

DOI: 10.3901/JME.2022.21.243

超磁致伸缩换能器涡流损耗及温升抑制研究*

兰天 冯平法 张建富 周辉林
(清华大学机械工程系 北京 100084)

摘要: 超磁致伸缩材料用于换能器后可实现大振幅的超声加工。超磁致伸缩换能器使用时会施加高频电流,内部会产生较大的涡流损耗,引起换能器内部系统的温升,造成不必要的能量损耗,因此对换能器内部进行优化设计,降低换能器内部的涡流损耗,可有效提高能量利用率,减小系统温升,提高换能器的振幅稳定性。建立了超磁致伸缩换能器内部涡流损耗的理论模型,特别分析了超磁致伸缩材料和永磁体切片对涡流损耗的影响。同时借助 ANSYS Workbench 软件对超磁致伸缩换能器工作时产生的涡流损耗及其引起的换能器整体的温升情况进行了有限元仿真分析,在理论层面得到了换能器内部的涡流损耗规律。最终提出了超磁致伸缩换能器的永磁体切片优化方案,结果表明,切片优化后的换能器涡流损耗明显降低,工作时温升情况得到明显抑制。

关键词: 超声加工; 超磁致伸缩; 换能器; 涡流损耗; 温度控制

中图分类号: TG663

Eddy Current Loss and Thermal Control of Giant Magnetostrictive Transducer

LAN Tian FENG Pingfa ZHANG Jianfu ZHOU huilin
(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Giant magnetostrictive material can realize large-amplitude ultrasonic processing when it is used in a transducer. When the giant magnetostrictive transducer is used, it will generate a large eddy current loss, which will cause the temperature rise of the internal system of the transducer, and cause the unnecessary power loss. Thus, optimizing the design of the interior of the transducer to reduce the eddy current loss inside the transducer can effectively improve the energy utilization rate, reduce the temperature rise of the system, and improve the amplitude stability of the transducer. The theoretical model of the eddy current loss inside the giant magnetostrictive transducer is established, and the influence of the giant magnetostrictive material and permanent magnet slices on the eddy current loss is especially analyzed. The finite element simulation analysis of the eddy current loss and the overall temperature rise of the transducer caused by the giant magnetostrictive transducer is carried out with the help of ANSYS Workbench, and the eddy current loss law inside the transducer is obtained at theoretical level. Finally, a permanent magnet slice optimization scheme for giant magnetostrictive transducer is proposed. The results show that the eddy current loss of the transducer after slice optimization is significantly reduced, and the temperature rise during operation was significantly suppressed.

Key words: ultrasonic machining; giant magnetostriction; transducer; eddy current loss; thermal control

0 前言

磁致伸缩现象是铁磁体在磁场中受磁场影响尺寸发生变化的现象。传统磁致伸缩材料虽然具有磁

致伸缩性能,但其磁致伸缩系数很小。20世纪70年代发现的稀土合金化合物 $Tb_{1-x}Dy_xFe_{2-y}$ 在室温下具有较高的磁致伸缩性能,其磁致伸缩系数可达到传统磁致伸缩材料的几十倍到上百倍,这种具有较高磁致伸缩性能的材料被称为超磁致伸缩材料(Giant magnetostrictive material, GMM),其中的代表性材料是 Terfenol-D^[1]。由于磁致伸缩现象,超磁致

* 国家自然科学基金资助项目(51875311)。20211219 收到初稿,20220518 收到修改稿

伸缩材料可以在施加的交变磁场作用下反复伸张与缩短,从而产生振动,实现从电磁能转到机械能或声能的能量转换,基于上述原理,超磁致伸缩材料可以应用于换能器^[2-3]。

在旋转超声振动系统中,超声换能器是核心部件,为使超磁致伸缩换能器能有稳定输出的振幅,需要使 GMM 处于稳定状态^[4]。由于 GMM 为导电材料,在高频电磁场中工作时, GMM 内部会出现较大的涡流,产生涡流损耗,同时 GMM 在工作过程中还会产生磁滞损耗以及线圈在高频交流电下会产生焦耳热,同时由于换能器工作时内部环境较为封闭,损耗会产生较多的热量,导致换能器温度显著升高。GMM 对于温度比较敏感,随温度升高,其磁致伸缩系数会产生显著降低,导致输出振幅显著降低,同时随着温度升高, GMM 会产生热变形,严重影响换能器的输出性能。

因此为使换能器能有稳定输出的振幅,就需要对 GMM 的温度进行控制,很多研究人员已经对此做出了研究。ZHU 等^[5]对超磁致伸缩执行器(Giant magnetostrictive actuator, GMA)的温度控制方法进行了研究,温度控制主要包括温度控制和热致位移补偿两种,该文献中将二者结合来减小温度变化带来的影响。MOONGKI 等^[6]研究了线圈电阻损耗、涡流损耗及磁滞损耗的占比模型。ZUCCA 等^[7]发现磁滞损耗和涡流损耗随驱动频率增大而增大。陶孟伦等^[8]通过研究发现,相对于不切片的 GMM 棒,堆叠式的 GMM 可有效降低涡流损耗。LI 等^[9]研究发现,切缝处理可以有效抑制小型换能器的涡流损耗,但是对于大型换能器使用切片处理更好。KALETA 等^[10]开发了一种生产包含粉状 Terfenol-D 和环氧树脂的磁致伸缩复合材料的方法,该材料具有更高的电阻率,更低的涡流损耗和更高的高频特性。但是该复合材料的磁致伸缩系数比普通 GMM 低 45%。LIU 等^[11]研究了考虑集肤效应的涡流损耗模型,发现考虑集肤效应后所得的涡流损耗计算结果比经典模型结果显著降低。在主动温控方面,贾振元等^[12]在 GMM 和线圈骨架之间设计一个水冷腔,利用冷却水转移热量。YAN 等^[13]在线圈骨架内外两侧分别设置了冷却腔以达到更好的冷却效果。ZHOU 等^[14]在换能器中设计了气路通道,使用气冷来进行冷却。冯良^[15]推导了磁滞损耗、电阻损耗及涡流损耗的理论公式,并对其占比进行了计算分析,发现在高频下涡流产热为主要的产热来源,因此对涡流损耗进行抑制可有效对整体热损耗进行抑制。

在现有研究中,研究人员在分析中讨论了 GMM 棒涡流损耗及冷却结构的设计。而现有设计仍存在涡流损耗大、温升高的问题,限制了超磁致伸缩换能器的工业应用。本文建立了考虑永磁体影响的换能器涡流损耗模型,并提出了永磁体切片的优化设计方案,并通过仿真分析和试验验证了优化设计方案的有效性。

1 超磁致伸缩换能器结构

超磁致伸缩换能器通常由 Terfenol-D 棒,线圈,导磁体,外壳,线圈骨架,预紧块,永磁体等部分组成。超磁致伸缩换能器结构如图 1 所示。

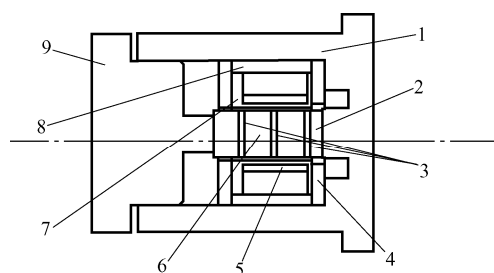


图 1 超磁致伸缩换能器结构图

1. 外壳 2. 预紧块 3. 永磁体 4. 导磁端盖 5. 线圈
6. GMM 棒 7. 线圈骨架 8. 导磁圆筒 9. 压块

其中线圈可以将施加的超声频电信号转换成周期变化的磁场,为 Terfenol-D 棒提供驱动磁场, Terfenol-D 棒、永磁体、导磁体、预紧块构成闭合磁路,接受线圈传递来的驱动磁场,对外输出振动。现有换能器中主要产热方式为焦耳损耗、磁滞损耗及涡流损耗,其中焦耳热损耗主要发生在线圈上,磁滞损耗发生在 Terfenol-D 棒及导磁体上,涡流损耗主要发生在 Terfenol-D 棒及永磁体上,这其中,涡流损耗为最主要的产热方式。

2 涡流损耗模型

2.1 Terfenol-D 棒的涡流损耗模型

2.1.1 传统涡流损耗模型

当 GMM 棒在高频磁场下工作时,由于换能器内部磁场均匀性较高,可将 GMM 内部看成均匀磁场,由麦克斯韦定律可得

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2)$$

式中, ∇ 为微分算子; \mathbf{E} 为电场矢量; \mathbf{B} 为通过

GMM 的磁感应强度矢量; \mathbf{J} 为涡流损耗矢量; σ 为 GMM 的电导率。由于 $\mathbf{B} = B \exp(j\omega t)$ (其中 ω 为交变磁场角频率, B 为磁感应强度幅值), 对于圆柱形的 GMM, 在半径为 r 处的电场为

$$\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_\theta) \right)_z = -j\omega B \quad (3)$$

$$E_\theta(r, t) = -\frac{j\omega r B}{2} \quad (4)$$

微圆环体的涡流损耗为

$$dP = 2\sigma\pi r E_\theta^2(r, t) dr \quad (5)$$

进行积分可得, 涡流损耗为

$$P = \int_0^R dP = \frac{\pi}{8} \sigma L \omega^2 B^2 R^4 \quad (6)$$

式中, R 为圆柱形 GMM 的半径。

2.1.2 集肤效应

GMM 在高频磁场中会产生涡流, 涡流也会产生与驱动磁场方向相反的磁场来抑制换能器内部的磁场, 且该磁场越靠近中心处强度越大, 因此 GMM 棒内部的磁场会趋向于集中在棒的表面, 产生集肤效应。其中, 有效磁场能够达到的材料的径向深度为集肤深度 δ

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu_0\mu_r}} \quad (7)$$

式中, μ_0 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率。

由于发生集肤效应后, 换能器内部磁场不再均匀, 在计算中将集肤深度以外的区域看成无磁场, 集肤深度以内看成均匀磁场。

由式(5)可知, 微圆环体涡流损耗为

$$dP = 2\sigma\pi r E_\theta^2(r, t) dr \quad (8)$$

故考虑集肤效应的涡流损耗为

$$P = \int_{r_0}^R dP = \frac{\pi}{8} \sigma L \omega^2 B^2 (R^4 - r_0^4) \quad (9)$$

式中, $r_0 = R - \delta$, δ 为 GMM 的集肤深度; L 为 GMM 的长度。

2.1.3 GMM 棒切片后的涡流损耗

为抑制换能器内部的涡流损耗及集肤效应, 通常对 GMM 棒进行切片处理。在过往研究中, 通常认为切片仅为抑制涡流损耗, 然而除抑制涡流损耗外, 切片也可对集肤效应产生抑制效果。根据上文所述定义, 集肤深度为有效磁场能够达到的材料的径向深度, 同时也为涡流产生的有效深度, 集肤深度与材料厚度无关, 因此, 当切片厚度小于 2 倍集

肤深度时, 可以认为切片内部均能产生有效涡流, 即集肤效应得到抑制。故在进行切片处理时, 每片厚度需要小于其 2 倍集肤深度。

在对切片后的涡流损耗进行计算时, 将切片等效成长方体进行计算^[15], 微元回路的涡流损耗为

$$dp_2 = 2 \frac{k^3}{1+k^2} \sigma L \omega^2 B^2 x^3 dx \quad (10)$$

式中, k 为单片长方形微元回路的长宽比; x 为微元回路的宽, 对微元回路进行积分最终可得单片 GMM 涡流损耗公式为

$$P = \frac{k^3}{16(1+k^2)} \sigma L \omega^2 B^2 r_c^4 \quad (11)$$

式中, r_c 为 GMM 单片切片厚度。

GMM 整体涡流损耗为

$$P_{\text{total}} = \frac{1}{16} \sigma L \omega^2 B^2 r_c^4 \times \left(2 \sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}} \frac{8 \left[\left(\frac{N}{2} \right)^2 - n^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{N^2 - 4n^2 + 1} + \frac{N^3}{1 + N^2} \right) \quad (12)$$

式中, N 为 GMM 切片数。

2.2 考虑永磁体的涡流损耗计算

在换能器中构成磁路的部分中, 除 GMM 外, 处于高频磁场下的还有永磁体及导磁体, 且永磁体具有和 GMM 相近的电导率, 因此永磁体上也存在较大的涡流损耗。

由于永磁体形状也为圆柱形, 故永磁体也需考虑集肤效应且永磁体半径与 GMM 半径相同, 因此永磁体的涡流损耗为

$$P_f = \frac{\pi}{8} \sigma_f L_f \omega^2 B^2 (R^4 - r_f^4) \quad (13)$$

式中, $r_f = R - \delta_f$, δ_f 为永磁体的集肤深度; L_f 为永磁体的长度。

在图 1 所示换能器中, 每个永磁体厚度为 1 mm, 共 3 个, GMM 总长度为 15 mm, σ_f 为 62 500 S/m, 工作中, 频率为 20 kHz, GMM 与永磁体半径为 6.5 mm, GMM 切片厚度为 1 mm, 由计算得 δ_f 为 4.4 mm, δ 为 0.9 mm。

故永磁体的涡流损耗与切片前后的 GMM 的涡流损耗比值 η_0 、 η_1 为

$$\eta_0 = \frac{P_f}{P} = 0.15 \quad (14)$$

$$\eta_1 = \frac{P_f}{P_{\text{total}}} = 6.3 \quad (15)$$

因此切片虽然有效抑制了 GMM 上的涡流损耗,但是永磁体依然存在较高的涡流损耗,在实际工作中不能忽视。

2.3 永磁体切片处理及其涡流损耗计算

在第 2.2 节的分析中可知,在 GMM 切片前,永磁体的涡流产热相对较小,可以忽略不计,但是在 GMM 进行切片之后,永磁体成为了换能器的主要涡流产热来源,此时需要对永磁体进行优化处理,以减小发生其涡流损耗。

为减小永磁体的涡流损耗,考虑其形状为圆柱体,磁场产生的涡流主要产生在圆形回路上,因此采用切片的方式对永磁体进行处理,如图 2 所示,切片处理可以对换能器的涡流回路起到阻隔的作用,进而降低永磁体上的涡流损耗。

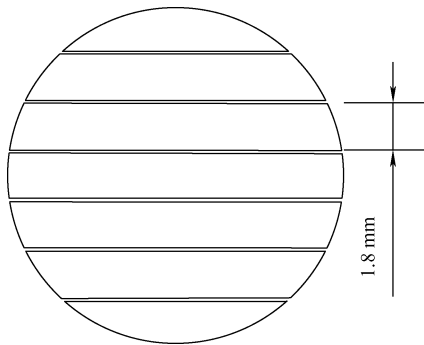


图 2 永磁体切片示意图

同时根据第 2.2 节可知,永磁体上也具有集肤效应,集肤效应同样会导致永磁体上磁场分布不均,进而导致 GMM 上的磁场分布不均,影响换能器稳定输出,因此为减小永磁体集肤效应的影响,切片后的永磁体单片宽度需要小于 8.8 mm,同时为减小涡流损耗,单片宽度不易过宽,故选择单片切片宽度为 1.8 mm。

切片后的永磁体与切片后的 GMM 具有相同的结构形式,因此切片后的永磁体的涡流损耗为

$$P_{\text{total}2} = \frac{1}{16} \sigma_f L_f \omega^2 B^2 r_{\text{fc}}^4 \times \left(2 \sum_{n=1}^{\frac{N_f-1}{2}} \frac{8 \left[\left(\frac{N_f}{2} \right)^2 - n^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{N_f^2 - 4n^2 + 1} + \frac{N_f^3}{1 + N_f^2} \right) \quad (16)$$

式中, r_{fc} 为永磁体单片切片厚度; N_f 为永磁体切片数。

本例中,通过该理论模型计算得永磁体切片后的涡流损耗可以降低 81%。

3 涡流损耗及温升仿真实验

由于在理论模型计算中,进行了多处近似,且在高频磁场中,相近的切片产生的涡流会互相影响从而最终影响最终的涡流分布,即会出现邻近效应,而在理论计算中并未将其计算在内,因此所得比值并不是精确比值,需要进行仿真分析进行验证。在本研究中采用 ANSYS Workbench19.2 进行仿真分析。电磁场涡流损耗仿真使用 Maxwell 模块,产热仿真使用瞬态热模块。在该软件的涡流场仿真的内置算法中,计算的时候会自动考虑集肤效应和邻近效应,相较于没有考虑邻近效应的计算公式会有更高的精确度。

3.1 初始模型仿真实验

在初始模型中,设置电流安匝数为 113.1 A,即电流有效值为 0.4 A。

由图 3 可知,换能器内部主要涡流损耗源的确为永磁体,且使用 Maxwell 软件自带的计算工具计算可知,涡流功率为 5.87 W,其中永磁体部分的涡流损耗功率为 4.37 W。

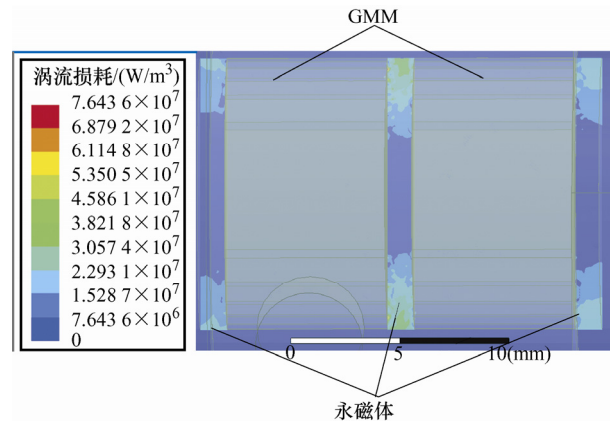


图 3 初始模型涡流损耗图

在 ANSYS Workbench 中进行耦合,在瞬态热模块中进行仿真,其中表面热对流系数设置为 $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$,换能器内部热对流系数设置为 $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$,仿真模拟工作时间为 70 min,环境温度为 22 C 。

由图 4、5 可知,温度上升很快,且换能器内部最高温度即中心永磁体表面温度可达 53.3 C 。

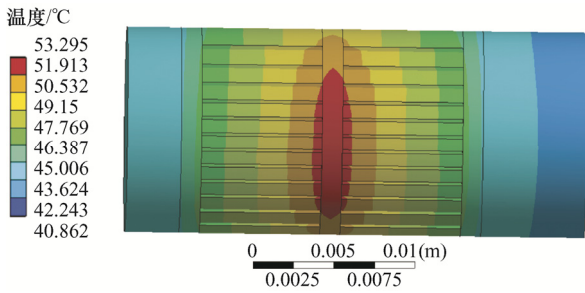


图 4 初始模型温升仿真结果图

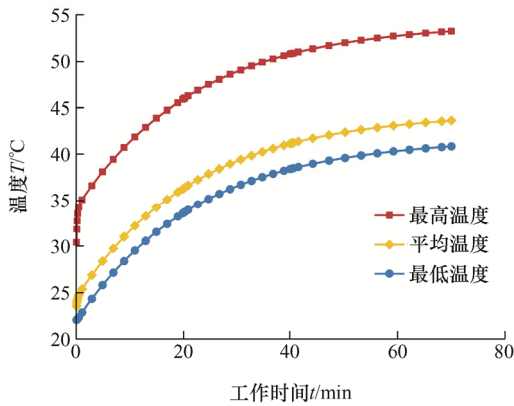


图 5 初始换能器温升仿真曲线图

3.2 优化模型仿真实验

对永磁体进行切片加工，每片 1.8 mm，对永磁体切片后的模型进行仿真实验。同样设置电流安匝数为 113.1 A，即电流有效值为 0.4 A。

由图 6 可知，经过切片之后换能器内部的涡流损耗显著变小，使用计算工具计算可得涡流功率为 4.46 W，其中永磁体部分的涡流损耗功率为 2.87 W。

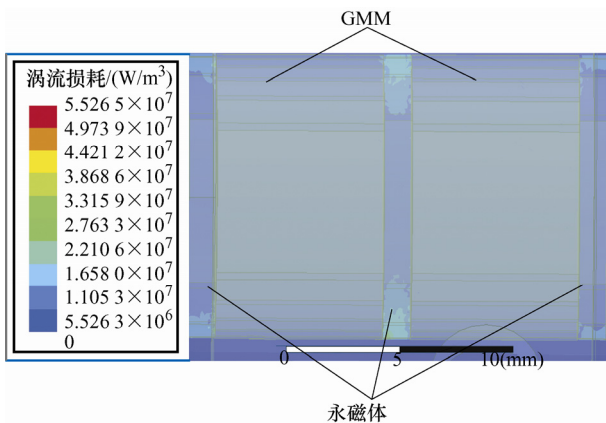


图 6 永磁体切片模型涡流损耗图

在 ANSYS Workbench 中进行耦合，在瞬态热模块中进行仿真，其中表面热对流系数设置为 $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ，换能器内部热对流系数设置为 $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ，仿真模拟工作时间为 70 min，环境温度为 22 C 。

由图 7、8 可知，经过切片后，换能器内部温升

获得显著降低，其最高温度由 53.3 C 降低为 44.6 C ，降低了 16.3 %。

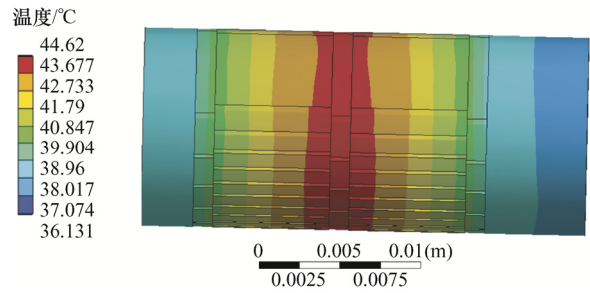


图 7 永磁体切片模型温升仿真结果图

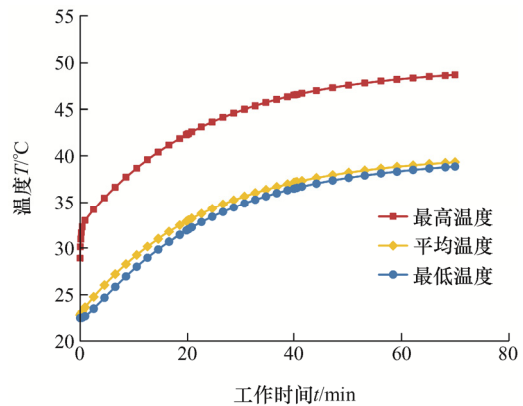


图 8 永磁体切片模型温升仿真曲线图

4 试验验证

根据前文提出的永磁体切片方案，对换能器内部的永磁体进行切片。永磁体采用线切割的方法进行加工，切片后的永磁体采用环氧树脂胶进行粘接。

对永磁体切片前后的换能器分别施加适当的预应力使二者获得相同的谐振频率。通过调节预应力，测得换能器优化前后的谐振频率均为 20 860 Hz。通过阻抗分析仪对换能器阻抗特性进行测量并据此进行电容补偿，补偿电容设置为 73 nF，试验平台如图 9 所示。

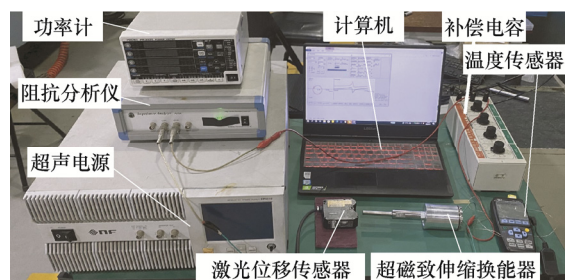


图 9 试验平台

试验时，控制换能器获得的电源的输入功率相同，通过前期预应力的调节，优化前后的换能器具

有相同的阻抗, 在同功率的输入条件下可认为输入电流也相同。

调节电源电压峰峰值为 85 V, 电源输出端电压有效值为 30 V, 电流有效值为 0.4 A, 换能器输入功率为 12 W。此时对优化前后的换能器进行通电, 使换能器空载工作 70 min, 使用温度传感器对换能器超磁致伸缩材料表面温度进行测量, 测量点接近中心永磁体, 试验初始温度均为 19 °C, 优化前后换能器温度如图 10 所示。

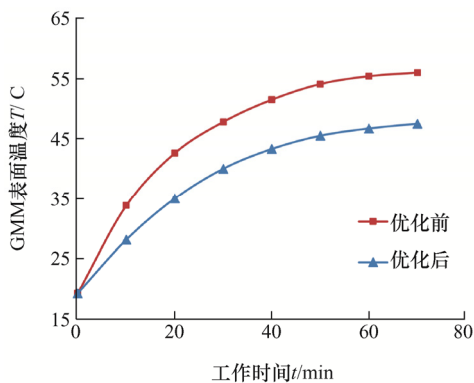


图 10 换能器工作 70 min 温度

通过图 10 可知, 优化前换能器通电 70 min 后温度为 56.5 °C, 优化后的换能器通电 70 min 后温度为 47.7 °C, 温度上升显著降低, 试验中换能器温度稍高于仿真结果, 这是因为仿真时仅考虑了涡流损耗的产热效果, 并未计算线圈焦耳热及 GMM 与导磁材料的磁滞损耗及换能器机械结构产热, 因此仿真产热功率会低于实际产热功率。通过试验结果可知, 切片对温升的抑制效果较为明显。

5 结论

(1) 建立了超磁致伸缩换能器涡流损耗理论计算模型, 分析了集肤效应、永磁体、是否切片等因素的影响, 设计了对永磁体进行切片的优化方案。

(2) 对优化方案进行仿真分析, 仿真结果显示该优化方案可以减小涡流损耗, 并能抑制换能器长时间工作的温升。

(3) 对优化后的换能器进行制作并开展试验, 试验显示切片后的换能器温升明显减小, 为后续减小涡流损耗及控制换能器温升的研究提供了理论与试验依据。

参 考 文 献

- [1] 吕福在, 项占琴, 程耀东, 等. 稀土超磁致伸缩材料高速强力电磁阀的研究[J]. 内燃机学报, 2000, 18(2): 199-202.
- [2] LÜ Fuzai, XIANG Zhanqin, CHENG Yaodong, et al. Research on high speed and powerful solenoid valve of rare earth giant magnetostrictive material [J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(2): 199-202.
- [2] 李明范, 项占琴, 吕福在, 等. 超磁致伸缩换能器磁路设计及优化[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(2): 192-196.
- LI Mingfan, XIANG Zhanqin, LÜ Fuzai, et al. Magnetic circuit design and optimization of giant magnetostrictive transducer [J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(2): 192-196.
- [3] 冯平法, 王健健, 张建富, 等. 硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 3-21.
- FENG Pingfa, WANG Jianjian, ZHANG Jianfu, et al. Research status and future prospects of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 3-21.
- [4] 蔡万宠, 张建富, 郁鼎文, 等. 超磁致伸缩超声振动系统的机电转换效率研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 52-58.
- CAI Wanchong, ZHANG Jianfu, YU Dingwen, et al. Research on the electromechanical conversion efficiency for giant magnetostrictive ultrasonic machining system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 52-58.
- [5] ZHU Yuchuan, JI Liang. Theoretical and experimental investigations of the temperature and thermal deformation of a giant magnetostrictive actuator [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2014, 218(1):167-178.
- [6] MOONGKI C, WAKIKAWA H, YAJIMA H, et al. Power loss analysis by measuring temperature rise in T-GMA [J]. Japanese AEM, 2011, 19(3): 503-508.
- [7] ZUCCA M, ROCCATO P E, BOTTAUSCIO O, et al. Analysis of losses in a magnetostrictive device under dynamic supply conditions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(2):183-186.
- [8] 陶孟仑, 陈定方, 卢全国, 等. 超磁致伸缩材料动态涡流损耗模型及试验分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 146-151.
- TAO Menglun, CHEN Dingfang, LU Quanguo, et al. Eddy current losses of giant magnetostrictors: modeling and experimental analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 146-151.
- [9] LI P, LIU Q, ZHOU X, et al. Effect of Terfenol-D rod structure on vibration performance of giant

- magnetostrictive ultrasonic transducer [J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(5-6): 573-581.
- [10] KALETA J , LEWANDOWSKI D , MECH R. Magnetostriction of field-structural composite with Terfenol-D particles[J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2015, 15(4): 897-902.
- [11] LIU H , GAO S , WANG H , et al. Study on eddy current loss characteristics of precision giant magnetostrictive actuator considering magnetic field distribution[J]. International Journal of Nanomanufacturing, 2019, 15(4): 343-354.
- [12] 贾振元, 杨兴, 郭东明, 等. 超磁致伸缩材料微位移执行器的设计理论及方法[J]. 机械工程学报, 2001, 37(11): 46-49.
- JIA Zhenyuan, YANG Xing, GUO Dongming, et al. Design theory and method of giant magnetostrictive micro-displacement actuator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(11): 46-49.
- [13] YAN Ming , ZHENG Peng , GAO Xiufeng , et al. Temperature field computation of giant magnetostrictive transducers[C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. Changchun, 2010: 244-247.
- [14] ZHOU H, ZHANG J, YU D, et al. Advances in rotary ultrasonic machining system for hard and brittle materials[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(12):1-13.
- [15] 纪良. 超磁致伸缩电静液作动器温度场分布与热位移特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- Ji Liang. Research on temperature field distribution and thermal deformation of giant magnetostrictive electro-hydrostatic actuator [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
-
- 作者简介: 兰天, 男, 1997年出生, 博士研究生。主要研究方向为超磁致伸缩加工系统设计。
E-mail: lan-t19@mails.tsinghua.edu.cn
- 冯平法(通信作者), 男, 1966年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超声加工工艺与装备; 高速高效切削工艺与装备; 数控加工精度原位检测; 制造装备性能分析与优化; 智能制造系统及信息集成技术。
E-mail: fengpf@tsinghua.edu.cn