

https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/zh.html

电空气动力推进 - 由麦克斯韦和库仑驱动

本文中呈现的见解源于作者于2016年至2018年间进行的数十项实验，这些实验探索了电空气动力推进，使用了广泛的电源（交流和直流）、电极几何形状以及离子发射器类型。这些调查以构建下图所示的80厘米转子为高潮，该转子使用不到6 kV和仅约100 mW的电输入功率达到了18转/分的旋转速度。

这项实验活动揭示，性能远比空气运动或离子电流本身更依赖于静电场的分布和几何形状。这些观察为后续电空气动力推进的理论重构奠定了基础。

电空气动力推进 - 静音发动机

电空气动力（EAD）推进 - 常称为电液动力（EHD）推力或“离子风” - 是那些罕见的、看似科幻的技术之一：一种无声地在空气中移动的装置，没有移动部件、没有燃烧，也没有可见排气。公众最早在2000年代初通过后院“升降器”项目了解到它，并在2018年MIT演示了一架“离子飞机”在健身房中滑行时再次听到。

然而，其底层物理学有着更长、更复杂的演变历史。近一个世纪前，托马斯·汤森德·布朗和保罗·比菲尔德观察到高压电容器能产生一种小但持久的推力。布朗将此效应归因于“反重力”。现代科学，凭借麦克斯韦和库仑定律，认识到真相更微妙 - 在许多方面更深刻。

EAD推进不是关于用离子吹空气。它是关于**塑造电场**，以使产生的**静电应力**产生净机械力。在此意义上，EAD装置由麦克斯韦和库仑驱动：由电场本身的几何形状和动态驱动。

离子风的误解

询问大多数工程师关于EHD推进，你会听到一个简单故事：尖锐发射器通过电晕放电产生离子；这些离子向收集电极加速，途中与中性空气分子碰撞并传递动量。中性气体运动 - 所谓的“离子风” - 根据牛顿第三定律，装置经历相等且相反的推力。

这个图景并非错误，但不完整。

在实践中，离子携带可忽略的质量。它们与中性的碰撞频繁，是的，但每碰撞传递的动量微小。更重要的是，**没有显著的机械力直接作用于针尖或收集器**。“风”是推进的副产品，不是源头。

真正的发动机在于**电场**，它加速那些离子 - 在空间电荷形成和流动时静电能量的再分配。

场压和麦克斯韦应力

麦克斯韦方程描述电场如何通过**麦克斯韦应力张量**存储和传递动量：

$$\mathbf{T} = \epsilon_0(\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

将此张量积分到任何物体表面上，得到作用在其上的净静电压力。这个压力 - 而非空气运动 - 是推动EHD推进器前进的。

当电晕放电发生时，发射器周围形成离子云。这些离子做了两件关键的事：

1. **它们部分屏蔽发射器的电场。** 局部场强在尖端附近下降，但在周围体积中保持强劲。
2. **它们扭曲整体场几何形状。** 发射器一侧，场线终止于附近的带电表面或接地结构。另一侧，它们向外延伸，被空间电荷部分中和。

结果是发射器-收集器系统上的静电压力不平衡 - 净力。动量从场流向电极，而不是通过分子碰撞。

库仑定律的作用

在最简单层面，涉及的力由库仑定律描述：

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

EHD结构每个带电表面元件吸引或排斥其环境中的每个其他带电区域。总推力是这些无数库仑相互作用的矢量和，由移动的离子调制场而不断重塑。

在稳态电晕中，高压发射器与相对负的收集器（或周围环境）之间有一层薄的正离子鞘。这些离子作为**中介**：它们部分屏蔽发射器和收集器之间的吸引力，并通过运动不断重置场不对称性。稳定的电输入维持这种不平衡，将静电势能转化为机械力。

来自NASA的教训和离子风范式的极限

2000年代初，NASA及其承包商在Gravitec和Talley AIAA研究下重访比菲尔德-布朗型装置。使用高压不对称电容器在大气和真空中环境中，这些实验旨在测试效应在无空气情况下是否持续。

结果明确 - 且无意中揭示。

在大气模式下，转子仅达到可测量的旋转（1-2转/分）和10-100 μN范围的推力 - 如果装置真正利用重力效应，预期值的数量级以下。运动完全归因于常规电晕放电和弱离子风。

在真空中，压力低至 10^{-6} Torr，运动完全停止。任何瞬态信号追溯到脱气或残余表面电荷。没有空气分子维持电离，静电场变得对称，力消失。

研究人员得出结论，推力大致与空气密度线性缩放 - 这一发现常被引用来“驳斥”EHD推进为真空不可能。但它真正证明的是更深层的东西：**没有介质携带空间电荷，电场失去产生静电压力梯度的不对称性。**

换言之，这些早期测试意外确认了麦克斯韦应力解释电空气动力推进。不是重力在起作用，也不是单纯的离子拖曳 - 重要的是电荷中介的场不平衡的存在。

为简单性和对称性构建的Gravitec装置缺乏任何显著的电荷储藏器或场塑造电介质。它们的开放几何形状将场线扩散到周围，浪费大部分静电能量。

相比之下，这里描述的EPS-铝转子沿良好定义的导电皮肤集中电荷，让空间电荷区域塑造局部场。结果：不到6 kV和约100 mW的有用推力 - 能量效率几乎提高两个数量级。

这些发现呼应了一个一致主题：电空气动力效率并非源于电压或气流，而是源于对电荷拓扑和场几何的控制。

电荷储藏器效应

硬质绝缘芯上的轻质箔不仅仅是导体 - 它形成一个大面积电荷储藏器，增强电场的非对称性。在当前设计中，膨胀聚苯乙烯（EPS）纯粹作为轻质结构支撑，其整个表面用与高压电源电连续的铝箔包裹。EPS添加可忽略的电功能；其价值在于以最小质量启用大导电表面。

这个广泛的导电皮肤直接从电源存储电荷，使电晕放电针对预充电静电场工作，而不是每个周期从零构建。箔的高表面积戏剧性地增加有效电容 - 取决于表面纹理和曲率，约为 $10\text{--}100 \mu\text{F cm}^{-2}$ - 并将适度施加电压转换为更强的局部电场梯度。

当电晕点燃时，箔作为稳定电位参考。发射的离子轻微调制局部场但不主导它；相反，存储的表面电荷维持产生连续推力的稳定非对称性，以极低功率。

从麦克斯韦应力视角，力正比于场强及其梯度的积分：

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

大而良好充电的箔最大化两个项，而无需更高电压或电流。这解释了为什么低功率、低电压转子能实现显著旋转：它用存储静电能量替代传统“离子风”几何的沉重离子电流损失 - 静电效率的实用形式。

效率的几何形状

EHD推进器的效率不是由气流速度决定，而是由电场塑造的有效性决定。关键参数包括：

- **场非对称性：** 静电压力梯度的净方向分量。
- **电荷密度分布：** 离子云通过部分屏蔽如何修改该场。
- **电容耦合：** 每施加伏特在相对表面存储的总电荷。
- **损失通道：** 电晕损失、重组和介质泄漏。

限制和塑造场的设计 - 例如，将宽广的相反充电表面置于发射器附近 - 可以实现每瓦推力的数量级改进。电场执行工作；离子仅使场保持非对称和动态。

重新审视比菲尔德-布朗

布朗关于不对称电容器推力的早期观察先于我们对等离子体物理学的现代理解。没有麦克斯韦应力或空间电荷动态的框架，自然认为效应可能涉及重力。EHD推进器产生“对抗”场矢量的力（有时垂直向上）的事实仅加深了谜团。

通过今日的镜头，布朗的“反重力”只是可见的静电压力。数学形式的相似性 - 重力和静电势能都以 $1/r^2$ 衰减 - 使混淆在历史上可理解，但物理完全是电磁的。

视角和现代语境

最近分析和同行讨论强化了电空气动力推进作为**场梯度现象**的重构，而不是离子风发动机。在经典升降器配置中，数十千伏下毫安级电晕电流产生微至毫牛顿/瓦的推力密度 - 反映电场能量有多少结束为定向机械应力。相比之下，箔包裹的EPS转子将相同物理定律转化为**电荷驱动**过程：宽导电表面以最小电流维持强 E -梯度，以存储场能量交换漂移损失。

这一区别呼应当代研究的更广泛转变。**介电障壁放电致动器**在空气动力控制中也从麦克斯韦应力而非体积气流导出表面力，当电极几何调谐为非对称时，实现 $10-100 \text{ N kW}^{-1}$ 效率。ONERA和欧盟EHD项目中研究的**浮动电极和限制几何**通过塑造离子鞘显示两至五倍推力提升 - 正是电荷储藏器转子的设计逻辑。而且在**稀薄空气环境**中，如上层平流层或火星大气，离子拖曳减弱但静电应力持续，富电荷表面可在传统设计失败后长期维持推进。

物理与经典电磁学的庞廷矢量动量框架完美契合：推力对应场能量密度的梯度，

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

意味着系统直接从电磁场抽取动量。离子是维持不平衡的催化剂，不是反应质量本身。这解释了为什么在真空实验中场变得对称时推力消失 - ∇E 项崩溃。相反，在箔储藏器转子中，电容皮肤保持 E 陡峭和定向，仅从100 mW输入功率产生约**0.1–1 mN**扭矩等效推力 - 离子拖曳装置的10–100倍效率。

参数	传统离子风设计	箔电荷储藏器转子	含义
电压	20–50 kV	< 6 kV	更低击穿风险，更易扩展
功率	1–10 W	$\approx 0.1 \text{ W}$	$10-100 \times$ 更高推力 / W
推力机制	离子-中性碰撞	场梯度（麦克斯韦应力）	基本独立于空气密度
关键使能器	发射器-收集器间隙	电容箔储藏器	存储电荷 > 瞬态电流
效率 (N kW^{-1})	0.01–0.1	1–10 (推断)	适用于微型无人机

此类比较突显概念性转向：**从电流驱动到电荷驱动推进**，从移动物质到塑造场。下一个前沿可能是所谓的**静电建筑** - 使用计算优化和先进材料（碳纳米管发射器、图案箔、超材料电介质）最大化 $\int E \cdot \nabla E$ 。混合脉冲直流模式可进一步利用瞬态电荷存储，同时减少化学副产物。

结论 - 由麦克斯韦和库仑驱动

电空气动力推进不是异国情调的好奇心或伪科学异常。它是麦克斯韦和库仑定律的直接表现 - 通过控制场非对称性将静电势能转化为运动的宏观机器。

早期发明家看到“反重力”，现代项目看到“离子风”，真实故事更简单、更深刻：**电场具有张力**。塑造那张力，你就能在无移动部件、无燃料、无声的情况下穿越空气。

这就是电空气动力推进的静默天才 - 真正地，**由麦克斯韦和库仑驱动**。

参考文献

1. Talley, C. et al. **Evaluation of the Biefeld–Brown Effect: Asymmetric Capacitor Thruster Tests in Vacuum and Atmosphere**. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. **Electrokinetic Apparatus**. U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. **Flight of an Aeroplane with Solid-State Ion Propulsion**. *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. **Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators**. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. **EHD Flow Control and Plasma Actuators**. NASA Technical Reports Server, 2015.
6. ONERA EHD Program: **Electrohydrodynamic Propulsion and Flow Control**. Internal Reports 2018–2023.