

超声电机的激励方法及应用研究

牛瑞坤

(金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要:对超声电机激励方法开展研究,有利于电机结构的优化与性能的提升。研究得出,增大压电陶瓷的厚度,或减小压电陶瓷的激励面积,可以获取更大的机电耦合效率。动态电阻和动态电容变小可以降低电机内部的机械损耗,提高机械品质因子。将接触刚度、介电损耗和机电耦合系数均考虑在内进行计算,设计出性能更佳的超声电机。通过应用分析可知,改善定子振动模态和结构尺寸,能够提高定子有效机电耦合系数,有利于降低电机的电源功耗,提高电机效率。

关键词:复合模态;超声电机;压电材料;等效电路

中图分类号: TM356

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2021)03-0053-07

Research on Excitation Method and Application of Ultrasonic Motor

NIU Rui-kun

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: The research on the excitation method of ultrasonic motor is beneficial to the optimization of motor structure and the improvement of performance. The results show that increasing the thickness of piezoelectric ceramics or reducing the excitation area of piezoelectric ceramics can obtain greater electromechanical coupling efficiency. The decrease of dynamic resistance and dynamic capacitance can reduce the internal mechanical loss and improve the mechanical quality factor. Considering the contact stiffness, dielectric loss and electromechanical coupling coefficient, an ultrasonic motor with better performance is designed. The application analysis shows that improving the stator vibration mode and structure size can improve the electromechanical coupling coefficient of the stator, reduce the power consumption of the motor and improve the efficiency of the motor.

Key words: composite mode; ultrasonic motor; piezoelectric material; equivalent circuit

超声电机是利用压电材料的逆压电效应而发展起来的新型电机,由定子和转子进行接触摩擦,利用压电陶瓷片的共有振动频率,将微观振动转换成宏观运动。目前超声电机已经在医疗器械、航空航天等领域得到了很好的应用^[1]。

超声电机虽然有很多优点,但是缺点也非常明显,如机电转换效率很低,这是目前超声电机最大的一个短板。电机的机电转换效率与材料、结构尺寸等因素密切相关^[2]。因此,从微观运动出发,对超声电机的激励方法进行研究,提高超声电机的转换效率,显得尤为重要。在能量转换中,首先需要对电能通过压电陶瓷转换为定子动能的过程进行分析,其次需要研究定子与动子之间通过摩擦力的作用进行力传递的

收稿日期: 2021-03-19

基金项目: 金陵科技学院博士科研启动基金(jit-b-202117)

作者简介: 牛瑞坤(1987—),男,河南安阳人,讲师,博士,主要从事超声电机技术方面的研究。

过程。电能的转换是通过压电陶瓷自身的逆压电效应,来实现从电能到机械能的转换过程,因此需要对压电材料性能进行研究^[3-4]。机械能之间的能量传递,主要是通过定子和转子之间的接触摩擦作用力来实现的,在此过程中接触面质点的运动轨迹、摩擦力的大小对能量的传递都起到至关重要的作用^[5-7]。目前国内外学者已针对有效机电耦合系数进行了相关研究,但对微观激励方法的研究相对较少^[8]。通过对超声电机微观激励方法的分析,电机的有效机电耦合系数可以反映电机的输出功率。

本文基于前人的研究,对超声电机微观激励方法中的介电损耗、等效电路、有效机电耦合系数进行研究。并通过实例应用分析,利用等效电路法和有限元仿真来验证电机定子的有效机电耦合系数。

1 性能参数

在设计超声电机时通常采用压电陶瓷作为激励材料,利用压电陶瓷的逆压电效应来产生振动,进而达到力的传输效果。但是不同结构的电机运动机理不相同,对于压电陶瓷的需求也不同。本文对超声电机所需要用到的压电材料的性能进行研究。

压电陶瓷具有介电性能、弹性性能以及压电性能,设计超声电机主要利用压电性能。压电陶瓷经过极化处理后,具有了各向异性,从而使压电陶瓷的性能参数比普通陶瓷好,被广泛应用到很多领域^[9]。

1.1 介电损耗

在给压电陶瓷施加电压而产生激励振动的过程中,基体会产生发热现象,这种现象是由介电损耗引起的。在施加交流电压的情况下,基体会产生两种电荷,一种为做功的部分,另一种为无功的部分。做工部分是由电导过程引起的,不做功部分是由介质松弛引起的^[10]。一般情况下用损耗角的余切来表示介电损耗。损耗角是一个无量纲物理量,用 δ 来表示,余切值 $\cot\delta$ 表示为无功功率与有功功率的比值。在理想情况下,压电陶瓷施加交变电压后,电流电压的相位差为 90° ,但是由于能量损耗的原因,实际的相位角要小于 90° 。通常用一个损耗电阻 R_n 来表示内部这部分电能的损耗。一般用建立串联等效电路和并联等效电路的方法来对其进行计算和分析,等效电路和计算方法如图 1 所示。

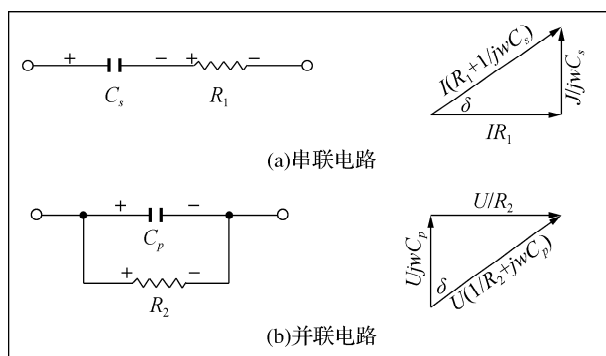


图 1 介质损耗的串联和并联电路

依据如图 1(a)的串联电路来计算:

$$\cot\delta = \frac{U_C}{U_R} = \frac{1}{\omega C_s R_1} \quad (1)$$

其中, C_s 为串联电路的等效电容; ω 为给压电陶瓷施加的电场频率; R_1 为串联电路的等效损耗电阻; U_C 为电导两端电压; U_R 为电容两端电压。

依据如图 1(b)的并联电路来计算:

$$\cot\delta = \frac{I_C}{I_R} = \frac{1}{\omega C_p R_2} \quad (2)$$

其中, C_p 为并联电路的等效电容; R_2 为并联电路的等效损耗电阻; I_C 为电导两端电流; I_R 为电容两端电流。

直流的静电场中产生的介电损耗即为电流的泄漏所产生的电导损耗。在交变电场中,如果交变电场的频率相对较高,外电场的极化强度要大于压电陶瓷的极化强度,从而使压电陶瓷的极化出现滞后现象,

导致介电损耗。影响介电损耗的因素有很多,比如极化情况、电场强度、电场频率等,因此引起介电损耗的原因很复杂。压电陶瓷在一定的振动范围内,由于介电损耗过大,会产生严重的发热现象,导致性能降低。又由于超声电机在交变电场中工作,并且其振动频率在超声频率段,因此在对电机的定子进行设计时,要考虑介电损耗带来的影响,根据工作频率对压电陶瓷的种类进行选择,从而避免介电损耗的干扰。

1.2 有效机电耦合系数

有效机电耦合系数 K 表示压电材料的机械能与电能之间的耦合效应。可定义为:

$$K = \frac{U_1}{\sqrt{U_M U_E}} \quad (3)$$

式中, U_1 为压电体输出的机械能和电能相互作用的能量密度,为 $0.5 d_{ij} T_j E_i$; U_M 为压电体储存的机械能密度,为 $0.5 S_{ij} T_j T_i$; U_E 为压电体储存的静电能密度,为 $0.5 \epsilon_{ij}^T E_j E_i$ 。

有效机电耦合系数 K 与各压电常数(d, e, g, h)之间的关系为:

$$K_{ij} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon^T S^E}} d_{ij} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon^T C^E}} e_{ij} = \sqrt{\frac{\epsilon^T}{S^E}} g_{ij} = \sqrt{\frac{\epsilon^S}{C^D}} h_{ij} \quad (4)$$

式中, ϵ^T 为应力恒定时的介电常数; ϵ^S 为应变恒定时的介电常数; S^E 为电场恒定时的弹性柔度系数; C^E 为电场恒定时的弹性刚度系数; C^D 为电位移恒定时的弹性刚度系数; $d_{ij}, e_{ij}, g_{ij}, h_{ij}$ 均表示压电常数。

在超声电机的设计中,金属弹性体起到能量传递的关键作用,电机的有效机电耦合系数对电机的整体性能具有很大的影响。

1.3 复合模态型超声电机的等效电路模型

作为超声换能器的一种,压电振子在振动时存在内部由电能转换成机械能的过程,具有较为复杂的机电耦合特性。通常情况下利用压电振子类比的方法建立压电振子等效电路,以此对压电振子的振动特性以及机电耦合特性进行研究。首先计算等效电路的参数,进行实验对比,并对输出性能进行评估。

针对单相压电型压电振子,只需要考虑单一的振动模式,并且压电振子的工作频率在谐振频率附近时,可对复杂的等效电路模型进行简化,得到总的等效电路图。静态条件下的等效电路如图2所示。等效电路中的电流 i 可表示为:

$$i = C_0 \cdot \frac{dV}{dt} + \rho(i_2) \quad (5)$$

$$i_2 = C_m \cdot \frac{d(\rho \cdot V + f)}{dt} \quad (6)$$

$$C_m = \frac{1}{K} \quad (7)$$

$$\rho = d \cdot K \quad (8)$$

式中, d 表示压电应变常数; ρ 表示匝数比; C_0 表示静态电容; C_m 表示动态电容; K 表示有效机电耦合系数。

给超声电机施加一定激励信号的电压,可以根据牛顿第二定律和麦克斯韦类比法,将超声电机的总体质量等效为电感,速度等效为电流。在能量转换中需要注意粘贴型阻尼的影响,因此需要串联一个电阻 R_m ,最后将其等效为一个串联的谐振电路。

单相振子等效电路的动态数目不相同,但都是多个电阻、电感以及电容之间的并联。现仅对只有一个动态支路的等效电路进行分析。

$$\begin{cases} Y = Y_0 + Y_1 = G + jB \\ Y_0 = \frac{1}{R_d} + i\omega C \\ Y_1 = G_1 + jB_1 \end{cases} \quad (9)$$

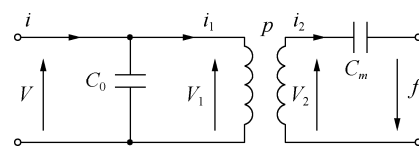


图2 静态条件下的等效电路

式中, Y 表示电路中等效导纳; Y_0 表示静态导纳; Y_1 表示动态导纳; G 表示总等效电导; B 表示总等效电纳; G_1 表示动态支路的总等效电导; B_1 表示动态支路的总等效电纳。

由式(9)可得:

$$\left(G_1 - \frac{1}{2R_{1m}}\right)^2 + B_1^2 = \left(\frac{1}{2R_{1m}}\right)^2 \quad (10)$$

式(10)表明, 由 L_{1m} 、 C_{1m} 、 R_{1m} 组成的动态支路导纳是以 $\left(\frac{1}{2R_{1m}}, 0\right)$ 为圆心, 以 $\frac{1}{2R_{1m}}$ 为半径的圆, 则:

$$\left(G - \frac{1}{R_d} - \frac{1}{2R_{1m}}\right)^2 + (B - \omega_s C_0)^2 = \left(\frac{1}{2R_{1m}}\right)^2 \quad (11)$$

由此可知, 等效电路的总导纳是以 $\frac{1}{2R_{1m}}$ 为半径, 以 $\left(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{2R_{1m}}, \omega_s C_0\right)$ 为圆心的圆, 如图 3 所示。

图中, f_m 表示最大导纳频率(最小阻抗频率); f_n 表示最小导纳频率(最大阻抗频率); f_s 表示串联谐振频率; f_p 表示并联谐振频率; f_a 表示反谐振频率; f_b 表示谐振频率。

f_m, f_n, f_a, f_b 可以直接测量得到, 串联谐振频率 f_s 为 LC 串联电路谐振时的信号频率, 并联谐振频率 f_p 为整个并联等效电路出现谐振时的信号频率。

$$\begin{cases} R_{1m} = 1/G_1 \\ C_0 = B_1/\omega_s \\ C_{1m} = \left(\frac{f_p^2}{f_s^2} - 1\right) \cdot C_0 \\ L_{1m} = 1/\omega_s^2 \cdot C_{1m} \end{cases} \quad (12)$$

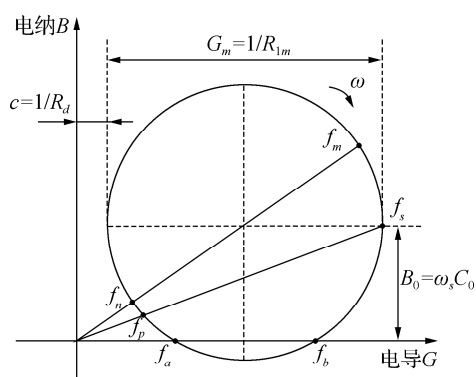


图 3 单相压电振子导纳圆

当 $R_{1m} = 0$ 时, 压电振子机械损耗为 0, 最大导纳频率(最小阻抗频率)为:

$$f_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{1m} C_{1m}}} = f_s \quad (13)$$

最小导纳频率(最大阻抗频率)为:

$$f_n = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{1m} \frac{C_0 C_{1m}}{C_0 + C_{1m}}}} = f_p \quad (14)$$

有效机电耦合系数 K 的定义:

$$K = \sqrt{\frac{C_{1m}}{C_0 + C_{1m}}} \quad (15)$$

通过以上分析可得, 当静态电容 C_0 越小时, C_{1m} 越大, K 也越大; 通常情况下动态电容为 pF 数量级, 静态电容通常为 nF 数量级, 因此静态电容影响机电耦合系数的显著程度要大于动态电容。一般可以通过增大压电陶瓷的厚度, 或者减小压电陶瓷的激励面积, 来获取更大的机电耦合效率。为了更好地降低电机的内部机械损耗, 获得更高的机械品质因子, 动态电阻和动态电容应尽可能地变小。

2 应用分析

本文针对以上理论方法设计了一种驻波面内弧形超声电机, 通过建立等效电路的方法对电机定子的有效机电耦合系数进行分析, 之后利用有限元对电机的阻抗特性进行仿真, 并分析定子的厚度、宽度、弧长对有效机电耦合系数的影响。具体模型如图 4 所示。

2.1 有效机电耦合系数分析

由于超声电机定子所表示的压电振动系统与 R-L-C 振荡电路系统具有相似的线性微分方程, 通过机电系统相似理论, 可以将定子的质量、刚度和阻尼等效为较合适的电子元器件, 从而实现对超声电机特性

的仿真分析。超声电机定子的振动特性可以用等效电路表示,具体如图 5 所示。

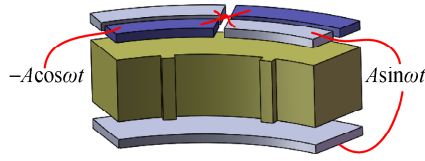


图 4 驻波面内弧形超声电机

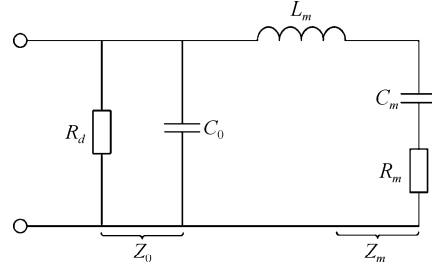


图 5 电机定子等效电路

在图 5 中, C_0 为压电陶瓷的静态电容; R_d 为压电陶瓷的介电损耗电阻; Z_0 为静态阻抗; L_m 、 C_m 、 R_m 分别为等效电感、动态电容、等效电阻,三者串联构成动态阻抗 Z_m ,其中 L_m 和 C_m 与定子的机械性质有关, R_m 与定子振动过程中的机械损耗有关。

根据等效电路图,静态阻抗 Z_0 和动态阻抗 Z_m 可以分别表示为:

$$Z_0 = \frac{R_d}{1 + i\omega C_0 R_d} \quad (16)$$

$$Z_m = R_m + i\omega L_m + \frac{1}{i\omega C_m} \quad (17)$$

等效电路的总导纳 Y 可表示为:

$$\begin{cases} Y = \frac{1}{Z} = Y_0 + Y_m = G + iB \\ G = 1/R_d + \frac{R_m}{R_m^2 + (\omega L_m - 1/\omega C_m)^2} \\ B = \omega C_0 + \frac{1/\omega C_m - \omega L_m}{R_m^2 + (\omega L_m - 1/\omega C_m)^2} \end{cases} \quad (18)$$

当超声电机定子和谐振频率 ω_s 附近产生弯曲行波振动时,上式中 ωC_0 可以近似看作常数 $\omega_s C_0$,则等效电路图中总导纳的矢量终端轨迹为一个圆,其圆心为 $(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{2R_m}, \omega_s C_0)$,半径为 $\frac{1}{2R_m}$,如图 6 所示。

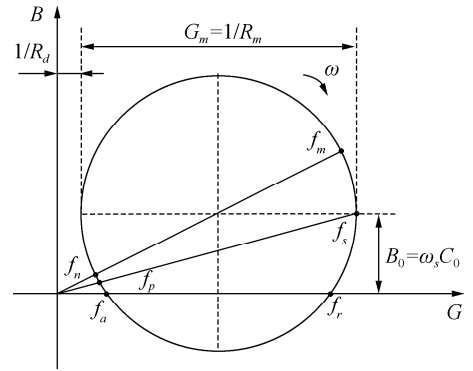


图 6 定子导纳圆

通过以上分析,可以得出定子的有效机电耦合系数的方程式:

$$K^2 = \frac{C_m}{C_0 + C_m} = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} = \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2} \quad (19)$$

式(19)表明,定子的有效机电耦合系数 K 与静态电容 C_0 和动态电容 C_m 有关,降低静态电容 C_0 或提高动态电容 C_m 均可以增大有效机电耦合系数。静态电容 C_0 与压电陶瓷的电学参数及结构尺寸相关;动态电容 C_m 反映的是定子振动特性,与定子金属弹性体的材料、振动模态和结构尺寸密切相关。因此,分析定子的尺寸以及压电陶瓷片的尺寸对有效机电耦合系数的影响,可以得到性能更高的驻波面内弧形超声电机。

2.2 工作模态对有效机电耦合系数的影响

为了分析定子振动模态和结构参数对有效机电耦合系数的影响,通过 ANSYS 对定子进行仿真计算。定子的弹性基体材料选取磷青铜材质,压电陶瓷材料选取 PZT-8 材质,两者通过环氧树脂胶粘贴。

超声电机的振动模态通常用 B_{0n} 表示,其中 n 为节径数。对初始模型进行模态分析,边界条件为:内圈固支,外圈自由。可得到定子 20~70 kHz 频率范围内的 50 阶模态振型及其对应的模态频率。当模态一致时,模态频率稍有偏差,且振型的空间相位相差 90° ,即对称结构在同一频率下的简并模态。进一步仿真定子在不同模态下对应的压电阻抗,可以得到定子工作模态对有效机电耦合系数的影响,如图 7 所

示。图 7 中定子 B_{07} 工作模式的谐振、反谐振频率分别为 23 125 Hz、23 838 Hz,有效机电耦合系数为 0.242; B_{09} 工作模式的谐振、反谐振频率分别为 35 375 Hz、36 127 Hz,有效机电耦合系数为 0.203; B_{011} 工作模式的谐振、反谐振频率分别为 50 754 Hz、51 522 Hz,有效机电耦合系数为 0.172。仿真表明,当模态阶数增大时,模态频率增大,谐振点附近的阻抗模减小,有效机电耦合系数呈递减趋势。这说明行波电机采用高阶模态工作并不利于定子的机电能量转换,在满足电机工作的超声频段内,应尽量采用较低阶的工作模态。

2.3 弹性体结构尺寸对有效机电耦合系数的影响

在超声电机中,金属弹性体起到能量传递的关键作用,其本身的材料属性、尺寸参数以及有效机电耦合系数等对电机的整体性能都具有很大的影响。本超声电机采用一阶谐振频率和二阶反谐振频率相互叠加的驱动方式,研究弹性体的厚度、内外径的宽度以及弹性体的角度对电机有效机电耦合系数的影响。利用仿真软件对其进行分析,结果如图 8 和图 9 所示。从图 8 可知,有效机电耦合系数随着弹性体的厚度的增加而减小;并且在相同厚度下,弹性体的宽度越大,有效机电耦合系数越小。从图 9 可知,随着弹性体角度的增加,有效机电耦合系数逐渐增大;弹性体的宽度越小,有效机电耦合系数越大。因此在频率一致性相对较好的情况下,尽量选择较小的厚度、适当的宽度以及相对较大的角度。

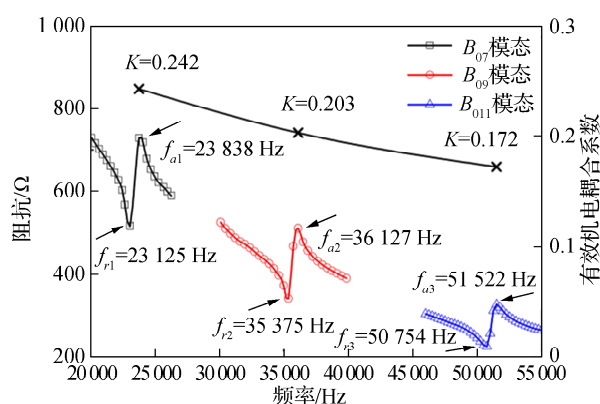


图 7 工作模态对定子有效机电耦合系数的影响

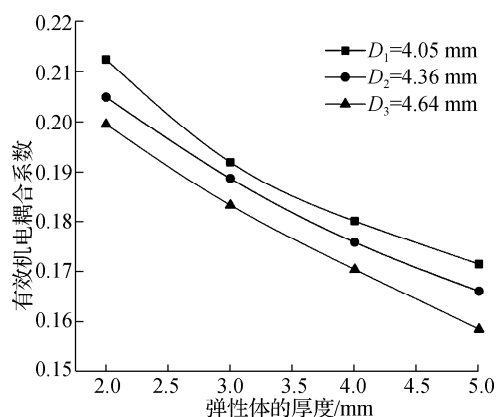


图 8 弹性体的厚度和宽度对有效机电耦合系数的影响

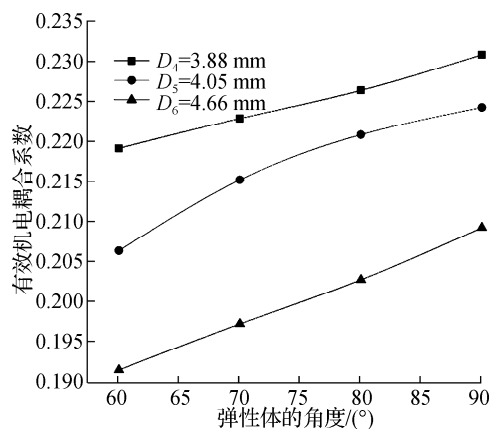


图 9 弹性体的角度和宽度对有效机电耦合系数的影响

2.4 压电陶瓷结构尺寸对有效机电耦合系数的影响

压电陶瓷是超声电机的激振源,也是超声电机能量转换的核心部件,结构参数和材料属性等对电机的振动性能会有较大的影响。设电机的工作振动模态为一阶谐振频率和二阶反谐振频率相互叠加的模态,分析电机的压电陶瓷的弧长和宽度对有效机电耦合系数的影响,仿真结果如图 10 所示。从图中可以看出,在压电陶瓷片宽度较小时,压电陶瓷片弧长越长,机电耦合系数越大;当压电陶瓷片宽度大于 3 mm 时,有效机电耦合系数与压电陶瓷片的弧长呈不规则的变化趋势。

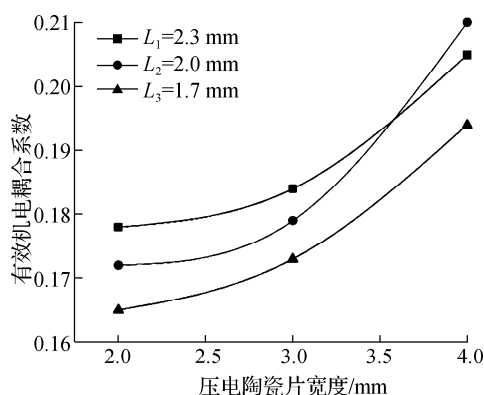


图10 压电陶瓷弧长和宽度对有效机电耦合系数的影响

3 结 语

超声电机工作机理是在驱动足处形成椭圆轨迹的运动,将电能转换成微观的振动,再将微观振动转换成宏观动能的过程。在设计电机时通常不考虑电损耗的干扰,因此所设计的超声电机还具有很大的优化空间。通过等效电路模型可知,在设计时可以通过增大压电陶瓷的厚度,或者减小压电陶瓷的激励面积来获取更大的机电耦合效率。为了更好地降低电机的内部机械损耗以及获得更高的机械品质因子,动态电阻和动态电容要尽可能变小。本文实例分析中,通过等效电路法和有限元仿真得到了电机定子的有效机电耦合系数。仿真表明定子的振动模态、金属弹性体的结构尺寸、压电陶瓷片的结构尺寸等参数对有效机电耦合系数有较大影响。

参考文献:

- [1] 陈超,曾劲松,赵淳生. 旋转型行波超声电机理论模型的仿真研究[J]. 振动与冲击, 2006(2): 129-133, 190
- [2] UEHA S, TOMIKAWA Y. Ultrasonic motors theory and applications[M]. New York: Oxford University Press, 1993
- [3] 郭语,刘昊瞳,杨建林,等. 基于多模态复合型压电振子的球形超声电机[J]. 压电与声光, 2021, 43(1): 114-119
- [4] 史维佳. 行波型超声电机调速特性复合补偿方法研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
- [5] 符宝鼎,李治辰,王宏祥. 弯扭复合模态超声电机振子的优化设计[J]. 压电与声光, 2021, 43(1): 110-113
- [6] 李响. 驻波型直线超声电机的动力学特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017
- [7] 张强. 夹心式直线超声电机机电及摩擦耦合建模与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
- [8] 杨小辉. 纵弯复合型超声电机激励方法与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016
- [9] JEONG S, CHEON S, KIM M, et al. Motional characteristics of ultrasonic motor using $\Lambda(\lambda)$ -shaped stator[J]. Ceramics International, 2013, 39: 715-719
- [10] 董迎辉. 基于有效椭圆运动及结构力系数行波型超声电机的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014

(责任编辑:谭彩霞)