

文章编号: 0258-7025(2007)06-0841-05

对称共路外差干涉法测量硬盘磁头 飞行高度瞬态调制

岳兆阳¹, 林德教², 宋南海¹, 孟永钢¹, 殷纯永²

(清华大学¹ 摩擦学国家重点实验室, ² 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 在线检测硬盘磁头飞行高度(FH)是高密度磁存储技术商品化的重要环节。提出了一种对称共路双频外差干涉测量硬盘磁头飞行高度的方法,用于在线检测磁头飞行高度瞬态调制变化。采用横向塞曼激光器作为外差光源,结合高速相位测量技术,可实现对磁头飞行高度高分辨率(0.1 nm),高采样频率(100 kHz)直接在线溯源测量。通过对称布局的两路差动干涉仪结构,系统能自适应补偿环境振动等扰动引入的随机误差以及盘片复杂运动引入的阿贝误差,还可兼容透射式玻璃盘片模拟条件下的硬盘磁头飞行高度的测量。结果表明,当盘片的偏摆在 $1.2\ \mu\text{m}$ 时,系统可清晰描述小于10 nm的飞行高度调制现象。

关键词 测量;外差干涉;磁头飞行高度调制;共光路;相位测量;误差补偿

中图分类号 TH 744.3 文献标识码 A

In-Situ Measurement for Flying Height Modulation of Magnetic Head by Symmetrical Common-Path Heterodyne Interferometry

YUE Zhao-yang¹, LIN De-jiao², SONG Nan-hai¹, MENG Yong-gang¹, YIN Chun-yong²
(¹State Key Laboratory of Tribology, ²State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In-situ flying height (FH) testing of the magnetic head in hard disk drives (HDD) plays an essential role in the commercial availability of high-density magnetic storage technology. A symmetrical common-path heterodyne interferometry is proposed, which utilizes a traverse Zeeman laser and a high-speed phase measurement technology. It takes the advantages of direct in-situ traceable measurement with high resolution (0.1 nm) and high sampling frequency (100 kHz). The errors introduced by rotation of disk and environmental disturbance can be adaptively compensated. The system is also suitable for the simulative FH measurement using glass disk. The experimental results show that it is able to clearly describe the FH modulation of less than 10 nm when the dynamic pitch of the rotating rigid disk is $1.2\ \mu\text{m}$.

Key words measurement; heterodyne interferometry; flying height modulation of magnetic head; common-path; phase measurement; error compensation

1 引言

目前高性能硬盘的磁头滑块飞行高度(FH)已降低到10 nm以下,由于不同盘片的表面粗糙度以及波纹度处于纳米量级。实际上,当飞行高度进一

步降低时,飞行高度调制(FHM)有增加的趋势。由于需要将这一调制量控制在平均飞行高度的20%以内,才能确保磁头的可靠读写^[1],这就对磁头滑块的设计和瞬态飞行高度测试提出了很高要求。针对磁头飞行高度的测试,在产品研制和生产中应用的

收稿日期:2006-11-09;收到修改稿日期:2007-01-09

基金项目:国家973计划(2003CB716205)和国家自然科学基金(50525515)资助项目。

作者简介:岳兆阳(1983—),男,内蒙古人,硕士研究生,从事摩擦学测量研究。

E-mail: yuezhao yang00@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介:孟永钢(1961—),男,内蒙古人,研究员,博士生导师,目前研究方向为硅微构件材料力学性能和摩擦磨损性能的测试方法。E-mail: mengyong@mail. tsinghua. edu. cn

主要有两类测试系统,一类是模拟盘片测量,如已成为工业标准的动态飞行高度测量仪(DFHT)^[2],采用空气静压轴承和超光滑透明玻璃盘片模拟磁盘,适用于测量稳态工况下磁头滑块与模拟盘片间的气膜厚度(绝对间隙),校核磁头滑块的设计。由于测试仪轴承和盘片与真实硬盘的情况不同,这类测试系统所得的结果未必能反映真实情况的实际飞行高度;另一类属于在线磁头飞行高度测量,主要有外差干涉法、偏振干涉法、激光多普勒法等^[3~5]。其中外差干涉法和偏振干涉法在原理上既可测量真实硬盘也可测量透明模拟盘片情况下的磁头飞行高度,而激光多普勒法一般多见于在线飞行高度测试研究。对于飞行高度小于10 nm的滑块飞行性能研究,上述方法的瞬态测量分辨率均已显不足。

在线检测真实硬盘的磁头飞行高度属于相对飞行高度测量,因为磁头不透明,不可能构成串联式光路,只能采用两束光并行方式测量头盘差分位移变化,因此必然引入阿贝误差^[3,6]。传统的补偿办法是假定盘片极低速转动下头盘接触,通过测量此时头盘差分位移为盘片倾斜阿贝补偿量,之后加速至正常转速所得测量结果减去该补偿量得到飞行高度。T. C. McMillan 等^[6]给出盘片不同转速下磁头相对飞行高度和工业标准仪器动态飞行高度测量仪绝对飞行高度的比对,发现盘片低速段和高速段旋转时两者具有较好的一致线性,然而在中速段的速度变化对两者影响存在几十纳米的差异。这一原因存在于传统阿贝误差补偿方法的原理缺陷:硬盘流体动压轴承系统在不同转速下盘片运动轴心轨迹存在差异^[7],由于相对飞行高度测点间距在毫米量级,将对相对飞行高度测量结果产生数十纳米量级影响(本文实验证实了这一影响在20 nm以上)。因此,对于磁头相对飞行高度测量,忽略了飞行高度测试时盘片姿态变化引入的阿贝误差是传统测量方法准确度难以提高的重要原因。

本文提出的对称共路双频外差干涉在线测量商品硬盘磁头飞行高度的方法,融合双频激光干涉法和高速相位测量技术,采用两路对称布局的双差动干涉仪结构,具有高稳定性、结构简单的特点。同时,该方法还可兼容透明玻璃盘片模拟条件下的硬盘磁头飞行高度研究。

2 原 理

对称共路双频外差干涉测量系统原理如图 1 所

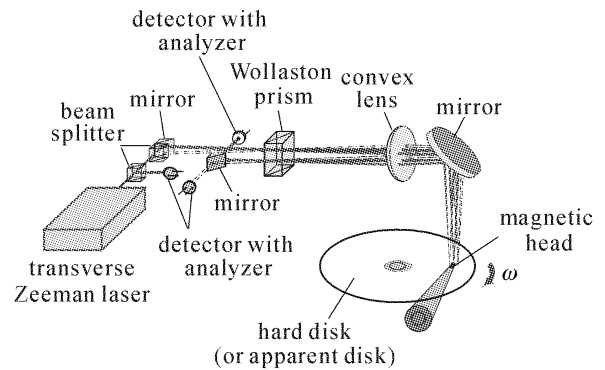


图 1 磁头飞行高度在线测量系统示意图
Fig. 1 Scheme of the system for in-situ measuring slider flying height

示,图中实线、虚线分别表示激光器分光后的对称的两组干涉光路,其测量臂共路。光源采用计量型横向塞曼 He-Ne 激光器(光波长稳定性优于 10^{-7})^[8],输出正交线偏振的双频激光(p 光和 s 光)。经分束器分出一路检偏探测作为参考拍频信号 S_r ,然后经分束器、反射镜形成夹角等于渥拉斯顿棱镜分束角的两束光,对称汇聚入射由渥拉斯顿棱镜和透镜构成的差分干涉仪。以实线路为例,正交线偏振双频激光 E_0 经渥拉斯顿棱镜偏振分束,其中 p 光出射平行于透镜轴线,为测量光,经大口径正透镜聚焦在磁头上为测量点,s 光倾斜于仪器轴线出射为参考光,经透镜聚焦在玻璃盘片或真实盘片上为参考点。参考光和测量光反射后分别经透镜、渥拉斯顿棱镜后合束射出(与原入射渥拉斯顿棱镜的光束方向平行),经反射镜到检偏探测器输出测量拍频信号 S_{m1} 。同理,虚线光路经过同一干涉仪,其测量臂与实线路重合,最终检偏探测器输出测量拍频信号 S_{m2} 。两路测量信号分别与参考信号输入相位卡进行比相,得到两路相位值 $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$,可表示为

$$\Delta\phi_i = \int_0^t 2\pi f_{D_i} dt = \int_0^t \frac{2v_i}{\lambda} dt \times 360^\circ = \frac{720h_i}{\lambda \cos\beta}, \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

式中 λ 为 He-Ne 激光波长, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$; 相位值 $\Delta\phi_i$ 的单位为度; f_{D_i} 为测量点相对参考点运动产生的多普勒频移; v_i 为测量点与参考点相对速度; h_i 为 t 时间内测量点和参考点之间的位移变化量; β 为测量和参考光与盘片法线的夹角。为了减少测量误差,设计光路使 $\cos\beta \approx 1$, 所以由式(1)可得

$$h_i = \frac{\lambda}{720} \Delta\phi_i, \quad (2)$$

由(2)式可知,当相位测量分辨率为 0.1° 时,飞行高度理论位移测量分辨率达到 0.1 nm 。

实际上,由于硬盘盘片表面安装偏斜以及轴承偏摆运动的影响,相对于磁头存在较大的角位移,且在不同稳定转速下,盘片回转平面平衡位置不同,因此为了得到瞬态磁头飞行高度变化,需要在线补偿这一角度变化对测量结果造成的影响,补偿原理如图 2 所示, M_1, M_2, R_1, R_2 分别代表两路干涉的测量臂和参考臂。

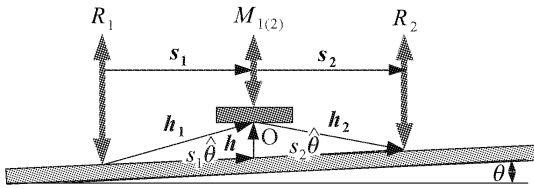


图 2 盘片倾斜补偿原理图

Fig. 2 Scheme of in-situ disk error compensation

如图 2,任意时刻差分位移矢量 h_1, h_2 分别为

$$h_1 = \hat{\theta}s_1 + h, \quad h_2 = \hat{\theta}s_2 - h, \quad (3)$$

那么 t 时间内两路干涉测量所得位移变化 h_1, h_2 分别为

$$\begin{aligned} h_1 &= \Delta h_1 = \Delta \hat{\theta}s_1 + \Delta h = \theta s_1 + h, \\ h_2 &= \Delta h_2 = \Delta \hat{\theta}s_2 - \Delta h = \theta s_2 - h, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 s_1, s_2 分别为两路干涉仪测点横向距离, θ 为盘片转动摆角变化, h 为磁头滑块飞行高度变化。令

$$s_2 = Ks_1, \quad (5)$$

在动态测量过程中,先测量盘片摆动运动,假设盘片为刚体,由于测点间距存在线性比例关系,可以通过两路干涉仪测量结果的相关曲线拟合得出 K 值

$$K = \frac{s_2}{s_1} = \frac{\Delta \varphi_{m1}}{\Delta \varphi_{m2}}, \quad (6)$$

式中 $\Delta \varphi_{m1}, \Delta \varphi_{m2}$ 为盘片在转动过程中干涉相位的变化量。由式(3)~(5)可得

$$h = \frac{Kh_1 - h_2}{K + 1}, \quad (7)$$

定义盘片转速为零(或低于起飞转速下的某一速度)时飞行高度为零,此时两路相位测量结果均置为零。那么当盘片加速到工作转速时,测量这一过程的飞行高度变化即可得到飞行高度值。由(7)式可以看出,测量飞行高度变化与测点位置无关,当 $K = 1$ 时, $h = (h_1 - h_2)/2$,该干涉系统是单路干涉仪测量精度的 2 倍。分析飞行高度测量误差,有

$$\Delta h = \frac{K}{K+1}\Delta h_1 - \frac{1}{K+1}\Delta h_2 + \frac{h_1 + h_2}{(K+1)^2}\Delta K, \quad (8)$$

式中 Δh 为飞行高度测量结果的不确定度。 $\Delta h_1, \Delta h_2$ 分别为两路干涉仪各自的系统误差,主要表现为非线性误差^[9,10]; ΔK 为两路干涉仪结果拟合误差。在光路结构上确保 K 趋近于 1,一定程度上可以起到系统误差相抵消的效果。确保测点布置在同一直线,可以减小 ΔK 及测量误差测量原理。

3 实验

3.1 系统稳定性测试

在无恒温普通实验室条件下,进行了硬盘盘片静止状态的稳定性测试,采样频率为 5 kHz,采样时间为 200 s,如表 1 所示。由于轴承间隙的存在,头盘结构并不稳定,盘片姿态易受环境影响,如图 3 所示。由于采用了共光路布局,两干涉路测量结果(即基本重叠的两条幅度较大的复杂曲线)在 200 s 内各自漂移小于 7.5 nm,数据标准差小于 0.7 nm,而补偿后的结果(即较平缓曲线)标准偏差为 0.051 nm,漂移小于 0.54 nm。结果表明,该系统在较短时间内相位测量的非线性误差较小,具有较强的抗干扰能力,适合于磁头飞行高度 10 nm 以下的测量。

表 1 200 s 系统稳定性统计结果

Table 1 Statistics about the system stability within 200 s

	Minimum value	Maximum value	Median value	Standard deviation	Mean value	Range
h_1 /nm	-4.5535	2.8819	0.0343	0.6465	-5.2594×10^{-11}	7.4354
h_2 /nm	-4.6283	2.7755	0.0544	0.6798	-2.1259×10^{-10}	7.4038
h /nm	-0.2157	0.3222	0.00575	0.05111	7.997×10^{-11}	0.5379

3.2 硬盘启动过程盘片动态偏摆测量

在同一实验条件下,将测量点参考点均布置于笔记本硬盘(Hitachi HTS541040g9at00)盘片上,进行盘片启动过程偏摆测试(采样频率 100 kHz)。图 4 中纵坐标表示测点间差分位移变化,虚线为单路

测量启动盘片偏摆结果,实线为前者 1000 点滑动平均处理结果,反映 10 ms 内盘片姿态(平衡位置)。由于盘片安装偏斜以及表面形貌的影响,盘片转动一周两测点位移变化一周;盘片从静止逐渐加速过程中,盘片姿态呈振荡变化,对差分距离测量影响

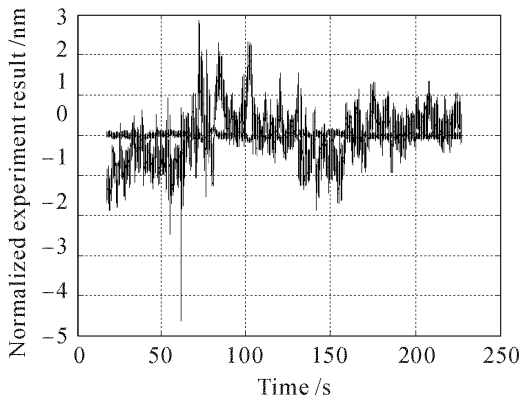


图 3 系统稳定性实验结果
Fig. 3 Stability of the system

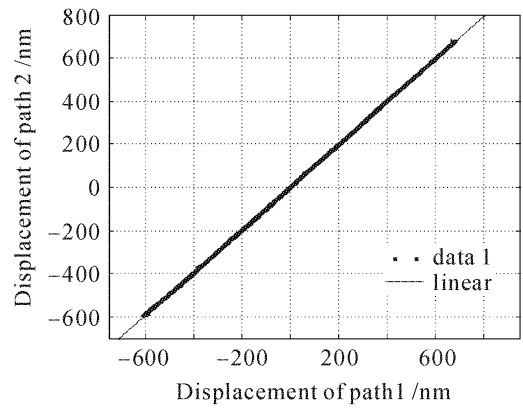


图 5 两路盘片偏摆测量结果相关图
Fig. 5 Correlation of the result of the two paths

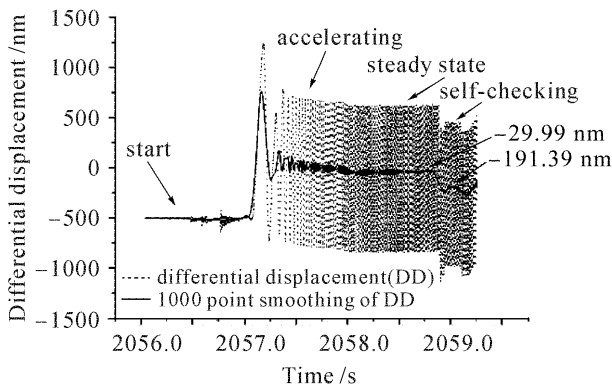


图 4 启动过程的盘片偏摆及姿态变化
Fig. 4 Tilting motion and equilibrium position of the rotating disk during start-up process

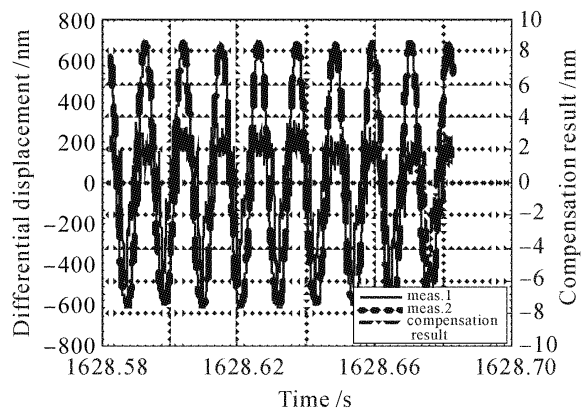


图 6 硬盘飞行高度测量结果
Fig. 6 Result of flying height measurement for a hard disk drive

在 20 nm 以上,当盘片转速趋于稳定的时刻,盘片姿态趋于稳定;当磁头自检加载进入盘片面内运动时,盘片姿态发生变化约为 160 nm(测点间距 2 mm)。这一结果证实:盘片不同转速下姿态的不同,即平衡位置不同,对相对飞行高度测量影响在几十纳米量级;磁头载入改变盘片姿态变化 100 nm 以上。

3.3 在线瞬态飞行高度调制变化测量

首先进行 K 值标定实验。如图 5 所示, xy 坐标轴分别表示硬盘稳态转动条件下两干涉路同步测得的盘片偏摆结果,即两路盘片偏摆测量结果利萨如相关图形(闭合曲线)。图中细实线为两路相关图的一次回归拟合曲线,线性拟合得到 $K = 0.9917$, 拟合 R 值为 0.99998。

根据 K 值可进行盘片稳态工作下磁头飞行高度调制的测量。图 6 给出了硬盘稳态转动时(Hitachi HTS541040g9at00)磁头飞行高度调制测量的一组实验结果(测试时间 0.1 s, 采样频率 100 kHz)。图中呈正弦变化的粗虚线和细实线为两路干涉测量头盘差分位移变化结果(基本重合),其纵坐标列于左侧;点划线为磁头飞行高度瞬态调制

补偿测量结果,纵坐标列于右侧。可见,当盘片的动态偏摆约为 $1.2 \mu\text{m}$ 时,磁头相对盘片飞行高度变化具有与盘片偏摆运动同周期的调制现象,其变化在 10 nm 以下。测量结果表明测量系统可清晰描述小于 10 nm 的飞行高度瞬态变化。

由于所用商品硬盘不具备生产线上进行产品调速测量相对飞行高度条件,目前只能进行飞行高度瞬态调制检测。可定义盘片转速为零或较低转速时头盘接触,将两路相位测量结果均置为零,那么当盘片加速到工作转速时,测量这一过程的两路飞行高度变化即可得在线磁头飞行高度值。

4 结 论

在线检测商品硬盘磁头飞行高度是高密度磁存储技术商品化的重要环节。提出了对称共路双频外差干涉在线测量商品磁头飞行高度的方法,结合相对飞行高度和绝对飞行高度测量不一致结果比较,可得出:

- 1) 硬盘启动结果表明,传统阿贝误差补偿方法

中未考虑的盘片不同转速下姿态变化引入的误差(20 nm以上)是以往相对飞行高度测量方法不准确的主要因素,需要实时补偿这一误差。

2) 该方法采用计量型横向塞曼激光器作为外差光源,结合高速相位测量技术,可实现对磁头飞行高度高分辨率(0.1 nm),高采样频率(100 kHz)直接在线溯源计量,灵敏度显著优于传统方法。由于无需机械缩进光强标定,仪器调试简便,使该系统具有较高的鲁棒性和准确性,适合生产线检测要求。

3) 在线飞行高度检测系统需要具有较强的环境适应性。该方法并采用两路对称布局的双差动干涉仪结构,能够自适应补偿环境振动等扰动引入的随机误差(5 kHz振动带宽采集,200 s内漂移小于0.6 nm),以及盘片复杂运动引入的阿贝误差,适合10 nm以下飞行高度测试的高稳定性要求;该方法还可兼容透射式玻璃盘片模拟条件下硬盘磁头飞行高度研究。

参 考 文 献

- 1 Brian H. Thornton, A. Nayak, D. B. Bogy. Flying height modulation due to disk waviness of sub-5 nm flying height air bearing sliders [J]. *Transactions of the ASME*, 2002, **124**:762~770
 - 2 Lacey Christopher. Method and apparatus to calibrate intensity and determine fringe order for interferometric measurement of small spacings [P]. U. S. Patent 5,280,340, 1994-01-18
 - 3 P. W. Smith, S. K. Ganapathi, D. H. Veillard. Measurement of head-disk spacing using laser heterodyne interferometry—part II: simulation and experiments [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1993, **29**(6):3912~3914
 - 4 Peter de Groot, Leslie Deck, James Soobitsky *et al.*. Polarization interferometer for measuring the flying height of magnetic read-write heads [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6):441~443
 - 5 D. H. Veillard, S. K. Ganapathi, P. W. Smith. Real-time tracking of the head-disk separation using laser heterodyne interferometry. part one: instrumentation [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1993, **29**(6):3909~3911
 - 6 T. C. McMillan, F. E. Talke. Ultra low flying height measurements using monochromatic and phase demodulated laser interferometry [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1994, **30**(6):4173~4175
 - 7 G. H. Jang, S. H. Oh, S. H. Lee. Experimental study on whirling, flying and tilting motions of a 3.5 in. FDB spindle system [J]. *Tribology International*, 2005, **38**(6-7):675~681
 - 8 Yan Juqun, Yin Chunyong, Jiang Hong. Dual-frequency laser using anisotropic bireflectance film (1.2~6.0 MHz) and its polarization character [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, **18**(1):156~158
 - 9 Dai Gaoliang, Chao Zhixia, Yin Chunyong. Determining the residual nonlinear of a dual-frequency interferometer for nanometrology [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(11):987~992
 - 10 Dai Gaoliang, Yin Chunyong, Xie Guangping. Study on drift of nonlinearity in nanometer precision heterodyne interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(12):1697~1702
- 戴高良,晁志霞,殷纯永. 纳米精度双频激光干涉仪非线性误差的确定方法[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(11):987~992
- 戴高良,殷纯永,谢广平. 纳米精度外差干涉仪非线性漂移的研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(12):1697~1702