

緒 言

随着数字計算技术的日益发展，应用脈冲信号进行控制的电机——步进电机（亦称脈冲电机）引起了人們极大的重視，并在自动化系統中，特别是在程序控制系統中得到了广泛的应用。

早在上世紀就已經出現了第一台步进电机(机械式)〔1,2〕。1925年苏联工程师C. A. - Ноздревский提出了三定子步进电机結構〔1, 2〕。1953年美国Chattanooga大学工业研究所为火箭风洞的自动控制及机床的程序控制研究制造了轉矩达34.6公斤米的三定子功率步进电机〔3,1〕并应用在相应的系統中,成功的实现了风洞的高精度控制。1955年苏联也研究成功了带有步进电机的步进系統,并在机床上进行了試驗,57年已正式在工业机床上采用〔1,4〕。德国在50年代以前就已經开展了这一研究工作。日本、法国对步进电机也相当重視,近几年发展很快。近十年来,国外对步进电机进行了大量的研究与制造,对步进电机及其应用系統的理论进行了深入的探討,步进电机的应用已扩大到程序控制机床、計算技术、火箭、导弹、飞机、原子能、船舶、铁路运输、計量、摄影、冶金等各种系統中〔1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11〕,对有关部门的发展起着有益的作用。到目前为止各国公布的有关步进电机的专利及創造发明已达200来件,步进电机的最小步距达 0.75° 〔12〕,最大輸出轉矩达34.6公斤米〔2〕,最高工作頻率达6000赫左右〔12〕,最小步进电机重量仅20克〔12〕。

随着我国工业水平的提高,对步进电机的应用已逐步提到日程上来,58年以后国内很多单位对步进电机及其应用系統进行了大量的研究工作,取得了一定的成績。

为了满足我国工业、国防及现代科学技术发展的需要,国家对步进电机的研究工作給予很大的重視今后必須迅速开展这一新型自动化元件的研究与制造工作,为此,我們对国内外情况进行了調查,比較全面的收集了国外的文献資料及部分国内資料,經分析整理,以綜述的形式报导出来,供大家参考。

去年5月曾由各有关单位对本文初稿进行了討論,并根据会上大家的意見进行了修改。由于我們的水平有限,時間仓促,資料不全,故錯誤与缺点仍然难免,希望大家提出宝贵意見。

編者

1965.8

目 录

绪 言

一、概 述.....	(1)
(一) 基本概念.....	(1)
(二) 工作原理.....	(1)
(三) 分类.....	(3)
二、步进电机的运行特性及性能指标.....	(6)
(一) 运行特性.....	(6)
(二) 性能指标.....	(9)
三、步进电机的控制.....	(11)
(一) 步进电机的控制方式——励磁方式.....	(11)
(二) 逻辑电路.....	(13)
(三) 功率放大电路.....	(14)
四、步进电机的试验研究.....	(14)
(一) 试验的主要内容.....	(15)
(二) 试验设备及方法.....	(15)
五、国外步进电机生产与研究概况.....	(20)
(一) 品种和四化情况.....	(20)
(二) 产品技术指标和各种类型步进电机的比较.....	(22)
(三) 步进电机的生产和研究机构.....	(33)
(四) 国外步进电机研究成就和动态.....	(33)
六、步进电机文献分布情况及检索途径分析.....	(35)
(一) 步进电机情报的主要来源和分布情况.....	(35)
(二) 步进电机的检索工具.....	(36)
七、应用.....	(38)
(一) 步进电机应用上的优点.....	(38)
(二) 应用范围.....	(38)
八、结束语.....	(41)
参考文献.....	(42)
附：专题文献索引.....	(45)
步进电机专业主题索引使用说明.....	(45)
技术主题表.....	(46)
俄文字母的拉丁译音对照表.....	(47)
本索引所用的汉字词汇汉语拼音检字表.....	(47)

概 述

(一) 基 本 概 念

步进电机是一种将电脉冲信号变换为直线位移或角位移的电磁装置，是一种与输入数字脉冲单值对应的增量元件。位移量与输入脉冲成比例，且在时间上与输入脉冲同步，因而控制输入脉冲的数量、频率及电机各相绕组的接通次序，便可得到所需要的运行特性。

(二) 工作原理

步进电机（本文所指的均系电磁步进电机）的种类很多，总的说来可以分为反应式与激磁式两大类。激磁式步进电机与反应式步进电机比较起来，只是在转子（或定子）上多了激磁，使产生转矩的因素有些改变，至于它的动作过程，则与反应式步进电机相似，因此这里只重点说明反应式步进电机的工作原理。

1. 单定子三相反应式步进电机的工作原理

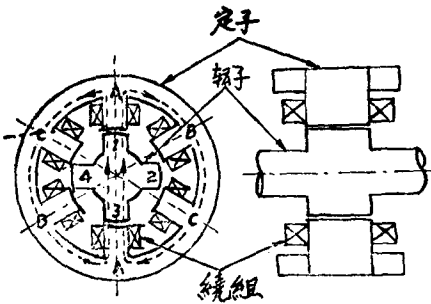


图1-1

图1-1所示为一单定子三相反应式步进电机的原理图，定子有六个齿，各齿上装有控制绕组，每两个相对的齿组成一相。转子有四个齿，无绕组。当A相通电时，磁通如图中虚线所示通过定转子磁路，转子齿1,3由于反应转矩的作用与A相定子齿对齐。当A相断开且接通B相时，转子齿2,4转到与B相定子齿对应的位置。当断开B相而接通C相绕组时，转子转到转子齿1,3与C相定子齿对应的位置。如此

按A—B—C—A……方式不断接通与断开控制绕组时，电机便进入连续工作。在图示情况下，转子每次转动半个定子齿距，即每步转过角度 $\alpha = \frac{360^\circ}{2 \cdot p} = \frac{360^\circ}{2 \cdot 3 \cdot 2} = 30^\circ$ ，其中m为绕组数，即相数，P为极对数，即齿对数。图1-2示出了按A—B—C—A……方式励磁时转子位置与磁通分布情况。

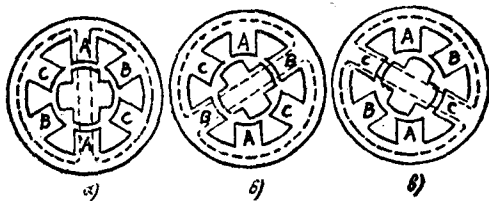


图1-2

当按A—C—B—A……方式通电时，电机反向旋转。

如果控制绕组励磁按A—AB—B—BC—C—CA……方式进行，即先接通A相，再同时接通AB相，然后断开A相，使B相单独接通，又同时接通BC相，如此等等，则转子反磁场旋转方向而旋转，且步距减少一半， $\alpha = 15^\circ$ 。

按这种方式励磁时的轉子位置与磁通分布示于图 1—3。



图 1—3 a) b) c) d)

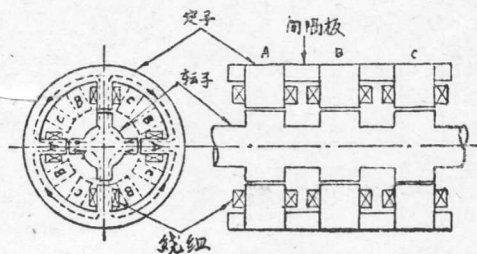


图 1—4

2. 三定子反应式步进电机的工作原理

图 1—4 所示为一现代常见的三定子反应式步进电机的原理图，定子轉子各分为三段，每段即为一相。每段定子有四个齿且等于每段轉子齿数，一齿即为一极，各段轉子齿一一对齐，各段定子齿相互错开 $1/3$ 齿距，三段轉子固定在一公共軸上，控制繞組在定子齿上，径向分布，轉子无繞組。当 A 相繞組通电时，由反应轉矩的作用，A 相轉子轉到 A 相定子齿对齐的位置，此时磁阻最小。如图所示，当 A 相定子齿对齐时，B 相定子齿错开 $1/3$ 齿距，C 相定子齿错开 $2/3$ 齿距。若使 A 相断开，且接通 B 相繞組，則 B 相定子齿对齐，轉子旋轉 $1/3$ 齿距，即一个步距 α ，图中 $\alpha = 30^\circ$ 。再断开 B 相，且使 C 相通电，則 C 相定子齿对齐，轉子又轉动 $1/3$ 齿距，如此接 A—B—C—A—……方式不断接通与断开定子繞組，电机便进入連續工作，如果使通电次序改变为 A—C—B—A—……，电机便反方向旋轉。

若将供給电机繞組的脈冲程序改变为 A—AB—B—BC—C—CA—…。即当 A 相接通后，又同时接通 AB 相，如此类推。当两相同时接通时，轉子便稳定在两相定子齿的中间位置上，轉子齿的稳定位置比前者增加一倍，步距 α 减小一半。

3. 減速式步进电机的工作原理

图 1—5 为減速式步进电机的磁系統及繞組联接图。

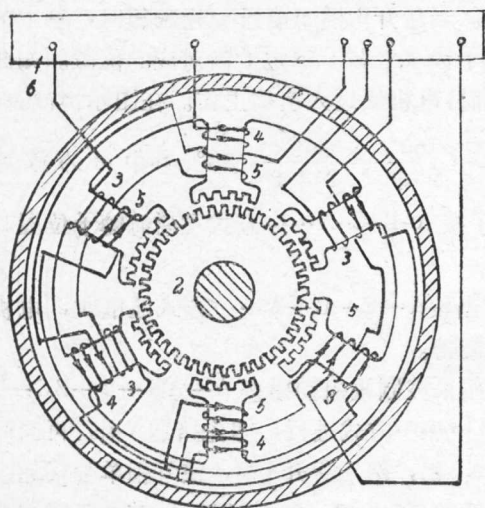


图 1—5

此类步进电机由反应式齿形轉子及在磁极上有小齿的定子組成，图 1—5 上示出了图 1—4 減速式步进电机磁系統的几何形状及繞組联接图，定子有六个极，极上有齿距等于轉子齿距的小齿，每相控制繞組由分别装在四个磁极上的繞圈組成，每个定子磁极上装有相邻两相控制繞組的繞圈。定子相邻磁极上的齿在径向相互错开 $1/3$ 齿距。当繞組 4.5 通电时，轉子处于图示位置，轉子齿与定子磁极 A、A' 上的齿对齐，如断开繞組 4，同时接通繞組 5 和 3，則轉子轉动 $1/3$ 齿距，轉子齿与定子磁极 3、B' 上的齿对齐，当断开繞組 5，而使繞組 3 和 4 同时接通时則轉子再轉动 $1/3$ 齿距，轉子齿与磁极 C、C' 的齿对齐。此时的接通次序为 4.5—5.3—3.4—

…，图中轉子齿数 $Z=40$ ，故每次轉动角度——步距 $\alpha = \frac{360^\circ}{2p_m} = \frac{360^\circ}{mZ} = \frac{360^\circ}{3 \cdot 40} = 3^\circ$ 。如果只接通一个繞組，例如只接通繞組 5，則轉子齿处于磁极 A、B，A'B' 的齿之間，断开 5 接通繞組 3，則轉子齿处于磁极 B、C，B'、C' 的齿之間，轉动了 1/3 齿距，即一个步距 α 。此时接通次序为 5—3—4—5—…，步距仍等于 3° 。若将上面的两种接通方式結合起来，即按 3—34—4—45—5—53—…方式通电，則轉子齿既有与定子齿对齐的稳定位置，也有在定子齿之間的稳定位置，此时平均步距减小一半， $\alpha=1.5^\circ$ 。当改变通电次序时，电机便向相反方向旋轉。

四相反应式、縱軸磁場式等其他类型的步进电机的工作原理与上面所談的基本相同，在此不再一一叙述。

(三) 分 类

步进电机的应用广泛，种类很多，根据不同作用原理及結構形式有不同的分类方法，一般常見的有：

(1) 按轉矩产生的原理分为

- a. 反应式步进电机；
- b. 激磁式步进电机。这类步进电机又分为电磁式与永磁式。

(2) 按輸出轉矩的大小分为

- a. 功率步进电机（动力式），轉矩一般在 1 公斤·米以上，可直接用来拖动执行元件；
- b. 伺服式步进电机（指示式），轉矩在几百克·厘米以下，多用于控制系統中。

(3) 按磁場方向分为

- a. 橫向磁場式步进电机；
- b. 縱向磁場式步进电机。

(4) 按定轉子数目分为

- a. 单定子式步进电机；
- b. 双定子及多定子式步进电机。

(5) 按定轉子相对位置可分为

- a. 內定子外轉子式步进电机；
- b. 外定子內轉子式步进电机；
- c. 双定子式（內外定子）步进电机。

另外也还可按繞組形式（集中、分布），轉向（可逆轉、不可逆轉）、相数（单相、两相、三相及多相）等方法分类。

下面示出了几种常见的步进电机的结构及原理图。

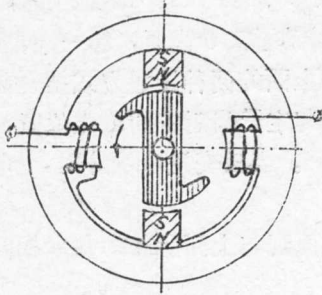


图1—6、定子具有一对永磁极的单相反应式步进电机

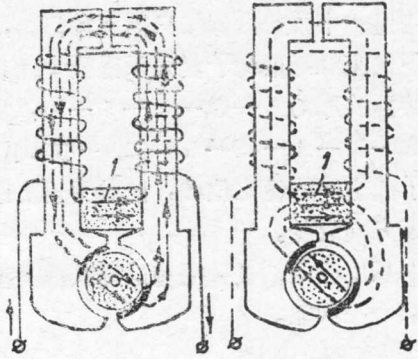


图1—7、永磁转子式单相步进电机

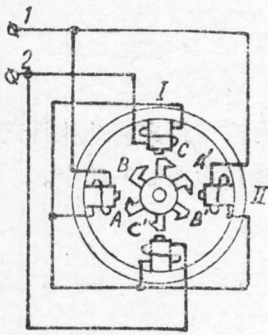


图1—8、两相反应式不可逆步进电机

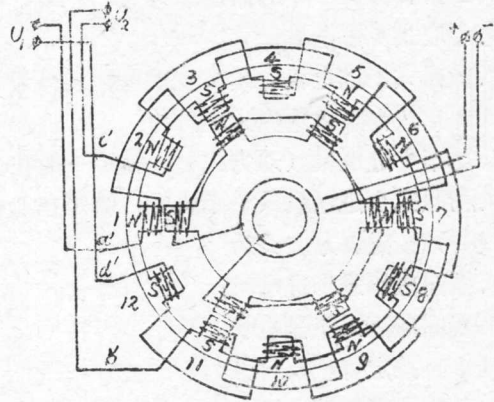


图1—9、两相激磁式步进电机

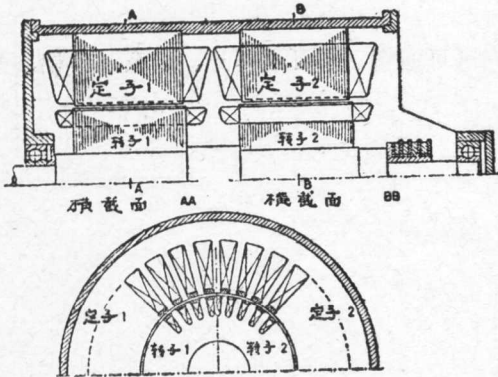


图1—10、双定子步进电机

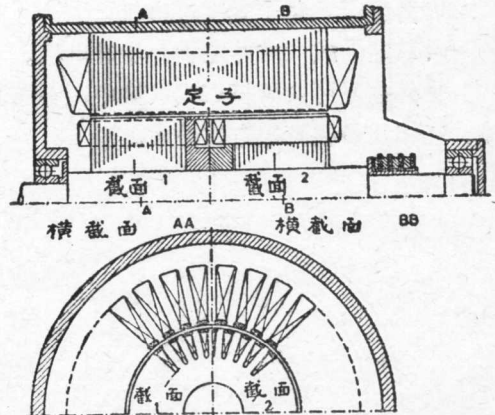


图1—11、双转子步进电机

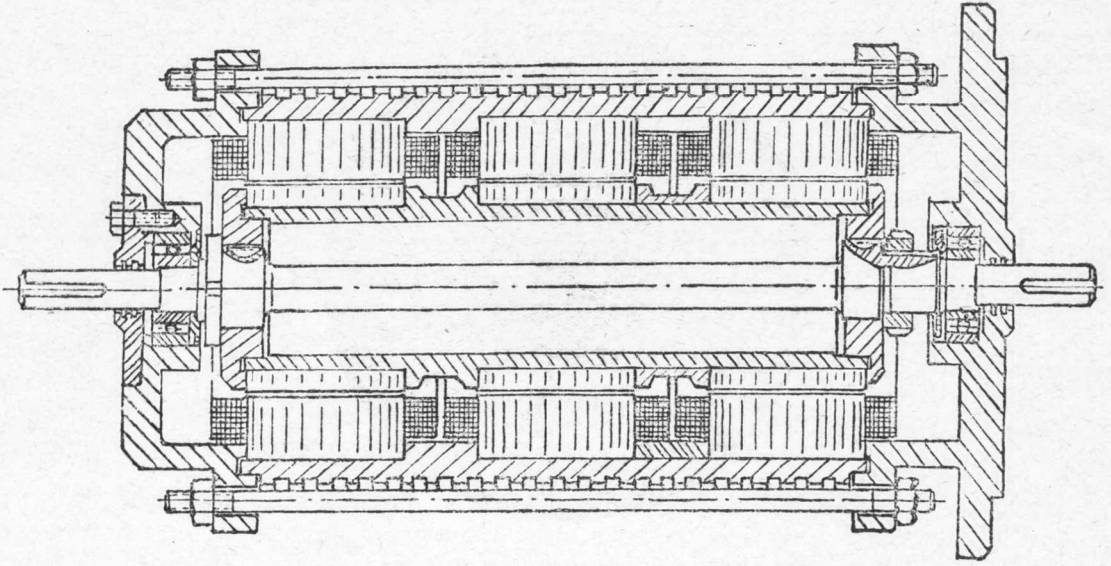


图 1-12、三定子反应式步进电机

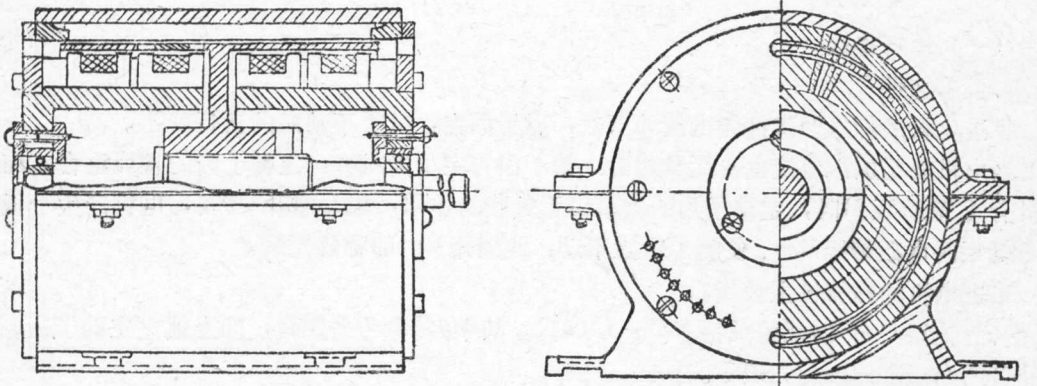


图 1-13、双定子（内外定子）四相反应式步进电机

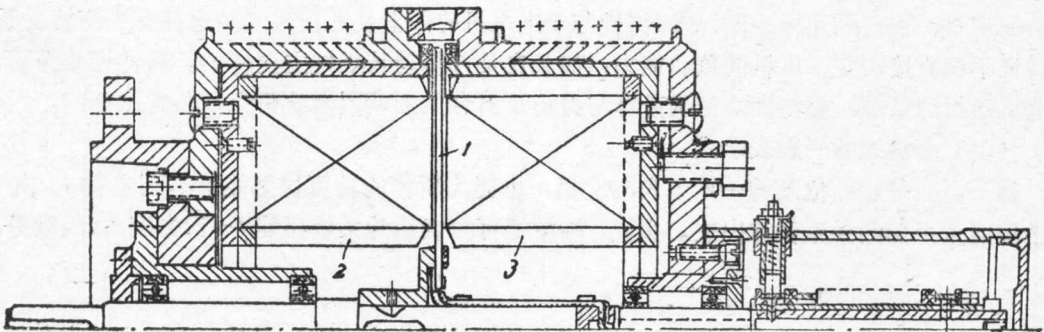


图 1-14 (1) 印刷绕组步进电机

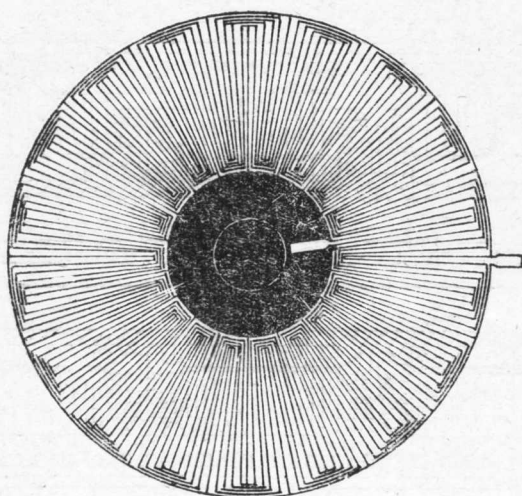


图 1-14 (2) 印刷繞組步进电机

二、步进电机的运行特性及性能指标

(一) 运行特性

1. 靜特性

步进电机的靜态即指控制电流为常数，磁場固定，轉子不动时的运行状态。

当电机繞組供以直流电且无負載时，轉子齿与定子齿对齐，定轉子齿的軸綫重合，而使电机有負載轉矩 M 时，定轉子齿的軸綫由于負載的作用，相互錯开一 θ 角，电机产生一抵消負載轉矩的电磁轉矩 M_{cr} ，使轉子稳定不动，此轉矩 M_{cr} 即称靜矩轉。

步进电机的靜特性主要指：

a. 靜轉矩与角度 θ 間的关系 $M_{cr} = f(\theta)$ 。其中 θ 角称为失調角，即上述之定轉子齿軸綫間錯开的角度，以几何角表示。

b. 靜轉矩与控制电流 i 的关系 $M_{cr} = f(i)$ ，主要是最大靜轉矩 $M_{cr \cdot \max}$ 与电流的关系 $M_{cr \cdot \max} = f(i)$ 。

靜轉矩 M_{cr} 与失調角 θ 間的关系主要决定于磁导 λ 与失調角 θ 間的关系，而磁导又与电机的結構形状、几何尺寸相关联，故靜特性与步进电机的設計及几何尺寸的选择有着直接关系。靜特性不仅直接决定了电机的負載能力，而且也是分析动特性的主要依据。靜特性是分析步进电机运行的基础，靜特性的正确計算与分析及对有关影响因素的研究是非常重要的。

(1) 靜轉矩的一般表示式

轉子由某一起始位置轉一单元角 $\delta\theta$ 之后，电磁力所作的功可根据能量不灭定律，由电磁系統能量平衡的关系計算出来。由此，靜轉矩可以表示为系統磁能 W_μ 对失調角 θ 的微分：

$$M_{cr} = \frac{dW_\mu}{d\theta} \quad (2-1)$$

必須指出，当按上式計算靜轉矩时，系統的磁場强度应不发生变化，亦即微分应在轉子虛位移的情况下进行。

与气隙比較，鉄心中的磁能及其变化可以忽略，因而近似的有：

$$\begin{aligned}
 W_{\mu} &\approx W_{\delta} = \frac{1}{2} \int_{V_{\delta}} B_{\delta} H_{\delta} dV_{\delta} \\
 &= \frac{1}{2} \int_{\delta} B_{\delta} H_{\delta} l_{\delta} R d\theta \\
 &= \frac{1}{2} \int_{\delta} F_{\delta} d\phi \\
 &= \frac{1}{2} \int_{\lambda_{\delta}} F_{\delta}^2 d\lambda_{\delta} \tag{2-2}
 \end{aligned}$$

式中 v_{δ} —— 一个极下的气隙体积；

ϕ —— 气隙磁通；

F_{δ} —— 气隙磁势（安）；

λ_{δ} —— 气隙磁导（亨）。

将 W_{μ} 之值代入静转矩公式，则得静转矩的一般表示式：

$$\begin{aligned}
 M_{cr} &= \frac{1}{2} F_{\delta}^2 \frac{d\lambda_{\delta}}{d\theta} \quad (\text{焦耳}) \\
 &= 5100 F_{\delta}^2 \frac{d\lambda_{\delta}}{d\theta} \quad (\text{克-厘米}) \tag{2-3}
 \end{aligned}$$

(2) 静转矩与失调角的关系 $M_{cr} = f(\theta)$

磁能量是电失调角 $\theta_e (=P\theta)$ 的周期函数，故静转矩 M_{cr} 也为电失调角 θ_e 的周期函数。

具有对称转子的步进电机静转矩可用福氏级数的形式表示。

对于具有对称激磁转子的步进电机，在磁路不饱和且忽略定子反应时：

$$\begin{aligned}
 M(\theta_e) &= M_1 \sin p\theta + M_3 \sin 3p\theta \\
 &\quad + M_5 \sin 5p\theta + \dots \tag{2-4}
 \end{aligned}$$

对于具有对称反应式转子的步进电机，在磁路不饱和时：

$$\begin{aligned}
 M(2\theta_e) &= M_1 \sin Z_r \theta + M_3 \sin 3Z_r \theta \\
 &\quad + M_5 \sin 5Z_r \theta + \dots \tag{2-5}
 \end{aligned}$$

转矩特性与横轴对称，如图 2-1, a) 所示。式中 Z_r 为转子齿数。

考虑磁路饱和与定子反应时，对称激磁转子步进电机的静转矩为：

$$\begin{aligned}
 M(\theta_e) &= M_1 \sin p\theta + M_2 \sin 2p\theta \\
 &\quad + M_3 \sin 3p\theta + \dots \tag{2-6}
 \end{aligned}$$

考虑饱和时对称反应式转子步进电机的静转矩为：

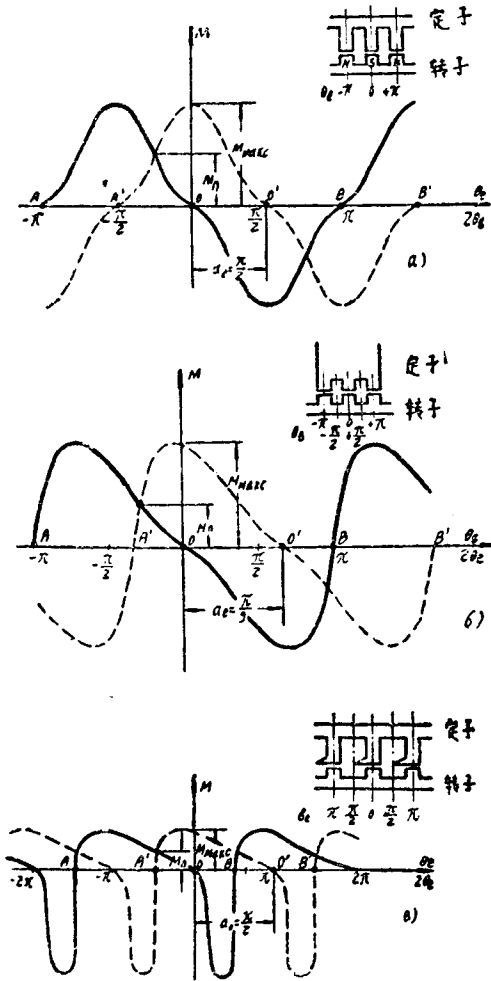


图 2-1

$M(2\theta) = M_1 \sin Zr\theta + M_2 \sin 2Zr\theta + M_3 \sin 3Zr\theta + \dots$ (2-7) 轉矩特性对称于坐标原点, 如图2-1, b)所示。

定子或轉子磁极不对称的步进电机, 其靜轉矩为周期性不同的等值半波, 而每一个半波都可以由具有周期性連續的福氏級数 (2-6) 和 (2-7) 来表示, 如图2-1, c)。

在实际計算时只限于研究級数的第一項。在分析具有对称不飽和磁系統的步进电机时只討論基波分量就足够了。

(3) 靜轉矩与控制电流*i*的关系 $M_{cr} = f(i)$

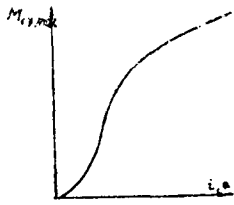


图 2-2

由靜轉矩的一般表示式可知, 在一定 θ 值时, 靜轉矩与控制电流的平方成比例, $M_{cr} \propto i^2$, $M_{cr} = f(i)$ 为二次曲綫。通常为我们所注意的是最大靜轉矩与控制电流的关系。在繞組电流为某一稳定值时, 对应于不同的失調角 θ , 可以找到一个靜轉矩的最大值, 随稳定电流的不同, 最大靜轉矩也不同, 因而可以得到 $M_{cr \cdot \max} = f(i)$ 的曲綫, 如图 2-2 所示。电流較小时, $M_{cr \cdot \max} = f(i)$ 为二次曲綫, 但当电流很大时, 磁路飽和, 故

最大轉矩特性也成飽和状。

2. 动特性

步进电机对其应用系统的快速动作能力及工作可靠性有着决定性的作用, 因此, 充分研究步进电机的动特性也是非常重要的。

步进电机的动特性不仅与其本身的特性、負載特性等有关, 而且也因驅動方式、驅動电路的不同而不同。步进电机的动特性, 因其中包括有許多非綫性的因素, 且在測量方面存在着某些問題, 故其严格分析是极其困难的, 一般只能采用近似的分析方法。

(1) 轉子运动方程式

轉子运动一般可用下式近似的描述

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + F(i) \frac{d\theta}{dt} + K(\theta, t) = \dots \quad (2-8)$$

其中 J ——轉动部分总的轉动慣量;

θ 失調角, 用机械角度表示;

$F(i)$ ——阻尼系数, 包括机械粘性摩擦阻尼与繞組通电时之电气阻尼。

$K(\theta, t)$ ——电动机电磁轉矩及干摩擦負載轉矩之和。

(2) 动态轉矩与頻率特性

动态轉矩, 是指在繞組电流及其产生的磁通, 处在过渡过程中、尚未达到稳定值时电机产生的轉矩, 亦即步进电机在某一脈冲頻率下之最大負荷轉矩, 电机在此最大負荷轉矩下运行时不应失步。

由于控制繞組电磁時間常数的存在, 繞組电流的增长可近似的認為是時間的指数函数, 故步进电机的动态轉矩随脈冲時間的不同, 即随控制脈冲頻率的不同而改变, 脈冲頻率增加动态轉矩下降, 且动态轉矩一定小于最大靜轉矩。

动态轉矩与脈冲頻率的关系我們称为步进电机的頻率特性, 用 $M_g = F(f)$ 表示, 图 (2-3) 示出了頻率特性的一般形式。

频率特性表征出了电磁过渡过程对步进电机工作过程的影响。

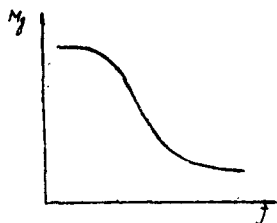


图 2—3

控制绕组电磁时间数越大，频率特性越软，用自动调节电源电压使控制电流保持不变的方法或用使供电电源具有接近于电流源的特性的方法可以使频率特性变硬，但必须指出，任何获得较硬频率特性的方法，都将导致电机内部电磁阻尼的变坏。

(3) 步进电机的运行状态

(a), 步进运行状态

当供给控制绕组的控制脉冲的转换时间间隔大于电机的过渡过程时间时，即当由于供给上一相控制脉冲而引起的转子运动过程完成后再供给下一相控制脉冲时，电机将呈现步进运行状态。由分析与试验指出，由于惯性作用，步进电机步进运行过程的瞬变函数 $\theta = f(t)$ 如图 2—4 所示，为一振荡曲线，转子经过一定的振荡后才能停止在相应的稳定位置。

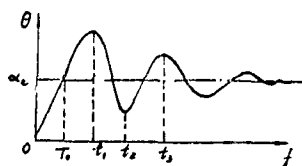


图 2—4

b. 连续运行状态

当脉冲转换时间间隔适当的小于电机的过渡过程时间时，电机将呈现连续运行状态。即在通入上一相的控制脉冲所引起的转子运动过程尚未完成时，就将下一个控制脉冲供给下一个相的控制绕组，使转子继续运动。连续运行状态包括控制脉冲时间间隔相等的匀速运行状态和时间间隔不等的非匀速运行状态。实际上步进电机大多以连续运行状态工作。

(二) 性能指标

1. 步距

步距是步进电机的主要指标之一，各种不同的应用场合，对步距值大小的要求也不同。在一般情况下，步距

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2P_m} = \frac{\pi}{P_m} \quad (2-9)$$

α ——电动机的步距，用几何角度或弧度表示；

m ——彼此有空位位移的控制绕组的数目；

P ——极对数。

如果定转子极数不等，则应将二量中之大者代入 (2-9) 式，一般控制绕组位于定子上，较多的极数在转子上。

在反应式步进电机中，极数 $2P$ 等于转子齿数，电动机步距为：

$$\alpha = \frac{360^\circ}{Z_{rm}} = \frac{2\pi}{Z_{rm}} \quad (2-10)$$

Z_r ——转子齿数。

步距的减小可通过控制绕组数 m 与极数 $2P$ 的增加来实现。在反应式步进电机中，齿距可小达 2 毫米，因而可以获得足够多的齿数，步距值可达 1 度以下。但对激磁转子步进电机，由于工艺条件的限制，无法得到这样小的步距。

2. 最大靜轉矩

电机不轉，供給控制繞組直流电时产生之最大轉矩称最大靜轉矩，該轉矩为控制繞組电流的函数， $M_{cr, max} = f(i)$ ，也与供电繞組的数目有关。对于飽和程度不同、齿的几何形状（指对称否）不同的电机，产生最大靜轉矩的失調角也不同。最大靜轉矩直接影响到电机运行的快速性（ $M_{ct, max}/J$ ）。

3. 比轉矩

比轉矩即靜轉矩特性曲綫的陡度，以穩定平衡点为标准，用 $\frac{dM}{d\theta}$ 表示，其中 θ 为定轉子齿軸綫間的机械失調角。比轉矩愈大，則在轉子离开平衡点时拉回平衡位置的轉矩就愈大，电机的稳定性愈好。轉子負載时的誤差也与比轉矩有关，当比轉矩很小时，轉子必須偏移較大的角度，以获得足够大的电磁轉矩平衡負載轉矩，因此比轉矩越大，誤差越小。

4. 最大步进轉矩比

用 $\frac{M_n}{M_{cr, max}}$ 表示，其中 M_n 为最大步进轉矩，即最大負載轉矩。当供給控制繞組一个脉冲时，轉子移动一步，总磁势曲綫及靜轉矩特性曲綫相应地也移动一步，此时，轉矩特性曲綫（图2—1虚綫所示）与原始靜轉矩特性曲綫的交点的轉矩值即为最大步进轉矩（图2—1）。随相数的增加，交点上升，因而最大步进轉矩增加。为了保証交点轉矩不为零，即为了保証最大步进轉矩不为零，电机能够工作，对不同的电机，控制繞組数不能小于一定的数字。

5. 靜态品質因数

在評价电机質量时，必須考虑电机的外形尺寸和重量，說明电机材料的利用情况，靜态品質因数就是說明这一电机性能的指标，用下式表示：

$$D_{cr} = \frac{M_{cr, max}}{G} \quad (2-11)$$

G 为电机重量，公斤。

6. 动态品質因数

轉动部分的慣量，对步进电机运行的快速性影响很大，慣量愈大，加速性愈差，快速动作能力愈差，即动态品質愈差。一般动态品質因数用下式表示：

$$D_g = \frac{M_{cr, max}}{J} \quad (1/秒^2) \quad (2-12)$$

其中 J 为轉子的轉动慣量。

为了全面的說明步进电机的快速性，最好用下式表示动态品質因数，其中 α 为步距。

$$M'g = \frac{M_{cr, max}}{J \cdot \alpha}$$

7. 靜态步距誤差

空載时，步进电机每步实际轉过的角度与理論步距值之差称靜态步距誤差，用二者角度的差值与理論步距值之比来表示。

8. 动态誤差

空載穩定运行时，每步的实际步距值与理論步距值之差称为动态誤差，用对理論步距的比值表示。

9. 起動頻率 (或稱突跳頻率)

轉子從靜止狀態不丟步地牽入同步的最大隨動脈沖頻率稱起動頻率。動態品質因數越大,步距越小,則起動頻率越高。在動態品質因數相同時,起動頻率隨控制繞組數的增加而增加。

10. 最大工作頻率 (或稱極限頻率)

最大工作頻率系指步進電機連續工作時所能接受的最高控制脈沖頻率,該頻率與電機的負載、控制繞組回路的时间常數、控制繞組數、平均轉矩等有關。

三、步進電機的控制

步進電機因其控制不同而有不同的運行特性。圖3-1為一步進電機驅動系統的示意圖,

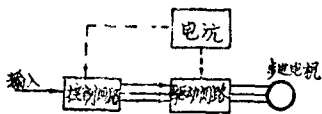


圖 3-1

其中邏輯電路實現電機的旋轉狀態,如三位置動作或六位置動作,正轉和反轉等;功率放大電路是按邏輯電路的輸出信號,供給電機足以旋轉的勵磁電流。邏輯電路可以設計成標準型式,它與電機本身無關,只決定於電機的勵磁方式。功率放大電路輸出的電壓、電流直接決定於所控制的電機。

前者常由電子管、晶體管等組成。后者常由電子管、晶體管、閘流管和可控硅正流器等組成。

(一) 步進電機的控制方式——勵磁方式

步進電機的輸出特性不僅與電機本身的特性、負載特性等有關,而且受控制方式的影響也很大,控制方式改變時,運行特性也會相應的變化,因而選擇適當的控制方式對獲得優良的運行特性是有好處的。

步進電機控制方式的分類,依其着眼點不同而異,這裡僅就按勵磁方式和接受脈沖輸入方法的分類舉例說明(見表3-1)。因目前三相步進電機得到了廣泛的應用,故以三相為例。

三相步進電機	勵磁方式	他激動作	每個輸入脈沖對	$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ 勵磁方式} \\ 2 \text{ } \dots \dots \dots \end{array} \right\} \text{三位置式}$
			應一個勵磁狀態	
			每個輸入脈沖	$\left. \begin{array}{l} 1 \cdot 1 \text{ 勵磁方式} \\ 1 \cdot 2 \text{ } \dots \dots \dots \end{array} \right\} \text{三位置式}$
		自走動作		

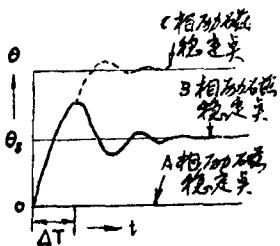


圖 3-2

其中以他激動作應用最廣,故這裡僅就他激情況加以敘述。

步進電機接受勵磁後,轉子動作的反應如圖3-2所示。當勵磁由A相轉到B相時,轉子從A相勵磁穩定點轉到B相勵磁穩定點。由於存在慣性,需經過圖示軌跡的過渡過程才能達到穩定點,設偏離B相穩定點最大的點所對應的時間為 ΔT ,這種偏離是造成振盪的主要原因之一,但當我們採用適

当的控制方式，在 ΔT 后紧接着给予C相励磁时，转子就很容易的稳定在C相稳定点上，而不经过衰减振荡，因而防止了振荡现象。当输入脉冲中止时，转子一定落在稳定点上。对于三相步进电机 稳定点有一相励磁和二相励磁两种，以这种稳定点为着眼点的励磁方式有1励磁方式，2励磁方式和1—2励磁方式三种，所有这些方式都是一个输入脉冲对应一个励磁状态。

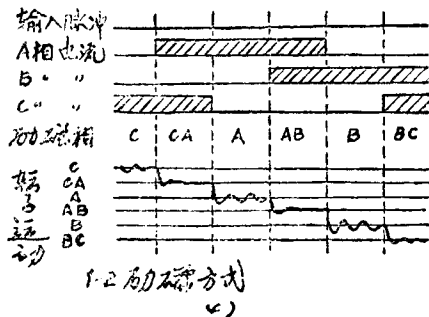
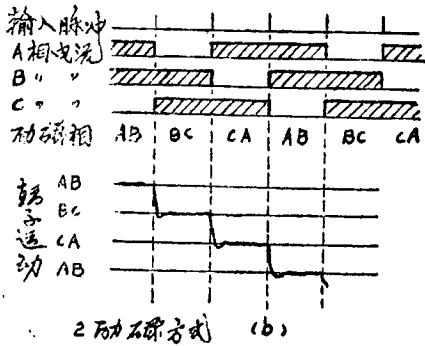
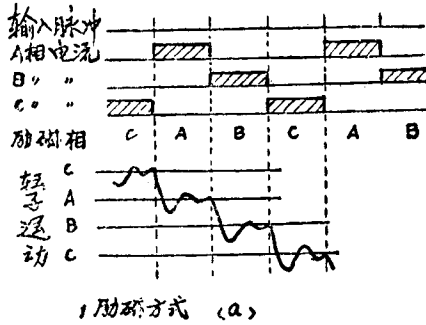


图 3—3

如图 3—4 所示。可以看出，此时一个输入脉冲对应二个励磁状态。转换时间 ΔT 因电机、控制系统及负载而不同。

在上述各励磁方式中，1励磁方式较难以防止振荡，而且转矩特性较差，一般较少使用。在1—2励磁方式时，电机能得到最大平均转矩，且振荡较小，故常被采用。

在图3—3上示出了这三种控制方式的励磁电流、转子运动的情况，可以看出，这些方式是将转子强行转到一个新的稳定点上，因而通常随之而产生较大的衰减振荡。其中2励磁方式的步进电机，转子受两个相反方向的力矩的作用而处于平衡状态，因而振荡的振幅大为减小，电机工作较稳定。对于1—2励磁方式，转子每转稳定位置增加一倍，因而步距减小一半。

以转子运动为主的控制方式是防止振荡，积极利用转子存在惯性而具有的过渡过程的一种励磁方式。依 ΔT 时间为准，改变1励磁方式和2励磁方式，而分为1·1励磁方式和1·2励磁方式二种。这种励磁方式与输入脉冲的关系

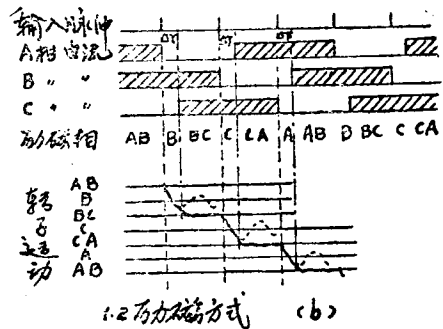
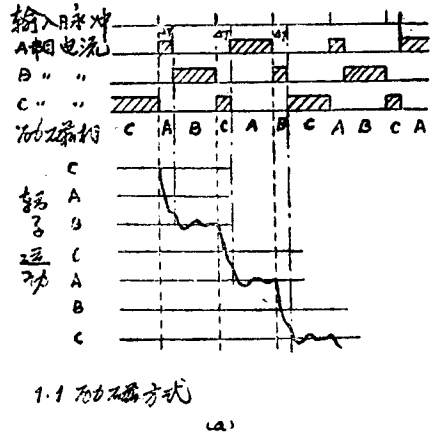


图 3—4

由上述分析可以看出，以稳定点为主的励磁方式中，步进电机工作的最高频率取决于负载、控制电路、电机等。而在以转子运动为主的励磁方式中，由于对应每个输入脉冲，需要输出二个时间间隔为 ΔT 的信号，故输入频率直接受控制电路的约束。

(二) 逻辑电路

完成同一励磁方式动作的逻辑电路可以有不同的形式，且各有其优缺点，下面仅就苏联和日本的举几个例子。

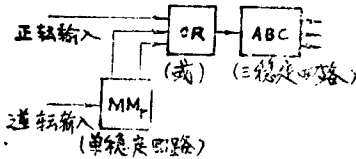


图 3—5

1. 逻辑电路的功用

- a. 完成所需的励磁方式；
- b. 实现正、反转。

2. 逻辑电路举例

(1) 属于 1 励磁和 2 励磁方式的如图 3

—5，图 3—6 所示。图 3—5 中 MMr 单稳定回路，

OR 或门，

ABC 三稳定回路，完成表 3—2 逻辑内容

表 3—2

A	B	C
1	○	○
○	1	○
○	○	1

A	B	C
○	1	1
1	○	1
1	1	○

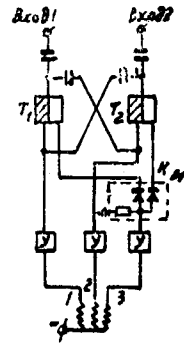


图 3—6

图 3—6 中，V 双稳态触发器，

U 与门，

Y 放大电路。

(2) 属于 1—2 励磁方式的如图 3—7，3—8 所示。在图 3—7 中虚线内为完成 1 励磁方式和 2 励磁方式部分。图 3—7 中 AND 与门。图 3—8 中 HF 非符合门。

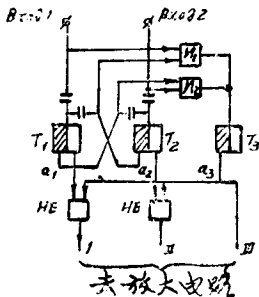


图 3—7

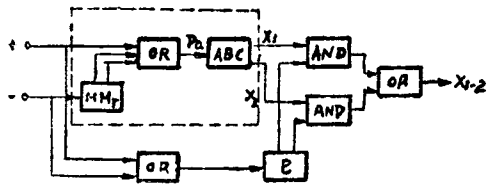


图 3—8

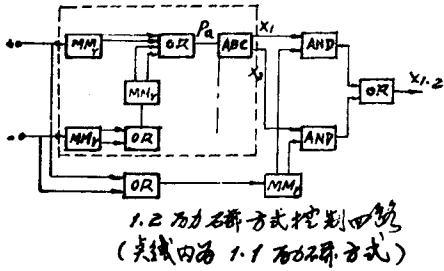


图 3-9

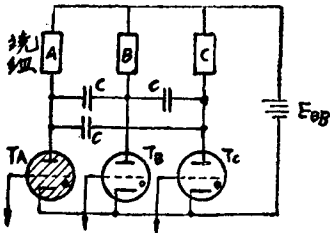


图 3-10

(2) 电子管功率放大电路如图 3-11，可用在励磁电流较小（0.2A 左右），速度较高的步进电机中，适用于各种励磁方式，大多采用三极管，也可用五极管。

(3) 晶体三极管功率放大电路。图 3-12 为一基本电路，适用于被驱动电机最大转矩不超过 0.03~0.04 公斤·米，励磁电流几安培。其优点为体积小，重量轻，可靠性高，目前已广泛使用。

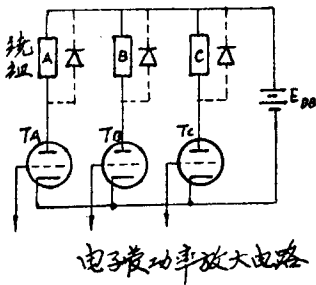


图 3-11

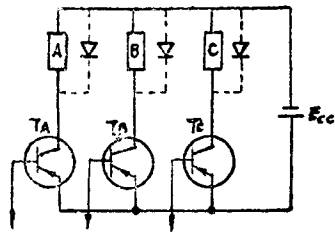


图 3-12

(4) 应用可控硅整流器的功率放大电路

P-n-P-n 型可控硅整流器具有与闸流管相似的特性，并保持了半导体器件的优点，其开关功率可达几瓩，如将闸流管换成可控硅整流器，则工作频率可以大大提高。它可同时实现逻辑变换和功率放大作用，是目前最有前途的一种电路，但由于近来可以用晶体管得到大电流，且元件本身尚处于研制阶段，故该种电路尚未广泛采用。

四、步进电机的试验研究

步进电机在考虑磁路饱和、定转子磁极形状等以后的精确理论计算是很困难的，因而在步

进电机的研究中，广泛地应用了试验研究的方法。

应该指出，步进电机的试验在电机试验中还是一门新的技术，虽然测定比较准确，但需特殊的测试设备与测试方法。

(一) 试验的主要内容

1. 步进电机磁路的研究

步进电机磁路的研究，对磁系统几何形状及尺寸的选择，对步进电机的正确设计有着重要作用。此项试验主要包括：

a. 改变磁极形状，求出不同齿形时电机的转矩特性。

b. 改变气隙大小，求出不同气隙时的转矩特性。

对各种齿形、不同气隙等的研究，可以选定我们所需要的磁路形状及几何尺寸。

2. 步进电机的静态试验

静态试验确定不同失调角 θ 及不同电流 i 时的静态转矩特性 $M_{CT} = f(\theta)$ 及 $M_{CT, \max} = f(i)$ ，试验时应测定角度 θ 、电流 i 及转矩 M_{CT} 。

3. 步进电机的动态试验

动态试验应确定动态转矩特性 $M_g = F(f)$ ；起动频率特性 $f_n = F(M_{\text{нагр}})$ ；极限频率特性 $f_{\text{огр}} = F(M_{\text{нагр}})$ 及转子的瞬变振荡特性 $\theta = f(t)$ 等。

除以上内容外，还有涡流影响，漏磁影响等其他研究试验。

(二) 试验设备及方法

1. 电磁场模拟法 (25, 26)

假设条件：

(1) 气隙磁场为二度场，即忽略齿端磁通的扩散，认为沿齿长度方向各横断面磁场分布相同。

(2) 认为铁心表面为等磁位面，不考虑铁心中磁场分布对气隙磁导的影响。

模拟方法为用电场的等电位面模拟等磁位面，用电场的电压模拟磁场的磁位降。

试验线路如图 4-1 所示，改变线路中的 $\frac{R_1}{R_2}$ 即可用探针找出定子齿间的等电位线轨迹，然后根据电力线与等电位线正交的原理，找出电力线与等电位线构成的网眼图，根据电场与磁场相似的原则，此网眼图与磁力线及等磁位线构成的网眼图是相似的。对某一 θ 角测出的电力线与等电位线构成的网眼图示于图 4-2。

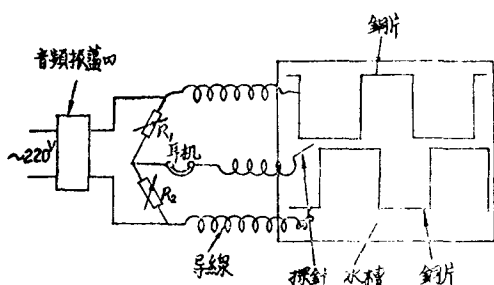


图 4-1 电磁场模拟试验线路图

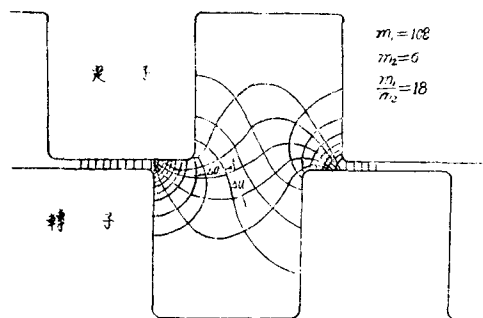


图 4-2 用电磁场模拟试验求出的磁场分布图

令 m_1 —— 一个齿下的磁通管数

m_2 —— 等磁位线间隔数

$\Delta\Phi$ —— 每一磁通管内之磁通量