

# 航 空 电 机

耀 忠  
永 光 编

北 京 航 空 学 院

1964, 8

# 目 錄

## 緒 論

|                |     |
|----------------|-----|
| § 1 电机在航空上的应用  | (1) |
| § 2 课程要求和电机的分类 | (1) |
| § 3 基本定律       | (2) |
| § 4 电机中应用的材料   | (5) |
| § 5 电机的损耗和效率   | (6) |
| § 6 电机的温升和额定值  | (6) |

## 第 一 章 直流發电机

|                 |      |
|-----------------|------|
| § 1—1 直流发电机工作原理 | (8)  |
| § 1—2 直流电机构造    | (9)  |
| § 1—3 电枢绕组      | (12) |
| § 1—4 空载磁路      | (17) |
| § 1—5 电枢反应      | (19) |
| § 1—6 换向        | (21) |
| § 1—7 他发电机的基本关系 | (25) |
| § 1—8 他发电机的特性   | (28) |
| § 1—9 直流测速发电机   | (30) |
| § 1—10 直流并激发电机  | (30) |
| § 1—11 直流复激发电机  | (32) |

## 第 二 章 直流电动机

|                     |      |
|---------------------|------|
| § 2—1 直流电动机的应用及作用原理 | (34) |
| § 2—2 直流电动机的基本性能    | (36) |
| § 2—3 他激电动机         | (40) |
| § 2—4 并激电动机         | (44) |
| § 2—5 串激电动机         | (47) |
| § 2—6 复激电动机         | (49) |

## 第 三 章 交軸磁場电机放大机

|                      |      |
|----------------------|------|
| § 3—1 概述             | (51) |
| § 3—2 交轴磁场电机放大机的工作原理 | (52) |
| § 3—3 电机放大机的空载特性     | (53) |
| § 3—4 电机放大机的外特性      | (54) |
| § 3—5 电机放大机的动态方程式    | (47) |

|                   |      |
|-------------------|------|
| § 3—6 交轴电机放大机的优缺点 | (59) |
| § 3—7 交轴电机放大机的稳定  | (60) |

#### 第四章 变压器

|                 |      |
|-----------------|------|
| § 4—1 概述        | (63) |
| § 4—2 单相变压器的分析  | (64) |
| § 4—3 三相变压器     | (72) |
| § 4—4 自耦变压器     | (73) |
| § 4—5 小型变压器设计原理 | (74) |

#### 第五章 三相异步电动机

|                     |      |
|---------------------|------|
| § 5—1 交流绕组的磁势与电势    | (76) |
| § 5—2 异步电动机的构造和主要元件 | (85) |
| § 5—3 异步电动机的作用原理    | (88) |
| § 5—4 三相异步电动机的分析    | (89) |
| § 5—5 三相异步电动机的主要特性  | (92) |
| § 5—6 三相异步电动机的应用    | (96) |
| § 5—7 单相异步电动机       | (97) |

#### 第六章 兩相异步电机

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| § 6—1 概述              | (101) |
| § 6—2 交流伺服电动机的结构和作用原理 | (103) |
| § 6—3 交流伺服电动机的特性      | (105) |
| § 6—4 交流伺服电动机的主要优缺点   | (110) |
| § 6—5 伺服电动机容量的选择      | (111) |
| § 6—6 交流异步测速发电机       | (112) |

#### 第七章 自整角机

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| § 7—1 概述                 | (118) |
| § 7—2 单相自整角机在变压器状态下的作用原理 | (120) |
| § 7—3 单相自整角机在指示状态下的作用原理  | (124) |
| § 7—4 差动自整角机             | (127) |

#### 第八章 回转变压器

|                      |       |
|----------------------|-------|
| § 8—1 概述             | (131) |
| § 8—2 余弦回转变压器        | (132) |
| § 8—3 副边补偿的正弦余弦回转变压器 | (134) |
| § 8—4 原边补偿的余弦回转变压器   | (135) |
| § 8—5 线性回转变压器        | (136) |
| § 8—6 回转变压器的其它线路     | (139) |

## 第九章 同步电机

|                        |       |
|------------------------|-------|
| § 9—1 概述.....          | (143) |
| § 9—2 三相同步发电机作用原理..... | (144) |
| § 9—3 单相同步发电机特点.....   | (150) |
| § 9—4 同步电动机.....       | (151) |
| § 9—5 磁滞电动机.....       | (153) |

## 第十章 变流机

|                        |       |
|------------------------|-------|
| § 10—1 概述.....         | (157) |
| § 10—2 直流升压机.....      | (157) |
| § 10—3 电机变流机.....      | (159) |
| § 10—4 电动机发电机组变流机..... | (160) |
| § 10—5 单电枢变流机.....     | (162) |
| § 10—6 串级变流机.....      | (164) |

## 主要参考文献

## 緒 論

近代国民经济各部门都向着电气化、自动化方向发展着，而电气化、自动化的基础就是电能的产生和应用，如把机械能转变成电能，把电能转变成机械能，或把一种形式的电能转变成另一种形式的电能等，而这一切主要是依靠电机来实现的。因此，电机是一种能量转换的机器，这种转换是在磁场中进行的，并以电磁感应定律为基础，所以严格说来这种机器应该叫电磁机。

### § 1 电机在航空上的应用

在航空上电机获得广泛的应用，在一架现代化的飞机上，各种类型的电机常达数百个之多。主要用于以下几个方面：

(1) 电源：直到现在许多飞机上仍是以直流电作为主电源，直流电是由复激或并激直流发电机产生，电压为28.5伏，单机功率从几百瓦到24瓩。直流发电机由航空发动机带动，转速为4000~9000转/分，为了使输出电压稳定，还有电压调节器协同工作。无线电台、计算装置等设备所需的交流电，则由小功率的交流发电机或者用变流机获得，可以是单相或三相，频率 $f=400\sim 800$ 赫芝，电压为115, 36, 26伏。

新式的巨型的飞机上采用了以交流电为主的电源，交流电是由交流同步发电机产生，电压为208/120伏，频率 $f=400\sim 500$ 赫芝。发电机是由航空发动机通过液压的或机械的减速器带动，这种减速器保证发电机的转速稳定和频率不变，而和航空发动机的转速无关。在这种飞机上直流电可由整流器获得。

无线电台所需要的高压直流则采用直流升压机，把低压直流电变成高压直流电，电压为220, 350, 450, 750和1500伏。

(2) 随动系统与电动机构：飞机上采用了数量众多的电动机，包括串激、并激和复激直流电动机，单相和三相交流异步电动机、交流同步电动机等。用来进行航空发动机的起动，起落架的收放，水平舵、方向舵以及襟翼、副翼的操纵，油泵、军械的传动和空中摄影等。

(3) 航空仪表：在自动领航仪，自动驾驶仪，电动转速表，电动温度表，电动油量表，起落架位置指示器，襟翼位置指示器等装置中，应用了直流电动机、三相和单相交流异步电动机、交流伺服电动机、自整角机和同步电动机。在电动陀螺仪表、自动驾驶仪和无线电罗盘中，电动机是一个重要元件，电动陀螺仪本质上就是一个三相异步电动机。

(4) 计算装置：利用差动自整角机进行和差的计算，利用交流或直流测速发电机进行微分和积分，用回转变压器进行三角函数、向量运算以及座标转换等。

### § 2 课程要求和电机的分类

学习航空电机学的目的在于：掌握航空电机的基本原理及其应用。为仪表、自动器、解算装置、雷达、和无线电设备等专业课程打下必要的基础知识。

航空电机虽然在基本原理上与普通电机没有本质上的区别，但由于飞行器的特殊要求，每一种航空电机都有它自己的突出特点。因此在学习的过程中，要在透彻掌握基本原理的基



基础上,抓住每一种电机的特殊性。并且要求通过本门课程的学习,能够根据用途和要求,恰当地选择电机的种类和容量。能把所学到知识应用于实际,解决实际问题。由于电机结构和材料对电机性能的影响极大,因此在结构和材料上,我们也应给予应有的重视。

所有的电机可以分成发电机,电动机,变换机和自动装置用的微电机。

(a) 发电机——将机械能变为电能;

(b) 电动机——将电能变为机械能;

(c) 变换机——将电能变为电能,即把一种电压、波形的电流变为另一种电压、波形的电流其中包括:

1) 变压器——把一种交流电压变成另一种交流电压,但频率不变;

2) 升压机——将一种直流电压变成另一种直流电压;

3) 变流机——将直流电转变成交流电,或反之。

(d) 自动化,遥控、计算解答装置中用的微电机——伺服电动机、测速发电机、回转变压器、同步联结装置用微电机和电机放大机。

和机械能有关的机器都必须是转动的,但有些电机却和机械能无关,就不一定需要转动。按照一般惯列,旋转的叫做机,如发电机、电动机;静止的叫做器,例如,变压器。

按照所应用的电流种类,电机可以分为:

(a) 直流电机;

(b) 交流电机;

1) 变压器;

2) 感应电机或异步电机;

3) 同步电机。

我们将采用后一种分类方法,因为依据电机的可逆性原理,发电机和电动机并不能作为电机的不同类别,仅只是电机的不同运行方式。

### § 3 基本定律

在学习航空电机学时,必须首先复习一下电工基础中的一些基本定律,其中包括电磁感应定律、楞次定律、克希荷夫定律,全电流定律和电磁力定律,现在简述如下。

a) 电磁感应定律

1831年法拉第在实验中发现,当穿过闭合导线回路所包围的磁通发生变化时,导体中将产生感应电势,这种现象称为电磁感应,它是一切电机运行的基础。

设 $\Phi$ 代表匝连某一电路的磁通, $d\Phi$ 代表磁通在时间 $dt$ 内的变化,则感应电势的大小等于磁通对时间的变化率 $\frac{d\Phi}{dt}$ 。

b) 楞次定律

楞次定律是电磁学中的能量守恒定律,我们很容易用这个定律来求出感应电势的方向。

楞次是俄国彼得堡科学院院士,他并不知道法拉第的发现,但几乎在同时期用实验求得很多相同的结果。他从这些结果,归纳出下述定律:

任何由电磁感应所产生的结果,就它的作用说,恒反抗电磁感应的原因。

或者说:由回路中感应电动势所引起的感应电流所产生的磁场,总是阻碍穿过回路中磁

通的变化。如果匝连回路的磁通增加，就是说  $\frac{d\Phi}{dt}$  是正的，则感应电势所产生的电流使磁通减少；若匝连回路的磁通减少，即  $\frac{d\Phi}{dt}$  是负的，则感应电流使磁通增加。这样电磁感应定律必须写作：

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-1)$$

所以回路中的感应电势等于与回路匝连的磁通的减少率。

在实际应用中，除了用上述公式来说明电磁感应以外，我们可以用另外一种形式来说明电磁感应，就是导线在磁场内运动，切割磁力线而感应电势。

如图 0—1 所示，设导体的长度为  $l$ 。假设在  $dt$  时间内，导线移动的距离为  $dx$ ，因为磁场是均匀的（即  $B$  为常数），那么，导线与电压表所形成的回路内的磁通在  $dt$  时间内增加了  $d\Phi$ ；

$$d\Phi = Bds$$

因为面积  $ds = ldx$

和距离  $dx = vdt$

所以

$$d\Phi = Bl dx = Bl v dt$$

或

$$\frac{d\Phi}{dt} = Bl v$$

又因为

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

所以

$$e = - Bl v$$

如果只考虑绝对值，则

$$e = Bl v \quad (0-2)$$

就是说，当磁感应，导体长度，运动速度三者互相垂直时，导线中感应电势的大小等于磁感应、导体长度和导体运动速度三者的乘积。

上式中的单位。

如长度  $l$  用厘米，速度  $v$ ——厘米/秒， $B$ ——高斯，则从公式（0—2）求得的电势值须乘以  $10^{-8}$  始为伏特。

应用楞次定律可以决定导体中感应电势的方向。如图 0—1 所示，导体向右运动时，导体和电压表组成的回路内的磁通要增加，按楞次定律，回路中所产生的电流引起的磁通要反抗穿过回路中磁通的增加，所以导体中感应电势的方向如图所示。

为了方便起见，我们可应用右手手掌法则来决定导体切割磁力线时所产生的电动势的方向。

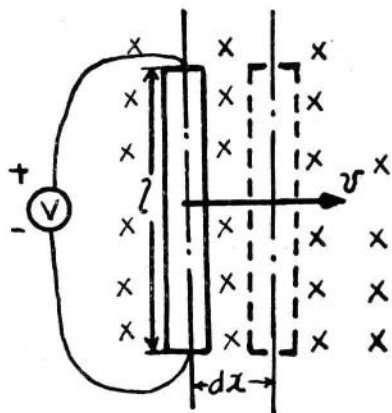


图0—1 导线在磁场中运动时所  
产生的电势

此法则即为：如磁力线的方向向手掌，大拇指依手掌平面屈成  $90^\circ$  来表示导体的运动方向，则伸直在手掌平面内的其他手指即表示导线中感应电势的方向（图0—2）。

从（0—2）式可知：导体中的感应电势等于它每秒所切割的磁通，或等于它切割磁通的速度。

要注意的是：根据（0—1）式是一般性的，而根据（0—2）式仅适用在磁通不跟着时间变化而导体与磁通之间有相对运动的场合。

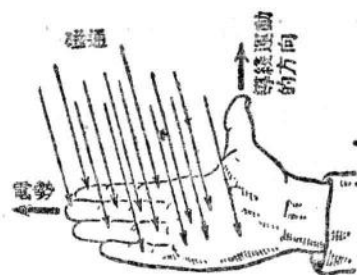


图0—2 右手手掌法则

综上所述，当通过回路的磁通量发生变化时，其中就会产生电势。但磁通量的变化有两种情形：

1) 磁通本身在变化，即磁通是由交流电产生，所感应的电势称变压器电势；2) 磁通本身不变化，但由于线圈和磁场间相对运动，穿过线圈的磁通在不断变化，此时所感应的电势称切割电势，或旋转电势，或速度电势。

若线圈的匝数  $w$  都穿过磁通  $\Phi$ ，则法拉弟电磁感应公式为：

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}$$

$w\Phi$  的乘积称为磁链，以  $\psi$  代表，即

$$\psi = w\Phi$$

$$d\psi = w d\Phi$$

因此，一般情况下的电磁感应公式可写成：

$$e = - \frac{d\psi}{dt} \quad (0-3)$$

c) 克希荷夫第二定则

克希荷夫第二定则是：顺沿一个闭合回路，所有感应电势的代数和等于各个电阻上电压降的代数和。

用公式可以写成：

$$\sum e = \sum iR \quad (0-4a)$$

若在回路之中有外加电压时，则外加电压相当一个电势存在，因而（0—4a）式可写成：

$$\sum (e + u) = \sum iR \quad (0-4b)$$

d) 全电流定律

为了要确定电流与磁场之间的关系，以便在电机中应用，根据实验的结果，得到一条极为重要的磁场定律，叫做全电流定律，其内容是：磁场强度沿一闭合回路的线积分等于此回路中安匝数的总和。

设  $H_l$  是回路  $dl$  上的磁场强度， $w$  是积分回路中的匝数，在它上面流的电流为  $i$ ，则全电流定律可以写成：



$$\oint H_l \cdot dl = iw = F \quad (0-5a)$$

式中  $H_l \cdot dl$  为磁路每一单元的磁位降

$iw = F$  称为磁势

在实际计算中, 由于回路的磁位降是由各段的磁位降串联组成, 即:

$$\oint H_l \cdot dl = \sum Hl$$

式中  $H$  为每段磁路的磁场强度

$l$  为该段的磁路长度

因而 (0-5a) 式可以写成:

$$\sum H \cdot l = iw \quad (0-5b)$$

我们就是用分段计算的方法来计算电机磁路所需的磁势的。

#### e) 电磁力定律

将载有电流的导体放在磁场内, 由实验可知, 导体将受到力的作用而向一定的方向移动。导体移动的方向(受力的方向)与导体中电流的方向及所在的磁场方向有关。

作用力的方向可以应用左手手掌法则来决定。

使左手手掌迎着磁力线, 伸直的四指与导线上的电流方向相符合, 那末与四指成直角的大拇指所指的方向, 就是导体受力的方向。

导体受力的大小与导体中通入电流的大小与导体的有效长度成正比, 此外还与导体所在处的磁场强弱及导体放的位置有关。

若导体的长度为  $l$ , 所通的电流为  $i$ , 导体方向与磁场方向垂直, 则由实验可知导体上所受到的作用力  $F_s$  为:

$$F_s = Bli \quad (0-6)$$

上式中的单位, 若  $B$ ——高斯,  $l$ ——厘米,  $i$ ——安培, 则 (0-6) 式须乘以  $\frac{10^{-6}}{9.81}$  后始为公斤。

上述五条基本定律是电机学的理论基础, 可以说在电机学中是如何把上述定律具体应用到电机中来, 希望同学们经常复习, 并要灵活运用。

### § 4 电机中应用的材料

制造电机的材料, 可分为结构材料、有效材料和绝缘材料。常用的结构材料有生铁、铸钢、锻钢、有色金属及塑料等。所谓有效材料是指通过磁通的磁性材料及流过电流的导电材料。绝缘材料是用以将流过电流的导线与其他部分隔离开来的。

电机的性能、尺寸和经济性很大程度上取决于材料的合理使用, 航空电机尤其是微电机其性能、尺寸、重量的要求很高, 因而它们对材料也有更高的要求。

航空电机采用的主要材料有:

#### 1. 磁性材料

一般的铁磁物质如铸钢、锻钢、普通钢板和阿莫可铁等可用作定子、磁轭等磁通不变化

的部分。

含硅的电工钢片如331, 341, 344……, 可以用作电枢铁芯, 变压器铁芯等磁通变化着的部分。这种材料的厚度有0.5、0.3、0.15毫米等。

对特殊要求的高导磁磁性材料可用坡莫合金。

再有永磁材料为铁镍铝、铁镍铝钴之类元素的合金, 在永磁体部分适用。

## 2. 导电材料

在一般电机的电枢绕组和激磁绕组中应用的导线有普通漆包线, 牌号为  $\Pi\mathcal{A}\mathcal{A}$ 、 $\Pi\mathcal{A}\mathcal{T}$ , 高强度漆包线  $\Pi\mathcal{A}\mathcal{B}$  和漆膜外有纱包或丝包的导线  $\Pi\mathcal{A}\mathcal{B}$ 、 $\Pi\mathcal{A}\mathcal{M}$ 。

在异步电动机和同步电动机中采用铸铝、黄铜、青铜等电阻系数较大的材料作鼠笼导条。

滑环和换向片一般采用紫铜或锡铜。微型电机的滑环则常用银。

## 3. 绝缘材料

在航空电机中经常采用 A 级 B 级和 C 级三种绝缘材料。由于航空电机的使用期限很短, 一般为 300~500 小时 (而普通的地面电机要用 15~20 年), 故在航空电机中允许提高绝缘的温度。如 A 级为  $155^{\circ}\text{C}$ , B 级  $175^{\circ}\text{C}$ , C 级为  $200^{\circ}\text{C}$ 。

上述的材料有云母、电工纸片、布、纱等纤维物质。为了提高绝缘材料的防湿性和导热性, 电机部件常要进行浸漆处理。为了提高绝缘材料的绝缘性能, 对高压电机要经过浸胶处理。

## § 5 电机的损耗和效率

在任何电机, 其输入的功率  $P_1$  总是大于其输出的有效功率  $P_2$ , 其间之差乃由于电机在进行能量变换过程中产生了损耗  $\Sigma P = P_1 - P_2$ 。

电机损耗大致可分为:

1. 机械损耗。其中包括轴承摩擦损耗, 旋转部分与空气摩擦损耗, 以及电刷摩擦损耗。
2. 铁损耗。这是由于铁磁物质中, 磁通变化时, 所引起的磁滞损耗与涡流损耗。
3. 铜耗。这包括所有绕组因流过电流而产生的损耗, 以及电流经过电刷接触电阻的损耗。
4. 附加损耗。这实际上可分别为附加铁损耗和附加铜损耗, 这部分损耗在电机中数量不大, 但产生的原因甚复杂, 如高次谐波磁场, 电流的集肤效应等现象所引起的损耗。这类损耗一般是很难准确分析计算的, 按照经验可将附加损耗取为额定功率的 1%。

很明显一台电机输出功率增加, 则其损耗也随之增加。

输出的有效功率与输入功率之比称为效率, 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} \quad (0-7)$$

式中  $\Sigma P$  为总损耗。通常电机功率愈大效率愈高, 大型电机 (几千或几万仟瓦以上) 效率可达 97~99%, 中小型电机约 80~90%, 只有在微电机 (几瓦或几十瓦以下) 效率常低于 20~30%, 但这时效率的实用意义已经不大了。

## § 6 电机的温升和额定值

工作的电机, 其损耗就变成热能, 这能量一方面向周围散掉一部分, 另外使电机发热。

电机本身的温度与周围介质的温度差称为温升  $\tau$ 。电机长期工作时温升将按指数规律提高如图 0—3 曲线 1，随着温升增加，电机与介质温度差增加，显然散发出去的热量也多了，直到最后产生的热量与散出热量达到平衡时，电机将在某温升值稳定下来，此即稳定温升  $\tau_y$ 。电机的损耗越大，散热性越差，那么稳定温升  $\tau_y$  越高。

因为电机应用的绝缘材料的温度有一定限制，因而对每一台电机都必须限定稳定温升  $\tau_y$  不超过一定数值，正因为如此，因而电机的损耗以及决定损耗大小的电机负荷（即功率输出），都有所限制。所以每一台的电机负荷都有其额定值，这在出厂名牌上明确指出（通常名牌上均指出额定的输出功率  $P_n$ ，电流  $I_n$ ，电压  $U_n$ ，转速  $n$ ，频率及功率因数等项）。电机负荷如超出额定值很大或时间较长，均会使电机温升超出限值，甚至马上将电机燃燬。

可看出改善电机的散热，那么在同样负荷及损耗时，其稳定温升  $\tau_y$  可降低，即可提高电机利用率，所以对较大的电机如飞机发电机就常用风扇或利用迎面气流吹风冷却。

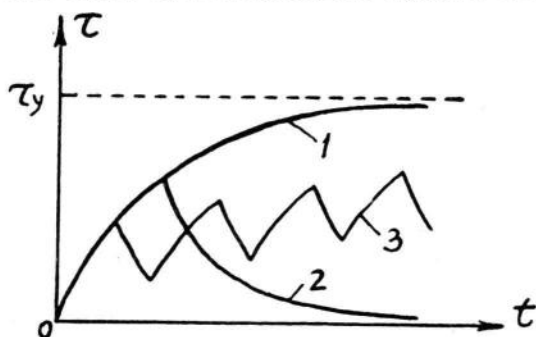


图0—3 电机的温升曲线

航空电机中还有很多是间歇工作或短时工作的，它们的温升不会达到象上述长期工作那样高（按同样的功率比较），因为它的温升的增加只限于不长的工作段内，停止工作时又按指数规律冷却了，图 0—3 曲线 2。即使反复间歇工作时，也只可能在较低的温升值上下变动，如图 0—3 之曲线 3。所以一个额定为长期工作的电机在此情况下可以提高它的工作负荷。事实上，专门设计了一系列电机作为间歇工作和短时工作状态应用，那么它们就不能按该名牌标称的额定功率而长期工作。因为它们的额定数据较之长期工作的电机提高了。

# 第一章 直流發電機

直流发电机是电机的基本型式之一，在航空上，它是直流供电系统的电源，由航空发动机带动。在这一章中我们将研究它的一些基本原理和性能，其中某些部分，是所有电机共有的，具有普遍的意义，所以这一章的学习是相当重要的。

## § 1—1 直流發電機的工作原理

图 1—1 表示一交流电机的简图，这里  $N$  和  $S$  表示两个固定的磁极，它们产生一定的自  $N$  到  $S$  的磁通，一绕有线圈  $abcd$  的电枢在两极中间旋转，线圈的两端和固定于转轴上的两个滑环相联接，滑环上装有两个接通外电路的静止电刷  $A—B$ ，此外电路系由某种用电器组成。

今设图 1—1 的电机作发电机运用，则电机的电枢被某种原动机以定速每分钟  $n$  转依指定方向（例如反时针方向）旋转。应用右手法则于导线  $ab$  和  $cd$ ，可见在图 1—1 所示的瞬间，导线  $ab$  中之电势向读者，而导线  $cd$  的则离读者，故外路的电流自滑环 1 流至电刷  $A$ ，而后再到电刷  $B$  和滑环 2。电机为发电机时，设电流流出处的电刷  $A$  为正电位，用正号（+）标示之，而电流流回电机处的电刷  $B$  为负电位用负号（-）标示之。

电枢旋转 180 度后，导线  $ab$  和  $cd$  的位置互换，故同时改变电刷  $A$  和  $B$  的电位及外电路电流的方向。

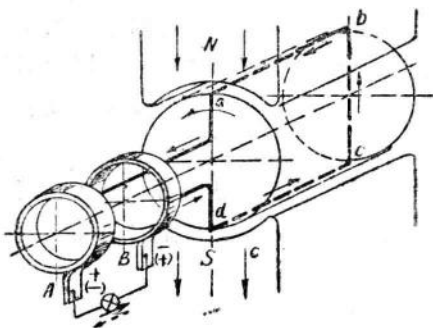


图1—1 交流电机原理图

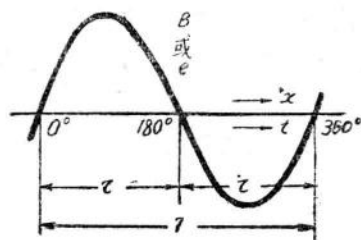


图1—2 线圈中的电势

可见由线圈  $abcd$  经滑环到外电路的闭路中受到一个交变电势的作用，并流过一个交流电流，其方向在电枢一回转中改变两次。为简便计，认为电势按时间作正弦变化（图 1—2）。电势（或电流）完成一次变化所需的时间  $T$  称为电势（或电流）的周期，一秒钟所具有的周期数称为频率  $f$ ，普通说电机有  $P$  对磁极，则电枢转一周时有  $P$  个周期，故线圈中电势的频率为：

$$f = \frac{Pn}{60} \text{ 赫芝；}$$

式中， $n$  是电枢转速，以每分钟的转数计。

按上述可知图 1—1 的电机为一交流发电机。

为使上述的交流电流变为直流，使电流在电路中永恒地按一个方向流动，则应装置一个换向器。线圈  $abcd$  的两端接向所谓换向片的两铜片 1 和 2 上（图 1—3），换向片紧装于轴上，它们互相间及和转轴间都妥为绝缘，在换向器上置有静止于空间的电刷  $A-B$ ，使发电机和外电路联接。

这样，在线圈  $abcd$  中和从前一样感应交变电势，但每一电刷上的电势仅为一个固定符号，例如在图 1—3 所示的瞬间，接触换向片 1 的电刷  $A$  的电位为正（+），因为它的电势来自位于北极下的导线  $ab$ ；电枢转 180 度后，电刷  $A$  接触换向片 2，和从前一样的它电位仍是正，因为它的电势来自位于北极下的取  $ab$  位置而代之的导线  $cd$ ，同理电刷  $B$  的电位永远为负（-）。

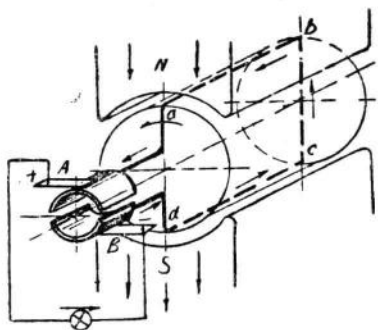


图1—3 直流电机原理图

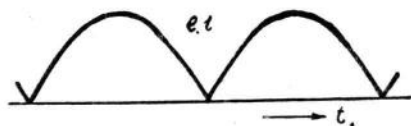


图1—4 电枢上一个线圈的脉动电势

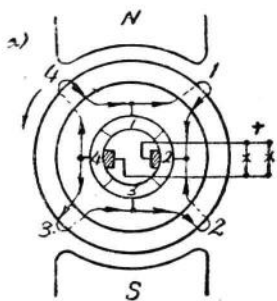


图1—5 换向后的电势和电流

a) — 电机图；

b) — 电势曲线。

因此，外线路中的电流仅按一个方向流动，即自正电刷  $A$  流向负电刷  $B$ ；换句话说，感应在线圈  $abcd$  中的交流电流在外电路内已换为脉动电流（图 1—4）。这个将线圈中的交流改变成外电路中单一方向电流的过程称为电流换向。

如在电枢上装两个相差 90 度的线圈，则电压脉动的幅度大为减小（图 1—5）。计算证明，每一极下有八片换向片时，则电刷上电压的脉动不超过平均电压的 1%，因此流经外电路的电流实际上可认为是直流。

## § 1—2 直流电机的构造

直流电机的结构主要有固定不动的所谓定子部分，包括磁极（主磁极、换向磁极）、机壳（也称磁轭）、电刷机构以及端盖等结构部件；另外有旋转的转子部分，包括电枢、换向器（或称整流子）及转轴等。如图 1—6 所示。

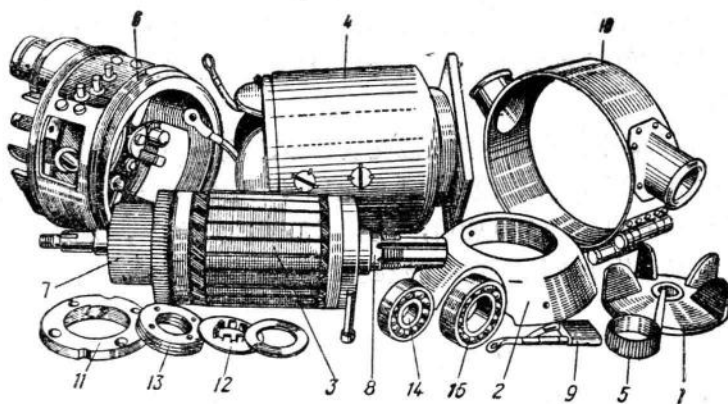


图1—6 拆开的航空直流发电机GCR—1500

1—风扇；2—端罩；3—电枢；4—机壳；5—出线口螺帽；6—端盖；  
7—换向器；8—轴；9—炭刷；10—保护带；11—法兰盘；12—限制  
垫圈；13—防油螺帽；14，15—轴承。

电机的主磁极用来产生主磁场。它有磁极铁芯和在磁极铁芯上安装的激磁绕组。磁极铁芯的下面截面较大的部分称为极靴，它可以固定激磁绕组，并且使空气隙中磁场分布最为有利。航空直流电机中的磁极铁芯多数都采用 0.5 毫米的钢片迭成如图1—7，然后用螺钉固定于机壳。在微电机中也有将磁极和磁轭一起用电工钢片冲制迭成，如图1—8。在航空直流电机中通常在主极之间放置换向磁极，用来改善换向情况。

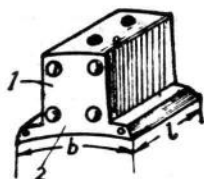


图1—7 主磁极

1—铁芯； 2—极靴；  
b—极弧长度；l—磁极长度。

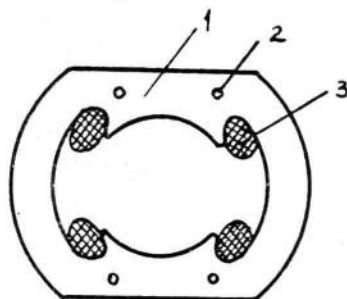


图1—8 小电机定子磁极

1—磁极铁芯；  
2—迭片固紧孔；  
3—激磁绕组。

电机磁极总是成对的出现，以后我们用  $p$  表示电机的极对数，如四极电机则表示  $p=2$ 。

机壳常也是电机磁路的一部分，故又称磁轭，用铸钢、钢管或者用钢板卷起来焊成。

电枢包括电枢铁芯和电枢绕组二部分。电枢铁芯是用电工钢冲片迭成，如图1—10(a)为电枢铁芯钢片，冲片间由绝缘漆或胶绝缘着，这样可以减小它的铁损耗。迭成的电枢铁芯外圆表面沿轴向有许多齿和槽，（有时为使工作均匀，把槽扭斜，如图1—9示），这些槽里就缚设电枢绕组的导线，这导线须按一定的法则联结起来并和换向器的铜片相联。关于电枢绕组下面将另立一节专门讨论。



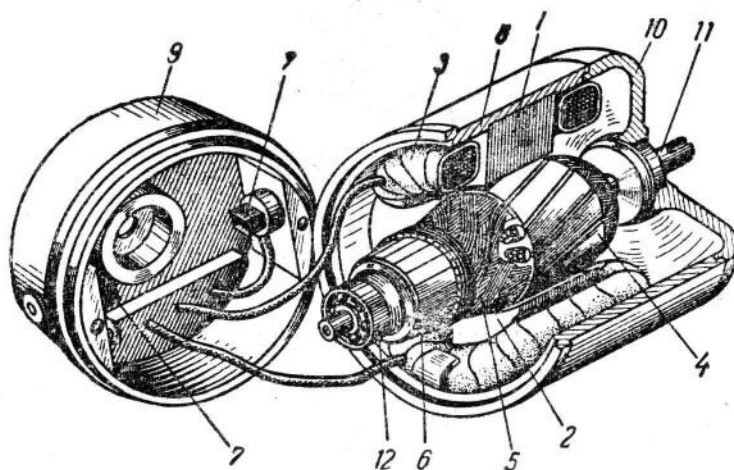


图1—9 直流电动机的立体图

1—端盖；2—电刷；3—激磁绕组；4—机壳；5—磁极；6—轴；7—电枢；  
8—磁极；9—电枢绕组；10—换向器；11—轴承。

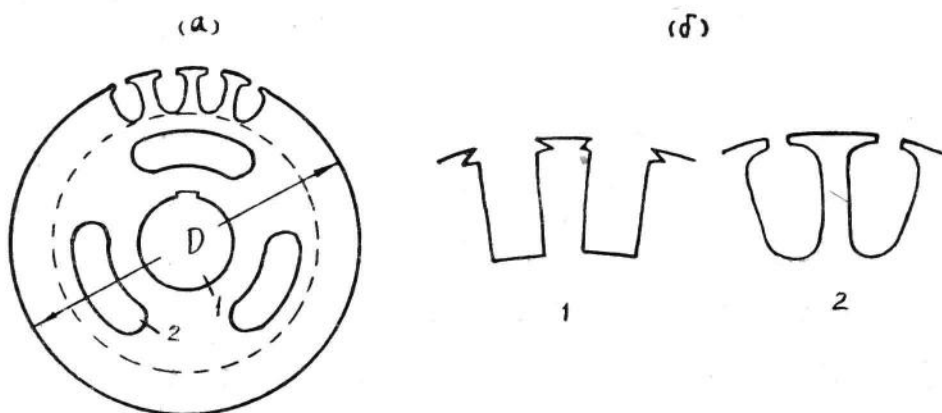


图1—10 电枢铁芯钢片及槽型

(a)—电枢铁芯钢片

1—轴孔；

2—轴向通风孔（大电机才有）。

(d)—槽型

1—开口槽或称矩形槽；

2—半闭口槽或称梨形槽。

换向器与电刷是变交流为直流的特征部件，一般是用楔形的硬拉铜片做成换向片，然后以许多换向片结合成换向器。这时换向片之间及换向片和换向器座之间必须用云母绝缘。对小型直流电机的常塑料压成整体，较大直流电机的换向器则采用机械联结的换向器座将许多换向片结合成整体如图1—11。

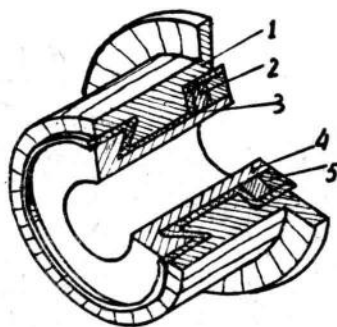


图1-11 换向器的解剖图

1—换向片；2—压紧垫圈；3—云母锥体；4—套筒；5—保险螺帽，

紧靠着换向器的是安装在刷握中的石墨电刷或金属石墨电刷。在电枢旋转的时候，电刷是不动的。安装在刷握中的电刷，被弹簧压紧在换向器上。小电机的刷握直接固定在端盖上如图1-6、1-9所示，较大电机的刷握则经过摇环再固定到端盖或机壳上，摇环与端盖的相对位置是可以调节的，因而可以变更整个电刷组相对于电机磁极的位置。当然电刷必须用绝缘材料的垫圈与机体绝缘，并有导线与电刷联结以引导电流。

在表1-1中列出飞机上所采用的直流发电机某些型号的技术数据。

表1-1 航空直流发电机的主要技术数据

| 发 电 机<br>型 式      | 额 定 数 据           |                  |                  |                    | 重 量<br>$G$<br>公斤 | 比 重 量<br>$G/P_n$<br>公斤/千瓦 | 高 度<br>$H$<br>公里 | 尺 寸             |                 | 极 数        |     | 电 刷<br>型 式          |
|-------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|---------------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------|-----|---------------------|
|                   | 功率<br>$P_n$<br>仟瓦 | 电压<br>$U_n$<br>伏 | 电流<br>$I_n$<br>安 | 转 速<br>$n$<br>仟转/分 |                  |                           |                  | 直径<br>$D$<br>毫米 | 长度<br>$l$<br>毫米 | 主极<br>$2P$ | 换向极 |                     |
| $\Gamma C-350$    | 0.35              | 27.5             | 12.7             | 3.8—5.4            | 7.6              | 21.5                      | 12               | 128             | 305.5           | 4          | —   | $\partial \Gamma-8$ |
| $\Gamma C-650$    | 0.65              | 27.5             | 23.6             | 3.8—5.4            | 12.0             | 18.5                      | 12               | 128             | 305.5           | 4          | —   | $\partial \Gamma-8$ |
| $\Gamma C-1000$   | 1.0               | 27.5             | 37.0             | 3.8—5.4            | 14.4             | 14.4                      | 12               | 128             | 305.5           | 4          | —   | $\partial \Gamma-8$ |
| $\Gamma CK-1500$  | 1.5               | 27.5             | 54               | 3.8—5.9            | 11.7             | 7.8                       | 15               | 130             | 265             | 4          | —   | $\partial \Gamma-8$ |
| $\Gamma CP-3000$  | 3.0               | 28.5             | 100              | 4.0—9.0            | 11.0             | 3.67                      | 15               | 137             | 245             | 4          | 4   | $M \Gamma C-7$      |
| $\Gamma CP-6000$  | 6.0               | 28.5             | 200              | 4.0—9.0            | 18.5             | 3.08                      | 15               | 140             | 313.5           | 4          | 4   | $M \Gamma C-7$      |
| $\Gamma CP-9000$  | 9.6               | 28.5             | 300              | 4.0—9.0            | 24.0             | 2.67                      | 15               | 166             | 377             | 6          | 3   | $M \Gamma C-7$      |
| $\Gamma CP-12000$ | 12.0              | 28.5             | 400              | 4.0—9.0            | 28.0             | 2.34                      | 15               | 176             | 405             | 8          | 4   | $M \Gamma C-8$      |
| $\Gamma CP-18000$ | 18.0              | 28.5             | 600              | 3.8—9.0            | 41.5             | 2.23                      | 15               | 198             | 435             | 8          | 4   | $M \Gamma C-9$      |

### § 1-3 电枢绕组

电枢绕组是电机的一个重要部分，因为绕组和能量形态的变化有最直接的关系。从上面可知，正是由于电枢绕组的存在，在发电机中才能把原动机的机械能转变成电能。为了求出电枢绕组中感应电势的大小，则首先必须要了解绕组的一些基本特性。

目前最常用的电枢绕组有单迭绕组和单波绕组两种。单迭绕组（图1—12）是将线圈  $A$  的始端连接在换向片上，而将其末端与相邻的换向片及装在旁边的线圈  $B$  的始端相连接；然后，将线圈  $B$  的末端与次一换向片及相邻线圈  $C$  的始端相连接，其余类推，直到绕组完全闭合为止，亦就是一直到我们回至线圈  $A$  的始端为止。线圈  $A$ 、 $B$ 、 $C$  等电动势是相加的。

单波绕组（见图1—13）是将线圈按照下列的方式连接起来。将线圈  $A$  的末端连于换向片上，并与拉于下一对磁极之下的线圈  $B$  的始端相连接。然后将线圈  $B$  的末端连于换向片上，并与线圈  $C$  的始端连接，其余类推，直到绕组闭合为止，亦就是直到回至线圈  $A$  的始端为止。

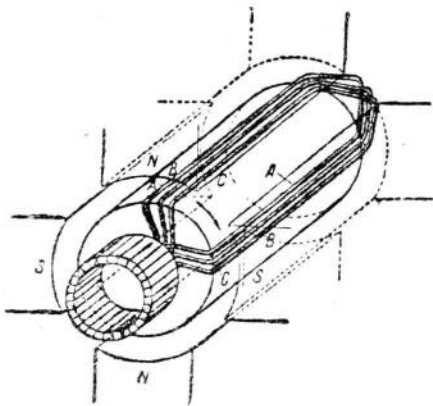


图1—12 单迭绕组

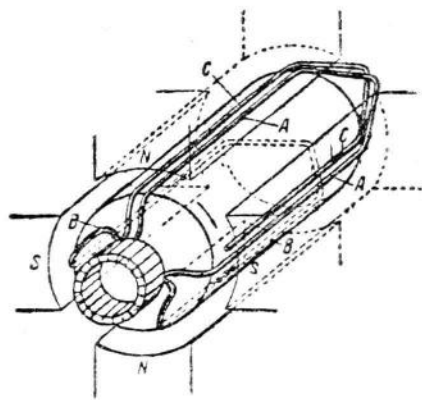


图1—13 单波绕组

从图1—13不难看出，在这种情况下，线圈  $A$ 、 $B$  和  $C$  的电动势也是相加的。

通常电枢绕组所具有的导体数很多，如果我们照图1—12及1—13图所示那样，来表示绕组的导体和线圈之间的全部连接情况，那么所得到的会是很复杂的图形，因此，在着手详细研究绕组的性质之前，必须先讲一讲几种更易了解的代表绕组的方法。

从图形上来表示绕组有两种方法。

第一种方法就是表示换向器一侧绕组的形状；这时位于电枢表面的导体用小圆圈表示，而位于换向器另一侧的不可见的导体端接部分，则绘在电枢圆周之外，这叫放射图。

第二种方法是将被电枢的圆柱面和绕组一同展示于图纸的平面上。这叫展开图。

图1—14所示为迭绕组(a)和波绕组(b)的放射图。

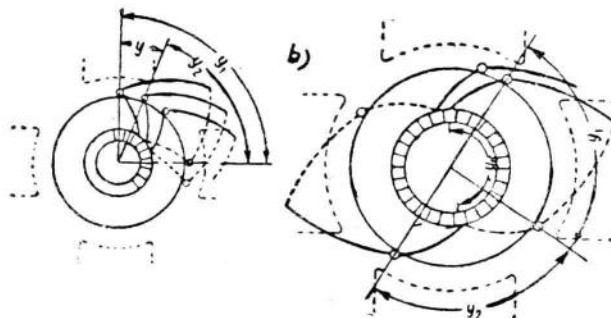


图1—14 迭绕组和波绕组的放射图