

# 对JSG-1型激光速度干涉仪的 条纹常数的进一步修正

李泽仁

(西南流体物理研究所)

**摘要** 本文详细讨论了由于JSG-1激光速度干涉仪中延迟元件折射率随光波波长变化而改变, 以及由于直接支路端镜 $M_1$ 和延迟支路端镜 $M_2$ 的相对位置不满足准零程差条件时, 对该仪器的条纹常数的影响, 给出了对条纹常数的修正因子, 并将条纹常数的相对误差和条纹数的测试误差进行了比较。这对提高JSG-1型激光速度干涉仪的测试精度具有重要意义。

**关键词** 激光速度干涉仪 条纹常数 条纹数

## 1. 引言

JSG-1型激光速度干涉仪具有较高的测试精度和十分广泛的应用范围。我们已用该仪器测量了高压冲击下, 铁、铜、钨等材料样品的自由面速度和“三七”炮炮弹在膛内的速度, 均取得了较好的结果<sup>[1, 2]</sup>。目前, 我们正准备用该仪器测量高压冲击下靶板的层裂, 材料等熵压缩状态方程等。

随着JSG-1型激光速度干涉仪被广泛地应用于各个领域, 要求测试精度越来越高。在以前发表的有关文章中, 我们对测试精度进行了分析, 讨论, 并给出了测试精度为3%的结果, 但这些讨论是针对条纹数 $F(t)$ 的测试误差进行的。对仪器中延迟元件折射率随光的波长变化而改变, 以及 $M_1$ 、 $M_2$ (图1所示)的相对位置不满足准零程差条件时, 引起的条纹常数误差, 进而对测试精度的影响, 没有讨论。对于标准具延迟系统, 条纹常数的相对误差有百分之几, 和以前讨论的测试误差具有相同量级。因此, 对其进行讨论、修正是十分必要的。

## 2. 条纹常数误差对测试精度的影响

JSG-1型激光速度干涉仪具有两种延迟系统, 一种是用标准具延迟的低灵敏度系统, 另一种是用共焦透镜组延迟的高灵敏度系统。使用时, 不同灵敏度的系统可以相互配合, 同时测量运动体反射表面的速度。这两种干涉系统的原理示于图1。

在图1(a)中,  $l_1$ 是直接支路中高反镜 $M_1$ 到主分束镜的距离,  $l_2$ 是延迟支路中高反镜 $M_2$ 到主分束镜的距离,  $h$ 为标准具厚度,  $d_1$ 为主分束镜厚度, 而 $\theta$ 是入射光束相对于主分束镜分光表面的入射角。在图1(b)中,  $l_1'$ 是直接支路中高反镜 $M_1$ 到主分束镜的距离,  $l_2'$ 为透镜前焦面到主分束镜的距离,  $S_f$ 是透镜的顶焦距,  $l_0$ 为共焦透镜之间的顶点间距,  $d_2$ 是透镜厚度,  $d_1$ ,  $\theta$ 的定义同前。

据JSG-1型激光速度干涉仪的原理, 被测运动体反射表面速度 $u(t)$ 与讯号条纹数 $F(t)$

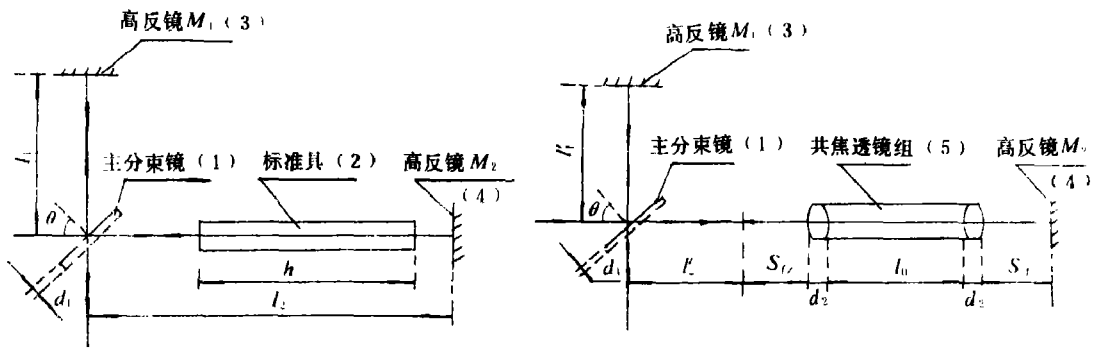


图1 两种相干延迟系统原理图

Fig.1 Principle diagram of two kinds of interference system

- (1) Main splitter (2) Etalon (3) Mirror  $M_1$   
 (4) Mirror  $M_2$  (5) Cofocal optical system

有如下关系<sup>[3]</sup>

$$u(t) = KF(t) \quad (1)$$

式中,  $K$  叫做条纹常数, 它表示每个讯号条纹所代表的速度变化, 因而也叫速度灵敏度。  $K$  与延迟元件的折射率、长度或透镜焦距, 以及  $M_1$ ,  $M_2$  的相对位置等有关。如果我们不考虑延迟元件折射率随波长变化对  $K$  的影响, 并假定  $M_1$ ,  $M_2$  的相对位置满足准零程差条件<sup>[4]</sup>, 则条纹常数  $K$  由 (2) 式给出

$$K = \frac{\lambda_0}{2\tau(1 + \Delta\nu/\nu_0)} \quad (2)$$

其中,  $\lambda_0$  是激光器的工作波长,  $(1 + \Delta\nu/\nu_0)$  是当样品表面使用了窗材料时, 该材料的折射率随冲击应力变化的修正。  $\Delta\nu/\nu_0$  需由实验确定, 不同的窗材料其值不同, 这里我们不讨论它的影响。  $\tau$  是延迟时间, 对于图 1 所示的相干系统, 有

$$\tau = \begin{cases} (2/c) [(n_0 - 1/n_0)h + (n_{10} - 1/n_{10})d_1/\cos i] & \text{标准具延迟系统} \\ (2/c) [2S_f + l_0 + (n_{10} - 1/n_{10})d_1/\cos i + (n_{20} - 1)d_2] & \text{共焦透镜延迟系统} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $c$  为光速,  $n_0$ ,  $n_{10}$ ,  $n_{20}$  分别是标准具、主分束镜和透镜材料相对于  $\lambda_0$  波长的折射率, 我们没有考虑  $\lambda_0/8$  波片对光波的延迟。在 JSG-1 型激光速度干涉仪中, 使用云母  $\lambda_0/8$  波片, 厚度大约十几微米, 因而可以忽略延迟效应。  $i$  是光束在分束镜中的折射角, 它与入射角  $\theta$  满足折射定律

$$\sin \theta = n_{10} \sin i$$

我们用已知的参数计算了条纹常数。表 1 给出了 JSG-1 型激光速度干涉仪各档的延迟时间和条纹常数。

进一步指出, 表 1 中的延迟时间和条纹常数是在假定延迟元件的折射率不随光的波长变化而改变, 和  $M_1$ ,  $M_2$  的相对位置满足准零程差条件时得出的。如果不满足这两个条件, 实际的条纹常数将与表 1 中给出的数值有所不同, 进而给测试结果带来误差。设速度误差为  $\Delta u$ ,

表1 各档的延迟时间和条纹常数

Table 1 Delay time and fringe constant of each measuring grade

档 次	1	2	4	4	5	6	7
条纹常数 $K(\text{m/s})/\text{fringe}$	$1.96 \times 10$	$3.88 \times 10$	$1.13 \times 10^2$	$2.55 \times 10^2$	$5.23 \times 10^2$	$9.903 \times 10^2$	$2.131 \times 10^3$
延迟时间 $\tau$ (ns)	16.13	8.153	2.803	1.242	0.6045	0.3194	0.1484

条纹数误差为 $\Delta F$ , 实际条纹常数 $K'$ 与表1中给出的值相差 $\Delta K$ , 对(1)式微分, 得 $\Delta u$ 与 $\Delta F$ ,  $\Delta K$ 之间的关系为

$$\Delta u = K \Delta F + F \Delta K \quad (4)$$

相对速度的均方误差为

$$\frac{\Delta u}{u} = \left[ \left( \frac{\Delta u}{u} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[ \left( \frac{\Delta K}{K} \right)^2 + \left( \frac{\Delta F}{F} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

(5)式表明, 相对速度误差不但与条纹数的相对测试误差有关, 而且与相对条纹常数误差有关, 如果 $\Delta K/K$ 较大, 将给测试精度带来较大的影响。 $\Delta K$ 由两种因素引起, 一是仪器中延迟元件的折射率随光波波长变化而改变, 另一是应用中 $M_1$ ,  $M_2$ 的相对位置不完全满足准零程差条件。实际上, 由于多普勒效应, 相干光的波长随被测运动体反射表面速度 $u(t)$ 变化而改变, 而延迟元件的折射率是光的波长的函数, 因而总是变化的。条纹常数误差 $\Delta K$ 也总是存在的。但由于 $\Delta K$ 只与延迟元件的固有特性以及仪器的装调有关, 并且波长变化不大, 因而通过对条纹常数进行修正, 就可以克服仪器中延迟元件的折射率随光波波长变化而改变, 以及 $M_1$ ,  $M_2$ 的相对位置不满足准零程差条件时对测试精度的影响, 使实验结果具有较高的精度。

### 3. 仪器中延迟元件折射率随光波波长改变时的条纹常数修正

假定 $M_1$ ,  $M_2$ 的相对位置满足准零程差条件。设被测速度为 $u(t)$ , 则多普勒效应引起的光波波长改变 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = -\lambda_0 \cdot 2u(t)/c \quad (6)$$

或

$$\lambda = \lambda_0 [1 - (2u(t)/c)] \quad (7)$$

由于速度 $u(t) < 10^3 \text{ m/s}$ , 因而波长变化不大, 我们用一修正因子 $\delta$ 来表示, 因仪器中延迟元件的折射率随光波波长变化, 而引起的条纹常数的变化, 即 $K' = \lambda_0/2\tau(1 + \delta)$ 。

对于标准具延迟系统(图1(a)), 设 $u(t) = 0$ 时的相干级次为 $N_0$ , 速度为 $u(t)$ , 即光的波长为 $\lambda$ 时的相干级次为 $N$ , 美国科学家L. Barker等认为 $t$ 时刻记录到的讯号条纹数 $F(t)$ 是二相干级次之差<sup>[5]</sup>, 即

$$F(t) = N - N_0 \quad (8)$$

按照这一观点, 对于JSG-1激光速度干涉仪给出 $N$ ,  $N_0$ 的关系式为

$$N = 2\Delta L/\lambda = 2h(n-1/n_0)/\lambda + 2d(n_1-1/n_0)/\lambda \cos i \quad (9)$$

$$N_0 = \frac{2\Delta L_0}{\lambda_0} = \frac{2h}{\lambda} \left( n_0 - \frac{1}{n_0} \right) + \frac{2}{\lambda_0 \cos i} \left( n_{10} - \frac{1}{n_{10}} \right) \quad (10)$$

式中,  $\Delta L$  是速度为  $u(t)$  时延迟支路中的光波相对于直接支路中的光波的光程差,  $\Delta L_0$  则是  $u(t) = 0$  时的光程差。将 (9)、(10) 式代入 (8) 式, 得

$$F(t) = 2h \left[ \frac{n - \frac{1}{n}}{\lambda} - \frac{n_0 - \frac{1}{n_0}}{\lambda_0} \right] + \frac{2d_1}{\cos i} \left[ \frac{n_1 - \frac{1}{n_{10}}}{\lambda} - \frac{n_{10} - \frac{1}{n_{10}}}{\lambda_0} \right] \quad (11)$$

其中,  $n$ 、 $n_1$  分别是光波波长为  $\lambda$  时标准具和主分束镜的折射率。由于光的波长变化不大, 可将  $n$  和  $n_1$  在  $\lambda = \lambda_0$  处展开, 并取一级近似, 有

$$n = n_0 + \left. \frac{dn}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} \cdot \Delta\lambda, \quad n_1 = n_{10} + \left. \frac{dn_1}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} \cdot \Delta\lambda \quad (12)$$

将 (12) 式代入 (11) 式, 并取一级近似, 得到  $F(t)$  与速度  $u(t)$  的关系

$$u(t) = \frac{\lambda_0}{2\tau(1+\delta)} F(t) \quad (13)$$

$$K = \frac{\lambda_0}{2\tau(1+\delta)} \quad (14)$$

其中,  $(1+\delta)$  就是由仪器中延迟元件的折射率随波长改变时条纹常数  $K$  的修正项。对于标准具延迟系统,  $\delta = \delta_a$  为

$$\delta_a = -\frac{2\lambda_0}{\tau c} \left[ h \cdot \left. \frac{dn}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} + \frac{d_1}{\cos i} \cdot \left. \frac{dn_1}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} \right] \left( 1 + \frac{2u(t)}{c} \right) \quad (15)$$

另外, 当光波波长变化不大时, 折射率  $n'$  随光的波长变化的关系由哥西公式给出

$$n' = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (16)$$

式中,  $A$ 、 $B$  均为与材料性质有关的常数。我们用公式 (15) 计算了  $\delta_a$  的大小, 得出  $\delta_a \doteq 2.5\%$ 。如果用该值计算相对条纹常数误差, 则  $|\Delta K/K| \doteq 2.5\%$ , 基本上与条纹数的相对测试误差大小相同。可见, 不考虑仪器中延迟元件的折射率随光波波长变化而改变, 直接用表 1 中给出的值计算速度  $u(t)$ , 将会引起百分之几的误差, 对测试精度具有重要影响。

同样, 对于图 1(b) 的共焦透镜延迟系统, 得到相应的修正因子  $\delta_l$  为

$$\delta_l = -\frac{2\lambda_0}{\tau c} \left[ 2d_2 \left. \frac{dn_2}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} + \frac{d_1}{\cos i} \left. \frac{dn_1}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} \right] \quad (17)$$

(17) 式中,  $n_2$  是当光的波长为  $\lambda$  时, 透镜材料的折射率。用公式 (17) 算出最大修正因子  $\delta_{lmax} = 0.15\%$ , 对测试精度影响很小, 因而  $\delta_l$  可以忽略。

#### 4. $M_1$ 、 $M_2$ 相对位置不满足准零程差条件时对条纹常数的修正

在 JSG-1 型激光速度干涉仪的装调中, 使  $M_1$ 、 $M_2$  的相对位置满足准零程差条件是装调的关键。但在实际应用中, 每次实验前都要调节  $M_1$  或  $M_2$ , 以得到最好对比度的干涉图样, 因而准零程差条件是很难完全满足的, 实际的条纹常数也将和表 1 中的数值有所不同。设延迟元件折射率随光的波长变化对条纹常数的影响已被修正。对于标准具延迟系统,  $M_1$ 、 $M_2$  的相对位置 (假定  $M_1$  固定) 有如图 2 的几种情况:

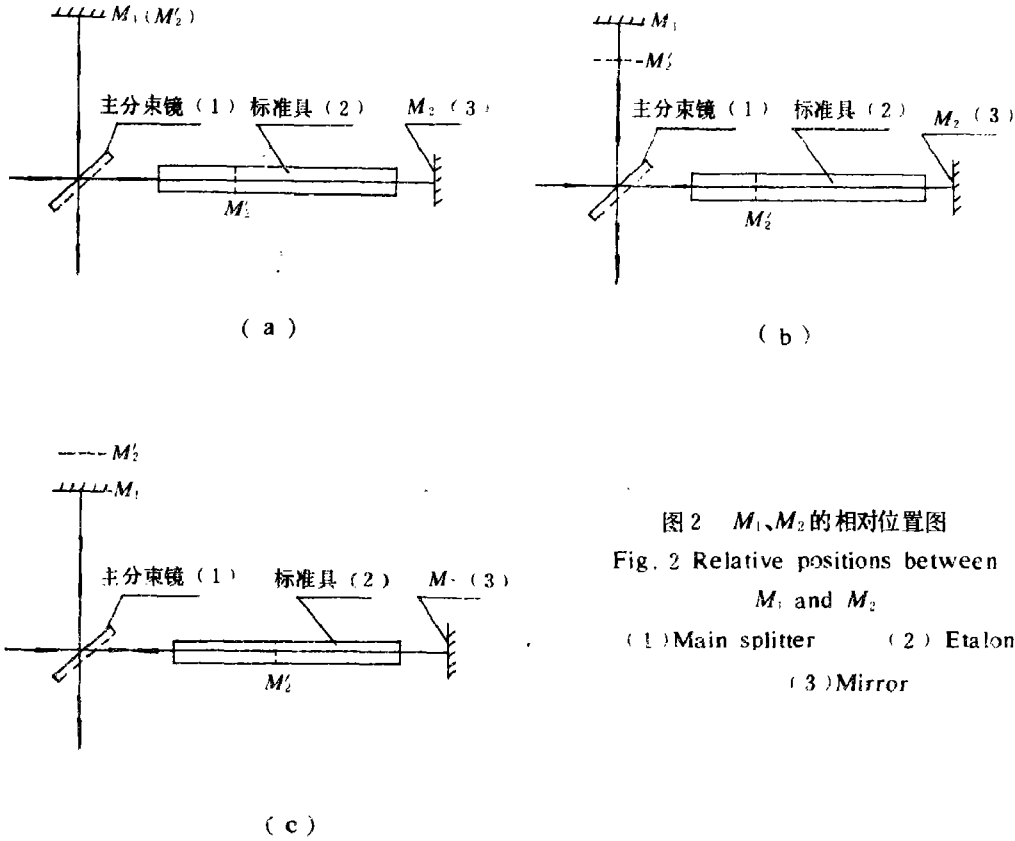


图2  $M_1, M_2$  的相对位置图  
 Fig. 2 Relative positions between  $M_1$  and  $M_2$   
 (1) Main splitter (2) Etalon  
 (3) Mirror

图2中， $M_2'$  是高反镜  $M_2$  相对于主分束镜的象。在图2(a)中， $M_1, M_2$  的相对位置满足准零程差条件，两支路中光波的光程差为

$$\Delta L = \left( n_0 - \frac{1}{n_3} \right) h + \left( n_{10} - \frac{1}{n_{10}} \right) \frac{d_i}{\cos i} \quad (18)$$

图2(b)显示了实际光程差比满足准零程差条件时小的情况，即  $\Delta L' = \Delta L - \overline{M_1 M_2'}$ 。由于条纹常数与光程差成反比，因而实际条纹常数  $K''$  将比表1中给出的数值大。对于图2(c)，情况正好相反。无论哪一种情况都将给测试结果带来误差。

设  $M_1, M_2$  的相对位置在未满足准零程差条件时的光程差  $\Delta L'$  与它满足该条件时的光程差  $\Delta L$  之差为  $\Delta$ ，即

$$\Delta = | \Delta L' - \Delta L | \quad (19)$$

静态 ( $u(t) = 0$ ) 时，我们观察到的干涉图样是等倾干涉圆环。设干涉环中心的干涉级次为  $M_0$ ，与相干光束最大发散角  $\alpha$  相对应的干涉级次为  $M_0 - M$ ，则  $\Delta$  与  $M, \alpha$  之间有如下关系

$$\Delta = \frac{\lambda_0}{4 \sin^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right)} M \quad (20)$$

在(20)式中,  $M$ 不一定为整数。当 $M_1$ 、 $M_2$ 的相对位置满足准零程差条件(图3(a))时,  $\Delta = 0$ ,  $M = 0$ , 此时观察到全场干涉图样。当 $\Delta \neq 0$ (图3(b)、(c))时, 我们将观察到有一定干涉级次的干涉图样。条纹常数误差与 $\Delta$ 的关系通过下式得到

$$|\Delta\tau| = \frac{1}{2c} |\Delta| = \frac{\lambda_0}{2c \sin^2(\frac{a}{2})} M \quad (21)$$

$$\left| \frac{\Delta K}{K} \right| = \frac{|\Delta\tau|}{\tau} = \frac{\lambda_0}{2c \sin^2(\frac{a}{2})} \frac{M}{\tau} \quad (22)$$

如果 $a$ 按 $1^\circ$ 计算, 则有

$$\frac{|\Delta K|}{K} = 1.38 \times 10^{-2} \frac{M}{\tau} \quad (23)$$

其中 $\Delta K = K'' - K$ 。 $\tau$ 的单位是纳秒。可见,  $M$ 越大即 $M_1$ 、 $M_2$ 的相对位置与准零程差条件的要求偏差越大, 条纹常数误差越大。如果 $M$ 按0.5计, 由(23)式算出标准具延迟系统最大相对条纹常数误差 $(|\Delta K|/K)_{max} = 4.6\%$ 。对于共焦透镜组延迟系统, (23)式同样适用。 $M$ 按0.5计得最大相对条纹常数误差为0.56%。表2列出了 $M$ 按0.5计时, 各档条纹常数误差值。

表 2 各档的相对条纹常数误差

Table 2 Errors of relative fringe constant of each measuring grade

档 次	1	2	3	4	5	6	7
相对条纹常数误差 (%)	0.043	0.085	0.245	0.556	1.14	2.16	4.65

在上面的讨论中, 没有考虑 $\Delta K$ 的正负。实际上由于静态时观察到的干涉图是等倾干涉条纹, 按等倾干涉环的移动规律, 只要轻轻调节一下 $M_1$ 或 $M_2$ , 就能判断 $\Delta$ 的正负, 进而确定 $\Delta K$ 的正负。另外, 将 $M_1$ 、 $M_2$ 的相对位置调节到满足准零程差条件, 即 $M = 0$ 是一件耐心, 细致的工作, 往往比较困难。因此利用相干级次 $M$ 确定条纹常数的修正因子, 降低测试误差, 将能达到事半功倍的效果。

### 5. 结语

在以前发表的有关JSG-1型激光速度干涉仪的文章中, 讨论了条纹数 $F(t)$ 的相对测试误差, 并给出了当讯号曲线的讯噪比大于或等于10:1, 速度大于40m/s时, 仪器的测试精度为3%。这里我们进一步讨论了引起条纹常数误差的主要因素和修正方法以及对测试精度的影响。从上面的讨论看到, 对于标准具延迟系统, 由条纹常数误差对测试精度的影响足以和条纹数的测试误差对测试精度的影响相比。要得到较高测试精度的实验结果, 必须对其进行修正, 这正是我们的目的。仪器中延迟元件折射率随光波波长变化而改变对条纹常数的修正因子 $\delta$ 已给出, 由 $M_1$ 、 $M_2$ 的相对位置不满足准零程差条件时对条纹常数的修正因子由 $M$ 确定。 $M$ 可通过比较静态干涉环的级次得到。这样, 最终得到消除了条纹常数误差的, 具有较高测试精度的实验结果, 对JSG-1型激光速度干涉仪的开拓应用具有重要意义。

胡绍楼、马如超、李大红老师对本文进行了审阅, 特此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] JSG-1型激光速度干涉仪鉴定会资料汇编, 西南流体物理研究所(1987).  
[2] 马如超等, 私人通讯.  
[3] Barker, L. M. et al., *J. Appl. Phys.*, **43** (11) (1942), 4669.  
[4] 胡绍楼等, 爆炸与冲击, **7** (3) (1987), 257.  
[5] Barker, L. M. et al., *J. Appl. Phys.*, **45** (8) (1974), 3692.

## A FURTHER MODIFICATION FOR THE FRINGE CONSTANT OF MODEL JSG-1 LASER VELOCITY INTERFEROMETER

Li Zeren

(*Southwest Institute of Fluid Physics*)

**ABSTRACT** The influences caused by both the refraction index variation with wavelength in the delay element and the unsatisfaction of quasi-zero path difference condition between mirror  $M_1$  in direct-leg and mirror  $M_2$  in delay-leg, for the fringe constant of model JSG-1 laser velocity interferometer are discussed in this paper in detail. The modification factor of fringe constant is given. The relative error of the fringe constant has been compared with the measuring error of the fringe number.

This modification has important significance for improving the measuring accuracy of the model JSG-1 laser velocity interferometer.

**KEY WORDS** laser velocity interferometer, fringe constant, fringe number.