使气隙磁场畸变,尽管对刷间的电势不产生任何影响(因为电刷间电势仅与每极总磁通有关,而与极下的磁通分布无关),但对各绕组元件中电势的影响则很大,使各换向片间的电压变得不均匀。特别是电机过载时,磁通密度分布的不均匀程度很大,那些切割最大磁通密度的导体将产生比正常值高得多的感应电势,在换向片间的表面放电(电位火花),并将引起周围空气电离。严重时,各种因素产生的火花汇合在一起,就有可能导致整个换向器的短路,即所谓的“环火”现象。同时由于物理中性线偏离几何中性线,使几何中性线上的磁场不为零,在几何中性线上的导体将会感应一个不大的电势,被电刷短接时,就会因有环流而引起电刷下面产生火花。

直流电机的换向是制造和运行时必须充分重视的问题。应该清楚地意识到,换向是直流电机固有的重要特性,它也是影响直流电机正常工作的主要因素。在讲这部分内容时,首先要交代清楚换向的实质,即换向是指电枢绕组元件被电刷短接的情况下,从一条支路转入另一条支路,元件中电流方向发生倒转的过程。然后,依据换向的电磁理论分析换向元件在换向过程中产生的现象。所谓的换向电磁理论,可归纳