



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 20485.15—2010/ISO 16063-15:2006

---

## 振动与冲击传感器校准方法 第 15 部分：激光干涉法角振动绝对校准

Methods for the calibration of vibration and shock transducers—  
Part 15: Primary angular vibration calibration by laser interferometry

(ISO 16063-15:2006, IDT)

2010-12-23 发布

2011-06-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会

发布

## 目 次

前言 .....	I
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 测量不确定度 .....	2
4 仪器设备要求 .....	2
5 环境条件 .....	7
6 优选的角加速度及频率值 .....	7
7 六种测量方法的通用步骤 .....	8
8 条纹计数法(方法 1A 和方法 1B) .....	8
9 最小点法(方法 2A 和方法 2B) .....	11
10 正弦逼近法(方法 3A 和方法 3B) .....	15
11 校准结果报告 .....	20
附录 A (规范性附录) 振动和冲击传感器激光干涉法角振动绝对校准的不确定度分量 .....	22
附录 B (规范性附录) 角位移 $\Phi$ , 角速度 $\Omega$ , 角加速度 $\alpha$ 和角振动传感器的灵敏度(包括角位移传感器 $S_{\Phi}$ 、角速度传感器 $S_{\Omega}$ 和角加速度传感器 $S_{\alpha}$ )的计算公式 .....	27
参考文献 .....	31

## 前 言

GB/T 20485《振动与冲击传感器校准方法》主要由以下几大类组成：

- 第 1 类：基本概念；
- 第 2 类：绝对法校准（如：激光干涉法振动绝对校准、激光干涉法冲击绝对校准等）；
- 第 3 类：比较法校准（如：振动比较法校准、冲击比较法校准等）；
- 第 4 类：环境模拟校准（如：磁灵敏度、声灵敏度、基座应变灵敏度、横向振动灵敏度等）。

本部分是 GB/T 20485 第 2 类中的一个部分。

本部分等同采用 ISO 16063-15:2006《振动与冲击传感器校准方法 第 15 部分：激光干涉法角振动绝对校准》(英文版)。

本部分等同翻译 ISO 16063-15:2006。

为使用方便,本部分作了如下编辑性修改：

- 用“本部分”代替“本国际标准”；
- 删除国际标准的前言；
- 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”；

——第 11 章 ISO 原文有 a)、b)、c) 三项,其中 b) 项在本部分中拆分为“b) 安装方法”和“c) 放大器的所有设置……”,相应地 ISO 中原来的 c) 项变为本部分的 d) 项；

——对 ISO 16063-15:2006 中引用的其他国际标准,用等同采用的我国标准代替对应的国际标准。

本部分的附录 A、附录 B 为规范性附录。

本部分由全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会(SAC/TC 53)提出并归口。

本部分起草单位：中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所、广州市计量检测技术研究院。

本部分主要起草人：薛景锋、李新良、张大治、周伦彬。

## 振动与冲击传感器校准方法

### 第 15 部分:激光干涉法角振动绝对校准

#### 1 范围

GB/T 20485 的本部分规定了绝对法校准角振动传感器如角位移传感器、角速度传感器、角加速度传感器(带放大器或不带放大器)的仪器设备和操作程序,以及采用稳态正弦振动和激光干涉测量法获得角振动传感器复灵敏度的幅值和相移的方法。本部分给出的方法适用于 GB/T 2298 中定义的角度位移、角速度和角加速度参量的测量仪器(特别是激光角振动测量仪)和角振动传感器的校准。

本部分适用的频率范围为 1 Hz~1.6 kHz,动态范围(幅值)为 0.1 rad/s<sup>2</sup>~1 000 rad/s<sup>2</sup>(依频率而定)。

本部分第 3 章规定的测量不确定度覆盖了上述范围。若校准频率低于 1 Hz(如:其他国际标准中的参考频率为 0.4 Hz)和角加速度幅值小于 0.1 rad/s<sup>2</sup>,可选用一个合适的低频角振动激励器,并采用本部分规定的方法 3A 或方法 3B。

方法 1A(见第 8 章条纹计数法的 A 型干涉仪)和方法 1B(见第 8 章条纹计数法的 B 型干涉仪)适用于频率范围为 1 Hz~800 Hz 的复灵敏度幅值校准。特殊条件下,可用于较高频率段。方法 2A(见第 9 章最小点法的 A 型干涉仪)和方法 2B(见第 9 章最小点法的 B 型干涉仪)适用于频率范围为 800 Hz~1.6 kHz 的灵敏度幅值校准。方法 3A(见第 10 章正弦逼近法的 A 型干涉仪)和方法 3B(见第 10 章正弦逼近法的 B 型干涉仪)适用于频率范围为 1 Hz~1.6 kHz 的灵敏度幅值和相移的校准。方法 1A、方法 1B 及方法 3A、方法 3B 规定在不同频率点、固定的角加速度幅值下进行校准。方法 2A、方法 2B 则要求在固定的角位移幅值进行校准(其角速度、角加速度幅值随频率变化)。

注 1:与 GB/T 20485.11—2006 类似,方法名称中的数字 1~3 对应激光干涉仪输出信号不同的处理方法:数字 1 代表条纹计数法,数字 2 代表最小点法,数字 3 代表正弦逼近法。每一种信号处理程序可以和本部分详细描述 A 型和 B 型干涉仪一起使用。

A 型干涉仪是采用迈克尔逊(Michelson)或者马赫-泽德(Mach-Zehnder)干涉原理,后向反射器安装于角振动激励器半径  $R$  的位置处。这一类型的干涉仪可测量的转角最大为 3°。B 型干涉仪采用测量圆环侧向表面环状衍射光栅的迈克尔逊或马赫-泽德的干涉仪。如果衍射光栅沿圆周(即 360°)粘贴,这种激光干涉仪不受转角的限制,通常是最大角振动受角振动激励器的限制。

注 2:虽然本部分规定的校准方法是用于角度量值的传感器(GB/T 2298 有定义),但也可将角运动量值的测量仪器作为校准对象,为了简化描述,它的特性也按传感器给出。激光角振动测量仪的具体详细指标在 4.11 中给出,见图 11。

#### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 20485 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 2298—2010 机械振动、冲击与状态监测 词汇(ISO 2041:2009, IDT)

GB/T 3240—1982 声学测量中的常用频率(neq ISO 266:1975)

GB/T 20485.1—2008 振动与冲击传感器校准方法 第 1 部分:基本概念(ISO 16063-1:1998, IDT)

### 3 测量不确定度

应用本部分达到的测量不确定度为:

a) 灵敏度幅值

参考条件下,测量值的不确定度为 0.5%;  
非参考条件下,测量值的不确定度不超过 1%。

b) 灵敏度相移

参考条件下,测量值的不确定度为 0.5°;  
非参考条件下,测量值的不确定度不超过 1°。

推荐的参考条件为:

——频率:160 Hz、80 Hz、40 Hz、16 Hz、8 Hz(或角频率  $\omega$  为 1 000 rad/s、500 rad/s、250 rad/s、100 rad/s、50 rad/s);

——加速度(角加速度幅值或有效值):100 rad/s<sup>2</sup>、50 rad/s<sup>2</sup>、20 rad/s<sup>2</sup>、10 rad/s<sup>2</sup>、5 rad/s<sup>2</sup>、2 rad/s<sup>2</sup>、1 rad/s<sup>2</sup>。

放大器设置的选择应考虑噪声、失真及截止频率的影响,使其达到最佳性能。

根据 GB/T 20485.1—2008,测量不确定度表示为测量的扩展不确定度(简称不确定度),包含因子  $k=2$ 。

### 4 仪器设备要求

#### 4.1 总则

为了满足第 1 章中的测量范围及达到第 3 章中的不确定度要求,本章给出了所需仪器设备的推荐技术指标。

允许的有的系统只用于上述测量范围的一部分。通常使用不同的系统(例如激振器)覆盖全部频率及动态范围。

注:本条款所述仪器设备,包含了本部分描述的六种校准方法所涉及到的全部仪器及设备。在特定方法中使用的仪器设备已做了单独注明(见图 2~图 8 和图 10)。

#### 4.2 频率发生器和指示器

应满足下列特性要求:

- a) 频率不确定度:不超过读数的 0.05%;
- b) 频率稳定度:测量期间不超过读数的 $\pm 0.05\%$ ;
- c) 幅值稳定度:测量期间不超过读数的 $\pm 0.05\%$ 。

#### 4.3 功率放大器和角振动激励器组合

##### 4.3.1 总则

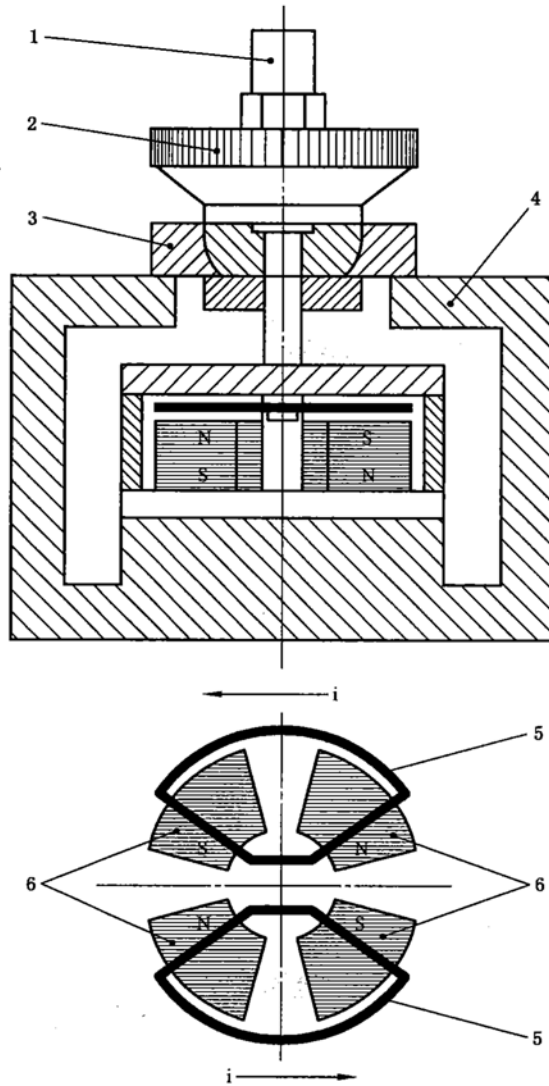
功率放大器和角振动激励器的组合应满足下列特性要求:

- a) 总谐波失真:不超过 2%;  
注 1:该指标与被校传感器的输入量有关。  
注 2:如果采用方法 3A 或方法 3B,允许有较大的谐波失真度。
- b) 横向和摇摆角加速度:应当足够小,以避免对校准结果产生过大的影响。对于 A 型干涉仪,最小角位移时横向运动应小于所要求切向运动的 1%。对于 B 型干涉仪,运动部件(测量台面)以高精度旋转空气轴承支撑的角振动激励器,允许的最大侧向运动(包括偏心运动)为 2  $\mu\text{m}$ 。
- c) 交流声及噪声:比满输出至少低 70 dB。
- d) 角加速度幅值稳定度:测量期间不超过读数的 $\pm 0.05\%$ 。

##### 4.3.2 电动角振动激励器

电动振动激励器采用的基本原理:当带电载体切割磁场时,洛伦兹力对其产生作用。

与一般电动振动激励器产生直线振动相似,置于磁场中的磁空气间隙的线圈,洛仑兹力激发动态扭矩激励装有被校角振动传感器的测量台面实现角振动。在工作频率范围内(1 Hz~1.6 kHz),角加速度的幅值与通过线圈的电流成比例。图 1 所示是角振动激励器的实例,其最大转动幅值是  $30^\circ$ (即两倍振幅为 1 rad)。参考文献[14]给出了角加速度激励器的另外一个示例(幅值  $60^\circ$ ,即振幅为 1 rad)。



- 1——角加速度计;
- 2——衍射光栅;
- 3——空气轴承;
- 4——外壳;
- 5——线圈;
- 6——磁体。

图 1 角振动激励器示例(功能示意图)

#### 4.3.3 基于无电刷电动机的角振动激励器

采用商用电动机设计和制造的特殊角振动激励器,用于角振动传感器的校准。

对于惯性导航传感器的测试,所谓的“速率台”已使用多年,通常装配有电子整流及伺服控制的无刷三相空心轴电机,特别是适合角速度即角速率的运行模式。一般情况下产生不变的角速度,并能获得失真小的正弦角振动。

随着控制技术的进步,使得该类激励器可以产生角加速度。但要求采用和平面线圈型的激励器(见

## 4.3.2)方式相同的空气轴承。

由于微分会加大失真,角加速度计的校准可能需要对传感器输出信号进行频率选择性的测量,以保证方法 3A 和方法 3B(即正弦逼近法)的使用。

## 4.4 角振动激励器和激光干涉仪的隔振块

为了避免大地脉动引起的相对运动或角振动激励器支撑结构的反作用力对校准结果产生过大的影响,角振动激励器及干涉仪应安装在起隔振作用的同一个大质量块或两个不同的大质量块上。

如果用一个普通隔振块,其惯性矩应至少是运动质量惯性矩的 2 000 倍。由此在角振动传感器与干涉仪之间引起的相对角振动小于 0.05%。如果隔振块的惯性矩较小,应考虑由角振动激励器引起的隔振块的运动。

为减小大地扰动的影晌,用在频率范围为 1 Hz~1.6 kHz 的隔振块应由专门设计的阻尼弹簧悬挂支承,以使干扰影响带来的不确定度分量降至 0.1%以内。

## 4.5 激光器

应该使用红光氦氖激光器或有其他已知波长的单频激光器。在实验室条件(即:大气压 100 kPa,温度 23 °C,相对湿度 50%)下,红光氦氖激光器的波长是 0.632 81  $\mu\text{m}$ 。

如果激光器具有手动或自动气压补偿功能,应将其设置为零或关闭。

## 4.6 干涉仪

## 4.6.1 总则

干涉仪可以用来做如下变换:

——将角位移  $\Phi(t)$  转换为与干涉仪输出信号成比例的相位移  $\varphi_M(t)$ ;

——将角速度  $\Omega(t)$  转换为与干涉仪输出信号成比例的频移  $f_D(t)$ (多普勒频率)。

两种转换都可用零差或外差干涉仪及一个通道或两个通道的装置(见图 3~图 8 及图 10)实现。

本部分详细说明  $\Phi(t)$  到  $\varphi_M(t)$  的转换作为标准步骤,而  $\Omega(t)$  到  $f_D(t)$  的转换作为一种可选方案,具体描述见相关文献。

A 型和 B 型干涉仪的基本共同点在于测量光束检测平移位移的运动分量,这样,可使用测量线性振动的干涉仪装置。为了使用传统的干涉仪,将被测旋转运动量转化为典型的平移运动分量,具体做法是:A 型干涉仪利用后向反射器作为反光镜,B 型干涉仪将衍射光栅置于旋转测量台上。在后一种情况中,光学反射的衍射光栅置于气浮旋转台侧表面,以满足最大偏心率 2  $\mu\text{m}$  的要求。

对于方法 1A 和方法 1B(见图 3 和图 4)及方法 2A 和方法 2B(见图 5 和图 6),采用单个光电接收器的普通迈克尔逊干涉仪。其由单束测量光或两束测量光实现。

对于方法 3A 和方法 3B(见图 7 和图 8)则采用改进的迈克尔逊干涉仪,它具有正交信号输出,并带有两个光电接收器检测干涉信号光束。改进的迈克尔逊干涉仪的结构见图 9。1/4 波片将入射的线偏振光分成偏振方向相互垂直、相位差为 90°的两个测量光束。在与线偏振参考光束发生干涉后,两个正交偏振光束由适当的光学器件分开[例如:沃尔斯顿(Wollaston)棱镜或偏振分光镜],并由两个光电二极管探测。

改进的迈克尔逊干涉仪的两路输出幅值的偏移量应不超过  $\pm 5\%$ ,相对幅值偏差应不超过  $\pm 5\%$ ,与 90°名义角度的偏差应不超过  $\pm 5^\circ$ 。为确保这些允差,要采用适当的方法调整两路干涉信号的偏移量、幅值大小及角度偏差。

当振动转角较大时,很难保证改进的迈克尔逊干涉仪两路输出信号的幅值偏差超过上述允差。为使其符合第 3 章中的测量不确定度的要求,至少在振动转角小于  $2 \times 10^{-2} \text{ rad}$  时要保证上述允差。当角位移较大时,允许增大允差。

示例:转角为  $2.5 \times 10^{-2} \text{ rad}$ (即:频率 1 Hz,角加速度幅值 1  $\text{rad/s}^2$ )时,偏移量和幅值相对偏差的允许误差可增大到  $\pm 10\%$ ,偏离 90°名义角度的允差可增大到  $\pm 20^\circ$ (见 10.2 注 1)。

上述允差对未对干涉仪正交条纹信号进行修正的情况有效,如果采用 Heydemann 所述的方法(见

文献[6])进行修正,允许更大一些的允差。

方法 1A、方法 1B、方法 2A、方法 2B、方法 3A 或方法 3B 中使用的(改进的)迈克尔逊干涉仪可用其他适当的干涉仪代替,如(改进的)马赫-泽德外差干涉仪。

A 型(见 4.6.2)或 B 型干涉仪(见 4.6.3)可以用一个光检测器检测干涉仪信号,其频率响应覆盖必需的带宽。所需最大带宽(频率  $f_{\max}$ )可由最大角速度幅值  $\Omega_{\max}$  计算:

$$f_{\max} = \frac{\Omega_{\max} R}{\Delta s} \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

$R$ ——有效半径(见 4.6.2 中 A 型干涉仪和 4.6.3 中 B 型干涉仪的定义);

$\Delta s$ ——干涉仪的位移量化间隔。

对于 A 型干涉仪,单光束装置中  $\Delta s = \lambda/2$ ,双光束装置中  $\Delta s = \lambda/4$ , $\lambda$  是激光波长。对于 B 型干涉仪,单测量光束装置  $\Delta s = g$ ,双光束装置中  $\Delta s = g/2$ , $g$  是光栅常数。

#### 4.6.2 A 型干涉仪(后向反射器干涉仪)

方法 1A 和方法 2A 采用带有后向反射器的迈克尔逊干涉仪,该后向反射器作为测量反射镜使用,光检测器用来检测干涉信号,其频率响应覆盖所需带宽(见 4.6.1)。为补偿干扰运动的影响,采用双光束装置(示例见图 3 和图 5),两个后向反射器在距离转轴  $R$  处对称安装(即移动  $180^\circ$ )。

激光器发出的激光束通过分光镜后分成两束,平行射向后向反射器。反射光彼此重合,相干的部分形成的光强变化由光电检测器转变为电信号(简单说来就是干涉信号)。

注:双光束装置不仅可以进行干扰(如地面振动)补偿,还使灵敏度加倍(量化间隔用  $\lambda/4$  替代  $\lambda/2$ )。后向反射器(代替平面镜)补偿(在一定范围,见附录 B)转动的倾斜影响。另外,干涉仪允许(在一定范围)横向干扰运动而不影响测量不确定度。

方法 3A 采用带后向反射器、测量反射镜、参考反射镜的正交干涉仪。如图 7 和图 9 所示的零差干涉仪,光源是稳定的单频激光器。激光束的直径由透镜组扩大,以减少光的发散。偏振激光束由分光镜分成参考光和测量光。参考光被后向反射器(参考反射镜)平移反射。由于两次经过  $\lambda/8$  波片,光程差变为  $\lambda/4$ 。同时,该反射光被分成两个偏振互相成直角的光(即圆偏振光)。测量光束被测量台面上的后向反射器平移反射,仍然保持线偏振状态。该线偏振测量光和圆偏振参考光重合。当通过与反射测量光偏振方向成  $45^\circ$  的沃尔斯顿棱镜,得到两束线偏振光,其偏振方向互相垂直。在空间中分离了两束光后,得到两个不同的干涉系统,彼此间有相移  $90^\circ$  的关系。两个光电探测器将光强强弱转换为电信号,显示为反映测量反射镜位移的正弦和余弦波。

#### 4.6.3 B 型干涉仪(衍射光栅干涉仪)

干涉仪(如迈克尔逊干涉仪)用衍射光栅作为测量反射镜,光检测器检测干涉信号的频带,其频响覆盖所需带宽(见 4.6.1)。

方法 1B 和方法 2B 采用带衍射光栅的改进型迈克尔逊干涉仪(见图 2、图 4 和图 6)。

用特殊衍射光栅干涉仪测量角加速度,角速度或角位移,该干涉仪基于高分辨率的光栅(例如以全息术制造的 2 400 线/毫米或 3 000 线/毫米正弦相位光栅,见参考文献[12]、[13])。光学反射光栅置于角振动激励器的气浮测量台上,环绕于旋转轴(见图 2)。由稳频的单频氦氖激光器发出的光分成两束平行光,以一级反射衍射角度(根据斜入射的光栅衍射公式)相对于旋转轴对称地射向光栅并以入射方向衍射返回。两束一级衍射光在光学装置中重合。当运动部分旋转时,光束产生一个数量相等、符号相反、与切线速度成比例的频率变化,因而与角速度也成比例。干涉光光强强度随着转动角度的正弦变化而变化。

方法 3B 采用带衍射光栅的零差正交干涉仪(见图 8)。

在单束测量光装置中,正交衍射光栅干涉仪的光束被分为参考光和测量光。测量光以一级反射衍射角度射向旋转轴承上的光栅并以入射方向衍射返回。两束一级衍射光在光学装置中重合。干涉光光

强强度随着转动角度的正弦变化而变化。

对于高精度要求(校准的相对不确定度小于 0.5%),对每一个衍射光栅盘测量台,光栅干涉仪都要进行一次校准,以精确测定位移量化间隔  $\Delta s$  和转角量化间隔  $\Delta\Phi$ (见第 7 章中的步骤)。

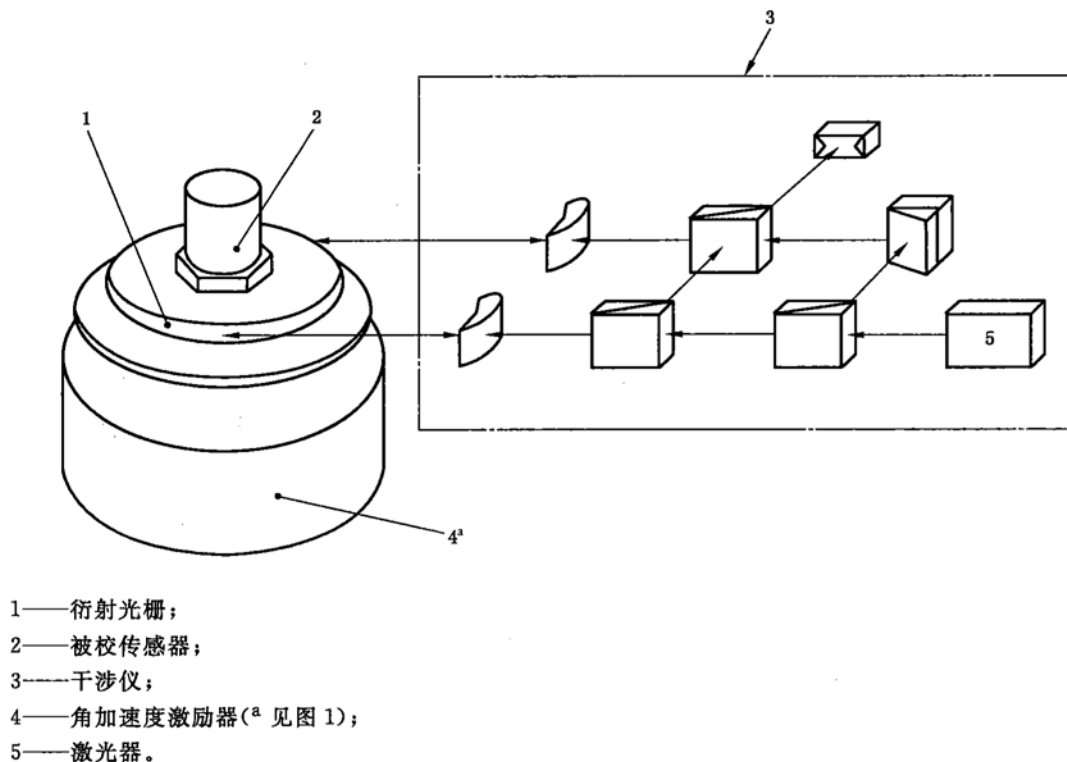


图 2 带衍射光栅干涉仪(零差法)的角加速度激励器

#### 4.7 干涉仪信号处理设备

##### 4.7.1 总则

信号处理设备用作解调光电探测器输出的相位调制电流或电压,以提取所需的振动参数(如正弦角振动的幅值和初相位)。方法 1A 和方法 1B(见 4.7.2)、方法 2A 和方法 2B(见 4.7.3)以及方法 3A 和方法 3B(见 4.7.4)中用到不同的处理技术。

##### 4.7.2 条纹计数法所用仪器(方法 1A 和方法 1B)

应满足下列特性要求:

- a) 频率范围:1 Hz 到最大所需频率(典型值为 20 MHz);
- b) 不确定度:不超过读数的 0.01%。

可用具有相同不确定度的频比计数器代替计数器。

##### 4.7.3 零点检测法所用仪器(方法 2A 和方法 2B)

应使用具有以下特性的可调带通滤波器或频谱分析仪:

- a) 频率范围:从不大于 800 Hz 到不小于 1.6 kHz;
- b) 带宽:小于中心频率的 12%;
- c) 滤波器斜率:不小于 24 dB/Oct;
- d) 信噪比:相对于最大信号,大于 70 dB;
- e) 动态范围:大于 60 dB。

用于零点检测的仪器(不用频谱分析仪)可用频率范围从 800 Hz 到 1.6 kHz,该范围应满足检测带通滤波器输出噪声的要求。

##### 4.7.4 正弦逼近法所用仪器(方法 3A 和方法 3B)

可采用带计算机接口的波形记录仪。该记录仪具有模数转换功能,并能存储干涉仪的两路正交输

出信号及角振动传感器的输出信号。它的幅值分辨率应足够高、采样频率应足够高及存储容量应足够大,以在校准的幅值范围内,满足第3章中规定的不确定度。通常用于角振动传感器输出的幅值分辨率应不小于10位,用于干涉仪正交输出信号的分辨率应不小于8位。用一个两通道的波形记录仪记录干涉仪输出信号,另一个波形记录仪(具有更高的分辨率和更低的采样频率)记录角振动传感器输出信号。在任何情况下,干涉仪及角振动传感器输出信号的数据转换都应同时开始、同时结束,其不确定度应该使得校准的测量不确定度符合第3章的规定。

当速度最大时,干涉仪输出信号的周期最短。在最短周期内,应保证有足够的采样点数(符合10.3的规定)。对于一个给定的角加速度幅值,当频率降低时,位移幅值会相应增加,这就要求记录仪具有更高的采样频率及更大的存储器。如不能达到上述要求,应减小角加速度幅值。

在振动频率为10 Hz、角加速度幅值为1 000 rad/s<sup>2</sup>的条件下校准角加速度计时,如果采样频率不小于20 kHz,则存储容量应不小于4 M字节。

应使用具有数据处理程序的计算机(针对方法3A和方法3B),程序应按照10.4中描述的计算过程编制。

#### 4.8 测量传感器输出的真有效值电压表

应满足下列特性要求:

- a) 频率范围:从不大于1 Hz到不小于1.6 kHz;
- b) 不确定度:不超过读数的0.1%。

用有效值乘以因子 $\sqrt{2}$ ,得到计算公式中的信号幅值(单峰值)。

对于方法1A和方法1B、方法2A和方法2B,应使用有效值电压表。对于方法3A和方法3B,则应按4.7.4使用一种特殊的电压测量仪器;也可以使用有效值电压表(可选)。

#### 4.9 失真度测量仪器

失真度测量仪应能够测量远小于1%~5%的总谐波失真,并且满足下列特性要求:

- a) 频率范围:从不大于1 Hz到不小于1.6 kHz,能够测量到5次谐波;
- b) 不确定度:失真度范围在0.5%~5%时,不超过读数的10%。

#### 4.10 示波器(可选)

可选用频率范围至少为1 Hz到高频端最小为2 MHz的示波器,以确定干涉仪的最佳特性,监测干涉仪信号及加速度计信号的波形。

#### 4.11 其他要求

被校准的传感器应该是刚性结构。在计算测量不确定度时,应考虑基座应变灵敏度、横向灵敏度以及角加速度计和放大器组成套组(若作为一个整体校准)的稳定性(参见附录A)。

所有影响测量结果的因素都应包含在不确定度计算中。

如果运动参数被标准装置(见4.6和4.7)和待校激光干涉仪同时检测,那么方法1B、方法2B和方法3B还可用于激光角振动测量仪的校准。如果两个测量系统检测运动的时间不同,那么旋转振动幅值必须十分稳定,以符合第3章中测量不确定度的要求。图11中给出激光角振动测量仪的校准装置实例。

### 5 环境条件

校准应在以下环境条件下进行:

- a) 室内温度:23 °C ± 3 °C;
- b) 相对湿度:最大75%。

应注意防止外部振动和噪声对测量结果的影响。

### 6 优选的角加速度及频率值

均匀覆盖角加速度计工作范围的角加速度(幅值或有效值)和频率应按以下系列值优先选用:

- a) 角加速度(方法 1A 和方法 1B、方法 3A 和方法 3B):  
 ——0.1 rad/s<sup>2</sup>、0.2 rad/s<sup>2</sup>、0.5 rad/s<sup>2</sup>、1 rad/s<sup>2</sup>、2 rad/s<sup>2</sup>、5 rad/s<sup>2</sup>、10 rad/s<sup>2</sup>、20 rad/s<sup>2</sup>、50 rad/s<sup>2</sup>、100 rad/s<sup>2</sup>、200 rad/s<sup>2</sup>、500 rad/s<sup>2</sup>、1 000 rad/s<sup>2</sup>(1 000 rad/s<sup>2</sup> 仅适用于灵敏度幅值的测量);
- b) 频率:  
 ——在 1 Hz~1.6 kHz 范围内,按 GB/T 3240—1982 标准的 1/3 倍频程频率系列进行选取(或由  $\omega=1\ 000\ \text{rad/s}$  推算出的角频率系列)。

7 六种测量方法的通用步骤

方法 1A、方法 1B、方法 2A、方法 2B、方法 3A 和方法 3B 共同之处是干涉仪(类型 A 或 B)检测的是距离角振动台圆形测量台面的旋转轴为  $R$ (等效半径)处的位移变化量。位移幅值  $\hat{s}$  由干涉仪测得,转角幅值由式(2)得到:

$$\hat{\phi} = \frac{\hat{s}}{R} \dots\dots\dots(2)$$

式中, $R$  是等效半径,其值可通过特殊干涉仪校准得到,该过程在校准传感器之前完成。在所有的情况下,对  $\hat{s}$  的测量是与亚微米量级范围内已知精确值的比较得到的。对于 A 型干涉仪,该值是既定的氦氖激光器的激光波长  $0.632\ 81\ \mu\text{m}$ 。对于 B 型干涉仪,该精确值是光栅常数  $g$ (刻线宽度,例如,每毫米 3 000 线的正弦相位衍射光栅的光栅常数是  $0.333\ 33\ \mu\text{m}$ ), $g$  准确已知(可以由光栅生产厂家测得)。

注:如果不准确知道光栅常数  $g$ ,那么与干涉信号周期相一致的角度量化间隔  $\Delta\phi$  由一种特殊的衍射光栅干涉仪校准测定(见[13]),然后用有位移量化间隔  $\Delta s$  的表达式  $\Delta s=R\Delta\phi$ (如图 8 所示的单光束 B 型干涉仪中的  $\Delta s=g$ )来约去半径  $R$ ,见式(2),这时,该式不用于计算  $\hat{\phi}$ 。

由式(2)得到的振动转角幅值  $\hat{\phi}$  适用于所有六种方法,可计算下列参数:

- a) 角位移传感器的灵敏度(幅值) $S_\phi$  由式(3)计算:

$$S_\phi = \frac{\hat{u}}{\hat{\phi}} \dots\dots\dots(3)$$

- b) 角速度传感器的灵敏度(幅值) $S_\Omega$  由式(4)和式(5)计算:

$$S_\Omega = \frac{\hat{u}}{\hat{\Omega}} \dots\dots\dots(4)$$

其中:

$$\hat{\Omega} = 2\pi \times f\hat{\phi} \dots\dots\dots(5)$$

- c) 角加速度计的灵敏度(幅值) $S_\alpha$  由式(6)和式(7)计算:

$$S_\alpha = \frac{\hat{u}}{\hat{\alpha}} \dots\dots\dots(6)$$

其中:

$$\hat{\alpha} = 4\pi^2 \times f^2\hat{\phi} \dots\dots\dots(7)$$

式中:

$\hat{u}$ ——角振动传感器输出  $u$  的幅值(例如角加速度计的输出电压);

$\hat{\Omega}$ ——角速度  $\Omega$  的幅值;

$\hat{\alpha}$ ——角加速度  $\alpha$  的幅值。

角振动传感器复灵敏度的相移只能由方法 3A 和方法 3B 测得,相移校准的通用步骤见 10。

8 条纹计数法(方法 1A 和方法 1B)

8.1 总则

本方法用于频率范围在 1 Hz~800 Hz 的灵敏度幅值校准。

注:在频率 800 Hz、角加速度幅值为  $1\ 000\ \text{rad/s}^2$  时,转角幅值是  $4 \times 10^{-5}\ \text{rad}$ 。如果后向反射器或衍射光栅放于离转轴 50 mm 处,相应的位移幅值是  $2\ \mu\text{m}$ (即衍射光栅在直径为 100 mm 圆盘的侧表面)。不用特殊方法减小量

化误差(见参考文献[1]和参考文献[11]),利用条纹计数法就可测量最小 2 μm 的位移幅值,其不确定度符合第 3 章的规定。如果减小量化误差(见参考文献[1]和参考文献[11]),方法 1A 和方法 1B 也可用于更小幅值的测量,可以在更高频率指定角加速度传感器幅值(如 1 000 rad/s<sup>2</sup>)的情况下进行校准。

对于 A 型和 B 型干涉仪(即方法 1A 和方法 1B),信号周期(如最大强度)数  $N$  由式(8)给出:

$$N = 4\hat{s}/\Delta s \quad \dots\dots\dots(8)$$

则:

$$\hat{s} = \frac{N}{4} \times \Delta s = \frac{f_t}{f} \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中:

$\hat{s}$ ——干涉仪测得的位移幅值,该值用于式(2)~式(7);

$\Delta s$ ——量化间隔,对两种 A 型干涉仪由式(10)和式(11)确定;对两种 B 型干涉仪由式(12)和式(13)确定;

$f$ ——角振动激励器的振动频率;

$f_t$ ——(平均的)干涉条纹频率。

代入  $\Delta s$  的相关表达式,即 A 型干涉仪的式(10)或式(11)、B 型干涉仪的式(12)或式(13),通过式(2)把位移转化为振动转角,得到振动转角的幅值  $\hat{\Phi}$ 。角速度幅值  $\hat{\Omega}$  和角加速度幅值  $\hat{\alpha}$  分别由式(5)和式(7)计算。角振动传感器的灵敏度由式(3)、式(4)和式(6)计算。

### 8.2 方法 1A 和方法 1B 的通用测试步骤

将激光干涉仪调整到最佳状态后(见 4.6),在所需角振动频率和角加速度幅值(见第 6 章)下,通过使用计数器(4.7.2)测量干涉条纹频率(使用图 3、图 4 的条纹计数法),或使用频比计数器(4.7.2)测量干涉条纹频率和振动频率的比值的方法,来确定角振动传感器的灵敏度。

### 8.3 测量结果的表达

见 B.2。

#### 8.3.1 方法 1A(后向反射器干涉仪)

由式(9)得到的干涉条纹频率计算位移幅值。对图 3 中所示的双光束装置用式(10):

$$\Delta s = \lambda/4 \quad \dots\dots\dots(10)$$

或对图 7 所示的单光束测量装置用式(11):

$$\Delta s = \lambda/2 \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中:

$\lambda = 0.632\ 81\ \mu\text{m}$ ,红光氦氖激光器的激光波长。

幅值  $\hat{\Phi}$  和振动转角  $\Phi$  由式(2)计算,角位移传感器的灵敏度幅值  $S_\phi$  由式(3)计算,角速度传感器的灵敏度幅值  $S_\omega$  由式(4)和式(5)计算,角加速度计灵敏度幅值  $S_a$  由式(6)和式(7)计算。

#### 8.3.2 方法 1B(衍射光栅干涉仪)

由式(9)得到的干涉条纹频率计算位移幅值。对图 4 中双光束装置用式(12):

$$\Delta s = g/2 \quad \dots\dots\dots(12)$$

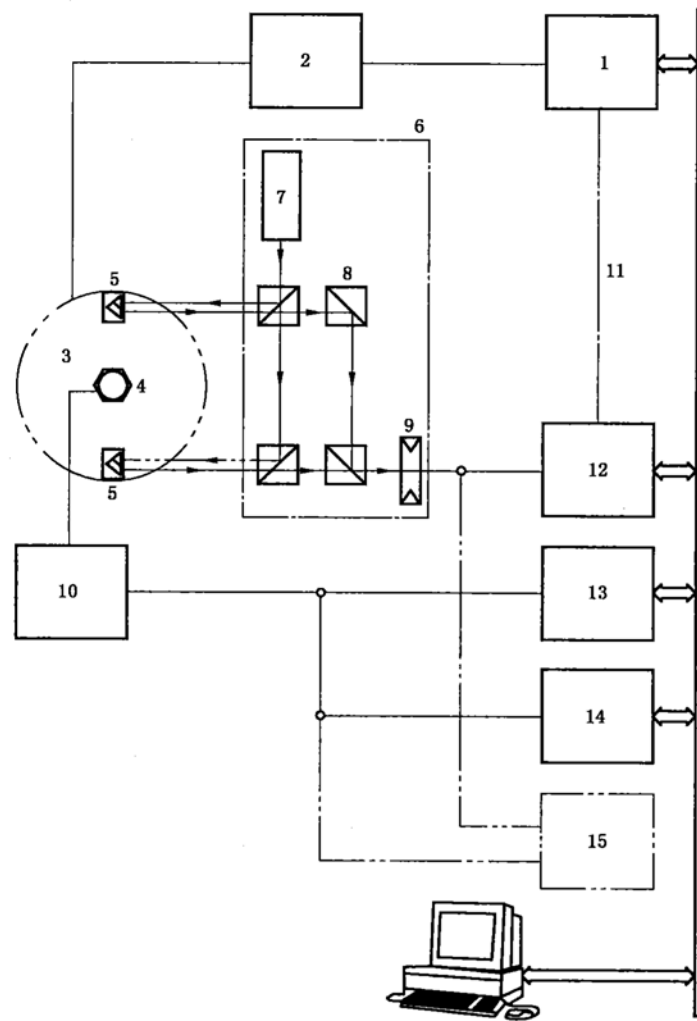
对图 8 中单光束装置用式(13):

$$\Delta s = g \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中:

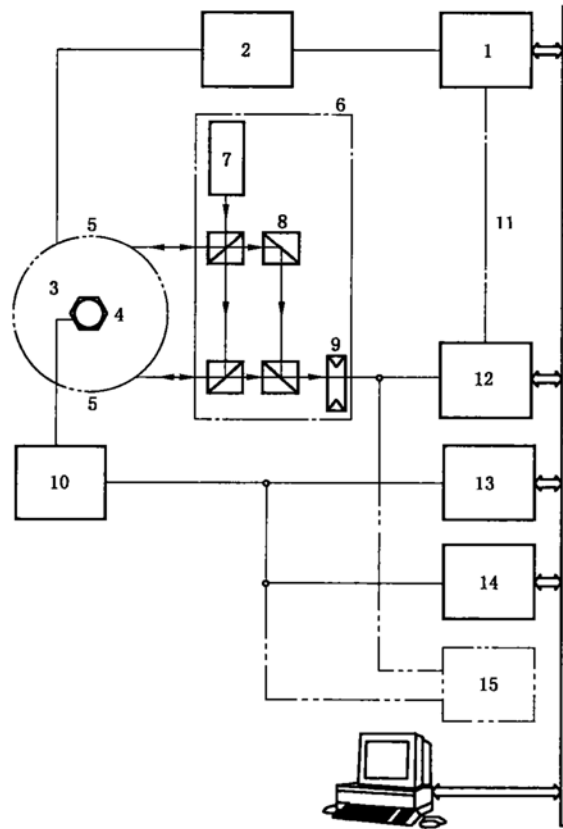
$g$ ——衍射光栅的光栅常数(线宽,即正弦相位衍射光栅的光栅常数为 0.333 33 μm 时每毫米有 3 000 线)。

振动转角  $\Phi$  的幅值  $\hat{\Phi}$  由式(2)计算,角位移传感器的灵敏度幅值  $S_\phi$  由式(3)计算,角速度传感器的灵敏度幅值  $S_\omega$  由式(4)和式(5)计算,角加速度计灵敏度幅值  $S_a$  由式(6)和式(7)计算。



- 1—频率发生器(4.2);
- 2—功率放大器(4.3);
- 3—角振动激励器(4.3);
- 4—角振动传感器;
- 5—后向反射器;
- 6—干涉仪(4.6);
- 7—激光器(4.5);
- 8—分光镜;
- 9—光电接收器;
- 10—放大器;
- 11—用于频比计数法(4.7.2);
- 12—计数器(或频比计数器)(4.7.2);
- 13—电压表(4.8);
- 14—失真度仪(4.9);
- 15—示波器(4.10)。

图3 方法1A的测量系统实例(反射式干涉仪,条纹计数法)



- |                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| 1——频率发生器(4.2);  | 9——光电接收器;               |
| 2——功率放大器(4.3);  | 10——放大器;                |
| 3——角振动激励器(4.3); | 11——用于频比计数法(4.7.2);     |
| 4——角振动传感器;      | 12——计数器(或频比计数器)(4.7.2); |
| 5——衍射光栅;        | 13——电压表(4.8);           |
| 6——干涉仪(4.6);    | 14——失真度仪(4.9);          |
| 7——激光器(4.5);    | 15——示波器(4.10)。          |
| 8——分光镜;         |                         |

图4 方法1B测量系统实例(衍射光栅干涉仪,条纹计数法)

## 9 最小点法(方法2A和方法2B)

### 9.1 总则

本方法适用于频率范围为800 Hz~1.6 kHz的角振动传感器灵敏度幅值校准。

本方法是用第一类一阶贝塞尔函数零点对应的自变量值来确定位移。

注:还有一种用第一类零阶贝塞尔函数零点对应的自变量值的等效方法来测量位移,该技术需要对参考镜的位置进行调制(见参考文献[2])。

考虑到光强变化频谱,调节角振动幅值使与振动频率相同的频率成分为零,用干涉仪测量位移幅值,按式(14)计算位移幅值:

$$\hat{s} = \hat{s}_n = x_n \times \frac{\Delta s}{2\pi} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

$\hat{s}$ ——激光干涉仪检测得到的位移幅值;

$x_n$ ——对应于表1中的贝塞尔函数零值点的自变量;

$\Delta s$ ——位移量化间隔。

详细说明见 A 型干涉仪对应式(10)和式(11),及 B 型干涉仪对应式(12)和式(13)。用式(2)得到振动转角幅值的对应值,用式(5)和式(7)计算分别得到角速度幅值  $\hat{\Omega}$  和角加速度幅值  $\hat{a}$ ,角振动传感器的灵敏度由式(3)、式(4)和式(6)计算得到。

表 1 对应于第一类一阶零点贝塞尔函数法的自变量  $x_n$  值

零点序号 $n$	$x_n$	零点序号 $n$	$x_n$	零点序号 $n$	$x_n$
0	0	11	35.332 30	21	66.753 23
1	3.831 70	12	38.474 77	22	69.895 07
2	7.015 59	13	41.617 09	23	73.036 90
3	10.173 46	14	44.759 32	24	76.178 70
4	13.323 69	15	47.901 46	25	79.320 49
5	16.470 63	16	51.043 53	26	82.462 27
6	19.615 86	17	54.185 56	27	85.604 02
7	22.760 09	18	57.327 53	28	88.745 77
8	25.903 68	19	60.469 45	29	91.887 52
9	29.046 83	20	63.611 36	30	95.029 24
10	32.189 68				

9.2 方法 2A 和方法 2B 的通用测试步骤

将激光干涉仪调整到最佳状态后(见 4.6),在所需角振动频率(见第 6 章)和角加速度幅值下确定传感器的灵敏度。通过带通滤波器(4.7.3)对光电接收器(4.6)检测到的信号进行滤波,中心频率等于角振动台的频率。滤波后的信号在特定振动幅值(即位移幅值  $\hat{s}_n$  和振动转角幅值  $\hat{\phi}_n$ )处有一系列最小值点,这些特定振动幅值和表 1 中的自变量  $x_n$  相对应。

设置校准频率,从零开始调节振动台振幅,使滤波后的光电检测信号达到一个最大值后返回到一个最小值。这个最小值是第一个最小点,该点对应的振幅为一规定的值,由激光干涉仪的类型和构造来决定(见 9.3)。

最小点法的测量系统见图 5 和图 6。

注 1: 加速度计的灵敏度也可以由第一类零阶贝塞尔函数得到,方法是调制参考镜的位置并使其振动频率比校准频率小,设定带通滤波器或频率分析仪的中心频率与参考反射镜的调制频率一致(见参考文献[3])。

注 2: 调制参考反射镜的位置也可改善第一类一阶贝塞尔函数最小点法(见参考文献[4])。

9.3 测量结果的表达

见 B.3。

9.3.1 方法 2A(后向反射器干涉仪)

由式(14)和相关的自变量值  $x_n$  计算得到位移幅值  $\hat{s} = \hat{s}_n$ 。

对图 3 中所示的双光束装置:

$$\Delta s = \lambda/4 \text{ [见式(10)]}$$

对图 7 所示的单光束测量装置:

$$\Delta s = \lambda/2 \text{ [见式(11)]}$$

式中,  $\lambda = 0.63281 \mu\text{m}$ , 红光氦氖激光器的激光波长。

注: 如果位移幅值  $\hat{s}_n$  采用表 2 中的所列的第  $n$  个极小点的位移值,就不用式(14)计算。

对于图 7 中的单光束装置,用式(2)将幅值  $\hat{s}$  转化为振动转角的幅值,与表 2 中所列  $\hat{s}_n$  相同:

$$\hat{s} = \hat{s}_n \text{ .....(15)}$$

对于图 3 中的双光束装置,用式(2)将幅值  $\hat{s}$  转化为振动转角的幅值,是表 2 中所列  $\hat{s}_n$  值的一半:

$$\hat{s} = \frac{\hat{s}_n}{2} \text{ .....(16)}$$

9.3.2 方法 2B(衍射光栅干涉仪)

由式(14)和关联幅值  $x_n$  计算得到位移幅值  $\hat{s} = \hat{s}_n$ 。

对图 6 中所示的双光束装置:

$$\Delta s = g/2 \quad [\text{见式(12)}]$$

对图 8 所示的单光束测量装置:

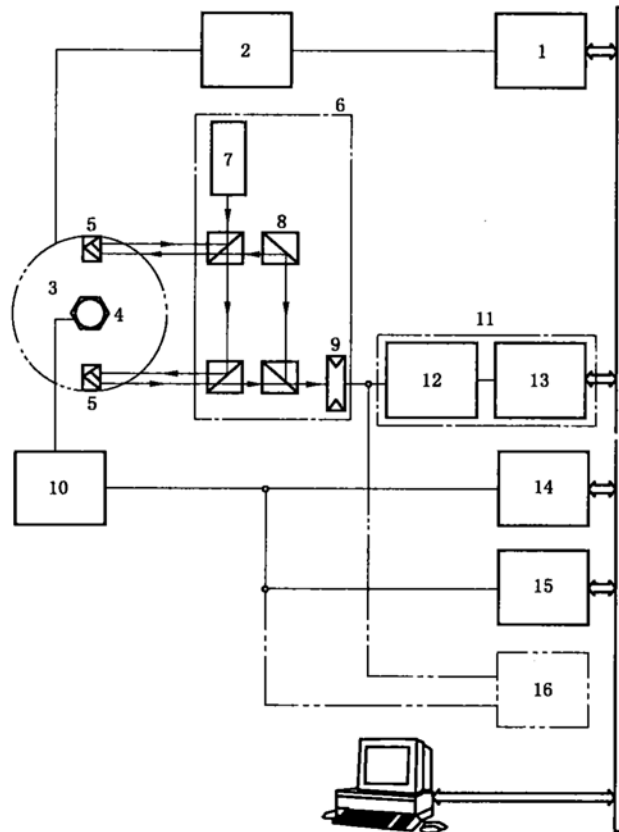
$$\Delta s = g \quad [\text{见式(13)}]$$

式中:

$g$ ——衍射光栅的光栅常数(线宽,即正弦相位衍射光栅的光栅常数为  $0.333\ 33\ \mu\text{m}$  时每毫米有 3 000 线)

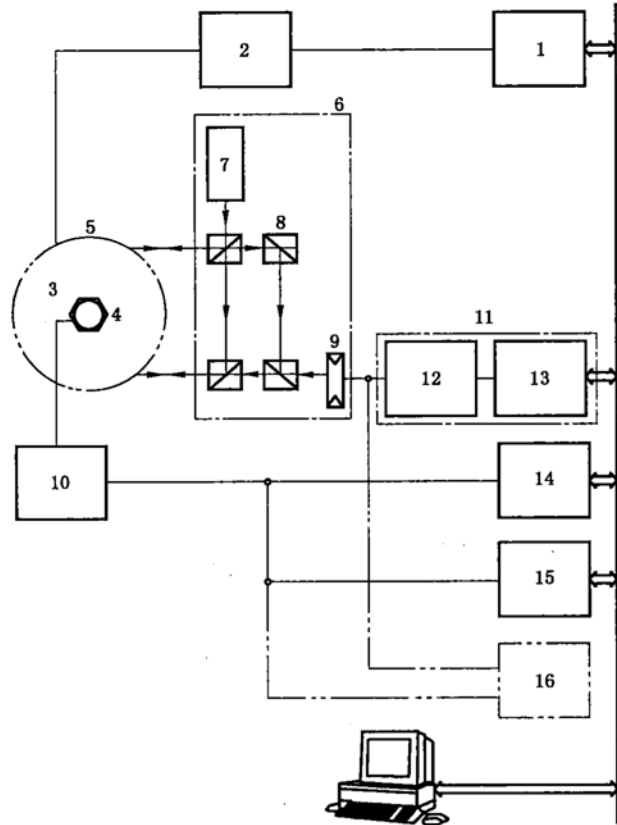
注:如果位移幅值  $\hat{s}_n$  采用表 2 中的所列的第  $n$  个极小点的位移值,就不用式(14)计算。

对于图 8 中的单光束装置,用式(2)将幅值  $\hat{s}$  转化为振动转角的幅值,与表 2 中所列  $\hat{s}_n$  相同[见式(15)];对于图 6 中的双光束装置,用式(2)将幅值  $\hat{s}$  被转化为振动转角的幅值,是表 2 中所列  $\hat{s}_n$  值的一半[见式(16)]。



- |                |                           |
|----------------|---------------------------|
| 1——频率发生器(4.2); | 9——光电接收器;                 |
| 2——功率放大器(4.3); | 10——放大器;                  |
| 3——角振动台(4.3);  | 11——频谱分析仪(4.7.3);         |
| 4——角振动传感器;     | 12——带通滤波器(调至振动频率)(4.7.3); |
| 5——后向反射器;      | 13——电压表;                  |
| 6——干涉仪(4.6);   | 14——电压表(4.8);             |
| 7——激光器(4.5);   | 15——失真度仪(4.9);            |
| 8——分光镜;        | 16——示波器(4.10)。            |

图 5 方法 2A 的测量系统实例(零差后向反射器干涉仪,最小点法)



- 1—频率发生器(4.2);
- 2—功率放大器(4.3);
- 3—角振动台(4.3);
- 4—角振动传感器;
- 5—衍射光栅;
- 6—干涉仪(4.6);
- 7—激光器(4.5);
- 8—分光镜;
- 9—光电接收器;
- 10—放大器;
- 11—频谱分析仪(4.7.3);
- 12—带通滤波器(调至振动频率)(4.7.3);
- 13—电压表;
- 14—电压表(4.8);
- 15—失真度仪(4.9);
- 16—示波器(4.10)。

图6 方法2B的测量系统实例(零差衍射光栅干涉仪,最小点法)

表2 最小点所对应的位移幅值( $\lambda=0.63281\ \mu\text{m}$ ),用以计算振动转角的幅值 $\hat{\phi}^a$ ,  
角速度的幅值 $\hat{\Omega}^b$ ,及角加速度的幅值 $\hat{\alpha}^c$

最小点序号 $n$	位移幅值 $\hat{s}_n$ $\mu\text{m}$	最小点序号 $n$	位移幅值 $\hat{s}_n$ $\mu\text{m}$	最小点序号 $n$	位移幅值 $\hat{s}_n$ $\mu\text{m}$
0	0	11	1.779 2	21	3.361 5
1	0.193 0	12	1.937 5	22	3.519 7
2	0.353 3	13	2.095 7	23	3.677 9
3	0.512 3	14	2.253 9	24	3.836 1
4	0.670 9	15	2.412 2	25	3.994 3
5	0.829 4				
6	0.987 8	16	2.570 4	26	4.152 5
7	1.146 1	17	2.728 6	27	4.310 7
8	1.304 4	18	2.886 8	28	4.468 9
9	1.462 7	19	3.045 0	29	4.627 1
10	1.621 0	20	3.203 3	30	4.785 3

a 见式(2);  
b 见式(5);  
c 见式(7)。

按式(2)计算振动转角  $\Phi$  的幅值  $\hat{\Phi}$ ,按式(3)计算角振动传感器的灵敏度  $S_\Phi$  (幅值),按式(4)和式(5)计算角速度传感器的灵敏度  $S_\Omega$  (幅值),按式(6)和式(7)计算角加速度计的灵敏度  $S_a$  (幅值)。

校准结果报告中的测量扩展不确定度的计算应符合附录 A 的要求。

## 10 正弦逼近法(方法 3A 和方法 3B)

### 10.1 总则

本方法适用于频率范围 1 Hz~1.6 kHz 的灵敏度幅值和(或)相移的校准。

注:当使用较宽频率范围的角振动台时,正弦逼近法也适用于频率在 1 Hz 以下及 1.6 kHz 以上的测量。

除用六种方法(见第 7 章)中公式得到校准结果外,方法 3A 和方法 3B 还可测量角振动传感器复灵敏度的相移。

振动转角的初相位  $\varphi_\Phi$  用式(17)给出的位移  $\hat{s}$  的初相位描述:

$$\varphi_\Phi = \varphi_s \quad \dots\dots\dots (17)$$

利用激光干涉仪测得  $\varphi_s$  的值,由式(18)计算角速度  $\Omega$  的初相位幅值  $\varphi_\Omega$ :

$$\varphi_\Omega = \varphi_\Phi - \pi/2 \quad \dots\dots\dots (18)$$

由式(19)计算角加速度  $a$  的初相位  $\varphi_a$ :

$$\varphi_a = \varphi_\Phi - \pi \quad \dots\dots\dots (19)$$

由式(20)计算角位移传感器的相移  $\Delta\varphi_\Phi$  为:

$$\Delta\varphi_\Phi = \varphi_a - \varphi_\Phi \quad \dots\dots\dots (20)$$

由式(21)计算角速度传感器的相移为:

$$\Delta\varphi_\Omega = \varphi_a - \varphi_\Omega \quad \dots\dots\dots (21)$$

由式(22)计算角加速度计的相移为:

$$\Delta\varphi_a = \varphi_a - \varphi_a \quad \dots\dots\dots (22)$$

在式(20)、式(21)和式(22)中,  $\varphi_a$  是被校传感器输出的初相位。

### 10.2 方法 3A 和方法 3B 的通用测试步骤

见 B.4。

按照图 7、图 8 和图 9 进行设备的安装。

调节激光干涉仪(见图 7 和图 8 示例),使其输出为两路相位正交的信号  $u_1$  和  $u_2$ ,其允差满足 4.6 的规定。

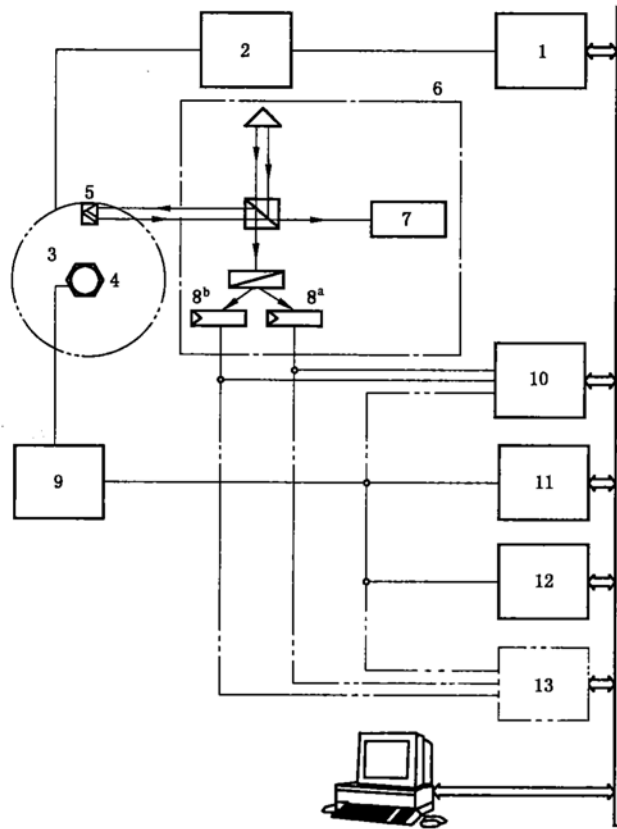
调整干涉仪(4.6)到最佳工作状态后,在规定的振动频率和振幅(见第 6 章)下,进行角振动传感器灵敏度幅值和相移的测量。

对传感器施加正弦振动。其位移幅值应该足够大,以使干涉仪输出至少有一个完整的明暗条纹。

注 1:正如 8.1 的注解的所述,当位移幅值不大于 0.5  $\mu\text{m}$  时,满足 4.6 规定允差的正交输出信号包含多种干扰因素,其综合影响可能会引起灵敏度幅值测量的最大误差不小于 0.3%,相移测量的最大误差不小于 0.3°。按照比 4.6 更严格的允差进行调整(见参考文献[8]或者通过使用参考文献[9]所提供的修正程序),可以减小该项误差。

注 2:为了实现纳米级小位移振幅范围内的角振动传感器复灵敏度的幅值和相移的测量,可以将正弦逼近法与适宜的外差技术相结合,见参考文献[7]和参考文献[8]。它可以在推荐的适中角加速度幅值下进行高频校准。

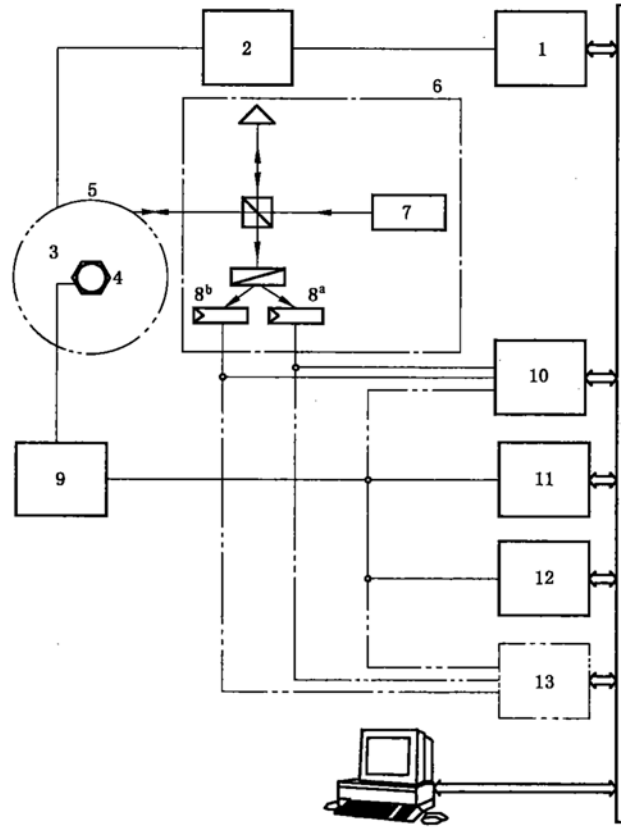
注 3:如果采用的正弦逼近法程序已满足第 3 章不确定度的要求,要想提高程序的抑制效率(即干扰信号的影响变小),可以对位移值或调相值进行加窗处理[12]。



- 1—频率发生器 (4.2);
- 2—功率放大器 (4.3);
- 3—角振动激励器 (4.3);
- 4—角振动传感器;
- 5—后向反射器;
- 6—干涉仪 (4.6);
- 7—激光器(4.5);
- 8—光电接收器;

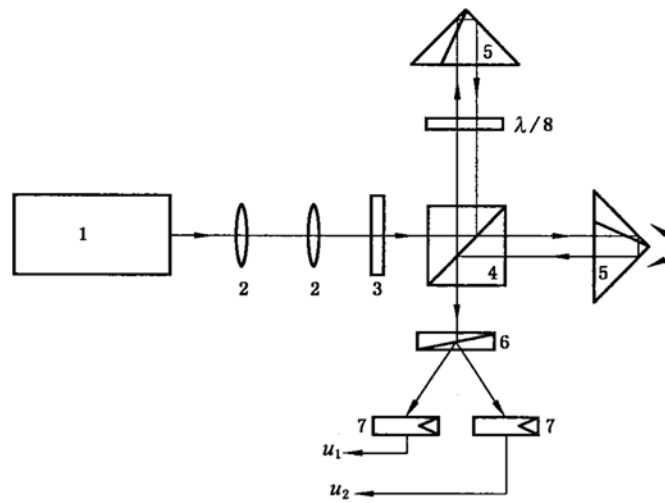
- 9—放大器;
- 10—数字波形记录仪(4.7.4);
- 11—电压表(4.8);
- 12—失真度仪(4.9);
- 13—示波器 (4.10)。
- <sup>a</sup> 0°相移;
- <sup>b</sup> 90°相移。

图7 方法3A测量系统实例(零差后向反射器干涉仪,正弦逼近法)



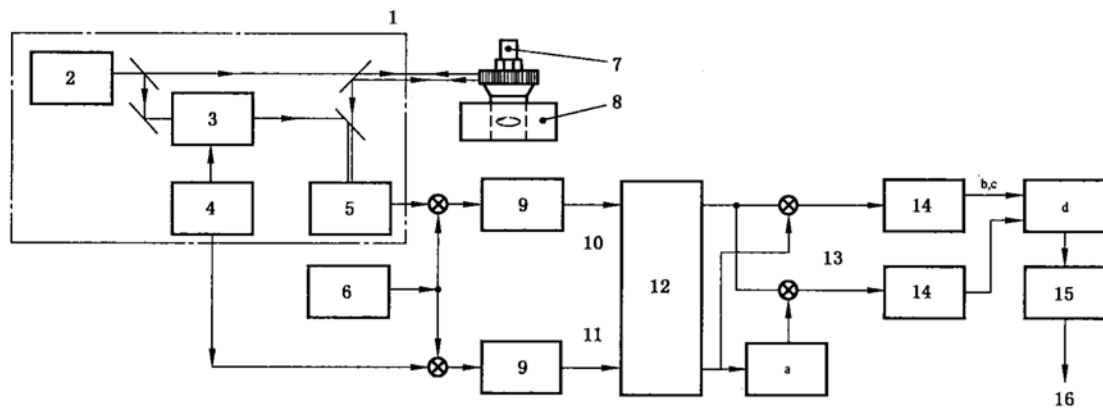
- |                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| 1—频率发生器 (4.2);  | 9—放大器;               |
| 2—功率放大器 (4.3);  | 10—数字波形记录仪(4.7.4);   |
| 3—角振动激励器 (4.3); | 11—电压表(4.8);         |
| 4—角振动传感器;       | 12—失真度仪(4.9);        |
| 5—衍射光栅;         | 13—示波器 (4.10)。       |
| 6—干涉仪(4.6);     | a <sup>0</sup> °相移;  |
| 7—激光器(4.5);     | b <sup>90</sup> °相移。 |
| 8—光电接收器;        |                      |

图 8 方法 3B 测量系统实例(零差衍射光栅干涉仪,正弦逼近法)



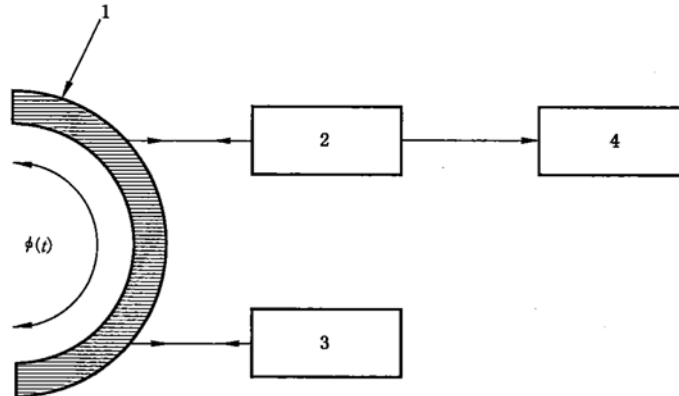
- |         |            |
|---------|------------|
| 1——激光器； | 5——后向反射器；  |
| 2——准直镜； | 6——沃尔斯顿棱镜； |
| 3——偏振片； | 7——光电接收器。  |
| 4——分光镜； |            |

图 9 带后向反射器和正交输出的改进迈克尔逊干涉仪



- |                   |                             |
|-------------------|-----------------------------|
| 1——干涉仪；           | 12——瞬态记录仪；                  |
| 2——激光器；           | 13——正交信号混频；                 |
| 3——Bragg 盒；       | 14——数字滤波；                   |
| 4——晶振；            | 15——算法；                     |
| 5——光电接收器；         | 16——测量结果(振动和冲击参数)。          |
| 6——同步信号发生器；       | a 90°；                      |
| 7——角加速度计；         | b $y(t_i)$ ；                |
| 8——角加速度激励器(空气轴承)； | c $z(t_i)$ ；                |
| 9——低通滤波器；         | d $\arctan y(t_i)/z(t_i)$ 。 |
| 10——测量信号；         |                             |
| 11——参考信号；         |                             |

图 10 方法 3B 使用外差干涉仪的测量系统示例  
(带有衍射光栅, 频率变换, 瞬态记录及数字信号处理的马赫-泽德外差干涉仪)



- 1—衍射光栅；
- 2—干涉仪(标准)；
- 3—被校激光角振动测量仪；
- 4—数据处理系统。

图 11 激光角振动测量仪的校准示例

这里用方法 B, 衍射光栅干涉仪使用一个 2 400 线/毫米的正弦光栅, 位于圆盘的侧表面, 构成直径为 100 mm 的测量台。

10.3 数据采集

应该设置低通滤波器和高通滤波器(如使用)的截止频率, 将低通、高通滤波对校准结果的干扰影响控制在允差范围以内(见参考文献[5])。为满足奈奎斯特(Nyquist)定律, 采样频率的设置应使最高频率小于采样频率的一半。

可采用与干涉仪输出信号模数转换速率相同的或较低的采样频率, 完成角振动传感器输出电压信号的模数转换。三路信号的采样应该同时开始、同时结束, 并且至少保证其中干涉仪的两路输出信号采用同一系统时钟进行同步采样。

应在  $t_0 < t < t_0 + T_{\text{Meas}}$  测量周期内, 对正交信号进行等间隔采样。在  $t_0 < t < t_0 + T_{\text{Meas}}$  内采样得到的  $\{u_1(t_i)\}$  和  $\{u_2(t_i)\}$  两路测量值序列, 其采样间隔  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$  为常数。

角振动传感器输出值的采样序列为  $\{u(t_i)\}$ 。

将数据传送到计算机的存储器。

10.4 数据处理

10.4.1 通过下列步骤计算出角振动传感器灵敏度的幅值和相移。

10.4.2 利用采样得到的干涉仪输出值  $\{u_1(t_i)\}$  和  $\{u_2(t_i)\}$ , 由式(23)计算调相值序列  $\{\varphi_{\text{Mod}}(t_i)\}$  :

$$\varphi_{\text{Mod}}(t_i) = \arctan \frac{u_2(t_i)}{u_1(t_i)} + n\pi \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中:

$n$ —0, 1, 2, ……。

应适当选择  $n$  项中的整数  $n$ , 以使调相值序列  $\{\varphi_{\text{Mod}}(t_i)\}$  连续。用于整数  $n$  计算的程序见参考文献[10]。

用式(24)计算位移值序列  $\{s(t_i)\}$  :

$$s(t_i) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_{\text{Mod}}(t_i) \quad \dots\dots\dots (24)$$

10.4.3 使用最小二乘法, 通过解算具有 A、B、C 三个未知数的  $N+1$  个方程, 使其逼近所获得的位移序列, 如式(25)所示。

$$s(t_i) = A \cos \omega t_i - B \sin \omega t_i + C \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:

$i=0,1,2,\dots,N;$

$A=\hat{s}\cos\varphi_s;$

$B=\hat{s}\sin\varphi_s;$

$C$ ——常数;

$\omega$ ——振动角频率,  $\omega=2\pi f;$

$\varphi_s$ ——位移的初相位角;

$N+1$ ——在 10.3 给出的测量周期内,同步采样得到的采样点数。

在“正弦逼近法”求得的参数值中,不需要使用参数  $C$ 。

10.4.4 用正弦逼近法求得的参数值  $A$  和  $B$ ,用式(26)和式(27)计算位移幅值  $\hat{s}$  和位移初相位角  $\varphi_s$ :

$$\hat{s}=\sqrt{A^2+B^2} \quad \dots\dots\dots(26)$$

$$\varphi_s=\arctan\frac{B}{A} \quad \dots\dots\dots(27)$$

10.4.5 用式(2)和式(17)由  $\hat{s}$  和  $\varphi_s$  计算幅值  $\hat{\Phi}$  和初相角  $\varphi_\Phi$ 。

如果被校的是角速度传感器,由  $\hat{\Phi}$  和  $\varphi_\Phi$  用式(5)和式(18)计算角速度的幅值  $\hat{\Omega}$  和初相位  $\varphi_\Omega$ 。

如果被校的是角加速度计,由  $\hat{\Phi}$  和  $\varphi_\Phi$  用式(7)和式(19)计算角加速度的幅值  $\hat{a}$  和初相位  $\varphi_a$ 。

10.4.6 按照 10.4.3 的正弦逼近法逼近采样得到的角振动传感器输出信号序列  $\{u(t_i)\}$ 。角振动传感器的输出为  $u$ ,待解的  $N+1$  个方程为:

$$\{u(t_i)\}=A_u\cos\omega t_i-B_u\sin\omega t_i+C_u \quad \dots\dots\dots(28)$$

式中:

$A_u=\hat{u}\cos\varphi_u;$

$B_u=\hat{u}\sin\varphi_u;$

$C_u$ ——常数;

$\hat{u}$ ——角振动传感器输出信号的幅值;

$\varphi_u$ ——角振动传感器输出信号的初相位角。

由正弦逼近法得到的参数值  $A_u$  和  $B_u$ ,用式(29)和式(30)计算角振动传感器的幅值  $\hat{u}$  和初相角  $\varphi_u$ :

$$\hat{u}=\sqrt{A_u^2+B_u^2} \quad \dots\dots\dots(29)$$

$$\varphi_u=\arctan\frac{B_u}{A_u} \quad \dots\dots\dots(30)$$

如果被校的是角位移传感器,由 10.4.6 得到的  $\hat{u}$  和  $\varphi_u$ ,由 10.4.5 得到的  $\hat{\Phi}$  和  $\varphi_\Phi$ ,用式(3)和式(20)计算其复灵敏度的幅值  $S_\Phi$  和相移  $\Delta\varphi_\Phi$ 。

如果被校的是角速度传感器,由 10.4.6 得到的  $\hat{u}$  和  $\varphi_u$ ,由 10.4.5 得到的  $\hat{\Phi}$  和  $\varphi_\Phi$ ,用式(4)和式(21)计算其复灵敏度的幅值  $S_\Omega$  和相移  $\Delta\varphi_\Omega$ 。

如果被校的是角加速度计,由 10.4.6 得到的  $\hat{u}$  和  $\varphi_u$ ,由 10.4.5 得到的  $\hat{\Phi}$  和  $\varphi_\Phi$ ,用式(6)和式(22)计算其复灵敏度的幅值  $S_a$  和相移  $\Delta\varphi_a$ 。

当报告校准结果时,需要根据附录 A 计算校准中的扩展不确定度。在 A.1.1、A.1.2、A.1.3.1 和 A.2.1 中,复灵敏度的幅值表示  $S$ 。

## 11 校准结果报告

在校准结果报告中,除校准方法以外,至少应对下列条件和特性参数给予说明:

a) 环境条件:

——角振动传感器的温度;

——环境空气温度。

- b) 安装方法：
  - 安装表面的材料；
  - 安装力矩(如果角振动传感器是螺栓安装)；
  - 油或油脂(如果使用)；
  - 电缆的固定；
  - 方向(垂直或水平)。
- c) 放大器的所有设置(如果可调),例如：
  - 增益；
  - 滤波器的截止频率。
- d) 校准结果：
  - 校准频率和幅值的量值；
  - 灵敏度的量值[幅值、相移(如果测量了相移)]；
  - 测量的扩展不确定度,如果包含因子  $k$  不等于 2,给出  $k$  的值。

附录 A  
(规范性附录)

振动和冲击传感器激光干涉法角振动绝对校准的不确定度分量

A.1 在选定校准频率、振幅、设置放大器增益和截止频率的条件下,灵敏度(幅值)测量的相对扩展不确定度和相移测量的扩展不确定度的计算

A.1.1 采用方法 1A 和方法 1B 时  $U_{rel}(S)$  的计算

在选定校准频率、振幅、设置放大器增益和截止频率的条件下,灵敏度(幅值)测量的相对扩展不确定度  $U_{rel}(S)$  的计算,应根据 GB/T 20485.1—2008,按照以下公式进行:

$$U_{rel}(S) = k u_{c,rel}(S) \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$u_{c,rel}(S) = \frac{u_c(S)}{S} = \frac{1}{S} \sqrt{\sum_i u_i^2(S)} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中包含因子  $k=2$  (见表 A.1)。

表 A.1 采用方法 1A 和方法 1B 时的不确定度分量

<i>i</i>	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源 <sup>a</sup>	不确定度分量大小 $u_i(y)$
1	$u(\hat{u}_V)$	角振动传感器输出电压的测量(电压表)	$u_1(S)$
2	$u(\hat{u}_D)$	总谐波失真对角振动传感器输出电压测量的影响	$u_2(S)$
3	$u(\hat{u}_T)$	横向和摇摆运动对角振动传感器输出电压测量的影响(横向灵敏度)	$u_3(S)$
4	$u(\hat{s}_Q)$	位移量化对位移测量的影响	$u_4(S)$
5	$u(\hat{s}_H)$	触发滞后对位移测量的影响	$u_5(S)$
6	$u(\hat{s}_F)$	滤波对位移测量的影响(频带带宽限制)	$u_6(S)$
7	$u(\hat{s}_{VD})$	电压扰动对位移测量的影响(例如:光电测量回路中的随机噪声)	$u_7(S)$
8	$u(\hat{s}_{MD})$	干扰运动对位移测量的影响(例如:总谐波失真;角振动传感器安装参考面和激光干涉仪测量点之间的相对运动)	$u_8(S)$
9	$u(\hat{s}_{PD})$	相位扰动对位移测量的影响(例如:干涉仪信号的相位噪声)	$u_9(S)$
10	$u(\hat{\Phi}_{Int})$	激光干涉仪的功能(将线位移转换为角位移)	$u_{10}(S)$
11	$u(f_{FG})$	振动频率的测量(频率发生器和显示器)	$u_{11}(S)$
12	$u(S_{RE})$	对灵敏度测量的其他影响(例如:重复测量的随机影响;算术平均值的实验标准偏差)	$u_{12}(S)$

<sup>a</sup> 不确定度的来源可以有与上表不同的分类及数量,应当考虑到所有对测量结果有显著影响的分量。

A.1.2 采用方法 2A 和方法 2B 时  $U_{rel}(S)$  的计算

采用 A.1.1 中所述的公式计算,但其不确定度分量如表 A.2 所示。

表 A.2 采用方法 2A 和方法 2B 时的不确定度分量

$i$	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源 <sup>a</sup>	不确定度分量大小 $u_i(y)$
1	$u(\hat{u}_V)$	角振动传感器输出电压的测量(电压表)	$u_1(S)$
2	$u(\hat{u}_D)$	总谐波失真对角振动传感器输出电压测量的影响	$u_2(S)$
3	$u(\hat{u}_T)$	横向和摇摆运动对角振动传感器输出电压测量的影响(横向灵敏度)	$u_3(S)$
4	$u(\hat{s}_Z)$	最小点分辨率对位移测量的影响	$u_4(S)$
5	$u(\hat{s}_{VD})$	电压扰动对位移测量的影响(例如:交流声和噪声)	$u_5(S)$
6	$u(\hat{s}_{MD})$	干扰运动对位移测量的影响(例如:角振动传感器安装参考面和激光干涉仪测量点之间的相对运动)	$u_6(S)$
7	$u(\hat{\Phi}_{Int})$	激光干涉仪的功能(将线位移转换为角位移)	$u_7(S)$
8	$u(f_{FG})$	振动频率的测量(频率发生器和显示器)	$u_8(S)$
9	$u(S_{RE})$	对灵敏度测量的其他影响(例如:重复测量的随机影响;算术平均值的实验标准偏差)	$u_9(S)$

<sup>a</sup> 不确定度的来源可以有与上表不同的分类及数量,应当考虑到所有对测量结果有显著影响的分量。

A.1.3 采用方法 3A 和方法 3B 时  $U_{rel}(S)$  和  $U(\Delta\varphi)$  的计算A.1.3.1  $U_{rel}(S)$  的计算

采用 A.1.1 中所述的方法来计算,但其不确定度分量如表 A.3 所示。

表 A.3 采用方法 3A 和方法 3B 时的不确定度分量

$i$	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源 <sup>a</sup>	不确定度分量大小 $u_i(y)$
1	$u(\hat{u}_V)$	角振动传感器输出电压的测量(波形记录仪;如:模数转换器的分辨力)	$u_1(S)$
2	$u(\hat{u}_F)$	电压滤波对角振动传感器输出幅值测量的影响(频带带宽限制)	$u_2(S)$
3	$u(\hat{u}_D)$	干扰电压对角振动传感器输出电压测量的影响(例如:交流声和噪声)	$u_3(S)$
4	$u(\hat{u}_T)$	横向、摇摆和弯曲角加速度对角加速度输出电压测量的影响(横向灵敏度)	$u_4(S)$
5	$u(\hat{\varphi}_{M,Q})$	激光干涉仪正交输出信号扰动对位移幅值测量的影响(例如:偏置,电压幅值的偏差,信号正交性的偏差)	$u_5(S)$
6	$u(\hat{\varphi}_{M,F})$	光电信号滤波对位移幅值测量的影响(频带带宽限制)	$u_6(S)$
7	$u(\hat{\varphi}_{M,VD})$	电压扰动对位移幅值测量的影响(例如:光电测量链的随机噪声)	$u_7(S)$
8	$u(\hat{\varphi}_{M,MD})$	干扰运动对位移幅值测量的影响(例如:漂移;角振动传感器安装参考面和激光干涉仪测量点之间的相对运动)	$u_8(S)$

表 A.3 (续)

<i>i</i>	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源 <sup>a</sup>	不确定度分量大小 $u_i(y)$
9	$u(\hat{\varphi}_{M,PD})$	相位扰动对位移幅值测量的影响(如:光电信号的相位噪声)	$u_9(S)$
10	$u(\hat{\Phi}_{Int})$	激光干涉仪的功能(将线位移转化为角位移)	$u_{10}(S)$
11	$u(f_{FG})$	振动频率的测量(频率发生器和显示器)	$u_{11}(S)$
12	$u(S_{RE})$	对灵敏度测量的其他影响(例如:重复测量的随机影响;算术平均值的实验标准偏差)	$u_{12}(S)$

<sup>a</sup> 不确定度的来源可以有与上表不同的分类及数量,应当考虑到所有对测量结果有显著影响的分量。

A.1.3.2  $U(\Delta\varphi)$ 的计算

在选定校准频率、振幅、设置放大器增益和截止频率的条件下,灵敏度相移测量的相对扩展不确定度  $U(\Delta\varphi)$  的计算,应根据 GB/T 20485.1—2008,按照以下公式进行:

$$U(\Delta\varphi) = k u_c(\Delta\varphi) \dots\dots\dots (A.3)$$

$$u_c(\Delta\varphi) = \sqrt{\sum_i u_i^2(\Delta\varphi)} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中包含因子  $k=2$  (见表 A.4)。

表 A.4 相移  $U(\Delta\varphi)$  的测量不确定度分量

<i>i</i>	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源 <sup>a</sup>	不确定度分量大小 $u_i(y)$
1	$u(\varphi_{u,V})$	角振动传感器输出电压相位测量(波形记录仪;如:模数转换器的分辨力)	$u_1(\Delta\varphi)$
2	$u(\varphi_{u,F})$	电压滤波对角振动传感器输出电压相位测量的影响(频带带宽限制)	$u_2(\Delta\varphi)$
3	$u(\varphi_{u,D})$	电压扰动对角振动传感器输出电压相位测量的影响(例如:交流声和噪声)	$u_3(\Delta\varphi)$
4	$u(\varphi_{u,T})$	横向和摇摆运动对角振动传感器输出电压相位测量的影响(横向灵敏度)	$u_4(\Delta\varphi)$
5	$u(\varphi_{s,Q})$	激光干涉仪正交输出信号扰动对位移相位测量的影响(如:偏移、电压幅值的偏差、与 90° 名义角度差的偏差)	$u_5(\Delta\varphi)$
6	$u(\varphi_{s,F})$	激光干涉仪信号滤波对位移相位测量的影响(频带带宽限制)	$u_6(\Delta\varphi)$
7	$u(\varphi_{s,VD})$	电压扰动对位移相位测量的影响(例如:光电测量链的随机噪声)	$u_7(\Delta\varphi)$
8	$u(\varphi_{s,MD})$	干扰运动对位移相位测量的影响(例如:漂移;角振动传感器安装参考面和激光干涉仪测量点之间的相对运动)	$u_8(\Delta\varphi)$
9	$u(\varphi_{s,PD})$	相位扰动对位移相位测量的影响(例如:激光干涉仪信号的相位噪声)	$u_9(\Delta\varphi)$
10	$u(\varphi_{\Phi,Int})$	激光干涉仪的功能性(将线位移转化为角位移)	$u_{10}(\Delta\varphi)$
11	$u(\Delta\varphi_{RE})$	对灵敏度测量的其他影响(例如:重复测量的随机影响;算术平均值的实验标准偏差)	$u_{11}(\Delta\varphi)$

<sup>a</sup> 不确定度的来源可以有与上表不同的分类及数量,应当考虑到所有对测量结果有显著影响的分量。

**A.2 在整个频率和幅值范围内,灵敏度(幅值)测量的相对扩展不确定度和相移测量的扩展不确定度的计算**

**A.2.1  $U_{rel}(S_t)$ 的计算**

按照 A.1.1、A.1.2 或 A.1.3.1 计算的灵敏度(幅值)测量的相对扩展不确定度  $U_{rel}(S_t)$ ,只对选定的校准频率、幅值、设置的放大器增益和截止频率有效。对于在整个频率和幅值范围内进行的连续多点的校准过程,灵敏度(幅值)测量的相对扩展不确定度  $U_{rel}(S_t)$ 的计算,应按照以下公式进行:

$$U_{rel}(S_t) = k u_{c,rel}(S_t) \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

$$u_{c,rel}(S_t) = \frac{u_c(S_t)}{S} = \frac{1}{S} \sqrt{\sum_i u_i^2(S_t)} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

式中包含因子  $k=2$  (参照 GB/T 20485.1—2008,见表 A.5)。

**表 A.5 灵敏度(幅值) $U_{rel}(S_t)$ 测量的不确定度分量**

<i>i</i>	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源 <sup>a</sup>	不确定度分量大小 $u_i(y)$
1	$u(S)$	在校准频率、振幅、放大器增益设定的情况下,按照A.1.1、A.1.2 或 A.1.3.1 计算的灵敏度不确定度	$u_1(S_t)$
2	$u(e_{T,A})$	参考放大器跟踪(不同增益设置时的增益偏差)	$u_2(S_t)$
3	$u(e_{L,I,A})$	与参考放大器恒定的幅值-频率特性的偏差	$u_3(S_t)$
4	$u(e_{L,I,P})$	与参考角振动传感器恒定的幅值-频率特性的偏差	$u_4(S_t)$
5	$u(e_{I,A,A})$	振幅对参考放大器增益的影响	$u_5(S_t)$
6	$u(e_{L,A,P})$	振幅对参考角振动传感器灵敏度(幅值)的影响	$u_6(S_t)$
7	$u(e_{I,A})$	参考放大器增益的稳定性、源阻抗对增益的影响	$u_7(S_t)$
8	$u(e_{I,P})$	参考角振动传感器灵敏度(幅值)的稳定性	$u_8(S_t)$
9	$u(e_{E,A})$	环境对参考放大器增益的影响	$u_9(S_t)$
10	$u(e_{E,P})$	环境对参考角振动传感器灵敏度(幅值)的影响	$u_{10}(S_t)$

<sup>a</sup> 不确定度的来源可以有与上表不同的分类及数量,应当考虑到所有对测量结果有显著影响的分量。

**A.2.2  $U(\Delta\varphi_t)$ 的计算**

按照 A.1.3.2 计算的复灵敏度相移测量的扩展不确定度  $U(\Delta\varphi_t)$ ,只对选定的校准频率、幅值、设置的放大器增益和截止频率有效。对于在整个频率和幅值范围内进行的连续多点的校准过程,灵敏度相移测量的扩展不确定度  $U(\Delta\varphi_t)$ 的计算,应按照以下公式进行:

$$U(\Delta\varphi_t) = k u_c(\Delta\varphi_t) \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

$$u_c(\Delta\varphi_t) = \sqrt{\sum_i u_i^2(\Delta\varphi_t)} \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中包含因子  $k=2$  (参照 GB/T 20485.1—2008,见表 A.6)。

**表 A.6 复灵敏度的相移 $U(\Delta\varphi_t)$ 测量的不确定度分量**

<i>i</i>	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源 <sup>a</sup>	不确定度分量大小 $u_i(y)$
1	$u(\Delta\varphi)$	在校准频率、振幅、放大器增益设定的情况下,按照A.1.3.2 计算的灵敏度相移不确定度	$u_1(\Delta\varphi_t)$
2	$u(e_{T,A}^*)$	参考放大器跟踪(不同增益设置时的相位偏差)	$u_2(\Delta\varphi_t)$

表 A.6 (续)

$i$	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源 <sup>a</sup>	不确定度分量大小 $u_i(y)$
3	$u(e_{L,f,A}^*)$	与参考放大器线性相位-频率线性特性的偏差	$u_3(\Delta\varphi_t)$
4	$u(e_{L,f,P}^*)$	与参考角振动传感器相位-频率线性特性的偏差	$u_4(\Delta\varphi_t)$
5	$u(e_{L,a,A}^*)$	振幅对参考放大器相移的影响	$u_5(\Delta\varphi_t)$
6	$u(e_{L,a,P}^*)$	振幅对参考角振动传感器相移的影响	$u_6(\Delta\varphi_t)$
7	$u(e_{I,A}^*)$	参考放大器相移的稳定性、源阻抗对相移的影响	$u_7(\Delta\varphi_t)$
8	$u(e_{I,P}^*)$	参考角振动传感器相移的稳定性	$u_8(\Delta\varphi_t)$
9	$u(e_{E,A}^*)$	环境对参考放大器相移的影响	$u_9(\Delta\varphi_t)$
10	$u(e_{E,P}^*)$	环境对参考角振动传感器灵敏度(幅值)的影响	$u_{10}(\Delta\varphi_t)$

<sup>a</sup> 不确定度的来源可以有与上表不同的分类及数量,应当考虑到所有对测量结果有显著影响的分量。

附录 B  
(规范性附录)

角位移  $\Phi$ 、角速度  $\Omega$ 、角加速度  $\alpha$  和角振动传感器的灵敏度  
(包括角位移传感器  $S_\phi$ 、角速度传感器  $S_\Omega$  和角加速度传感器  $S_\alpha$ ) 的计算公式

B.1 总则

依据 GB/T 3240—1982 和 GB/T 20485.1—2008, 振动和冲击传感器的复灵敏度由式(B.1)给出:

$$S = \hat{S} \exp(j\Delta\varphi) \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

其中,  $\hat{S}$  为幅值, 由式(B.2)给出:

$$\hat{S} = \frac{\hat{u}}{x} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

$\Delta\varphi$  是复灵敏度相对运动量  $x$  的相移, 由式(B.3)给出:

$$\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_x \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

$x$ ——代表角位移  $\Phi$ 、角速度  $\Omega$  或角加速度  $\alpha$  的运动量;

$x, \hat{\Phi}, \hat{\Omega}$  和  $\hat{\alpha}$  则表示这些量值的幅值;

$\hat{u}$ ——角振动传感器的输出幅值(如角加速度计的输出电压)。

式(B.2)和式(B.3)用于角位移传感器的幅值和相移计算时具体表示为式(B.4)和式(B.5):

$$\hat{S}_\phi = \frac{\hat{u}}{\hat{\Phi}} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

$$\Delta\varphi_\phi = \varphi_u - \varphi_\phi \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

用于角速度传感器时表示为式(B.6)和式(B.7):

$$\hat{S}_\Omega = \frac{\hat{u}}{\hat{\Omega}} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

$$\Delta\varphi_\Omega = \varphi_u - \varphi_\Omega \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

用于角加速度传感器时表示为式(B.8)和式(B.9):

$$\hat{S}_\alpha = \frac{\hat{u}}{\alpha} \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

$$\Delta\varphi_\alpha = \varphi_u - \varphi_\alpha \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

本部分由激光干涉仪测量该运动量值, 在 1A、1B、2A、2B、3A 和 3B 六种方法中直接得到的是角位移  $\Phi$ (即幅值  $\hat{\Phi}$ ), 在方法 3A 和方法 3B 中还得到了初相位  $\varphi_\phi$ 。 $\hat{\Phi}$  和  $\varphi_\phi$  由激光干涉仪获得, 角速度的幅值  $\hat{\Omega}$  和初相位  $\varphi_\Omega$  由式(B.10)和式(B.11)计算得到:

$$\hat{\Omega} = 2\pi \times f \hat{\Phi} \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

$$\varphi_\Omega = \varphi_\phi - \frac{\pi}{2} \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

角加速度的幅值  $\hat{\alpha}$  和初始相位  $\varphi_\alpha$  计算由式(B.12)和式(B.13)计算得到:

$$\hat{\alpha} = 4\pi^2 \times f^2 \hat{\Phi} \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

$$\varphi_\alpha = \varphi_\phi - \pi \quad \dots\dots\dots (B.13)$$

本部分中指定了两种类型的激光干涉仪, 均采用氦氖红光激光器作为光源, 其光谱的中心谱线波长为 0.632 81  $\mu\text{m}$ 。在 A 型激光干涉仪中(即后向反射器干涉仪), 对于图 3 和图 5 给出双测量光束的布局,  $\Delta s$  是与位移对应的条纹间隔由式(B.14)给出:

$$\Delta s = \lambda/4 \quad \dots\dots\dots (B.14)$$

对图 7 给出单束测量光束的布局,  $\Delta s$  由式(B. 15)给出:

$$\Delta s = \lambda/2 \quad \dots\dots\dots(\text{B. 15})$$

角振动激励器的测量表面在 1.6 kHz 以内的频率段应视为刚体, 因此其初始相位  $\varphi_s$  等同于  $\varphi_\phi$ , 即

$$\varphi_\phi = \varphi_s \quad \dots\dots\dots(\text{B. 16})$$

A 和 B 两类激光干涉仪均测量距离角振动激励器台面转轴 R(有效半径)处测量点的位移, 这一点上两者是共同的。通过激光干涉仪测得的位移值  $\hat{s}$ , 角位移幅值由式(B. 17)计算:

$$\hat{\Phi} = \frac{\hat{s}}{R} \quad \dots\dots\dots(\text{B. 17})$$

该位移由激光干涉仪测得, 其有效半径将对两种干涉仪分别给予说明。

对于 A 型激光干涉仪(即后向反射器干涉仪), 三类系统误差会影响振动转角的测量结果, 应计入。后向反射器干涉仪的基本特征是一个非线性的函数:

$$\hat{s} = R \sin \hat{\Phi} \quad \dots\dots\dots(\text{B. 18})$$

也就是由激光干涉仪获得的线位移幅值  $\hat{s}$ (即入射光束方向上的分量)和待测量的转角幅值之间是非线性的函数。对于  $\Phi \leq 3^\circ$  的小角度测量, 由式(B. 19)代替式(B. 18):

$$\hat{s} = R \cdot \hat{\Phi} \quad \dots\dots\dots(\text{B. 19})$$

该式与真值间存在一个小于 0.05% 的偏差。如果必要的话, 其修正值由式(B. 20)给出:

$$\sin \Phi \approx \Phi - \frac{\Phi^3}{3} \quad \dots\dots\dots(\text{B. 20})$$

如果激光干涉仪能够调整到两束入射光理想平行, 后向反射器的入射表面和运动台面的旋转轴与两束入射光组成的平面理想垂直, 则上式是成立的。由于光束路径与被测位移之间存在  $\cos \varphi$  因子的偏差(称作余弦误差), 因此会导致一个系统误差  $\Delta s$ , 由式(B. 21)和式(B. 22)给出:

$$\Delta s = -s(\cos \varphi - 1) \quad \dots\dots\dots(\text{B. 21})$$

$$\Delta \Phi = -\Phi(\cos \varphi - 1) \quad \dots\dots\dots(\text{B. 22})$$

此外, 由于旋转运动的作用, 入射光束与后向反射器运动方向之间夹角  $\delta$  的变化会导致光束入射到光电接收器的位置发生  $\Delta y$  的横向移动。

$$\Delta y = 2s \cdot \sin \delta \quad \dots\dots\dots(\text{B. 23})$$

由于从参考后向反射器返回到光电接收器的光束行程没有发生变化, 因此干涉图样会发生一个横向的变化。本部分(图 3、图 5 和图 7)中所描述的后向反射器干涉仪是利用同心圆的干涉条纹, 通过透镜压缩尽可能减小测量光和参考光的发散来减小干涉图样的横向移动。

当被测表面绕着角振动激励器的转轴旋转时, 由于测量光束的反射光发生了平移, 造成激光干涉仪的失调, 从而限制了其对更大旋转角度的测量。

对于 A 型激光干涉仪来说, 半径 R 并不是可精确定义的量值。由于采用后向反射器来避免因倾斜对测量结果的影响, 因此入射光束和反射光束的位置是相互变化替换的。另外一个不确定度来源是半径 R 的确定。在双光束布局中 R 代表两个后向反射器之间的距离, 在单光束系统中, R 代表后向反射器和旋转轴之间的距离。

对于 B 型激光干涉仪来说(即衍射光栅干涉仪), 位移与两个干涉条纹(最大光强度和最小光强度)之间的间隔有关, 对于在图 4 和图 6 中给出的双光束布置, 由式(B. 24)给出:

$$\Delta s = g/2 \quad \dots\dots\dots(\text{B. 24})$$

对于如图 8 中给出的单光束布置, 由式(B. 25)给出:

$$\Delta s = g \quad \dots\dots\dots(\text{B. 25})$$

式中, g 是光栅常数, 例如: 2 400 线/毫米<sup>[13]</sup> 的反射式正弦相位光栅, 其凹槽长度  $g = 1/2 \ 400 \ \text{mm} = 0.416 \ 6 \ \mu\text{m}$ 。式(B. 19)和(B. 20) 对于两束一级衍射光发生干涉是成立的, 并基于式(B. 26)

$$k \frac{\lambda}{g} = \sin\alpha_L + \sin\beta_L \quad \dots\dots\dots ( B. 26 )$$

式中:

$k$ ——衍射级 ( $k = \pm 1$ );

$\lambda$ ——激光波长;

$\alpha_L$ ——光束的入射角;

$\beta_L$ ——光束的衍射角。

衍射光栅式激光干涉仪能够测量旋转圆盘侧表面任何一点的位移(即角位移),其角位移幅值的测量范围受到衍射光栅覆盖角度范围的限制——除非在旋转圆盘侧表面均覆盖衍射光栅(即  $360^\circ$ )——或者是除了 B 型激光干涉仪以外的任何技术上的限制(例如角振动激励台的最大转角)。它与 A 型激光干涉仪相比还有另外一个优势,就是侧面安装衍射光栅的圆盘半径是一个可以精确定义和测量的量值。然而,B 型激光干涉仪对于横向运动比 A 型激光干涉仪需要遵守更加严格的公差要求(最大  $2 \mu\text{m}$  的偏心)。

**B.2 方法 1A 和方法 1B 的计算步骤**

在方法 1A 和方法 1B 中,对于 A 型和 B 型两种激光干涉仪来说,信号周期的数值(例如最大光强)由式(B.27)给出

$$N = 4\hat{s}/\Delta s \quad \dots\dots\dots ( B. 27 )$$

则

$$\hat{s} = \frac{N}{4} \times \Delta s = \frac{f_i}{f} \quad \dots\dots\dots ( B. 28 )$$

式中:

$f$ ——角振动激励器的激励频率;

$f_i$ ——条纹频率(平均值);

$\Delta s = \lambda/2$ 。

代入  $\Delta s$  的表达式,A 型激光干涉仪为式 (B.14) 或式 (B.15),B 型激光干涉仪为式 (B.19) 或式 (B.20),用式(B.17)将线位移转换为角位移,得到角位移幅值  $\hat{\phi}$ 。角速度幅值  $\hat{\Omega}$  和角加速度幅值  $\hat{a}$  则分别由式(B.10)和式(B.12)计算得到。角位移传感器的灵敏度则由式(B.4)、式(B.6)和式(B.8)来计算。

**B.3 方法 2A 和方法 2B 的计算步骤**

测量光强的频谱,调节角振动的幅值使与振动频率相同的(光学信号中的)频率分量为零,计算得到激光干涉仪测量的位移幅值,由式(B.29)给出:

$$\hat{s} = x_n \times \frac{\Delta s}{2\pi} \quad \dots\dots\dots ( B. 29 )$$

其中, $x_n$  为对应于贝塞尔函数零点的自变量(如表 1)。用式(B.17)计算得到相应角位移幅值。角速度幅值  $\hat{\Omega}$  和角加速度幅值  $\hat{a}$  则分别由式(B.10)和式(B.12)计算得到。角位移传感器的灵敏度则通过式(B.4)、式(B.6)和式(B.8)来计算。

**B.4 方法 3A 和方法 3B 的计算步骤**

当角振动激励器产生一个正弦位移,在 A 型和 B 型激光干涉仪的测量点,即与旋转部件(测量台面)转轴距离  $R$ (有效半径)的位置,检测到的位移  $s$  如式(B.30)所示:

$$s = \hat{s} \cos(\omega t + \varphi_s) \quad \dots\dots\dots ( B. 30 )$$

角位移传感器的输出信号表达式如式(B.31)所示:

$$u = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u) \quad \dots\dots\dots (B.31)$$

第一个光电接收器的输出信号表达式如式(B.32)所示:

$$u_1(t) = \hat{u}_1 \cos \varphi_{Mod}(t) = \hat{u}_1 \cos[\varphi_0 + \hat{\varphi}_M \cos(\omega t + \varphi_s)] \quad \dots\dots\dots (B.32)$$

这里,调制相位由光电接收器输出信号的初相位  $\varphi_0$  和调制部分  $\hat{\varphi}_M$  组成,见式(B.33):

$$\varphi_{Mod} = \varphi_0 + \hat{\varphi}_M \cos(\omega t + \varphi_s) \quad \dots\dots\dots (B.33)$$

$\varphi_M$  的幅值  $\hat{\varphi}_M$  与位移成比例关系,见式(B.34):

$$\varphi_M = \hat{\varphi}_M \cos(\omega t + \varphi_s) \quad \dots\dots\dots (B.34)$$

这里,  $\hat{\varphi}_M$  由式(B.35)给出:

$$\hat{\varphi}_M = 2\pi \frac{\hat{s}}{\Delta s} \quad \dots\dots\dots (B.35)$$

这些关系成立的前提条件是位移  $s(t)$  和正弦相位调制项  $\varphi_M(t)$  之间没有相移。

第二个光电接收器输出的正交信号表达式如式(B.32)所示:

$$u_2(t) = \hat{u}_2 \cos \varphi_{Mod}(t) = \hat{u}_2 \cos[\varphi_0 + \varphi_M \cos(\omega t + \varphi_s)] \quad \dots\dots\dots (B.36)$$

这里,  $\hat{u}_2 = \hat{u}_1$ 。

在测量时间  $t_0 < t < t_0 + T_{Meas}$  内这两个正交信号的采样时间间隔是相等的。在  $t_0 < t < t_0 + T_{Meas}$  内采样得到两路测量值序列  $\{u_1(t_i)\}$  和  $\{u_2(t_i)\}$ , 其采样间隔  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$  为常数。

从这两组正交信号,在测量时间段内依据式(B.37)逐点的计算可得到位移值或序列  $s_i = s(t_i)$ :

$$s_i = s(t_i) = \frac{\Delta s}{2\pi} \varphi_M(t_i) = \frac{\Delta s}{2\pi} (\arctan \frac{u_2(t_i)}{u_1(t_i)} + n\pi) \quad \dots\dots\dots (B.37)$$

式中  $n = 0, 1, 2, \dots$ 。

这种必要的步骤,尤其是带着连续“相位展开”的反正切函数计算(见参考文献[10]),是数字信号处理的标准程序。从  $s(t_i)$  的值,通过求解这个  $N+1$  方程组就可以计算出位移的幅值  $\hat{s}$  和相位  $\varphi_s$ :

$$s(t_i) = A \cos \omega t_i - B \sin \omega t_i + C \quad \dots\dots\dots (B.38)$$

式中:

$$n = 0, 1, 2, \dots;$$

$$A = \hat{s} \cos \varphi_s, B = \hat{s} \sin \varphi_s, \quad \dots\dots\dots (B.39)$$

C——常数。

$N+1$  表示在测量时间段内同步采样的次数。参数 A、B 和 C 应用最小二乘拟合(正弦逼近)方法计算得到。由此,位移的幅值  $\hat{s}$  和相位  $\varphi_s$  由式(B.40)和式(B.41)得到:

$$\hat{s} = \sqrt{A^2 + B^2} \quad \dots\dots\dots (B.40)$$

$$\varphi_s = \arctan \frac{B}{A} \quad \dots\dots\dots (B.41)$$

用式(B.16)和(B.17)计算得到角位移幅值和初始相位的相应测量结果。角速度幅值  $\hat{\Omega}$  和角加速度幅值  $\hat{\alpha}$  分别通过式(B.10)和式(B.12)得到。计算角振动传感器复灵敏度的幅值和相移则可采用式(B.4)和式(B.9)。

上述关系式,都是以现实情况难以达到的理想状态为前提条件,尤其是式(B.26)和式(B.30)。在实际应用中,光电接收器的信号会偏离它们的幅值  $\hat{u}_1, \hat{u}_2$  和名义  $\pi/2$  相移,并可能产生不同的偏移量  $\hat{u}_{0.1}, \hat{u}_{0.2}$ 。允差符合 4.6 要求的非理想正交信号对测量的影响,在 10.2 的注 1 中也进行了简要的描述(详细说明见参考文献[7])。

## 参 考 文 献

- [1] von Martens H. -J. Interferometric counting methods for measuring displacements in the range  $10^{-9}$  m to 1 m. *Metrologia*, 24, No. 4, 1987, pp. 163-170.
- [2] Robinson D. C. , Serbyn M. R. and Payne B. F. A description of NBS Calibration Services in mechanical vibration and shock. *NBS Technical Note* ,1232, 1987.
- [3] Schmidt V. A. , Edelman S. , Smith E. R. and Pierce E. T. Modulated photoelectric measurement of vibration. *Journal of the Acoustical Society of America* , 34, No. 4, 1962, pp. 455-458.
- [4] Clark N. H. An improved method for calibrating reference standard accelerometers. *Metrologia*, 19, 1983, pp. 103-107.
- [5] Link A. and von Martens H. -J. *Proposed primary calibration method for amplitude and phase response of accelerometers*. ISO/TC 108/SC 3/WG 6 N 59, Sept. 1995.
- [6] Heydemann P. L. M. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers. *Applied Optics* , 20, No. 19, 1981, pp. 3382-3384.
- [7] Link A. , Gerhardt J. and von Martens H. -J. Amplitude and phase calibration of accelerometers in the nanometer range by heterodyne interferometry. *SPIE*, 2868, 1996, pp. 37-48.
- [8] Wabinski W. and von Martens H. -J. Time interval analysis of interferometer signals for measuring amplitude and phase of vibrations. *SPIE*, 2868, 1996, pp. 166-177.
- [9] Sill R. D. Accelerometer calibration to 50 kHz with a quadrature laser interferometer. *Proceedings NCSL, Workshop & Symposium, Session 7B, Atlanta GA July 1997*, pp. 767-773.
- [10] Tribolet J. M. A new phase unwrapping algorithm. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* , ASSP-25, No. 2 April 1977, pp. 170-177.
- [11] von Martens H. -J. Investigations into the uncertainties of interferometric measurements of linear and torsional vibrations. *Shock and vibration* , 4, No. 5/6, 1997, pp. 327-340.
- [12] von Martens, H. -J. ; Täubner, A. Interferometric low-frequency calibration of translation and rotation quantity transducers. In: *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Meeting on Low Frequency Noise & Vibration*, Edinburgh, Great Britain, 1993, pp. 77-82.
- [13] Täubner, A. ; von Martens, H. -J. Measurement of angular acceleration, angular velocities and rotation angles by grating interferometry, In: *Measurement 24*, 1998, pp. 21-32.
- [14] Schlaak, H. -J. Excitation of low-frequency rotational vibration. In: *Journal of Low Frequency Noise* , 12, 1993, No. 4, pp. 123-127.
- [15] von Martens, H. -J. Generalization and analysis of the fringe-counting method for interferometric measurement of motion quantities. In: *Measurement 25*, 1999, pp. 71-87.
- [16] Marzolf, J. G. ; Bull, S. J. Angle Measuring Interferometer. In: *The Review of Scientific Instruments*, Vol. 35, No. 9, 1964, pp. 1212-1215.
- [17] ISO 16063-11:1999, *Methods for the calibration of vibration and shock transducers—Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry*.
- [18] ISO 5348, *Mechanical vibration and shock—Mechanical mounting of accelerometers*.
- [19] BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML, *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, 1995.

中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
振 动 与 冲 击 传 感 器 校 准 方 法  
第 15 部 分：激 光 干 涉 法 角 振 动 绝 对 校 准  
GB/T 20485.15—2010/ISO 16063-15:2006

\*  
中 国 标 准 出 版 社 出 版 发 行  
北 京 复 兴 门 外 三 里 河 北 街 16 号  
邮 政 编 码：100045

网 址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)  
电 话：68523946 68517548

中 国 标 准 出 版 社 秦 皇 岛 印 刷 厂 印 刷  
各 地 新 华 书 店 经 销

\*  
开 本 880×1230 1/16 印 张 2.25 字 数 66 千 字  
2011 年 5 月 第 一 版 2011 年 5 月 第 一 次 印 刷

\*  
书 号：155066·1-42204 定 价 33.00 元

如 有 印 装 差 错 由 本 社 发 行 中 心 调 换  
版 权 专 有 侵 权 必 究  
举 报 电 话：(010)68533533



GB/T 20485.15-2010