

# 抑制分离式读写头下硬盘自伺服刻写过程的径向误差

赵小刚<sup>1,2</sup>, 王海卫<sup>1,2</sup>, 谢长生<sup>1,2</sup>, 李 博<sup>1,2</sup>

(1. 华中科技大学计算机学院, 湖北武汉 430074; 2. 武汉光电国家实验室光电信息存储研究部, 湖北武汉 430074)

**摘 要:** 本文分析了自伺服过程中产生轨道形状偏差的原因及其带来的径向误差传递现象. 详细讨论了分离式磁头对自伺服刻写的影响, 指出磁头弯曲度的变化将对径向误差的传播产生一定作用. 提出了一种加权型校正信号的产生方法, 并从理论上和仿真条件下证明了该方法在参考值变化的情况下对径向误差抑制的作用.

**关键词:** 自伺服刻写; 径向误差; 误差传播; 分离式磁头; 磁头弯曲度

**中图分类号:** TP309 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 11-2239-04

## Restraining the Radial Error of the Self-Servowriting Process in Hard Disk with Separating Magnetic Head

ZHAO Xiao-gang<sup>1,2</sup>, WANG Hai-wei<sup>1,2</sup>, XIE Chang-sheng<sup>1,2</sup>, LI Bo<sup>1,2</sup>

(1. Computer Science Department, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Department of Optoelectronics Information Storage, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** The paper analyzes the reason of track shape error and the phenomenon of radial error propagation. Next the paper discusses in detail the effect of separating magnetic head to self-servowriting process. It shows the change of skew angel of the head will affect the radial error propagation procedure. In the end a new weighted correction signal method is proposed in the paper. The method has good containment effect which is proved in theory and in simulation test when reference signal changes.

**Key words:** self-servowriting; radial error; error propagation; separating magnetic head; skew angel of magnetic head

### 1 引言

硬盘驱动器是数据处理系统中的重要数据存储载体. 为了满足高容量硬盘的需求, 硬盘的面密度年均增长达到了 60%, 而实验室所达到的面密度更是经达到了 425 KIPI (Track Per Inch, 道每英寸)<sup>[1]</sup>. 快速增长的容量要求对伺服的性能和伺服信息刻写的方式产生了巨大影响. 盘片上的伺服信息是磁头获取与磁道相对位置的依据. 因此, 伺服信息对硬盘来说是至关重要的. 伺服信息必须在硬盘出厂之前就写好. 传统硬盘伺服信息写入过程必须依赖专用伺服信息刻写装置 (Servo Track Writer, 伺服道刻写机)<sup>[2,3]</sup>来完成, 但这些伺服刻写装置必须在造价高昂的净房中工作, 这会增加净房的维护成本, 而且其本身价格不菲. 因此传统的伺服信息刻写过程极大提高了硬盘的生产成本.

为了提高硬盘生产效率, 节约单块硬盘的生产成本, IBM 公司提出了自伺服刻写的思想<sup>[4]</sup>, 即完全不需要 STW 的辅助, 将盘片装入盘体后完全利用硬盘自身的磁头来刻写伺服信息, 但在自伺服刻写中出现了径向误差传递的现象<sup>[4,5]</sup>. 本文提出了一种能够在分离式磁

头情况下抑制自伺服刻写过程中径向误差传递的方法, 仿真表明该方法对径向误差抑制有较好效果.

### 2 自伺服刻写模型及其特性

自伺服刻写技术是硬盘使用自己的部件来刻写伺服信息. 其主要难点就在与于如何在没有外界帮助下找到正确的位置来刻写伺服信息. 它的理论依据是读头感应到的磁盘上磁化翻转信号的强弱与读头偏移磁道的距离成一定程度的线性比例关系<sup>[6]</sup>. 自伺服刻写过程与磁盘正常文件读取操作过程有很大区别: 自伺服刻写过程对时间不敏感, 伺服信息刻写过程相对独立, 刻写过程可以在多个磁盘之间并行; 磁盘正常文件读取过程则要求快速性. 自伺服刻写方法实现起来存在一些难题, 其中一个问题就是径向误差的传播. 径向误差的传播是指由于主轴电机的偏摆、磁头处的气流扰动等各种干扰的存在, 导致写入的磁道并非完美的圆形, 而读头会精确跟踪这个偏差, 后续磁道伺服信息刻写时会复制该误差. 图 1 是自伺服刻写环路模型.

$C(s)$  和  $P(s)$  分别代表控制器和执行器, 非重复性偏摆用  $D_{n-1}$  来表示. 而诸如媒介噪声, 读头感应噪声和

收稿日期: 2007-12-19; 修回日期: 2008-03-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60673002); 国家自然科学基金 (No. 60373091)

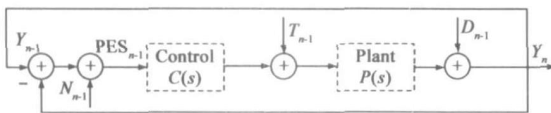


图1 自伺服刻写环路

A/D 量化误差等用  $N_{n-1}$  来表示,  $T_{n-1}$  表示 D/A 量化噪声, 电源放大噪声和由于空气紊流造成的对执行器, 磁头和滑块的转矩等。注意到这里  $Y_{n-1}$  不代表磁头在第  $n$  道时的绝对位置, 因为这里没有实际的位置传感器, 可以测量的只有 PES (Position Error Signal, 位置误差信号),  $Y_n$  代表实际磁道与理想磁道的差异, 也称为径向误差, 如下图 2。

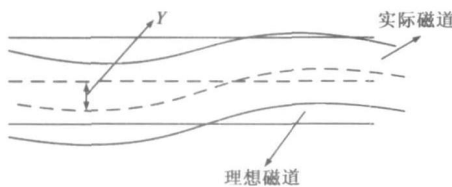


图2 自伺服系统实际输出

为了克服自伺服刻写中的径向误差传播问题, 研究人员提出了很多办法<sup>[4,7~9]</sup>。通常是设计一个前馈校正信号, 使前馈信号补偿上一伺服道中的径向误差。构造校正信号的办法通常是使用系统中可测量的信号。在文献[4]中提到使用上次伺服刻写过程产生的 PES 信号产生此次的校正信号, 缺点是没有考虑到磁道径向误差的累积性; 在文献[7]中使用从以前所有的 PES 派生出来的控制器输入信号来产生校正信号, 缺点是造成噪声的累积。而且这两种校正方法中都没有考虑分离式读写头对径向误差的影响。

### 3 分离式读写头对刻写过程的影响

上述自伺服刻写过程和模型都是假设读写头为一体, 而实际上如今流行的硬盘中通常采用的 MR 磁头和 GMR 磁头都是采用分离式的读写头, 使用这种磁头进行自伺服刻写时需要考虑分离式读写头对自伺服刻写过程的影响。

在自伺服刻写过程中伺服控制器会控制磁头径向移动, 一直到读头读回的信号的归一化幅度是读头处于上一磁道中心时读回幅度的一个特定百分比(参考值), 该百分比是根据实际情况来确定的, 它与读头和写头间距及磁头和磁道的弯曲度等有关<sup>[10]</sup>。分离的读头和写头会引起自伺服刻写过程中磁道间距的变化, 自伺服过程主要通过调整归一化的平均参考值来实现常量道间距。

#### 3.1 径向偏移量和磁头移动量的计算

读写头之间存在一定的间距。当磁头从内径往外径移动时, 读写头间的径向偏移量会随着磁头与磁道的弯

曲度的变化而变化。径向偏移量是指读写头间距在磁盘半径方向的投影, 弯曲度定义为磁头与磁道的夹角, 如图 3。图 4 表明从磁头从内径向外径移动时, 磁头弯曲度的变化情况。

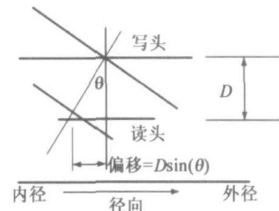


图3 读写头径向偏移

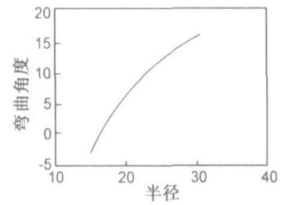


图4 磁头弯曲角径向变化

假设读写头的间距为  $D$ , 弯曲度为  $\theta$ , 那么读写头的径向偏移量为:  $offset = D \sin(\theta)$  (1)

参考值的目的是使得写头中心所处的位置正好和上一磁道中心相隔一个磁道的距离。因为实际刻写磁道时是写头产生磁场来磁化介质产生数据, 读头的作用是帮忙确定位置。由于径向偏移量的变化, 因此写头与上一磁道中心的距离 ( $Dis_w$ ) 还需要在读头偏移量 ( $Move_r$ ) 的基础上加上读写头之间的径向偏移量:

$$Dis_w = Move_r + offset \quad (2)$$

读回幅度变化对应的读头径向移动距离  $Mover$  直接对应参考值的变化, 从式 (2) 可得出, 由于  $offset$  会随弯曲角而变化, 因此为了使道宽  $Dis_w$  一定, 必须动态调整参考值范围。

#### 3.2 弯曲度对自伺服刻写模型的影响

在考虑了分离式的磁头的情况下, 为了获得常量的道宽和道间距, 需要对参考值进行动态的调整。考虑了参考值的动态调整对稳态误差的影响后, 自伺服过程的模型变成图 5。这里假定磁头从内径向外径移动过程中, 磁头的弯曲角度已知, 如图 4。而且由弯曲角变化引发的参考值的变化也已知。

$r_{n-1}$  可以看作是上一磁道和下一磁道刻写时参考值的变化量, 该值与弯曲度有关。则新的自伺服模型成为

$$Y_n = Hr_{n-1} + HY_{n-1} + HC_{n-1} + HN_{n-1} + PGT_{n-1} + GD_{n-1} \quad (3)$$

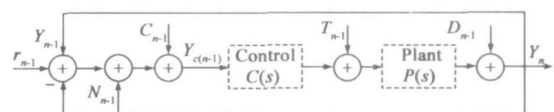


图5 加入参考值后的自伺服环路

### 4 分离式磁头下抑制误差的办法

文献[4,7]中介绍的两种方法都没有考虑到分离式读写头带来的参考值变化的情况, 而且它们对噪声的抑制效果不好, 所以在这里提出一种考虑了参考值变化情

况下抑制径向误差传递的方法,它对噪音的抑制也很有效。

该方法也是从控制信号产生校正信号.为了消除上一磁道的径向误差对本次磁道刻写的影响,可以令校正信号  $C_n = -Y_n$ ,就是说当校正信号等于上一次磁道刻写所生成的磁道径向误差取反时,原始磁道的误差累积就可以得到完全消除.这表示校正信号的获取关键在于获得上一磁道径向误差的准确估计.由于上一磁道的径向误差是不能直接测量的,因此可以根据现有可测信息估计出上一磁道的径向误差。

#### 4.1 校正信号产生方法

参考文献[7]和图5,考虑分离式磁头的影响,下一磁道的径向误差就等于:

$$Y_n = -Y_{c(n-1)} + \sum_{j=0}^{n-1} N_j r_j \quad (4)$$

从式(4)看出,磁道径向误差包含了从以前所有磁道累计过来的测量误差和磁道参考值变化的影响.为了达到迅速获取磁道径向误差,在这里,我们忽略掉后两项的作用,得到磁道误差估计值的第一项:

$$Y_n = -Y_{c(n-1)} \quad (5)$$

该校正信号可以快速校正系统误差,缺点是没有考虑到每次校正过程中累积的测量误差和磁道参考值变化,由于采用的是迭代校正产生校正信号,所以称为迭代校正项,但仅采用这种矫正方法径向误差不能够得到抑制.为了校正系统残余径向误差量,需要补充校正项.构造加权校正信号的第二项的方法是根据闭环系统模型表达式直接计算系统输出量,即磁头当前所刻写的磁道的径向误差.由图5可知:

$$Y_{c(n-1)} = Y_{n-1} - ((Y_{c(n-1)} \times C + T_{n-1}) \times P + D_{n-1}) + N_{n-1} + C_{n-1} + r_{n-1} \quad (6)$$

整理得

$$Y_{n-1} + C_{n-1} = Y_{c(n-1)} \times (1 + CP) - r_{n-1} + PT_{n-1} + D_{n-1} - N_{n-1} \quad (7)$$

式(7)左边表示加入校正项后系统残余的径向误差,该部分正是需要校正的部分.忽略噪声及扰动,可以得到系统径向误差估计校正值的第二项即补充校正项:

$$Y_n = Y_{n-1} + C_{n-1} = Y_{c(n-1)} \times (1 + CP) - r_{n-1} \quad (8)$$

式(8)所得  $Y_n$  为经过迭代校正信号校正后的残余磁道径向误差估计值.由于此处我们忽略了噪声影响,系统误差估计会有偏差,所以必须经行补偿,我们所忽略的部分为:

$$Omit = PT_{n-1} + D_{n-1} - N_{n-1} \quad (9)$$

由于  $T_{n-1}$ ,  $D_{n-1}$ ,  $N_{n-1}$  为互不相关的白噪声,那么将它们求和取平均后,它们的值应为0.即我们可令磁头跟踪一条磁道几圈后,收集这几圈的信号取平均值。

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (T_{n-1})_i = 0 \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (D_{n-1})_i = 0$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (N_{n-1})_i = 0$$

进行求和平均后,残留的径向误差校正过程就比较准确了.最后可以将这两个过程结合起来,得到关于下一磁道径向误差的估计和校正信号,如下式(10),其中  $a$  为权值,  $|a| < 1$ .

$$C_n = -\hat{Y}_n = -aY_{n-1} - (1-a)Y_n \quad (10)$$

#### 4.2 径向误差抑制效果分析

径向误差抑制效果分析如下,首先根据图5可以得到第  $n$  磁道的径向误差为:

$$Y_n = H(r_{n-1} + Y_{n-1} - \hat{Y}_{n-1} + N_{n-1}) + (1-H)(PT_{n-1} + D_{n-1}) \quad (11)$$

我们定义估计误差信号  $e_n$  为实际磁道径向误差与估计磁道径向误差之间的差值,该值表示磁道经过了加权校正信号校正过后,读头跟踪的磁道误差情况.抑制它的增加是加权校正信号的意思所在。

$$e_n = Y_n - \hat{Y}_n \quad (12)$$

由图5可知,第  $n$  道径向误差估计值可以表达成式(13)表示,这就得到了迭代校正项  $Y_n$ .

$$Y_n = -Y_{c(n-1)} = -(r_{n-1} + Y_{n-1} - \hat{Y}_{n-1} - PT_{n-1} - D_{n-1} + N_{n-1})(1-H) \quad (13)$$

接着磁头从第  $n-1$  道移动到第  $n$  道,并将  $Y_n$  作为校正信号带入系统中,读头跟踪第  $n$  磁道,那么补充校正项可以表示为:

$$Y_n = Y_{c(n)} \times (1 + CP) - r_n = Y_n - Y_{n-1} - PT_n - D_n + N_n \quad (14)$$

最后的第  $n$  磁道的径向误差估计值可以通过综合式(11), (13), (14) 计算加权校正信号得到.然后将该估计值带入到式(12)中可得到式(15).

$$e_n = (a - (1-a)G)e_{n-1} + K + L \quad (15)$$

其中  $K = (1-a)G(PT_{n-1} + D_{n-1}) + (a - (1-a)G)(N_{n-1} + r_{n-1})$ ;  $L = (1-a)(PT_n + D_n - N_n)$ .

要使误差得到抑制,必须使得第一项的系数  $|a - (1-a)G| < 1$ ,理论上讲,权值  $a$  是一个频率依赖的复数向量.但对一个硬盘自伺服系统来讲,当  $a$  标量值时,实验表明  $|a - (1-a)G| < 1$  的条件也能得到满足。

#### 5 仿真

此处硬盘执行器用一个四阶系统来进行模拟,传递函数如下.仿真采用的执行器模型是国际通用的,而误差控制方法是本文设计的并在实际硬盘工业中可实现的.整个自伺服刻写过程由 SIMULINK 和 MATLAB 仿真得到。

$$P(s) = \frac{3.9479 \times 10^7}{(s+1013)(s-124.6)} \times \frac{s^2 - 1.42 \times 10^4 s + 2.696 \times 10^8}{s^2 + 2.464 \times 10^3 s + 2.964 \times 10^8}$$

磁道宽度为 1 个单位长度. 扰动信号采用相等的轨道偏移量来模拟. 假定硬盘伺服系统的控制器是采用超前控制器加积分器的方法, 其传递函数为

$$C(s) = \frac{6.685 \times 10^{-4} s^2 + 17.13 s + 1}{3.554 \times 10^{-5} s^2 + s}$$

根据我们前面的推理可知该硬盘模型进行自伺服刻写的话, 其径向误差一定会越来越大.

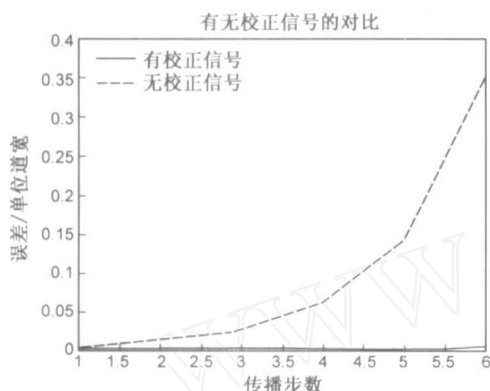


图6 有无前馈校正信号的自伺服刻写过程的比较

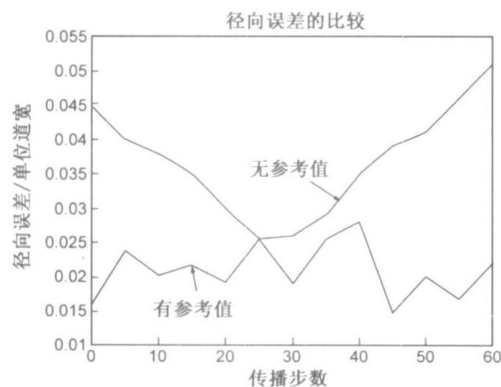


图7 有无参考值时的径向误差抑制效果

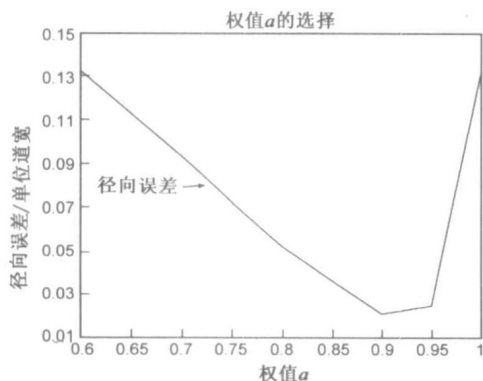


图8 权值a对径向误差的影响

图6 是没有加入前馈校正信号和加入了加权型校正信号时磁道径向误差的比较. 从图中可以看出, 磁道

径向误差得到了较好的抑制.

图7 是考虑了分离式磁头对自伺服刻写的影响和没考虑分离式磁头的影响时磁道径向误差的比较. 校正方法采用的是加权校正法, 差别在于有无参考值变化信号的输入. 可以看出, 当没考虑参考值变化的情况的整体径向误差始终高于考虑了参考值变化情况的自伺服过程的径向误差.

从图8 可以看出, 选择不同的权值  $a$ , 对系统的径向误差的抑制效果不同. 从图中可以看出, 当  $a = 0.9$  时, 对误差抑制效果最为理想.

## 6 结论

分离式磁头对自伺服刻写过程的顺利完成有重要影响, 它能引起自伺服刻写模型中的参考值的变化. 本文提出了一种加权型校正信号产生方法, 理论和实验表明它在参考值变化的情况下对径向误差的有较好的抑制作用.

### 作者简介:



赵小刚 男, 1979 生, 博士研究生, 研究方向为高密度硬盘与光盘关键技术研究.  
E-mail: zxgang302@gmail.com



王海卫 男, 1969 生, 博士, 副教授, 研究方向为高密度硬盘与光盘关键技术研究 (通讯作者).  
E-mail: hiway@mail.hust.edu.cn

谢长生 男, 1957 生, 博导, 教授, 研究方向为高密度硬盘与光盘关键技术研究, 海量信息存储理论.

李 博 男, 1979 生, 博士研究生, 研究方向海量信息存储理论.

### 参考文献:

- [1] Chunling Du, Lihua Xie, Guoxiao Guo et al. A generalized KYP lemma based control design and application for 425 kTPI servo track writing[A]. In Proceeding of the American Control Conference[C]. Minneapolis, Minnesota, USA, 2006. 1303 - 1308.
- [2] Yukihiro Uematsu, Masanori Fukushi, Kayoko Taniguchi. Development of the pushpin free STW[J]. IEEE Trans. Magn., 2001, 37(2): 964 - 968.

(下转第 2246 页)

- technology of the high purity water and high purity water technology[M]. Academic Press, Beijing, 1997. 1 - 13. (in Chinese)
- [2] S J Poirier, K J Ultra-Pure water[J]. 1987, 4(5):42.
- [3] Benoit Par   Roy A. Hango. Electrodeionization Replaces Aging Mixed Beds Serving Semiconductor Manufacturing[J]. UPW, JUL Y/ AUGUST 2000, 36 - 39.
- [4] Y Motomura. Kurita Water Industries Ltd., Membrane Journal (Korea) [J]. 1996, 6(3):141 - 156.
- [5] Brian Hernon, Hilda Zanolidou, Ted Prato, and Li Zhang. Removal of Weakly Ionized Species by EDI[J]. UPW, DECEMBER 1999. 45 - 49.
- [6] 闻瑞梅, 陈胜利. 控制超大规模集成电路用水中的溶解氧和总有机碳浓度的研究[J]. 电子学报, 2001, 29(8):1009 - 1012.
- Wen Ruimei, Chen Shengli. Study on Controlling the Concentrations of Dissolved Oxygen and Total Organic in Water Used for ULSI [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(8):1009 - 1012. (in Chinese)
- [7] Y Motomura. Kurita Water Industries Ltd., Ultrapure Water Quality Target Values for Semiconductor Manufacturing in Japan[J]. Membrane Journal (Korea), 1996, 6(3):141 - 156.
- [8] D Auerswald. Optimizing the Performance of a Reverse Osmosis/ Continuous Electrodeionization System[J]. Ultrapure Water 1996, 13(4):34 - 52.
- [9] Chris Edmonds, Eli Salem. Demineralization An Economic Comparison Between EDI and Mixed-Bed on Exchange [J]. Ultrapure water, 1998, 11:43 - 47.
- [10] Ron Iscoff. The Challenge for Ultra-pure Water[J]. Semiconductor International, 1986, 2:74 - 82.
- 作者简介:**  
闻瑞梅 女, 1933 年生于湖北, 现为同济大学电子信息学院教授、博士生导师. 长期从事高纯水新技术及痕量分析检测、废水废气处理及表征技术的研究. 先后获国家级、省部级各种科技奖 16 次, 专利 27 项, 发表中英文论文 130 余篇.  
E-mail: ruimeiw@163.com

#### (上接第 2242 页)

- [3] Kazuhiko Takaishi, Yukihiro Uematsu, Tomoyoshi Yamada et al. Hard disk drive servo technology for Media-Level servo track writing[J]. IEEE Trans. Magn., 2003, 39(2):851 - 856.
- [4] Timothy J. Chainer, Mark D. Schultz, Bucknell C. Webb, et al. Radial self-propagation pattern generation for disk file servowriting[P]. US Patent:6476989, 2002.
- [5] Chunling Du, Jingliang Zhang, Guoxiao Guo. Vibration analysis and optimal control in self-servo track writer[A]. In Seventh International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision[C]. Singapore, 2002. 156 - 161.
- [6] J. N. Teoh, C. Du, G. Guo et al. R/W gap delay estimation for self-servo track writing[A]. In Ninth IEEE International Workshop on Advance Motion Control[C]. Istanbul, Turkey, 2006. 149 - 152.
- [7] Hemant Melkote, Bob Cloke, Vinay Agarwal. Modeling and compensator design for self-servowriting in disk drives[A]. In Proceeding of the American Control Conference[C]. Denver, Colorado, USA, 2003. 737 - 742.
- [8] Hemant Melkote, Robert J. McNab. Modeling and control for self-servowriting in hard disk drives: A repetitive process approach[A]. In Proceeding of the American Control Conference[C]. Minneapolis, Minnesota, USA, 2006. 2005 - 2010.
- [9] Haibei Ye, Vincent Sng, Chunling Du et al. Radial error propagation issues in self-servo track writing technology [J]. IEEE Trans. Magn., 2002, 38(5):2180 - 2182.
- [10] Timothy J. Chainer, Mark D. Schultz, Bucknell C. Webb, et al. Methods and systems for self-servowriting include maintaining a reference level within a usable dynamic range [P]. US Patent:5757574, 1998.