

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.12.016

步进电机闭环控制系统的应用研究

夏斯权,周亦敏,杨一波,黄松
(上海理工大学公共实验中心,上海200093)

摘要:针对步进电机在实际开环运行过程中,由于惯性作用、速度突变或者突加负载的时候易发生失步的问题,对步进电机的数学模型和速度控制数学模型进行了分析研究,对步进电机控制方法和控制算法进行了归纳分析,提出了一种带有光电传感器检测角位置的步进电机闭环控制系统。算法方面采用模糊PID控制策略对步进电机的输出特性进行了优化控制,最大限度地复现了预设的角位移量运行;同时选用指数运行规律的速度控制方法对步进电机进行了有效控制,为了便于微控制器实时处理并对其速度控制规律进行了离散化操作。研究结果表明:闭环控制系统在速度和负载突变时能可靠地避免失步发生,提高系统的精度、可靠性、动态性能和鲁棒性。

关键词:步进电机;失步;光电传感器;模糊PID

中图分类号:TM383.6;G642.0

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)12-1446-05

Research and application of closed-loop control system for stepping motor

XIA Si-quan, ZHOU Yi-min, YANG Yi-bo, HUANG Song

(Public Experiment Center, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the actual running process of the stepping motor in the open loop state, the problem of step loss is caused by inertia, speed mutation or load. The mathematical model of stepping motor and the mathematical model of speed control were analyzed, the control method and the control algorithm of stepping motor were analyzed. A closed-loop control system with photoelectric sensor detection angle was proposed. The fuzzy PID control strategy was adopted to optimize the output characteristics of the stepping motor, the running of the angular displacement was reappeared farthest. At the same time, the speed control method of the index was used to control the stepping motor. In order to facilitate the real-time processing of the microcontroller, its speed control laws were discretized. The results show that the control system can reliably avoid losing step in speed and load mutation, it can improve the operating accuracy and reliability, dynamic performance and robust performance of the whole control system.

Key words: stepper motor; out of step; photoelectric sensor; fuzzy PID

0 引言

目前,步进电机的研发和制造技术已经相当成熟,现研究主要体现在以下方面^[1-2]:(1)小型化;(2)将位置传感器和变速齿轮等装置与电机集成一体化;(3)相数由两相向三相及五相变化。平常使用的步进电机通常是指一个集成系统,该系统包含一个步进电机和

一个驱动器。当集成系统中的驱动器接收了一个外部脉冲后就会驱动步进电机转过一个固定的步距角,不过在开环状态下转子定位精度不高,特别对突加负载或变速时易产生失步现象。

为了避免失步发生,许多国内外学者做了大量的研究工作。为了优化开环情况下步进电机的控制,文献[3]研究了运行曲线和传动刚度对步进电机开环控

制系统运动的影响,建立了控制系统数学模型,设计了一种基于正矢函数、高阶平滑的加减速曲线,并与常见的匀加减速曲线和指数型加减速曲线进行了比较仿真,仿真结果表明正矢型加减速曲线能够更好地抑制运动过程中的冲击,减小终点位置的残余振动幅度;文献[4]设计了一种步进电机计算动词 PID 控制器,整个控制性能好,但是整个计算规则和模型的建立所涉及的计算量大,不易推广;文献[5]研究了电流可控的步进电机细分驱动电路及方法,实现了五相步进电机的五相八十拍的细分驱动,步进角达到 0.09° ,提高了步进电机运行的稳定性,但是驱动技术成本较高;文献[6]通过对步进电机加减速控制方法的深入研究,提出了五段 S 型曲线的加减速方法,实现了 PLC 控制步进电机完成加减速控制,这种加减速算法能够保证速度、加速度的连续,有效抑制失步和过冲现象。

为了解决步进电机失步问题,提高系统的稳定性,本研究提出一种基于光电传感器检测角位置的步进电机闭环控制系统。

1 步进电机的数学模型

为了建立控制模型,首先需要明确步进电机的数学模型和状态方程^[7],步进电机数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L}(-Ri_a + K_m\omega\sin(N_r\theta) + v_a) \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L}(-Ri_b - K_m\omega\cos(N_r\theta) + v_b) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(-i_aK_m\sin(N_r\theta) + i_bK_m\cos(N_r\theta) - B\omega - \tau_l) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_a, i_b —步进电机 A、B 两相线圈的电流; ω, θ —步进电机的角速度和角位移; N_r —转子齿数; R, L —步进电机各相绕组的电阻和电感; v_a, v_b —步进电机两相上的电压; K_m —反电动势系数; J —转子的转动惯量; τ_l —负载转矩; B —步进电机摩擦系数。

由式(1)可知:步进电机是一个高阶的强耦合多变量非线性系统,如果对其直接分析求解,不易实现。为了使该非线性系统的每个控制量能够独立控制,使用状态变量法分析该系统,第一步先把式(1)在 dq 坐标下进行变换,目标是去除正余弦函数,然后选择步进电机的定子电流、角速度及其角位移为状态变量^[8],令:

$$x_1 = i_d, x_2 = i_q, x_3 = \omega, x_4 = \theta,$$

$$k_1 = \frac{R}{L}, k_2 = \frac{K_m}{L}, k_3 = \frac{K_m}{J},$$

$$k_4 = \frac{B}{J}, k_5 = N_r, u_1 = \frac{v_d}{L}, u_2 = \frac{v_q}{L}。$$

式中: v_d, v_q, i_d, i_q — dq 坐标下的电压和电流。

得到步进电机状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_1x_1 + k_5x_2x_3 + u_1 \\ \dot{x}_2 = -k_1x_2 + k_5x_1x_3 - k_2x_3 + u_2 \\ \dot{x}_3 = k_3x_2 + k_4x_3 \\ \dot{x}_4 = x_3 \end{cases} \quad (2)$$

2 步进电机的速度控制数学模型

步进电机的速度特性方程如下^[9]:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \beta \frac{d\theta}{dt} + K\theta + T_z = T_d \quad (3)$$

式中: β —阻尼系数; K — θ 相关的比例因子; T_z —阻力矩和; T_d —步进电机电磁转矩。

由式(3)可知系统的惯性扭矩 J_ε 为:

$$J_\varepsilon = J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_d - \beta \frac{d\theta}{dt} - K\theta - T_z \quad (4)$$

式中: ε —角加速度。

从式(4)中能够得出其惯性扭矩 J_ε 要低于最大的电磁扭矩 T_d 。处于提速的时刻,其转动的加速度 ε 要大些,以便可以提升系统的快速性。为了降低对系统的冲击, ε 不可以发生突变。

频率特性曲线如图 1 所示。

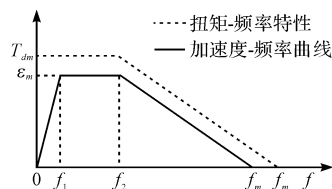


图 1 频率特性曲线

从图中可以看出: ε 从 0 增加到 f_1 是线性增加到最大值 ε_m 。等到 f_2 的时候, ε 以线性递减,在速度达到 f_m 时, ε 减小到 0。由于步进电机运行的脉冲频率与其转子的速度成正比,在步进电机不出现失步的条件下,其转子角加速度 ε 与驱动电机的频率 f 对时间 t 的微分成正比。对于图 1 中的每一段直线,都是一次方程,表达式为:

$$\varepsilon = \frac{df}{dt} = A - Bf \quad (5)$$

式中:A,B—常数。

假设转速由某个频率 f_0 准备向 f_1 转变,对式(5)

进行拉氏变换:

$$SF(S) - f_0 + BF(S) - \frac{A}{S} = 0 \quad (6)$$

即:

$$F(S) = \frac{A}{S(S+B)} + \frac{f_0}{(S+B)} \quad (7)$$

经过拉普拉斯反变换整理得:

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{A}{B} + \left(f_0 - \frac{A}{B}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= A\tau + (f_0 - A\tau)e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned} \quad (8)$$

令: $C = A\tau - f_0$; τ 为时间常数, $\tau = 1/B$ 得:

$$f(t) = f_0 + C(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (9)$$

3 控制策略与算法分析

3.1 指数运行规律速度控制离散化处理

对式(9)进行离散化操作。设 t 时刻为步进电机脉冲源发出第 n 个脉冲时刻:

$$\begin{aligned} n(t) &= \int_0^t f(t) dt = \int_0^t [f_0 + C(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})] dt = \\ &= (f_0 + C)t + \tau C(e^{-\frac{t}{\tau}} - 1) \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)能够得出, n 的整个表达式是 t 的一个超越方程。使用牛顿迭代法算出处理器送出第 n 个脉冲的时间点:

$$t_{k-1} = t_k - \frac{(f_0 + C)t_k + \tau C(e^{-\frac{t_k}{\tau}} - 1) - n}{f_0 + C - C \cdot e^{-\frac{t_k}{\tau}}} \quad (11)$$

将式(11)迭代若干次, 就可以获取精确的 $t(n)$, 然后把其代到式(9), 求得每个 n 对应的 $f(n)$ 。最后由频率 f 和时间 T 互为倒数的关系可以求得 $T(n)$ 。

设定步进电机的升速的初始频率为 f_0 , 运行最大的频率为 f_m (这里有 $f_m \gg f_0$), 通过一定时间后, 用 t_m 表示, 有 $f(t_m) = f_m$, 由式(9)可得:

$$f(t_m) = f_0 + C \quad (12)$$

所以: $C = f_m - f_0$, 故式(9)又可以表示为:

$$f(t) \approx f_0 + f_m(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (13)$$

当 $t = (2 \sim 3)\tau$ 时, $f(t) = f_m$ 。设定电机升速的序列脉冲为 N , 根据式(13)得到第 n 个脉冲的频率:

$$f(n) \approx f_0 + f_m(1 - e^{-\frac{n}{g}}) \quad (14)$$

式中: g — 经过 N 脉冲序列以后频率提升的快慢。

3.2 算法分析

本文把模糊控制与经典的 PID 控制相融合模型应用到步进电机闭环控制系统中, 目的就是利用各自

算法控制的优点对步进电机的输出特性实现优化控制^[10-12]。

具体控制结构框图如图 2 所示。

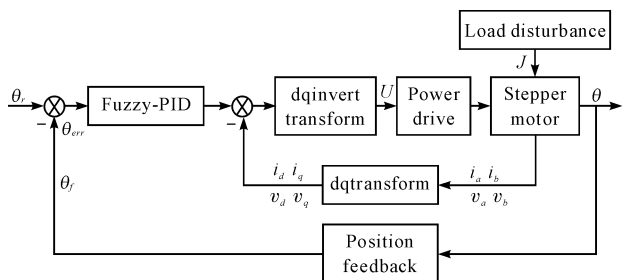


图 2 控制结构框图

其中: dq 变换是为了能够简化步进电机这个多变量的非线性系统。本研究主要针对步进电机的输出特性进行分析, 对应了步进电机转子的角位移变化, 模糊 PID 控制主要弥补位置反馈的角度误差。负载扰动 J 为了研究电机在外部负载变化时输出特性的变化趋势。

模糊 PID 控制是由传统 PID 控制与模糊化模块组成。其中模糊化模块主要完成对步进电机控制系统的状态变量进行模糊量化, 利用模糊控制的鲁棒性和非线性控制特点, 对步进电机控制系统的状态变量进行模糊化预处理^[13]。这里量化处理对象分别是步进电机转动角度偏差 θ_{Ei} 与偏差变化率 θ_{ECi} , 模糊偏差子集按负大、负中、负小、零、正小、正中、正大来划分, 即 $\theta_{Ei} = \theta_{ECi} = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 模糊论域量 $\theta_{err} = \theta_{err-c} = \{-7, -6, \dots, 5, 6, 7\}$, 经过经验分析与计算, 最后定制模糊规则。

为了得到精确的控制参数, 必须经过反模糊化操作, 常用的反模糊化操作有最大隶属度法、重心法和加权平均法。最大隶属度法容易丢失许多信息, 重心法对输入信号的微小变化, 输出也会发生变化^[14]。本研究选择加权平均法推解出精确的控制参数。算数表达式和模糊 PID 参数调整算式分别如下:

$$\begin{aligned} f_u - k_{p,i,d}(\theta_{Ei}, \theta_{ECi}) &= \\ \frac{\sum_{i=1}^3 u_i [(|\theta_{Ei}|, |\theta_{ECi}|) * k_{pi,ii,di}]}{\sum_{i=1}^3 u_i [|\theta_{Ei}|, |\theta_{ECi}|]} \end{aligned} \quad (15)$$

$$K_p = K_{po} + f_u - k_p(\theta_{Ei}, \theta_{ECi}) * k_1 \quad (16)$$

$$K_I = K_{io} + f_u - k_i(\theta_{Ei}, \theta_{ECi}) * k_2 \quad (17)$$

$$K_D = K_{do} + f_u - k_d(\theta_{Ei}, \theta_{ECi}) * k_3 \quad (18)$$

式中: $u_i(|\theta_{Ei}|)$ — 偏差的隶属度函数, $u_i(|\theta_{Ei}|, |\theta_{ECi}|) = \min(u_i(|\theta_{Ei}|), u_i(|\theta_{ECi}|))$; $k_{pi,ii,di}$ — 对应参数 K_p 、

K_I 、 K_D 在不同状态下的加权,其值可以从相关的模糊规则表中获取到; K_{po} 、 K_{io} 、 K_{do} — 预设参数; $f_u - k_p(\theta_{Ei}, \theta_{ECi})$ 、 $f_u - k_i(\theta_{Ei}, \theta_{ECi})$ 、 $f_u - k_d(\theta_{Ei}, \theta_{ECi})$ — 偏差和偏差变化率计算函数; k_1, k_2, k_3 — K_P 、 K_I 、 K_D 的比例因子。

4 实验及结果分析

本文通过 Matlab/Simulink 对控制系统进行仿真。步进电机参数如下^[15]: $R = 16 \Omega$ 、 $K_m = 0.142 \text{ Nm/AL} = 42 \text{ mH}$ 、 $N_r = 60$ 、 $J = 4.129 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $B = 0.0013 \text{ NM/rad/s}$ 。

开环控制输出速度仿真曲线如图 3 所示。

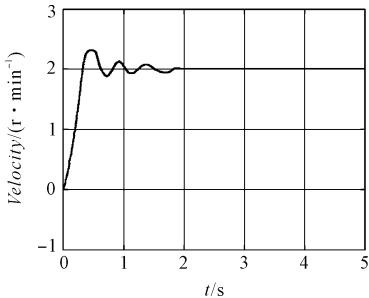


图 3 开环控制输出速度仿真曲线

PID 控制输出速度仿真曲线如图 4 所示。

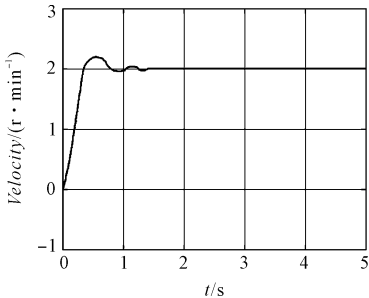


图 4 PID 控制输出速度仿真曲线

模糊 PID 控制输出速度仿真曲线如图 5 所示。

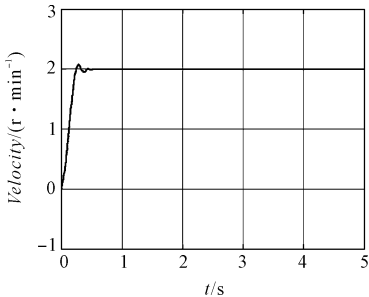


图 5 模糊 PID 控制输出速度仿真曲线

从图(3~5)可以看出:开环控制的步进电机速度输出曲线调节时间长,超调量较大,稳定性不好;PID 闭环控制的步进电机速度输出曲线相比开环控制的调节时间减小,但是超调量减小不是很明显,因而系统达

不到很好的稳定;模糊 PID 闭环控制的步进电机速度输出曲线与前两种对比,控制效果明显改善,不论是调节时间还是超调量都变少了,稳定性能较好。

PID 控制负载变化输出速度仿真曲线如图 6 所示。

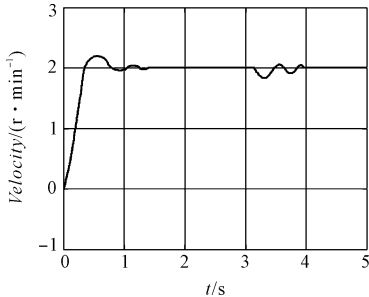


图 6 PID 控制负载变化输出速度仿真曲线

模糊 PID 控制负载变化输出速度仿真曲线如图 7 所示。

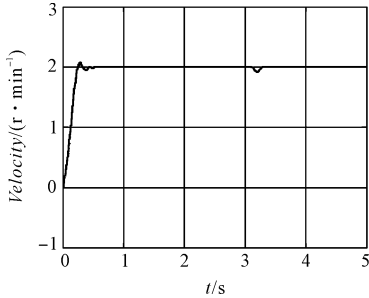


图 7 模糊 PID 控制负载变化输出速度仿真曲线

从图(6~7)可以看出:在 3.2 s 时刻增加外负载扰动,模糊 PID 闭环控制的步进电机在外增加负载扰动时的响应曲线和 PID 控制相比,电机可以快速的恢复到原设定的转速,平稳调节时间短,控制平稳效果好于前者。

为了说明闭环控制步进电机的可靠性,对步进电机转子位置在开环运行和闭环运行两种方式下进行分析。

开环运行的转子位置曲线如图 8 所示。

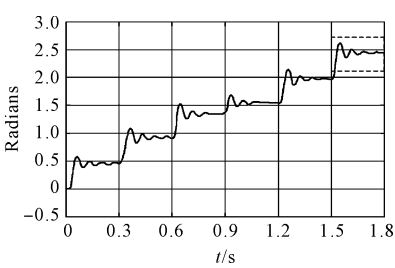


图 8 开环控制转子位置曲线

加入模糊 PID 控制带有位置检测的闭环运行的转子位置曲线如图 9 所示。

仿真时设定转子位置为 2.75 rad,从仿真结果可

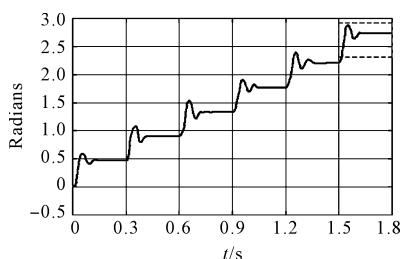


图9 闭环控制转子位置曲线

以看出,开环运行的步进电机出现了明显的失步,没有达到设定的位置,而模糊 PID 闭环控制的步进电机可以较为平稳地运行到设定的位置,避免失步发生。

最后使用实验室中带有步进电机控制系统的机械手控制平台去验证控制策略的可靠性。经过多次调试,试验结果表明:控制系统能够可靠的测出给定的角位移量,没有失步发生,步进电机运行平稳,证明该控制方法对机械手控制平台有效。

5 结束语

本文提出对步进电机进行闭环控制,使用指数运行规律对步进电机进行速度控制,同时加入模糊 PID 控制算法。

经过多次仿真和实验,结果表明:加入模糊 PID 控制的步进电机闭环控制系统相比于传统的 PID 闭环控制系统和开环运行的步进电机控制系统,调节时间缩短,超调量变小,能够可靠地稳定运行;在外加负载扰动突变的情况下,系统可以快速恢复到稳定点,避免了步进电机发生失步现象,有效地提高了步进电机控制系统的动态性能,并且实践应用效果较好,综合说明了控制系统的鲁棒性较强,具有一定的实用价值。

参考文献 (References):

[1] 王自强. 步进电机应用技术[M]. 北京:科学出版社, 2010.

- [2] 蒋 壮,高 平,洪浙丰. 小型步进电机选型应用研究[J]. 机电工程技术,2016,45(6):135-137.
- [3] 周 黎,杨世洪,高晓东. 步进电机控制系统建模及运行曲线仿真[J]. 电机与控制学报,2011,15(1):20-25.
- [4] 郑雪钦. 步进电机计算动词 PID 控制系统的设计[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2015,54(4):518-522.
- [5] 马秀娟,张志豪,王学义,等. 基于 FPGA 的步进电机控流细分驱动系统[J]. 控制工程,2017,24(1):16-20.
- [6] 樊留强,惠延波,王 莉. 步进电机加减速控制新方法的研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(3):36-39.
- [7] KENJO T, SUGAWARA A. Stepping motor and their micro-processor control[J]. Clarendon press,1984,21(5):615.
- [8] 蒋佳晨,黎 英,闫亚超. 基于变结构理论的步进电机无传感器控制[J]. 控制工程,2016,23(1):18-23.
- [9] 徐笠明. 步进电机速度控制的研究与实现[J]. 工矿自动化,2007(2):82-85.
- [10] 胡维庆. 步进电机细分驱动系统设计[J]. 轻工机械, 2016,34(3):57-60.
- [11] SINTHIPSOMBOON K, HUNSACHAROONROJ I, KHE-DARI J, et al. A Hybrid of fuzzy and fuzzy self-tuning PID controller for servo electro-hydraulic system[J]. Proceedings of Sidney,2011(16):220-225.
- [12] 孙 红,吴钱忠,尹鹏鸿,等. 无线高精度位置跟随监控系统研究[J]. 光电工程,2013,40(8):7-12.
- [13] NITHYASREE M, KANDAASAY K V. A generic PID controller based on ARM processor[J]. International conference on modeling optimization and computing, 2012,38(4):1044-1049.
- [14] 刘金坤. 智能控制[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [15] SHAN M B N, HUSAIN A R, AHMAD M N. Static sliding mode controller for permanent magnet stepper motor with disturbances[C]. International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering, Pahang: IEEE,2011.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

夏斯权,周亦敏,杨一波,等. 步进电机闭环控制系统的研究与应用[J]. 机电工程,2017,34(12):1446-1450.

XIA si-quan, ZHOU Yi-min, YANG Yi-bo, et al. Research and application of closed-loop control system for stepping motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(12):1446-1450.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>