

核电站热试位移传感器支架可行性研究

章 济

(国核电站运行服务技术有限公司,上海 200233)

摘要: 核电站热态功能试验期间,为了能够监测管道热膨胀、动态效应及振动,需要在高能管道及设备上安装位移传感器。传感器支架是监测系统最为关键的结构和承载单元,其可行性研究一直是热点问题。用C型钢(即美国著名管道系统支撑品牌 unistrut 型钢的国内替代产品)设计制作的临时支撑,不仅结构牢固,而且支撑生根方式不会破坏厂房的基础结构。采用理论分析、数值模拟的方法研究临时支撑的力学特性和功能原理,分析支撑杆在受拉(压)工作载荷下产生的最大挠度和支撑的失效条件。得到了临时支撑达到稳定状态的临界条件和支撑承载能力极限值,并将上述理论结合数值模拟应用于工程实践。

关键词: 临时支架; C型钢; 挠度; 正应力; 许用载荷

中图分类号: TL 48 文献标志码: A 文章编号: 1672-5581(2025)02-0315-03

Feasibility study of displacement sensor bracket in thermal function test for nuclear power plant

ZHANG Ji

(State Nuclear Power Plant Severice Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: In order to monitor the thermal expansion, dynamic effects and vibration of pipelines during thermal function tests in nuclear power plants, displacement sensors need to be installed on high-energy pipes and equipment. The sensor bracket is the most critical structure and bearing unit of the monitoring system, and the feasibility study has always been a hot issue. The temporary support designed and made of C-shaped steel (that is, the domestic alternative product of the famous American pipeline system support brand unistrut steel) is not only structurally firm, but also the support rooting method will not damage the infrastructure of the plant. The mechanical characteristics and functional principles of the temporary support are studied by theoretical analysis and numerical simulation, and the maximum deflection of the support rod under the tensile (compressive) working load and the failure conditions of the support are analyzed. The critical condition and the limit value of the bearing capacity of the temporary support reaching the steady state are obtained, and the above theory combined with numerical simulation is applied to engineering practice.

Key words: instrument support; C sharp steel; deflection; normal stress; allowable load

核电站管道热位移试验,对安全运行具有极其重要的作用。该数据被用于分析管道的运动情况,帮助提高安全性能。试验的测点覆盖核电站五大功能系统,大约有200个测点位置。小小的支架也能决定着试验的成败,因此需要为该试验设计稳定、可靠的专用支架。

核电站的电气支撑采用美国著名品牌 unistrut 型钢及配件,因其通用性和灵活性而提供了一种快速的安装方案。该产品的原材料为碳钢或不锈钢,最低屈服强度为227.53 MPa,符合ASTM A1008标准。在国内用Q235碳钢代替,即CHUANGBUILD型钢(以下简称C型钢),其力学性能也非常接近。

因此,国内某钢厂生产的C型钢将作为支架的主要材料。

管道热位移支架力学性能试验的目的:对用于该试验的几种不同的支架进行研究,评定其最大挠度是否小于 1.58 mm,是否具有承载能力等内容。

1 试验方法

1.1 试验对象

第1种以磁铁吸附在钢制墙壁上为例,进行受力分析。悬臂梁剪应力模型如图1所示。

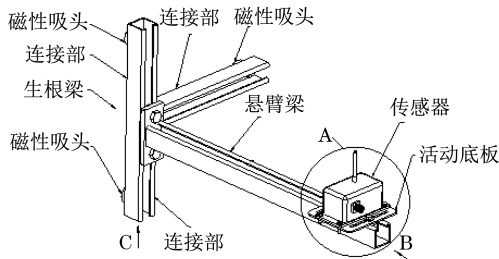


图1 支撑固定

Fig.1 Working example of support

第2种以焊接为生根方式的支架,在已有的方钢上焊接C型钢作为生根梁,如图2所示。在C型

钢的侧面与方钢交汇处现场焊接,是磁铁吸附的替代方案,而且焊接相比磁铁吸附更加牢固。焊接方式为现场焊接,4.76 mm角焊缝。

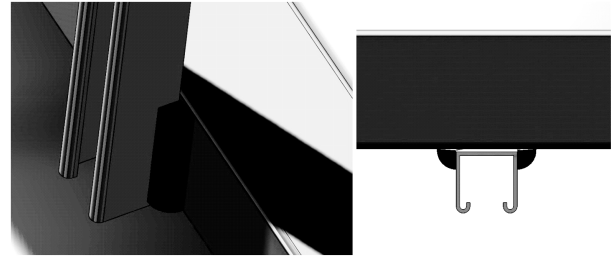


图2 焊接点模型

Fig.2 Model figure of welding

1.2 试验内容

基本假设与力学模型如下:

将支撑臂简化为悬臂梁,假设长度为 1.5 m,不发生变形。计算悬臂梁工作载荷下的总重量,用C型钢最大允许载荷来验证。建立挠度与荷载、悬臂梁长度之间的函数关系为

$$W_{\max} = -\frac{FL^3}{3E_s \cdot I_s} \quad (1)$$

式中: W_{\max} 为最大挠度; F 为荷载; L 为悬臂梁长度; E_s 为弹性模量; I_s 为截面惯性矩。

表1 计算结果汇总表

C型钢规格: S2535H, 材质: SS400(代替 unistrut P3000HG)		
计算项目	计算内容	计算结果
截面的宽度、高度、截面面积	$b=41.27 \text{ mm}, h=3.5 \text{ mm}, A_s=322.58 \text{ mm}^2$	
最小截面惯性矩、最小抗弯矩	$I_s=49 \ 947.77 \text{ mm}^4, W_s=2 \ 621.93 \text{ mm}^3$	
截面自重(均布载荷 q)	$q=2 \text{ kg/m}$	
假设悬臂梁最大允许长度	$L_s=1.5 \text{ m}$	
传感器自重	$W_m=0.909 \text{ kg} \times 9.8$	8.91 N
钢丝绳的张力	$T=3.5 \text{ N} \pm 20\%$	$T=4 \text{ N}$
剪力 F_s	$F_s = W + T = 8.91 + 4$	$F_s = 12.91 \text{ N}$
总重(生根梁、支撑臂)	$W_{\text{total}} = 2 q \cdot L_s + F_s$	$W_{\text{total}} = 43.24 \text{ N}$
3 048 mm 简支梁允许载荷 ^①	$L=1.2 \text{ kN}$	
比较总重和允许载荷	$43.24 \text{ N} < 1.2 \text{ kN}$	$W_{\text{total}} < L$
结论: CHUANGBUILD S2535H 是可以接受的。		
拉线的最大张力载荷	$F=T=4 \text{ N}$	
钢的弹性模量(查资料) Elastic Modulus		$E_s=2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$
支架最大挠度 ^②	$W_{\max} = -\frac{FL^3}{3E_s \cdot I_s}$	$W_{\max} = -0.46 \text{ mm}$
结论: 最大挠度满足小于 1.587 5 mm 的要求		

注: ① 相同载荷下, 考虑到 3 048 mm 简单梁效果(最大弯矩)等同于 1 524 mm 的悬臂梁, 简支梁为 $M = \frac{1}{8} q l_1^2$, 悬臂梁为 $M = \frac{1}{2} q l_2^2$, 所以 $l_1 = 2l_2$;

② 挠度为横截面形心在 y 方向的位移, 取 W 向上为正(取变形前梁的轴线方向为 X 轴, 垂直方向为 Y 轴, XY 平面为梁的纵向对称面);

③ 截面的宽度、高度、截面面积是指 C 型钢的参数。传感器是指安装在支架上物体的参数。表 1 的计算内容是根据上述参数对支架进行受力分析和载荷校验的结果, 并给出了最终结论。

1.3 测试系统

本试验用的传感器是美国 CELESCO 品牌的 PT101 拉线式位移传感器^[1], 满量程为 254 mm, 精度 0.15%。试验前将它装在底板上, 拉线端与绕管道一周的钢丝绳相连。传感器信号传输到基于 NI 采集板卡开发的数据采集系统上 (data acquisition, DAQ)。为了使管道有 ±127 mm 的膨胀裕量, 试验前传感器拉线被拉出 127 mm 的长度, 初始状态下 DAQ 的读数不为 0。如图 3 所示。

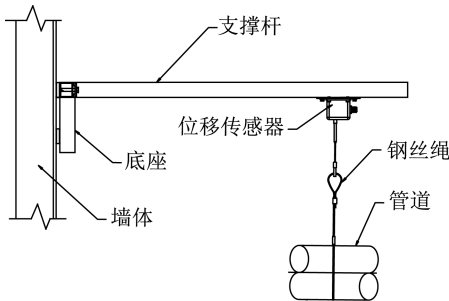


图3 支架工作图例

Fig.3 Working example of support for displacement sensor

打开数据采集系统, 从 DAQ 中读出此时的位移值 a 。将传感器拉线拉出一个标准 203.2 mm 量块的长度, 记录拉线拉伸的距离 c , 以及记录下 DAQ 显示的位移值 b 。传感器拉线松开, 回缩到初始位置, 记录下 DAQ 显示的位移值 e 。验证方法如下:

(1) 由记录的 DAQ 显示值决定的拉线位移量, 计算 $d = [c - (b - a)c] \times 100\%$, 并确认 $d \leq 5\%$ 。

(2) 初始记录的位移值和最终记录的位移值之间的显著差距, 计算 $f = |e - a|, f \leq 1 \text{ mm}$ 或者是已知量块长度的 0.01, 取其中较小值。

2 结果分析

采用上述“原位校验法”^[2]来验证误差。抽取几个不同生根方式的支架按上述步骤进行验证, 整理出结果, 如图 4 所示。

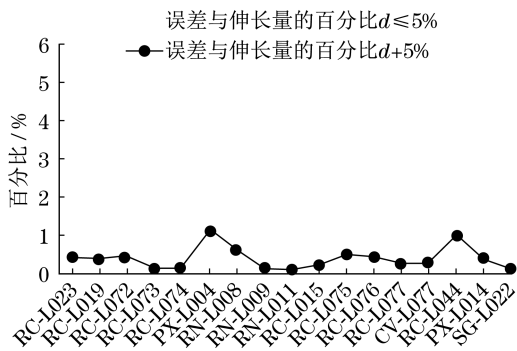


图4 误差与伸长量的百分比

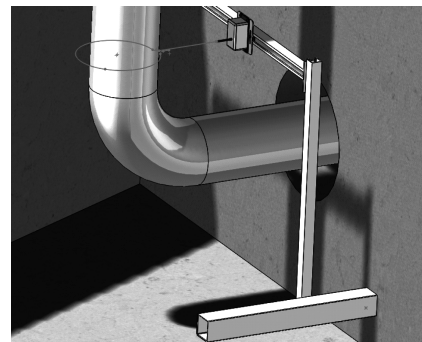
Fig.4 Percentage of deviation and extended

由图 4 可知, 所有抽取的测点, 拉线端的挠度在允许的测量误差范围内, 因此该支架可以使用。

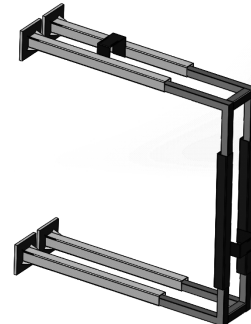
3 结论

3.1 磁吸附支架

根据不同测点的支架, 找出它们的共性特点。即组成支架必不可少的有 3 个部分: 生根梁、支撑臂、活动底板。两个 C 型钢焊成 T 型作为生根梁。支撑臂 (也叫悬臂梁), 采用 C 型支撑或双 C 型支撑, 长度小于 1.5 m。如果需要 1.5 m 长度的支撑臂, 则必须用双 C 型钢, 再焊接斜撑来增加稳定性。生根梁和支撑臂的自由度必须被完全约束, 避免出现 L 型支撑, 如图 5(a) 所示。该支撑悬臂梁的自由度没有被完全约束, 而且对生根梁的柱载荷是不断变化的, 抗扭刚度小。这种情况考虑门型架代替方案, 门型架^[3-5]结构是永久支撑典型案例, 如图 5(b) 所示。



(a) L型支架



(b) 门型架

图5 L型和门型架

Fig.5 L type and door frame type support

该永久支架常被用来固定流体管道的永久监测仪表, 在现场使用上与临时支撑有很大区别。该支架以结构稳定、距离可调节、测量精度高著称。它的缺点是需要焊接, 有可能破坏厂房的固有结构。

(下转第 323 页)

BP神经网络与回归模型在预测燃油消耗率时误差均小于5%,因此在经济性预测时,两者均可以使用。在评估动力性时,BP神经网络与回归模型的误差均小于5%,均能用来预测胶轮车的动力性。

参考文献:

- [1] 张庆洪. 基于径向基神经网络的汽车油耗软测量及监测系统研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- [2] 苗会,张翼,张探军,等. 基于AMESim柴油机油耗测量系统的仿真与优化[J]. 中国测试,2014,40(6):113-116.
- [3] 成文浩,寇子明,闫政,等. 基于多元回归模型的矿用胶轮车动力性评估[J]. 煤炭工程,2020,52(2):147-150.
- [4] 刘树成,闫清东,邢庆坤. 车用大功率柴油机与液力变矩器动态匹配影响因素分析[J]. 兵工学报,2016,37(3):385-393.
- [5] CESUR M R, CESUR E, ABRAHAM A. Digital twin-based fuel consumption model of locomotive diesel engine [C]// International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Cham: Springer Nature,2022:428-435.
- [6] AMER A, ABDALLA A, NORAZIAH A, et al. Prediction of vehicle fuel consumption model based on artificial neural network [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,492:3-6.
- [7] YAO Y, ZHAO X, LIU C, et al. Vehicle fuel consumption prediction method based on driving behavior data collected from smartphones [J]. Journal of Advanced Transportation,2020(1):1-11.
- [8] 孟祥踪,王利辉,张强,等. 基于AVL CRUISE的6×6越野汽车动力性及经济性研究[J]. 现代制造技术与装备,2020(4):30-32.
- [9] 陆昌年,曾凡灵. 基于AVL Cruise的轿车综合循环工况油耗的改善[J]. 汽车工程师,2013(5):43-46.
- [10] 中国机械工业联合会. GB/T 21404—2022:内燃机发动机功率的确定和测量方法一般要求[S]. 北京:国家标准化管理委员会,2019.
- [11] 中国北京集团大连机车车辆有限公司. 内燃机车用柴油机通用技术条件:GB/T 3391—2016[S]. 北京:国家标准化管理委员会,2017.
- [12] 安标国家矿用产品安全中心有限公司. 煤矿用防爆柴油机无轨胶轮运输车辆通用安全技术条件:MT/T 1199—2023[S]. 北京:国家矿山安全监察局,2023.

(上接第317页)

安装使用时需要厂房临时变更评估和授权,而且安装复杂,工期长,成本高。因此不能用于管道热位移试验这样的非永久仪表。

3.2 焊接生根的支架

(1) 4.76 mm角焊缝,碳钢焊条,现场焊接的临时支撑是可行的。

(2) 根据许用载荷的计算公式 $F_{\text{weld}} = [\sigma] \cdot A$ ($[\sigma]$ 表示材料的许用应力)可知^[4],增加焊缝的面积可以增加焊缝的应力强度。对于4.76 mm角焊缝而言,焊缝的长度大于35 mm即可,现场焊接的焊缝应尽可能长。

参考文献:

- [1] 邱宣怀. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2011:41.
- [2] 唐永进. 压力管道应力分析[M]. 北京:中国石化出版社,2003:166.
- [3] 郑文纬,吴克坚. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,1997:34.
- [4] 李学志. 计算机辅助设计与绘图[M]. 北京:清华大学出版社,2007:22.
- [5] 卢章平,张艳. 不同有限元分析网格的转换[J]. 机械设计与研究,2009(6):10-14.