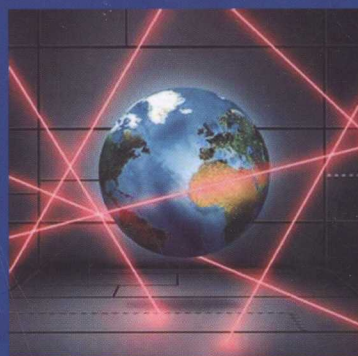


激光及光电测试技术

叶声华科研团队 论文集

Laser & Optoelectronics Measurement Technology
Collection of Papers by Ye Shenghua Research Team



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

014013490

TN24
46

激光及光电测试技术 叶声华科研团队论文集



机械工业出版社



北航

C1700122

TN24
46

本论文集收录了叶声华院士科研团队在“激光及光电测试技术”方面的代表性论文 50 篇,内容包括激光及光电测试技术的基本原理、方法、关键技术及典型应用。

本论文集融入大量创新性科研成果,兼具理论和实用价值,可作为从事精密测试技术与仪器及相关专业技术人员的参考材料。

图书在版编目(CIP)数据

激光及光电测试技术叶声华科研团队论文集.
—北京:机械工业出版社,2013.10
ISBN 978-7-111-44452-7

I. ①激… II. ①叶… III. ①激光技术-文集②光电
检测-文集 IV. ①TN24-53②TN206-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 247142 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王小东 责任编辑:王小东 安桂芳 王 荣 王寅生 张利萍

封面设计:张 静 责任校对:李锦莉

责任印制:张 楠

北京京丰印刷厂印刷

2013 年 11 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18.75 印张·463 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44452-7

定价:49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

科研团队人员

叶声华

邾继贵	杨学友	王 仲	曲兴华
孙长库	段发阶	赵美蓉	贾果欣
刘常杰	吴 斌	付鲁华	任永杰
王 鹏	张福民	林嘉睿	杨凌辉



前 言

叶声华院士 1934 年 6 月 11 日出生于湖北省沙市, 1956 年华中工学院 (现华中科技大学) 本科毕业, 1962 年天津大学研究生毕业, 2003 年当选为中国工程院院士, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院教授、博士生导师、仪器科学与技术国家重点学科学术带头人, 创建了精密测试技术及仪器国家重点实验室, 是实验室首任主任, 先后获得天津市劳动模范、特等劳动模范、全国“五一”劳动奖章、全国先进工作者、“当代我国仪器仪表与测量控制领域杰出科学家”等荣誉称号, 2007 年获“何梁何利基金”科学与技术进步奖。

叶声华院士率领科研团队长期从事激光及光电测试技术研究, 发展了一系列非接触、在线测量新原理新方法, 如激光衍射测量、激光准直及五自由度测量、视觉测量, 以及几何量测量仪器现场标定新技术等, 取得了多项重大科研成果并获得广泛工程应用, 例如“汽车白车身激光视觉在线检测站”、“复杂现场大尺寸空间坐标测量定位系统”等。叶声华院士共获省部级以上科技成果奖 16 项, 其中, “准直技术及应用”获 1998 年度国家科技进步三等奖, “视觉检测技术及应用”获 1999 年度国家科技进步二等奖, “先进制造中空间几何尺寸测量的现场校准方法和装备”获 2004 年度国家技术发明二等奖, “柔性在线自动测量方法、技术及应用”获 2011 年度国家技术发明二等奖; 著有《激光在精密计量中的应用》、《激光测量技术》等著作, 发表学术论文五百余篇。

叶声华院士特别注重创新能力人才的培养, 已培养 120 余名博士、硕士, 研究生培养工作获国家教学成果二等奖 1 项; 培育建立了一支朝气蓬勃的学术梯队, 科研团队于 2004 年被中华全国总工会授予“全国创新示范岗”, 2013 年获教育部创新团队称号。

本论文集是叶声华院士及其科研团队在“激光及光电测试技术”研究方向上的代表性技术探索和成果总结, 包括激光及光电测试技术的基本原理、方法、关键技术及典型应用等 50 篇学术论文。希望本论文集对从事精密测试技术与仪器及相关专业的科研工作者及工程技术人员有所帮助。

不足之处恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

电磁分度测量装置中的相位测量问题	1
量子干涉仪	6
利用带有固定衍射光栅的表面声波光电探测系统测量线位移和角位移	10
二维分布规则尺寸的激光在线测量方法的研究	14
空间多自由度激光定位系统	21
激光散射测量微粒尺寸的理论与技术	25
一种实用成像系统像面动态散斑的空-时相关函数	28
红细胞几何尺寸和动态应变参数激光衍射自动分析仪	33
表面特征 CCD 检测系统	37
激光散斑法测量皮肤血流	38
凝胶溶胀特性的测试方法	38
金属丝网缺陷激光在线检查系统	43
三维视觉检测与结构光传感器的标定	46
用于在线测量的视觉检测系统	52
非接触式光学柔性三坐标测量系统	56
CCD 摄像机参数标定新技术	62
用于三维尺寸检测的双目视觉传感器	67
机器人化柔性自动坐标测量系统的研究	72
三维尺寸视觉测量系统	78
视觉检测技术及应用	82
CCD 摄像机快速标定技术	88
双目视觉传感器的现场标定技术	93
一种新型线结构光传感器结构参数标定方法	99
IVECO 车身视觉检测系统现场溯源研究	104
精密测试技术展望	109
视觉传感器中摄像机的虚拟三维靶标标定法	112
大直径钢管直线度在线测量研究	117
栅状阵列器件激光视觉检测系统及共面性评价方法	120
三维彩色扫描测量技术	125
车身三维尺寸视觉检测及其最新进展	129
基于工业机器人白车身柔性坐标测量系统研究	134
利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法	139
基于激光跟踪仪的机器人运动学参数标定方法	148

任意位姿平面靶标实现立体视觉传感器标定	153
面向对象的大尺寸测量不确定度分析	159
线结构光视觉传感器测圆(类圆)孔中心两步法	165
现场条件下大空间三维精密定位原理与方法	171
现代测试计量技术及仪器的发展	180
机器人柔性视觉检测系统现场标定技术	187
采用光平面交汇的大尺寸坐标测量方法	196
扫描平面激光坐标测量系统校准方法的优化	202
一种基于视觉引导的激光经纬仪自动测量系统	211
基于机器人的柔性电子检具测量系统	220
基于叶尖定时的旋转机械叶片振动信号重建	227
回转激光位移传感器逼近式孔心定位方法	235
摄影测量图像处理的高精度误差补偿法	244
激光跟踪仪测角误差的现场评价	254
现场大空间测量中精密三维坐标控制网的建立	263
大型管道快速测量与建模技术研究及应用	271
基于 LCoS 像素级图像亮度调整方法研究	280
附录 SCI 收录论文	290

电磁分度测量装置中的相位测量问题

精密仪器教研室 叶声华

摘要：电子相位计是电磁分度测量装置的重要组成部分。作者对各种相位测量方法进行了分析研究，并且认为双极性触发式相位计能够满足电磁分度测量装置的要求。在研究过程中我们试制了一台该类型的相位计。文章简要地叙述了这种相位计的几个主要问题，并给出了实验结果。

вопросы о измерении фаз в делительном измерительном

аппарате с магнитным масштабом

Е Шэн-Хуа

Электронный фазометр-важная составная часть делительного измерительного аппарата с магнитным масштабом. Автор анализировал и исследовал различные методы измерения фаз и утвердил, что двухполярный триггерный фазометр может удовлетворять требованиям делительного измерительного аппарата с магнитным масштабом. В процессе исследования мы выполнили опытный образец фазометра такого типа. В статье кратко описаны основные вопросы об этом фазометре и приведены результаты эксперимента.

近几年，在长度测量方面出现了一种新型的测量装置，即电磁分度测量装置。其测量原理与一般的长度及角度测量不同，它不采用刻线尺或度盘作标准，而采用录磁度盘作标准。这种装置的测量过程大体上与磁带录制过程相似，它通过磁性记录，把精确的正弦波记录在直尺或圆盘上。磁波的波长就相当于长度或角度的测量单位。这种方法一般用来测量角度，与用光学分度头测量相似，只是用录磁度盘代替了刻线度盘，用拾磁头代替了显微镜。如图1所示。在分度装置的金屬盤1的圓周表面2上录有磁波。在测量过程中金屬盤连续旋转，磁

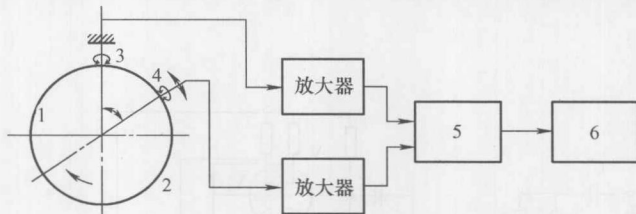


图1 电磁测量装置

1—金属盘 2—圆周表面 3, 4—拾磁头 5—相位计 6—数显表

波由拾磁头3和4取出。拾磁头3固定不动，拾磁头4可绕金属盘旋转。来自两拾磁头的信号经放大后传给相位计5。相位计的读数就表示出两个拾磁头的相位差角。当移动拾磁头4时，每移动相当一个磁波波长时，两信号之间的相位差角便相应地改变 360° 。因此拾磁头4位置测量的灵敏度可以达到很高。此外，这种装置还可用来检验机床的传动精度，以及齿轮精度，也可以用来作车间用万能分度头和自动坐标装置的分度工作台等。最近我国有些单位

开始研究电磁分度装置,但首先需要解决相位测量问题。

电子相位计是整个电磁分度测量装置的重要组成部分之一。它的测量范围、灵敏度以及频率响应等特性都直接影响到整个电磁分度测量装置的测量精度与应用范围。电子相位计本身也是一种独立的仪器,用途很广,如无线电、计时仪器以及振动测量等方面的科学研究工作都需要有高精度的相位计。作者对各种相位测量方法进行了分析研究,最后的结论是:双极性触发式电子相位计具有一系列的优点,能满足电磁分度测量装置的要求。根据分析研究的结果,我们试制了一台双极性触发式电子相位计。本文仅对这种相位计的原理、特点、试制结果作粗略的介绍。

一、双极性触发式相位计的作用原理

双极性触发式相位计的测量装置部分由两个触发器组成。成形装置与一般双路式相位计相同。它利用由第一个被测信号转换所得矩形波的前沿,以及由第二个信号转换所得矩形波的后沿,分别微分所得到的尖脉冲来控制第一个触发器。而用第一个矩形波的后沿及第二个矩形波的前沿微分所得的尖脉冲,来控制第二个触发器。

这种相位计测量装置的原理如图2所示。在两输入端加有两被测电压 u_1 及 u_2 (已经过成形装置转换为矩形波)。电压 u_1 通过二极管 VD_1 及 VD_2 ,被 R_2 、 R_3 、 R_4 及 R_1 C_1 共同组成的微分电路所微分。其正脉冲加到由电子管 V_1 及 V_2 所组成的第一个触发器的输入端上。结果电子管 V_1 开启, V_2 截止。电压 u_2 经过二极管 VD_3 及 VD_4 ,再经 R_6 、 R_4 、 R_3 及 R_5 C_2 组成的微分电路所微分,其负脉冲加到第一个触发器的输入端上。结果电子管 V_1 截止,而 V_2 开启。它的电流 I_{10} 一直到下一个正脉冲加入时才终止。脉冲电流的瞬时值如图3所示,第一个触发器的平均电流为

$$I_{10} = I_{1m} \left(1 - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2\pi} - \frac{\varphi}{2\pi} \right)$$

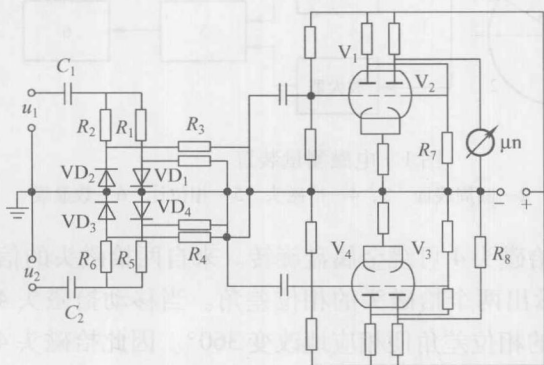


图2 双极性触发式相位计的测量装置

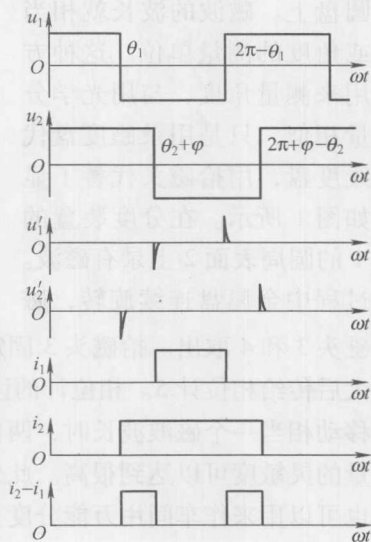


图3 脉冲电流的瞬时值

式中, φ 是被测相位角; $2\theta_1$ 及 $2\theta_2$ 是方波电压 u_1 及 u_2 正半波的宽度; I_{1m} 是第一个触发器脉冲电流幅度。

第二个触发器由电子管 V_3 及 V_4 组成。它的脉冲电流的宽度等于由 u_1 微分成的负脉冲及由 u_2 微分成的正脉冲之间的时间间隔。所以平均电流为

$$I_{20} = I_{2m} \left(1 - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2\pi} + \frac{\varphi}{2\pi} \right)$$

测量电表接在两个触发器输出电子管 V_2 及 V_3 的板极之间。若电子管 V_2 及 V_3 脉冲电流的幅度相等, 即 $I_{1m} = I_{2m} = I_m$, 则电流之差的平均值为

$$I_\theta = I_{2\theta} - I_{1\theta} = I_m \frac{\varphi}{\pi}$$

二、双极性触发式相位计的主要优点

由上述平均电流表达式可以看出这种相位计的重要性质:

- 1) 测量电表的刻度在 $0 \sim 360^\circ$ 的范围内是单值线性的。
- 2) 测量电表的读数与限幅的对称与否关系不大。从这种相位计的波形图可以看出, 由于零点漂移所带来的影响是可以消除的。这样就大大地提高了相位计的精度。
- 3) 减少了高次谐波所造成的影响。在一般的双路式相位计中, 高次谐波对测量精度的影响较大, 含高次谐波 1% 就会造成 1.2° 的误差。但在双极性触发式相位计中, 输出脉冲电流既决定于正脉冲, 又决定于负脉冲, 所以高次谐波的影响可以抵消一部分。

三、试制的结果

根据这种原理, 我们试制了一台电子相位计, 经过检定, 试验仪器的工作性能是可靠的、稳定的。目前由于在文献中尚未找到有关相位计精度检定的资料, 而且也没有已知的标准相位计作为检定标准, 因此作者只有根据自己的一些看法对仪器进行检定, 其结果于后:

(一) 仪器的定标

由输出电流的表达式可以看出: 相位计的 0 刻度相当于 0 相位差, 此时 $I_{1m} = I_{2m}$; 满刻度相当于 $\pm 180^\circ$, 此时测量电表的电流等于触发器的最大输出电流 I_m , 因此可用 I_m 来校准满刻度; 另外由 RC 组成的 90° 移相器是准确的, 因此我们可以得到 0 、 $\pm 90^\circ$ 、 $\pm 180^\circ$ 等各点, 其余各点可按线性刻度。该仪器刻度共分三挡, 即 $\pm 180^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 。

(二) 刻度值的检定

因为没有标准的相位计或标准的移相器, 我们只有用标准电阻电容组成 RC 移相器 (图 4) 进行检定。 RC 移相器只能在 $0 \sim 90^\circ$ 之间变化, 所以检定是在 90° 挡进行的, 其结果如图 5 ~ 图 8 所示。

图 5 ~ 图 8 分别为改变移相器的电容和频率所得到的检定曲线。从曲线可以看出: 实际测出的移相器的相位角 $\varphi_{\text{实测}}$ 与计算出的相位角 $\varphi_{\text{计算}}$ 大致相符; 测试结果是稳定的, 在 $\pm 62^\circ$ 以内曲线上各点的偏差约为 0.5° , 即相对误差为 3%; 在 $\pm 62^\circ$ 以外出现的误差较大, 最大

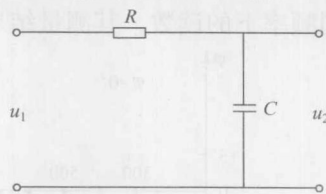


图 4 RC 移相器

达 4° ，即相对误差的5%。另外，我们将4条曲线与测量电表的检定曲线作了比较，前者和后者误差分布的情况极为相似，因此我们估计该相位计的误差主要是由测量电表带来的。

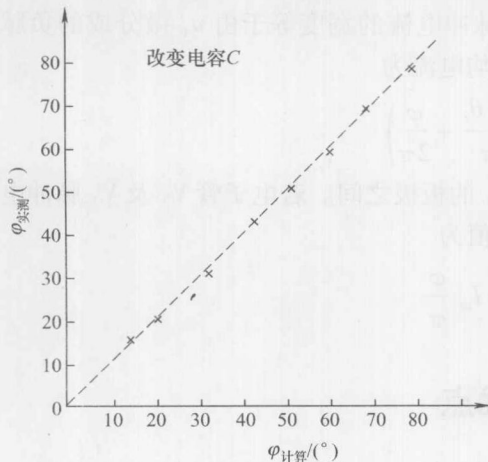


图5 刻度值的检定结果（一）

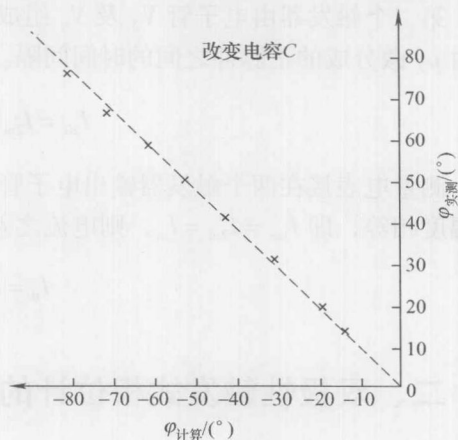


图6 刻度值的检定结果（二）

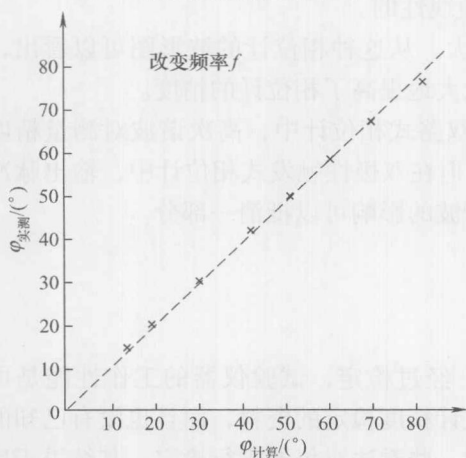


图7 刻度值的检定结果（三）

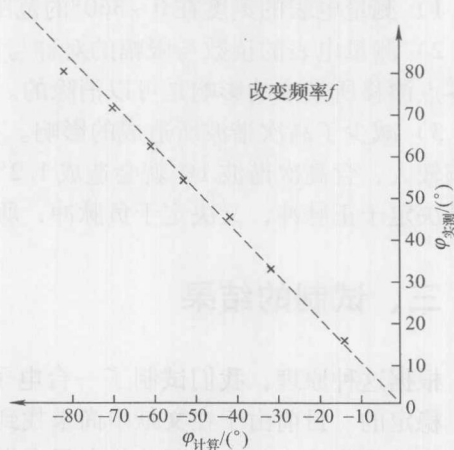


图8 刻度值的检定结果（四）

（三）频率响应特性

首先，我们将同一信号加到仪器的两输入端，即被测相位差 $\varphi = 0^\circ$ ，然后记取仪器在不同频率下的读数，其测量结果如图9所示。

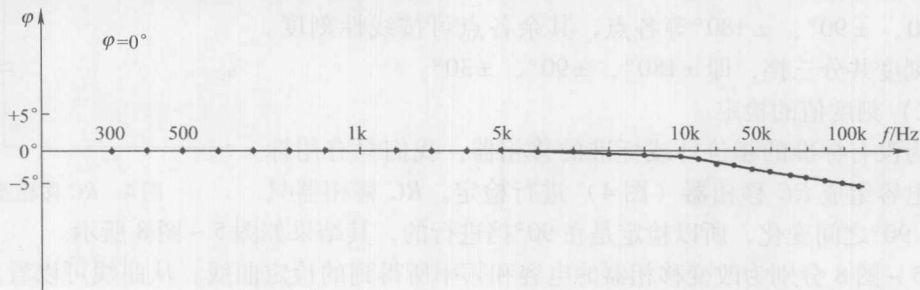


图9 $\varphi = 0^\circ$ 时的频率特性

其次,用 RC 组成的 90° 移相器 (图 10) 进行检定。从移相器两输出端 AO 及 BO 分别取出电压,其相位差为 90° ,两电压之比为

$$\frac{U_R}{U_C} = \omega C R e^{i90^\circ}$$

从上式看出,改变频率并不会影响其相位差。这样,在不同的频率下就可记取仪器的读数,其结果如图 11 及图 12 所示。

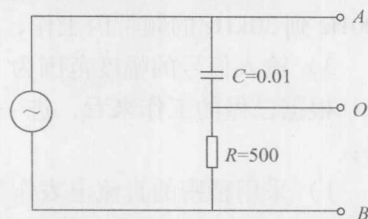


图 10 90° 移相器

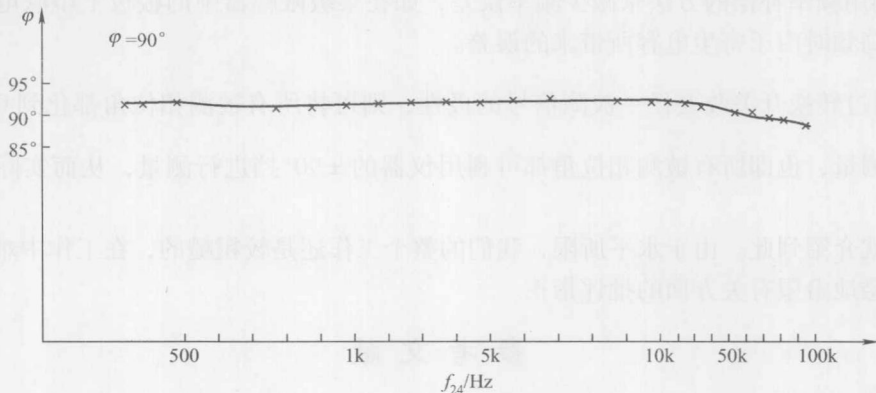


图 11 $\varphi = 90^\circ$ 时的频率特性

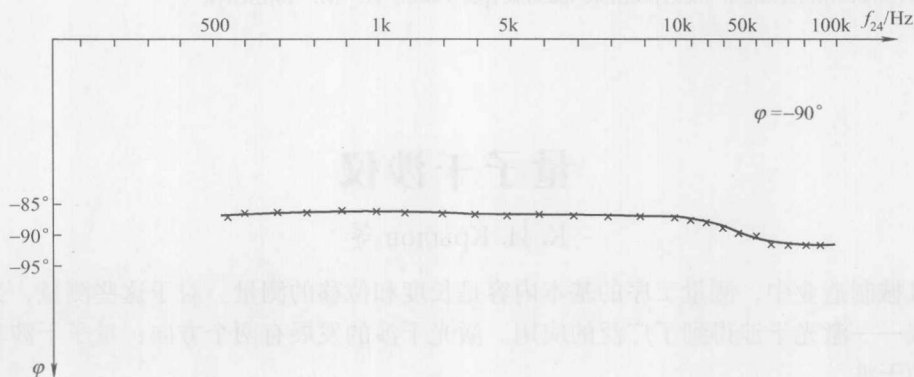


图 12 $\varphi = -90^\circ$ 时的频率特性

以上结果与理论分析大致符合,三条曲线的趋向也大体一致,所以检定是可以相信的。从曲线看出,仪器的工作频带是比较宽的。由于检定过程中所用元器件的影响,所以对仪器在低频和高频时的特性还无法检定。根据设计结果来看,该仪器的工作频带是可以更宽一些的。

另外,我们还对输入信号幅度的影响以及读数的稳定性作了一些实验。结果表明,输入信号为 $1 \sim 60\text{V}$ 时,仪器的工作是正常的;在连续工作 45min 以内仪器的读数也是稳定的。

综上所述,该仪器的性能可以归纳为以下几方面。

1) 仪器能测量 $\pm 180^\circ$ 之内的相位差,刻度分三挡,即 $\pm 180^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$,其刻度值分别为 5° 、 3° 、 1° 。仪器的误差约为 3% 。对满刻度而言,误差分别为 5° 、 3° 及 1° 。

2) 仪器的工作频带。从以上几种频率特性曲线可以看出, 根据现在的检定, 仪器可在 500Hz 到 30kHz 的频带内工作, 其附加的频率误差不超过 0.5° 。

3) 输入信号的幅度范围为 1~60V。

根据已做的工作来看, 进一步提高双极性触发式相位计的精度可以从下述几个方面着手:

1) 采用精密的直流电表作指示仪器。前面已经指出, 这种相位计的误差主要是由电表的误差造成的, 所以采用精密的电表可以直接提高仪器的精度。

2) 利用频率补偿的方法来减少频率误差, 如在某级限幅器中的板极上串联电感, 就可以补偿在高频时由于寄生电容所带来的误差。

3) 通过转换开关改变任一被测信号的极性, 则可将所有被测相位角都化到 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 的象限内进行测量, 也即所有被测相位角都可利用仪器的 $\pm 90^\circ$ 挡进行测量, 从而实际精度可提高一倍。

本文就介绍到此。由于水平所限, 我们的整个工作还是较粗糙的, 在工作中难免有不少错误, 诚恳地希望有关方面的批评指正。

参 考 文 献

- [1] Czechoslovak heavy industry 1959. 9.
- [2] Станки и инструмент 1959. 9.
- [3] Электромеханические и электронные фазометры 1962. И. М. Вишенук...

量子干涉仪

К. И. Крылов 等

在机械制造业中, 测量工序的基本内容是长度和位移的测量。对于这些测量, 光波干涉新的领域——激光干涉得到了广泛的应用。激光干涉的发展有两个方向: 量子干涉和以激光作光源的干涉。

量子干涉仪的特点是被测对象装在谐振腔内或者本身就是谐振腔的组成部分。目前广泛应用以差频原理为基础的量子干涉仪和具有三反射镜激光器的量子干涉仪。关于激光干涉仪在文献 [1, 2, 3] 中作了详尽的阐述。

一、差频量子干涉仪

在这类干涉仪中, 激光器的谐振腔被用作形成测量信息的测量干涉仪。这时, 为了确定距离要应用下列情况, 即谐振腔两相邻纵模之间的频差是腔长的函数

$$\Delta\nu = c/(2L) \quad (1)$$

式中, $\Delta\nu$ 是频差; L 是谐振腔腔长; c 是谐振腔内的光速。

因此, 当一个反射镜移动一段被测距离时, 差频的大小要发生变化, 并且位移由下式决定:

$$\Delta L = \pm 2L^2 \Delta F / c$$

式中, ΔF 是差频的变化量。

这类量子干涉仪的基本优点是: 将线性尺寸的测量归结为频率的测量, 而频率可以进行高准确度的自动测量。为了实现差频量子干涉仪, 激光器必须是单模双频振荡。

图 1 (略) 为测量量子干涉仪的原理图。谐振腔的一个反射镜 10 是半透明的, 并且固定不动, 而另一反射镜 3 是不透明的, 它可沿谐振腔的光轴移动。反射镜可以是平面的, 也可以是球面的, 它们之间的距离由谐振腔的损耗所限制。利用孔径可调光栏 2 可以获得激光器的单模振荡。激光束经过反射镜 10 和光学系统 9 投射到光探测器 7 上, 并产生电信号, 其频率等于与被测距离相应的激光器纵横的频差。这一信号经放大器进入终端测量装置——频率计 5。

检测标准零件尺寸的量子干涉仪原理图如图 2 所示。图中反射镜 3 固定在可动支座 4 上, 可动支座 4 借助于固定在支承块 5 上的弹簧 6, 可在机座 8 的凹槽 7 内作往返运动。反射镜 18 固定在与支承块 11 连在一起的固定支座 12 上。被测零件 10 放在可动支座 4 与固定支座 12 之间。测量结果由频率计 13 显示。

图 3 给出测量被测对象 5 位移量的量子干涉仪的另一种可行原理图。激光束通过偏振器 2 后分裂为两个偏振面相互垂直的偏振光 E_1 和 E_2 , 它们分别射向谐振腔反射镜 3 和 4。在激光器输出端, 谐振腔反射镜 9 的另一面装有检偏器 8, 由此使输出信号与分别通过谐振腔反射镜 4、9 之间和 3、9 之间的两路偏振光的程差有关。假设一个谐振腔反射镜, 例如谐振腔反射镜 3 固定不动, 而另一谐振腔反射镜 4 与被测对象 5 连在一起, 则可以测量被测对象 5 的位移量。

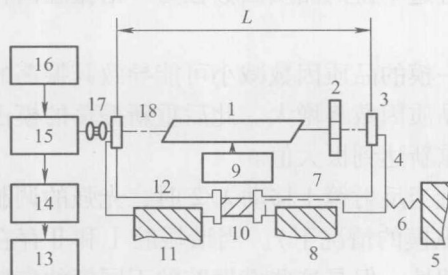


图2 检测标准零件尺寸的量子干涉仪原理图

- 1—气体激光放电管 2—光栏 3, 18—谐振腔反射镜 4—可动支座 5, 11—支承块
6—弹簧 7—凹槽 8—机座 9—激光电源 10—被测零件 12—固定支座
13—频率计 14—放大器 15—光接收装置 16—光接收装置电源
17—光学系统

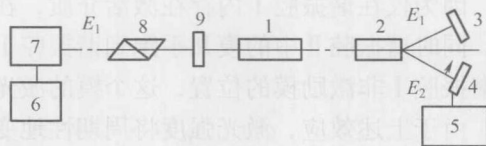


图3 测量物体位移的量子干涉仪原理图

- 1—激活介质 2—偏振器 3, 4, 9—谐振腔反射镜 5—被测对象 6—记录系统
7—光探测器 8—检偏器

如文献 [2] 指出, 由于在光波干涉中可用频率法进行测量, 所以对差频量子干涉仪的发展给予很大重视。为了使这类干涉仪达到高灵敏度, 应消除由于环境的扰动而引起的发射

频率的不稳定性。因此,在研究提高量子干涉仪激光频率的稳定性或者是消除频率不稳定性对测量过程的影响的方法和装置时,可以认为在三反射镜谐振腔中实现差频原则的量子干涉仪是最完善的。

二、以三反射镜谐振腔激光器为基础的量子干涉仪

图4为三反射镜谐振腔激光器的原理图。反射镜1和3与激活介质2组成的激光器。或是由于反射镜4的位移,或者是反射镜3和4之间介质特性的变化将引起光程长度的变化,从而引起激光强度的调制。

在研究三反射镜谐振腔的基础上^[4-6]得出下列结论^[4]:在该系统中所形成的模式既不是谐振腔I的模式,也不是谐振腔II的模式,而是三反射镜复合谐振腔I—II的模式;在谐振腔I和II耦合较弱的情况下,在很大的精确程度上这些模可看作谐振腔I和II的偏移模;在一般情况下,谐振腔之间耦合的引入将导致模在频率标度上的偏移,并且谐振腔I和II的位置越近,则偏移越大。

当耦合参数很小时($Q_c \ll 1$),相对于 $K_n = n\pi/L$ 的偏移量 ΔK_n 很小,并且当 $L_1 = L_2 = L$ 时, $\Delta K_n \approx \pm \sqrt{Q_c} 12/L$ 。当模的频移相对于 $Q_c = 0$ 模的值等于0时,在反射镜4移动的情况下,模将达到在自己谐振腔内强度的最大值。当反射镜4位移时,在三反射镜谐振腔内所有可能出现的模,相对于非激励状态的频率,都改变自己的频率,从而导致在自己谐振腔内模强度的减弱,因此也就减小了模的品质因数。并且这个模的品质因数在另一谐振腔内将增大。

因为仅在谐振腔I内存在激活介质,在腔内某一模的品质因数减小可能导致其振荡的终止。同时谐振腔II中的模几乎跑到谐振腔I内,其品质因数将增大。此后重新振荡的模占据了谐振腔I非激励模的位置,这个模的激光强度又重新达到极大值。

由于上述效应,激光强度将周期性地变化,并且当反射镜4移动 $\lambda/2$ 时,光强的调制变化一个完整周期(在谐振腔I或谐振腔II都只存在纵模的情况下)。当谐振腔I和II存在纵模和横模时,也能观察到类似的激光光强变化的周期性。但是这些谐振腔的不同模的焦散面并不相交(如在对称于反射镜3的镜对称式谐振腔内)。

上述效应是三反射镜激光干涉仪的基础。这种干涉仪用于测量物体的长度和位移、移动速度以及介质的各种物理特性,如折射率和密度等。

在三反射镜干涉仪中光强的调制深度在很大程度上取决于耦合参数 Q_c 及主动和被动谐振腔长度之比 L_1/L_2 。当 $L_1 = L_2$,反射镜移动时,所有振荡模将同时减弱或增强。假若这时反射镜移动速度很小,而 Q_c 足够大,并且在谐振腔中模建立的物理过程的惯性可以忽略,则光强的调制深度几乎可达100%。当 $L_1/L_2 > 1$ 时,仅部分模同时增强(或减弱),因此调制深度小于100%。当 $L_1/L_2 \gg 1$ 时,所有的激光模实际上同时偏离非激励状态,并且调制深度又重新接近于100%。

图5所示为测量物体位移的三反射镜谐振腔量子干涉仪原理图^[2]。氦-氖激光器1的谐

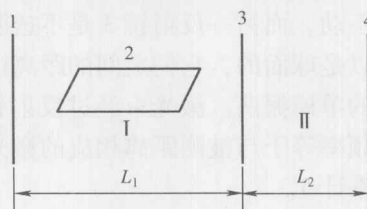


图4 三反射镜谐振腔
激光器的原理图
1, 3, 4—反射镜 2—激活介质

振腔由两个固定反射镜 2 和 14 (透过率分别为 0.1% 和 1%), 以及可动反射镜 6 所组成。可动反射镜 6 固定在可用千分尺移动的支承上。当可动反射镜 6 移动时, 接收装置 (包括光接收器 11、放大器 10 和记录装置 9) 记录光信号最大值和最小值的个数, 最大值与最小值之间的距离相当于半个波长。光学系统 4 和 12 用来减小激光的发散角。所述装置还可以用来测量移动速度和谐振腔内被测介质 5 特性的变化。

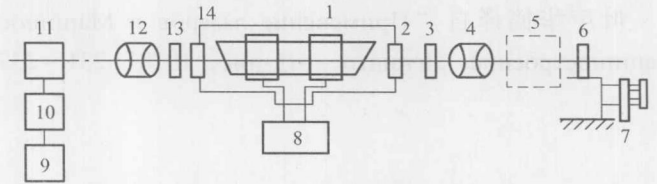


图5 测量物体位移的三反射镜谐振腔量子干涉仪原理图

- 1—氦-氟激光器 2, 14—固定反射镜 3, 13—滤光片
4, 12—光学系统 5—被测介质 6—可动反射镜
7—可动支承 8—激光电源 9—记录装置
10—放大器 11—光接收器

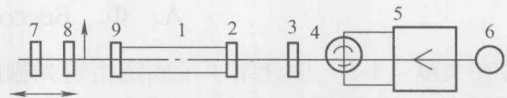


图6 利用偏振面周期性变换来测量物体位移长度的量子干涉仪原理图

- 1—激光器 2, 9—谐振腔反射镜 3—检偏器
4—光探测器 5—放大器 6—记录装置
7—被测对象 (可动反射镜) 8—偏振片

三反射镜谐振腔量子干涉仪的缺点是不能确定到外反射镜的光程变动的方向。假若预先不知道这个方向, 就难以判别测量结果, 还有由于外压力的波动, 谐振腔的失调等所引起的激光功率的不稳定将降低测量精度。为了克服后一缺点, 建议采用如下新装置, 在这种装置中反射镜的移动将引起激光束偏振面的周期变化。这个装置的原理图如图6所示。在这个装置中利用各

向同性的激光器1, 平面偏振波之一通过偏振片8落到可动反射镜7, 被反射后返回激光器。根据到达可动反射镜7前的光程, 它使同样偏振面的光波增强或减弱, 具有垂直偏振面的波被偏振片8吸收而不落到可动反射镜7上。由于反射镜的这些移动, 落在检偏器3上的激光偏振面将周期性地改变, 从而引起落在光探测器4上的光强周期性的变化。假若将偏振片8换成1/4波片, 可以提高装置的测量准确度。

用相对于谐振腔的两个反射镜略有失调的球面反射镜代替第三个平面反射镜, 则可大大提高三反射镜干涉仪的灵敏度^[14]。在这种情况下, 被动谐振腔内产生比基模更高阶的横模, 当相应于横模频率的光路改变时, 将引起光强更快的变化。

当外反射镜的移动速度 v 为常数时, 激光强度的变化周期可由下式决定^[14]:

$$t' = \lambda / (2vs)$$

式中, s 是受激振荡数。

在三反射镜干涉仪中差频原理的实现可以得到比其他干涉仪高得多的灵敏度。在文献[18]中所介绍的干涉仪是利用双频激光器, 其主动谐振腔长为80cm, 被动谐振腔长为10cm。主动腔长和被动腔长的这个比例保证了它们仅有两个谐振频率相符。在接近主动腔和被动腔的相符谐振频率时, 则一个频率振荡, 另一频率不振荡。这时被动腔长改变的信号包含在振荡的差频中。当被动腔长改变时, 其变化的速度能达到 $5\text{kHz}/\text{\AA}$ 。当利用同步探测器时, 测量的灵敏度可达 $10^{-3}\text{\AA}$ 。但是, 目前上述三反射镜干涉仪在长度和位移测量中还未得到足够应用, 它们还不能与很好设计的激光迈克尔逊干涉仪相媲美, 确定被动腔长变化符号上的困难阻碍了它们的广泛应用。

(参考文献略)

叶声华摘译自“Применение лазеров в Машиностроении и приборостроении. —Л. Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978” 231 ~ 237.

利用带有固定衍射光栅的 表面声波光电探测系统 测量线位移和角位移

А. Ф. Бессонов 等

作者在文献 [1-5] 中介绍了带固定衍射光栅的表面声波光电探测系统。在这个系统中, 光波与表面声波和固定衍射光栅连续地相互作用, 并且声波的波长 Λ 等于光栅周期 Λ_p 。在一个衍射级次的条纹处: $m=0$, $m=+1$, $m=-1$, 放置光电探测器, 它输出的信号具有表面声波频率 F , 并带有表面声波的幅值和相位信息。计算和实验表明^[3,4,9], 在光电探测器的输出端可以保证较高的信噪比, 因此可以利用该系统以很高的精度 ($\Delta\varphi \approx 0.1^\circ \sim 0.3^\circ$) 进行相位测量^[5]。

假如在该系统中光栅与传声器分开^[5], 那么光栅沿表面声波传播方向相对于传声器移动 Δx (或传声器相对于固定衍射光栅), 将会使输出信号的相位改变

$$\Delta\varphi = (2\pi/\Lambda) \Delta x \quad (1)$$

测量 Δx 时, 如果采用 $\Phi 5126$ 型相位计 (精度 $\Delta\varphi = 0.3^\circ$, 分辨力 $\Delta\varphi = 0.1^\circ$), 其分辨力是很高的。当 $\Lambda = 40\mu\text{m}$ 时, 可以得到 $\Delta x \approx 0.03 \sim 0.01\mu\text{m}$ 。在这个系统中长度基准是移动元件 (固定衍射光栅或表面声波) 的周期, 而 $\Delta\varphi$ 变化的线性范围取决于周期是否恒定。

在已知的光栅声光装置中^[6,8], 到目前为止都是利用体积声波。采用表面声波可使系统更加紧凑、稳定和提高了测量精度, 因为它消除了一系列体积声波系统所固有的缺点。

具有表面声波的测量仪系统可由两种方案实现, 即以透射光工作和以反射光工作的两种系统 (图 1), 它们都合理地利用了相位型衍射光栅。在透射光系统中, 从光源 7 发出波长为 λ 的相干光束连续通过固定衍射光栅 1 和表面声波传声器 2。在 0 次衍射处放置光电探测器 3, 其输出端的信号经放大器 4 进入相位计 5 的测量输入端。相位计的固定输入端与振荡器 6

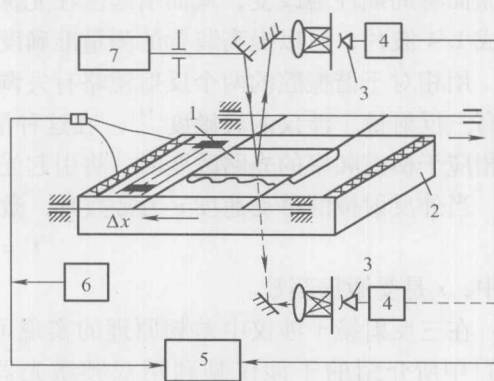


图1 利用衍射光栅和表面声波的线位移测量仪单路系统的两种方案 (光电探测器或放在反射光束中或在透射光束 (虚线) 中)
1—固定衍射光栅 2—传声器 3—光电探测器 4—放大器 5—相位计 6—振荡器 7—光源