

# 步进电机的转速稳定度研究

潘今宇\*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘 要** 针对步进电机在航天遥感遥测中的广泛应用, 就其运行的性能作了一些探讨。着重讨论了步进电机在航天成像仪器扫描驱动应用中的运转质量, 就步进电机的振荡特性及各种因素对转速稳定度的影响进行了一些摸索。同时对测试中的核心设备——光电编码器及其倍增技术也作了一些介绍。

**关键词** 步进电机 稳定度 振荡 光电编码器 倍增 精度

## 1 步进电机概述

步进电动机最富有吸引力的一点就是它的绕组的直流供电<sup>[1]</sup>。有趣的是当初也正是这一特点才使步进电机在缺乏交流电源的船舶和飞机等独立系统中得到推广与发展的, 而这也是步进电机在航天遥感遥测中被广泛应用的原因之一。从广义上讲, 步进电动机是一种受电脉冲信号控制的无刷式直流电动机, 也可看作是在一定频率范围内转速与控制脉冲频率同步的同步电动机<sup>[2]</sup>。

“效率低、有谐振、带惯能力差……”——尽管我们从未停止这样的抱怨, 然而步进电机在航天遥感中仍然是我们的首选。其实原因很简单, 在航天工程中我们总是力图以最简便可靠的方案来实现设计目标, 而步进电机的特性正是满足了这种需求:

- 能直接实现数字控制——大多数人都认为数字电路的研制难度要低于模拟电路。
- 位移量与脉冲数对应, 在需要精确定位的应用(如指向镜)中可以在开环控制下获得较高的定位精度。
- 步距误差不累计, 依赖晶振频率, 在连续运转中无需闭环反馈就可得到稳定的周期转速。

• 抗干扰能力强, 在负载能力范围内, 步距角和转速不受电压、负载和波形的影响, 也不受温度、冲击和振动等环境条件的影响。

的确, 我们是在回避闭环设计, 光电编码器、高精度基准源、抗干扰设计……这些无疑都将大大增加驱动电路的复杂程度。当然, 在享受这些便利的同时, 也必须直面步进电机的种种不足, 并对其影响作出充分的分析与评估, 确定其是否能满足任务指标。进一步来说, 这对电机选型及关键参数的选取也具有一定的指导意义。

## 2 步进电机的稳定度分析

### 2.1 振荡机理分析

步进谐振一直是步进电机最显著的特点之一, 在物理上表现为电机转速的波动(一般称为振荡或抖动等), 单步运行时甚至会导致位移上的前后振动, 从而直接威胁步进电机的转速稳定度。由于步进电机的矩角特性近似正弦函数<sup>[2,3]</sup>, 且定子磁场以跳跃方式转动, 这使得对步进电机的振荡机理作精确的理论分析一直十分困难。

有文献认为步进电机的转速中包含有三种成份: 其一为平均分量; 其二为衰减的自由振荡分量; 其三为不衰减的、由绕组电流切换所引起的强迫振荡分量<sup>[3]</sup>:

\* 2002 级博士研究生

$$\omega(t) = C + Ae^{-\beta/J \cdot J} \cos(\omega_0 t + \psi_0) + B \cos(\omega_1 t + \psi_1) \quad (1)$$

其中平均分量  $C$  直接构成电机的平均转速, 后两项为危害电机转速稳定度的振荡分量。为了便于直观上的理解, 可以把步进电机的转动过程分割为若干的单步运动, 转子在每一步都要经历一个“起步加速——惯性运动——减速制动”的过程, 而造成转速波动的本质原因是由电机转矩波动导致的加速度波动。

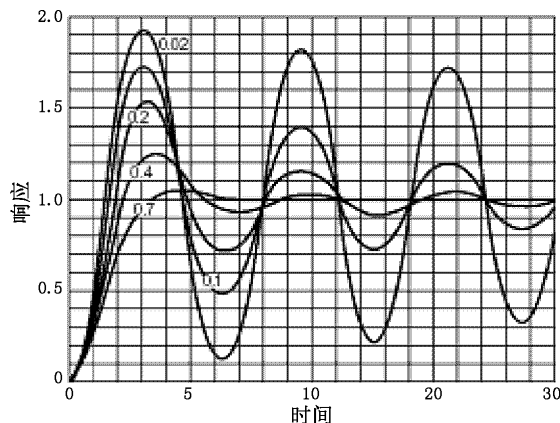


图1 不同阻尼系数下的单步响应曲线

在步进电机作单步运行时, 这种振荡可达到最大状态: 在起步时电机失调角最大, 获得最大转矩(加速度), 随着失调角的变化, 转矩逐渐减小, 当转子到达平衡点时则转矩为0, 并具有最大速度, 在惯性作用下它将越过平衡位置继续转动, 此时转子在反向转矩作用下减速, 而后反向转动, 从而以平衡点为原点作振荡运动, 并最终在摩擦阻尼的作用下停止在平衡点上。由此, 不难想像增加电机的阻尼系数是抑制振荡最有效的方法, 图1描述了电机在不同阻尼系数下的响应曲线。

除了在机械上寻求增加阻尼的措施外, 还可以通过增加电气阻尼的方法来抑制振荡。其基本思路就是在转子到达平衡点之前对电机施加上一通电状态来获得反向减速转矩, 然后再恢复当前通电状态, 从而使电机转速迅速稳定。这种方法的关键在于寻求一个适当的换相时机以获得合适的加、减速时间长度<sup>[4]</sup>。不过

个人认为这一方法过于极端, 其可靠性有待进一步的测试和验证。

除此以外, 时下流行的步距细分(微步距驱动)对低频(单步)运转中的振荡抑制也有着显著的效果。把一大步分为若干个小步来走对于转速稳定度的好处是不言而喻的, 不仅如此, 微步距驱动还可以改善步进电机的电气性能。它不但可以抑制由绕组切换所引起的强迫振荡分量, 还可以扩大电机稳定运行的范围。而作为感性负载来说, 这也缓解了电机绕组中电流的突变, 从而可以在一定程度上降低绕组的温升以及反向电动势对功放器件的危害。

理论上, 可以通过提高步距细分数来提高步进电机的分辨率和转速稳定度, 然而必须指出的是, 不论插入多少个微步距, 电机的绝对误差都会保持不变。微步距可以提高步距分辨率, 却不能增加步距准确性。5%的步距误差在采用半步驱动时就变为10%的误差, 32细分时就是160%, 当步距误差超过100%时就不能保证电机在收到脉冲时一定会进步。就目前电机的制作工艺来说, 超过32细分的微步距即使有改进也是微乎其微的<sup>[5]</sup>, 这就不奇怪为什么有时超微步驱动下的步进电机反而会失去其应有的准确性。所以应该根据需要来合理选择步进电机的步距细分数。

## 2.2 步进电机的振动特性

在某些情况下, 步进电机会在某一运行频率下发生共振。如果根据式(1)来理解的话, 当电机绕组切换的角频率 $\omega_1$ 接近电机的自由振荡角频率 $\omega_0$ 时, 两种振荡分量直接相加, 则电机发生共振。这种现象一旦发生将对电机的运转造成致命的影响, 甚至会直接导致电机停转。

为了研究这一现象, 这里引入了振动特性的概念。我们用步进电机转子角速度波动的振幅与控制脉冲频率的关系来表示振动特性。其特点为在不同的频域会出现一些峰值点和振幅增大的区间, 前者是某一谐波转矩的频率与固有频率相一致的谐振点, 后者属于零阻尼或负阻尼状态的不稳定区。

步进电机有自己的固有频率(或自然频率) $f_0$ , 设  $T_k$  为保持转矩, 转子齿数为  $Z_r$ , 转子转动惯量为  $J$ , 工程上用下式估算  $f_0$  [6]:

$$f_0 = (T_k \cdot Z_r / J)^{1/2} / 2\pi \quad (2)$$

习惯上把控制脉冲  $f_{cp} \leq f_0$  的区域称为低频段, 高频段则通常取  $f_{cp} \geq m_1 f_0$  的区域, 以上两个频段之间称为中频段。于是就有了我们所熟悉的低频振荡、中频振荡以及高频振荡。 $m_1$  是电机各相的通电状态数, 可以理解为步距细分数与通电拍数的乘积, 和电机每转周期  $t$  的关系:

$$t = m_1 \cdot Z_r / f_{cp} \quad (3)$$

图 2 的测试结果表明, 采用微步驱动技术提高通电状态数对改善步进电机低频运行的稳定性有显著的效果, 但可能会引入中频段新的谐振点, 这尚有待于进一步研究解决。同样的研究表明, 减小绕组的电感值有利于提高步进电机在高频运行下的稳定性, 而且电机的各种负载(电磁阻尼、摩擦阻尼与惯量负载)均对步进电机的振荡表现出不同的抑制作用, 可以说空载运行是对步进电机运行稳定度最严格的考核 [6]。

### 3 转速稳定度的测定

那么对于我们所关心的航天遥感应用, 尤其是在中、高分辨率的成像仪器中, 步进电机究竟能否胜任高精度的扫描驱动呢? 在 FY-1D 卫星扫描辐射计上就曾经发生过由于磁滞同步电机抖动(Jitter)量过大而造成图像边缘晃动的情况 [7], 而步进电机由于本身所固有的振荡特性, 其稳定度似乎更加堪忧。甚至有专家认为步进电机根本不适用于较高分辨率的成像扫描。考虑到在成像扫描时步进电机往往以固定速度(一般大于 20rpm)连续运转, 这时步进电机的磁动势变化接近正弦函数, 可以说已经失去了其传统的步进意义, 所以其振荡幅度比单步运行时要小得多。

然而我们需要的是科学的实验结果。为了对电机转速稳定度作出高精度的测量, 必须有一套可信的测试方法, 最关键的是还要有具有足够精度的测量仪器。从分辨率方面来讲, 在现有的诸多角度位置传感器中, 一般认为以光电编码器为代表的光电式角度传感器具有相对优势。要知道角度传感器的分辨率直接决定了转速的测量精度。

#### 3.1 光电编码器

旋转式光电编码器一般分为两种: 绝对式

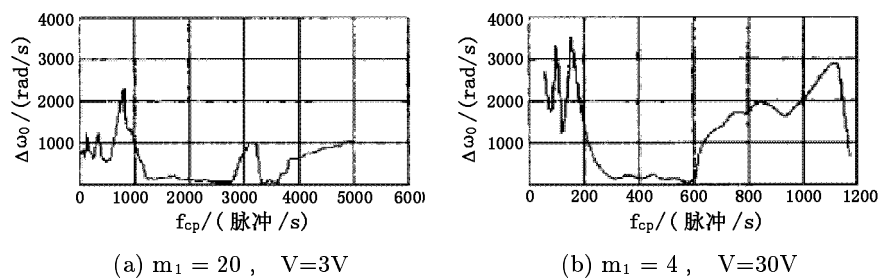


图 2 实测振动特性举例

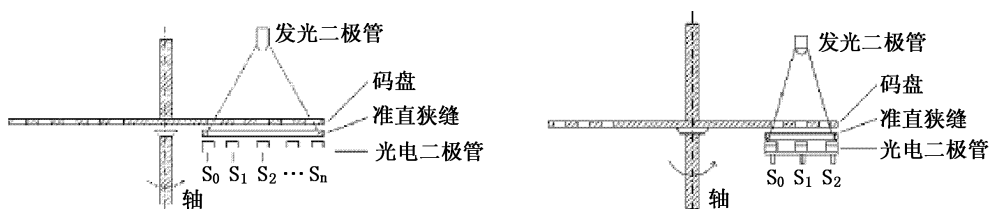


图 3 绝对编码器(左)和增量编码器(右)的基本构造

和增量式。如图 3 所示,光电编码器的核心部件为光学编码盘,玻璃盘表面的光刻道数直接决定了编码器的分辨率。光源在通过明暗相间的各个同心圆后经过准直狭缝由各自对应的光敏二极管接收。随着码盘的转动,光敏二极管输出类正弦信号,其周期为码盘的明暗周期,然后交由数字电路进行处理。

绝对式编码器具有多个同心圆的码道,在最简单的情形下,码道数等于编码器的分辨率。一般用 2 的指数来表征编码器的分辨率,17 位分辨率的编码器就是指它能够在一圈内提供  $2^{17}$ (131072) 个位置数。如果采用自然编码的话,17 位的绝对式码盘应该具有 17 个码道,其光刻道数从内到外应依次为 2、4、6……直到 131072 个。事实上这是不可能的,以目前所能达到的光刻密度来讲,13 万道的刻划数只能通过增加码盘直径的方法来得到。现在的产品通常采用绝对加增量的混合式码盘,内圈的绝对码道一般采用格雷编码,最外两圈为增量式码道,通过对增量码道周期数的倍增技术来获得高于实际码道圈数的分辨率。例如,对于一个 13 道(11 个绝对码道,2 个增量码道)的编码器可以通过类似技术得到 16 位的绝对式分辨率<sup>[8]</sup>。图 4 为三种码盘的码道示意图。

与增量式编码器相比,绝对式编码器的优势在于一旦编码器上电就可以立刻获得码盘的绝对位置,在数控机床的应用中显得尤为有用。但是现有绝对编码器的工作方式属于被动式,只能以响应外界时钟的方式送出位置值,而不能象增量编码器那样根据当前位置的变化来主动发出电平变化从而改变计数值。这里有必要解

释一下为什么笔者更需要后者的工作方式。首先,绝对式编码器在这种异步工作方式下得到的位置值包含了 1 个单位分辨率的最大误差,考虑到绝对式编码器对输入时钟的响应上限(比如 2MHz),这样随着转速加大就会直线降低测量的分辨率和精度。再者,究竟应该去计算“固定时间内的位移数”还是“转过固定角度所用的时间”呢?显然,在有限的码盘分辨率下,后一种方式更容易获得较高的测量精度。

一般成像仪器要求扫描速度的瞬时误差不大于一个瞬时视场(IFOV)。以 FY-3 中分辨率成像光谱仪为例,其最小的 IFOV 约为 3mr(毫弧度),若编码器的分辨率须至少比 IFOV 高一个数量级,则需要不低于每圈 2 万个计数值的编码器。事实上这还是远远不够的,在高分辨率扫描时,为了更准确地描述电机转速的瞬时误差,编码器的分辨率总是越高越好。然而,目前直径在 50mm 左右的增量码盘的最大光学分辨率一般约为 1 万道,更高分辨率的码盘不仅庞大而且昂贵。为了在有限的光学分辨率上获得更高的计数分辨率,可以在电路上采用倍增技术。

### 3.2 增量编码器的倍增技术

从图 4 中不难发现两条增量码道保持  $90^\circ$  相位差。由于光栅的光学特性和响应延迟,光敏二极管的输出信号为两路相差  $90^\circ$  的类正弦波。由数字电路处理后可获得占空比为 50% 的两路方波,相位差仍为  $90^\circ$ ,这样用户只要简单地通过异或逻辑就可以获得 4 倍于光学分辨率的周波数。

有的厂商不提供方波输出,而是将一个码

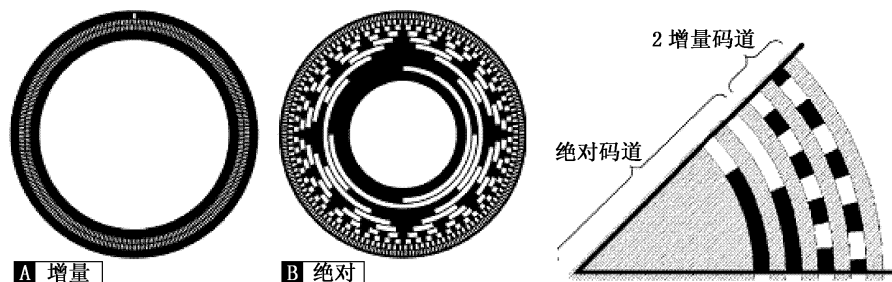


图 4 增量码盘(左)、绝对码盘(中)和混合码盘(右)的码道示意图

道上的 4 个光敏二极管的正弦信号直接输出，得到两对振幅相同、相位相反且相差  $90^\circ$  的信号 (见图 5)。由于光敏二极管的输出包含有背景亮度的直流分量，在将其整形为方波之前应把两路相位相反的正弦信号作减法运算，使其直流分量互相抵消，振幅加倍，从而获得两路去除了直流分量的倍增信号 (相差  $90^\circ$ )。这样两路信号在一个周期内将有 4 个过零点，以此作为触发就能够达到 4 倍增的周期输出。但是在实际情况中，直流分量很难被完全抵消，触发电平的精确调整有一定难度。

根据正弦信号的不同电平值与码盘位置的对应关系，配合模数转换技术就可以获得更高的倍增数。但是由于正弦信号在某些区间线性较差，无法拉开分辨阈值。国内的制造技术很少能把倍增数做到 10 倍以上，4 倍频成为我们最常见的选择。令人吃惊的是，美国某制造商竟能提供 20 倍增的增量编码器，最高情况下甚至达到 80 倍增。若是配以 1 万多道光学分辨率的增量码盘，就可以获得每圈 90 万个周期的方波信号<sup>[9]</sup>。

然而在高倍增技术中我们对其精度的关注甚至超过对分辨率的苛求，这个精度反映了倍增后的周波数究竟能在多大程度上对应码盘的真实位置变化。编码器的分辨率决定了转速的

测量精度，而编码器的精度却直接关系到测量结果的真实性。一个编码周期不均匀的码盘即使分辨率再高也无法获得准确的结果。这就提出了一个问题，我们用光电编码器测量转速，可是用什么来测量编码器的精确性呢？困难在于很难制作出一个转速接近匀速的系统来标定编码器。答案只能是另一个更高分辨率和精度的超级编码器：该厂商使用一个直径 20 英寸、分辨率为  $2^{21}$  的超级码盘，并将其安装于空气轴承上来审核被测编码器的每一个周波输出。这直接确保了高倍增编码器测量结果的可信度。

### 3.3 步进电机稳定度测试举例

电机转速稳定度通常分为瞬时稳定度和周期稳定度，前者用于评估电机转过每个编码周期所用时间的误差，后者则用于检验电机每转所用时间的周期误差。周期误差的测定对编码分辨率没有什么要求，增量码盘上有专用的单个基准光栅 (见图 4)，直接输出每圈一次的基准脉冲。对于混合式码盘的增量码道，以数字计数电路来获取进位脉冲也是不难的。在图像扫描中，瞬时误差会导致图像在一帧内不均匀，周期误差则会造成相邻帧无法对齐。周期误差定义如下：

$$\Delta T = (T_{MAX} - T_{min})/T_{AVG} \quad (4)$$

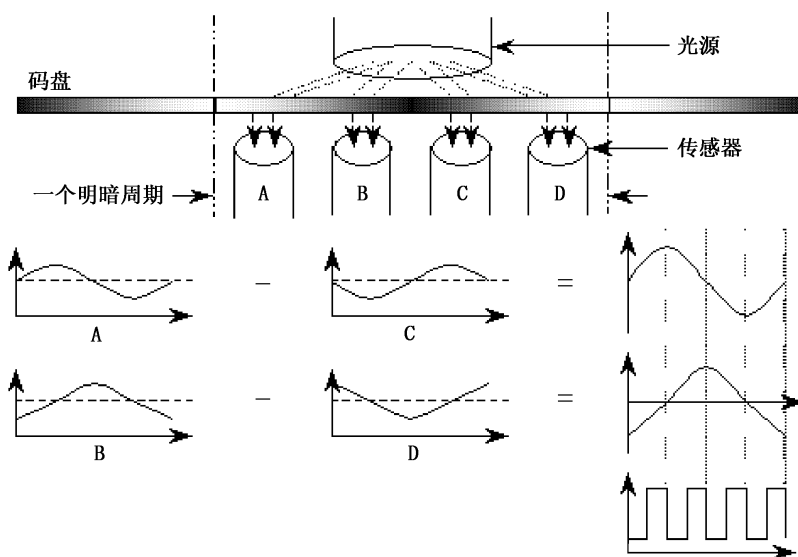


图 5 增量编码器与简单的 4 倍增原理

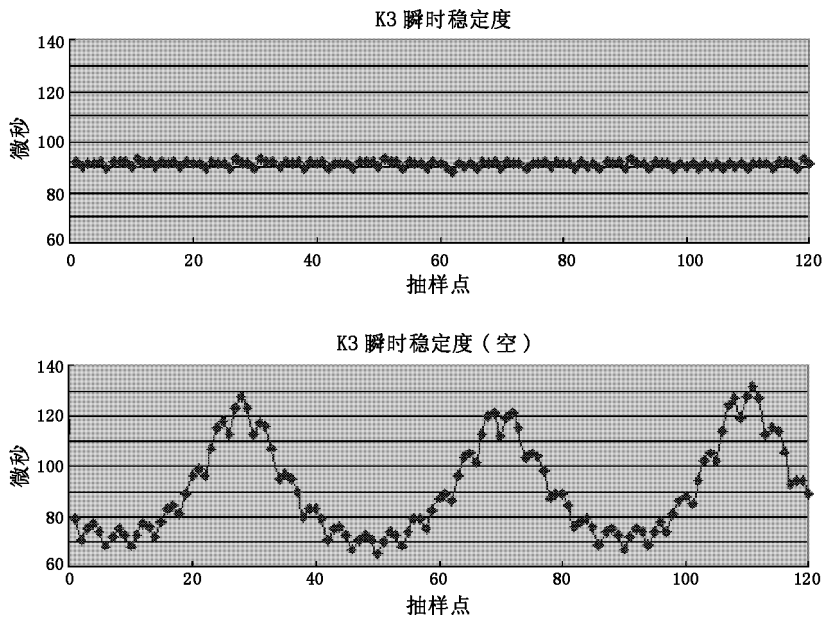


图 6 FY-3 光谱仪消旋电机的瞬时稳定度 (下图为电机空载时的情况)

图 6 是 FY-3 中分辨率成像光谱仪消旋电机 K3 的瞬时稳定度测试结果。电机为 200 齿的永磁式感应子步进电机 (又称混合式步进电机), 其保持转矩为  $5\text{N} \cdot \text{m}$ , 自定位转矩为  $0.15\text{N} \cdot \text{m}$ , 绕组电阻  $4.35\Omega$ , 电感为  $24\text{mH}$ 。采用 15 细分的 8 拍驱动, 转速为  $20\text{rpm}$ , 不考虑细分的话步距角为  $0.225^\circ$ 。编码器选用德国海德汉的混合式编码器, 具有 17 位绝对精度, 增量信号 8192 道, 正弦波输出。4 倍增后分辨率为 32768, 这样每个步距角由 20 个采样点描述。纵坐标取计时值的末 3 位。

图 6 中的空载测试结果很好地反映了步进电机的振荡特性, 同时也验证了大惯量负载对步进振荡的平滑作用。图中叠加的小波则是由于对正弦信号触发电平的调节未臻完美所致。可见在负载一定惯量后电机的转速十分平稳, 甚至超过编码器的测量精度。若要作进一步分析就必须使用更高分辨率的增量编码器。此外还利用编码器的绝对位置输出 (分辨率为  $10''$ ) 对电机步进中的位移抖动作了测试, 结果仅仅在电机从低频起动 (采用变频起动) 时观察到角位移的往返抖动, 这与步进电机单步运行特性相一致。

虽然得到了测试数据, 但数学模型的问题并未解决。到底怎样的数据才算是符合“瞬时误差不大于一个 (或半个)IFOV”呢? IFOV 是一个位移概念, 如何去衡量转速的误差呢? 笔者认为应该描述为“由瞬时转速误差所造成的位移误差的最大累计不应超过 1 个 IFOV”。由于测得的其实是电机转过每个编码周期所用的时间, 所以应该根据转速将 IFOV 转换为电机转过一个 IFOV 所用的平均时间, 再与测试结果进行比较。平均时间线与波动曲线所围的最大面积就是时间上的最大累积误差, 或者也可以对采样曲线作数学拟合后求取积分 (如图 7 所示)。

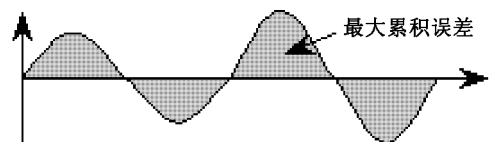


图 7 求取最大阴影面积来计算最大累积误差

按照式 (4) 的定义, 该电机的周期稳定度测量结果为  $0.5 \times 10^{-5}$ 。周期稳定度在很大程度上受到轴隙跳动的影 响。

#### 4 初步结论

- 测试结果表明, 受测的步进电机在负载

光学部件的惯量后其转速的瞬时稳定度可以满足中分辨率光谱仪成像扫描的需求，其周期稳定度也可以达到小于  $1 \times 10^{-5}$  的指标要求。

• 负载惯量在某些条件下对步进电机的转速振荡具有明显的抑制作用。

• 倍增技术可以有效地提升增量式光电编码器的输出分辨率，实现高精度测量。

• 步进电机的微步距驱动对其振动特性有一定的改善作用。

• 步进电机的转速稳定度受到转速、负载(如惯量、阻尼)、电机参数(如齿数、匝数)及电机制作精度(如齿槽均匀性)等多方面因素的直接影响，仅仅依靠驱动方式的改进对提高步进电机稳定度的作用显得十分有限。

• 对上述各种因素对步进电机转速稳定度的具体影响，尚有待于作进一步的更高精度的测试与分析。

### 参考文献

- [1] 孙鹤旭. 交流步进传动系统, 机械工业出版社, 1996.
- [2] 刘宝廷, 程树康 等. 步进电机及其驱动控制系统.
- [3] 陈秋明. 步进电机的振荡机理和矢量控制.
- [4] 邓之鹏. 步进电机单步运行仿真研究, 太原重型机械学院学报, 1994, 15(1).
- [5] 正确选择步进电机的参数, 世界产品与技术, 2001.
- [6] 王宗培 等. 步进电机系统不同参数对振动特性的影响, 微电机, 1998, 31(3).
- [7] 郑亲波. FY-1D 卫星扫描辐射计图像信号边缘晃动情况的分析, 卫星气象技术报告, 2003,(5).
- [8] Fabio CHERCHI etc. A digitally enhanced resolution technique for rotary encoder system.
- [9] www.gurley.com
- [10] 郭志彦. 空间低速扫描驱动机构的研究, 中科院上海技术物理研究所, 1996.
- [11] 潘今宇. 步进电机在 921 成像光谱仪中的应用, 上海技术物理研究所 40 周年所庆文集, 1999.

### 国外专利介绍

#### 带薄膜红外滤光片的图像传感器

美国专利 US2004/0082092

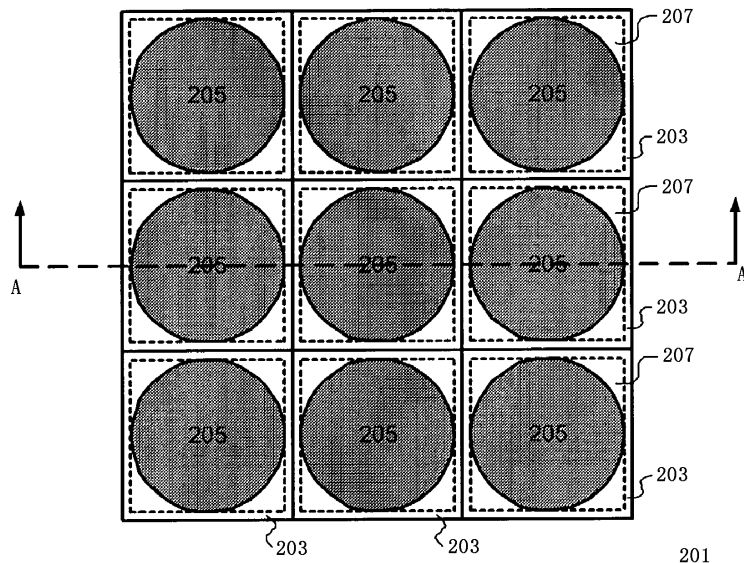
(2004 年 4 月 29 日公布)

红外滤光片一般是连同图像传感器一起使用的。红外滤光片可以防止或限制红外辐射入射到图像传感器上。许多先前的基于硅的像元对红外区域的光是有反应的。因此，如果红外辐射入射在像元上，该像元便

会产生一个输出信号。这种情况对于可见光图像传感器是不利的。解决这个问题的一种常用办法是在图像传感器或图像传感器透镜前使用分立的红外滤光片，但这会增加整台摄像机的成本。

本发明提供一种装有集成红外滤光片的图像传感器。该图像传感器有许多个像元，这些像元都做在一块半导体衬底中，每个像元都包括一个光敏元件。另外，像元上有一层能滤去入射红外辐射的叠层，叠层上面则是微透镜。

本专利文献共 7 页，其中有 3 张插图。



201

高 编译