

应用全息干涉方法研究水工 建筑物的振动问题

何伯森 陈吉书

(天津大学)

提要: 本文介绍如何用全息干涉法求水工建筑物的振型, 并叙述了模型设计以及实验技术。最后, 结合两个实际工程求出水电站厂房振型图和重力坝的二维振型图, 并与理论计算或有限元方法计算的结果进行了比较。

Vibration analysis of hydraulic engineering by holographic interferometry

He Bosen, Chen Jishu

(Tianjin University)

Abstract: This paper introduces how to use holographic interferometry to study the vibration mode of the hydraulic engineering and the model design, some experimental techniques and formulae used in calculation are also described. In the last part, the vibration mode of a factory building of hydro-electric power station and the two dimensional vibration mode of a gravity dam are obtained and the comparison of those results from the theoretical calculation or finite element method are given.

我国是一个多地震的国家, 在设计大型水工建筑物时, 设计者还必须考虑建筑物在地震作用下的动力特性。本文介绍我们用全息干涉方法研究水工建筑物振动问题的一些成果。

振动物体的全息干涉计量有许多方法, 我们采用时间平均法。根据时间平均法的理论^[1], 作简谐运动的物体其振幅 $A(r)$ 可以按下式计算:

$$A(r) = \frac{\rho\lambda}{2\pi(\cos\theta_0 + \cos\theta_i)} \quad (1)$$

式中, λ 为激光波长, θ_0 、 θ_i 分别为照明光和观察方向与振动矢的夹角(如图1所示)。 ρ 为由振幅引起的物光的位相差。当振动方向已知时, 即已知 θ_0 、 θ_i 值时, 利用(1)式可求出每一条等振幅线的振幅值 $A(r)$ 。

在研究二维或三维振动形变时^[2,3], 设图

收稿日期: 1982年3月9日。

2 中 P 、 P' 两点为模型上某点振动时的两个

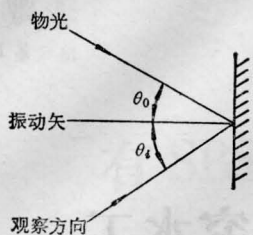


图 1

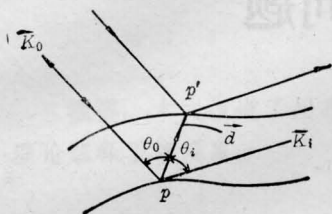


图 2

极限位置点, 振动矢 $\vec{d} = \overrightarrow{PP'}$, 则在 i 方向观察到的干涉条纹级数 N_i 与其光程差之间的关系为

$$d(\cos \theta_0 + \cos \theta_i) = N_i \lambda = \frac{\rho}{K} \quad (2)$$

式中 $K = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为波长。定义波矢 \vec{K}_0 及 \vec{K}_i 、 \vec{K}_0 与照明光方向相反, \vec{K}_i 为衍射光方向矢。令它们的模与波数相等并令 $\vec{K}_i - \vec{K}_0 = \vec{A}_i$, 则(2)式可写成

$$\rho = \vec{A}_i \vec{d} = A_{ix} dx + A_{iy} dy = K N_i \lambda \quad (3)$$

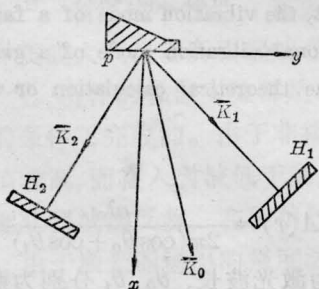


图 3

若在两个方向放置两块全息底板(如图 3 所示), 在全息图上测得 P 点的干涉条纹数分别为 N_1 、 N_2 , 则(3)式可写成

$$\begin{aligned} A_{1x} dx + A_{1y} dy &= K N_1 \lambda \\ A_{2x} dx + A_{2y} dy &= K N_2 \lambda \end{aligned} \quad (4)$$

由(4)式可得到 d 的两个分量

$$dx = \frac{K\lambda \begin{vmatrix} N_1 & A_{1y} \\ N_2 & A_{2y} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_{1x} & A_{1y} \\ A_{2x} & A_{2y} \end{vmatrix}}, \quad dy = \frac{K\lambda \begin{vmatrix} A_{1x} & N_1 \\ A_{2x} & N_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_{1x} & A_{1y} \\ A_{2x} & A_{2y} \end{vmatrix}} \quad (5)$$

由于水工建筑物原体大都是高达数十米或百米以上的巨型建筑物, 因此在设计阶段都是利用模型来研究它的振动问题的。在进行混凝土建筑物无水压力特性试验时, 模型设计采用弹性相似律。即

$$f_p = \frac{f_M}{\lambda_L} \sqrt{\frac{E_P}{E_M} \cdot \frac{\tau_M}{\tau_P}} \quad (6)$$

式中, f_P 、 f_M 分别为原体和模型的自振频率; E_P 、 E_M 分别为原体和模型的动弹性模量, 单位是公斤/厘米²; τ_P 、 τ_M 分别为原体和模型的容重(吨/立米); λ_L 为模型的几何比尺。

模型材料采用有机玻璃。图 4 是我们测出的有机玻璃的动弹性模量随温度变化曲线。由图上可以看出, 温度每变化 1°C, 动弹性模量变化约 560 公斤/厘米²。因此在试验时必须记载室温, 以便在将模型频率换算到原型时采用试验时室温的动弹性模量, 否则将会引起较大的误差。

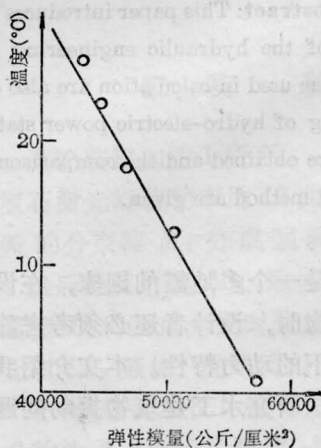


图 4

二维测振的光路布置及起振、拾振系统仪器方框图如图 5。

模型的起振与拾振均用压电晶体片, 输

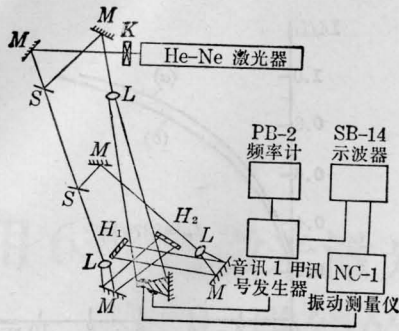


图 5

K—快门；M—全反镜；S—分光镜；
L—扩束镜；H—全息干板

入正弦波讯号使模型处于稳态振动。根据示波器屏上出现的李萨如图和拍摄的全息照片判别各阶共振状态。用矩形或圆形晶片贴在模型的不同部位可以激发出水平向变位为主或竖直向变位为主的振型。

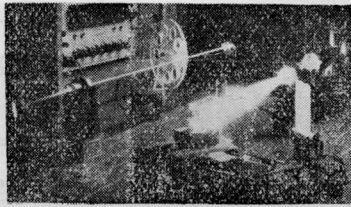


图 6

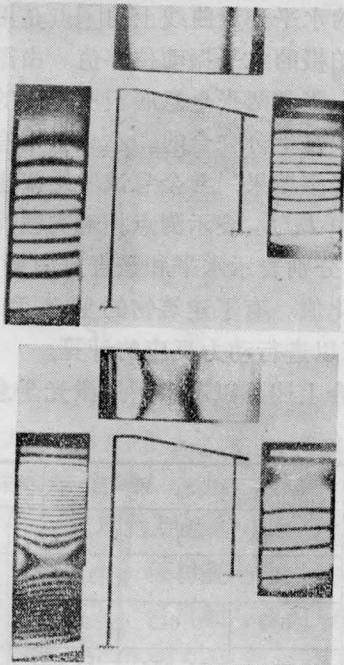


图 7

图 6 为某水电站挑流式厂房模型及全息照相时的光路布置。模型粘接在铁块上，以模拟固接端，几何比尺为 1:500。对厂房的上、下游墙和顶板分别拍摄全息图，第一、第二振型的全息图如图 7 所示。

实验中全息照相可照出模型频率高达 20000 赫左右的高阶振型和双向弯曲振型。图 8 所示为厂房前墙的高阶振型 (22213 赫) 及双向弯曲振型 (15624 赫)。

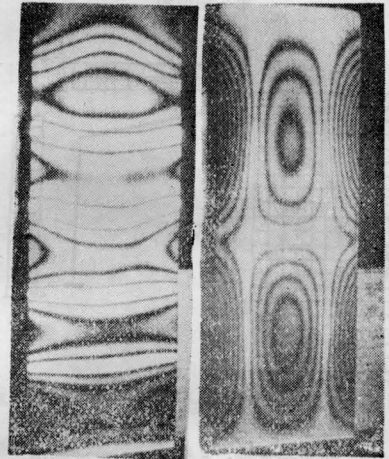


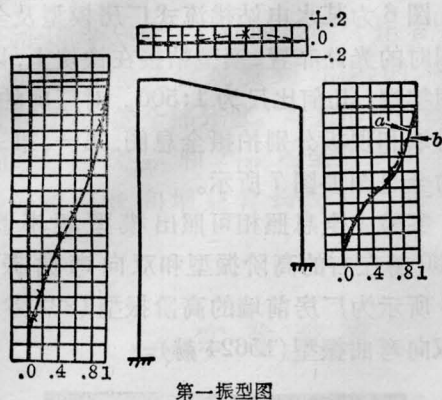
图 8

激光全息测振试验结果用弹性相似律换算到原体自振频率值(如表 1 所示)，与理论计算结果相比，是比较相符的^[4]。根据全息照相的结果和理论计算结果画出的振型图如图 9 所示。二者也是十分接近的。

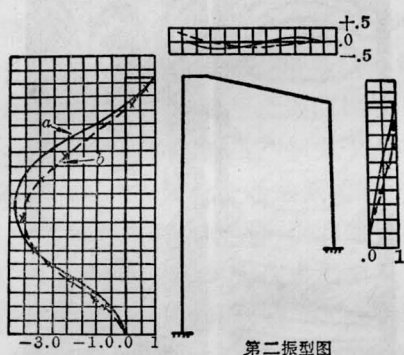
表 1

振型阶数	I	II
试验值(赫)	1.79	6.33
理论计算值(赫)	1.75	5.56

为了研究某水库宽缝重力坝的动力特性，我们制作了一个坝段宽度的挡水坝及溢流坝模型。几何比尺为 1:1000，基础固定在铁块上，以模拟固接。试验分两步，首先用一张全息干板照出并绘制坝体上游面在 I、II、IV 阶振动时的水平振型值，然后用两张全息干板拍出两张全息图以计算二维振型。



第一振型图



第二振型图

图 9

a —理论计算值; b —激光全息试验值

为了能比较准确地求出多张全息图在同一高程上的条纹值, 可以先利用易于判读的整条纹数 N_i 和算出该条纹的相对高程 L_i/L 并画出曲线, 即可方便地查出各个高程的条纹值。图 10 为挡水坝段第一振型两张全息图的 $N_i \sim L_i/L$ 曲线。

试验观测数值必然带有随机误差, 我们采用五点平滑公式对曲线进行局部平滑, 画出了各阶振型的水平向及竖直向分量的振型曲线。

我们科研组另两个小组对同一重力坝采

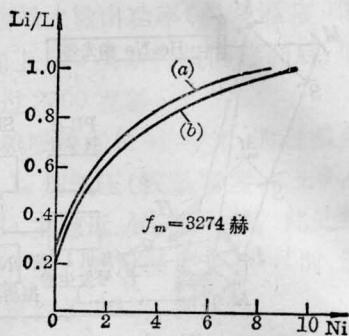


图 10

用较大比尺的模型在振动台上进行了动力试验, 并用有限单元法进行了动力计算。这三种不同方法得出的结果都比较接近, 起到互相校核的作用。表 2 为采用三种方法求出的原体各阶自振频率值(单位均为赫)。

图 11 为用两张全息片拍摄重力坝模型二维振型全息图的两个典型照片, (a) 为溢流坝段第一振型, (b) 为挡水坝段第四振型。

图 12 和图 13 分别为溢流坝段和挡水坝段的各阶振型图, 图中画出水平和竖直分量。图中 \odot 点为二维全息照相测点。在 I、II、III 阶振型的水平分量曲线上的 \square 点是用一张全息底板拍摄的水平振动位移值。由图可以看出, 用一张和两张全息底板所得出的水平向振型曲线是十分吻合的。 \triangle 点是用有限元法计算的二维结果, 与全息试验结果也比较符合。图中 L_i/L_m 表示测点相对高程, dx_i/dx_m 、 dy_i/dy_m 分别表示水平和竖直方向振动位移的归一化值。有了建筑物的频率和振型曲线, 就可以进行动力反应的计算。

综合上述可以看出, 用激光全息照相方

表 2

振型阶数	挡水坝段自振频率				溢流坝段自振频率			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
激光全息试验	5.510	9.640	12.478	15.753	5.968	10.469	11.715	16.812
振动台试验	4.496	9.380	11.287	14.992	4.643	9.643	9.823	16.420
动力有限元计算	5.255	10.799	12.270	18.519	5.718	11.236	11.834	18.248

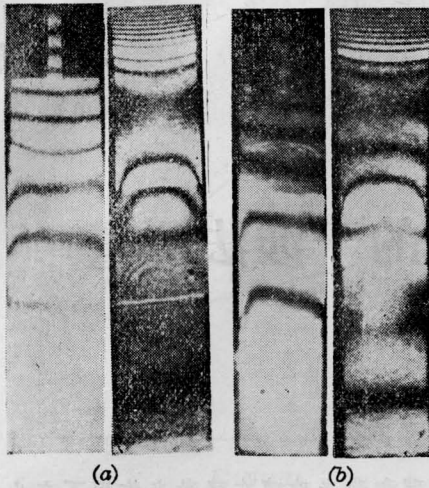


图 11

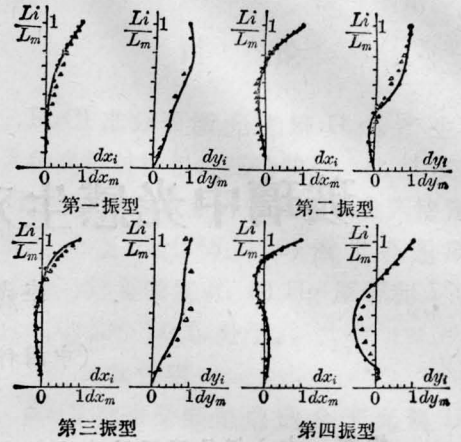


图 13 挡水坝段振型图

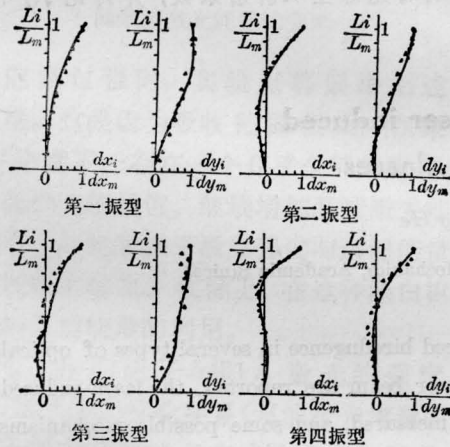
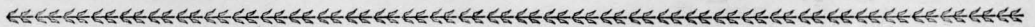


图 12 溢流坝段振型图

法研究水工模型的振动特性而后再换算到原体是一种可行的比较好的方法。它具有设备



(上接第 112 页)

的线性折射率有关；线性折射率 n_0 较大的，其光感生双折射系数 γ_k 亦较大。本文用干涉法测得的 γ_k 值比早先用正交消光比法测量的结果^[1]明显偏少。二批实验数据之间的偏差大约为 30~40%。这可能是因为正交消光比法中测量微弱光强引入的系统误差所致。

一般 η 值可以被用来判断光感生双折射的产生机理。分子取向机理预期有 $\eta = -2$ ^[2]，而电子壳层畸变机理预期 $\eta = 3$ ^[3]。我们的实

比较简单、费用低、实验重复性好、精度高、时间短、一次可测得表面各点振动位移等优点。这不仅对水利工程在初步设计阶段进行方案比较时十分可取，对于原体积很大的土建构件、机械部件以至于整体，只要能很好地模拟边界条件，保证模型加工精度，都是可以用全息照相的方法来研究它们的振动特性的。

参 考 文 献

- [1] H. M. 史密希;《全息学原理》(中译本), 1972 年。
- [2] Jon E. Söllid; *Appl. Opt.*, 1969, 8, No. 8, 1587.
- [3] 丁祖泉, 鲍乃铿;《同济大学学报》, 1980, No. 1, 49.
- [4] 舒扬桢等;《天津大学学报》, 1980, No. 1.

验结果为 $\eta = 2.1$, 这表明在这些材料中光感生双折射效应的主要机理是在强光场作用下的电子壳层畸变, 也许还有一小部分是核运动或其他机理的贡献。

参 考 文 献

- [1] 邓 和等;《激光》, 1981, 8, No. 11, 18.
- [2] T. H. Havelack; *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, 1908, 80, 28.
- [3] W. Voigt; *Ann. Phys. (Keipzig)*, 1901, 4, 197.