

目录

1 绪论	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究的目的地意义.....	1
1.3 国内外的研究现状.....	1
2 步进电机及其工作原理	2
2.1 步进电机的结构特点.....	2
2.2 步进电机的基本工作原理.....	3
2.3 步进电机的控制特点.....	5
2.3.1 转矩矢量分析.....	5
2.3.2 绕组通电方式.....	6
2.3.3 步距角的控制.....	6
2.4 步进电机的运行特性.....	7
2.4.1 静态运行特性.....	7
2.4.2 步进运行特性.....	8
2.4.3 连续脉冲运行特性.....	10
3 步进电机驱动系统.....	10
3.1 步进电机驱动系统简介.....	10
3.2 步进电机驱动器的特点.....	11
3.3 步进电机相绕组的电气特性.....	11
3.4 混合式步进电机的驱动电路分类和性能比较.....	13

3.4.1 单电压驱动方式	13
3.4.2 高低压驱动方式	13
3.4.3 斩波恒流驱动	14
3.4.4 调频调压驱动	15
3.5 混合式步进电机的细分驱动.....	15
3.5.1 细分驱动原理	15
3.5.2 细分驱动的特点.....	16
3.5.3 恒转矩等步距角细分.....	16
3.6 正弦脉宽调制技术原理及其控制方式.....	19
3.6.1 脉宽调制技术(PWM)的基本原理	19
3.6.2 三相 SPWM 电路构成和工作原理.....	20
3.6.3 SPWM 的调制方式	22
3.6.4 电流追踪型 PWM 控制	23
4 系统架构与硬件电路的实现	26
4.1 整体硬件结构	26
4.2 系统硬件电路设计	27
4.2.1 单片机控制电路	27
4.2.2 电平转换与第三相正弦波合成电路.....	29
4.2.3 电流反馈和比例积分电路	31
4.2.4 脉宽调制电路	32
4.2.5 IR2130 电路	34
4.2.6 开关电源电路	37
4.2.7 步进电机显示和键处理电路	40
4.2.8 光耦电路.....	41

4.2.9 IR2130 死区时间控制	42
5 系统软件设计	43
5.1 系统软件总体结构.....	43
5.2 步进电机控制主程序设计.....	43
5.3 步进电机细分驱动程序设计	44
5.4 步进电机显示和键处理程序设计	45
6 结论与展望	47
参考文献	48
致谢	49

—

步进电机 SPWM 细分驱动设计

一、 题目来源

社会、生产实践。

二、 研究目的和意义

步进电机是一种将电脉冲信号转换为角位移或直线运动的执行机构，由步进电机及其功率驱动装置构成一个开环的定位运动系统。当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度(即步距角)。脉冲输入越多，电机转子转过的角度就越多，同时，输入脉冲的频率越高，电机的转速就越快。因此可以通过控制脉冲个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的，同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度，从而达到调速的目的。由于步进电机的这些优点，步进电机已经广泛的应用在数控机床、医疗、军事、自动化生产线等领域。步进电机种类，根据自身的结构不同，可分为常用三大类:反应式(VR)、永磁式(PM)、混合式(HB)。步进电机在低速运行时的振动和噪声大，在步进电机的自然振荡频率附近运行时易产生共振，输出转矩随着步进电机的转速升高而下降，这些缺点制约了步进电机的应用范围。为了适应一些领域中高精度定位和运行平稳性的要求，出现了步进电机细分驱动技术。

所谓细分驱动就是把机械步距角细分成若干个更小的步距角，当转子从一个位置转到另一个位置的时候，会出现一些“暂态停留点”，这样使得电机启动时的过调量或者停止时的过调量就会减小，电机轴的振动也会减小，使电机转子旋转过程变得更加平滑、细腻，从而减小了噪声。步进电机内合成磁场的幅值及两相邻合成磁场的夹角决定了步进电机旋转力矩的大小及步距角的大小，通过对步进电机励磁绕组中电流加以控制，使步进电机内部的合成磁场形成幅值不变、均匀的圆形旋转磁场，便可实现步进电机恒力矩及恒步距角均匀细分控制。

SPWM细分技术是目前较为常用的方式。SPWM技术是把正弦波划分成N等分，可看成宽度相等、幅值不等的N个脉冲，再把这个序列脉冲用N个幅值相等、宽度按正弦规律变化的脉冲代替。应用SPWM细分技术，可以有效解决步进电机存在的缺陷，实现高精度定位和运行平稳性的要求。

三、 阅读的主要参考文献及资料名称

- [1] 聂汉平, 廖冬初. 电力电子技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 86~102
- [2] 刘玫, 孙雨萍. 电机与拖动北京[M]: 机械工业出版社, 2009: 323~328
- [3] 陈国呈. 新型电力电子变换技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004
- [4] 吴守斌. 电气传动的脉宽调制控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002
- [5] 华成英. 模拟电子技术基本教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 296~298
- [6] 徐爱钧. 单片机原理实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011
- [7] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002

四、 国内外现状和发展趋势与研究的主攻方向

步进电机的驱动系统是步进电机不可分割的一部分, 步进电机所能实现的功能在很大程度上取决于它的驱动系统的。步进电机的驱动系统可分为控制器和驱动器两部分, 控制器可以通过用户的控制指令实现对步进电机的控制, 而驱动器就是根据控制器的信号来使步进电机运动。

步进电机细分驱动技术是一种能在很大程度上改变步进电机整体性能的技术, 它在 20 世纪 70 年代中期迅速发展起来。在 1975 年举办的美国增量运动控制系统及器件的年会上, 一位美国学者第一次提出了步进电机的细分控制方法。在那以后的三十年里, 这种细分驱动技术有了很大的发展, 并且得到了充分的应用。通过实践证明, 步进电机细分驱动技术能使步进电机在小于步距角很多的情况下工作, 而且可以显著的改善步进电机的振动, 有效的提高步进电机的平稳性。目前, 国外对步进电机的控制和驱动都趋于采用专用芯片。典型的芯片有两类: 第一类芯片的核心是采用硬件和微小的程序来实现步进电机合理的加减速, 与此同时完成正反转。第二类芯片的关键是可以实现细分驱动。

我国步进电机驱动器的研究起步较早, 但发展较慢, 直到近些年才有了长足的进步。随着微处理器技术的发展, 国内开始在步进电机开环控制系统中采用单片机控制, 以求发展经济型机床控制系统。单片机控制的应用, 大大提升了控制部件的稳定性和可靠性, 并大幅度降低了成本, 但由于步进电机及其驱动器仍停留在较低的水平, 严重阻碍了系统的发展和实际应用。多年来, 科学家们尝试了多种控制方式, 力求改善步进电机系统的性能, 有如下常见控制方式: 单电压驱动、高低压启动、恒电流驱动、调频调压驱动、细分驱动。

通过国内外的的发展情况可以看出, 利用细分驱动和电流控制技术, 准确地控制步

进电机各相绕组上的电流，从而使步进电机控制系统的驱动性能有所提高，并且增强对控制性的要求，是当今步进电机驱动器发展的主要趋势。同时，模块化、集成化、低成本也是步进电机驱动系统发展的必然趋势。集成化、模块化可以有效的提高步进电机驱动系统的可靠性，减少电磁干扰，减小驱动器的体积，因此可以改善步进电机的运行性能，以至于进一步扩大步进电机的应用领域。

五、 主要研究内容、需重点研究的关键问题及解决思路

1. 主要研究内容

目标：

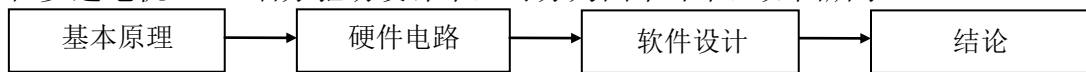
了解 SPWM 控制原理，了解 SPWM 细分控制步进电动机的意义；设计 SPWM 细分控制步进电动机系统电路；分析 SPWM 细分控制步进电动机的方法和性能。

技术指标：

- ① 控制对象：三相步进电机。
- ② 额定运行频率： $f=50\text{Hz}$ 。

2. 需重点研究的关键问题

在步进电机 SPWM 细分驱动设计中，可分为四个环节，如图所示：



步进电机 SPWM 细分驱动设计的四个环节

其中需要重点研究的关键问题是：硬件电路，软件设计。

3. 解决思路

- ① 基本原理：根据设计要求，查阅相关资料理解步进电机工作的基本原理，理解 SPWM 控制原理。
- ② 硬件电路：电路设计基本上可以划分为三部分：控制电路、驱动电路、步进电机。控制电路的作用主要是为了产生所需要的控制信号。控制信号主要由 SPWM 电路产生，该电路由正弦信号发生器、三角波振荡器和比较器等组成。驱动电路主回路采用交流-直流-交流电压型逆变电路形式。由整流滤波、三相逆变电路等构成。
- ③ 软件设计：本设计的控制软件内容主要完成单片机控制主程序，细分驱动程序、键处理程序、显示数据处理及显示驱动程序、通信监控程序等。其中除了主程序以外的其他部分都是子程序模块，可以对这些模块分别进行调试。

步进电机 SPWM 细分驱动设计

[摘要]:

本文先介绍了三相混合式步进电机的结构和工作原理,然后在步进电机细分驱动技术、PWM 逆变技术以及单片机研究的基础上,分析了细分驱动对于改善步进电机运行性能的作用,论述了正弦波细分驱动可以实现等步距角、等力矩均匀细分驱动的原理,提出了一种基于正弦电流细分和电流追踪型脉宽调制(PWM)的细分驱动技术,该方案中正弦电流细分技术基本上克服了传统步进电机低速振动大和噪音大的缺点,减小发生共振的机率。电流追踪型脉宽调制(PWM)技术使电机运行在较大速度范围内转矩保持恒定。该方案能避免其它相绕组的感应电压和绕组电流的漂移带来的误差,提高了细分精度。本文采用控制电路主要由 AT89C51 单片机、晶振电路、地址锁存器、译码器、EPROM 存储器及可编程键盘/显示控制器 Intel-8279 等组成,单片机是控制系统的核心。采用 IR2130 功率驱动芯片作为三相混合式步进电机的功率驱动器件。文中对整个系统的架构及硬件电路和驱动软件的实现都做了详细的介绍。

最后本文通过实验对这个系统的可靠性和步进精度进行了测试,实验结果表明该系统能够满足用户的定位精度要求,有效的抑制了运行噪声和机械振动。同时由于该系统实现了恒力矩细分驱动,从而提高了系统的可靠性,降低了成本,具有较强的实用性。

[关键词] 单片机 正弦脉宽调制 三相混合式步进电机 细分驱动

Stepper Motor Subdivision Drive Design Based On SPWM Technology

Student: Luo Xiaolong Electrical Engineering and Automation
Supervisor: Y u Shiqiu College of Electronic and Information

[Abstract]:

In this paper, the working principle and configuration of three-phase hybrid Stepper are introduced, then based on technologies such as stepper motor controller, PWM inverter and microcontroller. We analysis the using of micro-stepping drive technology to improve operational performance, discuss the principles of SPWM inverter for stepper motor with invariable torque micro-stepping driver, and propound sine wave current subdividing and current tracking PWM technology. Sine wave current subdividing technology not only overcomes the disadvantages of motor's vibration and noise at low speeds but also reduces probability of resonance. Current tracking PWM technology can maintain constant torque within wide speed range. It prevents the reactive voltage errors brought by other windings and the drift errors brought by current. It improves the precision of subdivision. In the thesis, we develop a single chip computer –based digital controlling system for a three-phase hybrid stepper motor that is mainly constructed from a AT89C51 single chip computer and 8279IC which is used as the core of control parts and a three full-bridge driver IR2130. The power stage of this driver uses IGBT IR2130 that provides high reliability Based on the approach, the system's whole architecture, the design of hardware and software are introduced in detail.

In finally, the reliability and stepper accuracy of this new control system are tested. The results show that the system can effectively satisfy the fixed position accuracy of customer request, represses movement noise and mechanical vibration. Meanwhile, the realization of the invariable torque micro-stepping technology of stepper motor can effectively reduce the cost to improve the system's reliability and relevance.

[Keywords] Microcontroller ,SPWM ,Three-phase Hybrid Step Motor ,Microstepping driver

步进电机 SPWM 细分驱动设计

1 绪论

1.1 前言

步进电动机又称脉冲电动机或阶跃电动机，其应用发展已有多年的历史。可以说步进电动机天生就是一种离散运动的装置，是纯粹的数字控制电动机。步进电机驱动器通过外加控制脉冲，控制步进电动机各相绕组的导通或截止，从而使电动机产生步进运动。就是说给一个电脉冲信号，电动机就转过一个角度或者前进一步，其输出转角、转速与输入脉冲的个数、频率有着严格的比例关系。基于步进电机的这些特点，步进电机被广泛运用于数控机床、医疗、军事、自动化生产线等领域。

但是步进电机在实际运用中也存在一些缺陷，比如在低速运行时振动、噪声大，在接近自然频率时存在共振，高速运行时输出转矩降低。所以如何有效解决这些问题，成为步进电机在实际运用推广中的技术难题，细分驱动技术应运而生，有效解决了这些难题。因而细分驱动技术的发展推动了步进电机在更多领域的运用。

1.2 研究的目的及意义

基于前言部分提出的步进电机在实际运用中存在的缺陷，本课题的研究目的之一就是设计一套硬件系统较简单、经济，但功能较为齐全，适应性强，操作方便，交互性强，可靠性高的步进电机控制系统。

此外，步进电机细分驱动设计还可以培养自己对已学过的专业基础理论知识与实践的综合应用能力；同时带着设计中碰到的各种新问题，学习 SPWM 技术、细分驱动的基本原理、步进电机工作的基本原理和特性，掌握软件设计的基本流程，将电力电子技术、单片机技术、电机的控制技术结合起来，培养学科间知识的交叉应用能力，也增强自己分析、解决问题的能力。

1.3 国内外的研究现状

步进电机细分驱动技术是一种能在很大程度上改变步进电机整体性能的技术，它是在 20 世纪 70 年代中期迅速发展起来的。在 1975 年，一位美国学者第一次提出了步进电机的细分控制方法。在那以后的三十年里，这种细分驱动技术有了很大的发展，并且得到了充分的应用^[1]。

目前，国外对步进电机的控制和驱动都趋于采用专用芯片。典型的芯片有两类：第一类芯片的核心是采用硬件和微小的程序来实现步进电机合理的加减速，与此同时完成正反转。第二类芯片的关键是可以实现细分驱动。我国步进电机驱动器的研究起步较早，但发展较慢，直到近些年才有了长足的进步。多年来，科学家们尝试了多种控制方式，力求改善步进电机系统的性能，有如下常见控制方式：单电压驱动、高低压启动、恒电流驱动、调频调压驱动、细分驱动。

通过国内外的情况可以看出，利用细分驱动和电流控制技术，准确地控制步进电机各相绕组上的电流，从而使步进电机控制系统的驱动性能有所提高，并且增强对控制性的要求，是当今步进电机驱动器发展的主要趋势。

2 步进电机及其工作原理

2.1 步进电机的结构特点

图 1 为三相混合步进电机轴向剖面图。主要由定子、转子和机壳构成。定子结构包括定子磁极，绕组线圈和绝缘材料组成。定子上有多个磁极，每个磁极上绕有励磁线圈，磁极末端有均匀的小齿。相对两个磁极的励磁绕组串联在一起构成一相控制绕组，通电时，这两个磁极的极性是相同的。按相数的多少分为不同结构的步进电机，常见的是 2 相、3 相和 5 相步进电机。转子由环形永磁体及两段铁心组成，环形永磁体在转子的中部，轴向充磁，使转子一端极化为南磁极，另一端极化为北磁极。两段铁心分别装在永磁体的两端，转子铁心上有小齿，两段铁心上的小齿相互错开半个齿距。通常三相步进电机的转子有 50 齿，两段铁心上的小齿相互错开半个齿距，即错开 3.6° ，定转子小齿的齿距通常相同。

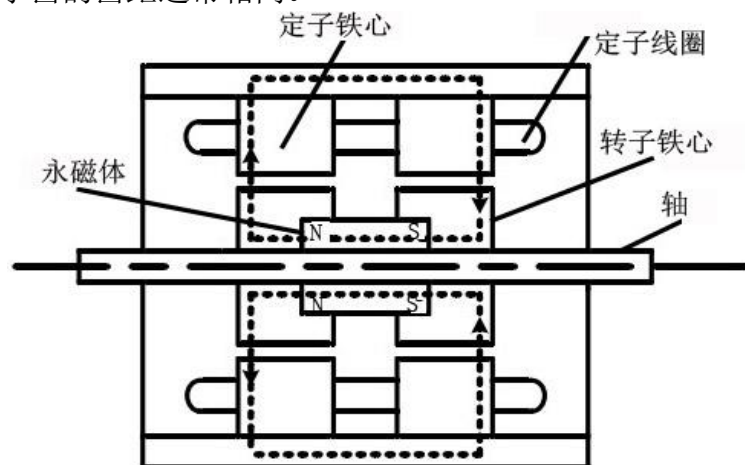


图 1 三相混合式步进电机轴向剖面图

2.2 步进电机的基本工作原理

图 2 为三相混合步进电机的简化模型，定子为三相六级，三绕组分别绕在相对的两个磁极上，绕组通电时这两个磁极的极性是相同的，它的每段转子铁心上有八个小齿。从电机的某一端看，当定子的一个磁极与转子齿的轴线重合时，相邻磁极与转子齿的轴线就错开 $1/3$ 齿距。如图 2(a) 中所示 a 段转子铁心的情况，A 相磁极下定转子齿的轴线重合时，B, C 相磁极分别与转子齿错开 $\pm 1/3$ 齿距。A', B', C' 极下的情况分别与 A, B, C 极下的情况相同。

假如转子上没有磁体，只是在定子的控制绕组里通电，这个电机不产生转矩。由于转子磁体的作用，使 a 段转子铁心呈 N 极性，b 段转子铁心呈 S 极性。当 A 相通电时，转子处于图中所示的位置，此时与 a 段转子铁心相对的定子 A 相极下气隙磁导为最大，与 b 段转子铁心相对的定子 A 相极下气隙磁导为最小。当转子转动时，a 段转子铁心对应的 A 相极下气隙磁导减小，b 段转子铁心对应的 A 相极下气隙磁导增大，使得 A 相主磁路上的总磁导基本不变，其它相通电时也一样，所以没有转矩。

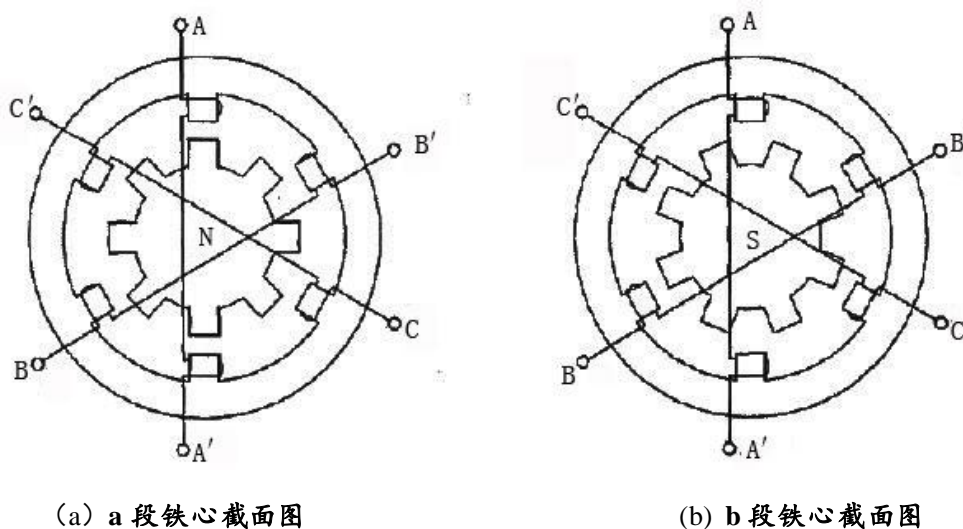


图 2 三相混合式步进电机截面示意图^[2]

三相混合式步进电机的转子磁体充磁以后，一端为 N 极，并使得与之相邻的转子铁心的整个圆周都呈 N 极性；另一端为 S 极，并使得与之相邻的转子铁心的整个圆周都呈 S 极性。如果定子绕组不通电，仅仅有转子磁体的作用，电机也基本上不产生转矩。永磁磁路是轴向的，从转子 a 端到定子的 a 端，轴向到定子的 b 端、转子的 b 端，经磁体闭合。在这个磁路上每个极的范围内，由于两段转子的齿错开了 $1/2$ 齿

距，当一端磁导增大时，另一端磁导必然减小，在忽略高次谐波时，使每个极的总磁导在转子位置不同时基本保持不变，因而整个磁路的总磁导与转子位置无关。只有在转子磁体与定子磁场相互作用下，才产生电磁转矩。例如转子磁体充磁，且定子 A 相通电的情况下，转子就有一定的稳定平衡位置，即 A 相 a 段极下定转子齿对齿的位置。当外加力矩使转子偏离稳定平衡位置时，例如转子逆向转了一个小的角度 $\Delta\theta$ ，则两段定转子齿的相对位置及作用转矩的方向，如图 3 (a)，(b)所示。由于沿圆周方向电机结构的对称性，图中只画出了通电相一个极下的情况。可以看到，两段转子铁心所受到的电磁转矩是同方向的，都是使转子回到稳定平衡位置的方向。这是由于在电机两端，定子极性相同，转子极性相反，但互相错开了半个齿距，所以当转子偏离稳定平衡位置时，两端作用转矩的方向是一致的。同时可以清楚地看到，混合式步进电机的稳定平衡位置是：定转子异极性的极下磁导最大、而同极性的极下磁导最小。

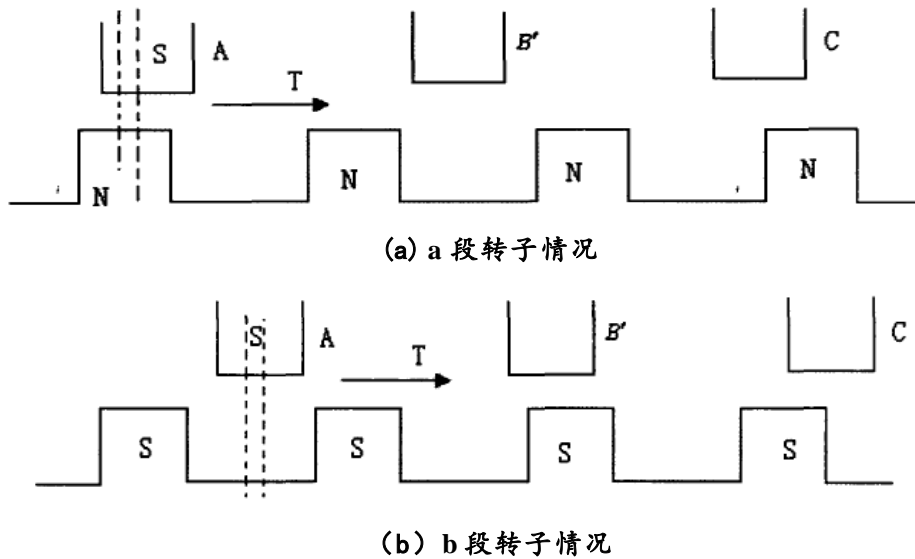


图 3 转子转过 $\Delta\theta$ 时，两端转子齿的相对位置

上述电机任意二个相邻定子磁极轴线间的夹角为 $360^\circ/6 = 60^\circ$ ，每一个转子齿距所对应的空间角度为 $360^\circ/8 = 45^\circ$ 。

当一相绕组通电，例如 A 相绕组正向通电，B、C 二相绕组不通电时，电机内建立以 AA' 为轴线的磁场。这时 A 相磁极呈 S 极性，而转子铁心 a 段呈 N 极性，b 段呈 S 极性，由于转子的稳定平衡位置是使定转子异极性的极下磁导最大，同极性的极下磁导最小的位置，故转子处于图 2 所示的位置：A 相磁极与 a 段转子齿轴线重合，与 b 段转子齿错开 $1/2$ 齿距。A、B 相磁极轴线间所包含的转子齿距数为 $60^\circ/45^\circ = 1 + 1/3$ ，

则 B 相磁极沿 AB'C 方向分别与 a, b 段转子齿相差 1/3、-1/6 齿距, 而 C 相磁极沿 AB'C 方向分别超前 a, b 段转子齿 2/3、+1/6 齿距。

在 A 相断电的同时, 给 B 相反向通电, 则建立以 BB'为轴线的磁场。此时 B 相磁极呈 N 极性, 转子沿 CB'A 方向转过 1/6 齿距, 达到 B 相磁极与 b 段转子齿轴线重合、与 a 段转子齿错开 1/2 齿距的位置。此时 C 相磁极沿 CB'A 方向分别超前 a, b 段转子齿 1/6、-1/3 齿距; A 相磁极沿 CB'A 方向分别超前 a, b 段转子齿 -1/6、1/3 齿距。

相似地, 在 B 相断电的同时, 给 C 相正向通电, 则建立磁场的轴线为 C C'方向, 转子又沿 CB'A 方向转过了 1/6 齿距, 达到 C 相磁极与 a 段转子齿轴线重合、与 b 段转子齿错开 1/2 齿距的位置。可见, 在连续不断的按 $A \rightarrow \bar{B} \rightarrow C \rightarrow \bar{A} \rightarrow B \rightarrow \bar{C} \rightarrow A$ 的顺序分别给各相绕组通电时, 每改变通电状态一次, 转子沿 CB'A 方向转过 1/6 齿距, 即 7.5°空间角; 循环一次, 转子沿 CB'A 方向转过一个齿距, 即 45°空间角。同理, 如果按 $A \rightarrow \bar{C} \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow C \rightarrow \bar{B} \rightarrow A$ 的顺序轮流通电, 转子沿 AB'C 方向以较慢的速度断续转动。也就是说, 改变通电的顺序, 就可以改变电机的转向^[3]。

2.3 步进电机的控制特点

2.3.1 转矩矢量分析

图 4 是三相混合式步进电机各相绕组单独通电和多相绕组同时通电时合成转矩矢量图^[4]。

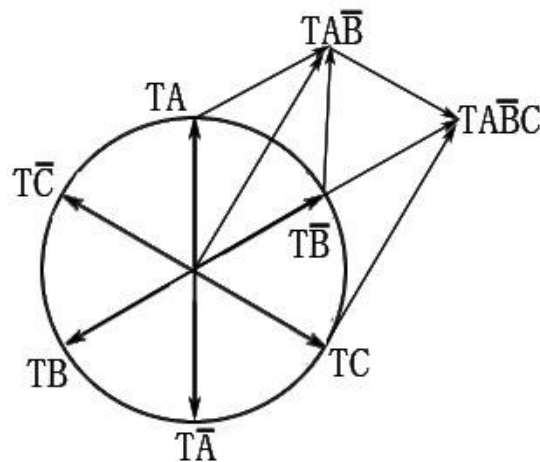


图 4 三相混合式步进电机转矩矢量图

其中, T_A 、 T_B 、 T_C 分别是 A、B、C 绕组分别通正向电流时的转矩, 这 3 个转矩矢量之间相互差 120°电角度; \bar{T}_A 、 \bar{T}_B 、 \bar{T}_C 已分别是 A, B, C 绕组通反向电流时的转矩。这 6 个转矩矢量之间相互差 60°电角度。

当 A 绕组中通以正向电流，B 绕组中通以反相电流时，用矢量相加的办法，合成转矩 $T_{A\bar{B}}$ 为单相通电时的 1.732 倍。若三相绕组同时通电，例如当 A, C 绕组中通正向电流，B 绕组中通反相电流时，合成转矩 $T_{A\bar{B}C}$ 为单相通电时的 2 倍。为了使三相混合式步进电机输出较大的转矩，宜采用多相通电的工作方式。

2.3.2 绕组通电方式

在步进电机中，定子绕组每改变一次通电方式，称为一拍，每一拍转子就转过一个步距角。每一个脉冲信号对应于绕组的通电状态改变一次，也就对应于转子转过一个步距角。对步进电机加一系列连续不断的脉冲时，它可以连续不断的转动，转子的平均转速正比于脉冲的频率，转子转过的角度等于步距角与脉冲数量的乘积。

如上所述，在 A, B, C 三相绕组内分别单独通电的运行方式，称为三相单六拍运行。“三相”是指三相步进电机，“单”是指同时只有一相绕组通电，“六拍”是表示六种通电状态为一个循环，即六次通电状态后电机内的磁场恢复到初始的状态，转子转过一个齿距，定转子齿的相对关系不变。

除了三相单六拍运行方式外，三相混合式步进电机还可以在不同的通电方式下运行，有 4 种基本逻辑通电方式^{[2][5]}：

- (1) 3 拍通电方式:有 2-2 相通电和 3-3 相通电两种运行方式。
- (2) 4 拍通电方式:有 2-3 相通电运行方式。
- (3) 6 拍通电方式:有 2-2 相通电和 3-3 相通电两种运行方式。
- (4) 12 拍通电方式:有 2-3 相通电运行方式。

2.3.3 步距角的控制^[6]

在不同的通电方式运行下，步进电机的步距角是不一样的，其大小为齿距角除以拍数，若用 N 表示运行拍数， Z_r 表示转子齿数，则每改变一次通电状态时转子转过角度称为步距角，用 θ_s 表示，则：

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{NZ_r} \quad (1)$$

从(1)式可以看出，拍数和转子齿数不同时，步距角不同，且步距角与拍数或转子齿数成反比。当三相混合式步进电机转子为 50 齿，若采用 3 拍通电工作方式时， $\theta_s=2.4^\circ$ ；采用 4 拍通电工作方式时， $\theta_s=1.8^\circ$ ；采用 6 拍通电工作方式时， $\theta_s=1.2^\circ$ ；采用 12 拍通电工作方式时， $\theta_s=0.6^\circ$ 。

2.4 步进电机的运行特性^[6]

2.4.1 静态运行特性

步进电机不改变通电情况的运行状态称为静态运行。电机定子齿与转子齿中心线之间的夹角 θ 叫做失调角，用电角度表示。步进电机静态运行时转子受到的转矩 T 称作静转矩，通常以使 θ 增加的方向为正。步进电机的静转矩 T 与失调角 θ 之间的关系 $T=f(\theta)$ 叫做矩角特性。当步进电机的控制绕组通电状态变化一个循环，转子正好转过一齿，故转子一个齿对应电角度为 2π 。在步进电机某一相控制绕组通电时，如果该相磁极下的定子齿与异极性的转子齿对齐，那么失调角 $\theta=0$ ，静转矩 $T=0$ ，如图 5 (a) 所示：如果定子齿与异极性转子齿未对齐，即 $0<\theta<\pi$ ，出现切向磁力，其作用是使转子齿与定子齿尽量对齐，即使失调角 θ 减小，故为负值，如图 5 (b) 所示。如果为空载，那么转矩作用的结果是使异极性转子齿与定子齿完全对齐；如果某相控制绕组通电时转子齿与定子齿刚好错开，即 $\theta = \pi$ ，转子齿左右两个方向所受的磁力相等，步进电机所产生的转矩为 0，如图 5 (c) 所示。

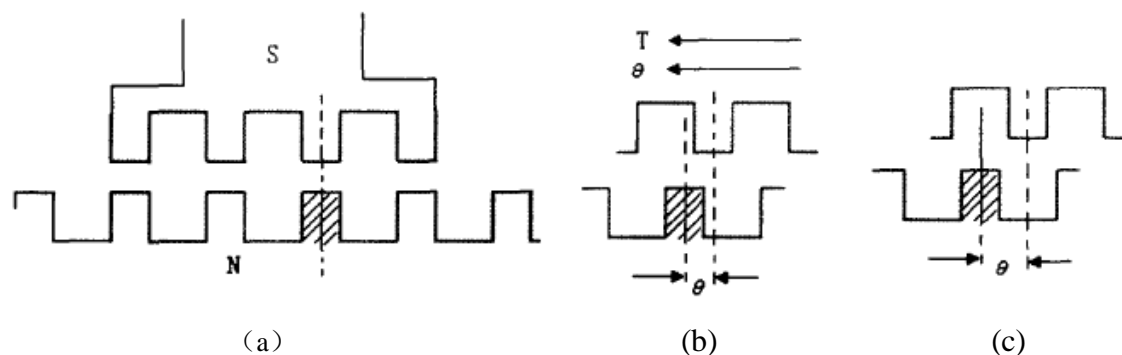


图 5 定子和转子齿的位置关系

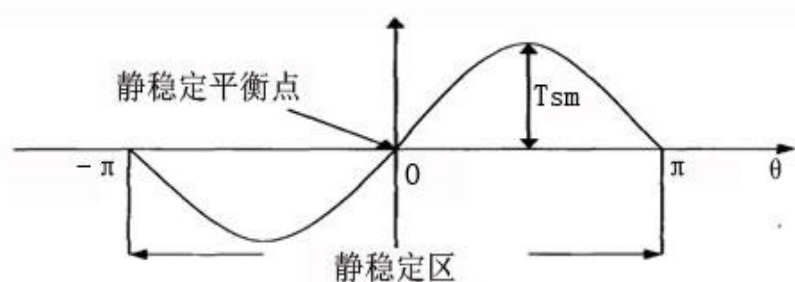


图 6 步进电机的矩角特性

步进电机的静转矩 T 随失调角 θ 呈周期性变化，变化的周期为转子的齿距，也就是 2π 电角度。混合式步进电机的静转矩 T 与失调角 θ 的关系近似为正弦曲线，称为矩角特性，如图 6 所示。

步进电机在静转矩的作用下，转子必然有一个稳定平衡位置。如果步进电机为空载，那么转子在失调角 $\theta=0$ 处稳定，即在通电相定子齿与异极性转子齿对齐的位置稳定。在静态运行情况下，如有外力使转子齿偏离定子齿 $0 < \theta < \pi$ ，则在外力消除后，转子在静转矩的作用下仍能回到原来的稳定平衡位置。当 $\theta = \pm\pi$ 时，转子齿左右两边所受的磁力相等而相互抵消，静转矩 $T=0$ ，但只要转子向左或向右稍有一点偏离，转子所受的左右两个方向的磁力不再相等而失去平衡，故 $\theta = \pm\pi$ 是不稳定平衡点。在两个不稳定平衡点之间的区域构成静稳定区，即 $-\pi < \theta < \pi$ ，如图 6 所示。矩角特性上静转矩的最大值 T_{sm} 称为最大静转矩。

2.4.2 步进运行特性

当脉冲频率较低，电机转子完成一步之后，下一个脉冲才到来，电机呈现出一转一停的状态，故称之为步进运行状态。当空载时步进电机的运行状态如图 7 所示，通电顺序为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 。

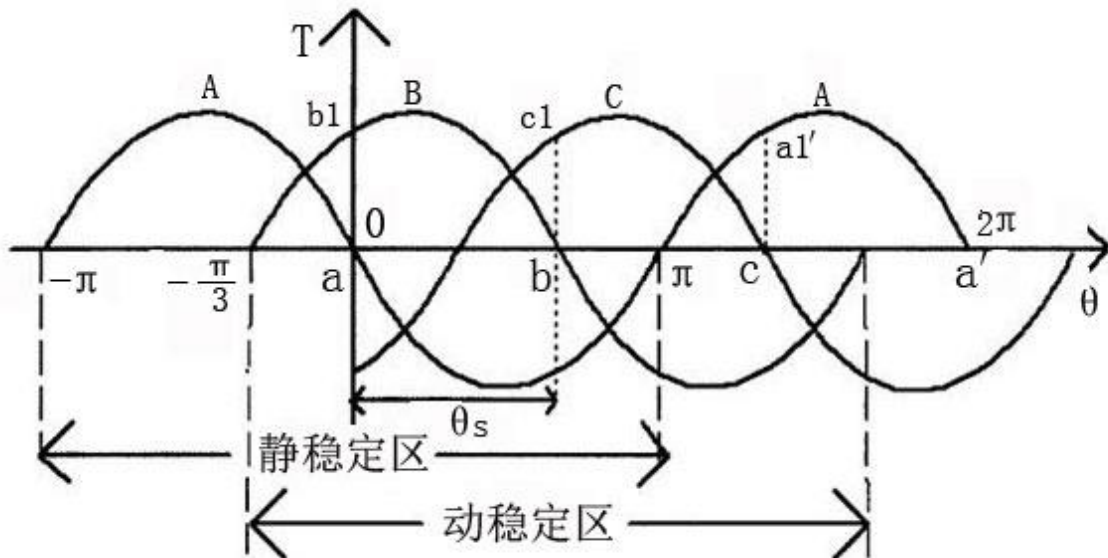


图 7 空载运行特性

当 A 相通电时，在静转矩的作用下转子稳定在 A 相的稳定平衡点 a，显然失调角 $\theta=0$ ，静转矩 $T=0$ 。当 A 相断电，B 相通电时，矩角特性转为曲线 B，曲线 B 落后曲线 A 一个步距角 $\theta_s = 2\pi / 3$ ，转子处在 B 相的静稳定区内，为矩角特性曲线 B 上的 b_1 点，此处 $T > 0$ ，转子继续转动，停在稳定平衡点 b 处，此处 T 又为 0。同理，当 C 相通电时，又由 b 转到 c_1 点，然后停在曲线 C 的稳定平衡点 c 处。接下来 A 相通电，又由 c 转到 a' 并停在 a' 处，一个循环过程即为 $a \rightarrow b_1 \rightarrow b \rightarrow c_1 \rightarrow a_1' \rightarrow a'$ 。A 相通电时，

$-\pi < \theta < \pi$ 为静稳定区，当 A 相绕组断电转到 B 相绕组通电时，新的稳定平衡点为 b，对应于它的静稳定区为 $-\pi + \theta_s < \theta < \pi + \theta_s$ ，在换相的瞬间，转子的位置只要停留在此区域内，就能趋向新的稳定平衡点，所以区域 $(-\pi + \theta_s, \pi + \theta_s)$ 称为动稳定区，显而易见，相数增加或拍数增加，步距角越小，动稳定区越接近静稳定区，即静、动稳定区重叠越多，步进电机的稳定性越好。

当步进电机带上负载运行时情况有所不同。带上负载 T_L 后，转子每走一步不再停留在稳定平衡点，而是停留在静转矩 T 等于负载转矩的点上，如图 8 中 a_1, b_1, c_1, a' 处， $T=T_L$ ，转子停止不动。具体分析如下：当 A 相通电，转子转到 a_1 时电机静转矩 T 等于负载转矩，两转矩平衡，转子停止转动，A 相断电 B 相通电，改变通电状态的瞬间，因为惯性转子位置来不及变化，于是转到曲线 B 上的 b_2 点，由于 b_2 点的静转矩 $T > T_L$ ，故转子继续转到 b_1 点，在 b_1 点 $T=T_L$ 转子停下来 C 相通电的运转情况类似，一个循环过程为 $a_1 \rightarrow b_2 \rightarrow b_1 \rightarrow c_2 \rightarrow c_1 \rightarrow a_2' \rightarrow a'$ 。

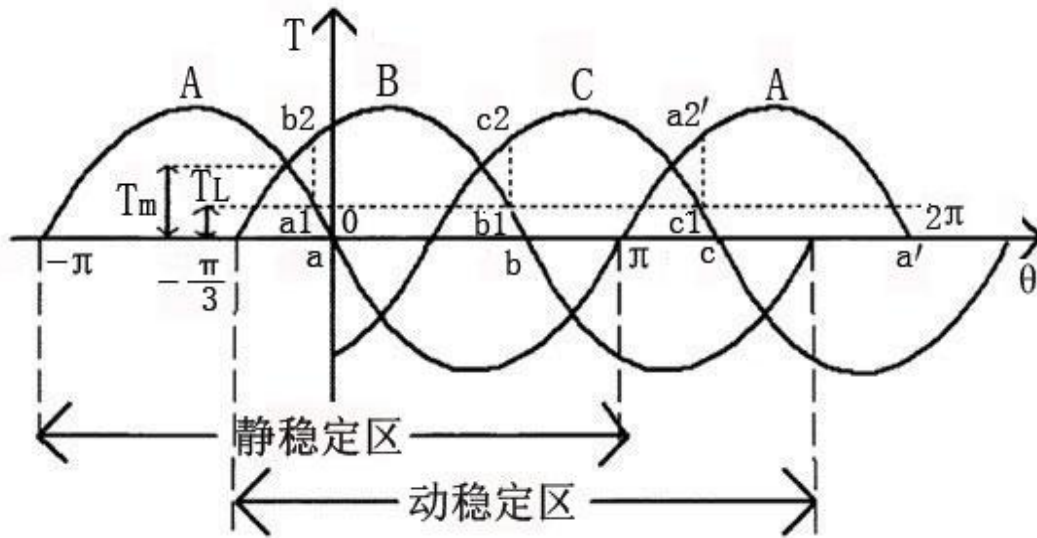


图 8 步进电机带负载运行

如果负载较大，转子未转到曲线 A, B 的交点就有 $T=T_L$ ，转子停转，当 A 相断电 B 相通电，转到曲线 B 后 $T < T_L$ ，电机不能作步进运动。显而易见，步进电机能够带负载作步进运行的最大值 T_m 即是两相矩角曲线交点处的电机静转矩。若增加相数或拍数，那么静动稳定区重叠增加，两相曲线交点升高，最大电机静转矩增加，步进运行能带动的负载越大。

2.4.3 连续脉冲运行特性

当脉冲频率较高时，电机转子未停止而下一个脉冲已经到来，步进电机已经不是一步一步的转动，而是呈连续运转状态。在改变各相通电状态的瞬间，只要失调角在动态稳定区内，转子就会不失步的继续向前转动。步进电机在带负载情况下启动时，不但要克服负载转矩，还要克服惯性转矩。如果输入的脉冲频率过高，在下一个脉冲到来时，失调角还未进入动态稳定区，电机就不能起步。启动频率与负载转矩的关系称为起动机频特性，又称牵入特性。当电机启动以后，惯性转矩的影响减少，电机就能以比起动频率高的脉冲频率连续运转。运行频率与负载转矩之间的关系称为运行矩频特性，又称牵出特性。步进电机相数越多或拍数越多，步距角越小，进入稳定区域越容易，启动频率就越高。

脉冲频率升高，电机转速增加，步进电机所能带动的负载转矩将减小。主要是因为频率升高时，脉冲间隔时间小，由于定子绕组电感有延缓电流变化的作用，控制绕组的电流来不及上升到稳态值。频率越高，电流上升所能到达的数值也就越小，因而电机的电磁转矩也越小。另外，随着频率的提高，步进电机运行中产生的反电势增加，使绕组电流减小，也使电机的输出转矩下降。总之，步进电机的输出转矩随着脉冲频率的升高而减小。

3 步进电机驱动系统

3.1 步进电机驱动系统简介

步进电机不能直接接到交直流电源上工作，而必须使用专用设备——步进电机驱动器。步进电机驱动系统的性能，除与电机本身的性能有关外，也在很大程度上取决于驱动器的优劣。典型的步进电机驱动系统是由步进电机控制器、步进电机驱动器和步进电机本体三部分组成。步进电机控制器发出步进脉冲和方向信号，每发一个脉冲，步进电机驱动器驱动步进电机转子旋转一个步距角，即步进一步。步进电机转速的高低、升速或降速、启动或停止都完全取决于脉冲的有无或频率的高低。控制器的方向信号决定步进电机的顺时针或逆时针旋转。通常，步进电机驱动器由逻辑控制电路、功率驱动电路、保护电路和电源组成。步进电机驱动器一旦接收到来自控制器的方向信号和步进脉冲，控制电路就按预先设定的电机通电方式产生步进电机各相励磁绕组导通或截止信号。控制电路输出的信号功率很低，不能提供步进电机所需的输出功率，必须进行功率放大，这就是步进电机驱动器的功率驱动部分。功率驱动电路向步进电

机控制绕组输入电流，使其励磁形成空间旋转磁场，驱动转子运动。保护电路在出现短路、过载、过热等故障时迅速停止驱动器和电机的运行。

3.2 步进电机驱动器的特点

步进电机的驱动特点主要体现在以下几个方面^[7]:

(1) 各相绕组都是开关工作。多数电机绕组都是连续的交流或直流供电，而步进电机各相绕组都是脉冲式供电，所以绕组电流不是连续的而是断续的。

(2) 步进电机各相绕组都是在铁心上的线圈，所以都有比较大的电感。绕组通电时，电流上升受到限制，因此影响电机绕组电流的大小。

(3) 绕组断电时，电感中磁场的储能将维持绕组中已有的电流不能突变，结果使应该电流截止的相不能立即截止。为使电流尽快衰减，必须设计适当的续流回路。绕组导通和截止过程都会产生较大的反电势，而截止时的反电势将对驱动器功率器件的安全产生十分有害的影响，使整个系统的使用受到影响。

(4) 电机运行时在各相绕组中将产生旋转电势，这些电势的方向和大小将对绕组电流产生很大的影响。由于旋转电势基本上与电机转速成正比，转速越高，电势越大，绕组电流越小，从而使电机输出转矩随着转速升高而下降。

(5) 电机绕组中有电感电势、互感电势、旋转电势。这些电势与外加电压共同作用于功率器件。当其叠加结果使电机绕组两端的电压大大超过电源电压时，使驱动器工作条件更为恶化。

(6) 混合式步进电机的绕组必须用双极性电源供电，也就是说，绕组有时需通正向电流，有时需通反向电流。

所以，根据以上的特点，步进电机的驱动器必须要保证步进电机绕组有足够的电压、电流和正确的波形，而且同时要保证驱动器功率放大器件安全运行，还应有较高的效率、较小的功耗、较低的成本，这就要求选用合适的功率器件，合理设计线路。

3.3 步进电机相绕组的电气特性

步进电机各相绕组都是在铁心上的铜线圈，电阻和电感是电机相绕组的两个固有属性，电机的性能和这两个因素密切相关。绕组通电时，电感使绕组电流上升速度受到限制，因此影响电机绕组电流的大小。绕组线圈的电阻是电机温升和电能损耗的主要因素。

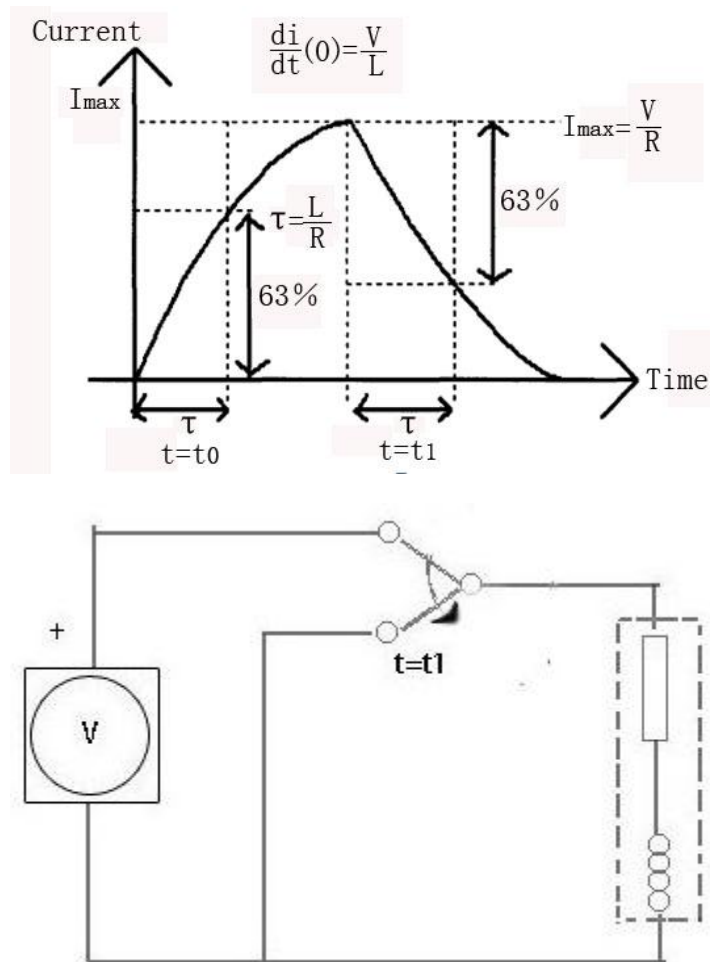


图 9 电感-电阻串联的电路电流波形

步进电机的相绕组可以等效为一个电感——电阻串联电路。图 9 表明了一个电感——电阻电路的电气特性。在 $t=0$ 时刻，电压 V 施加到该电路上时，电路中的电流变化规律为：

$$I(t) = \frac{V}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (2)$$

通电瞬间绕组电流上升速率为：

$$\frac{di}{dt}(0) = \frac{V}{L} \quad (3)$$

经过一段时间，电流达到最大值：

$$I_{\max} = \frac{V}{R} \quad (4)$$

$\tau=L/R$ 定义为该电路的时间常数， τ 是电路中的电流达到最大电流 I_{\max} 的 63%所需要的时间。在 $t=t_1$ ，时刻，电路断开与直流电压源 V 的连接，并且短路，电路中的电流以初始速率 $-V/L$ 开始下降，电流变化规律为：

$$I(t) = \frac{V}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} \quad (5)$$

要改善电机高速运行时的性能，有两种办法：提高电流上升速度 V/L 和减小时间常数 L/R ；可以通过加大绕组的电压从而增加电流上升的速率得时间常数，或者在电路中串联电阻，使 L/R 减少

3.4 混合式步进电机的驱动电路分类和性能比较

与反应式和永磁式相比，混合式步进电机运行特性具有很多优点，在国外已是步进电机系列的主流。混合式步进电机的驱动技术在发展的过程中出现过各种各样的驱动电路拓扑结构和驱动方式。根据驱动方式的不同又可分为单电压驱动、高低压驱动、斩波恒流驱动、调频调压驱动、电流细分驱动等^{[8][9]}。

3.4.1 单电压驱动方式

单电压驱动方式是指步进电机绕组上加上恒定的电压 V ，这种驱动方式的电路相当简单，流经绕组中的电流以时间常数 L/R (L 为绕组的电感， R 为绕组的电阻) 上升，直到达到额定电流 $I=V/R$ 。当电机高速运行时，流经绕组的电流还未上升到额定电流就被关断，相应的平均电流减少而导致输出转矩下降。为改善高速运行的电机转矩特性，通常在连接电机绕组的线路中串联一个无感电阻来减少电气时间常数，同时成比例的增加电源电压以保持额定电流不变（图 10）。单电压驱动电路的优点是电路结构简单、元件少、成本低、可靠性高。缺点是串入电阻将加大功耗，降低功放电路的功率，必须具备相应的散热条件才能保证电路稳定可靠的工作。所以这种电路一般仅适合于驱动小功率步进电机或对步进电机运行性能要求不高的情况。

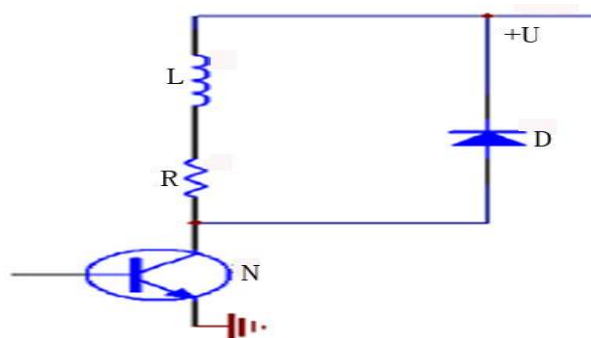


图 10 单电压驱动原理图

3.4.2 高低压驱动方式

高低压驱动的设计思想是不论电动机的工作频率如何，在导通相的前沿用高电压

供电来提高电流的前沿上升率，而在前沿过后用低电压来维持绕组的电流。

高低压驱动可保证在很宽的频段内绕组都有较大的平均电流，在截止时又能迅速释放，能够产生较大的且较稳定的电磁转矩。其优点是：功耗小，启动转矩大，高频性能较好。但是也存在着低频振荡加剧，波形呈凹形，驱动电源和大功率管数量加倍，成本上升的缺点。高低压驱动的原理线路如图 11 所示。

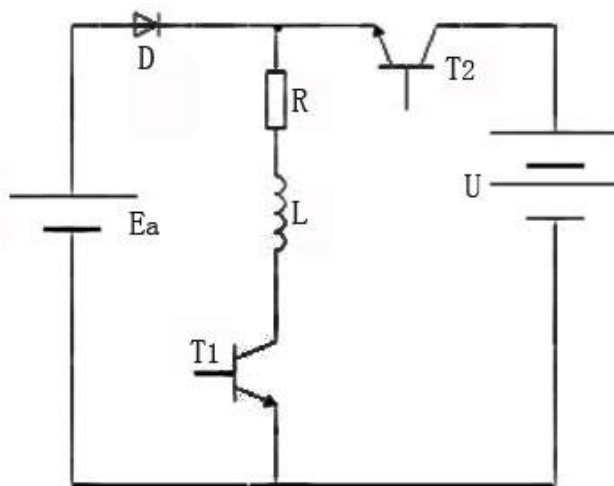


图 11 高低压驱动的原理图

3.4.3 斩波恒流驱动

恒流斩波驱动控制技术是目前步进电机控制的主流技术之一，其电路结构如图 12 所示。斩波驱动中，虽然电路较复杂，但是由于驱动电压较高，电机绕组回路又没有串入电阻，整个系统功耗下降很多，所以电流上升快。当达到所需要的电流时，由于取样电阻的反馈作用，使绕组电流基本恒定，从而保证在很大的频率范围内电动机的输出转矩基本恒定。而输出转矩是步进电机的一个重要性能指标，当我们使电机的绕组电流恒定在一个较高的数值时，就可提升电机的输出转矩。因此，为克服步进电机在高频时牵出转矩下降的问题，很多文献提出了一些新的恒流斩波驱动设计。但是，恒流斩波技术不能解决步进电机本身所固有的低频振动问题，无法克服步进电机因受步距角限制而不能实现多种步距角控制的缺陷。只有与单拍和双拍运行时相对应的两种步距角。

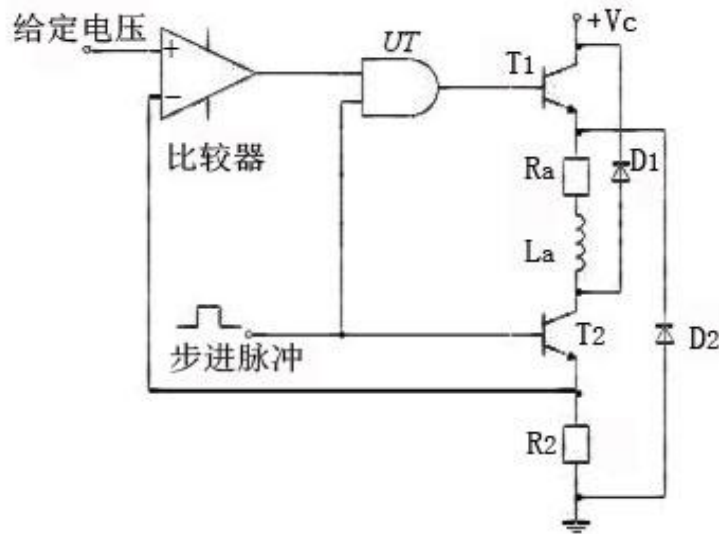


图 12 斩波恒流电路原理图

3.4.4 调频调压驱动

调频调压驱动基本思想是:随着步进电机运行频率的提高,同时提高功率放大电路的电源电压,以补偿因运行频率上升造成的输出转矩下降;当步进电机的运行频率降低时,同时降低功率放大电路电源电压。因电压随频率而变,故既可增加高频输出转矩,又能避免低频可能出现的振荡。从理论上讲,调频调压驱动基本克服了单电压驱动、高低压驱动、斩波恒流驱动等电路的不足,矩频特性较好,能够在较宽的频率范围内运行

3.5 混合式步进电机的细分驱动

3.5.1 细分驱动原理

细分驱动的基本思想是^[10]:各相绕组的通电状态改变时,不是将绕组电流全部通入或切除,而是只改变相应绕组电流的一部分,则电机的合成磁场的改变也只有原来的一部分,因为转子的平衡位置与电机中的合成磁场的方向保持同步,所以转子的每步运行也只有原先步距角的一部分。这样,绕组电流由常规的矩形波改为阶梯波,绕组中的电流经过 N 个台阶上升到额定值,或以同样的方式从额定值下降。电流分成多少个台阶,则转子就以同样的次数转过一个步距角,这种将原先的一个步距角细分成若干步的驱动方法,称为细分驱动。

3.5.2 细分驱动的特点

细分驱动不仅减小了步进电机的步距角，还带来了电机性能的全面提高^[11-14]

(1) 步进电机低速运行时的振动和噪音原因在于转子到达新的平衡位置时能量过剩。经过细分后，驱动电流的变化幅度大大减少，故转子到达平衡位置时的过剩能量也大为减少。假如电机的相电流为 3A，如果使用常规驱动器(如常用的斩波恒流方式)驱动电机，电机每运行一步，其绕组内的电流将从 0 突变为 3A 或由 3A 突变到 0，相电流的巨大变化，必然会引起电机运行的振动和噪音。如果使用细分驱动器，在 10 细分状态下驱动该电机，电机每走一步，其绕组内的电流变化只有 0.3 而不是 3A，这样就大大的减弱了电机的振动和噪音。

(2) 另一方面，步进信号的脉冲频率提高了 N 倍(N 细分时)，故电机运行时可尽量远离电机的自然振荡频率(80-200Hz)，这样就减小了低频共振的发生几率。

(3) 从第一章对步进电机的运行特性分析可以知道，步进电机运行拍数越多，步距角越小，进入动态稳定区越容易，起动频率就越高，电机的输出转矩也越大。

因此，运用细分驱动技术不仅可以减小步进电机的步距角，提高分辨率，更重要的是能使电机运行更加平稳均匀，而且还能减少低频振动与共振。总体来说，相对于其它的驱动方式，细分驱动的控制效果最好，这是步进电机驱动技术的重大进展之一。

3.5.3 恒转矩等步距角细分

步进电机的细分控制从本质上讲是通过对步进电机的定子绕组中电流的控制，使步进电机内部的合成磁场按某种要求变化，从而实现步进电机步距角的细分。最佳的细分方式是恒转矩等步距角的细分。一般情况下，合成磁场矢量的幅值决定了电机转矩的大小，相邻两合成磁场矢量之间的夹角大小决定了步距角的大小，转子平衡位置与合成磁场矢量方向保持一致。合成磁场矢量与绕组电流的合成矢量在理想情况下是线性关系，要实现恒转矩等步距角细分，必须合理的控制电机绕组中的电流，使各相绕组电流的合成矢量在空间作幅值恒定的旋转运动，从而在步进电机内部建立均匀的圆形旋转磁场，这就需要在各相绕相中通以正弦电流。三相混合式步进电机的三相绕组在空间位置上相差 $2\pi/3$ ，给三相绕组分别通相位相差 $2\pi/3$ 而幅值相同的正弦波电流，则合成的电流矢量在空间做幅值恒定的旋转运动^[15]。

三相混合式步进电机的工作原理十分类似于交流永磁同步电机。转子上所用永磁铁同样是具有高磁密特性的稀土永磁材料，所以在转子上产生的感应电流对转子磁场

的影响可忽略不计。在结构上，它相当于一种多极对数的交流永磁同步电机。由于输入是三相正弦电流因此产生的空间磁场呈圆形分布，而且可以用永磁同步电机的结构模型(图 13)分析三相混合式步进电机的转矩特性^{[16][17]}。为便于分析，可做如下假设：

- (1) 饱和效应忽略不计；
- (2) 磁滞电流及涡流损耗不计；
- (3) 励磁电流无动态响应过程。

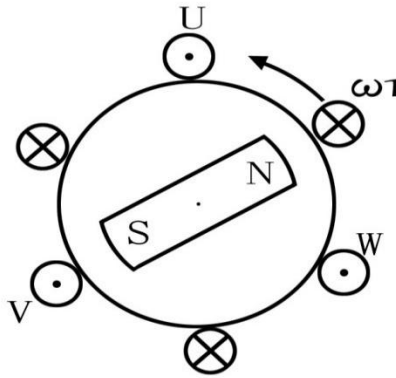


图 13 三相永磁同步电机的简单结构模型

U, V, W 为定子上的 3 个线圈绕组，3 个线圈绕组空间位置上相差 $2\pi/3$ 。电机单相绕组通电的时候，稳态转矩可以表达为：

$$T=f(i, \theta) \quad (6)$$

其中 i 为绕组中通过的电流； θ 为电机转子偏离参考点的角度。

由于磁饱和效应可以忽略不计，并且转子结构是圆形，其矩角特性为严格的正弦，即：

$$T=k \cdot i \cdot \sin \theta \quad (7)$$

其中 k 为转矩常数。

若理想的电流源以恒幅值为 I 的三相电流 i_U, i_V, i_W 供给电机绕组，即：

$$\begin{aligned} i_U &= I \sin \omega t \\ i_V &= I \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ i_W &= I \sin(\omega t + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (8)$$

合成的电流矢量为(以 i_U 为参考)：

$$\vec{I} = i_U + i_V e^{j\frac{2}{3}\pi} + i_W e^{j\frac{4}{3}\pi} = \frac{3}{2} I e^{j(\frac{1}{2}\pi - \omega t)} \quad (9)$$

则电机各相电流产生的稳态转矩为：

$$\begin{aligned}
T_U &= kI \sin \omega t \sin \theta \\
T_V &= kI \sin(\omega t + 2\pi/3) \sin(\theta + 2\pi/3) \\
T_W &= kI \sin(\omega t + 4\pi/3) \sin(\theta + 4\pi/3)
\end{aligned}
\tag{10}$$

稳态运行时， $\theta = \omega t$ ，则三相绕组产生的合成转矩为：

$$T = T_U + T_V + T_W = \frac{3}{2} kI \sin(\frac{\pi}{2} - \omega t + \theta) = \frac{3}{2} kI
\tag{11}$$

以上分析表明，对于三相永磁同步电机，当三相绕组输入相差 120° 的正弦电流时，由于在电机内部产生圆形旋转磁场，电机的输出转矩为恒值。同时可以看出，采用了类似三相永磁同步电机的结构和控制方式，三相混合式步进电机产生的空间磁场就具有了类似交流同步电机的运行特性，这为改善步进电机驱动系统的控制提供了保证。

因此，将交流永磁同步电机控制原理应用到三相混合式步进电机驱动系统中，输入的 220V 交流，经整流后变为直流，再经脉宽调制技术使三路阶梯式正弦波电流按固定时序分别流过三路绕组，其每个阶梯对应电机转动一步，一个周期正弦电流对应电机转子转过一个齿距。通过改变驱动器输出正弦电流的频率来改变电机转速，而一个周期正弦波的阶梯数确定了每步转过的角度。图 14 给出相差 120° 的三相正弦阶梯电流。

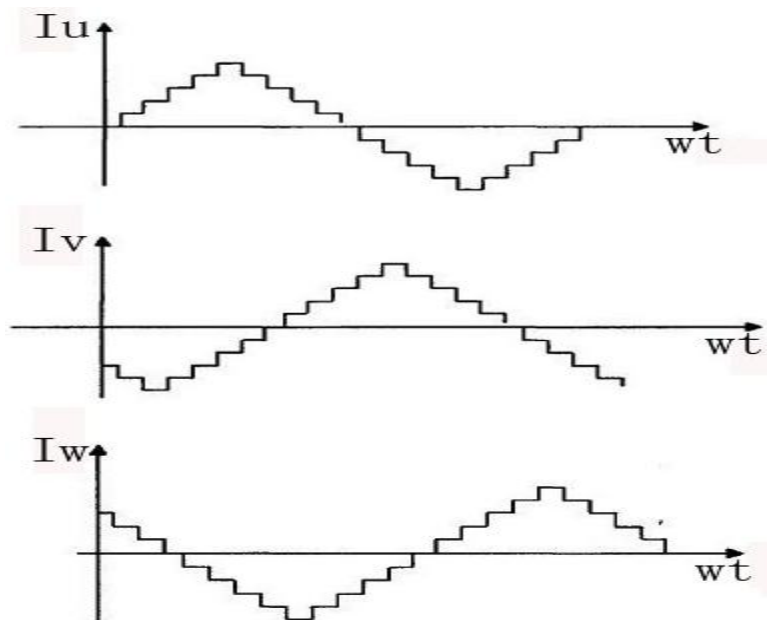


图 14 相位相差 120° 的三相正弦阶梯电流

此外，本文提出一种新的细分控制策略，它的设计思路是：先尽可能的细分步距角，使细分数取得足够大，即运行拍数 n 取得足够大，步距角便足够小，当来一个主令脉冲时，步进电动机可以走整数个微步数来达到所要求的步距角，也就是说不限定

只走一步(微步)，而也可以走几步(微步)，甚至几十上百步(微步)。在这种方式下，步进电动机的步距角计算公式为：

$$\theta_s' = \theta_s / k_1 = \frac{2\pi}{m_1 k_1 Z_r} \quad (12)$$

3.6 正弦脉宽调制技术原理及其控制方式

3.6.1 脉宽调制技术(PWM)的基本原理

在采样控制理论中有一个重要的结论：冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上，效果基本相同。冲量指窄脉冲的面积，如图 15。这里所说的效果基本相同，指环节的输出响应波形基本相同。如把各输出波形用傅氏变换分析，则其低频段的特性非常接近，仅在高频段略有差异，这是 PWM 控制的重要理论基础。步进电机的相绕组是明显的惯性环节，因此可以用 PWM 技术来控制电机绕组的电流大小。

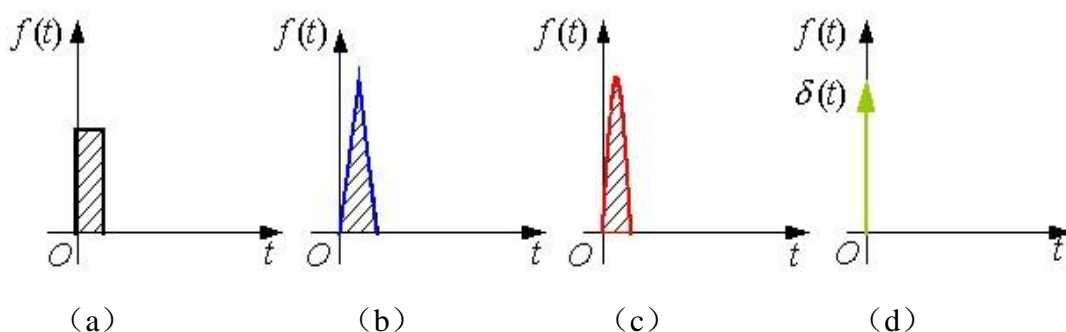


图 15 形状不同而面积相同的各种窄脉冲

把图 16 (a)所示的正弦半波分成 N 等份，就可把正弦半波看成是由 N 个彼此相连的脉冲所组成的波形。这些脉冲宽度相等，都等于 π/N ，但幅值不等，且脉冲顶部不是水平直线，而是曲线，各脉冲的幅值按正弦规律变化。如果把上述脉冲序列用同样数量的等幅而不等宽的矩形脉冲序列代替，使脉冲的中点和相应正弦等分点的中点重合，且使矩形脉冲和相应正弦部分面积相等，就可得到图 16 (b)所示的脉冲序列。这就是 PWM 波形，可以看出，各脉冲的宽度是按正弦规律变化的。根据冲量相等效果相同的原理，PWM 波形和正弦波形是等效的。像这种脉冲宽度按正弦规律变化和正弦波等效的 PWM 波形，也称为 SPWM 波形。在 PWM 波形中，各脉冲的幅值是相等的，要改变等效输出正弦波幅值，只要按同一比例系数改变各脉冲的宽度即可。

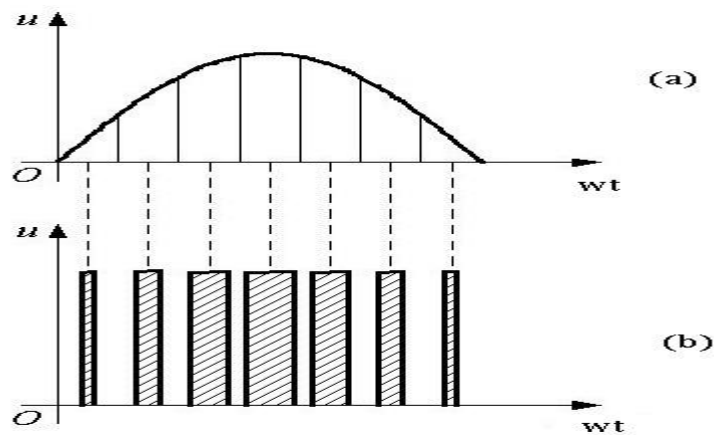


图 16 正弦半波的等效 PWM 波

按上述原理，在给出了正弦波频率、幅值和半个周期内的脉冲数后，PWM 波形各脉冲的宽度和间隔就可以准确地计算出来。按照计算结果控制电路中各开关器件的通断，就可以得到所需要的 PWM 波形。但是这种计算很繁琐，正弦波的频率、幅值等变化时，结果都要变化。较为实用的方法是采用调制的方法，即把所希望的波形作为调制信号，把接受调制的信号作为载波，通过对载波的调制得到所期望的 PWM 波形。通常采用等腰三角形作为载波，因为等腰三角形上下宽度与高度成线性关系且左右对称，当它与任何一个平缓变化的调制信号波相交时，如在交点时刻控制电路中开关器件的通断，就可以得到宽度正比于信号幅值的脉冲，这正好符合 PWM 控制的要求^[18]。当调制信号为正弦波时，所得到的就是 SPWM 波形(图 17)。

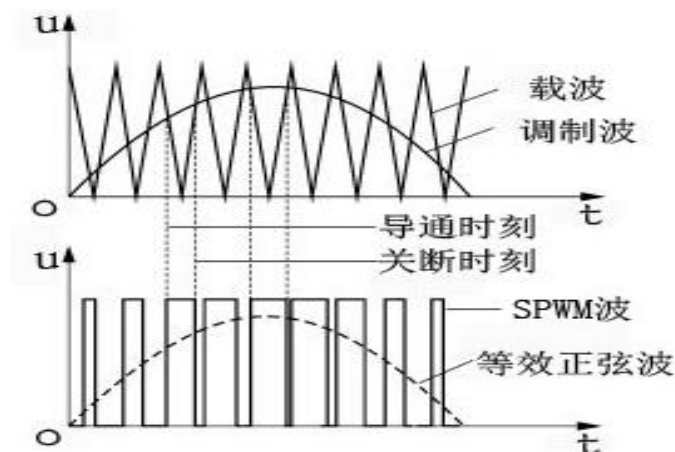


图 17 SPWM 的实现

3. 6. 2 三相 SPWM 电路构成和工作原理

图 18 为三相 SPWM 电路图，分为两大部分：主电路(a)和控制电路(b)。它用控制电路产生 SPWM 波控制主电路功率晶体管的通断，从而将输入主电路的直流电压变

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/816041045003010212>