

电 机

(論文集)

第 二 集

哈 尔 濱 工 业 大 学

1 9 6 3. 8

目 錄

电机发展簡史.....	竺培勳 (1)
同步电机的饱和效应.....	王宗培 (16)
旋轉电势、变压器电势及其和能量轉換的关系.....	湯蘊璆 (28)
利用金刚砂非綫性电阻做为大功率同步电机灭磁元件的研究.....	王耀臣 (43)
网格型 $P+1$ 端网络的参数.....	柳 焯 (50)
有源二端网络串并联組成的复杂网络的算子分析.....	周长源 (66)
关于网格式电模型第二类边值及源泉的給定.....	柳 焯 (72)
对多疊繞組及相应的蛙繞組中某些問題的分析.....	范存廉 (83)
異步电机的最大轉矩与端电压的关系.....	王宗培 (97)
三相小容量反应 (磁阻) 式同步电动机的鉄損和参数的測定.....	王宗培 (107)
氢內冷汽輪发电机轉子主要尺寸的决定.....	徐磐熹 (116)

电机发展简史

竺 培 勳

引 言

电机作为电能转换为机械能和机械能转换为电能的机器发生在十九世纪二十年代，而在十九世纪末及二十世纪初达到了基本上完善的地步。本世纪初叶以后的几十年中电机的应用日益广泛，普及到几乎所有的经济部门和日常生活方面。20年代以来自动控制的发展在电机中引起了新的分支，即控制用的电机的产生和发展。这种电机工作的物理基础虽然和一般电机相同，但就其作用来讲已经不是原来意义上的电机而是一种测量控制元件了。好象瓦小时表和某些其他电工仪表在工作原理上和电机相同。但是由于他们所解决的问题不同，因而对他们提出的要求和他们的结构也就不相同。因此严格的来说这种控制用电机可以不列入电机的范围之内。但是从工作原理和发展历史的关系来看和变压器一样把控制用电机列入电机范围内亦无不可。但是我们的讨论以能量转换为目的的电机为主。

近代史即从十七世纪中到二十世纪初叶是资本主义社会形成发展和开始没落的时期。以1871年巴黎公社为标志，整个时期可以划分为两个阶段。第一个阶段是资本主义形成和发展的时期而后一个阶段是资本主义过渡到并形成其最高阶段即帝国主义阶段的时期。前一个阶段又可划分为两个段落即以十八世纪中叶（1760年左右）工业革命为界，前一个时期为资本主义酝酿和形成时期，而在工业革命以后为迅速发展时期，约在1830年后，达到其全盛的时期。近代史的第二阶段亦可划分为两个段落，大体上1898年以前为由资本主义过渡到帝国主义阶段，而从1898年到1918年为帝国主义已经形成和社会主义革命开始的时期。

由上面的叙述可以看到电机产生在资本主义发展全盛时代而在资本主义过渡和变成垄断资本主义的时期达到了自己的基本完善的形态。这种现象不应当看为偶然的巧合。

虽然人类很早就接触到电磁现象并对这种现象进行了长期的研究。但是直到十八世纪中叶以前人们关于这方面的知识只限于静电和永磁现象的范围。十八世纪下半世纪由工业革命所引起的资本主义生产的迅速增长和贸易的发展，促进了对各种自然现象研究的加强。其中也包括对电磁现象的研究。高凡在1780年发现的蛙腿收缩现象导致伏达原电池的发明（1795年）。伏达电池第一次提供了一个可靠的可以较长期工作的“活电”电源。在这个基础上形成了电流的概念。发现了电流的化学、热、光、磁和机械效应。

伏特电池的不断改进，使人们获得了更有效可靠的电源以及对电流广泛的研究为电的应用开辟了道路。差不多从1830年起电开始得到实际的应用。首先在电讯方面即电

报及引燃方面（使火药爆炸）随后在电镀及电解方面其后在电力照明方面，再次是在电力拖动方面。由于电镀需要大量的电能促进了直流发电机的改进，而电力照明则引起了单相交流发电机及输配电系统的发展。到19世纪末叶生产日益集中工厂规模日益扩大，生产对能量传送和分配的需要更加迫切，在单相交流的基础上形成了交流三相体系。三相电力系统和异步电动机为电力的广泛应用和一切生产部门的电气化奠定了基础，至此电机达到了基本上完善的地步。二十世纪以来电机虽然在各方面有很大的改进。但基本上仍然保持了十九世纪末及本世纪初所确定的结构。辩证法告诉我们一切都在变化即发生成长和灭亡，电机当然亦不能例外研究电机的发展过程有助于认识使电机进一步发展的途径。

第一章 电机的发生和发展的第一阶段一

现代直流电机的形成

最初的电机产生在约1830年左右，由于当时生产的需要（电报、电解等）和已有的电源（化学电源）以及科学水平的限制最初得到发展的电机只可能是直流电机。因此电机发展的初期主要的是直流电机发展的历史。

电机与水力机、热力机不同，不能从日常的生产劳动中直接产生出来而是科学研究的結果。电的应用，电机的产生以至整个电工工业的形成是科学促进生产力发展的伟大实例。现在让我们来看看在电机发生前夜物理中与之关系最密切的各方面的概况。

§ 1. 电机产生的物理基础

从较古的时代起人类就已经知道静电和永磁的现象。关于这方面的长期累积起来的知識最基本的是存在着两种性质不同的电。带电体之间相互有力的作用。性质相同的电互相排斥而性质不同的电相互吸引。对于永磁铁也得到了相同的结论。但认为电和磁是互相独立的事情。化学电源的发现改变了这种情况。由不同的金属浸在稀释的酸中所组成的元电池成为十九世纪中叶主要的电源。这种元电池的逐步改进成为相当稳定和可靠的电源。有了元电池人们就有可能越出静电研究的圈子。首先形成了电流的概念，即不再在静止的状态中研究电而是在运动的状态中去研究电的现象。在十九世纪的最初三十年中发现并研究了电流的各种现象和性质，其中对电机的产生有密切关系的是电流的磁效应的发现和研究。电流的磁效应首先表现在电流对处在他附近的磁针的作用和永磁铁对磁针的作用相同。电流的这种磁效应为铁粉分布的情况所进一步证实，并且产生了线圈使得电流的磁效应大大地得到加强。建立了运动的电能够产生和永久磁铁所产生的相同的磁场的观点。由此得出与电机的产生直接有关的两个后果。

首先是在上述的基础上形成了电磁铁。人们注意到了电磁铁显示出来的强大的吸引力（当时已达几百公斤），并且注意到了电磁铁能够迅速的被磁化和去磁。电磁铁的这种性质是最初的电动机工作的基础。

从电流的磁效应中所得出来的第二个重要的后果是电动仪器的制作。从带电导体对

磁針机械力的作用出发 根据当时已为大家所接受的牛頓定律必然得出磁針亦将以相同的力作用于导体。因此在一定的条件下如果磁針不动則应该发生带电导体的运动，法拉第、白尔劳等基于相同的原理在相近的年代各自制成了能够发生机械轉动的电动仪器。图 1—1 示法拉第在 1821 年制成的能够旋轉的导綫。图中 6 为能旋轉的导体，3 为永磁铁，4 为水銀。图 1—2 示白尔劳輪，图中 7 为永久馬蹄形磁铁，5 为能旋轉的輪子，6 为水銀。

这两个仪器显示了电能轉化为机械能的可能性。

在这个时期里发现的另一个对电机的产生起重要作用的电磁現象是阿拉可在 1824 年发现的所謂磁旋轉現象，磁旋轉現象是将一个能够自由旋轉的銅盘放在永久磁铁下面，則当使永久磁铁轉动时銅盘亦将随之轉动。图 1—3 是阿拉可盘的示意图。这个現象的

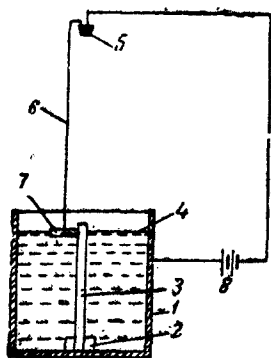


图 1—1

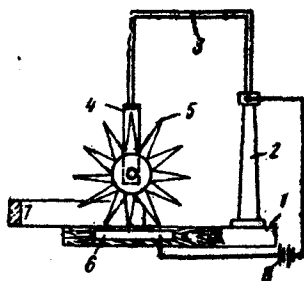


图 1—2

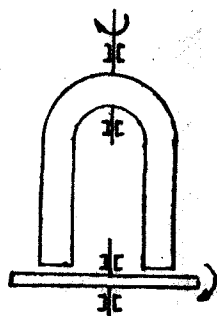


图 1—3

重要性不但在于它实际上是以后三相感应电动机的一个基础，还在于这个現象的研究有助于电磁感应現象的发现即磁的运动能够产生电。銅盘为什么会随着磁铁旋轉？法拉第经过了长期的研究得出了正确的結論。他認為銅盘之所以会运动是因为銅盘中有电流。正如以前的实验所已經显示的那样，带电流的导体在磁場中会发生运动，而銅盘中的电流是由于永久磁铁旋轉而在銅盘中引起的。为了証实旋轉的銅盘中确实有电流存在，他做了一个能够在磁铁中旋轉的銅盘，在盘子的軸上及边緣都装有电刷（金屬接触片）如图 1—4 所示。当盘子旋轉的时候他果然得到了电流。磁能够生电！法拉第在一系列的实验中都証实了磁的运动、变化可以产生电流。例如图 1—5 表示法拉第应用永久磁铁在綫圈中的运动得到了电流。

电的运动能够生磁，磁的运动能够生电，这样物理在十九世紀三十年代为电机的产生准备好了必要的条件。

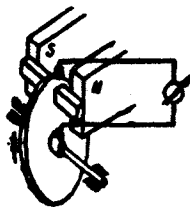
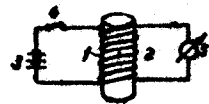


图 1—4



图 1—5

§ 2. 直流電机的發生和發展的初步階段

直流电机、电动机和发电机差不多同时发生在十九世紀三十年代的初期。由于人們对电机缺乏了解，因此电动机和发电机在发展的初期是被看作根本上不同的两种机械，各自根据不同的概念和原理工作的。虽然林茲在1838年已經用实验证实了一台发电机亦可以作为电动机运行，但电机的可逆性只是在1870年以后才被广泛地接受，直流发电机和电动机的发展才实际上统一起来。我們把直流电动机和发电机各自独立发展的阶段称为直流电机发展的初步阶段。

在直流电机的形成过程中由于引言中所說的那些生产对电源的需要，直流发电机是直流电机发展的主要方面。与此同时直流电动机虽然也得到了一些应用，但是电力拖动在三相交流异步电动机产生之前只限于个别的情况。直流电动机之所以沒有得到广泛的使用是由于在资本主义生产还不十分集中规模还不十分大时蒸汽机和其他的热力机（内燃机等）一般的尚能满足生产的需要。因此在十九世紀末叶之前对新的原动机虽然有一定的需要，但还不十分迫切。其次在发电机得到相当发展之前由于缺乏廉价的大量的电源，电动机的广泛应用是不可能的。最后，电动机是一种二次动力机，在电力集中生产并用輸电綫将电力送到用电的地方去的思想出現之前人們不能充分地想象应用电动机的优越性，而在电力集中生产之后又产生直流电能不适于較远距离传送的問題。

但是直流电动机在直流电机发展的初期仍然得到了不小的发展。这方面的主要推动力是人們認為化学电源可以几乎无償的供給电能。这方面可以举出雅可比的看法作为代表。他在1837年給当时俄国的教育部长的信中認為伏特池所供給的电源是物質化学反应的結果，而这些物質在經過化学反应以后所产生的化合物是在工业上很有用的东西，这样就能廉价地获得电能。和雅可比同时代的人中許多都持有和他相似的观点。这种廉价电源的憧憬后来虽然破灭了，但是在推动电机的发展上起了一定的作用。下面我們来分別地看看电动机和发电机在这个阶段中存在过的各种主要形式。

§ 3. 直流电动机發生和發展的初步階段

到1830年左右物理的形成就为电能通过磁場轉化为机械能提供了三个可能的方向：

- (1) 根据电磁鉄之間的相吸相斥和电磁鉄能够迅速磁化和去磁的現象；
- (2) 根据載电流导綫在磁場中受力的現象；
- (3) 根据金屬盘能够随着磁鉄的旋轉而旋轉的現象。

大概由于法拉第的旋轉导体仪器（图1—1）和白尔劳輪（图1—2）在通过电流时所产生的力量与电磁鉄的吸引和排斥相比显得很微弱而用电的方法来产生旋轉磁場的可能性当时还不存在，因此在最初的直流电动机及在其后30~40年的发展中心人們都以电磁鉄相互之間的吸引和排斥的現象作为制造电动机的指导思想。

可以举两个例子来代表最初的电动机。

这些装置虽然没有什么实际意义，只能作为實驗室中作研究用的設備。但是我們以后看到就它們的工作原理來說已經包含了以后直流电动机工作的基础，因此把它們称为

电动机亦是可能的。这些电动装置和电磁铁之间的差别在于在这些装置中出现了电流的切换装置。由于有了电流的切换装置电磁铁线圈中的电流方向不断随着运动部份的运动而变化方向，因而能够将电能不断地转换为机械能，而不象电磁铁那样只能产生短暂的机械运动。例如（图1—6）在亨利的摆动式电动机中当铁臂1向右倾时，线圈的两端AB和电池9的5、6相接触，使得铁臂的右端成为N，而左端成为S，这样就使得铁臂往左倾；而铁臂向左倾时线圈的两端A'B'和电池9的7、8相连接，使得线圈中电流的方向反过来。这样就使得铁臂中的磁性亦随着反过来，而使右端变成S极，左端变为N极，这样铁臂又要右倾。如此反复。图中4是永久磁铁。

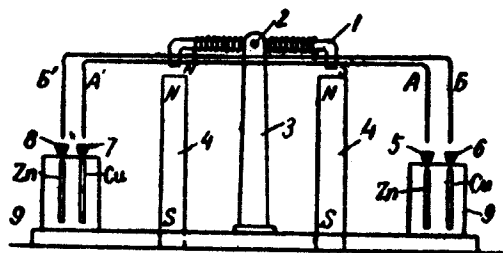


图 1—6

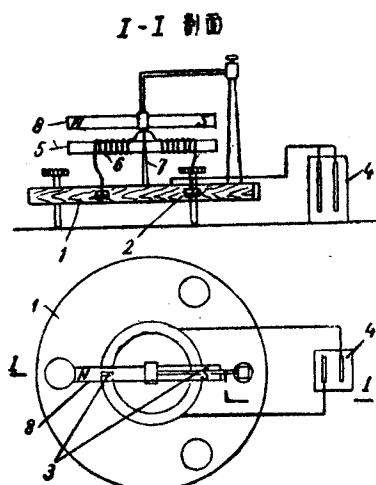


图 1—7

图1—7所示的利奇的旋转装置，5是电磁铁。电磁铁线圈的两端插在水银槽3中，电池4通过水银和线圈两端接通。当电磁铁5旋转时其中电流不断地在恰当的位置改变方向，使得电磁铁5与永久磁铁8相互作用维持电磁铁不断地旋转。

由上面的例子可以看到电流切换装置——以后简称为换向器，即改变电流方向的装置——所起的作用的实质在于当电磁铁在空间作机械运动时使电磁铁产生的磁场的极性在空间的位置不变。如没有换向器装置，则在利奇的旋转装置中电磁铁所产生的磁场将随电磁铁的旋转而在空间旋转。这样就不能产生持续的旋转运动。换向器解决了这样的矛盾，即电磁铁应该对永久磁铁在机械上有相对运动，但他们之间在磁性上又应该是相对不变的。只有在这个条件下电动机的工作才是可能的。如何使机械上相对运动的二部分在磁性上相对静止是电机发展中必须解决和改进的一个主要问题。

根据电磁铁相吸相斥的原理做成的电动机在实验室中得到原则上的成功之后，为了使电动机获得实用价值就必须增加它的出力。前面所举的例子中电动机的功率约在一瓦左右，这样小的功率的电动机在实际上显然是没有什么价值的。这方面可以举出如雅可比、卡依但诺夫及富隆等所设计的电动机作为代表。

这些电机的容量最大达到约700—800瓦，其所以能将容量从一瓦左右提高到数百瓦并且提高了电动机工作的可靠性，主要采取了下列措施。

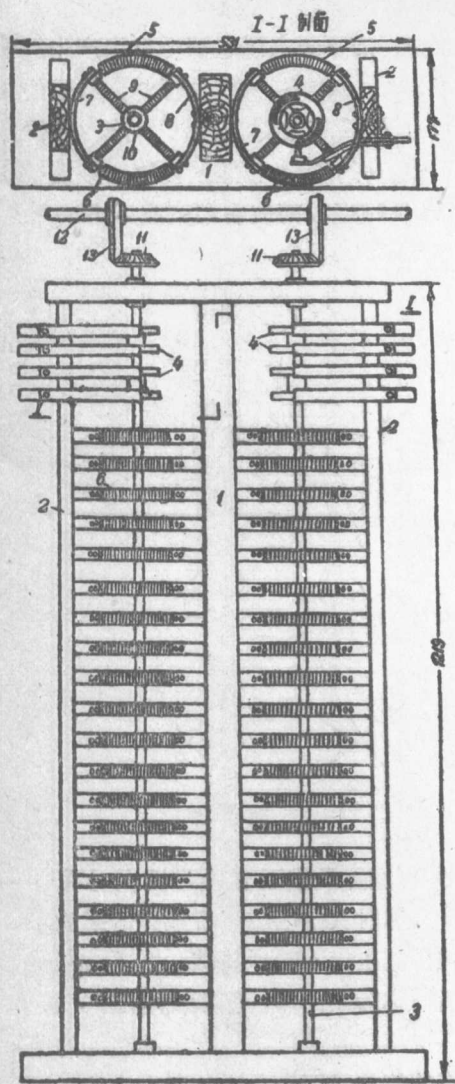


图 1—8

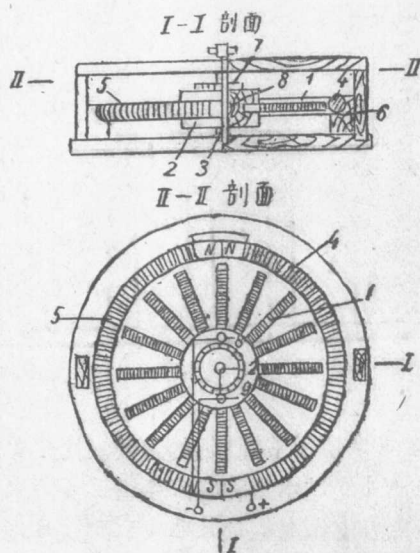


图 1—9

首先是换向器结构的改进。原来的换向器都采用水银作为接触介质。这种水银接触是一种既不可靠又不能通过大电流的结构。新的结构采用了固体接触，这就提高了换向器通过电流的能力和工作的可靠性。其次是无所谓静止部分或是运动部分都采用了电磁铁，用电磁铁代替永久磁铁这就加强了连接静止和运动部分的磁场从而加大了吸力或斥力。第三是加强了旋转部分的机械结构，例如用横式有轴承的结构代替了悬吊式结构，在这里顺便提一下，在这个时期存在过各种直线运动的电动机。例如图 1—11 所示。这种电动机设计者的思想受到蒸汽机的结构形式的束缚。这些电动机的运动部分象蒸汽机的活塞一样作直线运动，然后再利用机械的结构将直线运动转化为旋转运动，显然直接

从电动机得到旋轉运动是更先进的思想。

第四出现了轉子与定子同心而轉子放在定子内部的結構。如图 1—8 雅可比 1838 年式, 图 1—9 卡依但諾夫式。这种結構形式的重要性在于为电动机更充分地利用导磁及导电材料和工作空間提供了結構上的条件。这一点从卡依但諾夫的电动机中可以得到清楚的說明。从这台电动机的接綫图中 (图 1—9) 可見只要將轉动部分的綫圈的联結方法加以改竄就可以大大提高出力。(可以提高約八倍) 卡依但諾夫所以沒有能这样做的原因是当时人們都从电磁鉄之間異極性相吸, 同極性相斥的观点出发来考虑电动机的构造。因此在他們看来只有接近靜止部分南北極的轉子上的两个磁鉄才是有效的, 而轉子上的其他磁鉄因离开定子上的南北磁極較远, 不能起显著作用。因此也无庸通电流。他沒有看到由于定子电流处在轉子电磁鉄所产生的磁場中 能够在轉子磁鉄上产生一个力。他們还不会从 $f = Bil$ 的观点来考虑电动机的問題。

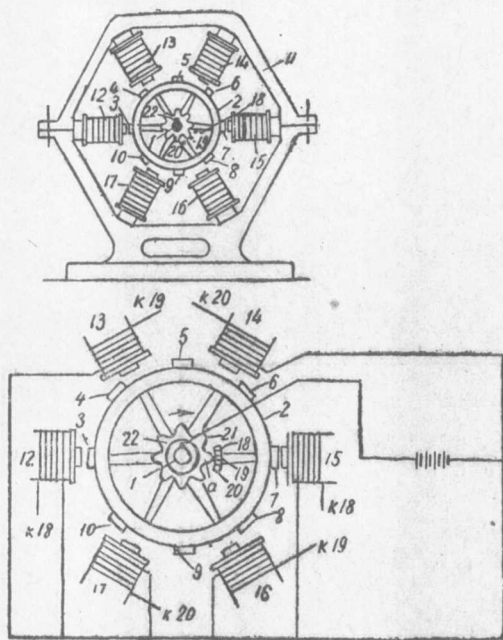


图 1—10

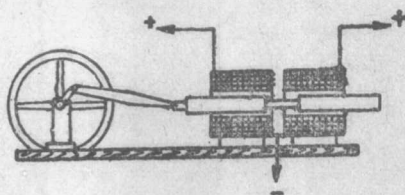


图 1—11

由这一节的討論可見在利用換向器解决了电能轉化为机械能的可能性問題之后, 提高材料的电磁和机械負荷及改善空間的利用以提高电动机的容量就成了主要的問題。在这个阶段电負荷的提高是通过改善电的滑动接触的結構, 而磁負荷的提高則是利用电磁鉄代替永久磁鉄来实现的。机械結構的加固及改善 (如軸承) 为提高轉动部分的轉速提供了条件。构成电动机的材料及空間的利用的不断提高和限制这种利用提高的因素之間的矛盾是电机发展中的另一个主要問題。

这几种电机虽然容量和可靠性上有了不少的提高, 但是並沒有得到广泛的使用。只有富隆式图 1—10 电动机在个别的工业中曾經采用过。如在大的印刷工厂中得到采用。由于印刷机时断时續的工作, 因此在經濟上及管理上用电池电源的富隆电动机比用蒸汽

机更为合算方便。

1860 年出现了环形电枢结构的直流电动机的模型。按这种结构的性质来说是将电动机向前推进了一步（图 1—12）。但是由于这种结构的发明人潘启诺节缺乏与工业的联系，加之所作的模型在加工上的不完善，因此这种电机结构起初没有受到人们应有的重视，因而对直流电动机的发展没有起到应有的推动作用。只是在十年后直流发电机亦独立出现了环形电枢结构，潘启诺节所提出的电动机结构方案起了沟通发电机和电动机结构的作用。

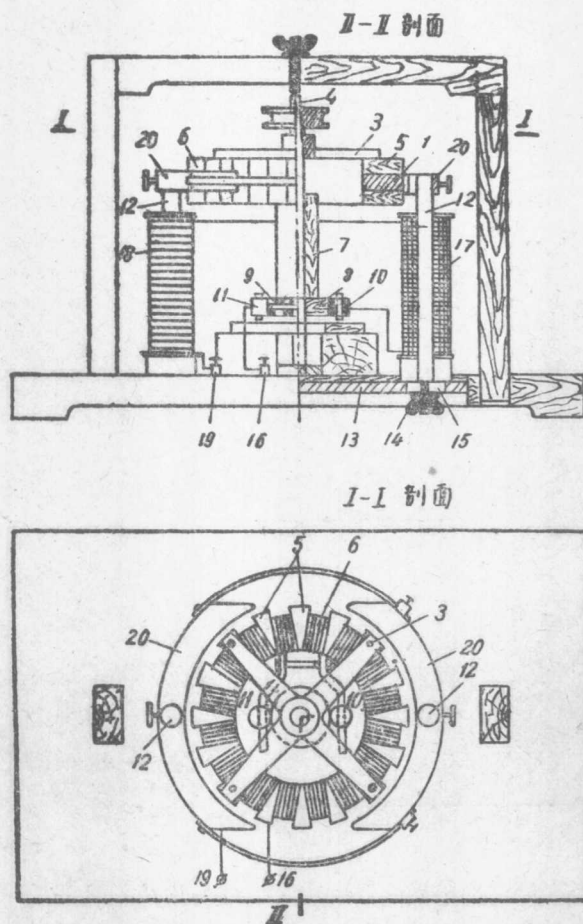


图 1—12

环形电枢电动机之所以应该看作是电动机发展上的一大进步，这是因为环形电枢用分布的闭路绕组代替了集中的开路绕组，并且改进了换向器和线圈的联结。这样，电枢绕组所产生的磁场在空间将是静止的，这个磁场不随转子的转动而变化或转动。和以前的各种结构来比，在以前各种结构的直流电机中，当转子转动时，它所产生的磁场都随着在空间移动，而极性不变。但是在环形电枢的结构中转子所产生的磁场可以认为作到了完全静止。定转子磁场的相对静止性加强了。正是由于定转子之间磁场相对静止性

的加强，所以电动机所产生的轉矩亦由脉振的变为恒轉矩的。并且由于电枢繞組的这种改进电流的换向同时間内仅发生在个别元件中，而不是在整个工作繞組中，这样就減小了换向电路电感，改善了电流换向的条件，減小了换向器上的火花，因此这种結構为进一步加强材料的利用提供了条件。

§ 4. 直流發電机發生和發展的初步階段

如 § 1 所述，发电机的构成可以有两个出发点：第一个是金屬盘在永久磁鉄中旋轉能够获得直流电流；另一个永久磁鉄和綫圈有相对运动时在綫圈中会产生电流。金屬盘在永久磁場中旋轉发电这个現象在直流发电机发展的初步阶段没有得到应用，这是因为金屬盘在永久磁場中旋轉所产生的电势很小，加之由于受到永久磁鉄尺寸及形状的限制，金屬盘中产生的电势在盘中形成涡流，使这个本来已經很小的电势还不能被充分利用。根据这个現象所做成的单極直流发电机只是在以后用实验証实了旋轉的金屬盘在均匀的磁場中旋轉时只产生很小的涡流以后才获得了发展。但是始終沒有成为直流电机的主流。关于单極电机在以后还要談到。而在永久磁鉄和綫圈之間有相对运动时会产生电流的基础上所构成的直流发电机得到了发展，成为发电机的基本形式。根据这个現象而制造的最初的发电机是一台单相交流发电机（图1—13）（1832年），因为利用磁鉄和綫圈相对运动而产生的电流必然是交流的。由于交流电源在当时还没有实用意义，因此在单相交流发电机之后就出現了用换向器将綫圈中原来的交变电流变成直流电流。首先出現

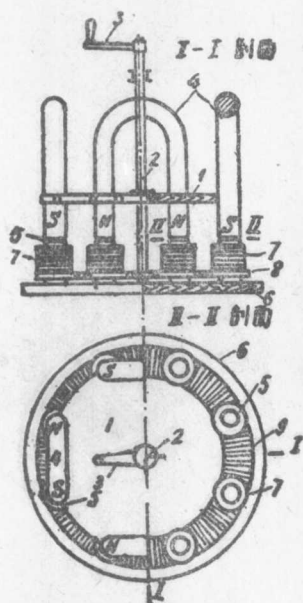


图 1—13



图 1—14

的是皮克西旋轉磁極的直流发电机（1833年）图1—14。为了提高单机容量，改善材料的利用，便于运行，陸續出現了各种型式的直流发电机，可以举下面的几种作为代表。

图 1—15 示莎克斯东式直流发电机用旋轉綫圈代替了皮克西的旋轉永久磁鉄，簡化了旋轉部份的构造。

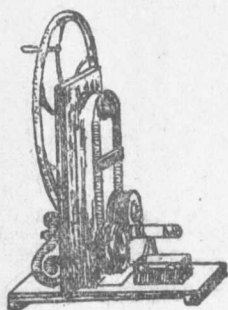


图 1—15

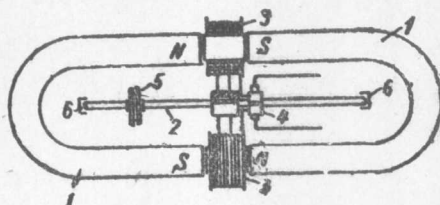


图 1—16

雅可比用两个永久磁鉄图 1—16 (1842) (雅可比的直流发电机) 构成封閉的磁路加强了磁場。

胸太尔在 1843 年做成了一台多極电机以提高单机容量 (图 1—17)，这种电机在十九世紀中叶曾在實驗室中得到广泛的应用。

永久磁鉄直流发电机发展到最后的形式是霍而姆斯直流发电机 (图 1—18)。这种发电机基本上只是简单的永磁直流发电机的集合体，其容量較大，达 850 瓦左右。曾經生产过相当大的数量 (以百台計)，在电介法取得氢气和氧气中起过显著的作用。

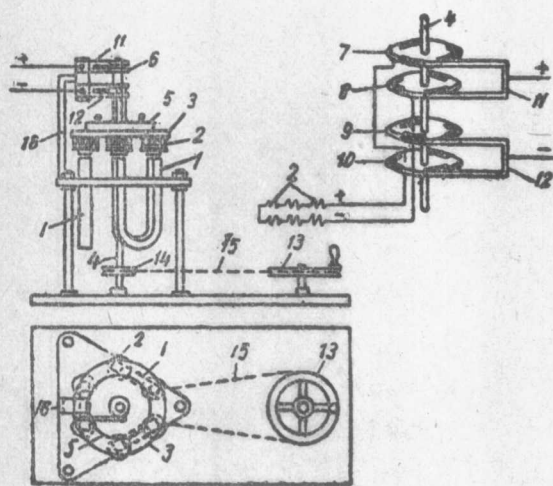


图 1—17

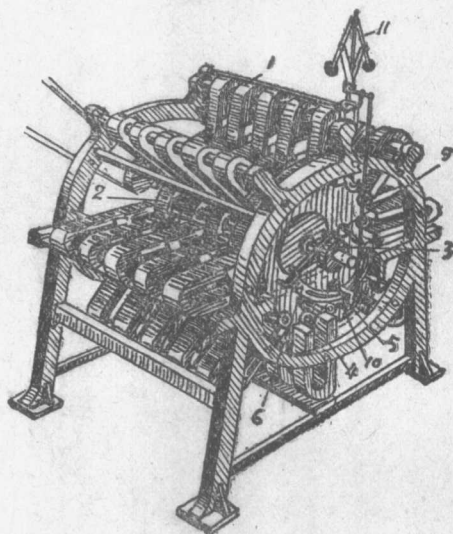


图 1—18

其它的各种发电机容量較小，除在實驗室及引爆 (軍事及开矿) 方面曾經采用外，实用价值較小。这类电机的特点是磁場由永久磁鉄产生，因此結構上定子和轉子不便做成同心式的。綫圈都采用集中式，換向器的形式虽然各不相同，但产生的电势都是单向脉

振的。因而电流所产生的磁场亦是脉动的。转子电流所产生的磁场对定子磁场基本上是静止的，但不完全，即尚存在脉振。

电机材料利用进一步的提高，首先是利用电磁铁来加强磁场。利用电磁铁来励磁又可分为两个阶段，即他励和自励。他励即利用——电池或另一永磁发电机来供给励磁线圈的电流。这时励磁电流仍不能太大，磁场的加强仍旧有限，因为若用电池则电池的容量有限，若用永磁发电机则当容量增大时，励磁用的发电机的重量（尺寸）增加很多。励磁机的尺寸会变得与主机不相称。图 1—19 示华尔得他励直流发电机（1863）。自励即利用发电机本身做为电源来激磁，如图 1—20 所示。这种励磁方式在 1866—1867 以后才逐渐为大家所熟悉和采用，自励的激磁方式最后解决了直流发电机加强励磁的问题。

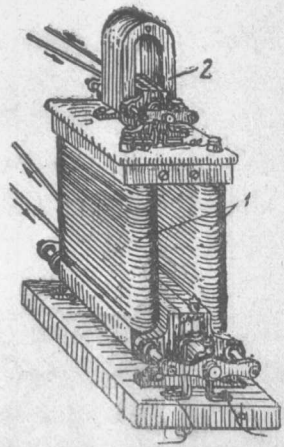


图 1—19

由于采用了电磁铁就有可能比较自由的扩大定子的尺寸，因而可以将转子放到定子中去做成定转子同心的结构形式，如图 1—19 所示的那样，转子铁芯作成图 1—21 所示的那种双 T 形。这样使得磁场可以得到进一步的加强。这时电磁负荷进一步提高为绝缘的寿命所限制。因为在磁场加强后实芯转子中所产生的涡流变得比较严重，引起铁芯发热。而当时电机中所采用的集中多层线圈的散热条件较差。这些情况都会引起绝缘的损坏。此外这类电机虽然采用了电磁铁励磁但其换向方法和前面所述的永久磁铁没有原则上的差别；因而换向器上的火花比较剧烈，在转子电流加强时换向器上的火花随之更趋剧烈。

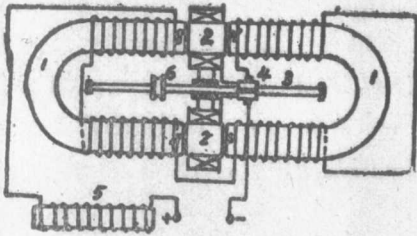


图 1—20



图 1—21

由此可见在安装了换向器之后我们就将交流发电机改成了直流发电机，并开始了直流发电机的发展过程。如直流电动机一样。为了使直流发电机有机械能和直流电能的转换必须有发电机的静止部分和旋转部分之间有相对的机械运动，但它们的磁场却应该是相对静止的。这个条件在直流发电机中在使用了换向器之后仍旧得到了满足。但在上面所述的发展阶段中由于换向方法的不完善在换向器表现出来的电势不是真正的直流而有剧烈所烈的脉动，因而电枢电流和由电枢电流所产生的磁场亦都是脉动的，即静止和旋转部分磁场基本上是相对静止的，但还不完善。当初步解决了定转子之间机械上相对运动磁场上相对静止的矛盾之后，直流发电机进一步发展的矛盾就成为加强电机材料的利用，即提高材料的电磁负荷，以提高单机容量。磁负荷提高时受到磁势不足和磁阻大的限

制，采用了加强磁势即用电磁铁代替永久磁铁和降低主磁路的磁阻，即用同心式结构代替轴向并列式的结构来解决。电磁负荷的提高还受到发热的限制（即绝缘寿命的限制）。在这个阶段有人采用水通入实心铁芯转子来加强冷却（1868年）。经过了磁路系统和冷却方式的改进，提高了电磁负荷和单机容量。这时限制单机容量进一步提高突出的矛盾是换向器上的火花由于电流增大更加剧烈。不变更电机的结构就不能进一步提高电机的容量。这个问题由环形电枢直流发电机的出现而得到解决。

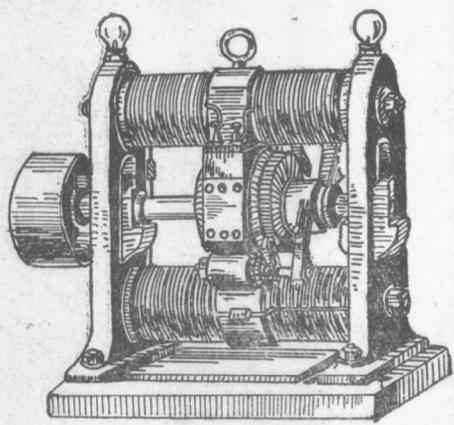


图 1—22

足。并且因环形绕组是分布的比集中绕组有更好的散热条件，为进一步提高电流负荷准备了条件。与T型电枢绕组比较在相同条件下，环形绕组每匝所能交链的磁通比较少，因而使铜的利用反而降低了。这种发电机一时曾较大量的生产，广泛的采用。在电机发展史上由于这种电机的结构和潘启谔节十年前所提出的电动机模型结构比较的结果，终于使电机的可逆性为公众所接受，从此电动机和发电机的发展合而为一。在电工发展史上由于这种电机的出现，为化学工业（主要是电解和电镀）提供了稳定的足够容量的廉价的电力。另一方面大量廉价电力供应的可能性，促进了电力照明的研究和发展，电力照明的发展后来对整个电工的发展上起了重要的推动作用。

§ 5. 直流电机发展的高级阶段

环形电枢的出现，为电机材料利用的进一步提高创造了条件。当然由于新的换向器结构上还不完善，因此在环形电枢出现后换向器的结构仍不断改善。

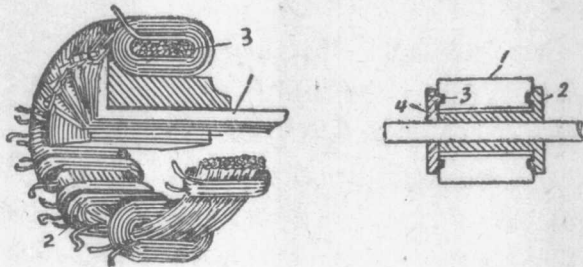


图 1—23

图 1—23 示，格拉姆最初采用的换向器的结构，经过一些中间的过程，1882 年埃尔芬斯东和维茨提出换向器的结构如图 1—24 所示。这种结构沿用到现在基本上没有改变。

在进一步提高材料利用的问题上，在这个阶段中第一个重大的改进是电枢绕组结构的改进。和 T 形电枢相比环形电枢具有分布的优点，但同时却使铜的利用变得差了。新的绕组应该同时具有 T 形和环形电枢绕组的优点，同时避免他们的缺点，这个新的绕组就是鼓形绕组（1873）。鼓形电枢绕组实质上就是 T 形电枢绕组的分布化图（1—25），鼓形电枢绕组虽然比之环形电枢绕组有显著的节省用铜的优点，但鼓形电枢绕组只是经过十多年之后，才完全代替了环形电枢绕组。促使鼓形绕组代替环形绕组的一个因素是在电机容量增大时，电枢绕组的铜线就变得粗重了而鼓形电枢绕组结构使得电枢绕组元件可以先在模子上绕好然后将绕好的元件装到铁芯上去，因而解决了环形绕组元件由于不能单独制造而造成的工艺上的困难，为了加强绕组的机械固定和减少铜线中的涡流损失，绕组的有效部分放到铁芯的槽中（1878），有槽铁芯及鼓形绕组电枢结构一直沿用到今天。

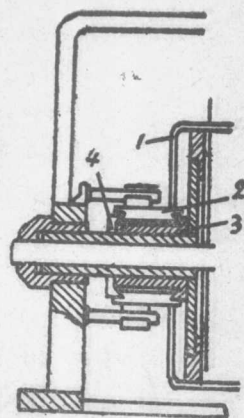


图 1—24

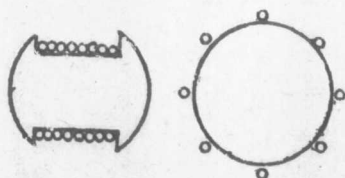


图 1—25

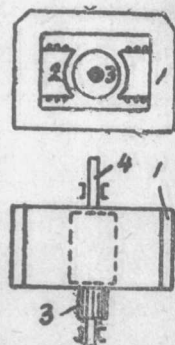


图 1—26

在这个阶段对解决提高电磁负荷时的发热问题，亦有了显著的进步。如前所述在前一阶段中，曾有人采用水冷的办法来解决。但水冷在结构上比较复杂，没有得到广泛的应用。为了降低温升爱迪生在 1880 年提出铁芯用互相绝缘的薄钢片来叠成，这样就大大减小了铁芯损失和电枢的温升。在这以前曾有人建议采用钢丝来绕制铁芯，但这个结构不适用于有槽的电枢铁芯，没有得到广泛采用。同年（1880）马克西提出将铁芯分为几迭而每迭之间有通风槽以加强散热。这种铁芯用薄钢片迭成，并在其中留有通风槽的结构，到现在仍然普遍采用。此外由于对磁路性质的进一步了解，即确定了磁路中的欧姆定律（1886），使得人们能更自觉的来结构磁路。如图 1—26 所示的拉梅恰的电机（1887）的磁路已和现代电机基本上一样了。

这样，上述的这些进步使得电机的电磁负荷和效率都提高到空前的水平。单机容量亦得到很大的提高。矛盾又转移到换向器上发生的火花上去了。为了在新的情况下消除换向器上的火花采用了补偿绕组（1884），换向极（1885）和用炭末做电刷。补偿绕组是用来平衡电枢绕组的磁势的。有了补偿绕组就可以做到在负荷变化时电枢磁场和定子磁场仍旧保持相对静止的关系。亦即定子合成磁场在负荷变化时没有变动。换向极的作用也可以从这个角度来看，因为电枢绕组漏磁通是随着转子的机械转动而对定子磁场

运动的，只有电枢繞組所产生的合成的进入定子的磁通才与定子磁場处于相对静止的状态。换向極的作用在于补偿由于漏磁通的变化所引起的效果。定轉子繞組所产生的漏磁場以及換向元件所引起的磁場的变化都应该列入定子和轉子磁場的有相对运动部份。这部份磁場的作用的进一步削弱就是加强了定轉子磁場的相对静止性。补偿繞組和附加極虽然在1884年就已经提出和使用。但真正广泛的采用还在20世紀初叶由于李翁拿系統的出現而得到推动的。补偿繞組和换向極的采用虽然使单机容量及电磁負荷又得到了提高，但单机容量和材料利用的繼續提高的主要困难仍然是换向器上的火花問題。

从1891年以后20世紀末逐步采用炭，石墨（天然石墨和电化学石墨）石墨和金屬的混合物来做电刷。出現了多种多样的电刷結構形式。半个世紀来电刷的不断改进对改善換向器上的火花情况起了很重要的作用。应该認識到換向器上的火花不仅仅是由于漏磁場的变化所引起的，而且是滑动接触的结果。这点由电刷在滑环上工作时会产生火花可以得到清楚的說明。此外在20世紀中还出現了均压綫，各种結構的槽阻尼器，（图1—27）以及蛙形繞組（图1—28）。但是所有这些努力都没有使直流电机摆脱火花对直流电机的約束。直流电机单机容量，电压及材料利用的提高以及轉速和調速范围的增長都受到火花的限制。

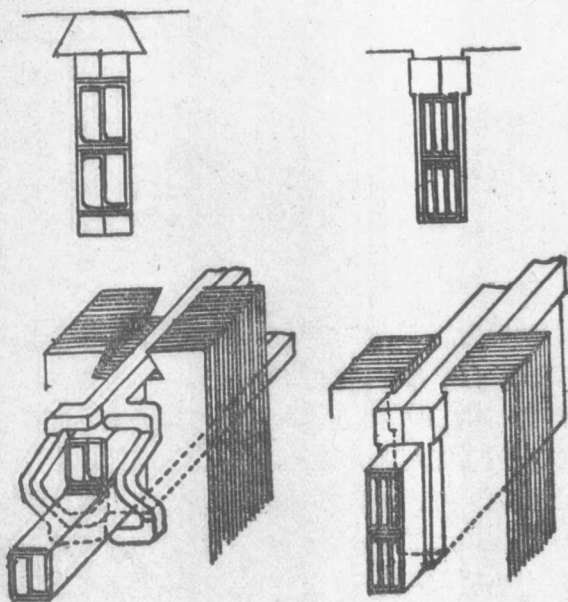


图 1—27

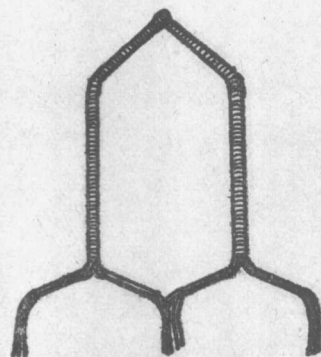


图 1—28

怎么摆脱这个限制是从十九世紀八十年代到今天所未能彻底解决的問題。

有人曾經企图利用单極电机来解决这个問題。这种电机沒有通常意义上的換向問題，并且結構比較簡單，理論上沒有鉄芯損失。所以在十九世紀末和二十世紀初曾經一度得到相当的发展（图1—29）。在汽輪直流发电机中（高速）曾做到电压达500伏功率2000瓩，轉速3000轉/分相当高的指标。但是这种电机只是看来似乎沒有換向問題，实际上由于电刷和轉子高速的滑动接触因而引起火花和較大的机械損失。并且由于

磁場不能完全对称，鉄芯損失及附加損失一率來說還是不能避免的。加以这种电机的电枢反应使得磁路飽和从而增大了激磁損失。因而总的來說单極电机的效率并不高。最后，单極电机单位容量所需的材料的重量較一般电机为重。因此与一般直流电机比較单極电机在一般情况下沒有优点，所以沒有繼續得到发展。但在第二次世界大战前后由于对低压大电流的直流需要，单極电机又重新得到发展。看来在大电流低压的領域里单極电机尚有一定优点，特别是在改进了接触导电（电刷）部份之后可能供給巨大的直流电流。

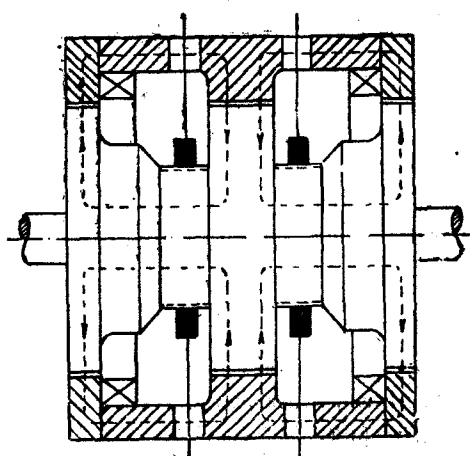


图 1—29

最后在 20 世紀初（1904）出现了利用电枢磁場激磁的发电机。这实际上将励磁机与主机合而为一。（图 1—30）这种电机的特点是它产生的电压的極性不随电机旋轉方向变化而改变。利用交軸电枢磁势激磁的原則在二十年代制成了控制用的直流电机放大机和轉控机（图 1—31）等。这开辟了直流电机在应用上另一个发展方向。这种电机大都作发电机使用，但在控制所需的功率和速度方面比一般直流电动机为优。

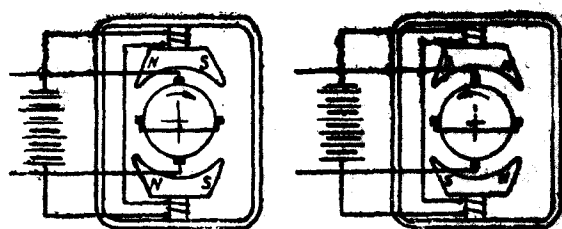


图 1—30

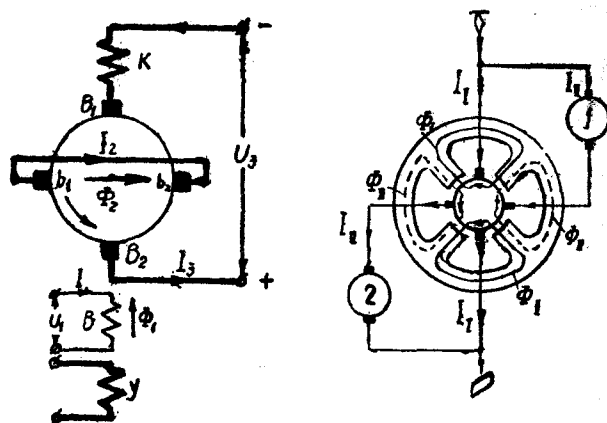


图 1—31