

微电机结构工艺学

微电机结构工艺学

张子忠 编

哈尔滨工业大学出版社



内 容 简 介

本书主要介绍微电机（包括小功率及特殊用微电机）的结构、制造工艺和结构工艺性等问题。

本书首次将微电机的结构与工艺有机地结合起来，从产品价值工程概念出发进行综合分析，便于读者建立正确的设计和工艺观点。本书给出了若干典型结构图和工艺规范，供结构设计和确定工艺方案时参考。

本书可作为高等院校电机专业本科生及专科生相应课程的教材或教学参考书，也可供从事微电机设计、制造、管理工作的科技人员参考。

微电机结构工艺学

张子忠 编

哈尔滨工业大学出版社出版
新华书店首都发行所发行
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 19 字数 371 000

1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷

印数 1—3000

ISBN7-5603-0080-4/TM·4 定价 3.50 元

前 言

本书以微电机（包括小功率及特殊用微电机）的结构、制造工艺和结构工艺性为主要内容，首次将微电机的结构与工艺有机地结合起来，从产品价值工程概念出发进行综合分析，并以微电机的主要零部件为对象，具体分析结构、工艺、结构工艺性问题。本书共分八章，作者尽可能收集了近几年来国内外各种微电机结构与工艺方面的资料，书中内容基本反映了国内八十年代微电机行业的生产水平，同时也反映了国外的一些先进技术。书中给出了若干典型结构图和工艺规范，供结构设计和确定工艺方案时参考。为便于读者复习，每章都附有思考题及作业题。

本书作教材时，教学应与生产实习密切配合，最好再配以电教片和结构工艺试验等（微电机结构与工艺电教片由哈尔滨工业大学音像出版社出版），使学生在正确进行微电机的结构设计、了解制造工艺等方面打下良好的基础，建立正确的设计与工艺观点。

在本书的编写过程中，主要参考了哈尔滨工业大学《微电机结构工艺学》讲义（张子忠、张竞清编，1983年11月），但对各章节内容都做了大量的增补和修改。编写过程中的手稿作为教材，在哈尔滨工业大学试用多遍，教研室的老师提出过许多意见，特别是王宗培教授给予了多方面的支持。上海微电机研究所陈继生及浙江大学孙云鹏等审阅了本书的初稿。成都电机厂赖钧钰参加了五、六、七章编写提纲的讨论，提出了详尽的建议。陆永平教授对全书进行了审阅，提出许多修改意见。对此，编者一并表示感谢。

本书可作为高等院校电机专业本科生及专科生相应课程的教材或教学参考书，也可供从事微电机设计、制造、管理工作的科技人员参考。

由于作者水平有限，资料掌握不充分，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

1988年3月

目 录

第一章 微电机结构与工艺的一般问题	(1)
1-1 微电机的分类与结构型式.....	(1)
一、按工作和使用特点分类.....	(1)
二、按结构与工艺特点分类.....	(20)
1-2 微电机的结构特点.....	(22)
1-3 微电机的结构设计.....	(24)
一、保证结构稳定可靠.....	(24)
二、冷却系统选择.....	(26)
三、防护与安装型式.....	(30)
四、贯彻“三化”原则.....	(32)
1-4 微电机制造工艺的一般问题.....	(33)
一、微电机制造工艺的特点.....	(33)
二、生产过程和工艺过程.....	(34)
三、生产类型及其特点.....	(35)
四、工艺方案和工艺规程的制定.....	(36)
1-5 结构工艺性.....	(38)
一、提高产品结构工艺性的一般原则.....	(40)
二、提高零件结构工艺性的一般原则.....	(43)
三、结构工艺性指标的数量化.....	(47)
复习题.....	(51)
第二章 软磁铁心	(52)
2-1 铁心材料.....	(52)
一、主要性能.....	(52)
二、铁心材料的种类和选用.....	(54)
2-2 铁心冲片结构和技术要求.....	(59)
一、铁心冲片的结构.....	(59)
二、冲片的技术要求.....	(59)
2-3 铁心冲片制造.....	(62)
一、硅钢片的剪裁.....	(62)
二、冲模的结构与设计特点.....	(65)
三、冲片的冲裁.....	(72)
四、毛刺及其消除.....	(72)

五、冲片的退火处理	(73)
六、冲片的绝缘处理	(76)
七、冲片加工的自动化	(79)
2-4 铁心结构和技术要求	(79)
一、铁心结构	(79)
二、铁心的主要技术要求	(85)
2-5 铁心制造工艺	(86)
一、叠片式铁心制造工艺	(86)
二、铁心叠压的工艺分析	(88)
三、整体铁心的工艺特点	(90)
2-6 冲片与铁心的结构工艺性	(90)
复习题	(92)
第三章 永磁体和磁滞体	(93)
3-1 材料种类及性能特点	(93)
一、永磁材料	(93)
二、磁滞材料	(98)
3-2 结构型式及主要技术要求	(100)
一、永磁体的结构型式及要求	(100)
二、磁滞体结构和技术要求	(105)
3-3 永磁体和磁滞体的制造工艺要点	(107)
一、永磁体的工艺要点	(107)
二、磁滞体的工艺要点	(114)
3-4 永磁体和磁滞体的结构工艺性	(115)
一、铁氧体永磁结构工艺性	(115)
二、稀土永磁结构工艺性	(115)
三、磁滞体结构工艺性	(116)
复习题	(116)
第四章 绕组	(118)
4-1 绕组的种类与技术要求	(118)
4-2 绕组常用导线和绝缘材料	(119)
4-3 绕组的结构	(121)
一、集中绕组的结构	(122)
二、分布绕组的结构	(122)
4-4 绕组的制造工艺	(126)
一、线圈的绕制	(126)
二、嵌线(下线)	(129)
三、绕组的接线与焊接	(129)
四、绕组的绑扎	(133)

五、绕组的质量检查	(133)
4-5 无槽转子绕组的特点	(134)
4-6 空心杯转子绕组的特点	(135)
一、线绕杯形转子绕组	(135)
二、金属杯形转子	(137)
4-7 盘式电枢绕组的特点	(141)
4-8 鼠笼绕组的结构与工艺	(142)
一、鼠笼绕组的结构	(143)
二、鼠笼绕组的制造工艺	(146)
4-9 绕组制造的机械化和自动化	(150)
一、线圈绕线机	(150)
二、转子绕组嵌线机	(150)
三、定子绕组嵌线机	(152)
4-10 绕组的结构工艺性	(152)
一、漆包线的选择	(153)
二、绝缘薄膜选择	(153)
三、线圈的绕制	(153)
四、槽满率	(153)
五、引线与连线	(154)
六、绝缘浸渍与涂覆处理	(154)
复习题	(154)
第五章 绝缘与涂覆	(156)
5-1 绝缘材料	(156)
一、绝缘材料的分类	(156)
二、绝缘材料主要性能	(157)
5-2 绝缘结构及特点	(160)
5-3 熔槽绝缘工艺及特点	(163)
5-4 绕组的绝缘浸渍	(165)
一、绕组的浸渍漆	(166)
二、绕组的浸渍处理方法及设备	(166)
三、绝缘浸渍处理的工艺过程	(170)
5-5 绕组的浇注绝缘	(172)
一、环氧树脂胶	(173)
二、环氧胶的浇注	(174)
5-6 表面涂覆处理	(176)
一、表面涂覆处理的主要要求和种类	(176)
二、表面金属镀层	(176)
三、表面化学处理	(180)

四、表面涂漆处理·····	(181)
复习题·····	(183)
第六章 塑料件 ·····	(184)
6-1 塑料及其在微电机中的应用·····	(184)
6-2 塑料成型工艺·····	(187)
一、塑料压制成型·····	(187)
二、塑料注射成型·····	(189)
三、塑料的挤压成型·····	(190)
6-3 塑料换向器的结构和技术要求·····	(190)
一、塑料换向器的结构型式和特点·····	(192)
二、塑料换向器的主要技术要求·····	(198)
6-4 塑料换向器的制造·····	(198)
一、换向片和云母片制造·····	(198)
二、换向片组合件制造·····	(200)
三、塑料压制和后热处理·····	(201)
四、换向器制造的其他加工工序·····	(204)
五、换向器的质量检查与质量分析·····	(204)
六、塑料换向器的结构工艺性·····	(204)
6-5 集电器的结构与工艺特点·····	(206)
一、集电器的结构及技术要求·····	(206)
二、集电器的材料和制造工艺·····	(207)
6-6 其他塑料零件的结构与制造·····	(209)
6-7 塑料制件的结构工艺性·····	(211)
复习题·····	(215)
第七章 机械加工件 ·····	(217)
7-1 主要金属结构材料和对机械加工件的要求·····	(217)
一、主要金属结构材料·····	(217)
二、机械加工件的技术要求·····	(218)
7-2 轴和转子组件·····	(220)
一、轴的结构型式和主要要求·····	(220)
二、轴的加工·····	(223)
三、转子组件的主要型式和加工特点·····	(223)
7-3 机壳和定子组件·····	(227)
一、机壳结构型式和加工特点·····	(227)
二、定子组件的结构·····	(229)
三、定子组件的工艺特点·····	(231)
7-4 端盖·····	(232)
一、端盖的结构和技术要求·····	(232)

二、端盖加工特点·····	(234)
三、端盖的结构工艺性·····	(235)
7-5 机械加工新工艺及自动化的发展趋势·····	(235)
复习题·····	(236)
第八章 装配与试验·····	(238)
8-1 微电机的装配特点·····	(238)
8-2 轴承组件结构及其装配·····	(239)
一、微电机用滚动轴承·····	(239)
二、微电机用滑动轴承(含油轴承)·····	(251)
三、滚动与滑动轴承的优缺点·····	(258)
8-3 旋转部件的平衡·····	(259)
一、三种不平衡现象·····	(260)
二、不平衡的校正和平衡精度·····	(261)
8-4 尺寸链的计算·····	(268)
一、尺寸链的定义和特征·····	(268)
二、尺寸链的计算·····	(269)
8-5 电刷组件的结构和装配·····	(275)
一、石墨电刷组件·····	(276)
二、金属弹簧电刷·····	(281)
8-6 装配质量检查与试验·····	(283)
一、装配质量检查·····	(283)
二、产品试验·····	(285)
三、试验特点·····	(286)
8-7 装配生产的型式·····	(288)
一、有人工操作装配·····	(288)
二、无人工操作装配·····	(289)
复习题·····	(289)

第一章 微电机结构与工艺的一般问题

这一章主要叙述微电机的种类、结构型式和结构特点，微电机制造工艺的一般问题；最后介绍微电机结构工艺性的基本原则和指标。

微电机的结构、制造工艺和微电机的种类密切相关，所以首先介绍微电机的主要种类和结构型式。

1-1 微电机的分类与结构型式

微电机可以有多种分类方法。

一、按工作和使用特点分类

微电机按其工作性质和使用特点基本上可以分为驱动用微电机、电源用微电机、控制用微电机和微电机组件等几大类，每一类中又可以详细区分，如表 1-1。

表 1-1

微电机分类

微电机	驱动用微电机	微型异步电动机	- 三相异步电动机（工频；高速） - 单相异步电动机（笼型）（隐极式；罩极式）
		微型同步电动机	- 反应式同步电动机 - 磁滞同步电动机 - 永磁同步电动机 - 永磁低速同步电动机
		微型直流电动机	- 永磁直流电动机 - 电磁直流电动机 - 盘式直流电动机 - 无刷直流电动机
		交流换向器式电动机	- 单相串激电动机 - 交直流两用电动机
微电机	电源用微电机	微型直流发电机	- 永磁直流发电机 - 电磁直流发电机 - 电机扩大机
		微型交流发电机	- 永磁交流发电机 - 电磁交流发电机
微电机	控制用微电机	信号控制微电机	- 旋转变压器（接触式；无接触式） - 感应同步器（圆盘式；直线式） - 传感器（微动同步器；电容传感器；磁栅） - 自整角机（接触式；无接触式） - 交流测速发电机 - 直流测速发电机（永磁式；电磁式）
		功率控制微电机	- 交流伺服电动机（笼型；空心杯型） - 步进电动机（旋转式；直线式；平面式） (磁阻式；永磁式；永磁感应子) - 直流伺服电动机（永磁式；电磁式） (线绕杯式；无槽式；无刷式) - 直流力矩电动机（换向器式；无刷式）
微电机组件	微电机组件	微电机组	- 交流伺服测速机组 - 直流伺服测速机组
		微电机组零件	- 变流机组（交流直流转换） (通风机；测位计算机机构件；电动机机构)

驱动用微电机简称驱动微电机，可分为微型异步电动机、微型同步电动机、微型直流电动机和微型交流换向器电动机等四种。它用量最大。

电源用微电机简称电源微电机，可分为微型直流发电机、交流发电机等两种。

控制用微电机简称控制微电机，主要有信号控制微电机和功率控制微电机两种。

微电机组件主要有微电机机组和微电机组套件。

这种分类方法概括了微电机种类的全貌。

1. 驱动微电机和电源微电机

驱动微电机和电源微电机一般是指机壳外径不大于 160 毫米，或电机轴伸中心高不大于 90 毫米的小功率电机，其功率范围从零点几瓦到 750 瓦，转速由 1 转每小时甚至更慢，到 50 万转每分钟（特殊用微电机，如航天、航空、船舶、雷达、通讯等不在此限）。这一类微电机着重于运转时的力能指标、安全可靠和寿命。驱动电动机要有自启动能力。

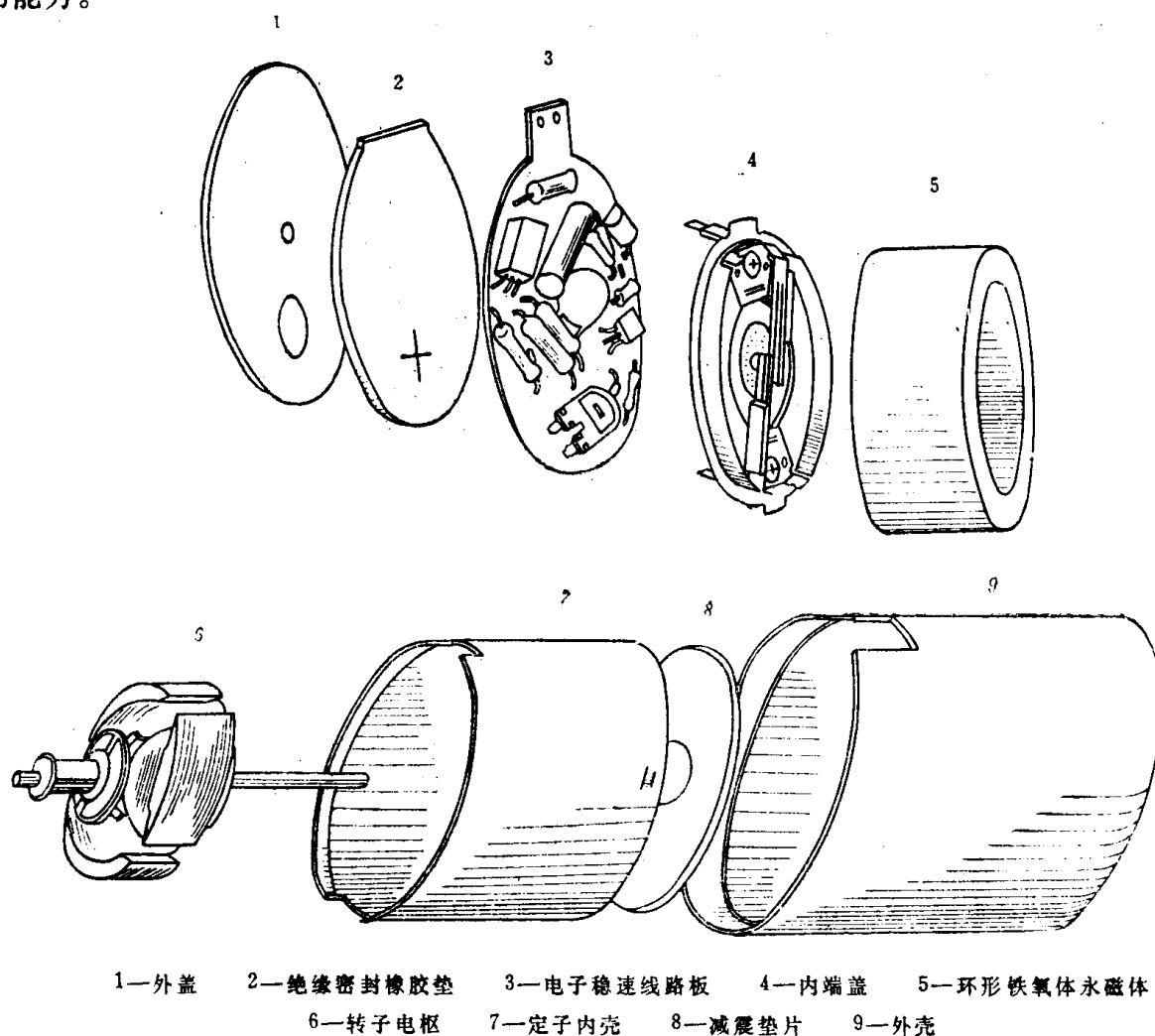
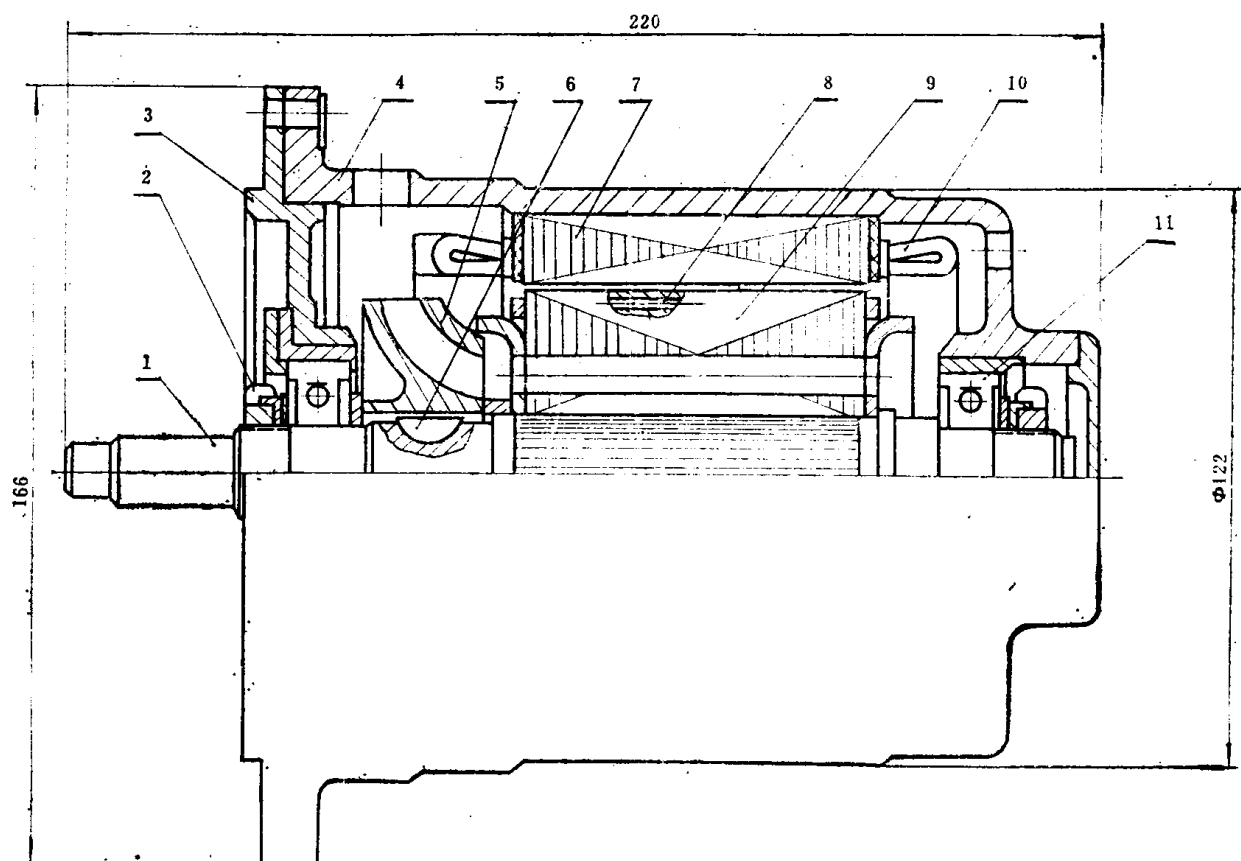


图 1-1 直流永磁稳速电动机

图 1-1 为直流永磁稳速电动机。外壳 9（屏蔽用）直径 38 毫米，长 36 毫米。定子内壳 7 中压入环形铁氧体永磁体 5 做主磁极。转子电枢 6 由三槽铁心、绕组和装配式塑料换向器构成。内端盖 4 上压有含油轴承，装有两个耐磨的片状电刷。电子稳速线路板 3 直接压在内端盖 4 的外侧（经薄膜绝缘），保证电机工作转速的漂移小于 1.5%。这类微电机用于收

录机、录放机及其他一些有稳速要求的设备上做驱动元件。



1—轴 2—锁紧螺帽 3—端盖 4—机壳 5—风扇 6—月牙键 7—定子铁心
8—转子鼠笼条 9—转子铁心 10—定子三相绕组 11—轴承

图 1-2 三相异步电动机

图 1-2 是一台功率为 200 瓦航空泵用三相异步电动机，定子铁心上嵌有三相对称绕组，转子为鼠笼式，设有冷却通风路径和径向风扇，保证电机连续工作状态下的通风冷却。航空电机突出的要求是体积小重量轻。这台电机定子外径 122 毫米，轴向长 220 毫米。其定子组件和转子组件分别见第七章图 7-10 和图 7-5。

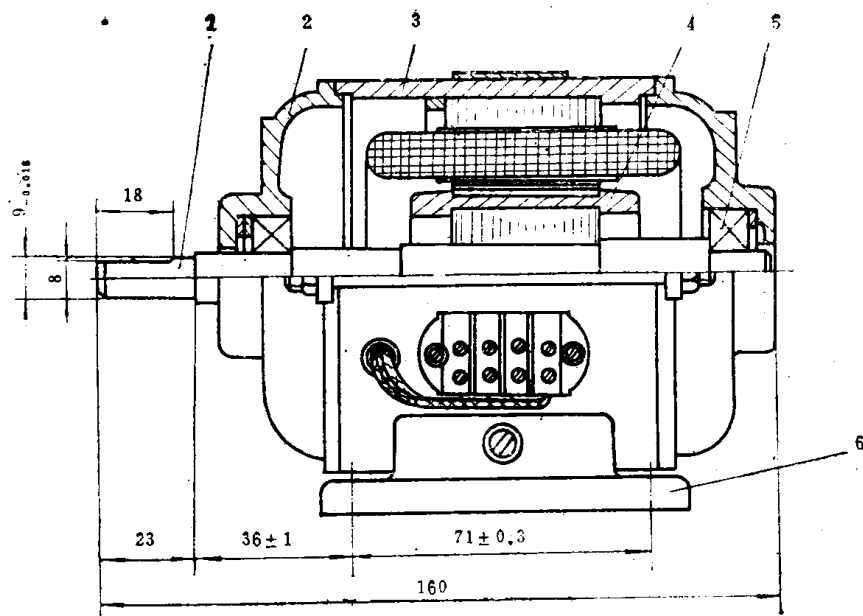
图 1-3 为一台 60 瓦单相异步电动机。定子铁心上嵌有工作绕组和起动绕组，转子为鼠笼式。由于鼠笼转子结构简单，运行可靠，价格便宜，又有多种标准系列规格，所以是产量、用量较大的一类小功率电机。

安装和保护结构型式，除图中所示防护式底脚安装外，还有开启式、端盖或机壳上带凸缘安装等。

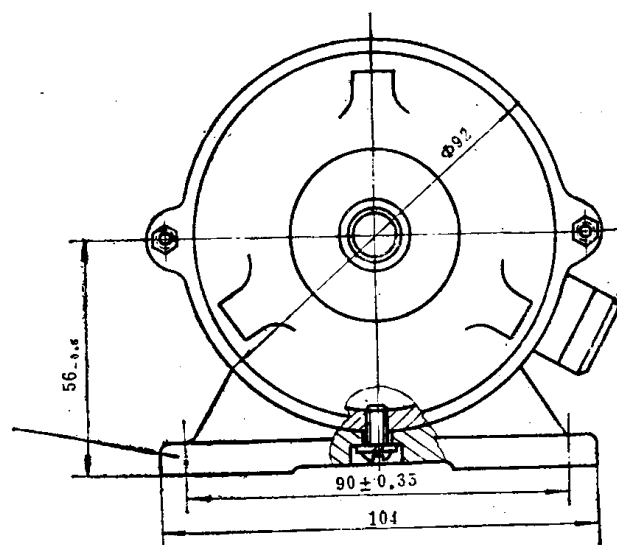
图 1-4 是一台单相罩极电动机结构图。定子四极铁心外形为方形，在每个凸极上开有不对称槽，槽内安放两只短路环。单相绕组绕在成型塑料骨架上，套入磁极铁心后利用定位销装入方形铁心。另外两个凸极是与方形叠片一起冲出来的。

电机的端盖和支架都采用钢板冲制而成。采用的球形含油轴承可以在一定范围内自动保持定、转子同轴度。电机采用支架和橡皮垫安装方式。

图 1-5 为反应式同步电动机结构图。反应式同步电动机定子与异步电动机定子结构基本相同。其转子可用冲有齿槽的硅钢片叠成，也可以用整块软钢加工出齿槽。叠片式



(a)



(b)

1—轴 2—端盖 3—定子 4—鼠笼转子 5—轴承 6—底座

图 1-3 单相异步电动机

转子铁心常常是在异步电动机转子铁心冲片上开出反应槽而形成。开反应槽可以使直轴和交轴磁阻不等，差别越大反应转矩越大。同时，利用转子上的一部分槽形成笼型绕组，解决了反应式同步电动机的起动问题。

图 1-6 是磁滞同步电动机的一种结构。为了加大转动惯量，采用外转子结构。外转子用整体式铁钴钼磁滞材料，在转子有效层外套以非磁性材料（也可采用软磁合金）。内定子槽内嵌有三相绕组，配以适当的分相电容作单相使用。滚珠 5 保证外转子相对内定子之间有合适的间隙，并能承受一定的轴向力，该电机也可用于轴伸向上的立式安装。

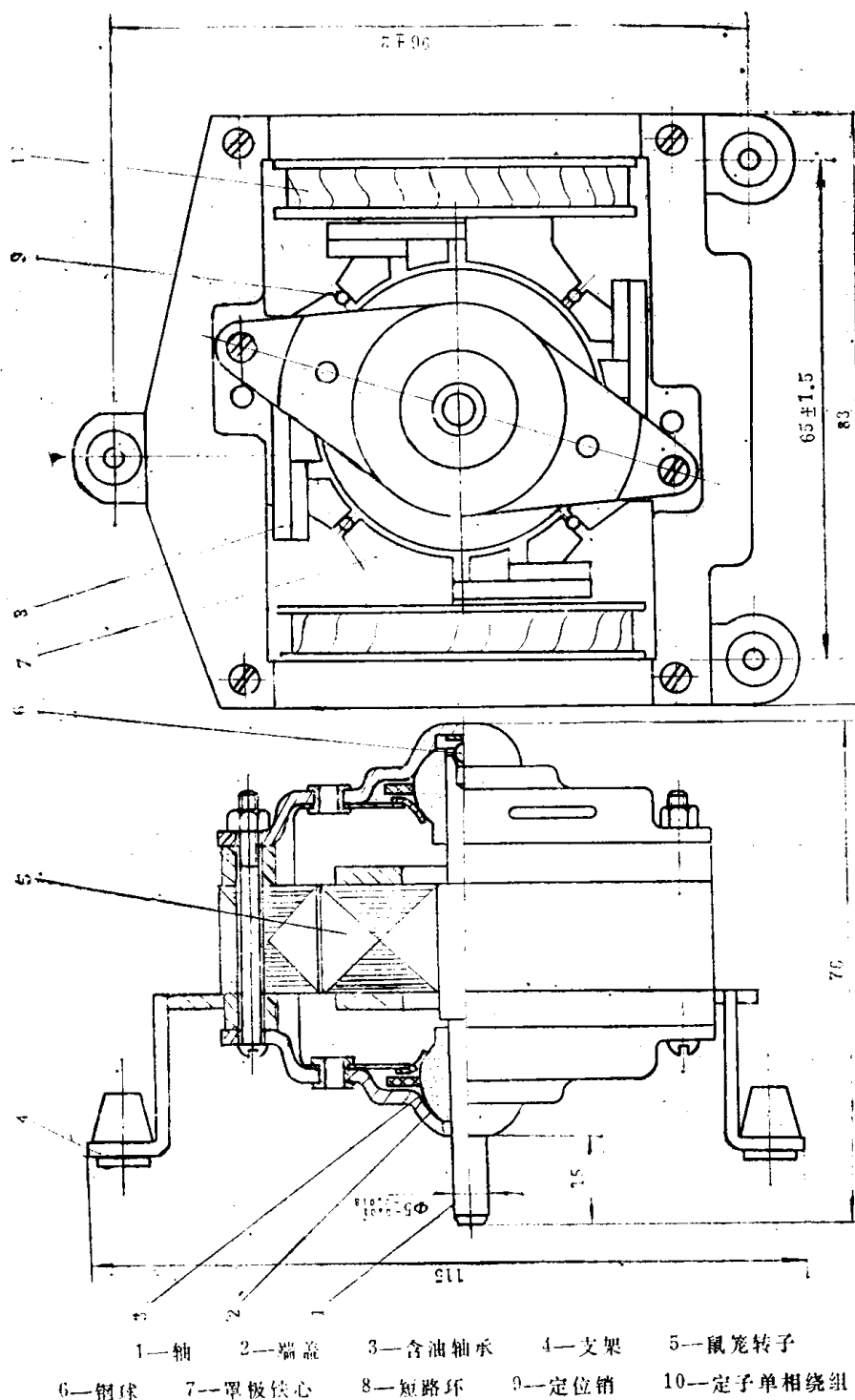
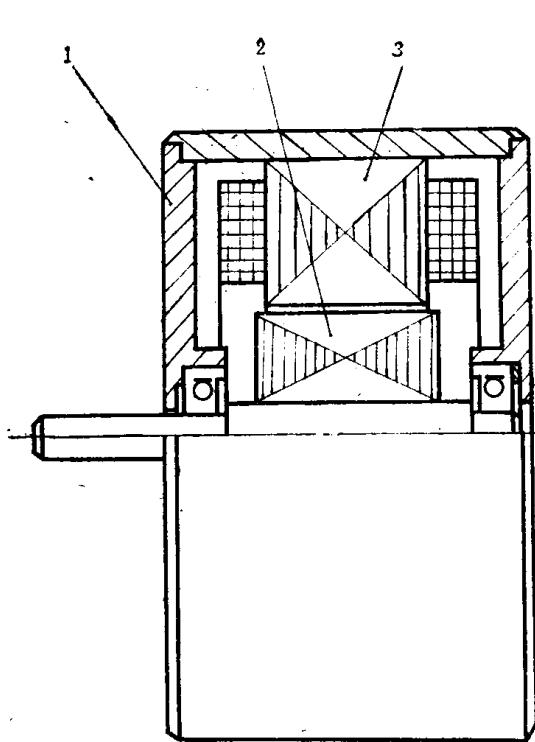


图 1-4 单相罩极电动机

磁滞电动机也大量采用内转子结构。常用于钟表机构、电唱机、录音机、陀螺仪等做驱动元件。

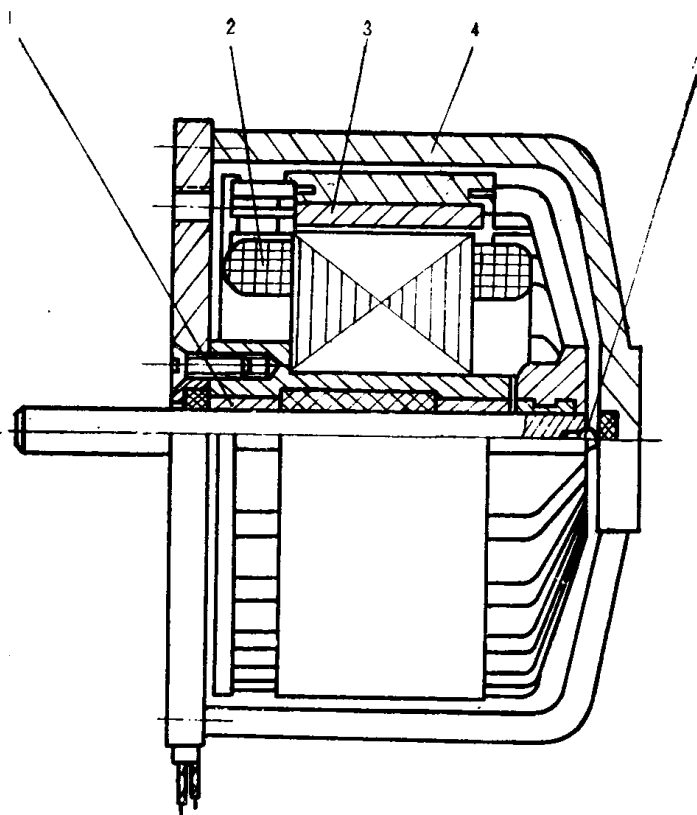
图 1-7 是永磁同步电动机的两种基本磁路结构型式。(a) 为径向串行磁路结构，永磁体一般为星形转子，在磁极极靴上装有起动用鼠笼。(b) 为并行磁路结构，永磁体也为星形，装在转子铁心的一端。这种结构容易产生单方向轴向作用力，故也有将星形永磁体安装于两段轴向铁心中间的结构。

由于转子上需要起动物鼠笼，所以转子结构较复杂，这限制了它的大量生产和使用。



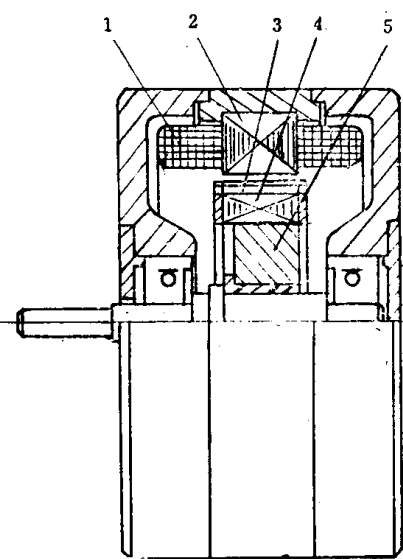
1—端盖 2—转子 3—定子

图 1-5 反应式同步电动机

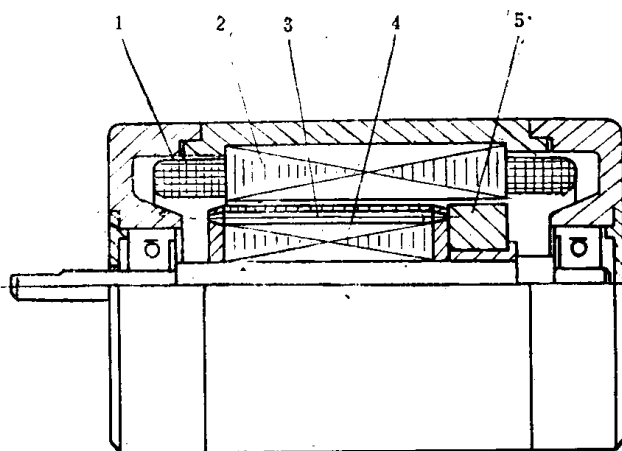


1—含油轴承 2—内定子电枢绕组 3—外转子磁滞体
4—支架 5—滚珠

图 1-6 磁滞同步电动机



(a)



(b)

1—定子电枢绕组 2—定子铁心 3—起动鼠笼 4—转子极靴或铁心 5—永磁体

图 1-7 永磁同步电动机

图 1-8 是两种永磁低速同步电动机的结构图。它们的定子结构完全相同，定子铁心内嵌有两相绕组，内表面开有若干小齿槽。转子上都有轴向充磁的圆环形永磁体和非磁

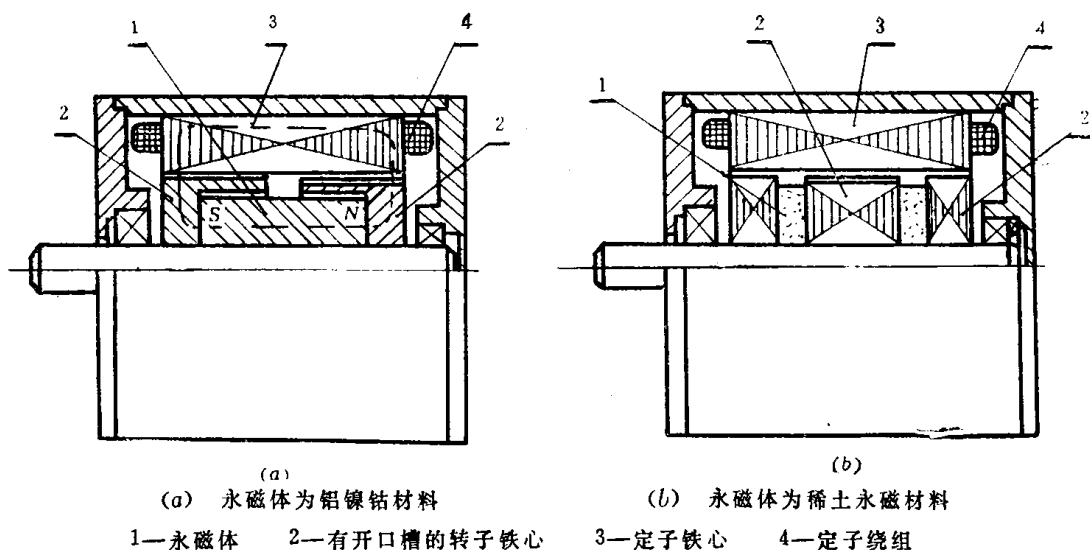


图 1-8 永磁低速同步电动机

性轴。区别是，永磁体与转子铁心的安置情况不同。(a) 结构中转子两端铁心上有均匀的齿槽，并互相错开半个齿距。图 (b) 是采用稀土永磁材料的新结构，其转子中间与两端的铁心段之间仍相互错开半个齿距，两块永磁体应沿轴向相斥安放，使端部铁心与中部铁心极性相反。这种结构使电机性能和结构工艺性都得到改善。

这种电机常用于各种电动执行机构中。

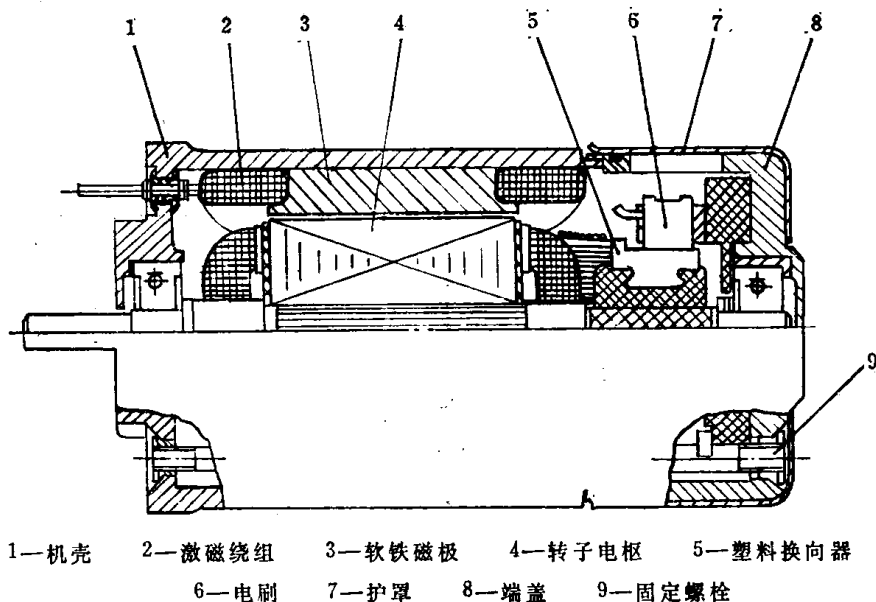
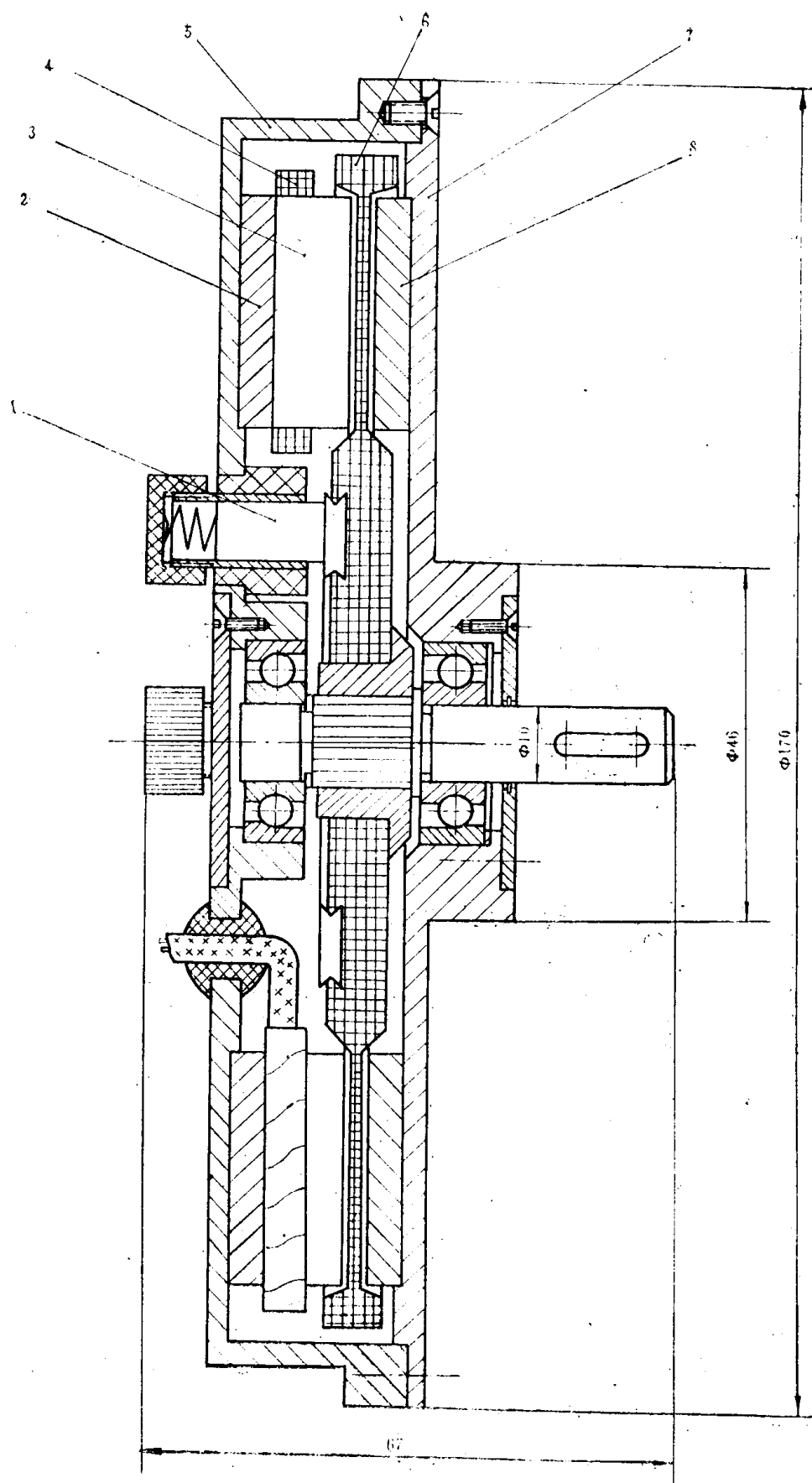


图 1-9 电磁式直流电动机

图 1-9 是电磁式直流电动机结构图。定子机壳为导磁体。磁极为整体式，用电工纯铁制成。端盖用铝合金或镁合金制造，外加防护罩。转子上有电枢绕组和塑料换向器。电机为封闭式，但是，防护罩可以打开，用来检查换向器火花。这种电机用于飞机上的某些拖动机构。

图 1-10 是盘式永磁直流电动机的一种结构。定、转子都呈圆盘形。定子上均匀分布着成对的永磁体，形成轴向磁路。圆盘形电枢绕组用漆包电磁线绕制，并接于端面式换向器上。整个电枢用环氧浇注绝缘胶模铸成一体。端面电刷装置固定在机壳上。这种电



1—电刷 2、8—磁轭 3—永磁体 4—充磁线圈 5—定子机壳 6—转子电枢 7—端盖
图 1-10 盘式直流电动机

机轴向尺寸小、起动转矩大、调速范围宽、低速运行性能较好，适用于电动车辆和一些

控制系统中。

圆盘形电枢绕组也可以用印刷电路工艺制成（使圆盘电枢更薄）而且常采用多层叠压结构。

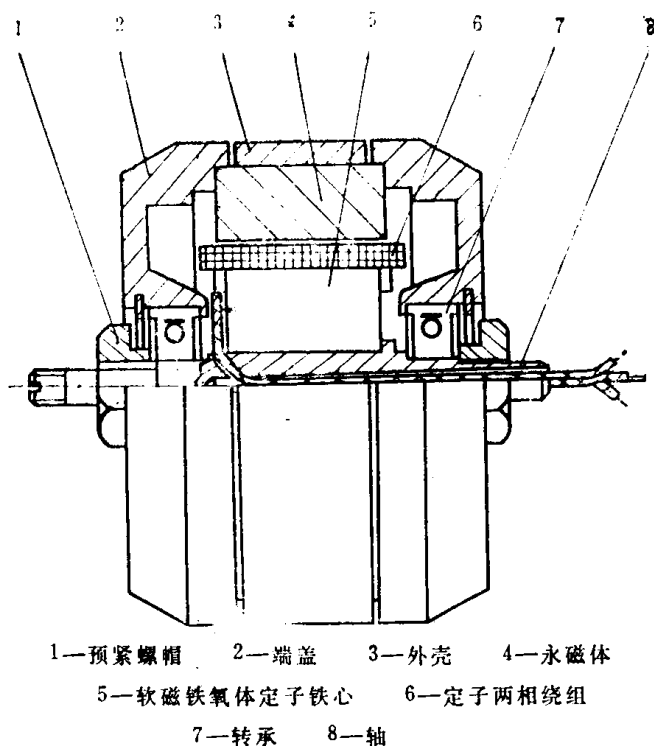


图 1-11 无刷直流陀螺马达

图1-11是无刷直流陀螺马达的一种结构图。为了加大转动惯量，采用外转子、内定子结构。因要求体积小、结构对称，引线常由内定子轴心孔穿过。为了保持转子质心坐标严格不变，轴承需要加轴向预紧力（通过预紧螺帽1）。

图中所示无刷直流陀螺马达，还应包适电子换向控制线路部分（未画出），通常做成单独的电源控制盒。

图1-12是双绝缘交流串激电动机的一种结构型式。整机采用分装式，仅有定子(a)和转子(b)两大组件，便于与主机配套安装。

定子基本结构与电磁式直流电动机相似，仅磁极铁心需要由硅钢片叠成。转子电枢采用双绝缘结构，即较

一般电机多设置了轴的绝缘8，这是适合锤击钻等电动工具用电机的一种双绝缘结构。这层轴绝缘可采用酚醛玻璃纤维压塑料等材料塑压而成，以充分满足安全可靠的要求。

轴伸端采用法向模数为1的斜齿轮。在其它驱动微电机中采用小模数齿轮的轴伸型式也常见到。

交流换向器电动机也大量使用装配式结构。这一类电动机转速较高，换向器火花较大，电刷和换向器磨损较严重。

图1-13是一台航空用大功率无刷直流发电机，由无刷同步发电机和静止整流器组合而成，可作飞机的主电源发电机。

无刷同步发电机部分实际上是一个机组，2、3组成主同步发电机，5、6组成一台励磁用旋转电枢式同步发电机，经整流器4整流作为主同步发电机的励磁机，整体结构上是无刷的。

根据飞机的特殊条件和工作要求，结构上采用了强迫通风管道、自扇冷却风扇7、空心轴与软轴联成组合轴等。这种飞机主发电机功率较大，可达几十千瓦。

图1-14是一种小功率三相同步发电机，定子为三相电枢绕组，转子采用永磁星形转子，结构简单，两端端盖结构基本相同。常用作无线电装置或仪表等专用小型交流电源。

图1-15为一台手摇式交流发电机结构，由发电机、传动机构和输出电路三部分组成。