

纵弯式压电微电机自然频率的有限元计算*

马建旭

(上海交通大学机械系 上海 200030)

吴清文 卢 铿 文大化

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

李成发

(吉林工业大学机械工程系 长春 130025)

摘要 利用有限元方法计算了纵弯式压电微电机自然频率和固有振型。相应的实验表明,利用该分析方法所得结果与实测值有较好的一致性。

关键词 有限元法 纵弯式压电微电机 微电子机械系统 自然频率

1 引言

微电子机械系统(简称微机械)崛起于八十年代后期,是一门新兴的前沿学科。进入90年代以来,微型机械的研究日趋活跃,并且在制造、开发、综合应用等方面都取得了一系列的成果。整个系统主要由驱动器、传感器、执行器和微能源等几大要素组成。其中以微电机为中心的驱动器的研究,一直是微机械发展的关键,并在一定程度上标志着一个国家微机械发展水平。目前,国际上对微电机的研究主要集中在实现实用化的压电微电机、电磁微电机和静电微电机这三大类上。

压电微电机,具有其他电机无法比拟的优势,易于微型化、简化机械传动链、低速下大转矩、高换能/储能密度、较大的保持力矩、制动方便,此外还有低电压驱动、无磁场干扰、不需悬浮等优点,可望应用于微机器人、空间和军事探测器、医疗器械、微卫星、微惯性导航系统、汽车行业等领域,因此国际上掀起了压电微电机的研究热,各国都力求在该领域应用开发的占有优势地位。但是由于对压电微电机的研究仅有五六年的历史,关于压电微电机更深层的理

* 863 计划资助项目

收稿日期: 1997- 09- 28

修稿日期: 1997- 10- 16

论和实验研究还属于刚刚起步阶段,有待于进一步的发展。本文将对某纵弯式压电微电机进行有限元分析(FEM),计算其自然频率并进行实测比对。

2 纵弯式压电微电机工作原理

本文结合多年的压电微电机的研制工作,提出一种易于微型化、驱动形式简单的纵弯式斜齿驻波式压电微电机。它主要是利用压电振子的纵向运动模式,但有别于传统的驻波压电电机,转子的输出轴重合于定子中心轴。此种电机的定子主要由压电振子与其相连的上弹性体和下基衬底粘结而成。比较有特色的是在其定子表面设置与定子中心成一定角度的斜齿,与转子在一定压力下相接触。

图 1 是其工作原理示意图。在静态工作时,由于转子与定子间存在一定的接触压力,使得斜齿沿转子产生一定的挠曲变形,并在压电振子两侧施加与电机共振频率一致的高频驱动电压时,将引起压电振子产生轴向的伸缩变形运动,从而引起整个定子的轴向伸缩运动。在定子轴向伸长时,斜齿挠曲变形加大,其表面质点产生相对运动,并通过转子与定子之间产生的摩擦力拖动转子向相同方向转动。在压电振子的收缩状态,定子斜齿顶端与转子迅速脱离,定子与转子无接触摩擦力的作用。最终斜齿顶端质点将会产生压电微电机驱动运动需要的运动轨迹,并促使其所接触的转子产生断续有规律的旋转运动,但从宏观上看转动是较为平稳的。

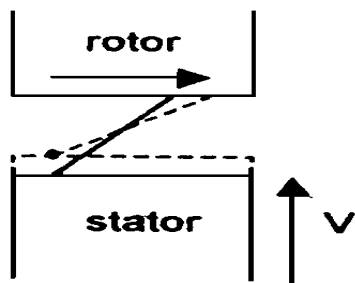


Fig. 1 The work principle of longitudinal-bending piezoelectric micro motor

3 压电微电机的有限元分析

有限单元法(FEM)作为工程分析中的重要手段,已成为机械CAE软件中不可缺少的组成部分,并具有广泛适用性。FEM是基于虚功原理的基础,建立以虚位移为变元的泛函,并通过变分导出诸如结构体力-位移关系等的控制方程。正是由于FEM有着坚实的数学、物理等理论基础,才使其成为解决复杂的边值问题和其它问题的数值方法。FEM在实际工程分析中的应用是通过连续体进行物理离散(划分成单元)和数学离散(单元位移分片插值),然后再进行系统组装,联立求解来实现。有限单元法对完成复杂连续体或多自由度分析来说是非常有效的,它弥补了长期以来弹性力学、结构力学以及其它连续体力学等方面只能解决一些严格理想化问题的不足。

利用经典振动理论和有限元分析两种方法,可以对压电微电机定子的自然频率和固有振型进行分析,它们分别为定子分析中的解析算法和数值算法。它们各有优缺点:由于压电微电机结构较为复杂,利用振动力学进行分析时,处理起来比较繁琐,因而进行了多种假设,导致计算结果的刚度偏低,但解析算法能把压电体的压电逆效应考虑在内,有限单元法在计算处理这一复杂结构时,体现其优越之处,计算结果与实验检测值相比其引入的误差在5%以内,可以被接受。

3.1 压电微电机有限元分析自然频率的理论基础

压电微电机定子自然频率是在以下假设和限制完成的:

- 1、结构是线性的;
- 2、无阻尼;
- 3、在结构中, 无随时间变化的力、位移、压力和温度(自由振动)。

整个结构的动力学方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [k]\{u\} = P(t) \quad (1)$$

式中

$[M]$ —— 结构的总质量矩阵

$[k]$ —— 结构的总刚度矩阵

$\{u\}$ —— 结构总体节点的位移向量

$\{\ddot{u}\}$ —— 结构总体节点的加速度向量

P —— 总载荷向量

在自由振动下即 $\{P\}$ 为零时, 可得,

$$\begin{aligned} \{U\} &= \{\mathcal{Q}_i\} \sin(\omega t) \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

这里

$\{\mathcal{Q}_i\}$ —— 代表第 i 阶共振频率振型的特征向量

ω —— 第 i 阶角频率

因而式(1)表示为

$$(-\omega^2[M] + [k])\{\mathcal{Q}_i\} = 0 \quad (3)$$

因为 $[K]$ 与 $[M]$ 都不是 ω 的函数, 如果系数矩阵 $([k] - \omega^2[M])$ 的行列式为零, 即

$$|[k] - \omega^2[M]| = 0 \quad (4)$$

则方程(3)的 $\{\mathcal{Q}_i\}$ 有 n 个非零解, 方程有 n 个特征根, 因此, 定子结构将有 n 个不同的自然频率。对应于这些自然频率可以由方程(4)求得非零解 $\{\mathcal{Q}_i\}$ 。 \mathcal{Q} 表示对应于第 i 个自然频率 ω 的特征向量(振型)。因而可得到满足方程(3)的 n 个特征值和 n 个特征向量 $\{\mathcal{Q}_i\}$ 。

3.2 压电微电机自然频率有限元计算模型的建立

有限元分析主要有前处理、分析计算和后处理三大步骤, 如图 2 所示。

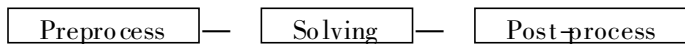


Fig. 2 The process of finite-element analysis of piezoelectric micromotor

(1) 微电机定子单元的选取与网格划分

因为压电微电机定子是压电体与金属体组合而成, 根据其形状、尺寸特点适合选用三维实体单元。

由于微电机可认为是一个对称的几何体, 首先生成的定子二维有限元模型, 而后旋转获得定子的实体模型(如图 3), 其单元总数为 1520, 节点总数为 1980。

(2) 约束处理及常参数输入

要准确地完成计算,除建立压电微电机定子有限元模型网格外,还必须给定各种计算条件,如物理属性、材料属性、载荷条件,约束条件。相关的材料属性如表 1 所示。考虑压电微电机在实验或将来的应用中是将其底面固定在某一物体上,故采用底面作全约束处理,取全部平移、旋转自由度为 0,可生成 FEM 前处理文件,其过程框图如图 4。

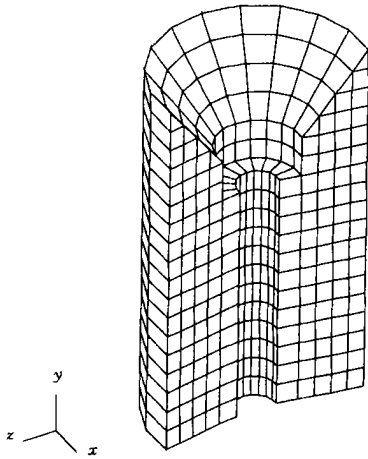


Fig. 3 The half model of the stator of piezoelectric micromotor

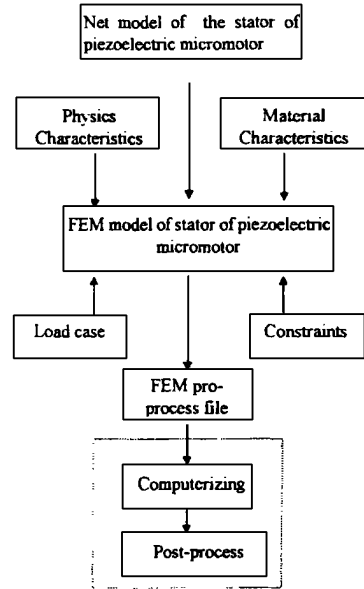


Fig. 4 Flow chart for finite-element analysis of piezoelectric micromotor

Tab. 1 Bills of Material

NO.	Mat.	$E(10^{10}\text{kg}/\text{m}^2)$	$\rho(10^3\text{kg}/\text{m}^3)$	μ
1	piezoelectric (at thickness direct.)	1.56	7.6	0.31
2	copper	1.0	8.43	0.35

3.3 计算结果

对于我们分析的这种压电微电机,认为起主要作用的是轴向振型,故选用轴向自由度为主自由度。选用结构分析有限元程序 ANSYS 进行动力学特性分析,得到纵弯式压电微电机的轴向自然振动频率如表 2 所示。表 2 同时列出了纵弯式压电马达自然频率的实测结果,表明计算结果与测量值基本吻合,其偏差小于 5%,满足工程要求。

Tab. 2 Calculated & measured natural frequency of piezoelectric micromotor

mode	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
calculated	110.85	157.96	168.29	219.51	244.56	291.31
measured	116.4	162.7	174.5	228.1	255.0	302.9

4 结 束 语

利用 ANSYS 软件计算了压电微电机系统的自然频率, 提供了较为准确计算电机频率的方法。由于 FEM 分析过程中的物理模型误差、数学模型误差和输入参数误差等, 使得计算结果与实际测定的压电微电机自然频率有一定差异, 但其计算误差小于 5%, 满足工程要求。

参 考 文 献

- 1 马建旭. 微机械中纵弯式压电微电机特性的研究. 中国科学院长春光学精密机械研究所博士学位论文, 1997
- 2 卢铿, 吴清文等. 用有限单元法(FEA)进行工程分析的误差评价与控制. 光学精密工程, 1995, 3(6): 34 ~ 39
- 3 Maeno T, et al., Finite-element Analysis of the Rotor/Stator in a Ring Type Ultrasonic Motor. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferro-electrical and Frequency Control, 1992, 39(6): 668 ~ 674

Finite Element Analysis on Natural Frequency of Longitudinal-bending Piezoelectric Micromotor

MA Jian-Xu

(Department of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030)

WU Qing-Wen, LU E, WEN Da-Hua

(Changchun Institute of Optics Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

LI Cheng-Fa

(Department of Mechanical Engineering, Jilin Univ. of Tech., Changchun 130025)

Abstract

Using FEM, the natural frequency of Longitudinal-bending piezoelectric micromotor is calculated, and the calculation result shows that it is consistent with the experiment, and it puts forward a theory foundation for investigating the natural frequency of piezoelectric micromotors.

Key words: Finite-element analysis, Longitudinal-bending piezoelectric micromotor, Micro Electro Mechanical System (MEMS), Natural frequency

马建旭 男, 1970年7月生, 上海交通大学机械工站博士后。1991年7月毕业于吉林工业大学机械工程系, 获学士学位。1994年3月毕业于吉林工业大学研究生部, 获硕士学位。1997年7月毕业于中国科学院长春光学精密机械研究所, 获工学博士学位。曾从事汽车齿轮高效加工方法的研究, 现主要从事微电子机械系统、微机器人方向的研究, 正主持一项 863 课题。已在国内外著名会议及期刊发表论文十余篇。