



第七届国际电机会议译文选集

**International Conference
on Electrical Machines
München**

西安微电机研究所

1987.10

译 者 序

国际电机会议是电机行业与学科的专家、教授和工程师们聚会的国际性学术会议，每二年举行一次，1986年9月于西德慕尼黑召开了第七届会议。出席会议的代表共430人，来自38个国家和地区。我国有18名代表参加。这次会议上宣读和交流的论文共304篇，其中我国论文27篇。为了使同行们尽快读到这些论文，了解国外这方面的学术动态，我们对其中有关小电机和特种电机的37篇（其中第35—37篇为我国学者的论文，因在国内已先后发表过，故未收入，还望谅解）组织了翻译，经过校对、审编后，现以译文集的形式奉献给大家。

参加这次译、校、审工作的有13个单位的46位同志，正是由于这些同志的积极支持，才使这本译文集得以问世，对于他们所付出的辛勤劳动，在此表示衷心地感谢。

本译文集的责任编辑是西安微电机研究所的朱青、牒正文两位同志，由于水平所限，编辑中的错误难免，还望同行们斧正。

机械工业微电机科技情报网

国家机械委西安微电机研究所

1987.8

目 录

1. 机床及机器人伺服驱动装置	(1)
2. 永磁伺服电动机的优化设计	(18)
3. 新系列交直流盘式电动机	(23)
4. 分相式单相感应电动机起动绕组优化设计的一些经验	(28)
5. 一种稀土永磁伺服电动机新产品	(33)
6. 单相电容式感应电动机的计算机辅助设计	(38)
7. 爪极步进电机在动态运行中电感的确定方法	(43)
8. 以线性模型为基础的开关磁阻盘式电机的设计	(50)
9. 微步距螺旋式步进电动机	(56)
10. 异步伺服电动机设计考虑的几个问题	(61)
11. 无励磁装置的调压式无刷单相同步发电机	(68)
12. 一种应用于电子表中的微电机	(74)
13. 使用边界元素法的步进电动机等值磁路模型	(80)
14. 多相极化磁滞电动机的设计分析	(86)
15. 不对称三相绕组单相电容器电动机的最佳性能	(92)
16. 高转速手握式同步电动机驱动装置	(98)
17. 单相电容电动机的运转电容器电容量的选择	(103)
18. 配有静态整流子的排斥式电动机基本概念和闭环控制	(109)
19. 论为获得恒电压输出而对单相自励感应发电机的无功功率提出的要求	(114)
20. 排斥式旋转型马达	(120)
21. 研究功能性紧张反射用的力矩电动机	(125)
22. 开关型磁阻电动机之动态性能	(130)
23. 两相自启动开关磁阻电机的分析和最佳参数的确定	(135)
24. 反应式同步电动机用作无刷伺服驱动时和永磁式同步电机的性能比较	(140)
25. 大功率开关型磁阻式驱动装置	(146)

26. 用转换功率方法扩大控制的电磁联结器	(153)
27. 电动式人造心脏用无刷直流电动机	(158)
28. 人造心脏用机电式驱动装置	(162)
29. 采用平板型直线脉冲电动机的人工心脏起搏器	(167)
30. 具有交流与直流定子接线的六相感应电动机	(171)
31. 电磁减速器的探讨	(178)
32. 低脉动转矩的无刷定位驱动	(182)
33. 用磁阻线性执行器的振动吸收装置	(186)
34. 磁轭设计对高速轴向气隙磁阻电机性能的影响	(194)
35.* 步进电动机静转矩计算的齿层比磁导法的应用与发展	
	哈尔滨工业大学 程树康 王宗培
36.* 罩极同步电机气隙磁场的分析	浙江大学 孙云鹏
37.* 小型凸极同步发电机谐波励磁绕组最佳匝数的计算与测定	
	江西工业大学 何友欢

* 见“译者序”

机床及机器人伺服驱动装置

Dr. Gerhard Henneberger

Robert Bosch GmbH, Kg/EWL, P.O.B. 30 02 40, 7000 Stuttgart 30

1 概况

1.1 简介

伺服装置的任务是使机构在规定时间内按予定的规律运行,并按需要的精度定位在最后位置上。在机械工程及建筑工程中,伺服驱动装置得到了广泛的应用,例如:机床的主轴伺服驱动,机器人及机械手驱动,天线及望远镜驱动,飞机副翼及阀门的驱动等。

上述的各种应用,其力矩范围为0.1~100Nm,速度最高达10000rpm,额定功率在100W至20KW之间。通常,这些驱动装置所使用的电动机都配以高减速比的齿轮箱。

由于其工作范围很宽,故对驱动装置的动态性能及驱动精度的要求有相当大的区别。

把驱动装置与驱动机构一体化,导致了驱动电动机的不同的结构型式,例如:具有圆柱形转子的径向磁场电动机和具有盘形转子的轴向磁场电动机。对于驱动装置而言,用圆柱形转子的电动机有其优点,而盘式转子电动机则常用于机器人。

近几年,电控伺服驱动毫无例外地全部设计成直流驱动,也就是使用可控硅整流器SCR或晶体管放大器作为直流电动机的电源。直流驱动技术可以认为实际上已经发展得非常完善,许多在技术上很成熟的系统,满足了动态性能及精度的要求,且在市场上容易采购到。

与交流驱动装置相比较,直流驱动装置存在某些缺点,例如:在高速大电流时的换向问题;在正常运行时换向器的发热问题;电刷的磨损问题以及重量较重等问题。但事实上,直流技术在伺服驱动中一直占据着统治地位,这是因为交流电动机的控制更为复杂,这样导致了逆变器、测量设备以及控制技术等方面的大量的高的要求,从而使驱动装置的费用剧增。

上述情况近几年来基本上有所改变,这是由于功率半导体(晶体管,可控硅整流器SCR's,矩形脉冲断开器GTO's),模拟数字信号处理(微处理机,集成电路IC's)及磁钢材料(稀土磁钢)等方面取得了突破性的进展,从而使得交流伺服驱动装置的复杂的电源及控制设备以及低惯量交流伺服电机等的制造价格趋向合理,因而可取代直流伺服驱动装置。

鼠笼式感应电动机或以永久磁钢励磁的同步电动机基本上可用作无刷三相交流驱动。驱动装置包括了产生旋转磁场的电动机及脉宽调制型(PWM)驱动电源。鼠笼式感应电动机的结构简单,但效率低且控制非常复杂。希望采用永磁同步电动的理由是基于容易控制且转子的损耗小。采用高磁能积的永久磁钢,如 $S_{m}C_{0.5}$ 的特殊电动机已经取得进展。

三相感应电动机现已用于机床的主轴驱动,这是由于它很容易采取减弱磁场的方法来扩展其调速范围以及结构坚固等优点。

永磁同步电动机按电动势的波形可进一步分类：以正弦电动势正弦电流供电的同步电动机要求精确的位置传感器，如旋转变压器，并且需要采取特殊的控制方法；以梯形电动势及方波电流供电的电子控制同步电动机对于位置传感器及信号处理的要求较为简单。

对于功率为10KW的驱动装置，电控伺服装置大大优于液压驱动装置和气压驱动装置。但必须注意，就加速性而言，电控伺服装置不如液压的好，因为液压驱动的能量密度较高；就制造成本而言，电控伺服装置不能与气压驱动相匹敌。但总的看来，电控伺服驱动的优点大于缺点，例如：其控制性能好，适应性强以及它可以采用同一种能量形式的传感器，控制器及执行元件。

额定数据

速度：0~10000rpm
力矩：0.1~100Nm
功率：100W~20KW
采用的传动装置：减速齿轮

电机结构

径向磁场的圆柱形转子电动机
轴向磁场的盘式转子电动机

驱动装置的配置

永磁直流电动机+可控硅整流器或伺服放大器
鼠笼式感应电动机+逆变器
永磁同步电动机+逆变器
—正弦波电流及电压
—方波电流及电压

图1 伺服驱动装置概述

1.2 伺服驱动装置在西德的经济地位

根据Frost及Sullivan的研究报告，西

德在1985年的全部可变速驱动装置的总销售额估计接近8亿马克。图2统计数据包括了机械、液压及电子伺服驱动装置各年的销售额。若仅考虑机床及工业机器人的电控伺服驱动装置，则市场销售额接近1.7亿马克。此伺服驱动装置包括了驱动电动机及伺服放大器。

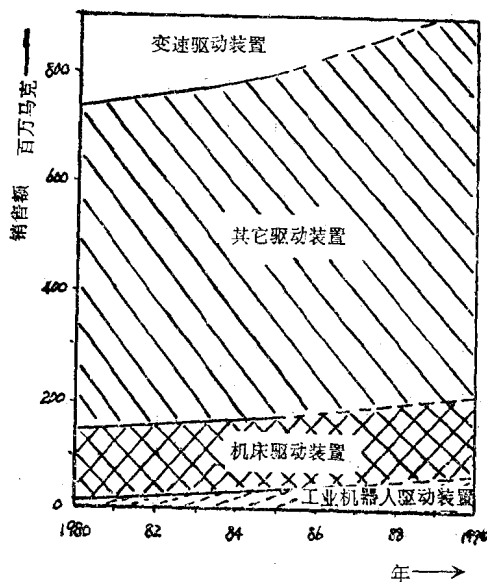


图2 西德可变速伺服驱动装置的市场销售额

机床的主轴传动机构及伺服驱动装置1985年的销售额达1.34亿马克，其中0.2亿马克为机床的主轴传动机构的销售额。在整个37000个坐标中，80%采用直流控制技术，20%为交流控制技术。然而，交流控制技术的销售额有所增加。尽管由于交流伺服控制技术质量的改进引起装置价格的提高，但以交流取代直流的年增长率估计达15%。

工业机器人市场销售额中的伺服驱动装置份额，包括了主关节驱动装置（主要采用盘式电机）及手关节驱动装置（通常用圆柱形电机），这些驱动装置都配备了伺服放大器。现今这类驱动装置几乎全被

直流技术独占。西德在1985年的销售额为0.36亿马克，占整个工业机器人销售额的11%。由于机械化加工设备及其柔性装置系统的增加，故工业机器人销售额的增长有希望大大地提高。

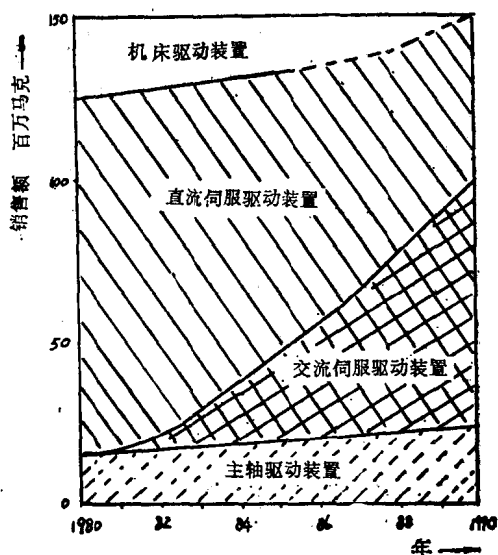


图3 西德机床伺服驱动装置的市场销售额

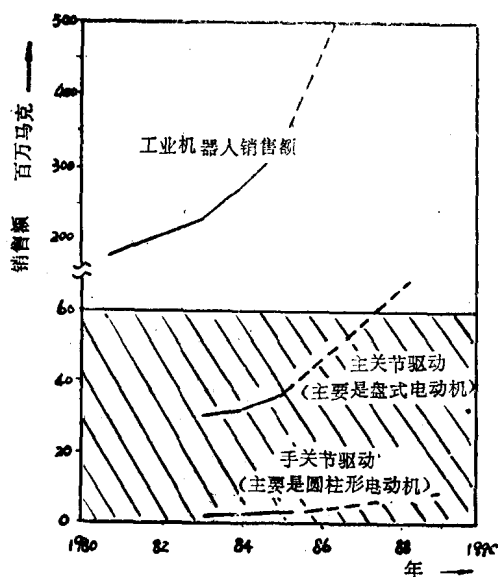


图4 西德工业机器人主关节及手关节的伺服驱动装置的市场销售额

伺服驱动装置的销售额，仅从电动机及伺服放大器这两项的销售额来看，它在机床及工业机器人的销售额中似乎只占有限地位，特别是在机床及工业机器人的2亿马克的销售额中仅占极小份额。若无合适的实用的伺服技术，其竞争地位是难以维持的。这种技术应能执行立体运动及时间优化。

1.3 电伺服驱动

完整的电伺服驱动系统包括下述与之相匹配的元件：

- 伺服放大器（包括主电源电路）
- 驱动电动机（直流电动机，同步电动机，感应电动机）
- 传动元件（齿轮、螺杆、联轴节）
- 传感器（位置、速度、加速度）
- 控制设备（转换器、信号处理）
- 计算机（轨迹计算、程序控制）

所有伺服驱动装置为级联速度及级联电流控制的位置控制。位置控制通常用数字控制器，这样可获得高的精度及好的重复性。

根据位置传感器所在的地点，可分为直接控制及间接控制：在直接控制中，直接在工件所处的位置上测得，这需要有一个转换的位置传感器（编码尺、增量尺、线性感应线圈）；在间接位置控制中，电机的转子位置用数字量（绝对或增量传感器）或模拟量（旋转变压器）表示。在间接位置控制中，机械传递元件的缺陷（间隙、弹性、摩擦）会导致工件的位置误差，但不影响位置控制的动态性能。

在控制器内部进行信号处理后，位置控制器的输出信号变成有价值的模拟量，并以一组级联速度控制值输出。级联速度控制回路向系统提供出色的动态及稳态性

能。目前直流测速发电机仍然是最有效的速度测量元件，即使在极低速度时亦能获得相当好的连续的线性度，不过在高精度系统，测速发电机还是有其欠缺之处，如高频波动以及对温度的敏感。

对应于速度控制，电流控制也为级联式的。这样，机电时间常数削弱电流快速变化的影响，在很大程度上得到了补偿。

由于直接限制了机组的速度及电流（均方极值），故电机在机械过载及热过载情况下得到保护。仅在短期加速过程中方允许达峰值电流，在其它情况，电流被限制在热负荷所允许的数值内。

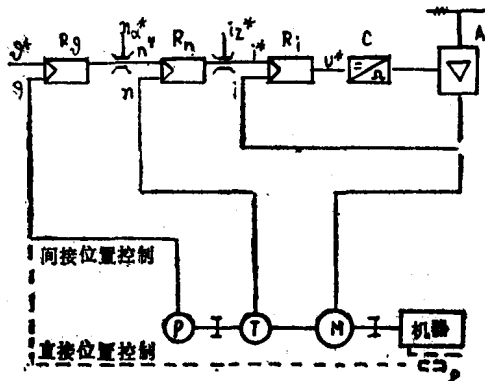


图 5 级联速度及级联电流控制的位置控制伺服驱动的方块图

1.4 要求及评定标准

工业生产及工艺流程自动化程度的提高，导致了对电伺服驱动装置的更高要求，从而带动了对特殊的驱动元件、特殊的电动机、特殊的电源以及特殊的控制设备的开发研究。对伺服驱动装置所扩充的各种各样的要求是基于想努力提高生产效率，提高工艺精度以及最重要的因素是扩大再生产。

各种各样独特的应用条件，会对驱动系统提出名目繁多的要求。因此，用一个满足所有要求的通用质量准则来评定驱动

系统是非常困难的。

下述要求可适用于所有驱动系统，而与其独特的应用情况无关：

—出色的动态性能

* 峰值力矩大或过载能力大

* 机械时间常数小，即低惯量

* 电时间常数小，即电机的电感小

—运行平稳，即使在极低转速时亦如此

* 力矩脉振小

* 力矩与轴角位置无关

—位置精度高

* 至少为1/1000转

—速度控制范围宽

* 至少为1:10000

* 在所有四个象限中运行

—体积小，重量轻

—高效率

* 运行经济

* 限制温度升高

—容易维修

* 最好不维修

* 长寿命

—高的防护等级

—装置的附加设备

* 测速发电机

* 位置传感器

* 刹车装置

满足这些要求的必要条件为：要有一个合适的控制构想及高质量的电源，亦即要有一个级联式的高频伺服放大器及高精度的位置、速度及电源测量装置。

某些要求例如平稳运行，可细心设计电动机来满足它。若考虑到逆变器是合适的，则对电动机的要求如下：

电动机必须提供连续的合适的力矩而无过热过载现象，这就是说在稳态运行时要求有连续的合乎要求的力矩 M_0 ，而在

短期运行时要求其力矩为稳态运行时的若干倍, 这样就可满足加速或制动时的需要。此外, 对电动机的机械及电过载能力的要求亦是一项重要的性能指标。

在电源设备为峰值电流的情况下, 电机的永久磁钢不造成不可逆的退磁。由于铁饱和而引起轻微的力矩下降则是允许的。

此外, 为保证动态运行必须有足够的电压储备, 即使在额定转速时亦应如此。导致电动机速度波动的力矩脉振可采取适当的设计方法使它尽可能的小。这也可促使装置的精确定位。驱动装置的动态性能在很大程度上取决于电动机的电时间常数。因此, 电动机的电感应当尽可能的小些。从另一角度来说, 为了确保逆变器安全工作, 必须给出限制电流上升时间的最小电感值。为使驱动装置获得良好的控制响应性能, 电动机的惯量应尽可能小。为了避免动态过程中的机械振荡, 转轴、转子、定子及机壳应有足够的刚度。

另外的一些要求是驱动装置要电机强制执行的, 例如: 因通常机械的装配空间十分有限, 故在设计电机时, 应权衡电机的体积与热量散发之间的关系, 以选取合理的折衷方案, 高防护等级的封闭式电机, 其损耗所产生的热量必须由机壳表面的散热肋来散发。应当避免通过驱动端的端罩或电机的传动轴来散发热量, 因为这会引起机构发热。为了降低成本, 必须权衡材料消耗(材料费)与工时消耗(工资费)之间的关系, 取得一个合理的折衷方案。

采用何种齿轮取决于驱动装置应用于何种场合。用一个中间减速齿轮, 为系统的优化提供一个可以灵活变化的减速比。由于采用了这种办法, 对电机轴上的输出

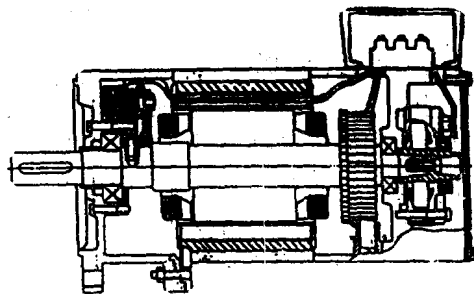
力矩要求较小, 因而可以用较小的电动机。但必须注意, 此附加的齿轮装置使电机的惯量按减速比的平方增加, 并且带来了齿轮间隙, 且齿轮装置需要维护。

2 直流伺服驱动装置

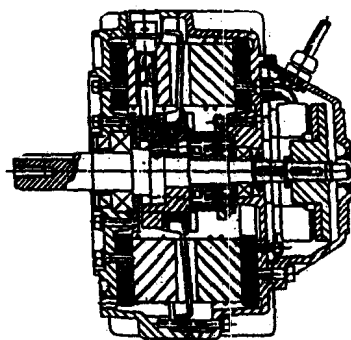
由于控制简单及经济上的理由, 目前装上SCR或晶体管放大器的直流电动机已作为标准伺服驱动装置来使用。

2.1 电动机

最好采用特别研究开发所提供的各种结构。例如: 为了力争低惯量, 导致了电机特别细长, 即长度相当的长, 径向励磁的圆柱形结构的电机就是如此。另一种结构为了保证电枢轻, 电枢用无铁塑料盘做成, 导体封装在塑料盘里, 轴向励磁的



a) 径向磁场电动机, 圆柱形转子, 铁氧体磁钢 (Siemens公司)



b) 轴向磁场电动机, 盘形转子, 铝镍钴磁钢 (Bosch公司)

图 6 直流伺服电动机

盘式转子电机就是如此。径向励磁的无铁铃型电枢（译注：Iron-free bell-type armatures 即我国所称的空心杯形转子电枢）电机，由于制造上及热负荷的原因，仅能制造成小功率电机。

直流伺服电动机是用永久磁钢来励磁，这样减少了励磁电源及励磁损耗，同时使电机的外形尺寸缩小。磁钢材料的选用决定于气隙磁密，去磁电阻及磁钢的价格。可供选用的材料有传统的铁氧体磁钢及AlNiCo磁钢，还有高磁能积材料SmCo₅及最新型的NdFeB磁钢等。

由于SmCo₅磁钢的价格昂贵，NdFeB磁钢的矫顽力及温度系数大，故它们的应用受到了限制。通常，铁氧体磁钢用在圆柱形转子，AlNiCo磁钢用于盘式转子电机。

与AlNiCo磁钢相比铁氧体磁钢有较大的抗去磁能力，但其剩余磁感应较小。若使用磁通集中装置则其气隙磁密可适当的提高。AlNiCo的剩余磁感应非常大，但其去磁效应非常灵敏。为了防止去磁，磁钢可做得长一些，必要时可装软铁极靴。

为了获得小的电枢时间常数，磁极应很快的放进电机的空气隙中。然而，只有稀土磁钢才能这样做。当铁氧体和AlNiCo分别用集磁器或极靴时，则电枢时间常数要增大。

加速或制动时所要求的高峰值力矩，由电枢中短时间的大电流所产生。允许的峰值电流值为额定电流的6—10倍。其大小受换向及去磁的限制。

力矩波动受磁导波动的影响，而磁导波动决定于转轴的位置。无刷盘式电枢的力矩波动较小。圆柱形转子因为有铁心，可以采取电枢斜槽的方法来减小力矩的波动。电枢导体均匀分布于电枢表面的无槽

电枢电机，由于制造上还存在问题，故尚未获得满意的结果。

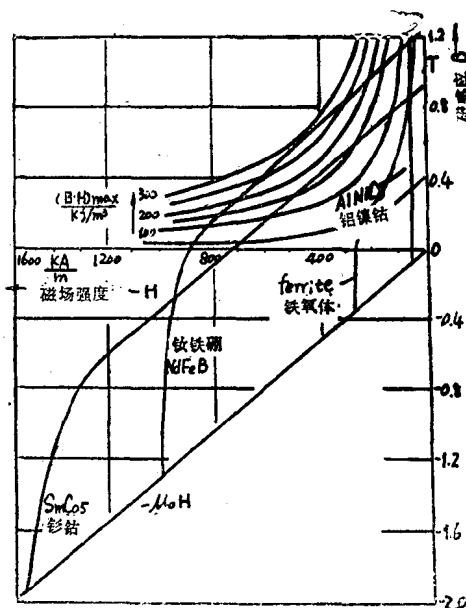
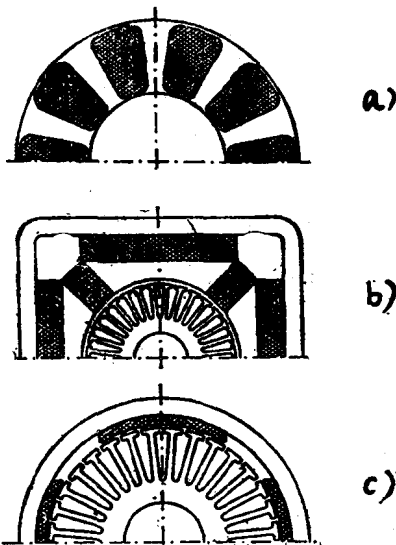


图 7 永久磁钢的去磁曲线



- a) 用铝镍钴磁钢的盘式转子(Bosch公司)
- b) 用铁氧体磁钢并有磁通集中装置的圆柱形转子 (Siemens公司)
- c) 用钐钴磁钢的圆柱形转子 (BBC公司)

图 8 直流伺服电动机的磁路

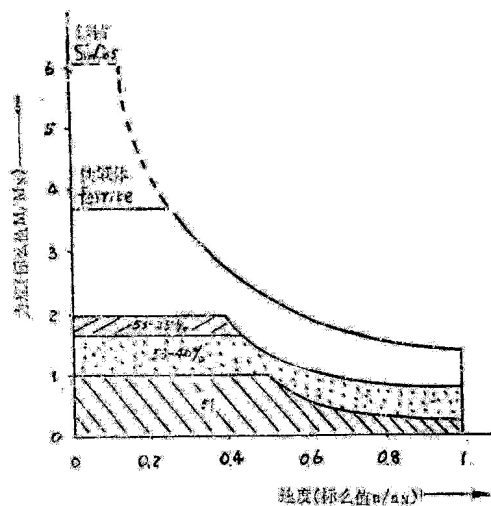


图 9 直流伺服驱动装置的运行图

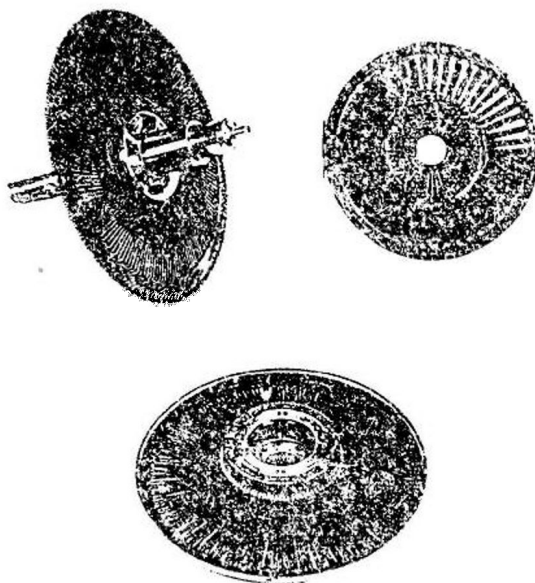
直流盘式电机绕组设计的几种可能途径

一电枢绕组用印刷或冲制的方法制造。电枢片最多有 8 层，每层之间用绝缘材料分隔开，在电枢片的最内圆和最外圆处的连接点把各层电枢片连接起来。电枢片最内圆处一段导体，作为换向器使用。电机的热过载能力严格地受导条厚度（0.2—0.3 毫米）及电枢片的热传导性能优异的限制，故这种电机的脉冲电流的持续时间相对地要短些。但从另一方面来看，此种电机的电枢惯量甚小。

一导体同心地布置在盘上的线绕式电枢。这种电机的换向器为直径较大的圆柱式或扁平式的结构。根据其制造工艺，电枢为预制可装配式结构。用绑带绑住单个线圈或把线圈全部绕在一个特制的框架上。在线圈的引线端头与换向器连接焊牢之后，进行灌封。与印刷绕组电机相比，由于这种电机的铜线较粗，故具有较大的热过载能力，但其惯量也较大。

—上述两种结构的优点结合起来，制成一种特殊的线绕盘式电枢。为实现此想法，把两层波绕组连续地绕好，绕组的导

线用特殊研制的绕法均匀地布置于圆盘表面。在绕组内圈伸出一端头，此端头连至圆柱形换向器，折叠外层绕组的端部以加强机械稳定性，之后进行浸漆及灌封，这样最小厚度的电枢盘就制成了。此种电机的惯量接近于印刷绕组电机，而热过载能力等于线绕盘式电机。



a) 冲制电枢片，扁平型换向器(BBC公司)
b) 线绕电枢，扁平型换向器(Mavllor公司)
c) 线绕电枢，圆柱型换向器(Bosch公司)

图 10 直流伺服电动机的盘式转子

2.2 电源设备及控制方法

用可控硅整流器SCR'S或用晶体管转换放大器的整流电路，主要作为直流伺服电动机的功率放大电路。这些控制元件可以在极短延迟时间内在四个象限间转换。

用SCR'S的电源整流转换装置，由于其技术上成熟及价格合适，经常作驱动装置的大功率控制元件用。一般都使用 2、3 及 6 脉冲环流整流电路及 6 脉冲非环流整流电路。环流电路显示了有较好的动态性能。高脉冲电路的空载时间较短，因此反应更快速。

目前, 直流技术的大多数电源设备是采用H型结构的晶体管整流放大器。电动机接在桥式电路的对角线上, 桥式电路有四条支路, 每个支路由晶体管功率整流管及单向二极管组成, 由直流电压供电, 中间电路具有恒定的电压。晶体管工作于开关模式, 其频率一直至20KHz。为了斩波、要产生一可变化的平均电压施加到电动机上。永磁直流电动机的速度取决于此电压的平均值。如果斩波频率足够高, 永磁直流电动机的电枢电感是足以满足电流斩波的平滑的要求的, 而且通常不必装扼流器。桥式电路的输入是由一整流管及一隔离电容器组成。在中间电路的电容器提供电动机加速时的峰值电流, 而在制动时把储存的能量反馈至中间电路, 制动的能

量被反馈至相当程度时, 中间电路中的电压将增高到允许值以上。在这种情况下, 中间电路除了主要的整流管外, 必须放进一斩波运行制动电阻或者放进一转换器。

由于它们限制了跨接于换向片上的电压, 直流伺服电动机的电压仅能达到200伏。连同标准的380伏三相电源一起, 必须采用一个变压器, 使电压适合于电动机的供电设备。

3. 交流驱动装置

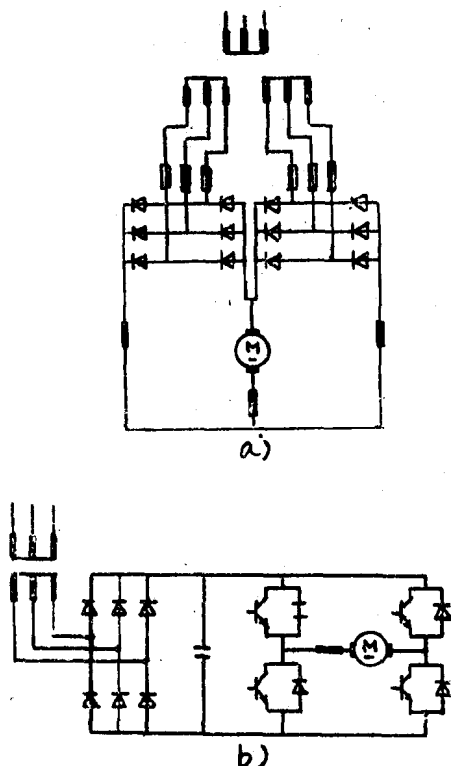
为了实现驱动中不必维修并扩展性能的梦想, 长期以来, 已经认识到需要发展三相交流技术中的无刷伺服驱动装置。由于功率半导体, 微电子技术及磁钢制造技术等方面取得的进展, 交流伺服驱动在数量和销售额上都有所增加。

3.1 直流与交流伺服驱动的比较

实际上的伺服驱动装置几乎全部采用直流技术, 其原因是它的控制性能良好, 且用简单而廉价的电源及控制设备大致上满足了动态及精度要求。对直流电动机而言, 力矩与电枢安匝数及励磁磁场有关, 最佳力矩的大小则要取决于换向情况。因励磁是恒定的, 故电机的力矩与电流几乎是呈线性关系。这对于精确而快速的速度及力矩控制是个重要的条件。

交流电动机的各类关系复杂得多。定子绕组安匝数的空间位置决定于三相电流, 它必须与旋转的转子磁场结合起来一起调整才能产生所需的力矩。为此, 至少要测量定子电流的任意两个变量。首先, 标定定子电流方向的转子磁通的空间位置并不知道, 它必须用测量或计算的方法来

确定。对于同步电动机, 可用位置传感器求出转轴的角度, 来确定转子磁通的空间位



a) 用SCR'S的6脉冲环流桥式电路
b) 用晶体管的H型电路中的伺服放大器
图 11 直流伺服驱动装置的电源电路

置。对于感应电动机，或者通过测量气隙磁通的空间位置，直接确定转子磁通的空间位置，或者通过电流及速度的计算间接地确定转子磁通的空间位置。对于感应电动机，至少需要另加一台计算机求出输入变量，计算机的计算速度决定了电机的动态性能及磁场定位控制的精度。

交流驱动装置对高脉冲频率的要求更为重要，它确定了外加的接近正弦或矩形的电流的速度极限和频率极限，这是获得平滑的力矩必不可少的。目前，使用的脉冲频率高达20KHz。

关于电源设备装置的功率，各种条件对交流驱动装置不太有利。一个脉宽调制逆变器需要三个半桥，桥的所有功率半导体必须比直流驱动装置有较高的开关功率，因为，特别在低频时选用功率半导体的电流值应按定子电流的峰值，而不是均方根值。另外，必须考虑交流电动机的无功功率，这对感应电动机来说是必然的，因为所产生的转子磁通经过定子，故磁化电流必须计入。假使磁场的减弱是采用了电枢安匝的话，则同步电动机需要更大的无功功率。

直流电动机的缺点在于电流要通过电刷及换向器，这就存在磨损及需要维修保养。电刷电弧在大电流及高转速时出现，因为这会有烧坏电机的危险，故在电机堵转时的力矩要有限制。动态性能受较高的惯量及速度（根据电流的极限值而定）所限制。要提出的另一个缺点是，由于损耗主要产生于转子，故热量会通过转轴传到机械装置，防护型电机要花费很高成本。

交流驱动装置中，逆变器可以通过500伏直流中间电路，直接接到三相主电源，这是目前的功率半导体所能够做到的。相反，直流驱动装置必须用一中间变压器，

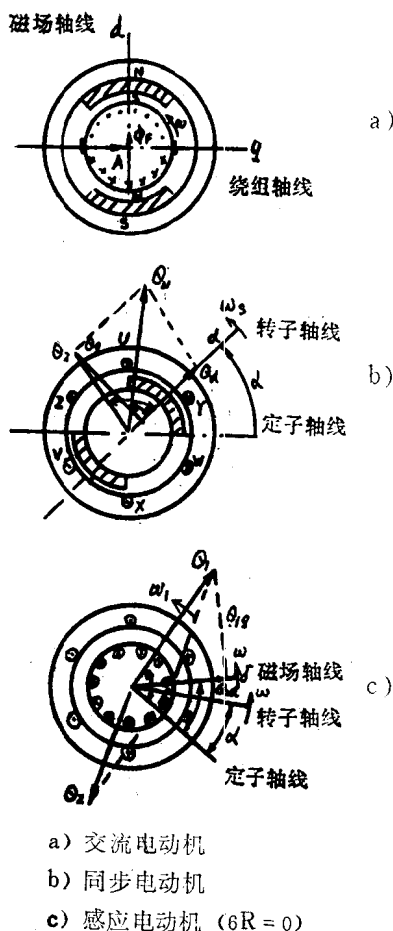


图 12 电动机控制的坐标系统

因为受换向器片的片间电压的限制，电动机的电压近似于200伏。这个变压器的使用增加了附加设备费用而且占用了控制柜的可利用空间。

3.2 用感应电动机与用同步电动机的伺服驱动装置的比较

对于无刷三相交流伺服驱动装置，鼠笼式感应电动机及永磁式同步电动机都是合适的。此两种电动机谁更合适，只能用详细的比较来回答。

感应电动机的转子结构既简单，又坚固，且惯量小，其过载能力非常高，因过

直流驱动装置

- 力矩控制简单
- 伺服放大器简单
- 电刷及换向器有磨损
- 动态性能受换向器限制
- 要用中间变压器（因为电动机的电压有限）
- 热的传递要通过轴

交流驱动装置

- 两相以上的电流控制及转子磁通位置（磁场定向控制）的确定
- 逆变器较复杂，装置的功率较大
- 不必维护
- 逆变器直接接电源

图 13 直流与交流伺服驱动装置的比较

载能力仅受热及机械的限制。若使用稀土磁钢，则无刷同步电动机亦可设计成低惯量，这样转子的制造成本较高，而电机的过载能力决定于磁钢的抗去磁能力。

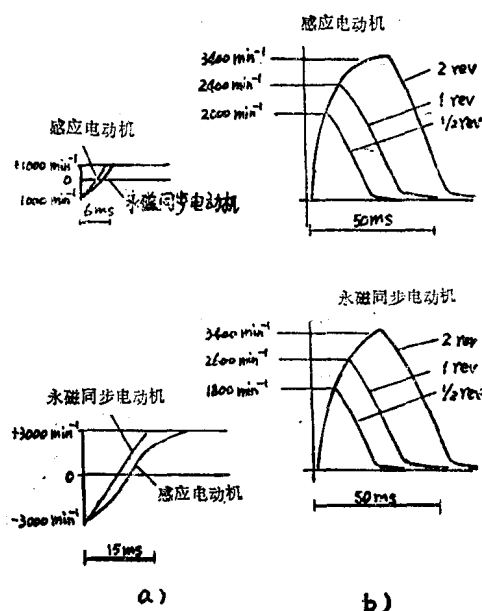
同步电动机优于感应电动机的最根本处在于其控制方法简单得多。两种电机之间的差别则在于与定子电流定向的磁通如何确定。感应电动机的磁通是由定转子的电流所产生。不过转子电流难以测量。因此，感应电动机的磁通或者用磁阻效应，即霍尔效应传感器来测量，或者用计算机通过转子的速度值及容易测量到的定子各值算出。上述两种方法并不满意，都存在着一一些问题。传感器对机械及温度都非常敏感，故磁通的计算结果由于温度及饱和的影响容易出误差。相比而言，定子安匝对于励磁磁场的定向位置可以用测量同步电动机的转子角的办法，容易地获得。

对感应电动机来说，磁场的减弱用增加电源频率的办法比用正比例地增加电压的办法更容易达到目的。对永磁同步电动机来说，仅由转子电枢反应所减弱的磁通是极有限的。这样导致了无功功率大大的增加，并增加了电源的附加负载。

感应电动机的磁化电流使逆变器的安装功率增加。相反，在运行时同步电动机可不吸收无功功率。因此放大器只需考虑有功功率。事实上，为了产生力矩，感应

电动机要吸收有功功率。为了产生磁场，感应电动机还要吸收无功功率，因此其效率较低且定子绕组的热负荷较高。同步电动机的另外一个优点是涡流引起的转子铁耗甚小，相反感应电动机转子的热量可引起其运行特性的变化，同时对机械装置带来不利影响。

就动态性能而言，用感应电动机和用同步电动机对驱动装置几乎没有什么区别。同步电动机与感应电动机的阶跃特性



a) 速度控制
b) 位置控制

图 14 伺服驱动装置的无载阶跃特性

示于图14。两种电机有相同的功率（1.2 WK），同时皆为速度的位置控制。

在同步电动机与感应电动机之间不能用常规的方法抉择。因为两种驱动电路各有其独特的优点。对于给定的特殊工作条件，其中一种电机将占明显优势。同步电动机特别适合于不必减弱磁场的位置驱动控制场合。感应电动机有它的应用范围，例如需要大幅度减弱磁场以得到宽速度范围的主轴驱动控制场合。

使用感应电动机的驱动装置

鼠笼式感应电动机成本低、结构坚固、具有高的过载能力

复杂的控制系统（需要可变速的控制技术）

容易实现磁场减弱

热传导的不利因素

在转子中的焦耳热

在定子中的磁化电流

效率低

适合于用减弱磁场的办法以获得宽的调速范围的主轴速度驱动

使用同步电动机的驱动装置

永磁励磁的同步电动机

具有低惯量，有一定的过载能力

简单的控制技术

磁场减弱极为有限

需要增加无功功率

转子中产生的热量小

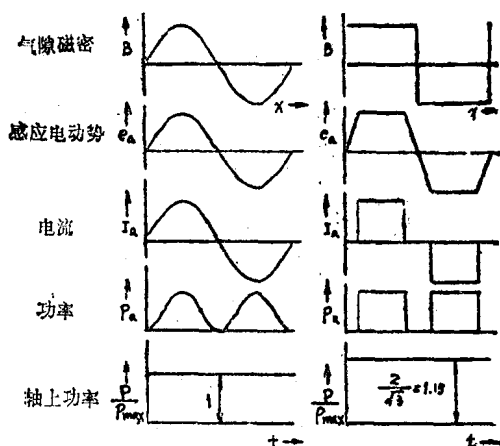
适合于不减弱磁场的位置驱动

图 15 同步电动机与感应电动机伺服驱动装置的比较

3.3 电压及电流曲线

当感应电动机由正弦电流供电时，同步电动机则可以设计成或以正弦电流供电

或以矩形电流供电。在后一种供电情况下，也涉及到无刷（即用电子换向的）直流电动机。图16表示了以正弦或矩形电流供电的伺服驱动用永磁同步电动机的气隙磁密、感应电动势、相电流、一相的功率及轴上功率等特性曲线。



a) 正弦

b) 矩形电流

图 16 伺服驱动用永磁同步电动机的特性曲线（相对于时间坐标）

当以正弦电流供电时，电动势必须为正弦形。这可以使磁极的磁密在空间的分布呈正弦；或者当用永久磁钢时，磁密的空间分布为其它形状时，可以把定子绕组设计成合适的形式来获得正弦电动势。在此条件下，轴上的功率为常数。当采取这种方法时，为了确保感应电动势与电流之间的相位角，必须以高分辨率测出转子的位置角。

另一种可能的方法是以矩形电流供电。电流是周期性地送到电动机的三个定子绕组，这样矩形电流块呈 120° 电角度分布，且两矩形电流块之间有 60° 的间歇。若在矩形电流块之段时间内的电动势为恒值，则在定子绕组中所产生的功率亦为恒值。在 60° 间歇期间，电动势的大小无多

大关系。矩形电动势波形是由于定子斜槽的结果，这点前面已介绍过其目的为了避免力矩的波动。所有各相的功率之总和由气隙功率所产生，在时间上为恒值，这就满足了力矩与转子无关的要求。

矩形电流供电的优点：

—信号处理较为简单，可以用简单的位置传感元件（三个光学或磁阀元件来代替旋转变压器）

—电动机的利用率在低速时至少增加15%

—无大的感应电压降

· 无刷直流电动机的缺点：

—在实际运行时由于换向不良产生与轴角成函数关系的力矩波动；然而，这可以采取合理的设计及适当的控制方法，使力矩波动与普通的直流电动机相比尽可能的低。

—由于电源的矩形电流的畸变，在高速时会发生力矩下降现象。

—高速运行时铁耗增加。这是因为定子磁场旋转不连续，它以不连续的阶跃式提前控制，使波形具有尖的上升沿所引起的。

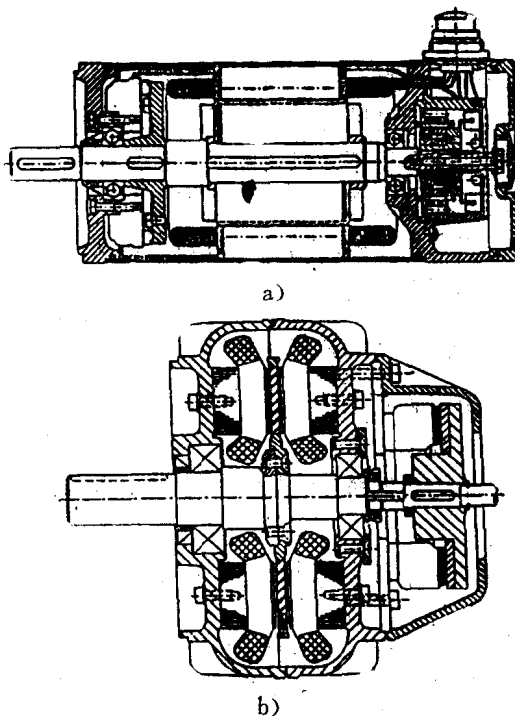
—以目前的控制方法，用减弱磁场的方法不可能扩展其速度运行范围。

因此，可根据其特定的应用需要，来选用合适的电动机。

3.4 电动机

与直流伺服电动机相似，交流伺服电动机亦有多种不同的结构。在图17，圆柱形同步电动机具有径向磁场，而盘式同步电动机具有轴向磁场。目前，这两种电动机日渐倾向于采用 SmCo_5 磁钢。它与铁氧体磁钢相比，小体积、大力矩、低惯量而且有可能做成高抗去磁性能的电机。选用上述两种结构中的哪一种，这要根据伺服驱动装置本身的情况而定。在机床伺服驱动

装置中用圆柱形结构的电机占明显优势，而在机器人伺服驱动装置中则宁可用盘式结构的电机。



a) 圆柱形转子，径向励磁的钕钴电动机 (Bosch公司)

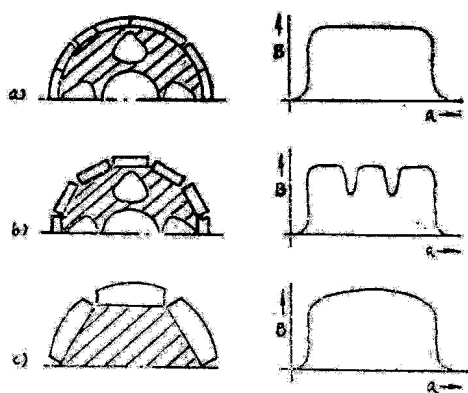
b) 盘式转子，轴向励磁的钕钴电动机 (Bosch公司)

图 17 交流伺服电动机

用永久磁钢励磁的无刷圆柱形伺服电动机，根据机座号的大小通常有4极或6极。机壳挤压成形，外壳常带有冷却筋。此种结构的防护等级较高，同时改进了热的传导。电枢铁心用焊或烧结办法制成坚固体，并使其斜一个齿距，铁心压入机壳。为了减小力矩波动，定子绕组最好设计成三相单层绕组，每极每相槽数 $q=2$ 。绕组用一特殊的针型工具引入铁心槽内。

转子叠片上开了几个槽，这是为了改善导磁性能和减小惯量。由于 SmCo_5 磁钢有高的抗去磁性能，它以降低电机导磁率的空气隙中直接把磁钢装在转子表面上。根据所需的磁密曲线，磁钢可做成薄块形

或瓦形；磁钢可用烧结法或者用玻璃纤维树脂使其固定在转子上，装好之后再进行充磁。



- a) 瓦形磁钢，楔形磁场
- b) 薄片形磁钢，矩形磁场
- c) 枕形磁钢，近似于正弦磁场

图 18 不同转子磁钢及磁场的磁场曲线

电动机必须考虑可安装刹车，测速发电机及位置传感器等装置。伺服驱动装置用的无刷盘式电动机，通常设计成较多的极数：这种电机有一个装着永久磁钢的旋转盘，其两边各有一定子（见图11）。与传统的电机一样，定子绕组嵌在铁心的槽内。空气隙绕组仅在特殊的应用场合才用到它。假使盘的内外直径相差非常大，会导致不合适的槽/齿比。若要求槽/齿比小，定子铁心是由薄硅钢片缠卷而成，等宽的槽是冲制出来的，但槽与槽之间的距离是不断地增大的。随着缠卷铁心的直径增大，所冲出的槽距必须跟着增加。定子铁心要焊牢或烧结牢，三相绕组可用最简单的方法嵌入铁心槽内。采用定子斜槽、优化槽形、齿形以及磁钢等方法，使力矩波动减到最小。

转子盘设计成夹心式结构。轮辐式盘（译注：即圆盘上开许多圆孔见图19）可抗弯曲变形，用不锈钢或高性能塑料制成，磁钢嵌入其中，并用环氧树脂灌封

牢。有效的磁路气隙，不要由于支撑结构上的原因而使其增加，这点是非常重要的。电动机的机壳为铸铝件，其上带有冷却筋。刹车装置、测速发电机及位置传感器等附件尽可能选用。

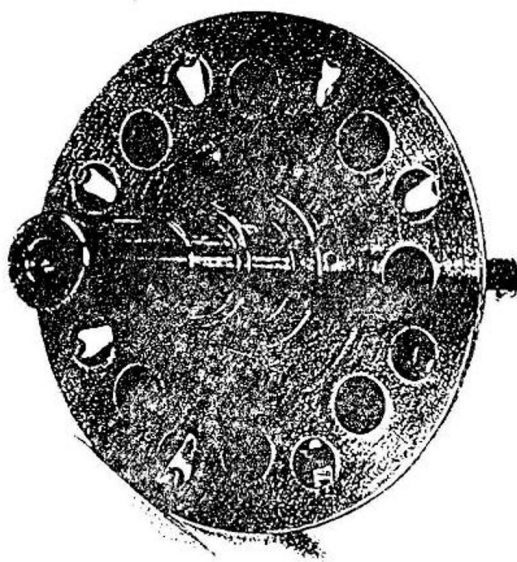


图 19 采用SmCo₅磁钢的无刷盘式电动机的转子

若感应电动机作为伺服电动机使用，必须考虑与标准感应电动机不同的下列几个问题：

- 为减小惯量，需要有较大的细长比（长度/直径）。这样，热损耗的传导较为困难。
- 经常加速和刹车所引起的短期过载，导致了定子温度的升高。

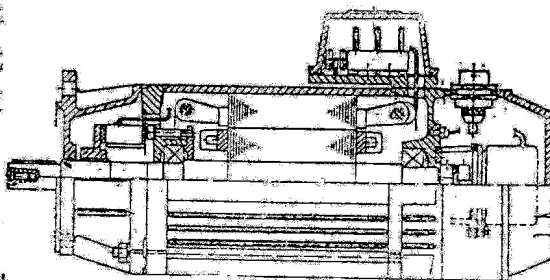


图 20 感应伺服电动机（EBC公司）