



江苏高校品牌专业建设工程资助项目

“十三五”江苏省高等学校重点教材



航空电机学

刘 闯 主编

新形态
教材



科学出版社



“十三五”江苏省高等学校重点教材

航空电机学

刘 闯 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以电机基本原理、电磁关系、基本运行特性为主线,结合航空电机应用的特点而展开阐述。全书分七篇,包括航空直流电机、航空变压器、交流电机的共性问题、航空同步电机、航空感应电机、特种电机与控制电机、总结篇。本书精简了电机的理论篇幅,适当增加了航空电机新技术的内容,理论联系实际,各章均附小结、思考题和习题。

本书可作为航空类高等院校电气工程及其自动化专业的教材,也可供相关专业技术人员及工科院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空电机学 / 刘闯主编. —北京: 科学出版社, 2017.9

“十三五”江苏省高等学校重点教材(编号: 2016-2-058)

ISBN 978-7-03-055158-0

I. ①航… II. ①刘… III. ①航空电气设备-电机学-高等学校-教材 IV. ①V242.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 269020 号

责任编辑: 余 江 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 9 月第一次印刷 印张: 20 1/4

字数: 480 000

定价: 62.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书是在 1992 年航空工业出版社出版的《航空电机学》的基础上修订编写而成,原书由刘迪吉教授主编,是南京航空航天大学、北京航空航天大学、西北工业大学三所航空院校联合编写的教材,已修订三版,在行业内有着显著的影响力。随着高等院校电气工程及其自动化专业培养计划的调整和航空技术的不断发展,时隔二十多年,有必要对原《航空电机学》再次做较大的修改。本书的修订征得原书主编的同意,并在其大力支持下完成。本书作者有着长期从事“电机学”课程教学和科研的经验,继承和发展了原教材的航空特色,内容上也做了较大幅度的改进,适当精简各种电机的理论篇幅,增加了部分新技术内容,将原书 30 章调整为 19 章,力争更好地适应电气工程及其自动化专业人才培养的需要。

参加本书修订编写的有朱学忠副教授(交流电机的共性问题篇)、邓智泉教授(航空直流电机篇)、黄文新教授(航空变压器篇、航空感应电机篇)、王晓琳教授(控制电机)、秦海鸿副教授(永磁电机)和刘闯教授(引论、航空同步电机篇、总结篇、开关磁阻电机)。本书由刘闯教授统稿和主编。东南大学黄学良教授主审本书,提出了许多的宝贵意见,在此表示诚挚谢意。

由于本书是在原《航空电机学》的基础上修订编写,本书包含了原书作者辛勤劳动的成果;同时得到陕西航空电气有限责任公司的大力支持,提供了本书需要的相关航空电机的资料和插图,在此对他们的大力支持表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,欢迎读者批评指正。

作 者

2017 年 6 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	P	功率
a	并联支路对数(直流电枢绕组); 并联支路数(交流绕组)	p q	极对数; 损耗功率
B	磁感应强度	$r(R)$	电阻
b	宽度; 电纳	S	表观功率; 面积
C	常数; 电容	s	转差率
D	直径	T	转矩; 周期; 时间常数
E	直流电势; 交流电势有效值	t	时间; 齿距; 温度
e	电势瞬时值	U	直流电压; 交流电压有效值
F	磁势; 力	u	电压瞬时值
f	频率; 磁势和力的瞬时值	V	体积
G	重力	v	速度
g	重力加速度; 电导	W	匝数; 能量
H	磁场强度	$x(X)$	电抗
h	高度	y	绕组节距
I	直流电流; 交流电流有效值	Z	齿数; 复阻抗
i	电流瞬时值	z	阻抗的模
J	转动惯量	α	角度; 极弧系数; 信号系数
j	电流密度; 虚数单位(作为虚数单位时为正体)	β	角度; 相对节距
K	常数; 放大倍数	γ	角度
L	电感; 长度	δ	气隙长度
l	长度	η	效率
M	互感	θ	角度; 功率角
m	相数	λ	磁导
N	导体数	μ	磁导率
n	转速	ν	谐波次数

续表

基本符号	名称	基本符号	名称
ρ	电阻率	Ψ	磁链
τ	极距; 温升	ψ	磁链瞬时值; 内功率因数角
Φ	磁通量	Ω	机械角速度
ϕ	磁通瞬时值	ω	角频率
φ	功率因数角		

二、主要下标符号及意义

下标符号	意义	下标符号	意义
0	空载	f	励磁
1、2	初、次级; 定、转子	K	短路
a	电枢	$l、\phi$	三相线、相
av	平均	m	机械; 磁场; 磁化; 幅值
$d、q$	直轴、交轴	N	额定
$D、Q$	直轴阻尼、交轴阻尼	s	饱和; 同步
em	电磁		

目 录

前言	
主要符号说明	
引论	1
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 航空动力种类及航空电机技术的发展	5
0.4 航空电机工作的物理基础	7
思考题和习题	14
第一篇 航空直流电机	
第1章 航空直流电机概述	15
1.1 直流电机的基本工作原理	15
1.2 直流电机的基本结构	17
1.3 直流电机的电枢绕组	20
1.4 直流电机的励磁方式	27
1.5 航空直流电机的型号和额定值	27
小结	28
思考题和习题	28
第2章 航空直流电机的电磁关系	30
2.1 直流电机的磁场和电枢反应	30
2.2 直流电机的基本电磁关系	35
2.3 航空直流电机的换向	41
小结	45
思考题和习题	45
第3章 航空直流发电机	47
3.1 他励直流发电机	47
3.2 并励直流发电机	48
3.3 串励和复励直流发电机	51
小结	52
思考题和习题	52
第4章 航空直流电动机	54
4.1 直流电动机的机械特性	54

4.2 直流电动机的起动、调速、制动	56
4.3 航空直流起动/发电机	62
小结	63
思考题和习题	64

第二篇 航空变压器

第5章 单相变压器的工作原理及运行特性	66
5.1 单相变压器的基本结构与额定值	66
5.2 单相变压器的空载运行	70
5.3 单相变压器的负载运行	76
5.4 变压器的试验和参数测定	80
5.5 相对单位制——标么值	81
5.6 变压器的外特性与效率	83
小结	84
思考题和习题	84
第6章 三相变压器与特殊变压器	87
6.1 三相变压器的基本结构	87
6.2 三相变压器的绕组连接法及其组别	88
6.3 三相变压器的空载电势波形	90
6.4 三相变压器的并联运行	92
6.5 特殊变压器	94
小结	97
思考题和习题	97

第三篇 交流电机的共性问题

第7章 交流电机的电势磁势	99
7.1 交流绕组的感应电势	99
7.2 交流绕组的构成和连接规律	107
7.3 交流绕组的磁势	119
小结	133
思考题和习题	134

第四篇 航空同步电机

第8章 航空同步电机概述	136
8.1 航空同步发电机的基本结构	136
8.2 同步发电机的励磁方式	140

8.3 航空同步发电机的型号和额定数据	142
小结	143
思考题和习题	143
第9章 三相同步发电机对称运行原理	144
9.1 空载磁路和空载特性	144
9.2 同步发电机的电枢反应	145
9.3 电压平衡式和矢量图	150
9.4 同步发电机的运行特性	158
9.5 同步发电机的电抗及测试方法	161
小结	167
思考题和习题	167
第10章 三相同步发电机的典型运行方式	170
10.1 同步发电机不对称运行	170
10.2 同步发电机的突然短路	179
10.3 同步发电机的并联运行	188
小结	196
思考题和习题	197
第11章 同步电动机	200
11.1 同步电动机的工作原理	200
11.2 同步电动机的起动	203
11.3 反应式同步电动机	204
小结	205
思考题和习题	205

第五篇 航空感应电机

第12章 感应电机概述	206
12.1 感应电动机的基本结构	206
12.2 感应电机的基本原理及工作状态	208
12.3 航空感应电动机的型号及其额定数据	209
小结	209
思考题和习题	210
第13章 感应电动机的运行原理与特性	211
13.1 感应电动机的运行原理	211
13.2 感应电动机的功率、转矩	224
13.3 感应电动机的工作特性	230
13.4 空间高次谐波对感应电动机的影响	231
小结	234

思考题和习题	235
第 14 章 感应电动机的运行	237
14.1 感应电动机的起动	237
14.2 感应电动机的调速	240
14.3 感应电动机的制动运行	242
14.4 感应电机发电运行	243
14.5 单相感应电动机	247
14.6 航空三相感应电动机的运行特点	252
小结	254
思考题和习题	254

第六篇 特种电机与控制电机

第 15 章 永磁电机	256
15.1 永磁材料及其特性	256
15.2 永磁同步电机	258
15.3 永磁直流电机	260
15.4 无刷直流电动机	261
小结	264
思考题和习题	265
第 16 章 开关磁阻电机	266
16.1 开关磁阻电机系统的组成	266
16.2 磁阻电机的电磁转矩	268
16.3 开关磁阻电机的运行特性及控制方法	269
16.4 开关磁阻电机发电运行及控制	271
小结	272
思考题和习题	273
第 17 章 控制电机	274
17.1 伺服电动机	274
17.2 旋转变压器	278
17.3 步进电机	283
小结	287
思考题和习题	287

总 结 篇

第 18 章 航空电机的发热与冷却	288
18.1 电机的发热过程与温升	288
18.2 航空电机的冷却方式	290

小结	293
思考题和习题	293
第 19 章 电机的机电能量变换	294
19.1 旋转电机的基本问题	294
19.2 机电能量转换中的能量关系	295
19.3 电机的电磁转矩	297
19.4 电机的感应电势	302
19.5 电机的机电转换功率与电磁功率	306
19.6 电机的运动方程	307
小结	309
思考题和习题	309
参考文献	310
附录	311

引 论

0.1 电机及其应用



课件

电机是一种电磁机械，它可实现电能与机械能之间的相互转换。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，都分为直流和交流两类。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转换成另一种电压的交流电称为变压器；将直流电能转换成交流电能输出的称为变流机。此外，还有专门作为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，工业设备、农业机械以及家用电器等都离不开电机。可以这样说，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越来越多，航空电机的应用也日益增加。一架大型飞机上的用电装置总功率达数兆瓦，电机有五十多种类型，多达几百台。图 0-1 为某运输机主要电气设备的分布图。

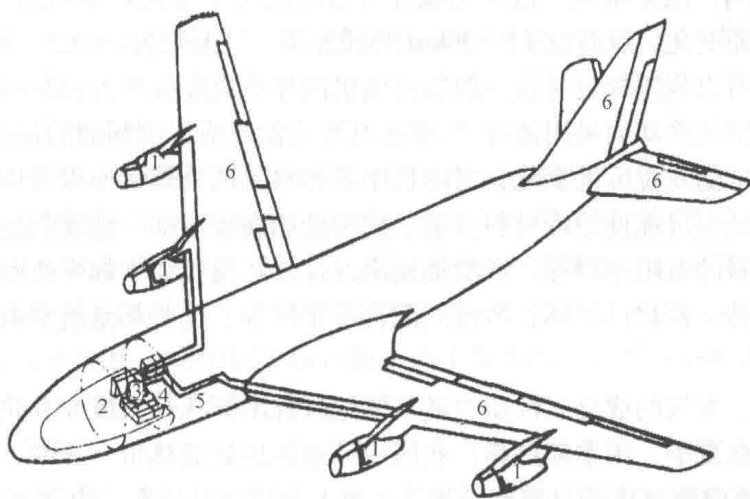


图 0-1 飞机电气系统典型布局图

- 1-发电机； 2-雷达舱中的各种控制电机； 3-驾驶舱中的控制电机； 4-驱动电动机；
5-变压整流器和蓄电池； 6-作动机构电动机

按飞机上的应用，航空电机可分为以下几类。

(1) 电源发电机有直流发电机和交流发电机两种，是构成飞机发动机主发电机、辅助动力装置(Auxiliary Power Unit, APU)、空气冲压涡轮(Ram Air Turbine, RAT)发电机系统的

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为辅助的交流电源,通过旋转的变流机将 28.5V 的直流电转换为 115V 的交流电,以供雷达、无线电、陀螺设备应用。随着电力电子技术的发展,变流机已逐步被静止变流器代替。

(5) 控制电机有直流和交流伺服电动机、测速发电机、旋转变压器、步进电机、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,作为伺服控制和信号转换器件使用。

0.2 航空电机的工作条件和特点

航空电机在飞行器中工作,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,它还必须要满足飞行器在不同的高度、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和性能上有不同于地面电机的一系列特点。

1. 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 $+75^{\circ}\text{C}$ 。大气温度又随高度的不同而变化,至高空 11~30km 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环境温度标准为 $-55\sim+70^{\circ}\text{C}$ 。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(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。例如,低温可能使绝缘材料开裂、润滑油脂黏度增加、橡胶制品硬化;高温使绝缘老化、导电材料的电阻率增加、润滑油流出或挥发;温度的大幅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。这些都是航空电机设计制造要考虑到的问题。

除了温度外,大气的成分和性质也随不同地区和不同飞行高度而变化。靠近江河湖海的地区湿度高,在夏季、雨季就更高;我国南部地区地处亚热带、热带,温湿并存,大气中还多有霉菌;高空空气中的臭氧成分增多;海上大气中有盐雾;沙漠上多沙尘;在 25km 高空,大气压力仅为地平面处的 1/40,空气的密度也随之降低为地平面处的 1/30。大气性质的多变,对电机性能的影响也是多方面的。而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、电晕和电弧放电等现象。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 $20\text{g}\sim 50\text{g}$ ；喷气发动机的振动频率为 $2\sim 4000\text{Hz}$ ，振动加速度为 $50\text{g}\sim 80\text{g}$ ；火箭发动机可出现 $2000\sim 10000\text{Hz}$ 的振动，其加速度达 $50\text{g}\sim 250\text{g}$ 。飞行器在飞行过程中产生的冲击现象很多，例如，飞机着地时常出现颠簸冲击，小型飞机的着落冲击过载可达 $4\text{g}\sim 6\text{g}$ ，而大型飞机可达 10g ，又如导弹发射时，冲击过载可达 200g 以上。剧烈的振动或冲击可能给航空电机造成一系列不良后果，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。

2. 航空电机的特点

航空电机对体积重量的限制很严，因为它安装在飞机上，其每千克质量需要 9.8N 的升力维持，而在飞行过程中，每牛顿的升力需 $0.7\sim 1.3\text{kg}$ 的设备和燃料来保证。所以要求航空电机体积小、重量轻，这是提高飞机性能和战斗力的需要。例如，型号为 JF-30A 的航空交流同步发电机，其额定容量为 $30\text{kV}\cdot\text{A}$ ，质量为 28kg ；而同样容量的普通（地面用）交流同步发电机（型号为 TZT-74-24），其质量则为 360kg ，是 JF-30A 的 12.9 倍。事实上，还有更轻、更小的航空电机，如 B787 的 $250\text{kV}\cdot\text{A}$ 主发电机采用喷油冷却的航空交流发电机，功率密度能达到 $2.6\text{kV}\cdot\text{A}/\text{kg}$ 以上。航空电机的体积重量之所以能做得很小，主要是采取了以下一些关键措施。

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（称为线负荷） 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。需要说明的是，航空交流电机采用中频 400Hz 而不用工频 50Hz ，有的飞机电源的频率达 800Hz ，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、冲击的影响，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 500h （工作），而地面电机则从经济性出发而定的使用期限为 20 年。当然，飞机的其他主要部件，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的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 (Mean Time Between Failures, MTBF) 来代替使用寿命这一指标，如现在大型客机主发电机的 MTBF 达 10000h 以上。

3) 采用良好的冷却方式

这主要指航空电源电机，因为其功率较大，单位体积的损耗也大，所以必须提高冷却效果。早期采用自带风扇自通风冷却，后来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，前者是冷却油按照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。随着航空电机容量的不断增加，更有效的冷却方式也不断被采用，例如，综合循油和喷油冷却方式也在 B787 飞机主发电机上被采用。先进的冷却方式不断被采用，不仅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 1J-22，其最大磁密可达 2.4T)；一般电机用 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℃ 的高温下工作；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。

3. 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、安装尺寸及其他数据。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 28V 直流电源系统，而稍大的飞机则多用 400Hz、115/200V 三相交流电源，更大容量的飞机则宜发展采用 270V 航空高压直流或变频交流电源。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 所示。

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/℃		-55~+70	
压力/mmHg		7.5~760	
相对湿度		40℃时，为 95%	
使用期限/h		100~3000	
机械强度	振动	频率为 25~190Hz，振幅为 0.0235~1mm，次数为 $2 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$	
	冲击	加速度为 4g~10g，速率为 40~100 次/min，次数为 10^4 次	

		直流电机	交流电机
过载	功率>10kW 的电机	150%, 2min; 200%, 5s	150%, 2min; 200%, 5s
	功率<10kW 的电机	150%, 2min; 200%, 10s	
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, 试验电源频率为 50Hz, 时间为 1min, 试验电压分别为 500V、1000V、1500V	
	热态绝缘电阻	用 500V 兆欧表测量, $\leq 2M\Omega$	
过速		超过最大转速 20%~50%, 历时 2~3min(串励的超过 50%)	
功率因数			0.75(滞后)
转速或频率		3800~9000r/min(有刷直流发电机)	400Hz
电压	发电机	30V	120/208V
	电动机	27V(电池供电的为 24V)	115/200V, 36V
冷却系统		自通风、强迫通风	强迫通风、循油、喷油

0.3 航空动力种类及航空电机技术的发展

1. 航空动力系统种类

传统的飞机主发动机除了提供飞机飞行所需的主动动力外, 还需要提供给其他四种二次动力系统作为原动力, 即液压、气动、电气和机械系统。

(1) 液压系统。通过发动机附件液压泵进行能量传输, 用于飞行控制的驱动、起落架的控制和多种辅助动力系统。液压系统具有能量密度高而且强大的特点, 但存在液压管路笨重不灵活的缺点而且具有潜在的泄漏危险和流体腐蚀。

(2) 气动系统。能量由发动机的高压压气机提供。这种能量用于供给飞机环控系统, 也可以提供高温气体用于机翼除冰系统, 辅助动力发动机还可以引气来起动主发动机。气动系统存在能量利用率低并且泄漏检测困难等缺点。

(3) 电气系统。由发电机把发动机的机械能转化为电能, 供能给飞机上的电动负载、电子设备、照明、商用娱乐系统等。电机是电气系统电能变换的核心装备。电气系统的特点是电能传输、分配方便。为防止电气绝缘、电磁干扰、馈电安全等问题, 电气系统电线分布要求较高。

(4) 机械系统。发动机通过各级减速器分配给液压泵、发电机和子机械系统, 多采用齿轮或滚珠丝杠等部件传输, 机械动力不便于远距离传输。

多种二次动力能源系统已经使飞机变得越来越复杂, 并且各设备之间的交互使飞机系统的能源整体利用率低, 也进一步增加了飞机内部潜在的危险, 维护成本高。

为了改善飞机的二次动力系统, 出现了全电飞机(All-Electric-Aircraft, AEA)的概念, 全电飞机就是用电气系统取代原先的液压、气动和机械系统的飞机, 即所有的二次动力均用电能的形式分配、传输。然而二次能源系统的更换是一个复杂的问题, 因此航空界

采取的做法是阶段性地增加电气系统所占的比例，这样就出现了多电飞机 (More-Electric-Aircraft, MEA) 的概念。多电飞机的二次动力系统中大部分以电能的形式进行传输，使得大多数机载设备和操纵系统都由电能驱动，减少了飞机的液压管路和气体管路，简化了飞机结构，提升了飞机的可靠性、舒适度、经济性等性能指标，因此，电气系统已成为多电飞机的核心系统之一，飞机电气系统包括飞机电源系统和飞机用电系统。

飞机电源系统包括发电、电能变换和分配各个环节，飞机电源系统先后出现了四种类型的系统：低压直流、恒频交流、高压直流及变频交流电源系统。

飞机用电系统除 0.1 节提及的一般机载用电设备，还包括近年来发展很快的电力起动、电力作动、电力刹车、电力环控、电力除冰、电力制氧等大功率用电设备，电动机成了飞机的主要用电负载。

2. 航空电机技术的新发展

(1) 低压直流发电机。低压直流发电机大多是有刷直流电机，额定电压常为 28.5V 直流，功率有 3kW、6kW、9kW、12kW、18kW 等多种规格。航空有刷电机需采用高性能的电工材料、高转速运行，采用了高效通风冷却等技术，其功率重量比一般可达 0.5kW/kg。但是由于电刷和换向器的限制，存在寿命短、电磁性能差等问题。

(2) 无刷交流发电机。现代飞机广泛应用的是三级式旋转整流器无刷交流同步发电机，常用容量有 30kV·A、60kV·A、90kV·A 和 120kV·A 等多种规格。为了减少体积重量，20 世纪 60 年代后出现了循环油冷却和喷油冷却的航空发电机，功率重量比可达 2kW·A/kg 以上。

(3) 无刷直流发电机。无刷直流发电机应用于飞机的高压直流电源体制，通常由无刷交流同步发电机和输出整流器组合而成。为了降低输出电压的脉动，交流同步发电机的电枢绕组采用五相绕组或双 Y 形绕组，通过调节励磁绕组电流实现输出电压的稳定。

航空永磁发电机用永磁体励磁，由于采用了优质的永磁材料，如高温稀土永磁材料，电机的体积小、效率高，逐渐在航空、航天场合得到了广泛的应用，永磁发电机存在调压和短路故障灭磁困难等问题。

(4) 起动/发电机。通常飞机发动机需要专门的起动机，根据电机的可逆原理，如用飞机的主发电机来起动发动机，这样发动机的起动机与发电机合二为一，简化了飞机的电源系统，提高了飞机的可靠性。

飞机主电源首先面临着主发电机类型的选择，一般低空低速的小型飞机多采用低压有刷直流电机；中型规格的飞机多采用恒频交流发电机，常用的是由无刷同步交流发电机与恒速传动装置组成的组合传动发电机，额定电压为 115/200VAC (供电电压，发电机输出电压是 120/208V)，频率为 400Hz。随着飞机电源容量的增加和航空技术的进步，高压直流电源 (以军用飞机 F-22 和 F-35 电源系统为代表) 和变频交流电源 (以民航客机 B787 和 A380 电源为代表) 成为先进飞机的两种大容量电源体制。B787、A380 采用变频交流发电机方案；F-22 采用无刷直流发电机方案。由于恒速传动装置不具备可逆运行特性，因此恒速传动装置的恒频电源系统不具备起动发电一体化功能。由于有刷直流电机方便为起动/发电机，多数小型飞机则采用了有刷直流起动/发电机方案。高压直流和变频交流电源系统的无刷发电