

文章编号:1004-4213(2010)s1-0014-5

皮米级分辨率测量及细分技术进程

汤善治,王昭,蒋志雄,郭俊杰

(西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘 要:综述了国内、外皮米分辨率测量的研究进展,介绍了高分辨率(皮米级)的测量方法和当前的发展,并对其原理及细分技术作了分析.针对典型测量方法的局限,阐述了另两种新颖的测量方法,并较深入地分析其优势及不足.着重分析了多次反射式光学干涉仪的测量方法,相对于 X 射线干涉仪,它具有更高的分辨率且其装置较简单,易于实现,在光谱学、高准确度测量等领域的应用前景较好.

关键词:光学测量;皮米分辨率;激光干涉仪;细分技术

中图分类号:TH744.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb201039s1.0014

0 引言

高分辨率、高准确度、大范围测量是现代精密测量技术的主要发展方向.广义上讲,皮米级分辨率的测量是属于纳米计量学的范畴,美国国家标准和技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)将纳米计量学定义为:纳米计量学是测量 1 nm 或更小的物体尺度或其特性的不确定性的科学^[1].它是纳米技术的重要分支,为纳米技术的基础和前提.

目前,纳米级测量技术的迅速发展也使其相关研究非常活跃.实现纳米测量的仪器较多,如:激光干涉仪、光栅、X 射线干涉仪、扫描探针显微术(Scanning Probe Microscopy, SPM)、电容电感传感器及 F-P 干涉仪等^[1],并且已有商品化产品面世,其中激光干涉仪的生产厂商有英国的 Renishaw,美国的 Agilent、ZYGO、Optodyne、自动精密工程公司,德国的 SIOS 等.这些仪器方法基本可以实现纳米级的测量,但分辨率达到皮米级的却不多.目前仅有电容传感器、X 射线干涉仪、F-P 干涉仪等少数仪器分辨率可达或接近皮米级,但其测量范围一般较小,在应用中受一定条件的限制.因此,研究和探索新的皮米级测量仪器方法十分重要,也将是未来高分辨率仪器的发展趋势之一.

1 几种典型的高分辨率(皮米级)的测量方法

1.1 电容式位移传感器(Capacitive Displacement Sensor, CDS)

电容式传感器的测量方式较多.若电容量为 C ,电容极板间介质的介电常量为 ϵ ,两平行板所覆盖的有效面积为 A ,两极板间的距离为 d ,则平行金属板间的电容量为

$$C = \epsilon A / d \quad (1)$$

由式(1)可知,当 d 、 A 和变化时, C 也随之发生变化.通常可将电容式传感器分为三类:变极距式、变有效面积式和变介质式.

图 1 为差动变极距式电容传感器.以图 1 为例简要阐述 CDS 的工作原理:极板 2 与 1 的间距和电容量分别为 d_1 和 C_1 ;极板 2 与 3 的间距和电容量

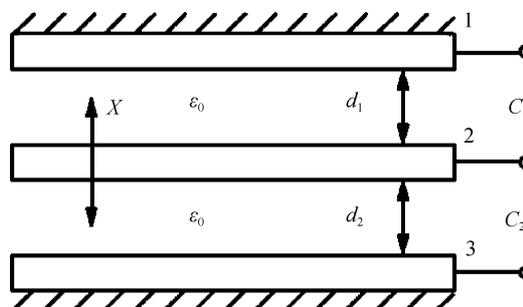


图 1 差动变极距式电容传感器

Fig. 1 Capacitive sensor of differential shife space

基金项目:国家科技重大专项(No. 2009ZX04012-061)资助

第一作者:汤善治(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为光电测量与精密仪器. Email: tangshanzhi1984@163.com

导 师:王昭(1964-),女,教授,博导,主要研究方向为光电测量、光信息处理和光学精密仪器. Email: wangzhao@xjtu.edu.cn

收稿日期:2010-07-12;修回日期:2010-07-29

分别 d_2 为 C_2 ; 当板 2 在 X 方向有一被测微位移 Δd , 则电容量 C_1 和 C_2 存在与被测微位移 Δd 对应的差动输出量 ΔC ; 经过差动电路被测量, 从而实现对被测微位移 Δd 的检测. 差动式较普通的电容传感器而言, 能够有效改善非线性误差及提高灵敏度.

目前, 电容式传感器用于位移测量, 其分辨率可达皮米级, 但其测量范围小, 只有几纳米. 因此, CDS 的测量范围成为关键问题, 韩国 M. Kim 等人的研究工作表明, CDS 的测量范围为 15 mm, 其分辨率可达 0.9 nm^[2].

1.2 X 射线干涉仪

Bonse 和 Hart 于 1965 年, 首次成功研制了 X 射线干涉仪, 在单晶硅上做成了 A 尺 (angstrom ruler), 以光波波长为标准测量了硅 220 面的条纹平面间距^[3-4]. 德国联邦物理技术研究院、英国国家物理实验室和日本国家计量研究实验室也对此做了相关研究并取得实验成功. 1983 年, 英国 D. G Chtwynd 等人将 X 射线干涉仪开始应用于微位移测量^[5].

近些年诸多单位均不同程度地研制了 X 射线干涉仪, 其测量系统主要有两种类型: 一种是整体式结构, 即在同一块晶体上将干涉仪和微动系统集成, 具有结构简单、性能较好、抗干扰能力较强等优点, 其典型的代表如英国国家物理实验室 X 射线干涉仪; 另一种则是将干涉仪和微动系统分别用不同的材料制成, 干涉仪采用单晶硅材料, 微动系统则用其他的材料制成, 以便降低加工难度, 但对测量环境要求较高, 其中以日本研制的 X 射线干涉仪为代表. 目前, X 射线干涉仪其测量准确度可达 5 pm, 测量位移范围为 100~200 μm ^[1,6].

图 2 为 LLL 型干涉仪 (X 射线干涉仪常见形式有: LLL 型、BBB 型、LBBL 和 LLLL 型^[7]) 干涉长度测量的基本原理. 当其中一块晶体相对其它两块晶体移动时, 输出 (O 光或 H 光) 的强度会按周期性正弦规律变化, 且晶体每移动一个晶面间距, 输出光强就变化一个周期, 而与 X 射线的波长无关. 这样

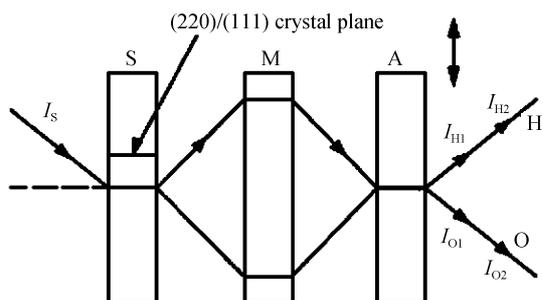


图 2 X 射线干涉仪基本原理图
Fig. 2 Principle scheme of X-ray interferometer

通过计算接收信号的周期数, 乘以相应的晶面间距, 即可得到晶体移动的位移大小.

1.3 F-P 干涉仪

F-P 标准具具有高分辨能力, 分辨率接近皮米, 常用来测量波长相差非常小的两条光谱线的波长差, 即光谱学中的超精细结构. 但是它的测量范围很小, 只有在几纳米范围内才能达到近皮米的分辨率^[1]. 荷兰 S. F. C. L. Wetzels 研制 F-P 干涉仪测量范围达 300 μm , 分辨率优于 0.1 nm^[8].

如图 3, 相邻两束光的光程差为

$$\Delta = 2hncos i' \tag{2}$$

相邻两束光的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{4\pi}{\lambda} nh \cos i' \tag{3}$$

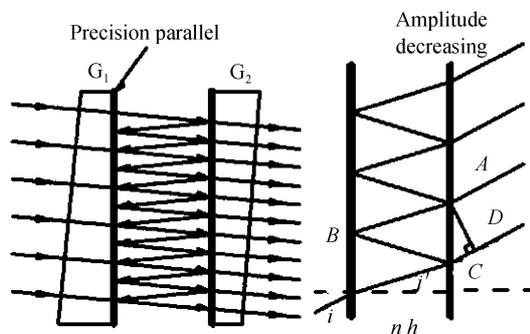


图 3 F-P 干涉仪的基本装置及原理
Fig. 3 Principle scheme and equipment of F-P interferometer

若移动 G_1 、 G_2 两板, 可以用来测量位移 h , 即为 F-P 干涉仪; 若 G_1 、 G_2 两板固定不动, 则为 F-P 标准具, 作为光谱仪, 用于分析谱线的超精细结构.

2 多次反射式的皮米级迈克尔逊干涉仪

意大利国家计量研究院的 Pisani. M 等人的研究表明通过特殊的光路装置, 多次反射的方法使得迈克尔逊干涉仪达到皮级或亚皮米的分辨率^[9-11].

2.1 工作原理

图 4 中, BS 为分束器 (Beam Splitter)、PBS 为偏振分束器 (Polarizing Beam Splitter)、M 为反射镜、 $\lambda/4$ 为 1/4 波板、P 为检偏器、L 为透镜、 D_1 和 D_2 均为探测器. 如图 4, 一个外差式迈克尔逊干涉光路, 与传统的光路工作原理相似, 具有一个频差的两个频率的正交偏振光, 经过 BS 分出一小束光作为参考信号被 D_1 所接收; 另一束经过 PBS 时, 其中 S 光经 1/4 波片再由 M 返回变成 P 光并透过 PBS 到检偏器 P, 为参考光路, 而其中的 P 光透过 PBS 经 1/4 波片, 经透镜汇聚进入多反射装置, 然后原路返回变化 S 光, 经 PBS 反射到检偏器 P, 为测量光路. 在检偏器 P 处 P 光和 S 光发生干涉, 由 D_2 授

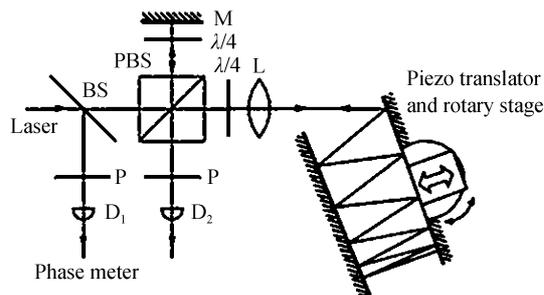


图4 多次反射的测量光路

Fig. 4 Measurement principle of multiple reflection interferometer

收. 通过移相器获得调制了移位信息的干涉信号 \sin 和 \cos 正交信号.

2.2 多次反射装置的细分原理

图5中, 当然两平面镜的夹角 β 和入射角 α 满足: $\alpha/\beta = N$, N 为整数时, 则光以入射角 α 入射, 经 N 次反射与其中一平面镜垂直, 然后再经 N 次反射原来返回.

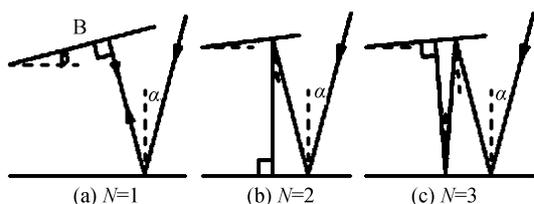
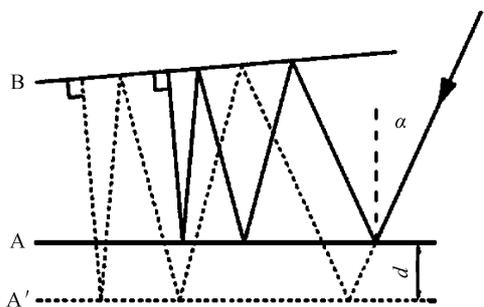


图5 多次反射示意图

Fig. 5 Scheme of multiple reflection equipment

图6中, 当沿着法线方向移动两个镜子其中的一个镜子时, 光路光程的变化与被放大的镜子位移成比例, 镜子位移的放大倍数为相对该镜子反射次数. 为了方便对经典迈克尔逊干涉仪的理解, 本文把这个叫做 M 倍增系数. 显然, 当移动 A 镜时 $M = N + 1$, 当移动 B 镜时 $M = N$. 为了简单起见, 忽略了移动镜子时激光入射角的影响.

图6 A 镜为随被测物体产生位移 d Fig. 6 A mirror displacement d with measured object

反射次数和系数 M 都受几何因素的限制. 需要合理设置入射角和两个镜子之间的距离才可以使光在到达镜子任何一面不被边缘限制, 使得最后垂直打在 B 镜上的光才能完全包含在反射面以内. 光束的直径与镜子的直径结合, 限制了连续反射的最小距离或反射的次数. 运用两个 50 mm 直径的镜子,

可以获得超过 100 的倍增系数^[9].

2.3 误差及分辨率

对于 M 取值在 100 左右时, 与理论值的偏差在以下. 可以预见, 与英国国家物理实验室的 X-ray 干涉仪相比, 此干涉仪精确度将会更高^[9].

提高干涉仪的分辨率关键在于采用简单而特别的光学装置. 这个装置利用了两面镜子之间一个折叠的光路使光程变化增加超过 100 倍. 相当于是用一个拥有短 100 倍波长的激光 (达到 6.33 nm) 来工作, 这个干涉仪可看作一个经典的迈克尔逊干涉仪, 但它的工作波长确比经典干涉仪中波长要小 100 倍. 这样, 可将光学条纹细分带来的误差减小, 达到同典型激光干涉仪条纹的非线性影响一样小. 此外, 它还因此也减少电子噪音 (光电探测器和放大器)^[9, 11].

工作波长为 6.33 nm, 等效于细分了 100 倍, 现若采用典型的干涉仪的条纹细分技术, 如 12 位 A/D 转换器, 再进行 4 096 倍细分, 分辨率为 0.8 pm, 最终可以达到皮米级甚至亚皮米分辨率.

3 基于合成波长的激光干涉仪

清华大学程晓辉、李达成等首次提出利用合成波长实现干涉条纹光学细分的原理进行纳米测量, 构建了“双波长共光路”纳米干涉测量系统, 并对该系统的非线性误差、信号处理方法等问题进行了理论和实验研究^[12-13]. 此后, 浙江大学、浙江理工大学陈本永等人也对激光合成波长进行纳米测量进行了较深入的研究并取得了进展^[14-17], 并以《激光合成波长纳米位移测量方法及应用》的研究获得 2007 年度国家技术发明二等奖.

3.1 激光合成波长纳米测量原理

如图 7 所示, 图中存在共光路的两个干涉仪. 当两个正交偏振光 λ_1 、 λ_2 入射到干涉仪的分光棱镜 BS 上时, BS 的反射光射向 M_1 形成参考臂, 透射光形成测量臂. 其中 λ_1 被偏振分光棱镜 PBS 反射, λ_2

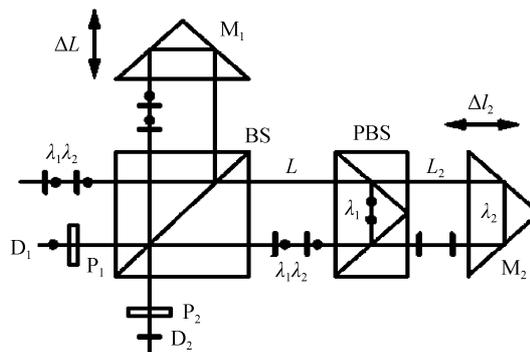


图7 激光合成波长干涉仪的原理

Fig. 7 Principle scheme of interferometer based on laser synthetic-wavelength

透射过 PBS,由测量镜 M_2 反射.这样,系统中实际上存在这两个共光路的干涉仪:1)由 M_1 、BS 和 PBS 组成的对 λ_1 一个干涉仪;2)由 M_1 、BS 和 M_2 形成的对 λ_2 的干涉仪.机械结构的设计可以保证 M_2 与 PBS 的间距 L_2 足够小,其它部分的光路对两个干涉仪来说是一致的.这种共光路的设计可以较好的降低环境中的机械振动和温度变化等干扰的影响^[13].

经过正交放置的检测器 P_1 、 P_2 在两个光电探测器上分别得到两个干涉仪系统的干涉信号,其位相 φ_1 、 φ_2 由式(4)表示

$$\varphi_1 = 2\pi L/\lambda_1, \varphi_2 = 2\pi(L/\lambda_2 + L_2/\lambda_2) \quad (4)$$

式中, L 为和 PBS 分别得到 BS 光程之差, L_2 是 λ_2 干涉仪比 λ_1 干涉仪多走过的光程,也就是非共光程部分.设 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$,当测量镜 M_2 有微小的位移 Δl_2 (纳米量级)时,则干涉两路信号的位相差变为

$$\Delta\varphi' = 2\pi(L/\lambda_s - (L_2 + 2n\Delta l_2)/\lambda_2) \quad (5)$$

式中, $\lambda_s = \lambda_2\lambda_1/|\lambda_1 - \lambda_2|$ 为合成波长.

为了得到测量镜的位移,可将参考镜 M_1 移动 ΔL 使 $\Delta\varphi'$ 不变(例如选定 $\Delta\varphi' = 0$ 时刻),则式(5)变为

$$\Delta l_2 = (\lambda_2/\lambda_s)\Delta L \quad (6)$$

如果光源选用 0.632 8 μm 波段的 He-Ne 双纵模激光器,其输出的两个光波频率差约为 $\Delta\nu = 1\,000\text{ MHz}$,合成波长 $\lambda_s \approx 300\text{ nm}$,单波长 $\lambda_2 = 0.632\,8\ \mu\text{m}$.从式(6)可得出,若被测位移的分辨率 $\Delta l_2 = 1\text{ nm}$,则参考镜的位移的分辨率 $\Delta L = (\lambda_s/\lambda_2)\Delta l_2 = (300\text{ nm}/0.632\,8\ \mu\text{m}) \times 1\text{ nm} = 0.474\text{ mm}$,即测量镜纳米量级的位移被放大到参考镜毫米量级的位移.这样,用普通的长度测量手段就能够实现高准确度的测量.

3.2 分辨率及其细分技术

该方法优点是利用合成波长到单波长的巨大比例系数 $K (= \lambda_s/\lambda_2)$,相当于条纹细分倍数 $G = \lambda_s/\lambda_2$.当取 $\lambda_s = 300\text{ nm}$, $\lambda_2 = 0.632\,8\ \mu\text{m}$,则 $G \approx 474\,000$.这样大的细分倍数要优于目前的干涉条纹细分方法.

实现测量的高分辨率可以通过两种途径:1)测量镜运动,参考镜补偿,如 $\Delta l_2 = 1\text{ nm} \rightarrow \Delta L = 0.474\text{ mm}$, $\Delta l_2 = 1\text{ pm} \rightarrow \Delta L = 0.474\ \mu\text{m}$;2)参考镜运动,测量镜补偿,如 $\Delta L \rightarrow \lambda_2/2 \rightarrow \Delta l_2 \approx 0.7\text{ pm}$.

由于在实际测量过程中只需保证一个恒定的相位差,所以消除了和其它光学干涉仪中对正弦干涉信号进行等间隔细分带来的非线性误差.另外,由光源、光学元件和安装误差等引入的非线性误差要小于一般的光学纳米干涉系统.

表 1 为各测量方法参量比较^[1,9,18].与其他的测量方法相比,多次反射式皮米级迈克尔逊干涉仪具有超高分辨率的优势,基于合成波长的激光干涉仪具有亚纳米分辨率、大范围的优势,均为实现超高倍细分的有效方法.

表 1 各测量方法参量对比

Table 1 Comparison of different measurements

	Resolution/ Precision/		Range/ Range/	
	nm	nm	nm	Resolution
Capacitive sensors	10^{-3}	—	25	2.5×10^4
X-ray interferometer	5×10^{-3}	10^{-2}	2×10^5	4×10^7
F-P interferometer	10^{-3}	10^{-3}	5	5×10^3
Mutiple reflection interferometer	10^{-4}	—	—	—
Synthetic-wavelength interferometer	0.01	1	10^6	10^8

4 结论

多次反射式皮米级迈克尔逊干涉仪具有普通光学测量方法的优点,同时结构新颖且简单,较容易实现超高倍细分,达到皮米级分辨率.但该方法还不成熟,存在着一些有待解决的问题:

1)测量中被测板移动后需保持高准确度的平行,否则影响光路的往返从而影响测量准确度;

2)由于为皮米分辨率测量,其对光学器件的加工要求较高,尤其在于反射镜较大,加工难以保证高准确度要求;

3)测量系统的抗干扰能力有待提高.需提出有效方法或措施以降低环境等因素的影响.

基于合成波长的激光干涉仪实质是利用两个共光路的干涉仪用以位移测量,较好消除了振动、温度等因素的干扰,而且细分倍数较高,较容易实现纳米级位移测量,但如需达到皮米级位移测量,还需进一步研究.

1)其测量过程为一个还原的过程,通过参考镜或测量镜补偿运动实现高准确度测量,在实时检测应用方面受到了限制;

2)如果要想实现皮米级测量,需与其他的方法结合进行测量.以 4.2 中的情况为例,当测量镜运动,参考镜补偿.若测量镜运动 1 pm,则参考镜需补偿 0.474 μm 即 $\Delta l_2 = 1\text{ pm} \rightarrow \Delta L = 0.474\ \mu\text{m}$.此时参考镜补偿的 0.474 μm 用常规工具难以较精确检测,仍需其他的测量方法,如迈克尔逊激光干涉仪、光栅等.

参考文献

- [1] TEAGUE E C. Nanometrology [C]. AIP Conference Proceedings, 1992: 371-405.

- [2] KIM M, MOON W, YOON E, *et al.* A new capacitive displacement sensor with high accuracy and long-range[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2006, **130-131**: 135-141.
- [3] BONSE U, HART M. An X-ray interferometry[J]. *Appl Phys Lett*, 1965, **6**(8): 155-156.
- [4] HART M. An angstrom ruler[J]. *J Appl Phys(J Phys D)*, 1968, **1**: 1405-1408.
- [5] CHERWYND D, SIDDONS D P, BOWEN D K. X-ray interferometer calibration of microdisplacement transducers[J]. *J Phys E: Sci Instrum*, 1983, **16**(9): 871-874.
- [6] WANG Lin, CAO Mang, LI Da-cheng. Latest development of the X-ray interferometry[J]. *Optical Technology*, 1998(4): 7-10.
王林,曹芒,李达成. X射线干涉测量技术的最新进展[J]. 光学技术,1998(4):7-10.
- [7] BONSE U, UEBBING H, BARTSCHER M, *et al.* X-ray and neutron interferometry and the measurement of fundamental constants[J]. *Metrologia*,1994, **31**: 195-201.
- [8] WETZELS S F C L, SCHELLEKEN P H J. Development of a traceable laser-based displacement calibration system with nanometer accuracy [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1997, **46**(1): 481- 484.
- [9] PISANI M. A homodyne Michelson interferometer with sub-picometer resolution[J]. *Meas Sci Technol*, 2009, **20**(8): 1-6.
- [10] PISANI M, ASTRUA M. Angle amplification for nanoradian measurements[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(8): 1725-1729.
- [11] PISANI M. Multiple reflection Michelson interferometer with picometer resolution [J]. *Opt Express*, 2008, **16** (26): 21558-21563.
- [12] CHENG Xiao-hui. Study on nanometer interferometry based on synthetic wavelength fringe subdivision theory [D]. Beijing: Tsinghua University, 2000.
程晓辉. 基于合成波长条纹细分原理的纳米干涉测量系统的研究[D]. 北京:清华大学, 2000.
- [13] CHENG Xiao-hui, LI Da-cheng, ZHAO Yang. Method of nanometer measurement using multi-wavelengths interferometry[J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(4): 313-315.
程晓辉,李达成,赵洋. 一种利用合成波长法实现的纳米测量方法[J]. 光学技术,2000, **26**(4):313-315.
- [14] CHEN B Y, CHEN X H, LI D C. Dual-wavelength interferometric technique with subnanometric resolution[J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(28): 5933-5937.
- [15] CHEN B Y, LI D C. Progress in studies on long-range and ultrahigh-accuracy nanometer measurements[C]. *Pro of the 2nd Internat Symp on Instrument Sc and Technol*, 2002, **2**: 2/054-2/059.
- [16] CHEN Ben-yong, MU Rui-zhen, ZHOU Yan-jiang, *et al.* Nonlinear error analysis of laser synthetic-wavelength nanomeasurement interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(2): 240-244.
陈本永,穆瑞珍,周砚江,等. 激光合成波长纳米测量干涉仪的非线性误差分析[J]. 中国激光,2008, **35**(2):240-244.
- [17] WEI Feng, CHEN Ben-yong, DING Qi-quan. Review on long-range and ultrahigh-accuracy nanometer measurements [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(2): 302-305.
韦丰,陈本永,丁启全. 大范围高准确度的纳米测量现状与发展趋势[J]. 光学技术,2005, **31**(2):302-305.
- [18] CHEN B Y, YAN L P, YAO X G, *et al.* Development of a laser synthetic wavelength interferometer for large displacement measurement with nanometer accuracy[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(3): 3000-3010.

Progress in Measurement with Picometer Resolution and Subdivision Technique

TANG Shan-zhi, WANG Zhao, JIANG Zhi-xiong, GUO Jun-jie

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The domestic and foreign progress of picometer resolution measurements were reviewed. Typical methods for measurement with high resolution(picometer resolution) were introduced, and the progress of picometer measurements was presented. The principles and corresponding subdivision techniques were studied. Then, two novel measurements were proposed and analyzed. The multiple reflection interferometer was analyzed. It has the advantages of higher resolution and more simplicity device than X-ray interferometer, which provide a good future in the fields of spectroscopy and high-precision measurement.

Key words: Optical measurement; Picometer resolution; Laser interferometer; Subdivision technique