

高等学校交流讲义

电 器 学

上 册

李介谷編著

只限学校内部使用



中国工业出版社

本书分上下两册，在本册中讲述磁系统的理论及计算和非线性电器元件的理论基础。在磁系统部份包括的内容为：直流电磁铁式磁系统、交流电磁式磁系统、永磁和极化系统以及感应式系统；而在非线性电器元件部份包括的内容为：无直流附加磁化的非线性电抗、交流流同时磁化的非线性电抗及半导体电器元件的理论基础。

本书可作为高等学校电机与电器制造专业电器专门化的交流讲义，也可供从事电器制造的工程技术人员参考。

电 器 学

上 册

李介谷編著

*

中国工业出版社出版（北京修麟閣路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店經售

*

开本787×1092 $\frac{1}{16}$ ·印張13 $\frac{3}{8}$ ·字数298,000

1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷

印数0001—3,337·定价（10-6）1.60元

统一书号：15165·687（81-103）

目 次

緒 論.....	1
I. 电器的定义、分类和研究的 問題.....	1
II. 电器的应用范围.....	2
III. 中国的电器制造业.....	9
第一篇 磁系统的理論及計算.....	11
第一章 磁系統計算中的一般性 問題.....	11
I—1 概 述.....	11
I—2 磁化曲綫的表达式.....	17
I—3 气隙磁导的計算.....	21
第二章 直流电磁鉄式磁系統.....	39
II—1 概 述.....	39
II—2 Π 形磁路的計算.....	42
II—3 作用在銜鉄上的吸 力.....	55
II—4 螺管形电磁鉄的吸力 計算.....	66
II—5 直流电磁鉄的动特性.....	66
第三章 交流电磁鉄式磁系統.....	79
III—1 概 述.....	79
III—2 交流磁路的等值磁路 图.....	80
III—3 交流电磁鉄的吸力計 算.....	86
III—4 交流电磁鉄的过渡歷 程.....	93
第四章 永磁和極化系統.....	95
IV—1 永久磁鉄的祛磁曲綫 和工作点.....	95
IV—2 永久磁鉄磁路的計算 方法.....	99
IV—3 极化系統的吸力計 算.....	107
IV—4 永久磁鉄的老化和穩 定.....	109
第五章 感应式系統.....	110
V—1 感应式系統的力矩計 算.....	110
V—2 矩形磁极的几何常 数.....	116
V—3 各极截面不同时几何 常数的确定.....	124
V—4 圓柱形轉子感应式系 統的力矩計算.....	125
第二篇 非綫性电器元件的理論基礎.....	132
第六章 非綫性元件和回路.....	132
VI—1 非綫性元件的种类.....	132
VI—2 非綫性回路.....	141
第七章 无直流附加磁化的非綫 性电抗.....	147
第八章 交直流同时磁化的非綫 性电抗.....	156
VIII—1 交直流同时磁化磁路 的作用原理.....	156
VIII—2 交直流磁化曲綫.....	162
VIII—3 交直流同时磁化磁路 的穩定工作状态.....	165
VIII—4 交直流同时磁化鉄芯 的放大作用(磁放大 器).....	173
VIII—5 交直流同时磁化鉄芯 的交流作用(直流互 感器).....	182
VIII—6 交直流同时磁化鉄芯 的繼电作用(无触点 元件).....	185
VIII—7 磁放大器的鉄芯結 构.....	189

VIII-8 磁放大器的过渡歷程.....	191	IX-1 半导体三极管.....	197
第九章 半导体电器元件的理论基础	197	IX-2 热敏电阻.....	202
		IX-3 霍尔电势元件.....	206
		参考文献.....	209

緒 論

I. 电器的定义、分类和研究的问题

电器是用来对电机、电路或非电装置进行切换、检测、控制、保护和调节的电气装置。因此电器的范围是很广阔的，其中包括高达数米的巨型高压断路器和微小不盈一握的低压熔断器以及大小结构各异、功用各不相同的电气装置。通常按照用途，电器可分成如下的几类：

1. 非自动地闭合和断开电路的电器，其中包括闸刀开关、转换开关、按钮、控制器和隔断开关等；
2. 自动地闭合和断开电路的电器，其中包括接触器、控制继电器和断路器等；
3. 平滑和逐级控制用的电器，其中包括变阻器等；
4. 自动和平滑地使某一参数，诸如电流、电压、功率等保持一定数值的电器，如各种调节器；
5. 保护电路使不受过电压和过载（或短路）电流危害的电器，其中包括熔断器、保护继电器、避雷器和电抗器等；
6. 放大和稳定用电器，如磁放大器、稳定器等；
7. 利用电磁能产生机械力的电器，如电磁联轴器、电磁制动器、起重电磁铁、电磁工作台等；
8. 仅用交流和变压的电器，如各种交直流电压互感器和电流互感器；
9. 成套电器和控制站，它们是由一定数量的各种电器按一定的要求组合起来的。

假使不按用途来分类，而从电器的额定电压来分类，则它们可以分成高压电器和低压电器两类。一般说来，500伏以下的电器属于低压电器，而500伏以上的电器属于高压电器。

对一些最基本、最主要的电器来说，大致可归为四类，它们是高压控制电器、低压控制电器、自动运动电器和自动调节电器。高压控制电器中包括那些直接对高压主回路起“执行”、“保护”、“量测”等作用的电器，其中有高压断路器、高压熔断器、高压互感器等。低压控制电器中包括那些直接对低压主回路起“执行”、“保护”等作用的电器，其中包括接触器、自动开关、低压熔断器等。自动运动电器是对高低压控制电器的控制起“敏感”和“放大”作用的电器，也就是作用于高低压控制电器的二次回路上的电器，如各种继电器、磁放大器、变换器等。自动调节电器是在较晚的时期当其结构理论越来越靠近其他电器的时候（其中特别是磁放大器的采用）方被纳入电器的范畴的。在这类电器中，我们最感兴趣的是自动励磁调节器。在这四种类型的电器中，所研究的理论内容也各有其特点。对高压控制电器来说，我们研究的主要是高电压（从数万伏到数十万伏）、强电流（达数万安以上）回路的通电、合闸、切断和量测等过程对电器结构的要求。这里主要的问题是高压电弧、电流的电动力、电流的热效应和电接触等。而对低压控制电器，我们研究的主要是低电压、强电流回路的通电、合闸和切断等过程对电器结构的要求。这里主要的问题是低压电弧、电流

的热效应、电接触和电磁结构的理论等。高低压控制电器中所研究的电弧有所不同，对高压控制电器目前研究的主要是处在熄弧介质中的交流高压电弧，对低压控制电器来说则主要是处在空气中的交直流低压电弧。在发热问题上也有所不同，对于高压控制电器比较侧重于直导体上的发热情况和处在磁场中的导磁体的发热情况，而对低压控制电器则比较侧重于绕组中的发热情况。在自动运动电器中研究的主要是弱电流回路的熄弧、电磁结构、非线性电器元件等理论。自动运动电器所研究的电弧与前两者也有所不同，由于二次回路的电流和电压都比较小的缘故，因而实际上出现了不产生电弧或不用灭弧装置熄弧的可能性，所以在自动运动电器中讨论的主要是如何保证这种可能性实现的问题。对电磁结构来说，自动运动电器与低压控制电器所讨论的角度也有所不同。由于使用场合的要求，自动运动电器往往从尽量缩小尺寸、减轻重量的要求来讨论电磁机构，而对低压控制电器则往往从经济、耐磨、工艺简单等方面来讨论电磁机构。由于半导体及磁性材料的发展，目前二次回路的容量已经出现了以无触点、无运动部分的元件来代替一部分有触点、有运动部分的元件的可能性。因而在自动运动电器中，还应该研究有关非线性电器元件的问题，其中主要是磁放大器。自动励磁调节器主要是研究处在该调节系统中的电器元件如何在结构上满足调节系统的要求，这里面特别着重的应该是电器的过渡历程。

II. 电器的应用范围

电器的应用范围是很广阔的。总的来说，可以认为电器是在生产过程自动化中起主要作用的元件。如果没有各种各样电器的采用，要实现生产过程自动化显然是不可能的。在生产过程自动化中，首先是在电力生产的自动化中电器得到了广泛的使用。在电力系统的主回路和二次回路中遍布着各种型式的电器。

图 B-1 中示出一个典型的发电厂、配电站的原理性线路，由此也可看出电器所起的作用。

我们将选择一些主要的电器，介绍一下其结构和基本作用原理。

在图 B-1 中的 3 是高压断路器，高压断路器是用来换接、接通和切断（不管是空载、额定电流或是短路电流）高压主回路。高压断路器按其熄弧介质的不同可以分成油断路器、压缩空气断路器、水断路器、磁吹熄弧断路器等结构。图 B-2 中示出一多油式断路器的结构，图 B-3 中示出一少油式断路器的结构。

图 B-1 中的 4 是隔离开关，隔离开关用来在高压电路中无电流时（或在一定条件之下有很小的电流时）把电器切除或接入电路。隔离开关拉开以后，电路中会出现一个很大空气隙，这样就保证了检修、维护的安全。图 B-4 所示是几种隔离开关的结构。

图 B-1 中的 5 是熔断器。熔断器广泛地采用在高低压电路之中作自动保护之用，当电路中的电流由于过载或短路而超过一定数值时，熔断器中的熔丝烧断和电路断开。熔断器是一种经济意义很大的电器。图 B-5 中示出熔断器的结构。

熔断器和负载开关的配合，由于经济和可靠，在工厂配电网中得到了广泛的应用。负载开关实质上就是带灭弧室的隔离开关，这时熔断器作短路保护之用，而负载开关则用来切断额定电流以下的负载。图 B-6 中示出负载开关的结构。

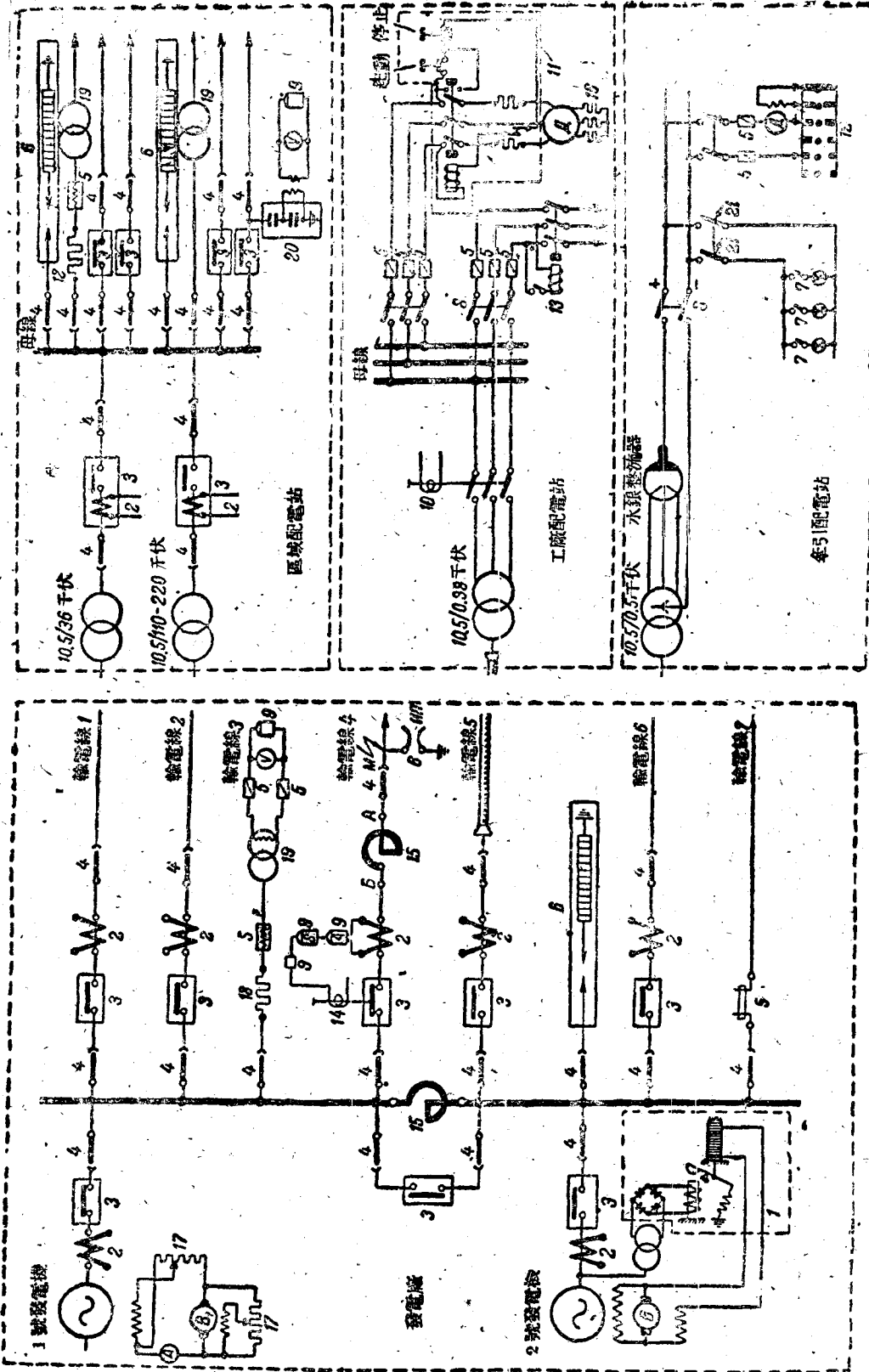


圖 B-1 在發電廠、配電站的原理性線路圖中的電器

- 1—電壓調節器；2—電流互感器；3—兩端斷路器；4—兩端開關；5—燃斷器；6—變壓器；7—照明開關；8—刀開關；9—繼電器；
- 10—低壓自動熔斷器；11—自動起動器；12—控制器；13—接觸器；14—電動機起動成組；15—電抗器；16—低壓電阻；17—變阻器；
- 18—高壓電阻；19—電壓互感器；20—電容分接器；21—自動限流器。

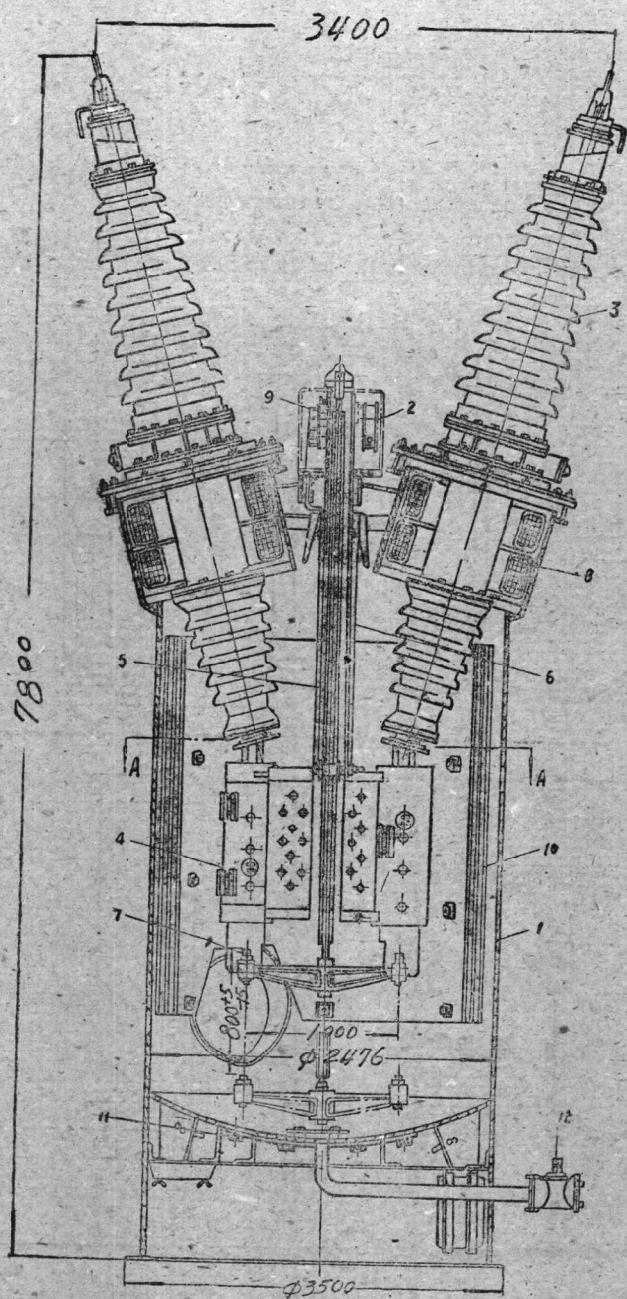


圖 B-2 DW3-220 单相剖面圖

- 1—油箱；2—提升机构；3—充油式套管；4—灭弧器；5—提升杆；6—导向装置；
7—动触头；8—电流互感器；9—接綫板；10—油箱絕緣；11—电热器；12—放油閥。

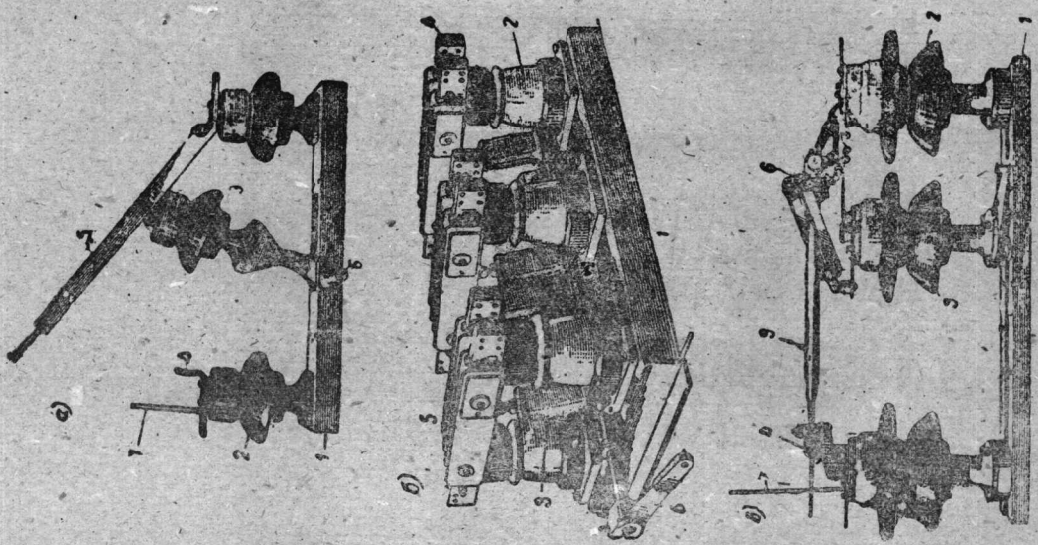


圖 B-4 刃形隔离开关

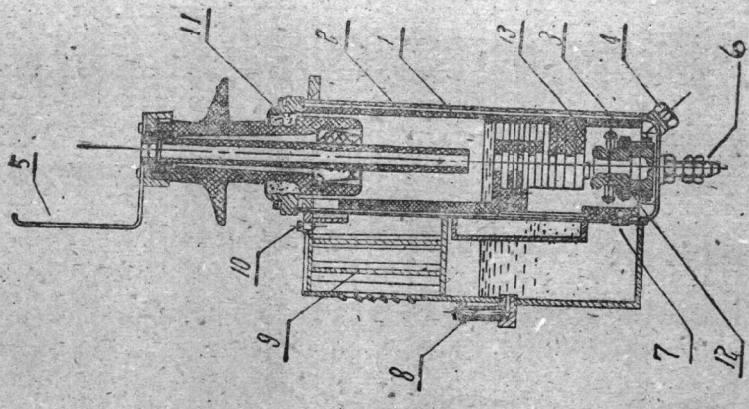
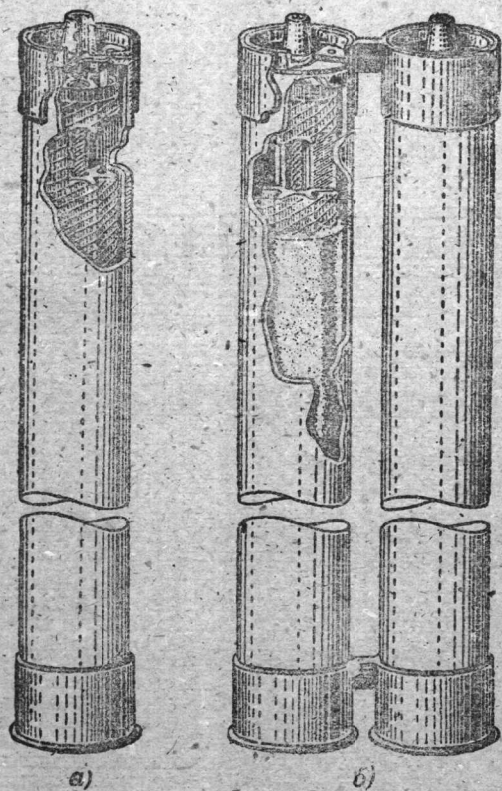
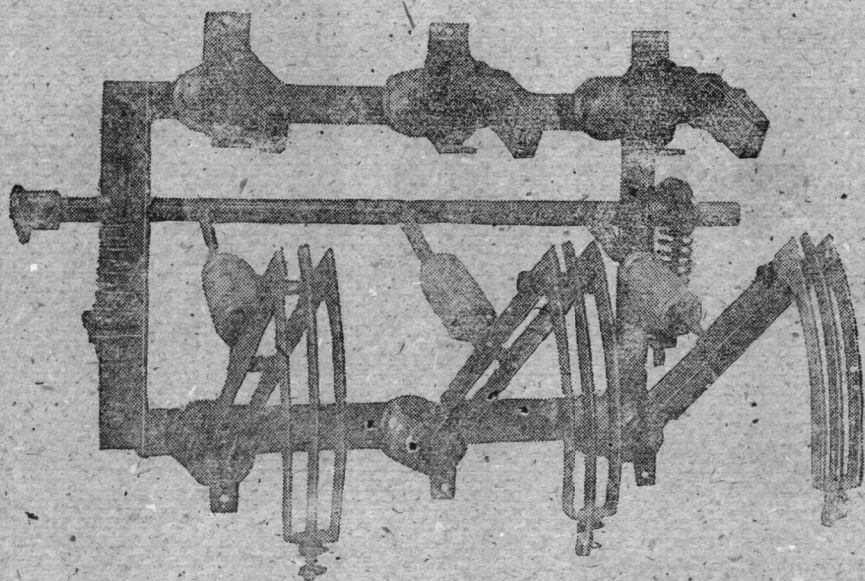


圖 B-3 SN₂-10G 断路器

1—絕緣筒；2—鋼箱；3—絕緣筒；
4—放油栓；5, 6—鞍鐵柱；7—回油
孔；8—油位表；9—分油室；10—
塞子；11—套套管；12—接觸座。



圖B-5 填充的石英細砂的高压熔断器
a—單； b—雙。



圖B-6 BH-16負載开关

图 B-1 中的 10 是低压自动空气断路器。低压自动空气断路器在低压电路中的作用相当于高压断路器在高压电路中的作用。大部分低压自动空气断路器是手操作合闸的。图 B-7 中示出低压自动空气断路器的结构。

图 B-1 中的 13 是接触器，接触器用来远距离控制和频繁地接通、切断被控电路。它们可分成交流和直流两种基本类型。图 B-8 中示出接触器的结构。

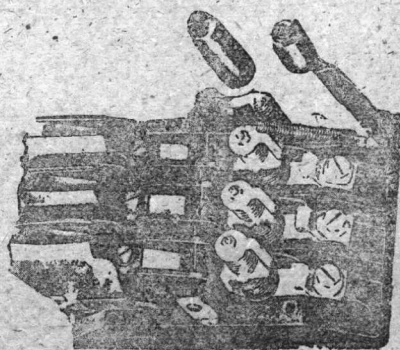


图 B-7 仿苏 АП-25 自动空气断路器

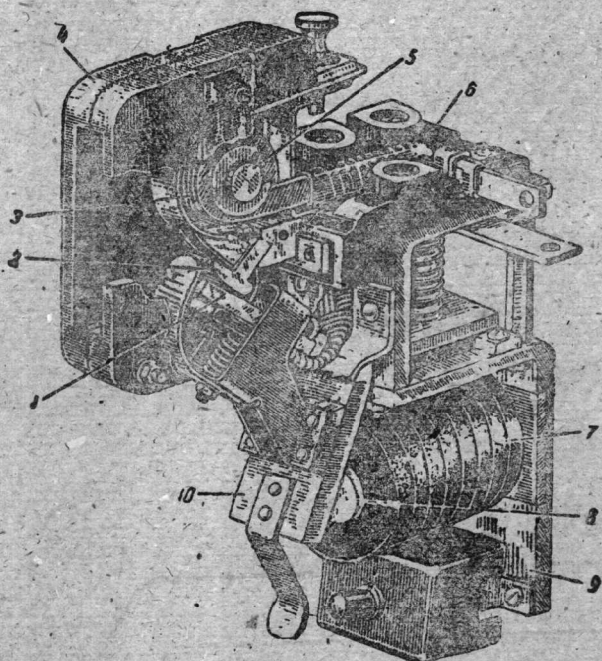


图 B-8 KП-523 接触器

- 1—动触头；2—静触头；3—电弧线圈；4—电弧局限室；5—线圈3的铁芯；6—线圈5的引线；
- 7—电磁铁；8—电磁铁铁芯；9—接触器的金属座；10—衔铁。

图 B-1 中的 11 是磁启动器，磁启动器是接触器、热继电器、按钮所组成的成套装置，专门用来作异步电动机的启动和过载保护。图 B-9 中示出磁启动器的结构。

图 B-1 中的 9 是继电器，继电器用来检测电路的工作情况，当电路的状态偏离其正常情况（例如短路等）时，继电器发生动作和送出信号。继电器具有极多的品种，图 B-10 中示出一种继电器的结构。

為了減少在起動電機時火花用的電阻與電容

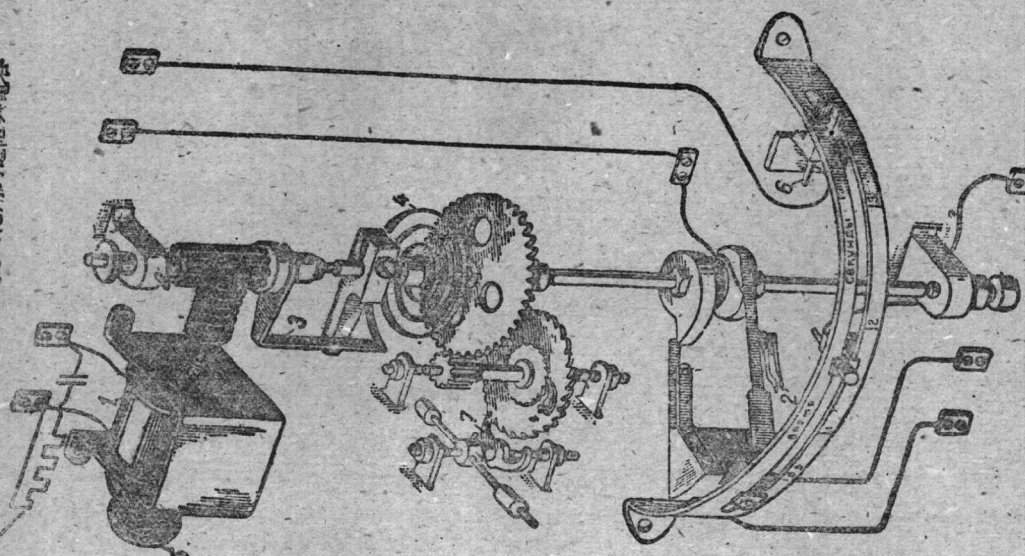


圖 B-10 時間繼電器 B-180

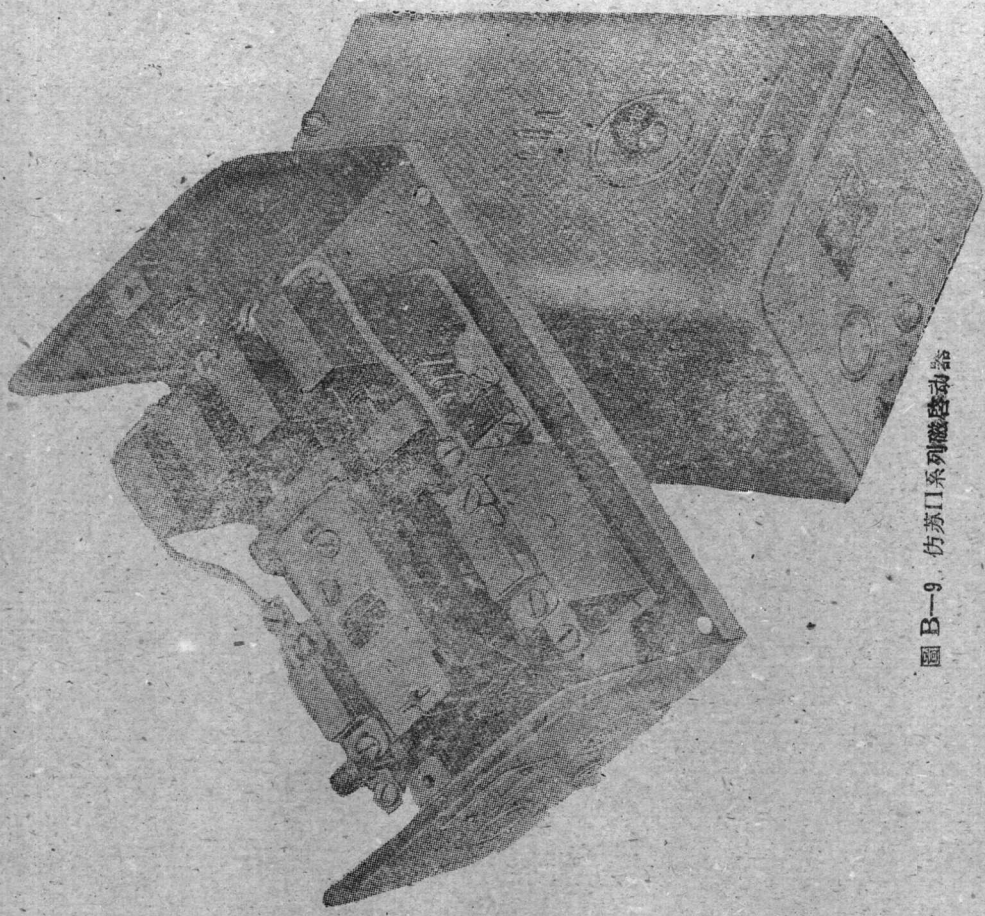


圖 B-9 仿蘇II系列磁啟動器

图 B-1 中的 1 是电压调节器, 电压调节器用来把发电机电压维持在一定的水平上。
图 B-11 所示是一种碳阻式的电压调节器。

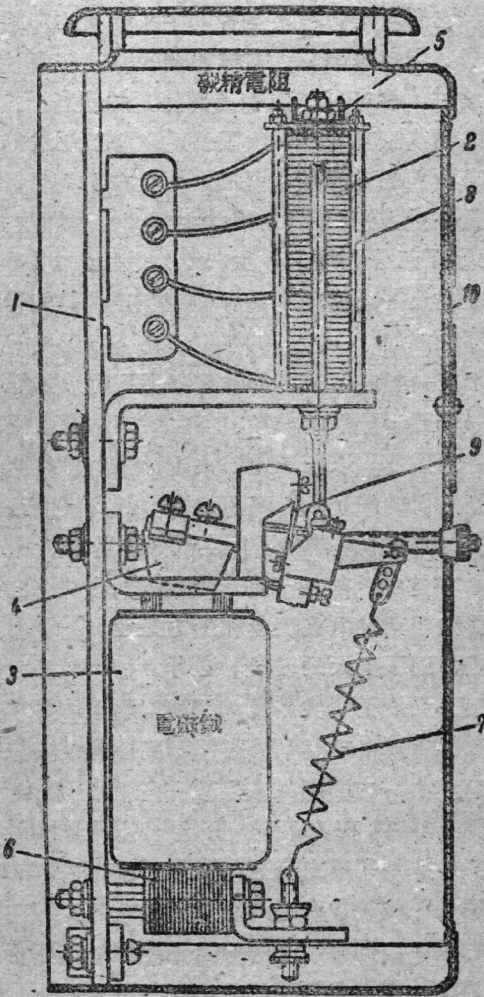


图 B-11 碳阻式电压调节器 pyH-111 型

- 1—底板; 2—玻璃片; 3—电磁铁线圈; 4—衔铁; 5—压力臂;
6—铁芯; 7—弹簧; 8—绝缘螺絲; 9—片状弹簧; 10—外箱。

除在生产过程自动化中起着主要的作用以外, 在运输工业、国防事业方面电器都是占有相当重要的地位的。

III. 中国的电器制造业

在党的社会主义建设总路线的光辉照耀下, 中国的电器制造业, 到目前为止, 已在旧中国残缺不全的基础上, 从无到有, 从小到大, 从修配到制造, 从不成套到成套, 基本上形成了一个完整的体系。

解放以前，由于反动派的黑暗统治和三大敌人的压迫，使我国的电器制造工业和其它工业一样，始终处于停顿状态，只有少数的修配性质的工厂，这些工厂的规模都很小，设备陈旧，技术也很落后，它们只是仿造某些资本主义国家的产品，不成系列地生产极少量的中小型电器（如断路器、继电器等）。这样薄弱的基础在解放战争时期中又遭到国民党反动派的严重破坏，解放时，生产几乎陷于全部停顿的状态。

解放后，在三年国民经济恢复时期中，国家对电器工业进行了恢复、改造并有重点地扩建旧厂，这时出现了专业性的高低压电器厂，也生产了相当数量的电器产品。

第一个五年计划期间，按照党所提出的集中主要力量发展重工业，建立国家工业化的基础的任务，电器制造工业除了充分利用已有生产能力，适当加以合理调整外，更主要的是集中力量建设重点单位，建立起一系列能制造各种高低压电器的骨干工厂。在新建和扩建的过程中，我们还学习了苏联产品统一设计的经验，结合我国的具体情况，对品种繁多，规格复杂的电器产品进行了统一设计，使之标准化和系列化。这样就为我国电器工业的飞跃发展奠定了基础。到第一个五年计划的末期，即1957年，高、低压电器的生产已基本上满足国民经济各部门当时的需要。以低压电器来说，当时已能生产自动空气断路器、接触器、继电器、主令电器等系列的产品。以高压电器中的高压断路器为例，当时也能生产多种类型的、能满足国内需要的油断路器和压缩空气断路器了。

1958年大跃进以来，在党的“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”的总路线的光辉照耀下，由于贯彻了党的中央工业和地方工业同时并举，洋法生产和土法生产同时并举的方针，电器工业得到了更大的发展。这时，一方面是企业的大建设得到加速，使它们有可能更好地向高、大、精、尖发展，因而出现了许多标志着更先进水平的产品，如：超高压断路器、万能式自动空气断路器、高性能的交流接触器、高灵敏度磁放大器、大容量饱和电抗器等。另一方面则又发展了许多中小型地方企业，促使产品数量和品种都急剧增加。由于这样，就在1959年我们即以两年的时间使发电设备（包括主要的高低压电器在内）的产量达到了第二个五年计划，即1962年的指标。与此同时，党还一贯地重视产品的质量，一些设备齐全的高低压电器的试验基地建立起来了，它们为提高产品质量供给了试验的条件。同时，有关高低压电器的国家标准也开始进行拟订。党的八届九中全会更明确地指出：重工业要在已有的胜利的基础上，采取巩固、充实和提高的方针，要努力提高产品的质量，增加产品的品种，这就是我们当前的任务。

虽然过去几年来我们获得的成就是巨大的，但是规模宏大、前景壮丽的我国的社会主义建设，对电器工业提出了许多技术水平极高的要求，如：超高压电器、高度精密的自动控制元件等。这些都有待于从事电器制造工作的同志在党的领导下按照党所指出的方向努力前进。

第一篇 磁系統的理論及計算

第一章 磁系統計算中的一般性問題

I-1 概 述

凡依靠工作气隙来把电磁能量轉化为机械能量的鉄磁元件都称之为磁系統。在所有依靠触头来切换电路的自动化电器(例如,接触器和繼电器等)中,在触头动作时都須要一定数量的机械能,因而磁系統就是这类电器中的一个主要部件。磁系統由两个主要部分所組成,一部分是靜止部分,另一部分是可动部分。靜止部分是綫圈和各种各样的磁路的組合,按照各种磁系統的作用原理的不同,靜止部分可感觉到某一个或某几个电参数的变化并把这种变化反应到可动部分上去。可动部分按各种磁系統的不同或是可旋轉的盤或圓柱,或是可移动的銜鉄等。磁系統有很多不同的种类,按照磁系統靜止部分的激励方式,它可分成直流、交流和永磁三类。按照其作用原理,电器中常用的磁系統大致都屬於电磁鉄式、感应式、极化、电动式和永磁式五类。

电磁鉄式磁系統按其磁路形状的不同可分成 Π 形, III 形和螺管形三类,而每一类中又可以各分成好几种。图 1-1 中示出几种常用的电磁鉄式磁系統的形状。

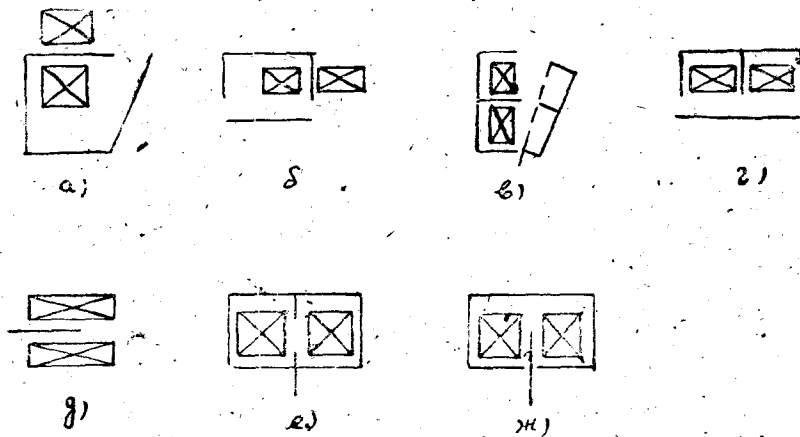


圖 1-1 几种常用的电磁鉄式磁系統

图 1-1 а and б 所示为 Π 形电磁鉄式磁系統,在图 а 中銜鉄作旋轉运动,在图 б 中銜鉄作平移运动。在图 а 中只有一个主工作气隙;而在图 б 中則有两个主工作气隙。图 в 和 г 所示为 III 形电磁系統,图 в 中的銜鉄作旋轉运动,图 г 中的銜鉄作平移运动,在这二种磁系統中都具有三个主工作气隙。图 д、е、ж 中所示为螺管式电磁系統。在图 д 中銜鉄仅由于螺管力而作进入綫圈的运动,图 е 和 ж 被称之为装甲螺管,在图 е 中作用在銜鉄上的为螺管力和磁极間吸力的总和,在图 ж 中則可以認為只有螺管力作用着。不同的电磁式磁系統具有不同的特性,这些在下面都将詳細地加以介紹。

电磁式磁系统的绕组可以采用交流或直流来进行激磁，当然在采用不同的激磁方式时，磁性材料、线圈几何尺寸及其他结构参数都是不一样的。III形磁路在直流中几乎得不到采用，而在交流中则几乎总是采用III形磁路的。

任一种形式的电磁式磁系统都可以简化成图 1-2 所示的等值磁路。在图 1-2 中 IW 为交流或直流绕组产生的磁势， ΣR 为磁路中空气隙的磁阻和铁中磁阻的总和。在交流激磁时， ΣR 是交流磁阻（气隙和铁的磁阻）的总和；在直流激磁时， ΣR 是直流磁阻的总和。关于交流磁阻和直流磁阻的区别，我们将在下文中加以叙述。在磁势 IW 的作用之下，有一磁通 Φ 流过气隙并在衔铁上造成一定数量的吸力。如果线圈串联在电路中，则在电流改变时，磁通 Φ 随之发生变化，也就是说吸力的大小会随之发生变化。如线圈并联在电源电压上，则电压的变化会使吸力发生变化。因而这种磁系统无论是交流或直流都可反应出电压或电流的变化。在采用直流激磁时，如果在磁路上再套一只短路的线圈（通常是一只铜套），则由于磁通的变化被延迟的缘故，从电参数的变化到吸力的变化，中间隔开一定的时间，这时除电参数以外，这种电磁式系统还可反应出一个时间参数。

永磁式系统也具有许多不同的结构。常用的永磁式系统的形状如图 1-3 所示。永磁式系统的可动部分是一个线圈，永磁式系统的静止部分是一个 U 形的永久磁铁。永久磁铁的磁场与线圈中的电流发生作用和使线圈旋转。与此同时，连在线圈上的触头就可使电路闭合或断开。

另一种永磁式系统的结构如图 1-4 所示。图中阴影部分是一段永久磁铁，在永久磁铁具有如图所示的极性时，磁路各段上的磁极分布情况如图中所示。永久磁铁的磁场与线圈中的电流产生的力使线圈向上或向下移动。

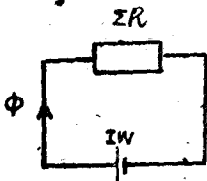


图 1-2 电磁式磁系统的等值磁路

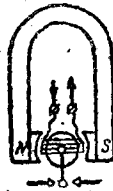


图 1-3 旋转式永磁系统

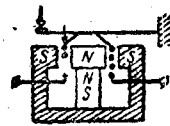


图 1-4 直线位移式永磁系统

如所周知，作用在线圈上的力为

$$F = KB I_p$$

式中 B 是工作气隙中的磁感应；

I_p 是线圈中的电流；

K 是一个系数，它与结构情况有关。

由于永久磁铁所产生的 B 是一个常数，所以作用力或力矩与线圈中的电流成正比，也就是说，这系统可以反应电流（当然是直流电流）大小的变化。

如果在线圈上串联一个电阻 r 以后再接到电源电压上去，则线圈中的电流 $I_p = u / (r + r_p)$ ，式中 r_p 是线圈本身的电阻， u 是电源电压。这就是说，这种系统还可以反映出直流电压的变化。

在电流 I_p 的方向改变时，可动部分的运动方向改变，因而这种系统还可以反映出电流方向的变化。

电动式磁系统，其几种最常用的结构与永磁式系统差不多，只是永久磁铁被换以带激磁线圈的电磁铁。象图 1—3 和图 1—4 一样，线框或是作旋转运动或是上下移动。因为可粗略地认为工作气隙中的磁感应与激磁线圈中的电流 I 成正比，因而作用力矩为：

$$M = K I_i I_p,$$

式中 K 是某一结构常数。

这就是说，在直流的情况之下，这系统可反映出电流和电压的大小，当然象永磁式系统一样，它同样可反映出电流的方向。

如果两个线圈中的电流都是交流的，并且它们差一相角 φ ，即

$$i_i = I_m \sin \omega t,$$

$$i_p = I_m \sin (\omega t - \varphi),$$

则平均转矩为

$$M_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} K i_i i_p d(\omega t)$$

$$= C I_m I_m \cos \varphi.$$

这就是说，这种系统还可以反映出两电流间的相角，在 φ 差 180° 时，旋转的方向改变。

极化磁系统用来反映出电流的极性，它有很多结构形式，图 1—5 上示出几种常见的结构及其等值图。

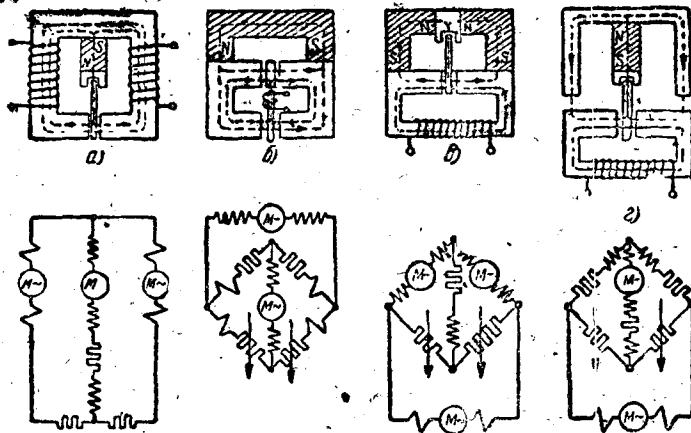
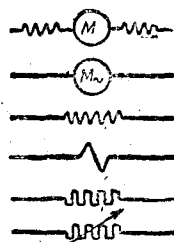


图 1—5 几种极化系统



大(内)磁阻永久磁铁的磁势;
 绕组磁路中的磁势;
 具有大磁阻(例如窗铁)的磁路段;
 具有小磁阻的磁路段;
 固定空隙的磁阻;
 可变空隙的磁阻。