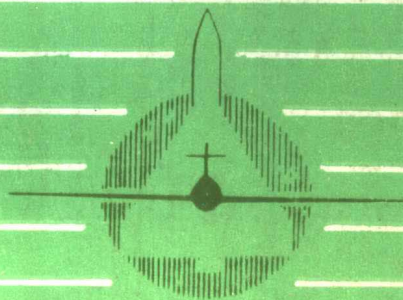


航空电机学

南京航空学院 刘迪吉 主编



国防工业出版社

航空电机学

南京航空学院 刘迪吉 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书讨论各类电机的基本工作原理、特性和特点,其中着重阐述了航空电机的特色,可作为航空院校电气类专业的教材或参考书。

本书内容精练,在阐明基本原理的基础上,注意反映电机在设计、生产和运行中采用的新材料、新技术,例如设有电子换向、旋转整流器式无刷励磁同步电动机等新的章节,还特别注意了各种电机的内在联系和共性分析。因此本书可以供从事电气技术的工程技术人员及其它工科院校师生学习参考。

航 空 电 机 学

南京航空学院 刘迪吉 主编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张27 625千字

1986年6月第一版 1986年6月第一次印刷 印数:0,001—1,400册

统一书号:15034·3082 定价:4.40元

前 言

本书是北京航空学院、南京航空学院、西北工业大学为适应航空院校教学需要，根据航空工业部教学大纲而编写的。第一版于1980年由国防工业出版社出版（分上、下两册），经过航空院校电气工程专业四年的教学试用，又广泛地听取了航空工业部有关厂所工程技术人员的意见，现决定作一些修改。这次修订再版的《航空电机学》改为一册版，其中大量删减了原版中偏离教学要求的内容，而尽力保持航空电机的特色；在文字上我们也作了较大幅度的删改，并增加了总结篇，但基本维持了原版编写的指导思想和体系。我们期望再版的《航空电机学》能更好地适应120学时左右的航空电机学的教学需要。

本书由南京航空学院刘迪吉同志主编。参加本书再版编写的同志及分工情况为：西北工业大学蒋宗荣（引论篇及第二十四章）、李钟明（第一篇），北京航空学院朱耀忠（第五篇）、王世塿（总结篇）、刘向群（第二篇），南京航空学院朱震莲（第三篇及第二十一章）、陈海镇（第四篇）。全稿由主编作了仔细的修改和统校。本书由南京工学院徐德淦同志主审，参加审稿的还有胡虔生同志，他们提出了许多宝贵的意见。在修订再版过程中，还得到航空工业部教材编审室的指导和支持，编写者所在单位的教师对书稿也提供了很多有益的意见和帮助。在此一并表示衷心的感谢。

书中难免还有许多不当之处，欢迎同志们批评指正。

编 者

目 录

主要符号说明	1
引论	3
0-1 电机在航空工业中的应用与分类	3
0-2 航空电机的工作条件	5
0-3 航空电机的特点与基本技术要求	8
0-4 电机工作的物理基础	12

第一篇 航空直流电机

第一章 直流电机概述	19
1-1 直流电机的基本工作原理	19
1-2 直流电机的结构	21
1-3 航空直流电机的型号	25
小结	25
第二章 直流电机的空载磁路	26
2-1 直流电机的空载磁路	26
2-2 磁路计算的基本原则	26
2-3 气隙磁压降	27
2-4 电机的磁化曲线	29
2-5 磁路计算实例	29
小结	32
第三章 直流电机的电枢绕组	33
3-1 直流电机电枢绕组的构成	33
3-2 单叠绕组	35
3-3 单波绕组	40
3-4 单叠绕组与单波绕组的应用范围及比较	42
3-5 复波绕组与复叠绕组的概念	43
3-6 直流电机电枢绕组的感应电势	44
小结	45
第四章 直流电机的电枢反应	46
4-1 电枢磁势及其磁场	46
4-2 交轴电枢反应和直轴电枢反应	48
4-3 航空直流发电机电枢反应的特点及其对电机的影响	51
4-4 直流电机的电磁转矩	51
小结	53
第五章 航空直流发电机	54
5-1 直流发电机运行时的基本电磁关系	54
5-2 他励直流发电机的运行特性	57

5-3 并励直流发电机的自励及运行特性	60
5-4 串励直流发电机	63
5-5 复励直流发电机	64
5-6 航空直流发电机并联运行	66
小结	66
第六章 航空直流电动机	67
6-1 直流电机的可逆原理	67
6-2 直流电动机的基本方程及功率平衡	68
6-3 直流电动机的机械特性	70
6-4 直流电动机的工作特性	73
6-5 直流电动机的起动	75
6-6 直流电动机的调速和稳速直流电动机	77
6-7 直流电动机的电磁制动	81
6-8 航空直流起动发电机	83
小结	83
第七章 航空直流电机的换向	86
7-1 概述	86
7-2 换向的电磁理论	87
7-3 换向过程产生火花的原因	91
7-4 改善换向的方法	93
7-5 补偿绕组	96
小结	97
第八章 航空直流电机的损耗、发热与冷却	99
8-1 直流电机的损耗分析	99
8-2 电机的发热过程及温升	101
8-3 航空直流电机的冷却	104
小结	108
第九章 直流控制电机	109
9-1 直流伺服电动机	109
9-2 直流测速发电机	112
9-3 直流力矩电动机	114
小结	115

第二篇 航空变压器

第十章 航空变压器概述	116
10-1 变压器的功用及其作用原理	116
10-2 单相变压器的基本结构与分类	117
10-3 航空变压器的型号及其额定数据	119
小结	120
第十一章 单相变压器的空载运行	121
11-1 变压器空载运行时的物理现象	121
11-2 变压器空载电势的分析	122

11-3 变压器空载电流的分析	123
11-4 变压器空载时的等值电路与矢量图	125
小结	126
第十二章 单相变压器的负载运行	128
12-1 变压器负载运行时的电磁关系	128
12-2 变压器负载运行的等值电路	129
12-3 变压器的外特性和效率	131
12-4 变压器的参数测定和试验	132
小结	134
第十三章 三相变压器	136
13-1 三相变压器的结构与连接组	136
13-2 三相变压器的绕组连接法及其组别	137
13-3 三相变压器空载电势波形	138
小结	140
第十四章 特殊变压器	141
14-1 多绕组变压器	141
14-2 自耦变压器	143
14-3 互感器	145
小结	147

第三篇 交流电机的一般问题

第十五章 航空交流电机概述	148
15-1 交流电机的应用和分类	148
15-2 同步发电机的基本原理	148
15-3 感应电动机的基本原理	149
第十六章 交流绕组及其感应电势	153
16-1 导体中的感应电势	153
16-2 元件的感应电势和节距因数	155
16-3 分布元件组的感应电势和分布因数	159
16-4 相电势及绕组因数	162
16-5 三相双层整数槽绕组	162
16-6 三相单层绕组	168
16-7 单相交流绕组	171
16-8 三相绕组的联接	172
16-9 齿谐波电势及其削弱的方法	174
16-10 三相 60° 相带分数槽绕组	179
16-11 三相 120° 相带绕组的特点	183
小结	187
第十七章 交流绕组的磁势	188
17-1 元件的脉振磁势	188
17-2 分布元件组的脉振磁势	193
17-3 相绕组的脉振磁势	195

17-4 三相绕组的旋转磁势	196
17-5 分数槽绕组和 120° 相带绕组磁势的特点	204
小结	206

第四篇 航空同步电机

第十八章 概述	208
18-1 航空同步发电机的基本结构	208
18-2 航空同步发电机的冷却方式	212
18-3 航空同步发电机的型号、额定数据和技术指标	215
第十九章 三相同步发电机对称运行原理	217
19-1 空载磁路和空载特性	217
19-2 同步电机的电枢反应	220
19-3 电压平衡式和矢量图	225
19-4 电枢反应电抗和漏抗	232
19-5 外特性和调节特性	235
19-6 短路特性及短路比	237
19-7 同步电机电抗的测试	239
19-8 相对单位制	243
19-9 同步电机的励磁及无刷同步发电机的特点	245
小结	250
第二十章 同步发电机不对称运行	252
20-1 对称分量法	252
20-2 相序阻抗及其测定	256
20-3 发电机不对称短路分析	260
20-4 单相同步发电机特点	266
小结	267
第二十一章 同步发电机的突然短路	269
21-1 突然短路的基本概念	269
21-2 三相突然短路的分析	271
21-3 三相突然短路试验	281
21-4 不对称突然短路	284
小结	284
第二十二章 同步发电机的并联运行	286
22-1 并联投入的条件和方法	286
22-2 同步发电机与无穷大电网的并联	290
22-3 同容量同步发电机的并联运行	296
小结	297
第二十三章 同步电动机	298
23-1 同步电动机工作原理	298
23-2 自整步同步电动机	303
23-3 步进电机	309
小结	315

第二十四章 永磁电机	316
24-1 概述	316
24-2 永磁材料及其基本特性	316
24-3 永磁同步电机	321
24-4 永磁直流电机	328
24-5 磁滞电动机	329
小结	332

第五篇 航空感应电机

第二十五章 感应电动机概述	334
25-1 感应电动机基本结构	334
25-2 感应电机工作状态及基本工作原理	336
第二十六章 三相感应电动机的运行原理	339
26-1 转子静止时的分析	339
26-2 转子转动时的分析	345
26-3 笼型转子的特点	348
26-4 参数测定	352
小结	354
第二十七章 感应电动机的功率、转矩和特性	355
27-1 感应电动机中的功率关系	355
27-2 感应电动机的电磁转矩	356
27-3 感应电动机的工作特性	363
27-4 高次空间谐波对感应电动机的影响	366
小结	370
第二十八章 感应电动机的起动、调速和制动	371
28-1 感应电动机的起动	371
28-2 感应电动机的调速	374
28-3 感应发电机	380
28-4 感应电机的制动	382
小结	383
第二十九章 感应电动机的电压不对称运行状态及单相感应电动机	384
29-1 感应电动机的电压不对称运行	385
29-2 单相感应电动机	387
小结	391
第三十章 交流控制电机	392
30-1 两相伺服电动机	392
30-2 异步测速发电机	395
30-3 自整角机	396
30-4 旋转变压器	400
小结	404

总 结 篇

S-1 旋转电机的基本问题405

S-2 机电能量转换中的能量关系406

S-3 电机的电磁转矩408

S-4 电机的感应电势414

S-5 电机的电磁功率419

S-6 电机的电压方程和运动方程419

附录 电机学常用量及其单位422

主要参考书422

主要符号说明

1. 基本符号与名称

符号	名称
A	线负荷
a	并联支路对数(直流电枢绕组); 并联支路数(交流绕组)
B	磁感应强度(简称磁感应)
b	宽度
C	常数; 电容
D	直径
E	直流电势; 交流电势有效值
e	电势瞬时值
F	磁势; 力
f	频率; 磁势和力的瞬时值
G	重量
g	重力加速度
H	磁场强度
h	高度
I	直流电流; 交流电流有效值
i	电流瞬时值
J	转动惯量
j	电流密度; 虚数单位
K	常系数; 放大倍数
L	电感; 长度
l	长度
M	互感
m	相数
N	导体数
n	转速
P	功率
p	损耗功率; 极对数
q	每极每相槽数
$r(R)$	电阻
s	面积; 转差率
T	转矩; 周期; 时间常数

t	时间; 齿距; 温度
U	直流电压; 交流电压有效值
u	电压瞬时值
v	速度; 体积
W	匝数; 能量
$x(X)$	电抗
y	绕组节距
Z	齿数; 负载阻抗
z	内阻抗
α	角度; 极弧系数; 信号系数
β	角度
γ	角度
δ	气隙长度
η	效率
θ	角度; 功率角
Λ	磁导
μ	磁导率
ν	谐波次数
ρ	电阻率
τ	极距; 温升
Φ	磁通量
ϕ	磁通瞬时值
φ	相角
Ψ	磁链
ψ	磁链瞬时值; 相角
ω	角频率
Ω	机械角速度

2. 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	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
st	起动
z	齿
δ	气隙
v	谐波

σ 漏磁

3. 主要上标符号及意义

上标符号 意义

$\cdot$ 时间矢量

— 空间矢量

$*$ 标么已归并本基

$'$ 瞬变量

$''$ 超瞬变量

+ 正序

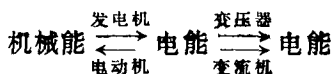
— 负序

0 零序

引 论

0-1 电机在航空工业中的应用与分类

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，或者使一种电能转换成另一种形式的电能。将机械能转换成电能的旋转电机称为“发电机”，反之，将电能转换成机械能的旋转电机称为“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。对于交流电机来说，根据其转速与频率的关系，规定：每秒转数等于频率除以极对数的为同步电机，不等的为异步电机。另外，实现电能与电能之间互相转换的电机（例如变压器），可将一种电压的交流电变换成为另一种电压的交流电；又如变流机，可将直流电能变换成交流电能输出，即



现代飞机的性能、可靠性及战斗力，很大程度上取决于飞机电气化的水平与质量。因此，飞机上电气设备的应用愈来愈多，并已成为提高飞机性能的必要措施。飞机上的电能是由飞机发动机的机械能通过航空发电机转换而来的，它传输到飞机各部位，然后利用各种电动机来操纵控制飞机。图 0-1 画出了某运输机主要电气设备的分布情况。

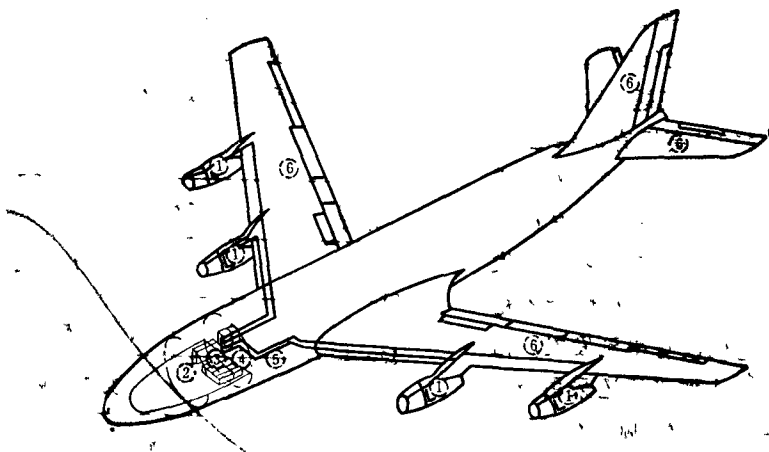


图0-1 某运输机部分电气设备分布图

- 1—交流发电机和恒速传动装置；2—雷达舱中的各种控制电机、主电源箱；
- 3—驾驶舱中各种控制电机；4—控制保护器、调压器、负载控制器；
- 5—变压整流器和蓄电池；6—操纵舵机电动机。

现代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。从飞机上应用的情况来说, 航空电机可归纳为以下几类:

1. 主电源发电机: 有直流发电机和交流发电机, 主要用于飞机的主电源电网、电气防冰系统、备用和专用的交直流供电电源装置。

2. 变压器: 有三相变压器、单相变压器及自耦变压器等, 可用来变换交流电压, 在交流电源系统中应用较多。另外, 在变压整流装置及雷达、无线电装置中需用电源变压器, 各种自动装置和电子线路中参数变换和调整也需大量变压器。

3. 驱动电动机: 主要用于飞机操纵机构, 如襟翼、舵面、力臂调节、起落架收放装置等, 还有专门驱动油泵、阀门等的电动机。

4. 变流机: 在直流供电系统中作辅助的交流电源, 以便供雷达、陀螺仪表及其它系统中的交流设备所用。

5. 控制电机: 有交、直流伺服电动机, 交、直流测速发电机, 旋转变压器, 自整角机及电机放大机等。在飞行控制系统和导航系统、航空仪表、解算装置等设备中, 作伺服控制及转换信号等用。

电机的发明和利用, 是在法拉第发现电磁感应定律之后, 至今约有 150 年历史了。本世纪以来, 随着飞机工业的兴起, 在飞机上应用的电机得到发展, 并很快形成了颇具特色的体系—航空电机。在第一次世界大战以前, 航空电机处在实验阶段, 到 1904 年才有小功率直流发电机装备飞机供照明和电动照像应用, 那时期采用了 6 V 和 12 V 的直流发电机。大约到 1930 年, 飞机上用电设备就发展到有发电机、蓄电池、点火系统、照明、加温、发动机电起动以及起落架和襟翼的电力驱动等装置, 因此出现了由两台 1000 W 直流发电机并联工作的 24 V 飞机直流供电系统。第二次世界大战中, 航空电机技术发展迅猛。飞机上除上述设备之外, 又增加了武器设备、各种自动化装置以及无线电和雷达等。为适应用电量的增加, 应用了多台单机功率达 6 kW 的直流发电机, 并构成 28 V 直流电网, 总功率达 30 kW。到五十年代, 飞机飞行高度提高, 机载用电设备及功率又继续增加, 达到 100 kW。这时, 低压直流供电就碰到了发电机容量、高空性能以及电缆重量等多方面的问题, 从而开始选用 120/208 V 三相交流发电机及交流供电系统。同时期, 也出现 112 V 高压直流供电系统

及频率为 280~560 Hz、200 V 的三相变频交流系统。但因为高压直流电机换向、电磁开关断弧困难, 变频系统中发电机不能并联及用电设备工作性能不稳定等问题, 因而它们没有得到发展。因此, 到目前为止, 小型飞机还采用 28 V 直流系统, 其余多采用恒频、400 Hz、120/208 V 三相交流系统为飞机主电源。事实上, 六十年代前后, 飞机的速度和高度都有较大发展, 如飞行速度超过 2 倍音速、飞行高度达 20000 m 以上。这

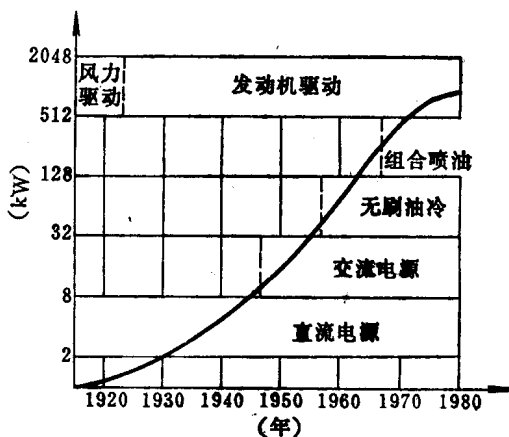


图0-2 飞机电源容量增长及发电机发展情况

时, 电刷磨损加剧, 空气冷却也已成为不可能, 电气设备的可靠性要求提高, 促成了

航空交流发电机的很大发展。在六、七十年代中,无刷结构和油冷(包括循油冷却和喷油冷却)形式在航空电机中得到开发和应用,相继又出现了与恒速传动装置组成一体的组合式发电机。这样,航空电机从体积重量、性能和可靠性诸方面得以进一步适应飞行器不断发展的要求。航空电机的发展,以飞机电源发电机为例,如图0-2所示。

当前,航空电机研究和发展的步伐很快。尤其因为半导体和微电子技术日趋成熟,它们与传统电机的有机结合,使得高压直流系统、无刷直流电动机以及变速恒频发电机等都达到了可以在飞机上应用的阶段。新型材料诸如稀土钴永久磁铁的开发,也使电机的结构和性能得到较大的改进。总之,出于飞行器发展的需要及随着科学技术的不断发展,航空电机的发展很快,并将继续不断开拓新的研究课题。可以预言,进一步研制和应用新的高性能的航空电机,将必然会有力地推动飞行器的发展。这也正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

航空电机处在飞行器中,而飞行器必须能在不同的高空、地区、气象、季节等条件下工作,所以航空电机也必须具备在以上条件下可靠工作的性能,还必须承受得住飞行器在各种飞行条件下(包括各种飞行速度与飞行状态)产生的机械应力与温度等的考验,并要能适应飞行器的特殊要求(包括体积小、重量轻、工作可靠、使用期限短等)。这些工作条件直接或间接地决定了航空电机在结构上、性能上不同于地面电机的一系列特点。所以必须首先将这些条件予以介绍,以便全面地、切合实际地研究航空电机。在这些复杂的工作条件中,对电机有直接影响的有以下几方面。

一、环境温度

我国幅员辽阔,温差很大,最冷的地方可达 -51.5°C ,最热的地方温度可达 $+75^{\circ}\text{C}$ 。对装在飞机内的设备,还要考虑到热辐射和安全系数,并兼顾可靠性及经济性,从而应选取合理的环境温度来考核航空产品,其中最低环境温度取 -55°C ,最高环境温度取 $+60^{\circ}\text{C}$ 。

当然,飞行器在不同高度飞行时,大气温度随高度而变化,这时电机的实际工作环境温度变化也较大。在标准大气参数情况下,在对流层范围内(11km高空以下)大气温度随高度 H 的增加而降低,以公式表示为

$$t = (15 - 6.5h)^{\circ}\text{C}$$

式中 h ——高度, km;

t ——无扰动空气的温度。

在高度11~30km的同温层范围内,气温基本稳定为 -56°C 。其规律可由图0-3表示。

此外,飞行器的附面层、进气管和机身内的温度,除受大气温度影响外,还随

飞行速度 V 的平方成正比变化。因此,航空电机的环境温度和工作温度直接与飞行速度有关,以高度 $h = 25\text{km}$,计算飞行器表面的阻滞温度与飞行速度(以马赫数 Ma 表示)的关系

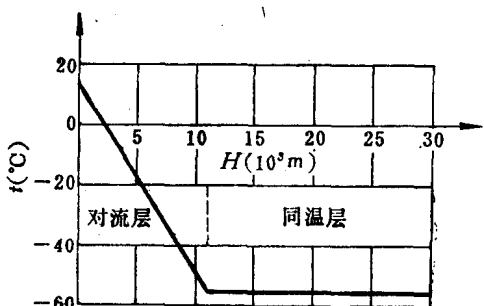


图0-3 标准大气无扰动气流的温度与海拔高度的关系曲线

如表 0-1。由此可见, 当飞行速度在马赫数 2 以上时, 用空气自行冷却电机的方式, 实际上已失去作用, 必须考虑其它冷却方式。由此, 出现了燃油、喷油、蒸发冷却等冷却方式。

表 0-1 阻滞温度与飞行速度的关系

马赫数 (Ma)	1	2	3	4
阻滞温度 (°C)	10~25	120~130	290~330	500~600

温度对电机中各种材料以致电机的性能是有影响的, 低温下可使电机主要材料的物理性质发生变化, 甚至造成永久变形。如导电材料电阻率下降, 绝缘材料开裂、弯曲和分层, 润滑油粘度增加, 橡胶制品硬化, 磁性材料的磁性能改变, 不同材料组合件由于线膨胀系数不同而产生应变等。高温下会加速绝缘材料老化, 润滑油溶解而流出或挥发, 导电材料电阻率增加, 弹性材料的弹性变坏, 结构材料的机械强度下降, 不同的线膨胀系数造成组合件产生应变等。上述因素都会导致电机的电磁性能变化和产生机械故障。目前, 在无刷电机中所用的电子元件, 受温度影响尤为显著, 这也直接影响电机的性能。

由于飞行器高度和速度的急剧变化, 使电机经常遇到高低温的冲击, 例如可能在很短时间内出现 120°C 的温度变化。这种冲击会造成绝缘材料 (漆包线、灌注物、涂层、层压制品、硅钢片压铸件、塑料制品等) 的开裂、分层和弯曲变形。冷空气使零件受到凝露、结霜、冰冻的侵袭, 线膨胀系数不同造成密封接缝的开裂、镶嵌件的松动、零件间配合不正常。上述因素亦会造成电机的电磁性能恶化和机械结构的故障。

二、大气压力、湿度、成份

大气压力随飞行高度的增加而降低, 由地面到 25km 高度, 大气压力约为原来的 1/40 (由 $760 \times 133.322 \text{ Pa}$ 降低到 $18.6 \times 133.322 \text{ Pa}$), 空气的重量密度亦随着降低约 30 倍 (由 1.225 kg/m^3 降至 0.040 kg/m^3)。

在不同地区和不同季节, 空气湿度有很大变化。靠近江河湖海的地区湿度高, 夏季雨季就更高, 高寒或沙漠地区的相对湿度就很低。飞机长期存放与经常起落, 受潮程度亦不同。凡此种种, 对电气性能和机械性能都会造成很大影响。尤其我国南部地处亚热带、热带, 气温较高, 湿度亦较大, 在高温高湿度下长期工作, 上述影响就更为严重。我们知道, 飞机需经常起飞着陆, 电机在地面上经受高温高湿度的侵蚀, 又很快到达高空, 处在低温的情况下, 原来吸收大量水汽的材料就产生凝露、结霜、冰冻等现象而可能造成短路及材料的龟裂和裂缝, 甚至引起机械故障。根据我国地理条件, 规定航空电机湿度考核标准为: 温度在 40°C 时, 湿度为 $95 \pm 3\%$ 。

飞行器要在高空、低空、海上、大陆到处飞行。在不同地区和不同高度, 大气成份也不同, 如在高空空气中臭氧成份增多, 湿热地带大气中有霉菌, 海上大气中有盐雾, 沙漠上有砂尘, 这些对电机工作性能都会造成不同的影响。

归纳起来, 这些大气性质的剧烈变化, 对电机工作的影响主要有以下几方面。

1. 绝缘材料的绝缘性能变坏, 耐压程度下降。空气的介电强度下降, 容易引起击穿造成电弧放电。在绝缘距离不够的情况下, 甚至引起电晕现象。
2. 由于空气稀薄, 电机散热不良, 温升增加易引起绝缘老化。尤其是飞机在高速

高空飞行时,电机环境温度提高而散热能力又下降,这时电机在最不利的条件下工作,若无特殊措施,将使电机过热而烧毁。

3. 由于空气稀薄使电刷磨损加剧,火花增大,直流电机换向变坏,甚至产生环火,导致电机不能正常工作。

4. 金属零件在水汽、盐雾、霉菌等作用下产生腐蚀,在不同的两种金属接触处由于电化作用腐蚀尤为严重。沙尘附着在绝缘材料表面,经过吸湿后,将会降低材料的性能。如果沙尘进入电气设备的活动部分或间隙中,则将影响电气产品的性能,严重时可能造成产品的机械故障。

三、机械过载

航空电机在使用过程中的机械过载主要有振动、冲击和恒加速度三方面。航空电机绝大部分都是旋转机械,转速高、空气隙特别小,主发电机一般又与发动机直接连接,因此发动机的振动、抖动以及飞行器作机动飞行(上升、下降、特技动作等)所产生的加速度和射击时产生的振动等都将直接给航空电机带来很大的机械应力。尤其是当部件发生谐振时,破坏性更大。因此在设计电机的结构与进行强度、刚度计算时,必须特别注意。

产生振动的原因很多,主要来源是发动机及气动力颤振。例如,作为振源,一般活塞式发动机振动频率为 $2\sim 4000\text{Hz}$,振动加速度可达 $20\sim 50\text{g}$;喷气发动机的振动频率为 $2\sim 4000\text{Hz}$,振动加速度为 $50\sim 30\text{g}$;火箭可出现 $2000\sim 10000\text{Hz}$ 、振动加速度可达 $50\sim 250\text{g}$ 的振动。飞机在开炮射击时,在局部地区则可产生 100Hz 、运动加速度达 $50\sim 75\text{g}$ 的局部振动。过剧的振动可能对航空电机造成一系列不良后果,诸如零部件相对位移、工作间隙变化、接触压力不稳定、零部件变形、紧固件松动、软磁材料的导磁率降低、永磁材料去磁、焊接脱落、绝缘损坏。当零件发生谐振时,带来的危害性更大,甚至使产品失效、结构件损伤、个别零部件折断,电机将不能正常工作。因此,航空电机要根据不同的飞机和发动机条件,也要根据不同的安装形式和位置来确定考核产品抗振稳定性的标准。

飞行器在飞行过程中,产生冲击的现象很多,这里只以常遇到的着陆冲击为例加以说明。飞机在着陆时,常出现 60周/分 的颠簸冲击,小型飞机冲击过载可达 $4\sim 6\text{g}$,大型飞机可达 10g 。一般电机产品,根据技术条件规定,在使用过程应能承受 10 千次上述冲击的考验。导弹发射时,冲击过载可达 200g 以上,但作用时间很短,约在 $10\sim 30\text{ms}$,所以用在导弹上的电机应能承受上述冲击过载 $2\sim 3$ 次的考验。冲击对电机的影响与振动类似,但有时更严重些。

恒加速度主要在飞机爬高、转弯、俯冲等特技飞行时较为严重,歼击机可达 9g ,持续两分钟;轰炸机为 4g ,可持续 20 分钟;导弹发射时,可达 $5\sim 20\text{g}$,但持续时间极短。恒加速度对电机的影响,主要给电机加上一个附加力矩,引起间隙分配改变与变形,所以对电机零部件的机械强度与结构上应作足够的考虑。

以上一些因素中,环境温度、大气压力、空气的湿度与成分主要属于飞行器的环境条件,而机械过载,则属于飞行器的工作条件。这些条件都直接影响航空电机的性能与结构要求。所以它是制订航空电机的基本技术要求的依据之一,也是设计、试制、生产、使用和维护航空电机时均应重视的条件。每台航空电机,在试制、生产和维修后,都必