

“双碳”目标下商务楼宇“光储直柔”恒功率运行研究

荣秀婷¹,张辉¹,朱刘柱¹,李旭枫²,王建华²,马静¹

(1. 国网安徽省电力有限公司 经济技术研究院,安徽 合肥 230022;

2. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210018)

摘要:基于“双碳”目标下建筑电气化的发展趋势,分析商务楼宇的源荷结构变化特点,提出直流商务楼宇的系统架构及三级控制结构,建立基于光、储、电动汽车协调的恒功率取电三类典型柔性运行模式,通过基于小步长时序模拟方法在 Matlab/Simulink 平台进行了仿真验证。

关键词:“双碳”目标;建筑电气化;低压直流配电系统;系统架构;“光储直柔”恒功率运行
中图分类号:TU852;X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0223-05

Research on ‘Photovoltaic, Storage and DC Flexibility’ Based Constant Power Operation in Commercial Buildings under Targets of ‘Carbon Peak’ and ‘Carbon Neutral’

RONG Xiuting¹, ZHANG Hui¹, ZHU Liuzhu¹, LI Xufeng², WANG Jianhua², MA Jing¹

(1. Economic Research Institute, Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: This paper analyzes the changes of source and load in commercial buildings and proposes a typical system structure and three-level control scheme. Three typical flexible operation modes of constant power based on coordination of photovoltaic power generation system, storage device and electric vehicle charging system are built. By small-step timing sequential method, the simulation model is established and verified on Matlab/Simulink platform.

Keywords: targets of ‘carbon peak’ and ‘carbon neutral’; building electrification; low voltage DC distribution network; system structure; ‘photovoltaic, storage and DC flexibility’ based constant power operation

0 引言

随着我国“2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和”目标的提出,大力推进电能替代成为了消费侧降低一次能源消耗、实现用能结构转型的必然选择^[1]。在电气化的驱动下,作为占全社会用电总量25%以上的电力消费重要主体,建筑楼宇的用电消费量在未来仍将处于大规模快速增长阶段。建筑领域电气化的实现,一方面要提高用户电能消耗占能源消费总量的比重,提升建筑电气化率;另一方面要通过大力推动清洁能源代替、发展储能技术,进一步降低化石能源发电占建筑供电总量的比重^[2]。相比于现有的交流系统,采用直流组网形式,易于实现分布式电源的灵活接入及多类型源荷的协调互补消纳,能有效降低传统电能消耗,具备良好的发展前景,目前已受到学者的广泛关注^[3]。

针对建筑楼宇直流供电研究的代表是美国弗吉尼亚理工大学 CPES 中心研究关于建筑楼宇直流供电的“Sustainable Building Initiative(SBI)”研究计划,其在2010年进一步发展为SBN(sustainable building and nanogrids)^[4]。与此同时,丹麦奥尔堡大学完成了1 MW 单极 DC750 工业

园区和 DC230/48/24 V 住宅用电系统示范应用。瑞典查尔姆斯理工大学分析了 326/230/120/48 V 直流电压等级在商业场景应用的可行性。

本文以商务楼宇这一典型建筑配电场景为对象,基于“双碳”目标下建筑电气化的发展趋势,对其“光储直柔”恒功率运行模式展开研究。首先分析了商务楼宇源荷结构的变化特点,提出了直流商务楼宇的典型系统架构以及包括用电单元控制、换流站控制及配电系统级控制在内的直流配电系统三级控制结构,进一步建立了适用于直流商务楼宇的基于光、储、电动汽车协调的恒功率取电三类典型柔性运行模式,并基于 Matlab/Simulink 平台搭建了仿真模型,以小步长时序模拟验证了商务楼宇低压直流配电系统设计的有效性,最后给出归纳与总结。

1 面向商务楼宇的低压直流配电系统

1.1 商务楼宇的源荷结构变化

传统商务楼宇负荷主要包括照明、电动以及商务办公设备等,由城市交流配电网对其进行供电,能量呈现单向流动的特点。但随着新能源、新技术、新需求的出现,未来

基金项目:国网安徽省电力有限公司科技项目(521209190004)

第一作者简介:荣秀婷(1985—),女,吉林四平人,高级工程师,硕士,主要从事直流配电网、直流配电系统保护控制技术研究工作。

商务楼宇的源荷结构将发生一定的变化,主要有如下表现。

1)以光伏为代表的分布式电源及储能装置的大量接入,使商务楼宇用电由单向受电向双向互动转变。分布式光伏及储能装置将在商务负荷用电方面提供不同的选择,其优势在于新能源的本地消纳可为用户减少对电网的用电需求,降低传统能耗及用电成本,节能减排,并在一定条件下通过光伏与储能装置的配合,实现楼宇内短时间的区域自治运行;但同时,由于光伏及储能自身带有的功率波动性及及时序间歇性,会带来电网调度困难、电能质量降低等问题。

2)以电动汽车为代表的双向新型负荷将成为未来商业负荷的重要组成部分。电动汽车是一种典型的新型负荷,其能量流动存在双向性,既可向电网取电,也可通过放电模式向电网馈送电能。随着新能源汽车以及电动汽车充电桩的大力发展以及相关政策的扶持,未来规模化调控新能源汽车充放电行为将成为调节商务楼宇负荷曲线的重要

手段。

3)未来商务楼宇中直流型负荷的占比将超越交流型负荷。长期以来,为了适应以交流配电网为主的供用电方式,负荷端往往通过相应的转接装置与交流网直接相连,但事实上,相当一部分负荷采用直流的形式进行供配电反而更加便捷与经济。尤其是在商务楼宇中,负荷占比较高的LED照明设备以及电子设备其本质均属于可直接利用直流进行供电的负荷,而如电动汽车、分布式光伏、储能装置等新型源荷均是通过直流的形式输出。因此,仅从源荷构成来看,未来商务楼宇中直流型负荷将占据主导地位。

1.2 直流商务楼宇的系统架构

和交流配电网相比,直流配电系统不存在对电压相位和频率的跟踪问题,并在电能质量、供电可靠性、供电容量等方面具备一定的优势,更加顺应商务楼宇用能的变化趋势。低压直流商务楼宇的典型系统架构示意如图1所示。

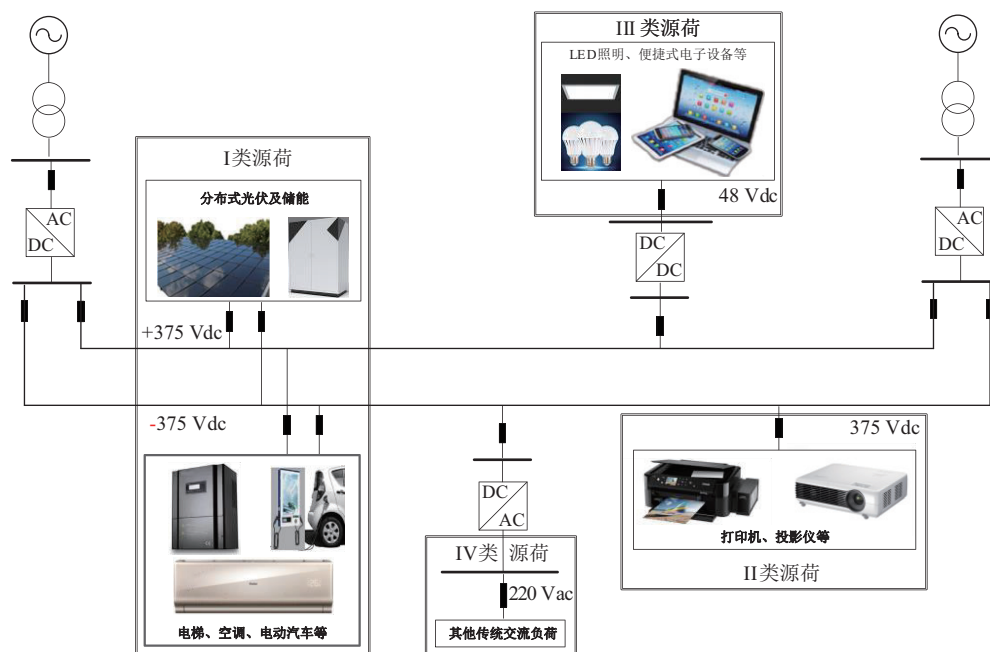


图1 直流商务楼宇系统架构示意图

图1中,直流母线由上级电网经双向AC/DC换流站引出,综合考虑系在正常及故障状态下的运行安全性、投资经济性以及二次设备接入便捷性等因素,确定其换流站接线形式为对称单极(伪双极)结构^[5];在对称单极接线方式下优先考虑人身安全保障能力^[6],选择不接地作为直流商务楼宇的首选接地方式;整体网架结构选择两端状架构,其具备较高的供电可靠性,可闭环运行,也可一路供电另一路作热备用。正常方式下,当一侧电源故障时另一侧电源可通过联络开关或者闭环运行功率控制,适用于大部分配电网场景。

在系统电压等级选取方面,需考虑源荷接入的灵活便捷性以及上级交流系统电压等级的匹配程度,对于与业

内标准推荐值不符的部分电压等级序列,可基于几何均值、舍二求三、负荷距比检验等原则进行经济技术校核^[7]。结合商务楼宇场景下的各类源荷用电特点,根据《GB/T 35727—2017中低压直流配电电压导则》标准中的相关规定,以尽可能少地配置电力电子变换器为原则,确定750 Vdc/375 Vdc/220 Vac/48 Vdc的电压等级序列,并进一步对源荷作分类及归纳,其结果如表1所示。

需要说明的是,电压等级中220 Vac的设定主要是考虑到因设备改造能力不足,导致目前场景内仍存在一定占比的传统交流负荷,难以直接进行直流供电。在未来发展中该交流电压等级将被对应的直流等级替代,IV类源荷也将转化为I或II类。

表 1 未来商务楼宇的源荷分类

类别	电压等级	说明	代表设备
I	750 Vdc	可直接挂网运行,设备需接入母线两极	光伏、储能、充电桩、空调、电梯等
II	375 Vdc	可直接挂网运行,设备接入母线单极	投影仪、打印机、主机、显示器等
III	48 Vdc	电压等级低,需降压后接入	LED 照明设备、便携式移动电子设备等
IV	220 Vac	无法采用直流供电,保留传统交流用电	其他

2 直流型商务楼宇典型运行模式

2.1 商务楼宇直流配电系统控制结构

直流型商务楼宇是一个电力电子变换器、各类双向源荷高比例渗透的配电系统,因此针对其供电模式的研究首先是要完成对各电力电子变换器的精确控制,以实现源荷的可靠接入。本文基于分层自治的概念,结合场景内的用电特点,提出适用于图 1 配电系统的三级控制架构,如图 2 所示。

1) 用电单元级控制,其控制对象为 III 类和 IV 类源荷

与配网所连接的电力电子变换器,实现其输入、输出特性跟随上级控制器输出参考值;

2) 换流站级控制,其控制对象为直流母线电压与交流网所连接的双向 DC/AC 换流器,维持直流母线电压,使其维持在正常区间内,并保证配网内功率的合理分布;

3) 配电系统级控制,通过接收配网内各级变换器的运行数据,根据顶层优化目标的设定下达相关指令,实现配电系统的最优化运行。

用电单元级和换流站级控制本质上是对各类电力电子变换器的控制,目前研究已相当成熟,不再赘述。因此本文的重点集中在对直流商务楼宇在配电系统级控制下的优化目标,即典型供电模式的优化研究。

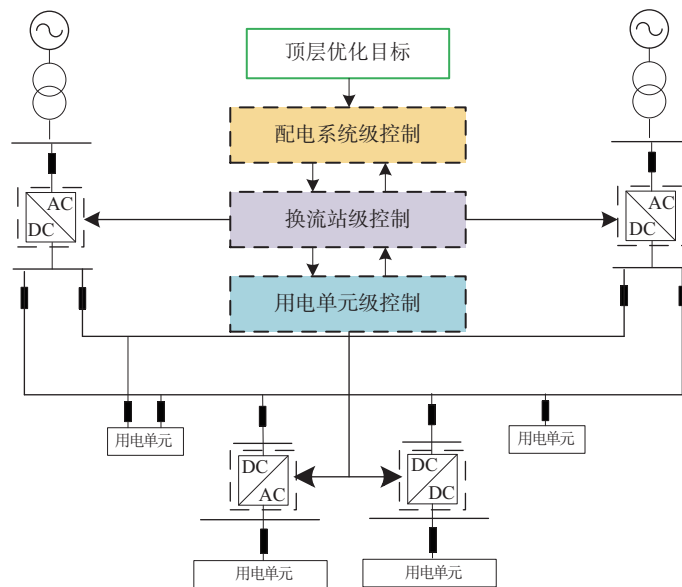


图 2 直流商务楼宇控制结构

2.2 基于光、储、电动汽车协调的恒功率柔性运行模式

一般而言,商务楼宇作为社会商业活动及办公的典型场景,其负荷曲线呈“几”字状,通常在上午 9:00 开始至晚上 22:00,其负荷达到高峰且峰值较为稳定,在其余时间由于商业活动匮乏,负荷维持在较低水平。因此,针对商业负荷这种特定时间段内用电功率不易发生巨大波动的特点,选择特定时段下的恒功率取电运行模式作为直流商务楼宇典型供电模式的优选目标。

恒功率取电模式指通过对供电区域内的可控源荷进行调控,将区域向电网的取电功率控制在一个恒定值,降低区域内的用电峰谷差,减少区域内装机容量,缩减成本,

同时减轻对电网调度的压力,提升区域内分布式光伏的发电效率及本地消纳能力,降低传统电能消耗,为建筑楼宇节能减排,并有效提高供电区域与电网之间的互动能力。

如 1.1 节所述,未来直流商务楼宇中可充当恒功率运行模式负荷调控功能的主要有分布式光伏、储能装置及新能源汽车三类。其中,应尽可能提高分布式光伏的发电效率,提升本地消纳水平,承担削峰作用;储能装置作为成熟的充放电设施,应作为调节负荷曲线峰谷差的主要力量;电动汽车的充电功率通过调节不同时段的充电电价控制汽车充电数量、控制充电桩功率等方式进行调整,可承担挪峰填谷的角色。因此可建立如图 3 所示的基于光、储、电动汽车协调的恒功率柔性运行模式,并将三类典型运行模式总结,如表 2 所示。

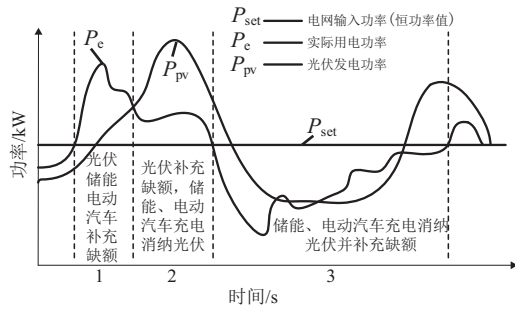


图3 直流商务楼宇恒功率运行模式示意图

表2 恒功率柔性运行模式类型

序号	类型	分布式光伏	储能装置	电动汽车
1	用电功率大于恒功率值	发电	充电 (光伏功率大于用电功率差额)	保持不变/减少充电行为
2	用电功率大于恒功率值	发电	放电 (光伏功率小于用电功率差额)	保持不变/减少充电行为
3	用电功率小于恒功率值	发电	充电	增加充电行为

恒功率运行模式下配电系统内的各功率关系如下：

$$P_{set} = P_e - P_{pv} - P_{store} - P_{ev} \quad (1)$$

式中： P_{set} 、 P_e 为电网恒功率取值以及实际用电功率； P_{pv} 、 P_{store} 为分布式光伏以及储能的功率，其值均可预测； P_{ev} 为该时刻下期望的电动汽车充电功率。

电动汽车的聚合充电功率为

$$P_{charge} = \sum_{i=1}^k N_i P_{charge_i} \quad (2)$$

式中： P_{charge} 为电动汽车的实际总充电功率； k 为充电桩种类； N_i 、 P_{charge_i} 分别为第*i*类充电桩的总充电功率。

结合式(1)与式(2)，可得需调节的电动汽车充电功率为

$$\Delta P_{charge} = P_{ev} - P_{charge} = P_e - P_{pv} - P_{store} - P_{set} - \sum_{i=1}^k N_i P_{charge_i} \quad (3)$$

式中，若 $\Delta P_{charge} > 0$ ，则需要增加充电行为；若 $\Delta P_{charge} = 0$ ，则充电行为不变；若 $\Delta P_{charge} < 0$ ，则减少充电行为。根据上式，可对直流商务楼宇恒功率模式下电动汽车的充电行为进行调节。

3 算例分析

为了验证上述针对直流商务楼宇理论研究的有效性，基于 Matlab/Simulink 平台搭建了图1所示的直流商务楼宇仿真模型，其中储能装置采用超级电容，光伏持续发电功率为 40 kW，负荷额定功率为 120 kW，其中设置 15 kW 电动汽车充电功率作为可控可投切负荷。仿真基于小步长时序模拟方法，设置如表3所示的事件触发序列，总时长设定为 2 s。

图4与图5为仿真过程中的直流母线电压以及用电总功率波形，验证了所建立的直流商务楼宇系统架构与控制结构的有效性。

1) 当用电功率大于恒功率值且此时分布式光伏发电功率能补充用电功率与恒功率值之间的功率差额并有富余电量时，储能装置进行充电，消耗剩余电能，新能源汽车根据储能充电容量选择充电行为为减少或保持不变。

2) 当用电功率大于恒功率值且此时分布式光伏发电功率不足以补充用电功率与恒功率值之间的功率差额时，储能装置进行放电，提供剩余所需的电能，新能源汽车根据储能放电容量选择充电行为为减少或保持不变。

3) 当用电功率小于恒功率值时，分布式光伏处于发电状态，负荷曲线的谷值由储能装置充电进行补充，同时增加新能源汽车充电行为。

表3 仿真模型事件设置表

仿真时间点/s	负荷功率变化值/状态值/kW	备注
0	0/80	仿真开始
0.30	+25/105	—
0.40	+15/120	—
0.50	0/120	恒功率触发
0.90	-15/105	减少电动汽车充电行为
1.35	+15/120	充电行为恢复
1.80	0/120	恒功率结束
2.00	0/120	仿真结束

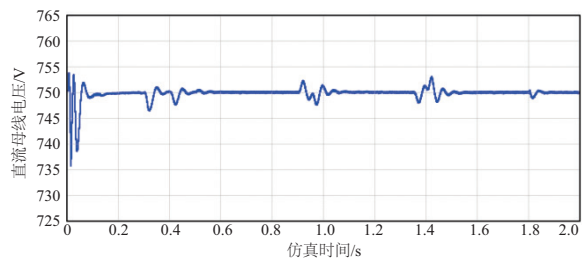


图4 直流母线电压波形图

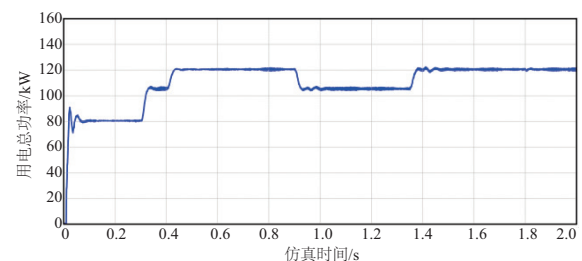


图5 用电总功率波形图

以下结合图6与图7的换流器输入功率(即电网取电功率)以及储能装置输出功率波形图，对直流商务楼宇的

恒功率运行仿真过程进行说明与分析。

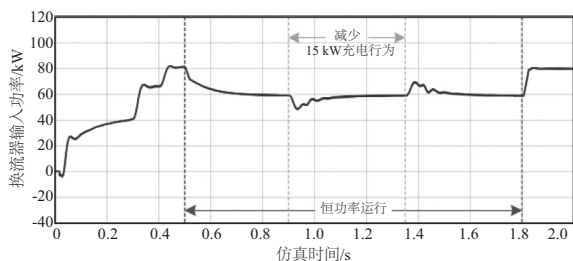


图6 换流器输入功率波形图

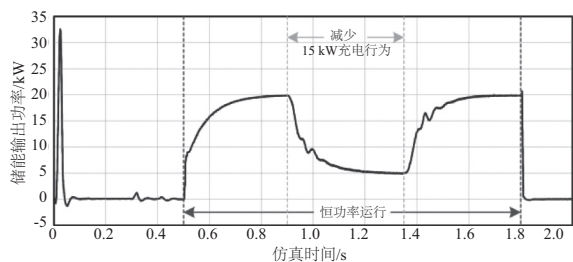


图7 储能输出功率波形图

1)忽略启动过程电压波动情况,0.30 s和0.40 s时相继投入25 kW和15 kW负荷,系统达到120 kW额定功率值。根据本文所述控制架构,换流站承担维持直流母线电压的主要任务,使负荷波动动态过程结束后,直流母线电压维持在750 V额定值。

2)0.50 s时触发恒功率运行模式,恒功率值设定为60 kW,由于光伏发电功率维持在40 kW,因此无法完全补足用电功率差额,因此系统按照表2中的第二种运行模式,由储能装置对剩余的功率差额进行补充。

3)0.90 s~1.35 s,为减小储能装置补额的压力,根据表3减少电动汽车充电行为,退出15 kW负荷。

4)1.35 s~1.80 s,充电行为恢复,配电系统返回2)运行状态。

5)1.80 s时,退出恒功率运行状态,此时超级电容储能单元恢复至零状态,用电功率为120 kW,原先由其承担的功率差额转移至并网单元换流器承担,换流器输入功率恢复至80 kW,直流母线电压经历短暂的动态过程后恢复

至稳态指令值750 V。

在0.50 s~1.80 s的恒功率运行时段,通过系统内光伏、储能及电动汽车之间的协调配合,将市电取电功率由120 kW降低至60 kW,节约传统电能消耗50%,在电动汽车充电行为可控的条件下,还可降低储能配置容量,进一步优化经济成本。以上仿真结果验证了基于光、储、电动汽车协调的直流商务楼宇恒功率柔性运行模式的可行性。

4 结语

本文针对“双碳”目标下商务楼宇的“光储直柔”恒功率运行模式展开研究,相关结论如下:

1)基于未来楼宇源荷结构的变化特点,商务楼宇是建筑领域中先行推广低压直流配电系统的理想场景;

2)商务楼宇“光储直柔”恒功率运行模式以充分发挥分布式光伏发电能力为基础,通过对储能装置及可控负荷的协调控制,降低区域内传统用电能耗及购电成本,是实现建筑节能减排、践行“双碳”目标的有效途径;

3)合适的恒功率取值可有效缩减储能安装容量,降低建设投资成本,提升清洁能源消纳能力。

参考文献:

- [1] 屈博,刘畅,李德智,等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理,2021,23(2):1-3,9.
- [2] DB11/891—2020 居住建筑节能设计标准[S].
- [3] 梁永亮,吴跃斌,马钊,等. 新一代低压直流供电系统在“新基建”中的应用技术分析及发展展望[J]. 中国电机工程学报,2021,41(1):13-24,394.
- [4] BOROYEVICH D, CVETKOVICH I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems a contemplative view[C]//2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Brasov, Romania; IEEE,2010:1369-1380.
- [5] 马钊,焦在滨,李蕊. 直流配电网架构与关键技术[J]. 电网技术,2017,41(10):3348-3357.
- [6] 王旭婷,童亦斌,赵宇明,等. 民用建筑低压直流配电系统接地方式研究[J]. 供用电,2019,36(9):52-58.
- [7] 陈红坤,何桂雄,石晶,等. 楼宇交直流混合供电模式下直流电压等级的研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20):5840-5851.

收稿日期:2021-06-03

(上接第210页)

3)CMUT的发射声压和发射灵敏度随直流偏置电压的增加而增加。

4)CMUT的接收灵敏度和接收电压幅度随直流偏置电压的增加而增加。

因此,CMUT在不同的应用需求中调节适当的CMUT直流偏置电压,以获得合适的应用效果。

参考文献:

- [1] ORALKAN O, ERGUN A S, JOHNSON J A, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: Next-generation arrays for acoustic imaging? [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,2002,49(11):1596-1610.
- [2] 张睿,潘理虎,陈立潮,等. 基于形态学串行运算的CMUT水

下扇形扫描探测[J]. 传感技术学报,2018,31(2):234-240.

[3] 张慧,郑冠儒,李志,等. 空气耦合电容式微超声换能器线阵设计与测试[J]. 传感技术学报,2018,31(5):803-808.

[4] 王波,高双胜,马明. 2024 铝合金薄板搅拌摩擦焊接头缺陷超声无损检测[J]. 机械制造与自动化,2019,48(5):54-56.

[5] WANG M L, CHEN J K, CHENG X Y, et al. Design and test of a monolithic ultrasound-image-guided HIFU device using annular CMUT rings[C]//2008 IEEE Ultrasonics Symposium. Beijing, China; IEEE,2008:459-462.

[6] LADABAUM I, JIN X C, SOH H T, et al. Surface micromachined capacitive ultrasonic transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,1998,45(3):678-690.

收稿日期:2022-05-11