

气体放电与等离子体及其应用著作丛书

# 等离子体流动控制与辅助燃烧

车学科 聂万胜 周思引 程钰锋 冯伟 李国强 著



科学出版社

气体放电与等离子体及其应用著作丛书

# 等离子体流动控制与辅助燃烧

车学科 聂万胜 周思引 著  
程钰锋 冯 伟 李国强



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍等离子体流动控制与点火助燃的数值计算方法、实验技术以及相关应用研究成果,包括等离子体放电过程模拟、等离子体流动控制机理、等离子体唯象学仿真模型、临近空间等离子体流动控制特点与应用、等离子体在超燃冲压发动机与爆震发动机中的应用等内容。

本书可作为航空航天相关专业科研人员和工程技术人员的参考书,也可作为从事等离子体流动控制、点火助燃研究的老师和学生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

等离子体流动控制与辅助燃烧/车学科等著. —北京:科学出版社,2018.8  
(气体放电与等离子体及其应用著作丛书)

ISBN 978-7-03-058411-3

I. ①等… II. ①车… III. ①等离子体约束 IV. ①O532

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 173677 号

责任编辑:牛宇锋 罗 娟 / 责任校对:王萌萌

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年8月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年8月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:372 000

定价:115.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 《气体放电与等离子体及其应用著作丛书》编委会

顾 问 邱爱慈 李应红 王晓钢 孔刚玉

主 编 严 萍 丁立健

副主编 王新新 邵 涛

编 委 (按姓氏笔画排序)

于达仁 万京林 王文春 方 志

卢新培 任春生 刘大伟 刘克富

刘定新 李永东 李庆民 李兴文

吴 云 张远涛 张冠军 欧阳吉庭

罗振兵 罗海云 姚陈果 章 程

程 诚 曾 嵘 戴 栋

## 前 言

利用等离子体控制飞行器表面流场、改善动力系统点火与燃烧性能的研究已经有比较长的历史,即使对近年来的研究热点——表面介质阻挡放电等离子体流动控制而言,从其提出到现在也已过去 20 多年了,但一直难以获得突破性进展。这与等离子体、流动、燃烧三者的复杂性有密切关系,它们具有明显的多场耦合、多学科交叉特点,给仿真、实验带来很大的挑战。随着航空航天技术的发展,等离子体流动控制、点火助燃也将迎来新的发展机遇。作者对 10 余年的工作进行总结并成书,希望能够起到抛砖引玉的作用,促进我国相关领域的发展。

本书内容分为等离子体流动控制、点火助燃两个方面,共 8 章。其中,第 1 章由聂万胜、车学科、程钰锋、周思引完成,主要介绍国内外研究历史、现状;第 2、3 章由车学科完成,主要内容为表面介质阻挡放电模拟与参数研究,重点阐述表面介质阻挡放电流体力学仿真模型及计算方法,利用该方法研究等离子体的单向体积力、体积力耦合、动量传递效率等机理,分析激励器、激励电源参数的影响;第 4 章由车学科完成,是在第 2、3 章基础上进行流动控制松耦合模拟研究,介绍松耦合模拟方法,从诱导流场角度进一步分析等离子体参数的影响,研究等离子体控制飞行器翼型流动分离的机理和效果;第 5 章由程钰锋、冯伟、李国强、周思引完成,介绍 5 种表面介质阻挡放电等离子体流动控制的唯象学仿真模型和计算方法;第 6 章由车学科、聂万胜、程钰锋完成,针对临近空间等离子体流动控制,论述等离子体流动控制实验的相似准则、实验原理和方法、低气压下激光粒子图像测速实验技术,介绍等离子体诱导旋涡、流场的实验成果,阐述平流层螺旋桨等离子体流动控制的两种实验方法,开展临近空间等离子体流动控制松耦合模拟和平流层螺旋桨流动控制唯象学仿真计算;第 7 章由周思引完成,采用唯象学方法研究超燃冲压发动机中等离子体对燃料喷流、凹腔流场的控制效果;第 8 章由车学科、周思引完成,综合采用松耦合方法和唯象学仿真方法,计算预混气体中等离子体放电过程,获得活性粒子的时空分布,研究等离子体对爆震发动机点火起爆的影响。全书的修改和统稿工作由车学科、聂万胜完成。

本书的研究工作得到国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划(863 计划)、高超声速冲压发动机技术重点实验室开放基金等项目的支持。田学敏、陈庆亚、姜家文、张立志等研究生也为本书出版付出了大量心血,中国科学院电工研究所邵涛博士对本书的出版给予了大力支持,中国科学院电工研究所章程博士和山

东大学张远涛博士审阅了本书并提出了许多重要的修改意见。本书的出版得到了“2110”工程的资助。在此一并表示衷心的感谢!

由于作者学识水平有限,书中难免存在不足与疏漏,恳请读者批评指正。

作者

2017年11月1日

# 目 录

## 前言

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第 1 章 绪论              | 1  |
| 1.1 等离子体流动控制          | 1  |
| 1.1.1 等离子体激励器类型       | 2  |
| 1.1.2 等离子体气动激励机理      | 5  |
| 1.1.3 等离子体流动控制实验研究技术  | 5  |
| 1.1.4 等离子体流动控制数值仿真技术  | 7  |
| 1.1.5 应用领域            | 9  |
| 1.2 等离子体点火与辅助燃烧       | 11 |
| 1.2.1 等离子体点火与辅助燃烧机理   | 12 |
| 1.2.2 等离子体辅助燃烧实验研究技术  | 12 |
| 1.2.3 等离子体辅助燃烧数值仿真技术  | 13 |
| 1.2.4 应用领域            | 15 |
| 参考文献                  | 15 |
| 第 2 章 表面介质阻挡放电        | 21 |
| 2.1 等离子体与空气的能量耦合机理    | 21 |
| 2.1.1 热量传输            | 21 |
| 2.1.2 动量传输            | 21 |
| 2.1.3 动量-热量综合传输       | 22 |
| 2.2 等离子体体积力产生机理       | 22 |
| 2.3 表面介质阻挡放电仿真模型及计算方法 | 23 |
| 2.4 交流激励表面介质阻挡放电过程    | 26 |
| 2.4.1 电势-电流密度变化       | 27 |
| 2.4.2 电子数密度变化         | 27 |
| 2.4.3 总电场强度变化         | 28 |
| 2.4.4 体积力耦合机制         | 31 |
| 2.4.5 单向体积力产生机制       | 32 |
| 2.4.6 离子动量传递效率        | 34 |
| 2.5 二次电子发射的影响         | 37 |
| 2.5.1 降低放电稳定性         | 38 |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 2.5.2      | 造成单侧放电                 | 41         |
| 2.5.3      | 增强空间“推-拉”机制            | 41         |
| 2.6        | 小结                     | 43         |
|            | 参考文献                   | 44         |
| <b>第3章</b> | <b>表面介质阻挡放电激励器参数研究</b> | <b>47</b>  |
| 3.1        | 单个激励器参数研究              | 47         |
| 3.1.1      | 电极结构的影响                | 47         |
| 3.1.2      | 电源的影响                  | 53         |
| 3.1.3      | 介质阻挡层的影响               | 73         |
| 3.1.4      | 磁场的作用                  | 79         |
| 3.2        | 激励器阵列研究                | 87         |
| 3.2.1      | 植入电极构型的影响              | 88         |
| 3.2.2      | 暴露电极电势关系的影响            | 93         |
| 3.2.3      | 暴露电极间隙的影响              | 98         |
| 3.3        | 特殊激励器研究                | 99         |
| 3.3.1      | SDBD 合成射流激励器           | 99         |
| 3.3.2      | 滑移放电激励器                | 106        |
| 3.4        | 小结                     | 116        |
|            | 参考文献                   | 116        |
| <b>第4章</b> | <b>等离子体流动控制松耦合模拟</b>   | <b>119</b> |
| 4.1        | 等离子体流动控制机理分析           | 119        |
| 4.1.1      | 低速流动                   | 119        |
| 4.1.2      | 高速流动                   | 120        |
| 4.2        | 仿真模型及验证                | 121        |
| 4.2.1      | 计算模型和方法                | 121        |
| 4.2.2      | 仿真验证                   | 122        |
| 4.3        | 交流激励平板边界层流动控制模拟        | 123        |
| 4.3.1      | 激励电源的影响                | 123        |
| 4.3.2      | 介质阻挡层厚度的影响             | 131        |
| 4.3.3      | 激励器阵列流动控制效果            | 132        |
| 4.3.4      | 合成射流                   | 135        |
| 4.4        | 交流激励翼型流动控制模拟           | 137        |
| 4.4.1      | 计算网格和方法                | 137        |
| 4.4.2      | 计算方法验证                 | 138        |
| 4.4.3      | 激励器数量的影响               | 138        |



|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 4.4.4 激励器位置的影响 .....                  | 140        |
| 4.4.5 控制力类型的影响 .....                  | 142        |
| 4.5 小结 .....                          | 145        |
| 参考文献 .....                            | 146        |
| <b>第5章 等离子体流动控制唯象学模拟 .....</b>        | <b>149</b> |
| 5.1 交流激励 SDBD 等离子体电荷密度均匀分布模型 .....    | 149        |
| 5.1.1 体积力模型 .....                     | 149        |
| 5.1.2 计算网格及边界条件 .....                 | 149        |
| 5.1.3 模型验证 .....                      | 150        |
| 5.2 基于德拜长度的交流激励 SDBD 等离子体电荷密度模型 ..... | 152        |
| 5.2.1 体积力模型 .....                     | 152        |
| 5.2.2 计算网格及边界条件 .....                 | 152        |
| 5.2.3 模型验证 .....                      | 153        |
| 5.3 电弧放电等离子体唯象学模型 .....               | 153        |
| 5.3.1 放热模型 .....                      | 153        |
| 5.3.2 模型验证 .....                      | 155        |
| 5.4 纳秒脉冲 SDBD 唯象学模型 .....             | 158        |
| 5.4.1 温度和压力均匀分布模型及验证 .....            | 158        |
| 5.4.2 温度高斯分布模型 .....                  | 161        |
| 5.5 集总参数模型 .....                      | 162        |
| 5.6 小结 .....                          | 163        |
| 参考文献 .....                            | 163        |
| <b>第6章 临近空间等离子体流动控制研究 .....</b>       | <b>166</b> |
| 6.1 不同气压下交流激励等离子体诱导流场 .....           | 166        |
| 6.1.1 低气压密闭环境中等离子体诱导流场 PIV 实验技术 ..... | 166        |
| 6.1.2 诱导流场结构特点 .....                  | 167        |
| 6.1.3 诱导流动动量特性 .....                  | 169        |
| 6.1.4 激励频率的影响 .....                   | 171        |
| 6.1.5 激励电压的影响 .....                   | 173        |
| 6.1.6 激励器电极间隙影响 .....                 | 175        |
| 6.2 亚微秒激励等离子体诱导流场 .....               | 176        |
| 6.2.1 诱导涡发展过程 .....                   | 177        |
| 6.2.2 激励频率的影响 .....                   | 180        |
| 6.2.3 脉冲数量的影响 .....                   | 182        |
| 6.2.4 环境压力的影响 .....                   | 183        |

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| 6.2.5      | 粒子空白区                    | 188        |
| 6.3        | 等离子体流动控制实验相似准则           | 191        |
| 6.3.1      | 等离子体体积力相似准则              | 192        |
| 6.3.2      | 等离子体放热相似准则               | 194        |
| 6.4        | 地面模拟高空等离子体流动控制的实验方法及应用   | 195        |
| 6.4.1      | 实验方法                     | 195        |
| 6.4.2      | 等离子体诱导流动实验               | 196        |
| 6.4.3      | 翼型流动控制实验                 | 199        |
| 6.5        | 平流层螺旋桨等离子体流动控制的地面实验方法及应用 | 201        |
| 6.5.1      | 基于叶素理论的地面实验方法            | 201        |
| 6.5.2      | 基于缩比螺旋桨的地面实验方法           | 207        |
| 6.6        | 临近空间等离子体流动控制模拟           | 211        |
| 6.6.1      | 纳秒脉冲放电流动控制松耦合模拟          | 211        |
| 6.6.2      | 平流层螺旋桨等离子体流动控制唯象学仿真      | 219        |
| 6.7        | 小结                       | 229        |
|            | 参考文献                     | 230        |
| <b>第7章</b> | <b>超燃冲压发动机等离子体辅助燃烧</b>   | <b>233</b> |
| 7.1        | 计算区域及网格划分                | 233        |
| 7.2        | 等离子体对燃料喷流的影响             | 234        |
| 7.2.1      | 喷流流场温度与壁面压力分析            | 235        |
| 7.2.2      | 燃料混合、燃烧特征分析              | 237        |
| 7.2.3      | 燃烧室总压损失变化                | 238        |
| 7.2.4      | 喷流下游燃烧效率的变化              | 239        |
| 7.3        | 等离子体对凹腔流场的影响             | 240        |
| 7.3.1      | 激励强度的影响                  | 240        |
| 7.3.2      | 激励器数目影响                  | 245        |
| 7.3.3      | 脉冲激励频率影响                 | 249        |
| 7.3.4      | 燃烧流场的影响                  | 255        |
| 7.4        | 纳秒脉冲 SDBD 等离子体对凹腔流场的影响   | 260        |
| 7.4.1      | 等离子体模型及仿真参数              | 260        |
| 7.4.2      | 凹腔流场特性变化比较               | 261        |
| 7.5        | 小结                       | 264        |
|            | 参考文献                     | 264        |
| <b>第8章</b> | <b>爆震发动机等离子体辅助燃烧</b>     | <b>266</b> |
| 8.1        | 等离子体喷嘴概念设计               | 266        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 8.1.1 介质阻挡放电助燃喷嘴 .....       | 266 |
| 8.1.2 电弧放电助燃喷嘴 .....         | 267 |
| 8.2 氢-氧预混气中等离子体放电仿真研究 .....  | 267 |
| 8.2.1 计算模型 .....             | 268 |
| 8.2.2 高压交流激励放电 .....         | 271 |
| 8.2.3 纳秒脉冲激励放电 .....         | 274 |
| 8.3 等离子体点火起爆仿真研究 .....       | 279 |
| 8.3.1 物理模型与计算方法 .....        | 279 |
| 8.3.2 仿真结果与分析 .....          | 282 |
| 8.4 等离子体助燃作用下的点火起爆仿真研究 ..... | 285 |
| 8.4.1 流场物理模型与求解方法 .....      | 286 |
| 8.4.2 无等离子体助燃时起爆过程分析 .....   | 287 |
| 8.4.3 施加等离子体助燃时起爆过程分析 .....  | 288 |
| 8.4.4 两种方式起爆效果对比 .....       | 290 |
| 8.5 小结 .....                 | 294 |
| 参考文献 .....                   | 294 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 等离子体流动控制

等离子体流动控制技术是一项非常有发展潜力的新型技术,在军用、民用方面均具有广泛的应用前景,如飞行器机翼增升减阻、激波控制、螺旋桨/旋翼/风力发电机桨叶流动控制、细长锥体大迎角前体涡控制、涡轮压气机扩稳、防冰/除冰等。等离子体是由大量带电粒子组成的非束缚态宏观体系,它由自由电子、自由离子和中性粒子混合而成,是除固体、液体、气体之外的第四种物质形态。不带电的普通气体在受到外界高能作用后,部分原子中电子吸收的能量超过原子电离能后会脱离原子核而成为自由电子,同时原子因失去电子而成为正离子,就可形成等离子体。

等离子体流动控制技术存在两种方法和途径。第一种为磁流体动力学(MagnetoHydroDynamics, MHD),即将大功率等离子体发生器产生的高浓度等离子体注入目标气流中,外加磁场通过等离子体将作用力传递给中性气体以达到所需控制效果;这种方法存在较多缺陷,例如,等离子体发生器功率大,一般需要携带工质,同时高强度磁场设备的体积、重量、功耗都很大,这些都限制了 MHD 等离子体设备的应用。

近年来,等离子体流动控制转向使用小尺度非平衡等离子体改变边界层流动,并通过黏性-无黏相互作用来控制主流,这就产生了第二种等离子体控制途径,即电流体动力学(ElectroHydroDynamics, EHD),它通过在控制对象表面上设置电极产生强电场,该电场一方面电离空气产生等离子体,另一方面加速等离子体,使等离子体与中性气体发生碰撞,从而将动量、动能传递到边界层的中性气体中,边界层气流受此影响,其流动发生变化,进而影响主流,从而达到流动控制的目的。这里称其为“小尺度”,原因在于与 MHD 相比,其所需要的或产生的等离子体体积非常小,两者相差数个量级。“非平衡”指的是等离子体中电子和离子温度不一致,电子温度可达上万开尔文,而离子温度仅为环境气体温度。为了加强控制效果,还可以再增加外部磁场,即电磁流体动力学(ElectroMagnetoHydroDynamics, EMHD)。EHD 和 EMHD 物理学非常复杂,受分析能力的限制,发展很缓慢。实现小尺度非平衡等离子体流动控制技术的一个主要障碍是如何在大气压下实现等离子体放电。1933 年, von Engle 等首先在一个大气压空气中得到直流正常辉光

放电,但是他们的方法需要在真空中启动放电,随后使气体压力逐步增加到一个大气压,而且需要对阴极进行大量冷却,以防止辉光放电变成电弧放电。由于存在辉光-电弧放电转化,这种放电是不稳定的,很少在工业或实验室中应用。1995年美国田纳西大学 Roth 等(1998)在电极上使用射频电源,从而可以在电极之间捕获离子但不捕获电子,并且用一个绝缘平板进一步抑制辉光-电弧的转变。这种方法极大地降低了阴极加热、腐蚀以及等离子体污染,还提高了等离子体的稳定性,增加了用于洛伦兹碰撞和流动加速的离子数密度。这类等离子体称为大气压均匀辉光放电等离子体(one atmosphere uniform glow discharge plasma, OAUGDP,也称 RF 辉光放电等离子体),并申请了专利。自此之后,基于表面放电的非平衡等离子体流动控制技术得到迅速发展。非平衡等离子体发生器包括直流(DC)电晕放电、交流(AC)表面介质阻挡放电(surface dielectric barrier discharge, SDBD)以及局部电弧丝状放电等。其中,SDBD 是一种重要的大气压放电形式,其激励器电极均设置在物体表面(图 1.1),具有尺寸小、重量轻、无运动部件、气动灵活性好、可靠性高、价格低、带宽高、响应快、阻力小等优势,应用潜力很大,目前在国际上得到非常广泛的研究。

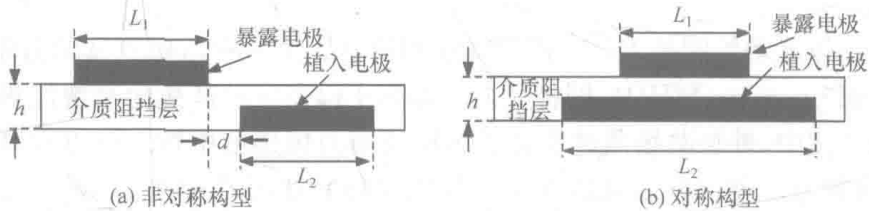


图 1.1 SDBD 激励器结构示意图

### 1.1.1 等离子体激励器类型

最先使用等离子体放电来控制气体流动的激励器类型是电晕放电,但当时主要研究的是体放电,法国 Poitiers 大学和阿根廷 Buenos Aires 大学组成的研究团队后来开始研究直流电晕表面放电等离子体控制流动(Artana et al., 2001)。直流电晕表面放电激励器的两个电极一般位于同一表面,且均不覆盖绝缘层,激励器的常见结构如图 1.2 所示。

直流电晕表面放电存在放电不稳定的问题,一些研究者使用交流电源代替直流电源来试图解决该问题,但是并没有获得任何改进(Moreau, 2007)。更可行的方法是在两个电极之间插入绝缘层,利用绝缘层熄灭电流来阻止电弧放电,这就是介质阻挡放电(DBD)。DBD 包括体放电(图 1.3)和表面放电两类。DBD 体放电并不适合流动控制,这里不进行过多讨论。SDBD 激励器一般结构如图 1.1 所示,它主要包含三部分:暴露电极、植入电极和介质阻挡层。暴露电极接电源高压输出

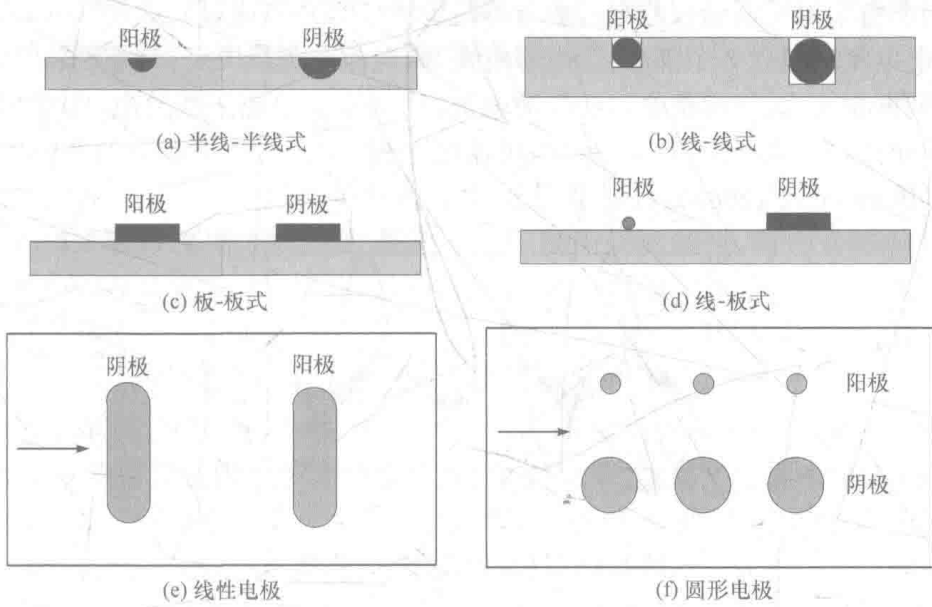


图 1.2 激励器结构

端,一般也可称为高压极、阳极等;植入电极接地,也可称为地电极、阴极等。两个电极粘贴在介质阻挡层的两个表面,其中暴露电极直接暴露在空气中,放电一般发生在其周围空气中;植入电极掩埋在介质阻挡层中,其周围没有空气,一般不发生放电。根据两个电极之间的位置关系可以将其分为对称和非对称两类,另外还有一些改进变形。与直流电晕放电相比,SDBD产生的等离子体更均匀,控制效果更好(Labergue et al., 2007)。使用 SDBD 等离子体进行流动控制是目前最常用的方法。

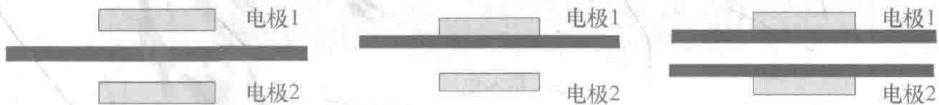


图 1.3 DBD 体放电电极结构示意图

在 SDBD 的一个交流周期内存在一次大电流放电和一次小电流放电 (Baughn et al., 2006),如图 1.4 所示,但随着激励电压的变化,可能出现两次相差不明显的放电。一般研究者通常根据电势的正负将其分为正半周期和负半周期,Enloe 等 (2006, 2005, 2004) 则根据电势的发展趋势将其分为前向放电 (forward stroke) 和后向放电 (backward stroke)。暴露电极向负电压发展时的放电为前向放电,也称负向放电 (negative-going)。与之相对应,当暴露电极向正电压变化时的放电为后向放电,也称正向放电 (positive-going)。每一个放电过程均包括点火、扩展和熄灭 3 个阶段,等离子体的扩展速度可以达到 100m/s,扩展区域则限于植入电极范围

(低气压下会超出植入电极范围),放电等离子体化学是快速熄灭过程( $<1\mu s$ )的动力。放电电流应包含 3 个部分:①电容电流,由电源和负载决定,与是否放电无关;②一系列振幅较大、持续数毫秒的脉冲电流,这些电流对应于微放电;③和前述脉冲电流同时出现、波形为 $(1+x^2)^{-1}$ 的小振幅电流,它们与放电造成的系统电容变化有关(Pons et al., 2005)。

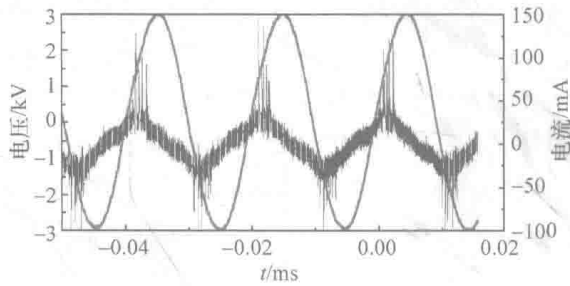


图 1.4 SDBD 的典型电压-电流

SDBD 激励器存在多种变形(图 1.5),其主要目的是提高等离子体的诱导能力以及控制能力。俄罗斯科学院普通物理研究所和莫斯科 Lomonosov 大学(Bychkov et al., 2003)在 SDBD 激励器上添加了一个暴露电极,该暴露电极与植入电极相连,这就是滑移放电的概念。滑移放电的击穿电势非常小,且随着电极间隙轻微变化,因此放电产生的等离子体覆盖范围可以达到 1m,且保持低电势。另外,还有弯曲形、马蹄形、圆形等多种类型(Roy et al., 2009; Wang et al., 2009)。

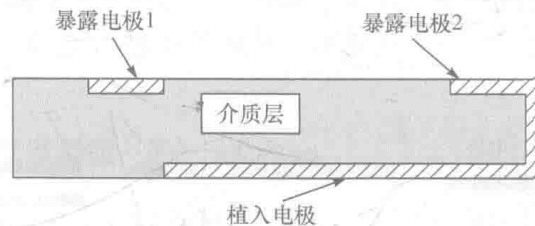


图 1.5 滑移放电激励器

俄罗斯科学院高温研究所(Leonov et al., 2005, 2002, 2001)研究的准直流多电极丝状放电实际上是一种局部电弧丝状放电。与一般电晕放电、SDBD 激励器的电极不同,准直流丝状放电激励器的电极形状非常特殊,是一个尖头、钝体铜圆柱,类似于削好的铅笔,其中尖头一端与电源相接,柱体穿过壁面上的孔后进入气流,端面与壁面光滑齐平,在这种电极上施加高频(27MHz)高压电势后即可在该端产生丝状放电,会对 1.7~1.8 马赫气流中激波的位置和强度造成影响。但是,可能由于控制效果不是很好,随后使用直流电源,称为准直流丝状放电。根据电极与流动方向的关系,可以将其分为纵向和横向两种模态。若阳极在上游,阴极在下游,放电沿着弦向、流向发生,为纵向放电模态;若阳极和阴极并列、垂直于来

流方向,则为横向放电模态。横向放电模态是松弛型放电,初始等离子体细丝先被吹向下游,然后停住并在大约  $10\mu\text{s}$  后重新开始。

### 1.1.2 等离子体气动激励机理

虽然 SDBD 激励器结构比较简单,但研究者对其流动控制机理依然没有达成共识。总体来看,人们研究 SDBD 等离子体气动激励机理时,考虑最多的是等离子体体积力以及热效应两种机理;另外,放电过程会对空气成分造成一定影响。

#### 1. 动力效应

等离子体在空间不均匀电场的作用下,电子逆电场方向运动,正离子沿电场方向运动,其中电子质量远小于离子和中性粒子的质量,其与大质量中性粒子的动量交换可以忽略。离子在运动过程中与中性气体分子发生碰撞,从而交换动量和传递动能,诱导激励器表面的空气发生定向运动。因此,等离子体动力效应的作用效果是诱导近壁面气流加速,产生的诱导射流一方面直接加速边界层流动,另一方面通过与主流进行掺混而将主流动能引入边界层,总的效果是增加边界层动能,提高其抵抗逆压梯度的能力。

#### 2. 能量冲击效应

如果将 SDBD 激励器与外界大气环境看成一个封闭的热力学系统,那么在这个系统中存在电子与中性气体之间碰撞而产生的欧姆加热,以及电子与振荡鞘层碰撞的电子加热等过程。SDBD 激励器工作过程中也存在一些功率损失,位移电流在介质板中会产生一定的热量,这些热效应产生的热力学过程可能会对放电区域流场产生一定的影响,尤其是使用纳秒脉冲电源激励放电时,强烈、瞬时的热效应引起空气迅速膨胀,产生一种类似微爆炸的冲击效应。

#### 3. 物性变化效应

高压放电使得电极附近稳定的中性气体电离产生等离子体,这可能会给流场带来扰动,例如,等离子体之间的相互作用主要是长程库仑力而不是短程牛顿力,是非弹性碰撞而不是弹性碰撞,且等离子体内部会发生复合、电荷交换等现象,这些微观物理现象的宏观效应改变了流体的黏滞性等物性参数。放电区域物性的变化将带来流体内摩擦剪切应力的变化,这对层流-湍流转捩有影响。因此,由放电过程产生的物性变化可能会带来流场的变化。

### 1.1.3 等离子体流动控制实验研究技术

等离子体流动控制实验主要关注等离子体放电特性、产生的体积力以及控



制效果。

等离子体放电光学测量实验,主要是使用相机记录放电发光,根据不同的拍摄要求可分为两类,一类是拍摄多次放电的累积效果,这是最常用的,一般数码相机即可;另一类要求比较高,相机的曝光时间为亚纳秒量级,且需要使用和激励电源同步的光增强设备,这种方法能把纳秒量级放电过程拍摄出来,对分析表面介质阻挡放电的发展过程很有帮助(Roupassov et al., 2009)。

等离子体体积力测量实验,主要有直接测量体积力和测量加速度两种方案。直接测量体积力包括利用高精度天平测量和钟摆式(Porter et al., 2007)两种方法。天平测量方法是把激励器水平放置在高精度天平上,天平直接测量放电时作用在激励器面板上的反作用力,该方法需要考虑的问题是如何屏蔽放电产生的电磁场的影响。一种思路是用铜箔把天平包裹起来,利用静电屏蔽原理隔绝电磁干扰(Hoskinson et al., 2008);另一种思路是把激励器放置在远离天平的地方,通过杠杆作用将体积力传递给天平并进行测量(Enloe et al., 2003)。钟摆法比较复杂,如图 1.6 所示,首先在低摩擦针式轴承上悬挂一个轻质空心碳棒,然后将圆形等离子体激励器安装在碳棒末端,同时安装一个激光器,激励器放电时产生的反作用力使得碳棒摆动,底面上的照相装置记录激光入射点的位置即可得到碳棒的摆动规律,最后利用数学工具得到反作用力。测量加速度就是利用加速度计测量激励器加速度,从而得到体积力,如图 1.7 所示(Porter et al., 2006)。需要注意的是,体积力测量法得到的体积力实际上不是等离子体体积力,而是等离子体体积力和空气摩擦力的合力,因此有时这种方法也称为反作用力测量。

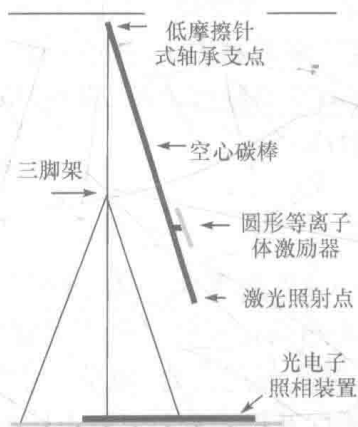


图 1.6 钟摆式测量体积力

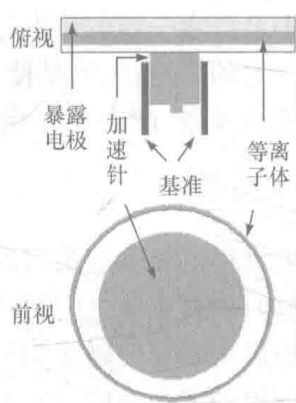


图 1.7 加速度计测量体积力

等离子体诱导流场显示实验,包括烟流法、纹影法、粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 等。烟流法是利用烟显示流动,通过烟流可以直观观测等离子体的作用效果,实验系统相对简单。当光线通过与之垂直的折射率梯度区时,