

航空直流电机設計

А. И. 別尔金諾夫, Г. А. 李茲尼克著



國防工業出版社

航空直流电机設計

A. И. 別尔金諾夫、Г. А. 李茲尼克著

刘占信、范曾洪、李国忠、吳明譯

余奕、張百齡校



國防工業出版社

1962

內 容 簡 介

本书闡述航空直流电机（发电机和电动机）的电磁、热和通風的計算方法和此类电机結構的主要部件及其零件的机械計算。书中引証了电机主要部件的工作图紙，例題以及設計数据。

此书可供航空学院电机系学生作課程設計和毕业設計时参考，同时对有关专业的技术人员亦有所裨益。

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行 各地新华书店經售

*

850×1168 1/32 印張 14 1/4 353 千字

1962 年 4 月第一版

1962 年 4 月第一次印刷

印数：0,001—3,100 册 定价：(11-8)2.60 元

統一书号 15034·422

目 录

前言	7
緒論	9

第一篇 航空直流电机电磁計算

第 一 章 技术要求	14
§ 1. 航空电机的工作条件	14
§ 2. 对航空电机的技术要求	15
§ 3. 設計用的主要原始数据	16
第 二 章 基本計算方程式	18
§ 1. 基本計算方程式的推論	18
§ 2. 电樞直徑和长度的計算	29
§ 3. 在短时和反复短时运用下的繞負載和电流密度	33
第 三 章 电樞繞組	38
§ 1. 直流电机繞組的基本概念	38
§ 2. 电樞繞組的計算	42
第 四 章 磁路	48
§ 1. 磁路尺寸的計算	48
§ 2. 磁路的計算	56
第 五 章 激磁繞組	63
§ 1. 負載时激磁磁化力的計算	63
§ 2. 补偿繞組	67
§ 3. 激磁繞組的計算	68
第 六 章 整流和换向极的計算	74
§ 1. 换向器和电刷	74
§ 2. 航空直流电机的特点和整流的檢查	76
§ 3. 换向极尺寸的选择	82
§ 4. 换向极繞組	92

第七章 损耗和效率	93
§ 1. 有效材料重量	93
§ 2. 损耗和效率	95
第八章 工作特性曲线	98
§ 1. 发电机和电动机的工作特性曲线	98
§ 2. 电动机的起动和制动时间	104
§ 3. 旋转部分的惯性力矩	107
第九章 电磁离合器的计算	109
§ 1. 电磁离合器的构造和作用原理	109
§ 2. 电磁离合器尺寸的选择	113
§ 3. 离合器的激磁绕组	116

第二篇 电机结构的主要部件及其机械计算

第十章 电机设计的一般问题	121
§ 1. 一般概念	121
§ 2. 机械特性和容许应力	125
§ 3. 结构总配置图	128
第十一章 轴和电枢铁心	157
§ 1. 轴的结构要素	157
§ 2. 轴的机械计算	163
§ 3. 电枢铁心结构要素	186
§ 4. 电枢铁心的机械强度	192
第十二章 电枢绕组	196
§ 1. 电枢绕组结构尺寸	196
§ 2. 电枢绕组的固定	205
第十三章 换向器的结构和计算	209
§ 1. 换向器的结构	209
§ 2. 换向片尺寸的初步选择	218
§ 3. 换向器强度计算	220
§ 4. 拱形圆柱换向器的机械强度计算	225
§ 5. 换向器的温差应力	246
§ 6. 换向器的计算例题	252

第十四章 壳体、端盖、主极和激磁绕组 263

- § 1. 壳体 263
- § 2. 端盖 267
- § 3. 主极结构的要素 270
- § 4. 主极固定的机械计算 277
- § 5. 激磁绕组 281

第十五章 轴承 288

- § 1. 结构元件 288
- § 2. 滚珠轴承的计算 294

第十六章 导电部分 302

- § 1. 电刷 302
- § 2. 刷架 306

第三篇 电机的冷却和温升

第十七章 航空电机的冷却 315

- § 1. 一般概念 315
- § 2. 电机通风计算 318
- § 3. 空气动力压力的计算 321
- § 4. 通风管路的空气动力阻力 327
- § 5. 风扇 333
- § 6. 电机的空气消耗量 339

第十八章 气冷式电机的热计算 340

- § 1. 一般概念 340
- § 2. 冷却空气温升 342
- § 3. 传导散热 347
- § 4. 表面散热 349
- § 5. 热的等效图 352
- § 6. 简要热计算 359

第四篇 航空直流电机计算例题

第十九章 航空并激发电机的计算 365

- § 1. 原始数据和基本尺寸的选择 365

§ 2. 电枢绕组的计算	366
§ 3. 导磁体的尺寸	367
§ 4. 换向器和电刷	371
§ 5. 均压连接綫	373
§ 6. 磁路計算和空載特性曲綫的繪制	373
§ 7. 負載下的激磁磁化力	377
§ 8. 整流情况的檢查和換向極的計算	381
§ 9. 发电机的有效材料重量、損耗和效率	388
§ 10. 发电机的工作特性	391
§ 11. 換向極等于主極全数时的发电机計算方案	395
第二十章 航空串激可逆电动机的計算	397
§ 1. 原始数据及主要尺寸的选择	397
§ 2. 电枢绕组的計算	400
§ 3. 导磁体尺寸和磁路計算	402
§ 4. 換向器和电刷	410
§ 5. 有負載时的激磁磁化力	412
§ 6. 整流的檢查	415
§ 7. 有效材料的計算和效率	417
§ 8. 工作特性曲綫	420
§ 9. 电磁連接-制動离合器的計算	423
附录	433
参考文献	456

前 言

直流电机在航空上获得了广泛的应用，它已成为飞行器的电气系统中不可分割的一部分，而且实际上也是航空自动化各种系统中不可分割的一部分。

苏联航空电机制造业现已达到了高度的发展水平。设计和制造了多种航空直流电机。航空电机设计是将学生培养成电机工程师的极重要的一门课程。

“航空直流电机设计”这本书包含航空电机教研室所推荐的课程设计和毕业设计所需的资料。

在本书的第一篇，提出了选择航空直流电机主要尺寸的基本见解并叙述了一般计算方法。在介绍电磁和机械负载时，考虑到航空电机工作规范的特点及其冷却系统。

由于在自动化系统中广泛应用电动机，因而举出了电磁制动离合器的计算公式。

在第二篇中简单地说明了几种主要类型的航空直流电机的结构并叙述了主要结构部件的机械计算；特别着重叙述了换向器，因为它能决定整个电机工作性能。

根据航空电机的工作条件，也介绍了材料、电刷和轴承等的参考数据。

在第三篇中叙述了在高空条件下航空电机的通风计算和热力计算的理论基础。

第二、第三篇也可以在设计交流电机时应用。

第四篇中举出了两个计算例题，在例题的计算中应用了以前叙述的电磁计算方法。

第一、四两篇为著者两人合写的，第二、第三篇为 А. И. 别尔

金諾夫所写。

作者非常感謝 Ф. И. 高尔果夫斯基在編著本书时給予的帮助。

作者欢迎并感激对本书提出意見。

緒 論

在航空事业中直流电机获得了广泛的应用。它在飞行器上既能做为电源——发电机，又能做为傳动各种机构的电动机。

目前，具有数个发动机的飞机，其直流电源的总设备功率已达到 100 千瓦，并有繼續发展的趋势。一台現代航空直流发电机的最大功率已达到 30 千瓦。航空直流发电机通常由主航空发动机傳动。在主发电机发生故障时做为飞机电源的应急发电机由輔助发动机带动旋轉。

苏联采用 TGP 系列直流发电机 (TGP 指轉速范围增大的飞机发电机)，其額定功率为 1000、1500、3000、6000、9000、12000 和 18000 瓦。航空发电机一般为并联激磁。各种发电机，除 TC-1000 外，都是用外部空气强迫通风冷却。TC-1000 和 TC-1500 型发电机是用內装风扇自行通风冷却的，但 TC-1500 的功率用强迫通风时为 1500 瓦，而在用自行通风时为 1000 瓦。

航空发电机有时做为起动发电机。这种发电机于发动机起动机时，做为起动电动机，然后做为发电机使用。起动发电机为复激式。

在現代飞机上装有 200 个以上的直流电动机，其功率由不到 1 瓦至 5~10 千瓦。电动机用来傳动各种机构：着陆襟翼机构、活动水平安定面机构、栅格式减速板机构、气冷式发动机飞机上的发动机罩魚鳞板机构、滑油散热器和水冷散热器、起落架信号灯、汽油-滑油泵、火力装置和变矩空气螺旋桨，而且也可以做为起动机，用以起动发动机。

航空电动机一般借助于减速器和离合器与工作机构联結。有时离合器上速有制动装置，这种离合器称做制动离合器。电动机

断开后,制动装置减小工作机构的滑动。滑油-汽油泵的电动机一般直接连接而没有离合器和减速器。

根据工作规范,直流电动机分为持续运用、短时运用和反复短时运用的。在飞机中反复短时运用和短时运用的电动机应用范围最广。

电机激磁线路的选择与其工作规范有关,它主要取决于对电动机特性的要求。例如起动频繁的反反复短时运用的电动机宜采用串激激磁;如果要求电机特性曲线“恒定”时,可采用并激,同时为了易于起动,可用匝数不多的串激线圈。持续运用的电动机除少数外,多采用并激激磁。

航空电机,其中包括直流航空电机,原理上和地面装置上使用的电机相同。但是航空电机的相对重量(公斤/千瓦)比地面装置上的电机要轻得多(表1-1)。

表 1-1 航空和地面电机几项数据的比较

数 据	电 机 的 型 别					
	感 应 电 机		同 步 电 机		直 流 电 机	
	地 面	航 空	地 面	航 空	地 面	航 空
功率 P_n (千瓦)	1	1	15	15	25	25
主极数	4	4	4	6	4	8
频率(赫芝)	50	400	50	400	66.7 ^①	267 ^①
相对总重量(公斤/千瓦)	16	2.0	17.8	1.3	13.2	2
重量比	8.0		13.3		6.6	

① 电机电枢中的反复磁化频率。

航空电机较地面电机相对重量小的原因如下:

- 1) 航空电机较地面电机的使用期限短很多,所以在航空电机中容许有较高的电、热和机械负载值;
- 2) 由于电机使用期限缩短,电机的转速可增高;
- 3) 使用优质的绝缘、磁性和结构材料,可提高电、磁、热和机

械負載值；

4) 採用絕緣薄層的導線(以 ПЭЛШО, ПЭВ, ПЭВП 和 ППД 代替 ПЭЛВО 和 ПВД)；

5) 使用更強的電機冷卻方法。

但是航空電機因其負載增加而相對重量減小，會使電機的損耗增大，因而使電機的效率降低。當效率過於降低時，則“飛行”效率增大，因而電機的“飛行”重量也增大；在計算持續運用的電機時必須考慮到這一點。

電機設計是分析不定式的課題，其未知數的數量總是超過可以列出求算的方程式的數量。

電機設計包括許多複雜的綜合問題：電、磁、熱、通風和機械等、方面的問題。當設計時，在電磁、熱和機械方面應充分利用所採用的材料，這對於航空電機來講尤其重要。

利用材料，在狹義上，可由電機繞組中的電流密度、磁路中的磁通密度和旋轉部分的圓周速率來表示。但在電機工業實際工作中，採用間接的材料使用指標，即：

電樞表面的電負載用線負載 A 來表示，在現代航空電機中，電負載值的範圍很大，可達到 500 安/厘米；

磁負載用空氣隙中的磁通密度 B_g 來表示，根據電機的功率大小，磁負載值的範圍很大，在大電機中達到 8000~9000 高斯；

熱負載用比損耗(瓦/厘米²)，即電樞、激磁繞圈、換向器和機體的每 1 厘米² 表面上的損耗量(瓦)來表示；對功率、工作規範、絕緣和冷卻方法不同的電機，比耗損值的变化範圍也很大，可達到 10 瓦/厘米² (以後將說明電樞的比損耗和線負載與電樞繞組中的電流密度的乘積成比例)；

機械負載用電機旋轉部分的圓周速率(米/秒)來表示，在現代直流電機中，圓周速率的極限值為 60 米/秒。

對電機設計師可能提出下列任務：

- 1) 設計出功率和轉速不同的同类型电机的系列;
- 2) 設計个别新型电机;
- 3) 設計已知型别的尖端电机;
- 4) 設計能利用現有冲模冲制鉄心迭片的个别电机;
- 5) 重新計算現有电机,改变电压、轉速和功率;
- 6) 按已知的尺寸驗算电机,以确定其参数。

在前三項任务中需計算出电机的主要尺寸,在其余各項任务中,主要尺寸則是已知的。

同类型的电机系列,特别是地面电机系列的設計方法,与个别电机的設計方法大不相同。

当設計电机系列时,由于要考慮生产和使用条件以及电机的生产量,必須在选择电机最有利尺寸方面放寬些要求。与此相反,設計个别电机时,尤其是大量生产的,必須力求更好地利用电机的材料。在本书中介绍的,只是个别电机的設計方法,对电机系列的設計沒有加以研究。

在我国电机制造的实践中,电机的設計分为三个阶段:草图設計,技术設計和施工設計。

草图設計包括电、热、通风和机械方面的計算,以及整个电机与在本設計中在原理上属于新組合件的結構示意图。

技术設計包括繪制电机的施工圖紙,制造和試驗試制的电机,按試驗数据校正設計,以及根据試制电机的制造和試驗确定結構和工艺的技术經濟定額。

技术設計批准后,即进一步繪制施工圖紙,編制工艺規程和研究生产装备,这是整个施工設計的内容。

根据教学大綱所規定的范围进行的課程設計为草图設計。学生应利用在电机設計理論和工艺規程,以及生产的經濟性方面所取得的知識,独立設計出滿足各种不同要求的电机,这些要求有时互相矛盾,例如,要求重量小,而效率高,工作可靠而結構与制造簡

单等。

制造电机应采用标准的材料、零件和结构组合件,而且要便于施工且经济性高,此外还须完全符合技术要求,而且在极不相同的飞行条件下能可靠地工作。

第一篇 航空直流电机电磁计算

第一章 技术要求

§1. 航空电机的工作条件

航空电机,其中包括直流电机,一般都应当在以下条件下正常工作:环境温度由 -60° 至 $+50^{\circ}\text{C}$, 环境相对湿度至 98%; 紧固地方的振动频率为 3200 周/分, 紧固地方的瞬时振动频率为 900 周/分(有可能提出更严格的要求)。

从以上要求可以知道,航空电机是在严格而复杂的条件下工作的。事实上,随着飞行高度的增加,空气的压力和密度在逐渐减小,以至电机的冷却条件变得更坏。当外界的压力、温度和湿度改变时,电机所用材料的抗电强度和机械强度就会改变。高度升高时,发弧时间增加,因而整流变坏;此外,因为空气密度减少,换向器上的氧化层还原得不好,以致换向器和电刷的磨损急骤地增大(例如,在一万米高空上,电刷的磨损一般为地面时的 30 倍)。在低温下,由于润滑油冻结,也会产生很大的阻力矩,使电动机产生过载现象。

电机在振动和抖动的条件下工作,会削弱个别部件和零件的连接性,破坏安装导线的钎焊,以及使整流变坏等。

根据上述情况,设计航空电机时,必须考虑到这些特殊工作条件。例如,为了避免电刷在高空磨损得过快,必须使用特殊高空电刷;为了保证电动机在低温下工作,则须有相当大的起动力矩;为了在振动和抖动条件下工作,要采用特种方法,以保证电机的各部件在该条件下能可靠地进行工作,如选择牢固的安装位置和采用

特种紧固方法等。此外,为了减少火花,可以预先规定提高电刷弹簧的单位压力,及使用特殊结构的刷架和电刷。

§2. 对航空电机的技术要求

除了对所有的航空电气设备所提出的一般要求以外,对航空直流电机还提出一系列的特殊技术要求。

对航空直流发电机的基本技术要求

1) 在正常的大气压力下,电机于额定规范下工作后,电枢绕组的温度应不超过 155°C , 激磁绕组和换向极绕组—— 155°C , 换向器—— 175°C 。

2) 发电机应能承受为额定电流 150% 的过载电流 2 分钟;以及为额定电流 200% 的过载电流 5 秒钟。

3) 发电机应能承受 2 分钟高于最大转速 20% 的过速。

4) 绕组、换向器、刷架和导电连接部分于热状态下应能承受得住抗电绝缘强度试验(相对于机壳):额定电压为 30 伏的发电机用频率 50 赫芝的交流电于 500 伏电压下试验 1 分钟,额定电压 60 伏以下的发电机在 1000 伏电压下试验 1 分钟。

5) 在热状态下进行耐潮试验(于相对湿度 98% 下试验 48 小时)后,发电机的绝缘电阻应不小于 1 兆欧。

6) 发电机的机壳应用接合盘与传动机构连接。电机轴凸出端的形状和尺寸应符合苏联国家标准(ГОСТ)或技术条件(TY)的要求。

7) 发电机的轴应有韧性。

对于个别型别的航空发电机可能提出特殊补充要求,例如:

对冷却方法要求强迫通风或自行通风,或二者具备(强迫通风的发电机上安装风扇,以保证发电机在没吹风的地面上工作),以及液体冷却等;

要求能安装成任意的、水平的或者垂直的位置等。

此外,发电机可以做为起动机,用机上蓄电池或机场电源启动飞机发动机。对于这种发电机提出了许多的特殊要求。

对航空直流电动机的基本技术要求

1) 在额定电压和正常环境温度下,电动机的转速与额定值的偏差不超过 $\pm 10\%$ 。

2) 在正常大气压力下,电动机在额定规范下工作后,其各部分的温度应不超出下列数值:电枢绕组 155°C ; 激磁绕组 155°C ; 换向器 175°C 。

3) 绕组、换向器、电刷架及导电连接部分于热状态下应承受得住(相对于机壳的)抗电绝缘强度试验,额定电压为 30 伏以下的电动机用频率 50 赫芝的交流电于 500 伏电压下试验 1 分钟,额定电压为 60 伏以下的电动机则需在 1000 伏电压下进行试验。

4) 于热状态下进行耐潮试验(在相对湿度 98% 下,试验 48 小时)后,电动机的绝缘电阻应不小于 1 兆欧。

5) 电动机的机壳与传动机构用接合盘连接在一起,机壳的尺寸应符合苏联国家标准(GOCT)或技术条件(TY)的要求。

6) 电动机轴凸出部分的形状和尺寸应符合苏联国家标准(GOCT)。

此外,对各种型别的航空电动机还可能提出特殊的要求,例如在结构上可以要求:封闭式、敞开式、气密式和防爆式等。在冷却方法上要求内部和外部的自行通风,强制冷却和液体冷却等。电动机在飞机上的安装方法,要求呈水平位置、垂直位置或任意位置。

§ 3. 设计用的主要原始数据

发电机

1) 发电机的功率 P_n 。

2) 电压 U 。

3) 转速 n 。