

提 要

247913

磁头飞行姿态即磁头六维运动参量的测量研究具有重要的理论意义和实用价值,引起了国内外专家的重视,被列为国家“七·五”攻关项目。

本文在理论上同时用激光多普勒测量原理和散斑干涉原理,分析了差动光路系统用于固体表面运动测量时,表面位移和光电信号相位之间的线性关系。并用实验证明了理论分析的正确性。首次提出了用直接相位测量法来提高测量分辨率,突破了现有激光多普勒测量技术中测量分辨率难以提高的困境。

在理论分析和大量调研的基础上,首次提出并实现了激光双焦点多功能磁头飞行姿态测试系统,研制了信号处理器,完成了原理实验,并装调出样机。解决了磁头在磁盘平面内微摆振测量的难题,同时还可解决磁头垂向姿态和头盘间隙测量问题。

测试系统的光路包括四光束双焦点差动式光路和双光束双焦点参考光式光路。两种光路之间通过简单的切换开关可方便地相互转换,因而可用一台仪器解决国内外在磁头飞行姿态测量时须用二台仪器的难题。

由于形成双焦点的光路为对称的准共光路系统,且机械结构稳定,所以物体上两点相对运动的测量可不受外界干扰的影响。

文中给出了与高精度电感测微仪和阿贝仪的位移测量比对结果,测量了电机运动姿态,音叉振动,实测了磁头在盘面内的微小摆振,实验结果对磁盘机研制有重要指导意义。

文中还给出了在其它领域的应用。如扬声器频响测试,望远镜稳象器微摆振测试。

本测试系统测量粗糙物体表面位移的分辨率为 $0.05\mu\text{m}$ 。比现有激光多普勒测速仪分辨率($10\mu\text{m}$ — $100\mu\text{m}/\text{s}$)大幅度提高,因而可用于微小位移、微小速度的测量。

该方法和装置比国内外现有方法和装置有明显的进步,已申报发明专利。航天部 706 所决定购买样机。还有许多单位表示了极大的兴趣。

关键词: 激光多普勒测量 磁头姿态测量 相对运动测量
位移、速度、振动测量

Abstract

Researches on attitude measurement of magnetic head, ie, the measurement of six dementional movement states of the head are very significant theoretically and valuable practically. It has been taken seriously by experts at home and abroad and was selected as one project of the seventh five-year plan of our country.

In this paper, Laser Doppler principle and scattered speckle interference principle are firstly introduced, Basing on which author analyse the linear relationship between shift of solid surface and phase of optoelectronic signal from the differential two beams system. The theoretical analysis proves complete right by a series of experiments. The paper offers a new theory that improvement of resolution can be well done by detecting the phase of signal directly, which solves a big problem remaining in the conventional Laser Doppler technique.

After having made theoretical analysis and a lot of investigation, author has set up a Laser two-beam multi-function magnetic head attitude measuring system and carried out theoretical experiments. The instrument including signal processor has been well designed and set. The system makes it easy to measure micro-vibration of the head on the disk, meanwhile measurement of the head attitude perpendicular to the disk can also be done.

Optical path in the system includes two sets. The first is the four beams two focuses differential one. The second is the two beams two focuses one with reference light. They can be changed conviniently from one to another by shifting the switch, by which the attitude measurement can be done with only one instrument, while approaches commonly used at home and abroad need two instruments.

Since the two-focus optical path is symetrical and co-optical path system and since its mechanical system is stable, measuring the relative movement between two objects can resist the outside disturbings.

The comparison experiment results for measuring the displacement with the Abbe apparatus were given in this paper. The vibration of the sound fork and the motion attitude of the electric motor were measured. In the paper the practical measurement of the micro-vibration on board of the magnetic head was carried out. The experiment result has important significance to the research and production of the disk drive.

The application in other fields were also given in the paper. Such as meas-

uring the frequency-response of the sound amplifier and micro-vibration of the picture-stabilizer of the telescope.

This measuring system has the discerning rate of $0.05\mu\text{m}$ in measuring the tangential movement on the surface of the solid, it has much improved comparing with the existing Laser Doppler velocitometer.(discerning rate is $10\mu\text{m}-100\mu\text{m}/\text{s}$) so the system can be used in measuring micro-displacement and micro-velocity.

The method and device have made remarkable improvement than the existing method and device. at home and abroad. We have applied for a patent for the system. The 706th research institute of the ministry of Aviation and Aeronautics has determined to purchase the sample machine. Other units show considerable interests in this apparatus.

Song Yunfeng (Major: Optical Instrument)

Directed by Liang Jinwen Yin Chunyong

Keywords: Laser Doppler measurement;magnetic head attitude measurement; relative movement measurement; shift, velocity, vibration measurement.

清华大学学位论文用纸

目 录

第一章 综述	(1)
§ 1.1 磁头飞行姿态及测量方法分类	(1)
§ 1.2 国内外常用磁头测试技术进展	(4)
§ 1.3 激光多普勒测速技术	(8)
第二章 理论分析	(13)
§ 2.1 本章提要	(13)
§ 2.2 多普勒频移的理论方程式	(14)
§ 2.3 光学外差原理	(15)
§ 2.4 用于粒子运动速度测量的差动多普勒模型	(16)
§ 2.5 激光多普勒测速分辨率	(18)
§ 2.6 用于固体表面运动测量的理论模型	(19)
§ 2.7 用实时位移测量法来测量固体表面运动速度	(22)
§ 2.8 提高分辨率的途径	(23)
第三章 双焦点磁头飞行姿态测试系统的光路	(25)
§ 3.1 总体方案的确定	(25)
§ 3.2 多功能磁头飞行姿态测试仪的总体光路	(27)
§ 3.3 磁头面内飞行姿态测试——四光束双焦点差动式光路	(31)
§ 3.4 磁头垂向姿态的测试——双光束双焦点参考光式光路	(31)
第四章 信号处理系统	(33)
§ 4.1 光电信号的特点	(33)
§ 4.2 信号处理系统总体介绍	(34)
§ 4.3 予处理电路	(37)
§ 4.4 高频声光驱动电源及混频电路	(38)
§ 4.5 相位锁定技术	(39)
§ 4.6 提高分辨率的措施 1——频差倍增器与数字减法器	(39)
§ 4.7 提高分辨的措施 2——相位检测器与减法器	(40)
§ 4.8 可控时钟电路	(41)
§ 4.9 计算机接口与采样程序	(41)
第五章 实验结果及分析	(43)
§ 5.1 总机装调	(43)
§ 5.2 位移测量比对实验及分析	(45)

§ 5.3 音叉振动测量试验	(48)
§ 5.4 电机运动姿态测试	(48)
§ 5.5 磁头飞行姿态测量实例	(48)
第六章 激光双焦点多功能姿态测试仪在工程上的应用	(56)
§ 6.1 扬声器频响特性测试	(56)
§ 6.2 望远镜稳像器摆振测量	(59)
第七章 结束语	(62)
致 谢	(63)
参考文献	(64)
攻读博士期间发表的主要论文	(66)

第一章 综述

§ 1.1 磁头飞行姿态及测量方法分类

一. 前言

随着计算机市场需求的不断提高, 硬盘驱动器的发展十分迅速。硬盘驱动器的性能与很多因素有关, 磁头运动姿态是决定磁记录密度和磁盘驱动器是否能长期稳定可靠工作的重要因素。随着磁记录原理、介质、制造工艺的不断改进和发展, 以及伺服定位控制精度、主轴电机性能的不不断提高, 提供了实现了超高密度磁记录的可能性, 从而对磁头机械结构及其动力特性提出了越来越高的要求。另一方面, 磁头运动姿态是多种因素共同决定的。如磁头的形状, 磁头臂的结构, 磁盘的转速、振动、头与盘的表面加工质量等。因此, 通过磁头运动姿态的测试, 不仅可检测磁头组件本身的机械动态特性, 还可作为驱动器性能的综合检验项目。所以, 对磁头运动姿态的测试有重要意义, 引起了国内外专家的重视。

二. 磁头运动姿态的描述

在硬盘机中使用的磁头多为浮动式磁头。在磁盘和磁头相对静止时, 磁头与盘片, 处于接触状态, 当磁盘转速达到一定程度时, 磁头和磁盘之间形成一层极薄的空气膜, 使磁头与磁盘脱离接触, 如图(1-1)

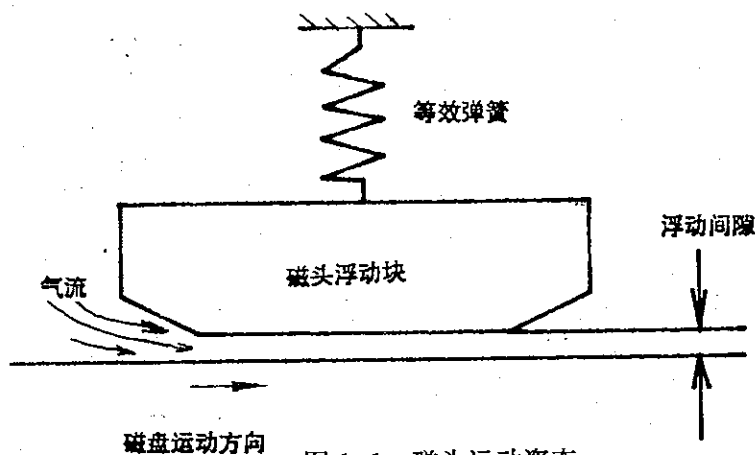


图 1-1 磁头运动姿态

磁盘轴向偏摆、轴向跳动以及盘面不平度, 粗糙度等, 都会影响浮动间隙中气流的变化; 从而影响磁头浮动状态。为了维持浮动块对于盘片的跟随性,

磁头固定在一个可以在垂直方向上下移动, 绕纵向轴和横向轴可以转动的支承系统上。这种要求通常是用薄片金属弹簧来实现的。弹簧架通过磁头臂和磁头驱动系统相连。磁头在驱动系统驱动下, 沿盘径向移动以选取所要求的磁道。在理想情况下, 磁头能迅速精确地停在所需磁道中心位置。但实际上, 磁头在中心位置附近会有振动。

人们在研究磁头浮动特性时, 常常使用的磁头模型是具有三个自由度的(位移 Z , 纵摆 θ_x , 横摆 θ_y)振动模型。这对于磁头运动姿态的描述是不完整的。实际上考虑各种误差及干扰因素时应用六自由度模型来描述磁头运动姿态, 即: 磁头中心的三个平移自由度(X 、 Y 、 Z), 和磁头的三个转动自由度(θ_x 、 θ_y 、 θ_z)。如图 1-2 所示。

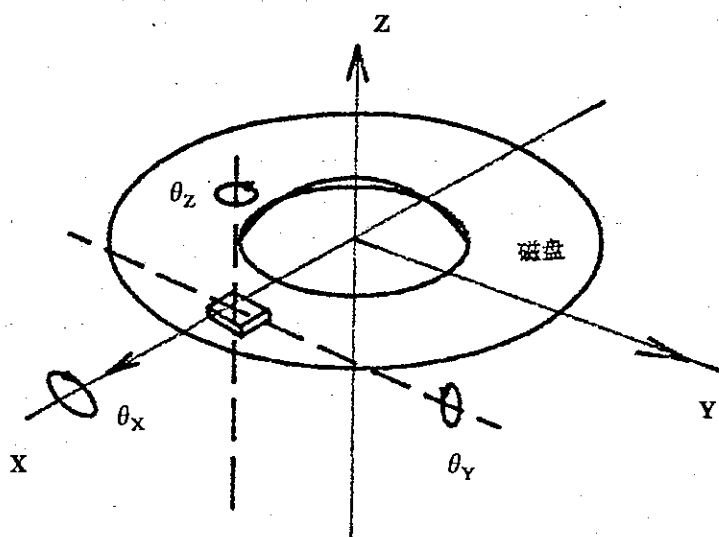


图 1-2 磁头运动自由度

也就是说, 要同时测量出磁头的六维运动量, 才能完整地描述出磁头的运动姿态。这在实际中很难办到。为了方便起见, 人们常把磁头运动姿态分解为几个分量, 分别进行测量。例如可分解为盘面内运动(X 、 Y 、 θ_z)和盘面外运动(Z 、 θ_x 、 θ_y)。

另外, 由于磁盘驱动器性能是由磁头与磁盘共同决定的, 除研究磁头的绝对运动姿态(相对于机壳坐标系)外, 研究磁头与磁盘的相对运动姿态, 如头盘间隙等, 是非常重要的。图 1-3 是磁驱动器的头盘系统照片。其上盖开玻璃窗。

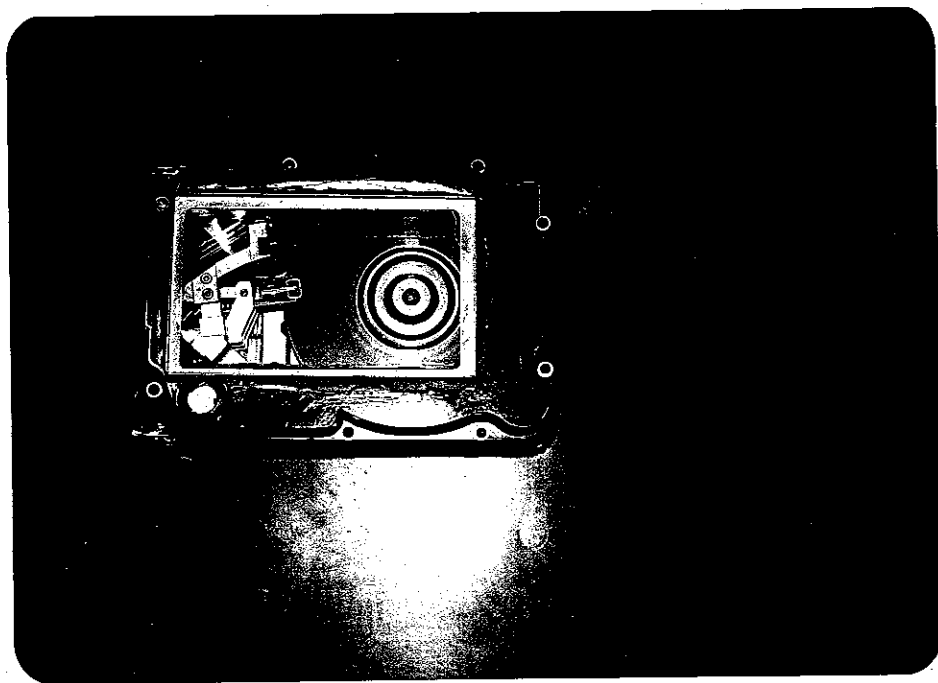


图 1-3 磁盘驱动器

三. 测量方法分类

根据研究问题的角度不同, 可有不同的分类方法。

按描述磁头运动的坐标系来分, 可分为: 绝对运动姿态的测量 (相对于固定的机壳座标) 和相对运动姿态的测量 (相对于转动的磁盘坐标系)。

按测量项目来分, 可分为: (1) 面内运动姿态测量, 如磁头寻道速度, 磁头在盘面内振动等; (2) 面外运动姿态测量, 如头盘间隙测量, 磁头在垂直方向振动等。

按测量方式来分可分为: (1) 模拟法: 如白光干涉法测量头盘间隙, 是以玻璃盘来模拟磁盘。(2) 非模拟法: 在实际磁盘机上进行测量。

按测量原理来分, 可分为: (1) 电子光学式测振器法; (2) 电容法; (3) 光学干涉法; (4) 激光多普勒法; (5) 磁头读出信号分析法。

§ 1.2 国内外常用磁头测试技术进展^[1-8]

在磁头运动姿态测量时,存在着以下几方面的困难条件:

(1) 磁头浮动间隙已从几微米降到 0.2 个微米,要求测量精度在几纳米以上。

(2) 磁头体积小($2 \times 4 \times 6\text{mm}^3$),重量轻,受到其它外力作用时会改变其运动状态。

(3) 为测出磁头运动动态特性,测量仪器应具有高的动态响应。可测频率应在 1000HZ 以上。

(4) 磁盘在转动过程中,会产生振动,所以从静止的基准面和磁头的相对位置无法测量出磁头的浮动量。

由于上述理由,限制了在磁头运动姿态测量时,不能用接触式量仪或气动量仪。满足上述要求的测量仪器有电动量仪和光学量仪,下面介绍几种国内外现有的方法。

(一) 电子光学式精密测试仪:

在磁头上涂以黑白分明的“界线”。该“界线”由光学成像系统成像于光电倍增管阴极上,光学像转换成电子图像。当磁头上界线移动时,会在测试仪输出端产生电压的变化。该方法可测振幅范围:0~5mm;测量距离 300mm;静态分辨率 $0.5\mu\text{m}$;可测振动频率 15KHZ,测量精度 $\pm 1\%$ 。

(二). 电容法

两块金属平行平板间的电容量为:

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{4\pi T} \times \frac{1}{9} \times 10^{-5} (\mu F)$$

C—电容量;

ϵ —电极间电介质的电导率;

S—电极间相对部分的面积(cm^2);

T—两块金属板的间隙。

所以电容值随间隙 T 的变化而变化。利用这一原理,将电容两电极之一当做磁盘,另一电极埋入磁头,就可测量头盘间隙。

这种方法存在以下问题:

(1). 标准间隙的设定。磁头浮动量是 0~ $5\mu\text{m}$ 的微小尺寸。应在测量范围内精确校正标准间隙与传感器输出的关系。

(2). 电极的大小。埋入磁头的电极面积越大,测量灵敏度越高,但磁头

本身限制了电极不能过大。

(3) 杂散电容的影响。磁盘转动时空气的流动, 电极与实验装置和人体的位置关系等都会产生杂散电容, 影响测量精度。

电容测量法对于 $1\mu\text{m}$ 以下间隙测量, 校正困难, 很难保证精度。随着对测量精度要求的提高, 这种方法已逐渐被光学干涉法取代。

(三) 光学干涉法

根据采用的光源可分为单色光干涉法, 白光干涉法, 激光干涉法。

其基本原理是利用玻璃盘来代替磁盘, 光线透过玻璃盘照到磁头表面, 由玻璃盘表面和磁头表面反射的光线产生干涉条纹, 通过对干涉条纹的测量, 可得到磁头与玻璃盘的浮动间隙和磁头姿态角。见图 1-4。

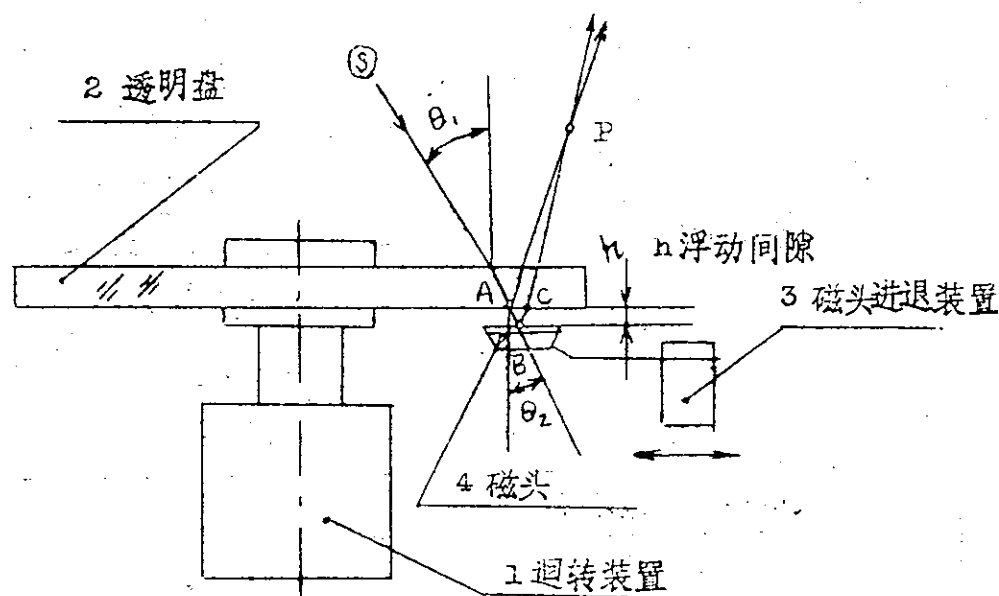


图 1-4 光学干涉法测量原理

单色光干涉法精度较低($\pm 0.04\mu\text{m}$), 一般适合测量 $1\sim 3\mu\text{m}$ 的浮动间隙。

白光干涉法可测量出低于 $1\mu\text{m}$ 的浮动间隙。最初的白光干涉仪是靠人眼来观察干涉条纹的颜色, 根据牛顿色尺来判读浮动间隙测试仪, 就是基于单色光干涉与白光干涉原理。近年来, 电子计算机技术与干涉技术相结合, 产生了

数字化, 自动化的飞行高度测试仪. 例如美国, McGiee 公司生产的 M502 型飞行高度测量仪, 借助于先进的分光辐射谱仪和 IBM / mpc 计算机, 对干涉条纹进行数字化分析处理, 实现了飞行高度的自动测量. 其测量精度为 $0.0025 \sim 0.005 \mu\text{m}$.

单色光干涉法、白光干涉法测量出的头盘间隙与磁头姿态是准静态量, 无法测出磁头运动姿态的高频成分。

激光干涉法, 利用多光束干涉原理, 通光检测干涉光强度的变化, 实现浮动间隙静特性和宽频带动特性的高精度测量。其测量精度为 $0.002 \mu\text{m}$, 最小间隙为 $0.025 \mu\text{m}$, 分辨率 $0.0013 \mu\text{m}$, 最高测量频率到 100KHZ。

(四) 激光多普勒测量法

这种方法与上述电容法、干涉法不同, 可直接在实际磁盘驱动器上测量。如果测量在超净实验室进行, 则可卸下磁盘机上盖, 将激光束射到磁头上; 如果不在超净实验室进行, 需要在磁盘机外壳上开一玻璃窗, 激光束透过玻璃窗入射到磁头上。从磁头上反射及散射回来的光由光电接收器接收。当磁头运动时, 光电接收器输出电信号的频率会产生与运动速度成比例的变化。检测电路可将频率检测出来, 得到磁头运动姿态。激光多普勒测量法包括参考光测量法和双光束差动测量法。参考光测量法适合于面外运动测量, 差动测量法适合于面内运动的测量。现有的测量仪器大都是单焦点的, 仅能测量磁头上一个点的运动。

激光多普勒测量法的测速精度在 $10\% \sim 0.5\%$, 测速范围 $0.1\text{mm} / -10\text{m} / \text{S}$, 可测振幅 $10\text{nm} \sim 10\text{cm}$

(五) 利用磁头读出信号测试法

磁头读出线圈所感应的电势经放大, 带通滤波后得到模拟量信号, 这是一种近似的正弦波, 其幅值随头 / 盘间隙、介质层厚度, 磁头缝隙宽度、头 / 盘相对运动速度等因素而变化。如果认为磁盘转速足够恒定, 介质厚度

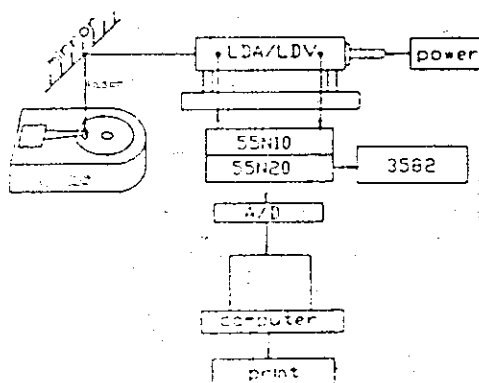


图 1-5 激光多普勒测量法

足够匀, 可以忽略它们对读出信号幅值的影响, 则这种幅值的变化纯属是由头 / 盘间隙变化而引起的。此时 Wallance 公式成为下列形式:

$$e = e_0 \cdot \exp(-2\pi d / \lambda)$$

其中 e_0 为头盘无间隙时的读出电势, d 为头盘间隙, λ 为读出信号波长。

根据调制理论, 高频读出信号即为载波, 由于头/盘间隙变化引起的读出信号幅值的变化则构成了包络线。经过解调后的包络线可直接示于示波器, 或经高速数据采集装置存贮起来, 再经标定, FFT 等一系列处理得到头盘系统动态信息。

(五) 各种测试方法的比较

1. 光电式精密测振器适合于面内运动的测量, 需在磁头上涂黑白标志;
2. 电容测量法适合于相对面外运动姿态即头盘间隙的测量, 不足之处是需将电容一极装在磁头内, 这对本已很小的磁头来说将很难接受。
3. 光学干涉法适合于面外运动姿态的测量, 不足之处, 是要将磁盘用玻璃盘来模拟, 不符合磁盘机的实际工作情况。
4. 激光多普勒法, 既适合于面外运动的测量, 也适合于面内运动姿态的测量。有较高的精度和频响特性。双焦点测试系统可用于头盘相对运动的测试。
5. 利用磁头读出信号的测试法, 设备简单, 不需要其它测试法中必需的传感器。可方便地用于磁头动态特性的实地测量。但如何定标, 如何把各个方向上的运动分离是困难的问题。

(六) 磁头运动姿态测试技术发展动向

1. 提高光学干涉法的自动化程度

国外已出现了高性能的数字化头盘间隙测试仪, 我国从 1980 年开始研制头盘间隙测试仪, 可测出 $0.2\mu\text{m}$ 的微小间隙, 但自动化程度很低, 需要提高自动化程度。

2. 发展多功能磁头运动姿态测试技术

磁头运动姿态包括许多项目, 如面外三维运动, 面内三维运动。磁盘驱动器研究者迫切需要能同时对各个项目进行测量的多功能仪器。国内外现有仪器无法满足这些要求, 所以要加快研究多功能测试技术, 以满足科研及生产的需要。

3. 将激光多普勒测试技术与磁头读出信号分析法紧密结合, 实时测量磁头运动姿态。

4. 将机械故障诊断技术用于磁头运动姿态测试信号的分析, 深入研究各种相关关系, 为磁盘驱动器性能改善提供依据。

5. 研究开发新型的测试传感器, 如半导体激光式传感器, 光纤传感器,

激光散斑传感器等。

§ 1.3 激光多普勒测速技术

一、发展简况:

激光多普勒测量技术是六十年代发展起来的一种非接触测量方法。它是利用被测物散射光的多普勒频移来获得速度信息的。它涉及光学, 激光、光电检测 and 信号处理等学科知识, 是一门既有理论, 又有广泛实际应用的综合性技术, 可用来测量固体的运动速度, 但通常主要用来测量流体运动速度, 湍流强度, 雷诺应力等参量。在国外文献中根据英文字母缩写常简称为: LDV(Laser, Doppler Velocimeter)或 LDA(Laser Doppler Anemometer)。1964年 Yeh 和 Cummins 发表文章, 报导了首次测量水流速度的实验, 宣告了 LDA 的诞生。此后很多人投入这一领域, 为改进或创制新的光路, 为阐明机理, 探明信号的特点, 为探讨各种信号处理技术, 研制相应的信号处理系统, 为能分辨流向的正负性, 为应用于各种具体环境, 一句话为了发展 LDA 从各方面做了许多研究工作, 在各种刊物上发表了大量文章, 国际上多次召开过专题学术会议, 并已有许多种专著问世, 进入 70 年代以后, 许多国家制成商品仪器。

二. LDA 的主要优点

1. 空间分辨率高。一般 LDA 的探测体积为椭球形, 根据具体情况, 两个短轴在几十微米至几百微米之间, 长轴在几百微米至几毫米之间, 探测体积在 $0.001 \sim 1\text{mm}^3$ 的范围。

2. 公认测速准确度高。

3. 响应快, 时间分辨率高。

4. 测速范围广。

5. 非接触测量。

6. 线性好, 标定简单, 易辨别方向。

三. LDA 在用于固体表面精密计量中的困难

1. 测量固体时, 往往需要 LDA 的更高的分辨率。例如磁头面内的微小摆动、磁头起飞过程, 固体形变, 蠕变, 温度收缩和热膨胀的测量中的需要有 $1\mu/\text{s}$ 以内的高分辨率, 而现有的测试仪器大都在 $100\mu/\text{s}$ 以上, 表 1 是国外激光多普勒测速仪的性能指标。提高测量分辨率是 LDA 用于固体表面精密计量时必须解决的问题。

表 1

国别和型号	测速范围	精 度	电频率范围
美TS1-1090	1mm/s~500m/s		2kHz~50MHz
英剑桥物理科学 仪器公司	100μm/s~100m/s 100μm/s~100m/s	±0.5%	2kHz~50MHz 100Hz~10MHz
丹麦DISA55L-I型	3mm/s~300m/s	1%	2.25kHz~15MHz
丹麦DISA55L-II型	3mm/s~300m/s 装有声光调制器 调制激励频率 40MHz	1%	2.25kHz~15MHz
丹麦DISA55L-90	2mm/s~200mm/s	1~2.5%	2kHz~100MHz
奥地利BBC	5.5mm/s~337.5m/s	1%	5kHz~16MHz
GoerZLSEOL			
西德PolytecL ₂ F	1m/s~1000m/s	0.5%	

一种观点认为,可测的多普勒频率极限分辨率主要取决于激光的单色性。如果氦氖激光的谐振腔长度短一些,功率低于 1mw,那么氦氖激光的频宽可窄到大约 10 赫。而 $\sin\theta=1(\theta=90^\circ)$ 时,可测速度最低。这样 LDA 可能的测速分辨率约为:

$$V=3\mu\text{m}/\text{S}$$

另外一种观点认为,尽管在高分辨率测量时存在着一系列困难,但通过用一种对多普勒信号的空间-时间滤波办法,可测出 $10^{-2}\sim 10^2\mu\text{m}/\text{s}$ 的速度。分辨率取决于整个装置的稳定性,而上限取决于所用调制频率。这种方法对 $10^2\mu\text{m}/\text{s}$ 以下的速度测量是可以做到的,但对于 $10^2\mu\text{m}/\text{s}$ 以上的速度测量,由于所需要的高压调制频率难以提高,限制了向高速发展,从而限制这种方法的使用范围。

本文在理论和技术上解决了高分辨率测量问题。

2. 因为刚体的平面运动须用刚体的平动和转动来描述。而用于测量磁头及其它物体面内运动的现有激光多普勒测速仪(图 1-6)为单焦点式的,不可能测量出物体绕光轴的转动。本文设计了一种新型的双焦点光路系统,成功地解决了这一问题。

3. 测量物体表面法向运动时可用图 1-7 所示激光测振仪,也可用 1-8 所示光纤式测量仪。这两种仪器代表着国际先进水平。图 1-9 是国内某单位研

制的一种采用单声光器件的测振仪，可用于测量物体表面法向运动。

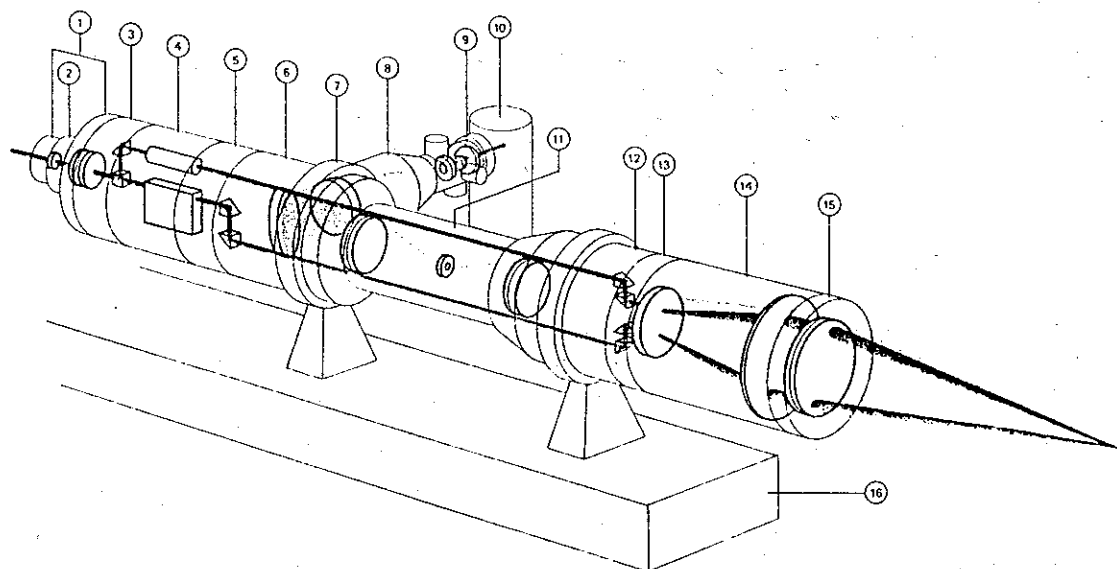


图 1-6 DISA 55X 型测速仪

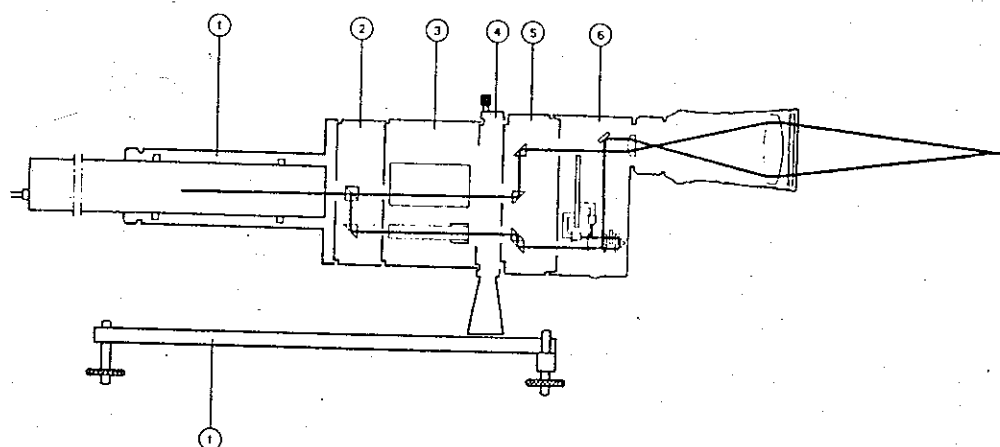


图 1-7 DISA 55X 型测振仪

四. LDA 的发展趋势

随着近代光学技术、电子技术的发展以及各种实际需要的迫切要求，LDA 技术也在不断向前发展，归结起来有以下几个方面：

1. 研究发展光纤式 LDA 测量仪；
2. 采用半导体激光器做 LDA 的光源使之小型化(图 1-10)；
3. 集成光学技术应用于 LDA 技术，得到小型、高稳定性的测量仪(图 1-11)；

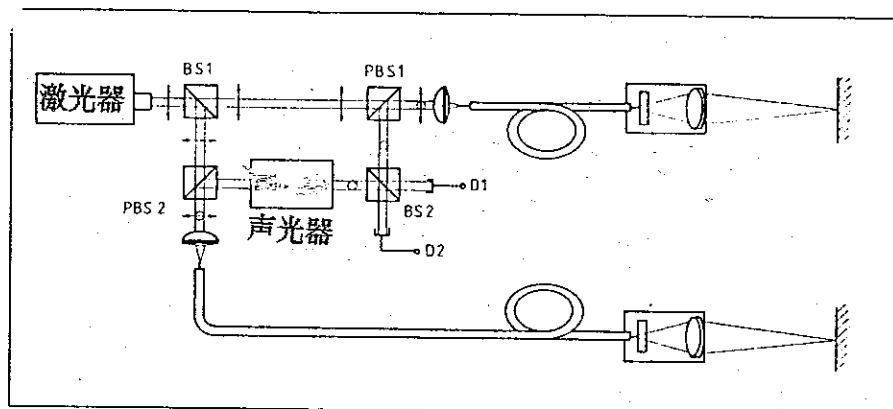


图 1-8 西德 Polytec 两通道光纤测振仪

4. 将电子计算机技术应用于LDA, 提高自动化程度;

5. 将光学信息处理技术应用于 LDA, 提高光电信号质量;

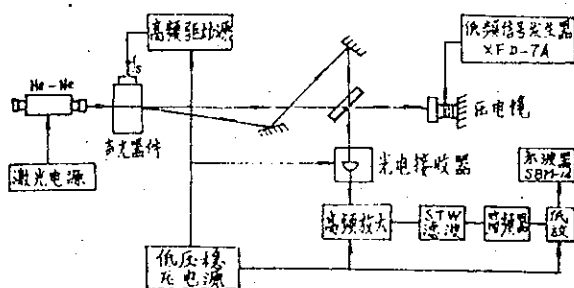


图 1-9 国产声光外差测振仪

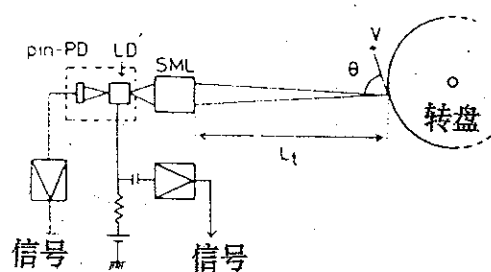


图 1-10 利半导体激光器的 LDV

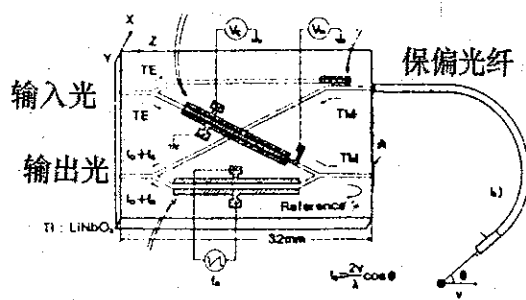


图 1-11 集成光学式 LDV

6. 提高 LDA 分辨率, 扩大测速度范围, 向超低速和超高速发展;

7. 扩大 LDA 应用领域, 如精密几何量计量, 多相流测量, 多参数综合测量等。

当同时需测量物体表面法向和切向运动时, 如磁头盘面内姿态和垂向姿态时, 往往需用图 1-6 所示仪器和图 1-7 所示仪器组合使用。这样的测量系统体积庞大, 价格昂贵, 使用不便。

本文成功地设计了一种双焦点多功能测试系统可同时测量切向和法向的运动。

第二章 理论分析

§ 2.1 本章提要

磁头垂向飞行姿态的测量在国外文献中已得到较满意的解决。但对面内运动姿态的测量,特别是磁头上两点面内相对运动的测量即磁头面内摆动的测量尚未见报道。所以要全面了解磁头飞行姿态,必须着重解决磁头面内姿态的测量。因为磁头尺寸较小($4 \times 3 \times 2\text{mm}^3$),磁头上两点处的相对速度是比较小的。另外,研究磁头跟随特性,以及磁头在主轴电机启停时的飞行姿态时,都需要测量分辨率很高,目前常用测速仪的分辨率都在 $100\mu\text{m/s}$ 左右,无法满足要求^[1]。

提高测量分辨率不仅仅是磁头姿态测量的需要,而且是具有普遍意义的问题。

在固体表面运动速度测量分辨率问题上有两类问题需要得到解决。一类是理论上的问题,一类是技术上的。在理论上,首先要探讨的是提高分辨率的可能性问题。激光多普勒测量技术在固体运动测量时的应用,都是基于流速测量的理论分析。而流速测量所要求的分辨率往往没有固体精密测量时要求的高。因此深入细致地研究多普勒测量技术在固体测量时的理论,是国内外学者普遍关心的问题。

本章用两种理论对粗糙物体表面运动的测量原理进行了分析。一种是激光多普勒测量理论,另一种是激光散斑干涉理论。在近代光学中,这两种理论属于两个独立的分支。通过分析和实验验证,得到以下结论。

1. 在用于固体表面运动测量时,两种理论的本质是一致的,是同一物理现象的不同解释。

2. 多普勒测量原理是基于检测激光的频移,而散斑干涉理论是基于检测光场的相位,前者的出发点是测速,后者是测量位移。

3. 在工程应用中,不同的出发点会导致不同的结果。从检测运动物体的多普勒频移出发研究物体运动,适合于运动速度较高且分辨率较低的场合($100\mu\text{m/s}$ 以上的速度),由散斑干涉理论检测相位变化来研究物体运动,则适合于静态高分辨率的场合。把两种思考方法结合起来,就可以解决高分辨和高速,以及静态动态的同时测量问题。

§ 2.2 多普勒频移的理论方程式^[13]

任何形式的波的传播，由于波源、接收器、传播介质或散射体的运动会使频率发生变化。本文所关心的是移动物体所散射的频移。光源和观察者是相对静止的。可以把这种情况当作一个双重多普勒频移来考虑。先从光源到移动物体，然后由移动物体到观察者。在图 2-1 中，考虑从光源 S 发出的频率为 ν 的光被物体 P 散射，在 θ 处来观察散射光，运动方向和 PS 及 PQ 所成的角度用 θ_1 和 θ_2 来表示。

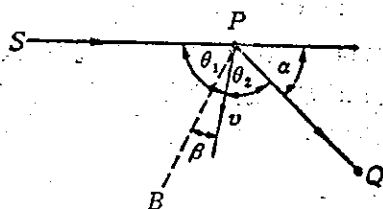


图 2-1 由移动物体 P 产生的多普勒频移计算

在 P 所观察到的频率由相对论方程给出

$$\nu' = \frac{\nu}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \left(1 + \frac{V}{C} \cos \theta_1\right) \quad (2-1)$$

该频率的光又被 P 重新发射出来，在 Q 处接收到的频率为 ν'' ，它由一下列方程确定：

$$\nu'' = \frac{\nu' \sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/C) \cos \theta_2} \quad (2-2)$$

由于这种情况中 θ_2 角是根据观察者来测定的。因此：

$$\frac{\nu''}{\nu} = \frac{1 + (V/C) \cos \theta_1}{1 - (V/C) \cos \theta_2} \quad (2-3)$$

在 $V \ll C$ 时，有：

$$\Delta \nu = \nu'' - \nu = \frac{\nu V}{C} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (2-4)$$

采用一个熟知的三角变换后得

$$\Delta \nu = \frac{2\nu V}{C} \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (2-5)$$

由图 2-1 可知：

$$\alpha = \pi - (\theta_1 + \theta_2) \quad (2-6)$$

其中 α 是散射角且:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \cos \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (2-7)$$

还有 $\frac{\theta_1 - \theta_2}{2} = \beta$

β 是速度向量和 PB 之间的夹角, PB 是 PS 和 PQ 夹角的平分线, 称为散射向量.

将式 2-6、2-7、代入 2-4 得:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{2V}{C} \cos \beta \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2-8)$$

由此可见多普勒频移依赖于散射半角的正弦值和 V 在散射方向的分量 $V \cos \beta$. 方程 2-8 也可用波长 λ 表示为:

$$\Delta v = \frac{2V}{\lambda} \cos \beta \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2-9)$$

§ 2.3 光学外差原理^[13]

如果散射光的多普勒频移足够大, 它就可以被检测, 而且可以用高分辨率的法布里—珀罗型光谱仪直接测量. 但在大多数速度测量中, 多普勒频移对直接测量来说太低了, 它们一般在 10KHZ~10MHZ 范围内, 超出了光谱仪的分辨率. 因此大多数测量使用光学外差以及某种形式的干涉或其它技术.

外差是无线电中熟悉的技术, 它由两个信号相加再通过一个非线性电路元件或检测器. 混合后的信号包含了和频差频及谐波. 假如初始频率是接近的, 低的差频很容易用低通滤波器分离出来. 完全相同的原理可用于光学. 将两束不同频率的光同时照射在光学检测器上, 可观察到差拍. 因光检测器的输出与入射光的强度成正比, 即与光学电场的平方成正比. 所以从电学意义上讲, 一般的光学检测器是非线性的. 因此两个光场在检测器上相加产生了包含差频的输出.

用下式表示时刻 t 的两个场

$$E = E_1 \cos (2\pi f_1 t + \varphi_1)$$

$$E' = E_2 \cos (2\pi f_2 t + \varphi_2)$$

式中 f_1, f_2 是频率, φ_1, φ_2 是任意的相位, 注意到检测器的输出 $i(t)$ 正比于总电场的平方。由此:

$$i(t) = B \cdot \left[E_1 \cos (2\pi f_1 t + \varphi_1) + E_2 \cos (2\pi f_2 t + \varphi_2) \right]^2$$

其中 B 是常数:

对上式作三角变换, 略去光学频率项, 因为检测器的频率响应不能太高, 可得。

$$I(t) = B \left\{ \frac{1}{2} (E_1^2 + E_2^2) + E_1 E_2 \cos [2\pi (f_1 - f_2) t + (\varphi_1 - \varphi_2)] \right\} \quad (2-10)$$

输出中包含了一个正比于总光强的直流项和一个正比于振幅 $E_1 E_2$ 的差拍频率 $(f_1 - f_2)$ 。

激光多普勒测量技术, 就是围绕测量差拍频率 $f_1 - f_2$ 而展开的。

§ 2.4 用于粒子运动速度测量的差动多普勒模型

一. 差动多普勒频差

把两束强度相近的聚焦光束同时照射到散射体上, 两束光的夹角为 α , 如图 2-2 所示. 在第三个方向上观测散射光. 令 θ 和 θ_1 是散射体里粒子运动速度 V 与入射光之间的夹角, φ_2 是 V 与观测方向的夹角. 到达检测器上的是从两束光散射出的光, 按方程(2-4)给出它们的多普勒频移分别为:

$$\Delta\nu = \frac{v \cdot V}{C} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$

$$\Delta\nu' = \frac{vV}{C} (\cos\theta'_1 + \cos\theta'_2)$$

由此检测器观测的频差 f 是

$$\begin{aligned} f &= \Delta\nu - \Delta\nu' \\ &= \frac{vV}{C} (\cos\theta_1 - \cos\theta'_1) \\ &= \frac{2V}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cos\beta \end{aligned} \quad (2-11)$$

其中 $\alpha = (\theta'_1 - \theta_1)$ 是两束照射光之间的夹角, $\beta = \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta'_1 - \pi)$ 是运动方向与光束夹角平分线的法线之间的夹角。特别要注意的是这个频率与接收方向无关。

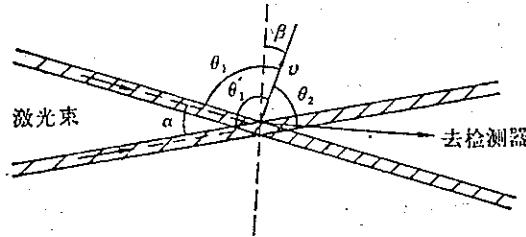


图 2-2 差动多普勒频差

二. 干涉条纹模型

在低粒子浓度的情况, 用条纹模型最容易理解这种技术的工作情况, 在相交区, 由于两束光之间的干涉, 存在着干涉条纹, 干涉条纹的间距为:

$$S = \frac{\lambda}{2\sin(\alpha/2)} \quad (2-12)$$

粒子以速度 V 运动, 如果 V 和条纹平面法线的夹角为 β , 则粒子会受到一个光强的调制, 其频率为:

$$f = \frac{2V\cos\beta \cdot \sin(\alpha/2)}{\lambda} \quad (2-13)$$

也就是差动多普勒频率。很明显由粒子发出的任意与向上的散射光也以这个频率调制。

三. 光电流信号的理论表达式

按照条纹模型来直观分析多粒子散射的情况, 就会遇到困难。因为条纹模型是基于单个粒子穿过条纹区时, 散射光强被明暗条纹调制而引起光电信号的调制。显然, 按照这种观点, 如果散射是自测量体内大量的小粒子, 则信号的品质降低, 并且当粒子的数量接近无穷多时, (保持平均散射光不变) 信噪比趋于零。很明显。如果把条纹系统投射到均匀烟尘粒子上, 由于亮条纹上几乎总是保持同样数量的粒子, 所以烟尘粒子的运动不能引起散射光强度的变化。

然而, 实验和更详细的理论指出, 在这种条件下信号也不会完全消失。由于不同粒子的散射光之间有差拍, 因而还会出现多普勒信号。

文献中^[9], 为推导出多粒子的光电流信号的表达式, 做了如下假设:

- (1) 两支相交的光束均为具有均匀强度的平面波:
- (2) 在采样体积中微粒以等速度 V 运动:
- (3) 两个不同微粒产生的散射光之间的干涉不容忽略。
- (4) 在收集窗口, 微粒所对应的整个立体角内, 散射截面是常数。

检测器上 Q 点的总电场可由条纹区内所有粒子的散射光电场 (计及相位后) 相加得到。这样可以计算 Q 点处检测器微元面积的响应。沿整个检测器的表面积分, 可以得到检测器的总电流。

$$i(t) = \iint_A B \cdot |E_{QT}(t, p)|^2 dA = I_0 + S \cdot \cos(\omega_D t + \varphi)$$

式中: B —与检测器有关的常数

$E_{QT}(t, p)$ — Q 点的总电场

I_0 —直流电流

S —具有多普勒频率的交流电流幅值

φ —初相

ω_D —多普勒频率

所有这些项的大小取决于在采样体积中同时出现的微粒的数目和其位置, 并且这些量是在与微粒穿过干涉条纹图案的渡越时间可相比较的时间内进行着变化。

由于微粒的数目和位置是随机的。所以多普勒信号的幅值和相位也是随机变化的因为频率是相位的导数, 所以在测量多普勒信号频率时会产生“随机相位误差。”此项误差是影响测量精度和分辨率的难以克服的因素。

§ 2.5 激光多普勒测速分辨率

激光多普勒测速技术在固体表面速度测量中已获得广泛应用。但目前的分辨率大都限于测量 $100\mu\text{m/s}$ 以上的速度。在许多精密测量中, 需要有更高的分辨率和精度。为此, 国内外许多学者进行了大量的研究工作, 得出了一些结论。

一种观点认为^[10], 多普勒频率测量分辨率的极限主要取决于激光的单色性。如果氦氖激光器的谐振腔长度短一些, 功率低于 1 毫瓦, 那么氦氖激光的频率可窄到大约 10 赫, 就是说, 多普勒频率可低到大约 10 赫。由 V

$$= \frac{\lambda f_d}{2 \sin(\frac{\alpha}{2})}, \text{ 当 } \alpha = 180^\circ \text{ 时 } \sin \frac{\alpha}{2} = 1, \text{ 可测速度最小, 这样 LDA 可,}$$

测速度的极限分辨率: $V_{\min} = 3\mu\text{m/s}$ 。

另外一种观点认为, 在测量分辨率高于 $10^2\mu\text{m/s}$ 的时存在的最大困难在于以下几点:^[11]

1. 在高分辨率测量时, 多普勒频移位于超低频范围, ($10^{-3}\sim 10\text{Hz}$), 因此必须处理只能用多普勒频率的几个周期持续时间测量到的信号。

2. 信号持续时间(按周期数)短大大限制对它(由于累积)滤波的可能性, 而且对光学信号(用以消除信号不希望的低频分量)的调制频率稳定性有严格要求。

3. 信号不可能长时间积累, 使信号本身(不论是相位还是振幅, 的波动对测量精度的影响比较大。

4. 最严重的困难是对多普勒信号低频分量的滤波, 因为它必须获得相移为 $\pm\frac{\pi}{2}$ 的两个多普勒信号。

为了解决上述困难, 文献^[11]介绍了一种对多普勒信号低频分量滤波的“空间时间”方法. 采用此方法解决了 $10^{-2}\sim 10^2\mu\text{m/s}$ 范围内的高分辨测量问题, 但此方法难以用于更高速度的测量。

§ 2.6 用于固体表面运动测量的理论模型

一. 引言

尽管激光多普勒测量技术在固体表面速度测量中获得了广泛应用, 但这些应用大都是简单套用流体中粒子的多普勒频移测量技术。多粒子的差动多普勒理论模型中, 光电流的表达式为 $i(t) = I_0 + S \cos(2\pi f_D t + \varphi)$, 其中 S 、 φ 是随机的。许多有关多普勒测量的理论分析中, 认为随机相位的存在是影响测量分辨率的主要因素。简单套用这种理论模型, 固体运动速度的精密测量是难以实现的, 为了解决固体表面运动精密测量问题, 就要深入研究固体表面运动速度测量的理论模型。

二. 激光在固体表面的散射机理^[12]

当用激光在固体粗糙物体表面时, 就会在其散射光场中观察到一种独特的颗粒状斑纹。这种颗粒状的斑纹被称为“激光散斑”。它的物理起因已被早期的这个领域的工作者所认识。大多数物质的表面按光波长($\lambda \approx 0.5\mu$)的尺度来说是极其粗糙的。当接近单色的光被这样的表面反射时, 在距离适中的任一点处得到光波是由许多来自表面的不同微观区的相干组元或子波组成的。见图 2-3。

如果表面确实粗糙, 则这些不同的子波走过的距离可能相差几个或许多个波长。去掉相位关系但仍相干的子波干涉就产生了激光散斑图样。

对激光散斑这种不规则图样的描述一般都用概率论与统计学的方法。有关激光散斑的理论研究是近代光学中的一大分支。我们在此不作详细介绍。仅把其中一些研究结果用到我们的理论之中。

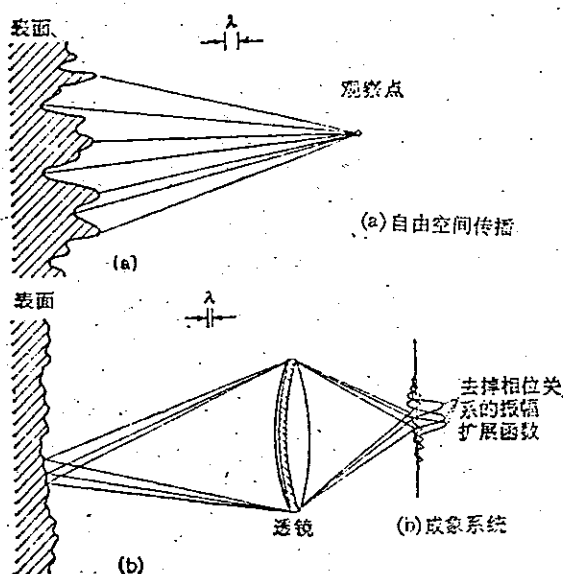


图 2-3 斑纹的物理起因

J · W · Goodman, 在推导激光斑纹图样统计特性时做了如下假设:

- (1) 光是完全相干的。
- (2) 无规则媒质引起的相位涨落大于 2π 。
- (3) 媒质不使光消偏振。
- (4) 大量散射中心对观察平面内某点强度均有贡献。

(5) 第 R 个基元相位复矢的振幅与相位统计上相互独立, 并且同所有其它基元相位复矢的振幅与相位在统计上也是独立的(即各个基元散射面积是无关的, 并且一个给定的散射组元的强度与它的相位无关)

- (6) 相位 φ_k 在主区间 $(-\pi \cdot \pi)$ 上均匀分布。

我们在实验中观察到的现象, 基本符合上述假定, 例如实验中采用同一束激光分成光程相等偏振方向一致的两束激光, 相干性是显然的, 用检偏器检查激光被测量目标散射后的散射光退偏不严重。所以, 可以采用激光散斑理论有关结论, 来分析固体表面运动测量的物理现象。

三. 利用散斑干涉理论建立双光束差动系统测速模型

我们研究的测量对象是粗糙表面。显然散斑统计理论的假设对激光多普勒测量是适用的。所以我们在研究固体表面运动速度测量时, 可以把散斑干涉理论的方法应用到激光多普勒测量中。

被研究的漫射体 A 用两个对称放置的相干光束 1 和 2 来照明, 如图 2-4 示, 透镜 O 将 A 成象于 A' 。让我们研究当物体 A 在它本身平面内经一位移时像 A' 的结构。设位移平行于 XX' 。物体 A 在 A' 平面上分别产生相应于光束 1

和 2 的两个斑纹图样 D_1 和 D_2 。考虑物体 A 的一个小面积元 M_1 (图 2-5)。假设 M_1 足够小, 使得它在 A' 上的像是透镜 O 的衍射图样 E。这个衍射斑集中于 M_1 的几何像 M'_1 上, 由于存在两个光束 1 和 2, M_1 的像由两个相同并重叠的衍射斑组成。

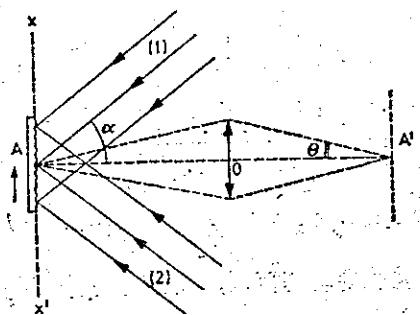


图 2-4 斑纹成象

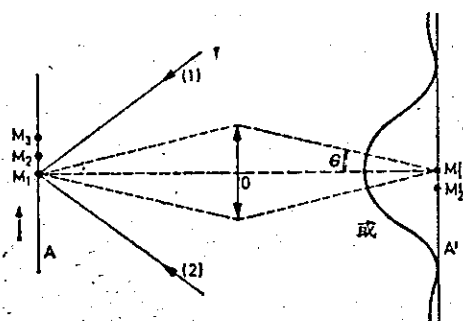


图 2-5 由光束 1 和 2 的两个斑纹的干涉

因为这两个衍射斑互相干, 其振幅必须叠加来计算合成强度 E' 。合成的衍射斑与大小相同, 但其强度可以不同。若在 M_1 处光束 1 和 2 之间的程差为零, 则在 A' 平面内振幅相加, 并在衍射斑 E' 中得到强度极大值。这个衍射斑可看作是 A 在 A' 平面上产生的斑纹 D 的亮颗粒。物体 A 位移以后, 面元 M_1 移至 M_2 , 现在衍射斑 E' 集中于 M_2 的几何象 M'_2 。如果 $d(=M_1M_2)$ 是物体的位移, 当光束 1 减少光程 $d\sin\frac{\alpha}{2}$, 而光束 2 增加相同的值。角 2α 是光束 1 和 2 之间的夹角。因此程差 Δ 在 M_1 点为零, 在 M_2 点变为 $2d\sin\frac{\alpha}{2}$ 。

如果

$$\Delta = 2d\sin\frac{\alpha}{2} = \frac{\lambda}{2}$$

则衍射斑 E' 的强度为零, 对于物体 A 所有面元可作同样的推理。像平面 A' 内的斑纹已有变化, 不再与相应于初始位置 A 的斑纹 D 相同。

假设物体进一步位移, 使 M_1 移至 M_3 , 若位移 $d(=M_1M_3)$ 满足

$$\Delta = 2d\sin\frac{\alpha}{2} = \lambda$$

则衍射斑 2 是极大值, 同在物体 A 初始位置时一样。对物体 A 所有面元

用同样方法作推理, 我们可以说, 在物体这一新位置上的斑纹与初始斑纹 D 相同, 当然它移动了, 正如像 A' 也移动了。每次位移 d 满足关系式:

$$2d \sin \frac{\alpha}{2} = n\lambda \quad (n \text{ 是整数})$$

则 A' 平面上的斑纹就变成与初始斑纹 D 相同。

如果物体在 Z 方向(物体表面法线方向)运动, 两个干涉光束光程变化相同, 结合的斑纹图样在透镜形成的象中将保持不变。与此类似表面平面内 y 方向上运动亦无影响。

$$\text{令 } S = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

当物体沿 X 方向每移动的距离为 S 时, 则斑纹的强度将变化一个周期。用光电接收器检测强度的变化其光电流表达式可写为:

$$i(t) = I'_0 + A' \cos(2\pi \frac{d}{S}) \quad (2-14)$$

其中 I'_0 为光电接收器直流量, A' 为随机函数, 与表面位置有关。

如果物体的运动速度为 V, 则 $d = v \cdot t$

所以
$$i(t) = I'_0 + A' \cos(\frac{2\pi v t}{S})$$

即:
$$i(t) = I'_0 + A' \cos \left[2\pi \cdot \left(\frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \right) \cdot V \cdot t \right] \quad (2-5)$$

这就是由散斑干涉理论导出的双光束差动测速模型。

§ 2.7 用实时位移测量法来测量固体表面运动速度。

一. 差动散斑技术固体表面速度测量模型与多普勒测量模型的比较。

在固体表面速度测量时, 我们按散斑干涉原理推导出的光电流理论表达式为

$$i(t) = I'_0 + A' \cos \left[2\pi \left(\frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \right) V \cdot t \right]:$$

$$\text{令 } f = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \cdot V$$

$$\text{则 } i(t) = I'_0 + A' \cos 2\pi f t \quad (2-16)$$

此式与多普勒速度测量时的光电流表达式

$$i(t) = I_0 + A \cos(2\pi f_D t + \varphi)$$

相比,明显的区别在于,差动散斑技术的光电流表达式中没有随机相位项 φ , 其交流成分中的相位是和表面位移成正比的。所以我们可以通过交流项的相位来得到位移信息。而多普勒速度测量中,由于存在着随机相位项 φ , 就无法精确测量相位。在此我们看到,如果把流体中多普勒的光电流表达式机械地照搬到固体速度测量中,就会给固体速度的精密测量带来困难。

此外,我们还注意到式 2-16 中的频率 f 正好就是流速测量中的多普勒频移表达式 f_D , 可见,由散斑干涉理论导出的固体速度测量模型在本质上和多普勒流体测量模型是一致的。

二. 用实时位移测量法来测量速度

在通常激光多普勒测速的应用中,都是想方设法检测出多普勒频移,即测量出光电信号交流项的频率,然后利用速度与频率的线性关系,得到物体运动速度,通过对速度的积分求出物体表面的位移。这种做法在高分辨率测量时遇到了困难。

我们在推导固体的差动测速理论模型时,是根据位移的变化得到光电信号信号的周期性变化的。光电信号的相位是与位移成比例的,检测出相位变化,就可实时测量出位移的变化。对位移进行微分可得到速度。这种思路和通常的做法正好相反。用测量实时位移的方法来测量速度,就可以解决高分辨率测量问题。

§ 2.8 提高分辨率的途径

以上几节分析了粗糙固体表面运动测量时,表面位移与多普勒信号相位是成比例关系的,表明用测量位移的方法可提高分辨率。

理论分析和实验表明,在高分辨率测量时,以下几种因素影响测量分辨率:

- (1) 光学零件的振动
- (2) 空气的抖动

(3) 在采用声光频移的光路中, 声光电源的频率波动等。

对此我们采用了以下几种措施:

(1) 稳定的机械结构。

(2) 对称的共光路设计。

(3) 用混频法实时检测声光电源频率的变动, 并消除它的影响。

第三章 双焦点磁头飞行姿态测试系统的光路

§ 3.1 总体方案的确定

一. 问题的提出

国家“七·五”攻关项目“磁盘测试设备研制”中，将磁头飞行姿态测试技术的研制分成三个子课题。清华大学承担了其中“面内姿态测试”一个子课题。头盘间隙和垂向姿态的测试分别由另外两单位承担。对于用户来讲，需要同时将磁头的各种姿态测量出来。从国际上发展趋势来看，多功能测试设备也是一个发展方向。由此我们决定研制多功能磁头飞行姿态测试仪以满足用户的实际需要。

目前，国内外常用单通道的激光多普勒测量仪来测试磁头运动姿态。单通道的测试仪不能测量出磁头的转动角度。为了测出磁头的转动、和头盘相对间隙，我们决定设计双焦点的测试仪器，来满足同时测量磁头的平动和转动的要求。

二. 磁头飞行姿态测量的运动学原理

我们可以把磁头的运动用运动学中的刚体来描述。刚体的运动可以用直线运动和回转运动的复合运动来表示。描述刚体的运动姿态必须同时测量出刚体的某一点的线速度和刚体角速度。刚体角速度可以由刚体上两点的相对转动速度来得到。

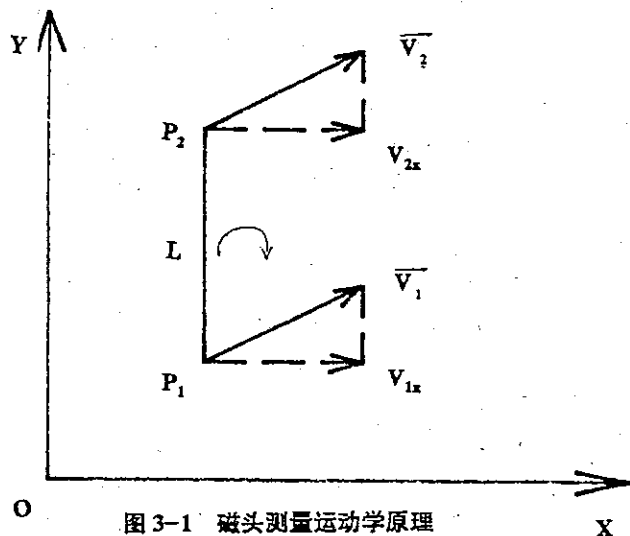


图 3-1 磁头测量运动学原理

在图 3-1 中，设所研究的磁头运动平面为 XOY 平面。磁头上两点 P_1P_2

相距 L , 且 P_1P_2 平行 Y 轴。则有:

$$\vec{V}_2 = \vec{V}_1 + \vec{V}_{2,1} = \vec{V}_1 + \vec{\omega} \times \vec{P}_1P_2 \quad (3-1)$$

对 x 分量有:

$$V_{2,x} = V_{1x} + \omega \cdot l$$

所以

$$\omega = (V_{2x} - V_{1x}) / L \quad (3-2)$$

式中:

$\vec{V}_1, \vec{V}_2$ — P_1, P_2 点的绝对速度

$\vec{V}_{2,1}$ — P_2 点相对于 P_1 点的相对速度

ω —转动角速度

V_{1x}, V_{2x} — P_1, P_2 点在 X 方向上的速度分量

所以, 只要能测出磁头上在某方向上两点的相对速度, 再根据两点的距离就可由公式 3-2 得到运动角速度。同理, 磁头在某平面内转角也可由两点的相对位移和间距得出。

二. 光学系统选择

1. 光源选择:

在激光多普勒测速中, 常用的光源有氦氖激光器、氩离子激光器。氩离子激光器体积庞大、价格昂贵、维护不便。显然对我们的仪器是不合适的。半导体激光器是近几年发展起来的新型光源, 具有体积小价格便宜等优点、在激光测速中已得到应用。但目前半导体激光器波长大都在 $0.78\mu\text{m}$ 的近红外区, 且光束发散性难以消除, 在使用过程中容易损坏。再加上国内的生产还不过关, 所以我们决定不使用半导体激光器。最后我们决定采用 5mw 的氦氖激光器。

2. 接收器选择

我们比较了一下 PIN 和光电倍增管。光电倍增管体积大, 需高压电源, 容易损坏。在接收光强稍大时容易饱和, 无法正常工作, 而且易受外界杂散光的影响。由此我们决定采用 PIN 光电二极管。

3. 光路选择

基本的光路布置有两种, 一种是参考光式光路, 另外一种双光束差动式光路。参考光式的光路适合于测量物体表面法线方向上的运动, 即沿光轴方向上的运动。差动式光路适合测量物体表面在平面内的运动, 即沿与光轴垂直方向上的运动。为了能用一台仪器同时测量磁头的面内和垂向姿态并把它们分开, 我们决定面内姿态的测量采用差动式光路, 垂向姿态的测量采用参考光式光路。两种方式可方便地相互转换。我们考虑过几种可能的方案。从中选择了

一种稳定性好、加工简单、光学元件最少且两种光路转换方便的结构。

§ 3.2 多功能磁头飞行姿态测试仪的总体光路

图 3-2 是测试系统的总体光路。

由功率为 5mw 波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器发出线偏振激光。偏振分光镜 2 将激光束分成两偏振方向相垂直的两束激光并由反射棱镜 3、4 反射成两平行光束。两平行光分别经声光调制器 5、6 后产生频移。带有频移的光束分别经 $\lambda/4$ 波片 7、8 后，变成圆偏振光。

渥拉斯登棱镜 9、10 将两圆偏振光变成四束偏振方向相互垂直的四束光。两渥拉斯登棱镜分束角相等且对称布置。每一个渥拉斯登棱镜可绕其光轴旋转，使得其分开的两光束所在平面与由另一个渥拉斯登棱镜分开的两光束所在的平面相互平行，且两平面与水平面相垂直。反射镜 11、12 固定在一导轨上可沿箭头所示方向移动以使光路适合不同的测量需要。当测量磁头面内姿态时，移动导轨使渥拉斯登棱镜 10 发出的两束光直接照到光阑 14，得到四光束双焦点差动式光路。如图 3-3。

当测量磁头垂向姿态时，移动导轨使反射棱镜 11 将渥拉斯登棱镜 10 发出的两束光截断，并反射到反射棱镜 12，使这两束光做为参考光，形成双光束双焦点参考光式光路。如图 3-4。

反射镜 15、大透镜 16、小透镜 18，反射镜 19、偏振分光镜 20 及两检偏起 21、22，光电接收器 23、24，对于两种方式的光路都是固定的。两种测量方式的转换，只需平移反射镜 11、12 的位置即可。

被测物体表面上两焦点的间距 L 是透镜 16 和渥拉斯登棱镜分束角 θ 的函数。由几何光学可得：

$$L = f_{16} \cdot \tan \theta \quad (3-3)$$

根据具体的测量对象可选择不同的 L 值。当 L 值确定后，可首先确定 θ 值，再确定 f_{16} 。改变透镜焦距、可改变两测点的间距。

对于磁头测量，两焦点的距离在 2~4mm 范围。形成两焦点的光束，偏振方向相互垂直，且实验表明，在测量点处的散射光及反射光的退偏不严重，基本保持偏振方向不变，故可用偏振分光镜将两测点的散射光分开。

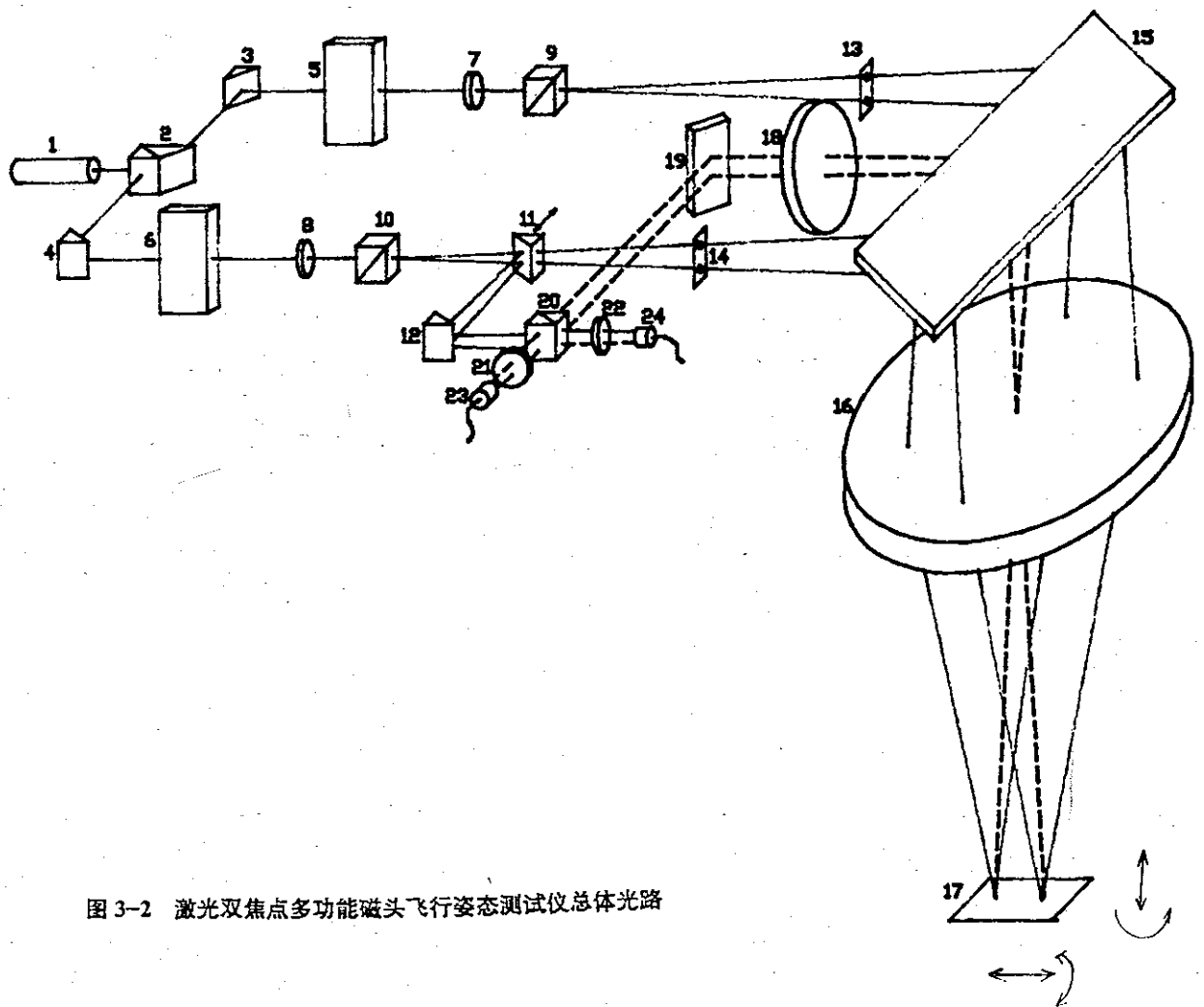


图 3-2 激光双焦点多功能磁头飞行姿态测试仪总体光路

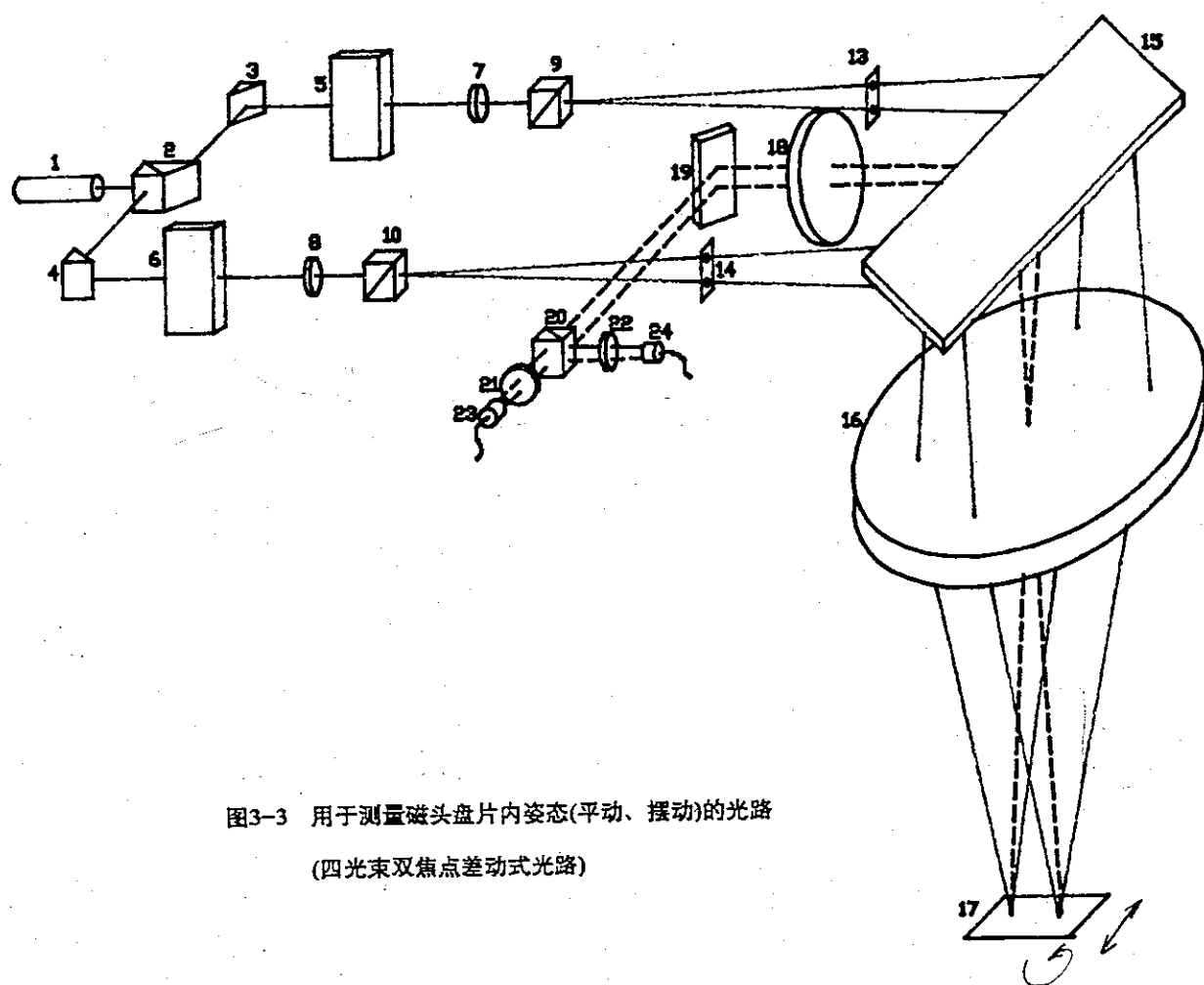


图3-3 用于测量磁头盘片内姿态(平动、摆动)的光路
(四光束双焦点差动式光路)

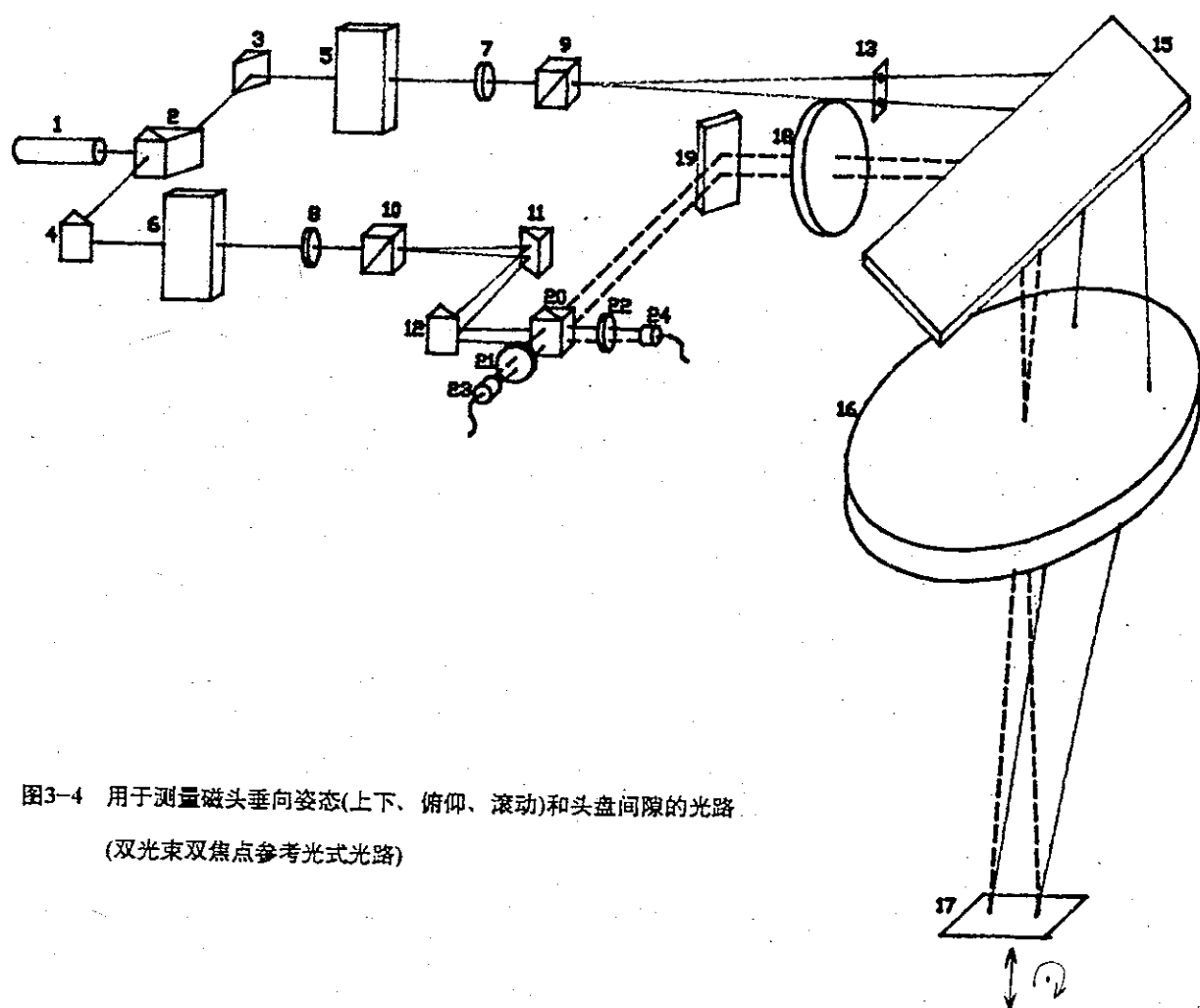


图3-4 用于测量磁头垂向姿态(上下、俯仰、滚动)和头盘间隙的光路
(双光束双焦点参考光式光路)

§ 3.3 磁头面内飞行姿态测试

——四光束双焦点差动式光路

图 3-3 所示光路为测量磁头面内运动姿态时的光路布置。由渥拉斯登棱镜 9、10 发出的四束偏振光经光阑 13、14 滤光后，由反射镜 15 反射，水平放置的聚焦透镜将四束光会聚到焦平面上两点。形成同一焦点的两束光偏振方向相同，且频差为 f_0 。频差 f_0 由声光频移器 5、6 的频差决定。

测量时，将被测磁头平面调整到透镜 16 的焦平面上。两激光焦点被磁头表面散射后，散射光经透镜 16、反射镜 15、透镜 18、反射镜 19 之后，入射到偏振分光镜 20，偏振分光镜 20 将来自不同焦点处的、偏振方向相垂直的光线分开。

一个焦点处的散射光经检偏器 21 由光电转换器 23 接收，另一个焦点处的散射光经检偏器 22 由光电接收器 24 接收。

根据差动多普勒测量原理，两光电接收器得到差拍频率 f_1 、 f_2 是与两测点的在盘片内的运动速度成正比的：

$$\begin{cases} f_1 = f_0 + [(2\sin\alpha / 2) / \lambda] \cdot V_1 & (3-3) \\ f_2 = f_0 + [(2\sin\alpha / 2) / \lambda] \cdot V_2 & (3-4) \end{cases}$$

其中 α 是两光束的夹角， λ 是激光波长， f_0 是两光束的频差。

信号处理系统可将两光电信号进行处理得到速度成正比的数字和模拟信号输出。

两个点的相对速度为： $\Delta V = V_1 - V_2$ ；

角速度为： $W = \Delta V / L$ 。

§ 3.4 磁头垂向姿态的测试

——双光束双焦点参考光式光路

图 3-4 所示为测量磁头垂向姿态及头盘间隙时的光路。

渥拉斯登棱镜 9 出射的偏振方向相垂直的两束激光作为测量光，经反射镜 15、透镜 16 射到被测物体上，在被测物体上形成两个光点。由两点的反射及散射光经透镜 16、反射镜 15、透镜 18、反射镜 19 后，在偏振分光镜 20 分别

与来自渥拉斯登棱镜 10、反射棱镜 11、12 处的参考光会合。会合后的两组光束分别经检偏器 21 和 22 后在光电接收器 23、24 的表面形成外差干涉。

输出的光电信号可表示为:

$$\begin{cases} i_1(t) = I_{01} + A_1 \cos(2\pi f_0 t + \Phi_1 + \Phi_{01}) \\ i_2(t) = I_{02} + A_2 \cos(2\pi f_0 t + \Phi_2 + \Phi_{02}) \end{cases}$$

其中 Φ_1, Φ_2 是与测量点处位移成比例的相位项。 Φ_{01}, Φ_{02} 是初始相位, I_{01}, I_{02} 是平均电流、 A_1, A_2 是随机幅值。

经后续处理电路就可得到物体表面两点处沿法线方向的位移与速度信息。

第四章 信号处理系统

§ 4.1 光电信号的特点

实验和理论分析表明, 在我们的测试系统中, 光电二极管 PIN 接收的光电信号既不同于流体测量中的多普勒信号, 又不同于以镜面反射做为测量目标的干涉仪信号, 而是一种包含许多噪声的准连续信号。信号的振幅是随机的, 相位对给定的固体表面是一定的, 相位的变化与固体表面的位移成比例。

一. 流场测量中的多普勒信号^[12]

在流场测量中, 多普勒信号是由流体中的粒子产生的。

检测器的振荡输出, 即多普勒信号的频率等于多普勒频率, 而信号的振幅不是常数。一般它有图 4-1 (a) 的形式, 振荡的振幅和相位随机地变化。这是由于散射光是以杂乱的方式由流体中的单个粒子产生的, 每个通过照明体的粒子产生一个差拍频率的脉冲信号, 其持续时间为 T_T , 即粒子

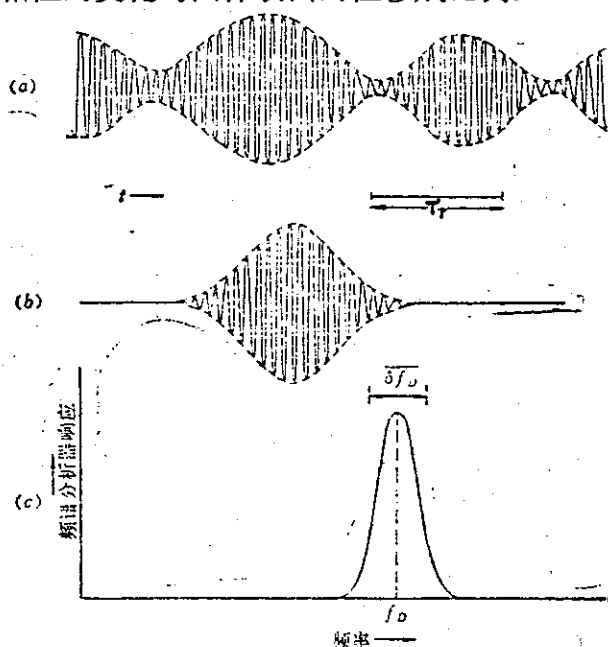


图4-1 光电信号的特点(a)典型的连续多普勒信号
(b)通过一个粒子时的信号
(c)信号的谱分析

通过测量体的渡越时间。图 4-1 (b) 说明了这种脉冲信号。由许多非相关粒子产生的信号叠加后产生随机振幅和相位脉动。由于多普勒信号的随机脉动, 进行频率分析时不能理想地显示出一个确定的差拍频率, 而是一个以差拍频率为中心带宽为 δf_D 的分布。如图 4-1 (c) 所示。这个线宽是由粒子穿过照明体时的渡越时间造成的, 常称为“模糊”或“随机相位加宽”。这个宽度显然使我们无法精确确定频率。如果对周期进行计数, 由于在时间 T_T 内相位的随机性, 则在此时间内的计数一定存在一个大约为 $\pm 1/2$ 的平均误差。因此:

$$f_D = \frac{1}{2T_T}$$

除渡越时间加宽外, 散射角的变化、光学元件的振动等, 都会使多普勒信号加宽。所以, 流场测量时的光电信号是带有随机振幅和相位的信号, 由于随机相位变化的发生不可避免地会有一些信号强度很低的区域。

二. 固体表面测量时的光电信号。

固体表面测量时的光电流信号, 其振幅和多粒子流场测量中一样是随机变化的, 但相位的变化是不一样的。在流场测量时, 相位是随机脉动的, 由于相位的随机脉动导致了信号处理时难以提高测速精度和分辨率。在固体的场合, 对于固定的固体表面、多普勒信号的相位是一定值, 且根据第二章的分析, 当固体表面移动时, 相位与位移成比例地变化。在本文介绍的双光路系统中, 由于两测量点的光路是对称的共光路系统; 所以由于光学元件振动和空气扰动而引起的相位变化基本是一致的。这样就可以利用相位测量技术及细分技术来提高分辨率。

在个别点处, 由于固体表面粗糙度、光泽等的变化, 可能会使原始信号大幅度降低。在这些个别点处会使信号产生“脱落”。所以我们称固体表面测量时的光电信号是准连续信号。

§ 4.2 信号处理系统总体介绍

一. 激光多普勒测量技术中常用的信号处理器。

通常的信号处理器有以下几种:

1. 频谱分析仪;
2. 频率跟踪器;
3. 计数器处理;
4. 滤波器库处理;
5. 光子相关器
6. 计算机处理。

市售的信号处理器价钱昂贵, 且分辨率和精度无法满足我们的需要。因此我们自行研制了适合于本系统的信号处理器。

二. 信号处理系统框图:

图 4-2 是信号处理系统的总体框图。

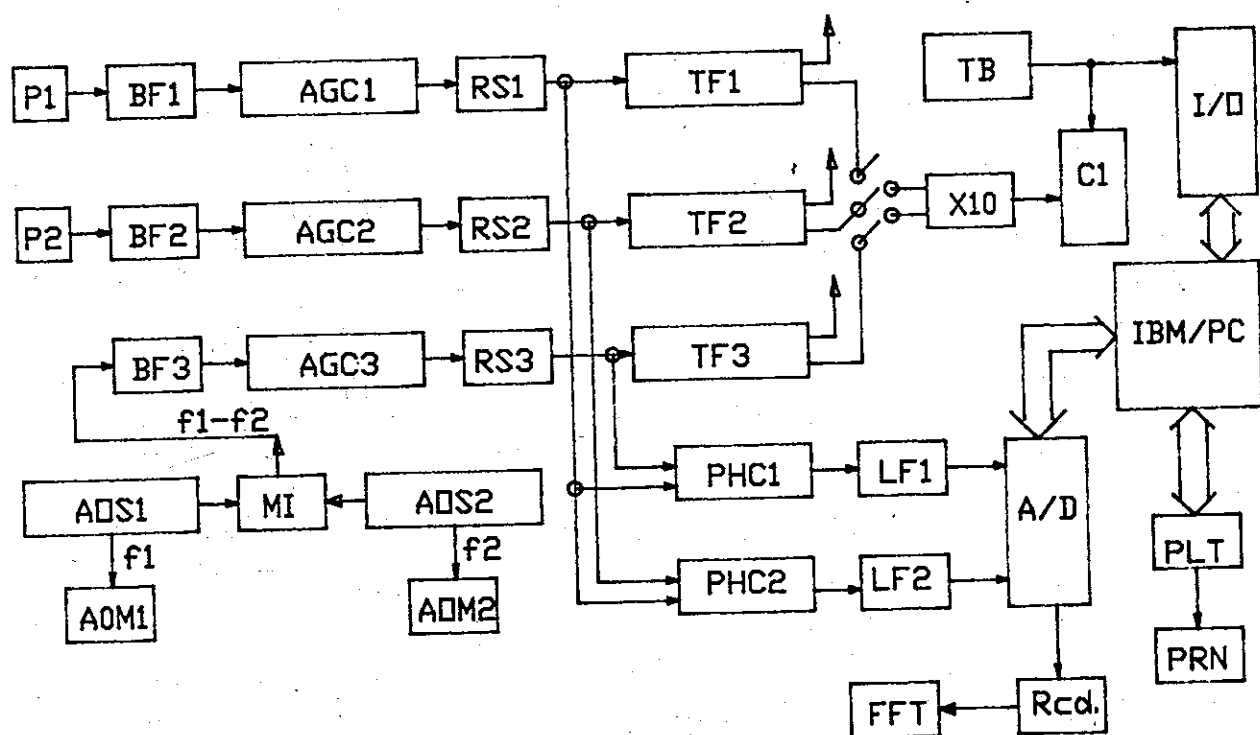


图 4-2 信号处理系统框图

图中:

P_1 、 P_2 —两光电二极管 PIN;

BF_1 、 BF_2 、 BF_3 —带通滤波器;

AGC_1 、 AGC_2 、 AGC_3 —自动增益控制放大器。

RS_1 、 RS_2 、 RS_3 —触发器整形电路;

TF_1 、 TF_2 、 TF_3 —跟踪滤波器与频率解调器;

TB—可编程时基与同步脉冲发生器

C_1 —计数器

AOS_1 、 AOS_2 —40MHZ, 41MHZ 声光驱动电源

MI—混频电路

PHC_1 、 PHC_2 —相位检测器

LF_1 、 LF_2 —低通滤波器

X10—频差倍增器

三.工作原理

本系统声光驱动电源的频率分别为 40MHZ 和 41MHZ, 其频差为 1MHZ, 所以两光电接收器接收到的光电信号的中心, 频率为

$$f_0 = f_1 - f_2 = 1\text{MHZ}$$

光电接收器 P_1 、 P_2 的原始信号, 除含有中心频率为 f_0 的有用信息外, 还包含大量噪声。带通滤波器 BF_1 、 BF_2 是中心频率为 f_0 、带宽为 Δf 的滤波器, 信号通过后得到幅度随机调制、中心频率为 f_0 的信号。自动增益控制电路 AGC 将带有幅度调制的信号变为幅值恒定的正弦信号。经 RS 触发器后得到方波信号。方波信号的中心频率为 f_0 , 相位与测量点的位移成比例, 相位随时间的变化率与速度成正比。

中心频率 f_0 应具有高的稳定性。但随温度的变化, f_0 总会有漂移。为了减小因 f_0 的变化而引起的测量误差, 将两声光电源的输出信号进行混频, 混频后的信号经带通滤波器 BF_3 , 自动增益控制放大器 AGC_3 , 触发器 RS_3 后得频率为 f_0 的标准信号。

RS_1 、 RS_2 输出的两路测量信号通过跟踪滤波器 TF_1 、 TF_2 后得到与测量点速度成比例的模拟输出和方波输出。方波输出经频差倍增器 X10 后送计数器 C_1 计数。频差倍增器的输入端可通过开关选择不同的信号。当选择 TF_1 、 TF_2 的输出时, C_1 计数器所计脉冲数为两测点的相对位移; 当选择 TF_1 、 TF_3 时 C_1 计数器为一个测点的绝对位移。

以标准时基脉冲为采样脉冲对计数器进行采样, 就可得到随时间变化的位移。速度值可由对位移进行微分得出。

为了提高测量分辨率, 本系统采用了两种方式。一种是锁相细分技术, 另一种是相位测量技术。

在相位测量技术中, 对于超过一个周期的大数部分, 可以用双频激光干涉仪中的高速减法电路与计数电路来得到。用同步脉冲对计数器与比相器输出进行同步采样就可得到位移的周期数和小于一个周期的小数部分。从而提高了分辨率且有大的测量范围。

计数器可以直接和计算机连接。系统中的模拟量输出可以用 A/D 采入计算机进行处理也可直接由记录仪进行记录, 然后进行频谱分析。

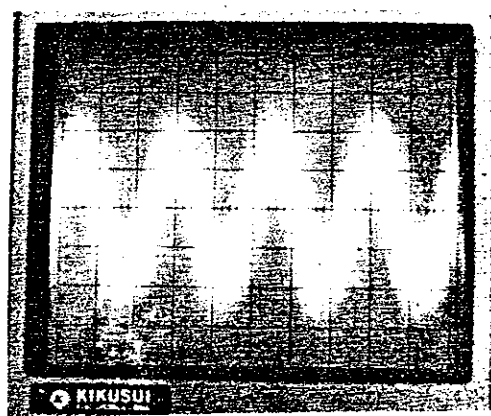
§ 4.3 予处理电路

由 PIN 光电接收器得到的原始信号并不是理想信号。实际的光电流信号质量是比较差的, 其噪声主要包括以下几项:

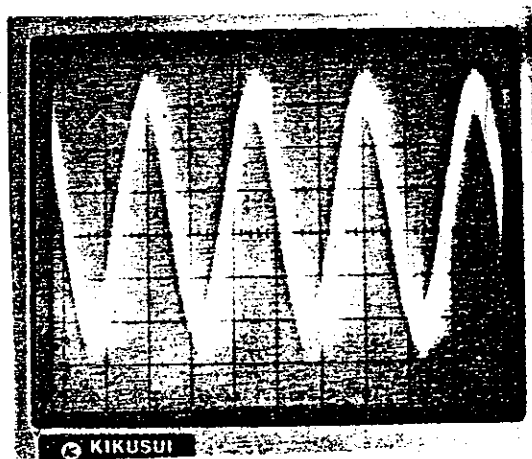
- (1) 信号的“基座”及迭加噪声;
- (2) 信号的振幅调制噪声
- (3) 相位噪声。

这些噪声产生的原因是很复杂的。激光功率的变化、散射表面的不均匀、声光驱动电源的频率漂移、输出功率的变化、空间电磁场的干扰、光学器件的振动等都会使 PIN 光电信号产生噪声。

予处理电路的功能就是要从 PIN 原始信号中分离出高质量的测量信号供后续处理用。主要包括: 带通滤波器、自动增益控制放大器和 RS 触发器。

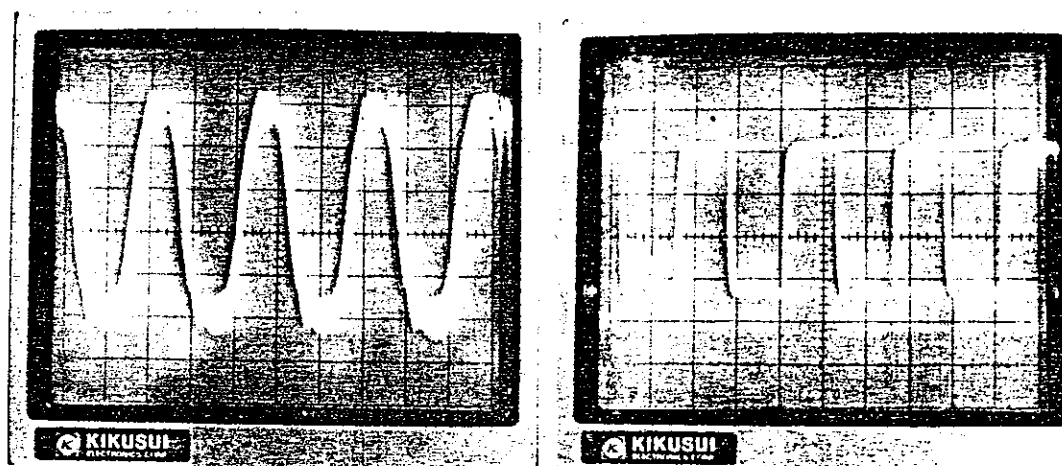


PIN 输出原始信号(峰峰值 5mv)



带通滤波输出(峰峰值 50mv)

图 4-3(a) 信号照片(磁头静止)



自动增益放大器输出(磁头静止)

跟踪滤波与整形后(TTL 电平)

图 4-3(b) 信号照片(磁头静止)

本系统两声光频移器件的频移为 1MHZ。所以采用中心频率为 1MHZ 带通滤波器，就可方便地去掉大部分的噪声，自动增益控制放大器可以将信号的幅度调制消除。通过 RS 触发器后可得到方波输出。

图 4-3 是有关信号的照片

§ 4.4 高频声光驱动电源及混频电路

声光器件的光频移和衍射效率由声光驱动电源决定。本系统采用 40MHZ 和 41MHZ 的声光频移。对声光电源的要求是：

- (1) 频率移定性 10^{-6} 以上；
- (2) 输出功率 1 瓦（可调整）
- (3) 输出信号要避免有杂波，即频谱要纯。
- (4) 防止对外辐射。

声光驱动频率的稳定性决定于晶振和电路器件的稳定性。随着温度等的变化，驱动电源的频率不可避免地要发生变化。因此用混频电路得到驱动电源频率的差值，再经与 PIN 输出信号同样的预处理电路后可得到频率随两驱动电源频率变化的方波。用这一方波信号作为参考信号，就可消除由驱动电源频率变化带来的测量误差。

§ 4.5 相位锁定技术

相位锁定技术简称锁相技术，由它可实现相位同步的自动控制。现在论述锁相技术的书籍很多。在此介绍本系统中的一些应用。组成锁相环的主要部件是鉴相器、环路滤波器和压控振荡器。如图 4-4 所示。

锁相环路通过使输入信号与输出信号保持相位同步，可起到以下作用：

1. 滤除输入信号的噪声，同时保持其频率性能；

2. 将输出通过分频器反馈给鉴相器，实现对输入信号倍频。

在本系统中，使用锁相环路的第一个作用，实现了对信号的跟踪滤波。同时利用压控振荡器 VCO 的控制电压 u_0 和频率的线性关系。得到与瞬时频率成正比的模拟电压，即得到瞬时速度电压。

系统中的“跟踪滤波与解调器”就是采用锁相技术实现的。

系统中的“频差倍增器”中也采用了锁相倍频技术。

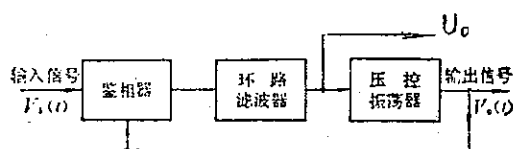


图 4-4 基本锁相环路

§ 4.6 提高分辨率的措施 1

——频差倍增器与数字减法器

在精确频率测量系统与双频激光干涉仪中，常用图 4-5 所示的“频差倍增与数字减法器系统”来提高分辨率和精度。这种方法对我们的系统也是适用的。

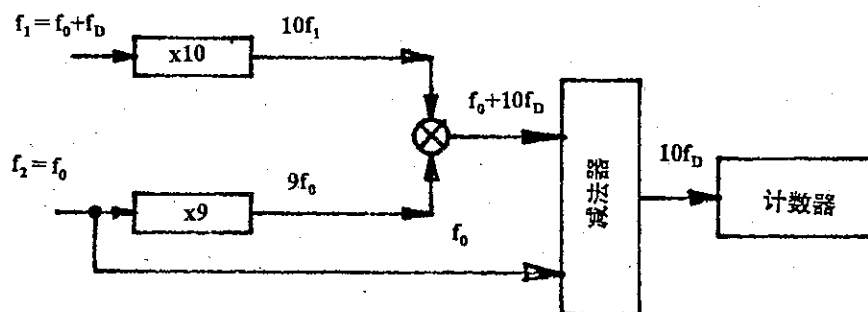


图 4-5 频差倍增器与数字减法器

设 $f_1 = f_0 + f_D$ 是测量信号的频率, f_D 是多普勒频移, $f_2 = f_0$ 是混频器输出的参考信号的频率。 f_1 经 10 倍频后变为 $10f_0 + 10f_D$, f_2 经 9 倍频后变为 $9f_0$, 经混频器后得到的频率为 $f_0 + 10f_D$, 与 f_0 相减就得到 $10f_D$, 于是与速度成正比的多普勒频率被扩大了 10 倍, 从而提高了分辨率。

§ 4.7 提高分辨率的措施 2

——相位检测器与减法器

用锁相倍频提高分辨率, 当倍频数太高时受到器件频率的限制。相位检测器可以测量出两路信号的相位差, 能大幅度提高分辨率。但常用的相位检测器只能测量在一个周期内的相位差, 对于大于一个周期的相位变化却无法检测。

本系统采用相位检测器与高速数字减法器相结合的办法, 实现了大量程高分辨率测量。图 4-6 是原理示意图。

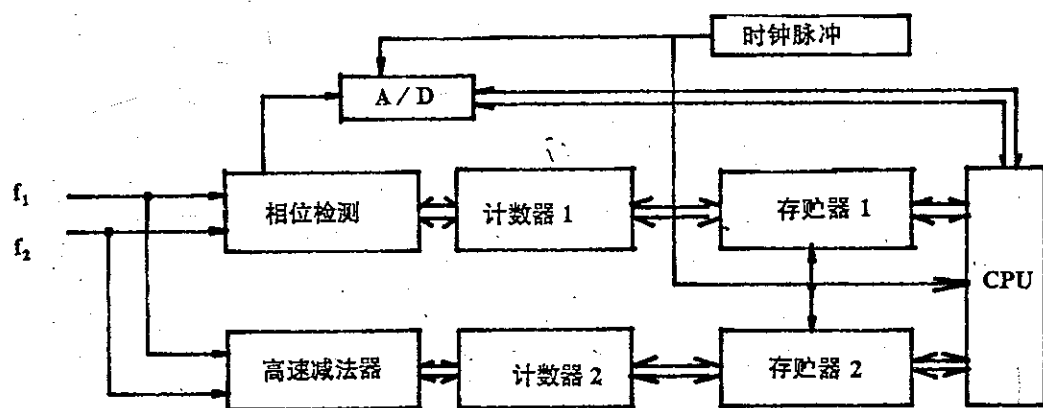


图 4-6 相位检测与减法器

f_1 、 f_2 是要比较的两信号的频率, 其频率差 (或者说周期差) 由高速减法器相减得到。两信号的相位差由相位检测器得到。相位检测器可输出与相位差成正比的模拟电压, 也可有数字输出。同步脉冲可在某一时刻同时将相位检测器输出与减法器输出存贮起来, 由计算机进行处理, 得到两信号的相位差与周期差。

§ 4.8 可控时钟电路

为了适应本系统的需要，我们用石英晶体振荡器、分频器及开关电路、单稳电路等组成了周期在 $1\mu\text{s}\sim 10\text{s}$ 内可变、脉宽可调的稳定的时钟电路。周期的选择可手动选择也可由计算机控制。框图如图 4-7。

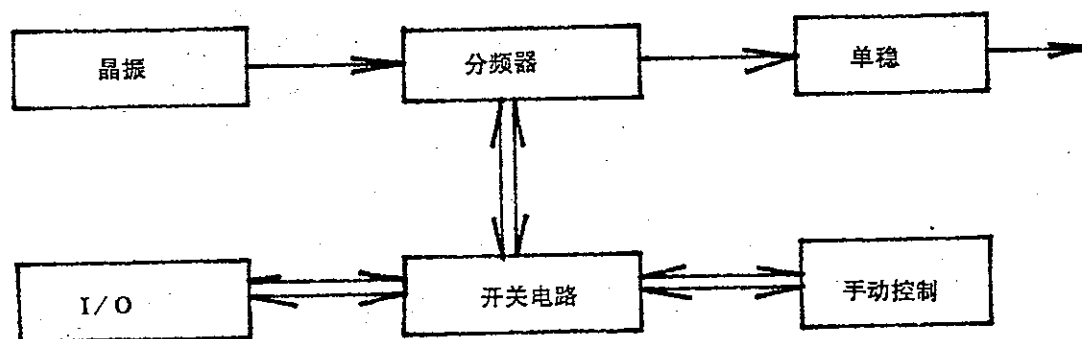


图 4-7 可控时钟电路

§ 4.9 计算机接口与采样程序

本系统计算机 IBM/PC 与计数器接口，采用查询式和无条件转输两种方式。程序框图如图 4-8、图 4-9。

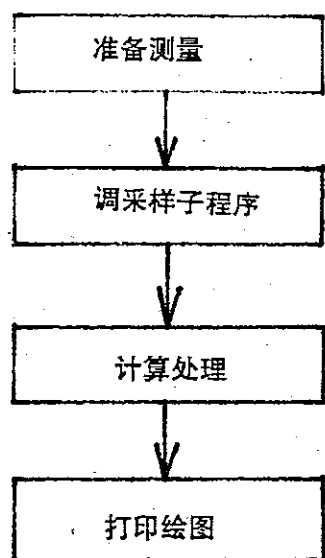


图 4-7 主程序

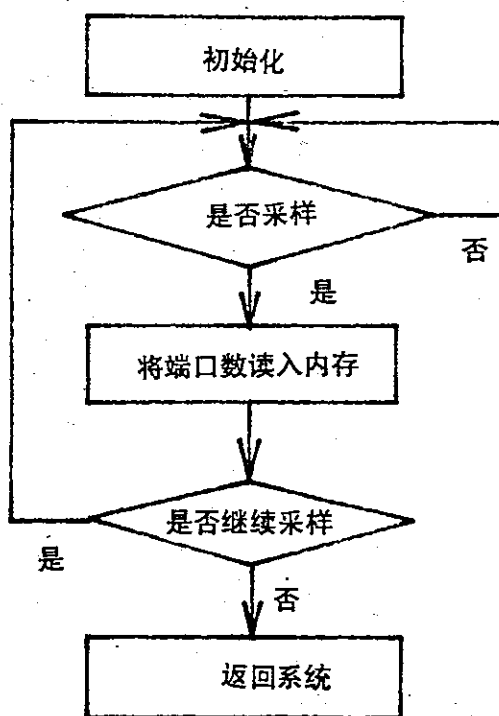


图 4-9 采样子程序

第五章 实验结果及分析

§ 5.1 总机装调

激光双焦点多功能磁头飞行姿态测试仪是包括机械, 光学, 电子, 计算机等的综合系统。在加工正式仪器之前, 我们首先完成了测量装置的原理实验。图 5-1(a)是实验装置的照片。实验成功之后, 又按照这种实验装置, 设计、加工出正式商品化的仪器。仪器的装调主要包括以下几个步骤:

1. 机械部分的安装, 粗调;
2. 光学零件的初装;
3. 光路的调整, 包括光束平行性、垂直性、光强等的调整。
4. 电路初调;
5. 系统总调。

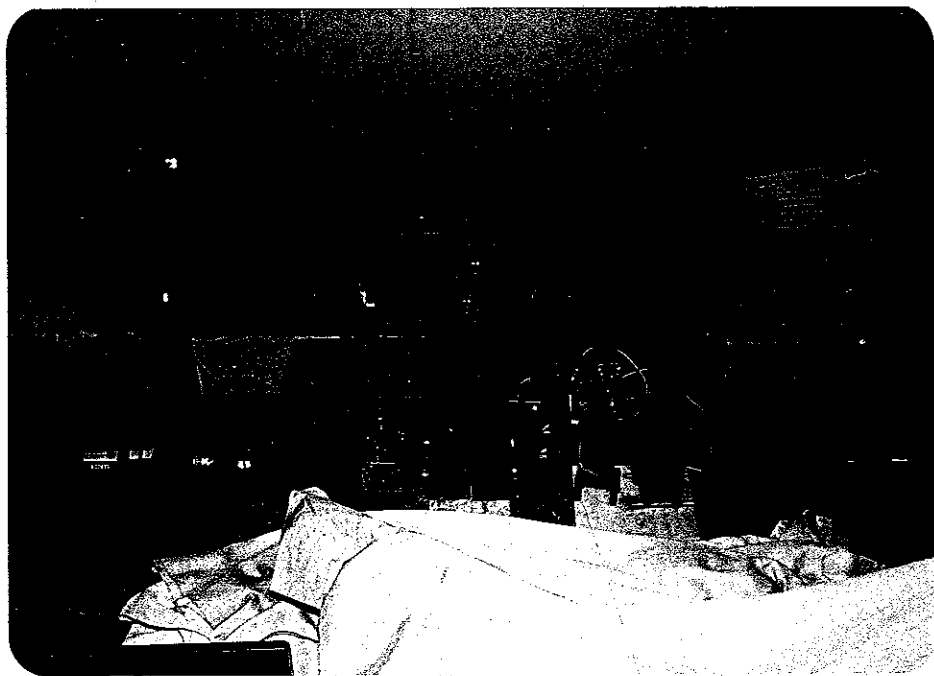


图 5-1(a) 原理实验装置(1989 年 3 月完成)

图 5-1(b)是测试仪的整体组成。图中的光学系统可沿立柱上下平移, 以适合不同的测量对象。测量光束有两种出射方式, 以供用户选用。第一种方式为垂直出射方式, 第二种方式为水平出射方式。取下系统中的一反射镜就可由

垂直出射转换为水平出射。

图 5-2 是光学系统的照片；

图 5-3 是自制的信号处理器的照片。

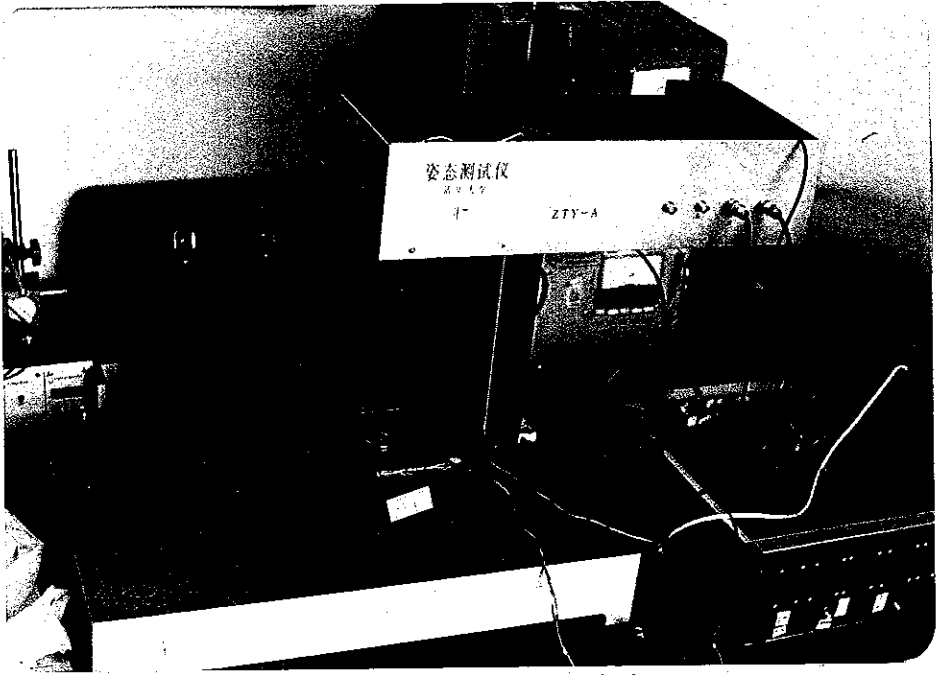


图 5-1(b) 测试仪样机(1990 年 3 月完成)

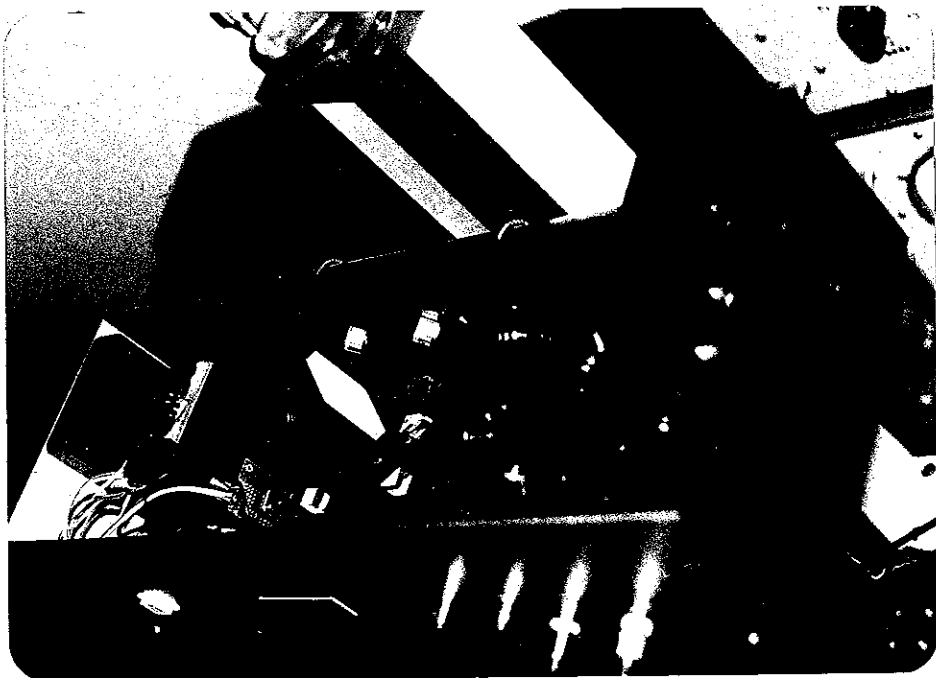


图 5-2 光学系统照片

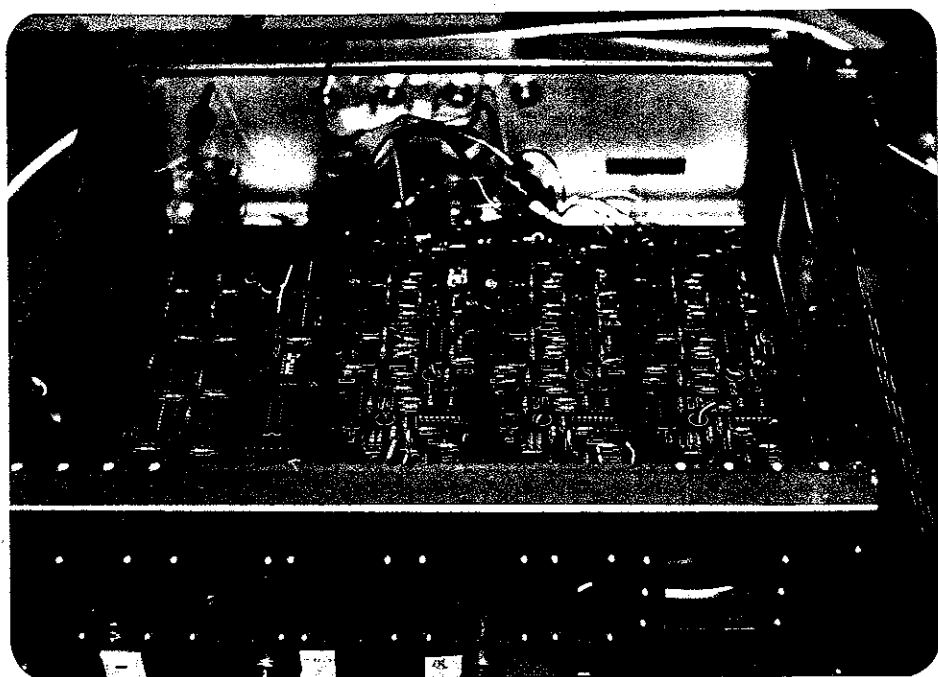


图 5-3 信号处理器

§ 5.2 位移测量比对实验及分析

一. 与电感测微仪的比对实验

图 5-4 实验装置的照片。

在压电陶瓷驱动下，杠杆产生微小的弹性变形。系统的一个光点聚焦到固定的物体上，另一光点聚焦于被测物体表面。物体表面的位移与杠杆的变形成比例。电感测微仪的测量轴线与被测点的运动方向重合。当被测面有一位移时，测量点的光电信号的相位将与固定点的光电信号的相位产生移动，同时电感测微仪将显示测量点的位移。

图 5-5 是由测量数据拟合的直线。直线的精度 $\sigma = 0.45^\circ$ ，换算成位移后 $\sigma = 0.037\mu\text{m}$

本实验表明：

1. 光电信号的相移与表面位移成线性关系；
2. 本系统可用于粗糙物体表面变形的动态精密测量；
3. 以标准时钟脉冲对位移进行采样，可由测得的实时位移得到速度值。

测速分辨率可比通常激光多普勒测速分辨率大幅度提高。

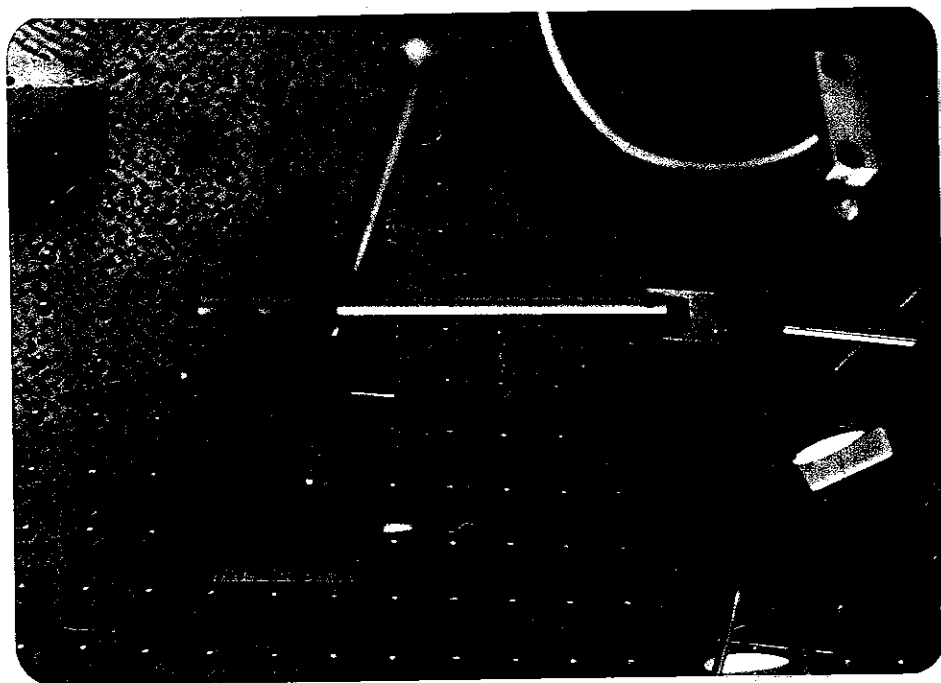
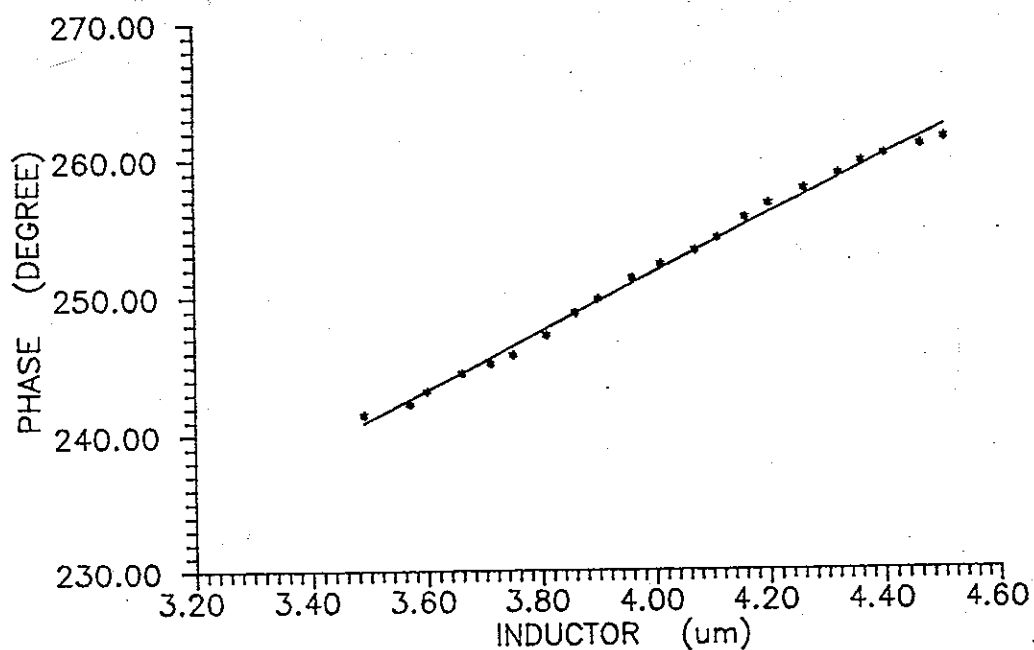


图 5-4 与电感测微仪比对实验装置



$$Y=21.337625X+166.44407$$

图 5-5 与电感测微仪比对结果

4. 仪器放置在普通桌子上仍得到较高的精度($\sigma=0.037\mu$)证实了本仪器有很强的抗外界干扰能力, 便于在现场实用。

二. 与阿贝仪比对实验

图 5-6 是实验装置的照片。

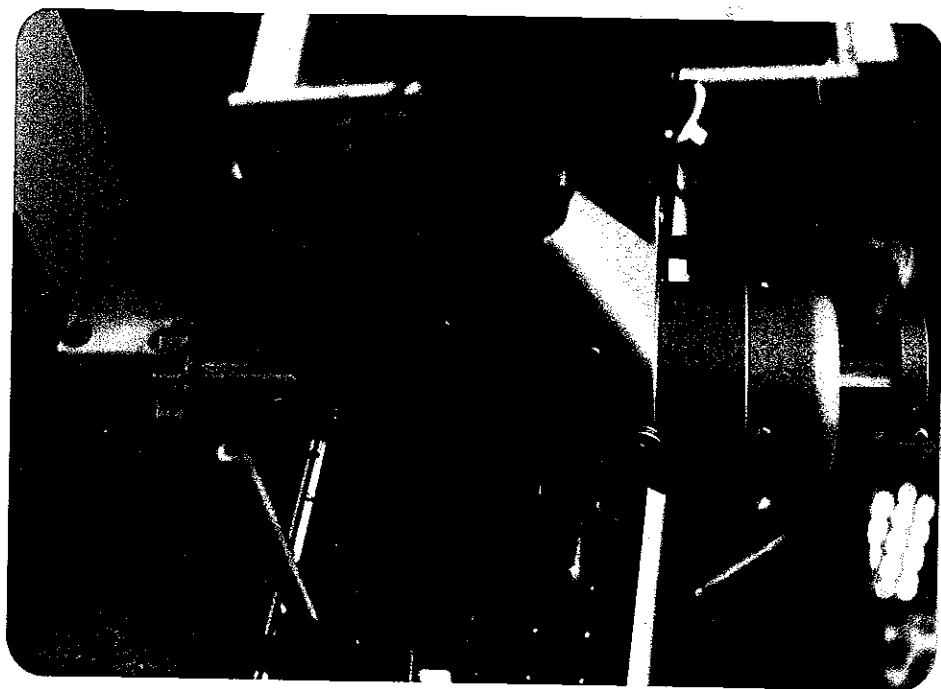
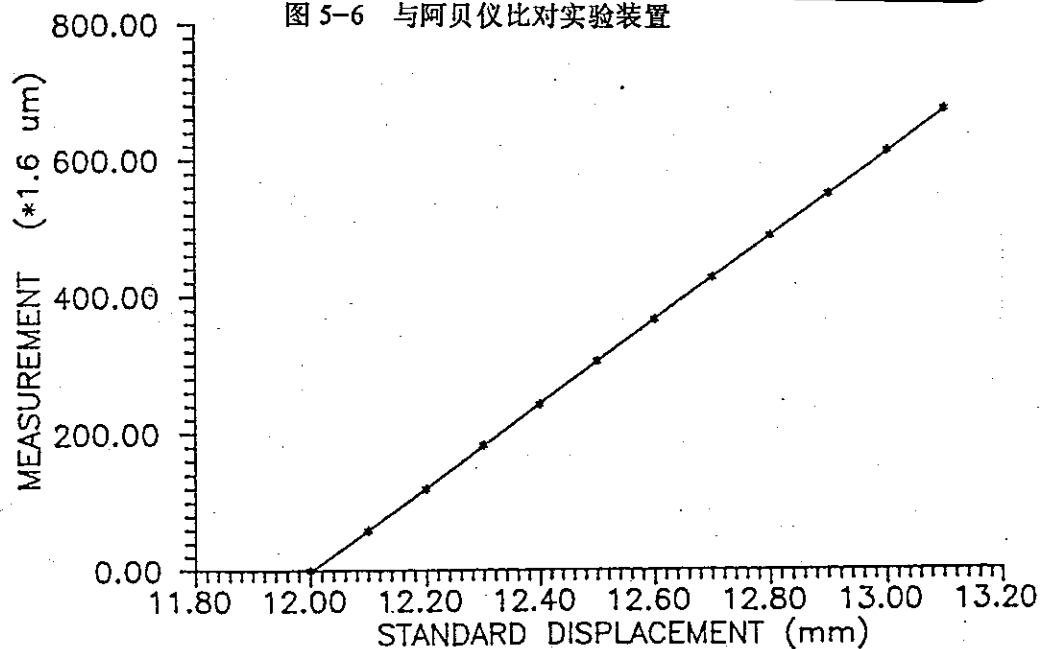


图 5-6 与阿贝仪比对实验装置



$$Y=611.888105X-7344.8624$$

图 5-7 与阿贝仪比对结果

固定点的光电信号与阿贝仪上测量点的光电信号经予处理电路后送数字减法器。相减后的脉冲可由电子计算机显示。脉冲当量为 $1.6\mu\text{m}$ 。图 5-7 是比对数据的拟合直线。精度为 $\sigma = 1.9\mu$ 。

本实验表明, 在物体表面移动距离为 1mm , 超过几个焦点直径(0.2mm), 测量点光电信号的相移与表面位移仍成线性关系。

§ 5.3 音叉振动测量试验

图 5-8 是实验装置。

音叉在受到敲击后, 将以固有频率做衰减振动。图 5-8 给出了固有频率为 2.048KHz 的音叉振动曲线。图 5-9 为其频谱分析结果。频谱分析出的频率为 2.050KH 。频率测量相对误差为 0.1% 。正文中给出更详细的实验结果。

此实验表明, 本系统可用于微小振动的测量。测量振幅分辨率取决于光机系统的稳性和光电系统的噪声。

图 5-8 表明, 测量出的最小振幅为 $0.05\mu\text{m}$ 。

§ 5.4 电机运动姿态测试

图 5-10 是实验装置。电机的运转规律可预先由超低频信号发生器及电机驱动电路来控制。由于电机转速与控制电压成线性关系, 所以当用超低频信号发生器产生一系列的电压(正弦电压、三角波电压方波电压、锯齿波电压)时, 电机转盘上各速度将按予给的电压波形而有规律地变化。

图 5-11 是测试曲线。图中, 曲线 1 是电机驱动电压的波形, 曲线 2、3 分别是电机转盘半径为 225mm 和 15mm 处两点的速度曲线。测量结果表明:

(1)电机转盘的速度曲线与电机驱动电压的波形是相似的, 电机转速与驱动电压成正比, 转盘上各点线速度符合关系式 $V = \omega \cdot r$, 即线速度与回转半径成正比。

(2)在驱动电压为方波的情况下, 电机由正转突然反转, 测量结果可真实地反映出这种变化, 说明该系统适用于速度突变的场合, 具有良好的动态响应。

§ 5.5 磁头飞行姿态测量实例

本系统可用于磁头面内运动姿态, 垂向姿态、头盘间隙和盘片轴向振动等的测试。在此仅给出测量磁头面内摆动的测量结果。

100.00 mV / DIV
1: A = 158.69 mV

AVE = 1

* AVERAGE -

定标 0.3 μ m / DIV

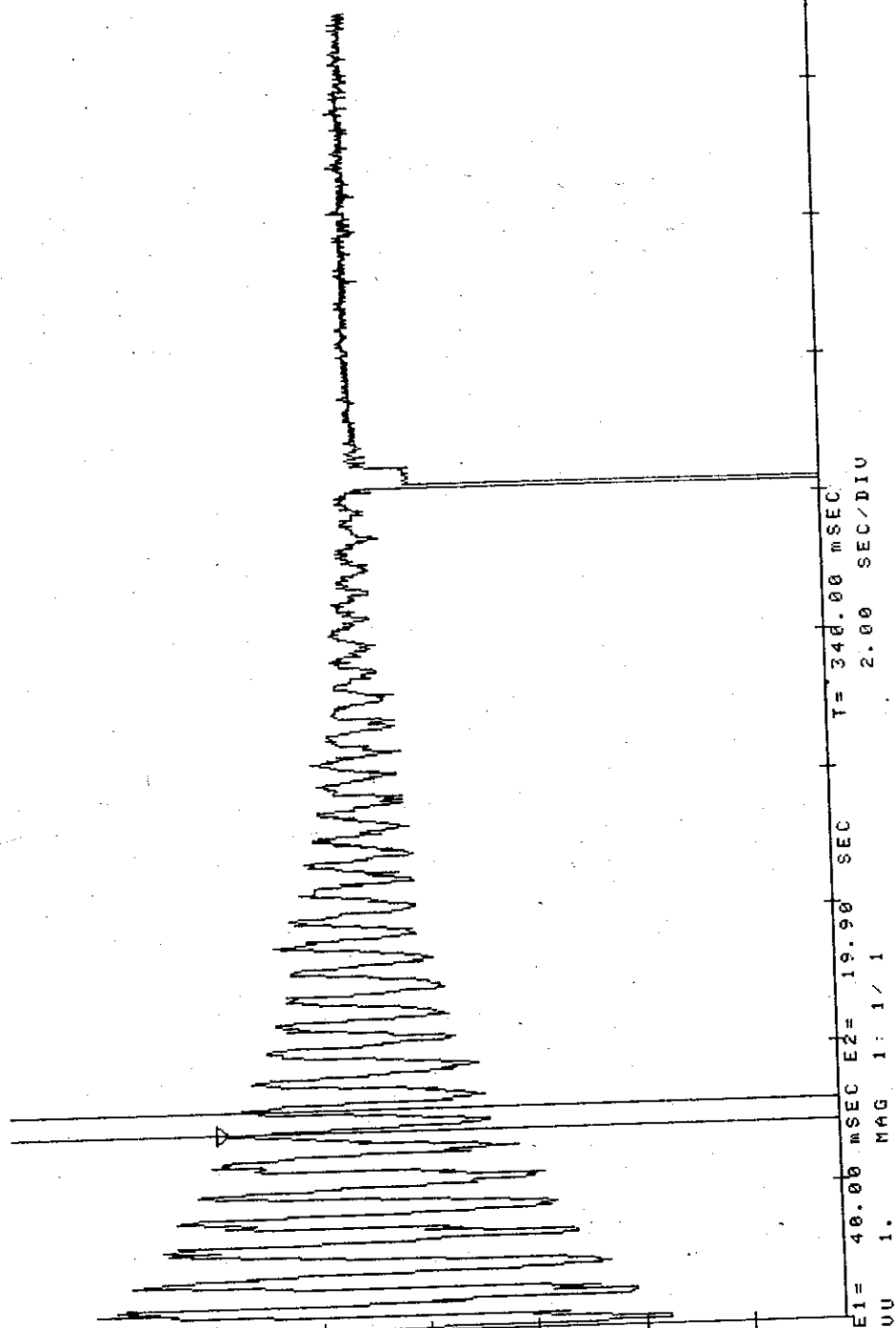


图 5-8 音叉振动曲线

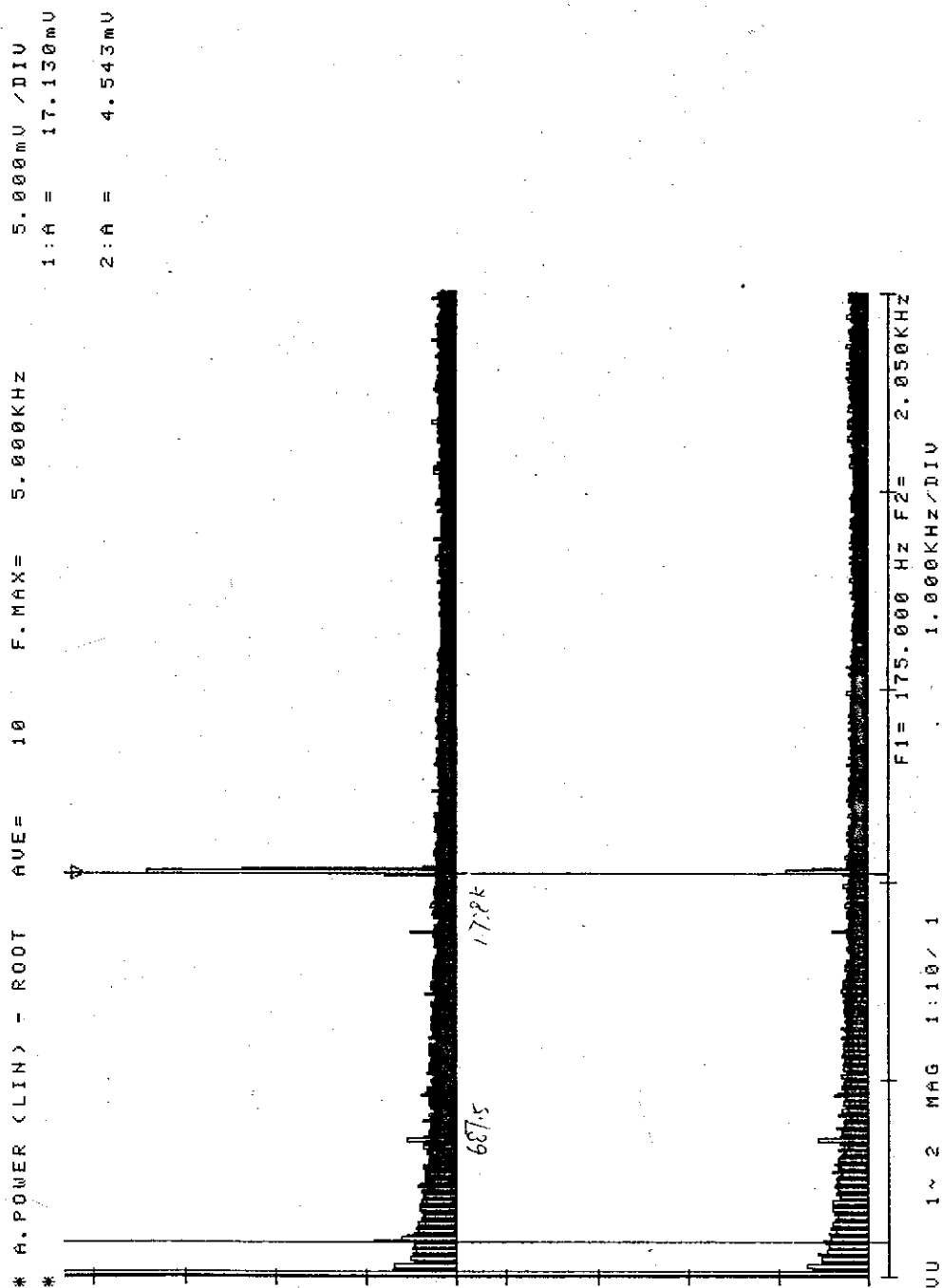


图 5-9 音叉振动频谱分析

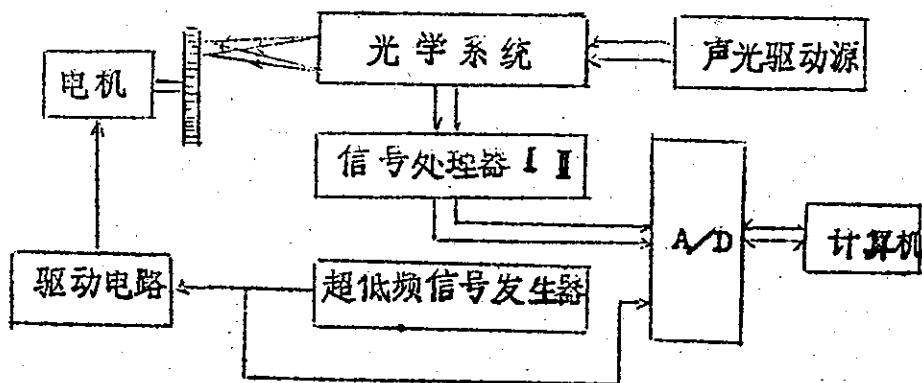


图 5-10 电机运动姿态测试

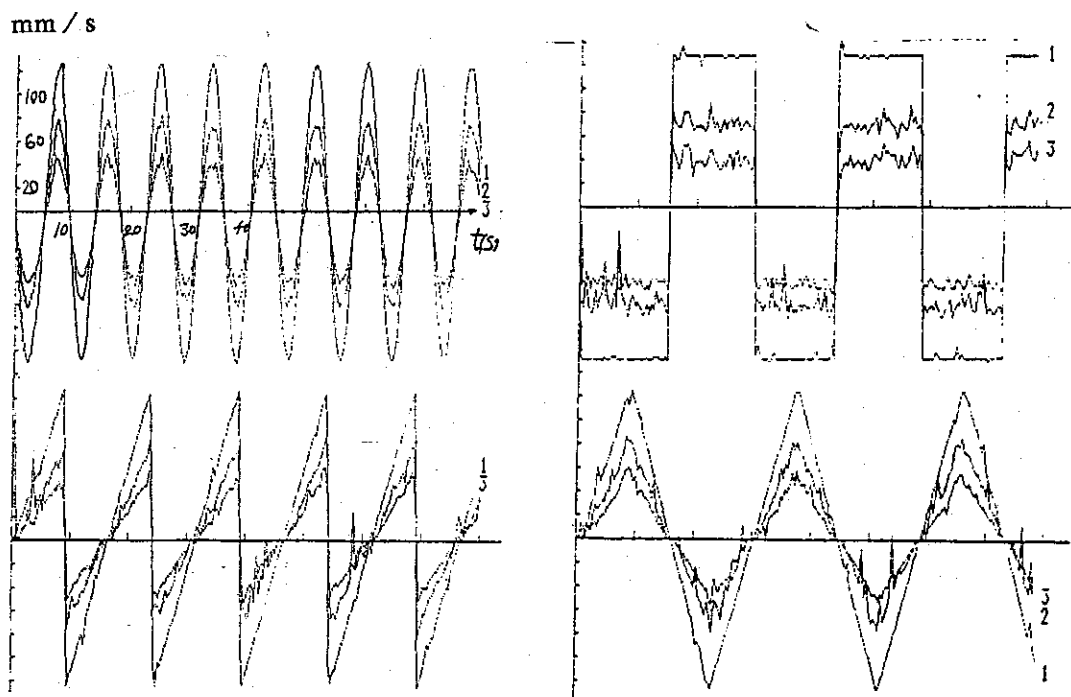


图 5-11 电机姿态测试曲线

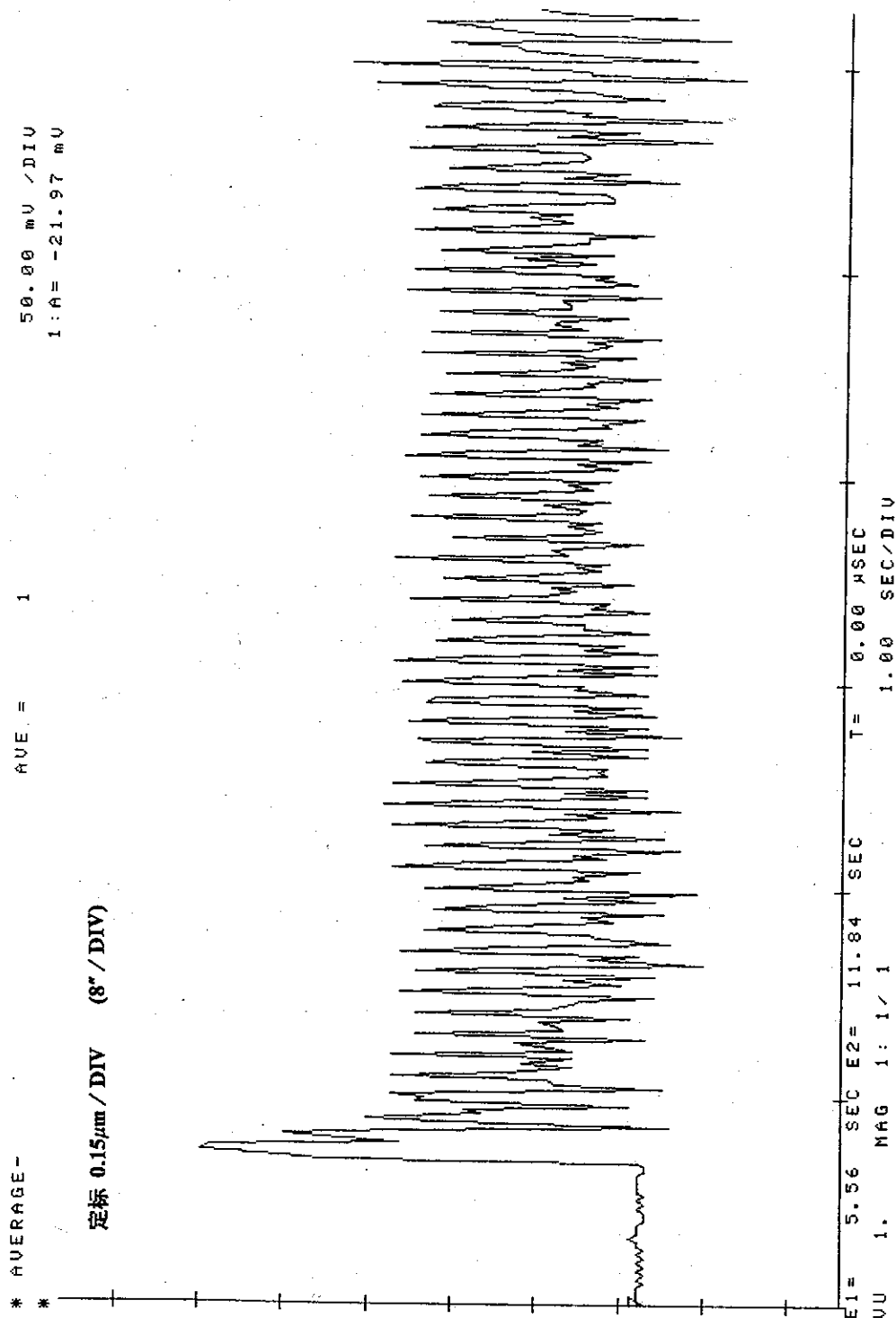


图 5-12 磁头在盘面内摆振测试

132-122

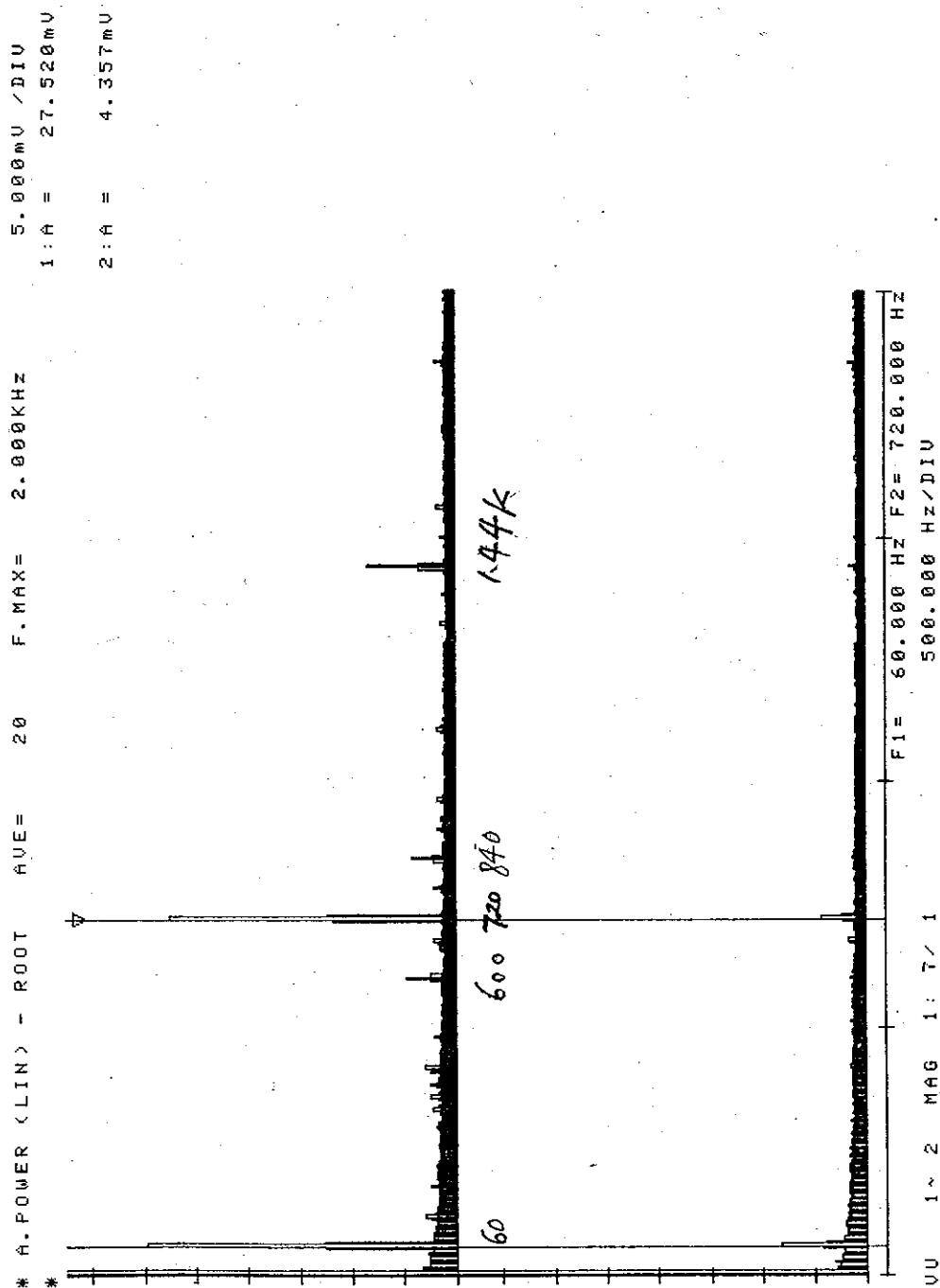


图 5-13 磁头摆振谱分析

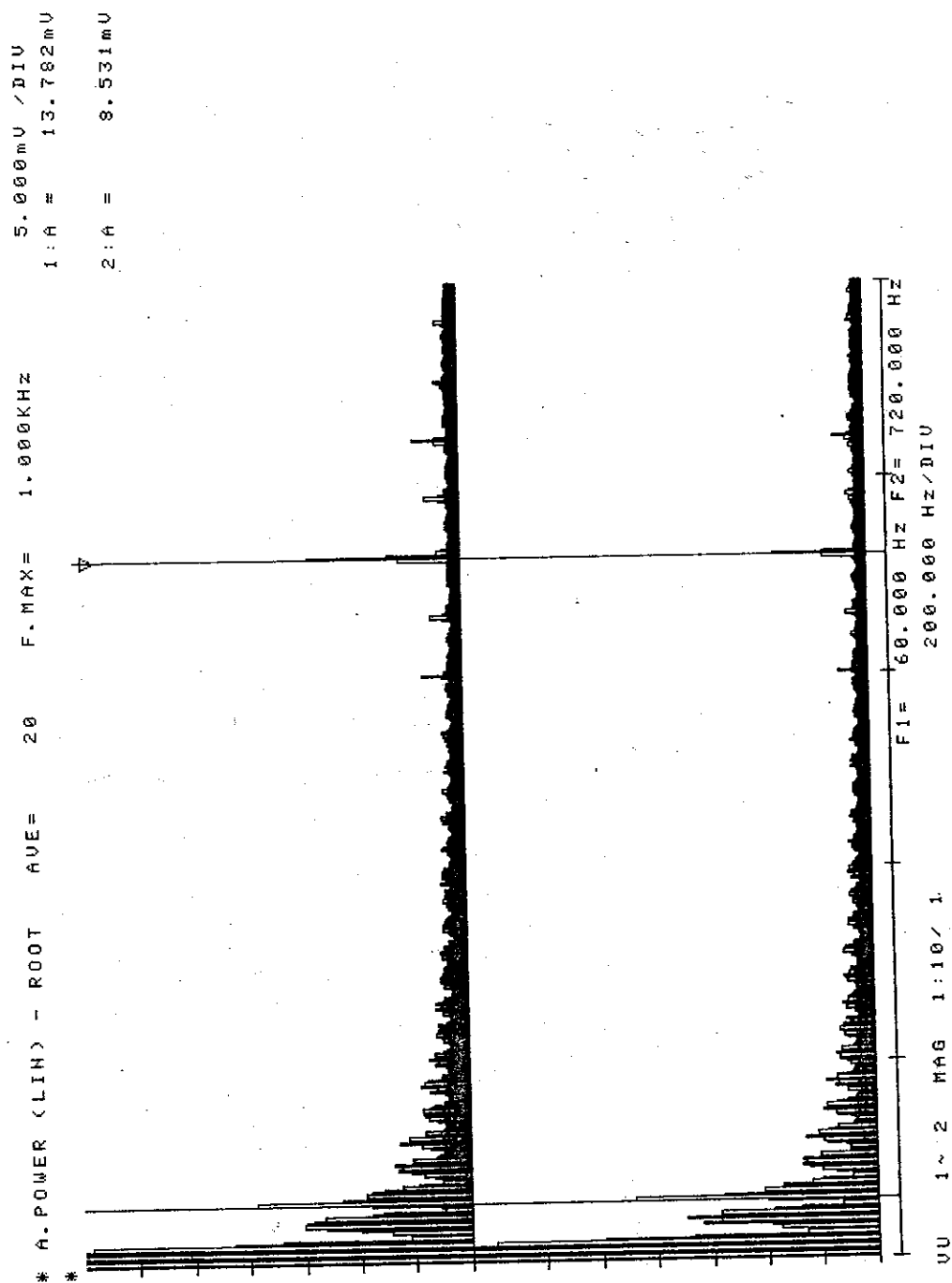


图 5-14 停机过程中磁头摆振谱分析

将系统的两激光焦点分别聚焦到磁头上两点处，开动磁盘驱动器主轴电机。图 5-12 给出了磁头上两测量点处相对振动的曲线。图 5-13 是频谱分析曲线。由频谱图上可看出，在 60HZ、600HZ、720HZ、840HZ、1.44KHZ 处有尖峰脉冲。它们分别是 60HZ 的 1 倍、10 倍、12 倍、14 倍、24 倍频，由于主轴电机的转速为 3600 转/分 = 60 转/秒，所以这些频率处的振动显然是由主轴电机的激振引起的。磁头上两点在面内相对摆振幅值为 $0.8\mu\text{m}$ ，摆角 $40''$ 。

图 5-14 是磁头在停机过程中的振动频谱，与图 5-13 相比，在停机过程中低频分量明显增加，而 720Hz 处的谐波没有减少。所以 720Hz 和磁头部件的固有频率极为接近。通过对磁头振动的频谱分析，可为头盘系统的模态分析提供依据，对磁盘机的研制和生产有实际指导意义。

第六章 激光双焦点多功能姿态测试仪在工程上的应用

激光双焦点多功能姿态测试仪以高分辨率、动态范围大、抗干扰能力强,体积小,重量轻,功能多,使用方便且对测量表面质量要求不高等优点,可在机械系统振动测量、位移和速度测量、固体力学研究等领域得到广泛应用。如除可应用于磁头飞行姿态测试外,还可用于盘片轴向振动,机床振动,汽轮机叶片振动,焊缝收缩、固体应变的微小位移,微小速度测量,磨损量测量等领域,本章介绍了在扬声器频响特性测试和望远镜稳象器摆振测量的应用实例。

§ 6-1 扬声器频响特性测量

扬场器的频响特性是关系到扬声器性能的一项重要指标,电涡流传感器可以对其频响特性进行测量,但当扬声器驱动频率高于 2KHz,电涡流传感器将受到扬声器本身电磁场的干扰而无法正常工作。而激光双焦点多功能姿态测试系统则不受外界电磁场的干扰。

图 6-1 是测量现场的照片,图 6-2 到图 6-6 是场声器在不同驱动频率下

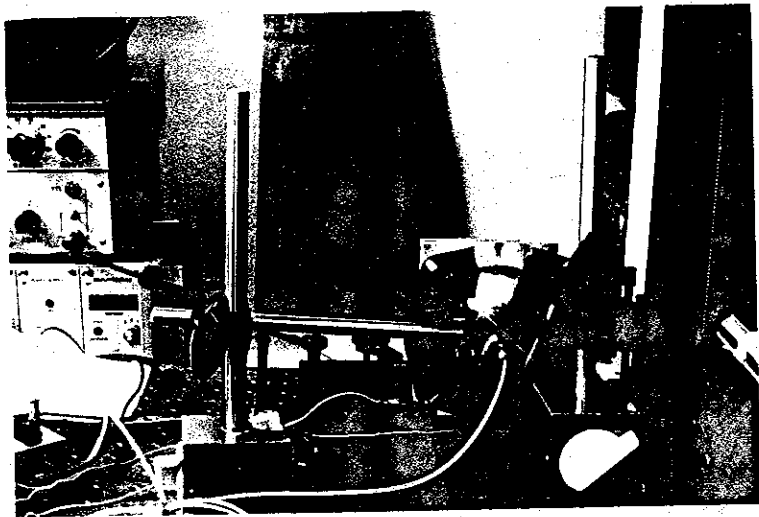


图 6-1 扬声器频响测试

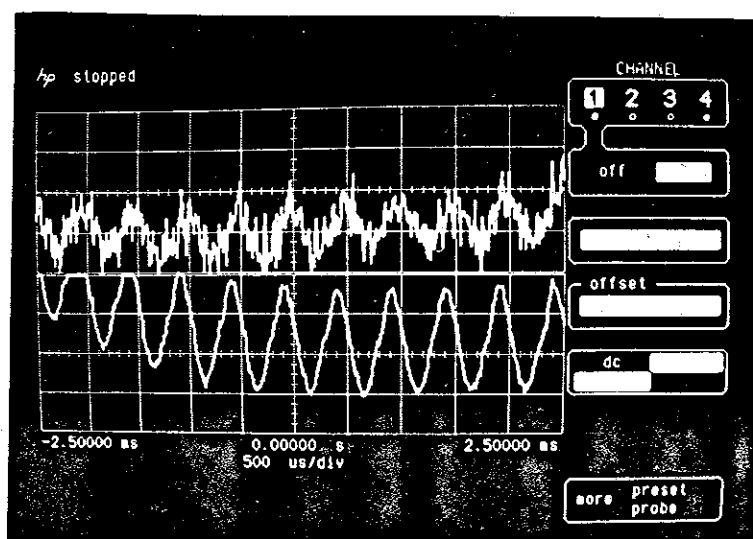


图 6-2 扬声器振动曲线($f=2\text{k}$)

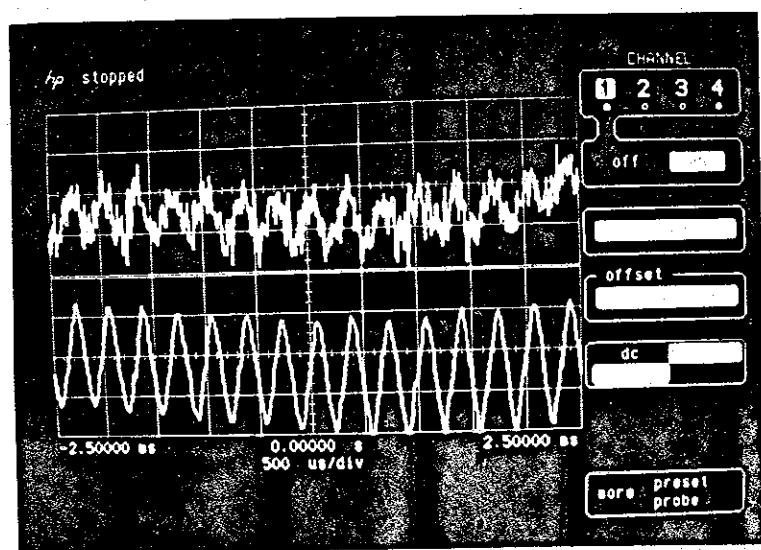


图 6-3 扬声器振动曲线($f=3\text{KHz}$)

的振动曲线。图中上方曲线为电涡流传感器的输出，下方曲线为激光姿态测试仪的输出。显然激光姿态测试仪的信噪比优于电涡流传感器。

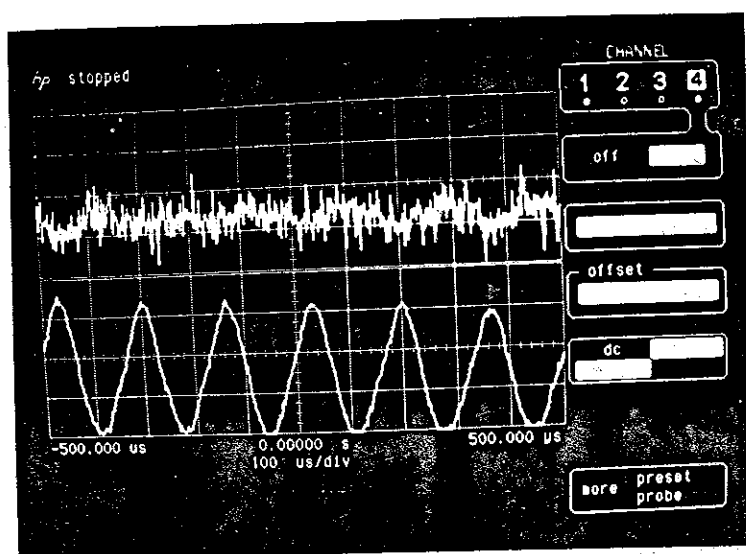


图 6-4 扬声器振动曲线($f=6\text{KHz}$)

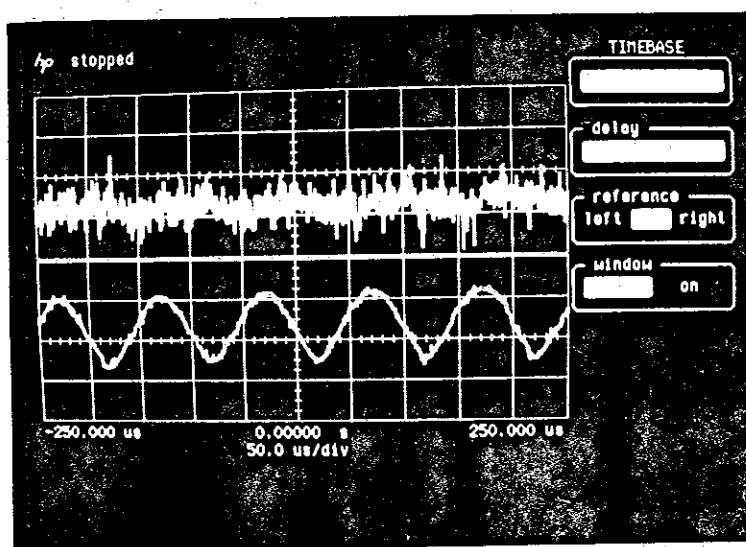


图 6-5 扬声器振动曲线($f=10\text{K}$)

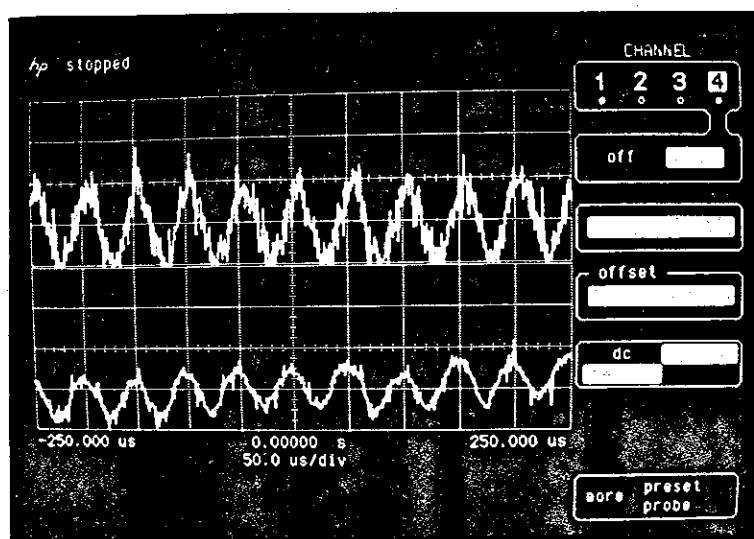


图 6-6 扬声器振动曲线($f = 20\text{k}$)

此实验表明扬声器频响可到 20KHz 。

实验中的场声器和电涡流传感器由清华大学传感器研究室提供。

§ 6.2 望远镜稳象器摆振测试

光学惯性稳象望远镜是在动载体上观察目标或手持实用的仪器，因此必须在象面上得到位置稳定、象质清晰的目标象，与此同时为了随时观察不同的目标或在动载体上跟踪目标该望远镜还必须具备跟踪性能。这种望远镜广泛应用于飞机、坦克、汽车上。望远镜稳象器的微小摆振是直接影响成象分辨率的关键因素。稳象器在摆振的同时，还存在着平移振动，且测量时只能用非接触方法，对摆振的动态测量是一直未得到解决的难题。现有的测量方法有分辨率板法和电视摄象机法，这两种方法都不能同时给出摆振的幅值和频率成分。我们研制的激光双焦点多功能姿态测试仪可同时测出摆振的幅值和频率成分且不受外界干扰，是一种理想的方法。

图 6-7 是测试现场。

图 6-8 是时域摆振曲线。幅度为 $30''$ 。这和直接观察目标象估计出的的结果是近似的。

图 6-9 是摆振的频谱分析结果。

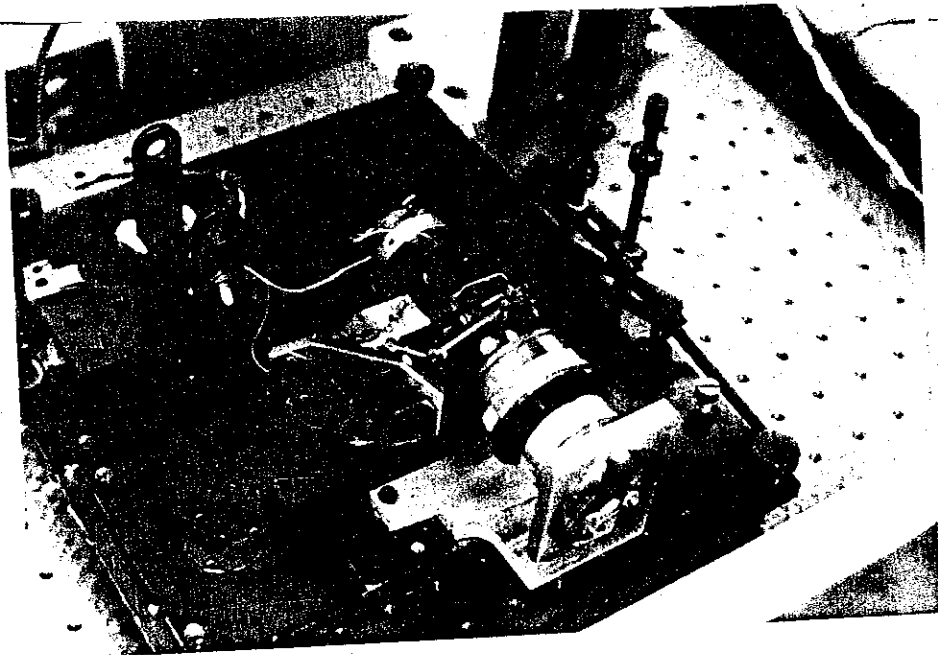


图 6-7 望远镜稳象器摆振测试

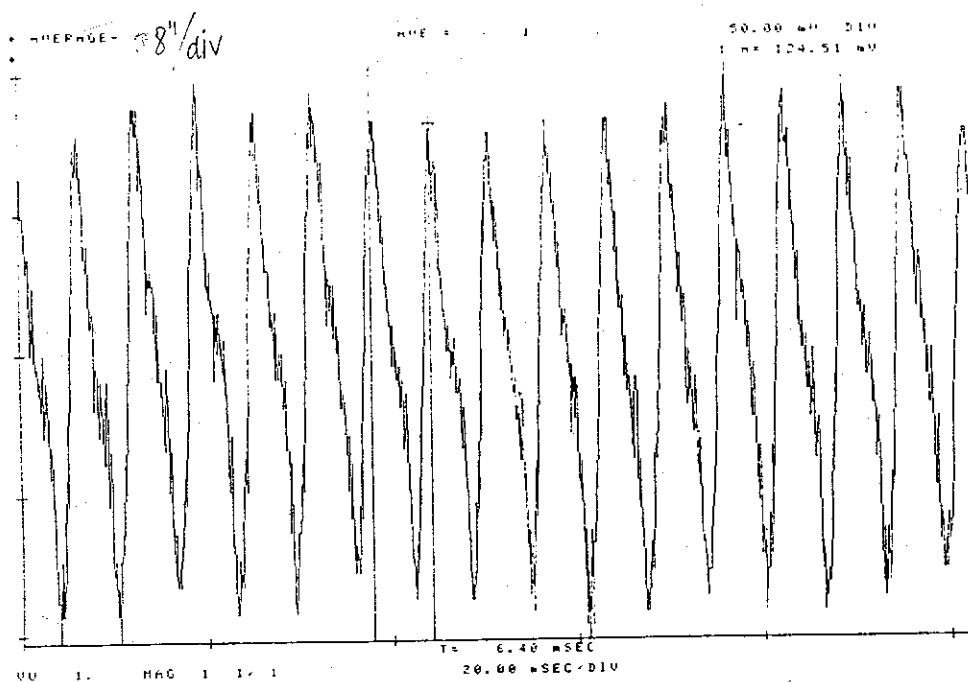


图 6-8 望远镜稳象器摆振 90.5.29

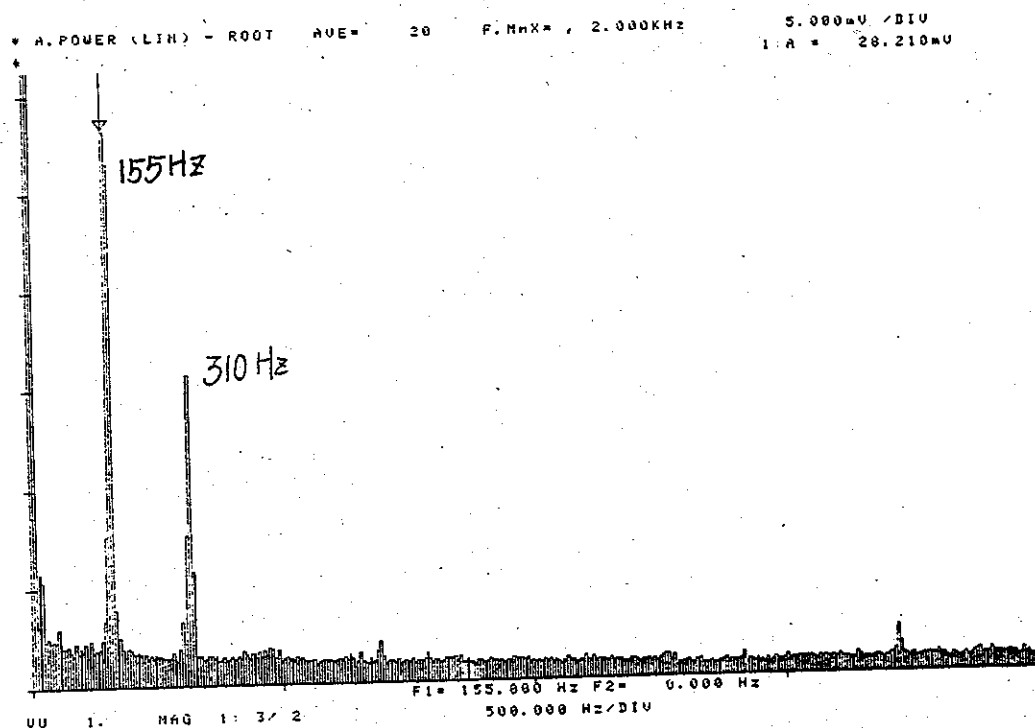


图 6-9 稳象器摆振谱分析 90.5.29

由于稳象器转子的转速为 9600 转/分 = 160 转/秒。所以谱图中 155Hz 的振动是和转子旋转频率一致的。而 310Hz 的振动是其二倍频。这种结果对减小摆振提高成像分辨率有指导意义。

试验中所用望远镜稳象器由北京理工大学光仪系提供。

第七章 结束语

通过以上理论分析和大量的实验验证表明激光双焦点 LDA 多功能磁头飞行姿态测试系统的研制是成功的。创造性的工作体现在以下几方面:

1. 首次提出并实现了四光束双焦点面内姿态测试系统, 解决了磁头在面内的微小摆振测量的难题, 在国际上还未见先例。

2. 首次提出并实现了双焦点多功能测试系统, 光路结构设计巧妙, 仅用一台仪器就可完成磁头面内姿态, 垂向姿态、头盘间隙, 盘片轴向振动等的多维、多参数测试。比国外同类仪器有显著的进步。

3. 在理论上同时用激光多普勒测量原理和散斑干涉原理, 分析了固体表面运动测量中双光束差动多普勒测量系统的光电信号的相位和表面位移的线性关系。并用实验证明了理论分析是正确的。为深入研究固体表面运动的激光非接触测量, 奠定了基础。

4. 通常激光多普勒测速的分辨率为 $100\mu\text{m}/\text{s}$ 。磁头上两点在盘片内相对速度的测量, 磁头启停过程的测量以及固体变形, 蠕变等的测量需要有高于 $1\mu\text{m}/\text{s}$ 的分辨率。直接从测量多普勒频移的方法来提高分辨率, 是不可能的。本文在激光多普勒测速领域首次提出了用直接测量位移的方法即用相位测量法来提高固体表面运动测量的分辨率。未用防振平台的条件下系统测量位移的分辨率达 $0.05\mu\text{m}$

5. 研究了滤波技术, 锁相细分技术, 脉冲减法技术, 计数技术和电子计算机技术及噪声抑制技术等, 研制了信号处理系统, 实现了高分辨率、大动态范围的位移、振动、速度的实时测量。

6. 本系统可测出粗糙表面 $0.05\mu\text{m}$ 以上的位移, 测速范围: $0\pm 0.2\text{m}/\text{s}$, 可测振动的频响 $0\sim 20\text{KHZ}$; 可测振幅 $0.05\mu\text{m}$ 以上。对于法向测量, 分辨率优于 $0.003\mu\text{m}$ 。

7. 本系统除能在磁盘驱动器中得到广泛应用外, 还可在其它精密机械以及力学的研究中, 得到广泛应用。例如: 电机测试, 固体变形动态测试, 机床振动等的测试。特别是对于相对振动, 相对速度和角速度、扭振、摆振测试, 本系统有强的抗外界干扰能力和稳定性。

致 谢

本文是在梁晋文教授、殷纯永教授的亲切关怀和精心指导下完成的。殷纯永教授给予了具体的指导。三年来，两位导师以渊博的学识，求实的科学作风和忘我的工作精神使学生受益非浅，在此谨向两位导师致以最衷心的感谢和敬意！

我系本科生刘向东、徐世刚、石玲、李朝辉同学，和研究生徐正奇同学参加了部分实验工作，郭继华、沙淑华老师给予过有益的指教。

在本文的选题阶段曾得到李达成教授的指教，在实验过程中得到方仲彦副教授、章恩耀、王佳、赵子英、张俊江等老师和博士生叶岗、徐勇、郑刚、赵洋、任伟明等的帮助。

航天部 706 所所长杨荫溥研究员，周学仁研究员，上海交大信息存贮研究中心实验室主任谭炳麟副教授，天津大学孙家鼎教授，邱惠和博士，曹玉珍博士，清华大学孙平博士，以及中国计量科学院、中国科学院硅酸盐所、中国磁记录设备公司，国营建南机器厂等单位的许多专家都对本文给予过有益的建议和支持。

日本富士通研究所米冈诚二先生，日本庆应大学南谷晴之教授与作者进行过有益的讨论并提供了有关资料。

在此谨向所有给予过作者帮助的前辈和朋友们表示感谢！

主要参考文献

- 【1】陈斌, 激光多普勒测速技术及其在航空中的应用. 激光技术, 1988, 第一期
- 【2】张菡、施文康、陈文元: “高性能磁头飞行高度的数字化测量”, 电子计算机外部设备, 1989 第 5 期
- 【3】T · Ohkubo, J.Kishigami: “Accurate Measureit of gad-LubricatedStider Bearing Separation Using Visible Laser Imterferometry”, TransaetiousOfthe ASME, VOL.110, JANUARY 1988
- 【4】倪耀国: “几种温盘磁头的浮动性能测试和分析”, 电子计算机外部设备, 1984 · 4
- 【5】华诚, 张江陵: “磁盘驱动器定位精度的分析及其提高措施”, 电子计算机外部设备, 1989 第一期
- 【6】D · B · Bogy and F · E · Talke, Laser Doppler interferometry on magnetic vecord-ing system, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL, MAG-21, NO.5 SEPTEMBER 1985
- 【7】V · Ponaganti, “ON non-linear Respouse Of head-disk interface to wavy”, IEEE. TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL MAG-22, NO.5 1987
- 【8】“Use of Readbaek Signat Modutation to Measure Head / Disk SpacingVariations in Magnetic Disk Fites” w · K · shi IEEE. TRAN. ON MAG, VOL MAG-23. NO I JANUARY 1987
- 【9】[英]B · M. 互切西威克兹著, 徐枋同译. 《激光多普勒测量》水利出版社1980
- 【10】DANTEC 科研仪器开发中心. 《激光多普勒测速与激光多普勒测振》.
- 【11】唐开生译. 测量超小速度的激光多普勒风速计 国外激光1988 · 2
- 【12】J · C丹蒂编《激光斑纹及有关现象》科学出版社1981
- 【13】L · E: DRAIN著王仕康等译《激光多普勒技术》清华大学出版社1985.8
- 【14】靳永东, 孙渝生, 一种新型的振动激光外差信号处理方法. 计量学报1987.4
- 【15】Fiber Opticlaser Vibration Senscr, J.Pwaters .ISA Trasactions · VOL25, No.1.1986
- 【16】我国激光技术在工业上应用之现状与展望 激光与红外1988
- 【17】A Compact differential Lcsar Doppeer Velocimeter using a Semiconductorlaser.J · Physe 1987
- 【18】Effect Of Pentrating Medium Giveu To Outpnt Singnat Of Lader Doppler Velocimeter Eiji OKADA, SICE'89Juey23-25, TOKYO
- 【19】Optical-fiber laser Doppler Velocimeter for high-resolution measurment Of Pulsatile blood Flows. H.Nishara, 15may 1982 / vol.21, NO.10 / Appeiedoptics.
- 【20】2-Dimensional Speed Measure meadure ment by Corrlation 日.计测自动控制学会论文集 vol, 22, NO · 4, 1986.4
- 【21】Vibration Measurement by Semiconductor Laser 日、电子情报通信学会论文C 1987.9

清华大学学位论文用纸

- [22] Gary E. Somnargren "Optical heterodyne Photilometry", APPLIED OPTICS(15.Feb.1981)
- [23] Field water Flow Measurement Using LDV 日.光学1987.7
- [24] IFA550信号处理器的工作原理. DANTEC说明书1989
- [25] Laser Doppler Measurement Of Solid Surface Velocity and the Moving Angle by use of Specular Reflection Bijiakada. 日.计测自动控制学会论文集 1987.10
- [26] Measurements Of Light-Freguency Variation and Distance by Optical Heterodyne Interferometry 菊田久雄、日.光学 1987.10
- [27] 激光多普勒测量热轧件的速度, 新西伯利亚. 1986苏联新西伯利亚科学分院自动化和电测研究所内部资料, 殷纯永译 1990
- [28] 轴向飞行头组动态测量, 内部资料, 殷纯永译自IEEE Transactions on MAG-Vol25 NO.5 sept 1989
- [29] 数字频率计 ± 1 个字误差的探讨, 天津大学、李箴贻《电子测量技术》1989.1
- [30] 瞬态波形采集, 显示系统《电子测量技术》1989.1
- [31] 《硬盘机特集》《NEC技报》VOL.39.NO.9/1986
- [32] 激光在工业计测中的应用, 日.激光研究1985.1
- [33] 激光多普勒测速技术应用的新进展, 力学与实践, 1983.3
- [34] 光纤在计测中应用, 计量与测试1987.4
- [35] 日本光学产业的发展趋势, 《Optuse》1987.3
- [36] 半导体激光器进展, 《国外激光》, 1987.2
- [37] 散斑图光学速度传感器, 《日经电子学》1986.NO.4
- [38] M. 玻思, E沃耳夫著《光学原理》, 科学出版社, 1981
- [39] 肖明耀等, 《时间频率的精确测量》, 中国计量出版社1986
- [40] 詹德众, 声光外差测微技术的研究, 光学工程, 1987年8月
- [41] Polytec, Fiber optic laser Vibrometer
- [42] DISA样本, Laser PoppLer anemometry
- [43] 杨彦峰等: 永磁式力矩施加器的工作原理, 中国仪器仪表学会论文集1989.11
- [44] 宋云峰、殷纯永、梁晋文: 激光双焦点运动姿态的非接触传感器, 中国仪器仪表学会论文集 1989. 桂林.
- [45] 宋云峰: 摆线齿轮加工误差诊断方法的探讨, 全国青年优秀论文报告会1989北京
- [46] 宋云峰、殷纯永、梁晋文: 双焦点运动姿态的动态测试系统, 《计测技术》1990第三期
- [47] 宋云峰、殷纯永、梁晋文: 双光束激光外差二维测振传感器, 中国计量测试学会论文 1990
- [48] Laser diode Feedback interferometer For Stabilization and displacement measurement Appl.opt 1987.Vol26.No5
- [49] Use of Laser diode and optical Fiber for a Compact Laser-Doppler Velocimeter Opt.LETTERS Vol.9.No21984
- [50] Interferometer for measuring displacement and distance opt.let.1987

攻读博士期间发表的论文

1. 激光双焦点运动姿态的非接触传感器。
中国仪器仪表学会, 精密机械学会, 第二届学术交流会1989.11
2. The study for the measurement and evaluation of epicycloidal gear errors(1st China-Japan International Conference on precision Instruments1987).
3. A study on the diagnosis method of epicyclic gear machining errors. (LCPE 1988.9 International Conference on Production Engineering)
4. 摆线齿轮加工误差诊断方法的探讨
全国青年优秀论文报告会1989。(中国计量测试学会主办)
5. 双焦点运动姿态动态测试系统
《计测技术》1990第3期。
6. 双光束激光外差=维测振传感器。
中国计量测试学会几何量学术年会1990。