

# 无刷电机专辑



湘潭电机厂科技信息室  
一九九五年六月



# 无刷电机专辑

(内部资料)

湘潭电机厂科技信息室

(一九九五年六月出版)

主编、责任编辑

科技信息室唐巧月

及出版校对

封面设计: 技术开发中心 何斌伍

印刷单位: 湖南省有色金属研究所

## 目 录

<b>综述</b>	无刷同步发电机的引进与开发.....湘潭电机厂三分厂 胡国恒 余冰 (1)
<b>外国专利</b>	无触点同步电机(俄文)(SU1624614).....湘机退协 郭纯成译 技术开发中心 姚楚仁校 (7)
	带电子换向器的直流电机及其圆筒式定子的制造(德文)(DE3629423) .....技术开发中心 周玲慧译 湘潭九洲特种线材公司 王本云校 (9)
	带自由静止场绕组的无刷交流发电机和同步电机(英文)(US4831300) .....科技信息室 宁佐亮译 技术开发中心 吴顺海校 (17)
<b>理论研究与设计</b>	嵌入式永磁转子无刷电机开路气隙场分布的预测.....科技信息室 胡新宇译 技术开发中心 曹飞校 (26)
	辐射场永磁无刷电机中齿槽效应转矩的分析.....科技信息室 王双灵译 技术开发中心 郭晓玲校 (37)
	对永磁无刷直流传动装置电动势输入方案的评价.....科技信息室 陈静余译 技术开发中心 周也宁校 (43)
	无刷直流电机参数的时域辨识法.....王双灵译 郭晓玲校 (48)
	对无刷直流电机中由换相引起转矩脉动.....技信息室 丁宏译译 周也宁校 (55)
	无刷管形直线电机的最优设计.....宁佐亮译 吴顺海校 (64)
<b>控制与运行</b>	可调速度无刷直流电动机系统及其控制.....陈静余译 吴顺海校 (69)
	无刷直流电动机使用自适应滑模观测器.....置-速度传感器控制 .....郭纯成译 技术开发中心 陈春强校 (75)
	具有瞬时转矩的无刷直流传动装置的伺服性能.....宁佐亮译 周也宁校 (84)
<b>电磁测量</b>	轴向场电动机的磁场测量.....科技信息室 刘一鸣译 技术开发中心 卫品贤校 (92)
	三相无刷直流传动中的电流测量.....刘一鸣译 陈春强校 (95)
<b>应用技术</b>	减小无刷直流电动机齿槽效应力矩的新技术.....技术开发中心 姜伟全译 工艺处 夏梁跃校 (108)
	无刷励磁式三相同步电机的励磁方案.....王双灵译 周也宁校 (115)
	用计算机仿真来研究带电子装置的无刷直流电机的动态 .....刘一鸣译 工艺处 韦国清校 (122)

# 无刷同步发电机的引进与开发

湘潭电机厂三分厂 胡国恒 余冰

**前言：**随着改革开放后我国经济的飞速发展，对用电的需求迅速增加。许多企业、宾馆、医院、大厦，不仅要求用电数量，而且对供电的可靠性也提出了高要求。由于当今国内电力紧张，水电开发周期较长，用户为自我补充电网供电不足，或作为停电应急用，都纷纷自备发电机组；加上舰船、钻井平台及山野、草原、流动工程等需用的独立电站和移动电站，也都随经济的发展而日益增多；再加上国际市场的拓展，以柴油机为动力的发电机组特别是中小型发电机组的市场日益兴旺。无刷励磁的同步发电机以其优良的性能倍受青睐。因此，国内先后有多家生产厂竞相引进或自行开发设计了不同型号和规格的无刷同步发电机，其技术性能和结构特征各有千秋。本文只简介几种无刷同步发电机，供大家参考。

国外几家公司的产品及国内引进并开发的产品见表1

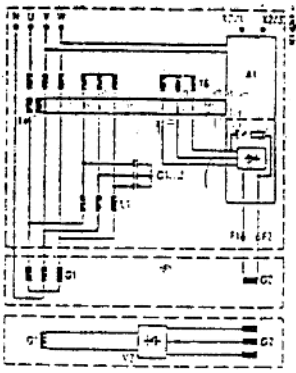
公司名称和电机型号	产 日 期 本					
	GE(美)	GE(美)	A DKB	IENS (德)	BRUSH (英)	JS(法)
电机型号	Custom800	GTA-30	DKB	1FC5/1FC6	BJ5	AP46-64/ A76-110
输出功率(kW)	187—4375	1090	10—2000	20—3300	430—1920	108—4800
转速(r/min)	900—1800	1200	900—1800	600—1800	750—1500	720—1800
功率因素	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7—0.8	0.8
频率(Hz)	50 60	60	50, 60	50, 60	50, 60	50, 60
环境温度(°C)	40	50	40	40	40—50	50
电压(V)	240, 480, 600, 2400, 4160	600	400—6300	400, 450	400—6600	450, 600, 6000
绝缘等级	F	H	F	F	F	F
备注			DKBH系 列已引进	国内已引 进技术	国内已引 进技术	

## 几种无刷同步发电机主要特征的对比分析

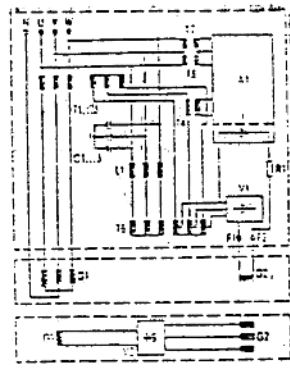
无刷同步发电机的结构大同小异，除励磁系统及其是否有无刷励磁机等方面各不相同外，主发电机都是转场式的（有隐极式和凸极式两种），旋转励磁机都是转枢式的。另外，旋转整流器基本功能相同，只是整流电路有三相、单相、全桥、半波之分。其原理图（以1FC5, 1FC6为例）见图1。

### （一）定子部分

定子为输出功率的电枢。定子铁心和机壳的安装方式，大体有两种。一种以GE公司产品



IFC6-具有可控硅电压调节器的  
相复励励磁系统



IFC5-具有可控硅电压调节器的  
相复励励磁系统

图1 无刷同步发电机基本电压理图 (以IFC5、IFC6为例)

- |          |                  |              |          |        |
|----------|------------------|--------------|----------|--------|
| A1 电压调节器 | C1...C3 电容器      | G1 主电机       | G2 励磁机   | L1 电抗器 |
| R1 串联电阻器 | T1、T2、T3、单相电流互感器 | T4 压降补偿电流互感器 |          |        |
| T6 整流变压器 | T7、T8、测量电路变压器    | V1 静止整流器     | V2 旋转整流器 |        |

为代表, 机壳内径正好与定子铁心冲片外径相等, 而在冲片轭部冲制轴向通风孔, 用螺钉穿过通风孔将冲片压紧固定, 再套入机壳内, 见图 2。

另一种以 AEG 公司产品为代表, 在定子铁心冲片外圆上冲槽, 然后用轴向筋条穿过这些槽把冲片栓起来压紧, 筋条两端与端板相焊接, 再套入机壳内, 轴向通风道就是机壳内圆与冲片外圆由筋条支撑的空间, 见图 3。

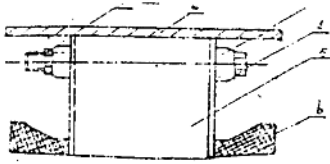


图2 冲片外圆直接与机壳配合的例子

1. 螺母
2. 机壳
3. 压块
4. 螺钉
5. 定子冲片
6. 定子绕组

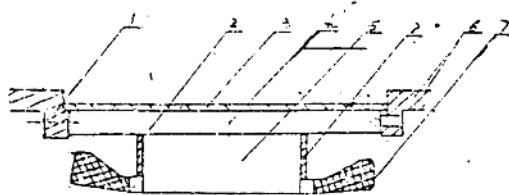


图3 冲片通过筋条与机壳配合的例子

1. 端盖
2. 端板
3. 机壳
4. 筋条
5. 定子冲片
6. 端盖
7. 定子绕组

这两种结构有什么区别呢?

首先, 由于用冲片迭成的定子铁心沿径向导热远远优于沿轴向导热, 因此, 采用图 2 的结构, 冲片外圆与机壳相接触, 可以借助机壳外表面散热。这对于降低定子温升, 减少冷却风扇内能损耗很有好处。如按图 3 结构, 则机壳表面的辅助散热作用较小; 而且, 根据英国杰克逊 (P. J. Taner) 等撰写的《大电机定子机壳中的涡流》一文中论述, 由于筋条和端板的作用, 将在端环和筋条内产生电流即所谓“机壳电流”。这个“机壳电流”, 主要由定子漏磁通所引起, 其值在定子铁心端部最大; 而且, “机壳电流”会从筋条进入靠近铁心端部的定子冲片中, 从而引起其流经部位 (特别是筋条两端) 过热, 使电机附加损耗增加。如果采用图 3 结构, “机壳电流”将被限制在较小范围。因此, 一般宜采用图 2 的结构。当必要采用图 2 结

构（特别是在大型电机中）时应采用限制“机壳电流”的措施。

至于定子绕组，各类产品所采用的绝缘结构和工艺方法也不尽相同。如GE公司，采用多层密封绝缘结构，即由多股漆包线绕成线圈后，用云母带（600V以上则用其他材料）包扎，作为匝间绝缘，然后用增强云母（粉云母）包扎全部线圈作为对地绝缘（不再用槽绝缘）线圈成型后即可嵌线，然后用铜焊焊牢，用云母带包扎，最后将整个定子进行真空压力浸漆。BRUSH公司则采用两种不同配方的环氧树脂制造线圈。首先用漆包线或云母绝缘的扁铜线绕成线圈，然后在整个线圈上用几层预先涂上环氧的云母玻璃丝带包扎。包扎槽部导线所用的环氧，在线圈热压成型过程中可以流动；解除热压后，则形成一个非常坚固而紧凑的绝缘系统，而且能保证线圈具有准确的形状和精确的尺寸。而用于线圈端部的环氧，则具有一定的柔软度。这种柔软性避免了起动或发生故障时在电动力作用下引起弯曲变形而造成的断裂。此外，5kV以上的线圈，表面须采取防电晕措施。可能是由于采用了热压或成型措施的缘故；整套线圈不是采用真空压力浸漆法，而是采用普通浸漆法。AEG公司的产品也采用普通浸漆的方法，GE公司、JS公司以及我厂引进的BRUSH公司的产品和自行设计的TFW系列产品，均采用真空压力浸漆法。

## （二）转子部分

SIEMENS公司的1FC5、1FC6的转子采用隐极结构，其优点是转子机械强度高，径向尺寸小，但转动惯量一般较同等功率的凸极结构的转子要小。

除上述隐极机外，其余均为凸极式转子。其中GTA—30是先做成单个磁极和线圈，然后再装到磁轭上。磁极线圈采用扁绕后压成弧形如图4所示：极靴、磁轭与线圈弧面接触的部分也相应地做成弧形。因为利用极靴本身的压力就可以直接抵消线圈在随转子转动时产生的离心力，从而省去了普通同步机在磁极线圈间安装的支撑。这样，不仅保证了机械性能，还用扁绕改善了线圈的热传导，降低了线圈最热点的温度；而省去极间支撑后又使极间风阻减少，有利于冷却。这样，线圈整体的温升就会进一步降低。两种结构的受力分析如图5所示。



图4 压成弧形的磁极线圈

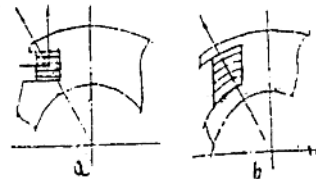


图5 磁极线圈受力分析

a.普通同步机 b.GTA—30型

尤其是当导线宽高比大于25时，扁绕线圈相当困难（我厂曾绕制过 $1.6 \times 35.5$ 的导线，也是采用扁绕，绕制难度较大）。因此，这一方案不适用于导线截面小而线圈匝数较多的磁极线圈。另一种凸极方案（如除1FC5、1FC6及GTA—30以外的其他类型产品）是把磁极和磁轭连成一个整体（即做成一整张冲片），用冲片迭成转子铁心，将极身绝缘，然后直接在转子铁心的极身部分绕线（一般为平绕），边绕边刷胶（漆）以固定，线圈外表喷一层耐油和耐潮的防护漆（我厂产品为真空压力浸漆）。这种结构的转子整体性好，可以有好的机械性能和散热性能。一般4极电机绕制比较方便，但绕制6极以上电机线圈时比较困难。因相邻极（尤其是极靴）妨碍绕线。目前市场已有专用绕制设备，可解决这一难题。

凸极转子的一大优点是转动惯量一般比同容量的隐极机的转动惯量大。这对于以柴油机为原动机的发电机组来说是很有益的。

### (三) 交流励磁机和旋转整流器

交流励磁机和旋转整流器是使发电机从有刷进化到无刷的两大关键部件。与发电机相反，交流励磁机是转枢式的，转子为电枢，与发电机同轴安装，磁场在定子内侧固定。为了提高励磁系统的反应速度，交流励磁机的频率一般比主发电机高，可高达数百赫兹，但最好不与主发电机成简单的整数倍(后详)。旋转整流器也安装在转轴上与主发电机同轴旋转，整流电路(三相或单相)与交流励磁机相数相同，可以是全桥式或半波整流式。旋转整流器的输入端(交流侧)接交流励磁机的电枢输出端，而其输出端(直流侧)接主发电机转子磁场绕组。当电机转动时，主发电机转子磁场、交流励磁机电枢及旋转整流器三者同轴转动，彼此无相对运动。交流励磁机电枢绕组感应出的交流电，经旋转整流器变成直流后进入主发电机转子磁场绕组以励磁。这时，只要调节交流励磁机的磁场电流(其磁场在定子侧，不转动)，就可以改变主发电机磁场电流，从而控制其输出端电压。这样，就省去了传统的有刷发电机所必需的电刷和滑环，变成了无刷发电机。依靠连接于主发电机输出端和交流励磁机定子磁场绕组之间的自动电压调节器(AVR)，就可稳定主发电机的端电压。

旋转整流器是由半导体元件旋转整流二极管及支架、散热板、浪涌抑制器、熔断器等元件组成，是电机中故障率较高的部件。因为它不仅工作于高速、高温和有振动的场合，而且还有承受过流过压冲击的可能。因为在电机受到外界扰动时，例如输出端突然短路时，尽管定子磁场(指由负载电流产生的旋转磁场)与转子绕组间并没有相对运动，但随着定子磁场幅值的突变，在转子绕组中便会感应出变压器电势；而当电机负载不对称时，定子绕组中将流过负序电流。这个负序电流所产生的负序磁场对转子有两倍同步转速的相对速度，将在转子磁场绕组中感应出旋转电势。在非对称短路或并网的误操作过程中，上述旋转电势和变压器电势将可能于某一瞬间同时产生，这两个瞬时电势加上交流励磁机电枢输送给旋转整流器的电势，再和主发电机转子磁场绕组中原有的电流相迭加(注意转子磁场绕组是感性元件)，共同作用于旋转整流二极管，可能使导通的二极管流过很大的正向电流，也可能使截止的二极管承受很高的反向电压，以至于损坏二极管。在气隙较小，阻尼不良或没有阻尼的凸极同步发电机中这一现象更为突出。如果交流励磁机的极对数与主发电机的极对数成简单的整数比，当发电机三相对称短路时，转子磁场线圈中的感应电流将流过正在导通的二极管，而使之损坏。针对上述分析，可从几个方面着手预防：A、在主发电机转子上设置阻尼；B、使交流励磁机与主发电机的极数不成整数比；C、选择旋转整流二极管定额时，留有较大裕度；D、旋转整流二极管采取过压和过流保护。浪涌抑制器并联于旋转整流器直流侧两端可以吸收瞬时过电压，也可在二极管两端并接电阻或阻容吸收回路以吸收瞬时过电压，而熔断器则作为过流或短路保护串接于每个二极管支路。有时为了简化结构，没有安装熔断器而宁可把旋转整流二极管的电流裕量多留一点。在励磁电流较小的电机中，这一方法不仅易行，而且也较可靠。但是，一旦二极管被击穿短路，则发电机必须立即停机更换元件，否则故障将进一步扩大。如果在每个二极管回路中串上熔断器，这样，即使部分二极管短路或熔断器发生故障，由于故障回路最终总是开路，只要其他部分正常(即仍有部分二极管正常工作)，则发电机仍可带病轻载运行而不会出现故障扩大现象。

旋转整流器和交流励磁机与主发电机的安装方式有两种。一种方案是,把三者都装在一个机壳内,这样,相互间联接方便,更换轴承操作简单,但应考虑旋转整流器的检修和二极管、熔断器更换的方便。另一种方案是,把旋转整流器和交流励磁机装在非传动端端盖外侧,然后从转轴中心打孔,用线把整流后的直流电穿过轴孔引入主发电机转子磁场绕组。这样,旋转整流器检修较为方便,但轴承更换增加了麻烦。只要考虑周全,两种方案都是可取的。

#### (四) 交流励磁机的励磁

尽管无刷同步发电机中的交流励磁机大体结构基本相同,但励磁机本身的励磁方式却各有特色。

常用的励磁方式有:自并励(如GE公司某些产品以及我厂200kW以下的无刷同步发电机)、相复励(或带电压调节器),相复励中又有电抗移相电磁相复励(如1FC5、1FC6系列产品)和电抗移相电流相复励(如我厂200kW以上的产品)等多种,其励磁电源都是取自发电机输出端或发电机定子上的附加绕组。这种原理的发电机叫自励恒压发电机。自励发电机的起励,一般都依靠其本身的剩磁。有时为了提高其起励的可靠性,不仅在励磁控制回路中采取起励措施,而且也可有意在交流励磁机的定子磁极极靴处,嵌放小块永久磁铁以加强剩磁。值得注意的是,当采用电抗移相电流相复励而又不励磁变压器,发电机定子上又没设附加低压绕组提供励磁电流时,励磁回路与发电机输出回路实际上没有电的隔离,因此,交流励磁机定子磁场绕组(尽管其两端工作电压并不高)的对地耐压必须与发电机定子绕组相同。

在自励恒压无刷同步发电机中, AEG公司的DKBH系列产品设计得比较特殊。见图6。

图中增加了副励磁机,它具有外旋式磁极。这些磁极是轴向插入主机磁极铁心的钢杆向非轴伸端的延伸部分。副励磁机的电枢是静止的,其结构和一般转场式交流发电机的电枢相仿,只是尺寸较小。副励磁机的磁场来自主发电机转子磁极磁场的分路。副励磁机电枢输出端电压随主发电机磁场增强而增强。由于交流励磁机磁场电流是由副励磁机电枢经调节器供给的,因此,副励磁机的这种特性本身具有自动补偿作用。即当主机需要的励磁电流越大,副励磁机电枢电势愈大,交流励磁机的磁场愈强,交流励磁机的电枢电势愈大,经旋转整流器后供给主机磁场绕组的直流励磁电流也愈大。这种自动补偿作用,可以使电压调节器做得比较简单。采用这种副励磁机的电机同样需要靠剩磁起励。

还有一种永磁转子式的副励磁机,就是副励磁机转子磁场是永磁铁,和主发电机同轴旋转,副励磁机电枢是静止的,其输出经电压调节器后供给交流励磁机的定子磁场。这种结构实际上已属于他励的范畴,不存在剩磁起励的问题,运行可靠。

系统中具有副励磁机的优点是,励磁机的励磁功率源不再取自主发电机,而来自副励磁机,故不再受主发电机的影响,使运行更为可靠。其缺点是,系统的动态性能下降,因副励磁机是惯性元件,它使系统时间常数增大,反应速度变慢。



a. 原理图      b. 结构图

图6 带副励磁机的DKBH系列结构图

1. 定子绕组      2. 转子绕组
3. 旋转整流器    4. 无刷励磁机的转子绕组
5. 无刷励磁机的磁场绕组
6. 副励磁机电枢绕组
7. 电压调节器    8. 铁棒

## 我厂开发的无刷励磁发电机简介

我厂生产的自励恒压无刷同步发电机有两个系列，近20个规格。BJS系列为引进英国BRUSH公司技术生产，计有如下规格(见表2)：

(表2)

型 号	功 率 (kW)	电 压 (V)	cosφ (滞后)	转 速 (r/min)	频 率 (HZ)	最高环境 空气温度 (°C)
BJS 7.62/6	430	400	0.8	1000	50	40
BJS 8.62/4	800	400	0.8	1500	50	40
BJS 9.84/6	1320	400	0.8	1000	50	40
BJS 8.84/6	600	600	0.7	1200	60	50
BJS 8.100/6	930	600	0.7	1200	60	50
BJSHW 8.100/6	930	600	0.7	1200	60	50
BSM 45.84/8	1470	600	0.7	750	50	50
BJS 10.120/6	1920	6600	0.8	1000	50	40

除表2中所列规格外，我厂还可按用户需要，生产其他派生规格。引进的BJS系列产品的励磁方式均为电抗移相电流相复励，均适于船用(包括海上钻井平台用)或陆用。

TFW系列为我厂参照国外几家公司的先进技术，结合我国实际情况而自行设计开发的自励恒压无刷同步发电机。目前已生产的有160kW—400kW之间的多种规格，均为4极，400V，50(60)HZ，其中200kW以下的为自并励，200kW以上的为电抗移相电流相复励，带可控硅调节器。均适于船用或陆用。还可根据用户要求设计不同规格，不同等级的无刷同步发电机。

此外，我厂还生产ZTFW—25中频发电机，STFW—11/5双电流发电机及核电站应急柴油发电机组用TFW1250—6无刷同步发电机。ZTFW—25中频发电机和STFW—11/5双电流发电机，均为军用无刷同步发电机。在动态性能、波形畸变率、噪声、可靠性要求等方面都优于其他产品，部分指标优于国军标、IEC标准以及美国军标MIL。TFW1250—6型的功率为6000kW，电压为6300V，频率为50HZ，由于使用场合特殊，该发电机在起动、加载、三相短路及使用环境等方面的要求均较一般电机高。尤其是高可靠性和抗地震性能，抗120°—180°误同期并网冲击性能是其他产品无法比拟的。

我厂无刷同步发电机均为F级绝缘，并采用部分H级材料，按F级考核。

### 结束语

任何先进的产品并不是处处都先进，无刷同步发电机也是一样。我们不能说哪一种最先进、最完美。例如1FC6系列具有体积小、重量轻等优点，但它为隐极机，转动惯量比凸极机要小，而BJS系列产品虽然体积和重量较大，但其转动惯量大、运行稳定性好、温升低、功率裕度大、过载能力强。如何扬长避短，就靠用户选择。可以说，真正好的电机是既具有先进的技术指标，又能得到合理的使用。



# 无触点同步电机

(苏联专利)

本专利的电机是用于移动设备上的发电机，该专利的目的是提高有效材料的利用和简化制造工艺过程。电机的组成部份有带绕组 2 的定子 1，带励磁绕组 4 的固定铁芯 3，转子 22 由爪形磁极 7 和 8 两部份组成，支承套筒 17 放在转子 22 的两部份之间，支承套筒端表面上做有轴向凸台，放在转子 22 的两部份的爪形磁极 7 和 8 的极间间距中。电机在结构和工艺上比较简单，因为不需要使用辅助紧固元件。插图 4。

本专利适用于电机，也就是移动设备上的发电机，特别适用于汽车和拖拉机上使用。本专利的目的是提高有效材料的利用和简化电机的制造工艺。

图 1 和图 2 绘出了无触点同步电机的纵剖面图，图 3 为支承套筒的端视图，图 4 为它的纵剖面图。

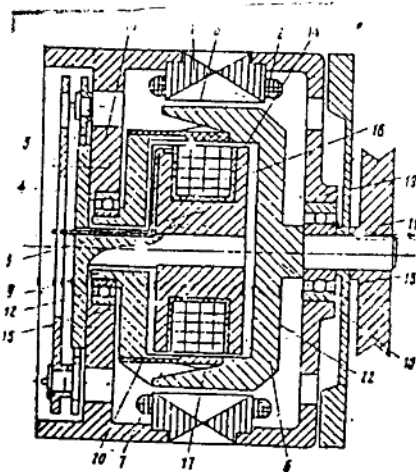


图 1

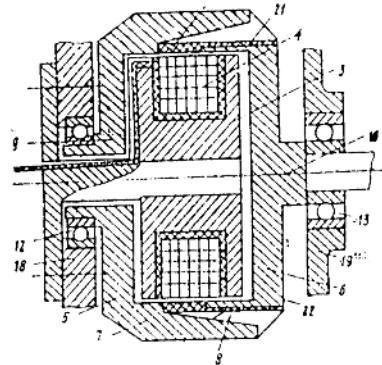


图 2

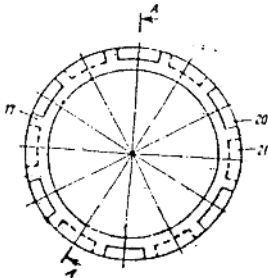


图 3

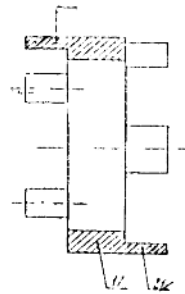


图 4

无触点同步电机包含有带绕组2的定子1, 带励磁绕组4的固定铁芯3, 带爪形磁极7、8和轴颈9、10的磁极部件5和6。轴颈10有传动装置11, 磁极部件5和6安装在轴承12和13上, 在带有励磁绕组4的铁芯3的外围, 相应的留有径向间隙14和端面间隙15和16。支承套筒17为非磁性材料, 安放在磁极部件5和6两部份之间。本机还含有轴承端盖18和19。支承套筒17在其端表面有纵向凸台20和21。支承套筒17的纵向凸台20放在磁极部件5的爪形磁极7之间, 凸台21放在磁极部件6的爪形磁极8之间, 如此构成一个整体转子22。

电机以如下方式工作:

因励磁绕组4获得直流电, 从而产生恒定磁通, 当磁极部件5和6旋转时, 在定子1的绕组2中感应出电动势, 电动势本身在定子1的绕组2中产生负载电流, 向用户送电。磁极6由传动装置11带动旋转的同时, 带动它后面的支承套筒17的纵向凸台21, 套筒17靠其本身的纵向凸台20传动磁极5旋转。

本专利的无触点电机的结构与原设计模型比较, 有较好的有效材料利用和更为简单的制造工艺。因为它不需要利用铆钉、螺栓和焊接就能将磁极固定在支承套筒中, 来实现从一个磁极向另一磁极传递旋转运动。克服了以下缺点: 第一, 工艺上复杂; 第二, 会引起转子一爪形磁极的磁路最强部份中的磁通量的附加损失。因为铆钉和螺栓的孔会减小磁极的截面, 而焊接会恶化磁极材料的磁性能, 归根结底减小了电机的输出功率。

#### 发明要点

无触点同步电机包括带绕组的定子、带励磁绕组的固定铁芯、由两部份爪形磁极组成转子, 磁极在带励磁绕组的铁芯外围有径向和端面间隙, 在轴承端盖的轴承内有轴颈, 支承套筒放在转子的两部份之间。该电机的特点在于提高有效材料的利用和简化其制造工艺, 在支承套筒的端表面上做有轴向凸台, 放在转子的两部份爪形磁极之间的间隙中。

郭纯成 译自: 《苏联专利 SU1624614A1》1991.01.30No. 4 专利公报

姚楚仁 校

(上接第36页)

表2 每极磁通

电机拓扑结构	如图4(a)中的“a”	如图4(b)中的“b”	如图4(c)中的“c”
FEM预测	25.87	25.99	24.66
分析计算	25.92	25.99	24.85

## V 结 论

为预测嵌入式磁铁转子电机开路气隙场

胡新宇 译自《IEEE Transactions on Magnetics》vol, 30, No. 1, JANUARY 1994,

曹飞校

磁场的分布, 研制了二维分析模型。因为它是在极坐标中建立的, 考虑了极弧半径磁通迭加以及极间漏磁。通过设置极弧至极弧端面, 得出表面安装磁体电机气隙场的直观算法。这个方法同样适用于电枢反应磁场分布计算和在任何负载条件下合成的磁场, 因此在设计过程的早期阶段, 提供了一种适合评价电机磁场削弱能力的方法。

# 带电子换向器的直流电机 及其圆筒定子的制造

(德国专利)

## 专 利 要 点

1. 一台电子换向直流电机的圆筒形定子在其铁芯上至少有一个电枢绕组。该定子有如下特征：定子铁芯是一由高阻抗高导磁的板材组成的封闭环；电枢绕组至少是一个由不间断的导线沿着圆筒轴的方向围绕板材来回绕成的线圈(10、17)，一些同绕向的平行且相邻的导线匝(11)构成一个绕组段(12, 12', 12"; 18, 18', 18")，而且这些顺序相联的绕组是以一定的距离互相排列的——在电流通过时总是产生相反的磁效应。

2. 根据要点1，定子有如下特征：

所有的绕组段(12、12'、12"；18、18'、18")都具有一相同的宽度；而且每两相邻的绕组段(12和12'；18和18')之间的距离等于或大于绕组段宽。

·根据要点1或2，定子有如下特征：线圈(10、17)的相邻的绕组段(12、12'、12"；18、18'、18")总是以相反的绕向绕制。

14. 根据要点1至3，定子有如下特征：

电枢绕组由一个为第一线圈(10)和至少一个为第二线圈(17)组成；并且第二个线圈(17)的绕组段(18、18'、18")分布于第一个线圈(10)的相邻绕组段(12、12'、12")之间的空档中。

5. 根据要点1至4，定子有如下特征：定子铁芯(1)上的固定介质能保证线圈在定子铁芯上各个绕组段以相同的宽度且相邻的绕组段之间间隔相同的空档固定地排列(10、17)。

6. 根据要点1至5，定子有如下特征：即形成定子铁芯的板材(1)是一软磁材料。该材料根据其厚度和其导磁率在转子永磁磁铁的磁场中不完全饱和。

7. 根据要点1至6，定子有如下特征：定子铁芯(1)是由含高硅成分的电机用硅钢片或一种含有Si、Fe、Me、Ni和/或Co作为金属成份在塑料晶体矩阵中的粉末烧结材料构成的。

8. 根据要点1至7，定子有如下特征：定子铁芯为多层板材叠制而成，且两层板材之间隔有一绝缘材料。

9. 根据要点1至8，定子有如下特征：即定子铁芯与电枢绕组之间有一层电绝缘层。

10. 根据要点1至9，定子有如下特征：板材在两终端之间应采用一种避免板材增厚的连接，特别是燕尾槽连接(3/4)或类似的连接形成封闭圆环。

11. 根据要点10，定子有如下特征：即在板材(1)两端的连接区域内装上传感器(6, 6')。该传感器用于测定转子上的磁极方位相对于定子上的线圈绕组段之间的角度。

12. 根据要点1至11，制造一台圆筒形定子的方法如下：

a) 首先准备一高阻抗和高导磁材料的平面带；

b) 沿着带的横向将一导线不间断地绕于此带上，构成一段段由平行且相邻的导线匝组成，相互顺序相接的绕组段。这些绕组段互隔一定的距离排列，使相邻的绕组段——当电流

通过时——总是产生相反的磁效应；

c) 在已构成的线圈的首端和尾端要预留用于连接的导线段；

d) 将已绕上线圈的平板带材切割成所需长度的块段，并将这些块段弯成圆环形状；

e) 然后将该带相邻的终端采用机械上牢固地且磁路上无突变的方式相互连接好。

13. 根据要点12的方法，有如下特征：即在第一个线圈绕到平带上后，在相邻的绕组段之间的空档上至少再用第二根不间断的导线绕上第二个相同结构的线圈；然后将带形成为圆筒形结构。

14. 根据要点12或13的方法，有如下特征：即一个线圈中相邻的绕组段总是以相反的绕线方向绕制。

15. 根据要点12至14中的方法，有如下特征：即在连接范围内安装传感器用来确定磁极的极性和定转子之间的角度位置。

16. 根据要点12至15中的方法，有如下特征：即在弯成圆筒形结构之前，将已按一定规律分布的线圈（即在相邻绕组段之间具有定义宽度的空档）固定于平面板材上。

17. 电子换向直流电机，其转子至少具有4个装在同一转子轴上的永磁磁铁。该磁铁与一个具有电枢绕组的圆筒形定子相邻，该电机还具有用于检测转子相对于定子绕组角度位置的装置，并具有一电子控制装置，它根据检测装置形成的信号来控制通过电枢绕组的电流，从而产生一驱动转子的磁场。这种电机有如下特征：即定子是一根据要点1至11的圆筒形定子。

18. 根据要点17，直流电机有如下特征：即电枢线圈(10、17)的一个绕组段(12、12'、12''、18、18'、18'')的宽度等于或小于转子上永磁磁极的半个极宽。

19. 根据要点17或18，直流电机有如下特征：即转子(30)的一个圆筒形永磁磁极装置(33)可转动(非固定)地置于圆筒形定子内(内转子)并与电枢绕组的绕组段距离很小。

20. 根据要点17或18的直流电机，有如下特征：即转子(30)的一个圆筒形永磁磁极装置(31)可转动地装置于圆筒形定子的外围(外转子)且与电枢绕组的绕组段距离很小。

21. 根据要点17或18的直流电机，有如下特征：即第一个圆筒形永磁磁极装置(33)置于圆筒形定子内；同一个转子(30)的第二个圆筒形永磁磁极装置(31)则置于圆筒形定子的外围，并且在某一径向上相同极性的磁极总是相对地分布。

## 说 明

本发明所涉及的是一直流电机的圆筒形定子，而且特别指的是一台永磁转子装置的直流电机的定子。本发明进一步论述了上述定子的制造方法，最后介绍的是一台用这样的新型定子装置制成的电子换向直流电机。这种电子换向直流电机既可作电动机运行，也可作发电机运行。

德国专利说明书3433695，公布了一种可作发电机运行或电动机运行的电子换向直流电机。其转子至少具有一个永磁体，且至少带有4个与转子转轴同轴装置的磁极。这些磁极本质上是垂直于转轴极化的。靠近转子的圆周有一定子，其定子绕组是一导体通过成型绕制成形状曲折的线路而构成，其顺绕和逆绕的各曲折段由一些平行的导体段组成。检测顺绕和逆绕的曲折段相对于转子的角度方位的一个装置提供信号到电子控制装置，它便控制通过定子绕组的电流，使其产生一驱动转子的磁场。

该直流电机的一个特殊结构形式是有两个驱动面，在两个永磁体转子之间的、宽度适当的环形间隙中有一固定分布的磁路。该磁路穿过定子的两个面向转子、布置有曲折形状线圈的主作用面上。分布于其中一个主作用面上的曲折形状线圈与分布于另一个主作用面上的线圈在作用上和开关技术上是分离的。

特别是，如果这样的电机作成40或更多永磁磁极的多极电动机，则其额定转速的稳定性就特别高。可达到的EMK(电动势)与磁场强度和回转速度有关，也与反复磁化的频率有关。反复磁化频率越高，得到的EMK也越高。这种电子换向直流电动机典型地用于当额定转速比较而言较高时要求具有高稳定性的场合，一般用于驱动旋转的记录器。当转速为3000 r/min或更高时将得到卓越的效果。与此相对，该项发明的任务在于，准备这种电子换向直流电机的圆筒形定子，该电机定子反复磁化频率很低，同时转速较低时也产生适应于运行电压的EMK。例如，当转速为1200 r/min或更低时，应能得到令人满意的EMK。

由一些平行的曲折形状线路构成的曲折形状成型线圈的生产是比较昂贵的，并且要预先准备很多复杂的设备用于线圈生产自动化，在顺逆绕曲折段间，将不可避免地引起绕组头子的欧姆损失，而不产生EMK。

相比之下，根据该发明的下一个目的应该初步准备一个作为这种电子换向直流电机的定子。该定子可以很方便地制造出来且根本只需很少费用，特别是在有两个驱动面的直流电机中，绕组头子的长度和在此出现的欧姆损失应减少到最小。

根据该发明的下一个目的应该给出制造这样一个圆筒形定子的方法。该方法可避免在制造具有多个导体线路的曲折形状线圈时出现困难。

最后根据该发明的另一个目的应该是提供一种电子换向直流电机的技术，该电机实际上不受可利用的转速的限制，例如在转速为1200 r/min或更低时也能提供一适应运行电压的EMK。

该发明的下一步任务、目的、优点和特点将从下面结合图样的叙述中得出。

该发明的一个观点涉及到一个电子换向直流电机的圆筒形定子，该定子的铁芯上至少有一个电枢绕组。在这个观点上根据该发明的上述任务和目的的解释有如下特征：即定子铁芯是一个由高阻抗、高导磁的板材构成的封闭环，电枢绕组至少是一个由不间断的导线绕成的线圈，该导线沿着圆筒轴向绕制而成，使得一些相同绕向的平行且相邻的导线匝构成一个绕组段，并且相互顺序相连且间隔一定的距离排列——当通以电流时——各相邻绕组段总是产生相反的磁效应。

在这样一个线圈中所有的绕组段应具有相同的宽度，且两相邻绕组段之间的距离应选为等于或大于该绕组段的宽度。为了使两相邻绕组段当电流通过时总是产生相反的磁效应，每两相邻绕组段的绕组方向必须相反；或者通过相应的焊接工作——可以交替地将相邻绕组段的头和尾相连。

根据以下标准选择板材，即根据其厚度和其在转子永磁体磁场中的导磁性板材不完全饱和为度。板材就是一带状或条状的材料，该材料在长度方向有很大的延伸率，而在宽度方向相反（在板材平面上垂直于长度方向），只有很小的延伸率；在典型情况下，宽与长的比例（此时板材尚未封闭成圆环）对一按该发明的圆筒形定子为1:10—40。在完整的圆筒形定子上，板材的宽度方向为圆筒轴的方向。板材的厚度与使用条件有关，对于输入功率只有几瓦特的

电动机大约0.3—0.5mm厚的材料就足够了。

按该发明的定子应该主要用于与多极的永磁体积相配使用，在这种力求的多极性电机中换向频率可能会出现100kHz的若干倍。由于板材导电性能差，尽管反复磁化频率很高，涡流损耗和磁滞损耗还是很低。这种板材应具有很高的导磁性，这样组成定子铁芯的板材在预期的转子永磁体磁场中将达不到完全磁饱和。例如导磁率将力求从大于40直至10,000乃至更多个 $\mu$ ，主要是从150至2,000 $\mu$ 。可用的材料，例如有通常的软磁材料和众所周知的软材铁氧体；还有用Si、Fe、Mn、Ni和/或Co作为金属成分掺在塑料矩阵中的粉末烧结材料也很适合；用一种具有高硅成分的电机用硅钢片组成的板材也能获得很好的效果；还有，用一定的Si/Ni合金构成的板材也适宜。

另外，以商品名“镍铁合金”出售的材料也适用。

在该发明的范围内令人惊奇地确认，当电流通过线圈时，例如在位于板材一个宽边的导线段中，用于防止一驱动瞬间产生的感应受位于另一边上的导线段中产生的相反方向的感应所干扰或影响，这样一种板材的“磁屏蔽”是完全足够的。另一方面，这样一种线圈的制造特别简单且经济：在这种线圈中，导线须不间断地围绕原本为平面的板材绕制（然后由此封闭成一个环），如果既充分利用在一个板材宽边上的导线段中产生的感应，也充分利用在板材另一宽边上的导线段中产生的感应来构成驱动转矩，那么自然会获得特别高的功率。因此，该发明的定子主要是安装在两个相同意义上运行的永磁体转子之间的环形间隙中。在这种情况下，绕组头子的长度完全只剩下在板材的窄边用于张紧导线段的这段长度。在典型情况下，板材的窄边尺寸与宽边或高度尺寸之比为1:20及以上，这样使得架于窄边的绕组头子的长度和在此出现的欧姆损耗非常小。

（与板材带的宽度尺寸相应的）定子的高度应完全等于转子永磁磁极的长度（高度）。在这种电子换向直流电机中，定子铁芯上线圈的一个绕组段和其与下一个绕组段之间的空档的总宽不允许超过转子永磁磁极的一个磁极宽度。由规定宽度的绕组段和相邻绕组段间规定宽度的空档构成所选择的线圈排列。这种排列必须持久地固定在板材上。对此可以在板材上预先准备固定件，用它来固定单个线圈或主要用来固定单个绕组段，使其形成所选定的排列。例如这种固定件可以是小旗状，它微微凸出于板材的一条或两条窄边并以相应于绕组段宽和/或空档宽的距离互相分布；或者可以在板材窄边的范围内贴上塑料型材；该型材作为线圈匝相应引导装置。或者可以借助于一种可硬化的合成树脂，使线圈按希望的分布固定绕在板材上。

该发明定子的电枢绕组可以由一个唯一具有上述结构的线圈组成，或者可以由两个或多个互相分离的线圈组成。由此可提高在气隙磁场中的填充系数，并且在相应的控制下，转子可实现自任何位置的自动运转。在这种情况下，第二个线圈（或下一个线圈）的绕组段分布在第一个线圈两相邻绕组段间的空档上。

电枢绕组的所有线圈可以仅是单层导线分布，然而多层的，例如两层或三层导线布置也可优先采用。由此可提高填充系数，从而可大大补偿由于气隙增大所引起的感应下降。

通常具有任意截面（例如圆截面）的导线材料可以用作制造电枢绕组的线圈。只要采用截面带角的、特别是矩形截面导线，就可以得到一特别高的填充系数。导线表面覆盖有由合成树脂或类似材料制成的电绝缘覆盖层，特别是在板材上也要涂上一层可固化的合成树脂或类似材料构成的电绝缘覆盖层，特别是可保证在板材窄边范围内的导线段弯折程度很大的地

方，不发生短路。

正如下面还将逐一详细阐述的一样，这一圆筒形定子，首先由一本来为平面的板材制成。在平面的状态下绕上线圈，然后弯成一个封闭的圆环。为了连接板材两端面以形成圆环，首先选用避免增厚板材的连接方式，特别是燕尾槽连接或类似的连接方式。已绕线的板材两终端应该在机械上互相牢固地且在磁性上无突变地相连。尤其可在板材的连接区域内安装检定装置传感器。这种传感器——例如霍尔传感器或通常的磁场传感器——可以获取转子相对于一板材宽边线圈的一个绕组的直导线段角度位置。由检定装置形成的信号被输向一控制电子装置，该装置通过电枢绕组的电流来控制，使其产生一驱动转子磁场。

本发明将介绍制造一达上述特征圆筒形定子的一种方法。就这一点而论，按此发明上述任务和目的的解释，可以用一种具有下述步骤的方法来表明：

a) 初步准备一条由高阻和高导磁材料制成的平面带；b) 沿着带的横向，用一不间断的导线这样绕在板材上，使形成由平行且相邻的导线匝组成相互顺序相连的绕组段，这些绕组段间隔一定的距离互相排列——此时当电流通过时——顺序相连的绕组段则总是产生相反的磁感应；c) 在线圈的始端和终端，预留一段用于连接的导线；d) 将此已绕线的平面板材截成所需长度，并将其弯成圆环；e) 然后将板材两端面在机械上牢固地、在磁性上无突变地相连。

尤其是，可以在绕上第一个线圈后，在平面带上顺序相连的两绕组段间的空档上，用第二根不间断的导线绕上相同结构的第二个线圈；然后将此已绕线的板材弯成圆筒。

当电流通过时，一个线圈的每两相邻的绕组段必须产生相反的磁效应，这一点可由此简单地实现，即相邻绕组段总是以相反的绕组方向绕制，或者可以将相邻绕组的头、尾交替相连。

这些绕组被按规定配置，在相邻两绕组段之间带有规定宽度的空档，在将它们绕上板材之后，在已绕线的板材弯成圆筒形之前，紧接着的首先是固定工序，例如为了固定可以涂上一层可硬化的合成树脂，接着时效硬化之。

实质上平面板材带的绕线，是可以连续进行的，然后将该已绕线的板材带截成所需长度段，并在其终端区域将其截成产生啮合的装配形状，对此例如可以是槽和锥头装配形状或一种燕尾槽连接的其他装配形状。在已绕线并已截成段的板材带的连接区域，首先要装上检定装置传感器，例如可以是霍尔传感器或其他磁场传感器，这些传感器可以测定转子上正经过的永磁磁铁的极性和转子对于定子的角度位置。

这种制造方法是将一本来是平面的板材用所解释的方式绕上线圈，然后将此板材弯成圆筒形状的定子——相对于前文所提及的制造曲折形状的线圈，明显地具有优越性和简单性。

该发明的第3个观点涉及到定子具有上述特征电子换向直流电机。

就这一点而论，该发明涉及到一种电子换向直流电机。该直流电机具有至少一个永磁磁铁转子，该磁铁则至少由四个与转子转轴同轴且本质上垂直于这些已极化的磁极，相邻于一个在铁芯上带有电枢绕组的圆筒形定子；再就是具有用于获取转子相对于各个电枢绕组段的角度位置的装置，还具有一个控制电子装置，该装置根据由检定装置形成的信号来控制通过电枢绕组的电流，使绕组产生一驱动转子的磁场。这种直流电机已登载在德国专利说明书3433695上或欧洲专利信息178380上。为了避免重复，涉及到这些印刷品的内容时，只有对解释该发明很有帮助、很有必要的内容，才应作为该资料的组成部分。

从这样一种电子换向直流电机出发，按该发明的上述任务和目的的解释有如下特征，即

预备一个具有上述特征的圆筒形定子，也就是说电子换向直流电机包括一个圆筒形定子，其定子铁芯是一个由高阻抗、高导磁的板材构成的封闭圆环，定子的电枢绕组至少是一个由不间断导线绕制的线圈，该线圈沿圆筒的轴向围绕板材绕制，使得一些同绕组方向的平行且相邻的导线匝组成一个绕组段，且顺序相连的绕组段间隔一定的距离分布——当通以电流时——总是产生相反的磁效应。

这一种直流电机既可用作直流电动机又可用于发电机。下面将着重说明该电机作为电动机且以多极、电子换向的直流电动机的形式使用时情况，但并不是说因此该发明存在局限。

当作为电动机运行时，该发明的一个特别的优点正好是电动机在低速，如1200r/min或更低时也能产生一高的、相应于运行电压的EMK，并且由于永磁转子的多极性，在所希望的额定转速时有特别高的稳定性。由于有这个特性，才存在多种用途的可能性，例如作为视频记录器的驱动电动机。

如上面已确定的，一台这样的直流电机的定子和转子必须相配，定子的高度（沿着圆筒的轴向）应完全等于转子永磁磁极的长度（高度）。定子线圈一个绕组段的宽度应等于或小于转子上永磁磁极的半个极宽。

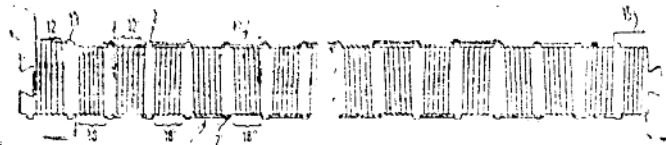
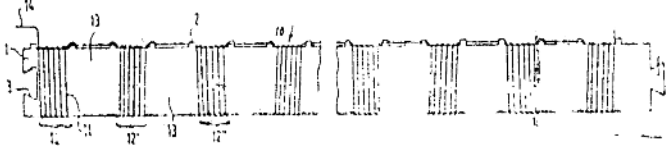
此外转子相对于定子的位置应这样选定，即转子永磁磁极和组成定子铁芯的板材之间的气隙应尽可能的小，以便得到一个尽可能高的填充系数。

根据该发明的直流电机的装置，在圆筒形定子内的转子的圆筒形永磁磁极装置是可转动的，并规定与定子绕组的绕组段的距离很小，这样产生一个内装转子。

或者转子的一个圆筒形永磁磁极装置可以位于定子之外包围圆筒形定子且规定与定子绕组的绕组段距离很小，由此得出一个外装转子。

一种电子换向直流电机的最佳方式是具有两个环状的、同轴布置的、同向旋转的永磁磁铁，由它们封闭形成一环状气隙，而上述的圆筒形定子无接触地置于该气隙中。在这种情况下，转子的第一个环状永磁磁铁装置位于圆筒形定子的内部且与板材内面绕组段间的距离很小，同一转子的第二个环状永磁磁铁装置位于定子的外部，并与板材外面的绕组段间的距离也很小；同时在通过该两磁铁装置的某一径向上相同极性的永磁磁极总是在同一径向位置。这样一种具有两个驱动面的结构，当电流通过时特别充分地利用了电枢绕组中产生的感应并将绕组头子的长度减少到最短，另外当电流流过时，在板材里感应的电磁转矩也为电动机的驱动转矩作了贡献，因此每单位体积可以得到一特别高的转矩。

下面将借助于优选的结构形式，结合图纸详细论述该发明，图示如下：





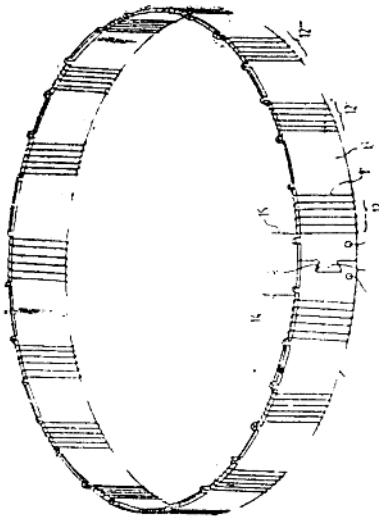


图 3

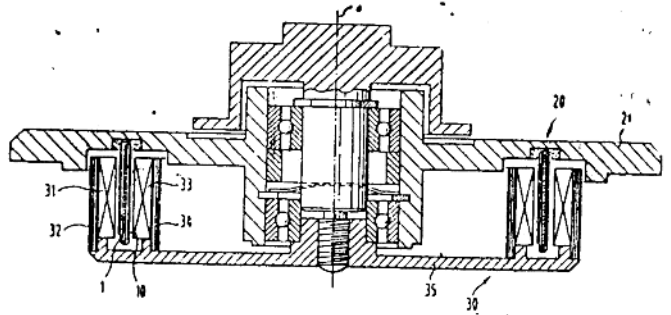


图 4

图 1 为按该发明的定子部件，即按该发明的设想绕上线的一块带状平面板材；图 2 为类似于图 1 的部件，而这块平面板材是按该发明的设想绕上了两个互不相干的线圈；图 3 为该发明所述定子的一种结构形式。该定子由图 1 的板材环状封闭而成型；图 4 为一台具有按该发明所述的定子装置的直流电动机的结构简图。

图 1 所示带状平面板材由一软磁材料制成，对于一典型的、多极的、输入功率为若干瓦特的电子换向直流电机来说，该带厚约 0.4 mm，高约 8 mm，在带的上缘有固定线圈用的固定件，即在这一情况下为一很小的、在规定的距离内分布的、微微凸出于上缘的小凸块 2。这样的带材 1 可以实际上无终点的形状从一卷材中抽出，在平面状态下绕线，然后截成所需的长度，再在两端上加工出用于机械上牢固地，而磁性上完全无突变的环状相连的结构。在现在这种情况下指的是在一端为槽形凹处 3，而另一端是榫头形状凸出部 4，这样便构成通常的燕尾槽连接。在带材 1 上，将线圈 10 绕上便产生所希望的电枢绕组。一根实际上无限长的导线用于绕制线圈 10，该导线垂直于带材 1 的长轴方向并围绕着带材 1 绕制，使得顺序相连的绕组段 12、12'、12'' 等等。相邻绕组段 12 和 12' 等，它们之间存在完全等宽的空档 13，使得各相邻的绕组段互隔一定的距离分布。所有的绕组段 12、12'、12'' 等，都具有相等一致的宽度（这是在带材长轴方向的延伸），在优选的结构形式中，该宽度等于空档 13 的宽度。每一个绕组段 12、12'、12'' 等，由平行、相邻、相互电绝缘的导线匝 11 组成，相邻的绕组段 12 和 12' 互相顺序相连，从而得到一个具有起点 14 和终点 15 的线圈。

必须注意到该发明的一个重要的观点：应在电流通过时，在相邻的绕组段 12 和 12' 中产生相反的磁效应。如图 1 所示，该要求可以由此很容易得到满足，即相邻绕组段 12 和 12' 以相反的绕线方向绕制，例如从凹处 3 向榫头端 4 视之绕组段 12 为顺时针方向绕制，而相邻的绕组段 12' 则为逆时针。或者该要求也可以由此得到满足，即各个相邻绕组段 12 和 12' 的头和尾交替相接，这些措施在专业领域是众所周知的，这里不必详细解释。