

# 一种基于分形修正PID算法的弹上舵机控制器

万彦辉<sup>1,3</sup>, 李存志<sup>2</sup>, 郭 华<sup>1</sup>, 侯伟波<sup>2</sup>,  
裴丽霞<sup>2</sup>, 王 房<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072; 2. 西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071; 3. 航天科技集团 16 所, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 针对某型号弹上舵机采用的小型稀土力矩电机与谐波减速器的组合结构方案, 设计了一种基于分形几何度量变化率特征的增量比例-积分-微分控制器. 该控制器考虑了谐波传动随速度波动和低阻尼特点, 以提高舵机系统控制品质为目标, 从传动过程在一定的尺度范围内具有参数自相似性的特征出发, 利用了线性模型与分形模型所表达的规律性之间存在的固有互补性. 用反馈信号短时分形维数估计舵机实际转角与电机驱动力之间的相背离程度, 并利用这个估计函数修正比例-积分-微分输出值. 实验表明, 该舵机系统对 25°阶跃响应时常数小于 100 ms, 20 Hz, ±15°振幅条件下的频率响应相位延时小于 20°, 定位精度优于 0.06°, 半振荡次数小于两次.

**关键词:** 弹上舵机; 谐波减速器; 短时分形维数; 比例-积分-微分控制

**中图分类号:** V249.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2007)01-0145-04

## A steering gear system controller in missiles based on the fractal modified PID algorithm

WAN Yan-hui<sup>1,3</sup>, LI Cun-zhi<sup>2</sup>, GUO Hua<sup>1</sup>, HOU Wei-bo<sup>2</sup>,  
PEI Li-xia<sup>2</sup>, WANG Fang<sup>2</sup>

(1. Dept. of Automatic Control, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China; 2. School of Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 3. China Aerospace Times Electronics Corporation, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Aiming at the steering gear machinery in some missiles, and adopting the combined configuration of a small rare earth torque motor and a harmonic drive reducer, the increasing PID (Proportional-Integral-Derivative) control system based on the rate character of fractal geometry is designed. This control system has some advantages as follows: considering the change with velocity and small damp of harmonic drive, improving the ability of the control system, adopting the complement between linear model and fractal model, using Short-time Fractal Dimension of the feedback signal to attain the difference between the real angle and the ideal angle, and consulting the change above to modify the output of PID. Experimental shows that the 25°rank-jump response constant of this gear machine system is less than 100 ms, and with 20 Hz and amplitude of ±1.5°, the frequency response phase delay is less than 20°, and orientation precision is higher than 0.06°.

**Key Words:** steering gear machinery in the missile; harmonic drive reducer; short-time fractal dimension; PID control

随着高性能稀土电机技术和高能电池的发展, 精确制导武器上高性能舵机系统的研究被重视, 各种新型的电机伺服系统的控制技术不断出现. 航天某所某型号研制项目, 采用了小型稀土力矩电机与谐波减速器的

收稿日期: 2006-05-25

基金项目: 航天科技集团 16 所资助项目(O0505B12)

作者简介: 万彦辉(1969-), 男, 航天科技集团 16 所研究员, 西北工业大学博士研究生.

组合方案. 谐波减速器由于结构方面的问题,同时具有一定的传动死区<sup>[1]</sup>;在较高的指标体系下,不同转角位置的传动摩擦具有严重非均匀性;而且武器飞行过程中舵机转动负载受外界条件影响是时变的,这使得被控对象的精细模型很难建立,模型参数也很难通过实验测试方法精确确定.因而基于模型的控制,如传统比例-积分-微分(PID)控制、模糊控制等,很难提高系统的指标,这为高性能廉价舵机系统的研制提出很大的挑战<sup>[2~4]</sup>.

在前期大量观察研究中发现,由于谐波传动固有特性,舵机系统的运行过程在一定尺度范围内,运行速度和位置轨迹曲线结构具有明显的不规则形状;其幅值有界且不规则振荡,而且振荡是稳定的;在控制周期区域内轨迹片断是不重复的;曲线的精细结构不仅表现为一维光滑流形,片断之间也具有明显的自相似性.这一方面来源于机电系统的固有惯性,另一方面主要来自谐波传动的低阻尼和随速度波动的特性.

分形模型对复杂对象控制的广泛适用性,是通过改变模型的特征参数来实现的.笔者根据分形模型的自相似性表达式,设计了一种带分形修正函数的 PID 控制器.

## 1 控制器结构、问题的提出及其解决思路

舵机控制器系统控制分为 3 段进行,设  $E_{\max}$  和  $E_{\min}$  为偏差的最大和最小阈值,在偏差  $E > E_{\max}$  时,系统快速性是控制的关键指标,算法输出最大常量,使得偏差能够尽快缩小;在  $E_{\min} < E < E_{\max}$  时,按经典的增量 PID 算法控制运行,因为此时传动系统的非线性因素不足以影响到系统精度;当  $E < E_{\min}$  时,定位精度成为关键指标,以分形修正函数  $f(a)$  修正 PID 算法结果.这里重点讨论最后一种情况.

设  $g_i$  是数字化的电位器反馈信号的时间序列,  $s_i$  和  $n_i$  分别表示信号和加性噪声的时间序列

$$g_i = s_i + n_i \quad (1)$$

实际控制过程中,式(1)中的  $g_i$  是惟一能得到的反馈信号数据.  $s_i$  和  $n_i$  是不可分离的.  $n_i$  原理上虽然包含有各种电路噪声,但可以通过硬软件相结合的方法加以滤除.因此,加入算法运算的噪声项,主要还是由传动系统非线性带来的结构噪声.结构噪声本质上是一种控制误差,是由于谐波齿轮在功放驱动下,输出轴的实际转速/转角与电机驱动力之间的相背离的那一部分,具有很强的随机性和不可预知性.因此式(1)就可以理解成为:采样  $g_i$  是由理想输出  $s_i$  和结构误差  $n_i$  组成的.在高精度指标的转速/转角控制要求下,现有的算法都不能理想地对这部分结构误差进行有效辨识并给出合理的解决方案.

经过理论分析,作出如下假设并制定出相应的控制策略:①假定电机不存在结构噪声;②电机具有一定时常数;③大减速比的谐波齿轮是非线性摩擦重要来源,且输出轴非线性符合分形自相似性;④由于输出轴在不同位置摩擦力矩不同且具有随机性,使得输出曲线的分维数随控制状态变化;⑤变化了的分维数反映了实际转速/转角与电机驱动力之间的相背离的程度;⑥实时计算分维数,得到输出轴位置曲线几何度量变化率  $a$ ,用  $a$  构造修正函数  $f(a)$  来校正 PID 控制器的输出.

## 2 算法原理

对于在实际获得应用的分形,一个很重要的性质是它的自相似性.对于分形曲线,该性质可以表示为

$$D(r\Delta) = r^{(2-F_D)} D(\Delta) \quad (2)$$

其中  $D(\Delta)$  为分形曲线的长度,  $\Delta$  为度量时使用的单位长度,  $r$  为尺度因子 ( $0 \leq r \leq 1$ ),  $F_D$  为曲线的分维数.式(2)的解为

$$D(\Delta) = a \Delta^{(2-F_D)} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,分形模型具有两个重要的特征:一是研究对象的度量值与度量尺度之间的指数律关系,实际中度量值和度量尺度之间的关系相对于指数律关系的偏离程度称为分形模型拟合误差,它表明实际数据是否具有空间结构的自相似性及能否用分形模型加以描述;二是研究对象的分维数,它描述了曲线的粗糙程度.这两个特征是相互独立的.

式(3)有一个与分形模型有关的特征,即比例系数  $a$ . 对于一个分形曲线,可将比例系数  $a$  表示为

$$a = (D(\Delta_2) - D(\Delta_1)) / (\Delta_2^{(2-F_D)} - \Delta_1^{(2-F_D)}) \quad (4)$$

其中  $\Delta_1, \Delta_2$  表示不同大小测量尺度,  $D(\Delta_1), D(\Delta_2)$  表示对应尺度下测量得到的曲线长度. 由此可看出, 比例系数  $a$  表示几何度量随度量尺度的变化率特征, 称之为几何度量变化率特征参数. 对于一个给定的理想分形曲线, 该系数为一常数, 但如果在分形曲面中嵌入一个非分形的对象(例如: 结构非线性引起的波动), 则比例系数  $a$  将不再是常数, 而是一个随非分形对象出现的变化的量. 它的变化反映了实际转速 / 转角与电机驱动力之间相背离的程度. 式(4)中分形维数  $F_D$  是未知参数, 下面根据函数网格分形方法得到  $F_D$ .

### 3 信号短时分形维数的计算

信号短时分形分析方法常用于语音信号的滤波处理<sup>[5,6]</sup>, 这里将其应用于机电控制系统的设计中. 取  $\Delta_2 = 2\Delta_1 = 2\Delta$ . 对于反馈信号的采样序列  $g_i, i = 0, 1, 2, \dots, N$ , 令

$$D(\Delta) = \sum_{i=0}^{N-1} |g_i - g_{i+1}| \quad (5)$$

$$D(2\Delta) = \sum_{i=0}^{(N-1)/2} (\max\{g_{2i-1}, g_{2i}, \dots, g_{2i+1}\} - \min\{g_{2i-1}, g_{2i}, \dots, g_{2i+1}\}) \quad (6)$$

$$N(\Delta) = D(\Delta)/\Delta \quad , \quad N(2\Delta) = D(2\Delta)/(2\Delta) \quad (7)$$

其中  $\Delta$  表示采样间隔,  $N(\Delta)$  及  $N(2\Delta)$  分别表示用  $\Delta$  和  $2\Delta$  正方形网络覆盖采样信号所需要的格子数. 由网格维数的定义, 信号短时分形维数为

$$F_D = (\ln N(\Delta) - \ln N(2\Delta)) / \ln 2 = 1 + \log_2(D(\Delta)/D(2\Delta)) \quad (8)$$

短时分形维数动态地表达了信号在不同时段内的波动程度(即结构噪声水平). 在式(4)中, 参数  $a$  根据式(8)确定的分维数、也就是根据输入信号中结构噪声大小动态地调整, 即  $a$  应具有自适应能力. 因此, 采用信号的短时分形维数作为特征来控制  $a$  参数, 并用  $a$  参数构造的修正函数  $f(a)$  校正 PWM 输出值, 就能使基于 PID 算法的控制器具有一定的自适应能力, 从而有效地克服结构噪声, 提高舵机控制器的品质.

### 4 增量 PID 算法与修正项系数自寻优判决函数

将经过二阶压控滤波的舵机电位器反馈的模拟信号用采样频率为 1MHz 的 A/D 转换器量化. 考虑到舵机系统时常数, 同时又兼顾信号处理器 TMS320C2812F (150 MHz 主频运行) 数字信号处理器(DSP)的计算量和信号  $g_i$  的时变性, 控制周期设置在 2 ms. 一个调宽斩波 PWM(PWM 周期为 8 kHz)的计算控制周期内, 采样次数为 2000 次. 每 100 个采样点作为一帧, 将帧间采样点做去极大、极小值的算术平均滤波, 因此, 共有 20 个处理后的反馈数据作为一场, 由式(5)~(8)进行短时分形维数  $F_D$  计算, 再由式(4)得到  $a$  值. 这里使用的增量 PID 算法基本表达式为

$$P_k = P_{k-1} + \Delta P_k \quad (9)$$

$$\Delta P_k = f(a) \cdot \{K_p[E_k - E_{k-1}] + K_i \cdot E_k + K_d[E_k - 2E_{k-1} + E_{k-2}]\} \quad (10)$$

其中  $P_k$  为 DSP 输出的调宽 PWM 信号,  $E_k$  为第  $k$  场采样时的偏差,  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,  $K_d$  为微分系数.  $f(a) = \beta(E_k/R)^a$  为修正函数, 式中  $R$  为弹上计算机通过控制器局域网(CAN)总线给出的设定值. 该修正函数与归一化偏差  $E_k/R$  和参数  $\beta, a$  之间的关系是: 当  $a < 1$  时, 修正函数随偏差  $E_k$  的增大递增较快, 可使控制规则中  $E_k$  的作用相对加强, 当  $a > 1$  时, 修正函数随  $E_k$  的增大递增较慢, 从而加强了控制规则中  $E_k$  变化率的作用,  $a$  值越大, 其作用越强. 参数  $\beta$  的取值与  $a$  无关, 但要求满足在偏差较大时过程响应较快.

为实现系统的控制规则的自调整 and 自完善, 提高控制品质, 研究了一种修正项系数  $\beta$  的整定方法. 取

$$J = \sum_{k=1}^N k |E_k| \quad (11)$$

为判决函数. 整定过程是针对被控过程的运行状态, 根据判决函数值的大小不断对因子  $\beta$  进行修正, 使判决函数取值逐步减小, 直到系统的控制性能符合指标要求. 实际操作时, 先选择一个大于 1 的初始值  $\beta$ , 得到一

个初始控制规则来进行控制,然后对系统的响应过程连续采样,即可得到判决函数  $J$  的值。 $\beta$  反复取值,运算控制,判断,最终得到满意的  $\beta$  值。从而完成控制器修正函数  $f(a)$  的参数  $\beta$  的整定。

## 5 试验结果

舵机系统所采用的力矩电机传递函数为  $G(s) = 31.7899/(0.01s + 1)$ ;谐波减速器传递函数为  $G(s) = 1/(190s)$ 。使用上述控制器,联调实验表明,该舵机系统对  $25^\circ$  阶跃响应时常数小于  $100\text{ ms}$ ,  $20\text{ Hz}$ ,  $\pm 15^\circ$  振幅的频率响应相位延时小于  $20^\circ$ ,定位精度优于  $0.06^\circ$ ,半振荡次数小于两次。

系统中驱动器件使用的是小型直流力矩电动机和谐波减速器的组合。由于摩擦力矩的影响,多数控制方法将会使实际位置曲线产生失真。采用文中的控制方案,图 1~3 中,随着输入正弦信号 ( $y = A \sin(\omega t)$ ,  $A = 1.5^\circ$ ) 频率的增强,PWM 调制幅度显著增大,测量得到的输出波形依然平滑,目测几乎观测不到失真。计算机数值分析可知其相移最大不超过  $10^\circ$ 。

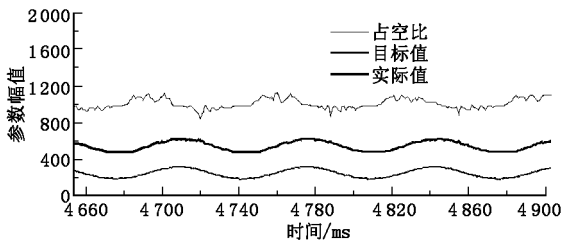


图 1 1 Hz,  $\pm 1.5^\circ$  振幅的角度-时间曲线

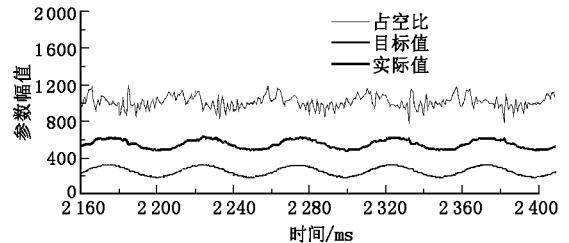


图 2 10 Hz,  $\pm 1.5^\circ$  振幅的角度-时间曲线

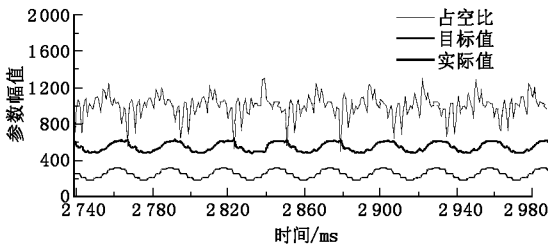


图 3 20 Hz,  $\pm 1.5^\circ$  振幅的角度-时间曲线

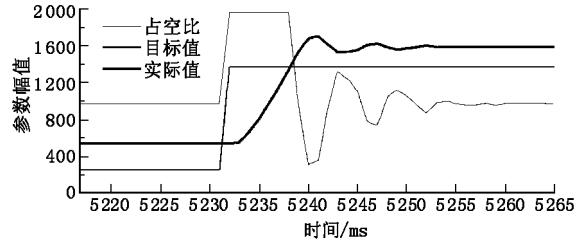


图 4  $25^\circ$  阶跃的角度-时间曲线

舵机系统不仅要求在超低速下具有良好的位置稳定性,而且要求位置阶跃时有快速的跟踪性能。该系统位置阶跃响应如图 4 所示。可以看出,由于控制系统采用了开环/闭环加上分形修正算法相结合的控制策略,舵机位置建立时间小于  $100\text{ ms}$ ;位置稳定性也很好。 $25^\circ$  阶跃仅需要一个半周期就可以达到稳定。这表明文中的控制方法针对性强,设计合理。

### 参考文献:

- [1] 刘延杰,孙立宁. 谐波驱动并联机器人的加速度反馈抑振控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36(3):281-285.
- [2] Guo Runqiu, Lin Xiaochun, Bao Jianyue. Study of the Automatic Rotary Control System Based on Fuzzy Control[J]. Journal of Xidian University,1999,26(4):416-419.
- [3] Bao Hong, Duan Baoyan, Yan Li. Output Feedback Control of the Nonlinear Various Structure Uncertain System: Its Application to Fuzzy Adaption[J]. Journal of Xidian University, 2004,31(1):39-42.
- [4] Guo Runqiu, Wang Xiaohong. The Research on the Immune Feedback Mechanism[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(6): 717-721.
- [5] Melin P, Castillo O. A New Approach for Quality Control of Sound Speakers Combining Type-2 Fuzzy Logic and the Fractal Dimension[C]//International Conference of NAFIPS. Chicage: NAFIPS, 2003: 38-43.
- [6] 赵立业,周百令. 分形滤波在高精度海洋重力仪数据处理中的应用研究[J]. 中国惯性技术学报,2004,12(3):32-36.