
无铅压电陶瓷在预应力超声换能器中的应用研究

MDPI Actuators

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42288.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

无铅压电陶瓷在预应力超声换能器中的应用研究 MDPI Actuators。论文标题：Lead-Free Ceramics in Prestressed Ultrasonic Transducers

论文链接：<https://www.mdpi.com/2076-0825/14/2/55>

期刊名：Actuators

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/actuators>

文章导读

超声换能器是工业、医疗、汽车等领域的关键部件，但其核心材料锆钛酸铅（PZT）压电陶瓷因含铅而对环境和健康构成威胁。欧盟RoHS指令已对铅的使用进行限制，使得开发性能相当的无铅替代材料的任务迫在眉睫。

尽管科研界已发现多种无铅压电材料，但其能否直接替换PZT并满足工业应用的可靠性要求，仍缺乏系统性验证。本研究旨在填补这一空白，通过构建一系列预应力纵向振动换能器（BLT），系统对比了标准PZT材料（PIC 181）与两种商用无铅KNN基材料（PIC 758和PIC HQ2）的性能，从材料特性、换能器装配、老化工艺到带载能力进行了全流程评估。核心结论是：通过调整换能器几何设计，当前的无铅材料完全可用于中等功率的BLT换能器。

研究内容

1. 换能器设计与压电陶瓷特性对比

研究采用经典的朗之万换能器（BLT）结构，由预应力螺栓、质量块、电极和四片压电陶瓷环组成（图1）。为评估材料替代的可行性，三种不同材料的换能器使用了完全相同的金属部件。

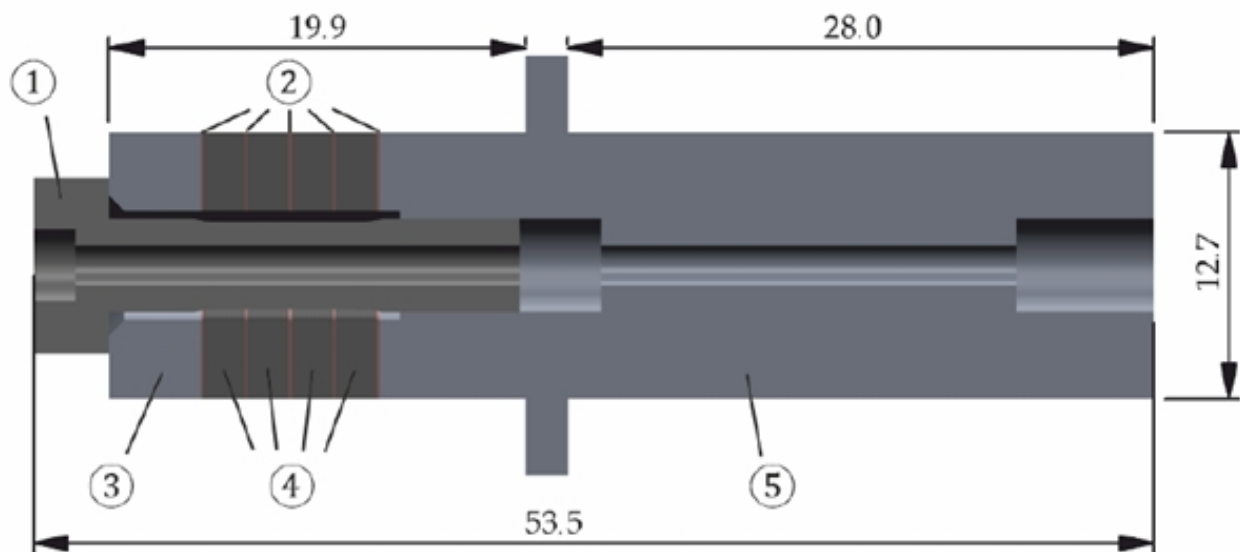


图1. BLT换能器设计

对每种材料各50片陶瓷环的电导纳测量（图2）显示，无论是含铅PIC 181还是无铅PIC 758和PIC HQ2，其样本一致性都非常高，谐振频率偏差在0.2%以内，体现了优异的制造一致性。

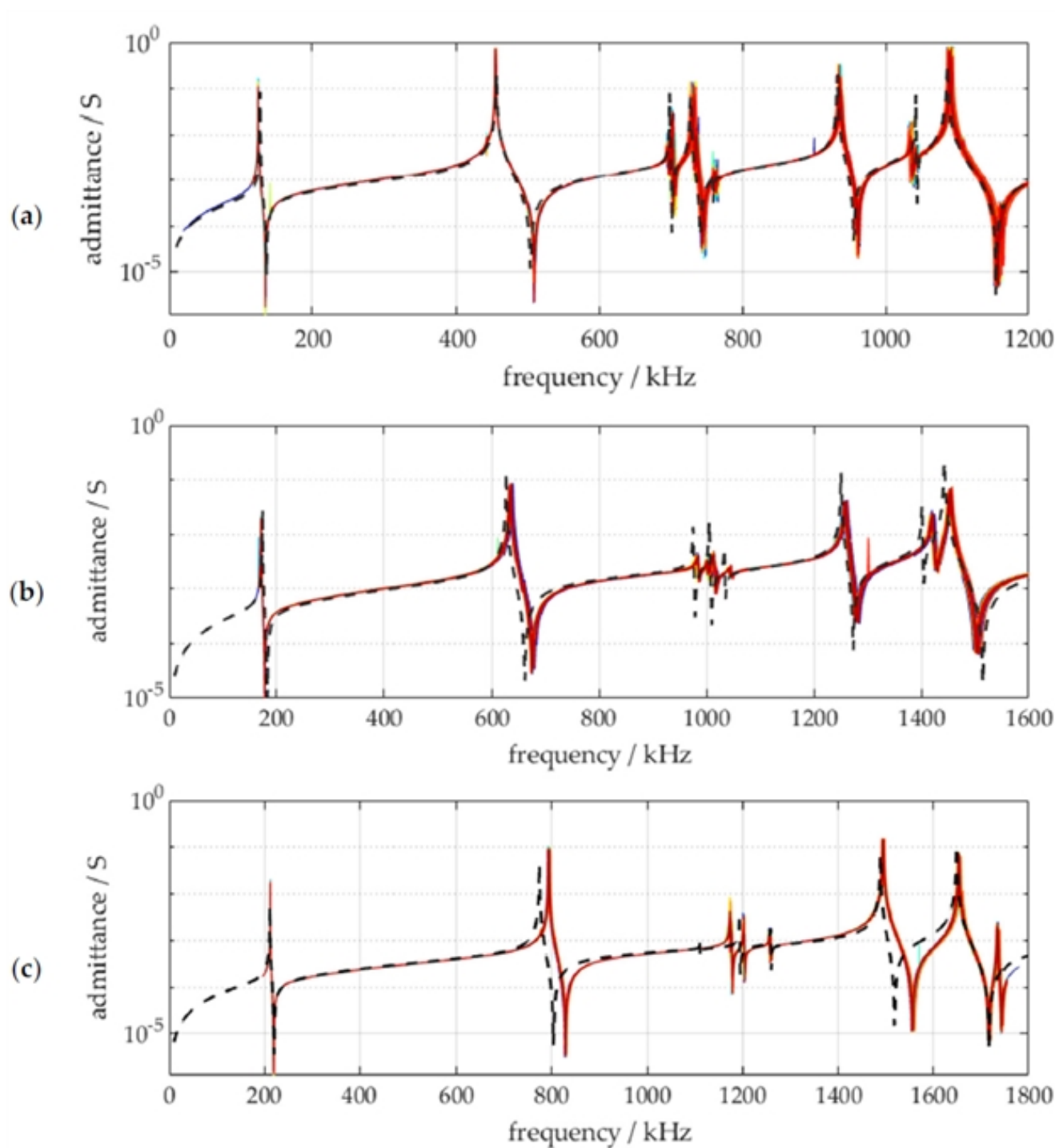


图2. 50片陶瓷环在短路条件下的输入导纳频率响应（彩色实线）与仿真结果（黑色虚线）对比：
 (a) PIC 181, (b) PIC 758, (c) PIC HQ2

从材料参数对比（表1）和关键指标（表2）可以看出，无铅材料与PZT存在显著差异。例如，PIC 181的密度为7850 kg/m³，而两种无铅材料仅为4800 kg/m³；压电常数d₃₃方面，PIC 181为253 pC/N，PIC HQ2仅为60 pC/N。

表1. 三种压电陶瓷的材料参数对比

Material	PIC 181 [17]	PIC 758 [18]	PIC HQ2
$\rho/\text{kg/m}^3$	7850	4800	4800
Q_m	2200	585	2500
$\varepsilon_{11}^T/\varepsilon_0$	1224	950	254
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1135	850	228
$e_{31}/\text{N/Vm}$	-4.5	-2.6	-2.2
$e_{33}/\text{N/Vm}$	14.7	12.6	7.0
$e_{15}/\text{N/Vm}$	11.0	9.0	3.3
$c_{11}^E/10^{10}\text{ N/m}^2$	15.20	15.16	19.00
$c_{12}^E/10^{10}\text{ N/m}^2$	8.91	6.83	6.00
$c_{13}^E/10^{10}\text{ N/m}^2$	8.55	8.15	8.20
$c_{33}^E/10^{10}\text{ N/m}^2$	13.10	14.63	19.45
$c_{44}^E/10^{10}\text{ N/m}^2$	2.83	3.15	3.00
k_{33}	0.66	0.57	0.50
$d_{33}/10^{-12}\text{ m/V}$	253	170	60

表2. 三种压电陶瓷的关键性能指标对比，无铅材料明显低于含铅PZT

Key Figure	PIC 181	PIC 758	PIC HQ2
k_{33}^2Q	958	190	625
$d_{33}Q/10^{-9}\text{ m/V}$	557	100	150

2. 换能器装配与老化工艺

预应力对换能器性能至关重要。本研究对所有换能器施加了40 MPa的相同预应力，并通过测量产生的电荷进行精确控制。之后，换能器经历了约6分钟的老化工艺，在约1 m/s的振动速度下连续运行以稳定性能。

图3记录了老化过程中的数据：PIC 758的温升最高；无铅材料所需的驱动电压显著高于PIC 181；PIC 181和PIC HQ2的谐振频率随温度线性下降，而PIC 758则呈非线性关系。

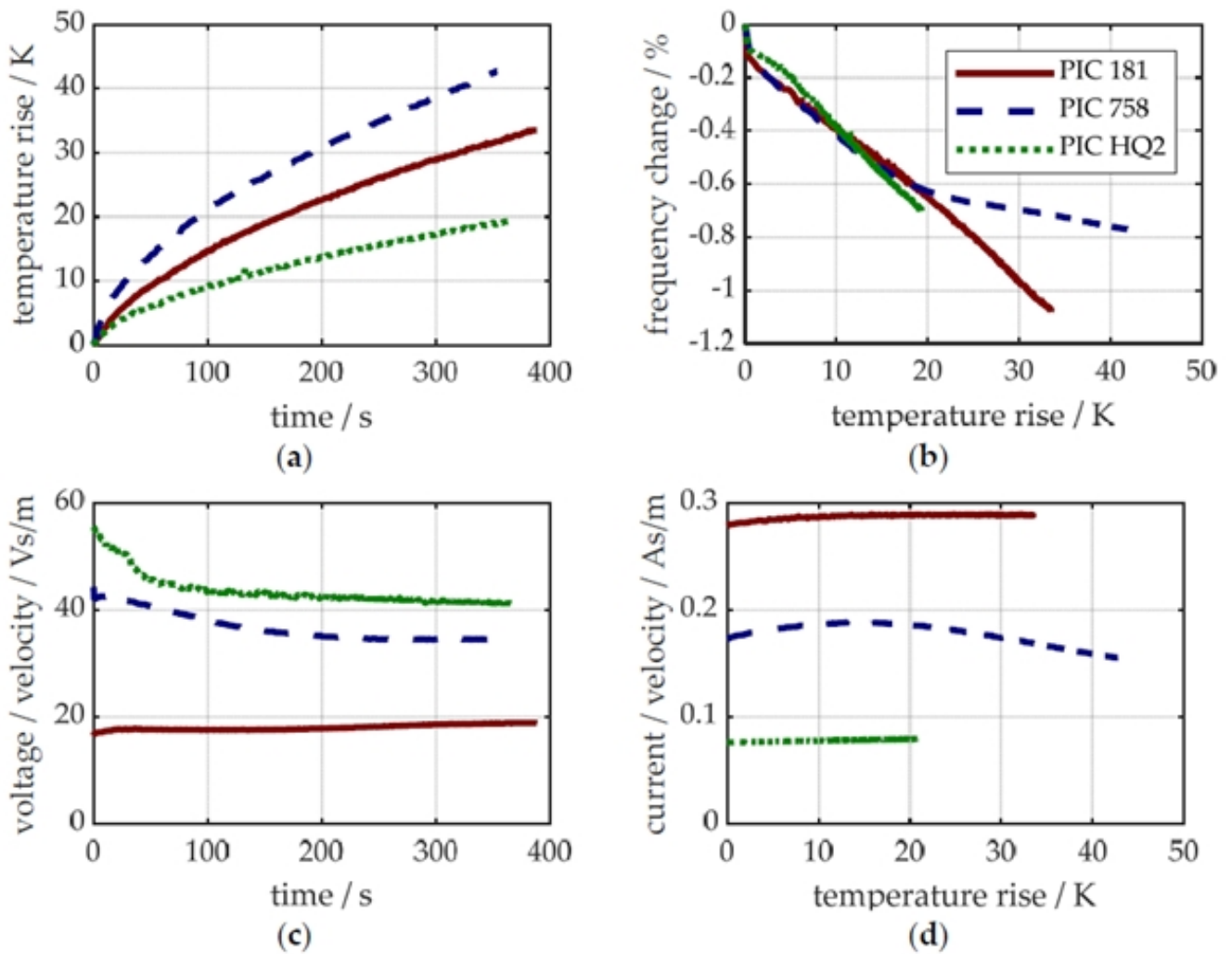


图3. 老化过程结果（自由谐振， $\approx 1\text{ m/s}$ ， $\approx 6\text{ 分钟}$ ）：（a）温升随时间变化，（b）频率变化随温升变化，（c）电压/速度比随时间变化，（d）振动电流/速度比随温升变化

3. 自由振动特性

老化后的小信号导纳测量（表3，图4）显示，因密度较低，无铅换能器的谐振频率更高；其阻抗远高于PZT（PIC HQ2的最小阻抗为 $775.86\ \Omega$ ，PIC 181仅为 $43.66\ \Omega$ ），这对驱动电子设备的设计提出了更高要求；同时，无铅材料的有效耦合系数和机械品质因数也均低于PZT。

表3. 所有换能器小信号导纳测量结果总结，显示了频率、阻抗等关键参数的平均值和标准差

PIC	f_r		Z_{min}		k_{eff}		Q_m	
	kHz	$\sigma/\%$	Ohm	$\sigma/\%$	-	$\sigma/\%$	-	$\sigma/\%$
181	42.68	0.31	43.66	8.67	0.21	0.23	766	8.73
758	45.43	0.42	136.36	29.62	0.14	1.23	722	24.61
HQ2	45.94	0.52	775.86	23.04	0.12	1.63	533	16.08

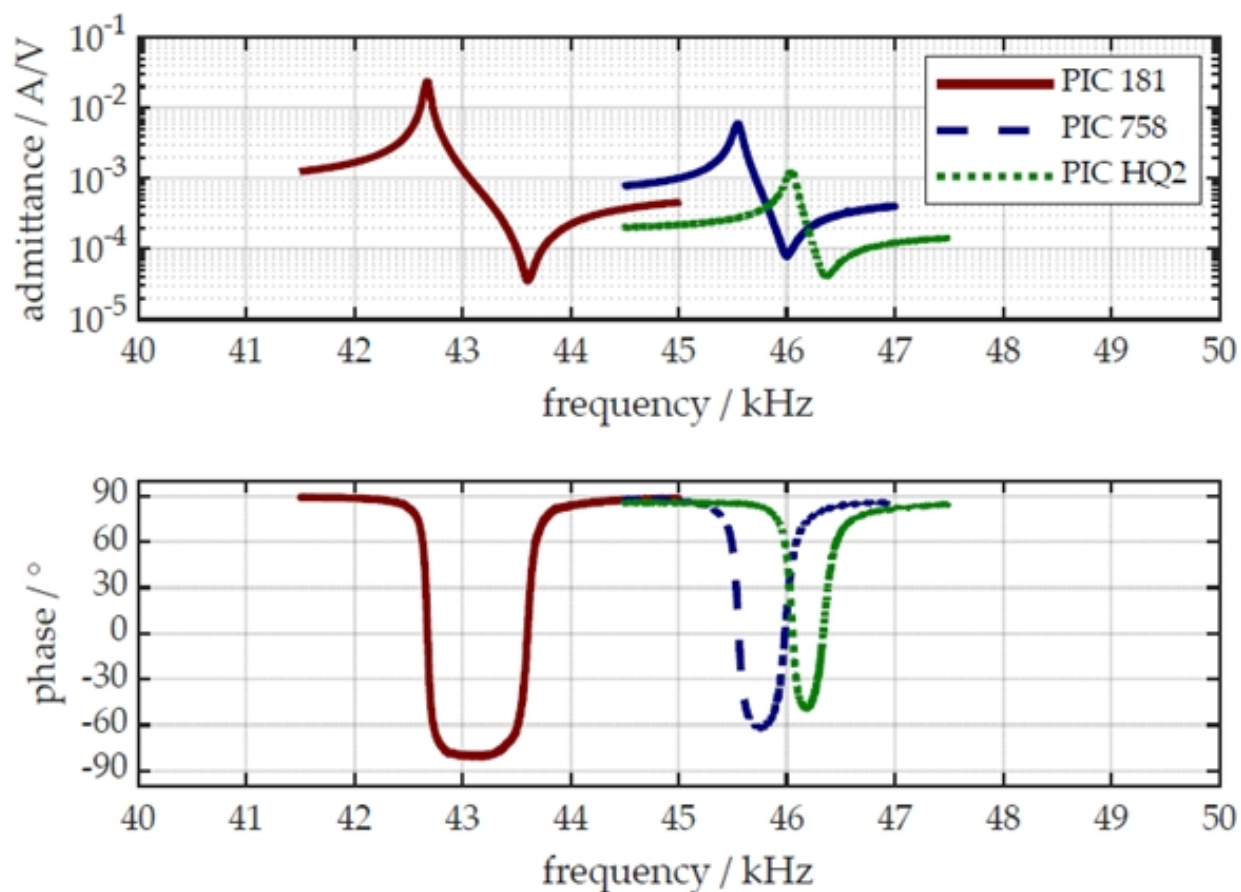


图4. 三种材料换能器的小信号导纳特性（自由振动，室温）

4. 带载性能评估

为模拟真实工况，换能器尖端浸入水中作为负载。短时测试（图5）显示，尖端振动速度与振动电流在室温下呈良好的线性关系。在自由振动下，PIC HQ2的功耗最低（约6 W），而PIC 181和PIC 758分别约为10 W和9 W。在带载情况下，所有换能器的有功功率均达到32-34 W水平，表明声能输出能力相当。

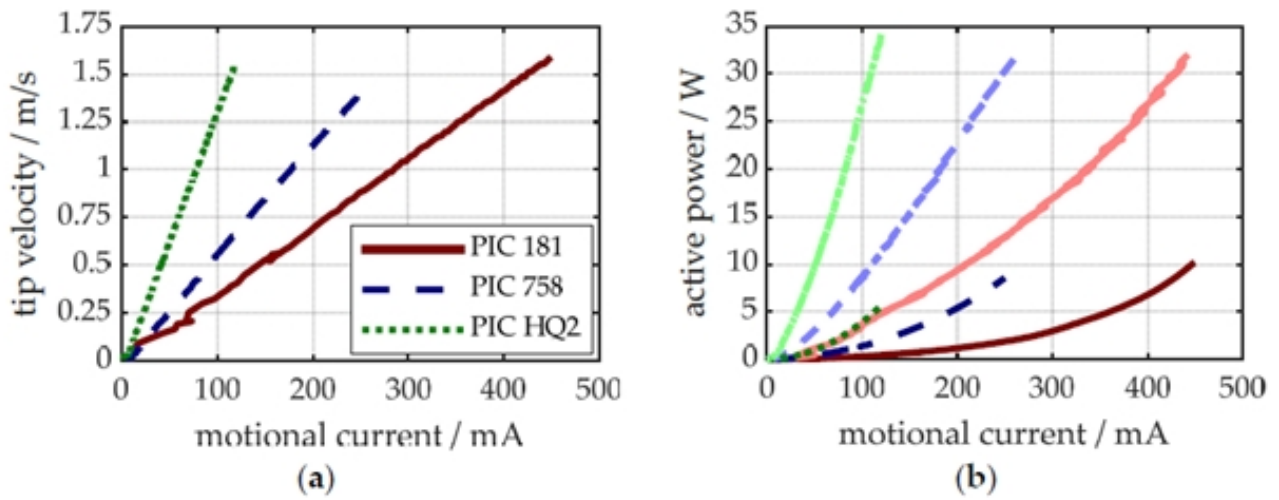


图5. 短时操作测试结果：（a）空载时尖端速度与振动电流的关系，（b）有功功率与振动电流的关系（深色为空载，浅色为带水负载）

更长时间的连续带载测试（图6）表明，无铅换能器需要更高的驱动电压，但它们的自发热均低于含铅PZT换能器。例如，在稳定状态下，PIC 181温升最高，而PIC HQ2温升最低。这得益于PIC HQ2在高振幅下更低的机械阻尼，这对于对热敏感的应用非常有利。

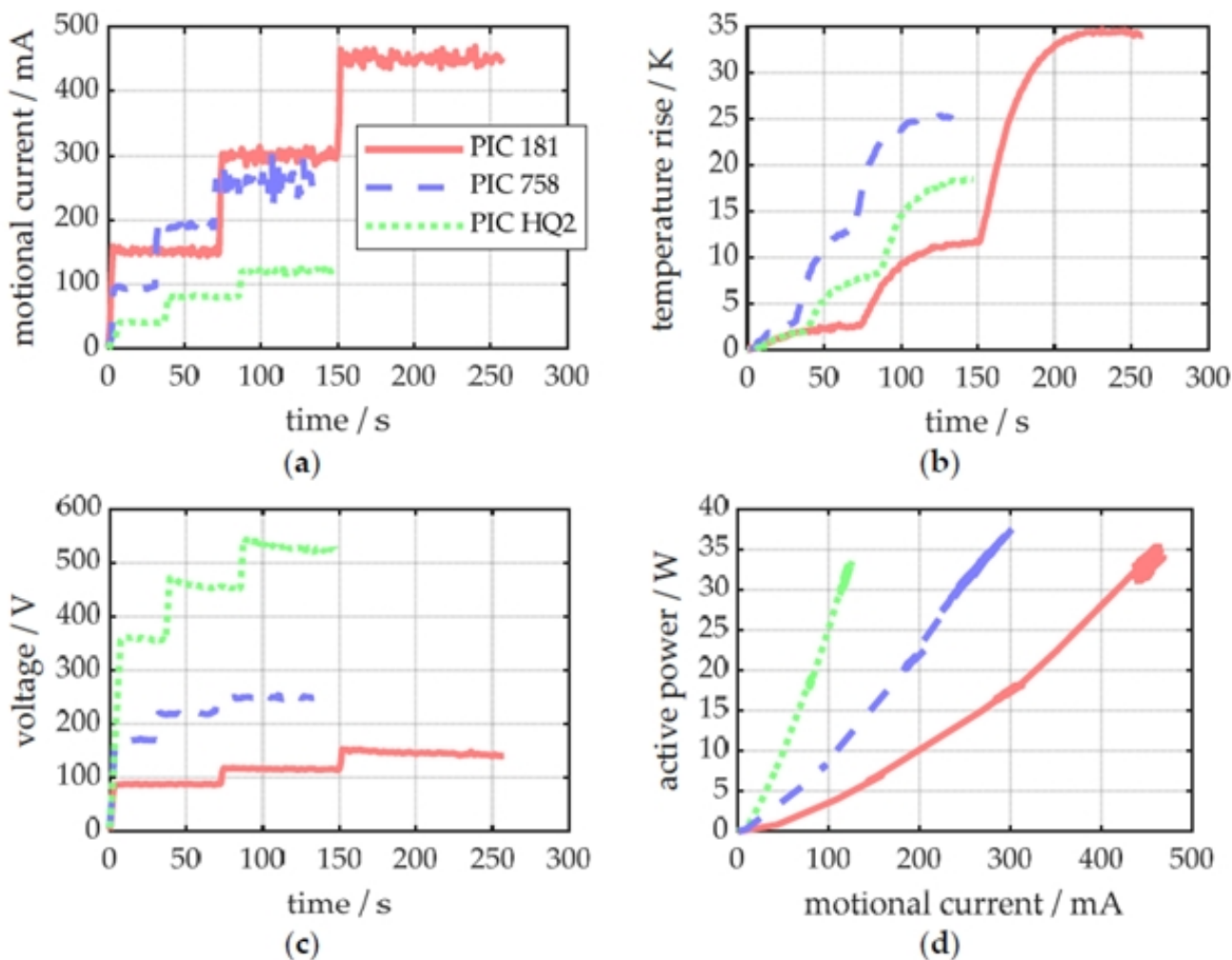


图6. 带载加热测试结果（浸水，连续驱动至稳态）：（a）振动电流随时间变化，（b）温升随时间变化，（c）电压幅值随时间变化，（d）有功功率与振动电流的关系

研究总结

本研究通过系统、实际的工程验证，回答了无铅压电陶瓷能否用于预应力超声换能器这一核心问题。主要结论如下：

1. 可行性得到证实：两种商用无铅KNN基压电陶瓷（PIC 758和PIC HQ2）成功集成了标准BLT换能器，在中等功率应用中展现出与PZT相媲美的性能。
2. 不可一对直接替换：由于无铅材料密度更低、压电常数(d_{33})和耦合系数(k_{33})更小，直接替换PZT会导致换能器谐振频率和电阻抗发生显著变化（频率升高约10%，阻抗增大数倍至一个数量级）。因此，更换材料时必须根据新材料的特性，利用现有仿真工具重新设计换能器的几何尺寸（如调整金属部件长度），以满足特定的工作频率和阻抗要求。
3. 特性与应用优势：无铅换能器需要更高的驱动电压以达到相同功率，这对驱动电源提出了挑战，但同时也带来了更大的设计灵活性（如可使用更薄的陶瓷片）。令人关注的是，无铅材料（尤其是PIC HQ2）在连续大功率工作时表现出更低的机械阻尼和自发热，这对热敏感工艺（如医疗

超声刀) 和提升系统可靠性极具吸引力。

4. 未来展望：

- 优化设计与工艺：当前换能器设计并非针对无铅材料最优。未来可通过调整金属部件质量或陶瓷片数量，在功率、频率和阻抗之间取得更佳平衡，并优化预应力工艺以提高产品一致性。
- 提升材料性能：KNN基材料的压电性能仍有提升空间。未来材料研发应致力于在不牺牲机械品质因数(Qm)的前提下，进一步提高其d33和k33。
- 拓展应用验证：本研究以水为负载，后续需在焊接、切割等固体负载应用中验证其长期稳定性和可靠性，并探索其在更高功率需求场景下的适用性。
- 开发专用驱动技术：针对无铅材料的高阻抗特性，开发与之匹配的高压、低电流驱动电源和更精准的谐振频率追踪算法是产业化的关键一环。

期刊介绍

主编：Kenji Uchino, Pennsylvania State University, USA; Norman M. Wereley, University of Maryland, USA

期刊下设包括执行器材料、航空执行器、机器人执行器、控制系统等10个专题，为执行器和控制系统的科学和技术提供了一个先进的论坛。

2025 Impact Factor：2.4

2025 CiteScore：4.3

Time to First Decision：16.6 Days

Acceptance to Publication：3.7 Days

来源：Actuators

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发