

压电驱动微位移工作台动态特性分析

贾宏光, 吴| 辉, 于振雷, 王立鼎

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

摘要: 压电驱动微位移工作台的动态特性分析对其设计及实际应用都有很大的指导作用。本文在线性化的前提下, 通过对这种微位移工作台各个组成部分的相应简化, 分析了在频响低于共振频率时微位移工作台的动态特性, 得出了其传递函数。另外, 本文还对影响工作台设计的两个重要边界条件—初始预紧力和工作台所能达到的最大频响进行了比较详细的推导, 给出了其所应满足的量化指标。

关键词: 压电陶瓷; 微位移工作台; 动态特性分析

中图分类号: TM 384 文献标识码: A

1 引 言

随着科技的发展, 作为精密工程和精密仪器的关键技术之一的高精度微位移技术在诸如微电子、微机械、纳米科技、主动光学和光纤对接等许多前沿学科领域都有广泛的需求和应用。压电元件由于其本身具有高分辨力、快速响应、无摩擦和磨损、低功率消耗、不受磁场影响及对运行环境要求低等一系列优点而成为微位移工作台的首选驱动元件被广泛应用。

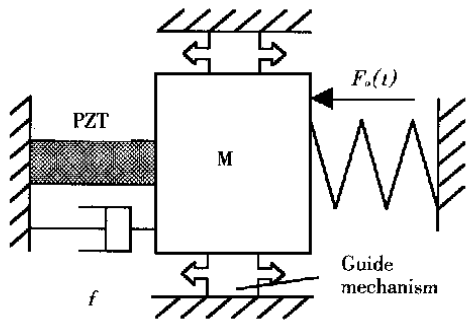


Fig. 1 The model of the micropositioning system driven by PZT actuator. The guide mechanism and the spring can be combined into a single mechanism—the flexure hinge mechanism

图1所示为一压电驱动微位移工作台的基本结构, 压电驱动微位移工作台的精度主要取决于压电元件控制电路的分辨力、电噪声、位置传感器的电噪声等因素。系统的频响则取决于控制方式及由压电元件、导向机构、预紧弹簧和惯性质量等

组成的部分的性能和力状态。对这样一个系统进行动力学分析, 找出各个环节对系统动态性能的影响, 得到系统总的运行特性, 对工作台的初期设计和控制系统的调试都具有一定的指导作用。下面就对工作台的各个部分进行动力学分析, 进而推导出整个系统的动态特性。

2 压电元件的传递特性

压电元件的共振频率是比较高的, 一般都在几十千赫兹以上。在运行频率远低于共振频率时, 压电元件可以等效成图2所示的电路。图中 R 为限流电阻加上压电元件损耗电阻后总的电阻值; C_p 为压电元件的等效电容; L_p 为压电元件等效质量, 其值与元件的质量、刚度和等效电容值都有关, 大小为 $M_p/(k_p C_p)$, 其中 M_p 和 k_p 分别是压电元件的质量和刚度。需要提及的一点是, 为防止压电元件电击穿而串联的限流电阻在控制时应该视为压电元件的一部分, 所控制的是压电元件与限流电阻串联后的总电压。另外, 在低频时压电元件的损耗电阻可视为常数。

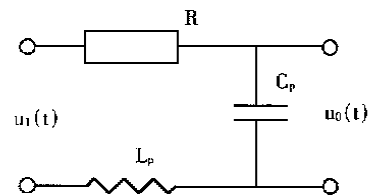


Fig. 2 The model of a PZT actuator working in low frequency

考虑以上几点后,压电元件成为一个典型的二阶振荡环节,其传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{L_p C_p s^2 + RC_p s + 1} \quad (1)$$

3 系统总的动态特性

3.1 压电元件伸长与场强、力的关系

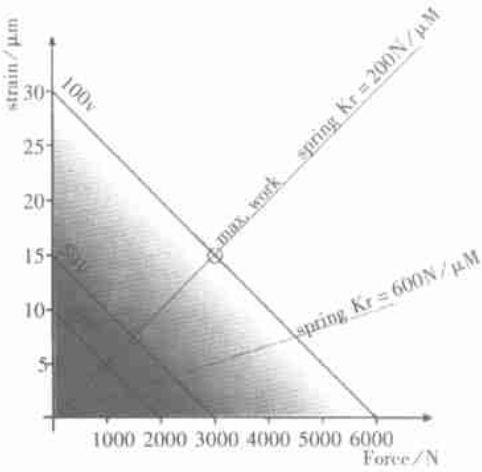


Fig. 3 Force generation vs. displacement of a kind of PZT actuator at various operating voltages

如果不考虑压电元件的非线性特性,其伸长与所加外电场成正比。在一定范围内,压电元件的伸长量会随外力的增加而减小,图3是不同场强下压电元件伸长同外力的关系。综合图3及伸长与所加电场(电压)的关系,可以得到下式

$$y_o(t) = au_o(t) - \frac{1}{k_p} f_i(t) \quad (2)$$

其中: $y_o(t)$ - 压电元件的伸长;

$u_o(t)$ - 压电元件外电压;

$f_i(t)$ - 压电元件端部所受压力,也就是压电元件的驱动力;

a - 比例系数;

外力包括预紧力和外部对工作台的直接作用力(不包括外部加于工作台之上的质量),其作用是使压电元件的初始零点产生偏移,偏移量大小同压电元件的刚度和外力的大小直接相关。根据公式(2)可计算出偏移量为:

$$y_o(t) = - \frac{1}{k_p} f_o(t) \quad (3)$$

3.2 工作台机械部分运动微分方程

工作台的机械部分包括导向机构、预紧弹簧及相应的惯性质量。惯性质量受以下几个力的作

用:压电元件的驱动力 $f_i(t)$ 、外力 $f_o(t)$ 、预紧力。在不考虑外力情况下工作台部分的运行特性可表示为以下微分方程:

$$f_i(t) = M \frac{d^2}{dt^2} y_o(t) + f \frac{d}{dt} y_o(t) + k y_o(t) \quad (4)$$

将公式(2)、(4)合并可得出:

$$u_o = \frac{M}{ak_p} \frac{d^2}{dt^2} y_o(t) + \frac{f}{ak_p} \frac{d}{dt} y_o(t) + \left[\frac{k}{ak_p} + \frac{1}{a} \right] y_o(t) \quad (5)$$

其传递函数为:

$$G_2(s) = \frac{Y_o(s)}{U_o(s)} = \frac{ak_p}{Ms^2 + fs + k + k_p} \quad (6)$$

3.3 系统总的动力学模型

不计外力,系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{Y_o(s)}{U_i(s)} = G_1(s) \times G_2(s) = \frac{ak_p}{(L_p C_p s^2 + RC_p s + 1)(Ms^2 + fs + k + k_p)} \quad (7)$$

在输入为 $u_i(t)$ 的情况下,考虑外力的作用,系统响应为:

$$y_o(t) = L^{-1} [G(s) \cdot U_i(s)] - \frac{1}{k_p} f_o(t) \quad (8)$$

确定了公式(7)中的各个参数和外力之后,就可根据公式(8)求出相对于输入 $u_i(t)$ 的输出 $y_o(t)$ 。

4 两个边界条件

4.1 系统所能达到的最大频响

一般来说,这样一种工作台除去压电元件后其余部分的共振频率应该在几百赫兹到1千赫兹之间,远低于压电元件的共振频率。整个系统最大频响亦应在这个共振频率之内。系统的频响高低同压电元件的选择和其余部分的机械设计有直接关系。压电元件驱动电路中的限流电阻的大小是限制压电元件快速响应性能的因素之一。

低频时,图2中的 L_p 值很小,接近于零。在阶越输入 v_i 时,压电元件两端的电压和电流分别为:

$$v_o(t) = v_i \left[1 + e^{-\frac{t}{RC_p}} \right] \quad (9)$$

$$i = C_p \frac{d}{dt} v_o(t) \quad (10)$$

对应不同的压电元件都有一个最大允许通过电流

I_L , 超过这一数值, 压电元件就可能损坏。由此,

(6) 式必须满足 $i = C_p \frac{d}{dt} v_o(t) \leq I_L$ 。即

$$\frac{dv}{dt} \leq \frac{I_L}{C_p} \quad (11)$$

假设压电元件两端电压为 $v_o \sin(\omega t)$ 的正弦波, 那么压摆率最大值为 $\sin(\omega t) = 0$ 点。此时应满足

$$\frac{dv}{dt} = v_o \omega \cos(\omega t) \Big|_{\sin(\omega t)=0} = v_o \omega \leq \frac{I_L}{C_p} \quad (12)$$

即为防止压电元件电流击穿而产生的边界条件之一, 如图(4)所示, 这也可以部分解释压电驱动的微位移工作台在小信号下比较容易达到较高频率的原因。

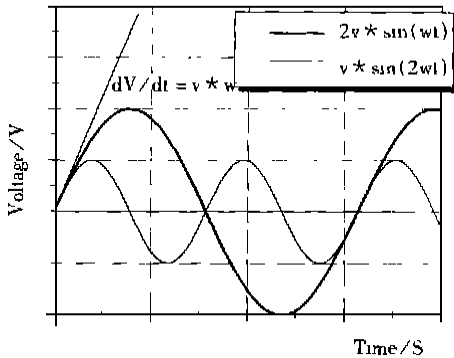


Fig. 4 The working frequency and amplitude of the PZT actuator are inverse—high working frequency means low amplitude

4.2 初始预紧力的选择

初始预紧力的作用是保证工作台在工作过程中压电元件与其驱动部分能紧密接触。如果初始预紧力过小, 在压电元件收缩时就可能使其与其它部分脱离而造成脱落甚至损坏; 反之如果预紧力过大, 则会使压电元件的最大伸长量变短, 不能充分发挥其性能。

参考文献:

- [1] 吴一辉. 纳米分辨率压电式微定位系统的研究[D]. 长春: 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 1996.
- [2] PI Ltd. Physik Instrumente handbook[ED/OL]. <http://www.physikinstrumente.com/>, 1999/10/13.
- [3] 董景新, 等. 控制工程基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

压电元件收缩时, 弹性力 $ky_o(t)$ 及预紧力 F 方向是与收缩方向相同的。压电驱动微位移工作台一般都是欠阻尼的, $f \frac{d}{dt} y_o(t)$ 很小, 由此预紧力应满足以下关系:

$$F + ky_o \sin(\omega t) = M \frac{d^2}{dt^2} y_o \sin(\omega t) \quad (13)$$

弹性力相对于预紧力来说是比较小的, 在压电元件刚开始收缩时惯性质量部分加速度最大, $\sin(\omega t) = 0$, 因此上式变为:

$$F = M \omega^2 y_o - ky_o \quad (14)$$

如外力作用方向与压电元件收缩的方向相反, 在公式右边应该加入外力的值。

5 结 论

以上通过一定的简化, 分析了压电元件驱动的微位移工作台的动态运行特性, 给出了输入和输出之间的计算公式并给出了两个边界条件。根据工作台实际工作环境及力状况的不同, 在确定了其余的边界条件之后, 此模型可用于工作台的初期设计依据。

压电元件有着本质的非线性, 这会使实际的输出同以上公式计算的理论输出相比产生一定的变形, 但一方面变形量同输出幅值相比比较小(10%左右), 另一方面此非线性可通过一些手段如电荷控制等进行校正。

所分析的工作台动态运行特性在工作频率较高时(如超过机械部分的共振频率而达几千赫兹), 压电元件将不能再简化为二阶系统, 而应该有更复杂的形式, 以上推导亦不再适用。

Dynamic characteristic analysis of the micropositioning system driven by PZT actuator

JIA Hong-guang, WU Yi-hui, YU Zhen-lei, WANG Li-ding

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

Abstract: The dynamic characteristic analysis of the micropositioning system driven by the PZT actuator is very important to design and application. By simplifying parts of the micropositioning system based on linearization, this paper analyzes the dynamic characteristics of the system working below resonance frequency, and its transfer function. Meanwhile, two boundary conditions – the maximum frequency response and preload that should be fed are analyzed.

Key words: PZT actuator; micropositioning system; dynamic characteristic analysis

作者简介: 贾宏光(1971-), 男, 黑龙江省五常县人, 现长春光学精密机械与物理研究所在读博士生。已发表论文 10 篇, 其中第一作者 5 篇, 主要研究方向- 微纳技术。

消 息

《光学 精密工程》从 1996 年始被中国科学引文数据库收录为来源期刊。凡列入中国科学引文数据库的来源期刊从总体上来说核心期刊中的核心部分。

本刊被中国科学期刊全文数据库第一批收录为自然科学核心期刊。

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化, 推进科技信息交流的网络化进程, 本刊现已入网“万方数据(ChinaInfo)系统科技期刊群”, 所以, 向本刊投稿并录用的稿件文章, 将一律由编辑部统一纳入万方数据系统全文上网(网址: <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical>)。凡有不同意见, 请另投它刊。本刊所付稿酬包含刊物内容上因特网提供信息服务报酬, 不再另付。

读者可上因特网进入万方数据系统查询检索本刊内容, 也欢迎各界朋友通过万方数据系统向我刊提出宝贵意见、建议, 或征订本刊。

中国科学引文数据库利用该库的数据资源已开发出两种产品, 即《中国科学引文索引》(光盘版)和(印刷版)。欲购者请与中科院文献情报中心中国科学院引文数据库联系。

电话: (010) 62564354 传真: (010) 62566846

《光学 精密工程》编辑部公告

为适应我国信息化建设需要, 扩大作者学术交流渠道, 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入该数据库, 请在来稿时声明, 本刊将做适当处理。

特此公告!

《光学 精密工程》编辑部
2000 年 10 月