

EAST 磁体及冷屏测量系统设计

任凤梅¹, 武松涛², 刘全坤¹, 盛道林², 张远斌², 刘常乐²

(1. 合肥工业大学, 合肥 230009; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要: EAST 运行中的温度改变会导致磁体及冷屏产生形变和位移。为了测量此位移的变化, 利用一个延长臂, 把位移转移到较易测量的位置, 然后采用直滑式电位器把位移变化转换成电压变化并测量出其值, 最终转换成位移的变化值。该测量系统解决了 EAST 装置中磁体和冷屏位移测量的难题。

关键词: EAST; 磁体; 冷屏; 位移测量; 位移转移

中图分类号: TL62⁺9; TB22; TH822

文献标识码: A

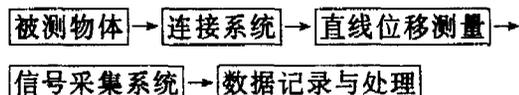
1 引言

EAST (Experimentation of Advanced Superconducting Tokamak) 在正式运行前需要进行降温试验, 以检验装置在降温过程中各大部件的定位精度, 并进行调整和修正, 从而保证在正式放电时各部件能够正常运行。在降温试验时, 内外冷屏降温到 80K, 超导磁体降温到 4.5K, 外杜瓦窗口用盲法兰封住, 内部抽真空, 整个装置处于一个封闭状态。当温度改变时, 真空室(VV)、内外冷屏(TS)、纵场磁体(TF)、极向场磁体(PF)以及外杜瓦(CV)——装置的五大主要部件必然会产生形变和位移。真空室和外杜瓦的温度变化只是收到冷屏热辐射的影响, 变化不大, 变形很小。磁体从室温降到 4.5K, 必然会产生形变和位移。通电时的磁场位形就会发生改变, 磁场的中心线会偏离原先设计的位置; 在等离子体放电时, 磁场对等离子体的约束就会偏移, 很可能导致高温等离子体与真空室的内壁接触, 进而导致实验失败。因此, 要对降温后还未通电时的磁体位置进行测量, 确定磁体的位置的变化范围。冷屏的温度变化也较大, 会产生较大的变形和位移, 故对冷屏也要进行测量。

2 EAST 磁体及冷屏测量系统的设计

2.1 测量系统的设计原理

由于被测点是在 4.5K 和 80K 的温度下, 一般的接触式传感器都不能正常使用, 而非接触式的精度和测量范围又不能尽如人意。因此, 采用一个延长臂, 把装置内部的位移通过延长臂转移到外杜瓦内侧, 再用一个直滑式电位器对延长臂的位移进行测量, 通过电压值的变化, 得到待测点的位移量。原理流程图如下:



测量系统主要由与被测点连接的支架、树脂垫板及斜块滚子组件、圆管杆件、弹簧和定位套筒、水平滑槽支架以及直线位移传感器六部分组成。

各测量点之间的区别主要是与被测点连接的支架结构不同, 其它部分均采用一样的结构, 以方便加工生产。由于装置内部的结构比较复杂, 防止支架与其它部件相互干涉, 采用一个较小的支架, 利用被测点处的可用空间和已有的螺纹孔, 把树脂垫板与被测点连接起来。利用树脂的热绝缘性, 减小热传导对杆件的影响。图 1 为外冷屏测量系统的结构示意图。

当测量极向场和纵场时, 在上检测窗口的冷屏处有隔板, 需将隔板中开一个通孔, 孔的尺寸要保证杆子不碰到孔壁, 使杆件自由通过, 在通孔附近要加

绝热材料,以尽量减少冷屏对杆件温度的影响。由于冷屏自身在降温过程中还要发生位移,由有限元分析计算得到在上检测窗口处将下降 7mm,在孔的上部要留出 8mm 的空间来保证杆件与冷屏不接触。测量磁体的杆件要跨越 4.5K、80K 和 300K 三个温度区间,测量冷屏的杆件也要跨越 80 ~ 300K 的区域。要保证测量的精度,杆件自身的热收缩率要低,因此选用绝热绝缘性能好的环氧树脂材料。从图 1

可以看出,杆件属于悬臂梁,为防止杆件的弯曲,采用重量轻抗弯曲强度较高的环氧树脂管材。在安装前还需要对杆件做低温收缩测量,以保证测量精度。弹簧要顶在粘接在圆管上的套筒和水平滑槽的支架之间,采用圆截面材料圆柱螺旋压缩弹簧。其起始位置有一定的预压缩,使之对圆管套筒有一定的推力推着圆管顶在树脂垫板上。预压缩量要超过预计的位移量 20 ~ 25mm。

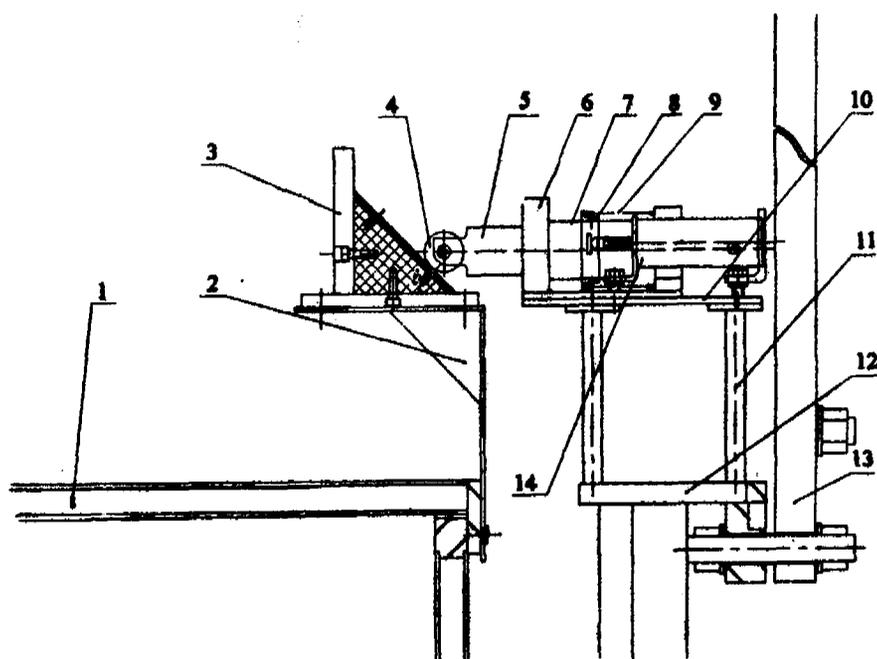


图 1 外冷屏测量系统总装示意图

1—冷屏水平颈管;2—托架;3—树脂垫板;4—滚子;5—圆管;6—滑槽;7—衬套;
8—套筒及挡板;9—弹簧;10—垫板;11—支架;12—外杜瓦;13—盲法兰;14—直线位移传感器。

水平滑槽也采用圆管,在安装的时候要保持水平,并且与圆管杆件要有良好的接触,采用间隙配合,使之既能保证杆子在水平方向移动,又可以对杆子起到支持和定位的作用。水平滑槽用支撑固定在杜瓦上,可以认为是不动的。

直线位移传感器采用滑动变阻器,即直滑式导电塑料电位器。它是接触式的,对测量物体有一定的作用力,工作温度范围在 $-55 \sim +125^{\circ}\text{C}$ 。与电感式、电容式相比其精度相对较低,但线性范围较大,

独立线性度为 0.3%;分辨率理论上无限小,实际分辨率是由量程、电阻两端所加的电压以及电压表的分辨率确定。比如电阻两端加 5V 的电压,电压表的分辨率为 0.01V,对量程为 25mm 的电位器,分辨率就可以达到 0.02mm。电位器固定在外杜瓦上的盲法兰上,伸缩杆与圆管连接在一起,即可测得圆管的水平位移量。由于此次测量在外杜瓦内部进行,传感器会受到冷屏热辐射的影响,在试验前还需要对传感器做标定试验。

电位器的输出是电压信号,用电压表测的电位器两端电压 V_0 及触点和起始端之间的电压 V_1 , $V_1/V_0 = L_1/L_0$ 。当触点移动时, V_1 改变, L_1 随之改变,实时的记录下电压值,即可得到位移的变化情况。电压信号通过航空插头把电线从杜瓦内部的真空室接到杜瓦外部,电信号可以用采集卡采集,并用程序实时地记录变化量,或者采用电压表直接记录下电压值,再计算得出结果。

2.2 水平与垂直位移的分解

由于装置的对称性和十六瓣相互之间的约束,磁体和冷屏在降温时的移动只有径向收缩和垂直收缩;由于位移点位于装置内部,位移量相对装置的尺寸而言较小,在位移点附近没有可以作为基准的点,故不易直接测量。因此采用一根热收缩率很低的刚性绝缘材料(如环氧树脂等)杆件,通过固定在外杜瓦上的弹簧支架将杆件顶在位移点的支架上,把位移通过杆件引到靠近外杜瓦处,以外杜瓦作为基准进行测量。在杆子的另一端直接连一个直线位移传感器(滑动变阻器式),传感器固定在外杜瓦上。水平位移直接把杆件顶在测量点上固定的平板支架上,平板和被测点同时移动,当发生水平收缩时,杆件在弹簧的推力作用下与平板同时向内移动。垂直位移测量采用一个几何斜块,将斜块的垂直位移转换成水平位移。同样采用弹簧将杆件顶在待测点处的斜块上,随着测量点向下向内移动,杆件在水平方向向内移动,得到水平位移和垂直位移的叠加量。整个测量系统的难点在于杆子的支撑、固定与测量精度。

2.3 测量点的确定

考虑到测量的方便性和位移点的代表性,在上检测窗口开设观测窗对纵场和极向场的一号大线圈进行测量。在水平窗口对内外冷屏进行测量。具体的测点的如图 2 所示。整个圆周有 4 个上检测窗口,选相隔 90° 的两个窗口可以测量同一个点(1 点)的水平位移和垂直位移,定位和支架固定都比较容易。水平窗口的通径比较大,可以在同一个窗口采集到两个点的两个方向的位移。选取两个窗口,各测量两个点(2 点和 3 点)的位移。

3 误差分析

影响该测量系统精度的主要因素有以下几个方面:托架、垫板及杆件的热收缩,滑槽与圆管之间的

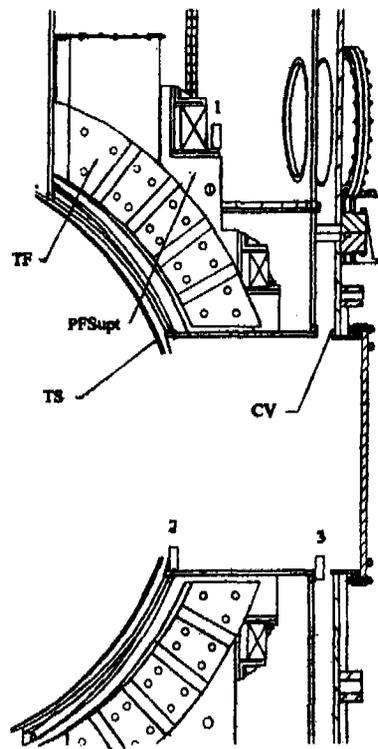


图 2 测量点的位置

间隙造成圆管的倾斜,位移传感器以及测量元件的误差。

3.1 托架、垫板及杆件的热收缩

托架材料用 316L 不锈钢,垫板、圆管材料用环氧树脂。其热物理性质都是已知的,它的温度分布通过 Ansys 软件分析得出,再将温度分析的结果耦合位置约束,进行结构分析计算得出收缩量 $X_1 = 2.726\text{mm}$ 。考虑到模型中不确定因素对有限元分析结果的影响,经过可靠度分析,计算结果的置信限度为 95%,即相对误差 $\epsilon_{X_1} = 5\%$ 。

3.2 滑槽与圆管之间间隙造成的误差

由于滑槽与圆管有轴向运动,采用 F8/h7 的间隙配合,两者之间的最大间隙为 0.089mm ,滑槽的长度为 100mm ,杆子的倾斜角 $\alpha = \arctg(0.089/100) = 8.900 \times 10^{-4}\text{rad} = 0.051^\circ$,由于间隙而导致的误差为

$$\epsilon_{X_2} = \frac{\left(\frac{1}{\cos\alpha} - 1\right)}{1} \times 100\% = 4.0 \times 10^{-5}\%$$

3.3 测量元件造成的误差

此次测量是先用位移传感器将综合位移量 X_0 转换为电压值 U , 再通过引线把电压信号传到数据采集卡, 然后通过计算机程序再输出位移量 X_0 。

位移传感器选用的是导电塑料式的滑动变阻器 SM36XWY 型直线位移计。其量程为 25mm, 经过计算, 传感器处在大约 -20°C 的温度区域内, 这在传感器的工作温度范围 $-55 \sim 125^{\circ}\text{C}$ 之内。因此对于此次测量来说, 由传感器造成的相对误差即元件本身的误差 0.1%。

传感器的测量结果采用凌华的 DQA2206 型采集卡将电压的变化值采集到计算机中, 通过程序将其输出, 并变化成位移值。2206 采集卡包括线上损耗的误差在 5mV 以下, 传感器的最大输出值为 5V, 相对误差 $\epsilon_u = \Delta U/U = 0.001 = 0.1\%$ 。

采用了传感器和数据采集卡两个测量元件, 相对误差累计后为:

$$\epsilon_{x_0} = [(1 + 0.1\%)(1 + 0.1\%) - 1]/1 = 0.2001\%$$

按照间接测量的误差分析理论, 假设间接测量的函数关系 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$, 则间接测量值 y 的相对误差 ϵ_y 为:

$$\epsilon_y^2 = \frac{(\Delta y)^2}{y^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 (\Delta x_i)^2}{y^2}$$

对于此次测量, $X = X_0 - (X_1 + X_2)$, 则

$$(\Delta X)^2 = \left(\frac{\partial X}{\partial X_0}\right)^2 (\Delta X_0)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial X_1}\right)^2 (\Delta X_1)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial X_2}\right)^2 (\Delta X_2)^2$$

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{(\Delta X)}{X} \\ &= \left[\frac{(\Delta X_0)^2}{X_0^2} + \frac{(\Delta X_1)^2}{X_1^2} + \frac{(\Delta X_2)^2}{X_2^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= (\epsilon_{x_0}^2 + \epsilon_{x_1}^2 + \epsilon_{x_2}^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= 5.004\% \end{aligned}$$

故由以上的分析可得, 此次测量所得位移的误差为 5.004%。误差符合设计精度要求, 主要误差是由有限元模拟的误差造成。

4 结论

a. 此次测量主要是通过一个延长臂, 把 4.5K 和 80K 温区的位移转移到接近室温的地方进行测量。

b. 由于整个装置比较复杂、内部温度很低, 而且不可破坏其内部结构, 对延长臂的选材、支撑的设计和安装精度都有比较高的要求。

c. 误差主要是由托架、垫板及杆件的热收缩, 滑槽与圆管之间的间隙造成圆管的倾斜, 位移传感器以及测量元件造成, 此次测量的相对误差约为 5%。

d. 降温试验开始后, 测量出来的结果只是几个点的位移量, 还需要进行整理和分析, 得出整个 TF、PF 和冷屏的位移变化, 并参照有限元模拟的结果得出相应的结论。

参考文献:

- [1] 武松涛, 万元熙. HT-7U 装置设计文集(一) [C]. 合肥: 中科院等离子体物理研究所, 1998.
- [2] 陈文革. HT-7U 超导托卡马克核聚变装置纵场磁体结构的设计分析与磁体实验研究 [D]. 合肥: 中科院等离子体物理研究所, 2002. 42-50.
- [3] 王煜东. 传感器及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 16-34.
- [4] 任嘉卉. 公差与配合手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [5] 方昆凡. 工程材料手册——非金属材料卷 [M]. 北京: 北京出版社, 2002. 1-87.
- [6] 吴泳华, 霍剑青, 熊永红. 大学物理试验(第一册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

Design of metrical system for magnet and thermal shield in EAST

REN Feng-mei¹, WU Song-tao², LIU Quan-kun¹,
SHENG Dao-lin², ZHANG Yuan-bin², LIU Chang-le²

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: The deformation and displacement of magnet and thermal shield will take place due to the temperature change during EAST operating. In order to measure the displacement, an extended arm is used to transfer it to a place where it is easy to be measured and the variation of displacement is changed to voltage data by rheostat, finally the displacement data is obtained from voltage data. This system mainly focused on how to measure the displacement of magnet and thermal shield in EAST.

Key words: EAST; Magnet; Thermal shield; Displacement measurement; Displacement transfer