

无刷直流起动发电机

第三机械工业部第六二八研究所

1975. 12

非机密承制单位

技术报告

无刷直流起动发电机

利尔、西格勒公司动力设备分公司编写

(俄亥俄州、克利夫兰)

空军航空发动机研究室技术报告—71—24最终报告

1971年1月

本文件已批准公开发行和出售

出售范围不限

美国空军

空军航空发动机研究室

赖特、帕特森空军基地(俄亥俄州)

前 言

本报告根据合同No.AF33(615)3625的要求,包括由利尔、西格勒公司动力设备分公司(俄亥俄州克利夫兰)为美国空军空军航空发动机研究室赖特、帕特森空军基地(俄亥俄州)所进行的研究和研制工作。这项工作以空军方案No.812818,预算计划No.6(638128,62415214)为依据,并在P.R.Bertheand先生的监督下进行的(AFAPL/POP—1)。研究时间为1966年6月至1970年8月。

本报告没有从其他机密文件中摘引机密资料。本报告附录Ⅱ中每页上面的保密图例缺乏根据,故予删去。

本报告的发表并不意味着空军同意报告的研究结果或结论,只是为了交换和模仿设计思想。

空军航空发动机研究室发动机和动力分部美国空军负责人

Richard G·利比

目 录

第一章 目 的	(1)
第二章	(2)
2.0 引 言	(2)
2.1 无刷起动发电机系统的定义	(2)
2.2 无刷起动发电机系统的组成部分及其工作的概述	(4)
第三章	(6)
3.0 机电转换器	(6)
3.1 机电转换器的定义	(6)
3.1.1 转换器类型的评论	(6)
3.1.1.1 永磁电机	(6)
3.1.1.2 同极电机	(7)
3.1.1.3 伦台尔型电机	(7)
3.1.1.4 绕线转子电机	(9)
3.1.2 选择合适的转换器	(10)
3.1.3 转换器设计	(10)
3.1.3.1 几何尺寸的选择	(14)
3.1.3.2 定子	(14)
3.1.3.3 转子	(16)
3.1.3.4 轴和轴承	(16)
3.1.4 转换器的制造	(17)
3.1.4.1 定子的装配	(17)
3.1.4.2 转子的装配	(17)
3.2 附加的转换器元件	(22)
3.2.1 轴位传感器	(22)
3.2.1.1 设计	(23)
3.2.1.2 制造	(23)
3.2.2 旋转变压器整流器装置	(25)
3.2.2.1 设计	(26)
3.2.2.2 制造	(26)
3.2.3 发电机状态的整流器	(27)
3.2.3.1 整体的整流器微型组件	(31)
第四章	(31)
4.0 静止换向器	(31)

4.1 换向器定义	(31)
4.1.1 取得方法	(32)
4.1.2 承制者电路方案和微型组件的说明	(34)
4.1.3 对所获器件的评价	(36)
4.2 附加电气元件	(44)
4.2.1 轴位指示器信号的模拟—数字变换器	(44)
4.2.2 辅助电源	(44)
第五章	(47)
5.0 无刷起动发电机系统成品	(47)
5.1 系统的连接	(47)
5.1.1 机电转换器装置和静止换向器微型组件之间的连接	(47)
5.1.2 轴位传感器和静止换向器之间的连接	(47)
5.2 系统激磁	(52)
5.2.1 机电转换器的激磁	(52)
5.2.2 轴位指示器的激磁	(52)
5.2.3 辅助电源	(52)
5.3 系统输出调压器	(52)
5.3.1 设计方法	(52)
5.3.2 模拟板鉴定	(54)
第六章	(56)
6.0 无刷起动发电机系统性能的鉴定	(56)
6.1 发电机状态	(56)
6.2 起动机状态	(72)
第七章	(81)
7.0 结论和建议	(81)
7.1 发电机状态结果摘要	(81)
7.2 起动机状态结果摘要	(81)
附录 I 静止换向器开关技术说明书 No15—100011	(83)
附录 II 美国无线电公司技术建议“无刷起动 发电机电流换向用半导体装置”	(93)
附录 III 美国无线电公司最终报告“无刷起动 发电机的半导体混合换向装置”	(115)

第 一 章

目 的

计划的目的是和无刷直流起动发电机的要求如“A”览所述，它是美国空军 No.33 (615) — 3625 整个合同的一部分。为了和便于查阅起见，将“A”览的要求陈述如下。

“A” 览

无刷直流起动发电机的工作概述

I. 目的：这项计划的目的是设计无刷电机来代替有刷型电机，以增加直流起动发电机的可靠性和延长其寿命。

II. 范围：承制者将根据下列设计目的进行设计、制造、鉴定一种无刷起动发电机。

1. 起动发电机的体积小、重量轻，它的总体积不得超过 $11" \times 5.5" \times 5.5"$ ，重量不得超过30磅。

2. 起动发电机工作速度范围为7700—12000转/分，安装在 XIID 型传动机上，符合标准AND20002。

3. 起动发电机的发电机部分援引MIL—G—6162的应用部分，能在额定电压下连续地供给满额定负载。发电机的设计应符合下列参数：

- (1) 功率：6 千瓦；
- (2) 输出电压：30伏直流；
- (3) 输出电流：200安。

4. 当输入800安时，起动发电机的电动机部分的最小起动转矩为40磅·呎，并能在10秒钟内，从0到500转/分时，产生25磅·呎²的惯性负载。

5. 起动发电机能在超速25%的条件下，工作5分钟而无损坏。

6. 起动发电机的悬臂转矩不得大于160吋·磅。

7. 起动发电机的冷却要求要最低，在高空运转时，能按照MIL—G—6162的要求提供鼓风冷却。

III. 环境：起动发电机在所有下列环境下能正常工作：

1. 周围温度：-65°到125°F；
2. 高度：0到50000呎；
3. 湿度0到100%；

4. 振动: 20g—80到2000周/秒;

5. 冲击: 50g;

6. 线加速度: 10g。

起动发电机的工作不应受盐雾、霉菌、沙和灰尘的影响。这些要求是同MIL—G—6162的应用部分一致的。

Ⅳ. 鉴定: 承制者应保证这种起动发电机能在所有环境条件下工作; 起动发电机在每个环境试验后将保持其机械和电气完整性, 以及提供额定负载; 并保证这种起动发电机有如下的工作持久能力:

顺序	周围温度	高 度	负 载	时 间
A	-65°F	SL(海平面)	50磅·呎 ²	起动发电机起动和停止三次(起动之间相隔2分钟)
B	-65°F	SL(海平面)	100安	1小时
C	-65°F	50,000呎	200安	20小时
D	A. B. C重复试验10个循环			
E	125°F	SL(海平面)	50磅·呎 ²	起动发电机起动和停止三次(起动之间相隔2分钟)
F	125°F	SL(海平面)	200安	10小时
G	E. F重复试验10个循环			

很清楚, 上述各种要求要获得成功, 在半导体工艺和装配方法方面都需要先进的技术。这个计划需用固体换向器元件, 需要相当的资金。要注意, 这个计划的组织要符合“**A**”览中所述的目的是技术要求。

虽然“**A**”览的要求与普通起动发电机系统相似, 但其起动转矩的要求大于同等体积和重量的普通装置。

第 二 章

2.0 引 言

2.1 无刷起动发电机系统的定义

无刷起动发电机系统的技术要求与目前现存的用于普通直流系统的非常相近。但在机体所允许尺寸和重量比较起来, 它们在性能上有更多的要求。这个比较复杂的装置在使用操作上与普通系统一样, 易于理解。一般地说, 起动发电机系统是一种直流电机和组合系统部件的电气装置, 这样一组装置能作两种状态的工作。这两种状态的工作如

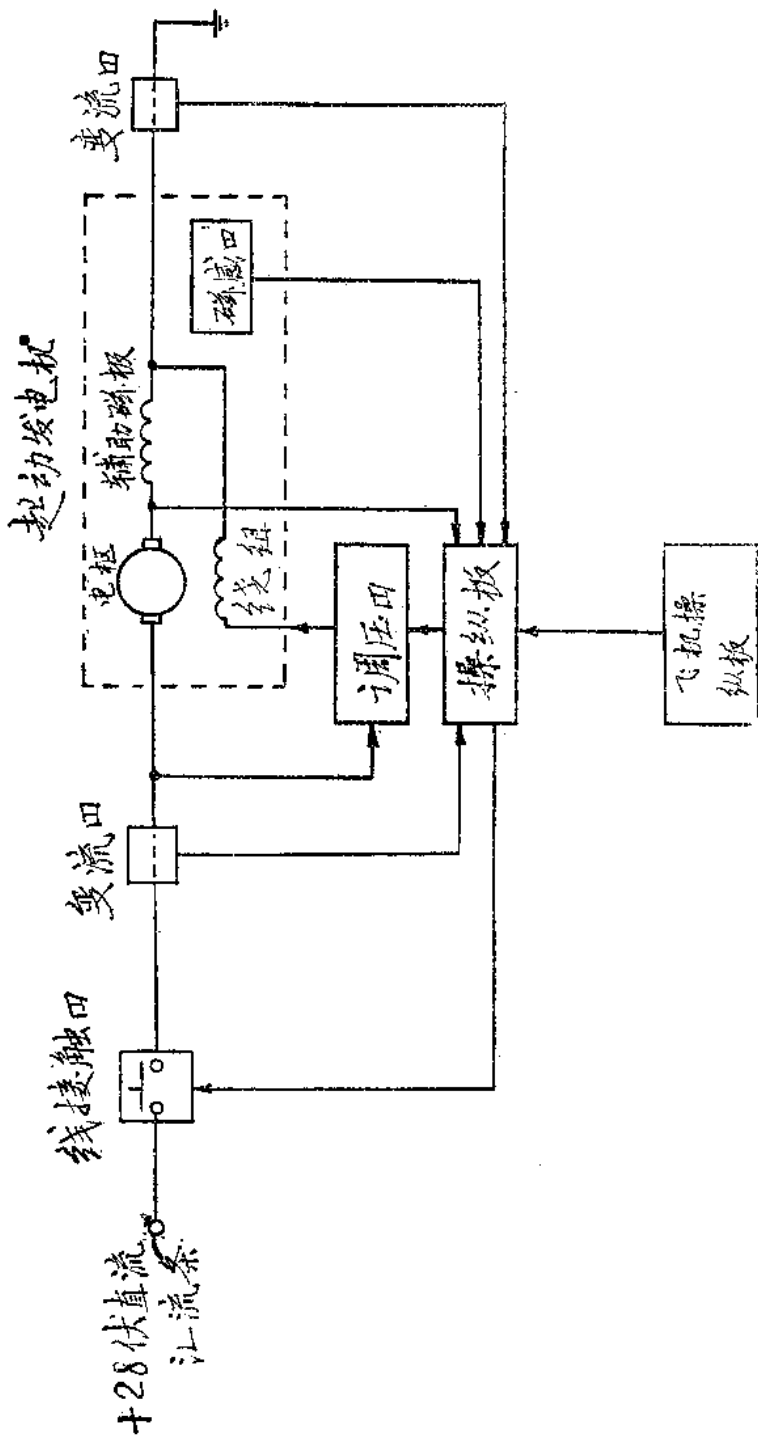


图2.1A 普通起动机发电机系统方框图

下：

(1) 这种系统是将电能变为机械能的转换器，提供必要的机械能去起动一定的飞机发动机。这种工作状态在本报告中叫做起动机状态。

(2) 这种系统又是将机械能变为电能的转换器，能给飞机提供必要的直流电源。这种工作状态在本报告中叫做发电机状态。

典型的普通起动发电机系统如图2.1A所示。很明显，图2.1A 中最重要的系统部件是起动发电机。普通直流起动发电机是一种直流电机，利用机械换向器完成电机绕组之间的电流换向，在方式上与上述定义的起动机和发电机状态一致。

无刷起动发电机是用固体器件来代替机械换向器的一种电机，这样取消了机械接触传导电流。这种设备既能作起动机，也能作发电机状态工作。

本合同主要是有关无刷起动发电机设备的。这个设备更详细的介绍可见下文。

2.2 无刷起动发电机系统的组成部分及其工作的概述

图 2.1B 系使用伦台尔型机电转换器的无刷起动发电机的概貌。这种类型的机电转换器（电机）包括固体转子（旋转部分）和多相绕线定子（固定部分）。这种电机通过固定的激磁机线圈来激磁，激磁机安装在定子上，并与转子部件同心。在转子和定子之间必须建立起稳态的连续磁通，磁通由固定激磁机线圈中的直流激磁电流产生。静止换向器部件固定在该机电转换器上，如图 2.1B 所示。这种部件为同心环形结构。在这种类型中，通过出现在静止换向器部件中的尾翼散热器提供必要的冷却。这种部件是固定的，安装在电机的定子壳体上。转子部件具有轴位指示器，安装在轴上。这种器件用来确定转子与定子的相互位置。这个位置对利用固体换向器使定子绕组作定时同步激磁是必要的。轴位读出器在图上由固定电磁铁表示。电磁铁传感器有效导磁率的变化产生其激磁电流的变化。这种变化一出现，相应的静止换向器固体开关就导通，从而使电机绕组与直流电源相连接而产生转矩偶。当转矩传到转子上，转子部件就产生旋转运动。同时指位器也向前转动。指位器的转动提供必要的讯号，使固体换向器其他换向片导通，从而给电机其他绕组通电。这种在电机绕组中不断推进的电流传导提供必要的转矩，而使转子部件和附加负载旋转起来。该无刷起动发电机使用的附加负载为喷气或涡轮发动机。电机转矩进一步增大，就加速发动机的起动，而达到点火速度和更快的速度。

在转子开始旋转期间，电机的反电势实际上为零，所以直流电源应保证一定的电阻，以使电流流入电动机绕组。因这个电流必须流过固体换向器，很明显，换向器的电流控制能力必须相应地与之相匹配。为了限制过大的电流流过静止换向器，必须采取某些限制电流的办法。这种无刷起动发电机在起动状态时，限制电流的精确方法，只有等到固体静止换向器较好地确定后才能得到。

当电机达到一定的速度后，其反电势就能控制电机的输入电流，输入电流的限制就不需要了。在一定的电机激磁中，最终转子的速度主要由直流电源的电压所控制。这时，预先点火的飞机发动机达到了以最小速度自身维持其工作。超过了这一点，就不要求无刷起动发电机工作在起动机状态了。这时电机已能作为直流发电机使用。直流电的产生是

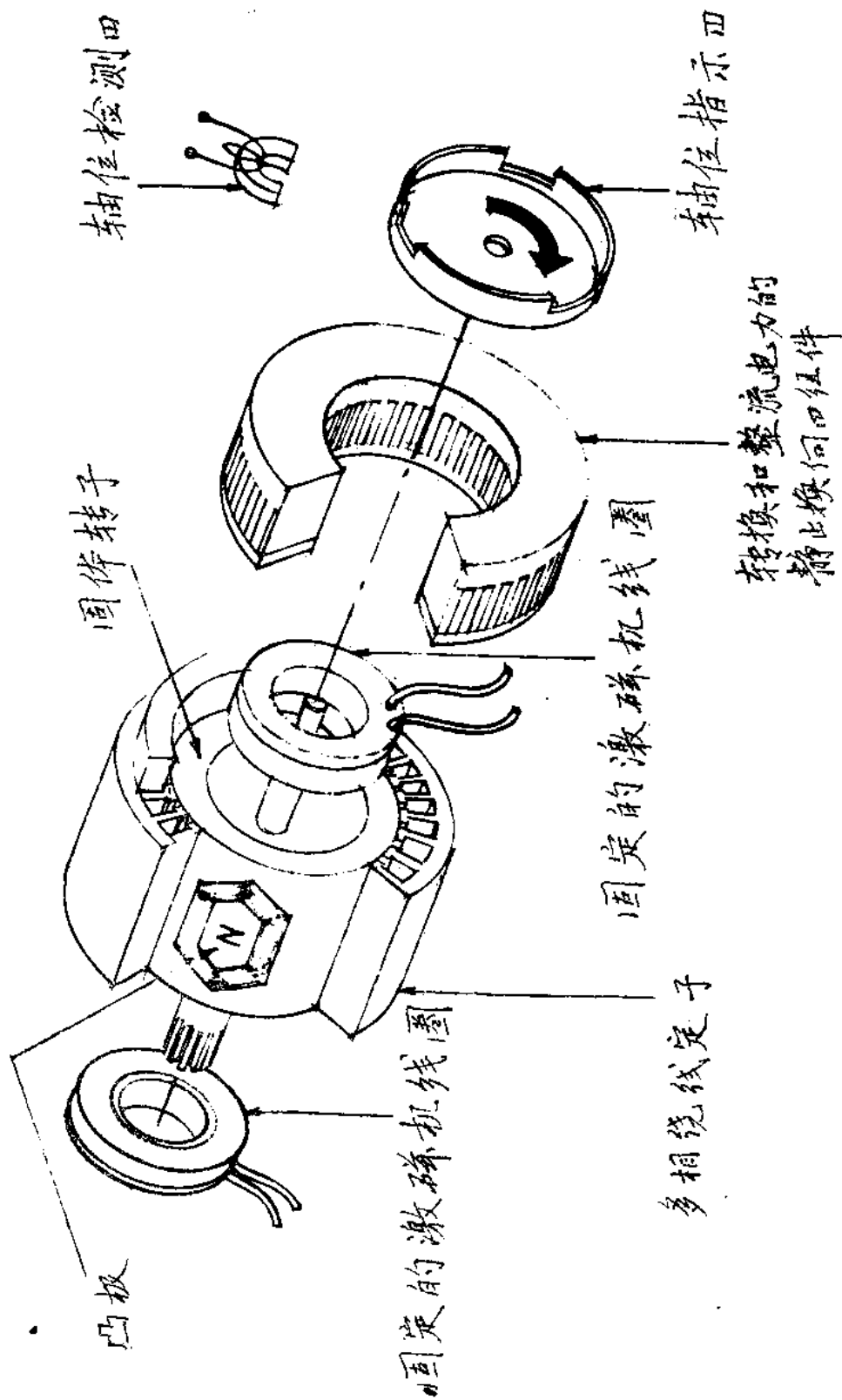


图2.1B 使用伦台型机电转换器的无刷起励发电机

利用固体整流器整流电机的输出得到的。电机的输出必须是平滑的，所要求的电压大小的无脉动直流电，并保证如“A”览中所述的整个发动机速度范围内都如此。

在两种工作状态下，该电机的激磁场是借助于保证电机激磁线圈中适当大小的直流电流来达到的。在起动机状态期间，激磁最高，所以在激磁线圈中需要最大的直流电流。在发电机状态期间，激磁线圈通过的电流，其大小与调压器所建立的输出电压调节量一致。

第三章

3.0 机电转换器

3.1 机电转换器的定义

在无刷起动发电机装置中的机电转换器用作双向机电能量的转换。例如在起动机状态期间，机电转换器将电能转换为机械能。无刷起动发电机轴的机械输出转动喷气或涡轮发动机。在发电机状态期间则相反，发动机机械轴的动力被无刷起动发电机转换器用来产生直流电输出。机电转换器在这种情况下是一种不完全的电机。这种机电转换器的不完整性明显表现其不能直接与直流电源相接。使机电转换器工作未成功的组件是换向器。在这种无刷起动发电机中换向器是用固体器件装成的。

3.1.1 转换器类型的评论

在选择机电转换器时，认识固体换向器是一种固定器件这一点是很重要的。因此，它必需安装在整个装置的框架上。同时，定子绕组也必须是固定的。这样就直接限制了机电转换器的选择。例如，直流电机使用机械换向器，它在轴上与电枢一起旋转。在无刷起动发电机的情况下，用固体换向器直接代替换向器是不可能的。很明显，这种用途的机电转换器必需是具有旋转磁极和固定的定子绕组的类型。这种类型的机电转换器的评论在本计划开始时就完成，其各项重点介绍如下：

3.1.1.1 永磁电机

永磁电机是适合可逆电机要求的机电转换器类型之一。这种电机的转子用永久磁铁做成，其定子的绕制适合固体静止换向器的要求。调查的结果，立刻发现了用这种方法解决无刷起动发电机机电转换器的缺点：

- 1) 这种装置在低气隙磁通密度下工作，所以其重量和尺寸大于其他电机；
- 2) 这种装置在发电状态时，需要特别的激磁控制，以符合输出电压控制的要求；
- 3) 当电机最大直径和长度如“A”览所述时，在高圆周速度时，永久磁铁的完整性是个问题；
- 4) 定子里大电流的退磁效应对永久磁铁的特性是不利的，无刷起动发电机在起

机状态时，定子绕组中需要大电流，这样，这种小型电机才能产生40磅·呎的起动转矩。

上述的每一个缺点都足以说明不能使用永磁电机，所以这种类型的机电转换器没有作进一步的设计探讨。

3.1.1.2 同极电机

因同极电机是真正的直流电机，这显得它们最适合于作直流发电机。但并非如此。第一，在提供输出电流时，它们使用汇流环、水银接触点或类似器件。这些器件的输出端电压很低，在本计划中不适合直接使用。由于汇流环、同极复合电机的任何其他组合在本计划中都被排斥了。

3.1.1.3 伦台尔型电机

开始时，看来伦台尔型电机是适用的，因它们符合于原先设计的可逆电机的几何尺寸。转子的几何尺寸符合于极部的设计，磁极由固定的安装在该电机定子壳体上的激磁线圈来激磁。图3.1.1.3A系典型的固定线圈伦台尔型电机的略图。

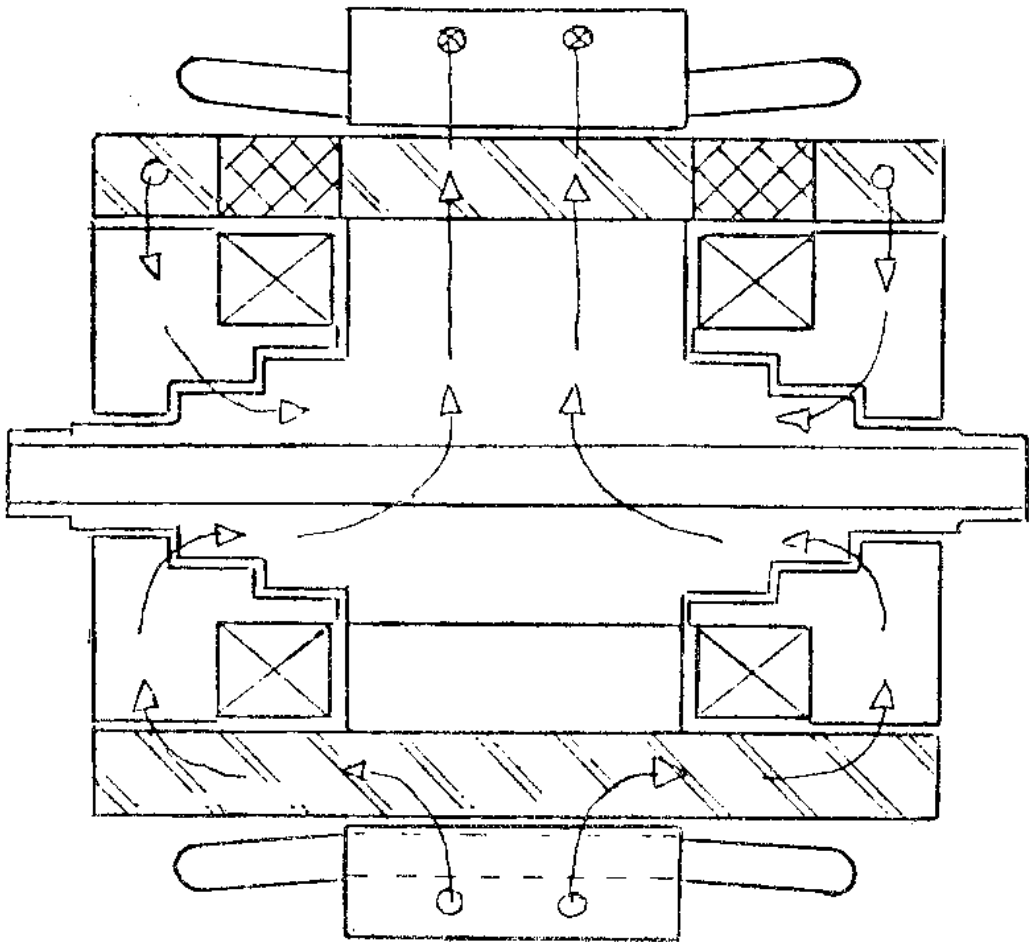


图1.1.1.3A 内线圈、固定式、双线圈伦台尔交流发电机（贝基、罗宾逊）
无刷固定线圈式伦台尔型发电机，使用两个激磁线圈，美国专利2796542所述，A. 贝基发行。

材料: 定子 海波可 50
 转子 H 130

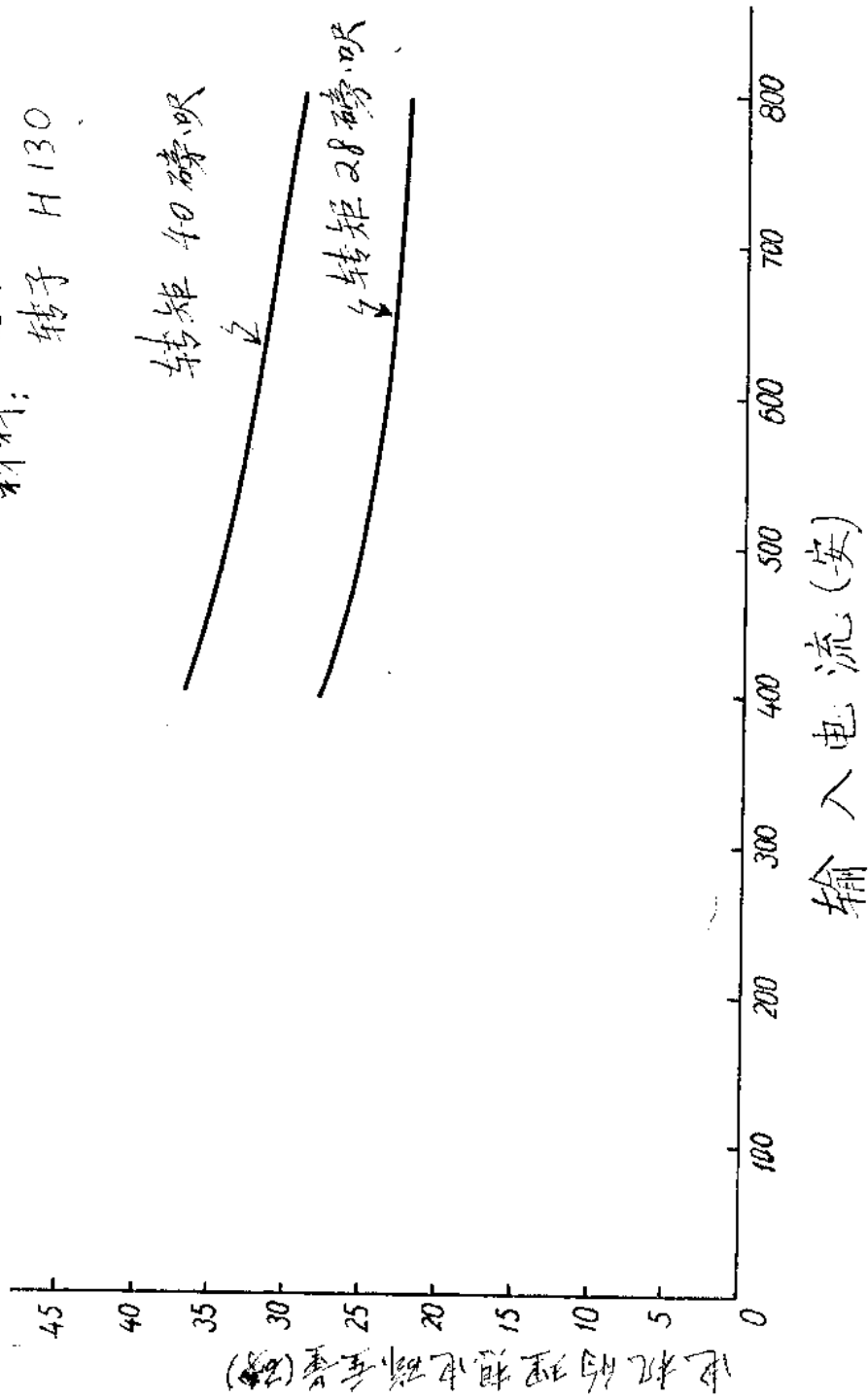


图3.1.1.3B 塞克松型电机—重量与输入电流的关系

图上的箭头表示电机内磁通的分布情况。因磁通曲线是由固定线圈通以直流电而产生的，所以该机电转换器使用稍大的一般调压器看来是很合适的。如超速规范所要求的，当工作于15000转/分转速时，转子的完整性是十分令人满意的，因这些类型的电机的工作速度基本上是超过那个要求的。适合伦台尔型电机一般说明书的转子和定子的几何形状的某种改变也是值得考虑的，但此处不适用。例如旋转线圈伦台尔型电机要求其激磁通过汇流环，这对本计划无刷电机是不适宜的。对扁平型电机的几何形状也进行了评论而舍弃了。这样此种用途最合适的电机就如图3.1.1.3A所示，并对其进行了原始的设计研究。对800、600和400安的输入电流条件作了探讨。同时，对起动机状态时产生起动转矩能力为28磅·呎和40磅·呎的设计作了估计。对电机的重量和尺寸进行了仔细的审查。定子的磁性材料使用海波可50，转子用H130电工钢制成。电机的理想机电重量用来作为比较的标准。此种研究的结果如图3.1.1.3B曲线所示。这个重量不包括提供磁通及其在转子中分布所必需的固定激磁线圈。

在研究过程中，发现该电机最大可能转矩为28磅·呎，这对起动机和发电机状态都不利。转矩高于28磅·呎的起动能力需要更大更重的电机。设计的结论如图3.1.1.3B曲线所示。很明显，该电机在初始起动时转矩能力为28磅·呎，其机电重量正好在30磅以下。因这个重量是电机理想的机电重量，这样，外壳、端盖以及附加换向器的重量就会使无刷起动发电机的全部重量超过30磅；而30磅为该装置说明书规定的最大重量。图3.1.1.3A所示产生所需转矩40磅·呎的伦台尔电机，在此处不适用。图3.1.1.3B表示电机在40磅·呎需要量时，机电重量与输入电流的关系曲线，曲线超过了30磅极限。此外，无刷起动发电机的直径也妨碍了塞克松型机电转换器的使用。这些电机需要长度与直径有一定的比例，以便在转子中建立有效的磁通曲线。电机的直径制定在6到6.5吋之间，这超过说明书的要求。从上述数据来看，伦台尔型电机尽管在物理结构上很吸引人，但发现对无刷起动发电机并不适用，因其重量和起动转矩的要求受“A”览所规定数值的限制。

3.1.1.4 绕线转子电机

关于绕线转子式电机所作的评论。这些电机利用转子上的绕组构成磁极。这是预先确定的，固体换向器将给定子中的固定绕组通电，旋转部分将提供必要的安装在电机轴上的极部。在选择电机的几何尺寸时，这是一个重要的标准。绕线转子电机符合这个标准。图3.1.1.4A表示使用凸极绕线转子设计的整个电机工作的典型几何尺寸。转子利用小型激磁机和旋转整流器来激磁，这样直流电流就可利用于主转子了。定子是一般的，并能设计得适应于固定换向器。对于4极电机设计的磁通曲线如图3.1.1.4B所示。这种类型电机的几何尺寸完全满足无刷起动发电机在发电机状态时的需要。在起动机状态时，电机的使用存在着两种可能性：一种是利用短路激磁绕组并在磁极外面提供阻尼杆的办法，电机如同步感应电动机那样起动；第二种起动方式是利用最大激磁能力时的磁场和对该电机结构的同步起动方式提供必要的电子设备。设计表明这种同步起动比感应起动产生更大轴转矩。这个发现基本上决定了对该无刷起动发电系统电机的设计，在起动机状态时为同步电动机，在发电机状态时为同步发电机。这种类型的几种设计与固体转子伦台尔型电机进行了比较，并作出了这种电机的理想电磁重量与输入电流的关系曲线。同时表明28磅·呎转矩时电机重量在15到20磅范围内。转矩超过28磅·呎，则受

电机尺寸的限制，正如图 3.1.1.4C 第二条曲线所示。材料用海波可 50。起动转矩为 40 磅·呎时，需要的电机电磁重量在 20 到 27 磅范围内，其输入电流范围为 400 到 800 安。

3.1.2 选择合适的转换器

总结设计，如图 3.1.1.3B 曲线所示，使我们能对此种用途的二种可能电机进行直接比较。第一种是伦台尔型固体转子电机；第二种是绕线磁极转子电机。因能符合说明书要求的为绕线磁极同步电机，故最后研究选中了它。在起动机状态时，它作为同步转换器工作，在定子绕组中输入 800 安电流时，产生 40 磅·呎的转矩。设计时，其完整的带罩电机重 25 磅，剩下的 5 磅为固体换向器，电机长度设计约为 9 吋。

3.1.3 转换器设计

在机电转换器（一种是固体转子伦台尔型发电机，一种是绕线磁极同步发电机）进行比较设计研究时，重点放在两者终端的换向电感值上。发现绕线转子电机输出端每相换向电感值能达到 15 至 20 微亨。与此相反，伦台尔型固体转子电机在其终端的换向电感值高好几倍。换向电感值由计算绕线磁极电机的起始瞬态电抗值来确定。为验证此数值，进行了发电机状态试验，根据示波器数据确定换向电感值（两数之间的吻合率在 10% 以内）。

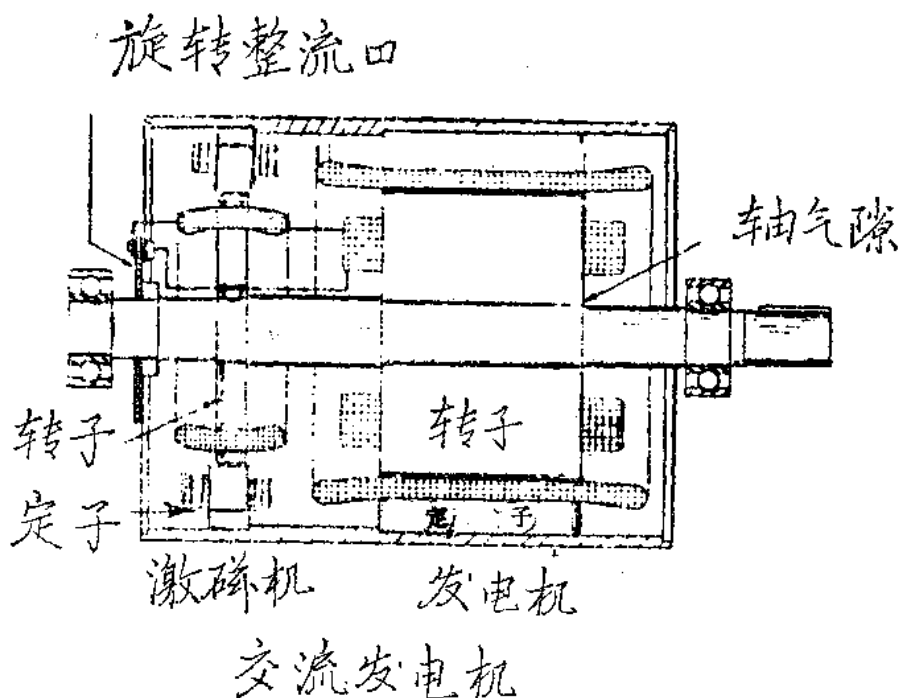


图 3.1.1.4A 无刷绕线磁极发电机排列图，激磁机转子中的交流电流由旋转整流器来整流，整流器输出直流电流馈给主发电机的激磁绕组

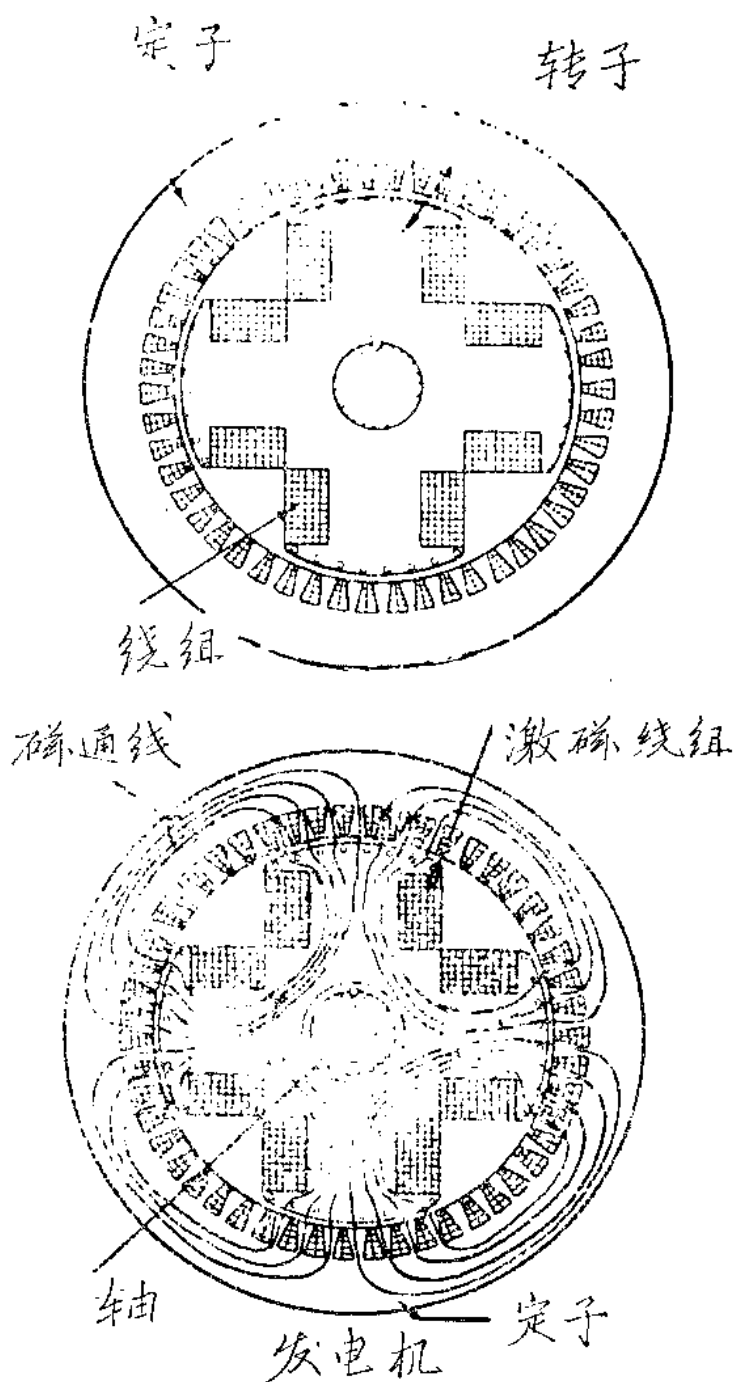


图3.1.1.4B 绕线磁极同步发电机断面图，表示绕组和磁通路线的安排

绕线磁极电机

材料：海波可 50

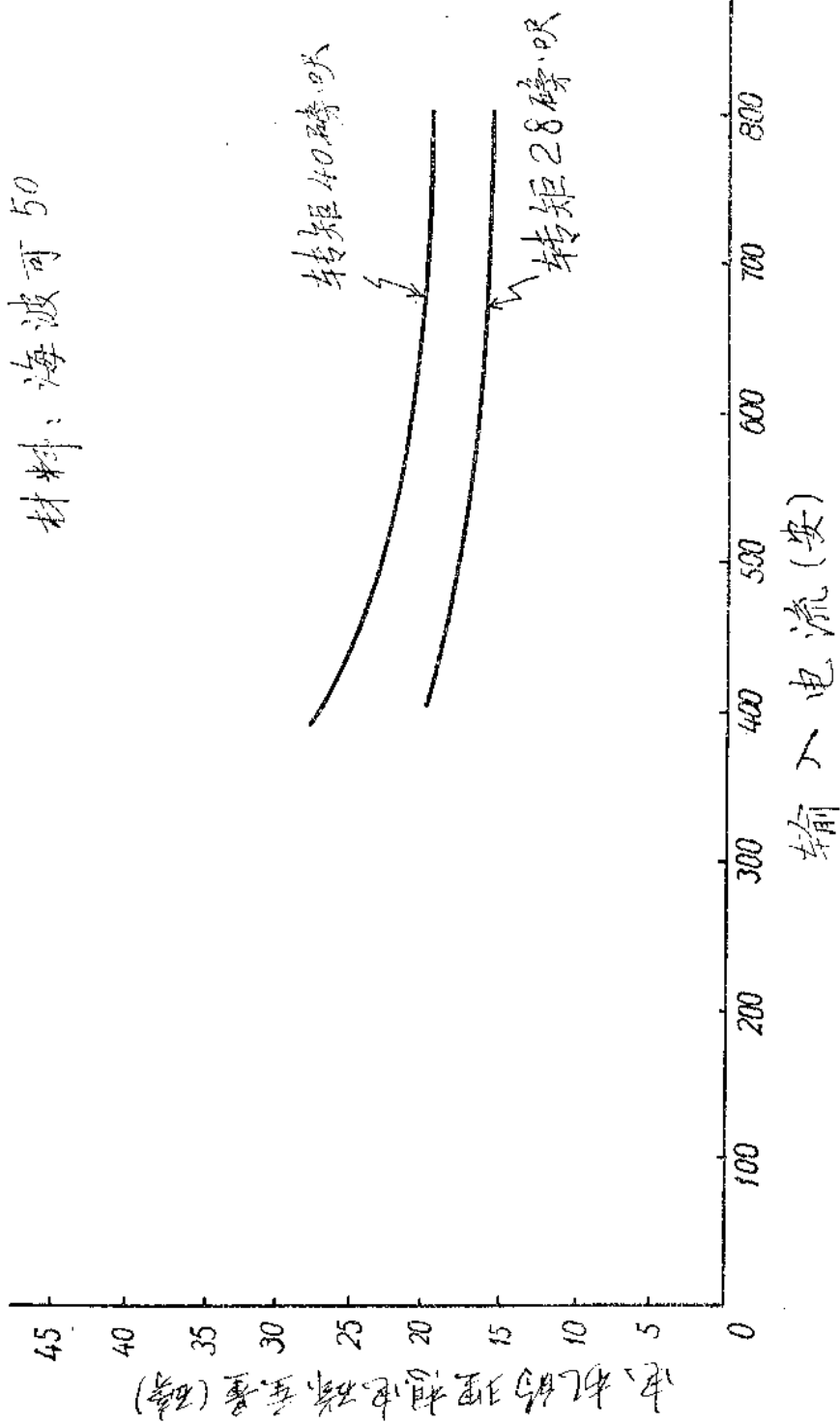


图3.1.1.4C 绕线磁极电机—重量与输入电流关系