

步进电机升降频的优化算法

刘颖, 王志刚, 王红, 张素伟

(河北工业大学, 天津 300401)

摘要:通过分析步进电机在升降频时发生失步、过冲等现象的原因,以及传统升降频曲线中存在的不足,结合步进电机的矩频特性提出了一种能保证电机在升降频阶段稳定工作的S形曲线升降频算法,并结合工程应用的特点对该算法进行了优化。文中以船载仪表系统为例介绍了该优化算法的应用方法。实验结果表明:该优化算法不仅提高了步进电机的运行稳定度,同时对电机的启动效率也有了很大改进。目前该算法已成功应用于散货船的仪表系统中。

关键词: 步进电机; 升降频; S形曲线

中图分类号: TM383.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-6848(2010)08-0093-02

An Optimization Algorithm to Accelerate or Decelerate Speed of Step Motor

LIU Ying, WANG Zhi-gang, WANG Hong, ZHANG Su-wei

(Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The reason of losing step or overshooting when to accelerate or decelerate and the deficiency of traditional accelerating or decelerating method were analyzed. According to the analysis above, based on the characteristic of moment-frequency about step motor, an algorithm to accelerate or decelerate following s curve was propounded. Meanwhile, the algorithm is optimized according to engineering practice. Taking instrument system of vessels for example, an application method of this algorithm was introduced. As the test result proved, the degree of stop motor's stability is increased, and the start-up efficiency is improved. The algorithm has been applied in the instrument system of bulk freighter successfully now.

Key Words: Step motor; Accelerate or decelerate speed; S curve

0 引言

在步进电机驱动器的设计中,步进电机的升降频设计是关键。升降频设计的核心是实现电机的快速、准确定位,即在避免电机发生失步、过冲和震动等现象的情况下,以最快的速度运行到指定的位置。

然而由步进电机典型的矩频特性曲线图知,步进电机无论采用何种驱动电路,在驱动脉冲频率较低时,输出转矩较大且力矩值比较稳定,但随着驱动频率的上升,电机的输出转矩则会随之逐渐降低。步进电机的升降频设计就是要寻求一种与电机矩频特性相适应的速度控制方案,以保证电机在不产生失步和过冲的情况下尽快达到最高运行频率。常见的步进电机升降频曲线有:梯形曲线、抛物曲线和指数曲线等。

步进电机的工作特点是:电机启动初期,其静态惯量比较大,需以较小的加速度升频;而当步进电机停止时,由于输出转矩已大幅降低,若加速度

比较大就容易发生过冲。综合以上各个方面考虑,为了保证电机的稳定、准确启停,在加速曲线的起始和结束时都要以较低的速度运行。但是,前述的三种方式在启动或减速结束时都存在不同程度的加速度突变,容易产出失步或过冲现象,不利于步进电机的控制,而按图1所示的S形曲线考虑了以上因素,在启停阶段加速比较缓慢,在加减速曲线的中间部分加速度又比较大,这样的设计,既能够保证电机的稳定工作,又能在允许的范围内最大程度的提高电机的控制效率,因此按S形曲线对步进电机进行升降频控制是优于其它几种曲线的一种最优方案^[1]。

1 步进电机S形曲线升降速规律

下面对电机的力矩特性进行分析。

首先,定义以下变量: ω 为转子的机械角速度; T_e 为电机的电磁转矩; J 为电机的转动惯量; T 为电机的输出转矩; T_L 为负载转矩; T_f 为电机的阻力

矩;虽然和均不是解析函数,但是根据步进电机的特点,在一般的工程应用中完全可以近似的把他们看做的线性函数,其中负载转矩 $T_L = J\omega$, 阻力矩 T_f 可设为 $T_f = B_f\omega$ (B_f 为转矩常数)。

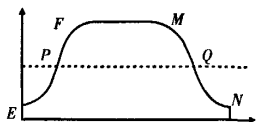


图1 S形加速曲线

根据动力学原理可知,当步进电机克服阻力矩 T_f 匀速旋转时则有^[2]:

$$T = T_e - T_f = T_L \quad (1)$$

由上面的分析得到电机的运动方程:

$$J\omega = T_e - B_f\omega \quad (2)$$

假设电机从静止开始加速,即 $t=0$ 时, $\omega=0$, 则式(2)的解为:

$$\omega = \frac{T_e}{B_f}(1 - e^{-t/\varepsilon}) \quad (3)$$

式中 $\varepsilon = J/B_f$, 若设电机的脉冲频率为 f , 显然 ω 与 f 存在线性关系, 可设为:

$$\omega = Af \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)整理可得:

$$f(t) = f_h - f_h e^{-t/\varepsilon} \quad (5)$$

式中, $f_h = T/AB_f$, 为电机稳定运行的最高频率; ε 是决定步进电机加速度大小的时间常数, 该值为经验数据, 也是步进电机速度控制的关键。

式(5)为指数方程的变形, 由图2可以看出, 它与图1中的PF断曲线吻合, 为了得到其它三段加速减速变换, 可以用坐标平移的方法得到其余三段曲线, 从而也就得到了理想的S形曲线。

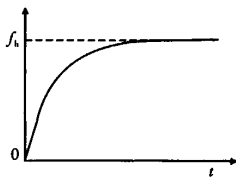


图2 式(5)的函数图像

2 S形曲线算法的改进

在工程应用中上, 式(5)可表示为:

$$f(t) = f_h - [(f_h - f_0)/k_1] * e^{-k_2 t} \quad (6)$$

其中, f 为运行频率; f_0 为突跳频率; f_h 为最高频率, 即匀速运行频率; k_1 为频率系数, 通常取值在 0.90~0.98 之间。

为了便于计算, 将上式进行离散化处理, 得到

式(7):

$$f(\Delta t_n) = f_h - [(f_h - f_0)/k_1] * e^{-k_2 \sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (7)$$

其中, $0 < n \leq N$; $f(\Delta t_n)$ 第 n 级的频率; N 升频的级数; Δt_n 第 n 级频率的运行时间; k_2 加速时间系数, 该系数决定步进电机加速度的大小, 与式(5)中的 ε 对应。 k_2 可由式(8)求得。

$$k_2 = -[\ln(1 - k_1)]/\Delta t \quad (8)$$

其中, $\Delta t = \sum_{n=1}^N \Delta t_n$, 为 N 级加速时间的总和。

由式(8)得到的加速曲线, 可以在 Δt 的时间内加速到 f_h , 但是考虑到此曲线在中间部分加速比较快, 可能发生失步或震动, 不利于电机的平稳加速, 因此在实际应用中用式(9)得到 k_2 。

$$k_2 = -[\ln(1 - k_1)]/(1.5 * \Delta t) \quad (9)$$

由式(9)得到的曲线, 其中间各级的频率过渡相对平滑, 但是在初级和末级的加速过程又显得过于缓慢, 而工程应用中通常希望步进电机快速启动, 因此可对加速曲线的初级和末级进行适当修正, 一般情况下, 初级的时间 Δt_1^* 可取 $\Delta t_1/2$, 末级的加速时间 Δt_N^* 可取 $\Delta t_N/2$ ^[3]。

根据上述分析, 由式(7)和式(9)可求得各级的运行频率 f_n 及其周期 $T_n = 1/f_n$, 进一步可求得各级的运行步数 $M_n = \Delta t_n/T_n$ 。

3 S形改进算法的应用

下面介绍上述方法在船载仪表系统中的应用^[4]。该系统中采用 X25.589 型步进电机, 对应的驱动芯片为 X12.017。X25.589 型步进电机的最高启动频率为 225 Hz, 运行的最高频率可达 600 Hz 以上, 因此选定电机启动频率为 200 Hz, 最高频率选为 600 Hz^[5]。根据 S 形曲线算法, 将 200~600 Hz 分为相等的两部分, 对其中的 400~600 Hz 频率段应用式(7)和式(9), 得到加速曲线, 进行相应的坐标变换后即可得到另外一部分曲线, 从而得到完整的步进电机加速曲线, 对初级和末级的加速时间进行改进后, 得到图3所示的加速曲线。

由步进电机的矩频特性曲线可知, 在分级加速过程中, 由于电机在频率低时输出转矩比较大的特点, 为了加速电机的启动, 前级加速的频率跨度可以比后级适当增大, 结合 X25.589 型步进电机的矩频特性, 本例中采用 {200~300, 300~375, 375~450, 450~500, 500~550, 550~600} 的 6 级加速^[5]。在本例中取 $k_1 = 0.0909$, $N = 0.045$ s 将 k_1 和

(下转第 102 页)

5 结 论

(1) 开关磁阻电机是磁阻电机与现代电力电子技术、微机控制技术相结合的产物, 它既继承了磁阻电机结构简单坚固的优点, 又在高速发展的电力电子和微机控制技术的支持下获得了良好的可控性以及较高的容错能力。因此, 它在驱动调速领域得到了广泛的应用, 同时也在制动和发电领域, 得到越来越多的重视。

(2) 理论和实践表明在电流控制的基础上, 中小功率 SR 电机具有良好的制动和发电效果, 可以方便的实现四象限运行, 这对降低中小功率系统成本、提高系统性能/价格比和中小功率驱动系统的制动和发电运行, 具有一定参考价值。

参考文献

- [1] Miller, T. J. E., Switched reluctance motors and their control [M]. London: Magna Physics Publishing and Oxford Science publications, 1993.
- [2] 李广海, 叶勇, 蒋静坪. 3 kW 开关磁阻电机的再生制动实现[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 123-127.
- [3] R Krishnan. Switched Reluctance Motor Drives: modeling, simulation, analysis, design and applications[M]. CRC Press, 2001.
- [4] Radun A.. Generating with the switched reluctance motor[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1994: 41-47.
- [5] Cardenas R., Pena, R., Perez M., et al. Control system for grid generation of a switched reluctance generator driven by a variable speed wind turbine[C]. Industrial Electronics Society, 2004: 1879-1884.

作者简介: 唐庆博, 男, 工程师, 硕士学位。

王笃俊, 男, 高级工程师。

尹首钦, 男, 助理工程师。

(上接第 94 页)

N 代入式(8)可得 $k_2 = 35.52$ 。表 1 为应用上述参数得到的计算结果。

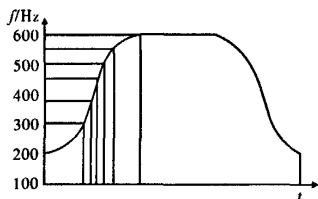


图 3 S 形加速曲线

表 1 计算结果

n	t_1/s	$\Delta t_n/s$	f_n/Hz	脉冲个数
1	0.0200	0.0200	200	4
2	0.0333	0.0133	300	4
3	0.0440	0.0107	375	4
4	0.0551	0.0111	450	5
5	0.0691	0.0140	500	7
6	0.0891	0.0200	550	11

4 结 语

本文算法既弥补了其它加速曲线存在的不足, 又克服了现有的其它 S 形曲线升降频算法要么算法复杂, 要么作用不明显的缺点。经上述分析可知,

在不失步和不过冲的条件下, 采用 S 形加速算法只需要 89.1 ms 就能完成 200 Hz ~ 600 Hz 的加速过程, 而采用梯形算法达到上述的稳定程度至少需要 120 ms。因此, 本文提出的 S 型曲线优化算法不仅提高了电机升降频的稳定度, 同时对电机的启停效率也有了很大改进。目前该算法已成功应用于散货船的仪表系统中^[6]。

参考文献

- [1] 曹东杰, 韩峰, 任云燕. 单片机控制步进电机按 S 形曲线升降频设计[J]. 弹箭与制导学报, 2006(02): 157-159.
- [2] 孙耀杰, 王丹, 高丽哲, 等. 步进电机升降速曲线的设计[J]. 微特电机, 2006(05): 12-14.
- [3] 王小明. 电动机的单片机控制[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2002.
- [4] 魏衡华, 陈根杰, 张玉斌, 等. 基于 CAN 总线的步进电机控制系统的设计[J]. 自动化与仪表, 2009(01): 29-32.
- [5] 李会艳, 胡荣强. 基于单片机的步进电机控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2007(11): 75-77.
- [6] Two Phase Stepper Motor Control with the XC866, User's Manual Version 1.0 [Z]. Germany: Infineon Technologies AG, 2004, 09.

作者简介: 刘 颖(1984 -), 女, 硕士研究生, 通信与测控技术。

王志刚(1950 -), 男, 教授, 通信与测控技术。

作者: [刘颖](#), [王志刚](#), [王红](#), [张素伟](#), [LIU Ying](#), [WANG Zhi-gang](#), [WANG Hong](#), [ZHANG Su-wei](#)

作者单位: [河北工业大学, 天津, 300401](#)

刊名: [微电机](#) **ISTIC** **PKU**

英文刊名: [MICROMOTORS](#)

年, 卷(期): 2010, 43(8)

被引用次数: 0次

参考文献(6条)

1. 曹东杰, 韩峰, 任云燕 [单片机控制步进电机按S形曲线升降频设计](#) 2006(2)
2. 孙耀杰, 王丹, 高丽哲, 尹飞星 [步进电动机升降速曲线的设计](#) 2006(5)
3. 王晓明 [电动机的单片机控制](#) 2002
4. 魏衡华, 陈根杰, 张玉斌, 李隆 [基于CAN总线的步进电机控制系统的设计](#) 2009(1)
5. 李会艳, 胡荣强 [基于单片机的步进电机控制系统](#) 2007(11)
6. Two Phase Stepper Motor Control with the XC866, Users Manual Version 1.0 2004

相似文献(10条)

1. 学位论文 [赵铁彦](#) [步进电机的智能控制在自动聚焦中的应用研究](#) 2008

近年来, 作为视频监控核心设备的一体化摄像机已经随处可见, 其特点是小巧灵活、安装方便。因此, 本文以一体化摄像机为研究对象, 对其控制系统进行了设计和实现。首先对一体化摄像机控制系统中的自动聚焦技术, 步进电机结构原理和步进电机的控制技术等进行了研究。然后以单片机为主控制器提出了整个控制系统的硬件设计方案, 在此基础上对各个模块的电路进行了详细设计。接着介绍了步进电机软件控制开发的流程和部分模块的软件设计。

本文通过频域带通法对CCD输出的视频信号进行模拟带通滤波, 提取高频分量, 然后对高频分量进行简单运算来构建评价函数的一种方法, 采用频域带通法搭建自动对焦系统具有运算简单和成本低廉的优点。针对传统爬山算法存在的问题提出了改进模型, 该模型采用两次穷举搜索即可确定最佳成像位置, 第一次采用步长粗略搜索, 第二次用最小步长细扫。将改进的爬山算法用于基于单片机的自动对焦系统实验平台中, 使系统在保证对焦精度的情况下极大地提高了对焦速度。

在理论上研究和推导出两相混合步进电机的升降频曲线, 以及在实际运行中步进电机升降频理论的实现, 寻找出最速控制的方法, 并采用单片机软件升降频控制策略, 解决了点位控制中的失步和两相混合步进电机行程末端的机械冲击问题。利用细分控制技术保证了电机运行的平稳性, 并进行了波形分析和理论研究。

模糊控制模仿人的决策能力和推理功能, 又是一类智能控制的形式。本文研究了模糊控制理论及其软件实现。控制参数根据不同的偏差要求, 运用模糊PID控制而选择不同的参数, 从而改善各局部性能, 促使整体性能提高。通过Fuzzy-PID控制和常规PID控制进行了仿真对比。然后, 将模糊控制和PID控制结合成模糊PID控制, 用Matlab软件对该控制方法作了仿真。实验结果表明, 对于自动聚焦系统而言, 相比传统的PID控制, 智能模糊控制的响应具有较小的超调量和快速稳定能力, 其控制品质明显高于传统的PID控制性能指标。

2. 期刊论文 [曹东杰](#), [韩峰](#), [任云燕](#), [CAO Dong-jie](#), [HAN Feng](#), [REN Yun-yan](#) [单片机控制步进电机按S形曲线升降频设计](#) - [弹箭与制导学报](#) 2006, 26(2)

分析了步进电机升降频时发生失步、过冲的原因, 提出了一种单片机控制的步进电机按S形曲线升降频的方法。该方法能有效提高定位系统定位的快速性和准确性且不必改变系统的硬件; 同时可降低对步进电机功率的要求, 降低系统功耗。文中以一个二维角度定位系统为例介绍了该方法的应用实现, 试验结果表明同一系统在采用S形曲线升降频时的定位精度明显提高。

3. 学位论文 [王超](#) [直线步进电机控制系统设计](#) 2007

本文在直线步进电机的基本结构、原理与特性的基础上, 着重分析了电磁原理, 包括两相混合式直线步进电机的结构、磁链及工作原理。另外, 本文还推导了两相混合式步进电机的矩角特性、电压方程和转矩方程并由此建立了两相混合式步进电机的数学模型并分析了两相混合式直线步进电机的动态速特性。根据直线步进电机的结构与特性, 使用了恒力矩电流细分控制和升降频控制法, 采用细分控制技术来确保电机运行的平稳性并提高精度; 采用DSP软件降速控制策略来抑制直线步进电机行程末端的机械冲击问题。

根据两相混合式直线步进电机绕组的通电特点和脉冲步进控制方法, 采用以DSP为核心的控制单元, 以具有细分功能的两相步进电机驱动专用芯片PBL3717作为功率驱动器件, 结合电流峰值检测电路等, 对两相混合式直线步进电机提出了总体控制方案, 并分别就控制系统技术方案、硬件电路、控制软件设计等技术内容进行了详细的分析和研究。

该控制器能够实现直线步进电机的各种方式运行, 电机运行稳定, 满足设计要求。该直线步进电机驱动控制系统的研制, 可广泛应用于小功率直线运动装置和系统中, 同时利用该驱动系统可对直线脉冲电机的动态特性进行更深入一步的研究, 具有较好的应用前景。

4. 期刊论文 [唐春蓬](#), [王伯铭](#), [张丽](#), [TANG Chun-peng](#), [WANG Bo-ming](#), [ZHANG Li](#) [基于DSP的步进电机升降频控制](#) - [机械工程与自动化](#) 2007(6)

步进电机在启动和停止时容易发生失步和过冲的现象, 为提高步进电机系统的定位精度, 提出了一种按指数型加减速曲线控制步进电机升降频的方法, 取得了较好的实际效果。

5. 学位论文 [刘爱萍](#) [基于C8051F005单片机的两相混合式直线步进电机驱动系统的设计](#) 2007

本课题采用比普通单片机快十多倍的C8051F005单片机, 设计了基于C8051F005控制的直线步进电机驱动控制系统, 扩大了细分度和速度的可调节范围。

在控制策略上, 依据直线步进电机力—速特性和动力学方程, 推导了直线步进电机理想的升降速控制曲线, 实现了指数规律的升降速控制, 使系统具有良好的动态特性, 解决了点位控制中的失步和直线步进电机行程末端的机械冲击问题; 采用等幅均匀细分控制技术, 有效地克服直线步进电机低频振动, 提高了电机在中、低速运行时的性能, 提高了系统的分辨率, 减小了噪音; 采用具有恒流斩波功能的专用驱动芯片, 使直线步进电机绕组电流

恒定,电机运行更加平稳。

完成了C8051F005单片机和UC3717A结合的硬件电路设计,用汇编语言编写直线步进电机定位、匀速往返和加减速三种运行方式控制程序。实现了对直线步进电机的启停、定位、调速及正反向运行的控制。最后在SLPMU-025A样机上进行了测试,实验结果满足设计要求。

该驱动控制系统可做步进电机本体研发的配套设备,通过修改软件参数也可推广应用于其他步进电机的驱动控制,具有较好的应用前景。

6. 期刊论文 郑灼. 李兴根 单片机控制的步进电机升降频规律及实现 -微电机1999, 32(4)

在综合分析了步进电机矩频特性、具体负载的情况下,得出了步进电机升降频规律,并讨论了升降频曲线的计算方法。文中还给出了单片机控制步进电机系统中自动升降频的具体实现方法和程序框图,并介绍了此方法的实际应用。

7. 学位论文 周立夫 基于80C196KC微处理器的智能化天文望远镜控制系统设计 2005

目前,国内生产的天文望远镜,大多采用人工手动控制方式进行寻星跟踪,操作很不方便,且要求操作者具备较高的专业化知识。即使市场上存在的带控制系统的天文望远镜,也多是半自动方式。因此,研制智能型天文望远镜控制系统具有重要的现实意义和应用价值。针对目前天文望远镜自动寻星系统存在的不足,在熟悉天文望远镜相关背景知识的基础上,该文设计了一种基于计算机控制的智能化天文望远镜

(IntellectualAstronomicalTelescope)控制系统。系统工作于时角坐标系(即第一赤道坐标系,包括两个坐标轴,时角 t 和赤纬 δ),以步进电机作为执行机构,设计了系统硬件和控制软件。

硬件部分,论文在介绍控制电路的核心-80C196KC的特点和它的内部结构、串行通信、高输出器(HSO)、输入/输出端口(I/O)的基础上,设计了电源电路、键盘电路、连接单片机与PC机硬件电路的RS-232接口电路、执行机构,硬件设计中采用了抗干扰措施。

在硬件电路设计的基础上,论文编制了控制系统软件。软件分上位机运行的管理软件和下位机运行的控制软件,上位机软件在DELPHI编译环境下编写,包括操作界面、星空图数据库、模糊算法程序和与下位机的串行通信程序。下位机软件采用MCS-96汇编语言编写,包括主循环程序模块、串行通信模块、数据处理模块、点动处理模块、步进电机升降频调速模块、HSO软件定时器模块,实现望远镜的寻星、跟踪和串行通信的功能。

该系统实现高度智能化,能自动寻星、动态跟踪,人机交互界面友好,操作方便,并可实现大量实时信息的传输、过滤、处理、人机交互和显示,通过友好的人机界面提供给观测操作人员。

论文最后研制了一套智能化天文望远镜控制系统,调试结果表明,该系统能方便快捷定位天空星座,且具有准确度高、重复性好、可靠性高和操作方便简单等优点。系统可实际应用于配套天文望远镜中。

8. 期刊论文 王玉琳. 王强. WANG Yu-lin. WANG Qiang 步进电机的速度调节方法 -电机与控制应用2006, 33(1)

提出了步进电机的几种速度调节方法。脉冲频率的调节采用软件延时或硬件定时,升降频采用直线升降法、指数曲线升降法或抛物线升降法。给出了脉冲频率调节的实用程序,通过对步进电机矩频特性曲线的分析,得出了步进电机的升频表格,并提供了一个完整的软件升降频流程图。几种调速方法应用在多种数控机床上,提高了步进电机的定位精度,改善了电机转动的平稳性,加速了电机的升降过程。

9. 学位论文 庄树学 雷达天控器的设计 2003

雷达天控器系统是用来控制雷达天线的运动,实现对目标的搜索、截获、跟踪,并将天线的方位角和高低角数据传递给计算机。系统在本机和遥控操作方式下,可实现固定曲线及随机曲线的扫描,可用于各种天线、各种传感器的扫描、探测、目标跟踪,也可用于某些场合的定点监视、扫描监视、实时记录等。该系统主要由天线座和天控器两部分组成,天线座采用谐波传动技术,可直接与专用计算机对接,实现数字控制,扫描分辨率高,定位准确。天控器以高性能稳定可靠的8098单片机为核心,给出了驱动系统的硬、软件设计,配以高集成体的步进电机驱动器,完成系统的整体控制,实现各种功能的控制要求。在驱动电路的功放级采用了一种不同于传统驱动器的高低压驱动方式,改善了系统的高频性能,增加了步进电机带负载能力,以软件方法实现步进电机最佳升降控制规律,实现了步进电机的快速启、停控制。

10. 期刊论文 王玉琳. WANG Yu-lin 步进电机的速度调节方法 -中国科技信息2005(18)

提出了步进电机的几种速度调节方法。脉冲频率调节采用软件延时或硬件定时,升降频采用直线升降法、指数曲线升降法或抛物线升降法。通过对步进电机矩频特性的分析,得出了步进电机的升频表格,并提供了一个完整的软件升降频流程图。几种调速方法应用在多种数控机床上,提高了步进电机的定位精度,改善了电机转动的平稳性,加速了电机的升降过程。

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wdj201008024.aspx

授权使用: 华中科技大学(wfhzkdj), 授权号: 698486d9-5d1c-42ae-bf95-9e9a014f361a

下载时间: 2011年3月2日