

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.01.006

燃料组件抽插力测量系统研究与应用

彭望¹,周剑良^{1*},陈虹先²,郭爽²

(1. 南华大学核科学技术学院,湖南衡阳 421001;2. 中核建中核燃料元件有限公司,四川宜宾 644000)

摘要:国内核燃料元件公司以前采用的抽插力测量系统存在设备陈旧,机械故障多,系统不能稳定运行等不足,通过对燃料组件抽插力测量系统进行研究,设计了新的机械结构和数字化系统的改进方案,并在燃料元件厂实际使用中实现了燃料组件抽插力测量的数据自动读取与测量底座自动转换。研究表明,新的燃料组件抽插力测量系统实现了燃料组件抽插力测量过程自动化、数字化和系统化的提升,系统更加稳定,生产噪声明显变小,操作更安全便捷。

关键词:燃料组件;抽插力;系统设计;自动检查

中图分类号:TL38 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2020)01-0035-05

Modification of Fuel Assembly Insertion Force Measuring Equipment

PENG Wang¹, ZHOU Jianliang^{1*}, CHEN Hongxian², GUO Shuang²

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. CNNC Jianzhong Nuclear Fuel Co., Ltd., Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: Through the research on the measuring system of the thrusting force of fuel assembly, it is found that the measuring system of the thrusting force of fuel assembly used by the domestic nuclear fuel element company has some shortcomings, such as obsolete equipment, many mechanical faults and the unstable operation of the system, so a new mechanical structure and an improved digital system are designed, and the data automatic reading and the automatic conversion of the measuring base are realized in the practical use of the fuel element plant. All the study shows that, the automatic conversion of the data reading and measuring base is realized, and the mechanical structure is redesigned, which makes the system more stable, the noise is obviously smaller, and the operation is safer and more convenient.

key words: fuel assembly; thrusting force; system design; automatic inspection

收稿日期:2019-09-18

作者简介:彭望(1991-),男,工程师,硕士研究生,主要从事核技术应用方面的研究。E-mail:810222530@qq.com。
*通信作者:周剑良(1956-),男,教授,主要从事辐射防护方面的研究。E-mail:13327341099@189.com。

0 引言

核燃料组件和相关组件是反应堆的基本单元,燃料组件以内部芯块发生链式反应产生热量,相关组件则通过插入燃料组件内导向管的深度控制反应速度^[1-2]。在国内外主流核电站设计中,反应堆紧急停堆是将相关组件插入、下落至组件来实现^[3-4]。由于相关组件在下落中会与导向管内侧发生摩擦,故该摩擦力是非常重要的数据,它直接影响到相关棒的插入速度和能否在导向管通道中无损下落^[5]。

在测量核燃料组件相关组件抽插力时,行业内的抽插力测量系统主要采用的是测力传感设备采集力值,通过数模转换显示在测力传感设备屏幕上,靠肉眼读取最大值,受人为因素影响较大。在核燃料厂中,测量抽插力的燃料组件分AFA3G、300 MW和CF系列等,在进行组件类别转换时,需要人工进入地坑内部,转换两个实心金属底座,费力且安全风险大。本文通过对抽插力测量系统进行改进,重新设计机械结构和控制系统,实现了数据的自动读取与测量底座自动转换,使得系统更加稳定,操作更加安全便捷。

1 燃料组件抽插力测量方法

燃料组件的抽插力值就是相关组件插入或抽出燃料组件导向管时所受的摩擦力的大小,其测量装置如图1所示。伸缩臂电机在后缩状态时,将需见证的燃料组件按固定方向吊入地坑并夹紧,按键让伸缩臂伸出,前伸到位后用导向梳把相关组件导入导向管内,清零系统的测力传感器,使相关组件匀速下降直到相关棒全部插入燃料组件导向管内;再清零测力传感器,并且让相关组件上升到距导向管管口面约10 cm距离,分别记录相关组件插入及抽出过程中的最大值。抽插力测量完成后按键使伸缩臂后缩,驱动卷筒带动相关组件回缩且同时微微下降,直至后缩停止。

2 测量系统现状分析

对旧式测量系统进行分析,在旧系统对相关组件的插入/抽出过程可以看出,主要存在以下不足:

1) 相关组件插入燃料组件的整个过程为手动控制(即手动下降),快降至燃料组件底部时需十分小心、慢速(以防止相关组件和下管座发生大力碰撞),整个过程操作难度大,安全风险大,

耗费时间长。

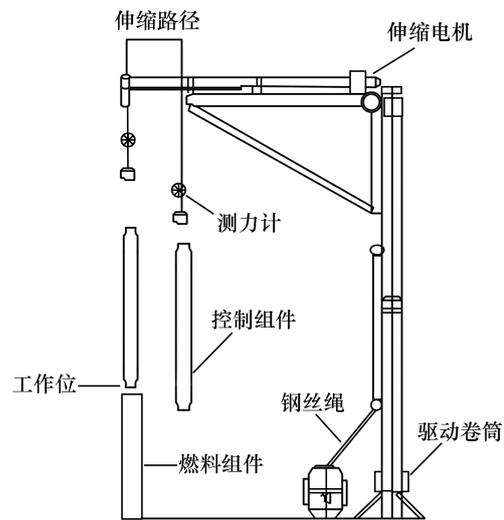


图1 抽插力检测示意图

Fig.1 Schematic diagram of thrust detection

2) 测量值显示在连接传感器的一台显示器上,显示实时变化值。因现有系统无法自动采集测力传感器最大值(技术要求采集值),操作者必须肉眼不间断目视显示值,劳动强度大,且容易出现人因误差。

3) 更换燃料组件类型时,必须更换组件底座,该过程目前只能由人进入地坑底部,人力推动,费时费力且下地坑过程人有跌落风险。

在核燃料厂产量日益扩大的背景下,旧系统难以满足测量需求,在改进旧系统自动化程度和数字化的同时,考虑增加新的功能进行技术性防错应用,新系统应满足以下要求:

1) 自动采集测力传感器的值并显示在电脑显示屏上,绘成一条实时抽插力值曲线图,测量结束后在屏幕上方自动显示出此次插力(或抽力)的最大值。

2) 针对不同类型组件抽插力要求(AFA3G组件对相关组件抽插力要求最大值是67 N,300 MW组件抽插力最大值是59 N)分开设置测量阈值,在超过后立即示警。

3) 组件底座可实现一键自动更换。

3 新测量系统研制

新型抽插力测量系统由工控机、PLC系统、直流电源、液晶显示器、伸缩臂电机、升降电机、称重传感器、称重显示器、报警器、接近开关、操作台、伸缩机构和卷扬机构机械装置等组成。

3.1 机械结构改进

3.1.1 伸缩臂系统改进

将伸缩臂及驱动机构由原来的滑动导轨改为直线导轨和滚珠丝杠的结构形式,运动灵活可靠,无噪音,如图2所示。滑动导轨是由钢珠在滑块跟导轨之间无限滚动循环,从而使负载平台沿导轨高精度线性运动,并将摩擦系数降至平常传统滑动导轨的五十分之一,能达到高的定位精度。卷扬机构增设直线导轨和钢丝配重后,绕线精准不混乱,解决了以往经常发生的绞线问题。

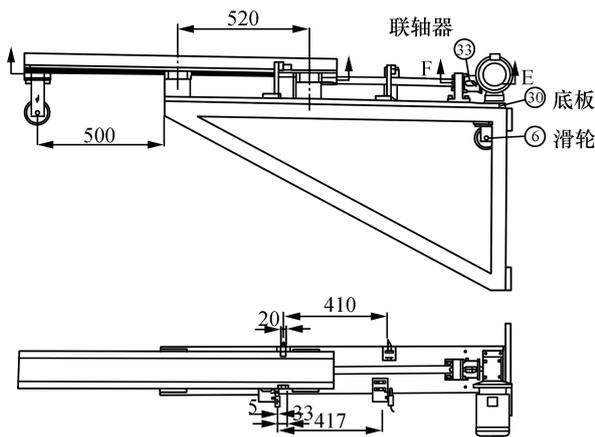


图2 伸缩滑台示意图

Fig.2 Schematic diagram of telescopic slide

3.1.2 气动滑台系统改进

新增的气动滑台可以自动切换燃料组件底座来满足不同类型燃料组件的检测(其中AFA3G类型燃料组件底座带光源,光源使用安全电压,用来检查导向管内异物),如图3所示。为了确保两个重物不产生轻微位移影响组件固定,在底座旁边加入了固定插销确保底座固定不移动。

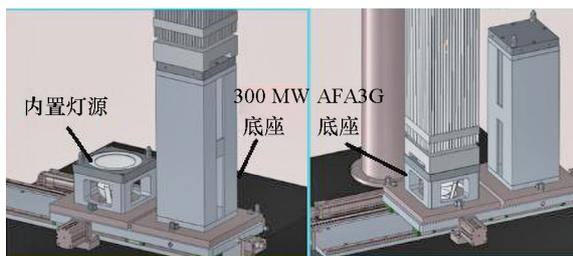


图3 气动滑台示意图

Fig.3 Schematic diagram of pneumatic slide

3.1.3 寻原点改进

原点是基准位置的体现,通过寻原点能够在上下空间中给予相关组件一个参考零点,然后在

自动模式下,停至设定的位置处。

改进前,相关组件在上下方向仅靠限位开关控制行程,无法在限位点以外自动停止。进行技术改进后,新增寻原点步骤,要求在抽插力设备断电重启后,必须进行寻原点操作(原点被设置为前伸到位后一个足够高的位置):将手动/自动开关扭至中间的无选择状态,使伸缩臂处于前伸到位状态,升降电机在上升限位和下降限位之间,按下寻原点按钮后,升降机构就会往原点方向运行,升降电机找到原点后原点指示灯亮。寻原点成功后,可在需要高度设置上升/下降到位点,在进行抽插力测量时,使相关组件在自动模式下自动停于上升/下降到位点。

3.2 控制系统改进

新型的控制系統增加了友好的人机交互界面。用抗干扰能力强、防尘、防振的工控机与PLC和现场称重传感器信号进行通讯,同时可通过软件参数设置对升降电机速度等进行更改,本系统增加了以下功能:

1)抽插力实时曲线和最大值显示:可以显示并记录每一组燃料组件的抽插力实时变化数据及最大值,还将数据转为表格自动保存在工控机硬盘中,可随时调出查询、打印。

2)可在软件界面设置相关组件的插入、抽出速度,保证工作速度。

3)联锁保护功能。自动时:伸缩臂电机与升降电机互锁,即电机不会同时工作。手动时允许伸缩臂与升降电机同时运动。伸缩臂电机与升降电机有前后和上下极限限位开关保护。

4)增加了各种安全报警限位(包括前伸限位、后缩限位等)、抽插力异常报警及报警说明,还可以在系统中查到详细的说明。

4 测量系统试验

对改进后的抽插力测量系统进行可靠性验证,发现技术改进后的测量系统不仅运行噪音小、安全风险低,系统也非常稳定可靠,能满足生产检测需求。

4.1 钢丝绳中心线和滑台底座中心线偏差试验

将线锤固定在传感器下端的挂钩上(悬挂相关组件的部位),更换为AFA3G底座并在AFA3G滑台底座上寻找中心点,做好标记。将伸缩臂前伸到位,在线锤顶尖对应位置做标记,测量两个标记之间的距离,将伸缩臂缩回,重复试验10次并分别记录中心线偏差值,改进后抽插力测量系统

的钢丝绳中心线和滑台底座中心线偏差小于 0.5 mm,符合技术要求,结果如图 4 所示。

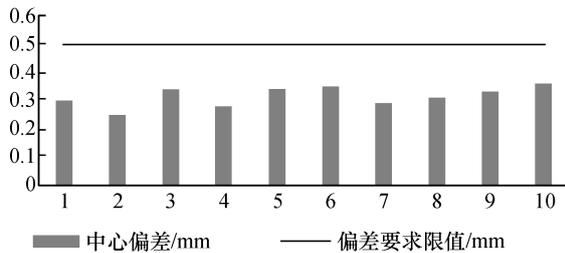


图 4 中心偏差试验结果

Fig. 4 Results of the central deviation test

4.2 伸缩臂安全性计算和验证

伸缩臂进行安全设计计算和验证(钢丝绳负重试验应不小于 150 kg,设备现场组装完成后负重试验应不小于 100 kg);导轨选用 HGH25HA 导

轨,双导轨 4 个滑块分开布置方式,单滑块容许力矩 $M_p = 880 \text{ N} \cdot \text{m}$,伸缩臂伸出长度 550 mm,按 4 滑块紧靠计算能承受的力: $4 \times 880 / 0.55 = 6400 \text{ N}$ (相当于可承受 653 kg)。

由于相关组件长期吊在钢丝绳上,悬挂相关组件的钢丝绳必须要有足够的承重能力。对钢丝绳进行抗拉检测,检测结果拉断力为 644 N。大大超出相关组件重力(约 700 N),能保证运行安全。

4.3 改进后测量水平试验

为了检验设备测量结果是否满足检测要求,改进前后进行了一个对比试验:在正确操作方法下,尽量短的时间间隔内,由同一操作人员、使用同样的燃料组件和相关组件重复进行抽插力检测,同时记录下改进前和改进后测量系统下读取的插力最大值,实验测量结果如表 1 所示。

表 1 改进前后设备测量结果读取值

Table 1 The reading value of the measurement results of the front and back equipment

方式	次数									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
改进前	13	13	12	14	12	12	12	14	13	13
改进后	12	12	12	11	12	12	12	13	12	12

作为统计学基本概念,样本标准差反映了分布数列中各标志值的平均差异程度,是应用最广泛的描述离散程度的指标^[6]。跟据样本标准差平方计算公式

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (1)$$

式中: x_i 为第 i 次测量结果; \bar{x} 为 i 次测量平均值。代入表 1 数据,求出:改进前 $s_1^2 = 0.62$,改进后 $s_2^2 = 0.22$ 。取显著性水平 $\alpha = 0.05$,查表可得 $F_{0.05}(9,9) = 3.18$,则 $F = s_1^2/s_2^2 = 2.81 < F_{表}$ 。

从 F 检验结果可以看出,设备进行技术改进前后,抽插力测量系统测量数据无明显差异,表明新的抽插力测量系统检测水平满足检测要求,可用于日常生产中对燃料组件抽插力的检测^[7]。

5 改造后效果

5.1 测量时间

新系统增加的寻原点功能,让相关组件可以在上下过程中定点停止。

在整个测量过程设置一个上升到位点(避免

相关组件升出燃料组件)和下降到位点(避免碰撞燃料组件底部),中间过程就可用自动升降模式。由 10 位操作人员分别在改造前后用相同燃料组件和控制棒组件进行抽插力测量,记录下十位操作人员测量耗费时间如图 5 所示。

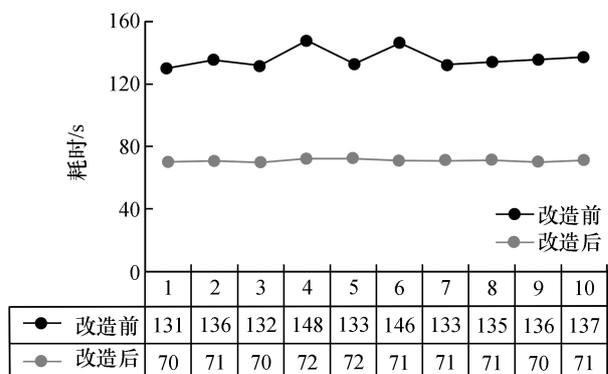


图 5 抽插力测量耗时对比图

Fig. 5 Comparison chart for measuring time consumption

改造后,测量时间更稳定,速度更快,耗时

更少。

5.2 测量结果

测量不确定度指由于测量误差的存在,对被测量值不能肯定的程度,反过来可作为测量结果质量的定量体现,其评定方法分A类和B类^[8],对应公式为:

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

$$u_b = \delta/\sqrt{12} \quad (3)$$

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (4)$$

式中: u_a 为A类不确定度; x_i 为第*i*次测量值; \bar{x} 为*i*次测量平均值; n 为测量次数; u_b 为B类不确定度; δ 为仪器的分辨力(对于数显测量仪器,其分辨力为最低位数字显示变化一个步进量时的示值差); u 为合成标准不确定度^[9]。代入表1数据,可得改进前和改进后测量系统的测量结果不确定度分析,详见表2。

表2 改进前和改进后系统测量结果不确定度值
Table 2 Uncertainty value of system measurement results before and after improvement

	u_a/N	δ/N	u_b/N	u/N
旧系统	0.25	1.0	0.29	0.38
新系统	0.15	0.1	0.03	0.15

改进后,新系统的合成标准不确定度更小,即测量结果质量更好,设备可靠性更高。

6 结论

通过对抽插力装置进行改造,设备在使用上有了很大优化,实现了燃料组件抽插力高效准确的测量:

1) 实现全自动采集数据并且自动显示最大

值功能;

2) 减少了操作时间,提高测量效率;

3) 无需人工搬运底座,减少安全风险;

4) 经许多实验证明系统稳定可靠,安全性能高,可用于生产检测。

从交付使用至今,改进后的抽插力测量系统已对上千组燃料组件进行了抽插力检测,所有燃料组件的抽插力检测均未出现过异常,系统稳定可靠。

参考文献:

- [1] 陈宝山. 我国压水堆燃料元件的发展[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(增刊): 10-14.
- [2] BRIAN V H, MADELINE A F. A study on the optimization of integral fuel burnable absorbers using the genetic algorithm based CIGARO fuel management system[J]. Annals nuclear energy, 1997, 24(6): 439-448.
- [3] 孙磊. 控制棒组件落棒时间与历程计算[J]. 核动力工程, 2003, 24(1): 59-62.
- [4] LIN C, YANG J I, LIN K J, et al. Pressurized water reactor loading pattern design using the simple tabu search[J]. Nuclear science and engineering, 1998, 129(1): 61-71.
- [5] 齐欢欢. 燃料组件导向管事故工况应力计算方法研究[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(5): 534-541.
- [6] 蔡一鸣. 几种方差概念的比较[J]. 统计与信息论坛, 2008, 23(4): 20-22.
- [7] 蔡伟建. 测量显著误差的F检验法[J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 1171-1175.
- [8] 李联军, 杨关月, 魏文华. 测量不确定度评定与表示简介[J]. 现代养生, 2019(12): 66-67.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 测量不确定度评定与表示: GB/T 27418—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 1-17.

(责任编辑:周泉)