

## 声波式机械天线的谐振频率调控方法

崔勇<sup>1\*</sup>, 李良亚<sup>1</sup>, 王琛<sup>1</sup>, 黄玉平<sup>2</sup>, 袁志鸿<sup>1</sup>, 陶云飞<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 2. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

**摘要:** 声波式机械天线作为机械天线的重要类型之一, 其谐振频率与固有频率高度耦合, 而目前声波式机械天线受到材料尺寸限制, 谐振频率较高, 无法满足甚低频或更低频段的需求。为调控声波式机械天线的谐振频率, 对声波式机械天线进行了振动建模, 提出了增加单边固定约束、增加自由端质量和去除天线部分材料三种方法, 并通过有限元仿真对所提方法进行了验证。结果表明, 三种方法均能有效调控声波式机械天线的谐振频率, 且与解析模型具有良好的一致性。通过应力分布研究了三种调控谐振频率方法对天线辐射的电场强度或磁场强度的影响, 对声波式机械天线的设计具有重要参考意义。

**关键词:** 声波式机械天线; 甚低频; 固有频率; 有限元; 磁电复合材料

**中图分类号:** TN822+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2024)04-096-08



## Resonant frequency control method of acoustic mechanical antenna

CUI Yong<sup>1\*</sup>, LI Liangya<sup>1</sup>, WANG Chen<sup>1</sup>, HUANG Yuping<sup>2</sup>, YUAN Zhihong<sup>1</sup>, TAO Yunfei<sup>2</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Acoustic mechanical antenna is one of the important types of mechanical antenna, the resonant frequency of acoustic mechanical antenna is highly coupled with its natural frequency. However, the current acoustic mechanical antenna is limited by material size and has high resonant frequency, which can not to meet the needs of very low frequency or lower frequency band. In order to control the resonant frequency of acoustic mechanical antenna, the vibration modeling of acoustic mechanical antenna was carried out. Three methods were proposed: adding unilateral fixed constraint, increasing free end mass and removing some materials of antenna. Proposed method was verified by finite element simulation. Results show that the three methods can effectively control the resonant frequency of acoustic mechanical antenna, and are in good agreement with the analytical model. Influence of three methods of regulating resonant frequency on the electric field or magnetic field intensity radiated by the antenna was studied through the stress distribution, which has important reference significance for the design of acoustic mechanical antenna.

**Keywords:** acoustic mechanical antenna; very low frequency; natural frequency; finite element; magnetoelectric composites material

低频电磁波能够通过地-电离层波导沿地球曲面远距离传播, 并且在有耗介质中的衰减率较小<sup>[1]</sup>。因此, 低频电磁波同时具备远距离传播和强介质穿透力的特性, 十分符合对潜通信的场景需求, 是对潜通信的有效手段, 同时在地质勘探、无线电导航等领域也具有重要作用<sup>[2]</sup>。而采用传统的“电源型”天线激励低频电磁波, 其尺寸难以突破波长限制, 存在体积大、效率低、顽存性弱、机动性差等缺点<sup>[3]</sup>。不同于传统天线, 机械天线不依靠电流振荡来激励电磁波, 而是通过机械能

直接驱动电荷或磁偶极子运动, 进而激励电磁波<sup>[4-5]</sup>, 该方案可利用近场能量在天线辐射中发挥作用, 无须庞大的阻抗匹配网络, 便于实现低频发信设备的小型化。

目前, 根据不同的实现方案, 机械天线可分为永磁体式、驻极体式和声波式<sup>[6-7]</sup>。永磁体式机械天线通过驱动永磁体运动辐射电磁波, 其永磁材料易于获取, 结构较为简单, 因此是最常见的机械天线方案。西安电子科技大学的 Liu 等提出的永磁体机械天线采用转动惯量更小的细长柱形永磁体

收稿日期: 2022-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707006)

\*第一作者: 崔勇(1982-), 男, 河北唐山人, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: cuiyong@buaa.edu.cn

引用格式: 崔勇, 李良亚, 王琛, 等. 声波式机械天线的谐振频率调控方法[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(4): 96-103.

Citation: CUI Y, LI L Y, WANG C, et al. Resonant frequency control method of acoustic mechanical antenna[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(4): 96-103.

发射电磁波,于水下 10 m 处接收,并进行了数据的发射与接收测试<sup>[8]</sup>;国防科技大学的周强等建立了旋转永磁体式机械天线的系统模型<sup>[7]</sup>,并研制了原理样机。目前,由于永磁体和软磁材料质量较大,永磁体式机械天线多用于超低频(30 ~ 300 Hz, super low frequency, SLF)以及更低频段。

驻极体作为一种可以长期存储电荷的介电材料,也可以应用于机械天线,在机械驱动下激励电磁波。由于驻极体式机械天线激励的电磁波强度随转速增加而提高<sup>[9]</sup>,因此驻极体式机械天线有望实现更大的辐射功率。北京航空航天大学的崔勇对旋转驻极体式机械天线的原理与优化开展了大量的研究<sup>[10-12]</sup>。

声波式机械天线作为机械天线的一个重要类型,利用声波形式的机械能驱动天线产生机械振动。声波式机械天线多采用压电材料或磁电复合材料(压电材料与磁致伸缩材料复合而成的材料)制成,天线中的压电材料在激励电压的驱动下产生机械振动,机械振动以声波的形式在天线内传导,声波产生的应力波动能够引起天线上电偶极矩或磁偶极矩的变化,因而能够激励电磁波<sup>[13]</sup>。相比于永磁体式 and 驻极体式机械天线,声波式机械天线不需要电机等驱动部件,具有结构简单、重量轻等优点,同时工作频率不受电机的转速限制,可用于激励甚低频(3 ~ 30 kHz, very low frequency, VLF)频段或更高频率的电磁波。

为增大应力波动,提高辐射强度,声波式机械天线需工作在机械固有频率附近,天线的机械固有频率决定了其谐振频率。清华大学的Liu等研究了基于压电材料的环形声波式机械天线<sup>[14]</sup>,发现改变环形机械天线中心孔洞的半径可以调整天线的谐振频率。由于低频电磁波的磁场分量更易于检测,因此由磁致伸缩材料与压电材料复合而成的磁电复合材料能够使声波式机械天线具有更好的性能。美国东北大学的Dong与弗吉尼亚理工大学的Xu等提出了由磁致伸缩层-压电层-磁致伸缩层构成的三明治结构磁电复合机械天线<sup>[15-16]</sup>。压电材料受工艺限制尺寸较小,因此制成的声波式机械天线工作频率多高于30 kHz<sup>[13, 17]</sup>,无法覆盖甚低频频段,而高频率的电磁波对海水等导电介质的穿透性显著下降<sup>[18]</sup>,不利于发挥低频电磁波的优势,因此如何调控机械天线的谐振频率已成为本领域内亟待解决的问题。目前,已有关于调控压电器件固有频率方法的研究<sup>[19-20]</sup>,但这些研究主要关注于压电器件的一阶固有频

率,对于工作于更高阶次的声波式机械天线的固有频率则少有涉及。

本文从声波式机械天线的原理出发,分析了声波式机械天线电磁波频率与机械固有频率的关系,提出了调控声波式机械天线谐振频率的若干方法,对提出的方法进行了解析建模分析,并采用有限元方法进行了仿真验证。

## 1 声波式机械天线原理

声波式机械天线的工作原理如图1所示。对于采用压电材料的声波式机械天线,其电极材料为普通导体材料,压电材料在外加交变电场的驱动下产生应力波,压电材料产生交变的电偶极矩  $P$  以激励电磁波。

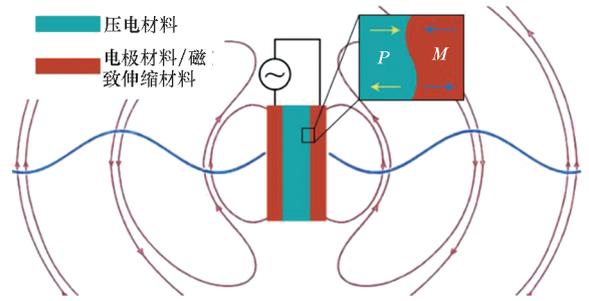


图1 声波式机械天线的工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle of acoustic mechanical antenna

对于采用磁电复合材料的声波式机械天线,其利用界面将压电材料与磁致伸缩材料复合,在交变外场驱动下的压电材料将应力波通过复合界面耦合传导至磁致伸缩材料,激励磁致伸缩材料振动产生交变的磁偶极矩  $M$ ,亦可激励电磁波。

由麦克斯韦方程组可知,加速或减速变化的电偶极矩或磁偶极矩可以向外界辐射电磁波。声波式机械天线基于压电材料或磁电复合材料的特性,用声波驱动材料的极化强度或磁化强度周期性变化,从而辐射电磁波。

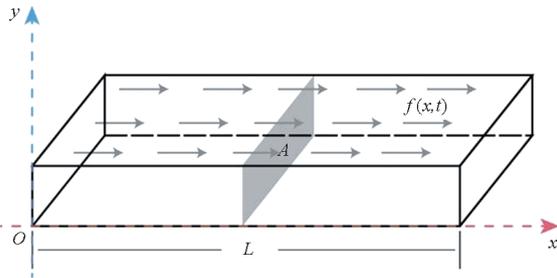
Mindlin等<sup>[21]</sup>研究了声波驱动的压电材料,分析并评估了无限大石英晶片的辐射功率密度。Lee等<sup>[22-23]</sup>用更严谨的电磁建模方法研究了Mindlin提出的模型。结果表明,Mindlin在压电材料中使用的静电近似方法与更复杂的电磁方法的结果是几乎等价的。根据电磁对偶原理,在磁致伸缩材料中使用稳态磁场的近似方法也是可行的。Xu等<sup>[24]</sup>研究了磁电复合机械天线的辐射特性,并给出了球坐标系中磁电复合天线的近场辐射公式如下:

$$\begin{cases} E_\theta = -E_0 e^{-j\kappa r} [1/(\kappa r) - j/(\kappa r)^2] \sin\phi \\ E_\phi = -E_0 e^{-j\kappa r} [1/(\kappa r) - j/(\kappa r)^2] \cos\theta \cos\phi \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} H_r = 2H_0 e^{-j\kappa r} [j/(\kappa r)^2 + 1/(\kappa r)^3] \sin\theta \cos\phi \\ H_\theta = H_0 e^{-j\kappa r} [1/(\kappa r) - j/(\kappa r)^2 - 1/(\kappa r)^3] \cos\theta \cos\phi \\ H_\phi = H_0 e^{-j\kappa r} [1/(\kappa r) - j/(\kappa r)^2 - 1/(\kappa r)^3] \sin\phi \end{cases} \quad (2)$$

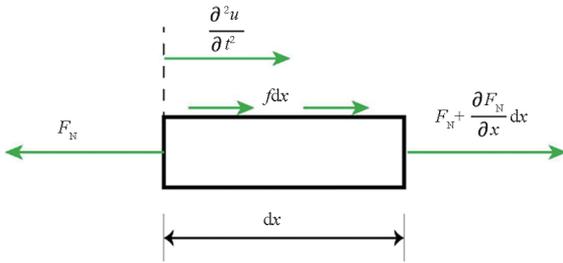
其中： $H_0 = \kappa^3 m_0 / (4\pi)$ ， $E_0 = \eta_0 H_0$ ； $\kappa$  为自由空间波数； $\eta_0$  为自由空间波阻抗； $m_0$  为天线的等效磁偶极矩，其值为磁致伸缩材料磁化强度的体积分。

对于均质且形状为等截面直梁的压电材料，设其长为  $L$ ，密度为  $\rho$ ，截面积为  $A$ ，材料的弹性模量为  $Y$ 。如图 2(a) 所示，取长度为  $dx$  的微元，其受力分析如图 2(b) 所示。



(a) 机械天线结构

(a) Structure of mechanical antenna



(b) 机械天线受力分析

(b) Stress analysis of mechanical antenna

图 2 机械天线结构及受力分析示意图

Fig. 2 Graph of mechanical antenna structure and stress analysis

设梁在纵向分布力  $f(x,t)$  的作用下沿  $x$  轴方向振动时，其横截面保持为平面，并且不计横向变形。在梁上  $x$  处取微元段  $dx$ ，其左端纵向位移为  $u(x,t)$ ，由受力分析可得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho A} f(x,t) \quad (3)$$

式中，

$$a^2 = \frac{Y}{\rho} \quad (4)$$

式(3)即为梁做  $x$  轴方向受迫振动时微元的波动方程。

取  $f(x,t) = 0$ ，即可得到梁的微元体的  $x$  方向自由振动微分方程

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (5)$$

此方程可用于分析系统的固有频率。忽略阻尼，则当梁按某一主振型振动时，梁上所有点将同时经过平衡位置，并同时达到极限位置。因此可将  $u(x,t)$  分解为仅含有  $x$  的振型函数  $U(x)$  与仅含有  $t$  的简谐函数的乘积表示。

$$u(x,t) = U(x) [A \cos(pt) + B \sin(pt)] \quad (6)$$

代入式(5)可得

$$U(x) = C \cos \frac{px}{a} + D \sin \frac{px}{a} \quad (7)$$

其中： $p$  为角频率； $C$  和  $D$  为积分常数，由梁的运动起始条件确定。

对于梁两端自由的情况，其边界条件为

$$\begin{cases} \left. \frac{dU}{dx} \right|_{x=0} = 0 \\ \left. \frac{dU}{dx} \right|_{x=L} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

将此边界条件代入式(7)可得两端自由压电梁的固有频率为

$$f_s = \frac{1}{2L} a \quad (9)$$

## 2 调控声波式机械天线的方法

### 2.1 单边固定约束条件下机械天线的固有频率

改变边界条件可以改变微分方程的解的频率。对于如图 3 所示的机械天线，在左端固定、右端自由的条件下，其纵向振动的微分方程不变，而边界条件为

$$\begin{cases} U(0) = 0 \\ \left. \frac{dU}{dx} \right|_{x=L} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

将此边界条件代入式(7)可得一端固定、一端自由的机械天线的固有频率为

$$f_s = \frac{1}{4L} a \quad (11)$$

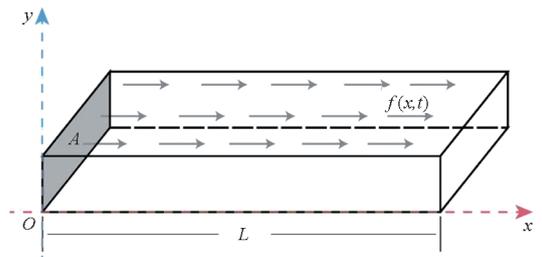


图 3 单边固定约束条件下的机械天线示意图

Fig. 3 Mechanical antenna schematic diagram under unilateral fixed constraints

可见,单边固定约束条件下机械天线的固有频率比两端自由条件下的机械天线低 50%,因此通过对声波式机械天线施加单边固定约束可以有效地调控机械天线的谐振频率。

对于具有对称结构的梁,由对称性可知,其中间对称面位移为零,其对称面一侧的梁结构相当于长度减小了一半的单边固定约束梁。相应地,相比于两端自由的梁结构,单边固定约束总是能降低梁结构的固有频率。因此本文接下来将在单边固定约束的条件下讨论调控机械天线谐振频率的方法。

### 2.2 自由端增加质量情况下的谐振频率

对于如图 4 所示,左侧固定、右侧附加质量块的梁状机械天线,其边界条件为

$$\begin{cases} U(0) = 0 \\ YA \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L} = -m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{x=L} \end{cases} \quad (12)$$

代入式(7),记

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\rho AL}{m} \\ \beta = \frac{pL}{a} \end{cases} \quad (13)$$

则有

$$f_s = \frac{\beta}{2\pi} \frac{a}{L} \quad (14)$$

其中,α 为梁状机械天线与质量块的质量比。

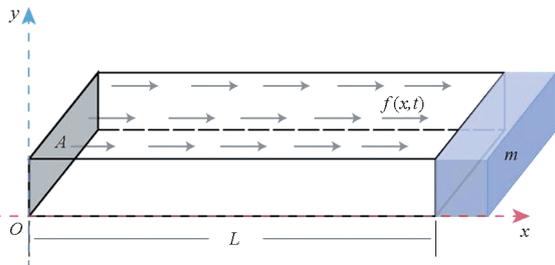


图 4 自由端增加质量负载的机械天线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mechanical antenna with increased mass load at free end

### 2.3 减小局部强度引起的谐振频率变化

对于如图 5 所示的机械天线,通过去除部分材料,降低局部强度,亦可以调控天线的固有频率。天线截面积为 A,对图 5 中长度为 L<sub>1</sub> 的部分分别从两侧切除部分材料,使其截面减小为 A<sub>1</sub>,而剩余部分的材料长度为 L<sub>2</sub>。假设两等截面梁之间通过可以忽略的圆角过渡。则可设其振型方程为

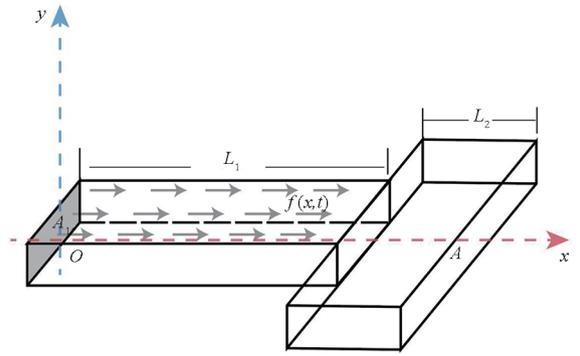


图 5 减小局部强度的机械天线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mechanical antenna with reduced partial strength

$$\begin{cases} U_1(x) = C_1 \cos \frac{px}{a} + D_1 \sin \frac{px}{a}, 0 \leq x \leq L_1 \\ U_2(x) = C_2 \cos \frac{px}{a} + D_2 \sin \frac{px}{a}, L_1 < x \leq L_2 \end{cases} \quad (15)$$

边界条件为

$$U_1(0) = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dU}{dx} \Big|_{x=L_1+L_2} = 0 \quad (17)$$

$$U_1(L_1) = U_2(L_1) \quad (18)$$

$$YA_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} \Big|_{x=L_1} = YA \frac{\partial u_2}{\partial t} \Big|_{x=L_1} \quad (19)$$

代入振型方程(15)消去 C<sub>1</sub>、D<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、D<sub>2</sub>,得频率方程为

$$\begin{aligned} & 1 + \tan \frac{pL_1}{a} \tan \left( p \frac{L_1 + L_2}{a} \right) \\ & = \tan \frac{pL_1}{a} \left[ \tan \left( p \frac{L_1 + L_2}{a} \right) - \tan \frac{pL_1}{a} \right] \frac{A}{A_1} \end{aligned} \quad (20)$$

化简可得

$$\frac{A_1}{A} = \tan \frac{pL_1}{a} \tan \frac{pL_2}{a} \quad (21)$$

当  $\frac{A_1}{A} = 1$  即未减弱天线局部强度时,记此条

件下固有频率为 f<sub>0</sub>, p<sub>0</sub> = 2πf<sub>0</sub>, 则有  $\frac{p_0 L}{a} = \frac{\pi}{2}$ , 所以

$$\frac{A_1}{A} = \tan \left( \frac{p}{p_0} \frac{L_1}{L} \frac{p_0 L}{a} \right) \tan \left[ \frac{p}{p_0} \left( 1 - \frac{L_1}{L} \right) \frac{p_0 L}{a} \right] \quad (22)$$

$$\frac{A_1}{A} = \tan \left( \frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_0} \frac{L_1}{L} \right) \tan \left[ \frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_0} \left( 1 - \frac{L_1}{L} \right) \right] \quad (23)$$

## 3 仿真验证

### 3.1 有限元求解内容

#### 3.1.1 模态分析

第 2 节建立机械天线解析模型的过程中做出

了一些简化与假设,例如将质量负载视为质点,而未考虑应力波在其内部的传导情况;将梁振动时截面视为刚性平面,未考虑材料在  $y$  轴方向上的形变等。这些简化将会导致固有频率的计算出现误差,也会为分析各谐振频率调控方法的效果带来困难。

有限元方法可以将复杂介质几何区域离散为若干具有简单几何形状的子域单元,通过求解方程组可得到该介质行为的近似表达。有限元方法允许子域单元平移、转动和变形,因此相比于解析方法具有更高的自由度,能更精确地逼近介质的真实运动状态,有效地弥补了解析方法中为简化计算做出的妥协。

因此,本文对第 2 节所述的模型进行了有限元建模仿真,验证解析模型的正确性,并进一步将第 2 节所提出的机械天线谐振频率调控方法应用于该模型,计算其固有频率,分析各机械天线谐振频率调控方法的有效性。

### 3.1.2 计算天线应力体积分

由式(1)与式(2)可知,机械天线近场辐射的电场强度与磁感应强度均与天线的等效磁偶极矩成正比,而声波式机械天线各点的极化强度与磁化强度正比于该点的应力。所以,声波式机械天线的应力体积分等效地反映了天线的辐射场近场强度。因此,需计算压电材料的应力体积分,以表征天线在同一电压驱动下产生的近场磁场强度。

此外,降低机械天线的固有频率,使其激励频率更低的电磁波,是为了发挥低频电磁波传播距离远、穿透性强的优点。然而,固有频率的改变会引起天线应力分布的变化,可能会使天线的局部极化强度或磁化强度增加而总体等效电偶极矩或等效磁偶极矩减小,电磁波频率降低的收益不足以弥补其偶极矩减小带来的损失,违背调控电磁波频率的初衷。

因此,本文在有限元仿真中计算了机械天线的应力体积分,并进行归一化处理,以比较不同结构的机械天线产生的近场辐射大小。

### 3.1.3 有限元参数设置

目前,声波式机械天线多采用锆钛酸铅(PZT)压电陶瓷作为驱动材料<sup>[14-15, 25]</sup>,其中 PZT-5H 相较于其他 PZT 材料具有更大的压电系数,机电耦合性能更强,因此本文选取 PZT-5H 作为压电材料,设计了  $50\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  的压电结构,在 COMSOL Multiphysics 中进行了有限元仿真。

图 6 为所述模型的有限元建模与仿真结果,图中左侧为几何模型及网格剖分,右侧为有限元仿真得到的各结构在固有频率驱动下的位移

分布。

图 6(a)~(c)分别绘制了 2.1~2.3 节所述模型的几何结构及有限元仿真结果。三种模型的网格均采用“映射—扫掠”的方式生成,映射生成的网格大小选择“超细化”,扫掠生成 5 层三维网格。由图 6(a)、(b)的仿真结果可知,对于 2.1 和 2.2 节所述方法,天线振动时同一横截面上各点位移近似相同,横截面近似保持平面。由图 6(c)可知,对于 2.3 节所述模型,远离固定端的等截面梁中,横截面发生了较大弯曲形变,可能出现应力集中现象,引起天线辐射强度的下降。

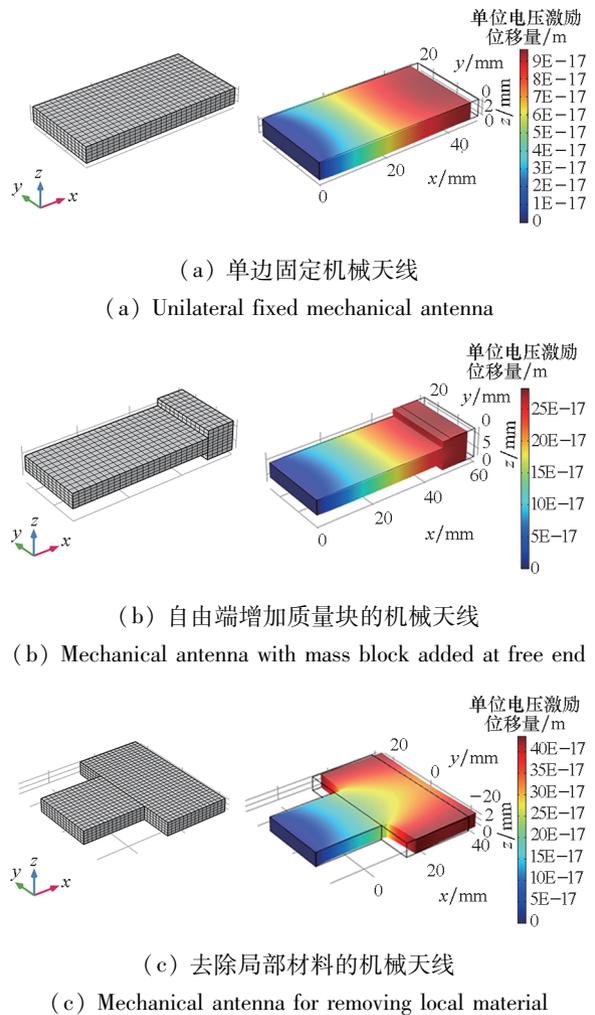


图 6 三种结构的机械天线仿真结果

Fig. 6 Simulation results of mechanical antenna with three structures

## 3.2 有限元仿真结果

### 3.2.1 无约束和单边固定约束下固有频率与天线长度的关系

图 7 给出了声波式机械天线固有频率随天线长度的变化规律。从图 7 中可以看出,在解析模型中,声波式天线的固有频率与长度成反比,有限元仿真结果与该结论一致,证明了解析模型的正

确性。在解析模型中,增加单边固定约束可以将无约束机械天线的固有频率降低一半,有限元仿真结果很好地支撑了这一结论。可见,将声波式机械天线的一端固定是一种有效降低此类天线谐振频率的方法。

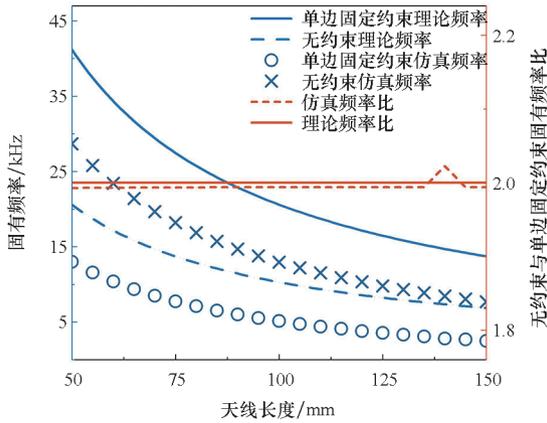


图7 无约束、单边约束天线的理论与仿真结果

Fig.7 Theoretical and simulation results of unconstrained and unilateral constrained antennas

此外,机械天线固有频率的解析模型计算值与有限元仿真值存在较大偏差,且解析模型计算结果大于有限元计算结果。这是由于解析模型假设天线在截面方向上无变形,与物理实际有差别,系统自由度减小,刚性增加,固有频率提高;而有限元仿真中,截面上各点运动未被限制,更接近物理实际,系统的自由度增加,刚性降低,因此固有频率降低。

图8给出了声波式机械天线应力体积积分随天线长度的变化规律。其中,归一化应力体积分的计算方法是计算各长度机械天线受到谐振频率的单位激励振动时的应力体积积分,并以50 mm 无约

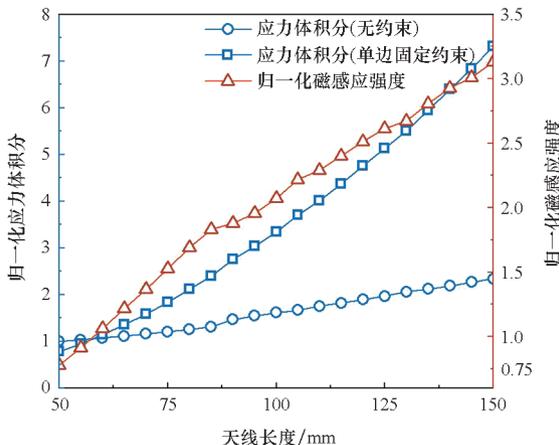


图8 无约束与固定约束天线的应力体积积分对比

Fig.8 Comparison of volume integral of stress between unconstrained and fixed constrained antennas

束机械天线为基准归一化处理。由图8可知,随着机械天线长度的增加,天线应力体积积分相应增加。长度大于60 mm 时,单边固定约束机械天线的应力体积积分大于相同长度的无约束机械天线,当天线尺寸达到150 mm 时,单边固定约束机械天线的应力体积分为无约束机械天线的2.88倍。可见,单边固定约束不仅可以降低天线的谐振频率,还可以提高其激励电磁波的电场强度或磁场强度。

### 3.2.2 自由端增加质量后的固有频率变化

对比式(11)与式(14)可知,当 $\frac{\beta}{2\pi} < \frac{1}{4}$ 时,可以说明自由端增加质量块的机械天线固有频率得到了降低。进一步计算 $\gamma = \frac{\beta}{2\pi} / \frac{1}{4}$ 即可得到机械天线固有频率的下降比例。通过参数化扫描改变金属质量块的体积,可以得到不同质量比下机械天线固有频率的变化情况。

图9描述了声波式机械天线固有频率和应力体积积分随天线质量的变化规律。

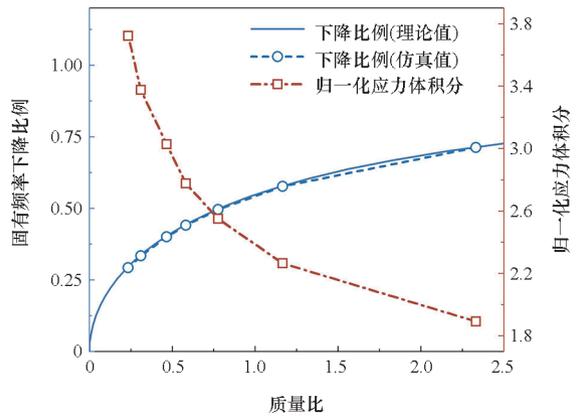


图9 质量比变化对固有频率和应力体积积分的影响

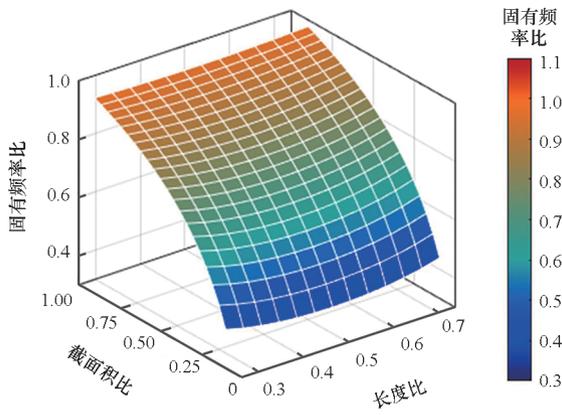
Fig.9 Influence of mass ratio change on natural frequency and surface stress

由图9可知,随着质量的增加,质量比 $\alpha$ 减小,天线固有频率降低,应力体积积分增加,天线的近场强度增大。有限元仿真结果很好地符合了解析模型解,验证了模型的精确性。

### 3.2.3 去除局部材料对固有频率的影响

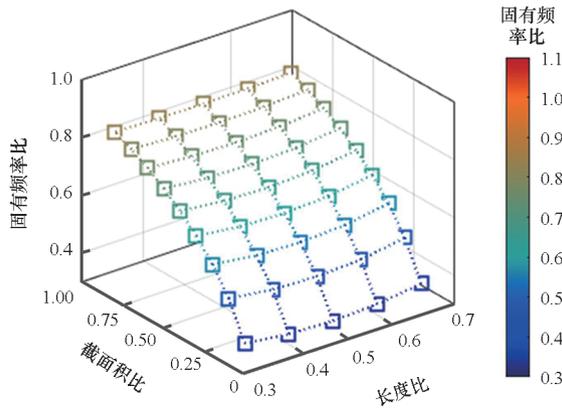
图10给出了声波式机械天线的固有频率和应力体积积分随两部分梁截面面积比和长度比的变化规律。

通过对比图10(a)与图10(b)可知,随着截面面积比减小,声波式机械天线的固有频率降低,当两阶梯梁的长度相等,即 $\frac{L_1}{L} = 0.5$ 时,机械天线的固有频率最低。由图10(c)可知,随着截面面积比



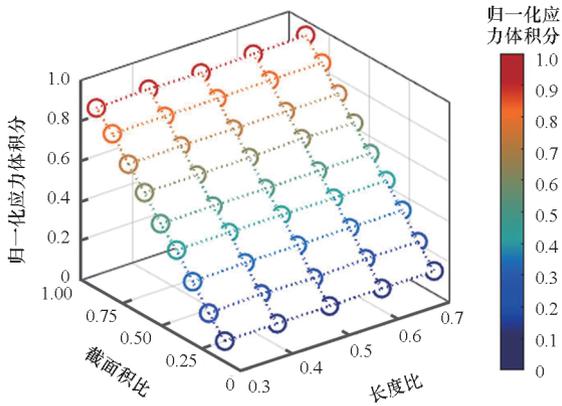
(a) 解析模型求出的固有频率比

(a) Natural frequency ratio calculated by analytical model



(b) 有限元模型求出的固有频率比

(b) Natural frequency ratio calculated by finite element model



(c) 有限元模型求出的应力体积分比

(c) Ratio of volume integral of stress calculated by finite element model

图 10 减小局部强度对固有频率及应力体积分的影响

Fig. 10 Influence of reduced partial intensity on natural frequency and volume integral of stress

$\frac{A_1}{A_2}$  的减小, 声波式机械天线的应力体积分近似线性减小, 并且当长度比  $\frac{L_1}{L}$  变化时, 机械天线的近场强度保持不变。

可见, 去除声波式机械天线的局部材料可以调控机械天线的固有频率, 但也会降低机械天线的近场强度, 此方法的应用场景将受到一定的限制。

### 4 分析与结论

本文从声波式机械天线的固有频率角度研究了调控其谐振频率的方法。根据声波式机械天线的原理建立了天线的振动模型, 用解析模型分析了单边固定、单边固定条件下自由端增加质量块以及单边固定条件下去除局部材料三种方法对声波式机械天线固有频率的影响, 并采用有限元仿真对解析模型进行了验证, 分析了三种方法对于机械天线激励电磁波电场强度或磁场强度的影响。

解析模型用于计算声波式机械天线的固有频率时存在一定的误差, 但解析模型对于机械天线固有频率与天线长度的规律描述较为准确, 在工程实践中可以通过引入适当的比例系数修正计算结果。

单边固定约束可以调控声波式机械天线的固有频率, 使其降低 50%。当天线长度大于 110 mm 时, 单边固定机械天线的磁场辐射强度可达到同尺寸无约束机械天线的 2 倍以上。此方法对于声波式机械天线的设计具有重要指导意义。

在单边固定机械天线的自由端增加质量块可以进一步降低声波式机械天线的固有频率, 提高天线的磁场辐射强度。质量块的质量越大, 其降低天线固有频率的效果越显著。但由于构成声波式机械天线的材料本身密度较大, 增加质量远大于天线的质量块将进一步限制天线的小型化与轻量化。在工程实践中, 质量比的取值不宜小于 0.5。此方法对于声波式机械天线的设计具有一定的指导意义。

去除单边固定机械天线的部分材料, 也能够调控声波式机械天线的固有频率。本文以两个等截面梁构成的阶梯型机械天线模型为例, 分析了此类机械天线的固有频率随着长度比与截面面积比的变化规律。结果显示, 减小两阶梯梁的截面面积比能更有效地调控声波式机械天线的固有频率, 但此方法也会影响天线激励电磁波的强度, 因此在工程实践中, 应结合具体应用场景, 分析降低频率的收益和减小电磁波强度的损失, 选取合适的长度比与截面面积比。

### 参考文献 (References)

[1] 陆建勋. 极低频与超低频无线电技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2013.  
 LU J X. Extremely low frequency and ultra-low frequency radio technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University

- Press, 2013. (in Chinese)
- [2] 贾琦, 刘晓东, 孟凡涛, 等. 甚低频系留气球缆绳天线设计实现与效能分析[J]. 电波科学学报, 2021, 36(5): 775-780.
- JIA Q, LIU X D, MENG F T, et al. The design and performance analysis of VLF tethered balloon cable antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(5): 775-780. (in Chinese)
- [3] BARR R, JONES D L, RODGER C J. ELF and VLF radio waves [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2000, 62(17/18): 1689-718.
- [4] 丁春全, 宋海洋. 机械天线运动电荷和磁偶极子辐射研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(2): 166-170.
- DING C Q, SONG H Y. Theory principle of the AMEBA antenna based on radiation of mechanical motion of electric charge and magnetic dipole[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(2): 166-170. (in Chinese)
- [5] 任万春, 陈懿, 高杨, 等. 体声波介导电磁天线的研究进展与技术框架[J]. 电波科学学报, 2021, 36(4): 491-497, 510.
- REN W C, CHEN S, GAO Y, et al. Progress and technical framework of the BAW mediated magnetoelectric antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(4): 491-497, 510. (in Chinese)
- [6] 崔勇, 吴明, 宋晓, 等. 小型低频发射天线的研究进展[J]. 物理学报, 2020, 69(20): 208401.
- CUI Y, WU M, SONG X, et al. Research progress of small low-frequency transmitting antenna[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(20): 208401. (in Chinese)
- [7] 周强, 施伟, 刘斌, 等. 旋转永磁式机械天线的研究与实现[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(3): 128-136.
- ZHOU Q, SHI W, LIU B, et al. Research and practice of the mechanical antennas based on rotating permanent magnet[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(3): 128-136. (in Chinese)
- [8] LIU Y, GONG S H, LIU Q, et al. A mechanical transmitter for undersea magnetic induction communication [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(10): 6391-6400.
- [9] BICKFORD J A, DUWEL A E, WEINBERG M S, et al. Performance of electrically small conventional and mechanical antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(4): 2209-2223.
- [10] WANG C, CUI Y, SONG X, et al. Model, design, and testing of an electret-based portable transmitter for low-frequency applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(9): 5305-5314.
- [11] 王琛, 崔勇, 宋晓, 等. 基于驻极体材料的机械天线式低频/甚低频通信磁场传播模型[J]. 物理学报, 2020, 69(15): 158401.
- WANG C, CUI Y, SONG X, et al. Magnetic field propagation model of low frequency/very low communication based on mechanical antenna of electret [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(15): 158401. (in Chinese)
- [12] WANG C, CUI Y, SONG X, et al. Model and design of a novel low-frequency magnetic signal transmitter based on rotating electret [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(5): 4001107.
- [13] NAN T X, LIN H, GAO Y, et al. Acoustically actuated ultra-compact NEMS magnetoelectric antennas [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 296.
- [14] LIU H L, CHU Y, HOU W G, et al. Modeling and optimization of VLF piezoelectric antenna towards lower frequency [C]//Proceedings of the IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2021: 271-274.
- [15] DONG C Z, HE Y F, LI M H, et al. A portable very low frequency (VLF) communication system based on acoustically actuated magnetoelectric antennas [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(3): 398-402.
- [16] XU J R, LEUNG C M, ZHUANG X, et al. A low frequency mechanical transmitter based on magnetoelectric heterostructures operated at their resonance frequency [J]. Sensors, 2019, 19(4): 853.
- [17] YAO Z, WANG Y E, KELLER S, et al. Bulk acoustic wave-mediated multiferroic antennas: architecture and performance bound [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(8): 3335-3344.
- [18] 李凯, 潘威炎, 苗永瑞. 非均匀电离层中 VLF 辐射源在海面上产生的场 [J]. 电波科学学报, 1998, 13(3): 265-269.
- LI K, PAN W Y, MIAO Y R. The VLF field on the sea surface generated by the transmitter antenna in the inhomogeneous ionosphere [J]. Chinese Journal of Radio Science, 1998, 13(3): 265-269. (in Chinese)
- [19] 傅成城, 高成, 黄姣英. 基于接触面优化方法和整体仿真的压缩式压电振动传感器固有频率优化 [J]. 仪表技术与传感器, 2021(7): 38-43.
- FU C C, GAO C, HUANG J Y. Natural frequency optimization of compressive piezoelectric vibration sensor based on contacts optimization and overall simulation [J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(7): 38-43. (in Chinese)
- [20] 陈仲生, 骆彦廷, 杨拥民. 非线性压电振动能量俘获行为建模及其不同参数影响机理研究 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(2): 154-158.
- CHEN Z S, LUO Y T, YANG Y M. Modeling of nonlinear piezoelectric vibration energy harvesting behaviors and the effects of its different parameters [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(2): 154-158. (in Chinese)
- [21] MINDLIN R D. Electromagnetic radiation from a vibrating quartz plate [J]. International Journal of Solids and Structures, 1973, 9(6): 697-702.
- [22] LEE P C Y. Electromagnetic radiation from an AT-cut quartz plate under lateral-field excitation [C]//Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1988: 407-411.
- [23] LEE P C Y, KIM Y G, PREVOST J H. Electromagnetic radiation from doubly rotated piezoelectric crystal plates vibrating at thickness frequencies [C]//Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1989: 423-428.
- [24] XU G K, XIAO S Q, LI Y, et al. Modeling of electromagnetic radiation-induced from a magnetostrictive/piezoelectric laminated composite [J]. Physics Letters A, 2021, 385: 126959.
- [25] HASSANIEN A E, BREEN M, LI M H, et al. Acoustically driven electromagnetic radiating elements [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 17006.