

VDI-Berichte 482

机械部微电机科技情报网译

西德工程师协会

微电机会议论文集

汉诺威·1983

Gesteuerte und geregelte elektrische Antriebe in der Gerätetechnik

西安微电机研究所

西德工程师协会

微电机会议论文集

汉诺威·1983

机械部微电机科技情报网译

西安微电机研究所

序言

我以西德工程师协会与西德电气工程师协会精密仪器制造技术分会主席，并以会议召集人的名义为微电机会议论文集撰写此简短序言。

仪器技术是精密制造技术的核心，这使结构发生了深刻的变化，迄今仍在发展中。

结构变化主要是受计算机技术中数字技术及测量与调节技术的讯号处理发展的影响。

应用微电子技术(特别是微处理机及功率电子学进步有关的微型计算机)已能设计中心控制的仪器，因此，用它直接控制单个驱动元件或伺服元件。家用及类似用途电气驱动的仪器仍具有很大的经济意义。中心控制的电气驱动的仪器要求可控可调。这本会议论文集就是这次会议的主要报告内容。会议得到了西德工程师协会与西德电气工程师协会精密仪器制造分会及西德电工学会能源技术协会的密切合作，并得到了电气工业中央协会与西德机械制造协会给予的热情支持，同时又恰逢今年汉诺威博览会之际。

现代驱动技术除了必要的可控可调要求外，仍有进一步发展的明显趋势。应用微电子技术能进一步促进今仪器驱动技术的多样化。大量的单个驱动代替了以前在驱动部位常见的中心仪器驱动，它应符合其附加功能，并确定各种尺寸。

现在，在电动打字机上可看到多至八台的驱动电动机或机电驱动元件已不足为奇，各单个驱动装置分开控制，如用微处理机进行位置控制，就需要数字与调节电路。

此外，应用特殊直线电动机，都要进行新的仪器驱动设计，其特点是组合结构型式。直线电动机和无刷直流电动机都有新的发展，现在它们只在一定范围内被应用。在某些情况下，对仪器新的发展来说，它具有重要的意义。从这些新型电动机的应用，可看到其新的发展趋向。

永磁电动机和步进电动机目前已在可控可调驱动中广泛应用。

此次会议诸位召集人的任务是，使这次会议的主题不仅要考虑电子控制和调节各类电动机，还要反复考虑特殊组合仪器的驱动设计问题。微电子技术促进了电机结构的变化，特别是数据与办公仪器技术、电声与视频技术以及家用电器技术。另外，其另一任务是评述了仪器驱动技术迄今已达到的水平。由于时间短促，篇幅有限，不能详细予以介绍。

今年汉诺威博览会为这次会议提供了与展出电动机和仪器的各公司负责人及专家广泛交谈的良好机会。这次会议加强了电机、电子电路、机电元件制造厂商和仪器制造单位之间的经常必要的对话。

西德布朗斯威克大学教授 A·里希特

目 录

译者序

序 言	A.里希特	
无刷直流电动机—双脉冲无刷直流电动机的工作原理与应用	R.米勒	(1)
无刷直流电动机的效率	L.维特霍恩	(10)
复式杯形转子无刷直流电动机	C.C. 贾	(15)
稀土永磁盘式转子无刷直流电动机的工作参数	J.林德纳	(24)
无刷直流直线电动机	H.伯克尔	(32)
打字机中的直线电动机驱动	E.G.罗伊特	(42)
短行程无刷直流直线电动机的结构	H.莫克扎拉	(48)
小型磁盘机传动机构中的磁盘驱动电动机	K.施拉姆	(54)
办公机械位置传动装置调整回路的数字化	H.汉斯	(64)
应用在录音和录像机技术中的可调电气驱动机构	H.卡普	(74)
永磁直流电动机的应用	B.乌尔里希	(84)
仪用永磁直流电动机	W.科芬克	(89)
永磁式混合电压电动机的工作特性	A.奥登达尔	(94)
伺服电动机参数	W.H.赖因	(101)
步进电动机的静态和动态工作参数	H.P.克罗伊特	(108)
五相步进电动机的分步控制方法	G.盖贝尔	(116)
偏心对混合式步进电动机步距精度的影响	D.布雷梅尔	(126)
步进电动机测试技术	E.格雷克施	(131)
最新自动洗衣机的传动技术	P.里勒	(136)
洗衣机驱动控制	K.尼德迈尔	(144)
专用微型计算机在单相电网下控制多相异步电动机运行	K.韦茨尔	(151)

无刷直流电动机——双脉冲无刷直流电动机的工作原理与应用

R.米勒

摘要 无刷直流电动机(亦称电子整流电动机)品种繁多,常专供特殊用途。

本文先系统地简述最常用的结构,再讨论特别经济的电动机——双脉冲无刷直流电动机。下面叙述此种电动机应用的两个典型例子。

前言

电工技术已有一百多年的历史了,它使许多类型电动机的结构发生了巨大的变化。对传统结构电动机来说,文中所述电动机是最新颖的,其结构类型极多。无刷直流电动机的共同特点是,以电子整流代替机械整流。其功率范围从几毫瓦(微型涡轮驱动)到几千瓦,转速超过 10^3 。

已应用的结构有细长圆柱体和盘式两种。虽其工作原理差别很大,但都基于电磁感应定律。

本文不予讨论特殊结构部分,只简述其主要工作原理,并较详细论述双脉冲电动机,此种电机在经济上具有巨大的意义。

电动机工作原理

无刷直流电动机主要(但非唯一的)特点是绕组结构与控制类型不同。人们按大量互相独立的支路数和电气上每转过 360° 电角度不同的电脉冲数(故简称脉冲)控制来区分,同时,一条支路脉冲方向相同的电流脉冲,称之一个脉冲。按此特点,无刷直流电动机分为如下几组:

1. 单支路的单脉冲电动机

这种电动机定子上只布置一个支路,支路电气上每转过 360° 电角度,由可控半导体获一电流脉冲。因只有转过 180° 电角度才能产生驱动转矩,故这种电动机产生不理想的转矩,而在其运转的范围内必须有一推力或附加转矩推动转子。电动机电路图与产生的转矩示于图1。

2. 单支路的双脉冲电动机

此种电动机定子上也只布置一个支路,并通双脉冲励磁,双脉冲方向相反。因此,它

产生转矩比单脉冲电动机好得多，但仍然未产生均匀的电磁转矩。籍适宜的辅助转矩克服转矩为零的瞬间。所述电动机的优点是，结构简单，绕组利用率高（见图2）。

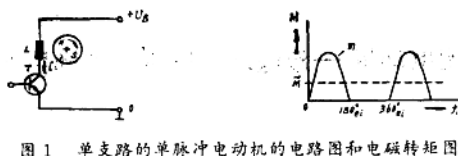


图1 单支路的单脉冲电动机的电路图和电磁转矩图

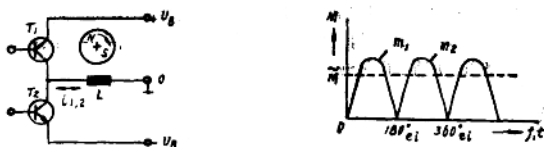


图2 单支路的双脉冲电动机的电路图和电磁转矩图

3. 双支路的双脉冲电动机

此种电动机定子有两个支路，以双脉冲电流交替励磁。由此可知，转矩的产生原理与单支路、双脉冲电动机一样，绕组的利用率约为50%。所述电动机的优点是电子脉冲控制简单，电磁转矩间隙如单支路电动机一样，也籍适宜的辅助转矩予以克服（见图3）。

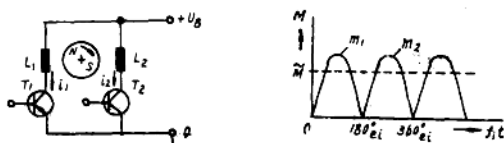


图3 双支路的双脉冲电动机电路图与电磁转矩图

双支路的双脉冲电动机的特殊形状是由于绕组另一种布置所致。两个支路嵌在不同槽内，跨距为 120° 电角度，且磁极结构特殊，两个磁极宽度为 120° 电角度，极间宽度相同。籍这种电机结构可避免上述转矩为零的瞬间。下面将着重叙述这种电动机的特殊性能。

4. 三支路的三脉冲电动机

此电动机定子上分布三个互成 120° 电角度的支路，常以单脉冲控制之。即定子周期性每 360° 的电角度通三个脉冲电流。只需装三个功率三极管，这是所示电动机的主要优点。而其缺点是，绕组利用率比较差（通常约为33%），所需位置传感器数最多。多数是利

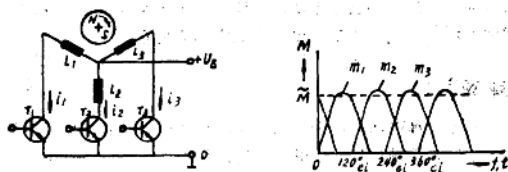


图4 三支路的三脉冲电动机电路图和电磁转矩图

用三个霍尔发生器或类似接受磁性的半导体元件（见图4）。

5. 四支路的四脉冲电动机

此电动机定子上分布四个互成 90° 的支路周期性地依次输四个脉冲电流。这样转矩才能无等于零的瞬间，绕组利用率约为50%以下。电子线路费用却比双脉冲的多一倍（见图5）。

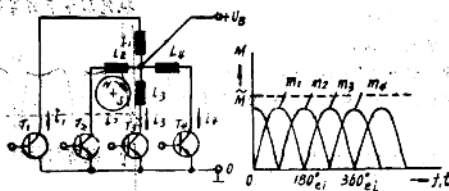


图5 四支路的四脉冲电动机的电路图和电磁转矩图

6. 三支路的六脉冲电动机

此电动机定子上布置三个支路，它为星形联接或三角形联接，一般不用星形汇集点。经六个功率三极管周期性地输六个脉冲电流来控制绕组。这种电动机不仅能产生非常均匀的转矩，而且材料利用率也最佳。其缺点是位置传感器（三个霍尔发生器）及电子控制电路费用较高（见图6）

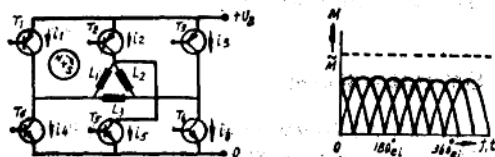


图6 三支路的六脉冲电动机的电路图和电磁转矩图

四支路的六脉冲以上的无刷直流电动机在技术上几乎没有什么优点，因费用和成本与脉冲数差不多成线性增长，这种电动机没有什么实际应用意义。

附加转矩的产生

如前所述，双脉冲原理电动机结构特别简单，只需一个位置传感器（例如，一个霍尔发生器）和两个功率三极管进行控制就够了。这两种原理电动机的材料利用率高，其缺点是，旋转 180° 电角度产生的电磁转矩有等于零的瞬间，



图7 定子冲片图

解决上述问题的有效方法是产生附加转矩，该转矩不是通过电磁效应，而是通过永磁转子及软磁定子之间的磁阻效应形成的。为了达到此目的，定子应有与转子位置有关的可变磁阻。适当地解决此课题是，定子外形与圆柱体略有不同，如图7所示。

籍这种定子形状及转子磁化，使附加转矩具有最佳曲线，达到满足附加转矩值的要求，此种附加转矩示于图8。依热力学第一定律平均值为零，即它不产生功率，但它有如

下两个作用：

1. 附加转矩有助于起动
2. 它能补偿电磁转矩脉动

具有附加转矩的双脉冲无刷直流电动机主要应用在驱动经济性要求高，但转矩稳定性要求不高的场合。

在这种情况下，双脉冲电动机比传统的经济性好多。

对有磁阻—附加转矩的双脉冲电动机来说，只在恒定负载情况下，附加转矩与电磁转矩的迭加产生很小的转矩波动，负载在较大波动时，转矩以二倍换向频率脉动。

重要的是，不是在转子任一位置都能达到满起动转矩的，应只有在额定运行时的校正磁阻——附加转矩对电磁“死点”处起作用。

因此，这种双脉冲电动机在起动转矩要求较高的场合下是不适合的。

无附加转矩的双脉冲电动机

在这一方面，应采用无附加转矩的双脉冲电动机。其工作原理基于适当转子磁化形状与适当的双支路定子绕组结构，能将单支路绕组的转矩扩大至 180° 电角度以上的角度范围。这与把二次谐波人为地叠加到旋转感应反电势的意义相同。从而使得两个支路的转矩

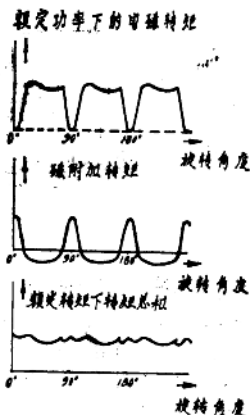


图8 附加转矩作用曲线图

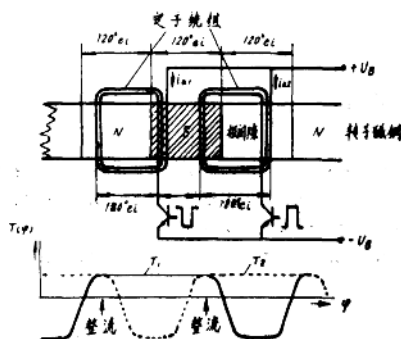


图9 一台无附加转矩的双脉冲无刷直流电动机的原理图与转矩曲线图

对上述结构转子，此法尚不能立即应用，因转子磁极间隙很大（120°电角度）。

在此转子范围内，霍尔发生器无输出电压，霍尔集成电路便成不动作的开关状态。为了这种电动机用磁性传感器作为位置传感器，必须采取特殊措施：凡转子上极间隙大的转子，应装置附加极，此附加极安置在原来磁极间隙中间，它给磁极传感器提供一个明显的磁场方向变化。

当然，附加极对产生转矩的均匀性不利，每个整流求相电流恒定时，转矩为梯形曲线。但这一缺点通过如下措施是可以补偿的，即附加极根据控制磁性传感器的要确定宽度。在磁极间隙剩余范围装对称极，它起附加极的作用，但对传感器无干扰影响。具有特殊磁化的此种双脉冲电动机原理图如图10所示。

当电枢电流恒定时，转矩曲线基本与图9所示相同。

无附加转矩的这种双脉冲电动机的优点是众所周知的，其结构和电子线路实际上有磁阻—附加转矩的双脉冲电动机的一样简单，它能在每一负荷点产生一很均等的转矩，在转子任意位置能产生满载起动转矩。此种电动机的缺点不为人们所熟知，与整流双支路绕组及转子永磁体磁场分布近似于矩形的双脉冲电动机比较，当铜损相等时，则产生的转矩约减少一半，而比单支路双脉冲电动机约降低到25%。这是由于转子永磁体利用率低，绕组节距太短和双支路单脉冲的运行。

不同时等于零，则可避免“死点”。

随转子每个磁极磁化宽度为120°电角度，每对磁极极间隙为120°电角度，定子上布置的两个绕组支路相互错开180°电角度，跨距为120°电角度。从理论上讲，当从一个支路至另一个支路换向时，有60°电角度的重叠区域的话，每个支路在240°电角度范围内的无间隙转矩，能可靠地避免“死点”。

·图9为此种电动机结构原理图与理想转矩曲线图。

一般来说，采用电磁式传感器（例如，霍尔发生器或霍尔集成电路）作为无刷直流电动机整流的位置传感器，由于价格原因，传感器直接由转子永磁体控制。

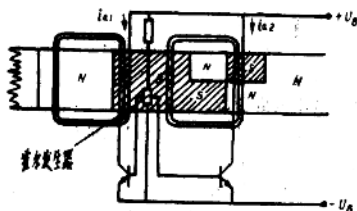


图10 用霍尔元件控制的双脉冲无刷直流电动机

当为规定结构尺寸及输出功率时,不应不顾效率,而只求取消附加转矩。此种结构电动机近来被广泛地应用。

用无刷直流电动机驱动的风扇

双脉冲电动机第一个典型应用例子是驱动仪器用风扇。近十年来,由于仪器技术中日益迅速应用电子技术,便扩大了直流电源的应用趋向。许多仪器至今除了直流稳压器以外,还有本身的直流电压,多数在5~24伏之间低压电也比较安全。

这样便不难理解,直流风扇应用日多的原因,此种风扇首先要具备下述两点:

1. 直流驱动
2. 寿命长,即至少20,000小时

用有直流-交流换流器的交流风扇也能满足上述要求,而无刷直流电动机具有如下优点:

1. 效率高,即用电量很低;
2. 通过改变电源电压,在宽广范围内能调速;
3. 无线电干扰小;
4. 附加机能,例如:
 - 4.1 通风量恒定不变时的调速;
 - 4.2 根据温度调节转速;
 - 4.3 用简单附件监视转速;
5. 温升很低。

无刷直流电动机驱动的风扇附加机能优点也已证实,采用无刷直流电机的最初原因(直流电压驱动,取消换向器)居于次要地位。目前要求应用具有最佳气流风扇日益增多,最佳系指寿命、耗电、噪音及积尘而言。

双脉冲无刷直流电动机驱动的风扇能很好满足此要求。但电子整流线路费用较高,因此,大大妨碍采用此种直流风扇。因此,今后进一步发展趋势是首先再将整流电路简化。

图1所示为1976年研制的一种整流电路。它有一个霍尔发生器(位置号24),发生器经一个三级放大电路使双支路电动机工作。图12所示电路是最新的电路,霍尔发生器集成电路直接控制双脉冲末级。上述二电路都有防止转子卡住及错误的极化的装置,总驱动效率为50~70%。

今已供应额定电压5~48伏直流电双脉冲无刷直流电动机风扇。

图13所示为双脉冲无刷直流电动机驱动的风扇内部结构。

直流电风扇的发展不限于4 1/2吋边长的标准型,而较大型的为布置电子线路提供了较大位置,因此,电机设计者便能安置附加机能及有功率三极管的功率末级。所述桥式电路末级使电动机大大提高效率,并能扩大工作电压的范围。附加机能系指电流限制与转速调节等,调速也与温度传感器的温度有关。

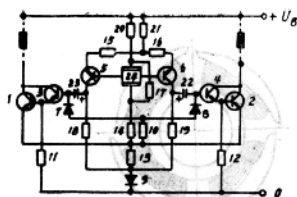


图11 三级整流电路

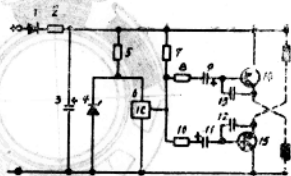


图12 已简化的整流电路

监视转速的附加电子线路当转速下降至最低时可发出报警讯号,在6吋风扇凸缘上不需附加装置。进一步发展方向是小型直流风扇,其外形尺寸如 $62 \times 62 \times 25$ 毫米,对于这种小尺寸双脉冲电动机由于结构和电子整流线路均简单,因而获得广泛应用。

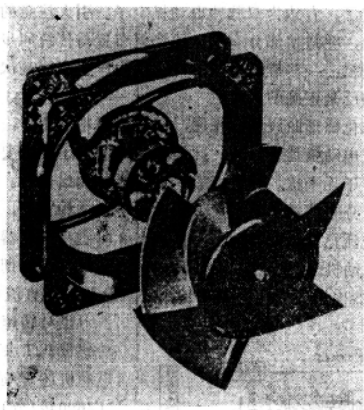


图13 无刷直流电动机驱动风扇的内部结构

用无刷直流电动机驱动主轴

双脉冲无刷直流电动机另一个主要应用方面是作固定盘式存储器的主轴驱动。第一代硬盘式存储器是洗衣机的不轻巧的部件。其主轴通常靠皮带用交流电动机驱动。以后该盘直接驱体积日益缩小,但功率还较大。除上述用交流电动机间接驱动外,现在用无刷直流电动机驱动的逐渐增多,而电机故为外转了结构。

驱动盘式存储器主轴电动机的共同结构是,轴承系统尺寸应尽量配合精密。当给定电动机外形尺寸时,使定子铁心内径便增大。图14所示为主轴转动用无刷直流电动机定子,

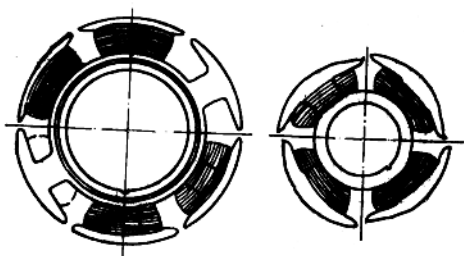


图14 驱动主轴的无刷直流电动机定子

左边为六脉冲电动机定子，右边为双脉冲电动机定子。引人注意的是，在这两种情况下，绕组嵌在少数几个槽内，并搭接部分有误。此绕组布置与传统同步电机嵌线不同，无刷直流电动机很少用这种绕组，一些旋转电机的专家认为产生空间高次谐波磁场的此种绕组是极不适宜的，然而从相反是正确的。

集中绕组与转子磁化梯形曲线相互作用，能提高材料利用率，提高电子线路和电动机的效率，此外，还可使电动机造价低廉。此结构简单的定子绕组要产生空间高次谐波磁场，它对永磁非导电转子无干扰。相反，它有助于增加输出功率。

此外，因所示绕组分布使轴承系统尺寸较大，电机结构紧凑，故能较理想地满足驱动主轴的要求。除了用交流电动机间接地驱动外，在8吋磁盘存储器中，而多数情况下采用四与六脉冲无刷直流电动机来驱动。8吋磁盘存储器在70年代末期已开始发展起来。较新一代5 1/4吋盘式存储器中用有磁阻—附加转矩的双脉冲无刷直流电动机直接驱动。

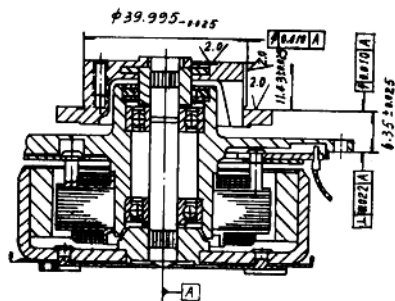


图15 驱动主轴用电动机剖面图

虽对转速恒定的要求高，转速脉动超过0.1会产生干扰，若采用此种电动机还是适宜；主轴转速较高（3600转/分），旋转磁盘摆动载荷大，这便产生较大的摆动能量，能很好消除短时转矩脉动。因仪器每一振动都会引起干扰，这是由于磁道距离短及读写头向上“飞行高度”极低，与此相反，除轴承和盘毂要求有极高机械精密密度外，电动机平稳运行也很重要。正如实践所证实，具有最佳附加转矩的双脉冲无刷直流电动机完全能符合上述条件。

乍一看来，无附加转矩的双脉冲

电动机也能满足上述条件,然而可以发觉,此种电机材料利用率低,只有采用优质、昂贵的磁钢,才能提高材料的利用率。此外,实践还证明,定、转子之间力含有不理想的径向和轴向分量,整流时它突然工作点移动,结果便产生附加振动和噪音,这对日用电器是非常不利的。显而易见,在绝大多数 5 1/4 吋盘式存储器中,今采用具有磁阻—附加转矩的双脉冲整流无刷直流电动机。

展 望

无刷直流电动机至今仍在发展,而且又有新的飞跃发展趋势。但其总的发展趋势是结构简单,小型化,价格低廉,同时,还要力图使电动机尽量符合所提要求。一台电动机只性能参数高,并不是特别理想的,而一般则需要价格低的电动机。这不仅包括输出功率,而且也涉及其它指标,例如,效率、转矩均匀性、能正、反转运行及许多其它技术特性。

对传动实际要求的详细分析及要求电动机经济性好,这开辟了双脉冲整流电动机新的应用可能性。

参考文献

- [1] Moczala, H. Bürstenlose Gleichstrommotoren mit einsträngiger Ständerwicklung ETZ-A Band 94 (1973) S. 526 bis 530
- [2] Müller, R. Drehzahlregelung einsträngiger kollektorloser Gleichstrommotoren Feinwerk & Meßtechnik 84 (1976) S. 161 bis 164
- [3] Teile dieses Beitrages sind im Rahmen der "Motorcon" in Genf 1982 veröffentlicht worden Müller, R. DC-Motors for special applications, proceedings of the third Motorcon 82 S. 299 bis 309

李文斌译 陶志鹏校

无刷直流电动机的效率

L. 维特霍恩

1. 前言

若要使无刷直流电动机获得最高效率, 便需使用较优质的材料。此外, 还应分别合理地确定铁心截面几何尺寸、绕组接线法、气隙磁感应 (若自由选择的话)、电动机外形尺寸及转速。

本文旨在使无刷直流电动机的铜损和铁损作为最主要参数的函数。选择冲片铁心截面尺寸的原则是, 使铜损和铁损最小。

为此, 首先应探讨无刷与有刷直流电动机铜的利用率。

2. 铜的利用率

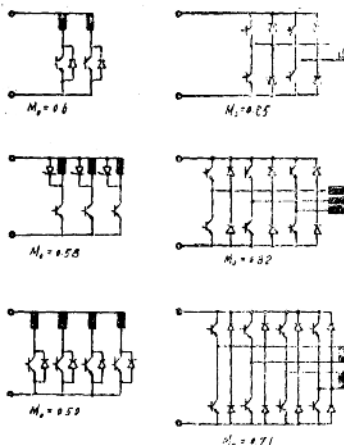


图1 一台两个、三个与四个支路中点接地式全波整流的无刷直流电动机和一个三个与两个支路桥式整流的电动机的电路原理图

今以有机机械换向面磁极覆盖宽度为 $180^\circ/\text{P}$ 的一台直流电动机为例, 当它通电后, 全部绕组产生转矩。理想电动机的匝数、绕组电阻、电流与转矩假设为 100%, 其它类型电动机与它相比较, 其内径、气隙磁感应、铁心长度、转矩、铜重量和槽满率任何情况下应都一样。同时可不考虑, 内转子无刷直流电动机通常比有刷永磁直流电动机的外径大 (相等内径), 绕组端部长度差异也忽略不计。

实际上, 永磁直流电动机磁极覆盖系数通常为 $130^\circ/\text{P}$ 。在一定转速下, 如此种电动机绕组内感应电压与磁极覆盖宽度 $180^\circ/\text{P}$ 电动机的电压一样, 则匝数应提高 $180/130$, 这就使绕组电阻增加此比值的平方, 假设铜损一样, 电流和转矩只是理想值的 72%, 若无刷直流电动机常常一个支路始终通电, 中点接点全波整流时, 这些支路都是单向通电, 桥式整流时, 为双向通电。图1所示系研究铜损电路原理图。

我们的出发点是,其一,因一个支路已在感应电压过零处接通,而在过零处又断开,对两个支路中点接地全波整流的无刷直流电动机和一个支路桥式整流的电机,感应电压平均值减少约11%。其二,为了保证起动须扩大气隙,则磁通的损失约为5%。则此电机每个支路匝数应增加 $1.05/0.89 = 1.18$ 。

当一个支路桥式整流时,一个支路的电阻增大1.18²;当两个支路桥式整流时,电阻为 2×1.18^2 。开始转矩为0.85和0.6,而于三个与四个支路BL电动机中点接地全波整流和两个与三个支路桥式整流时,一般说来,一个支路整个导通时间的感应电压为最大。

在三个支路电动机中点接地全波整流时支路电阻为3,而4个支路为4,转矩分别为0.58和0.5。

三个支路桥式整流时,通常有两个支路导通,而两个支路桥式整流时,通常只有一个支路导通。三个支路桥式整流时,其导通部件的绕组电阻是1.5欧姆,而两个支路桥式整流时为2欧姆,转矩分别为0.82和0.71。

3. 铜 损

铜损的算式如下:

$$P_{cu} = \left(\frac{M}{M_0} \right)^2 \frac{2L_w C^2}{B_L^2 (2r_1 + \delta)^2 L_F K_n N Q_n X} \quad (1)$$

式中 M_0 为图1所示的转矩。系数 C 是有效电流与电流平均值之比,在电流线性增长的不利情况下,它为1.15, K_n 是槽满率。

4. 铁 损

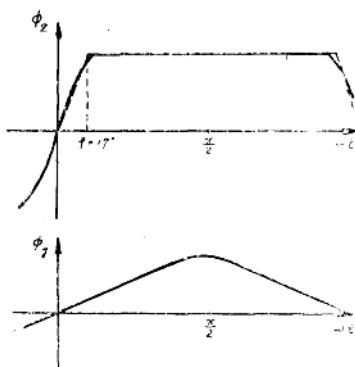


图2 一台24槽4极电动机的齿和轭的时间变化曲线图

齿和轭非正弦形反复磁化。对于内径55毫米的4极和24槽的电动机来说,测量绕组布置于一个齿和轭上。由感应电压值得磁通时间曲线。

利用磁感应峰值计算磁滞损耗。涡流损耗也与磁感应时间变化极为有关。考虑以涡流与磁感的时间变化率成比例以及涡流损耗与此涡流成平方地增大为基础,则积分

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (2)$$

为涡流损耗的值。如磁密分别为相等幅值与频率的梯形和正弦波形,则得这两波形的涡流损耗之间的如下关系式:

$$P_{wiT} = P_{wi} \sin \alpha \cdot \frac{4}{\rho \cdot \pi} \quad (3)$$

式中 ρ 为图 2 所示的角度。如齿部磁感应时间上相似梯形分布, 并采用方程式 (3), 则齿部涡流损耗是相等幅值和相同频率的正弦曲线磁齿的涡流损耗的 4.3 倍。轭部涡流损耗比正弦形曲线磁感应时小。

5. 电损耗

在控制部件、功率开关接通与断开和持续接通状态下, 都能产生电损耗。控制部件损耗与导通损耗在相当大的程度上与电源电压有关, 因此, 不予详述。

开关损耗基本上与开关频率和断开电感有关。当利用功率开关 (晶体三极管) 只切换支路, 一般说来, 假设断开时磁能不在开关内转换成热能的话, 则因开关频率很低, 开关损耗不起什么大的作用。

当两个支路与三个支路桥式整流时, 因此采用自振荡二极管, 则磁能转换成机械能和铜损。两个与四个支路中点接地全波整流时, 常常两个支路接合良好, 并反向缠绕, 这样在一个支路断开时, 仍有磁场, 支路内电流经电源或一并联电容器反回继续流过, 直至磁能有时一半转换成机械能, 其余反回。

与此相反, 三支路中点接地不能应用自由振荡二极管。用切纳尔二极管与支路并联, 这样切纳尔二极管断开时, 至少一半磁能转换为热量。随着电动机利用率提高, 这常导致产生较大损耗。以第 6 节三支路电机为例, 它的磁钢高 6 毫米, 气隙磁感应 0.3 特斯拉, 转矩 0.5 牛顿·米, 输出功率 150 瓦, 切纳尔二极管热量转换功率约为 8 瓦。

6. 铁心截面的最佳化

6.1 定子内圆半径与槽高之比的最佳化

定子内圆半径与槽高之和保持恒量时, 可得定子内圆半径与槽高之比关系, 这时, 铜损最小。

匝数与定子内圆半径应成反比, 在规定电流下, 转矩一样。当定子内径变化时, 平均线匝长度的变化忽略不计时, 绕组匝数与绕组电阻的平方成正比变化。采用上述忽略, 电动机越长, 该误差愈小。此外, 绕组电阻与槽面积成反比变换。

以下式求解绕组电阻:

$$R \sim \frac{1}{Q_n R_i^2} \quad (4)$$

图 3 所示铁心截面, 以定子内圆半径、齿顶高度、齿宽及槽底半径 R_0 表示槽面积。

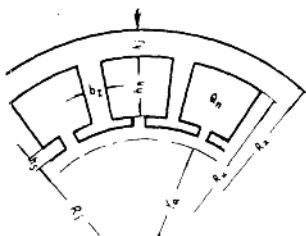


图 3 叠压铁心的最佳化原理图

将所述支路电阻对定子内圆半径进行微分, 可得支路电阻的最小值, 并以求得此定子内圆半径时的铜损

$$R_i = \sqrt{\frac{1}{2} \left(R_s^2 - h_s^2 - \frac{N}{\pi} b_s (R_s - h_s) \right) + \left(\frac{3}{4} h_s - \frac{3}{8} \frac{N b_s}{\pi} \right)^2} + \frac{3}{8} \frac{N b_s}{\pi} - \frac{3}{4} h_s \quad (5)$$

当给出 R_s 、 R_s 及 b_s 时, 确定定子内圆最佳半径。电动机其它参数无影响。

6.2 槽宽与齿宽的最佳比值

齿部铁损与齿宽成反比:

$$P_{Fei} = \frac{C_1}{b_s} \quad (6)$$

铜损与槽宽成反比:

$$P_{cu} = \frac{C_2}{b_n} \quad (7)$$

用下式求槽宽:

$$b_n = \frac{R_s + R_i + h_s}{N} \pi - b_s \quad (8)$$

现将方程式 (8) 代入 (7), 把齿部铁损和铜损之和对齿宽微分, 便可算出齿宽与槽宽之比值, 这样损耗便最小, 用下式:

$$\frac{b_s}{b_n} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (9)$$

交替应用方程式 (9) 与 (5), 则可算出槽底半径 R_i 内最佳截面几何尺寸。

6.3 槽高与轭高的最佳比值

假设, 槽高与铜损成反比, 轭高与轭部铁损成反比, 将下式微分并置零

$$R_{Fei} + P_{cu} = \frac{C_3}{h_i} + \frac{C_4}{h_n} \quad (10)$$

槽高与轭高的最佳比例关系式为:

$$\frac{h_i}{h_n} = \sqrt{\frac{C_3}{C_4}} \quad (11)$$

由槽底半径及轭高可求得铁心截面外径, 但通常它不是理想的外径。因此, 必需用相应校正槽底半径重复计算总的截面, 直至获得所求外径为止。

7. 不同气隙磁感应时效率计算的例子

如果要比较一下外径尺寸一定、工作点一定的电机在不同磁密时的效率, 必须确定每