

磁滞电动机 理论与设计



国防工业出版社

磁滯电动机理论与设计

星云仪表厂 编译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了磁滞电动机的理论、设计及其应用。具体研究了磁滞电动机转子有效层磁性材料的性能及其对电动机的影响，讨论了设计磁滞电动机的理论基础，介绍了计算方法，并列举了计算实例。附录中列出了设计电动机所必需的国产导线和磁性材料的数据，同时列出了一些国产磁滞电动机的主要参数。

本书可供从事磁滞电动机及陀螺电动机设计和生产的工程技术人员、工人及高等工业院校有关专业师生参考。

磁滞电动机理论与设计

星云仪表厂 编译

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168^{1/32} 印张12 306千字

1977年9月第一版 1977年9月第一次印刷 印数：00,001—10,800册

统一书号：15034·1525 定价：1.50元

编 译 者 序

遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，为适应我国社会主义建设事业迅速发展的需要，我们参阅一些外文资料，编译了《磁滞电动机理论与设计》一书，供从事磁滞电动机研究和生产的人员参考。

磁滞电动机结构简单，能自行启动，并具有转速恒定，工作可靠，启动电流小和几乎无噪音等优点，在国防工业、自动控制系统和民用工业中得到了广泛的应用。例如，钟表、录音机、电唱机、电影机、通讯传真和各种记录仪器都普遍采用磁滞电动机作为驱动元件，而在陀螺仪表中，则几乎全部采用磁滞电动机作为陀螺转子。近年来，由于磁滞材料质量的提高，磁滞电动机的性能更加完善，它的应用范围正在不断扩大。磁滞电动机的主要缺点是功率因数和效率都比较低，但这些缺陷可以采用过激的方法得到弥补。

本书共有七章和附录。第一章讲的是磁滞电动机的构造、工作原理、磁滞力矩产生的物理过程和磁滞电动机的各种工作状态。第二章叙述磁滞电动机转子有效层磁滞材料的性能和特点，提出了对磁性材料的要求，确定了设计所必需的材料参数，给出了常用材料的特性曲线。第三章在能量法和磁激同步电动机一般理论的基础上阐明了磁滞电动机的理论。第四章研究磁滞电动机性能的特点，将磁滞电动机与其它类型的电动机进行了比较，并讨论了磁滞电动机的应用范围。在这一章还探讨了改善磁滞电动机特性的主要途径。第五章叙述设计最佳参数磁滞电动机的理论基础。第六章给出了磁滞电动机的详细计算方法。第七章是两个计算实例。附录中列出了设计电动机所必需的国产导线、转子有

效层、定子磁性材料的牌号和有关数据，以及国产普通工业用磁滞电动机系列的一些主要技术数据，以供设计和使用单位选用时参考。

参加本书编译工作的有王同庚、祝凤魁、唐宗基、周世勤、赵雪洁、魏凤琴等同志。全书经解勤喜同志审校。

由于我们水平所限，加之编译时间仓促，书中不免存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

星云仪表厂

目 录

第一章 磁滞电动机的构造和工作原理	7
§ 1-1 磁滞电动机的构造	7
§ 1-2 磁滞力矩产生的物理过程	10
§ 1-3 分析磁滞电动机的两种观点	22
§ 1-4 磁滞电机的各种工作状态	24
第二章 磁滞电动机转子磁性材料	26
§ 2-1 磁滞电动机转子有效层磁性材料的应用特点	26
§ 2-2 对磁滞电动机转子磁性材料的基本要求	32
§ 2-3 磁滞电动机转子的磁性材料及其特性	39
§ 2-4 磁性材料特性的某些规律	67
§ 2-5 生产磁滞电动机转子的几个工艺问题	72
第三章 磁滞电动机的理论基础	79
§ 3-1 磁场的分布特点和转子材料的反复磁化	79
§ 3-2 磁滞电动机的主要计算公式	87
§ 3-3 用能量法分析和计算磁滞电动机的基础	96
§ 3-4 磁滞电动机也是磁激同步电动机	109
第四章 磁滞电动机性能的特点及其应用范围	137
§ 4-1 磁滞电动机性能的特点	137
§ 4-2 磁滞电动机与其它交流电动机的比较	157
§ 4-3 磁滞电动机的应用范围	162
§ 4-4 磁滞电动机的过激状态	166
§ 4-5 磁滞电动机和其它类型的同步电动机的组合	182
第五章 设计磁滞电动机的理论基础	191
§ 5-1 问题的提出及原始方程	191
§ 5-2 电动机指标与气隙磁通密度的关系	195
§ 5-3 转子材料的最佳工作点 (转子的最佳工作磁通密度 B_p)	208
§ 5-4 磁滞电动机的最佳设计条件 (最佳气隙磁通密度 B_{opt} 的	

选择)	214
§ 5-5 定子绕组磁势的分配, 转子有效层材料的选择	234
§ 5-6 磁性和非磁性衬套(套箍)磁滞电动机的方案比较	239
§ 5-7 磁滞电动机的电机常数	242
第六章 磁滞电动机的计算	247
§ 6-1 设计任务书	247
§ 6-2 电动机主要尺寸的确定	251
§ 6-3 定子绕组、槽和轭	265
§ 6-4 转子有效层材料和尺寸的选择	282
§ 6-5 磁路和定子绕组参数的计算	285
§ 6-6 电动机在启动点的特性	296
§ 6-7 额定工作状态参数的近似估算	293
§ 6-8 磁滞电动机的热计算	294
§ 6-9 设计最大 $\eta \cos \varphi$ 磁滞电动机的几点意见	298
§ 6-10 磁滞陀螺电动机的设计特点	299
§ 6-11 过激磁滞电动机的设计特点	302
第七章 计算实例	311
§ 7-1 功率和温升给定时磁滞电动机的计算	311
§ 7-2 过激磁滞电动机的计算	328
附录	340
附录 I 电磁线	340
附录 II 定子磁性材料	342
附录 III 转子磁滞材料	350
附录 IV 国产磁滞电动机性能	371
参考文献	382

第一章 磁滞电动机的构造和工作原理

§ 1-1 磁滞电动机的构造

磁滞电动机的特点是，它的电磁力矩的性质与转子有效层材料的磁滞特性有关。

磁滞电动机的构造很像一个具有实心转子的异步电动机（图 1-1）。它的定子与具有三相或两相绕组的交流电动机定子没有区别。在某些场合也采用罩极式单相定子（图 1-2）。磁滞电动机用做陀螺电动机时通常做成外转子式，也就是具有内定子（图 1-3）。

磁滞电动机通常采用隐极的空心圆柱形转子（图 1-4），由硬磁材料制成，且转子上没有任何绕组。转子有效层由具有显著磁滞特性的硬磁材料构成，但不预先磁化。它的磁化是在电动机启动过程中直接依靠定子磁场进行的。

根据材料的不同，转子有效层可以制成叠合式的、铸造的、由磁粉材料压制的或者用丝材绕制的。

在转子有效层里边（对于外转子式而言则在外边）安装衬套（套箍）。衬套一般采用非磁性材料（黄铜，有时是铝合金，在许多情况下是耐高温塑料）制成，有时也采用软磁合金（结构钢或电工钢）。在磁滞电动机设计过程中根据需要来选用衬套的材料。

在其它方面，磁滞电动机的结构与小功率交流电动机的结构没有区别，一般说来其结构相当简单。

图 1-5 所示为一种普通工业用封闭式外部吹风的磁滞电动机结构。

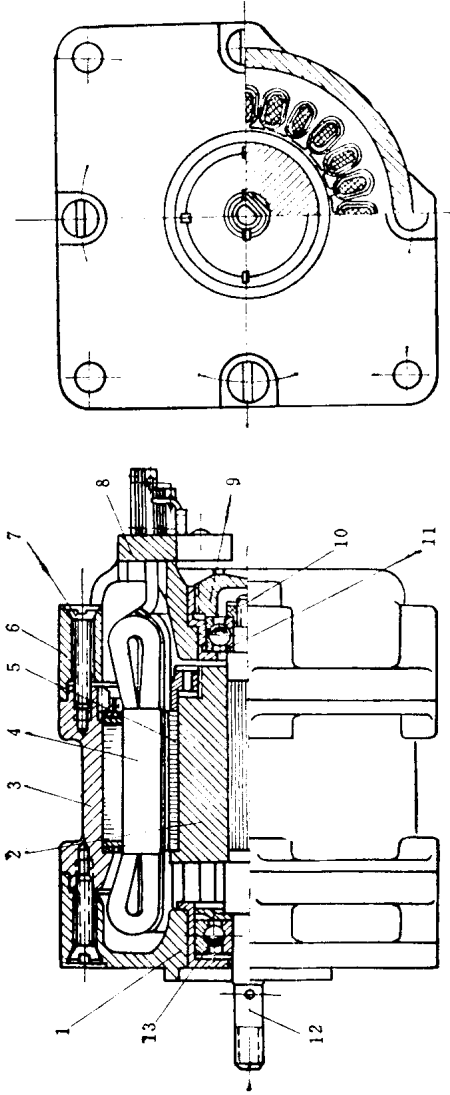


图1-1 磁滞电动机的构造

1—前端盖，2—转子衬套，3—电动机壳体，4—带绕组的定子叠片，5—转子有效层，6—后端盖，7—螺钉，8—接线板，9—轴承盖，10—螺帽，11，13—轴承，12—轴。

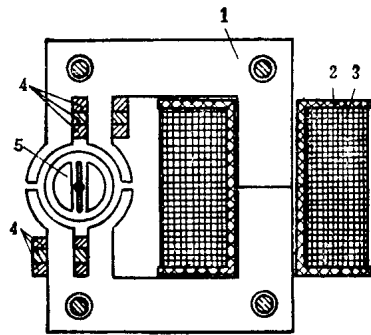


图1-2 C型电动机 (剖视图)

1—定子导磁体；2—骨架；3—激磁绕组；4—短路绕组；5—转子。

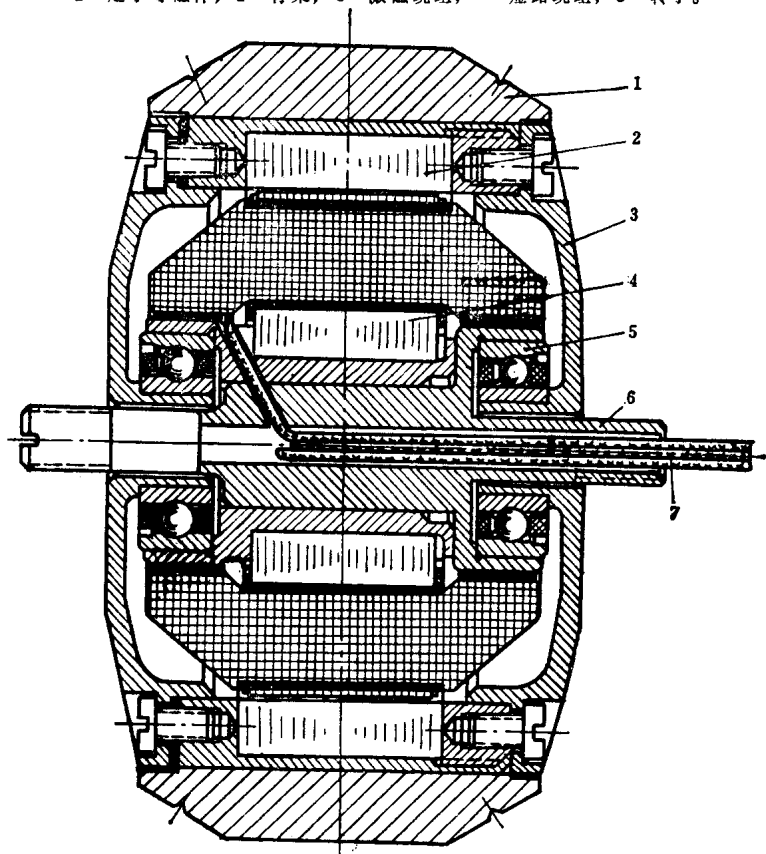


图1-3 磁滞陀螺电动机

1—套箍；2—转子有效层；3—端盖；4—带绕组的定子叠片；
5—轴承；6—轴颈；7—引出线。

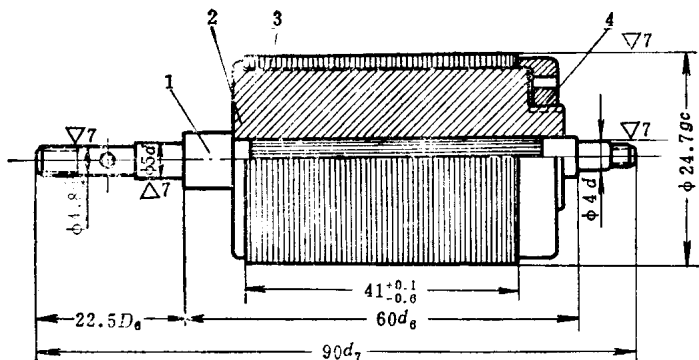


图1-4 磁滞电动机转子

1—轴；2—黄铜衬套；3—转子有效层；4—螺帽。

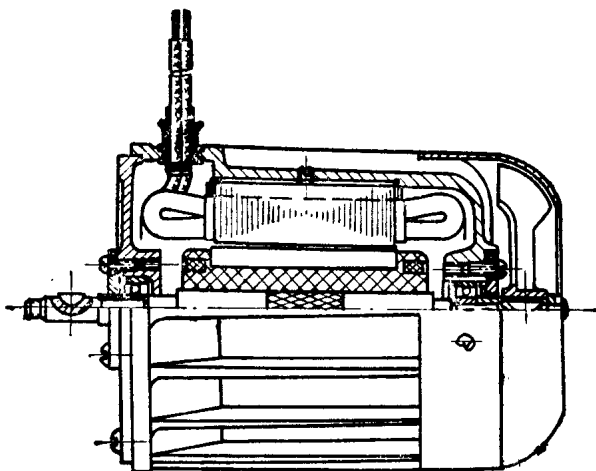


图1-5 一种工业用封闭式磁滞电动机

§ 1-2 磁滞力矩产生的物理过程

磁滞电动机的转矩与转子有效层材料的磁滞特性有关。

利用关于分子磁体的假说，可以将磁滞理解为材料中分子的摩擦力。当铁磁材料处于电磁场里时，在电磁场的作用下，分子

磁体发生转动，这时就产生分子摩擦力。

磁滞电动机转矩的出现又怎样解释呢？

为了讨论简便，假设电动机转子是实心的（没有内衬套），而定子用永久磁铁代替。永久磁铁在转子周围形成一个均匀而恒定的磁场（图 1-6）。

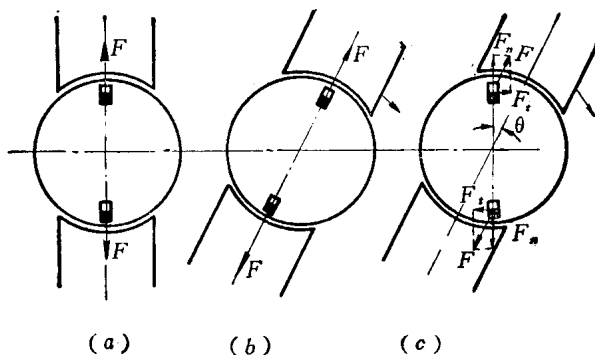


图1-6 磁滞电动机转矩的产生过程

在永久磁铁磁场的作用下，转子被磁化，而且永久磁铁磁场的轴线与转子磁化的轴线重合（图 1-6 a）。这两个磁场的相互作用力是径向的，因而在电动机里不产生转矩。

如果转子由软磁材料制成（没有磁滞特性），则当永久磁铁轴线转动时，已被磁化的转子的磁场轴线将随永久磁铁的磁场转动而不滞后，它们之间的相互作用力也只有径向力，并且相互平衡（图 1-6 b），所以也没有转矩产生，转子依然不动（由于转子是叠片式的，并且磁场转速很低，因而涡流可以忽略不计）。当永久磁铁旋转时，虽然转子材料反复磁化，但不消耗功率（因为转子是由软磁材料制成）。

如果转子由硬磁材料制成，并且具有显著的磁滞特性，那末，当定子转动某一角度时，转子的分子磁体基本上仍保持其本身相对于原磁化的方位（磁滞作用），这时定子磁场和已磁化转子的

磁场轴线之间出现了空间位移——失调角 θ (图 1-6 c)。这样, 由于转子和定子磁场之间的相互作用, 就出现了一对产生电动机转矩的切向分力 F_t 。

如果定子磁场继续转动, 失调角就逐渐达到最大稳态值 θ_M 。在给定的转子材料和定子磁场参数下, θ_M 决定磁滞力矩的最大值。当失调角达到 θ_M 值以后, 定子磁场再继续转动时, 转子磁极便随定子磁场而同步旋转, 它们之间保持不变的空间失调角 θ_M 。此时转子磁极相对转子体滑动, 同时反复磁化转子材料, 其磁化频率与定子旋转磁场速度成正比。由于反复磁化, 在转子中引起损耗——磁滞损耗。

在与最大失调角 θ_M 成正比的转矩出现的同时, 转子开始旋转 (如果阻力矩小于转矩的话), 并且加速, 直到与旋转磁场同步为止。随着转子转速的增大, 磁化频率减小, 磁滞损耗也相应地降低, 达到同步时它们都等于零。

当磁极旋转 α 角时, 电磁力矩 M_e 增长情况的实验曲线 $M_e = f(\alpha)$ 如图 1-7 所示。此曲线是通过把实际电动机定子绕组用直流电激磁时测得的。

由于磁滞电动机转子在定子磁场中工作, 同时在定子磁场磁

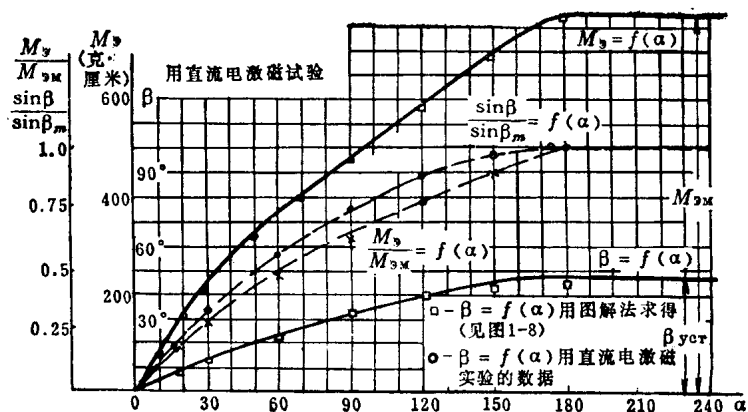


图 1-7 电磁力矩 M_e 和 β 角与 α 角的关系曲线

势的作用下产生了最初的磁化，因此在转矩增长到最大值的过程中，转子的感应磁极不但滞后于外磁场，而且相对转子体也有小移动。图 1-7 中列出的实验结果证实了这一点。在电动机定子绕组用直流电激磁时，如果预先退磁的转子在外力矩作用下被转过某一角度 α ，那末，在去掉外力矩以后转子不会恢复到原有位置，而仅仅转过 β 角。 β 远小于 α ，而且 $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$ ， β 值随 α 值的增大而单值地增大。当 $\alpha \geq 180^\circ$ 时， β 角实际上保持不变，这时电动机的电磁力矩达到了稳态值（图 1-7）。

为什么表征电动机磁滞特性的 β 角和电磁力矩仅在 α 角增大到 180° 之前增长而后保持不变了呢？为了回答这个问题，我们在磁滞电动机模型中将其绕组用直流电激磁，在此条件下研究定子磁场转动（或转子相对定子磁场转动）时转子建立稳态的过程。

如图 1-8 所示，在两极距上加上沿定子内孔移动的定子磁势波 $F_1(p\varphi)$ 。为简化起见，我们假设：

- 1) 磁势 $F_1(p\varphi)$ 为正弦波，其振幅不变，即 $F_{1M} = \text{const}$ （相当于定子绕组是直流电激磁的情况）；
- 2) 在定子回路中没有过渡过程，即 $F_1(p\varphi)$ 的大小和形状都是稳态值；

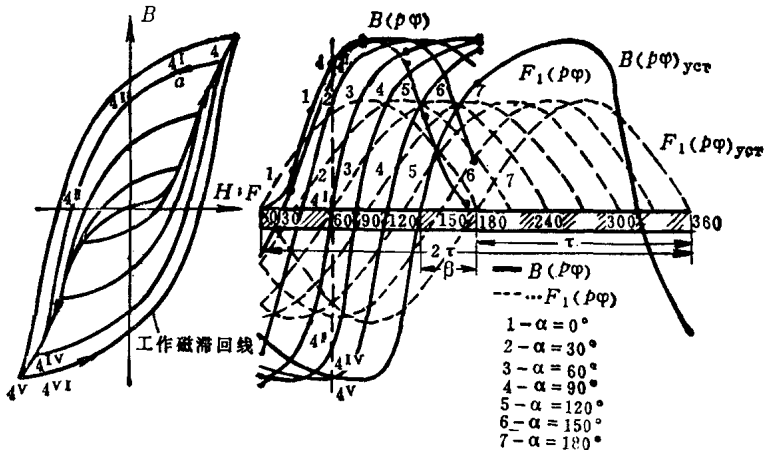


图 1-8 转子中稳定磁状态的形成

3) 转子外面沿磁力线方向的磁阻很小, 可忽略不计, 即气隙 $\delta = 0$, 定子铁芯的导磁率 $\mu_{\sigma\tau} = \infty$, 这样全部磁势加到了转子上。

为了叙述方便, 我们来研究电动机转子有效层作成薄壁空心圆柱体而其衬套由软磁材料制成的情况。磁力线 (磁通密度和磁场强度) 在转子中是沿径向的, 而且磁场强度的分布曲线与磁势曲线重合 ($F_x = 2H_x\Delta$, Δ 为转子有效层厚度)。

在知道了转子中磁势的分布规律 (因而也就知道了与其成正比的磁场强度的分布规律) 以及磁通密度和磁场强度之间的关系之后, 必须找出转子中磁通密度的变化规律。在有磁滞的情况下, 磁通密度和磁场强度之间的关系用磁滞回线族表示出 (图 1-8 左边)。

对于磁势的初始状态 ($\alpha = 0^\circ$) 和退磁的转子, 转子的磁状态由初始磁化曲线确定。根据它求出的磁通密度 $B(p\varphi)$ 的分布曲线是尖的对称的曲线 (在未饱和时), 并相对于 $F_1(p\varphi)$ 曲线没有相位移 (图 1-8)。

当 $F_1(p\varphi)$ 曲线向右偏移时, 设偏移角 $\alpha = 30^\circ$, 在 $0^\circ < p\varphi \leq 105^\circ = 90^\circ + \frac{\alpha^\circ}{2}$ 范围内, 加到转子上各点的磁势减小。因此, 这些点的磁状态用磁滞回线下降支路上的对应点 [根据 $F_1(p\varphi)_{(2)}$ 的值确定] 表示, 下降支路的顶点由转子上相应点的磁势 $F_1(p\varphi)_{(1)}$ 初始值给出。当 $\alpha = 30^\circ$ 时, 在 $105^\circ < p\varphi \leq 180^\circ$ 范围内, 加到转子上各点的磁势增大, 与此相应, 这些点的磁状态仍然用磁滞回线上的点表示。在 $\alpha = 30^\circ$ 时, $B(p\varphi)$ 曲线的分布如图 1-8 中的曲线 2 所示。它已经滞后于 $F_1(p\varphi)$ 曲线某一相角。

在 $F_1(p\varphi)$ 曲线相对于转子继续移动时, 转子上各点的磁状态将是: 各自沿磁滞回线族中表征它们的相应的下降段并沿基本磁化曲线移动, 直至移到基本工作磁滞回线上为止。这些点的移动轨迹可按图 1-8 求得。例如, 对于转子点 4 ($p\varphi = 60^\circ$),

当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 其磁状态用磁化曲线上的点 4 表示。在 α 变到 120° 前, $p\varphi = 60^\circ$ 点的磁状态用回线 a 的下降段表征 (见点 4^I 、 4^{II} 、 4^V)。在 $\alpha = 120^\circ$ 时, 落到在第 III 象限的回线 a 的顶点 (点 4^V) 上。当 α 从 120° 变到 150° 时, 沿磁化曲线移动到点 4^V , 它是工作回线的顶点。随着 α 的继续增大, $p\varphi = 60^\circ$ 的转子点的磁状态将用工作磁滞回线上相应的点来表示。对于转子的其它各点的磁状态同样可用类似方法来研究。

由此可见, 当定子磁场相对转子有一个位移时, 转子上所有点的磁状态都可用工作磁滞回线上的点来表征。通过研究转子上 $p\varphi$ 无限接近 90° 的点不难看出, 为了完成一个循环, 并在转子中建立磁状态, 必须将 $F_1(p\varphi)$ 曲线移动 180° 。这时转子所有的点都可用基本磁滞回线上的点来表征, 而在 $F_1(p\varphi)$ 的分布规律给定时, $B(p\varphi)$ 的曲线稳定形状 (见图 1-8 中曲线 7) 和它相对于 $F_1(p\varphi)$ 曲线的相位移 β 仅由工作磁滞回线的形状来确定。当 α 继续增大时 ($\alpha \geq 180^\circ$), 曲线 $B(p\varphi)$ 和 $F_1(p\varphi)$ 沿转子表面移动, 其形状不失真, 它们之间的空间相位移 β 也不变。显然, β 角的稳态值就是所谓该回线的磁滞角 γ (见 § 2-2, 诚然, 并不是根据 B 和 H 的基波求出的)。根据上述情况, 在 $\alpha \geq 180^\circ$ 时, 力矩值同样保持不变。显然, 在取消外力矩后, 转子应该转回与给定的 α 角相应的 β 角, 这时电动机转矩就降到零。将用图解法 (与绘制图 1-8 的方法类似) 求得的 $\beta = f(\alpha)$ 曲线, 与在直流激磁下用实验法得到的 $\beta = f(\alpha)$ 曲线相比较 (图 1-7)。可以看出, 用图解法得到的数据与实验数据很吻合。

图 1-7 中所列的 $M_g = f(\alpha)$ 的变化规律, 在从 0 到 $M_{g\max}$ 这个范围内与 $\sin \beta = f(\alpha)$ 的规律不同, 看来, 这与气隙的影响有关, 与因转子的磁状态随角 α 改变而引起气隙和转子之间磁势的再分配有关, 也与磁通在空间分布形状因 α 的改变而改变有关。

这里所研究的在磁滞电动机模型内建立电磁力矩的情况, 与启动的最初一瞬间具有旋转磁场的实际电动机内所发生的过程相当近似。

在定子绕组等值磁势恒定时，实际电动机启动时的力矩值与磁滞电动机模型的力矩值纯数量上的吻合也证实了这一点，见图 1-9。

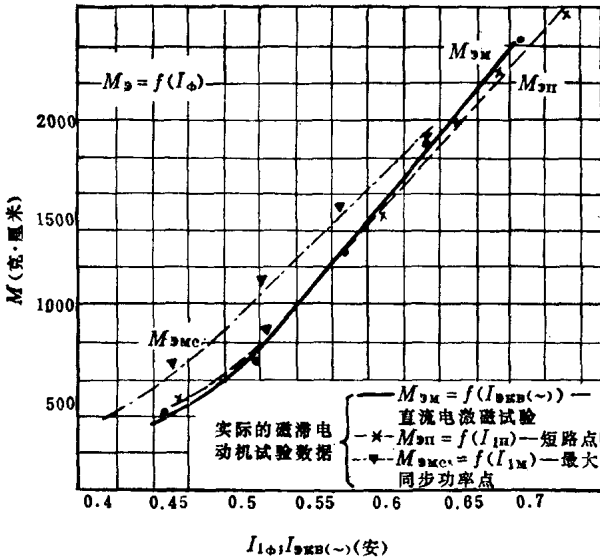


图1-9 实际磁滞电动机的电磁力矩与其模型的力矩值的比较

由于磁滞作用，在处于旋转磁场中的转子材料内磁通密度和磁场强度曲线出现了空间相位移，因而电动机的磁通和磁势之间也有相位移。这个相位移的存在决定了磁滞电动机转矩的产生。现在，我们来推导磁滞电动机电磁力矩的方程。我们假设转子具有较薄的有效层和磁性衬套。这时，转子中的磁通密度 B_p 近似地等于气隙磁通密度 B_s ，并且沿极距 τ 的分布规律也是一样的。

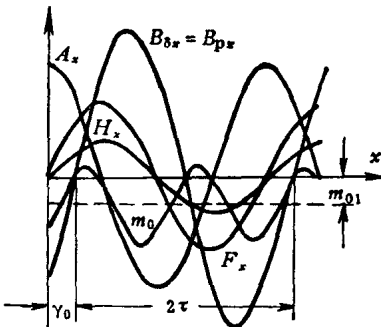


图1-10 $B_{\delta x}$ 、 B_{px} 、 A_x 、 H_x 、 F_x 和 m_0 曲线的分布规律

假定气隙（以及转子）磁通密度沿气隙按正弦规律分布（图