

# 增量运动控制

下 册

(步进电动机及其控制系统)

主译 王宗培 孔昌平 李楚武

93

哈尔滨工业大学微电机教研室

# 增量运动控制

Incremental Motion Control

第二册

Volume II

R

步进电动机及其控制系统

Step Motor and Control Systems

主编 郭宗仪

Edited by

Benjamin C. Kuo

University of Illinois at Urbana—Champaign

美国、伊利诺斯州 香滨城 61820

SRL 出版公司 1979年

A 站邮政信箱 2277

## 内容简介

本书内容为步进电动机及其控制，它系《增量运动控制》两卷本的第二册，其中部分资料选自“美国增量运动控制系统及器件”历届年会论文集，原稿全部经过充实并由依利诺斯州立大学郭宗仪教授（美籍华裔）编纂成册，它是该学术领域的首批著作。

本书旨在使从事实际工作的工程师通晓各种步进电动机的工作原理和控制问题以及如何运用微处理机更有成效地发挥步进电动机的效能。

本书共分15章，前8章主要介绍步进电动机的工作原理、数学模拟、驱动电路、参数和性能的测试、阻尼方法以及正确选用步进电动机等方面的问题，中间6章首先论述步进电动机的转速和点位控制问题，特别是对电流检测的闭环控制作了较详细的阐述，另有专章叙述步进电动机系统的计算机模拟和设计问题，最后用较多的篇幅讨论了步进电动机的微处理机控制。对读者广泛了解或深入探讨步进电动机某些专题均有所裨益。

本书可供微电机、自动控制、电子技术以及计算机等领域的科技工作者参考，并可作为大专院校有关专业教师、研究生、高年级学生的参考书或补充教材。

## 序 言

这两本书是增量运动控制系统和器件领域内的首批著作，上册为直流电动机及其控制系统，而下册则为步进电动机及其控制系统。

近年来应用直流电动机和步进电动机的增量运动控制系统已经引起了工业界的密切注意，微处理机时代的到来，更进一步扩大了高性能的直流电动机和步进电动机的应用，藉以解决复杂的运动控制系统中的许多问题。

本书部分资料选自“增量运动控制系统和器件”历届年会发表过的文章，经作者改写后编入，而今年将为这个年会十周年的里程碑。

编著者高兴地得悉直流电动机和步进电动机在中国已有较好的进展，并在它的科学研究与发展中正起着有成效的作用。

在此，编著者谨向王宗培教授和他的同事们表示谢意，感谢他们的努力使这本书得以译成中文出版。

郭宗仪 B.C.Kuo

1981年1月

## 译 序

今春承美国伊利诺斯州立大学电气工程系郭宗仪 (B.C.Kuo) 教授以所编《增量运动控制》两卷见赠, 阅读一过、爱不释手, 深感该书内容新颖, 结合实际, 深广有度, 不蔓不支, 诚为微电机、自动控制、电子技术及计算机诸专业不可多得的参考读物, 经征得编者同意, 由哈工大微电机专业翻译出版, 以期对祖国四化建设及中美文化交流有所裨益。

本书第一册内容为直流电动机及其控制系统, 第二册为步进电动机及其控制系统。

本书第二册由王宗培、孔昌平、李楚武、顾其善、张宝铭、郭庆吉、刘宝廷、张绍清、李春城、韩伟忠、乔静秋等同志分别译出, 并聘请外语教研室陆干同志协同校阅和修改全部译稿, 李楚武同志还负责全书插图文字的翻译以及全部译稿的统一工作。

在协同工作中, 我们体会到专业工作者与科技外语工作者相结合, 对提高译文质量是有一定好处的。但是, 由于我们在专业和翻译方面的水平都有限。难免有不信不达及错误之处, 恳请原作者及读者批评指正, 来函请寄哈尔滨工业大学微电机教研室。

承郭宗仪教授为中译本撰写序言, 谨表谢忱。

第二册 主译 王宗培 孔昌平 李楚武

1981年12月

# 前 言

本书为《增量运动控制系统及器件》两卷本的第二册。第一册专门论述直流电动机及其控制系统，本书则集中论述步进电动机及其控制系统。

近年来，步进电动机在增量运动控制系统中的应用有了显著地发展。在许多工业控制问题中，微处理机在控制系统中的普及，卓有成效地提高了步进电动机的性能和潜在能力。

本书主旨在于使从事实际工作的工程师通晓各种步进电动机的基本工作原理以及如何去控制这些电动机。实际上，对于许多控制问题来说，直流电动机和步进电动机控制系统只是代表两种可供选择的方案而已。在许多情况下，采用一种电动机就意味着比采用另一种电动机有较好的作用。然而，这两卷书之所以介绍大量表征直流电动机及步进电动机的特点和特性，其目的是为了设计师可自行作出正确的选择。

书中相当一部分内容系“增量运动控制系统及器件”历届年会论文集所提供的资料，但所有章节几乎全部经过充实而后编纂成册。编者对年会论文的作者表示感谢。珍·卡尔顿 (Jane Carlton) 打印了全部手稿，并在本书出版过程中做了很多工作，特此致谢。

郭宗仪 (Benjamin C. Kuo)

1979年4月

作 者

姓 名	工 作 单 位
A. Cassat	Hermes Precisa International S.A.
G. Heine	Berger Lahr Corporation
K. S. Kordik	Warner Electric Brake and Clutch Company
B. C. Kuo	Department of Electrical Engineering university of Illinois at urbana-Champaign
S. H. Pollack	Western Electric Research Laboratory
G. Singh	QYX Corporation

# 目 录

前言	
作者名单	
<b>一、步进电动机导论 B.C.Kuo</b>	
1—1. 引言 .....	1
1—2. 步进电动机的应用 .....	1
1—3. 步进电动机的优缺点 .....	5
1—4. 步进电动机的类型 .....	5
1—5. 步进电动机的工作特性 .....	6
1—6. 螺管线圈-棘轮式步进电动机 .....	8
1—7. 反应式步进电动机 .....	9
1—8. 永磁式步进电动机机 .....	19
1—9. 机电式步进电动机 .....	26
1—10. 电液式步进电动机 .....	27
1—11. 结论 .....	29
<b>二、反应式步进电动机的数学模拟 B.C.Kuo</b>	
2—1. 引言 .....	32
2—2. 反应式步进电动机各相绕组的动态方程 .....	32
2—3. 步进电动机中磁场能量和电磁转矩 .....	35
2—4. 多段反应式步进电动机的动态模型 .....	38
2—5. 单段反应式步进电动机的动态模型 .....	43
附录 .....	54
<b>三、永磁步进电动机的数学模拟 B.C.Kuo</b>	
3—1. 引言 .....	60
3—2. 各相绕组的动态方程 .....	60
3—3. 永磁体引起的磁链 .....	66
3—4. 初始条件和电流的不连续跃变 .....	68
3—5. 以磁链作状态变量的动态方程 .....	71
3—6. 转矩及转子动力学 .....	72
3—7. 参数的确定及结论 .....	73
附录 .....	74
<b>四、步进电动机的驱动电路</b>	
4—1. 引言 .....	79
4—2. 程序逻辑 .....	79
4—3. 功率驱动器 .....	83



4—4. 脉冲源 .....	92
<b>五、高性能有源抑制驱动器 A.Cassat</b>	
5—1. 引言 .....	100
5—2. 有源抑制控制器 .....	101
5—3. 电流波形 .....	102
5—4. 动态性能的比较 .....	104
5—5. 两相通电运行 .....	108
5—6. 升速电容的作用 .....	108
<b>六、步进电动机的测试 K.S.Kordik and B.C.Kuo</b>	
6—1. 引言 .....	111
6—2. 电源、电流和电压的测量 .....	111
6—3. 转速及频率的测量 .....	111
6—4. 绕组电阻的测量 .....	118
6—5. 温度的测量 .....	118
6—6. 电感的测量 .....	119
6—7. 静转矩的测量 .....	124
6—8. 矩频特性曲线的测量 .....	125
6—9. 动态转矩的测量 .....	136
<b>七、步进电动机的选择 K.S.Kordik</b>	
7—1. 引言 .....	145
7—2. 步距角分辨率 .....	145
7—3. 转矩要求 .....	146
7—4. 起动(牵入)惯频特性 .....	147
7—5. 阻尼响应时间与负载惯量特性 .....	148
7—6. 步距角精度 .....	149
7—7. 输入功率极限 .....	149
7—8. 温度极限 .....	149
7—9. 散热极限 .....	150
7—10. 环境因素 .....	150
7—11. 空间限制 .....	150
7—12. 价格考虑 .....	150
7—13. 安装规定 .....	150
7—14. 用于步进电动机的齿轮选择 .....	151
<b>八、步进电动机的阻尼 B.C.Kuo</b>	
8—1. 引言 .....	154
8—2. 外部机械阻尼法 .....	154
8—3. 控制电路阻尼法 .....	159
8—4. 电子线路转换的(阻尼)方法 .....	161

8—5. 利用电动机设计参数进行阻尼的方法 .....	162
<b>九、步进电动机的闭环控制 B.C.Kuo</b>	
9—1. 引言 .....	167
9—2. 编码器 .....	168
9—3. 转换角或超前角 .....	169
9—4. 旋转方向的检测 .....	170
9—5. 超前角在步进电动机闭环控制中的作用 .....	171
9—6. 转换角及注入脉冲对四相步进电动机闭环响应的影响 .....	173
9—7. 步进电动机使用时间延迟反馈的闭环控制 .....	175
9—8. 步进电动机闭环控制的实验结果 .....	177
9—9. 采用编码器反馈的闭环点-位控制器 .....	178
<b>十、采用电流检测的闭环控制 B.C.Kuo and A.Cassat</b>	
10—1. 引言 .....	183
10—2. 典型的电流波形及电流峰值检测器 .....	184
10—3. 电流检测的超前角 .....	186
10—4. 反应式步进电动机的动态方程 .....	188
10—5. 导通相电流波形的曲线 .....	190
10—6. 截止相电流波形的曲线 .....	193
10—7. 实际电流检测的设计依据 .....	194
10—8. 使用电流检测的闭环控制 .....	195
10—9. 步进电动机使用电流检测闭环运行的计算机模拟 .....	199
10—10. 具有电流检测装置的成套闭环点-位控制器 .....	202
附录 .....	204
<b>十一、步进电动机的转速控制 B.C.Kuo</b>	
11—1. 引言 .....	209
11—2. 固定单位时间延迟速率控制系统的介绍 .....	211
11—3. 可变单位时间延迟速率控制系统的介绍 .....	212
11—4. 固定单位转速控制器的性能 .....	213
<b>十二、步进电动机系统的计算机模拟 B.C.Kuo</b>	
12—1. 引言 .....	219
12—2. 步进电动机模拟的通用程序 .....	219
12—3. 反应式步进电动机的数学模型 .....	221
12—4. 主程序 .....	224
12—5. FCTY 常规子程序 .....	227
12—6. 永磁步进电动机的计算机模拟 .....	236
<b>十三、步进电动机打印机系统的设计和实例研究 B.C.Kuo and G.Singh</b>	
13—1. 引言 .....	239
13—2. 用于高速冲击式打印机系统由步进电动机驱动的打印头 .....	239

13—3. 步进电动机驱动字盘系统的设计 .....	252
<b>十四、五相永磁步进电动机 G.Heine</b>	
14—1. 引言 .....	254
14—2. 五相混合式步进电动机的结构和工作原理 .....	254
14—3. “稳定数”与电动机的极限转矩 .....	259
14—4. 标准驱动 .....	262
14—5. 派生的步距角 .....	272
14—6. 与一台“纯粹”的两相电动机进行测试比较 .....	275
14—7. 结论要点 .....	284
<b>十五、步进电动机的微处理机控制 S.H.Pollack</b>	
15—1. 引言 .....	286
15—2. 步进电动机同微处理机的接口 .....	286
15—3. 开环控制 .....	288
15—4. 闭环控制 .....	296
15—5. 步进电动机先进的闭环控制方法 .....	310
15—6. 结论要点 .....	324
关于步进电动机及其控制系统的专利编目表 .....	326
关于步进电动机及其控制系统的文献目录 .....	351

# 一、步进电动机导论

B. C. Kuo

## 1—1. 引 言

步进电动机是一种增量运动的电磁执行元件，这种元件能将数字脉冲输入转换成模拟输出运动。步进电动机是当按一定程序输入直流电压和电流加以激磁时，即转换为旋转或直线增量运动的一种装置。当采用适当的控制时，步进电动机的输出步数总是和输入指令的脉冲数相等。每个脉冲使转轴进位一个步距增量，并依靠磁性将转轴准确地锁定在所进位的步距位置上。

步进电动机实际上并不是一种新器件，这种器件至少已存在四十年了。不过，绝大多数早期的步进电动机性能都很差而且效率也很低。事实证明，与通常的交直流电动机相比较，步进电动机原本是一种低效率的电磁能量转换器件。但是，近年来数字计算机、特别是微型计算机方面的发展使步进电动机的控制发生了革命。今天人们可以看到步进电动机已经应用到许多工业控制系统中了。相当大部分的步进电动机正应用在大多数类型电子计算机的外围设备中，例如打印机、纸（磁）带输送机构、卡片阅读机、主动轮驱动机构和存储器存取机构等。步进电动机也在数字控制系统、工具机控制、程序控制系统以及许多航天工业的系统中得到应用。

大多数步进电动机可以正反转步进运行，与其输入脉冲率直至由驱动器和电动机共同确定的最大响应频率时均能相一致。在增量运动控制方面，步进电动机可以用作具有迅速地加速、减速和停机能力的起停运动控制器。步进电动机以具有低转子惯量、无漂移和无累积定位误差为其特征。

因为步进电动机能够跟踪具有一定重复频率的脉冲链，所以可以当作具有同步转速范围宽广的同步电动机使用。事实上，有一种永磁步进电动机就是由于对低速交流同步电动机的需要而被创造出来的（见1—8节）。

本章将讨论步进电动机的典型用途和应用举例。还将讨论步进电动机的优缺点，并介绍各类步进电动机及其工作原理。

## 1—2. 步进电动机的应用

步进电动机基本上可作下列类型的器件应用：

- 无刷直流电动机
- 同步电动机
- 数字驱动电动机
- 开环伺服电动机（无需反馈）
- 增量运动电动机

变频和变速电动机

数模转换器

脉冲计数器（积分器）

下面列举现代步进电动机的一些具有代表性的典型用途：

印刷工业的自动排字

银行终端

钟表

绕线机

包线机

照相制版机

X Y 绘图仪

X Y 缩微胶片存取机构

数控喷漆设备

用于太阳能吸收板的太阳跟踪控制

增量磁（纸）带记录仪

纸带记录仪

数控机床的驱动机构

医疗设备（自动控制的显微镜）

核反应堆控制器（燃料棒的控制）

包装机器

农业机械

照相和光学设备

串行和行式打印机

穿孔纸带阅读机和打孔机

随机存取盘式存储器

遥控指示器

机器人——翻译机

金属薄板冲床

纺织机械

飞机控制系统

当然，上面所列决非包罗无遗，而步进电动机新的用途人们每天都有所发现。

下面介绍几种典型的步进电动机应用实例。

### 1. 用作驱动进给纸机构的步进电动机

步进电动机的最简单用途之一就是用作字符处理机或打印机纸的进给机构。在这种情况下，打印机较典型的是以每英寸6行或8行的增量进给送过卷筒。步进电动机可以直接与卷筒连结或通过皮带或齿轮系与卷筒连结。为此，通常选用 $15^\circ$ 步距角的步进电动机。例如每英寸分辨率为6行时，电动机每步相当于打印纸运行0.16666英寸，因而所需卷筒直径为1.27324英寸。电动机一般由来自终端处理机的一串脉冲指令以开环方

式驱动。有时受到一连串脉冲可使打印纸一次就向前送进好几个增量。

## 2. 打印轮的控制

字符处理机或终端打印机的打印轮要求点-位式控制，以便在进行硬拷贝打印时可将打印轮上的打印字符选在打印锤的前方位置上。图 1—1 中示出的是一种号称菊花轮打印元件的打印轮。典型的打印元件有96个字符位置，以便在正常工作时可控制打印轮从任一位置转向另一位置。现代打印机的典型打印速度约为每秒45个字符，现在人们还在设计更高速度的打印机。所以，这种运动的控制要求是打印机字符取数时间应为毫秒数量级。如采用双向运动控制，则打印轮的最大幅角为180°。步进电动机就成为这种用途的很好的选择对象了。在此情况下，一台具有每转96步分辨率的步进电动机便可直接与打印轮相连接。图 1—2 示出了打印轮控制系统的基本部件。

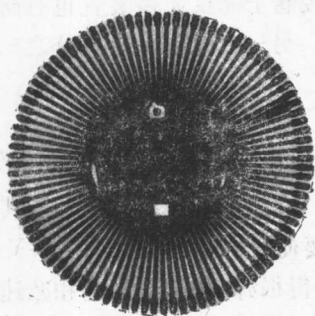


图 1—1 菊花轮打印元件

## 3. 软盘驱动系统

软盘存储装置是一种经济而又有效的计算机记忆存储方法。典型的软盘每面有77个磁道，磁道中心距间隔0.0208英寸。软盘装置的读写磁头通常是由一台与螺杆直接连结的步进电动机驱动的，如图 1—3 所示。具有每转24步分辨率或15°步距角的步进电动机因为和0.5英寸螺杆完全匹配，而获得每步0.0208英寸的直线运动，所以最适合于这一用途。磁道间的典型取数时间为10毫秒。



图 1—2 打印轮控制系统的基本组成部分

## 4. 照相排字系统

印刷工业已发展到排字通过计算机控制和照相方法来实现的阶段。因为排字要求同步的增量运动控制，所以许多照相排字机有好几台步进电动机来实现各种控制功能。

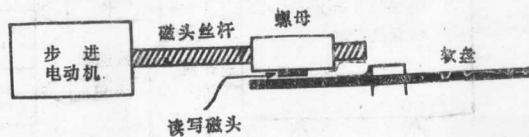


图 1—3 由步进电动机驱动的软盘存储装置

图 1—4 示出由麦琴塞勒 (Mergenthaler) 条行排铸机公司制造的 V-I-P 排字机的主要机械装置。步进电动机驱动着装有字体根的圆鼓，如图 1—4 所示。在此情况下，鼓上可容纳由胶卷读出的六个字体根。只要打开或锁住安装销，滑动胶卷就会很容易地调换字体根。鼓内装有一氙闪光管和聚光透镜，当闪光管触发时，透镜照亮字体根。鼓底漆成黑色，且有一个复位槽。复位槽是由使圆鼓定位在一个参考位置上的复位光电池和小灯进行监测的。字体根底部有一排明暗条障（“光栅”），由阅读光电池和光源监测。每根暗条障的边缘与一排字体的右侧方位对齐。当步进驱动圆鼓时，阅读光电池和条障组合在一起用来产生一道同步闪光。当字体根光轴和透镜系统光轴对齐时就

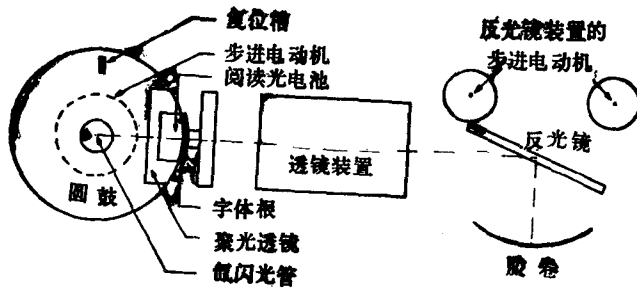


图 1-4 V-I-P 排字机的主要机械装置

会出现这种闪光。

除去驱动圆鼓的步进电动机外，将字体图象反射到胶卷上的反光镜装置也有两台步进电动机。一台电动机以每步四分之一方位驱动反光镜，另一台以每步十八分之一方位驱动反光镜。

### 5. HP9872A XY 绘图仪[1,2]

从传统的观点来说，在 X-Y 记录仪中直流伺服系统由于本身所固有的工作平稳性，在控制记录笔运动时已经达到了极高的质量。然而，直流电动机也同样具有其本身所固有的局限性，即在维持适当的闭环稳定度的同时，既要使死区小又要保持 X-Y 轴的动态响应匹配是不容易的。除非 X-Y 轴的动态响应匹配得很好，否则在加速和减速的暂态期间记录笔的运动将会偏离所要求的曲线。当绘制具有很大或很小斜率的直线时，过大的死区会使慢轴起动滞后于快轴。死区还会降低终点精度。较高闭环增益可以解决这两个问题，但又会降低稳定性极限。所以采用直流电动机的伺服系统不可避免地在性能

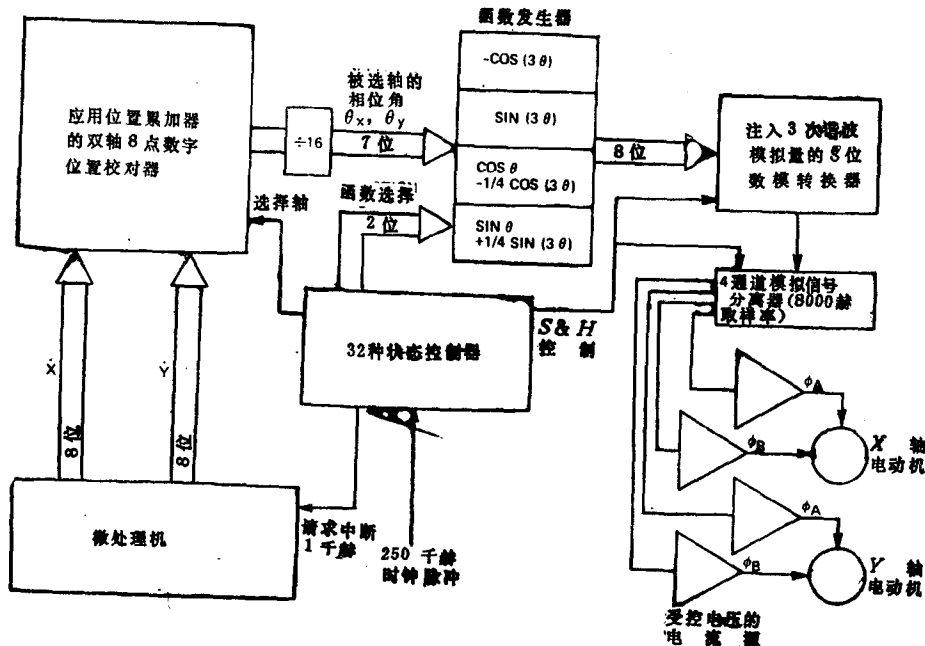


图 1-5 HP 9872A 步进电动机驱动系统的框图

和稳定性之间会趋向于折衷。

休利特——派卡 (Hewlett Packard) 公司制造的 HP 9872 A 数字绘图仪使用了两台步进电动机控制 X 和 Y 轴。因为步进电动机可用开环方式驱动而无需反馈, 在控制稳定的经典意义上来说是根本不存在稳定问题的。已采用微步距控制[3—7] (用电子方法划分步距增量) 和粘滞惯性阻尼器 (见第八章) 解决了在这种情况下的共振和振荡问题。图 1—5 是说明 HP 9872 A 步进电动机驱动系统的框图。

### 1—3. 步进电动机的优缺点[8,9]

步进电动机有下列优点:

可以开环方式驱动而无需反馈; 无稳定问题。

无累积定位误差。

能响应数字输入讯号, 所以步进电动机适合于数字计算机控制。

机械结构简单; 很少或无需维护。

不易受污染。

必要时容易装散热器。

可重复地堵转而不会损坏。

相当坚固耐用。

步进电动机的缺点列举如下:

运动增量或步距角是固定的; 在步进分辨率方面缺乏灵活性。

采用普通驱动器时效率低。

在单步响应中有相当高的过冲量和振荡。

承受大惯性负载的能力有限。

开环控制时摩擦负载增加了定位误差, 尽管误差是非积累的。

采用的控制线路种类繁多。

可供使用的电机尺寸和输出功率是有限的。

### 1—4. 步进电动机的类型[8,9]

步进电动机的种类很多, 通常可分成下列六种类型:

1. 螺管线圈棘轮式。
2. 反应式 (VR)。
3. 永磁式 (PM)。
4. 混合式 (同步感应子式)。
5. 机电式
6. 电液式

在市场上, 上述类型的步进电动机中有些比其他类型更为普及, 而不同类型电动机的工作原理亦稍有差别。



## 1—5. 步进电动机的工作特性

在开始讨论各种步进电动机以前，让我们首先介绍步进电动机的典型工作特性和术语。因为这些特性和术语是大多数步进电动机所共有的。

普通电动机的名词术语不能用来描述步进电动机。下面介绍用于增量运动控制系统中所必不可少的步进电动机特性专门术语。

**分辨率** 步进电动机的分辨率是用每转步数、步距角或步距增量度数来表示的，直线电动机则用英寸或毫米表示。对于大多数电动机来说，分辨率是一种不可改变的、固有的特性。

步进电动机的分辨率可用各种电子控制方法加以改变。先接通电动机一相，再接通两相，随后又接通一相，依次类推，或根据电动机的相数采用其他转换相绕组的组合方式，就可使步距角减半。

当一相通电时，控制其他相电流的相对值也可以改变步距角。

**单步响应** 一定时间内电动机一相通电，电动机就处于某一锁定位置。当这一相断电而下一相通电时，电动机就会向前运动一步。这种转子对时间的响应定义为单步响应。单步响应是步进电动机的一个重要特性，以此表明所作步进运动的快慢、响应的振荡如何（阻尼性质）以及步距角精度。当一相绕组通过额定电流时，大多数步进电动机呈现轻微振荡的单步响应，因此通常需采用阻尼方法（第八章），以减少或消除振荡。

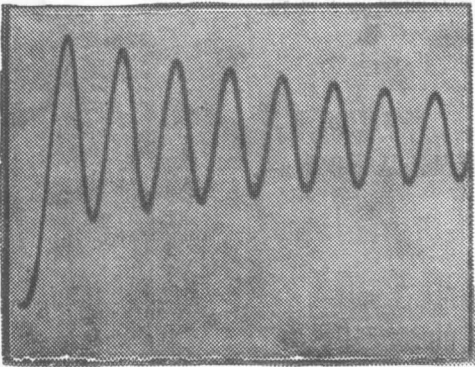


图 1—6 步进电动机的典型单步响应曲线

图 1—6 表示一个典型的单步响应。

**精度** 步进电动机的步进位置是在设计和加工时引入的许多零件和装置的尺寸所决定的。这些尺寸的公差导致了步进位置偏离其正确标称位置的误差。这就称为步进电动机的精度，表示为任意位置的最大角误差，标称步距角的百分值或度数。例如，在一台每转 24 步（ $15^\circ$  步距角）的步进电动机中，与最大误差  $0.25^\circ$  相对应的步距角精度为  $\pm 1.67\%$ 。商用步进电动机的精度范围从  $\pm 5\%$  到最低  $\pm 1\%$ 。

步进电动机的固有位置误差可以在各种负载条件下出现，但是并非累积性的。具有摩擦转矩或力的负载也会产生额外的非重复性位置误差，尽管这两种误差都要加到系统中去，这种因摩擦负载引起的多少带有随机性质的位置误差却与步进电动机的精度无关。

**静（保持）转矩** 静转矩是步进电动机最基本的转矩特性。静转矩曲线表示保持或恢复转矩对转子角位移的关系。这个转矩的作用方向是使转子返回或保持在零转矩位置或定位点上。图 1—7 所示，是一条典型的步进电动机一相通电时的静转矩曲线。