

特种交流电机设计

〔苏〕B.A.巴拉古洛夫 著

朱耀忠 许巧保 译 秦钢 校

国防工业出版社

TM 34
B 09

290183

特种交流电机设计

[苏] B.A.巴拉古洛夫 著

朱耀忠 许巧保 译

秦 钢 校



国防工业出版社

内 容 简 介

本书是苏联高等学校的大学生教材。书中详细阐述了
几种特种交流电机的计算和设计特点。这些电机广泛地应
用在飞机和汽车上的独立电气设备系统和移动式电气设备
中。

书中还对个别的发电机提供了在电动机工作状态时的
特性计算。对设计中的一些重要计算问题从物理概念上进
行了解释。

本书可供电机、电力传动、飞机与汽车、拖拉机电气
设备专业的学生用，也可供有关科技人员参考。

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В. А. БАЛАГУРОВ

«ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1982

*

特种交流电机设计

〔苏〕 В. А. 巴拉古洛夫 著

朱耀忠 许巧保 译

秦 钢 校

责任编辑 米德友

*

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

*

850×1168 1/32 印张 9⁵/₈ 254千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷 印数：10,001—2,350册

ISBN7-118-00240-2/V23 定价：2.20元

科技新书目151-121

译 序

本书所介绍的几种特种交流电机，广泛应用在航空电源系统中。书中内容主要反映了苏联多年来在航空交流电机方面的研制成果，对我国的航空电机设计和制造有一定的参考价值。本书可作高等学校有关专业的教学参考书。

前言及第一章至第三章由许巧保同志翻译，第四章至第六章及附录由朱耀忠同志翻译，全书由秦钢同志校阅。在原书中已发现的错误，译文已作了更正，一般不再单独注明。

由于我们水平有限，书中存有不妥甚至错误之处，请读者批评指正。

译 者



前 言

目前，在移动电站、飞机和汽车上装备的独立电气设备系统中，广泛采用交流电。因此在有关电机专业的电机设计课程大纲中，特种交流电机，尤其是特种交流发电机的计算和设计问题占有很重要的地位。

独立电气设备系统的突出特点是电机的结构特点和特性多种多样，其原因是对电机所提的要求和运行条件不相同。因此采用了大量的，不仅结构不同而且作用原理和磁系统形式也不相同的发电机。近年来无接触式发电机获得了广泛地应用，它们有旋转整流器式的，感应子式的，永磁式的，复合励磁式的，异步式的，内封闭导磁体式（塞克辛）的，串级式的等等。

很多情况下电机工作在发电机和电动机状态，这对其参数和特性提出了一定的附加要求。属于这种电机的有异步电机、感应子电机和永磁同步电机等等。

在设计特种交流电机方面实际上没有任何教科书。在学习课程，以及在做课程设计和毕业设计时，学生只能用普通电机的教材，在这种教材中没有讲述独立电气设备系统用的特种电机。由于特种电机的设计和计算是与结构及作用原理有关，所以它们的设计方法彼此大不相同，本书只阐述下面几种交流电机设计时的一些问题：径向磁通交流发电机，整流器发电机，异步电机，内封闭导磁体式（塞克辛）同步发电机和感应子发电机等。这些电机的热计算在本教材中没有列入，但在参考文献〔1〕中有详细的叙述。而电机的机械计算在参考文献〔22〕和莫洛佐夫的《直流电机计算》（А. Г. Морозов《Расчет электрических машин постоянного тока》1977）两书中已经阐明。

本教材填补了现有电机专业电机设计教材中的空白。

茹可夫斯基空军军事工程学院 (ВВИА им. Н. Е. Жуковского) 的科学技术博士兹特罗克 (А. Г. Здрок) 教授对本书手稿提出了许多宝贵意见和愿望, 作者表示由衷的谢意。

作 者

目 录

第一章 特种交流电机的应用和设计	1
§ 1.1 交流电在独立电气设备系统中的应用	1
§ 1.2 独立电气设备系统中交流电机的分类	3
§ 1.3 电磁式特种交流电机的基本参数和结构	4
§ 1.4 独立电气设备系统中交流电机的设计特点	14
第二章 径向磁通交流发电机的电磁计算	16
§ 2.1 发电机设计的任务和步骤	16
§ 2.2 发电机主要尺寸的确定	17
§ 2.3 电枢绕组的设计和布置	31
§ 2.4 发电机导磁体尺寸的确定	66
§ 2.5 阻尼绕组计算	73
§ 2.6 发电机磁路计算	75
§ 2.7 负载时磁势计算	87
§ 2.8 励磁绕组计算	91
§ 2.9 单相发电机计算特点	100
§ 2.10 同步发电机参数和时间常数	103
§ 2.11 同步发电机特性	109
§ 2.12 发电机有效材料质量的确定	112
§ 2.13 发电机损耗和效率的确定	113
第三章 整流器发电机的计算特点	121
§ 3.1 整流器发电机的应用	121
§ 3.2 接整流负载的同步发电机工作特点	124
§ 3.3 整流器发电机的计算特点	138
第四章 异步电机设计	145
§ 4.1 异步发电机工作过程的特点	145
§ 4.2 异步电机主要尺寸的确定和计算	148
§ 4.3 定子和转子槽数的选择	154

§ 4.4	定子和转子绕组的有效电阻和电抗	160
§ 4.5	励磁电容器的选择	163
§ 4.6	异步电机在电动机状态下的磁路计算和空载电流的确定	165
§ 4.7	计算和建立异步电机的磁特性	169
§ 4.8	异步电动机工作特性的建立	170
§ 4.9	异步电机的损耗和效率	176
§ 4.10	异步发电机外特性的建立	178
§ 4.11	用辅助磁化电枢调节电压时的外特性计算	181
§ 4.12	辅助磁化绕组的计算	183
第五章	内封闭导磁体无接触式同步发电机设计	185
§ 5.1	内封闭导磁体式发电机的结构特点和工作过程	185
§ 5.2	内封闭导磁体发电机主要尺寸的确定	190
§ 5.3	转子磁路尺寸和励磁绕组支架尺寸的确定	196
§ 5.4	磁极漏磁导和支架漏磁导的计算	204
§ 5.5	磁路验算	209
§ 5.6	发电机参数计算	217
§ 5.7	内封闭导磁体发电机的极限容量	220
第六章	感应子发电机设计	223
§ 6.1	感应子发电机的磁系统和结构	223
§ 6.2	感应子发电机工作过程的特点	230
§ 6.3	电机型式和齿层的选择	238
§ 6.4	发电机主要尺寸和磁路尺寸的确定	248
§ 6.5	电枢绕组设计	256
§ 6.6	磁路计算	261
§ 6.7	电枢绕组的参数和电压矢量图	271
§ 6.8	发电机的损耗和效率	277
附录	旋转磁极式发电机电磁计算	279
参考文献		301

第一章 特种交流电机的应用和设计

§ 1.1 交流电在独立电气设备系统中的应用

在移动电站、运输装置、飞机和汽车上以及其他场合广泛采用交流的独立供电系统。采用这种系统的原因如下：

交流电的通用性好。交流电易于进行各种电压变换和频率变换，同时能得到各种等级的电压；采用交流电时可选用较高的机上电网电压 120/220 伏或更高，这就能使机上电网的质量减小；交流电能较容易用整流器转换成直流电，能在发热温度高达 +150℃ 下工作并有较高的效率，在用碳化硅整流器时可达 +400℃。

采用交流发电机能保证对大功率用电器供电。交流发电机的单机容量能做得很大。例如系列生产的航空发电机额定容量达 120 千伏·安。实际上，交流发电机额定容量能够到 200 千伏·安或更大。航空直流发电机的极限容量由于有电刷和换向器部件而不超过 18~24 千瓦。

交流发电机质量轻。表征现代航空发电机特征的比质量 M_{yn} 的数据列于表 1.1 (当转速 $n = 6000 \sim 8000$ 转/分)。

表 1.1

P_n , 千伏·安	10	15	20	30	40	60	90	120
M_{yn} , 公斤/千伏·安	1.2~ 1.3	1.0~ 1.2	0.95~ 1.0	0.9~ 0.95	0.7~ 0.85	0.58~ 0.65	0.5~ 0.55	0.5

依靠选用高的转速、较高的电磁负荷值、高效率冷却系统以及采用新的磁性材料，使得这种航空发电机具有较小的比质量。交流发电机中没有直流电机中必不可少的电刷-换向器部件。采用喷油冷却系统能使发电机比质量减小到 0.3~0.35 公斤/千伏·安。

装在移动电站的由燃气轮机传动的高速发电机（转速达100000转/分）也有这样的比质量值。

汽车及拖拉机中的交流发电机的质量比相同容量的直流电机的质量减少百分之四十到百分六十，所以铜和电工钢的消耗也相应减少。

交流电机结构简单，运行可靠。它没有复杂而不可靠的换向器元件。交流电机可做成无接触式。无接触式发电机有下列型式：旋转整流器式，永磁式，复合励磁式，感应子式，异步式，内封闭导磁体式（塞克辛），爪式等等。实际上所有上述电机都可用作电动机。异步笼型电机、有起动绕组的永磁同步电机、磁滞电机用作电动机时，无需任何附加设备和控制线路，即可直接用于传动装置。同步和感应子电机用作电动机时需采用相应的控制线路。

无接触式交流电机在环境温度较高，大气稀薄并有杂质的恶劣条件下运行，工作非常可靠。在一些特殊的运行条件下，很多场合只能采用无接触式电机。

交流电机使用期限可以很长。无接触式电机的使用期限实际上取决于轴承的寿命。

交流发电机的效率比直流发电机的效率高。永磁式交流发电机的效率最高，因为它没有励磁损耗并使发电机的冷却问题简化了。

采用交流发电机易于解决额定电压为127伏或230伏的交流电器的直接供电问题，例如照明灯，加热器，专用电器和生活电器等的供电。

使用交流发电机时可采用较简单又更可靠的调节装置，例如，在汽车上采用功率半导体整流器时就无需采用反流继电器；在许多场合下不要限流器。

供电系统可以是单相的或三相的。基本供电系统选用较复杂的三相系统，其发电机和电动机的质量较小，特性较好和可靠性高。

交流供电系统也有一定的缺点。

在恒频系统中,当由喷气涡轮机驱动时,需采用专门的、复杂的液压机械式传动装置和电磁式传动装置。

实现交流发电机的并联工作有困难,因为这时要求发电机同相位旋转。转速和电压调节系统,有功功率和无功功率的分配均变得更为复杂。

用于各种传动设备的异步电动机需要较大的无功功率,而最大转矩不大。电动机转速的调节也较困难。

对于原动机(活塞式,喷气式)不用直流起动-发电机或直流起动机的方法起动时,需采用别的起动方法。目前,交流起动-发电机的原动机起动系统还相当复杂而且不经济。

§ 1.2 独立电气设备系统中交流电机的分类

独立电气设备系统中应用的交流电机(发电机和电动机),可按不同特征分类。

按用途分:汽车及拖拉机用,飞机、直升机用,移动电站用等等。

按输出和输入(对电动机)参数分:以相数 m 分有单相,三相,五相,六相;以频率 f 分有400, 500, 1000, 2000赫或更高;以发电机输出电压分有线电压 U_n 和相电压 U_ϕ ;或以输出功率分;或以输出转矩和转速(对电动机)分。

按磁路结构分:径向凸极式;径向隐极式;爪型凸极式;磁通换向式(感应子式);异步式;塞克辛式(有径向和轴向磁极);爪式;永磁式。前三种具有电磁励磁的发电机为接触式,而其余都是无接触式。如果励磁电路中采用带旋转整流器的串级结构,则径向凸极电磁励磁的发电机也可做成无接触式。

按励磁方法分:他励式,励磁绕组由机上电网供电;他励式,由装于发电机中的专用励磁机供电;自励式;永磁式(永磁发电机);复式励磁(永磁式和电磁式相结合)。

按冷却方法分:自然冷却式;自通风式(轴上装风扇);外部冷却式;利用迎面气流动压力头冷却;液体冷却(对流,管道,

喷射); 空气-蒸发冷却; 液体-蒸发冷却; 热惯性发电机。

按结构分: 开启式, 防护式和封闭式。

按转轴位置分: 垂直位置和水平位置。

§ 1.3 电磁式特种交流电机的基本参数和结构

独立电气设备系统中的电机必须满足一定的要求, 其中最重要的是: 在所有给定的运行条件下有高的工作可靠性; 质量和尺寸小; 维护简单; 设备的独立性和生命力 (遭受损害时继续工作的能力); 规定的使用期限; 对无线电干扰的防护; 成本低; 生产工艺的要求。

此外, 对特种电机还提出了一些补充要求以满足特殊的工作特点、技术要求、规范及苏联国家标准 (ГОСТ)。例如, 对航空发电机提出的主要补充要求 (ГОСТ 19705-74, OCT 100775-75) 有: 相电压和线电压曲线的正弦程度, 三相发电机不对称负载下的电压对称性, 小的电压不平衡度, 高的过载能力, 过渡过程时间短。这些要求靠在设计和制造过程中保持相应的发电机参数值来保证。按照技术条件 (ТУ) 航空发电机的参数值列于表 1.2^[1]。

对发电机参数的要求是很严格的, 满足这些要求会在结构上和工艺上有很多困难。并且会使电机的利用率变差。

对电压曲线正弦程度的要求是靠减小高次谐波的绕组系数来满足的 (同时减小了基波的绕组系数因而使发电机的尺寸增加); 选择气隙截面形状; 采用特殊绕组, 例如采用四层绕组, 但这些都使制造工艺复杂, 并使电机利用率变差。

为了确保不对称负载下电压的不对称和不平衡在容许的范围之内, 需要加强阻尼绕组, 减小电枢绕组和励磁绕组的漏磁以减小负序阻抗 Z_2 和零序阻抗 Z_0 , 但这些也使发电机利用率降低。如果在不对称负载下相电流之间的差值不超过 10~20% 的额定相电流, 则三相发电机允许长期工作, 当相电流差别很大时, 负序电流在励磁绕组中将引起较大损耗, 并使励磁绕组过度发热。

表 1.2

参 数	数 值
额定容量 p_n , 千伏·安	8, 16, 30, 40, 60, 90, 120
额定电压 U_ϕ/U_n , 伏	120/208
频率 f , 赫	$400 \pm 5\%$
功率因数 $\cos\varphi$	不低于0.8
转速 n , 转/分	6000*, 8000, 12000
工作状态	连续
过载能力	1.5倍额定负载 5 分钟, 2 倍额定负载 5 秒钟
电压曲线失真系数, %	不大于 8
按相电流的负载不对称, %	不大于30**
纵轴同步电抗 X_d^* , 标么值	不大于2.1
纵轴瞬变同步电抗 $X_d'^*$, 标么值	不大于0.35
纵轴超瞬变同步电抗 $X_d''^*$, 标么值	在0.1~0.18范围内
负序电抗 X_2^* , 标么值	不大于0.2
零序电抗 X_0^* , 标么值	不大于0.12
热态和额定励磁状态下稳态单相短路电流倍数	不小于4.5
热态和额定励磁状态下稳态三相短路电流倍数	不小于3.0
励磁绕组时间常数 T_n , 秒	0.1~2.5
电压不对称度 e_n , %	不大于4

* 在经过技术论证的情况下, 对于容量小于90和120千伏·安的发电机, 允许采用转速6000转/分。

** 在技术条件中给出了发电机相电压的不平衡度值。

大的过载能力要求选择较大的气隙、降低线负荷和减小绕组漏磁。

过渡过程时间小是靠减小绕组时间常数来保证, 首先是减小励磁绕组的时间常数和采用有效的阻尼系统。

对整流器发电机(直流, 无接触式)的技术要求由OCT100575-73和OCT100026-72规定。额定功率(发电机端电压 $u = 30$ 伏, 转速为 4000 转/分)按下列选择: 3, 6, 9, 12, 18千瓦。发电机的转速范围为 4000~9000 转/分。额定电压等于28.5伏。在额定长期负载及断开蓄电池组的稳定状态下, 瞬间脉动电压偏离直流平

均电压的最大值不应超过 2 伏。在 6000 转/分下，发电机应能经受住 1.5 倍过载 5 分钟，而在 8000 转/分以上，发电机应能经受住 2 倍过载 10 秒钟。规定发电机短路电流不小于额定电流值的 1.5 倍。

对汽车及拖拉机电机的一般要求由 ГОСТ 3940-71 “汽车拖拉机电气设备” 规定。Г-502 А 型交流汽车发电机产品的性能要求由 ГОСТ 5.1593-72 规定。

为了直接发出交流电，在飞机上主要采用电磁式凸极同步发电机。励磁绕组由位于发电机轴上的专用励磁机供电，或由飞机上直流电网供电。

凸极发电机的磁系统有两种形式：旋转磁极式（图 1.1(a)）和旋转电枢式（图 1.1(б)）。第一种发电机具有典型的同步电机结构。第二种发电机具有像直流电机的磁系统，其电枢电流由滑环引出。两种发电机的极靴上都有阻尼绕组。

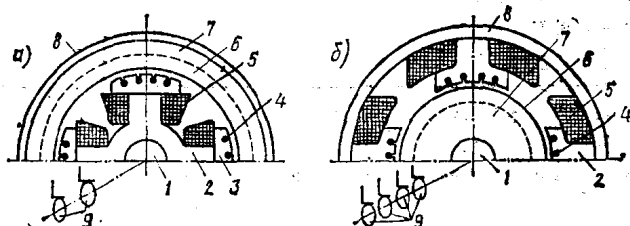


图 1.1 接触式凸极发电机的磁路

(a) 旋转磁极式；(б) 旋转电枢式。

1—轴；2—磁极；3—极靴；4—阻尼绕组；5—励磁绕组线圈；6—电枢齿层和电枢绕组；7—电枢轭；8—机壳；9—滑环。

选用何种磁系统取决于发电机的功率、电枢电流和转速。旋转磁极式磁系统的优点是只有两个滑动接触，并且滑环尺寸小。这在设计功率比较大的同步发电机时有决定性意义，因为当电枢绕组放在转子上时，引出大的电枢电流是相当困难的。把电枢绕

组放在定子上，发电机的冷却条件比电枢绕组放在转子上时有利。

旋转电枢式发电机的有效材料和结构材料比旋转磁极式发电机利用得好。发电机机壳同时又是导磁体。因此在容量不大时（小于 30 千伏·安），这种发电机和同容量的旋转磁极式发电机相比，结构质量约小 15%，外径亦较小。对大容量来说，这一优点就消失了，因为大电流下的滑环使发电机的轴向尺寸急骤增大，并使接触装置工作的可靠性降低。

苏联电机工业为航空供电系统制造三相和单相同步发电机。СГС型三相凸极发电机有变频和恒频两种，容量为 7.5, 30, 40, 90 千伏·安，线电压为 120, 208, 360 伏。

航空单相发电机是在三相的基础上实现的。单相供电是把用电器接至电枢绕组的三个端钮中任意两个上实现的。当电枢绕组接成星形时第三相不被利用。现在所用的СГО型单相发电机容量为 8, 12 和 30 千伏·安。

作为一种典型，图 1.2 给出了СГО-30 和СГО-30Y型发电机的结构^[1]，它们是用作飞机电网的单相变频电源。把用电器接到交流绕组三个端钮的任意两个上。

发电机选择何种磁系统和结构取决于励磁方式。当发电机是由自带励磁机通过旋转整流器励磁时，总是采用旋转磁极式磁系统，这就能得到无接触式发电机结构。

带旋转整流器的同步发电机（图 1.3）是由三台电机串级组成，即典型的凸极型旋转磁极式主发电机СГ，定子上有磁极（爪式或径向式）的旋转电枢式同步励磁机CB和三相永磁式副励磁机МЭПВ。全部三台电机的转子都装在一根轴上。主发电机的励磁绕组由三相励磁机CB通过旋转整流器BB供电。利用励磁机励磁绕组回路中的调节器 P_r 调节电压。励磁机CB的励磁绕组由副励磁机通过整流器B供电。

带旋转整流器的发电机的特点是材料利用率高，励磁可靠，质量和外形尺寸小，具有大的过载能力，能保证良好的电压波形。

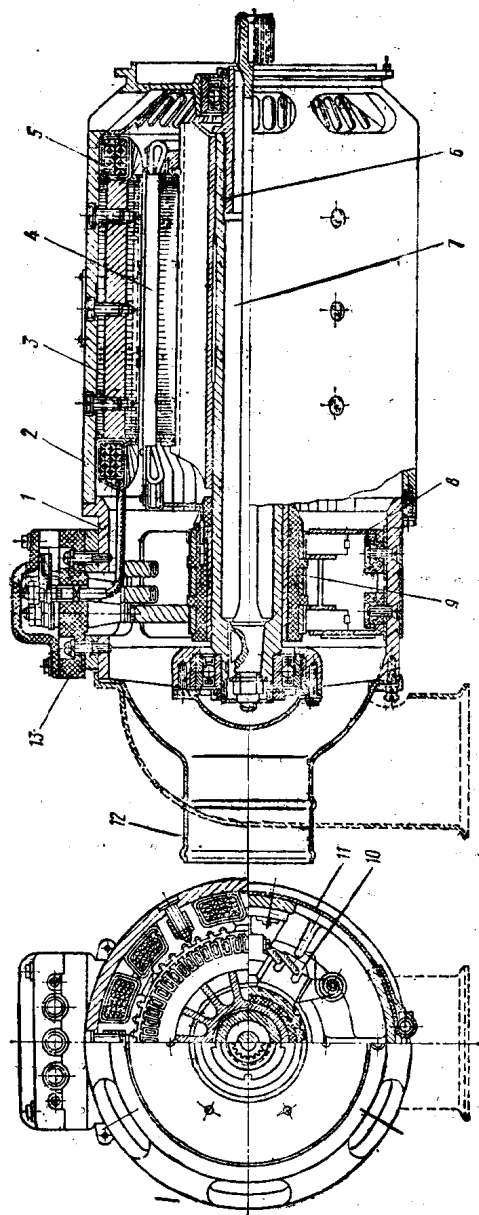


图1.2 CTO-30和CTO-30Y型发电机总装图

1—端盖，2—机壳，3—磁极，4—转子绕组，5—励磁线圈，6—空心轴，7—转轴，
8—刷握，9—滑环，10—电刷，11—防护带，12—出线管，13—接线盒。

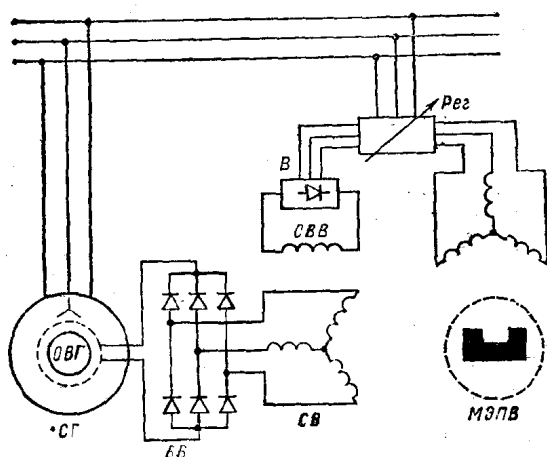


图1.3 带旋转整流器的同步发电机线路图

CT—三相主同步发电机；OBΓ—主发电机的励磁绕组；CB—三相同步励磁机；OBΓ—励磁机励磁绕组；M3PB—三相永磁式副励磁机； P_{er} —调节器；B—副励磁机回路中的整流器；BB—同步励磁机电枢回路中的旋转整流器。

这种发电机在飞机上广泛应用，容量有8，16，30，40，60，90，120千伏·安（ΓT系列）。

图1.4给出了容量为60千伏·安带旋转整流器的发电机纵剖面图^[1]。发电机由迎面气流空气冷却。主发电机，励磁机和副励磁机三级在结构上做成一体。

图1.5所示为带旋转整流器和喷油冷却的发电机纵剖面图^[1]。发电机结构上和液压传动连成一体。采用有效的冷却系统和新的导磁材料大大地减轻了发电机质量。

带旋转整流器发电机的缺点在于结构复杂和有旋转整流器。

在汽车上广泛采用爪式转子接触式交流发电机（图1.6），其功率不太大，由250瓦到2~3千瓦。

这种发电机在结构上和制造工艺上比径向凸极发电机简单。励磁绕组用铜量比径向凸极发电机小几倍，并且励磁绕组的损耗较小。