

Propulsione Electroaerodinamica - Alimentata da Maxwell e Coulomb

Le intuizioni presentate in questo saggio derivano da decine di esperimenti condotti dall'autore tra il 2016 e il 2018, esplorando la propulsione electroaerodinamica con una vasta gamma di fonti di alimentazione (AC e DC), geometrie di elettrodi e tipi di emettitori di ioni. Queste indagini hanno culminato nella costruzione del rotore da 80 cm raffigurato di seguito, che ha raggiunto una velocità di rotazione di 18 giri/min utilizzando meno di 6 kV e solo circa 100 mW di potenza elettrica in ingresso.

Questa campagna sperimentale ha rivelato che le prestazioni dipendono molto più dalla distribuzione e dalla geometria dei campi elettrostatici che dal movimento dell'aria o dalla corrente ionica stessa. Le osservazioni hanno posto le basi per il riformulazione teorica della propulsione electroaerodinamica che segue.

Propulsione Electroaerodinamica - Il Motore Silenzioso

La propulsione electroaerodinamica (EAD) - spesso chiamata spinta elettroidrodinamica (EHD) o "vento ionico" - è una di quelle rare tecnologie che sembrano fantascienza: un dispositivo che si muove silenziosamente attraverso l'aria senza parti mobili, senza combustione e senza scarichi visibili. Il pubblico ne ha sentito parlare per la prima volta all'inizio degli anni 2000 attraverso progetti domestici di "lifter", e di nuovo nel 2018 quando il MIT ha dimostrato un "aereo ionico" che planava attraverso una palestra.

Tuttavia, la fisica sottostante ha una storia più lunga e intricata. Quasi un secolo prima, Thomas Townsend Brown e Paul Biefeld osservarono che i condensatori ad alta tensione potevano generare una spinta piccola ma persistente. Brown attribuì l'effetto all'"antigravità". La scienza moderna, armata delle leggi di Maxwell e Coulomb, riconosce che la verità è più sottile - e, in molti modi, più profonda.

La propulsione EAD non riguarda il soffiare aria con ioni. Riguarda la **scolpitura di campi elettrici** in modo che le **tensioni elettrostatiche** risultanti producano una forza meccanica netta. In questo senso, i dispositivi EAD sono alimentati da Maxwell e Coulomb: dalla geometria e dalla dinamica del campo elettrico stesso.

Il Malinteso del Vento Ionico

Chiedete alla maggior parte degli ingegneri sulla propulsione EHD e sentirete una storia semplice: un emettitore affilato produce ioni tramite scarica a corona; questi ioni accelerano verso un elettrodo collettore, collidendo con molecole d'aria neutre lungo il cammino e trasferendo loro momento. Il gas neutro si muove - il cosiddetto "vento ionico" - e per la terza legge di Newton, il dispositivo sperimenta una spinta uguale e opposta.

Questa immagine non è sbagliata, ma è incompleta.

Nella pratica, gli ioni portano una massa trascurabile. Le loro collisioni con i neutri sono frequenti, sì, ma il momento trasferito per collisione è minuscolo. Ancora più importante, **non agisce una forza meccanica significativa direttamente sulla punta dell'ago o sul collettore**. Il "vento" è un sottoprodotto, non la fonte, della propulsione.

Il vero motore risiede nel **campo elettrico** che accelera quegli ioni - nella ridistribuzione dell'energia elettrostatica mentre si forma e scorre la carica spaziale.

Pressione di Campo e il Tensore di Tensione di Maxwell

Le equazioni di Maxwell descrivono come i campi elettrici immagazzinano e trasferiscono momento attraverso il **tensores di tensione di Maxwell**:

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

Integrando questo tensore sulla superficie di qualsiasi corpo si ottiene la **pressione elettrostatica netta** che agisce su di esso. Questa pressione - non il movimento dell'aria - è ciò che spinge un propulsore EHD in avanti.

Quando avviene una scarica a corona, si forma una nuvola di ioni intorno all'emettitore. Questi ioni fanno due cose critiche:

1. **Schermano parzialmente il campo elettrico dell'emettitore.** L'intensità del campo locale diminuisce vicino alla punta, ma rimane forte nel volume circostante.
2. **Distorgono la geometria complessiva del campo.** Da un lato dell'emettitore, le linee di campo terminano su superfici cariche vicine o strutture a terra. Dall'altro, si estendono verso l'esterno, parzialmente neutralizzate dalla carica spaziale.

Il risultato è uno **squilibrio nella pressione elettrostatica** sul sistema emettitore-collettore - una forza netta. Il momento scorre dal campo agli elettrodi, non attraverso collisioni molecolari.

La Legge di Coulomb in Azione

Al livello più semplice, le forze coinvolte sono descritte dalla legge di Coulomb:

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

Ogni elemento di superficie carica di una struttura EHD attrae o respinge ogni altra regione carica nel suo ambiente. La spinta totale è la somma vettoriale di queste innumerevoli interazioni coulombiane, continuamente rimodellate dagli ioni in movimento che modulano il campo.

In una corona in stato stazionario, un sottile strato di ioni positivi si trova tra un emettitore ad alta tensione e un collettore relativamente negativo (o l'ambiente circostante). Quegli ioni fungono da **mediatori**: schermano parzialmente l'attrazione tra emettitore e collettore, e muovendosi, ripristinano continuamente l'asimmetria del campo. L'ingresso elettrico costante mantiene quello squilibrio, convertendo energia potenziale elettrostatica in forza meccanica.

Lezioni dalla NASA e i Limiti del Paradigma del Vento Ionico

All'inizio degli anni 2000, la NASA e i suoi appaltatori rivisitarono dispositivi di tipo Biefeld-Brown sotto gli studi Gravitec e Talley AIAA. Utilizzando condensatori asimmetrici ad alta tensione in ambienti atmosferici e di vuoto, gli esperimenti miravano a testare se l'effetto persistesse in assenza di aria.

I risultati furono inequivocabili - e involontariamente rivelatori.

In modalità atmosferica, i rotori raggiunsero rotazioni appena misurabili (1–2 giri/min) e spinte nell'ordine di 10–100 μN - ordini di grandezza inferiori a quanto ci si aspetterebbe se i dispositivi sfruttassero davvero un effetto gravitazionale. Il movimento era interamente attribuibile alla scarica a corona convenzionale e al debole vento ionico.

In vuoto, a pressioni fino a 10^{-6} Torr, il movimento cessò completamente. Qualsiasi segnale transitorio fu tracciato a degassificazione o carica superficiale residua. Senza molecole d'aria per sostenere l'ionizzazione, il campo elettrostatico divenne simmetrico, e la forza svanì.

Gli investigatori conclusero che la spinta scalava approssimativamente linearmente con la densità dell'aria - un risultato spesso citato per "smentire" la propulsione EHD come impossibilità nel vuoto. Ma ciò che dimostrò davvero fu qualcosa di più profondo: **senza un mezzo per trasportare la carica spaziale, il campo elettrico perde l'asimmetria che produce gradienti di pressione elettrostatica**.

In altre parole, quei test iniziali confermarono accidentalmente l'**interpretazione del tensore di tensione di Maxwell** della propulsione electroaerodinamica. Non era la gravità in azione, né mero trascinamento ionico - era la presenza di uno **squilibrio di campo mediato da carica** che contava.

I dispositivi Gravitec, costruiti per semplicità e simmetria, mancavano di qualsiasi *serbatoio di carica* significativo o *dielettrico formatore di campo*. Le loro geometrie aperte disperdevano le linee di campo nell'ambiente, sprecando la maggior parte dell'energia elettrostatica.

Al contrario, il rotore EPS-alluminio descritto qui concentrava la carica lungo una pelle conduttrice ben definita, permettendo alla regione di carica spaziale di *scolpire* il campo locale. Il risultato: spinta utilizzabile con meno di 6 kV e circa 100 mW - prestazioni quasi due ordini di grandezza migliori in efficienza energetica.

Questi risultati riecheggiano un tema consistente: **l'efficienza electroaerodinamica emerge non dalla tensione o dal flusso d'aria, ma dal controllo della topologia di carica e della geometria del campo.**

L'Effetto Serbatoio di Carica

Una lamina leggera su un nucleo rigido e isolante si comporta come più di un semplice conduttore - forma un **serbatoio di carica ad area estesa** che amplifica l'asimmetria del campo elettrico. Nel design attuale, il polistirene espanso (EPS) serve puramente come **supporto strutturale leggero**, con l'intera superficie avvolta in lamina di alluminio che è **elettricamente continua con l'alimentazione ad alta tensione**. L'EPS aggiunge una funzione elettrica trascurabile; il suo valore risiede nell'abilitare una grande superficie conduttriva con massa minima.

Questa pelle conduttriva estesa immagazzina carica direttamente dall'alimentazione, permettendo alla scarica a corona di operare contro un **campo elettrostatico precaricato** anziché costruirlo da zero in ogni ciclo. L'alta area superficiale della lamina aumenta drasticamente la capacità effettiva - dell'ordine di $10\text{--}100 \text{ pF cm}^{-2}$, a seconda della texture superficiale e della curvatura - e converte una tensione applicata modesta in un gradiente di campo elettrico locale molto più forte.

Quando la corona si accende, la lamina agisce come riferimento di potenziale stabilizzante. Gli ioni emessi modulano leggermente il campo locale ma non lo dominano; al contrario, la carica superficiale immagazzinata mantiene un'asimmetria costante che produce spinta continua con potenza molto bassa.

Dalla prospettiva del tensore di tensione di Maxwell, la forza è proporzionale all'integrale dell'intensità del campo e del suo gradiente:

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

e la lamina grande e ben caricata massimizza entrambi i termini senza richiedere tensione più alta o corrente più alta. Questo spiega perché un rotore a bassa potenza e bassa tensione potesse raggiungere una rotazione significativa: ha sostituito **energia elettrostatica immagazzinata** con le perdite di corrente ionica pesante delle geometrie "vento ionico" convenzionali - una forma pratica di *efficienza elettrostatica*.

La Geometria dell'Efficienza

L'efficienza di un propulsore EHD è determinata non dalla velocità del flusso d'aria, ma da **quanto efficacemente il campo elettrico è modellato**. I parametri chiave includono:

- **Asimmetria del Campo:** Il componente direzionale netto del gradiente di pressione elettrostatica.
- **Distribuzione della Densità di Carica:** Come la nuvola di ioni modifica quel campo attraverso schermatura parziale.

- **Accoppiamento Capacitivo:** La carica totale immagazzinata su superfici opposte per volt applicato.
- **Canali di Perdita:** Perdite da corona, ricombinazione e dispersione dielettrica.

I design che confinano e modellano il campo - ad esempio, posizionando una vasta superficie caricata oppostamente vicino all'emettitore - possono ottenere miglioramenti di ordini di grandezza nella spinta per watt. Il campo elettrico compie il lavoro; gli ioni meramente abilitano il campo a rimanere asimmetrico e dinamico.

Rivalutazione di Biefeld-Brown

Le osservazioni iniziali di Brown sulla spinta da condensatori asimmetrici precedono la nostra comprensione moderna della fisica dei plasmi. Senza il quadro del tensore di tensione di Maxwell o della dinamica di carica spaziale, era naturale pensare che l'effetto potesse coinvolgere la gravità. Il fatto che i propulsori EHD producano forza "contro" il vettore di campo (e talvolta verticalmente verso l'alto) ha solo approfondito il mistero.

Visto attraverso la lente di oggi, l'"antigravità" di Brown era semplicemente pressione eletrostatica resa visibile. La somiglianza nella forma matematica - sia le energie potenziali gravitazionali che elettrostatiche decadono come $1/r^2$ - ha reso la confusione storicamente comprensibile, ma la fisica è interamente elettromagnetica.

Prospettive e Contesto Moderno

Analisi recenti e discussioni tra pari rafforzano questa riformulazione della propulsione electroaerodinamica come **fenomeno di gradiente di campo** piuttosto che motore a vento ionico. Nelle configurazioni classiche di lifter, correnti da corona dell'ordine di mil.liampere a decine di kilovolt producono densità di spinta nell'ordine di micro- a milli-newton per watt - un riflesso di quanto poca dell'energia del campo elettrico finisce come tensione meccanica diretta. Al contrario, il rotore EPS avvolto in lamina converte la stessa legge fisica in un processo *guidato da carica*: la vasta superficie conduttriva sostiene un forte gradiente E con corrente minima, scambiando perdite di deriva con energia di campo immagazzinata.

Questa distinzione riecheggia un cambiamento più ampio nella ricerca contemporanea. **Attuatori a scarica dielettrica a barriera** nel controllo aerodinamico derivano anche la loro forza superficiale dal tensore di tensione di Maxwell piuttosto che dal flusso d'aria in volume, raggiungendo efficienze di $10\text{--}100 \text{ N kW}^{-1}$ quando la geometria dell'elettrodo è sintonizzata per asimmetria. **Geometrie a elettrodo flottante e di confinamento** in studio presso ONERA e nei programmi EHD UE mostrano aumenti di spinta da due a cinque volte modellando l'involucro ionico - precisamente la logica di design del rotore a serbatoio di carica. E in **ambienti ad aria rarefatta**, come la stratosfera superiore o l'atmosfera marziana, dove il trascinamento ionico si indebolisce ma la tensione eletrostatica rimane, le superfici ricche di carica possono sostenere la propulsione molto dopo il fallimento dei design convenzionali.

La fisica si allinea perfettamente con il quadro di momento di Poynting dell'elettromagnetismo classico: la spinta corrisponde al gradiente della densità di energia di campo,

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

il che significa che il sistema attinge momento direttamente dal campo elettromagnetico. Gli ioni sono catalizzatori che mantengono lo squilibrio, non la massa di reazione stessa. Questo spiega perché, negli esperimenti in vuoto dove il campo diventa simmetrico, la spinta svanisce - il termine ∇E collassa. Al contrario, nel rotore a serbatoio di lamina, la pelle capacitiva mantiene E ripido e direzionale, producendo approssimativamente **0.1-1 mN** di spinta equivalente a coppia con solo **100 mW** di potenza in ingresso - 10-100 volte l'efficienza dei dispositivi a trascinamento ionico.

Parametro	Design Convenzionale a Vento Ionico	Rotore a Serbatoio di Carica in Lamina	Implicazione
Tensione	20-50 kV	< 6 kV	Rischio di breakdown inferiore, scalabilità più facile
Potenza	1-10 W	≈ 0.1 W	$10-100 \times$ spinta più alta / W
Meccanismo di Spinta	Collisioni ion-neutro	Gradiente di campo (tensione di Maxwell)	Largamente indipendente dalla densità dell'aria
Abilitatore Chiave	Distanza emettitore-collettore	Serbatoio capacitivo in lamina	Carica immagazzinata $>$ corrente transitoria
Efficienza (N kW⁻¹)	0.01-0.1	1-10 (inferita)	Fattibile per micro-UAV

Tali confronti evidenziano un pivot concettuale: **dalla propulsione guidata da corrente a quella guidata da carica**, dal muovere materia al modellare campi. Il prossimo confine è ciò che potrebbe essere chiamato *architettura elettrostatica* - utilizzando ottimizzazione computazionale e materiali avanzati (emettitori a nanotubi di carbonio, lamine sagomate, dielettrici metamateriali) per massimizzare $\int E \cdot \nabla E$. Modi DC pulsati ibridi potrebbero sfruttare ulteriormente lo stoccaggio di carica transitorio riducendo i sottoprodoti chimici.

Conclusione - Alimentata da Maxwell e Coulomb

La propulsione electroaerodinamica non è una curiosità esotica o un'anomalia pseudo-scientifica. È una manifestazione diretta delle leggi di Maxwell e Coulomb - una macchina macroscopica che converte energia potenziale elettrostatica in moto attraverso asimmetria di campo controllata.

Dove gli inventori iniziali videro "antigravità" e i progetti moderni vedono "vento ionico", la vera storia è più semplice e profonda: **i campi elettrici possiedono tensione**. Modellate

quella tensione, e potete spingervi attraverso l'aria senza parti mobili, senza carburante e senza rumore.

Questa è la genialità silenziosa della propulsione electroaerodinamica - veramente, **alimentata da Maxwell e Coulomb**.

Riferimenti

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.