

红外双谱线 He-Ne 激光用于绝对距离 合成波干涉计量的两个方案

邹大挺 田 芊 梁晋文 李恭亮 汲 庆 刘胜茂
(清华大学精密仪器系, 北京 100084) (清华大学物理系, 北京 100084)

提要: 本文给出了合成波长的一般计算公式和各级合成波长的测量方程组, 介绍了用 $3.3922\ \mu\text{m}$ 和 $3.3912\ \mu\text{m}$ 双谱线 He-Ne 激光器产生两级合成波长体系的方法和有关实验结果。提出了两个合成波长干涉测量方案, 适用于几米到 100 米的大尺寸测量, 精度优于 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ 。

关键词: 干涉测量, 合成波长, He-Ne 激光器, 双波长激光器

Two approaches for absolute distance interferometry by synthetic wavelengths of an infrared dual-line He-Ne laser

Zou Dating, Tian Qian, Liang Jinwen

(Department of Precision Instru., Tsinghua University, Beijing 100084)

Li Gongliang, Ji Qing, Liu Shengmao

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: It is the key of absolute distance interferometry to establish a synthetic-wave measuring chain. This paper gives a general formula of synthetic-wavelength and a conventional measuring equation set for each stage of synthetic wave, and introduces two-stage synthetic hierarchy produced by $3.3922\ \mu\text{m}$ and $3.3912\ \mu\text{m}$ dual-line He-Ne laser, as well as the related experimental results. On the basis of the hierarchy, this paper puts forward two interference measuring approaches. The discussion and analysis show that these two interfering system can be suitable to measurement of distance ranging from several meters to 100 meters, with an accuracy better than $1\times 10^{-6}\sim 1\times 10^{-7}$.

Key words: interferometry, synthetic wavelength, He-Ne laser, dual-line laser

一、前 言

当今, 科学研究和工业生产迫切需要对几十米至上百米的大尺寸作出高精度(优于 $10^{-5}\sim 10^{-6}$)测量。已经实用化的双频激光干涉仪因需要有平直导轨供参考镜移动, 难以满足这个要求。因此, 最近十年来, 各国科学家相继开展了无导轨绝对距离干涉计量系统的研究。按所用红外激光器的种类分, 主要有 $10.6\ \mu\text{m}$ 波段多谱线 CO_2 激光干涉系统^[1~3], 和 $3.51\ \mu\text{m}$

和 $3.37 \mu\text{m}$ 双波长 He-Xe 激光干涉系统^[4]。这些测量系统因以下原因, 尚未进入实用: (1) 双波长 He-Xe 激光的合成波长太小(只有 $84.2 \mu\text{m}$), 很难用于几米以上的大尺寸测量; (2) 多谱线 CO_2 激光振荡谱线的线序重复性差。

本文提出的两个干涉测长方案, 采用 $3.3922 \mu\text{m}$ 和 $3.3912 \mu\text{m}$ 双谱线 He-Ne 激光器, 具有合成波长长、振荡频率稳定的优点, 可应用于几十米到近百米长度的高精度测量, 并有希望在较短的时间内研制出实用系统。

二、绝对距离合成波干涉测量原理

无导轨绝对距离干涉测长的一般公式即光波干涉方程:

$$L = (K + \varepsilon)\lambda/2 \quad (1)$$

其中, L 是被测长度, λ 是光波波长(可以是单一波长或光波合成波长), K 和 ε 分别是干涉条纹的整数和小数。与双频激光干涉条纹计数法不同, 无导轨绝对距离合成波干涉测长的特点是: 干涉测量得到的只是条纹小数 ε 值, 条纹整数 K 是利用长度 L 的初始值 L_0 (如通过目视估计得到的长度值, 其误差为 $\Delta L_0 = |L_0 - L|$) 来确定的。容易证明, 只要初值差满足下式

$$\Delta L_0 < \lambda/4, \quad (2)$$

整数 K 就能被唯一确定, 这是因为由(2)式给出的被测长度不确定区间为 $2\Delta L_0 < \lambda/2$, 而整数 K 值的不确定所对应的长度不确定区间应为: $\Delta L \geq \lambda/2$ (严格地说, 是 $\lambda/2$ 的整数倍)。显然, 在小于 $\lambda/2$ 的长度不确定区间内, 不可能存在多个整数值。

在实际测量中, 绝对距离干涉测量还有以下两个基本要求: (1) 干涉测量所能允许的 ΔL_0 值较大, 使得初始值 L_0 的估计容易做到; (2) 测相产生的测量误差 $\delta\varepsilon \cdot \lambda/2$ 尽可能地小, 使干涉测量具有高精度。两者对光波波长 λ 来说, 是相互矛盾的。因为, 由(2)式知, 当 λ 小时, 确定 K 值所允许的 ΔL_0 就小, 会造成初值估计的困难; 当 λ 大时, 虽然初值估计较方便, 但产生的测量误差 $\delta\varepsilon \cdot \lambda/2$ 较大, 使测量精度难以提高。为解决这对矛盾, 一个好的方案是利用多波长建立合成波长链来进行测量。设有 N 个光波 $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n$, 相应的波数为 $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_n$, 对相邻两个波数按 $\sigma_{si}^{(1)} = \sigma_i - \sigma_{i+1}$ 逐个组合, 可得到 $N-1$ 个第一级合成波长的波数 $\sigma_{s1}^{(1)} > \sigma_{s2}^{(1)} > \dots > \sigma_{s(n-1)}^{(1)}$, (相应的第一级合成波长为 $\lambda_{s1}^{(1)} < \lambda_{s2}^{(1)} < \dots < \lambda_{s(n-1)}^{(1)}$), 然后再对它们进行两两组合, 就可得到 $N-2$ 个第二级合成波数和相应的波长。依次下去, 直至最后, 就可得到图 1 所示的合成波长金字塔, 其中第 j 级第 k 个合成波长的计算公式为

$$\lambda_{sk}^{(j)} = \left\{ \sum_{i=k}^{k+j} (-1)^{(i-k)} C_j^{(i-k)} \sigma_i \right\}^{-1} \quad (3)$$

其中: $\sigma_i = 1/\lambda_i$; $C_j^{(i-k)} = j! / (i-k)! (j-i+k)!$; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$; $k = 1, 2, \dots, (n-j)$ 。

当单波长 λ_i 之间间隔合适时, 金字塔中上一级合成波波长总比下一级合成波大, 这样取其任何一支, 就可形成由大到小的 N 个合成波长(单波长 λ_i 可认为是零级合成波长), 如 $\lambda_{s1}^{(n-1)} > \lambda_{s1}^{(n-2)} > \dots > \lambda_{s1}^{(1)} > \lambda_1$, 形成一个合成波测量链。通常, 从最大的合成波长 $\lambda_{s1}^{(n-1)}$ 开始测量, 逐级向单波长过渡。这样既可大大降低对初值精度的要求, 又能保证最终的测量值有很高的精度。

在合成波长链测量中, 各级合成波的测量方程组有以下统一的形式(详细推导另文发表):

测值公式:

$$L_m = (K_s + \varepsilon_s) \lambda_s / 2 \quad (4)$$

条纹整数:

$$K_s = \ln [2L_0 / \lambda_s - \varepsilon_s + 1/2] \quad (\text{其中 } \ln \text{ 是取整函数}) \quad (5)$$

过渡条件:

$$\Delta L_0 < (\lambda_s / 4 - \Delta L_m) \quad (6)$$

测量误差:

$$\Delta L_m = \delta \varepsilon_s \cdot \lambda_s / 2 + L_0 \cdot \delta \lambda_s / \lambda_s \quad (7)$$

上述各式中, λ_s , K_s 和 ε_s 代表合成波长及相应的干涉条纹整数和小数; L_m 、 ΔL_m 是本级合成波干涉测量的长度测值和误差; L_0 、 ΔL_0 是被测长度的初值和误差(在多级合成波长干涉测量中,它们也可以是上级合成波长测量得到的测值和误差)。这里,测值公式(4)即是干涉测长的一般公式;(7)式是相应的误差方程;(5)式是求 K_s 值的函数式;(6)式是考虑 ΔL_m 影响时,对(2)式的修正,在合成波长测量链中,就是合成波长级与级之间的过渡条件;对于首先开始测量的那一级合成波长,(6)式就是初始条件。只有当各级合成波长的过渡条件得到满足时,合成波长链的干涉测长才能顺利进行。

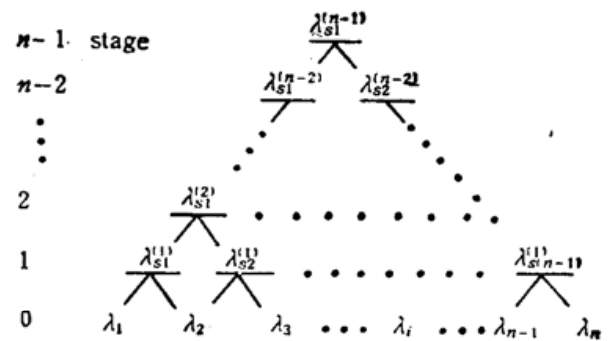


Fig. 1 Hierarchy of synthetic wavelength

三、两级合成波长体系和实验结果

He-Ne 激光器在 $3.39 \mu\text{m}$ 波段有以下两条跃迁谱线: $3s_2 \rightarrow 3p_4$ 跃迁 ($\lambda_1 = 3.3922 \mu\text{m}$) 和 $3s_2 \rightarrow 3p_2$ 跃迁 ($\lambda_2 = 3.3912 \mu\text{m}$)。它们的合成波长为 $\lambda_s = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2) \approx 11.5 \text{ mm}$ 。当激光器同时输出这两条谱线时,这个合成波即是 λ_1 和 λ_2 的拍波。将它直接用于大尺寸测量是不够的,因为由(6)式知, λ_s 要求初始条件为 $\Delta L_0 < 2.85 \text{ mm}$ (忽略小量 ΔL_m), 这对几十米长的被测长度而言,要求过高。但是,在这种双谱线激光器中可以形成比拍波大得多的第二级合成波。设 λ_1 和 λ_2 增益线型中心的频差为 $\Delta \nu_{21} = \nu_{20} - \nu_{10}$, 则当腔模间隔 $\Delta \nu_0 = c / 2L_0$ (c 是光速, L_0 是腔长) 满足下式时,激光振荡模在两增益线型中的位置

$$\Delta \nu_{21} = (2m + 1) \Delta \nu_0 / 2 \quad (8)$$

其中, m 是正整数。设有如图 2 所示的,由 A 、 B 两点代表的等光强双波长工作点,当双谱线同时振荡时,每个等光强点输出一个拍波。 A 、 B 两个工作点将得到 λ_{SA} 和 λ_{SB} 两个拍波。由图 2 知,拍波 λ_{SA} 的频率为 $\Delta \nu_A = \Delta \nu_{21} + (\Delta_1 + \Delta_2) = (k+1)c / 2L_0$, 拍波 λ_{SB} 的频率为 $\Delta \nu_B = \Delta \nu_{21} - (\Delta_1 + \Delta_2) = k \cdot c / 2L_0$ 。因为, $(\Delta_1 + \Delta_2) \ll \Delta \nu_{21}$, 所以, $\lambda_{SA} \approx \lambda_{SB} \approx c / \Delta \nu_{21} \approx 11.5 \text{ mm}$ 。但由于工作点 A 、 B 的拍频不同, $\Delta \nu_A - \Delta \nu_B = 2(\Delta_1 + \Delta_2) \approx c / 2L_0$, 所以,由 λ_{SA} 和 λ_{SB} 可组合出新的合成波,其波长为

$$\lambda_{SAB} = c / (\Delta \nu_A - \Delta \nu_B) \approx 2L_0 \quad (9)$$

当 $L_0 \approx 500 \text{ mm}$ 时, $\lambda_{SAB} \approx 1 \text{ m}$ 。这样就得到了一个比 11.5 mm 大的新的合成波长 λ_{SAB} 。

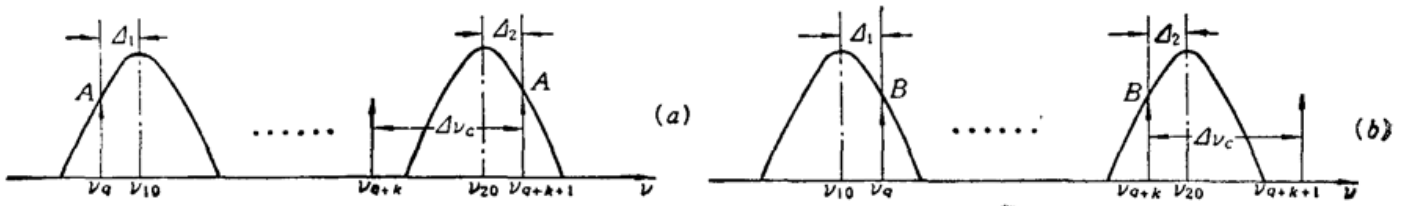


Fig. 2 Equal intensity operation of λ_1 and λ_2 :
(a) for A operating point, and (b) for B operating point

3.3922 μm 和 3.3912 μm 双谱线 He-Ne 激光器的两级合成波体系如图 3 所示。这里， λ_{SAB} 作为前级测量，故测量的初始条件降为

$$\Delta L_c < 250 \text{ mm} \tag{10}$$

使初值估计很方便，可采用许多成熟的辅助测量手段(如采用光学经纬仪测距等等)来实现。

要在 3.3922 μm 和 3.3912 μm 双谱线 He-Ne 激光器中建立两级合成波长体系，需要解决以下三个问题：(1) 实现 λ_1 和 λ_2 同时振荡；(2) 存在两个等光强工作点；(3) 在每个工作点上稳频，能获得高的稳频精度。

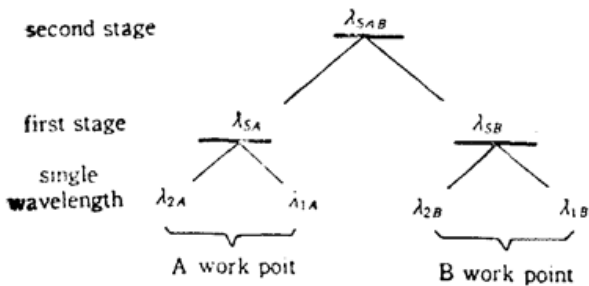


Fig. 3 Hierarchy of two-stage synthetic wavelength produced by 3.3922 μm and 3.3912 μm dual-line He-Ne laser

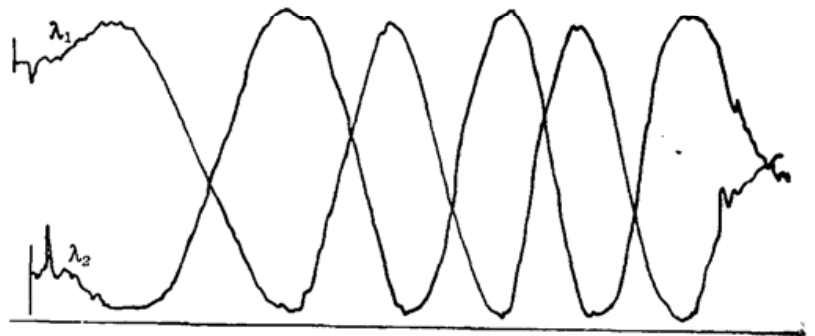


Fig. 4 Experimental record of the output of λ_1 and λ_2 vs. cavity length. (note: starting positions of the two curves are different, their crosses are equal-intensity points)

He-Ne 激光器 3.3922 μm 和 3.3912 μm 两谱线的自发辐射强度有较大差别，前者是后者的 2.5 倍^[5]，因此，两谱线的增益有显著差别。在激光腔内建立强线 3.3922 μm 振荡容易，而弱线起振较难。要使 λ_1 和 λ_2 在一个谐振腔内同时振荡，必须使谐振腔对 λ_1 和 λ_2 具有不同损耗。我们设计了含有甲烷盒的激光腔，利用纯甲烷对 3.3922 μm 强线的强吸收和对 3.3912 μm 弱线几乎无吸收的特点，形成了对 λ_1 和 λ_2 的不等损耗，实现了等强双谱线的同时振荡。并且，得到了实验曲线如图 4 所示的两个等光强工作点。实验所用激光器腔长 $L_c \approx 500 \text{ mm}$ ，每条谱线在等光强点处的输出功率为 0.5 mV，单纵模操作。利用等光强稳频技术，任一等光强工作点的稳频精度在 3 h 内优于 5×10^{-8} 。

四、双谱线 He-Ne 激光器两级合成波测长方案

干涉仪原理如图 5 所示。为了提高干涉条纹的位相测量精度，采用了拍波零点锁定技术，其合成波长测量链如图 6 所示， λ_{SAB} 用于粗测， λ_{SA} (或 λ_{SB}) 用于精测。这里的关键是实现由

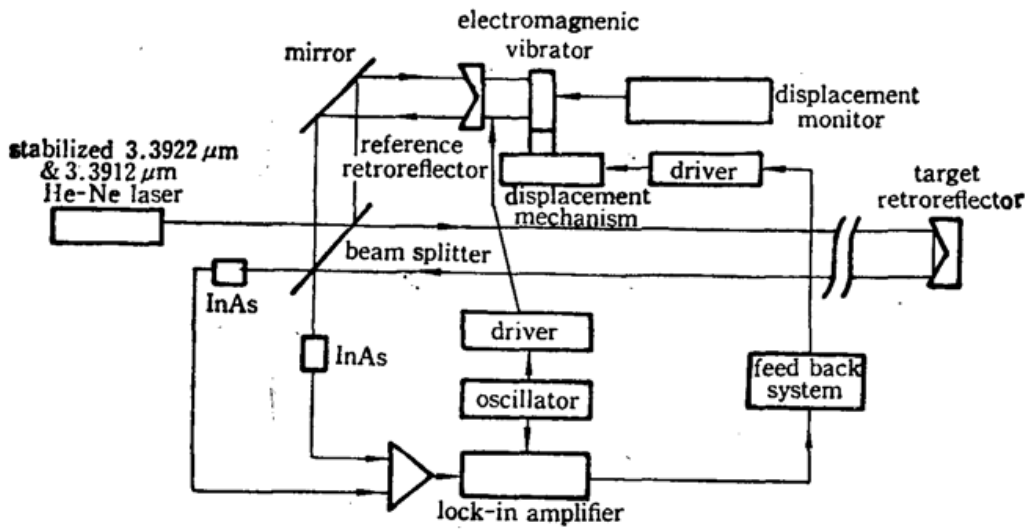


Fig. 5 Schematic diagram of synthetic wavelength distance measuring system by a dual line He-Ne laser

λ_{SAB} 到拍波的级间过渡。应当指出, 这里的 λ_{SAB} 只是为了说明拍波 λ_{SA} 和拍波 λ_{SB} 的联合测长作用而引入的等效合成波长, 它的测长精度能否满足向精测级过渡的条件, 完全由拍波 λ_{SA} 和 λ_{SB} 的测量精度决定。所以, 级间过渡条件的满足和最终测长精度的实现, 都依赖于拍波 λ_{SA} 和 λ_{SB} 的测长精度。拍波干涉测量的误差可由公式 (7) 推出为



Fig. 6 Measuring chain of two-stage synthetic wavelength

$$\Delta L_m = \delta \epsilon_s \cdot \lambda_s / 2 - L [\delta f / (f - 1) + \delta \nu / \nu] \tag{11}$$

其中, f 为同时振荡的两单波长之比, $f = \lambda_1 / \lambda_2$, ν 是单波长频率。可见, 拍波 (λ_{SA} 或 λ_{SB}) 干涉条纹的测相精度 $\delta \epsilon$ (不计下标 s)、波长比的不稳定度 δf 和单波长频率的稳定度 $\delta \nu / \nu$ 是产生拍波测量误差的三个因素。如果, 若级间过渡条件为 $\Delta L_s < 2.80 \text{ mm}$, 则要求干涉系统的测长精度为

$$\Delta L = 10 \mu\text{m} + 1 \times 10^{-6} \cdot L \tag{12}$$

则可算出各级合成波测量对 $\delta \epsilon$ 、 δf 和 $\delta \nu / \nu$ 的要求如表 1 所示。

由表 1 可见, 干涉测量对 δf 和 $\delta \nu / \nu$ 的要求随被测长度 L 而变, L 愈大, 波长比和单波长频率稳定度的要求愈高。当 $L = 100 \text{ m}$ 时, 要求稳频精度优于 1.61×10^{-7} , 波长比不稳定度 $\delta f \leq 4.7 \times 10^{-11}$ 。3.3922 μm 和 3.3912 μm 双谱线激光器采用等光强稳频技术, 每个工作点的频率稳定度已达 5×10^{-8} , 完全满足 100 m 距离上长度测量所需的频率稳定度要求。目前直接测量波长比稳定度的条件尚不具备, 但注意到两波长在同一腔内同时振荡, 引起波长不稳定的许多影响因素对两者是共同的, 可以相互抵消。粗略的理论分析得出, 在单波长频率稳定度达 5×10^{-8} 的情况下, $\delta f \leq 4.7 \times 10^{-11}$ 的稳定度是可以达到的。表中所列的测量精度也能满足。在图 5 给出的干涉系统中, 实验得到了 $\delta \epsilon = 5 \times 10^{-4}$ 的条纹测相精度。

由上述讨论容易看出, 3.3922 μm 和 3.3912 μm 双谱线 He-Ne 激光两级合成波干涉测长的方案是正确的, 它可用于 100 m 范围内, 相对精度达 1×10^{-6} 的长度测量。

Table 1 Phase-reading accuracies, oscillating wavelength-ratio uncertainty and frequency stability required for a measuring accuracy of $10\mu\text{m}+10^{-6}\cdot L$

Measuring order & synthetic wavelength	δs	δf	$\delta\nu/\nu$	Property
1st step λ_{SAB} (1000 mm)	2.8×10^{-3}	$4.7 \times 10^{-9}/L$	$1.61 \times 10^{-5}/L$	gross
2nd step $\lambda_{SA} (\lambda_{SB})$ (11.5 mm)	1.7×10^{-2}	2.1×10^{-11}	7.0×10^{-7}	fine

note: L in meter.

五、He-Ne和He-Xe双激光器联合干涉测长方案

双谱线 He-Ne 激光两级合成波干涉测长方案的缺点, 是拍波测相产生的测量误差 $\delta s \cdot \lambda_{SA}/2$ 较大(可达 $5\mu\text{m}$), 这一方面使干涉测量不能从拍波长过渡到单波长 $3.3922\mu\text{m}$ (或 $3.3912\mu\text{m}$); 另一方面, 当干涉系统用于小距离(如 5 m 以内)测量时, 相对测量精度将下降。

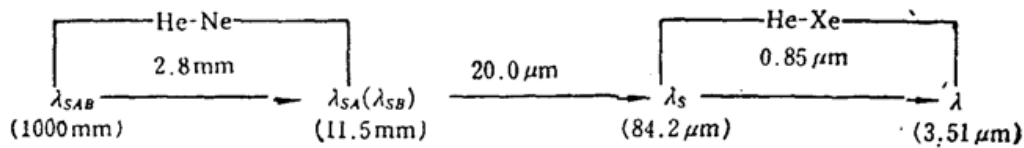


Fig. 7 Four-stage measuring chain of three synthetic wavelengths and one single wavelength

Table 2 Phase-reading accuracy, oscillating wavelength-ratio uncertainty and frequency stability required for a measuring accuracy of $0.05\mu\text{m}+10^{-7}\cdot L$

Measuring order & synthetic wavelength	δs	δf	$\delta\nu/\nu$	Property
1st step λ_{SSA} (1000 mm)	2.8×10^{-3}	$4.7 \times 10^{-9}/L$	$1.61 \times 10^{-5}/L$	gross
2nd step $\lambda_{SA} (\lambda_{SB})$ (11.5 mm)	2.46×10^{-3}	$4.2 \times 10^{-9}/L$	$1.41 \times 10^{-5}/L$	gross
3rd step λ_s (84.2 μm)	1.43×10^{-2}	$2.5 \times 10^{-8}/L$	$6.0 \times 10^{-7}/L$	gross
4th step λ (3.508 μm)	2.86×10^{-2}	—	7.0×10^{-8}	fine

note: L in meter.

在双谱线 He-Ne 激光干涉测长系统中, 引进双谱线 $3.51\ \mu\text{m}$ 和 $3.37\ \mu\text{m}$ He-Ne 激光器, 就能克服上述不足, 实现向单波长测量的过渡。

He-Xe 激光器的两条红外谱线 $3.51\ \mu\text{m}$ 和 $3.37\ \mu\text{m}$ 可在同一谐振腔内同时振荡^[4], 其合成波长为 $\lambda_s \approx 84.2\ \mu\text{m}$ 。当这种 He-Xe 激光器和双谱线 He-Ne 激光器联合作为合成波干涉测长系统的光源时, 可以形成图 7 所示的四级合成波(包括单波长)测量链。当图中给出的过渡条件得到满足, 并且, 设最终测长精度为 $\Delta L = 0.05\ \mu\text{m} + 10^{-7} \cdot L$, 则计算得出的测相精度 $\delta\epsilon$ 、波长比不稳定度 δf 和单波长频率稳定度 $\delta\nu/\nu$ 应满足表 2 所示的要求。

由表中数据可以看出, 已经研制的双谱线 He-Ne 激光器的性能已能满足测量要求。双谱线 $3.51\ \mu\text{m}$ 和 $3.37\ \mu\text{m}$ He-Xe 激光器, 在日本已经研制成功^[4], 并被用于合成波干涉测长实验。根据日本研制的双谱线 He-Xe 激光器的性能指标, 本方案可在 $50\sim 60\ \text{m}$ 范围内, 达到优于 1×10^{-7} 的测长精度。由于实现了向单波长 $3.508\ \mu\text{m}$ 的过渡, 所以, 这个方案对较小的距离(如小于 $5\ \text{m}$)也能保证优于 1×10^{-7} 的测长精度。此外, 如果 He-Xe 激光器单波长的稳频精度达到 6.0×10^{-9} , 光波 $3.508\ \mu\text{m}$ 的测相精度达到 2.46×10^{-3} , 各级 δf 满足要求, 那么, 本方案的测长精度可进一步提高到 $\Delta L = 0.005\ \mu\text{m} + 10^{-8} \cdot L$ 的水平。

作者感谢杜继楨高级工程师、宗维千、姜培兰和郭宏同志参加了双谱线 He-Ne 激光器的研制工作; 感谢硕士生葛晓菁参加了 He-Ne 激光器的前期研究工作; 感谢博士生邓罗根同志提供了频率稳定度和测相精度方面的实验数据。

参 考 文 献

- 1 G. L. Bourdet *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 1754(1982)
- 2 C. W. Gillard *et al.*, *Opt. Eng.*, **22**(3), 348(1983)
- 3 H. Mastumoto, *Appl. Opt.*, **25**(4), 493(1986)
- 4 H. Mastumoto, *Appl. Opt.*, **20**(2), 231(1981)
- 5 P. W. Murphy, *J. Opt. Soc. Am.*, **58**(9), 1200(1968)