

混合型非线性 Fabry-Perot 标准具的 光学双稳特性

李永贵 张洪钧 杨君慧 高存秀

(中国科学院物理研究所)

1981 年 7 月 10 日收到

提 要

本文描述了一种用光电反馈改变 Fabry-Perot (以下简称 F-P) 标准具腔长的办法来实现光学双稳工作的装置。我们从动态方程出发,得到了表述双稳行为的平衡态解析解;讨论并观察了光学双稳特性和线性调制特性;分析了系统的稳定性和瞬态过程中的“临界延迟”效应,同时给出与理论相一致的实验结果。

一、前 言

近年来,对光学双稳装置 (optical bistable device) 的研究引起了人们的兴趣,这不仅是由于它在理论研究方面成为非线性光学的一个新领域,而且有应用的前景。

1969 年 Seidel^[1,2] 等首先提出 F-P 共振腔内放有可饱和吸收体的装置可实现光学双稳运转;1974 年 McCall 从理论上证明了吸收型光学双稳的存在^[3],1975 年观察到了这种现象^[4];其后, Felber 等人又用 Kerr 介质代替可饱和吸收体获得同样的结果^[5]。由于上述光学双稳装置都是纯粹由光学元件组成,因此常称做“纯光学型”双稳,其输出和输入间的非线性是由入射光场本身的场强对 F-P 内非线性介质产生三阶极化所引起。

1977 年 Smith 又在此基础上提出了一种电光反馈光学双稳装置^[6],其原理是将 F-P 输出光束的一部分通过电学反馈装置来控制 F-P 标准具的工作状态,这样,电学反馈装置就象是“人为的非线性”,起到“纯光学型”双稳装置 F-P 腔内物质固有非线性同样的作用。其后,又报道了一些类似的改进型装置^[7,8]。对后一类光学双稳装置,由于是光学元件和电学系统联合组成,故常称做“混合型”光学双稳装置。

“混合型”同“纯光学型”相比,最大优越性是可在弱入射光场下使用,可做成光控或电控实时光调制器。若运用不同的工作方式,可实现光学限幅、微分放大、光强稳定、光学延时、光逻辑运算等功能。

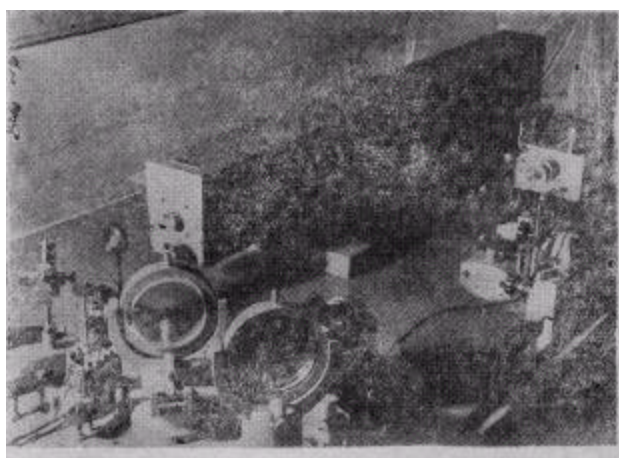
1978 年 Shen^[9],1979 年 Bonifacio^[10] 从理论和实验上分析了“纯光学型”双稳的瞬态特性,后来 Garmire^[11] 和文献 [12] 又分别观察了正交偏振器下的电光晶体和液晶光学双稳的“临界延迟” (critical slowing down) 现象。这些研究都从不同的方面提供了各类光学双稳器件的时间特性。

本文描述了一种用改变 F-P 标准具腔长的办法来实现光学双稳方式工作的“混合

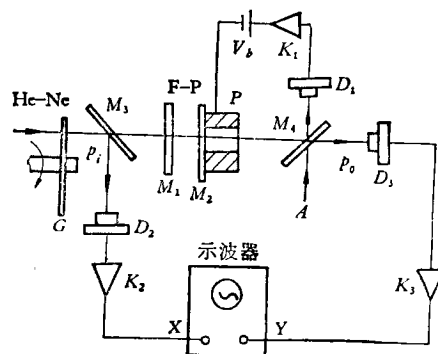
型”装置,并从动态方程出发,得到表征双稳行为的平衡态解析解;讨论了双稳及线性调制特性;分析了系统的稳定性和瞬态过程中的“临界延迟”效应,同时给出与理论相一致的实验结果。

二、实验装置及原理

实验装置如图 1。间距约 1mm,对 He-Ne 激光波长 $6328 \text{ \AA}$ 反射率为 98% 的两块平面反射镜 M_1, M_2 组成线性 F-P 标准具。 M_1 固定在稳定的机械支座上,另一块反射镜 M_2 通过一个筒状的压电陶瓷 P 与支座固定。 M_3, M_4 是分束器,前者使入射光束的一部分经检测器 D_2 、放大器 K_2 将输入信号取样送至示波器 X 轴,后者一方面让透过光作为输出光,经 D_3, K_3 转换成放大的电信号驱动示波器的 Y 轴,另一方面将 F-P 输出光的一部分经检测器 D_1 、放大器 K_1 、偏置电源 V_b 、光电转换放大后加在压电陶瓷 P 上。这样 F-P 标准具的工作状态除由本身的参数(反射率 R 、初始间距 l_0)决定外,其间距 l 还受输出光强大小的控制。图 1 中 G 是圆型连续尖契,转动时可连续改变输入光强。示波器直接显示输出光强随输入光强的变化曲线。



(a)



(b)

图 1

设标准具两反射镜的反射率为 R , 初始间距为 l_0 , 腔内介质(空气)折射率为 n , 输入光强为 p_i , 输出光强为 p_o , 不加光电反馈时强度透过率为

$$T = \frac{p_o}{p_i} = \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad (1)$$

其中 $F = 4R/(1 - R)^2$, 标准具细度; $\varphi = 4\pi n l_0 / \lambda$, 光在腔内往返一次所经历的相移。当 R, n, l_0 确定后, T 是定值, p_o 和 p_i 是线性关系, 这时标准具称线性标准具; 加上反馈信号后, 如果使腔内的整相移 φ 和输出 p_o 成正比, 则有

$$\varphi = \varphi_0 + k p_o, \quad (2)$$

其中 φ_0 为初始偏置, 由初始间隔 l_0 和偏置电压 V_b 决定, k 是转换系数, 为常数。

联立方程(1)和(2)知, 当 R, n, k, V_b 确定后, p_o 和 p_i 呈非线性关系, 此时标准具称

非线性标准具。

以 φ_0 为参量求解方程(1),(2), p_o 和 p_i 间可产生如图 2(a) 所示曲线。可以看出,对某一段输入范围 p_i , $p_i^- < p_i < p_i^+$, 输出有两个稳定的工作状态 (AB 和 CD 段), 这种工作方式称非线性标准具的双稳工作方式。

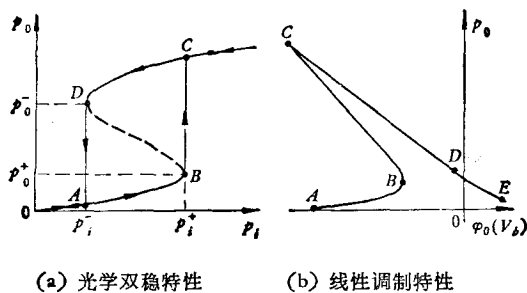


图 2

以 p_i 为参量, 改变 φ_0 (即 V_b), 求解方程(1),(2), 则 p_o 和 φ_0 间有图 2(b) 所示曲线, 这时曲线 CD 段几乎是一条直线。如果让系统在 CD 段工作, p_o 和 φ_0 间有很好的线性关系, 这种工作方式称非线性标准具的线性调制工作方式。

上述是输入输出间的平衡态行为。如果对给定的输入 $p_i(t)$, 考察系统输出 $p_o(t)$, 将涉及到时间特性, 即瞬态过程。最简单的瞬态过程是系统对阶跃输入函数的响应。

三、动态方程及平衡态解

信号在非线性 F-P 标准具内的传输按两个过程分析, 这里采用 Shen 的方法。将光线进入标准具, 经腔内多次反射到输出, 称“传输过程”; 输出光一部分经光电转换后控制光线在腔内的整程相移 φ , 这个过程称“反馈过程”。

1. 传输方程

设入射光波振幅 $E_i(t) = \varepsilon_i(t)e^{-i\omega t}$, 标准具两反射镜光强反射率 R' , 在弱光场下, 入射光场强大小不改变腔内介质空气的折射率 n , 光在腔内的吸收和散射损耗和两镜面平行度微小失调而引起的损耗都归并在反射率 R' 内, 进而用 R 代替 R' , 于是对在 t' 时刻的光增量 $d\varepsilon_i(t')$, 当在腔内往返第 m 次后 (m 整数) 于 t 时刻在输出端的透过振幅为

$$d\varepsilon_i(t')(\sqrt{R})^{2m} \cdot u\left[t - \left(m + \frac{1}{2}\right)t_R - t'\right],$$

其中 $u\left[t - \left(m + \frac{1}{2}\right)t_R - t'\right]$ 是单位阶跃函数, $t_R = 2nl/c$ 是光在腔内往返一个来回所用的时间。所经历的相移可表示为

$$e^{i\varphi[t' + (m + \frac{1}{2})t_R]} = e^{i\frac{n\omega}{c}l[t' + (m + \frac{1}{2})t_R]}.$$

动态情况下, 当 $\varepsilon_i(t')$ 的变化比 t_R 大得多时, 在这 m 次反射的过程中, 腔长可用同一个 t' 时刻的腔长 $l(t')$ 来近似:

$$l \left[t' + \left(m + \frac{1}{2} \right) t_R \right] \doteq l_0 + m[l_0 + \Delta l(t')].$$

令

$$\omega n l_0 / c = \varphi_0, \quad \omega n \Delta l(t') / c = \Delta \varphi(t'), \quad \varphi(t') = \varphi_0 + \Delta \varphi(t'),$$

则

$$e^{i\varphi[t' + (m + \frac{1}{2})t_R]} \doteq e^{i\varphi_0 + im\varphi(t')}.$$

由 $d\varepsilon_i(t')$ 引起的这 m 束透射光的相干迭加为

$$\sum_{m=0}^M d\varepsilon_i(t') (\sqrt{R})^{2m} \cdot e^{i\varphi_0} \cdot e^{im\varphi(t')} \cdot u \left[t - \left(m + \frac{1}{2} \right) t_R - t' \right].$$

整个输入光在 t 时刻的总透射振幅

$$E_0(t) = (1 - R) e^{i(\varphi_0 - \omega t)} \int_0^t \sum_{m=0}^M d\varepsilon_i(t') R^m e^{im\varphi(t')} u \left[t - \left(m + \frac{1}{2} \right) t_R - t' \right].$$

考虑到 $m \leq \frac{t - t'}{t_R} - \frac{1}{2}$, 腔的建立时间 $\tau_1 = \frac{t_R}{|1 - R e^{i\varphi}|}$, $R \doteq 1$, 以及 $\varphi(t')$ 在 2π 附近的慢变化, 上式可近似写作

$$E_0(t) = (1 - R) e^{i(\varphi_0 - \omega t)} \int_0^t \frac{1 - R e^{[i\varphi(t') - \frac{t-t'}{\tau_1}]}}{1 - R e^{i\varphi(t')}} \cdot \frac{d\varepsilon_i(t')}{dt'} \cdot dt'. \quad (3)$$

该方程描述了光线通过标准具时的动态传输特性, 称为传输方程.

2. 反馈方程

设在反馈回路中, 光电检测器、放大器、压电陶瓷等的有限带宽使整个反馈回路有时间常数 τ_2 , 当不存在强迫项时, 标准具的整程相移 $\varphi(t)$ 在任一时刻 t 的变化应与 $(\varphi - \varphi_0)$, $1/\tau_2$ 和 dt 成正比

$$d\varphi(t) = -(\varphi - \varphi_0) \frac{1}{\tau_2} dt,$$

其中“—”号表示衰减. 考虑到反馈系统的强迫输入项 $k p_0 = k |E_0(t)|^2$, 上式写为

$$\tau_2 \frac{d\varphi}{dt} = \varphi_0 - \varphi + k |E_0(t)|^2. \quad (4)$$

该方程称反馈方程.

3. 平衡态解

联立方程(3), (4)可求得在给定初始条件下的瞬态解. 对于输入为近似三角波的情况文献[9]中已报道. 现考虑平衡态情况, 由 $d\varphi/dt = 0$, 方程(4)变为

$$\varphi = \varphi_0 + k |E_0|^2. \quad (5)$$

(5)式代入(3)式, 并令 $t - t' \gg \tau_1$, (3)变为

$$E_0 = \frac{(1 - R)\varepsilon_i}{1 - R e^{i\varphi}} e^{i(\varphi_0 - \omega t)}. \quad (6)$$

令 $F = \frac{4R}{(1 - R)^2}$, $k |E_0|^2 = x$, $k |\varepsilon_i|^2 = u$, (5), (6) 式变为

$$\varphi = \varphi_0 + x, \quad (7)$$

$$x = \frac{u}{1 + F \sin^2 \frac{\varphi}{2}}. \quad (8)$$

或写作一个方程

$$u = x \left[1 + F \sin^2 \frac{(x + \varphi_0)}{2} \right]. \quad (9)$$

方程(9)描述了非线性标准具的平衡态行为.

四、光学双稳特性

对非线性方程(9),以 φ_0 为参量,理论计算的输出 x 与输入 u 的关系如图 3 所示. 计算中 $F = 160$, u 限制在有限的范围,使得正弦项宗量中 $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$. 由图 3 看出,当 $\varphi_0 > \Phi_0$ 时, x 是 u 的单值函数,当 $\varphi_0 < \Phi_0$ 时,在一定的输入区域内 x 是 u 的多值函数. Φ_0 为临界偏置点.

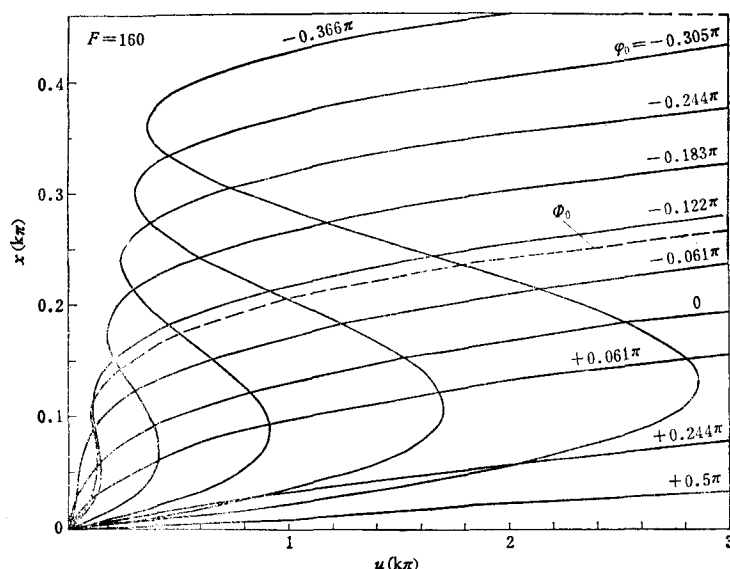


图 3 不同 φ_0 下的输入输出曲线

图 4(a) 是一支典型的具有双值时的曲线. 当输入 u 在 $u^- - u^+$ 范围内时, 输出 x 可以有三个值. 本文第六节将证明, 曲线中 OAB 段和 DCE 段是(3),(4)式稳定的平衡态解, BD 段是不稳定的平衡态解. 因此, 当 u 从零向着超过 u^+ 的方向增加时, 输出 x 将沿着 $OABCE$ 的路线非线性增加, 而当 u 从高值减小到零时, x 将沿 $ECD AO$ 的路线非线性减小. $B(u^+, x^+)$ 和 $D(u^-, x^-)$ 是两个状态跳跃点, 前者称“开启点”, 后者称“关闭点”. 图 4(a) 中右边的纵坐标是平衡态时系统不同状态点所对应的相移 φ . F - P 标准具谐振点处 $\varphi = 0$, 此时 $x = u$, 双稳装置有最大透射率. 图 4(b) 是用图 1 实验装置得到的实际照片. 从图 4 看出: 在双稳区间 $u^- - u^+$ 内, 高输出态和低输出态所对应的曲线都是相当平直的, 因此当把这种装置做为光学逻辑元件或光强稳定器时是有其优越性的.

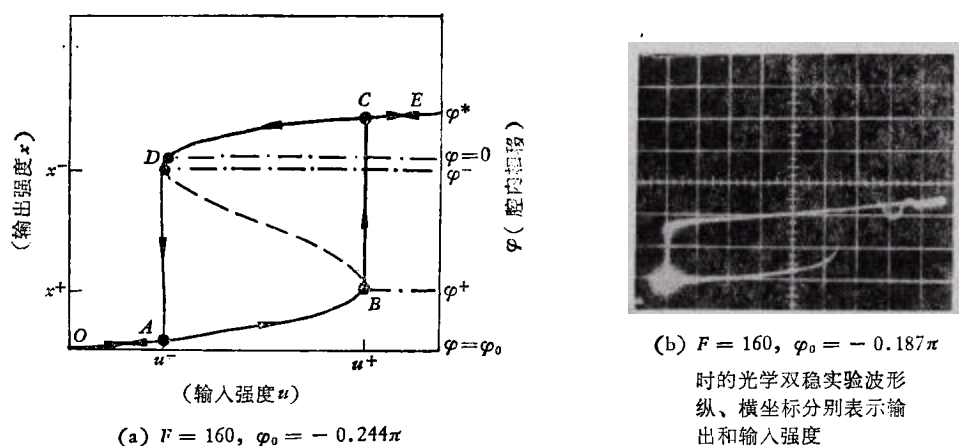


图 4

开启点 由图 4(a), 在 $B(u^+, x^+)$ 点, $x \ll u$, 忽略方程(9)右边第一项, 由 $du/dx = 0$, 近似得到 $u^+ = -(F\varphi_0/3)\sin^2\varphi_0/3$, $x^+ = -\varphi_0/3$.

关闭点 关闭点 $D(u^-, x^-)$ 对应于输入 u 的极小点处, 当方程(9)方括号内的第二项为零时, u 有极小值, 此点对应 $x^- = -\varphi_0$, $u^- = -\varphi_0$.

同样在开启和关闭点的计算中, 限制 φ 在区间 $(-\pi/2, \pi/2)$ 内取值, 因为在此区间外的取值除导致多稳态出现, 数学处理复杂外, 并不增加新的含义, 这里仅考虑双稳态.

临界偏置 Φ_0 如同三极管的基极偏置完全决定着三极管的工作状态一样, 非线性标准具的偏置点 φ_0 决定着非线性标准具的工作状态. 如果将图 3 中 x 与 u 的关系对 φ_0 的依赖画成立体图, 则如图 5 所示. Φ_0 是产生双稳的临界点. 以 φ_0 为常数的平面去截立体图, 会得到双稳曲线, 以 u 为常数的平面去截, 会得到线性调制特性曲线. 图 6 是用图 1 实验装置对不同 φ_0 得到的实验结果. φ_0 的取值为标准具偏离谐振点的弧度数. 在实验中, φ_0 靠调节加在压电陶瓷上的偏置电压 V_b 实现. 从图 6 中看出, 当 $\varphi_0 = -0.0466\pi$ 时, 双稳开始出现, 该点是系统的临界偏置点. 当 $\varphi_0 \leq -0.336\pi$ 时, 双稳又消失, 这是由于此时输入光功率不足以达到“开启点”所需的输入值所致.

临界偏置点 Φ_0 发生在图 4(a) 中 u 的两个极值点(把 u 看作 x 的函数)和拐点重合的地方,

$$\begin{aligned} u'(x^-) &= u'(x^+) = 0, \\ u''(x_{拐}) &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

对(9)式按上两式计算近似得到(在 F 很大情况)

$$\Phi_0 = \frac{2\sqrt{3}}{F} \pi. \quad (11)$$

可见 Φ_0 仅与 F 有关, 理论上当 $F = 160$ 时, $\Phi_0 = 0.022\pi$, 实验上得到 $F = 160$ 时, $\Phi_0 = 0.05\pi$. 由于实验误差, 特别是临界点处双稳是否产生的判断困难, 实验同理论有大的误差. 标准具的 F 值愈高, 能够产生双稳的最小偏置愈小.

F 值对双稳波形有很大影响, F 愈大, 双稳的两个稳定态愈平直. 在开启点后产生的

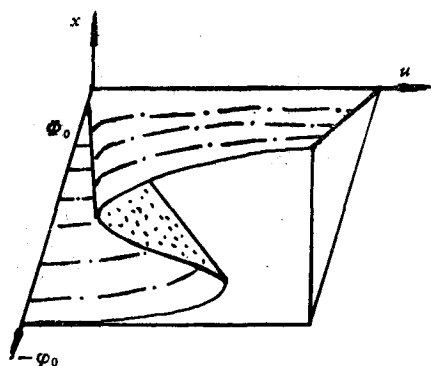


图5 三维坐标下的 x, u, φ_0 关系图
— · — 为稳定区；网点为非稳定区

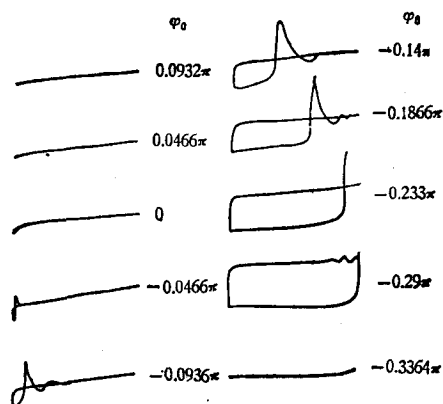


图6 不同偏置 φ_0 下的输出输入波形
 $F = 150, \varphi_0 \pm 0.05\pi$

上冲振荡愈剧烈。这种上冲来源于状态突变时,标准具的动态变化要经历谐振点所致,即相移 φ 要经历从 $\varphi^+, \varphi^-, \varphi = 0$ 到 φ^* (图 4(a)) 的变化过程。在此瞬态变化过程中,标准具的输入输出特性不能用平衡态方程(9)表达。当 τ_2 远大于 τ_1 时,事实上输出按透射率函数(1)式主要由 φ 决定。实验证实,减小 F 可减弱这种振荡。

五、线性调制特性

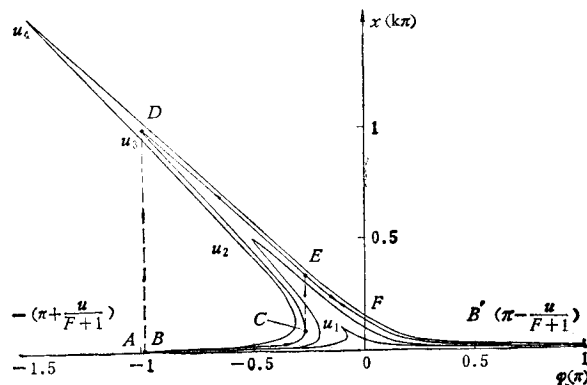
在图 1 的实验中,固定输入光强,以 V_b 作信号源,或者将另外一束控制光信号从 A 点输入给 D_1 , 由 $\varphi_0 = \frac{4\pi n}{\lambda} (l_0 + \alpha V_b)$ 知,此时的标准具相当于以输入 u 为参量求 x 相对于 φ_0 的变化关系 (α 是转换因子)。图 7 是对于不同的 u 值求得的 $x-\varphi_0$ 曲线族,这里仅考虑了 φ_0 在 $(-\pi, +\pi)$ 区间内的变化。由方程(9)容易得到

$$\varphi_0 = \pm 2 \arcsin \sqrt{\frac{1}{F} \left(\frac{u}{x} - 1 \right)} - x, \quad (12)$$

式中正号代表曲线的 DEF 段,负号表示 $ABCD$ 段。同前述双稳特性一样,分支 CD 段也是不稳定的,当 $\varphi_0(V_b)$ 从最小值向最大值增加并返回到最小值时,输出将沿着 $ABCEF$ 和 $FEDBA$ 的回线方向变化,同样有双稳区域存在,有两个状态突跳点。注意到 $\varphi_0 = 2 \arcsin \sqrt{\frac{1}{F} \left(\frac{u}{x} - 1 \right)} - x$ 所产生 DEF 这段分歧解,在一定范围内有很好的线性度,如果非线性标准具工作在这段直线上, x 对 φ_0 有非常宽的线性范围。标准具以此种方式工作,控制信号与输出间将具有很好的线性调制特性。

由(12)式, $0 \leq \frac{1}{F} \left(\frac{u}{x} - 1 \right) \leq 1$, x 的变化范围为 $u/(F+1) \leq x \leq u$, 当 $x = u$ 时, $\varphi_0 = \pm 2m\pi - u$, m 为整数。当 $x = u/(F+1)$ 时, $\varphi_0 = \pm(2m+1)\pi - u/(F+1)$, 可见 x 对 φ_0 成周期性变化。 φ_0 在 $(-\pi, +\pi)$ 内变化时(图 7),极值点坐标如下:

$$\begin{aligned}
 A: \begin{cases} x_A = \frac{u}{F+1}, \\ \varphi_A = -\left(\pi + \frac{u}{F+1}\right); \end{cases} & B: \begin{cases} x_{B'} = \frac{u}{F+1}, \\ \varphi_{B'} = \pi - \frac{u}{F+1}; \end{cases} \\
 C: \begin{cases} x_C = \sqrt{\frac{u}{2F}} + \frac{u}{2F}, \\ \varphi_C = -\frac{2}{\pi} \arcsin \frac{\sqrt{\pi u}}{F}; \end{cases} & D: \begin{cases} x_D = u, \\ \varphi_D = -u. \end{cases}
 \end{aligned}$$

图7 线性调制特性 (u 为参量)

$$F = 160; \quad u_1 = 0.1\pi; \quad u_2 = 0.5\pi; \quad u_3 = 1\pi; \quad u_4 = 1.5\pi$$

线性段 DEF , 当 F 在 100 左右时, 可用直线方程近似表示

$$x = -\left(1 - \frac{4}{2u\sqrt{F}}\right)\varphi_0 + \frac{4}{2u\sqrt{F}}. \quad (13)$$

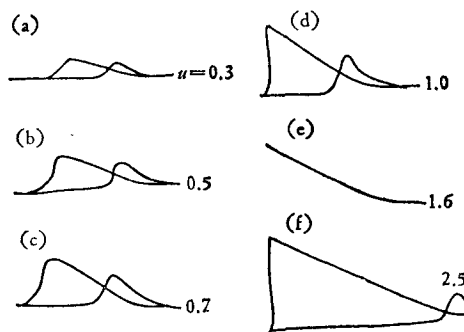
当 F 或输入 u 相当大时, 直线斜率接近 -1 . 用 $F = 160$ 计算, 当 x 从 $0.99u$ 到 $0.3u$ 变化时, 曲线在该范围内切线的倾角从 $-47^\circ 12'$ 到 $-46^\circ 18'$ 间变化, 仅差 $54'$, 这说明 x 对 φ_0 的线性度是很高的.

图 8 是对不同的 u 值, 得到的不同 $x-\varphi_0$ 实验曲线. 实验同理论分析是一致的.

六、稳定性分析

图 4(a) 中, 双稳曲线上任一点的输入输出状态并不都是非线性标准具实际能够达到的状态, 这要看该点是稳定的还是非稳定的平衡态点. 从物理上看, 如果系统的状态是稳定的, 那么处在该状态的系统, 当受到外界的一个微小扰动后, $t \rightarrow \infty$ 时, 仍应能够保持

在原来的状态上, 反之, 若偏离原状态, 则是不稳定的平衡点.

图8 不同 u 时的 $x-\varphi_0$ 实验曲线

纵轴: 输出强度; 横轴: 控制信号强度

(f) 为示波器放大倍率减小, 扫描线左移后的波形

为简单起见,假定标准具传输过程的时间常数 $\tau_1 \rightarrow 0$ (实际上这种近似在一定条件下也是合理的,当 R 很大,腔的建立时间很小时,光的传输过程同电的反馈网络反馈过程相比,时间常数可以忽略),这时方程组(3),(4)可用下述方程组近似:

$$x(t) = \frac{u(t)}{1 + F \sin^2 \frac{\varphi(t)}{2}}, \quad (14)$$

$$\tau_2 \frac{d\varphi(t)}{dt} = \varphi_0 - \varphi(t) + x(t). \quad (15)$$

令 $f(\varphi) = \varphi_0 - \varphi + x$, 将(15)式对 φ 在平衡点处取变分有

$$\tau_2 \Delta \dot{\varphi} = \Delta f(\varphi) = f'_{\varphi}(\varphi) \Delta \varphi.$$

其解为

$$\Delta \varphi = c e^{f'_{\varphi}(\varphi) \frac{t}{\tau_2}}. \quad (16)$$

其中 c 是初始扰动幅度. 由(16)式看出,当 $f'_{\varphi}(\varphi) < 0$ 时, $t \rightarrow \infty$, $\Delta \varphi \rightarrow 0$, 系统最终会回到原来的状态点;当 $f'_{\varphi}(\varphi) > 0$ 时, $t \rightarrow \infty$, $\Delta \varphi \rightarrow \infty$, 状态是不稳定的. 这说明平衡状态的稳定条件为

$$f'_{\varphi}(\varphi) < 0. \quad (17)$$

可以证明,这不仅是必要条件,也是充分条件.

由(14)式,上式变为

$$Fu \sin \varphi + \left(1 + F \sin^2 \frac{\varphi}{2}\right)^2 > 0. \quad (18)$$

这正好就是描述平衡状态的(7),(8),(9)式中 $\frac{dx}{du} > 0$. 这意味着,图 4(a) 中双稳曲线上凡是斜率大于零的点都是稳定的状态点,凡是斜率小于零的点都是不稳定的状态点. 状态点 B 和 E 是稳定与非稳定状态的分界点,亦称“临界点”. 由图 3 看出,当 $\varphi_0 > \Phi_0$ 时,所有的平衡状态点都满足 $\frac{dx}{du} > 0$, 此时 x 随 u 单调增加,没有非稳定状态点,因而双稳曲线消失.

考察双稳曲线上不同点处的 $f'_{\varphi}(\varphi)$ 值有重要的物理意义. 令

$$\tau = \left[\frac{f'_{\varphi}(\varphi)}{\tau_2} \right]^{-1} = \tau_2 \left(\frac{dx}{du} \right)^{-1},$$

由(16)式知, τ 是平衡态曲线上任一点受到一个偏离平衡位置的微小扰动时,恢复到扰动前位置时所具有的时间常数. 显然,斜率 dx/du 愈大的点是恢复时间愈长的点. 可见 $f'_{\varphi}(\varphi)$ 或者 dx/du 既是衡量状态点稳定程度的一个量,又是反映系统在某个平衡状态时,对时间响应快慢的一个量. 在平衡态曲线上,状态愈趋近“临界点”,斜率愈大, τ 愈大,稳定性愈差,这同后面将被讨论的“临界延迟”效应有直接的关系. 图 4(a) 中的虚线,斜率小于零,是不稳定的,因而这些状态点在实验上观察不到.

当输入变化时,输出的突变也与稳定性有关. 例如图 4(a) 中的 B 点,假设系统原来处在该点邻域的稳定区部分,当 u 增加时,由(14),(15)式知, $f(\varphi)$ 增加,因而 φ 增加,但从图 4(a) 中 φ 的坐标看出,状态向非稳定的虚线方向变化. 由于一切物理系统都有向其最

稳定的状态过渡的趋势,使得标准具在时间上将经过非稳定的暂态过程而达到对应新的输入 $u > u^+$ 所确定的稳定状态点,这样伴随着输入的增加,输出在临界点处产生过渡性质的上冲,后趋近于稳定的高输出态上,如图 6 所示.相反的情形,在 B 点如果 u 减小, $f(\varphi)$ 减小, φ 减小,状态沿 BA 稳态曲线滑动,不产生输出突变.在“关闭点” E 处的分析也类同.由此可见,输出突变是与系统状态迅速经过非稳定区分不开的.

七、阶跃响应及“临界延迟”效应

非线性标准具对输入为三角波形时的瞬态响应.文献[9]中已作报道,今考虑输入阶跃波形的幅度接近“临界点”附近时标准具的时间响应.

设标准具初始偏置 $\varphi = \varphi_0$, 此时系统已对应着图 2 所示的双稳状态.若输入光振幅

$$\varepsilon_i(t) = AI(t) - BI(t - t_0),$$

如图 9. 将 $\varepsilon_i(t)$ 代入方程(3), (4), 并假定 t_0 足够大, 在 t_0 到来时, 上升前沿的过渡过程已结束, 仍取 $\tau_1 \approx 0$, 得到如下解:

$$x(t) = \frac{u'_0}{1 + F \sin^2 \frac{\varphi(t)}{2}},$$

$$\tau_2 \frac{d\varphi(t)}{dt} = \varphi_0 - \varphi + x(t),$$

$$\varphi|_{t=0} = \varphi_0 \quad 0 \leq t \leq t_0, \quad t_0 \gg \tau_2. \quad (19)$$

和

$$x(t) = \frac{u''_0}{1 + F \sin^2 \frac{\varphi(t)}{2}},$$

$$\tau_2 \frac{d\varphi(t)}{dt} = \varphi_0 - \varphi + x(t),$$

$$\varphi|_{t=t_0} = \varphi(t_0) \quad t \geq t_0, \quad t_0 \gg \tau_2. \quad (20)$$

这里 $u'_0 = kA^2$, $u''_0 = k(A - B)^2$, 表示阶跃输入的强度. 解(19)式给出上升前沿特性, 解(20)式给出后沿特性.

1. 前沿响应

(1) $u'_0 > u^+$ 取 $F = 160$, $\varphi_0 = -0.183\pi$, 此时“开启点”和“关闭点”所对应的输入分别为 $u^+ = 0.42\pi$, $u^- = 0.18\pi$, 图 10(a) 是 u'_0 取不同值时按(19)式理论计算的结果. 实线是输出波形, 虚线是相应的腔内相移 φ 的变化. 图 10(b) 是实验的结果. 实验中 $F \approx 150$, $\varphi_0 \approx -0.1\pi$, 开启点 $u^+ = 0.35$ 个单位(实验中以示波器刻度线为单位).

可以看出, 尽管理论计算和实际实验是对不同的双稳初始状态 (φ_0 不同) 进行, 但下述规律是一致的: 1) 开始输出增加非常缓慢, 并有一段延时, 以后迅速增加, 经“过冲”后

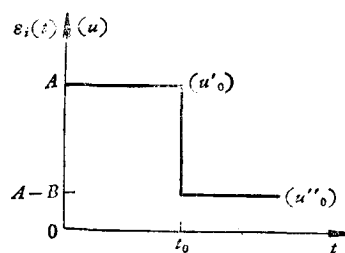
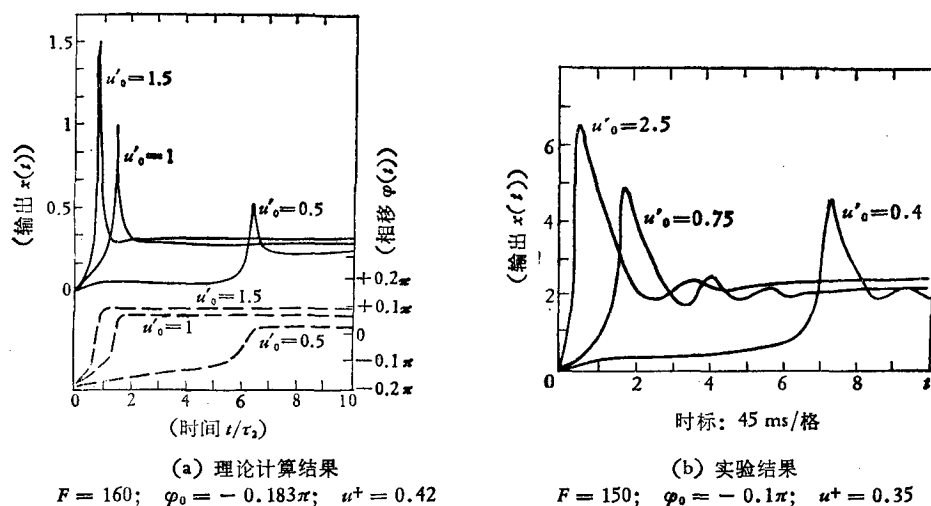
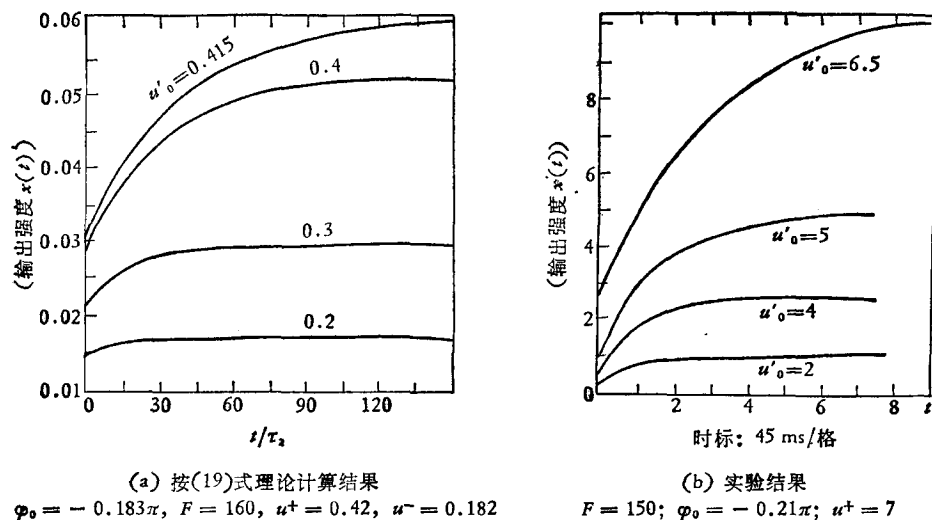


图 9 阶跃输入波形

图 10 $u'_0 > u^+$ 时的阶跃响应

再衰减到一个稳定值。2) 输出的峰值点对应着 $\varphi = 0$, 即谐振点, 此时 $x = u'_0$, 这说明从瞬态过程看, 腔内相移 φ 是连续变化并通过谐振点的。3) 输入幅度 u'_0 愈接近 u^+ , 达到稳定状态所需的时间愈长。

(2) $u'_0 < u^+$ 图 11 是输入不超过开启点时的阶跃响应曲线。图 11(a) 是按(19)式计算的结果, 图 11(b) 是实验结果。从图中看出, 与图 10 相比, 其不同点是没有共振出现, 类似点是输出要达到稳定值所需的延时亦随输入 u'_0 愈接近 u^+ 而愈大。

图 11 $u'_0 < u^+$ 时的阶跃响应

输入幅度愈接近临界点时延时愈大的现象称“临界延迟”效应。若定义 φ 达到其稳定值的 90% 所需要的时间为系统的响应时间 τ , 则 τ 是 u'_0 的函数。取 $\alpha = u'_0/u^+$ 为变量, 系统的响应时间 τ 可由方程(19)求得

$$\tau/\tau_2 = \int_{\varphi_0}^{90\% \varphi_{\text{平衡}}} \frac{d\varphi}{\varphi_0 - \varphi + \frac{\alpha u^+}{1 + F \sin^2 \frac{\varphi}{2}}}. \quad (21)$$

理论计算和实验结果示于图 12, 初始条件同图 10、图 11 中所述一样。可以看到, $\alpha \rightarrow 1$ 时, $\tau \rightarrow \infty$ (注意理论计算与实验采用的双稳参数不同, 但 τ 随 α 变化趋势是一致的)。

2. 后沿响应

设 $t = t_0$ 时, 系统状态处于超过“开启点”的高输出状态上。当一个突然的负阶跃光信号输入后, 不仅此后系统的稳态输出幅度与负阶跃幅度有关, 而且系统对负阶跃的时间响应也同阶跃幅度有关。理论和实验表明, 负阶跃幅度使得系统的总输入幅度愈接近“关闭点”对应的输入幅度 u^- , 系统的响应时间愈长。换句话说, 在“关闭点”处也存在着“临界延迟”效应。

取 $F = 160$, $\varphi_0 = -0.183\pi$, 当 $t \leq t_0$ 时若输入 $u'_0 = 1$, 此时对应系统的

$$\varphi(t_0) = 0.0837\pi, \quad x(t_0) = 0.27,$$

对 u'_0 小于 u^- 的情况 ($u^- = 0.182$, $u^+ = 0.42$) 按方程(20)进行理论计算, 图 13(a) 给出其结果。(b) 是对 $F = 150$, $\varphi_0 = -0.18\pi$, $u^+ = 5$, $u^- = 0.92$, $u'_0 = 8$ 等不同的 u'_0 的实验结果。在图 13(b) 中, 由于光电探测器的时间常数, 使得实验曲线在 t_0 处的下跳沿有一段指数衰减, 这种指数变化平滑了理论计算中所给出的 t_0 时输

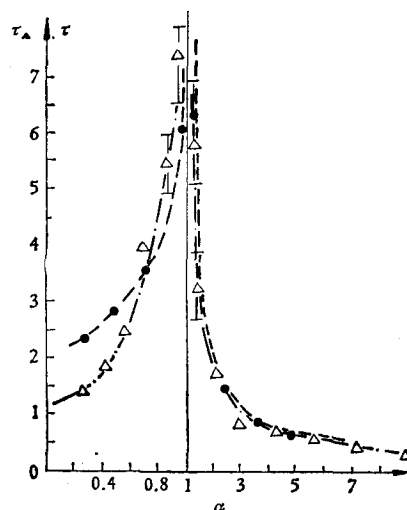
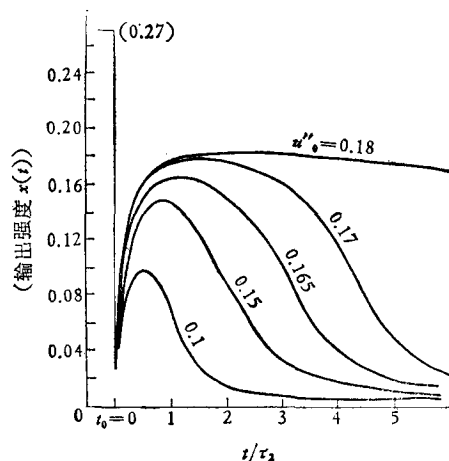
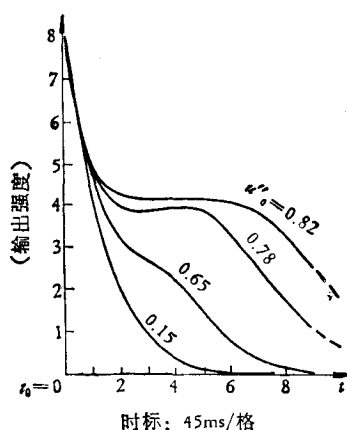


图 12 系统响应时间 τ 随 α 的变化

—△— 为实验值;
—●— 为理论值;
 $\alpha > 1$: 理论值和实验值由图 10(a) 得到;
 $\alpha < 1$: 理论值和实验值由图 11(a) 得到;
 τ_{Δ} 单位 t/τ_2 ; τ_0 单位 $t \times 50\text{ms}$



(a)



(b)

图 13 $u'_0 < u^-$ 时的阶跃响应

出的剧烈变化部分。

由图 13(a) 看出, 在负阶跃脉冲的作用下, 输出先下跳, 然后增加到一个峰值再缓慢向平衡态趋近。峰值对应标准具的谐振点, 此处输出 $u = u_0''$; u_0'' 愈接近 u^- , 响应的后沿波形拖得愈长, 即系统趋于稳定状态所需时间愈长。由此看出, 当 u_0' 和 u_0'' 都很接近 u^- 时, 输出的峰值几乎可以与负阶跃前的输出幅度相比, 而且趋于稳定的过渡时间特别长。这将严重影响脉冲的后沿特性。

光学双稳器件的这种“临界延迟”效应, 使它作为快速开关元件应用有一定局限性。为增加开关速度, 输入幅度应远离“临界点”。

八、结 论

1. 混合型非线性 F-P 标准具的光学双稳特性强烈地依赖于初始偏置 φ_0 的选取。在一定的输入范围内, φ_0 不仅决定双稳状态的存在与否, 而且决定“开启”和“关闭”点的位置。

2. 选择合适的输入 u , 用控制信号控制标准具的偏置 φ_0 , 则系统输出和 φ_0 间有很好的线性调制特性。

3. 在平衡态光学双稳曲线上, 斜率为正的状态点是稳定的平衡态点, 斜率为负的状态点是不稳定的平衡态点。

4. 混合型非线性 F-P 标准具光学双稳装置对阶跃输入的时间响应具有“临界延迟”效应, 输入幅度愈接近临界点, 延迟时间愈长。

非线性 F-P 标准具的上述特性, 使它在光信号处理上有着广泛应用的可能性。但是由于它对时间响应的延迟效应, 作为快速信号的处理元件具有一定的局限性。

参 考 文 献

- [1] H. Seidel, U. S. Patent, No. 3610731, (1971).
- [2] A. Szöke, *Appl. Phys. Lett.*, **15**(1969), 376.
- [3] S. L. McCall, *Phys. Rev. A*, **9**(1974), 1515.
- [4] S. L. McCall, H. M. Gibbs, *J. Opt. Soc. Amer.*, **65**(1975), 1184.
- [5] F. S. Felber, J. H. Marburger, *Appl. Phys. Lett.*, **28**(1976), 731.
- [6] P. W. Smith, E. H. Turner, *Appl. Phys. Lett.*, **30**(1977), 280.
- [7] E. Garmire, J. H. Marburger, S. D. Allen, *Appl. Phys. Lett.*, **32**(1978), 320.
- [8] *Opt. Comm.* **29**(1979), 364.
- [9] T. Bischofberger and Y. R. Shen, *Appl. Phys. Lett.*, **32**(1978), 156.
- [10] R. Bonifacio, *Opt. Comm.*, **19**(1976), 172.
- [11] E. Garmire, *Appl. Phys. Lett.*, **34**(1979), 374.
- [12] 张洪钧等, 物理学报, **30** (1981), 810; *Opt. Comm.*, (1981), to be Published.

BISTABLE CHARACTERISTICS OF HYBRID NONLINEAR FABRY-PEROT OPTICAL BISTABILITY

LI YONG-GUI ZHANG HONG-JUN YANG JUN-HUI GAO CUN-XIU

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this paper, we describe a hybrid nonlinear F-P Bistable Optical Device (BOD), the length of its cavity is controllable. The dynamic equations of the system and the equilibrium solution which shows the optical bistable nature are given. The bistability and linear modulation characteristics are discussed. The stability of the equilibrium state and the "critical slowing down" effect of transient behavior are analysed. The experimental demonstrations are in agreement with the theoretical evaluations.