

## EAST 装置主支撑应变测量

裴善报<sup>1</sup>, 曹云露<sup>1</sup> 郁 杰<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学机械工程系, 安徽 淮南 232001; 2. 中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** EAST 装置主体由真空室、极向场系统、纵场系统、冷屏、外真空杜瓦、主支撑等结构组成。装置主支撑(八个柱子)承担大约340 t 来自真空室、极向场系统、纵场系统、冷屏、外真空杜瓦等结构的重量, 主支撑因而产生应变、应力, 进而影响装置的水平度和稳定性, 而装置的水平度和稳定性涉及到装置运行的稳定性和安全性。因此, 需要检验主支撑的应力、应变以便及时校正。根据主支撑的理论应变大小和方向, 通过分析和比较, 采用电阻应变片和数据采集卡结合 Visual Basic 程序开发了应变测量系统。该系统与市场上零售的数据采集系统相比, 具有针对性强, 费用低等优点。

**关键词:** EAST; 应变片; Visual Basic**中图分类号:** TN707 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2004)01-0043-04

## 1 引言

EAST 先进超导托卡马克实验装置结构复杂, 造价昂贵, 建设周期长, 运行费用高。因此, 需要设计应力、应变监测系统来检验装置设计的可靠性, 确保装置运行的安全性。

目前已有十余种实验应力分析方法: 如应变片电测法、光弹法、脆性涂层法、云纹法、激光全息摄影法、声发射法、红外线法、单束激光斑干涉法等, 其中应变电测法是使用最广泛的一种。

## 2 电阻应变片的工作原理

将电阻应变片安装(如粘贴)在被测构件表面上, 构件受力而变形时, 电阻应变片的敏感栅随之产生相同应变, 其电阻值发生变化。用仪器测量电阻变化, 即可测量出构件表面敏感栅轴线方向的应变, 因此, 电阻应变片的主要性能与敏感栅有关。取敏感栅材料金属细丝, 研究其应变转换成电阻变化的关系。

金属丝的电阻  $R$  与丝的长度  $L$  成正比, 而与其截面积  $A$  成反比, 即:  $R = \rho \frac{L}{A}$ ,  $\rho$  为金属的电阻率。

当细丝因受拉力而伸长时, 其电阻发生变化,

此变化可由对上式的微分求得:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (1)$$

又因细丝伸长由泊松效应( $\mu$  为泊松比)引起截面变化:  $\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dL}{L}$ , 据高压下金属丝性能研究, 发现  $\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dV}{V}$ ,  $V$  为金属丝的初始体积  $V = AL$ ;  $m$  为比例系数(常数)。

$$\text{细丝轴向应变 } \epsilon = \frac{dL}{L}, \text{ 得}$$

$$\frac{dR}{R} = [1 + 2\mu + m(1 - 2\mu)]\epsilon = K_0\epsilon \quad (2)$$

$$K_0 = [1 + 2\mu + m(1 - 2\mu)] \quad (3)$$

在一定的应变范围内  $\mu$ 、 $m$  是常数, 因此  $K_0$  也是常数, 即电阻相对变化与应变成比例,  $K_0$  称为金属丝的灵敏度系数。对于康铜,  $m \approx 1$ ,  $K_0 \approx 2$ ,  $\frac{\Delta R}{R} \approx K_0\epsilon$ , 它表示应变——电阻效应, 电阻应变片就是利用这一效应制成的。

## 3 应变测量系统硬件设计

## 3.1 电阻应变测量电路分析与设计

由于机械应变一般都很小, 要把微小应变引起

的微小电阻变化测量出来,同时要把电阻相对变化  $\frac{\Delta R}{R}$  转化为电压或电流的变化。因此,可采用直流电桥测量应变变化而引起电阻变化的测量电路。

3.1.1 直流电桥平衡条件 在图1中,  $E$  为电桥供电电源;  $R_1 \sim R_4$  为桥臂电阻;  $R_L$  为负载电阻。

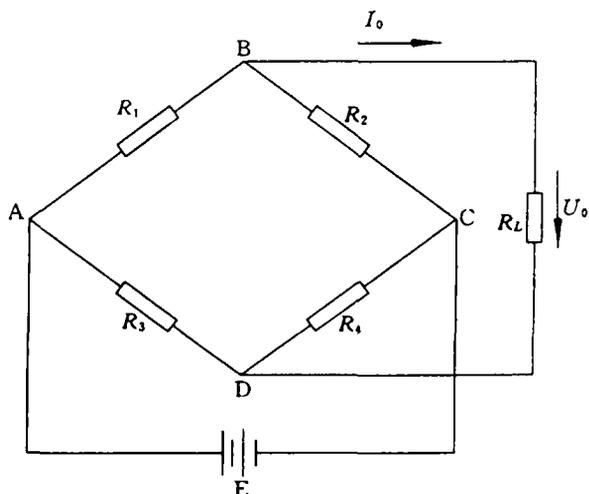


图1 直流电桥

当  $R_L \rightarrow \infty$  时,电桥输出电压为

$$U_0 = E \left( \frac{R_1}{R_2 + R_1} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (4)$$

当电桥平衡时,  $U_0 = 0$ , 则有:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \text{ 或 } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (5)$$

这说明欲使电桥平衡,其相对两臂电阻的乘积相等,或相邻两臂电阻的比值相等。

3.1.2 电压灵敏度 当应变片工作产生应变时,若变化为  $\Delta R$ ,其它桥臂固定不变,电桥输出电压  $U_0 \neq 0$ ,则桥路不平衡输出电压为

$$U_0 = E \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \\ = E \frac{\frac{R_4 \Delta R_1}{R_3 R_1}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} \quad (6)$$

设桥臂比  $n = R_2/R_1$ ,分母中  $\Delta R_1/R_1$  可忽略,并考虑到平衡条件  $R_2/R_1 = R_4/R_3$ ,则式(6)可写为:

$$U_0 = E \left( \frac{n}{(1+n)^2} \right) \frac{\Delta R_1}{R_1} \text{ 电桥电压灵敏度为} \\ K_V = \frac{U_0}{\Delta R_1} = E \frac{n}{(1+n)^2} \quad (7)$$

3.1.3 桥路预调平衡问题 为测量方便起见,在

构件变形前,要求电桥起始输出电压等于零,即  $du_{ab} = 0$ 。而要挑选完全一样的电桥电阻是很困难的,一般最常见的是并联电阻法,调整  $R_{12}$ ,使  $R_3$ 、 $R_4$  上并联的电阻得到调整,以达到调零作用,从而使电桥满足平衡条件。

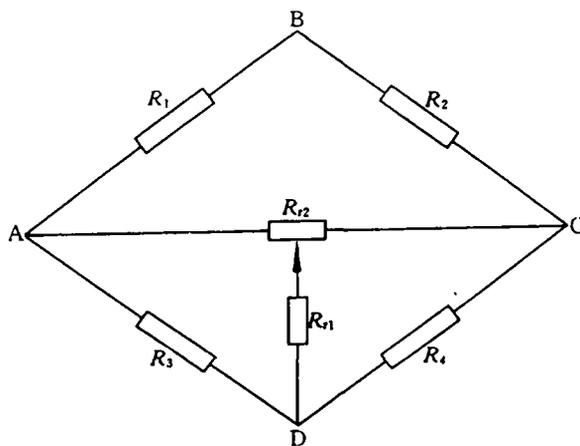


图2 预调平衡桥路

(1) 调零电位调至C端,相当于在  $R_4$  上并联电阻  $R_{11}$ ,这时CD臂的电阻变化率为

$$\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{R_4}{R_4 + R_{11}} \quad (8)$$

如果  $R_4 = 120 \Omega, R_{11} = 10 \text{ k}\Omega$

$$\text{则 } \frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{120}{120 + 10 \times 1000} = 1.185\%$$

(2) 调零电位调至A端,相当于在  $R_3$  上并联电阻  $R_{11}$ ,这时DA臂的电阻变化率为

$$\frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{R_3}{R_3 + R_{11}} \quad (9)$$

如果  $R_3 = 60 \Omega, R_{11} = 10 \text{ k}\Omega$

$$\text{则 } \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{60}{60 + 10 \times 1000} = 0.596\%$$

如果调节范围一定,计算并联电阻  $R_{11}$  的方法如下:

$$R_{11} = \frac{R \left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right)}{\frac{\Delta R}{R}} \approx \frac{R}{\frac{\Delta R}{R}}$$

若  $R = 120 \Omega, \frac{\Delta R}{R} = \pm 1\%$ ,则得

$$R_{11} = \frac{120}{0.01} = 12 \times 1000 = 12 \text{ k}\Omega$$

若  $R = 120 \Omega, \frac{\Delta R}{R} = \pm 0.5\%$ ,则得

$$R_{11} = \frac{120}{0.005} = 24 \times 1000 = 24 \text{ k}\Omega$$

### 3.2 采集卡

从直流电桥引出的电信号接至采集卡,可以实现计算机自动控制和采集。选用凌华公司生产的 PCI-9188 型多功能采集卡,该采集卡使用方便、效率高,广泛应用于数据采集,过程控制,自动测试,工业自动控制。其主要特性:32 位 PCI 总线,即插即用;12 位或 16 位分辨率;最高 333 kHz A/D 采样频率;单极性或双极性输入;突发方式扫描;可编程增益选择:  $\times 1$ 、2、4、8(9118DG/HR),  $\times 1$ 、10、100、1000(9118HG);两个 12 位高速模拟量输出通

道;4 个数字量 I/O 通道;三种 A/D 触发源:软件触发、可编程定时器触发与外部脉冲触发;50-pin SCSI-II 连接器;紧凑的半长卡结构。

### 3.3 阻应变测量硬件系统

应变测量电路与采集卡配合起来构成了硬件系统。装置运行过程中,需要监视的测量点不止一个,根据 EAST 主支撑应变测量的需要设计了八路,也可以根据需要进行扩充。测量电路由八组直流电桥组成,每组电桥由独立电源供电,相互之间互不影响(见图 3)。

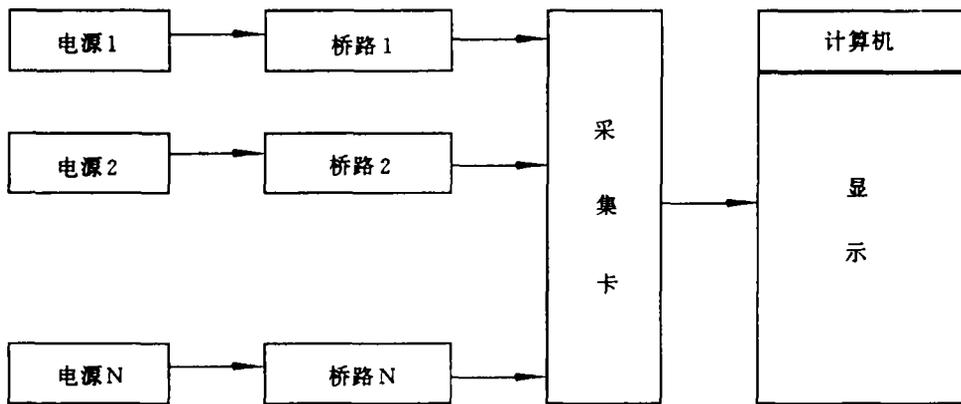


图3 EAST装置主支撑电阻应变测量系统硬件框图

## 4 应变测量系统软件设计

### 4.1 软件系统目的和意义

在硬件系统设计定型后,软件系统就成了决定整个测量系统功能强弱的关键因素。软件系统必须与硬件系统协调配合,才能完成对输入信号的处理工作。软件系统决定了系统的人机界面、测试速度、测试精度、易用性等指标,同时,软件系统自身的可维护性、可扩充性、可移植性也必须予以足够的重视;基于以上考虑,并结合测量系统对软件系统的需求,经过反复比较,确定了以 Visual Basic 语言为软件系统的程序设计语言。

### 4.2 应变测量系统

软件设计是为了配合硬件系统,方便、高效地

完成测量任务,因此软件设计之前必须明确硬件的工作过程。测量前对于 1-8 路电桥,分别调节电位器  $R_{p1}-R_{p8}$  使得各组电桥初始输出都为零。之后,即可通过软件设置各路电桥参数,包括应变片灵敏度系数  $GF$ 、应变片初始电阻值  $R_g$ 、导线电阻  $R_w$ 、采集卡量程以及试件材料弹性模量  $\mu$  等,设置完毕开始测量,根据需要可以选择手动测量或自动巡检。最后保存数据,还可以根据需要输出、打印数据。在应变测量系统主界面上,各路电桥输出电压值和对应应变值实时显示其中,一级菜单“应变测量”包含了“放大器调零”、“桥路调零”、“测量应变”、“测量终止”,一级菜单“文件”包含了“打开”、“保存”、“保存为”、“打印”,一级菜单“显示”包含“显示”,一级菜单“退出”(见图 4)。

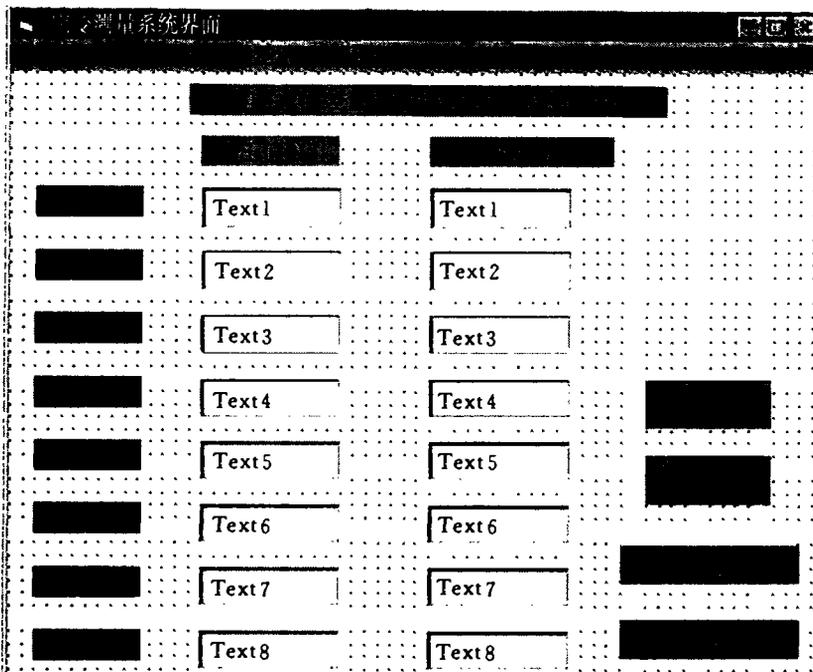


图4 EAST装置主支撑电阻应变测量系统主界面

#### 4.3 程序源代码(举例)

```

For j = 0 To 119
For i = 0 To 7
  If ImageOn(i) Then      '判断桥路
    If range_value(Combo1.ListIndex) >= 14
Then      '判断量程范围
      result = AI_9118_Config(0, P9118_AI_
UniPolar, 0, 0, 0)
    Else
      result = AI_9118_Config(0, P9118_AI_
BiPolar, 0, 0, 0)
    End If
    result = AI_ReadChannel(card, i, range_
value(Combo1.ListIndex), d)
    result = AI_VReadChannel(card, i,
range_value(Combo1.ListIndex), x)
    shuju(j, i) = x      '桥路i电压
    data(j, i) = (((-4 * x) / 2.04) * (1 +
Rw(i + 1) / Rg(i + 1))) /
GF(i + 1) / ((1 + μ(i +
1)) - (2 * x * (μ(i + 1)

```

- 1) / 2.04))

data(j, i) = 1000000 \* data(j, i)

'对应应变值

End If

Next i

Next j

#### 5 结语

随着EAST工程的推进,EAST装置主支撑应变测量系统将被运用采集数据,从而可以验证主支撑有限元计算的结果,对装置的总装提供理论参考和实际依据。

#### 参考文献:

- [1] 徐晗. HT-7U装置应变测量的预研及模型线圈应变测量[D]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所, 2002.
- [2] 刘瑞新. Visual Basic 程序设计教程(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [3] [美]J. 阿弗里尔. 实验应力分析手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1985.

(下转第54页)

## 参考文献:

- [1] 陈伯时. 电力传动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 1992.
- [2] 顾永辉. 煤矿电工手册[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1999.
- [3] 吴守箴, 臧英杰. 电气传动的脉宽调制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.

## Current-inverting power source of speed control in deceleration period of AC hoist in mines

WANG Qing-ling, WANG Yong

(Dept. of Electric Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** The requirement of speed in deceleration and low-speed-drive period of AC hoist and some problems in equipment are introduced in the paper. It presents a new technique of AC-DC-DC current-inverting project to resolve the problem of dynamic braking power source, and AC-DC-AC frequency-variable power source to resolve the problem of requirement of low speed drive. Describing the structure of system, the authors analyze the theory of control circuits. At last its structure of control software and main-program flow diagram are given here.

**Key words:** hoist; current-inverting power source; frequency converter

(上接第46页)

## Strain measured system of the main support structure of the EAST

PEI Shan-bao<sup>1</sup>, CAO Yun-lu<sup>1</sup>, YU Jie<sup>2</sup>

(1. Dept. of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract:** EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) is made up of vacuum vessel, the superconducting poloidal field, toroidal field, the thermal shields, the cryostat and the main support. The main support structure of the EAST superconducting Tokamak (8 pillars) is used for supporting the weight about 340 tons of vacuum vessel, the superconducting poloidal field, toroidal field, the thermal shields, the cryostat etc. Strain and stress landed on the main support therefore affect its horizontal height and stability. While horizontal height and stability of apparatus affect its safety and stability when it is running, it needs something to test its strain and stress so as to adjust it timely. Based on the theoretic value and direction of strain of main support, a measure system of strain is exploited by using resistance strain gauge and the data acquire, through analysis and comparison, and with a software——Visual Basic. The system has the advantages of low cost and good pertinency compared with the data acquire system sold in market.

**Key words:** EAST; strain gauge; visual basic