

DIAN CI JIAN SU SHI DIAN DONG JI

励鹤鸣 励庆孚 编著

电磁减速式电动机

电磁减速式电动机是一种新型的电动机，无需齿轮减速就能得到较低的转速。本书在分析定、转子开槽后的气隙磁导波和气隙磁场的基础上，全面的介绍了这类电动机的结构、工作原理、特性和设计方法，同时对单相电源馈电时裂相问题和转子转速的均匀性问题也进行了讨论，最后还有二个计算例题。

本书可供电机制造厂和从事电机运行工作的有关工程技术人员参考，也可供大专院校电机专业师生以及有关研究所科技人员参考。

电磁减速式电动机

励鹤鸣 励庆孚 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $13\frac{3}{4}$ · 字数 303 千字

1982年11月北京第一版·1982年11月北京第一次印刷

印数 0,001—7,700 · 定价 1.40 元

*

统一书号：15033·5267

前 言

在许多自动化装置和小功率拖动系统中往往要求低转速、大转矩驱动，在这种情况下可以选用低速电动机。使用低速电动机，可以取消齿轮减速装置，简化传动机构，提高工作的可靠性和精确度。因此，在国内对低速电动机的研究越来越引起人们的重视。

本书介绍的电磁减速式电动机是一种利用定转子开槽后使气隙磁导发生变化的原理而工作的低速电动机，它的基本特点是转速低、瞬时转速稳定度高、噪声小、起动快、工作可靠、寿命长，与其他类型的低速电动机相比，具有更多的优点，故这类电动机在国内得到了越来越广泛的使用。目前，在我国单路传真机的生产上，这类电动机已大量取代磁滞电动机、步进电动机和脉冲电动机，使我国传真机制造出现了崭新的面貌。同时它也被广泛地使用于电动执行机构、计测装置、机床自动化以及其他要求低速和转速稳定的场合，是很有发展前途的电动机。

电磁减速式电动机是比较新型的电动机。虽然，在我国已有不少的研究单位从事这方面的研究工作，也有不少工厂已成批生产这类电动机。但到目前为止，有关这类电机的文献都分散在杂志的文章中，还没有一本书系统地叙述这类电动机的结构、原理、工作特性和设计方法。这给从事这方面工作的同志带来不少困难。同时，为了使更多的人能够了解这类电动机以促进对这类电机的研究和生产，进一步扩大

IV

它的使用范围。为此，促使作者编写本书，在本书内作者总结了国内外有关的文献资料和自己在工作中的一些体会，系统地介绍了这类电机的结构、原理、工作性能和计算方法。书中还根据这种电机的特点，用一定篇幅分析了定、转子开槽情况下的气隙磁导波和气隙磁场。对使用方面的问题如转速稳定性和裂相方法也作了一定的介绍。

本书可供电机制造厂和从事电机运行工作的有关工程技术人员参考，也可供大专院校电机专业师生以及有关研究所科技人员参考。

本书共分十二章，绪论和第1~6章由励庆孚同志编写，第7~12章由励鹤鸣同志编写。西安微电机厂总工程师刘大椿同志对书稿作了仔细审阅，提出了许多宝贵的意见，在此谨致以深切的谢意。

由于作者水平有限，书中的内容难免有不妥和错误之处，欢迎广大读者予以批评指正。

目 录

前言	
绪论	1
第一章 电磁减速式同步电动机的工作原 理和结构	8
§ 1-1 反应式减速同步电动机的基本作用原理	8
§ 1-2 轴向励磁式减速同步电动机的工作原理	18
§ 1-3 分类和基本结构	23
第二章 电机的气隙磁导波	30
§ 2-1 气隙系数	31
§ 2-2 气隙单边有槽时的气隙谐波磁导	36
§ 2-3 气隙两边有槽时的气隙谐波磁导	47
§ 2-4 气隙的齿距比磁导	54
§ 2-5 气隙谐波比磁导和齿距比磁导的关系	60
第三章 气隙不均匀时的气隙磁场	68
§ 3-1 气隙不均匀时气隙磁场的一般计算公式	68
§ 3-2 轴向励磁磁势产生的气隙磁场	75
§ 3-3 径向励磁磁势产生的气隙磁场	79
§ 3-4 交流对称绕组产生的气隙磁场	82
§ 3-5 不对称情况下交流绕组产生的气隙磁场	86
§ 3-6 轴向励磁磁通在气隙中的轴向分布	91
第四章 电磁减速式同步电动机的工作原理	103
§ 4-1 电机的电磁转矩	103
§ 4-2 反应式减速电动机	108
§ 4-3 轴向励磁式减速电动机	124
§ 4-4 具有轴向交流绕组的反应式减速电动机	137

VI

§ 4-5 磁减速器	145
第五章 减速式同步电动机的基本参数和方程式	147
§ 5-1 反应式减速同步电动机的基本参数	148
§ 5-2 轴向励磁式减速电动机的基本参数	160
§ 5-3 电压和磁链方程式	173
§ 5-4 方程式的变换	178
§ 5-5 转矩方程式和电磁转矩公式	187
§ 5-6 用标么值表示的方程式	190
§ 5-7 反应式减速电动机运行状态的分析	195
§ 5-8 轴向励磁式减速电动机运行状态的分析	201
第六章 异步感应子电动机	209
§ 6-1 结构和工作原理	209
§ 6-2 参数和工作特性	218
§ 6-3 单相次级绕组的异步感应子电动机	227
§ 6-4 可控异步感应子电动机	233
§ 6-5 双电源感应子电动机	249
第七章 减速式低速同步电动机的起动特性	260
第八章 单相馈电时的减速式同步电动机	269
§ 8-1 两相电动机在单相馈电时的运行	269
§ 8-2 三相电动机在单相馈电时的运行	289
§ 8-3 电机参数的确定	295
第九章 转子旋转的均匀性	300
§ 9-1 旋转均匀性的定义和测定	300
§ 9-2 气隙磁场对旋转均匀性的影响	304
§ 9-3 在要求瞬时转速稳定度高的场合下电机的选用	312
第十章 轴向励磁式减速电动机转子磁钢的工作状态 ...	318
§ 10-1 磁钢的工作原理	318
§ 10-2 稳磁	322
§ 10-3 轴向励磁式减速电动机磁钢工作状态的确定	326

第十一章	轴向永久磁钢励磁式减速同步电动机 的设计	335
§ 11-1	主要技术条件	335
§ 11-2	主要尺寸决定	337
§ 11-3	定子冲片	345
§ 11-4	定子绕组	349
§ 11-5	定、转子齿槽和轭部	353
§ 11-6	气隙的选取	356
§ 11-7	气隙磁导的计算	357
§ 11-8	磁路计算	373
§ 11-9	定子绕组的参数	387
§ 11-10	性能计算	390
第十二章	计算例题	393
§ 12-1	设计例题一	393
§ 12-2	设计例题二	409
参考文献	426

绪 论

现代科学技术的发展,对电动机提出了各种各样的要求,特别是自动控制系统,对电动机提出了更高的技术要求:精度高、反应快、工作特性好、重量轻和体积小,其中也包括对电动机转速的大小和瞬时转速稳定度的要求。在某些情况下,希望电动机能够直接输出低转速大转矩,有时要求瞬时转速稳定度达到 10^{-6} 。例如陀螺试验台,机床调速和进给系统,电动执行机构,传真通讯装置,录音和复制装置,钟表机构以及计测装置中使用的电动机,有时要求其转速在每分钟数百、数十以至几转。在个别场合下,甚至希望电动机的转速为几小时、几天转一转或更低。在有些系统中为了减少整个装置的重量和体积,往往采用较高的电源频率,如果采用一般的交流电动机驱动,电动机输出的转速很高,因此,往往要求降低电动机的转速和增大转矩。

从电机原理上说,一般的同步或异步电动机的转速是和极对数成反比的。只要增加它们的极对数就可以达到降低转速的要求。但是,电动机极对数的增加受到结构和工艺因素的限制,同时极对数的增加,电机的利用程度也随着降低,体积和重量显著增加,力能指标变坏。因此增加极对数降低转速的方法只能适用于一定的转速范围。

一般的直流电动机,有很好的调速特性和力能指标,但是,在低速时往往出现力矩波动和转速波动(某些特殊结构和设计的直流电动机,例如,直流力矩电动机,也可以在很

低的转速下稳定工作)；直流电动机换向产生的火花,往往对无线电通讯产生干扰；在某些环境的条件下,对电机的换向会带来不利的影响,以至影响正常工作；在运行过程中,换向器和电刷需要经常检查和维护；还需要有直流电源,这些因素使直流电动机的使用往往受到限制。

为了得到低转速、大转矩,过去一般都是采用机械减速器减速的办法,这样使得整个传动装置结构复杂,增加了重量和体积,特别是最常用的齿轮减速器,由于存在齿轮的齿隙,引起齿隙误差,使装置的精度降低,甚至使系统产生振荡,造成工作不稳定。由于齿形加工不精确,也会使系统的误差增大,并使瞬时转速不均匀。齿轮的磨损,不仅使误差增加,而且带来寿命和可靠性的问题。采用机械减速器减速,还存在噪声以及需要润滑和维护的问题。因此,科学技术的发展提出了研究和生产各种低速电动机的任务。

无需减速器减速就能直接输出低转速的低速电动机,由于没有高速转动部分,取消了齿轮传动,可以简化传动机构,提高整个装置的精度和可靠性,消除由于齿轮传动引起的噪声,维护简单,并可提高使用寿命。因此,自60年代以来,低速电动机的研制,越来越引起电机科研、生产和使用单位的注意。

目前,已经有许多种不同工作原理和结构的低速电动机,其中有的已经得到比较广泛的使用。到目前为止,对于低速电动机的确切定义,还没有明确的和统一的规定。实际上,大家熟悉的交、直流力矩电动机,印刷绕组电动机等都可以在低转速的情况下长期运转,从这一点说,它们也可以认为是低速电动机。但是,一般所说的低速电动机往往是指那些利用特殊原理和结构做成的低速运行的电动机,它们的

转速范围，在工频 50 赫的情况下，往往可以低于每分钟一百转。在已经研制的各种低速电动机中，目前比较常见的有电磁减速式电动机，滚切式电动机和谐波电动机。

电磁减速式电动机是一种交流电动机，它是利用电机定、转子的开口槽使气隙磁导分布发生变化的原理工作的。根据结构和气隙磁场的作用情况，这类电机又可以分为许多种。本书要讨论的就是各种电磁减速式电动机的工作原理、特性和设计方法。由于它们是本书讨论的主要对象，在这里暂不作具体介绍。

滚切式电动机是一种低惯量，低转速的交流电动机。它的结构型式很多，但是就其基本原理来讲，都是把电机中产生的电磁力和机械上的行星减速原理结合起来，使输出轴直接得到低转速输出。图 0-1 所示为一种滚切式电动机的结构示意图。定子铁心内圆的中心 o 和转子的中心 o' 不相重合。定子两相绕组接上单相交流电源后，在气隙中产生一个单边的旋转磁场，例如在图示瞬间，只有下面两个齿上的线圈通过电流产生磁势。在气隙磁场产生的单边磁拉力作用下把转

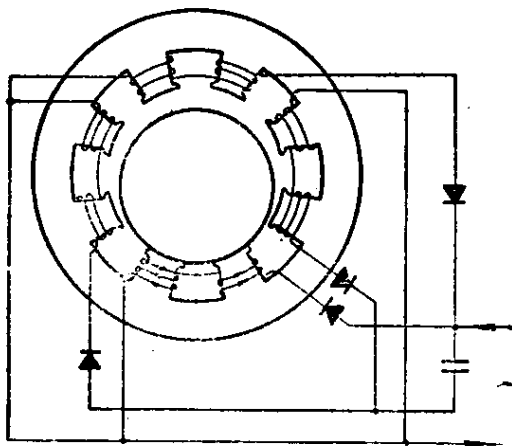


图0-1 滚切式电动机的结构示意图

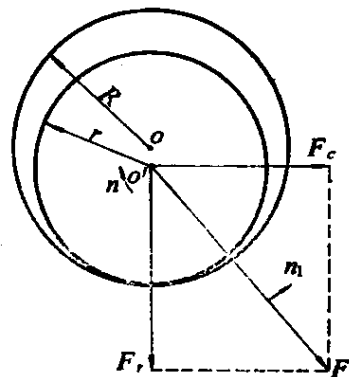


图0-2 滚切式电动机的工作原理图

子吸向定子的一边，并使其跟随单边旋转磁场沿着定子内圆作滚切运动。

图 0-2 为这种电动机的工作原理图。 R 为定子内孔半径， r 为转子外圆半径， F 表示滚切磁场对转子的磁拉力， F_r 和 F_t 为 F 的径向和切向分量。 F 的作用方向是随磁场一起旋转的，使转子沿定子内圆作滚切运动。当磁场转过一转时，转子沿定子内圆滚转一周。假如定、转子接触表面间没有相对滑动，由于转子圆周长度 $2\pi r$ 小于定子内圆周长 $2\pi R$ ，因此，转子除了相对定子轴线作逆时针方向公转外，还绕自己的轴线作顺时针方向的自转运动。磁场转过一周，转子自转的角度为 $2\pi \frac{R-r}{r}$ ，所以转子输出的转速为

$$n = \frac{R-r}{r} n_1 \quad (0-1)$$

式中 n_1 ——定子旋转磁场的转速；

$\frac{R-r}{r}$ ——减速比。

由上式可见，定、转子的偏心距 $(R-r)$ 越小，输出轴的转速越低。

当然，在实际的结构中，转子铁心是不能直接在定子铁心内圆上作滚切运动的，否则会很快磨损；同时必须采取措施，消除由偏心运动所引起的输出轴的摆动。

谐波电动机是利用电机中产生的电磁力和谐波减速器原理结合起来得到低速的。在一般谐波减速器中，柔轮的变形是由谐波发生器的机械力产生的，在谐波电动机中柔轮的变形是直接利用电机的电磁力产生的。谐波电动机的结构型式很多〔16〕。图 0-3 表示一种谐波电动机的结构简图。图中 1 表示内定子铁心，它的槽中放有两相或三相交流绕组 2，当

绕组通过交流电流时产生两极旋转磁场，转子杯形圆筒 3 上卷绕有转子铁心 4，以构成转子磁路。柔轮 5 和转子固定在一起，刚轮 6 和定子固定在一起。图 0-4 表示了这种电动机

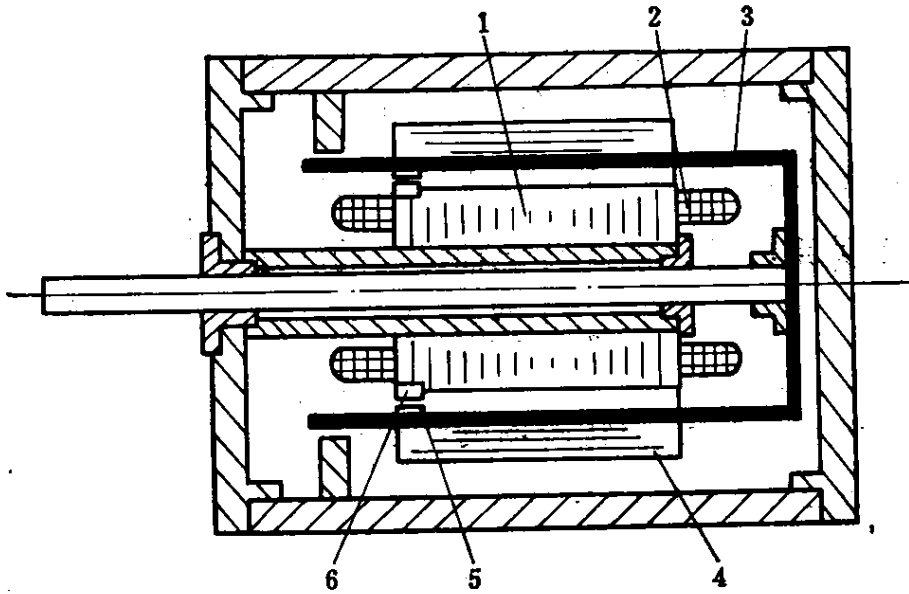


图0-3 谐波电动机结构简图

1—定子铁心 2—定子绕组 3—转子杯形圆筒 4—卷绕的转子铁心 5—柔轮 6—刚轮

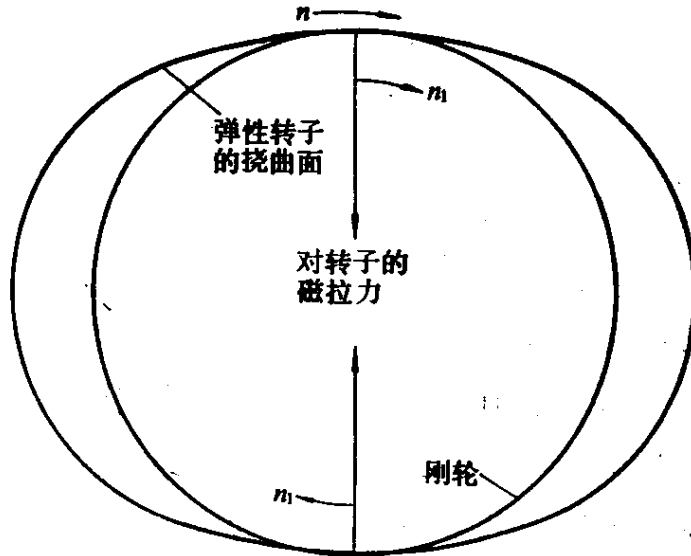


图0-4 谐波电动机工作原理示意图

的工作原理示意图。图中内圆表示固定在定子的刚轮，刚轮的齿数为 N_s ，外圆表示固定在转子的柔轮，柔轮的齿数为 N_r 。在定子两极旋转磁场磁拉力的作用下，转子产生了椭圆变形，在椭圆的短轴方向，刚轮和柔轮相互啮合。当磁场旋转时，转子椭圆变形轴线的方向也随着变化，使刚轮和柔轮啮合的位置也随着变化。由于刚轮和柔轮的齿数不一样，因此，磁场每转过一周，转子转过的角度为 $\frac{N_r - N_s}{N_r} 2\pi$ ，根据这个关系，可以确定转子轴输出的转速为

$$n = \frac{N_r - N_s}{N_r} n_1$$

式中 n_1 ——定子旋转磁场的转速；

$\frac{N_r - N_s}{N_r}$ ——减速比。

除了以上所介绍的低速电动机外，还有其他类型的低速电动机，例如 $q < 1$ 的分数槽绕组的多极异步和同步电动机、利用振动得到低速的低速电动机等。目前各种新原理和新结构的低速电动机还在不断出现。

在各种低速电动机中使用比较广泛的是轴向励磁的减速电动机和反应式减速电动机，它们具有以下特点：

(1) 结构简单，尤其是反应式减速电动机的结构非常简单，制造方便，价格便宜；

(2) 没有高速转动和容易磨损的部分，对润滑的要求很低，因此，运转平稳，噪声低，工作可靠，使用寿命长，不需维护，尤其适合在某些特殊条件下使用；

(3) 起动、反转以及不同负载时的输入电流变化不大，对电源要求低，可以在频繁的起动、停止和反转的条件下工作，长期堵转也不会烧坏；

(4) 起动、停止和反转的时间非常短，一般在10~50毫秒以内，因此，可以作为伺服电动机使用；

(5) 如果在交流绕组中持续地通以直流电流可以产生很大的自锁转矩，对永久磁钢轴向励磁的电动机，即使在定子绕组不通电的情况下，也能产生一定的自锁转矩；

(6) 配以适当脉冲电源可作为步进电动机使用；

(7) 瞬时转速稳定度高。

由于以上这些特点，目前这些电动机，特别是永久磁钢轴向励磁的减速式同步电动机，已经在许多自动化装置以及一般工业装置中得到了应用。例如用于控制各种阀门的电动执行机构，计测装置，传真机，录音机，自动机床，电极升降装置，搅拌机，泵等。

电磁减速式异步电动机（又称异步感应子电动机）主要用于高频电源的系统中，在这种场合下，如果使用一般电动机，电动机输出转速很高，往往需要通过机械减速器减速，由于转速太高，容易产生磨损，振动，噪声等问题，如果使用减速式同步电动机，往往不能自行起动，这时可以采用异步感应子电动机。但是这种电动机的力能指标低，体积大，所以在一般场合下很少采用。

第一章 电磁减速式同步电动机 的基本工作原理和结构

各种电磁减速式电动机的工作原理，不论是同步的还是异步的，都是基于利用定、转子开口槽的影响，使气隙磁导在空间的分布发生变化而工作的。对这类电机作用原理的深入分析，必须首先研究定、转子开槽时的气隙磁导和气隙磁场。但是，考虑到部分读者对这类电机可能还是初次接触，因此，在对这些问题作比较系统的深入分析之前，在这一章中，先对这类电机中比较典型的二种——反应式和轴向励磁式减速同步电动机的基本作用原理作比较简单的介绍，以便对这类电机的特点有一个大概的了解。

这里在说明基本工作原理时，采用了与一般同步电动机进行比拟的方法。这样，可以使我们更清楚地看到这类电动机与一般电动机在结构和作用原理上相似和不同之处，以及这类电动机能够得到低转速的原理。在这一章的最后，对电磁减速式电动机的分类以及部分电机的结构作了简单介绍。

§ 1-1 反应式减速同步电动机的基本作用原理

一、一般反应式同步电动机的作用原理

反应式同步电动机又称磁阻电动机，它的特点是只在定子上有一套交流绕组，转子上没有励磁绕组，利用转子正交方向磁阻不等而产生转矩。在图 1-1 a 中表示了定、转子铁心的展开图（定子槽和绕组没有画出）。由于转子做成凸极结构，使定、转子间气隙大小不均匀，在凸极极靴下气隙

小，气隙磁导大（磁阻小）；极间区域气隙大，气隙磁导小（磁阻大），因此，气隙磁导在空间的分布是波动的，每经过一个极，气隙磁导分布变化一个周期，如图 1-1 b 所示（图中假定气隙磁导按正弦规律变化）。

我们称磁极中心线（气隙磁导最大）为 d 轴，磁极间中心线（气隙磁导最小）为 q 轴。显然，当转子以 Ω 机械角速度旋转时，气隙磁导分布曲线随同转子以相同速度向同一方向移动。

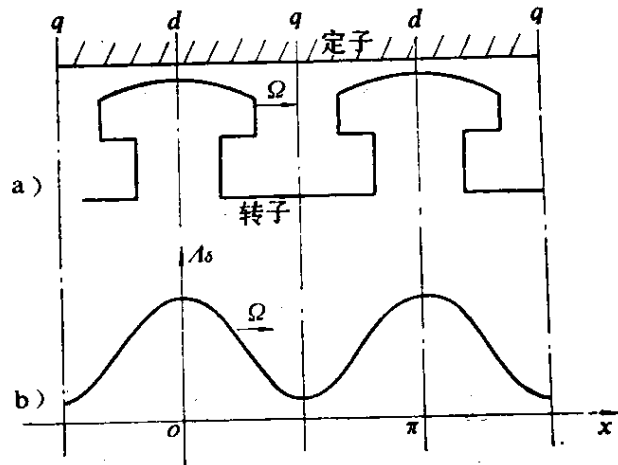


图1-1 反应式同步电动机
气隙磁导分布

反应式同步电动机的作用原理可以用 d 轴和 q 轴方向磁阻不同，磁力线被歪扭的现象进行解释。

众所周知，当定子两相或三相对称绕组通过对称交流电流时，产生一个旋转磁场，其转速为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-1)$$

式中 p —— 电动机的极对数；

f_1 —— 电源频率。

在图 1-2 b 中，外边的磁极表示定子绕组产生的旋转磁场，当定子旋转磁场的轴线与转子凸极轴线重合时，磁力线不发生歪斜，故不产生转矩。图 1-2 c 中，转子凸极的轴线与定子磁场的轴线处在不对称位置，由于凸极下磁阻较小，

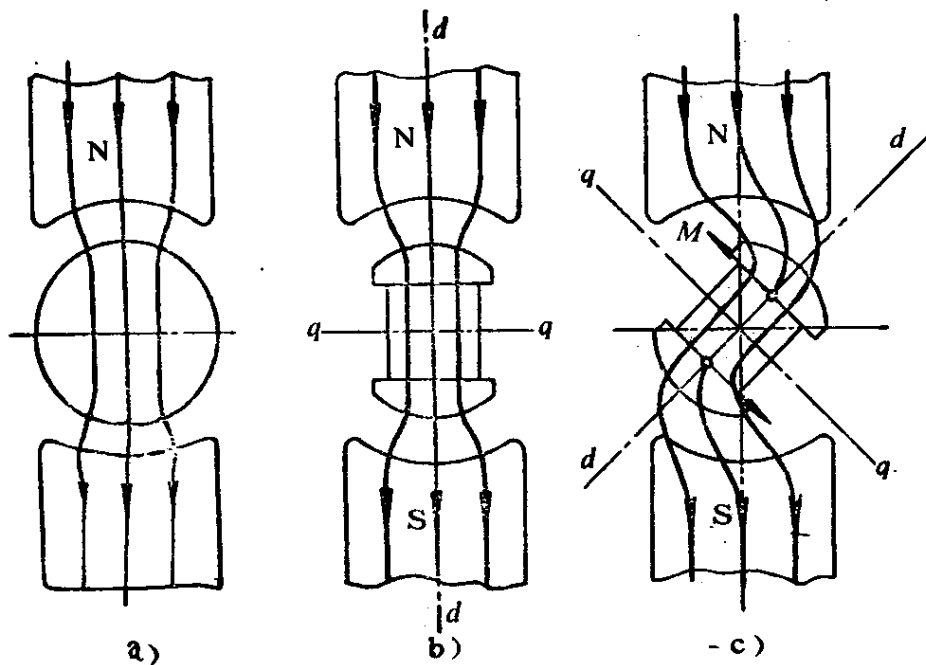


图1-2 反应式同步电动机工作原理

当磁力线按图示的路径进入转子时，产生了扭斜现象。由于磁力线有类似橡皮筋的特性，它总是企图要收缩，使其所经过的路径磁阻为最小，也就是力图使转子凸极和定子旋转磁场轴线对齐。这时，就有切向分力作用在转子上产生转矩，带动转子跟着旋转磁场以同步速 n_1 旋转。如果转子是光滑的圆柱体，气隙磁导处处相等（图 1-2 a）磁力线就不产生扭斜现象，也就不会产生反应转矩。因此，反应式同步电动机产生转矩的基本条件应该是 d 轴和 q 轴的气隙磁导（磁阻）不等，并且定子绕组产生的旋转磁场极数应该和转子的凸极数相等。

二、反应式电磁减速同步电动机的作用原理

1. 结构特点

反应式电磁减速同步电动机和一般反应式同步电动机在结构上的主要差别是转子做成隐极结构，定、转子铁心上都有开口槽，并且定、转子开口槽数满足以下关系