

DOI: 10.3901/JME.2021.22.369

# 基于回归模型的 SDBD-PA 击穿特性试验研究<sup>\*</sup>

张扬辉 胡兴军 刘一尘 李久超 余天明 桑涛 王靖宇  
(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130025)

**摘要:** 近年来, 表面介质阻挡放电等离子体激励器(Surface dielectric barrier discharge plasma actuator, SDBD-PA)已经成为流动控制领域的研究热点。为研究 SDBD-PA 的击穿特性, 为 SDBD-PA 相关研究的参数区间选取提供参考, 首先采用控制变量法研究各激励器参数对 SDBD-PA 击穿电压和放电稳定性的影响, 然后选取对击穿电压有影响的激励器参数, 基于 DOE 方法进行试验, 使用 Isight 软件建立二次回归模型并分析激励器参数对击穿电压的影响。研究结果表明, 对 SDBD-PA 击穿电压和放电稳定性有影响的参数包括频率  $f$ 、电极间隙  $d_1$  和激励器长度  $L$ ; 拟合所得三元二次回归模型经验证具有良好的精确度, 可作为 SDBD-PA 击穿电压的预测模型; 对 SDBD-PA 击穿电压影响最大的参数是  $f$ , 其次为  $L$  和  $d_1$ ;  $f$  和  $L$  对击穿电压的影响为负效应,  $d_1$  对击穿电压的影响为正效应;  $d_1$  和  $f$  之间以及  $f$  和  $L$  之间的交互作用对击穿电压也有很大影响,  $d_1$  和  $L$  之间的交互作用对击穿电压的影响非常小。

**关键词:** 介质阻挡放电; 击穿电压; 回归模型

**中图分类号:** O461

## Experimental Study on Breakdown Characteristics of SDBD-PA Based on Regression Model

ZHANG Yanghui HU Xingjun LIU Yichen LI Jiuchao YU Tianming SANG Tao  
WANG Jingyu

(State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025)

**Abstract:** In recent years, surface dielectric barrier discharge plasma actuator(SDBD-PA) has become a research hotspot in the field of flow control. In order to study the breakdown characteristics of SDBD-PA and provide a reference for the selection of parameter interval of SDBD-PA related research, the control variable method is used to study the influence of the actuator parameters on SDBD-PA breakdown voltage and discharge stability, select the actuator parameters that have an effect on the breakdown voltage, experiment based on DOE method, use the Isight software to establish the quadratic regression model and analyze the effect of actuator parameters on the breakdown voltage. The results show that the parameters affecting the breakdown voltage and discharge stability of SDBD-PA are as follows: frequency  $f$ , electrode gap  $d_1$  and the length of the actuator  $L$ ; the fitting ternary quadratic regression model is proved to have good accuracy and can be used as the prediction model of SDBD-PA breakdown voltage;  $f$  is the most influential parameter to SDBD-PA breakdown voltage, followed by  $L$  and  $d_1$ ;  $f$  and  $L$  have a negative effect on the breakdown voltage, while  $d_1$  has a positive effect; the interaction between  $d_1$  and  $f$  and between  $f$  and  $L$  also have a great influence on the breakdown voltage, but the interaction between  $d_1$  and  $L$  has a very small influence on the breakdown voltage.

**Key words:** dielectric barrier discharge; breakdown voltage; regression model

## 0 前言

根据等离子体的产生方式, 等离子体激励器可

分为以下几种<sup>[1]</sup>: 激光诱导等离子体、电晕放电等离子体、电弧放电等离子体、介质阻挡放电(Dielectric barrier discharge, DBD)等离子体等。近年来, 表面介质阻挡放电等离子体激励器(Surface dielectric barrier discharge plasma actuator, SDBD-PA)因具有结构简单、工作稳定、响应迅速等优点<sup>[2]</sup>,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51875238)。20210113 收到初稿, 20210628 收到修改稿

已经成为机翼分离流动控制<sup>[3-6]</sup>、边界层转捩控制<sup>[7-9]</sup>、后台阶分离流动控制<sup>[10-12]</sup>、气动噪声控制<sup>[13-14]</sup>等领域的研究热点。典型的 SDBD-PA 激励器结构如图 1 所示。激励器表面空气在外加高电压作用下发生击穿,电离形成的离子在电场的驱动下运动并与中性气体分子发生碰撞传递能量,进而在近壁面诱导气流加速,产生离子风<sup>[15]</sup>。

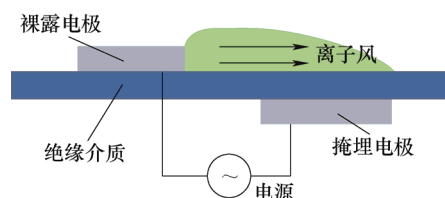


图 1 典型的 SDBD-PA 结构

随着供电电压的升高,激励器表面的空气状态会经历绝缘、击穿、放电三个阶段<sup>[16]</sup>: ① 绝缘阶段: 由于供电电压较低,无法提供足够的能量使气体分子进行非弹性碰撞,电子数无法大量增加,反应区气体仍处于绝缘状态; ② 击穿阶段: 升高供电电压,提供的能量足以使气体发生离子化的非弹性碰撞后,当电子密度超过某一临界值时,反应区气体瞬间发生击穿; ③ 放电阶段: 若再继续升高供电电压,激励器将进入正常放电状态,大量无规则分布的细丝状微放电通道会出现在电极间反应区。

在应用 DBD-PA 进行参数研究和流动控制时,需要在正常放电状态下进行试验,因此对 DBD-PA 的击穿特性进行研究具有重要意义。对于对面型 DBD 结构,击穿电压与气压和电极间隙之间的关系可以用帕邢曲线来表示<sup>[17]</sup>。欧阳吉庭等<sup>[18]</sup>利用拉普拉斯方程求出了共面型 DBD 结构电势空间分布的解析解,并据此研究了其击穿特性。针对于本文所研究 SDBD-PA 的击穿特性没有学者进行过相关研究。

本文对 SDBD-PA 的击穿特性进行试验研究。首先采用控制变量法研究各激励器参数对 SDBD-PA 击穿电压和放电稳定性的影响,并选取对击穿电压有影响的参数。然后以有影响的激励器参数为设计变量,以击穿电压为目标变量,基于 DOE 方法进行试验,使用 Isight 软件建立二次回归模型并分析激励器参数对击穿电压的影响,为 SDBD-PA 相关研究的参数区间选取提供参考。

## 1 试验装置

本文所采用激励器电源型号为南京苏曼等

离子科技有限公司 CTP-2000K,可输出峰峰值电压 0~30 kV 的正弦交流电压,频率可调范围 5~20 kHz,中心频率为 10 kHz,最大功率 500 W。输入电压和电流由激励器电源实时显示,而激励电压峰峰值和激励频率由 TDS1002 示波器实时显示。

激励器达到正常放电状态后,放电区域是由大量无规则分布的细丝状微放电通道组成<sup>[16]</sup>。放电具有一定的不稳定性,因此激励电压会在一定范围内波动。在试验中记录激励器刚达到正常放电时激励电压峰峰值波动区间的最大值和最小值,将区间中点即最大值和最小值的平均值  $V_b$  记为击穿电压,并以波动区间长度最大值与最小值之差  $\Delta V_b$  评价激励器的放电稳定性。

本文所研究的 SDBD-PA 参数如图 2 所示,包括激励频率  $f$ 、电极间隙  $d_1$ 、上电极宽度  $d_2$ 、下电极宽度  $d_3$ 、激励器长度  $L$ 、绝缘胶带层数  $t$ 。上下电极采用铜箔胶带,厚度 0.05 mm。绝缘介质采用单层厚度 0.05 mm、介电常数  $\epsilon_r=3.5$  的聚酰亚胺薄膜。

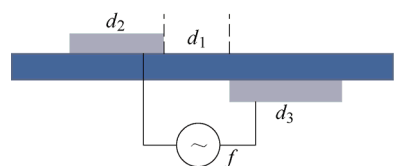


图 2 SDBD-PA 参数

## 2 试验结果及分析

### 2.1 控制变量法

首先通过控制变量法研究各参数对击穿电压和放电稳定性的影响,并选取对击穿电压有影响的参数。基础参数组合如表 1 所示,各参数取值如表 2 所示。

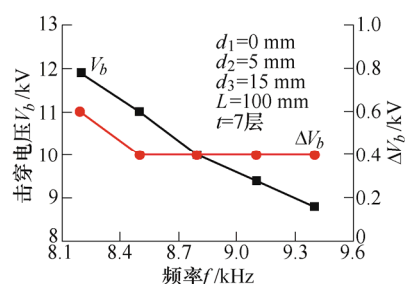
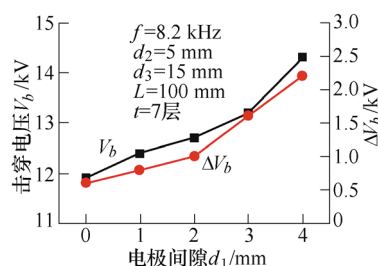
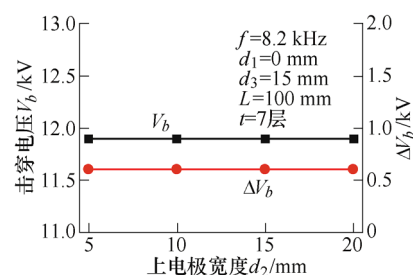
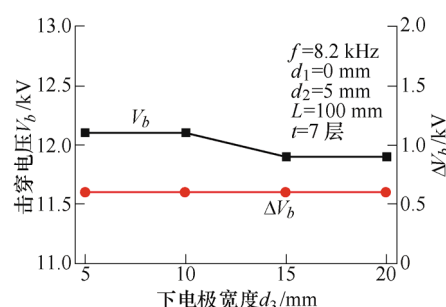
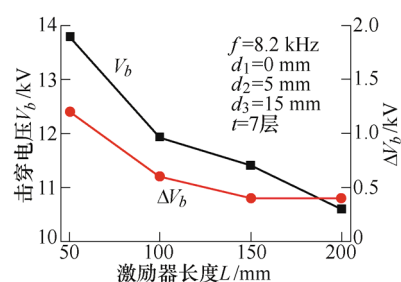
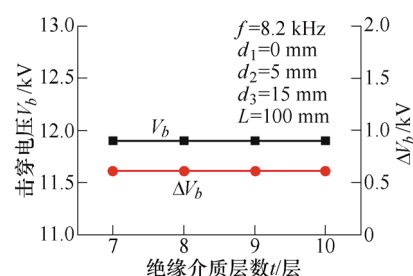
表 1 基础参数组合

因素	取值
频率 $f/\text{kHz}$	8.2
电极间隙 $d_1/\text{mm}$	0
上电极宽度 $d_2/\text{mm}$	5
下电极宽度 $d_3/\text{mm}$	15
激励器长度 $L/\text{mm}$	100
绝缘胶带层数 $t/\text{层}$	7

表 2 激励器参数取值

因素	水平				
	1	2	3	4	5
频率 $f/\text{kHz}$	8.2	8.5	8.8	9.1	9.4
电极间隙 $d_1/\text{mm}$	0	1	2	3	4
上电极宽度 $d_2/\text{mm}$	5	10	15	20	—
下电极宽度 $d_3/\text{mm}$	5	10	15	20	—
激励器长度 $L/\text{mm}$	50	100	150	200	—
绝缘胶带层数 $t/\text{层}$	7	8	9	10	—

图 3~8 显示了各激励器参数对击穿电压  $V_b$  和放电稳定性  $\Delta V_b$  的影响。由图 5、6、8 可知, 上电极宽度  $d_2$ 、下电极宽度  $d_3$  和绝缘胶带层数  $t$  对击穿电压和放电稳定性均无明显影响, 击穿电压  $V_b$  为 11.9 kV 左右,  $\Delta V_b$  均为 0.6 kV。由图 3 可知, 随着频率  $f$  的增加,  $V_b$  逐渐降低,  $f=9.4$  kHz 时, 激励电压达到 8.8 kV 时即可正常放电;  $\Delta V_b$  降到 0.4 kV 时不再变化, 放电均比较稳定。由图 4 可知,  $V_b$  和  $\Delta V_b$  均随电极间隙  $d_1$  的增加而升高, 达到正常放电所需的激励电压越来越高且放电越来越不稳定。由图 7 可知,  $V_b$  和  $\Delta V_b$  均随激励器长度的增加而降低,  $L=200$  mm 时, 激励电压达到 10.6 kV 时可正常放电;  $L$  达到 100 mm 以上时  $\Delta V_b$  降到 0.6 kV 以下, 放电稳定较好。

图 3 频率  $f$  对击穿电压和放电稳定性影响图 4 电极间隙  $d_1$  对击穿电压和放电稳定性影响图 5 上电极宽度  $d_2$  对击穿电压和放电稳定性影响图 6 下电极宽度  $d_3$  对击穿电压和放电稳定性影响图 7 激励器长度  $L$  对击穿电压和放电稳定性影响图 8 绝缘介质层数  $t$  对击穿电压和放电稳定性影响

## 2.2 DOE 试验设计及结果分析

DOE 是一种结合数理统计和正交原理对试验空间进行合理设计的方法<sup>[19]</sup>。Isight 软件中提供的常用的试验设计方法主要包括参数试验法(PS)、全因子设计法(FFD)、部分因子设计法(FF)、正交数组法(OA)、优化的拉丁超立方设计法(OLHD)等<sup>[20]</sup>。本文采用优化拉丁超立方方法生成样本点, 该方法通过采用较少的样本点以及对样本空间强有力的均匀覆盖能力, 被广泛应用于工

程实践与研究中<sup>[21]</sup>。由第 2.1 节控制变量法分析结果可知, 上电极宽度  $d_2$ 、下电极宽度  $d_3$  和绝缘介质层数  $t$  对击穿电压  $V_b$  无明显影响。因此, 选取频率  $f$ 、电极间隙  $d_1$  和激励器长度  $L$  为设计变量, 击穿电压  $V_b$  为目标变量。各设计变量取值范围如表 3 所示。选取 11 个样本点, 生成的样本点及试验结果如表 4 所示。

表 3 设计变量取值范围

设计变量	最小值	最大值
频率 $f/\text{kHz}$	8	10
电极间隙 $d_1/\text{mm}$	0	5
激励器长度 $L/\text{mm}$	50	200

表 4 样本点及试验结果

样本点	频率 $f/\text{kHz}$	电极间隙 $d_1/\text{mm}$	激励器长度 $L/\text{mm}$	击穿电压 $V_b/\text{kV}$
1	9.6	4.5	80	9.3
2	8.2	0.5	110	12.4
3	8	3.5	140	14.5
4	9.2	1	50	10
5	9	2.5	125	10.4
6	10	2	95	8.6
7	8.6	1.5	200	10.5
8	9.8	3	185	8.7
9	8.8	5	170	11.3
10	8.4	4	65	14
11	9.4	0	155	9.3

根据上述样本点在 Isight 中拟合三元二次回归模型如式(1)所示, 该模型也可作为 SDBD-PA 击穿电压的预测模型

$$y = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_1^2 + c_5x_2^2 + c_6x_3^2 + c_7x_1x_2 + c_8x_1x_3 + c_9x_2x_3 \quad (1)$$

式中  $y$ ——击穿电压  $V_b$ ;

$x_1$ ——频率  $f$ ;

$x_2$ ——电极间隙  $d_1$ ;

$x_3$ ——激励器长度  $L$ 。

其余为各项系数。

拟合所得回归模型系数表如表 5 所示。第一列即为回归模型各项的系数; 第二列为把设计变量归一化至 $[-1,1]$ 后用最小二乘法拟合后的模型系数, 能够公平地反映各设计变量对目标变量的影响<sup>[22]</sup>; 第三列为将归一化后的模型系数转化为贡献率百分比后的结果, 转化过程如式(2)所示

$$N_{x_i} = 100S_{x_i} / \sum_j |S_{x_j}| \quad (2)$$

式中,  $N_{x_i}$  为标准化后的模型系数;  $S_{x_i}$  为归一化后的模型系数。

表 5 回归模型系数表

	系数	归一化	标准化
常数项	114.66		
$d_1$	3.80	0.57	8.36
$f$	-20.19	-2.78	-40.66
$L$	-0.09	-0.57	-8.39
$d_1^2$	0.01	0.08	1.23
$f^2$	0.96	0.96	14.03
$L^2$	0.00	-0.02	-0.22
$d_1f$	-0.39	-0.98	-14.30
$d_1L$	0.00	-0.18	-2.67
$fL$	0.01	0.69	10.12

回归模型拟合  $R^2=1$ , 拟合精确度较高。为进一步说明回归模型拟合精确度, 选取单因素控制变量法试验所有参数组合, 对比试验结果与拟合回归模型预测结果, 如表 6 所示, 14 组参数组合回归模型预测误差均在工程可接受范围内, 进一步说明该回归模型可用于 SDBD-PA 击穿电压预测, 为 SDBD-PA 相关研究的参数区间选取提供参考。

表 6 回归模型精度验证

频率 $f/\text{kHz}$	电极间隙 $d_1/\text{mm}$	激励器长度 $L/\text{mm}$	击穿电压 $V_b/\text{kV}$		误差 (%)
			试验	预测	
8.2	0	100	11.9	12.3	3.2
8.5	0	100	11.0	11.3	2.7
8.8	0	100	10	10.5	4.9
9.1	0	100	9.4	9.8	4.8
9.4	0	100	8.8	9.4	6.6
8.2	0	100	11.9	12.3	3.2
8.2	1	100	12.4	12.8	3.1
8.2	2	100	12.7	13.3	4.9
8.2	3	100	13.2	13.9	5.3
8.2	4	100	14.3	14.4	1.3
8.2	0	50	13.8	12.9	-6.6
8.2	0	100	11.9	12.3	3.2
8.2	0	150	11.4	11.6	2.2
8.2	0	200	10.6	11.0	3.8

将标准化后的系数用柱状图表示即为 Pareto 图, 直观地反映各设计变量及其交互作用对目标变量的影响, 深色代表正效应, 浅色代表负效

应<sup>[22]</sup>, 如图 9 所示。从图 9 可知, 对 SDBD-PA 击穿电压影响最大的变量是频率  $f$ , 其次为激励器长度  $L$  和电极间隙  $d_1$ ; 另外, 电极间隙  $d_1$  和频率  $f$  之间以及频率  $f$  和激励器长度  $L$  之间的交互作用对击穿电压也有很大影响, 电极间隙  $d_1$  和激励器长度  $L$  之间的交互作用对击穿电压的影响非常小。

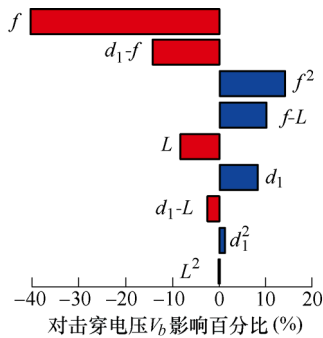


图 9 回归模型 Pareto 图

如图 10 所示为三个设计变量对目标变量的主效应图。主效应图指由于设计变量间的交互作用, 改变单个设计变量的水平, 用每个水平和其他设计变量的所有可能的组合对目标变量的影响的平均值说话的图, 反映了各设计变量对目标变量的影响程度<sup>[22]</sup>。从图 10 可知, 频率  $f$  对 SDBD-PA 击穿电压的影响最大, 其次为电极间隙  $d_1$  和激励器长度  $L$ , 且频率  $f$  和激励器长度  $L$  对击穿电压的影响为负效应, 电极间隙  $d_1$  对击穿电压的影响为正效应, 与 Pareto 图所得结论一致。

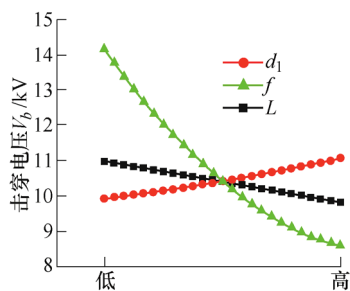
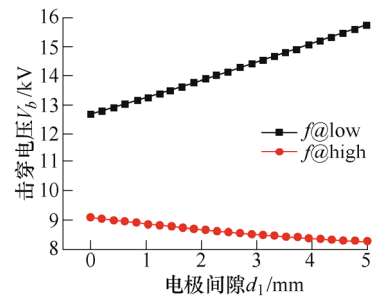
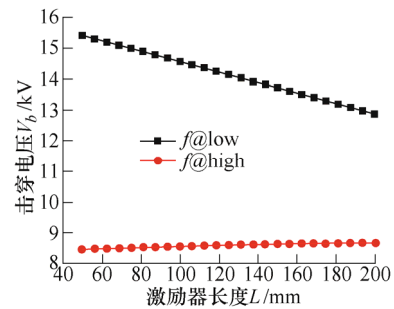
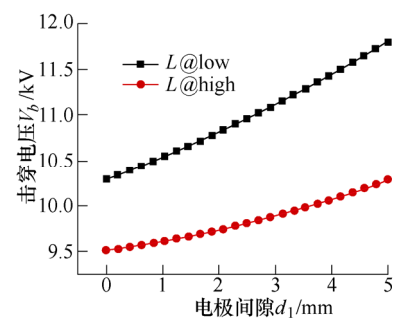


图 10 主效应图

如图 11~13 所示为三个设计变量两两之间的交互效应图。在第二个设计变量取不同的水平时, 分别绘制第一个设计变量的主效应图, 然后叠加而成即为交互效应图<sup>[22]</sup>。图中两条线的不平行程度反映了两个设计变量交互作用的强弱。由图 11~13 可知, 频率  $f$  和电极间隙  $d_1$  之间以及频率  $f$  和激励器长度  $L$  之间存在比较强的交互作用, 而电极间隙  $d_1$  和激励器长度  $L$  之间基本不存在交互作用, 同样与 Pareto 图所得结论一致。

图 11 频率  $f$  和电极间隙  $d_1$  间交互效应图图 12 频率  $f$  和激励器长度  $L$  间交互效应图图 13 激励器长度  $L$  和电极间隙  $d_1$  间交互效应图

### 3 结论

本文对 SDBD-PA 的击穿特性进行了试验研究, 得到结论如下。

(1) 采用控制变量法得到对 SDBD-PA 击穿电压和放电稳定性有影响的参数为频率  $f$ 、电极间隙  $d_1$  和激励器长度  $L$ 。

(2) 基于 OLHD 生成样本点进行试验, 拟合所得三元二次回归模型经验证具有良好的精确度, 可作为 SDBD-PA 击穿电压的预测模型。

(3) 对 SDBD-PA 击穿电压影响最大的参数是频率  $f$ , 其次为激励器长度  $L$  和电极间隙  $d_1$ ; 且频率  $f$  和激励器长度  $L$  对击穿电压的影响为负效应, 电极间隙  $d_1$  对击穿电压的影响为正效应。

(4) 电极间隙  $d_1$  和频率  $f$  之间以及频率  $f$  和激励器长度  $L$  之间的交互作用对击穿电压也有很大影

响, 电极间隙  $d_1$  和激励器长度  $L$  之间的交互作用对击穿电压的影响非常小。

### 参 考 文 献

- [1] 杜海. 纳秒脉冲介质阻挡放电等离子体激励器流动控制原理及应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.  
DU Hai. Nanosecond pulse dielectric barrier discharge plasma actuator flow control mechanisms and application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [2] 张鑫, 黄勇, 阳鹏宇, 等. 等离子体激励器诱导射流的湍流特性研究[J]. 力学学报, 2018, 50(4): 776-786.  
ZHANG Xin, HUANG Yong, YANG Pengyu, et al. Investigation on the turbulent characteristics of the jet induced by a plasma actuator[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(4): 776-786.
- [3] DURASIEWICZ C, SINGH A, LITTLE J. A comparative flow physics study of Ns-DBD vs Ac-DBD plasma actuators for transient separation control on a NACA 0012 airfoil[C]//2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee, FL, USA: 2018-1061.
- [4] KURZ A, GRUNDMANN S, TROPEA C, et al. Boundary layer transition control using DBD plasma actuators[J]. Aerospace Lab, 2013(6): 1-8.
- [5] MOREAU E, DEBIEN A, BREUX J M, et al. Control of a turbulent flow separated at mid-chord along an airfoil with DBD plasma actuators[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 83: 78-87.
- [6] 李国强, 常智强, 张鑫, 等. 翼型动态失速等离子体流动控制试验[J]. 航空学报, 2018, 39(8): 122111.  
LI Guoqiang, CHANG Zhiqiang, ZHANG Xin, et al. Experiment on flow control of airfoil dynamic stall using plasma actuator[J]. Act Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(8): 122111.
- [7] BARANOVA S A, KISELEVA A F, MORALEVA I A, et al. Control of the laminar-turbulent transition in a three-dimensional boundary layer under elevated external turbulence using dielectric barrier discharge[J]. Doklady Physics, 2019, 64(6): 264-268.
- [8] JOUSSOT R, WEBER R, LEROY A, et al. Transition control using a single plasma Actuator[J]. International Journal of Aerodynamics, 2013, 3(1/2/3): 26-46.
- [9] 陆纪椿, 史志伟, 杜海, 等. 等离子体激励器控制平板边界层转捩实验研究[J]. 航空学报, 2016, 37(4): 1166-1173.  
LU Jichun, SHI Zhiwei, DU Hai, et al. Experimental study of controlling flat transition using surface dielectric barrier discharge actuator[J]. Act Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(4): 1166-1173.
- [10] POURYOUSSEFI S G, MIRZAEI M, HAJIPOUR M. Experimental study of separation bubble control behind a backward-facing step using plasma actuators[J]. Acta Mechanica, 2015, 226(4): 1153-1165.
- [11] KONTIS K, BEHTASH H Z, ROY S. Flow control at subsonic speeds using serpentine plasma actuators[C]//45th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. Atlanta, GA, 2014-2812.
- [12] 王斌, 李华星. 等离子体对流动湍动能的控制[J]. 航空学报, 2015, 36(12): 3809-3821.  
WANG Bin, LI Huaxing. Control of flow turbulent kinetic energy by plasma[J]. Act Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(12): 3809-3821.
- [13] SADAWI L A, CHONG T P, KIM J H. Aerodynamic noise reduction by plasma actuators for a flat plate with blunt trailing edge[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 439: 173-193.
- [14] KOPIEV V F, KAZANSKY P N, KOPIEV V A, et al. HF DBD plasma actuators for reduction of cylinder noise in flow[J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2017, 50(47): 1.
- [15] 胡兴军, 惠政, 郭鹏, 等. 基于等离子体流动控制的车体减阻试验研究[J]. 华南理工大学学报, 2019, 47(11): 10-15.  
HU Xingjun, HUI Zheng, GUO Peng, et al. Experimental investigation into vehicle drag deduction based on plasma flow control[J]. Journal of South China University of Technology, 2019, 47(11): 10-15.
- [16] 惠政. 基于等离子体主动流动控制的车辆减阻研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
HUI Zheng. Research on vehicle drag reduction based on plasma active flow control[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [17] JACKSON J D. Classical electrodynamics[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1975.
- [18] 欧阳吉庭, 曹菁, 何锋. 共面型介质阻挡放电的击穿特性[J]. 北京理工大学学报, 2005, A1: 4-7.  
OUYANG Jiting, CAO Jing, HE Feng. The breakdown characteristics of coplanar dielectric barrier discharge[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, A1: 4-7.
- [19] 任露泉. 试验优化技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

- REN Luquan. Experiment design technique[M]. Beijing: China Machine Press, 1987.
- [20] KELTON W D. A tutorial on design and analysis of simulation experiments[C]//Proceedings of the 27th conference on winter simulation. Arlington, Virginia, USA: 1955.
- [21] 刘龙威. 造型初期重型商用车外形的气动减阻研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- LIU Longwei. Study on aerodynamic drag reduction of heavy commercial vehicle shape in the styling phase[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [22] 和生泰. 风洞实验地板边界层对汽车气动特性的影响及其控制[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- HE Shengtai. Effect of floor boundary layer on aerodynamic characteristics of vehicle and its control in wind tunnel[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- 作者简介: 张扬辉, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为等离子体流动控制。  
E-mail: 1950175242@qq.com
- 胡兴军, 男, 1976 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为汽车空气动力学。  
E-mail: hxj@jlu.edu.cn
- 余天明(通信作者), 女, 1977 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为汽车空气动力学及车身先进制造技术。  
E-mail: yutm@jlu.edu.cn
- 王靖宇, 男, 1976 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为汽车空气动力学。  
E-mail: wangjy@jlu.edu.cn



## 第 10 届上银优秀机械博士论文奖——铜奖

### 复杂光学面形的自适应可变补偿干涉检测技术研究

作者: 薛 帅

毕业学校: 国防科技大学

指导教师: 陈善勇

随着侦查预警探测等成像光学系统性能不断提高, 纳米精度自由曲面光学元件将是下一代成像光学系统的主角。当前如何实现纳米精度自由曲面光学元件检测, 成为高性能成像光学系统研制的瓶颈难题。干涉测量是普遍使用的光学面形测量方法, 然而受传统干涉测量镜头和补偿器固定形式限制, 难以满足制造中局部大误差检测和灵活适应不同复杂面形的需求, 严重影响了自由曲面光学元件的加工效率和质量。针对这一瓶颈, 论文开展自适应可变干涉检测基础研究, 创新点包括如下几个方面。

(1) 区别于传统干涉检测固定像差的补偿器模式, 采用空间光调制器(SLM)进行补偿波前重构调制, 解决自由曲面曲率变化大且制造过程容易出现局部大误差, 干涉检测动态范围不足的难题。创新基于 SLM 的智能推理-实时补偿-测量反馈迭代的优化自适应补偿算法, 形成闭环迭代的自适应补偿检测方法, 实现自由曲面光学制造中超干涉仪动态范围的局部大误差智能、高效检测。

(2) 提出了一种基于多灰度等级干涉型计算全息编码的 SLM 相位控制方法。基于计算全息原理, 建立了相位精度和相位调制深度在灰度量化等级和像素离散化共同作用下的消光数学模型, 解决了 SLM 适中精度下的多模式自由像差控制难题。

(3) 提出高次非球面单透镜组合 SLM 补偿的衍射混合可变补偿新方法, 解决传统可变补偿方法可适应面形范围小的问题。揭示了高次非球面单透镜在光路中随轴向距离变化产生大范围可变球差的物理机制, 掌握了非球面单透镜补偿器的优化设计方法, 探索了混合补偿像差平衡机理, 建立了组合补偿能力的参数化描述方法。实现偏离量 0~170  $\mu\text{m}$  范围内非球面和自由曲面的可变检测, 优化了检测工艺、节约检测成本、支撑复杂曲面高效制造。

(4) 在全球优化的框架下规划了自适应补偿干涉检测的控制算法, 解决局部寻优算法的自适应补偿干涉检测适应性不强问题, 提出全局性的智能优化算法进行 SLM 相位的智能控制, 形成基于机器视觉的补偿效果实时表征方法, 在应用层面上将对不同形态大面形的适应性从 79%提高至 99%以上。

自主研发的自适应补偿干涉检测系统、方法和工艺成功应用于空间探测、强激光系统多个型号复杂柱面、非球面镜等关键元件的检测, 推动光学系统变革和成像性能跃升, 支撑相关重大科技项目顺利实施。