

文章编号 1004-924X(2003)04-0390-04

# 电机波动力矩的重复学习控制补偿

陈娟<sup>1,2</sup>, 张淑梅<sup>1</sup>, 黄艳秋<sup>2</sup>, 张袅娜<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2. 长春工业大学 电气与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**为较好地解决伺服系统的低速抖动问题,研究了重复学习控制方法抑制电机波动力矩等非线性干扰,以提高系统的低速平稳性问题。在讨论电机波动力矩成因的基础上,重点研究了电机齿槽效应引起的电机力矩波动的理论模型、量值大小等问题,并在模型转台上进行了实验测试。实验结果表明了理论分析的正确性,并证明了电机波动力矩的周期性。根据上述结论,引用重复学习控制来抑制这种周期性干扰,介绍了带有低通滤波器和前馈滤波器的改进型重复学习控制器的设计方法,设计了实际的控制系统。对采用重复学习控制的伺服系统进行正弦跟踪实验测试,结果说明,重复学习控制较好地补偿了低速或零速附近的系统死区特性,系统的跟踪误差最大值为 0.72。

**关键词:**低速抖动;电机波动力矩;齿槽效应;重复学习控制

中图分类号:TH743 文献标识码:A

## Repetitive study control to compensate motor moment fluctuation

CHEN Juan<sup>1,2</sup>, ZHANG Shu-mei<sup>1</sup>, HUANG Yan-qiu<sup>2</sup>, ZHANG Niao-na<sup>2</sup>

(1. *The Optoelectronic Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;*

2. *The Institute of Electronics and Electricity, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)*

**Abstract:** To solve the jitter problem of a servo system at low speed, the repetitive control method is studied to check the non-linear disturbances such as motor moment fluctuation for improving the stability of low-speed. After analyzing the reason of motor moment fluctuation, the theoretical model and quantity of the fluctuation caused by the motor's alveolus effect are discussed, and some experiments are made in the practical model system. The results show that the theoretical analysis is correct, and the fluctuation is periodical. The repetitive control law is introduced to check the periodical fluctuation. The design method of this controller and the control system are also discussed. The sine tracking experiments for the speed loop with repetitive controller were conducted. The results show that the repetitive control compensates the system's dead-zone very well at low speed or zero-crossing, and the maximum tracking error is 0.72.

**Key words:** low-speed jitter; fluctuating moment; alveolus effects; repetitive learning control

收稿日期:2003-01-16;修订日期:2003-06-19

基金项目:吉林省科技厅基础研究资助课题

# 1 引 言

当伺服系统运转速度低于某一临界值时,其运动速度呈脉动现象,称为低速抖动或低速爬行。当伺服系统出现低速爬行时,会影响系统的正常工作,使系统的低速性能受到损害,因此如何消除低速抖动一直是伺服系统研究的主要课题之一。影响伺服系统低速特性的因素有很多<sup>[1]</sup>,如系统的测角元件分辨率;测速元件灵敏度;系统采样/量化分辨率和 A/D 卡的分辨率;摩擦力矩;耦合力矩;电机的波动力矩以及风阻力矩等。研究表明<sup>[2]</sup>,摩擦力矩和电机波动力矩是引起伺服系统低速抖动或爬行的主要原因。文献[3]研究了基于摩擦力矩模型的自适应控制方法来补偿伺服系统的低速抖动。考虑到无论高速还是低速,电机波动力矩对伺服系统速度平稳性都有影响<sup>[4]</sup>,而低速时电机波动力矩的影响更不能忽略,为此以讨论电机波动力矩对伺服系统的低速抖动的影响为主要内容,进行了直流力矩电机的波动力矩干扰的理论分析与实验测试。由于在匀速运动状态下,电机波动力矩表现为周期性干扰,且当伺服系统工作在多位置连续定位状态下,输入信号也具有周期性,根据这一周期性特点,采用了重复学习控制的方法来提高伺服系统的低速平稳性。它对电机波动力矩以及伺服系统中存在的静、动摩擦力、粘滞摩擦力、执行机构饱合等非线性特性有很强的抑制作用,使系统具有很强的学习特性。

# 2 电机波动力矩实验测试

从结构上讲,电机波动力矩主要包括齿槽波动力矩和电磁波动力矩两种。齿槽波动力矩是定子永磁体与转子齿槽相互作用而引起的,同转子电流大小和方向无关;电磁波动力矩是由定子永磁体和转子电流的相互作用产生的。理论分析表明<sup>[1-4]</sup>,电机波动力矩主要来自齿槽效应。假设电机以角速度  $\omega$  匀速旋转,齿槽效应引起的扰动力矩是角位置  $\theta$  的函数,当角速度是常值时,扰动力矩可近似认为是时间的函数。设  $f$  是齿槽效应引起的扰动力矩频率, $Z$  是电机转子齿槽数,并假设其高次谐波可以忽略,则用基波近似的扰动力矩为  $M_d(t)$  <sup>[5]</sup>

$$M_d(t) = A \sin zt, \tag{1}$$

其中

$$z = 2 f = \omega Z$$

$$f = Z \cdot \omega / 2\pi$$

$$A = \frac{1}{\omega} \int_0^{\omega} (M_d(t) \sin zt) dt$$

为了分析电机波动力矩对伺服系统速度平稳性的影响,对模型转台进行了实验测试。首先定性地测量出电机的齿槽效应。模型转台方位直流力矩电机(ZLM90),其直径为 0.65 m 电枢铁心的圆周上,冲有 281 个齿槽;定子有 28 个磁钢,即 14 对极,因此电机每匀速转动一周时,由于齿槽效应,其输出力矩应波动变化 281 次,即在 15° 的范围内应变化 10 次左右。测量时,电机工作在发电机状态,使转台徐徐转动,则在电机两端将有电压  $V$  输出,电压的幅值和电机转动速度有关,其形状即为齿槽效应。将电压  $V$  用 816A/D 卡读出送入计算机进行数据处理,结果见图 1。正如理论上的分析结果,齿槽力矩波动是位置  $\theta$  的函数,且和齿槽数有关。因此有必要对其进行定量测量。

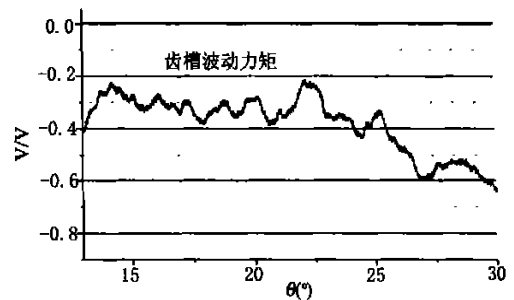


图 1 齿槽波动力矩定性测试

Fig.1 Alveolus disturbance measurement in quantity

因齿槽力矩波动是位置的函数,所以采用了以下测试方法:用稳压电源给转台电机直接加固定电压信号(15 V),在电机堵转的情况下,测量转台某一点的电机输出力矩(kgm),采用固定力臂测量输出力的方法。压力计采用 RS 公司生产的 250 kg 压力传感器,该压力计由 12 V 稳压电源驱动,输入为压力,输出为电压。该电压由 816A/D 卡以码的形式读出,标定一个码代表 1.77 kg,力臂长 0.64 m,则力矩  $F$  等于压力乘以力臂长,在转台上每半个齿槽(0.64°)测量力矩一

次(每测量一次取 3 000 个采样点)。如图 2 是测量结果,横轴是角度,可以看到力矩波动最大值约 1.695 kgm,而标准偏差  $SD(SD = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)$ ,  $n$  为采样点数,  $\bar{x}$  为均值 0.768 kgm。实验结果表明,齿槽效应引起的电机力矩波动具有周期特性,与式(1)是相符的。

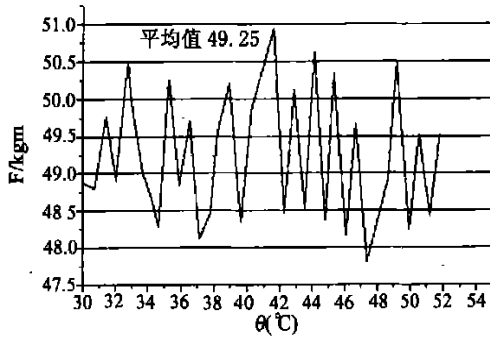


图 2 齿槽力矩为主的电机力矩波动测试图  
Fig. 2 Test of the motor moment wave mainly based on the alveolus disturbance

### 3 重复学习控制补偿低速干扰力矩

伺服系统在跟踪低速或不断穿越零点的周期信号时,由于电机波动力矩干扰或者摩擦力矩等非线性干扰的存在,造成了较大的系统跟踪误差。因电机的波动力矩表现为周期性干扰,且当伺服系统工作在多位置连续定位状态下,输入信号也具有周期性,因此根据这一周期性特点,学习控制系统如图 3 所示<sup>[6]</sup>,图中  $G(s)$  是被控对象的传递函数。首先在延时环节前加一个低通滤波器  $Q(s)$ ,以改善并保证闭环系统的稳定性。但低通滤波器的加入降低了系统的快速跟踪性能,为克服这一缺点,引入了  $b(s)$ 、 $a(s)$  前馈滤波器,它们的输入是误差信号,输出分别加到低通滤波器和延时环节  $e^{-Ls}$  的输出端。

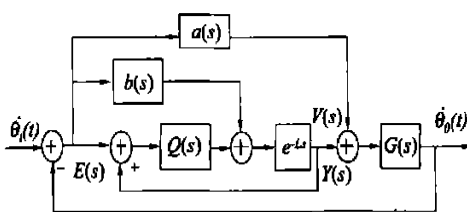


图 3 改进型重复控制原理图  
Fig. 3 Improved principle diagram of repetitive control

新的延时环节为  $Q(s) e^{-Ls}$ ,改进型重复学习控制器的稳定条件<sup>[4]</sup>为,

$$\left\| Q(s) \left\{ 1 - \frac{b(s) Q(s) G(s)}{Q(s) [1 + a(s) G(s)]} \right\} \right\| < 1, \quad (2)$$

$Q(s)$  的选择应满足在低频段其幅值接近 1 以保证跟踪精度,高频时接近 0 以满足系统稳定性。实际信号的低频成份相当丰富,因此,  $Q(s)$  可以具有以下形式

$$Q(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} \quad T_1 > 0, \quad (3)$$

或

$$Q(s) = \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1} \quad T_1 > T_2 > 0, \quad (4)$$

可以证明<sup>[3]</sup>,选择合适的  $Q(s)$  可以保证系统在重复学习控制过程中,高精度的跟踪输入指令,跟踪误差随学习周期快速收敛至零。

### 4 实验研究

实验研究以模型转台伺服系统为基础,其各种工作方式是由一台工业控制计算机(简称工控机)设定的,即可以完成对转台位置、速度、伺服状态的设定。工控机控制 PCL836 产生 PWM 输出,又和数据采集接口相连,构成了完整的转台驱动与数据采集系统。计算机的参与,不但提高了系统的测试能力,也保证了测试数据的准确可靠,其系统组成如图 4 所示。

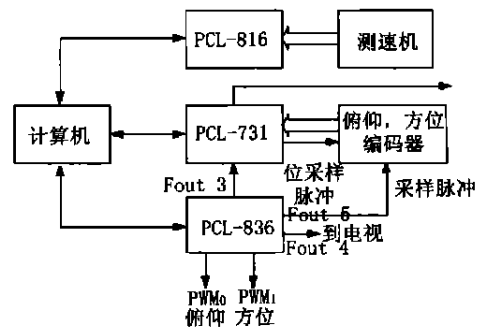


图 4 计算机控制与数据采集系统  
Fig. 4 System of computer control and data sampling

需对采用重复学习控制的速度回路进行正弦跟踪特性测试。测试条件:速度回路给定正弦信号  $r(t) = 50 \sin 10t$ , 根据图3,  $a(s) = 100$ ,  $b(s) = 70$ 。图5是具有重复学习控制的速度输出, 横轴是采样数  $n$ 。为进行补偿方法的比较, 在相同输入的条件下还进行了PID控制的跟踪特性测试, 图6是PID控制结果。可以看到, 同样的输入信号, PID补偿时, 系统输出严重失真, 而重复学习控制较好地补偿了零速附近的系统死区特性。图6中, 在前三个学习周期, 曲线不够平滑, 第四个周期则大有改善, 此时的系统的跟踪误差最大值为0.72。

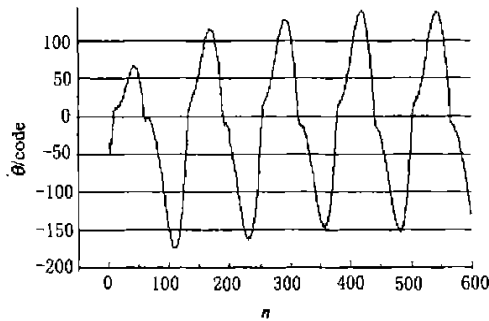


图5 PID低速补偿时速度输出

Fig. 5 Speed output with PID compensation

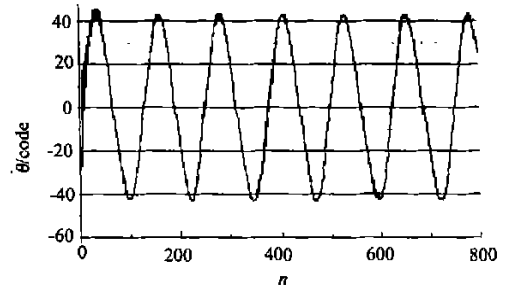


图6 具有重复控制补偿的速度输出

Fig. 6 Speed output with repetitive control

实验证明, 针对模型转台伺服系统, 重复学习控制对系统低速运行时存在的非线性补偿是有效的, 其结果优于传统的PID控制。

## 5 结论

讨论了重复学习控制低速补偿方法。实验结果证明重复学习控制对伺服系统低速运行时存在的非线性补偿是有效的, 其补偿效果优于PID校正。该方法简单、切实可行, 对其他的低速干扰也有很强的抑制作用, 可广泛应用于高精度伺服系统的低速跟踪控制中。

## 参考文献:

- [1] 陈娟. 伺服系统低速特性与抖动补偿研究[D]. 长春: 中科院长春精密机械与物理研究所. 2001. 36-50.  
CHEN J. Study on low-speed properties and jitter compensation of the servo system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001. 36-50. (in Chinese)
- [2] 从爽, AL ESANDRO D C. 两种补偿动态摩擦力的先进控制策略[J]. 自动化学报. 1998, 24(2): 15-21.  
CONG S, AL ESANDRO D C. Two advanced control strategies for the compensation of dynamic friction[J]. Automatic Transaction. 1998, 24(2): 15-21. (in Chinese)
- [3] 陈娟. 自适应低速摩擦补偿[J]. 量子电子学报, 2001, 18(1): 56-58.  
CHEN J. Adaptive low-speed friction compensation [J], Quantum and Electronics Transaction. 2001, 18(1): 56-58. (in Chinese)
- [4] HARA S, OMATA T, NAKANO M. Synthesis of repetitive control systems and its application[A]. Proc 24<sup>th</sup> Conf Decision Contr [C]. 1985. 1384-1392.
- [5] CAUDAS D W C. LISCHINSKY P. Adaptive friction compensation with partially known dynamic friction model. Int [J]. Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 1997, 11: 65-80.
- [6] 张锦江, 陈兴林. 基于摩擦自适应补偿的转台变结构控制器设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(4): 92-95.  
ZHANG J J, CHEN X L. The design of rotation table varied-structure controller based on friction adaptive compensation [J], The Transaction of Harbin University of Technology, 2000, 32(4): 92-95. (in Chinese)

作者简介: 陈娟(1962-), 女, 吉林长春人, 教授, 光学工程博士, 现在长春光学精密机械与物理研究所机械制造与自动化专业博士后工作站工作, 研究方向为光电精密跟踪, 自适应控制等。