

31026705

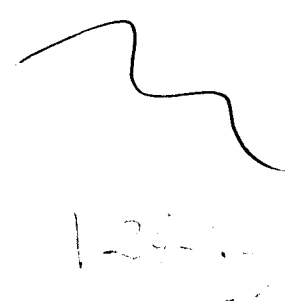
V242.44
01-3

航空电机学

刘迪吉 主编

航空工业出版社

1992



1-24-1

再 版 前 言

《航空电机学》是由南京航空学院、北京航空航天大学、西北工业大学三院校联合为电气技术专业编写的“电机学”教材。第一版于1980年由国防工业出版社出版，分上、下两册，第二版改为一册本由国防工业出版社于1986年出版。通过十年来的教学应用，取得了较好的效果，同时，目前航空院校及全国的电气技术专业已有统一的“电机学教学基本要求”，因此有条件有必要进行《航空电机学》的修订编写。这次再版的编写原则是：根据教学基本要求调整和精简有关章节，保持航空特色，增加例题、思考题和习题。期望这第三版在内容处理和文字上都有较大改进，能更好地适应100~120学时的电机学教学需要。

本书由南京航空学院刘迪吉教授主编。参加修订编写的有北京航空航天大学王世序副教授（第二篇、第五篇及总结篇），西北工业大学王国斌副教授（第一篇），南京航空学院陈海镇副教授（第四篇）和刘迪吉教授（引论及第三篇）。全书稿由主编进行了细致的修改统编。本书由全国电气技术专业教学指导委员会主任委员、东南大学徐德淦教授主审。由于是在原书基础上修订再版，因此本版《航空电机学》包含了原书作者辛勤劳动的成果，他们是（按姓氏笔画顺序）：王世序、朱耀忠、朱震莲、刘向群、刘迪吉、李钟明、张文祥、陈海镇、蒋宗荣。

在本书出版之时，编写者衷心感谢主审人徐德淦教授，他对本书稿提出了许多宝贵的意见，对保证本书质量起到了至关重要的作用。同时要感谢居美华工程师，她花费了很多精力精心绘制本书图稿。此外，编写者所在单位的同志们对本书稿也提供了很多有益的意见和帮助。在此一并表示衷心感谢。

本书难免还有许多不当之处，欢迎同志们批评指正。

编 者

1991年8月

主 要 符 号 说 明

一、基本符号与名称

基本符号	名 称	基本符号	名 称
A	线负荷	$r(R)$	电阻
a	并联支路对数(直流电枢绕组); 并联支路数(交流绕组)	S	表观功率; 面积
B	磁感应强度	s	转差率
b	宽度; 电纳	T	转矩; 周期; 时间常数
C	常数; 电容	t	时间; 齿距; 温度
D	直径	U	直流电压; 交流电压有效值
E	直流电势; 交流电势有效值	u	电压瞬时值
e	电势瞬时值	V	体积
F	磁势; 力	v	速度
f	频率; 磁势和力的瞬时值	W	匝数; 能量
G	重力	$x(X)$	电抗
g	重力加速度; 电导	y	绕组节距
H	磁场强度	Z	齿数; 复阻抗
h	高度	z	阻抗的模
I	直流电流; 交流电流有效值	α	角度; 极弧系数; 信号系数
i	电流瞬时值	β	角度; 相对节距
J	转动惯量	γ	角度
j	电流密度; 虚数单位	δ	气隙长度
K	常系数; 放大倍数	η	效率
L	电感; 长度	θ	角度; 功率角
l	长度	λ	磁导
M	互感	μ	磁导率
m	相数	ν	谐波次数
N	导体数	ρ	电阻率
n	转速	τ	极距; 温升
P	功率	Φ	磁通量
p	极对数; 损耗功率	ϕ	磁通瞬时值
q	每极每相槽数	φ	相角; 功率因数角
		Ψ	磁链

基本符号	名 称
ψ	磁链瞬时值；相角
Ω	机械角速度
ω	角频率

二、主要下标符号及意义

下标符号	意 义
0	空载
1、2	初、次级；定、转子
a	电枢
av	平均
d, q	直轴、交轴
D, Q	直轴阻尼、交轴阻尼
em	电磁
f	励磁
K	短路
l, ϕ	三相线、相
m	机械；磁场；磁化；幅值
N	额定
s	饱和；同步
st	起动
Z	齿
δ	气隙
ν	谐波
σ	漏磁

三、主要上标符号及意义

上标符号	意 义
$\cdot$	时间矢量
—	空间矢量
$*$	标么值
$'$	瞬变量
$''$	超瞬变量
$+$	正序
$-$	负序
0	零序

目 录

引 论

§ 0-1 电机及其应用·····	(1)
§ 0-2 航空电机的工作条件和特点·····	(2)
§ 0-3 电机工作的物理基础·····	(5)
思考题和习题·····	(10)

第一篇 航空直流电机

第一章 直流电机概述·····	(11)
------------------------	---------------

§ 1-1 直流电机基本工作原理·····	(11)
§ 1-2 直流电机的结构·····	(12)
§ 1-3 航空直流电机的型号·····	(15)
小结、思考题和习题·····	(16)

第二章 直流电机的空载磁场·····	(17)
---------------------------	---------------

§ 2-1 直流电机的空载磁场和磁通·····	(17)
§ 2-2 励磁磁势及其计算原则·····	(17)
§ 2-3 气隙磁感应强度分布和气隙磁压降·····	(18)
§ 2-4 电机的磁化曲线·····	(19)
§ 2-5 磁路计算实例·····	(19)
小结、思考题和习题·····	(22)

第三章 直流电机的电枢绕组·····	(23)
---------------------------	---------------

§ 3-1 单叠绕组·····	(23)
§ 3-2 单波绕组·····	(27)
§ 3-3 复波绕组和复叠绕组·····	(30)
§ 3-4 电枢绕组的感应电势·····	(30)
小结、思考题和习题·····	(32)

第四章 直流电机的电枢反应·····	(33)
---------------------------	---------------

§ 4-1 直流电机的电枢磁势·····	(33)
----------------------	--------

§ 4-2 直流电机电枢反应·····	(35)
§ 4-3 航空直流发电机电枢反应的特点·····	(36)
§ 4-4 直流电机的电磁转矩·····	(37)
小结、思考题和习题·····	(38)
第五章 航空直流发电机 ·····	(39)
§ 5-1 直流发电机的基本电磁关系·····	(39)
§ 5-2 他励直流发电机的运行特性·····	(42)
§ 5-3 并励直流发电机的自励及运行特性·····	(44)
§ 5-4 串励和复励直流发电机·····	(47)
小结、思考题和习题·····	(48)
第六章 航空直流电动机 ·····	(50)
§ 6-1 直流电机的可逆原理·····	(50)
§ 6-2 直流电动机的基本电磁关系·····	(51)
§ 6-3 直流电动机的机械特性·····	(52)
§ 6-4 并励直流电动机的工作特性·····	(54)
§ 6-5 直流电动机的起动·····	(56)
§ 6-6 直流电动机的调速·····	(57)
§ 6-7 直流电动机的电磁制动·····	(60)
§ 6-8 航空直流起动发电机·····	(62)
小结、思考题和习题·····	(63)
第七章 航空直流电机的换向 ·····	(66)
§ 7-1 换向概述·····	(66)
§ 7-2 换向的电磁理论·····	(67)
§ 7-3 产生火花的原因·····	(69)
§ 7-4 改善换向的方法·····	(70)
§ 7-5 补偿绕组·····	(72)
小结、思考题和习题·····	(73)
第八章 航空直流电机的发热与冷却 ·····	(74)
§ 8-1 电机的发热过程及温升·····	(74)
§ 8-2 航空直流电机的冷却·····	(76)
小结、思考题和习题·····	(78)
第九章 直流控制电机 ·····	(79)
§ 9-1 直流伺服电动机·····	(79)

§ 9-2 直流测速发电机·····	(81)
§ 9-3 直流力矩电动机·····	(83)
小结、思考题和习题·····	(83)

第二篇 航空变压器

第十章 变压器概述 ·····	(84)
------------------------	--------

§ 10-1 变压器的功用及其原理·····	(84)
§ 10-2 单相变压器的基本结构与分类·····	(85)
§ 10-3 航空变压器的型号及其额定数据·····	(87)
小结、思考题和习题·····	(87)

第十一章 单相变压器的空载运行 ·····	(88)
------------------------------	--------

§ 11-1 变压器空载运行时的物理现象·····	(88)
§ 11-2 变压器空载电势的分析·····	(89)
§ 11-3 变压器空载电流的分析·····	(91)
§ 11-4 变压器空载时的等值电路和矢量图·····	(92)
小结、思考题和习题·····	(93)

第十二章 单相变压器的负载运行 ·····	(95)
------------------------------	--------

§ 12-1 变压器负载运行时的电磁关系·····	(95)
§ 12-2 变压器负载运行的等值电路·····	(96)
§ 12-3 相对单位制——标么值·····	(98)
§ 12-4 变压器的试验和参数测定·····	(99)
§ 12-5 变压器的外特性与效率·····	(101)
小结、思考题和习题·····	(102)

第十三章 三相变压器 ·····	(104)
-------------------------	---------

§ 13-1 三相变压器的铁心结构·····	(104)
§ 13-2 三相变压器的绕组连接法及其组别·····	(104)
§ 13-3 三相变压器空载电势波形·····	(106)
小结、思考题和习题·····	(107)

第十四章 特殊变压器 ·····	(108)
-------------------------	---------

§ 14-1 自耦变压器·····	(108)
§ 14-2 电压互感器·····	(109)
§ 14-3 电流互感器·····	(110)
小结、思考题和习题·····	(111)

第三篇 交流电机的一般问题

第十五章 交流电机概述.....(112)

§ 15-1 同步发电机的基本原理.....(112)

§ 15-2 感应电动机的基本原理.....(113)

小结、思考题和习题.....(115)

第十六章 交流绕组及其感应电势.....(116)

§ 16-1 导体的感应电势.....(116)

§ 16-2 元件的感应电势和节距因数.....(118)

§ 16-3 分布元件组的感应电势和分布因数.....(121)

§ 16-4 相电势及绕组因数.....(123)

§ 16-5 三相双层整数槽绕组.....(123)

§ 16-6 三相单层绕组.....(127)

§ 16-7 单相交流绕组.....(128)

§ 16-8 三相绕组的联接.....(129)

§ 16-9 齿谐波电势及其削弱方法.....(130)

§ 16-10 三相 60° 相带分数槽绕组.....(133)

小结、思考题和习题.....(135)

第十七章 交流绕组的磁势.....(137)

§ 17-1 元件的脉振磁势.....(137)

§ 17-2 分布元件组的脉振磁势.....(141)

§ 17-3 相绕组的脉振磁势.....(143)

§ 17-4 三相绕组的旋转磁势.....(144)

小结、思考题和习题.....(150)

第四篇 航空同步电机

第十八章 同步电机概述.....(152)

§ 18-1 航空同步发电机的基本结构.....(152)

§ 18-2 航空同步发电机的冷却方式.....(156)

§ 18-3 航空同步发电机的型号、额定数据和技术指标.....(157)

小结、思考题和习题.....(158)

第十九章 三相同步发电机对称运行原理.....(159)

§ 19-1 空载磁路和空载特性.....(159)

§ 19-2	同步发电机的电枢反应	(161)
§ 19-3	电压平衡式和矢量图	(166)
§ 19-4	电枢反应电抗和漏抗	(172)
§ 19-5	外特性和调节特性	(175)
§ 19-6	短路特性和短路比	(177)
§ 19-7	同步电机电抗的测试	(179)
§ 19-8	同步电机的励磁及无刷同步发电机的特点	(183)
	小结、思考题和习题	(187)
第二十章	同步发电机不对称运行	(190)
§ 20-1	对称分量法	(190)
§ 20-2	相序阻抗及其测定	(194)
§ 20-3	同步发电机不对称短路	(198)
§ 20-4	单相同步发电机的特点	(201)
	小结、思考题和习题	(203)
第二十一章	同步发电机的突然短路	(205)
§ 21-1	突然短路的基本概念	(205)
§ 21-2	三相突然短路物理过程的分析	(206)
§ 21-3	三相突然短路电流的分析	(211)
§ 21-4	三相突然短路试验	(215)
§ 21-5	不对称突然短路	(217)
	小结、思考题和习题	(217)
第二十二章	同步发电机的并联运行	(219)
§ 22-1	并联投入的条件和方法	(219)
§ 22-2	同步发电机与无穷大电网的并联运行	(222)
	小结、思考题和习题	(227)
第二十三章	同步电动机	(229)
§ 23-1	同步电动机工作原理	(229)
§ 23-2	自整步同步电动机	(233)
§ 23-3	步进电机	(237)
	小结、思考题和习题	(240)
第二十四章	永磁电机	(242)
§ 24-1	永磁材料及主要特性	(242)
§ 24-2	永磁同步电机	(244)
§ 24-3	永磁直流电机	(246)

§ 24-4 磁滞电动机.....	(246)
小结、思考题和习题.....	(249)

第五篇 航空感应电机

第二十五章 感应电机概述.....	(250)
--------------------------	----------------

§ 25-1 感应电动机的基本结构.....	(250)
§ 25-2 感应电机基本原理及工作状态.....	(252)
§ 25-3 航空感应电动机的型号及其额定数据.....	(253)
小结、思考题和习题.....	(253)

第二十六章 三相感应电动机的运行处理.....	(254)
--------------------------------	----------------

§ 26-1 转子静止时的分析.....	(254)
§ 26-2 转子转动时的分析.....	(259)
§ 26-3 笼型转子的特点.....	(262)
§ 26-4 感应电动机的参数测定.....	(263)
小结、思考题和习题.....	(265)

第二十七章 感应电动机的功率、转矩和特性.....	(267)
----------------------------------	----------------

§ 27-1 感应电动机的功率转换关系.....	(267)
§ 27-2 感应电动机的电磁转矩.....	(268)
§ 27-3 感应电动机的工作特性.....	(274)
§ 27-4 空间高次谐波对感应电动机的影响.....	(276)
小结、思考题和习题.....	(279)

第二十八章 感应电动机的起动、调速和制动.....	(281)
----------------------------------	----------------

§ 28-1 感应电动机的起动.....	(281)
§ 28-2 感应电动机的调速.....	(284)
§ 28-3 感应发电机.....	(287)
§ 28-4 感应电机的制动.....	(289)
小结、思考题和习题.....	(290)

第二十九章 单相感应电动机.....	(292)
---------------------------	----------------

§ 29-1 单相感应电动机的工作原理.....	(292)
§ 29-2 单相感应电动机的起动和调速.....	(294)
§ 29-3 三相感应电动机不对称运行特点.....	(296)
小结、思考题和习题.....	(298)

第三十章 交流控制电机	(299)
--------------------------	---------

§ 30-1 两相伺服电动机.....	(299)
§ 30-2 异步测速发电机.....	(302)
§ 30-3 自整角机.....	(303)
§ 30-4 旋转变压器.....	(307)
小结、思考题和习题.....	(311)

总 结 篇

§ S-1 旋转电机的基本问题.....	(312)
§ S-2 机电能量转换中的能量关系.....	(313)
§ S-3 电机的电磁转矩.....	(315)
§ S-4 电机的感应电势.....	(320)
§ S-5 电机的机电转换功率和电磁功率.....	(323)
§ S-6 电机的运动方程.....	(324)
思考题和习题.....	(326)

附录 电机学常用量及其单位	(327)
习题参考答案	(328)
主要参考书	(330)

引 论

§ 0-1 电机及其应用

电机是一种电磁机械，它可实现电能与机械能之间的互相转换。将机械能转换成电能的称为“发电机”；反之，将电能转换成机械能的称为“电动机”。由于电能有直流和交流两种，所以不管是发电机还是电动机，都分直流和交流两类。有些电机仅实现电能与电能之间的转换，如将一种电压的交流电变换成另一种电压的交流电称为变压器；将直流电能变换成交流电能输出称为变流机。此外，还有专作电量或机械量转换和控制的电机，称为控制电机。总之，电机种类繁多，应用十分广泛，无论是工业设备、农业机械以及家用电器等等都离不开电机。可以这样讲，电机的发展和应用直接与各行各业的电气化、现代化水平相关。

航空航天工业也不例外地广泛应用着各种电机。作为提高飞机性能的必要措施，现代飞机上的电气设备愈来愈多，航空电机的应用也日益增加。一架大型飞机上用电装置总功率达数百千瓦，各种电机有五十多种类型、多达几百台。图 0-1 所示为某运输机主要电气设备的分布图。

航空电机是和飞机工业同时兴起和发展着的。按飞机上的应用，航空电机可以分为以下几类：

(1) 电源发电机 有直流发电机和交流发电机两种，是构成飞机电源系统的主要部件。

(2) 驱动电动机 用于飞机操纵机构（如襟翼、舵面、起落架收放装置）及油泵、阀门驱动，也有直流电动机和交流电动机两种。

(3) 变压器 有三相变压器、单相变压器及自耦变压器等，用以变换交流电压。另外，电子和控制系统中，还应用一些电源变压器和参数变换变压器。

(4) 变流机 在直流供电系统中作辅助的交流电源，以供雷达、无线电、陀螺设备应用。

(5) 控制电机 有直流和交流伺服电动机、测速发电机，有旋转变压器、自整角机等。它们在飞机控制系统、导航系统和航空仪表设备中，作伺服控制和信号转换用。

这些航空电机都是为了适应飞机的需要而开发的。正是由于航空航天事业及科学技术的

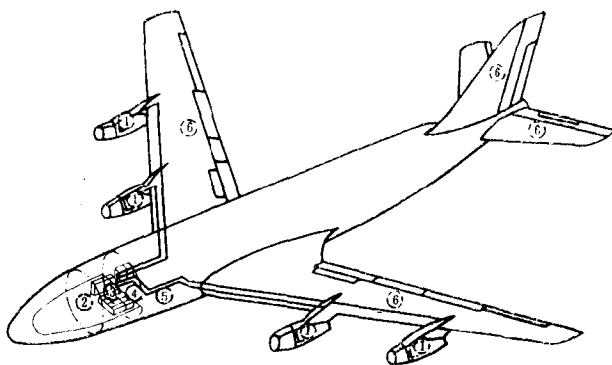


图 0-1 飞机部分电气设备分布图

1—发电机； 2—雷达舱中各种控制电机； 3—驾驶舱中各种电机； 4—控制保护器； 5—变压整流器和蓄电池； 6—操纵机构电动机

飞速发展，所以航空电机的研究与发展也很快。当然，进一步研制和应用新的高性能的航空电机，也必将会有力地推进飞行器的发展。这是学习和从事航空电机事业的人们应承担的光荣职责。

§ 0-2 航空电机的工作条件和特点

航空电机处在飞行器中工作，它首先要适应飞行器的特殊要求，如体积小、重量轻、工作可靠。此外，它还必须能满足飞行器在不同的高空、地区、气象、季节等条件下工作的要求，应能承受各种飞行条件下产生的机械应力和温度等的考验。这些都直接或间接地决定了航空电机在结构上、性能上有不同于地面电机的一系列特点。

一、航空电机工作的环境条件

我国幅员辽阔，温差很大，最冷的地方可达 -51.5°C 、最热的地方达 $+75^{\circ}\text{C}$ 。大气温度又随高度而变化，至高空 $11\sim 30\text{ km}$ 的同温层，气温则为 -56°C 。飞机就在这样的环境温度下飞行，所以我国规定考核一般航空电机的工作环境温度为 $-55\sim +60^{\circ}\text{C}$ 。另有一些航空电机不采用空气冷却、而采用油冷却，那么其环境温度应以冷却油的最高温度（例如 120°C ）为条件。高温或低温及温度的变化，对电机中各种材料的物理性质以及电机的性能都是有影响的。如低温可能使绝缘材料开裂、润滑油脂粘度增加、橡胶制品硬化；高温使得绝缘老化、导电材料电阻率增加、润滑油流出或挥发；温度的大幅度变化则会导致结构材料变形、镶嵌件松动、密封件损坏、零件间配合不正常，等等。这些都是航空电机设计制造要考虑到问题。

除了温度外，大气的成分和性质也随不同地区和飞行高度而变化。靠近江河湖海的地区湿度高，在夏季、雨季就更高；我国南部地处亚热带、热带，温湿并存，大气中还多霉菌；高空空气中臭氧成分增多；海上大气中有盐雾；沙漠上多沙尘；在 25 km 高空，大气压力仅为地平面的 $1/40$ ，空气的重量密度亦随着降低约 30 倍。大气性质的多变，对电机性能的影响也是多方面的。高湿度及盐雾使绝缘性能变坏，空气的介电强度降低，易引起绝缘击穿、电晕和电弧放电现象。空气稀薄不利于电机散热，并使电刷磨损加剧，直流电机换向恶化。水汽、盐雾、霉菌及沙尘则直接造成零部件腐蚀，甚至引起机械故障。

尚需指出，航空电机工作条件之恶劣还表现在它工作时可能受到严重的机械振动、冲击。这主要是发动机振动和气动力颤振，会直接传给某些电机。作为振源，一般活塞式发动机的振动频率为 $2\sim 4000\text{ Hz}$ 、振动加速度可达 $20\sim 50\text{ g}$ ；喷气发动机的振动频率为 $2\sim 4000\text{ Hz}$ 、而振动加速度为 $50\sim 80\text{ g}$ ；火箭发动机可出现 $2000\sim 10000\text{ Hz}$ 的振动、其加速度达 $50\sim 250\text{ g}$ 。飞行器在飞行过程中产生的冲击现象很多，例如飞机着落时常出现颠簸冲击，小型飞机的着落冲击过载可达 $4\sim 6\text{ g}$ ，而大型飞机可达 10 g ；又如导弹发射时，冲击过载可达 200 g 以上。剧烈的振动或冲击可能使航空电机造成一系列不良后果，诸如零部件相对位移、工作气隙变化、接触压力不稳定、零部件变形、紧固件松动、导磁材料性能降低、永磁材料去磁、焊点脱落、绝缘损坏等。

总之，飞行器的这些工作条件必成为航空电机的基本环境条件，它是制定航空电机技术要求的依据，也是设计、试制、生产、使用和维护航空电机时均应重视之处。根据我国的航

空标准, 每台航空电机在试制、生产和维修后, 都必须进行相应的环境试验, 这包括高空、高温、低温试验, 三防(湿热、霉菌、盐雾)试验, 机械过载(振动、冲击、加速度)试验等。

二、航空电机体积小、重量轻

航空电机对体积重量的限制很严, 因为它安装在飞机上工作, 其每 1 kg 质量需要 9.8 N 的升力维持, 而在飞行过程中, 每 1 N 的升力需 0.7~1.3 kg 的设备和燃料来保证。所以, 要求航空电机体积小、重量轻, 是提高飞机性能和战斗力的需要。举例来说, 型号为 JF-30A 的航空交流同步发电机, 额定容量 30 kVA, 质量为 28 kg; 而同样容量的普通(地面用)交流同步发电机, 型号 TZT-74-24, 其质量则为 360 kg, 是 JF-30 A 的 12.8 倍。事实上, 还有更轻、更小的航空电机, 如喷油冷却的航空交流发电机能达到 0.3 kg/kVA。航空电机的体积重量所以能做得很小, 主要是采取了以下一些措施:

1. 增大电磁负荷与转速

根据电机设计的基本原理, 电机的基本尺寸与电枢绕组的电流密度、气隙磁感应强度 B 、电枢表面单位圆周长度内的电流数(称线负荷) A 及转速大小有关。通常以 A 和 B 的大小来标志电机的电磁负荷大小。显然, 电磁负荷大(即电流大、磁场强)、转速高, 那么电机单位体积所能转换的功率就大, 若是同等功率就可使电机的体积减小、重量减轻。值得说明, 航空交流电机采用中频 400 Hz、而不用工频 50 Hz, 也正是为了提高转速、减小体积重量而确定的。

2. 缩短使用期限

航空电机工作条件恶劣, 而它的电磁负荷大、转速高, 相应的损耗也必然大, 加上散热条件又很差, 因此电机发热严重、温度很高, 这必将影响绝缘材料的寿命。又因为机械上的高速和强烈的振动、冲击之影响, 轴承寿命也要缩短。与此适应的是航空电机就该合理地缩短使用期限。例如, 航空电机常规定使用期限为 500(工作)小时, 而地面电机则从经济性出发而定使用期限为 20 年。当然, 飞机的其它主要部件, 如航空发动机, 使用期限也很短, 所以航空电机作为一个部件, 使用期限设计过长, 意义不大。随着电机的设计和制造水平提高以及飞机使用期限的增加, 航空电机的使用期限也在逐步增加, 例如可达数千小时, 并用平均故障间隔时间来代替使用寿命这一指标。

3. 采用良好的冷却方式

这主要指航空电源电机, 因为它功率较大, 单位体积的损耗也大。因此必须提高冷却效果。早期采用自带风叶自通风冷却, 后引入飞机迎面气流强迫通风冷却。当飞机飞行速度提高以及发电机功率加大之后, 就发展了油冷却方式, 即利用发动机的滑油引入电机传导热量至油箱散发冷却。油冷却有循油和喷油两种, 前者是冷却油循一定油路经定子和转子冷却电机; 后者是在电机内腔将油喷成雾状, 直接与发热的电机导体和铁心接触, 冷却电机。冷却油在循环中还冷却和润滑了轴承。先进的冷却方式不断采用, 使航空电机的体积重量不断减小, 还提高了使用期限和性能。

4. 选用优质材料

优质材料的利用, 可保证航空电机在电、磁、热以及机械等方面的高强度和可靠性。例如, 航空电机的导磁材料选用优质硅钢片以及铁钴钒软磁材料(如 1 J-22, 其最大磁密可达

2.4 T)；一般航空电机用 B 级绝缘材料，航空交流发电机则常选用 H 级绝缘，后者可在 250℃ 高温下工作；航空电机的机壳、端盖、机座等结构件，多采用高强度轻金属（如镁合金）制成，而转轴等受力部件则选用高强度合金钢（如 30CrMnSiA）。

上述的一系列措施，保证了航空电机有体积小、重量轻的特点，并能适应飞机上各种复杂的使用条件。

三、航空电机的基本技术要求

航空电机的基本技术要求应包括以下几方面：额定数据、工作条件、试验和验收方法、安装尺寸及其它数据。由于航空技术在不断发展，对航空电机的要求也在不断提高，所以这些基本技术要求也在不断变化。目前，小型飞机还用 28 V 直流电源系统，而稍大的飞机则多用 400 Hz、115/200 V 三相交流电源，这是当前航空电机的电压和频率基本体制。根据现行的航空标准，简要摘录我国航空电机的基本技术要求如表 0-1。

表 0-1 我国航空电机基本技术要求

		直 流 电 机	交 流 电 机
高空性 (km)		30 以下	
环境温度 (°C)		-55~+60	
压力 (mmHg)		760~7.5	
相对湿度		40°C 时, 为95%	
使用期限 (小时)		100~3000	
机械	振 动	频率为 25~190Hz, 振幅为 0.0235~1mm, 次数为 $2 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$	
强度	冲 击	加速度为 4~10 g, 速率为 40~100 次/min, 次数为 10^4 次	
过载	功率>10 kW的电机	150%, 2 min; 200%, 5 s	150%, 2 min; 200%, 5 s
	功率<10 kW的电机	150%, 2 min; 200%, 10 s	
热态绕组绝缘	抗电强度试验	产品额定电压分别为<36V、36~115V、>115~250V; 试验电源频率50Hz, 时间1分钟, 试验电压分别为500、1000、1500V	
	热态绝缘电阻	用500 V兆欧表测量, $\leq 2 M\Omega$	
过 速		超过最大转速 20~50%, 历时 2~3 min (串励的超过 50%)	
功 率 因 数			0.75 (滞后)
转速或频率		3800~9000 r/min (发电机)	400 Hz
电压	发 电 机	30 V	120/208 V
	电 动 机	27 V (电池供电的为 24 V)	115/200 V、36 V
冷 却 系 统		自通风、强迫通风	强迫通风、循油、喷油

§ 0-3 电机工作的物理基础

电机作为一种电磁机械,以磁场为媒介实现能量变换。因此,电机的工作原理是以基本电磁定律为基础,如全电流定律,电磁感应定律以及电磁力定律等等。所以,在研究具体电机之前,有必要对这些电工基础中有关的基本理论,作一简要的回顾和讨论。

一、电磁场的基本方程

麦克斯韦方程是电磁场的基本方程。由于一般的电机课题中不必考虑电位移和位移电流,所以麦克斯韦方程可简化为

$$\begin{cases} \text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \end{cases} \quad (0-1)$$

$$\begin{cases} \text{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{cases} \quad (0-2)$$

$$\begin{cases} \text{div} \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (0-3)$$

若配合介质特性 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (0-4)$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (0-5)$$

以及边界条件,就可以完整描述电机内的电磁现象。

就本书体系出发,我们常应用的不是上述微分形式,而主要用该方程的积分形式。现分别说明如下。

1. 全电流定律

导体或线圈通电后就建立磁场,全电流定律表达了磁场与电流的关系,也称为安培定律:沿任一闭合路径上磁场强度的线积分,就等于穿过该闭合路径内的导体电流的代数和。

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (0-6)$$

式中 l 为闭合路径,它所围的面积为 S 。由式 (0-1) 对面积 S 求积,即

$$\oint_S \text{rot} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = \oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}$$

由矢量积分的基本关系可知

$$\oint_S \text{rot} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$$

又 $\mathbf{J}$ 为电流密度,因此

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = \sum I$$

可见式 (0-6) 和式 (0-1) 仅仅是积分和微分的两种不同表达形式。

全电流定律在电机中的典型应用有:计算建立一定磁场所需的励磁电流,或者是分析一定电流可以建立的磁场。

在实际应用时,可简化用和式代替线积分,即把研究的闭合磁路分成若干段,每一段的磁场强度看作是常数,则有

$$\sum H_i l_i = \sum I \quad (0-7)$$

式中, $H_i l_i$ 称为第 i 段磁路的磁压降; $\sum I$ 或计作 IW (W 为线圈匝数),为该磁路的总磁

势。磁场强度 H 的单位：安/米(A/m)，尚见的实用单位有奥[斯特]注，1奥=1000/4 π 安/米。
磁势单位：安匝(A)。

2. 电磁感应定律

任一线圈中所匝链的磁通发生变化时，线圈中便产生感应电势。此感应电势的大小等于磁链对时间的变化率，感应电势的方向总是企图产生感应电流来阻止线圈中磁链的变化。当感应电势的正方向与磁通的正方向符合右螺旋关系时，电磁感应定律可表达为如下数学式

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -W\frac{d\phi}{dt} \quad (0-8)$$

式中 ϕ 为匝链线圈的磁通，单位（磁链同单位）：韦[伯](Wb)，尚见的实用单位：麦[克斯韦]，1麦=10⁻⁸韦。 e 为电势，单位：伏[特](V)。

按式(0-8)，单匝线圈的感应电势 $e' = -d\phi/dt$ 。设该线圈所围面积为 S' ，则

$$e' = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \oint_{S'} \text{rot } \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

及

$$\frac{d\phi}{dt} = \oint_{S'} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$$

代回后，即可得式(0-2)等式。说明式(0-2)和式(0-8)是电磁感应现象的两种不同的表达形式，前式为微分形式、后者为积分形式。式(0-8)也常称为法拉第一楞次定律。

使用式(0-8)时，要注意 e 和 ϕ 的正方向符合右螺旋关系，否则式中“—”号就失去正确含义。

线圈磁链的变化，总的来说可能有两种不同的情况：(1) 磁通是由交流电产生的，因而磁场本身就是随时间变化的；(2) 线圈的导体与磁场有相对运动，由此引起匝链线圈的磁链发生变化。

一个变压器，线圈是固定不动的，它靠磁通本身的交变而产生感应电势。因此，情况(1)所形成的感应电势常称为“变压器电势”。注意到变化的磁通是由电流的变化激励而成，而这又包含两种可能。一是线圈本身电流的变化，由此在自身线圈上产生的感应电势，称为“自感电势”；另一种是由其它线圈上的电流变化而在这个线圈上引起的感应电势，称为“互感电势”。

对于情况(2)，通常把“相对运动”说成导体“切割”磁场，因此而形成的电势称为“切割电势”。旋转电机就常常用此概念来分析。下面举一简例来说明切割电势的计算。

如图0-2(a)所示，导体 ab 在恒定磁场(图中“+”表示磁感应强度方向是垂直进入纸面)中运动，速度为 $v = dx/dt$ ，它产生的感

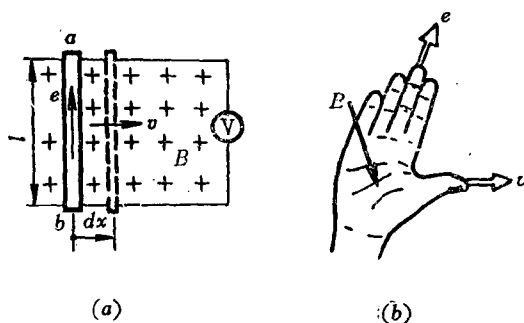


图 0-2 切割电势与右手定则

注：本书采用我国法定计量单位，基本上与国际单位(SI)制是一致的。这里所谓尚见的实用单位主要是厘米米秒(CGS)制单位，因为原来应用甚广，所以还列出名称，并给出单位换算关系。关于电机学中常用量及其单位，可参见本书附录。