

锅炉受热面小径管超声相控阵检测技术研究

王东,江野,刘文生,贾少威,王警卫,朱国斌
(中国大唐集团科学技术研究院有限公司华中分公司,郑州 450000)

摘 要:依据超声相控阵检测技术原理,结合锅炉受热面小径管对接焊缝的特点,研制了专用的超声相控阵检测换能器和楔块,在 PHASCAN 型便携式超声相控阵仪上实现了小径管对接焊缝的二维成像检测。选择 $\phi 51\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的小径管人工缺陷进行验证,该检测技术能快速、直观、有效地检测出裂纹缺陷,可确保锅炉安全运行,防止爆管。

关键词:锅炉;受热面小径管;对接焊缝;超声相控阵检测;换能器;楔块

中图分类号:TG 441.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2017)07-0007-04

0 引言

火力发电厂锅炉受热面所用的直径小($32 \sim 89\text{ mm}$)且壁薄($4 \sim 12\text{ mm}$)的管子通常被称为小径管,随着超临界以及超超临界机组不断增加,机组运行温度、压力等参数不断提高,对电站锅炉用小径管的质量提出了更高的要求。小径管长期处于高温、高压环境下,极易产生蠕变、疲劳和腐蚀,进而引起严重的爆管事件^[1],严重威胁火电机组的安全稳定运行,同时还会给电厂带来巨大的经济损失。

对于小径管焊缝裂纹类缺陷,一般采用磁粉、渗透、超声等方法进行探伤。磁粉、渗透探伤对焊缝表面光洁度要求较高且只能检测表面或近表面缺陷,小径管管壁较薄不能过度打磨,焊缝表面光洁度一般无法达到要求,容易造成漏检。常规超声波探测时耦合不佳,声速扩散,反射率低,降低了检出率,检测时只能发射角度固定的声束,存在一定检测盲区;同时,由于电站锅炉小径管管排比较密集,空间狭小,操作受到影响^[2]。因此,寻求一种新的小径管检测技术显得十分迫切。

本文通过理论分析,提出了一种专用超声相控阵检测换能器以及楔块,并在 PHASCAN 型便携式相控阵检测仪的基础上进行模块开发。

1 超声相控阵检测的原理和特点

超声相控阵检测技术是通过控制换能器阵列中各阵元发射(或接收)脉冲的不同延迟时间,改变声波到达(或来自)物体某点时的相位关系,实现焦点和声束方向的变化,从而进行超声波的波束扫描、偏转和聚焦^[3]。这种检测技术可以产生不同形式的声束效果,模拟各种斜聚焦探头的工作,并且可以进

行电子扫描和动态聚焦,无需或少移动探头,检测速度快,探头放在一个位置就可以生成被检测物体的完整图像,实现了自动扫查,且可检测复杂形状的物体^[4]。与传统超声检测相比,超声相控阵检测技术在检测速度、缺陷定量准确性及降低作业强度等方面有着明显的优势^[5]。设计专用的相控阵超声检测换能器和楔块,采用超声相控阵检测技术检测锅炉小径管对接焊缝,能够实现电站锅炉受热面管焊缝裂纹的多角度、无盲区扫查,检测灵敏度高,能有效排除此类隐患,对实现锅炉安全运行具有重要意义。

2 小径管对接焊缝超声相控阵检测工艺

2.1 换能器参数优化设计

超声相控阵换能器的性能对检测结果影响很大,换能器设计与制作是极为关键的技术。实际检测时,换能器多为均匀线阵,均匀线阵的主要参数包括换能器频率、换能器阵元数、阵元间距、阵元宽度、阵元尺寸和辐射角等。若换能器参数选用不合适,声场分布除了主瓣外还会出现栅瓣和较高的旁瓣。栅瓣是产生伪像的主要原因之一,旁瓣的出现一方面降低了主瓣的能量和系统的对比度分辨力,同时还可能会造成伪像。由于系统的横向分辨力主要取决于主瓣的宽度,所以减少主瓣宽度即可提高系统的横向分辨力。因此,相控阵换能器的主要设计原则即为最小化方向锐角,抑制旁瓣,消除栅瓣^[6]。

电站锅炉受热面管曲率大、管壁薄,且受热面管子排列紧密,实际扫查空间较小,因此,换能器在满足检测的同时应尽可能小。通过研究分析,定制了自聚焦换能器 7.5S16-0.5 $\times$ 10-D10,外形及尺寸如图 1 所示,主要参数见表 1。换能器采用弧形晶片,具有周向自聚焦功能,能有效改善声场形状,如图 2 所示。

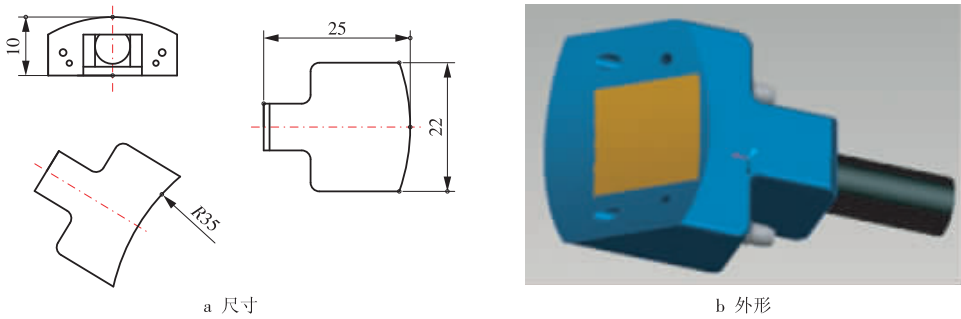


图 1 换能器尺寸及外形

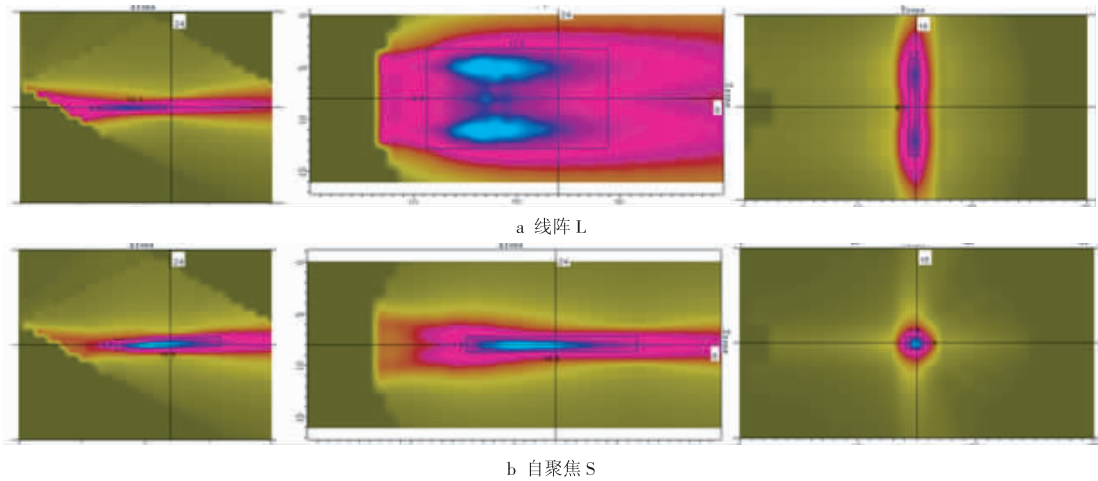


图 2 换能器在小径管的声场形状

表 1 换能器设计参数及实测参数

项目	设计参数	实测参数
中心频率(- 6 dB)/MHz	7.50(1 ± 10%)	7.43
相对带宽(- 6 dB)/%	≥60.00	93.09
脉冲长度/μs	≤0.53	0.31
均匀性灵敏度/dB	±3.00	+1.00/ - 1.38
界面波和反射回波比值	≤ - 60	- 62
阵元数目	16	16
阵元间距/mm	0.5	0.5
阵元间隙/mm	0.1	0.1
阵元宽度/mm	10	10

2.2 楔块的设计

电站锅炉受热面管管径小且排布紧密,除了对换能器有较高的要求外,还必须专门定制的楔块来配合完成焊缝裂纹准确、快捷的成像检测。

本次试验楔块制作材料选择聚苯乙烯,楔块内声速为 2 337 m/s,楔块前段设有消声槽,镶嵌阻抗橡胶,可有效降低界面反射波的干扰。根据电站锅炉受热面管的实际情况,专门设计定制了 SD10 - N60S - IH - AODXX 系列楔块,入射角度为 39°,整体尺寸设计为 18 mm × 22 mm × 12 mm (长 × 宽 × 高),如图 3 所示。

2.3 灵敏度的设置

将探头放在试块 R2 外弧面上并前后移动,使



图 3 SD10 - N60S - IH - AOD60.33 楔块

5mm 深的 $\phi 1$ mm 通孔反射信号移动到不同声速角度,增益至波高的 80%,记录增益值。对 8mm 深的 $\phi 1$ mm 通孔重复上述步骤,得到探头在不同声速角度的灵敏度,见表 2。由表 2 可知,声束角度 80°时的直射波是整个扫查覆盖范围内灵敏度最低的地方,故选择声束角度 80°时 8 mm 深的 $\phi 1$ mm 通孔反射波高 80% 时的增益值为检测灵敏度。

表 2 不同声速角度的灵敏度

$\phi 1$ mm 通孔深度/mm	不同声速角度的灵敏度						dB
	30°	40°	50°	60°	70°	80°	
5	24	22	18	18	23	28	
8	31	27	23	24	28	33	

2.4 探头放置和声束覆盖范围设置

相控阵扇形扫查可扫查整个工件界面,而无需前后移动探头。对于 4~12 mm 厚的受热面管焊缝,为实现直射波、一次反射波全覆盖扫查,需要较大的扫查角度,但增大声速偏转角度会降低灵敏度,因此需要进行模拟研究,找到一个扫查范围,既能满足全覆盖扫查的要求,又能保证一定的灵敏度。

在实际检测时一般应用超声波检测模拟软件 ES Beam Tool 模拟不同扫查角度、不同探头放置位置时声速覆盖的情况。经分析,扫查角度为 40°~80°,探头放置在距离焊缝中线 $\delta \pm 2$ mm (δ 为管壁厚)时,可以满足全覆盖扫查要求,对于 4 mm 和 6 mm 厚的焊缝,声速覆盖范围如图 4 所示。

3 小径管相控阵扫查分析

电站锅炉受热面管焊缝裂纹大多产生在焊缝边缘热影响区,内外侧均可能产生裂纹,如图 5 所示。

为了验证小径管对接焊缝检测系统对锅炉小径管焊缝的检测灵敏度,此次试验采用目前电站锅炉受热面中 $\phi 51$ mm $\times$ 4 mm 的小径管制作了 2 个模拟裂纹缺陷对比试块,材质为 T91,具体参数见表 3。

超声相控阵检测可实现实时成像检测,在检测界面中导入绘制的焊缝坡口图形,就可实现小径管对接焊缝的成像检测,如图 6 所示。在小径管检测系统界面的相关功能菜单中选择相应的探头、楔块和工件类型,并完成超声基本参数和聚焦法则的设置,部分参数见表 4。

对 #1, #2 对比试样 A,B 侧管壁进行扫查检测。将探头放在试样管壁外弧面上,探头前端离焊缝中

表 3 对比试样具体参数			
试块	缺陷尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 深)/mm	缺陷数量/个	缺陷位置
1	5.0 $\times$ 0.2 $\times$ 1.0, 5.0 $\times$ 0.2 $\times$ 2.0, 5.0 $\times$ 0.2 $\times$ 3.0	3	焊缝外表面熔合线处
2	5.0 $\times$ 0.2 $\times$ 1.0, 5.0 $\times$ 0.2 $\times$ 2.0, 5.0 $\times$ 0.2 $\times$ 3.0	3	焊缝内表面熔合线处

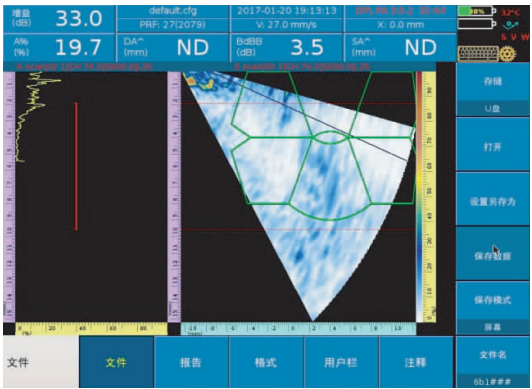


图 6 检测软件界面

表 4 仪器设置的部分参数

参数	数值	参数	数值
检测范围/mm	20	起始角度/(°)	40.0
横波声速/(m $\cdot$ s ⁻¹)	3 290	终止角度/(°)	80.0
扫描类型	扇形	步进/(°)	0.5
		聚焦类型	真实深度

心线(4 $\pm$ 2) mm,以增益 33 dB 为检测灵敏度,对试块的 3 处人工缺陷进行检测。探头不做前后移动,只在检测面上沿试块周向匀速移动,得到 #1, #2 对比试样 A,B 侧扫查检测结果,如图 7~10 图所示。在图中可以清楚地看到缺陷二次波反射回波图像,

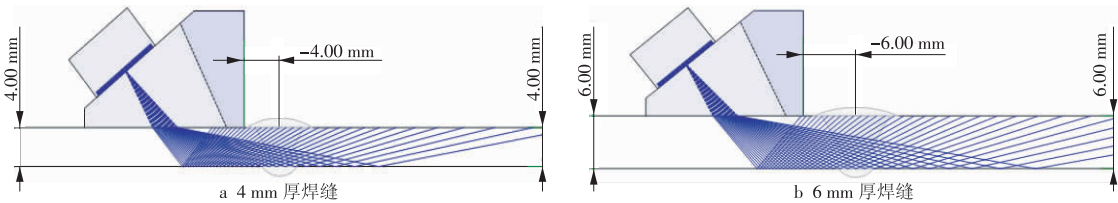


图 4 声速覆盖范围

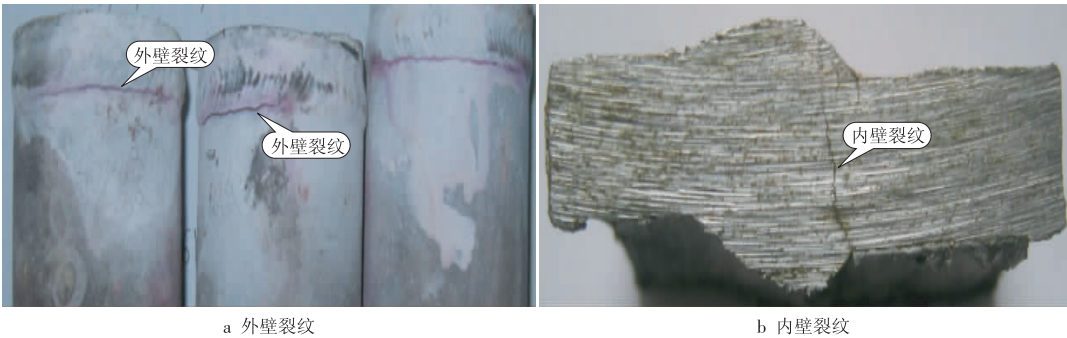


图 5 某电站锅炉高温再热器进口管屏焊缝裂纹

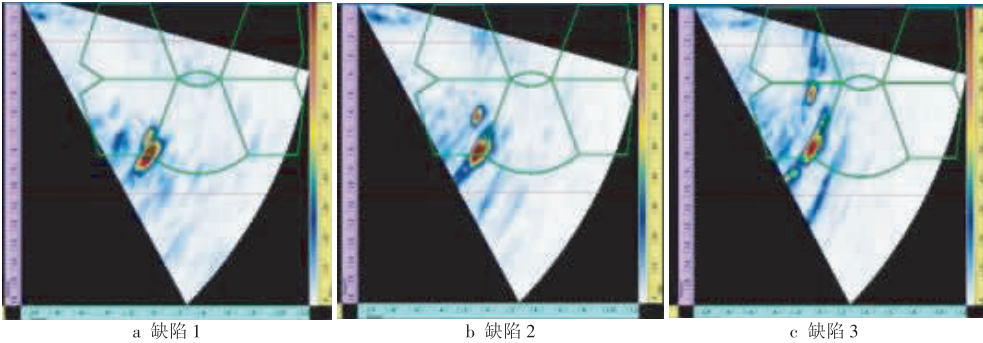


图 7 #1 对比试样 A 侧扫描检测结果

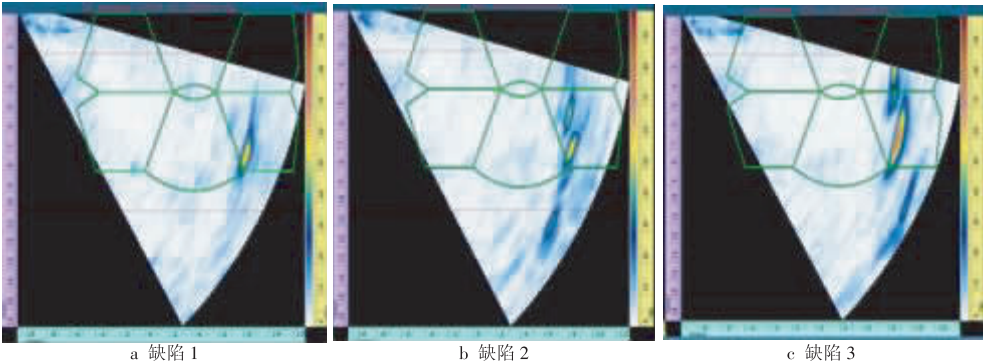


图 8 #1 对比试样 B 侧扫描检测结果

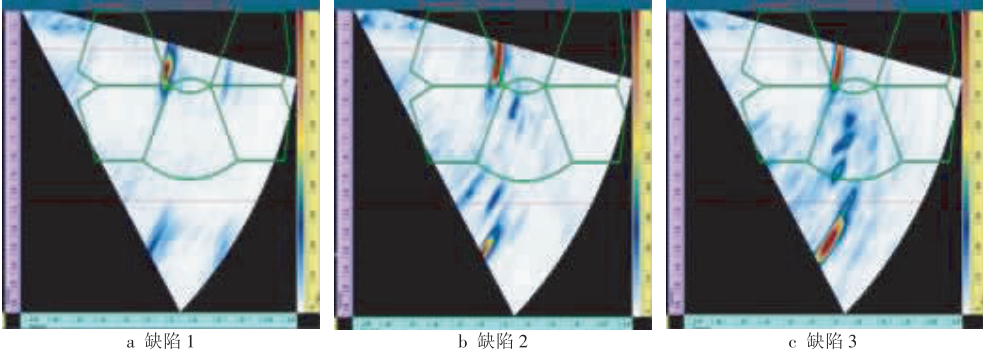


图 9 #2 对比试样 A 侧扫描检测结果

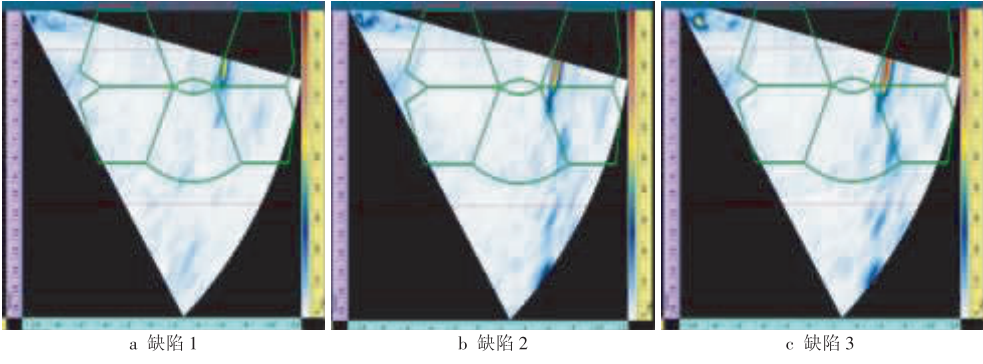


图 10 #2 对比试样 B 侧扫描检测结果

成像位置与缺陷所在位置一致,易于辨别。

4 结论

(1)通过理论分析相控阵超声检测技术的特点,设计一种专用的相控阵超声检测换能器和楔块,能完全覆盖这个小径管对接焊缝,很好地提高了检测效率。

(2)在 PHASCAN 型便携式超声相控阵检测仪基础上进行模块开发,从而实现小径管对接焊缝二维检测,其裂纹类缺陷检测灵敏度高,成像位置准确,检测结果直观、准确、易于判断。

(3)结合试验可知,由于相控阵聚焦及偏转的特点,单侧检测就可以查出小径管环焊缝全部区域危害性的缺陷。
(下转第 14 页)

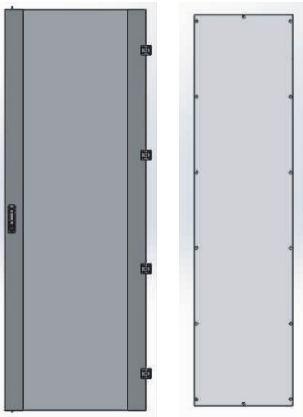


图 6 改进型机柜前门和侧门

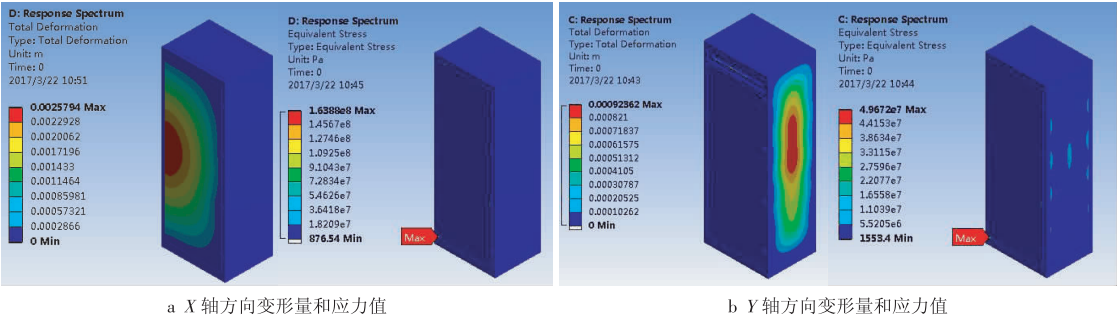


图 7 改进型机柜变形及应力

3 结论

本文采用 ANSYS Workbench 对二次机柜进行了模态分析及响应谱分析以验证其抗震性能。通过仿真得到以下结论:(1)框架侧横梁处安装加强块对框架模态和抗震性能的提高无显著影响;(2)在前门、后门、侧门部分增加连接点,有助于其固有频率的提高,改善其抗震性能。

本文通过响应谱法对机柜进行仿真,为机柜抗震设计提供了一种便捷方法,同时为后续机柜抗震试验提供了数据参考。

参考文献:

[1]祝德春,韩德斌,周桂生,等. 基于模态试验与有限元的电力机柜动力学分析[J]. 城市建设理论研究:电子版, 2013(35):58-61.

(上接第 10 页)

参考文献:

[1]马延会,苏德瑞,刘建屏,等. 锅炉受热面小径管周向缺陷磁致伸缩导波检测试验研究[J]. 华北电力技术,2014(9):39-43.
[2]金南辉,牟彦春. 小径管对接焊接接头相控阵超声检测技术[J]. 无损检测,2010,32(6):427-430.
[3]李衍. 超声相控阵技术[J]. 无损探伤,2007,31(4):24-28.
[4]靳峰,杨旭,刘文生,等. 叉型叶根超声相控阵检测技术研究[J]. 热加工工艺,2013,42(24):217-218.

表 3 改进型机柜模态仿真结果

振型	频率/Hz	振型	频率/Hz
1	12.215	10	31.075
2	18.456	11	32.784
3	21.54	12	33.274
4	24.754	13	36.185
5	25.532	14	36.227
6	25.888	15	36.663
7	27.601	16	40.658
8	27.675	17	40.992
9	30.667	18	41.058

[2]何小兵,张赤斌,颜肖龙. 车载电子机柜的动力学分析[J]. 机械工程与自动化,2006(1):46-48.
[3]刘凡,周思宇,刘曦,等. 汶川大地震四川电网输变电设备受灾情况研究[C]// 中国电机工程学会年会,2008.
[4]刘笑天. ANSYS Workbench 结构工程高级应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
[5]袁一凡,田启文. 工程地震学[M]. 北京:地震出版社,2012.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

代廷振(1989—),男,山东济宁人,助理工程师,从事电力系统电子设备结构设计、研究、开发方面的工作(E-mail:tingzhen-dai@sac-china.com)。
顾锦书(1988—),男,江苏盐城人,助理工程师,从事电力系统电子设备结构设计、研究、开发方面的工作。
高学斌(1988—),男,江苏南京人,助理工程师,从事电力系统电子设备结构设计、研究、开发方面的工作。

(本文责编:刘芳)

作者简介:

王东(1989—),男,河南安阳人,助理工程师,工学硕士,从事电力行业无损检测新技术的应用研究和电力行业的失效分析研究(E-mail:wangd_1989@163.com)。