

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

薄膜变形镜电极边缘效应及其对校正能力评估影响研究

贾浩磊, 顾乃庭, 钟立波

引用本文:

贾浩磊, 顾乃庭, 钟立波. 薄膜变形镜电极边缘效应及其对校正能力评估影响研究[J]. 光电工程, 2025, 52(5): 250025.

Jia H L, Gu N T, Zhong L B. Electrostatically driven membrane deformable mirror edge effects and their influence on the evaluation of correction capability[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(5): 250025.

<https://doi.org/10.12086/oe.2025.250025>

收稿日期: 2025-02-08; 修改日期: 2025-03-20; 录用日期: 2025-03-25

相关论文

中国科学院光电技术研究所的变形反射镜研究进展

官春林, 张小军, 邓建明, 薛丽霞, 张耀平, 周虹, 樊新龙, 程琳, 樊峻棋, 何刚, 牟进博, 龙国云
光电工程 2020, 47(10): 200337 doi: 10.12086/oe.2020.200337

大口径ULE分块镜曲率半径调整能力分析

赵凯伦, 宋刘幸, 孙德伟, 黄巧林, 田国梁, 贺金平, 胡瑞
光电工程 2025, 52(3): 240291 doi: 10.12086/oe.2025.240291

基于连续镜面变形镜本征模方法的复杂涡旋光场调控

熊光昀, 唐奥, 兰斌, 沈锋
光电工程 2022, 49(11): 220066 doi: 10.12086/oe.2022.220066

超大口径弯月镜支撑点布局-刚度-校正力联合优化

习兴华, 张超杰, 胡海飞, 关英俊
光电工程 2020, 47(8): 190551 doi: 10.12086/oe.2020.190551

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

薄膜变形镜电极边缘效应及其对校正能力评估影响研究

贾浩磊^{1,2,3,4}, 顾乃庭^{5*}, 钟立波^{1,2}

¹自适应光学全国重点实验, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049;

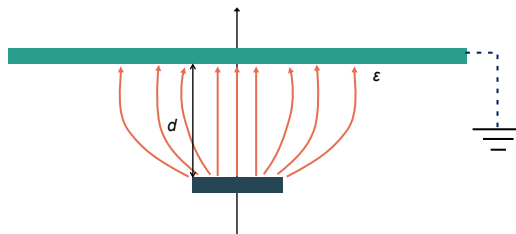
⁵国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

摘要: 静电驱动薄膜变形镜通过静电驱动实现波前像差校正, 其校正能力评估主要依赖于驱动载荷分析的准确性。由于电极边缘产生电荷集聚导致区域载荷非线性变化产生非均匀变形, 引起静电驱动薄膜变形镜校正面型评估不准或错误评估。基于此, 开展静电驱动薄膜变形镜电极边缘效应及其对校正能力评估影响研究, 建立电极边缘效应理论模型, 并基于该模型对电极边缘形变响应和校正能力评估准确性的影响进行定量分析。分析结果表明, 边缘效应前后校正能力评估误差从 25.49% 降低至 6.83% 甚至更低, 且适用于不同电极间距参数, 验证所提理论模型正确性。

关键词: 静电驱动薄膜变形镜; 电极边缘效应; 镜面变形; 波前校正

中图分类号: O439

文献标志码: A



贾浩磊, 顾乃庭, 钟立波. 薄膜变形镜电极边缘效应及其对校正能力评估影响研究 [J]. 光电工程, 2025, 52(5): 250025
Jia H L, Gu N T, Zhong L B. Electrostatically driven membrane deformable mirror edge effects and their influence on the evaluation of correction capability[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(5): 250025

Electrostatically driven membrane deformable mirror edge effects and their influence on the evaluation of correction capability

Jia HaoLei^{1,2,3,4}, Gu Naiting^{5*}, Zhong Libo^{1,2}

¹National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁵College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

收稿日期: 2025-02-08; 修回日期: 2025-03-20; 录用日期: 2025-03-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC2202200, 2021YFC2202204); 国家自然科学基金 (12293031, 12022308, 61905252); 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目 (Y2022097)

*通信作者: 顾乃庭, gnt7328@163.com。

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

Abstract: Electrostatically driven membrane deformable mirrors correct wavefront aberrations through electrostatic forces, whose correction capability dependent on driving load accuracy. Due to the charge aggregation at the electrode edges, non-uniform deformation occurs due to the nonlinear change of the regional load, which causes inaccurate or incorrect assessment of the calibrated wavefront aberration of electrostatically driven membrane deformable mirrors. Based on this, this work carries out a study on electrostatically driven membrane deformable mirror electrode edge effect and its influence on correction capability assessment, establishes a theoretical model of electrode edge effect, and quantitatively analyzes the influence of electrode edge deformation response and correction capability assessment accuracy based on the model, and the results show that before and after the consideration of the edge effect, the error of correction capability assessment is improved from 25.49% to 6.83% or even lower, and applies to different electrode spacing parameters, which verifies the correctness of the theoretical model proposed in this paper.

Keywords: electrostatically driven membrane deformable mirror; electrode edge effect; mirror surface deformation; wavefront correction

1 引言

静电驱动薄膜变形镜 (Electrostatically driven membrane deformable mirror, EMDM) 作为自适应光学系统的核心部件^[1-2], 克服了传统机械变形镜在体积、响应速度和稳定性方面的局限^[3-4]。凭借镜面精度高、驱动功耗低、响应速度快和长期稳定性, EMDM 已广泛应用于显微成像、视光学校正等领域, 成为有效校正光学波前畸变、提升成像质量和光学性能的关键技术^[5-8]。EMDM 的校正能力分析是自适应光学系统性能优化的核心内容, 直接决定了自适应光学系统的整体性能, 而精确的静电载荷分布模型是计算 EMDM 镜面变形的前提, 更是评估 EMDM 校正能力的基础^[9-10], 静电载荷分布模型的准确性直接影响到变形镜的形变精度、控制算法的有效性、动态响应、系统稳定性和长期可靠性。当前的载荷计算模型在实际应用中未充分考虑电极边缘效应的影响, 这导致 EMDM 镜面变形的计算精度不足, 从而影响了系统的设计优化和性能评估^[11-12]。随着对 EMDM 波前校正精度和系统性能要求的提升, 改进现有模型以更准确地描述静电载荷分布, 尤其是考虑电极边缘效应的影响, 已成为提高 EMDM 性能的关键所在。

传统的 EMDM 设计通常基于理想的平行电容器模型, 假设静电载荷均匀作用在电极与导电薄膜的正投影区域内。这一假设使得静电力的计算可以借助理想平行平板电容器的静电场公式进行求解, 最终结合小挠度理论模型推算 EMDM 的镜面变形, 这一方法简化了计算过程并保证了一定的准确性^[13-16]。然而, 以往模型忽略了电极的边缘效应, 导致镜面变形出现

预测偏差。在实际应用中, 电极边缘的电场强度显著增强^[17-18], 电极的边缘效应加剧了镜面变形, 进而影响了镜面控制精度和波前校正效果。为准确描述这一问题, 考虑电极边缘效应对 EMDM 的影响, 首次利用镜像法与矩量法计算导电薄膜的电荷分布, 以提高镜面变形的预测精度。提出的这一方法能够更真实地反映电极边缘电场的非均匀性, 从而获得更准确的静电载荷分布, 提高 EMDM 的镜面变形计算精度, 减少波前校正的评估误差。

基于上述背景, 开展对 EMDM 电极边缘效应及其校正能力评估影响的研究, 提出设置镜像电极将电极之间的相互作用简化为等大的平行电容, 利用矩量法求解电荷分布与电势之间关系, 建立了电荷分布数字化模型, 解决了现有模型电荷分布准确性不足的问题, 并进一步分析了边缘效应对镜面面型和波前校正能力评估精度的影响。通过与 COMSOL 仿真结果进行对比验证, 本模型镜面变形计算的相对误差不超过 2%, 使 EMDM 波前校正能力的评估误差从 25.49% 降低至 6.83%, 证明了该模型的有效性和准确性, 为 EMDM 参数优化和高精度波前校正应用提供了可能的理论依据和应用基础。

2 EMDM 电极边缘效应理论研究

如图 1 所示, EMDM 通常采用导电薄膜作为镜面材料, 薄膜边缘固定在框架结构上, 底层基板通过镀刻方式形成驱动电极阵列, 在电极与薄膜之间填充电介质层, 最终在电极与薄膜间形成平行电容结构。通过施加电压或电流形成静电力载荷改变薄膜镜面面

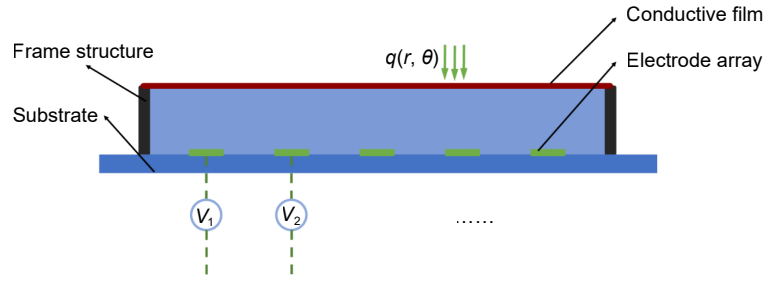


图 1 EMDM 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of EMDM structure

型, 实现波前像差的校正^[19]。在一般情况下, EMDM 镜面的变形量为微米级, 其相对薄膜厚度较小, 因此静电载荷作用下的镜面变形可近似为小挠度模型^[20-21], 表达式为

$$\begin{cases} D\nabla^2\nabla^2\Phi(r,\theta)=q(r,\theta) \\ D=\frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: D 为导电薄膜的弯曲刚度; $\Phi(r,\theta)$ 为镜面面型; $q(r,\theta)$ 为驱动载荷; E 为薄膜杨氏模量; δ 为薄膜厚度; μ 为薄膜泊松比。

由式 (1) 可以看出, EMDM 面型变化主要取决于各电极所施加的静电载荷。因此, 若要准确估计不同电压下镜面面型, 就需要精确分析不同电压下各电极所施加的局部静电载荷。

一般情况下, 将 EMDM 电极与薄膜镜面形成的电容器看成理想平行电容 (以下简称“理想模型”), 即假设电极表面电荷均处于均匀分布状态, 导电薄膜在电极正投影区域受匀强电场作用, 如图 2(a) 所示。在理想模型中, 镜面面型的变化与驱动电压的平方成正

比^[22-24], 驱动电极对导电薄膜的正投影区域上的静电载荷 q_{ideal} 可表示为

$$q_{\text{ideal}} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r V^2}{2d^2}, \quad (2)$$

式中: ε_0 为真空介电常数; ε_r 为电极间介质的相对介电常数; V 为驱动电压; d 为电极间距。

导电薄膜产生镜面变形的驱动载荷 $q(r,\theta)=q_{\text{ideal}}$, 根据式 (1)、式 (2), 对驱动电极施加单位电压时, 理想模型获得的镜面面型 Φ_{ideal} 与结构参数的定量关系为

$$D\nabla^2\nabla^2\Phi_{\text{ideal}} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r}{2d^2}. \quad (3)$$

对平行电容进行结构设计时, 边缘效应的影响与电极间距紧密相关。雷建华^[25]通过仿真的手段给出了电极间距与边缘效应作用宽度之间的定性关系, 说明电极间距越大边缘效应作用越强。式 (2) 适用于较大尺寸电极和较小电极间距的平行电容结构, 其边缘电荷非均匀分布及其带来的影响可以忽略。在实际 EMDM 中, 电极尺寸有限, 电极间距相对较大, 受边缘效应影响电极边缘电荷集聚产生非均匀的静电载

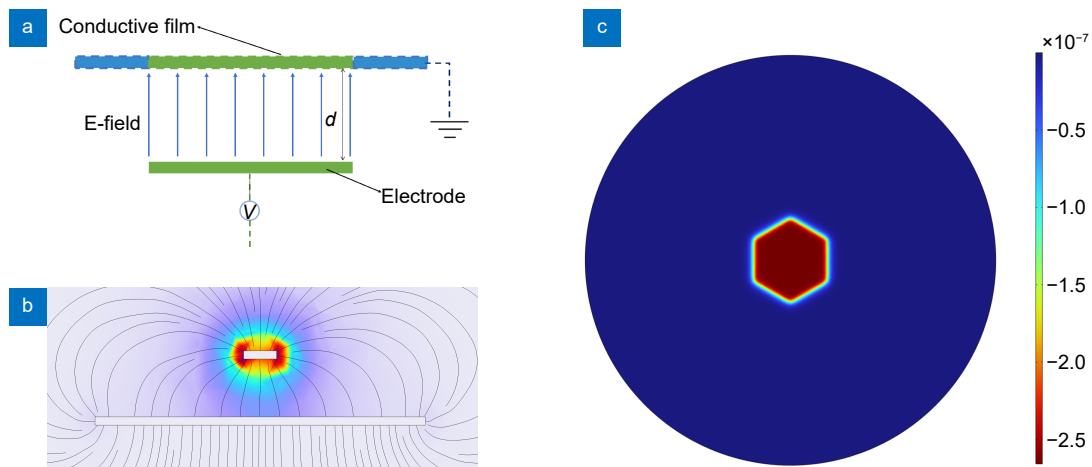


图 2 平行平板电容的边缘效应。(a) 理想的平行电容驱动器模型; (b) EMDM 电场分布; (c) EMDM 导电薄膜的电荷分布

Fig. 2 Edge effect of parallel flat capacitor. (a) Ideal parallel capacitance driver model; (b) EMDM electric field distribution; (c) Charge distribution of EMDM conductive membranes

荷, 对镜面面型产生显著影响^[26], 最终导致镜面变形和校正能力评估不准确。EMDM 中心电极施加电压后的电场分布如图 2(b) 所示。图 2(c) 展示了六边形电极施加单位电压后的导电薄膜上的电荷分布。通过以上结果可以看出, EMDM 电极边缘会产生电荷集聚, 对应电场强度明显增强, 并导致静电载荷的不均匀性分布, 进而使得相同电压驱动下 EMDM 镜面变形偏离理想分布, 使得最终对波前校正能力评估时产生误差。因此, 对于有限尺寸的 EMDM 电容结构而言, 应充分考虑边缘效应, 才能准确估计不同电压驱动下的镜面变形。

导电薄膜表面与电场方向垂直, 依据高斯定理可知导电薄膜的感应电荷密度 σ_{real} 与电场强度成正比^[27], 则导电薄膜在任意位置的静电载荷分布 $q_{\text{real}}(r, \theta)$, 表达式为

$$q_{\text{real}}(r, \theta) = \frac{\sigma_{\text{real}}(r, \theta)^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_r}. \quad (4)$$

EMDM 薄膜尺寸较大与电极大小有量级差, 因此在电极静电分析中可利用镜像法在电极相对薄膜的镜像位置设置等效镜像电极, 镜像电极与实际电极间形成了平行电容器, 而电极间距 d' 则变为原电极和薄膜间距的两倍, 即 $d'=2d$ 。此外, 根据对称性原理, 镜像电极和原电极的电荷分布具有一致性。由此可以得到电极电势 φ 与电荷分布之间的关系, 表达式为

$$\varphi(x, y) = \iint_{\Omega_{\text{mirror}}} \frac{\sigma_{\text{electrode}}(x', y')}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l(x, y, x', y')} dx' dy' + \iint_{\Omega_{\text{mirror}}} \frac{-\sigma_{\text{electrode}}(x', y')}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r \sqrt{l^2(x, y, x', y') + d'^2}} dx' dy', \quad (5)$$

式中: Ω_{mirror} 为镜像电极区域; Ω_{original} 为驱动电极区域; $\sigma_{\text{electrode}}(x', y')$ 为驱动电极电荷分布; l 为驱动电极两点间距离。

式 (5) 所示的积分表达式一般采用矩量法进行求解^[28-30], 即将驱动电极划分为 n 个小微元区域, 划分后第 j 个微元的面积为 ΔS_j , 则每个区域的电荷分布离散为微元电荷, 对应电势分布离散为局部电势, 将积分方程转换为离散的矩阵方程, 表达式为

$$\Psi_{\text{electrode}} = P_{n \times n} \cdot X_{\text{electrode}}, \quad (6)$$

式中: $\Psi_{\text{electrode}}$ 为驱动电极的电势向量, $\Psi_{\text{electrode}} = (v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_n)^T$, 其中 v_j 为第 j 个微元的局部电势; $X_{\text{electrode}}$ 为驱动电极的电荷密度向量, $X_{\text{electrode}} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_n)^T$, 其中 σ_i 为第 i 个微元的电荷密度; $P_{n \times n}$ 为驱动电极各微元的电荷密度对驱动电极各微元的电势影响。 $P_{n \times n}$ 的表达式为

$$P_{n \times n} = \begin{cases} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{i1} & \dots & p_{ij} & \dots & p_{in} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}, \\ p_{ij} = \frac{\Delta S_j}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \left(\frac{1}{l_{ij}} - \frac{1}{\sqrt{l_{ij}^2 + d'^2}} \right) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: l_{ij} 表示驱动电极第 i 个微元与第 j 个微元间距离。

对驱动电极网格划分后, 依据划分后各小微元区域的面积与间距代入式 (7) 获得矩阵 $P_{n \times n}$, 当驱动电极施加单位电压, 即电势向量 $\Psi_{\text{electrode}}$ 为全 1 向量时, 通过求解矩阵方程式 (6) 获得驱动电极的电荷密度向量 $X_{\text{electrode}}$ 。将导电薄膜划分为 m ($m > n$) 个小微元区域, 划分后第 h 个微元的面积为 $\Delta S'_h$ 。依据获得的驱动电极的电荷密度向量 $X_{\text{electrode}}$ 和导电薄膜的电荷密度向量 X_{real} 及其各自对导电薄膜的电势影响矩阵 $G_{m \times n}$ 和 $B_{m \times m}$, 即可求解导电薄膜的电势向量 Ψ_{real} , 表达式为

$$\Psi_{\text{real}} = G_{m \times n} \cdot X_{\text{electrode}} - B_{m \times m} \cdot X_{\text{real}}, \quad (8)$$

式中: Ψ_{real} 为导电薄膜的电势向量, $\Psi_{\text{real}} = (v'_1, v'_2, \dots, v'_h, \dots, v'_m)^T$, 其中 v'_h 为第 h 个微元的局部电势; X_{real} 为导电薄膜的电荷密度向量, $X_{\text{real}} = (\sigma'_1, \sigma'_2, \dots, \sigma'_k, \dots, \sigma'_m)^T$, 其中 σ'_k 为第 k 个微元的电荷密度。矩阵 $G_{m \times n}$ 与 $B_{m \times m}$ 依次为驱动电极与导电薄膜各微元的电荷密度对导电薄膜各微元的电势影响, 表达式为

$$G_{m \times n} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & \dots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{k1} & \dots & g_{kj} & \dots & g_{kn} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ g_{m1} & g_{m2} & \dots & \dots & g_{mn} \end{bmatrix}, \quad B_{m \times m} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & \dots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{k1} & \dots & b_{kh} & \dots & b_{km} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & \dots & b_{mm} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$g_{kj} = \frac{\Delta S_j}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r \sqrt{l_{kj}^2 + d'^2}}$$

$$b_{kh} = \frac{\Delta S'_h}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r \sqrt{l_{kh}^2 + d'^2}}$$

式中: l_{kj} 表示导电薄膜第 k 个微元与电极第 j 个微元的距离; l_{kh} 表示导电薄膜第 k 个微元与第 h 个微元之间的距离。

对导电薄膜网格划分后, 依据划分后导电薄膜与驱动电极小微元的面积与各小微元的间距代入式 (9) 获得矩阵 $\mathbf{G}_{m \times n}$ 与 $\mathbf{B}_{m \times m}$, 当导电薄膜接地时, 电势向量 Ψ_{real} 为全 0 向量, 求解矩阵方程式 (8) 可得到导电薄膜的电荷密度向量 $\mathbf{X}_{\text{real}}$ 。当导电薄膜网格划分足够密时, 任一位置的电荷密度分布 $\sigma_{\text{real}}(r, \theta)$ 可由对应网格微元区域的电荷密度向量 $\mathbf{X}_{\text{real}}$ 元素电荷密度近似表示。

将导电薄膜电荷分布 $\sigma_{\text{real}}(r, \theta)$ 代入式 (4) 可以得到静电电荷分布 $q_{\text{real}}(r, \theta)$, 则导电薄膜产生镜面变形的驱动电荷 $q(r, \theta) = q_{\text{real}}(r, \theta)$, 代入式 (1) 获取受边缘效应影响下的镜面面型与电荷分布之间的定量关系, 表达式为

$$D\nabla^2 \nabla^2 \Phi_{\text{real}}(r, \theta) = \frac{\sigma_{\text{real}}(r, \theta)^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}. \quad (10)$$

至此, 建立了 EMDM 导电薄膜电荷分布及其镜面变形的理论模型, 基于此可以定量分析不同 EMDM 参数条件下镜面电荷分布情况和面型变化情况, 为量化分析边缘效应提供了途径。与式 (3) 对应的理想模型相比, 所提理论模型充分考虑到了边缘效应导致的电荷分布不均匀及其对面型影响问题, 能更好地反映电荷非均匀分布下实际 EMDM 的镜面面型, 为静电驱动薄膜变形镜电极边缘效应分析及校正能力评估提供了理论依据。

3 模拟仿真验证

3.1 EMDM 镜面变形

为了进一步分析边缘效应对镜面变形的影响, 基于 37 单元电极布局的 EMDM 结构, 评估不同电极间距 d 条件下的镜面面型, 并将结果与 COMSOL 的分析结果进行对比, 验证所提理论模型的准确性。37 单元 EMDM 驱动电极阵列分布如图 3 所示, 整体结构如图 1 所示, 六边形电极以均匀正六边形阵列方式排布, 六边形电极外接圆半径 $R=1 \text{ mm}$, 导电薄膜半径 $R_m=10 \text{ mm}$, 相邻电极中心间隔为 1.8 mm , 详细结构参数如表 1 所示。

为计算中心 0 号电极施加单位电压 EMDM 导电薄膜的镜面面型, 对电极与导电薄膜进行网格划分, 将划分后各子区域的位置坐标代入式 (7) 与式 (9) 计算电势影响矩阵 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{B}$, 电极施加单位电压导电薄膜接地, 依次计算矩阵方程式 (6) 与 (8) 获得 0 号电极作用下导电薄膜的电荷分布 $\sigma_{\text{real}}(r, \theta)$, 代入式 (10) 求得 EMDM 镜面面型 $\Phi_{\text{real}}(r, \theta)$, 如图 4(c) 所示。在 $d=150 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 理想模型的镜面面型 $\Phi_{\text{ideal}}(r, \theta)$, 如图 4(b) 所示。 $\Phi_{\text{ideal}}(r, \theta)$ 与数值仿真结果 (图 4(a)) 之间的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 $2.33 \times 10^{-4} \text{ }\mu\text{m}$, 而 $\Phi_{\text{real}}(r, \theta)$ 与数值仿真结果之间的 RMSE 为 $8.11 \times 10^{-45} \text{ }\mu\text{m}$ 。计算结果表明, 实际 EMDM 镜面变形受电极边缘电荷集聚效应影响与理想模型镜面变形存在较大偏差, 提出的考虑边缘效应模型能更准确计算 EMDM 的镜面面型。

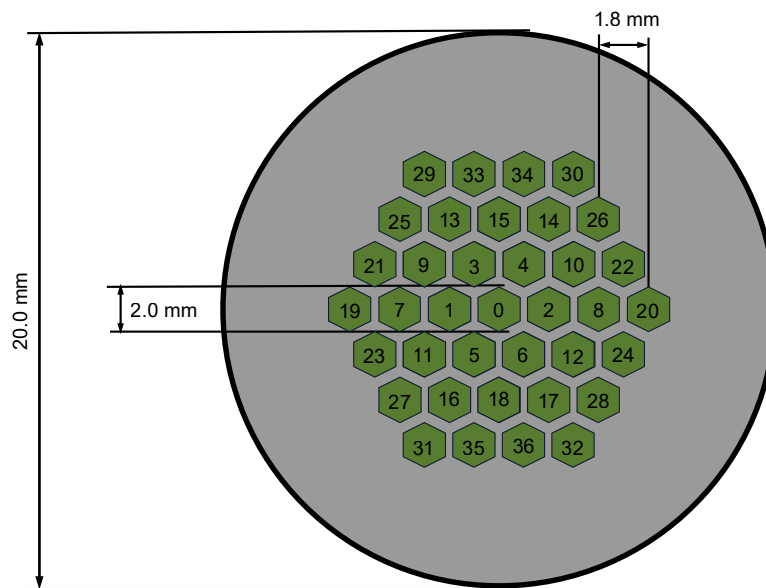


图 3 EMDM 电极分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of EMDM electrode distribution

表 1 EMDM 结构尺寸

Table 1 EMDM structure dimensions

组件	参数	值
薄膜	半径(R_m)/mm	10
	厚度(δ)/mm	0.1
	泊松比(μ)	0.49
	杨氏模量(E)/KPa	750
电介质	相对介电常数(ϵ_r)	3
电极	外接圆半径(R)/mm	1
	电压(V)/V	1

调节电极间距 d 由 $50\ \mu\text{m}$ 到 $750\ \mu\text{m}$ 变化, 所提模型与理想模型计算的镜面面型与数值仿真结果的相对误差如图 5 所示。当电极间距较小时, 边缘效应影响较弱, 两模型对镜面面型的计算差异不大, 但随着电极间距的增加, 边缘效应的影响逐渐扩大, 理想模

型无法表征电极边缘的集聚电荷对镜面变形的影响, 模型计算的准确度逐渐下降, 当电极间距 $d=750\ \mu\text{m}$ 时理想模型面型拟合的相对误差达到 5.8%, 这也从侧面验证了随电极间距增加边缘效应的影响也变得更为显著。当然, 最终边缘效应的影响量化指标与实际模型参数有关。然而, 所提模型对 EMDM 镜面变形计算的相对误差始终保持在 2% 以下, 表现出较好的模型计算准确性与结构参数的适应性。

3.2 边缘效应影响下 EMDM 校正能力评估准确性分析

EMDM 的优化设计依赖于对 EMDM 校正能力的准确评估, 为了进一步探究边缘效应在 EMDM 校正能力评估中的影响, 本节依据图 3 的结构布局, 为了突出显示边缘效应的影响, 以 RMSE 为 EMDM 校正

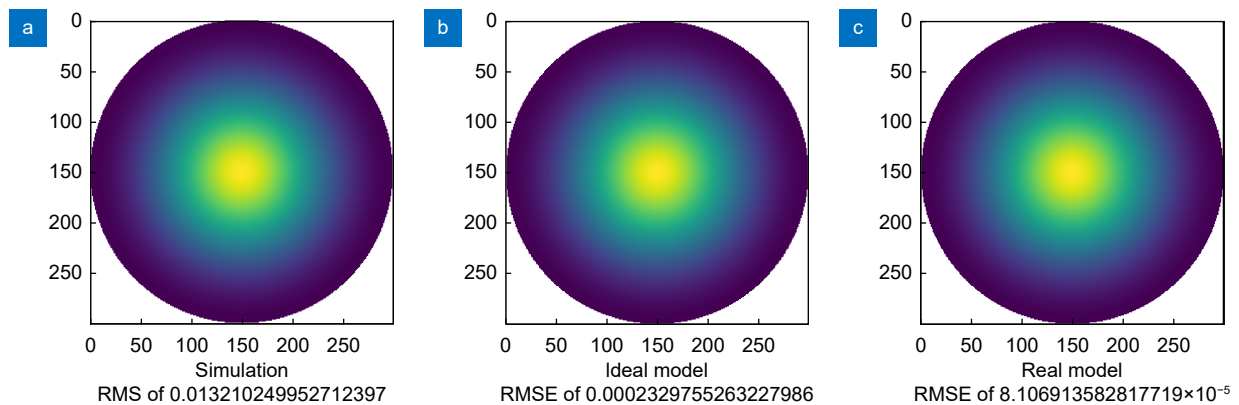


图 4 EMDM 中心电极作用下的镜面面型。(a) 数值仿真的镜面面型; (b) 所提模型的镜面面型; (c) 理想模型的镜面面型

Fig. 4 Mirror surface pattern under the action of EMDM center electrode. (a) Mirror surface profile for numerical simulation; (b) Mirror surface profile for the proposed model; (c) Mirror surface profile for the ideal model

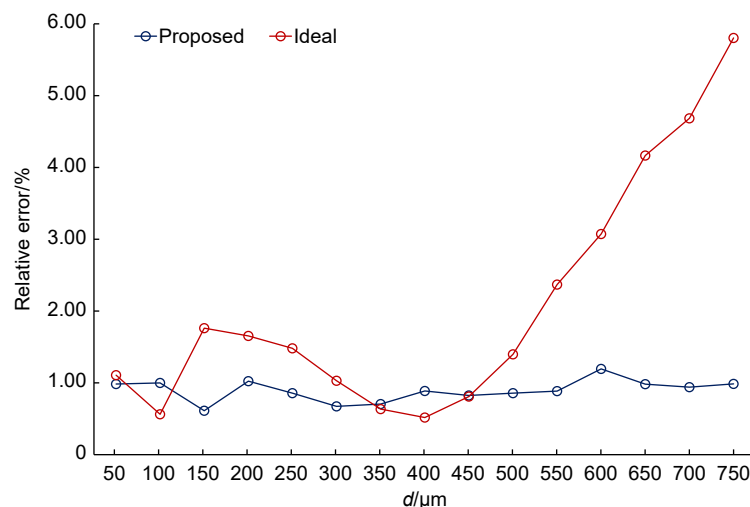


图 5 在不同电极间距 d 下, 所提模型与理想模型的面型拟合误差

Fig. 5 Surface shape fitting error between proposed model and ideal model under different electrode spacing d

能力的评估指标, 讨论电极间距 $d=750\ \mu\text{m}$ 时 EMDM 各电极的镜面变形, 依据 COMSOL 数值仿真结果, 对比理想模型与所提模型对均方根 (RMS) 为 1 的标准 Zernike 像差的实际校正效果, 进一步验证所提理论模型的准确性, 并说明本模型对 EMDM 校正能力评估的准确性。

将不同模型校正像差的控制信号作用于数值仿真系统, 获得模型对像差校正的实际校正效果, 并与数值仿真结果作对比。

数值仿真系统校正离焦像差的结果如图 6(a) 所示, 其对标准离焦像差面型拟合的 RMSE 为 0.1538。理想模型对离焦像差实际校正效果如图 6(b) 所示, 对校正离焦像差的评估结果 RMSE 为 0.193, 与仿真结果之间的相对误差约为 25.49%。所提模型对离焦像差实际校正效果如图 6(c) 所示, 对校正离焦像差的评估结果 RMSE 为 0.1643 与仿真结果较为接近, 与仿真结果之间的相对误差约为 6.83%, 相对理想模型在校正能力评估准确度方面有显著提升, 该评估分析对比方法详见图 7。这一分析结果证实了电极边缘电荷集聚效应对 EMDM 镜面变形及其评估准确性的影响, 也验证了所提考虑电极边缘效应下镜面变形评估理论模型的正确性和准确性。

图 8 给出了所提的理论模型与理想模型对前 15 项 Zernike 像差生成评估准确性对比分析结果。从中可以看出, 采用所提的理论模型对各阶 Zernike 像差评估误差均显著优于理想模型, 特别是在对前 4 项 Zernike 像差校正的评估计算中, 所提理论模型相对理想模型评估误差下降近 20%。这一结果说明了所提

模型对 EMDM 镜面面型拟合与波前像差校正计算的可靠性, 并验证了本理论模型对 EMDM 波前校正能力评估计算上更具准确性, 可以为 EMDM 自适应光学系统的结构设计及优化提供更准确更可靠的理论支撑。

4 总结与讨论

电极边缘效应随着电极间距的增大影响逐渐增强, 导致导电薄膜的电荷分布不均匀, 显著影响 EMDM 的镜面变形与校正能力评估, 以往理想的平行电容器模型无法准确反映这一现象。结合矩量法和镜像法对导电薄膜的载荷分布进行了详细求解, 构建 EMDM 导电薄膜电荷分布数字化模型对 EMDM 的镜面变形进行了准确求解。通过数值仿真与理论分析相结合的手段, 探究边缘效应对 EMDM 镜面面型与校正能力评估的影响, 研究结果表明本理论模型计算得到的镜面变形与仿真结果的相对误差不超过 2%, 对不同电极间距下的镜面面型计算均有较好的准确性与适应性。在 EMDM 校正能力评估方面, 本理论模型与仿真结果之间的相对误差始终保持在较低水平, 能够更准确的评估 EMDM 校正能力。本模型对各项像差校正能力的评估效果均有所提升, 其中离焦像差的校正能力评估误差从 25.49% 降低至 6.83%。这一结果也说明边缘效应对 EMDM 的波前校正评估的影响是不可忽视的, 考虑电极边缘效应对 EMDM 结构设计与优化的影响是必要的。

系统地研究了边缘效应对 EMDM 镜面变形及波前校正能力评估的影响。建立了考虑边缘效应影响的导电薄膜电荷分布模型, 深入揭示了边缘效应对

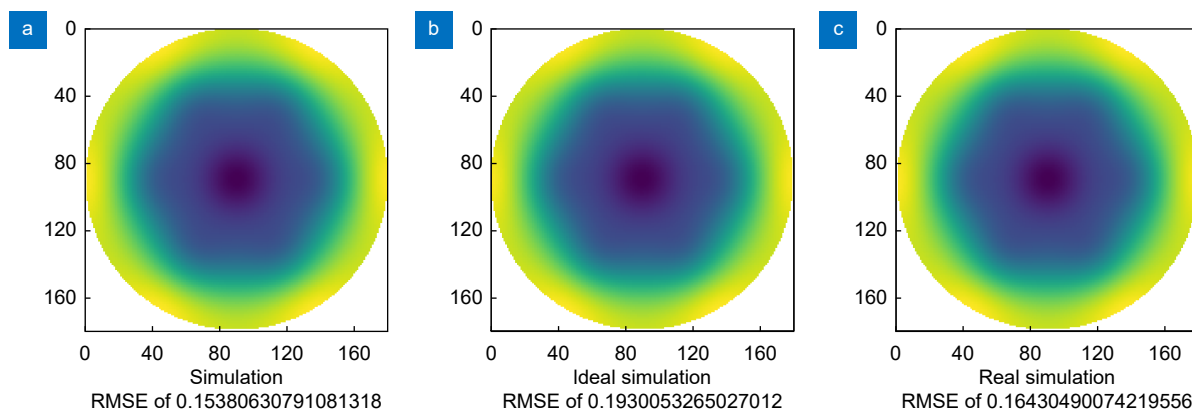


图 6 不同模型对离焦像差的实际校正效果。(a) 校正离焦像差的仿真结果; (b) 理想模型校正离焦像差的实际效果; (c) 所提模型校正离焦像差的实际效果

Fig. 6 Actual results of correcting the out-of-focus aberration by different models. (a) Simulation results of correcting the out-of-focus aberration; (b) Practical results of the ideal model for correcting the out-of-focus aberration; (c) Practical results of proposed model for correcting the out-of-focus aberration

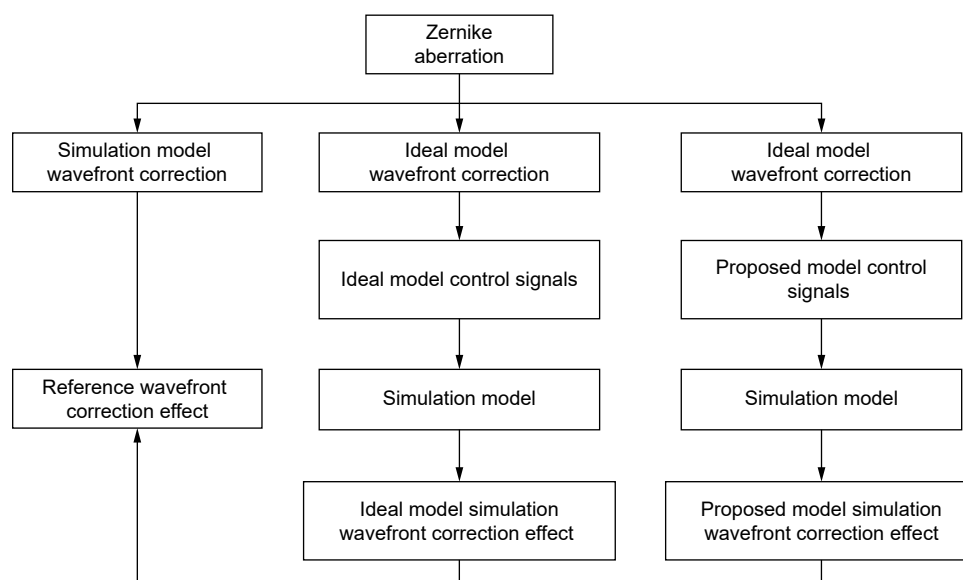


图 7 波前校正能力评估分析对比流程图

Fig. 7 Process flow diagram for comparing wavefront correction capability analysis

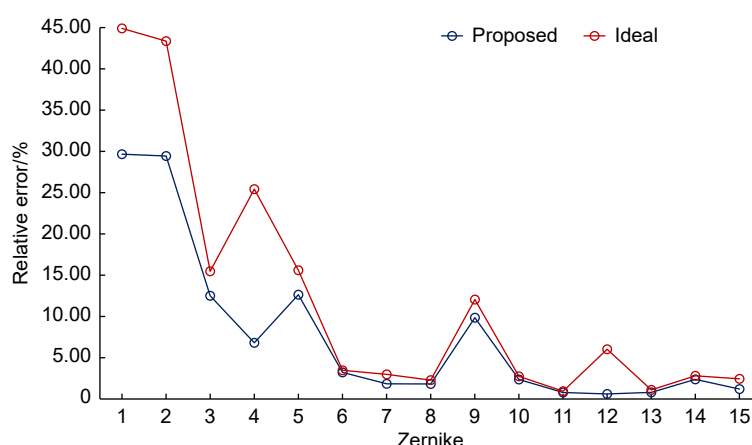


图 8 所提模型与理想模型对前 15 项 Zernike 像差生成评估准确性对比分析曲线

Fig. 8 Comparative analysis curves of the accuracy of the proposed model in this thesis and the ideal model for the first 15 Zernike aberration generation assessment

EMDM 的影响。本理论模型能够有效提高镜面变形计算的准确性, 为 EMDM 波前校正能力评估提供更准确的理论支持, 为 EMDM 在高精度波前校正领域的应用奠定了基础, 具有重要的理论和工程意义。未来的研究可进一步探索不同应用场景下的模型适应性, 特别是在更高校正精度要求的光学系统中。通过优化电极设计提升 EMDM 的波前校正能力, 满足更高的系统性能要求。

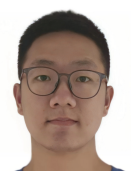
利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Jiang W H. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, 45(3): 170489.
- [2] Booth M J, Neil M A A, Juškaitis R, et al. Adaptive aberration correction in a confocal microscope[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99(9): 5788-5792.
- [3] Guo Y M, Chen K L, Zhou J H, et al. High-resolution visible imaging with piezoelectric deformable secondary mirror: experimental results at the 1.8-m adaptive telescope[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, 6(12): 230039.
- [4] Luo S, Wang J Q, Zhang B. Influence of fatigue characteristics of piezoelectric ceramics actuators on correction ability of deformable mirror[J]. *Chin J Lasers*, 2018, 45(9): 0905002.
- [5] Hermann B, Fernández E J, Unterhuber A, et al. Adaptive-optics ultrahigh-resolution optical coherence tomography[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(18): 2142-2144.
- [6] Zhao H X, Li K, Yang F, et al. Customized anterior segment photoacoustic imaging for ophthalmic burn evaluation in vivo[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(6): 200017.
- [7] Ren J, Lin H, Zheng X R, et al. Giant and light modifiable third-order optical nonlinearity in a free-standing h-BN film[J]. *Opto-*

- Electron Sci*, 2022, 1(6): 210013.
- [8] Jin K, Liu Y Q, Han J, et al. Study of high-efficiency metasurfaces based on optical thin films[J]. *Acta Opt Sin*, 2024, 44(10): 1026032.
金柯, 刘永强, 韩俊, 等. 基于光学薄膜的高效超构表面研究[J]. *光学学报*, 2024, 44(10): 1026032.
- [9] Kim D, Choi H, Brendel T, et al. Advances in optical engineering for future telescopes[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(6): 210040.
- [10] Xiong G Y, Tang A, Lan B, et al. Vortex field manipulation based on deformation mirror with continuous surface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(11): 220066.
熊光昀, 唐奥, 兰斌, 等. 基于连续镜面变形镜本征模方法的复杂涡旋光场调控[J]. *光电工程*, 2022, 49(11): 220066.
- [11] Zhao S M, Gu N T, Huang L H, et al. Low spatio-temporal frequency wavefront aberration correction technology of solar telescope[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, 52(7): 20220887.
赵思旻, 顾乃庭, 黄林海, 等. 太阳望远镜低时空频率波前像差校正技术[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(7): 20220887.
- [12] Zhu L J, Sun P C, Bartsch D U, et al. Adaptive control of a micromachined continuous-membrane deformable mirror for aberration compensation[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(1): 168–176.
- [13] Zeng Z G, Ling N. Research of analysis method for stress of discrete deformable thin mirror[J]. *Opt Precis Eng*, 1997, 5(5): 21–29.
曾志革, 凌宁. 分立式变形反射镜薄镜面的应力分析方法研究[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(5): 21–29.
- [14] Yan J L, Zhao Y, Yu F, et al. Theory and simulation of MEMS deformable mirror[J]. *Proc SPIE*, 2006, 6032: 60320J.
- [15] Chen L Z, Guan X W, Zhang Z. Development and application of MEMS deformable mirror[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2010, 47(2): 022201.
陈力子, 关小伟, 张政. 微变形反射镜技术应用及发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(2): 022201.
- [16] Ma J Q, Liu Y, Chen J J, et al. Design and performance testing of 200-element silicon unimorph deformable mirror[J]. *Opt Precis Eng*, 2014, 22(8): 2047–2053.
马剑强, 刘莹, 陈俊杰, 等. 200单元硅基单压电变形镜的设计与测试[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2047–2053.
- [17] Xiong L, Hu J, Yang Z, et al. Research progress of microcapacitors: from preparation technology to development trend[J]. *Opt Precis Eng*, 2021, 29(12): 2818–2831.
熊黎, 胡晋, 杨翌, 等. 微电容器的研究进展: 从制备工艺到发展趋势[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(12): 2818–2831.
- [18] Zhang Y, Jin G. Research on electrostatic deformation of membrane mirror[J]. *Opt Precis Eng*, 2009, 17(2): 267–273.
张鹰, 金光. 薄膜反射镜静电成形机理研究[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 267–273.
- [19] Yan Z H, Zhou Z Y, Li Y, et al. Study on the charge driven displacement behavior of the actuator of the point ahead angle mechanism of a space gravitational wave telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(11): 230223.
闫泽昊, 周子夜, 李杨, 等. 空间引力波望远镜超前瞄准机构致动器电荷驱动位移行为研究[J]. *光电工程*, 2023, 50(11): 230223.
- [20] Chien W Z, Wang Z Z, Xu Y G, et al. The symmetrical deformation of circular membrane under the action of uniformly distributed loads in its central portion[J]. *Appl Math Mech*, 1981, 2(6): 599–612.
- [21] Li S C, Dong Z Z. The natural boundary element method for the bending of the elastic thin circular plate under the discontinuous load[J]. *J Guangdong Univ Technol*, 2003, 20(4): 96–100.
李顺才, 董正筑. 非连续载荷作用下圆板弯曲的自然边界元法[J]. *广东工业大学学报*, 2003, 20(4): 96–100.
- [22] Eriksson E. Low-order aberration correction with a membrane deformable mirror for adaptive optics[D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2004.
- [23] Fernández E J, Artal P. Membrane deformable mirror for adaptive optics: performance limits in visual optics[J]. *Opt Express*, 2003, 11(9): 1056–1069.
- [24] An Y, Jin G, Qi Y C, et al. The test design of shape controlled with single electrode Electrostatic about the membrane mirror[J]. *Opt Precis Eng*, 2009, 17(8): 1964–1970.
安源, 金光, 齐迎春, 等. 薄膜反射镜的单电极控制静电成形[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1964–1970.
- [25] Lei J H. Influence of plate spacing on capacitive edge effect[J]. *Comput Telecommun*, 2013, (7): 57–58,64.
雷建华. 极板间距对平行板电容边缘效应的影响研究[J]. *电脑与电信*, 2013, (7): 57–58,64.
- [26] Yariv E. Edge corrections for parallel-plate capacitors[J]. *Eur J Appl Math*, 2021, 32(2): 226–241.
- [27] Liu Y B, Yuan W Z, Qiao D Y, et al. Design and modes of a novel two-dimensional microscanner with electrostatic actuation[J]. *Acta Opt Sin*, 2013, 33(6): 0623001.
刘耀波, 苑伟政, 乔大勇, 等. 一种新型静电驱动二维微型扫描镜的设计及模式[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0623001.
- [28] Wang S G, Guan X P, Wang D W, et al. Solution of the electric field integral equation using higher-order method of moments[J]. *J Electron Inf Technol*, 2007, 29(9): 2265–2268.
王少刚, 关鑫璞, 王党卫, 等. 求解电场积分方程的高阶矩量法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(9): 2265–2268.
- [29] Liu Y N, Pan X M, Sheng X Q. A new method for accuracy analysis in method of moments[J]. *Trans Beijing Inst Technol*, 2016, 36(7): 723–726.
刘燕楠, 潘小敏, 盛新庆. 一种矩量法精度分析验证方法研究[J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(7): 723–726.
- [30] Jebri Z, Taleb Ali M. Calculations and strategies to mitigate edge phenomena in planar capacitors[J]. 2023.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3754607/v1>.

作者简介



贾浩磊 (2000-), 男, 硕士研究生, 目前就读于中国科学院大学, 主要研究方向为光流体波前校正技术研究。

E-mail: jiahaolei22@mailsucas.ac.cn



【通信作者】顾乃庭 (1984-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事光电成像及探测技术研究和系统研制, 具体包括光电望远镜、自适应光学以及偏振成像等。

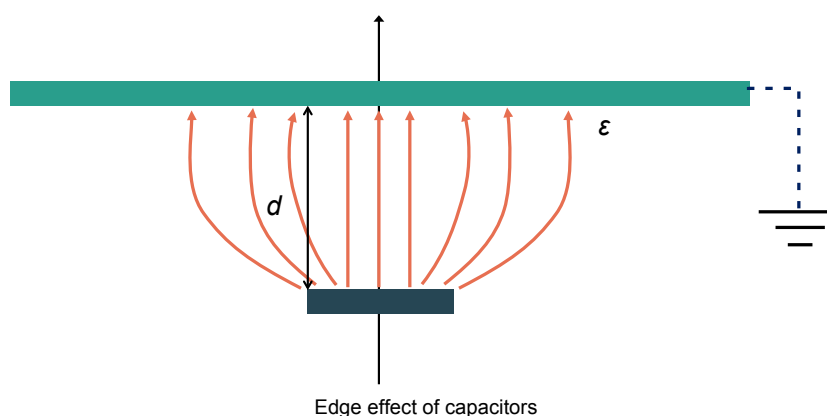
E-mail: gnt7328@163.com



扫描二维码, 获取PDF全文

Electrostatically driven membrane deformable mirror edge effects and their influence on the evaluation of correction capability

Jia Haolei^{1,2,3,4}, Gu Naiting^{5*}, Zhong Libo^{1,2}



Overview: Electrostatically driven membrane deformable mirrors (EMDMs), as key components in adaptive optical systems, overcoming the limitations of traditional mechanical deformable mirrors in terms of size, response speed, and stability. EMDMs offer high surface precision, low power consumption, fast response speed, and long-term stability, which makes them essential for applications such as microscopy imaging and vision correction. The correction capabilities of EMDMs directly determine the overall performance of adaptive optical systems, with an accurate electrostatic load distribution model being critical for predicting the membrane deformation and evaluating the mirror's correction performance. However, current models often neglect the edge effects of the electrodes, which reduces the accuracy of deformation calculations and impacts the system's optimization and performance evaluation.

Traditionally, EMDM designs are based on ideal parallel capacitor models, assuming uniform electrostatic loads across the electrode's and conductive membrane's projection area. While this simplifies calculations and provides reasonable accuracy, it fails to account for the edge effects, in which the electric field strength near the edges of the electrodes is significantly stronger. This edge effect exacerbates membrane deformation, and affects the control accuracy and wavefront correction capability. To address this issue, this study improves the existing models by considering the edge effects, employing the method of image electrodes and the moment method to compute the charge distribution and electrostatic potential. This approach provides a more realistic description of the non-uniformity of the electric field at the edges of the electrodes. The proposed model overcomes the limitations of previous models by offering a more accurate charge distribution, which improves the deformation prediction accuracy. Compared with COMSOL simulation results shows that the relative error in membrane deformation calculations does not exceed 2%, and the wavefront correction evaluation error is reduced from 25.49% to 6.83%. These results demonstrate the effectiveness and accuracy of the model, and offers a theoretical foundation and application basis for the optimization of EMDM parameters and high-precision wavefront correction.

Jia H L, Gu N T, Zhong L B. Electrostatically driven membrane deformable mirror edge effects and their influence on the evaluation of correction capability[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(5): 250025; DOI: [10.12086/oee.2025.250025](https://doi.org/10.12086/oee.2025.250025)

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2021YFC2202200&2021YFC2202204), National Natural Science Foundation of China (12293031,12022308&61905252), and Excellent Member of Chinese Academy of Sciences Youth Promotion Association (Y2022097)

¹National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu, Sichuan 610209, China; ²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁵College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

* E-mail: gnt7328@163.com