

数字微反射镜装置的分析与设计

贾建援¹, 邵彬¹, 冯小平²

(1. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 简述了数字微镜装置的微机械工作原理和数字光信号处理技术, 建立了基于微米技术制作的数字微镜的机电动力学模型, 并给出了微机械碰撞中考虑纳米尺寸效应的实用建模方法. 数值仿真分析了某微反射镜单元的运动状态和过程, 分析结果与该微镜实测结果吻合较好. 此外, 还设计了一种新型微镜阵列, 提出了相应的分析设计方法.

关键词: 微电子机械系统; 数字微反射镜; 数字光信号处理; 投影仪

中图分类号: TH11; TN4; TP334 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2001)01-0001-04

Analysis and design of the digital micromirror device

JIA Jian-yuan¹, SHAO Bin¹, FENG Xiao-ping²

(1. School of Mechano-electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. School of Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The projection device based on the DMD and DLP has a prosperous future and potential commercial value. In this paper, the micro mechanical theories of key device DMD and DLP are expounded. The mechanical dynamics model of DMD based on the nanon-tech is established. The simplified and practical modeling methods for considering the nanon effect of impact are proposed. By using the numerical emulation method, the motion status and course of a typical DMD element are analyzed. The analysis result coincides with the result measured in practice very well. A new DMD structure is designed with its analysis and design methods described.

Key Words: micro electronic methanical system; digital micromirror devices; DLP; projector

数字微镜装置(Digital Micromirror Devices, 简称 DMD)是微米/纳米技术和微电子机械系统(MEMS)设计理论的产物. 数字微反射镜是 DMD 投影设备的光机电一体化关键装置. DMD 投影设备的优点在于高性价比、小体积、低成本、高分辨率、高清晰度、大屏幕及超大屏幕显示和巨大的市场前景^[1]. DMD 投影设备采用了自然光源, 而非电子束激发光源, 能有效地避免对人眼的光损伤. 更重要的是, DMD 投影设备几乎全部采用数字技术, 显示过程中没有强磁场、大电流和高电压, 能够有效地防止信息泄露. 因此对 DMD 技术的研究有重要的应用价值.

1 DMD 结构与数学模型

1.1 DMD 的工作原理与关键技术

芯片上的微反射镜被划分成 x - y 二维阵列, 对应于屏幕上的二维解析点. CMOS 电路所提供的静电力驱动镜片绕固定轴转动, 如图 1 所示. 运动控制的目的是快速完成镜片 4 个状态的转换, 分别为 $+10^\circ \rightarrow -10^\circ$, $+10^\circ \rightarrow +10^\circ$, $-10^\circ \rightarrow -10^\circ$, $-10^\circ \rightarrow +10^\circ$. 当微镜片做旋转运动到达 10° 或 -10° 后, 由于受到机械结构的限位和控制电压序列的作用, 最终将稳定在该位置直到下一个控制电压序列到来^[2]. 快速和稳定是运动控制关

收稿日期: 2000-03-07

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(99X05)

作者简介: 贾建援(1952-), 男, 教授.

键技术的重要指标,与图像显示质量密切相关.

1.2 DMD 机电动力学模型

针对微米技术制作的微镜结构(如图 1),运用机电分析动力学原理,以反射镜片相对于铰链轴的转角 θ 为广义坐标,得到系统的拉格朗日-麦克斯韦方程

$$J\ddot{\theta} + \eta\dot{\theta} + K_R\theta = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} U^T \frac{dC}{d\theta} U, \quad (1)$$

其中 J 为系统的转动惯量; K_R 为铰链轴的扭转刚度; η 表示系统的阻尼系数; C 为系统等效电容矩阵; W_c 为静电场能量; U 为控制电压向量,决定静电场能量的大小.显然,不能简单地用平行板电容器的公式来计算 C 矩阵,因为系统运动过程中电容极板位置关系不是相互平行的,而且极板间距相对较大.笔者采用有限元法对不同 θ 角度的 C 矩阵进行计算,再在 $-10^\circ \rightarrow +10^\circ$ 范围内用多项式拟合得到等效电容函数矩阵 C ,其中每个矩阵元素都是广义坐标 θ 的函数.

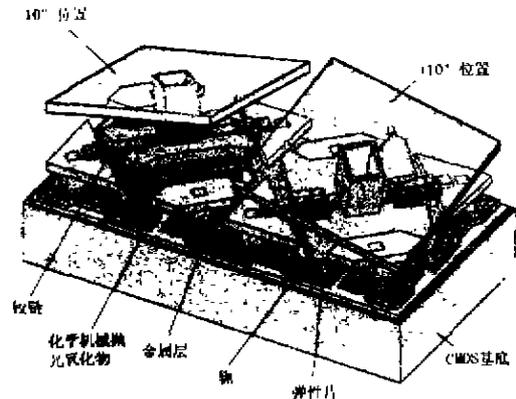


图 1 微镜片工作状态示意图

2 微反射镜运动模拟及结果

2.1 控制电压序列及其作用

控制电压序列就是能使反射镜完成预定动作的电压矢量序列.加在反射镜片的电压(偏离电压)、两个互补的寻址电压(加在图 1 中两个独立的立柱上)和前面所求得的等效电容阵 C 共同决定了该时刻系统的静电场能量.控制电压序列取不同的向量值,系统的动态响应结果也不同.根据文献[3],在一个控制周期中,一个控制电压序列分为 5 种不同的时段,如图 2 所示.控制电压序列使得微镜片能够完成预定的状态转换,并且能够提高系统的快速性和寿命.

2.2 固定粘着能与纳米摩擦耗能

在微反射镜运动及稳定于平衡位置的过程中,装在铰上的弹性片有着相当重要的作用.弹性片一方面对铰与基底之间的碰撞产生缓冲作用,提高了系统寿命;另一方面,反射镜在向另一侧运动之前,弹性片预先储存了一部分机械能,使反射镜向另一状态跳转的快速性得到了提高.但是弹性片与基底之间的微结构碰撞过程是一个纳米级的微观问题.因为纳米微尺寸效应,粘着和纳米摩擦变得举足轻重,因此基于连续介质的宏观理论不再适用.按文献[4]的研究成果,笔者采取了工程设计的实用方法:将粘着能和摩擦耗能等效为系统阻尼耗能,体现在阻尼系数 η_c 中,得到描述系统飞行和碰撞过程的微分方程,即

$$\begin{cases} J\ddot{\theta} + \eta_f\dot{\theta} + K_R\theta = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} U^T \frac{dC}{d\theta} U, & \text{飞行过程 } |\theta| \leq 10^\circ, \\ J\ddot{\theta} + \eta_c\dot{\theta} + K_C\theta = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} U^T \frac{dC}{d\theta} U, & \text{碰撞过程 } |\theta| > 10^\circ. \end{cases} \quad (2)$$

给定初始条件,可用数值方法求解该微分方程.

2.3 数值模拟结果分析

图 3 给出 Texas 仪器公司的测量结果,图 4 为微分方程(2)的数值结果.对比图 3 和图 4,二者吻合较好,表明上述理论建模能够正确分析微反射镜的运动过程,可以用于微镜装置的工程设计.

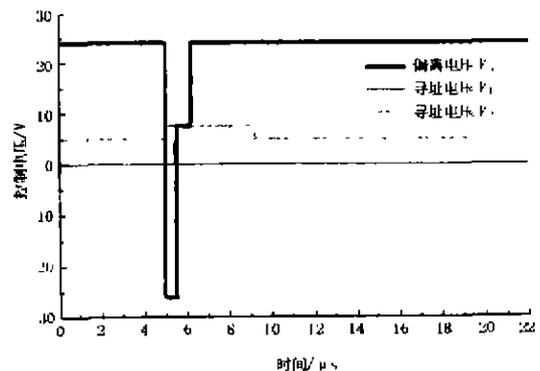


图 2 一个典型的控制电压序列

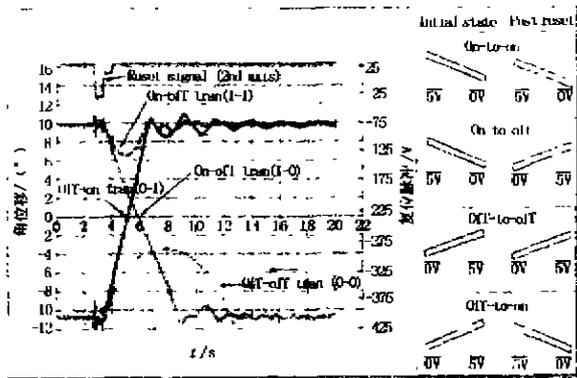


图 3 Texas 仪器公司的实测曲线

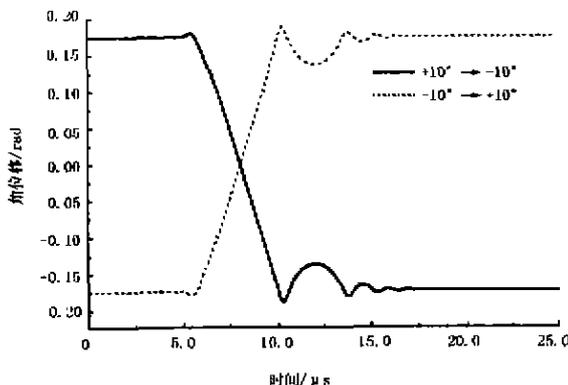


图 4 数值方法模拟结果

3 一种新的 DMD 微结构设计

3.1 微结构设计

为了进一步提高 DMD 的性能,运用曲屈理论中临界压力的“阀门”效应,设计了一种新的微反射镜结构,如图 5 所示.由于对 Texas 仪器公司的 DMD 分析结果的正确性,新结构的设计理论及方法同样可以基于传统连续介质理论.

在新结构中,微镜片与 Texas 仪器公司的 DMD 的结构不同,仅有 0°和 10°两个位置.当静电转矩 M_e 使压杆所受的压力大于其临界压力,微镜片就会绕扭转轴运动,最终使微镜片稳定于 10°限位位置.当静电转矩突然减小,扭转轴、弹性片和失稳杆中储存的弹性势能将转化为微镜片的动能,促使镜片飞离着陆端,直至镜片的动能转化为压杆的拉伸变形能,系统迅速稳定于 0°位置.由于压杆的“阀门”效应,静电转矩 M_e 较小时,微镜片就不会转动,压杆仅仅有轻微的压缩变形.

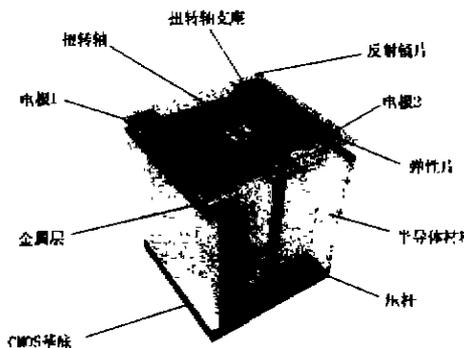


图 5 三维结构示意图

3.2 数学模型与求解

新微镜装置的运动微分方程为

$$\begin{cases} J\ddot{\alpha} + c_1\dot{\alpha} + K_a\alpha + Nl + m_l = M_e, & \text{飞行过程 } \alpha \leq 10^\circ, \\ J\ddot{\alpha} + c_2\dot{\alpha} + K_c\alpha + Nl + m_l = M_e, & \text{碰撞过程 } \alpha > 10^\circ. \end{cases} \quad (3)$$

其中 J 为系统的转动惯量, c_1, c_2 为阻尼系数, K_a 为轴的抗扭刚度, K_c 为碰撞着陆后的刚度, $M_e = M_e(\alpha)$ 为静电转矩, $N = N(\alpha)$ 为杆压力, $m_l = m_l(\alpha)$ 为杆端弯矩,其他参数如图 6 所示.根据大挠度非线性理论,杆压力 $N(\alpha)$ 及杆端弯矩 $m_l(\alpha)$ 的复杂函数关系可由下述状态方程求得:

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta, \quad \frac{dy}{ds} = \sin \theta,$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{R}{2EI} [(b - 2y) \cos \beta - b \cos(\alpha + \beta) + (2x - l) \sin \beta] +$$

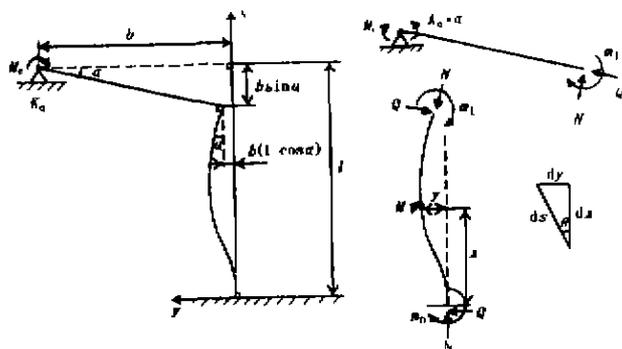


图 6 新结构的数学模型示意图

$$\frac{1}{b} \frac{\cos \beta - \cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta - \cos(\alpha + \beta) - l \sin \beta} \quad (4)$$

初始条件 $x|_{s=0} = 0, y|_{s=0} = 0, \theta|_{s=0} = 0$,

N, m_l 与 R, β 和 α 存在如下关系:

$$N = R \cos(\alpha + \beta) \quad (5)$$

$$m_l = \frac{EI(\cos(\alpha + \beta) - \cos \beta)}{[b \cos \beta(1 - \cos \alpha) - \sin \beta(l - b \sin \alpha)]} + \frac{R}{2} [b \cos \beta(1 - \cos \alpha) - \sin \beta(l - b \sin \alpha)] \quad (6)$$

给定 $\alpha = \alpha_i$, 对于 $\beta_j = \beta_{j-1} + \Delta\beta, (j = 1, 2, \dots, q), R_k = R_{k-1} + \Delta R, (k = 1, 2, \dots, p)$, 求解状态方程(4), 寻求 β_i 和 R_i 使它们恰好满足端点位移协调条件 $x|_{s=l} = -b \sin \alpha_i, y|_{s=l} = b(1 - \cos \alpha_i), \theta|_{s=l} = -\alpha_i$, 可以得到 $\beta_i = \beta(\alpha_i)$ 和 $R_i = R(\alpha_i)$. 对于 $i = 1, 2, \dots, r$, 由式(4) ~ (6) 可以得到 $N_i = N(\alpha_i)$ 和 $m_{li} = m_l(\alpha_i)$, 最终可以拟合为复杂函数关系 $N(\alpha)$ 和 $m_l(\alpha)$, 这样就可以求解新结构的运动微分方程.

4 对新型 DMD 微结构的评价

新结构工作于 0° 位置, 几乎不存在微颤动过程, 最大振幅为 0.14° , 图像清晰度高. 虽然在 10° 位置, 新结构也存在微颤动问题, 但此时反射光线不进入屏幕, 不会影响显示效果. Texas 仪器公司的微结构不能保证在工作位置各镜片光学共面, 而新结构的每个微反射镜单元在 0° 位置是光学共面的, 因此不一定要求平行光, 这样降低了对光路的设计要求. 新结构的压杆加工精度要求相对较高, 保证深度方向的加工精度在加工制造方面有一定的难度.

参考文献:

- [1] Hornbeck L J. From Cathode Rays to Digital Micromirrors: a History of Electronic Projection Display Technology[Z]. USA: Texas Instruments, 1998.
- [2] Hornbeck L J. DMD Architecture[Z]. USA: Texas Instruments, 1994.
- [3] Meier R E. DMD Pixel Mechanics Simulation[Z]. USA: Texas Instruments, 1998.
- [4] Landman U, Luedtke W D, Nitzan A. Dynamics of Tip-Substrate Interactions in Atomic Force Microscopy[M]. Amsterdam: North-Holland, 1989.

(编辑: 郭 华)

我校学报再次被列为中文核心期刊

《西安电子科技大学学报》(自然科学版)是我校对外宣传的重要窗口, 它集中反映我校教学科研的实力与水平, 倍受广大师生的欢迎和支持. 我校学报曾被《中文核心期刊要目总览》第一版(1992年)、第二版(1996年)收录, 列入“无线电电子学、电信技术”类核心期刊. 这次通过检索、统计、分析、计算、专家鉴定等步骤严格筛选, 被《中文核心期刊要目总览》第三版(2000年)列为“综合性科学技术”类核心期刊, 为我校的学科建设及人才培养创造了有利条件.

我校学报在国际学术界的影响也逐渐扩大, 除早被 Ei Page One 数据库和英国《科学文摘》(SA)收录外, 1998年被日本的《科学技术文献速报》(CBST)收录, 1999年又被俄罗斯的《文摘杂志》(PJK)收录, 这些都属世界著名的6大检索系统.