

圆筒弯扭组合实验中弯曲切应力的测量¹⁾李 昊²⁾ 刘一华 王美芹 吴枝根 詹春晓

(合肥工业大学土木建筑工程学院, 合肥 230009)

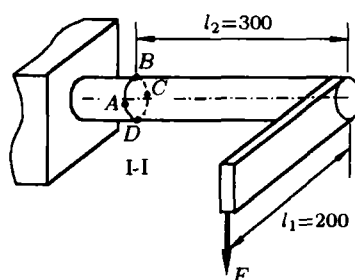
摘要 分析了圆筒弯扭组合实验中弯曲切应力的主要测量误差, 提出了改进的贴片方式, 在此基础上, 重新设计了弯曲切应力的实验方案。

关键词 材料力学, 弯扭组合实验, 电测技术, 弯曲切应力

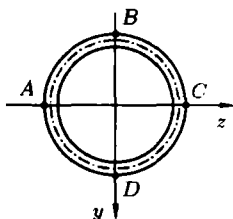
电阻应变测量技术是工程结构试验应力分析的主要手段之一, 并广泛应用于机械、土木、航空航天等各工程技术领域。对于大多数工科院校而言, “圆筒弯扭组合实验”是电测应力实验的基本实验内容之一^[1~3]。在教学中我们发现, 原有的实验方法在测量主应力、弯曲正应力和扭转切应力时的精度较高, 而弯曲切应力的测量误差很大, 超过了 50%。为此, 本文在分析了产生该误差的主要原因的基础上, 提出了相应的改进方案。

1 实验装置

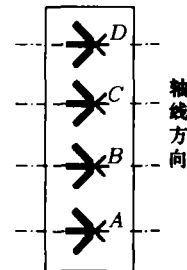
实验装置的结构示意图如图 1(a) 所示。圆筒用铝合金制成, 其外径 $D = 40 \text{ mm}$, 内径 $d = 34 \text{ mm}$, 材料常数 $E = 70 \text{ GPa}$, $\nu = 0.33$ 。在圆筒 I-I 横截面处的外表面上下边缘和中性轴前后处分别粘贴了一个 45° -3 直角应变花, 测点位置及应变花布置方式展开示意图如图 1(b) 和图 1(c) 所示。测量弯曲切应变时, 将 A、C 两点的 45° 和 -45° 敏感栅连接成如图 2 所示的全桥桥路, 采用等增量 4 级加载, 载



(a) 实验装置结构示意图



(b) I-I 横截面的测点位置



(c) 应变花布置方式

图 1 结构示意图和测点及布片方式

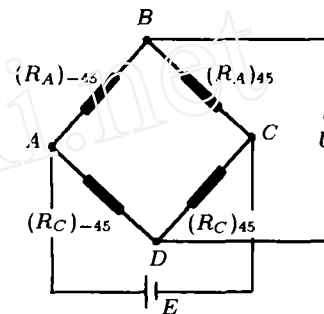


图 2 弯曲切应变的测量桥路

荷增量为 100 N , 取应变增量的平均值作为测量值, 其值为 $68.25 \mu\epsilon$ 。

根据弯扭组合变形的受力特点可知, A、C 两点为纯剪切应力状态, 如图 3 所示, 其中

$$\tau_A = \tau_T + \tau_Q, \quad \tau_C = \tau_T - \tau_Q \quad (1)$$

式中 τ_T 和 τ_Q 分别表示扭转切应力和弯曲切应力。

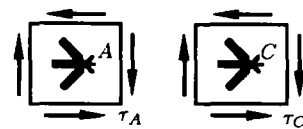


图 3 A, C 点的应力状态

由广义胡克定律, A、C 点沿 45° 和 -45° 方向的线应变分别为

$$\left. \begin{aligned} (\epsilon_A)_{-45} &= -(\epsilon_A)_{45} = \frac{1+\nu}{E} \tau_A = \frac{1+\nu}{E} (\tau_T + \tau_Q) \\ (\epsilon_C)_{-45} &= -(\epsilon_C)_{45} = \frac{1+\nu}{E} \tau_C = \frac{1+\nu}{E} (\tau_T - \tau_Q) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

按照图 2 所示方式接桥测量时, 应变仪输出的由弯曲切应力所产生的理论应变值为

本文于 2007-02-12 收到。

1) 安徽省教学研究重点项目资助 (2005007)。

2) E-mail: lhtwd@sina.com

$$\varepsilon_* = (\varepsilon_A)_{-45} - (\varepsilon_A)_{45} + (\varepsilon_C)_{45} - (\varepsilon_C)_{-45} = \frac{4(1+\nu)}{E} \tau_Q \quad (3)$$

式中

$$\tau_Q = \frac{F_Q S_z^*}{I_z b} = \frac{16F(1+\alpha+\alpha^2)}{3\pi D^2(1-\alpha^4)} \quad (4)$$

其中 $\alpha = d/D$ 。在载荷 $F = 100 \text{ N}$ 作用下, 按式 (3) 计算得到的理论值为 $\varepsilon_{理} = 43.40 \mu\varepsilon$, 实验值和理论值的相对误差达 57.26%。

2 误差分析

产生上述实验误差的因素很多, 除了横向效应和粘贴方位的影响之外, 弯曲切应变测量的主要误差是由于应变花敏感栅中心位置的应力状态与被测点的纯剪切应力状态不一致所造成的。用电阻应变片测量应变时, 所测得的应变反映的是敏感栅中心点处的应变。而 A, C 两点处应变花的 45° 和 -45° 敏感栅的中心点与 A, C 两点不重合, 其相对位置如图 4 所示, 图中 $l = 2.5 \text{ mm}$, $a = 3 \text{ mm}$ 。相应的应力状态如图 5 所示, 其中

$$\left. \begin{aligned} (\tau_A)_{45} &= (\tau_A)_{-45} = \tau_T + \tau'_Q \\ (\tau_C)_{45} &= (\tau_C)_{-45} = \tau_T - \tau'_Q \\ \sigma_M &= (\sigma_A)_{45} = (\sigma_A)_{-45} = (\sigma_C)_{45} = (\sigma_C)_{-45} = \frac{64Fl_2y_1}{\pi D^4(1-\alpha^4)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, τ'_Q 为敏感栅中点的弯曲切应力, $y_1 = (l/2 + a)/\sqrt{2}$ 为敏感栅中心到中性轴的距离。在考虑敏感栅中心位置的影响后, A, C 两点的 45° 和 -45° 敏感栅按图 2 所示方式接桥测量时, 由应变仪输出的理论应变值为

$$\varepsilon'_{理} = \frac{4(1+\nu)}{E} \tau'_Q + \frac{2(1-\nu)}{E} \sigma_M \quad (6)$$

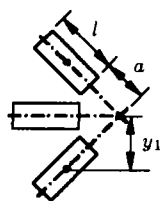


图 4 45° -3 应变花

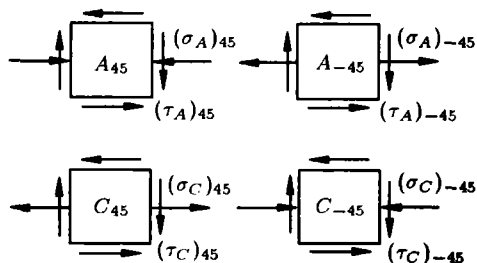


图 5 敏感栅中心的应力状态

比较式 (3) 和式 (6) 可以看出, 由于 τ_Q 和 τ'_Q 数值相差并不大, 所以弯曲切应变的测量误差主要是由于敏感栅中心

点的弯曲正应力引起的。当载荷 $F = 100 \text{ N}$ 时, 由式 (5) 可得 $\sigma_M = 1.50 \text{ MPa}$ 。根据式 (6) 可知, 该应力值由应变仪输出的应变为 $28.73 \mu\varepsilon$ 。扣除此应变后, 由弯曲切应力引起的应变测量值为 $39.52 \mu\varepsilon$, 与式 (3) 所得理论值的相对误差为 8.94%。

3 改进方案

通过以上误差分析可以看出, 由于应变花自身结构的特点, 在测量弯曲切应变时, 敏感栅中心的应力状态与被测点的应力状态不一致。在采用图 2 所示的测量桥路时, 只能抵消扭转切应力的影响, 而弯曲正应力的影响无法消除。根据惠斯通电桥的特点, 只要选择合适的贴片方式和桥路, 便可同时消除扭转切应力和弯曲正应力的影响, 从而提高弯曲切应变的测量精度。

基于上述思想, 对贴片方式进行如下改进: 将 A 点 (或 C 点) 处的应变花旋转 180° , 如图 6 所示。此时, A, C 两点处 45° 和 -45° 敏感栅中心点的应力状态如图 7 所示, A 点处应变花的 45° 敏感栅中点为拉应力, -45° 敏感栅中点为压应力, 数值可近似认为与改进前一致。由广义胡克定律可得, A, C 两点处 45° 和 -45° 敏感栅中心点沿栅长方向的线应变分别为

$$\left. \begin{aligned} (\varepsilon'_A)_{45} &= -\frac{1+\nu}{E} (\tau_A)_{45} + \frac{1-\nu}{2E} \sigma_M \\ (\varepsilon'_A)_{-45} &= \frac{1+\nu}{E} (\tau_A)_{45} - \frac{1-\nu}{2E} \sigma_M \\ (\varepsilon'_C)_{45} &= -\frac{1+\nu}{E} (\tau_C)_{45} + \frac{1-\nu}{2E} \sigma_M \\ (\varepsilon'_C)_{-45} &= \frac{1+\nu}{E} (\tau_C)_{45} - \frac{1-\nu}{2E} \sigma_M \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

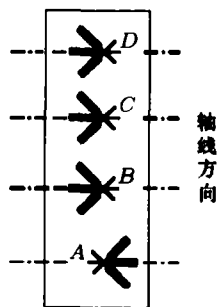


图 6 改进的贴片方式

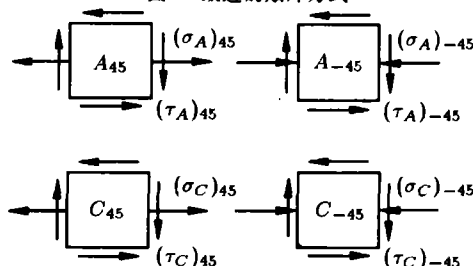


图 7 敏感栅中心的应力状态

仍采用图 2 所示测量桥路,则由应变仪输出的理论应变值为

$$\varepsilon'_{\text{测}} = \frac{4(1+\nu)}{E} \tau'_Q \approx \frac{4(1+\nu)}{E} \tau_Q \quad (8)$$

由式 (8) 可以看出,采用图 6 所示的改进贴片方式后,可以同时消除弯曲正应力和扭转切应力的影响,从而获得较为准确的弯曲切应力的测量值。

为了验证上述实验方案的准确性,在应变花布置方式改进后的实验装置上进行加载实验。仍采用等增量 4 级加载,载荷增量仍为 $F = 100 \text{ N}$,取应变增量平均值作为测量值代入式 (8),得到弯曲切应力的测量值为 0.59 MPa 。根据式 (4) 得到的理论值为 0.57 MPa ,两者的相对误差仅为 3.5% 。

4 结 论

采用新的应变花布置方式后,在测量弯曲切应力时,可以同时消除弯曲正应力和扭转切应力的影响。实验测量结果也表明,在新的布置方式下,弯曲切应力的测量精度有了很大的提高,满足测量精度的要求。

参 考 文 献

- 1 刘鸿文,吕荣坤编.材料力学实验(第3版).北京:高等教育出版社,2006
- 2 赵志岗主编.基础力学实验.北京:机械工业出版社,2004
- 3 金保森,卢智先编著.材料力学实验.北京:机械工业出版社,2003

水力学求解器设计及快速开发

丁全林¹⁾

(河海大学环境科学与工程学院,南京 210098)

摘要 为快速开发水力学 CAI 软件——水力学求解器,提出了 BFB 开发模式和积木式结构相结合的开发方法。这种开发方法的优点在于最大限度地利用现有源代码,便于软件内容的扩展及多人协同工作,软件界面友好,使用方便,满足水力学教学的要求。

关键词 水力学, CAI, 积木式结构, BFB 开发模式

水力学课程中有些问题是靠繁琐的公式运算或者数值方法(差分法、有限元法等)解决的。例如:明渠非均匀流的水面曲线、土坝渗流流网等。本专科教学过程中,教师对这些问题一般会详细地推导公式,解说方程式的物理意义。但是,课堂上教师无法给出这些问题的定量解答。在这种情况下,学生往往不容易深入理解这些知识。为解决这一问题,很多学者提出了水力学求解器的概念,即把复杂的水力学计算封装成“黑箱”,仅提供给学生输入、输出界面的水力学 CAI 软件。让学生通过数字实验的方式理解并掌握相关知识。因此,水力学求解器应具备界面友好、针对性强、计算准确以及数据结果图形或动画显示等特点。

1 BFB 开发模式

1.1 BFB 开发模式概述

众所周知,高校、科研院所在多年的教学、科研过程中已经积累了大量的水力学计算程序。但是这些程序大多数是用 FORTRAN 或其他面向过程的语言编写的,其输入输出均为一系列数字表,而且各知识点的程序往往独立编写,没有整合成套。这样的程序不能满足辅助教学的要求。如果用 VB、VC 等面向对象的语言重新编写整合这些程序,要耗费

大量的人力、财力和时间,而且成果不一定令人满意。纵观国际上大型水力学计算软件,如 Delft3D、SMS 等,其计算程序是用 FORTRAN 编写的,而输入输出界面是用面向对象的语言编写的。像这种利用两种或两种以上的计算机语言编写程序的方法称之为混合编程。其优点是充分利用现有源代码,便于开发者分工协作。

VB 6.0 是一款面向对象的软件开发工具,具有事件驱动、结构化程序语言等特点,适合开发基于视窗系统的软件。本文拟采用 VB 6.0 与 FORTRAN 混合编程的方法开发水力学求解器,即采用 VB 6.0 制作输入界面,用 FORTRAN 程序进行后台计算,再用 VB 6.0 制作结果的图形或动画显示的混合编程方法,称之为 BFB 开发模式。

1.2 BFB 开发模式的接口实现

BFB 开发模式的关键是 VB 6.0 程序与 FORTRAN 程序的接口实现。主要有两种实现方法,一种是动态连接库法,即将 FORTRAN 程序在 Fortran PowerStation 4.0 开发环境中做成动态连接库,VB 6.0 程序调用此动态连接库的方法。图 1 给出了采用动态连接库进行混合编程时的数据传输过程。

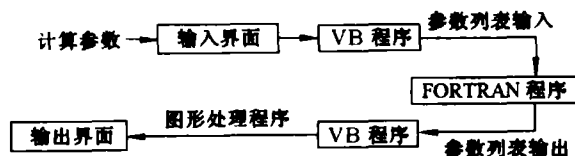


图 1 采用动态连接库法时的数据传输

2007-10-08 收到第 1 稿, 2007-11-29 收到修改稿。

1) E-mail: dingquanlin@126.com