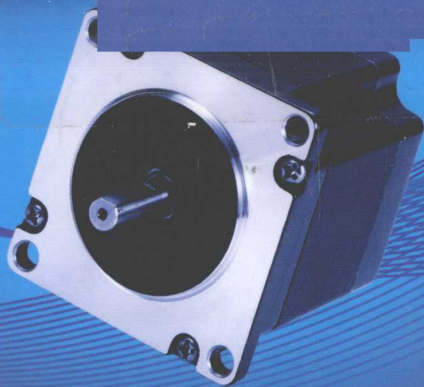


电动机控制电路应用技术丛书

步进电机应用技术

〔日〕坂本正文 著

王自强 译



电动机控制电路应用技术丛书

步进电机应用技术

〔日〕坂本正文 著
王自强 译

科学出版社

北京

图字：01-2009-4410 号

内 容 简 介

本书是关于步进电机使用方法的入门书。书中以图、表和曲线说明为主，公式描述为辅，详细介绍步进电机相数、转子齿数、主极数和转速之间的关系，以及三相 HB 型步进电机、三相 PM 型步进电机、步进电机的选择方法和使用方法等，并针对步进电机的一些常见问题及故障提出了解决措施。

本书可供步进电机维护人员、步进电机设计研发和测试人员，工科院校机械、电机、电子等相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

步进电机应用技术/(日)坂本正文著;王自强译.—北京:科学出版社,2010
(电动机控制电路应用技术丛书)

ISBN 978-7-03-027211-9

I. 步… II. ①坂…②王… III. 步进电机-基本知识 IV. TM35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 065109 号

责任编辑：杨 凯 / 责任制作：董立颖 魏 谨

责任印制：赵德静 / 封面设计：郝晓燕

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京天利彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 5 月第 一 版 开本：A5(890×1240)

2010 年 5 月第一次印刷 印张：5 1/2

印数：1—5 000 字数：157 000

定 价：22.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

序

本书是关于步进电机使用方法的入门书。书中以图、表和曲线说明为主,公式描述为辅,适合于步进电机的应用人员、大学电气专业的学生、步进电机或同类电机的生产厂的设计研发和测试人员使用。

本书详细介绍了步进电机相数、转子齿数、主极数和转速之间的关系,以及三相 HB 型步进电机、三相 PM 型步进电机、步进电机的选择方法和使用方法等。

要想电机正常运转,步进电机与驱动电路之间的连接是否正确是关键。如连接不当,电机会产生振动和噪音,容易出现失步现象。本书针对这些问题提出了一些解决措施。

作者自 1965 年进入日本伺服(股份)公司以来,一直亲自动手开发、设计步进电机,先后开发了单相步进电机、两相爪极 PM 型步进电机、三相 VR 型步进电机、两相 HB 型步进电机、三相 HB 型、PM 型和三相爪极 PM 型步进电机等产品。这些电机均得到实际应用。

作者曾经调研过全球的主要电机客户,并协助他们完善了步进电机的应用方案。同时,针对各种使用不当的情况,积累了丰富的解决经验,并且对电机的很多特性进行了改善。

作者刚进入公司工作时,公司只能生产特殊用途的步进电机,几乎没有客户愿意使用,所以步进电机每年生产量极少,直到 1975 年需求才急剧增加。增加的原因是因为计算机终端机的外围设备、查询机器等办公设备上开始大量使用步进电机。主要是因为步进电机较适用于断续工作形式,同时因为步进电机驱动电路的元器件——晶体管或 IC 芯片等半导体技术的进步,降低了生产成本,使步进电机整体价格下降。

特别是在 1977 年,美国生产的软盘驱动器的磁头(输送筒驱动)开始使用步进电机,使小型步进电机的生产量急剧扩大。根据调查机构 2002 年度的统计,小型电机的世界总生产量超过 40 亿个,其中 10% 为步进电机。与作者开始研发时 1965 年的产品数量相比,简直不可思议。

由于积累了一些步进电机设计开发的实践经验,希望将这些资料整理成书。当日本 OHM 社提出出版时,没有考虑自己的能力就痛快地接受了。

本书的完成得到了许多人的帮助:电机理论部分得到了茨城大学户恒明教授的指导,以及作者所属的日本伺服(股份)公司的崛江升社长、大西和夫技术顾问和其他同仁的很多帮助,他们提供了大量的资料;公司外的企业也提供了大量的参考资料;出版时,OHM 社出版部的各位工作人员也提供了很多帮助。借此对以上各位表示感谢。

本书提供了各种型号的步进电机和驱动电路,有关这些工业品所有权关系,本书不负任何责任。

目 录

第 1 章 什么是步进电机

- 1.1 步进电机的发展史 1
- 1.2 步进电机概要 2

第 2 章 步进电机的分类、结构、原理

- 2.1 定子相数的分类、结构、原理 9
- 2.2 转子的分类与结构 18
- 2.3 电机按相分类及其结构 36
- 2.4 HB 型步进电机的转子齿数与主极数之间的关系 37
- 2.5 RM 型步进电机 43
- 2.6 直线步进电机 45
- 2.7 外转子电机 47
- 2.8 轴向气隙电机 49

第 3 章 步进电机的原理与特性

- 3.1 基础理论 51
- 3.2 基本特性 55

第 4 章 步进电机的技术要点

- 4.1 永久磁铁 61
- 4.2 磁性材料 67
- 4.3 绝缘材料与线圈 68
- 4.4 轴 承 69
- 4.5 减速器 71

第 5 章 步进电机的驱动与控制

5.1 恒电压驱动	73
5.2 恒电流驱动	74
5.3 单极驱动与双极驱动	76
5.4 激磁方式	80
5.5 细分步进驱动	82
5.6 闭环控制	90
5.7 加速控制、减速控制	94
5.8 附加制动的驱动方法	96
5.9 三相步进电机的驱动电路	97

第 6 章 步进电机的特性测量方法

6.1 静态特性	101
6.2 动态特性的测量法	105
6.3 步距角度精度的测量	107
6.4 暂态(阻尼)特性的测量	111
6.5 噪音和振动的测量	113

第 7 章 步进电机的选择方法

7.1 电机种类的选择	117
7.2 位置定位精度的选择	120
7.3 从转速方面来选择	124
7.4 由转速变化率来选择	126
7.5 依据使用环境来选择	127
7.6 选择电机的计算方法	128

第 8 章 步进电机的使用方法与问题解决方案

8.1 增加动态转矩的解决方法	133
8.2 降低振动噪音的解决方法	136
8.3 改善暂态特性的解决方法	142
8.4 位置定位精度的解决方法	145

第 9 章 步进电机的应用

9.1 应用于复印机	149
9.2 应用于传真机	150
9.3 应用于打字机	151
9.4 应用于 FDD	153
9.5 应用于监视摄影机	154
9.6 应用于照明装置	156
9.7 应用于自动机械	157
9.8 应用于游戏机	157
9.9 应用于医疗机械	158
参考文献	161

第 1 章 什么是步进电机

本章叙述步进电机的诞生、发展和变迁,概要讲解什么是步进电机。

1.1 步进电机的发展史

电机为工业发展不可缺少的一大要素,并扮演着重要的角色。电机的应用不仅在动力应用方面不断扩大,而且在控制领域的使用范围也在不断扩大。随着控制电机重要性的增加,控制电机的使用量也逐年增加。步进电机是一种控制电机,不使用反馈回路,就能进行速度控制及定位控制,即所谓的电机开环控制。其应用主要以处理办公业务能力很强的 OA(Office Automation,办公自动化)机器和 FA(Factory Automation,工厂自动化)机器为核心,并广泛应用于医疗器械、计量仪器、汽车、游戏机等。就数量来讲,OA 机器方面的应用约占步进电机使用总数的 75%。

虽然步进电机最近被大量应用,但其原理早已有之。步进电机与电磁铁和柱塞泵同一时期开发,法国人佛罗曼提出了将电磁铁的吸引力转化为旋转力矩的方法。当时,激磁相的切换用机械式凸轮的接触点来完成,这就是步进电机的原型。现在还有旋转线圈式的应用方法。1920 年步进电机的实际应用才开始,称为 VR(Variable Reluctance,变磁阻)型步进电机,被英国海军用作定位控制和远程遥控^[1]。

混合式 HB(Hybrid 的缩写,是 VR 与 PM 复合的意思)型步进电机的产生,大约在 1952 年,由美国 GE 公司的 Karl Feiertag 开发的发电机演变而来。与现在的两相 HB 型步进电机结构相同,取得了 US 专利^[2]。当初作为低速同步电机使用,其后,由美国的 Superior Electric 公司和 Sigma Instruments 公司开发出两相 1.8° 步距角的 HB 型步进电机。当时因为电流小、电感大、恒电压驱动的关系,换相脉冲只有 300pps(现在为 10~20kpps)。

另一方面,从驱动电路方面看,步进电机的发展与晶体管半导体元件的发展密不可分。1950 年研制出二极管半导体,1964 年开发出 MOS 半导体,1965 年出现 IC,1967 年 LSI 实用化。特别是经过 1950~1965 年

间半导体材料的高速发展,进入 20 世纪 70 年代,由于价格便宜,可靠性高的逻辑数字电路得到广泛应用,使步进电机的使用量急剧增加。

日本东京大学的大岛氏^[3],在 1958 年的自动控制年会上发表了有关 VR 型步进电机的论文。步进电机的国际性学会在 1970 年成立,在美国伊利诺大学召开了第一次 IMCSD(Incremental Motion Control Systems and Devices)大会。此次大会由伊利诺大学的 BC Kuo 教授主办,美国的 Warner Electric 公司与 Westool 公司协办。发表的论文约 2/3 来源于企业界,剩下的 1/3 来源于大学方面。作者在第 26 届与第 29 届的 IMCSD 也发表了有关步进电机的论文^[4]。在 IMCSD 发表的论文中,有很多是关于步进电机的,从中能了解步进电机的最前沿技术和研究动态。美国的学者和企业技术人员对步进电机进行了广泛的研究。

步进电机的大规模应用是在 1977 年,两相步进电机(图 1.1)被应用于 FDD(floppy disk drive 软盘驱动器)输出轴的驱动上。

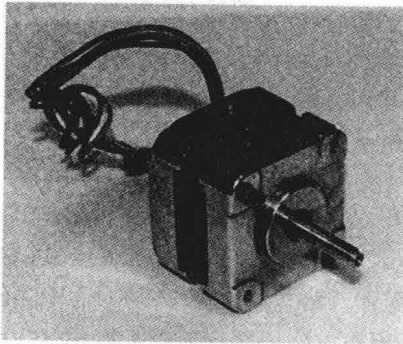


图 1.1 两相 HB 型 3.6°、42mm 的步进电机

1.2 步进电机概要

1. 步进电机的地位

电机有各种分类方式,如用电压种类分类时,有 AC 驱动与 DC 驱动;用旋转速度与电源频率关系分类时,则有同步电机和异步电机。

图 1.2 是步进电机在小型电机系列中的位置关系。

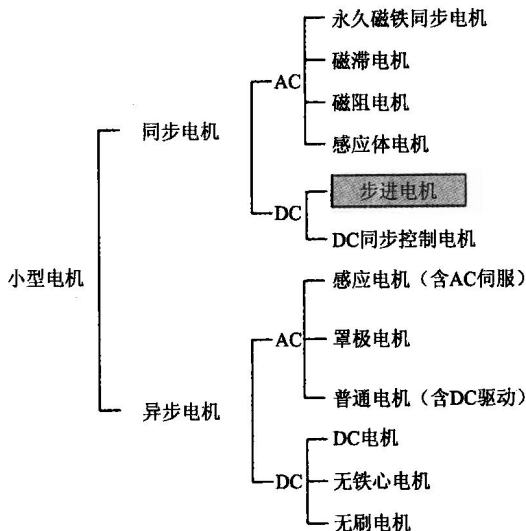


图 1.2 小型电机系列中步进电机的位置

由图 1.2 可知,步进电机属于 DC 驱动的同步电机,但无法直接用 DC 或 AC 电源来驱动,需要配备驱动器才能使用。所以步进电机的运行需要驱动电路。此点与无刷 DC 电机相同,无刷 DC 电机要使用驱动电路,驱动电路将电机定子与 DC 电源连接在一起工作。

2. 步进电机驱动电路的功能

步进电机驱动电路的任务,是按顺序指令切换 DC 电源的电流流入步进电机的各相线圈。图 1.3 为三相 VR 型步进电机的绕组外加电源示意图,其中驱动电路用开关来表示。

图 1.3 中开关 S_1 为 ON 时,第 1 相的绕组导通,如切换第 2 相绕组电流的指令, S_1 将打开变为 OFF 状态, S_2 变成 ON 状态。如此,电机转子就旋转一个固定角度,此只由定子极数与转子齿数的关系来决定的旋转角度,即为电机转动固有的步距角。同样, S_3 顺序打开为 ON 状态, S_2 转为 OFF 状态,电机转子又转过一个步距角。依次进行,电路每切换一次,电机就以固有的角度转动一步。

若切换 n 次,转子就旋转步距角的 n 倍角度;如果没有发出指令,转子则停止转动。电机以步距角为一步,此旋转角度的大小由电机结构来决定,如果将负载连接在电机轴上,就可以对负载进行旋转角度的位置控

制；改变开关切换速度（即脉冲频率）就可改变旋转速度，故改变速度，就是要改变图 1.3 的开关 S_1 、 S_2 、 S_3 的切换频率，即开关 S_1 、 S_2 、 S_3 的切换频率与转子转速成正比。

开关的切换频率向来是由驱动电路的指令脉冲频率来决定的。此种脉冲频率以 pps(pulse per second) 为单位。pps 为每秒脉冲数。图 1.4 为步进电机与驱动电路的功能框图。

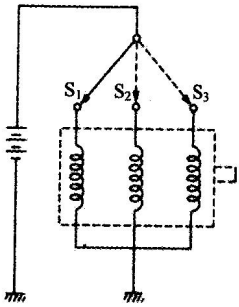


图 1.3 步进电机驱动电路原理图

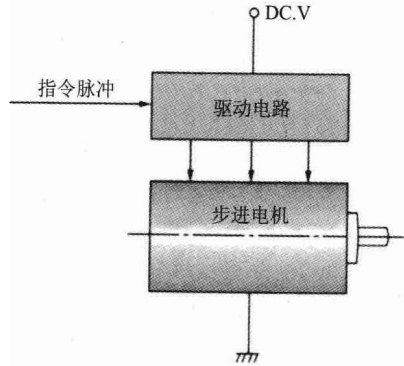


图 1.4 步进电机与驱动电路的功能框图

3. 步进电机的位置控制与速度控制

步进电机的位置控制与速度控制可根据上节的原理按如下操作进行：

- (1) 步进电机的位置控制依指令脉冲的总数而定。
- (2) 步进电机的速度与指令频率的 pps 成正比。
- (3) 由指令脉冲可以进行位置和速度控制，不需反馈电路即开环控制。

DC 电机或无刷电机要作位置控制和速度控制时，转子的位置或速度的信号必须反馈给控制器，即要加反馈传感器，图 1.5 所示的闭环控制系统才可以实现。相对的，图 1.6 所示的开环控制不必特别在转子上加装位置或速度传感器电路，因此，包含驱动电路的步进电机的整体费用一般比较便宜。

4. 步进电机开环控制的原理

当步进电机的定子一相绕组流过直流电流时，最接近该相的转子齿被定子相吸引，因产生的电磁转矩大于负载转矩，从而使转子运动。当转

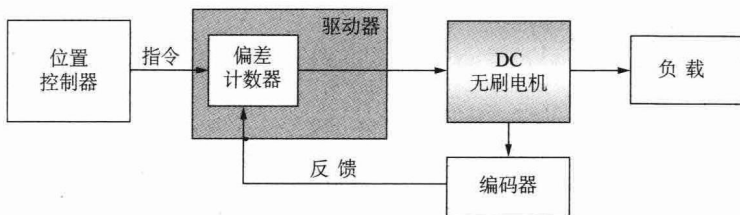


图 1.5 闭环控制

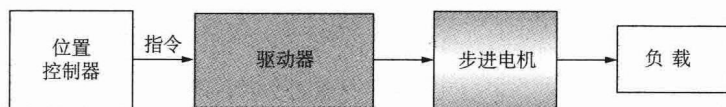


图 1.6 开环控制

子转动到电磁转矩与负载转矩平衡位置时,转子就静止不动了,此电磁转矩也就把负载转至需要定位的位置。然后再对下一相施加激磁电流,另外一个最接近该相的转子齿被吸引,负载被该相电磁转矩驱动,移动1个步距角,到达下一个静止位置。激磁相切换的次数与频率决定了转子旋转的最终角度与速度。步进电机的步距角由定子的相数与转子的齿数决定,详细内容将在下一章说明。切换相的次数与步距角的乘积为步进(专有名词为步动作增加的角度)角度,此值决定最终静止位置。相对负载转矩来说,如步进电机产生的转矩足够大,则切换指令就能驱动负载,作位置控制。此时的位置平衡力是由步进电机静态转矩产生的。

图 1.7 表示两相 PM 型步进电机的各相矩角特性曲线的情况。当 \bar{A} 相绕组激磁时,要使带负载的转子产生位移,负载应在转子与 \bar{A} 相的作用力范围内。 \bar{A} 相激磁绕组通电时的定子与转子的位置关系如图 1.7 上部所示。激磁相 \bar{A} 的矩角特性用实曲线表示;其他相绕组激磁时,产生的矩角特性曲线用虚线表示。

在轻载或空载时,静态转矩由所在位置决定,故 \bar{A} 相转矩沿曲线箭头方向移动到其与横轴的交点 c_1 点;实际上,转子停在转矩曲线上负载平衡点。

依次,B 相如果激磁,则转子停在 b_1 点, $b_1 - c_1$ 的角度差为步距角。

变速控制可使用开环控制(OPEN LOOP)方式,改变速度只需要改变切换频率的指令,相当于变频同步电机的功能。

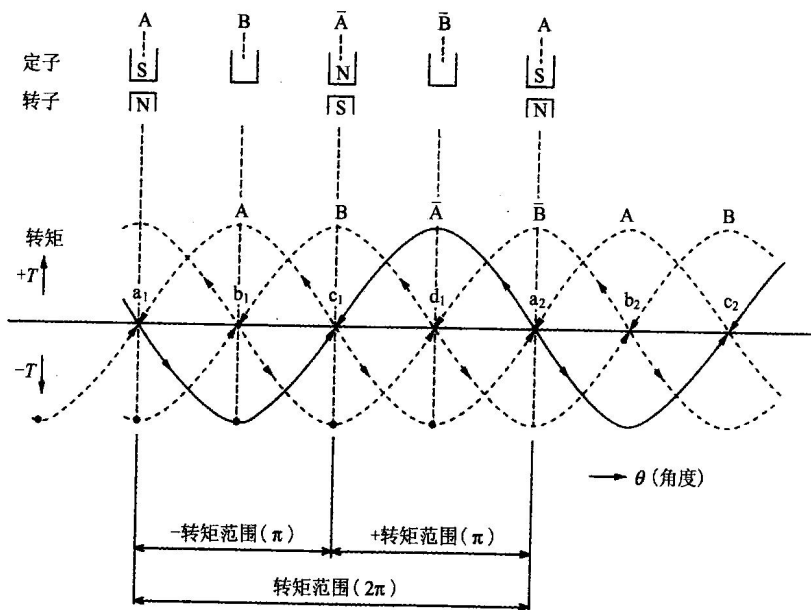


图 1.7 步进电机各电角度的静态转矩

5. 步进电机驱动器的基本结构

步进电机驱动器的基本电路结构如图 1.8 所示。步进电机直接连接交流或直流电源时不会运动，必须与驱动电路同时使用才能发挥其功能。驱动器(驱动电路)由决定换向顺序的控制电路(或称为逻辑电路)与控制电机输出功率的换相电路(或称为功率电路(power stage))组成，其详细内容将在后面章节介绍。

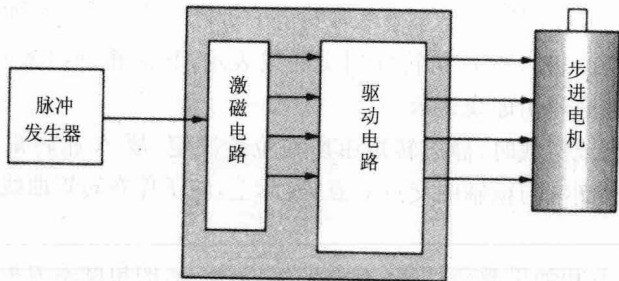


图 1.8 步进电机的电路结构

图 1.9、图 1.10 为三相 VR 型、两相 HB 型步进电机恒电压驱动器的早期产品外观。

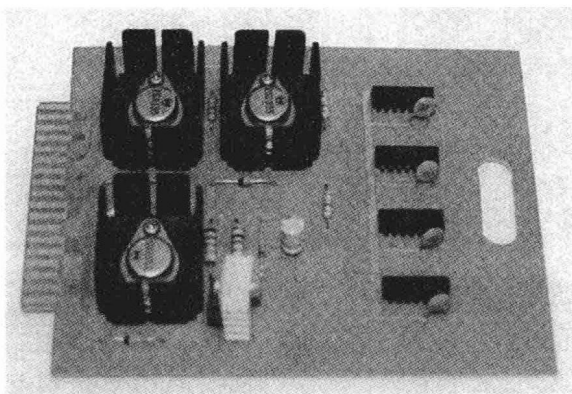


图 1.9 三相 VR 型早期使用的驱动器

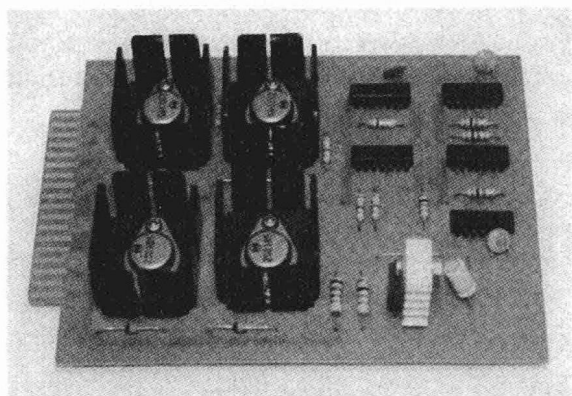


图 1.10 两相 HB 型早期使用的驱动器

脉冲发生器产生指令脉冲。当步进电机要按一定速度运行时,只要产生一定频率的连续脉冲,就可以决定步进电机的总旋转角度、停止位置、加速、匀速、减速等的变速过程。由于该脉冲发生器可以控制脉冲频率,故又称为控制器。

20 世纪 70 年代,步进电机也称为脉冲电机,此种称呼是由于电机的输入指令是脉冲信号或电机绕组电流为脉冲电流。步进电机的称呼源于

转子的输出动作,即转子一步一步旋转运动的关系。脉冲电机与步进电机的概念如图 1.11 所示。

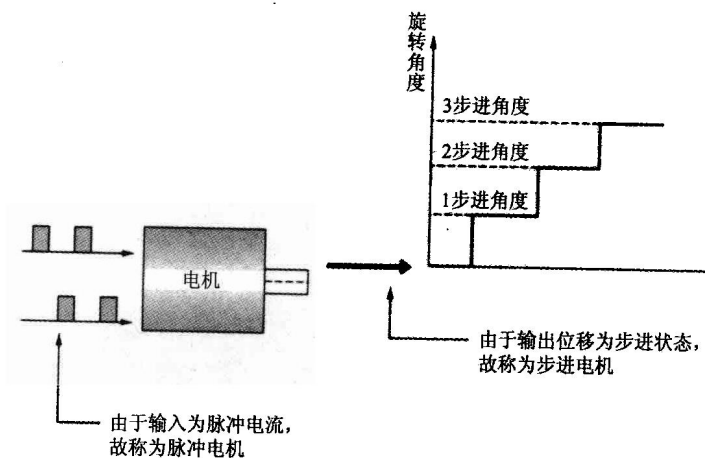


图 1.11 脉冲电机与步进电机

第 2 章 步进电机的分类、结构、原理

本章介绍步进电机的运行原理、结构和种类等,并且介绍这些步进电机的特点和优缺点。

2.1 定子相数的分类、结构、原理

当步进电机切换一次定子绕组的激磁电流时,转子就旋转一个固定角度即步距角。步距角一般由切换的相电流产生的旋转力矩得到,所以需要每相极数是偶数。步进电机通常都为两相以上的,当然也有一些特殊的只有一个线圈的单相步进电机。虽说单相,实为一个线圈产生的磁通方向交互反转而驱动转子转动。实用的步进电机的相数有单相、两相、三相、四相、五相。

现在使用的步进电机大部分用永磁转子。普遍使用永久磁铁的原因是效率高,分辨率高等优点。以下以介绍永磁转子为主。

1. 决定步距角的因素

步进电机分辨率(一圈的步数, 360° 除以步距角)越高,位置精度越高。为了得到高分辨率,设计的极数要多。PM型转子为N与S极在转子的铁心外表面上交互等节距放置,转子极数为N极与S极数之和,为简化讲解,假设极对数为1。此处确定转子为永久磁铁的步进电机的步距角 θ_s 由式(2.1)表示,其中 N_r 为转子极对数, P 为定子相数,(本章后面叙述的HB型步进电机 N_r 为转子齿数):

$$\theta_s = 180^\circ / PN_r \quad (2.1)$$

式(2.1)的物理意义如下:

转子旋转一周的机械角度为 360° ,如用极数 $2N_r$ 去除,相当于一个极所占的机械角度即 $180^\circ / N_r$ 。这就是说,一个极的机械角度用定子相数去分割就得到步距角,此概念如图2.1所示。

由式(2.1)可知,步距角越小,分辨率越高,因此要提高步进电机的分辨率,就要增加转子极对数 N_r 或采用定子相数 P 较多的多相式方法。而