

# 硬盘自伺服刻写模型特性研究

赵小刚 王海卫 谢长生 李博

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

**摘要** 自伺服刻写是解决伺服信息刻写问题的良好方案。详细讨论了自伺服刻写模型及其特点,指出定位准确度是衡量自伺服刻写方案好坏的重要指标。设计了3种控制器来控制自伺服刻写过程,实验数据表明了自伺服刻写中定位准确性的重要性。重点指出鲁棒控制器能够很好地抵御外部扰动,保障自伺服刻写过程的精确度。

**关键词** 伺服信息,自伺服刻写,定位准确度,鲁棒控制

中图分类号 TP391 文献标识码 A

## Research on the Characteristic of the Model of Self-servowriting in Hard Disk

ZHAO Xiao-gang WANG Hai-wei XIE Chang-sheng LI Bo

(Computer Science Department of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Department of Optoelectronics Information Storage, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Self-servowriting is a good method which deals with servo information writing. This paper analyzed the characteristic of servo model. It shows that position precision is the most important criterion to the validity of self-servowriting. In the paper three different controllers were designed to control the self-servowriting process. The experiment data shows the importance of position precision in self-servowriting. This paper indicated the robust controller can resist outer disturbance and provide the position precision in self-servowriting process.

**Keywords** Servo information, Self-servowriting, Position precision, Robust controller

## 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。为了满足大容量硬盘的需求,硬盘的面密度年均增长率达到了60%<sup>[1]</sup>。在硬盘中放置的是表面溅射了磁性薄膜层的旋转盘片,数据在磁盘表面以同心圆形状记录,这些同心圆叫做磁道。硬盘的记录头和一个制动器一起移动,经过整个磁盘表面,到达每个磁道。一个磁头定位伺服机构是一个控制系统,它将磁头(安装于制动器末端)定位于期望的磁道位置。硬盘伺服系统是硬盘的重要组成部分,因为它是提高硬盘面密度的关键。

在一个典型的硬盘伺服控制系统中,伺服系统检测磁头相对于期望磁道中心的位置,并根据它来向制动器发送合适的命令,从而使制动器驱动磁头移动以减少位置误差。位置误差信号(Position Error Signal, PES)的检测依据是通过读取这些伺服扇区中的伺服信息得到的,所以说伺服信息对硬盘数据的读取是至关重要的。传统的伺服信息刻写方式是通过伺服道刻写机(Servo Track Writer, STW)来完成的<sup>[2-4]</sup>,但这增加了硬件成本和净房维护费用。为了解决该问题,IBM公司提出了自伺服刻写的思想<sup>[2]</sup>,即完全利用硬盘自身的磁头来刻写伺服信息。探讨自伺服刻写的特性,解决如何利用

硬盘自身设备来实现定位准确性的问题成为目前硬盘技术研究的重要方向。本文提出了使用鲁棒控制器来提高自伺服刻写过程的定位精确度,保障自伺服刻写过程稳定性的方法。实验也表明了它的有效性。

## 2 自伺服刻写系统模型分析

硬盘中磁头的定位过程主要是由伺服控制器控制音圈电机的移动来完成的,而盘片上的伺服信息则是决定磁头与磁道相对位置的依据,因此伺服信息相当于位置传感器所起的作用。伺服信息在磁盘中的表现形式就是磁道上预先刻写好的一些标记,当磁头读取到这些标记时就可以知道自己目前所处的位置。伺服信息在硬盘出厂之前就必须写好,一般来说,伺服信息要占到磁盘容量的10%左右。

传统的硬盘伺服信息写入必须依赖专用伺服信息刻写装置STW,优点是借助外界的辅助定位设备和准确的参考时钟,伺服信息可以刻写得完美。缺点是这种伺服刻写装置必须在造价高昂的净房中工作,而且其自身价格不菲。

IBM公司提出的自伺服刻写技术能在使用硬盘本身的GMR(巨磁阻)磁头以及采用现有的HAD(硬盘)装配条件下,根据上一个磁道的伺服信息写入下一磁道的伺服信息,由于不再需要STW等外部设备,故能大幅度降低生产成本并提高生

到稿日期:2008-09-04 返修日期:2008-12-04 本文受国家自然科学基金项目(60673002)和国家973重大基金研究项目(2004CB318203)资助。  
赵小刚(1979-),男,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(1969-),男,博士,副教授,研究方向为高密度硬盘与光盘关键技术研究;谢长生(1957-),男,教授,博士生导师,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 研究方向为海量信息存储理论。

产效率。自伺服刻写的难点就在于如何在没有外界定位装置的帮助下确定磁头刻写伺服信息时的径向和切向位置。

详细的自伺服刻写过程如图 1 所示。R 和 W 分别代表读头和写头。A, B, C 和 D 代表写头所写的伺服信息。它的核心思想是磁头感应到的磁道上磁化翻转信号的强弱是与磁头偏移磁道的距离成一定程度的比例关系<sup>[5]</sup>。而现在流行的硬盘中采用的是分离式的读写头<sup>[6]</sup>。当读头读取第 N 道上的伺服信息来获取磁头当前位置时,写头就可以在第 N+1 道上写入需要的伺服信息。这个过程顺利地重复下去,就会使盘片上布满所需要的伺服信号。最初磁道的磁道位置信息(第 0 道)可以通过将磁头移动到紧靠启停区的最外圈磁道后,伺服机构控制磁头刻写出第 0 道伺服信息和时钟信息。通常假设这一道为完美伺服磁道,就是不存在任何形状缺陷的磁道。

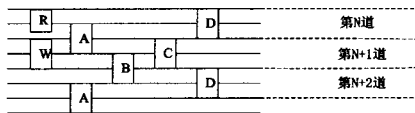


图 1 自伺服刻写过程

图 2 为自伺服刻写模型。其中  $C(s)$  和  $P(s)$  分别代表控制器和执行器,  $Y_{n-1}$  是磁头刻写第  $n$  道时自伺服系统的参考输入,  $Y_n$  是磁头与第  $n$  道的相对位置。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 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对执行器、磁头和滑块的转矩等,  $PES_{n-1}$  为实测的位置误差信号。下标表示当前所要刻写的磁道号。

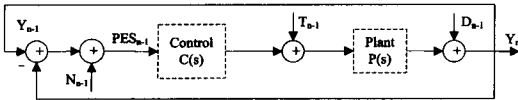


图 2 自伺服刻写环路

由于自伺服刻写无需借助外部设备来为伺服刻写过程提供参考位置, 它借助的是上一次写入过程所产生的伺服磁道的位置信息, 因此,  $Y_n$  被反馈回来作为  $n+1$  道伺服刻写过程的参考输入。值得注意的是  $Y_{n-1}$  和  $Y_n$  不代表磁头在第  $n-1$  道和第  $n$  道时的绝对位置, 因为这里没有实际的位置传感器, 可以测量的是 PES 信号。它们分别代表磁头与第  $n-1$  理想磁道和第  $n$  理想磁道的相对位置, 可以称为形状误差, 如图 3 所示。

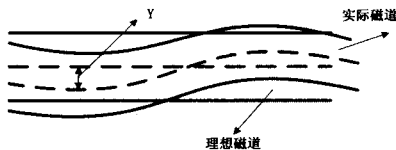


图 3 自伺服系统实际输出

### 3 自伺服刻写过程的特点

自伺服刻写过程和成品硬盘进行文件读写的过程不同, 有其自身的特点, 反映在伺服控制器上有:

#### 1) 时间灵敏度不高

成品硬盘在进行文件读写时, 它的重点在于定位的迅速性, 要求磁头在很短时间内到达指定位置读取数据, 否则会引起用户的不满。在伺服过程中寻道过程和跟踪过程都要求通

过优化控制器的时间来达到迅速定位的目的。

而自伺服刻写对跟踪时间、寻道时间这些对正常伺服读写来说至关重要的因素并不敏感。因为自伺服刻写过程已经脱离了净房的环境和伺服道刻写机, 所花费的时间多一点也没问题。而且这些时间可以通过并行操作多个硬盘的自伺服刻写过程来减少, 所以说自伺服刻写对时间因素要求不高。

#### 2) 较高的伺服精度和鲁棒性

自伺服刻写的过程是在成品硬盘工作之前发生的, 在该过程刻写好的伺服信息会成为硬盘正常工作时的位置参考信息。自伺服刻写过程也是在伺服控制器的控制下, 控制磁头在磁道上写下伺服信息, 所以该过程存在一个定位准确度的问题。如果自伺服刻写过程中定位不准确, 则写下的伺服信息位置将会产生偏差。如果正常的硬盘数据的读写依靠这些错误的伺服信息就会使硬盘读取错误的的数据。因此为了达到准确的数据读取, 自伺服刻写过程需要的定位精度远远高于硬盘正常的的数据读取时的伺服定位精度。

而且由于自伺服刻写过程是以上一磁道的形状作为本次磁道刻写的参考输入的, 因此如果自伺服刻写定位产生偏差, 就会造成后续磁道伺服信息刻写产生偏差, 而且该偏差会迅速累积放大。这就是径向误差的传播。所以这也是自伺服刻写要求必须高精度定位的原因。

自伺服刻写对定位精度除有很高的要求外, 还需要有很高的鲁棒性。当出现偶尔的外部振动和执行器的参数存在不确定性变化时, 径向误差依然能够保持在很小的范围内, 所以鲁棒性也是必需的。

对自伺服刻写过程和正常磁盘数据读取过程来说, 采用的都是同样的装置, 即相同的音圈电机和控制处理电路。由于自伺服刻写过程和正常磁盘数据读取对伺服控制器的要求不同, 通常的解决办法是对两种过程分别设计两种不同的控制器, 自伺服刻写过程设计伺服精度高、鲁棒性强的控制器, 而对正常磁盘数据读取则采用响应速度快的控制器, 这两种控制器的切换对现代数字电路来说是没有问题的。

### 4 自伺服刻写控制器的设计

下面用一个实际例子来表明自伺服刻写过程控制器的设计和选择过程。

通用硬盘驱动器的执行机构是音圈电机(VCM)。它的作用是将控制电流转化为悬臂的角位移。所以可以使用一个二阶系统来对执行器进行仿真。为了反映硬盘伺服系统的真实模型, 还需要考虑由于外部扰动引起的共振情况。所以执行器用一个四阶系统来进行模拟, 传递函数为式(1)。自伺服模型如图 2 所示, 整个自伺服刻写过程由 SIMULINK 和 MATLAB 仿真得到。

$$P(s) = \frac{3.9479 \times 10^7}{(s+1013)(s-124.6)} \times \frac{s^2 - 1.42 \times 10^4 s + 2.696 \times 10^8}{s^2 + 2.464 \times 10^3 s + 2.964 \times 10^8} \quad (1)$$

假设主轴马达转速为 7500 转/分钟, 一个磁道中含有 100 个扇区。那么磁盘旋转一周所花的时间就为 0.008 秒, 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。这里先暂时不考虑系统扰动输入来观测控制器的性能。

#### 4.1 无扰动的自伺服刻写

##### 4.1.1 超前滞后补偿器

由于原有系统是一个不稳定系统,通过分析发现其相位裕度为 $-15.49^\circ$ 。利用超前补偿器将相位裕度设为 $60^\circ$ 。设计后的控制器为

$$C(s) = \frac{6.435 \times 10^{-5} s^2 + 0.1306s + 17}{3.554 \times 10^{-5} s^2 + s} \quad (2)$$

加上积分器后降低了稳态误差却增加了稳定时间,而自伺服刻写对时间不敏感,所以在这里可以这样做。稳定时间为 $0.00774s$ ,刚好是小于一圈的时间。

#### 4.1.2 PID 控制器

根据系统特性设计出来的PID控制器为

$$C(s) = \frac{0.00006s^2 + 0.12s + 17}{s} \quad (3)$$

其阶跃响应的稳定时间为 $0.00797s$ 。

将超前滞后补偿器和PID控制器的性能进行对比后,可以得到表1。可以看到响应时间的关系为PID控制器>超前滞后控制器,稳态误差为PID控制器>超前滞后控制器,但总体相差得不是太多。

表1 超前滞后和PID性能比较

类型	超前滞后	PID
响应时间	0.00774	0.00797
稳态误差(3σ)	0.0018	0.0020

将这两个控制器分别用于自伺服刻写模型后,经过6圈的刻写,得到的仿真结果如图4所示。

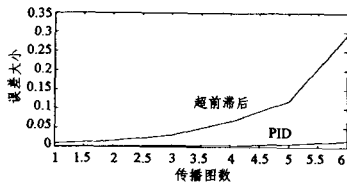


图4 超前滞后和PID的仿真结果

从经过自伺服刻写环路模拟后的图4中可以看出,采用PID控制器的自伺服刻写的磁道形状的是误差已达到30%,而超前滞后补偿器的误差则在5%以下。由此可见自伺服刻写对稳态误差,即伺服定位精度很敏感。

#### 4.2 加入扰动后的自伺服刻写

上述是在没有考虑扰动和制动器参数不确定性的情况下自伺服刻写过程的模拟过程。如果考虑扰动作用及参数变化的情况,系统的定位准确度就很难得到保证。如何既保持系统稳定,又能对扰动和某些不确定因素起到很好的抑制,在此引入鲁棒控制方法。

鲁棒控制方法是现代控制理论的重要发展成果,它能在系统出现扰动和不确定参数,不改变控制器结构的情况下,达到系统没发生变化前的各项指标。它采用的是现代状态空间分析方法,着重于频率分析。一种常见的鲁棒控制方法为 $H_\infty$ 控制器。该控制器的工作结构如图5所示。

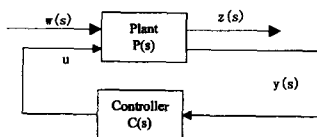


图5  $H_\infty$ 控制器工作结构

其中 $w$ 为扰动输入, $z$ 为扰动对系统影响大小的评估。这里可以将扰动对应为自伺服刻写中的扰动如 $D_{n-1}, N_{n-1}, T_{n-1}$ 。

而 $z$ 可以对应系统中的PES信号。执行器的状态空间方程为

$$x'(s) = Ax(s) + B_1 w(s) + B_2 u$$

$$z(s) = C_1 x(s) + D_{11} w(s) + D_{12} u$$

$$y(s) = C_2 x(s) + D_{21} w(s) + D_{22} u \quad (4)$$

控制器的状态方程为

$$x_c'(s) = A_c x_c(s) + B_c y(s)$$

$$u = C_c x_c(s) + D_c y(s) \quad (5)$$

$H_\infty$ 控制器的目的就是找出合适的控制器矩阵( $A_c, B_c, C_c, D_c$ ),令 $w$ 到 $z$ 的传递函数 $\|\Phi_{zw}\|_\infty < \gamma$ , $\gamma$ 为控制系统对扰动的最大增益。

为了仿真系统对扰动输入的影响,在自伺服刻写环路中引入扰动 $D_{n-1}$ 。假定 $D_{n-1}$ 为阶跃扰动,如表2所列,比较了超前滞后和 $H_\infty$ 控制器对阶跃扰动输入下的稳态误差大小。

表2 超前滞后和 $H_\infty$ 性能比较

类型	超前滞后	鲁棒
响应时间	0.00774	0.00191
稳态误差(3σ)	0.0019	2.5336e-004

将这两个控制器分别用于自伺服刻写模型后,加入扰动,经过40圈的刻写后,得到的仿真结果如图6所示。

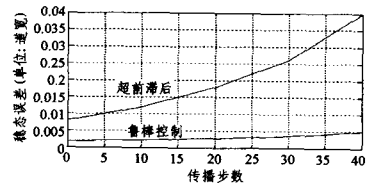


图6 超前滞后和鲁棒的仿真结果

从经过自伺服刻写环路模拟后的图6中可以看出,采用 $H_\infty$ 控制器在扰动输入的情况下保持良好的性能,由此可见自伺服刻写需要对扰动有良好的抵御力以维持较小的稳态误差。

**结束语** 本文描述了自伺服过程及其特点,着重指出了自伺服刻写过程的特点和它对定位精度的高要求,并设计了适合自伺服刻写过程要求的鲁棒控制器。实验表明鲁棒控制器对噪声的良好抑制作用,这对自伺服刻写过程是十分关键的。

#### 参考文献

- [1] Grochowski, Hoyt R. Future trends in hard disk drives [J]. IEEE Trans. Magn., 1996, 32(3):1850-1854
- [2] Regenerative clock technique for servo track writers [J]. IBM Technical Disclosure Bulletin, 1990, 33:310-311
- [3] Du Chunling, Xie Lihua, Guo Guoxiao, et al. A generalized KYP lemma based control design and application for 425kTPI servo track writing [C]//Proceeding of the American Control Conference. Minneapolis, Minnesota, 2006:1303-1308
- [4] Zheng Jinchuan, Du Chunling, Guo Guoxiao, et al. Phase lead peak filter method to high TPI servo track writer with microactuators [C]//Proceeding of the American Control Conference. Minneapolis, Minnesota, 2006:1309-1314
- [5] Liu Bo, Hu Sheng-bin, Chen Qi-suo. A novel method for reduction of the cross track profile asymmetry of MR head during self servo-writing [J]. IEEE Trans. Magn., 1998, 34(4):1901-1903
- [6] Teoh J N, Du C, Guo G, et al. R/W gap delay estimation for self-servo track writing [C]//9th IEEE International Workshop on Advance Motion Control. Istanbul, Turkey, 2006:149-152