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

الدفع الكهربائي الهوائي - مدعوم بماكسويل وكولوم

تستمد الرؤى المقدمة في هذه المقالة من عشرات التجارب التي أجرها المؤلف بين عامي 2016 و2018، حيث استكشف الدفع الكهربائي الهوائي باستخدام مجموعة واسعة من مصادر الطاقة (تيار متردد ومستمر)، وأشكال الأقطاب الكهربائية، وأنواع منشئات الأيونات. بلغت هذه التحقيقات ذروتها في بناء الدوار ذو القطر 80 سم الموضح أدناه، الذي حقق سرعة دوران تبلغ 18 دورة في الدقيقة باستخدام أقل من 6 كيلوفولت وفقط حوالي 100 ميغاواط من الطاقة الكهربائية المدخلة.

كشفت حملة التجارب هذه أن الأداء يعتمد بشكل أكبر بكثير على توزيع وهندسة الحقول الكهروستاتيكية بدلاً من حركة الهواء أو التيار الأيوني نفسه. شكلت الملاحظات الأساس لإعادة صياغة النظرية للدفع الكهربائي الهوائي التي تليها.

الدفع الكهربائي الهوائي - المحرك الصامت

الدفع الكهربائي الهوائي (EAD) - الذي يُشار إليه غالباً باسم الدفع الكهروهيدروديناميكي (EHD) أو "رياح الأيونات" - هو واحدة من تلك التقنيات النادرة التي تبدو كخيال علمي: جهاز يتحرك بهدوء عبر الهواء دون أجزاء متحركة، ودون احتراق، ودون عوادم مرئية. سمع الجمهور عنه لأول مرة في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين من خلال مشاريع "الرفعة" المنزلية، ومرة أخرى في عام 2018 عندما أظهر معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT) "طائرة أيونية" تنزلق عبر صالة رياضية.

ومع ذلك، فإن الفيزياء الأساسية لها تاريخ أطول وأكثر تعقيداً. قبل قرن تقريباً، لاحظ توماس تاونسند براون وبول بيفلد أن المكثفات عالية الجهد يمكن أن تولد دفعاً صغيراً لكنه مستمر. نسب براون التأثير إلى "مضاد الجاذبية". اليوم، يعترف العلم الحديث، المسلح بقوانين ماكسويل وكولوم، بأن الحقيقة أكثر دقة - وفي كثير من النواحي، أعمق.

الدفع الكهربائي الهوائي ليس عن نفخ الهواء بالأيونات. إنه عن **تشكيل الحقول الكهربائية** بحيث تنتج الإجهادات الكهروستاتيكية الناتجة قوة ميكانيكية صافية. في هذا المعنى، تُغذى أجهزة EAD بماكسويل وكولوم: بهندسة وديناميكيات الحقل الكهربائي نفسه.

الاعتقاد الخاطئ برياح الأيونات

اسأل معظم المهندسين عن الدفع EHD وسوف تسمع قصة بسيطة: منشئ حاد ينتج أيونات عبر تفريغ التاج؛ تتسارع هذه الأيونات نحو قطب جامع، وتصطدم بجزيئات الهواء المحايدة في الطريق وتنقل الزخم إليها. يتحرك الغاز المحايد - الذي يُدعى "رياح الأيونات" - وبموجب القانون الثالث لنيوتن، يتعرض الجهاز لدفع مساوٍ ومعاكس.

هذه الصورة ليست خاطئة، لكنها غير كاملة.

في الواقع، تحمل الأيونات كتلة ضئيلة. تصادماتها مع المحايدات متكررة، نعم، لكن الزخم المنقول لكل تصادم صغير. الأهم من ذلك، **لا تعمل قوة ميكانيكية كبيرة مباشرة على رأس الإبرة أو القطب الجامع**. "الرياح" هي منتج ثانوي، وليست مصدر الدفع.

المحرك الحقيقي يكمن في **الحقل الكهربائي** الذي يسرع تلك الأيونات - في إعادة توزيع الطاقة الكهروستاتيكية مع تشكل الشحنة المكانية وتدفقها.

ضغط الحقل وإجهاد ماكسويل

تصف معادلات ماكسويل كيفية تخزين الحقول الكهربائية ونقل الزخم من خلال **مصفوفة إجهاد ماكسويل**:

$$\mathbf{T} = \varepsilon_0(\mathbf{EE} - \tfrac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

يؤدي دمج هذه المصفوفة على سطح أي جسم إلى **الضغط الكهروستاتيكي الصافي** الذي يعمل عليه. هذا الضغط - وليس حركة الهواء - هو ما يدفع دافع EHD إلى الأمام.

عند حدوث تفريغ التاج، يتشكل سحابة من الأيونات حول المنشئ. تقوم هذه الأيونات بشيئين حاسمان:

1. **تحمي جزئياً الحقل الكهربائي للمنشئ.** ينخفض قوة الحقل المحلية بالقرب من الرأس، لكنه يظل قوياً في الحجم المحيط.

2. **تشوه هندسة الحقل العامة.** على جانب واحد من المنشئ، تنتهي خطوط الحقل على أسطح مشحونة قريبة أو هياكل مؤرضة. على الجانب الآخر، تمتد إلى الخارج، محايدة جزئياً بالشحنة المكانية.

النتيجة هي **عدم توازن في الضغط الكهروستاتيكي** على نظام المنشئ-الجامع - قوة صافية. يتدفق الزخم من الحقل إلى الأقطاب، وليس من خلال التصادمات الجزيئية.

قانون كولوم في العمل

على المستوى الأبسط، تصف القوى المعنية بقانون كولوم:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}\hat{r}$$

يجذب أو يصد كل عنصر سطح مشحون في هيكل EHD كل منطقة مشحونة أخرى في بيئته. الدفع الكلي هو مجموع متجهي هذه التفاعلات الكولومية العديدة، التي يعاد تشكيلها باستمرار بواسطة الأيونات المتحركة التي تعدل الحقل.

في تفريغ التاج الثابت الحالة، يجلس غلاف رقيق من الأيونات الإيجابية بين منشئ عالي الجهد وقطب جامع سلبي نسبياً (أو البيئة المحيطة). تعمل هذه الأيونات كـ**وسطاء**: تحمي جزئياً الجذب بين المنشئ والجامع، وبواسطة حركتها، تعيد تعيين عدم التماثل الحقلي باستمرار. يحافظ الإدخال الكهربائي الثابت على ذلك عدم التوازن، محولاً طاقة الجهد الكهروستاتيكي إلى قوة ميكانيكية.

دروس من ناسا وحدود نموذج رياح الأيونات

في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، أعادت ناسا ومقاولوها النظر في أجهزة من نوع بيفلد-براون تحت دراسات Gravitec وTalley AIAA. باستخدام مكثفات غير متماثلة عالية الجهد في كل من البيئات الجوية والفراغية، كانت

التجارب تهدف إلى اختبار ما إذا كان التأثير يستمر في غياب الهواء.

كانت النتائج قاطعة - وكاشفة عن غير مقصود.

في الوضع الجوي، حققت الدوارات دوراناً بالكاد قابل للقياس (1-2 دورة في الدقيقة) ودفعاً في نطاق 10-100 µN - أوامر من المقدار أقل مما كان متوقعاً إذا كانت الأجهزة تستفيد حقاً من تأثير جاذبي. كان الحركة منسوبة بالكامل إلى تفريغ التاج التقليدي ورياح الأيونات الضعيفة.

في الفراغ، عند ضغوط تصل إلى 10^{-6} Torr، توقفت الحركة تماماً. تم تتبع أي إشارات عابرة إلى الغاز المنبعث أو الشحنة السطحية المتبقية. دون جزيئات هواء للحفاظ على التأين، أصبح الحقل الكهروستاتيكي متماثلاً، واختفت القوة.

خلص المحققون إلى أن الدفع يزداد بشكل تقريبي خطي مع كثافة الهواء - نتيجة غالباً ما تُستشهد بها لـ"دحض" الدفع EHD كاستحالة في الفراغ. لكن ما أظهرته حقاً هو شيء أعمق: **دون وسيط لنقل الشحنة المكانية، يفقد الحقل الكهربائي عدم التماثل الذي ينتج تدرجات الضغط الكهروستاتيكي.**

بمعنى آخر، أكدت تلك الاختبارات المبكرة عن غير مقصود **تفسير إجهاد ماكسويل** للدفع الكهربائي الهوائي. لم يكن الجاذبية في العمل، ولا مجرد سحب الأيونات - كان وجود **عدم توازن الحقل الوسيط بالشحنة** هو ما يهم.

أجهزة Gravitec، المبنية للبساطة والتماثل، افتقرت إلى أي **خزان شحنة** كبير أو **عازل تشكيل حقل**. أدت الهندسات المفتوحة إلى تشتيت خطوط الحقل في المحيط، مُهدرة معظم الطاقة الكهروستاتيكية.

بالمقابل، ركز الدوار EPS-ألمنيوم الموصوف هنا الشحنة على طول جلد موصل محدد جيداً، مما سمح لمنطقة الشحنة المكانية بـ**تشكيل** الحقل المحلي. النتيجة: دفع قابل للاستخدام بأقل من 6 كيلوفولت وحوالي 100 ميغاواط - أداء أفضل بنحو دولتي المقدار في كفاءة الطاقة.

تكرر هذه النتائج موضوعاً متسقاً: **تنبثق كفاءة الدفع الكهربائي الهوائي ليس من الجهد أو تدفق الهواء، بل من السيطرة على طوبولوجيا الشحنة وهندسة الحقل.**

تأثير خزان الشحنة

الغشاء الخفيف الوزن فوق نواة عازلة صلبة يتصرف كأكثر من مجرد موصل - يشكل **خزان شحنة واسع المساحة** يعزز عدم التماثل للحقل الكهربائي. في التصميم الحالي، يخدم البوليسترين الموسع (EPS) فقط كـ**دعم هيكلي خفيف الوزن**، مع لف سطحها بالكامل بغشاء ألمنيوم **مستمر كهربائياً مع مصدر الجهد العالي**. لا يضيف EPS وظيفة كهربائية ضئيلة؛ قيمته تكمن في تمكين سطح موصل كبير بكتلة زهيدة.

يخزن هذا الجلد الموصل الواسع الشحنة مباشرة من مصدر الطاقة، مما يسمح لتفريغ التاج بالعمل ضد **حقل كهروستاتيكي مشحون مسبقاً** بدلاً من بنائه من الصفر في كل دورة. تزيد مساحة سطح الغشاء الإجمالية من السعة الفعالة بشكل كبير - في حدود 10-100 بيكوفاراد سم$^{-2}$، اعتماداً على نسيج السطح وانحنائه - وتحول جهداً مطبقاً معتدلاً إلى تدرج حقل كهربائي محلي أقوى بكثير.

عند اشتعال التاج، يعمل الغشاء كمرجع إمكاني مستقر. تعدل الأيونات المصدرة الحقل المحلي قليلاً لكنها لا تسيطر عليه؛ بدلاً من ذلك، تحافظ الشحنة السطحية المخزنة على عدم تماثل ثابت ينتج دفعاً مستمراً بطاقة منخفضة جداً.

من منظور إجهاد ماكسويل، تكون القوة متناسبة مع التكامل لقوة الحقل وتدرجه:

$$F \approx \varepsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

ويُحدث الغشاء الكبير الجيداً المشحون الحد الأقصى لكلا المصطلحين دون الحاجة إلى جهد أعلى أو تيار أعلى. هذا يفسر لماذا يمكن لدوار منخفض الطاقة ومنخفض الجهد تحقيق دوران كبير: استبدل **الطاقة الكهروستاتيكية المخزنة** بخسائر التيار الأيوني الثقيلة لهندسات "رياح الأيونات" التقليدية - شكل عملي من **الكفاءة الكهروستاتيكية**.

هندسة الكفاءة

تحدد كفاءة دافع EHD ليس بسرعة تدفق الهواء، بل بـ**مدى فعالية تشكيل الحقل الكهربائي**. تشمل المعلمات الرئيسية:

- **عدم التماثل الحقلي:** المكون الاتجاهي الصافي لتدرج الضغط الكهروستاتيكي.
- **توزيع كثافة الشحنة:** كيفية تعديل سحابة الأيونات لذلك الحقل من خلال الدرع الجزئي.
- **الاقتران السعوي:** إجمالي الشحنة المخزنة على الأسطح المواجهة لكل فولت مطبق.
- **قنوات الخسارة:** خسائر التاج، وإعادة التركيب، وتسرب العازل.

يمكن للتصاميم التي تحصر وتشكل الحقل - على سبيل المثال، بوضع سطح مشحون عكسياً واسع قريباً من المنشئ - تحقيق تحسينات في حدود دولتي المقدار في الدفع لكل واط. يقوم الحقل الكهربائي بالعمل؛ الأيونات تمكن فقط الحقل من البقاء غير متماثل وديناميكي.

إعادة النظر في بيفلد-براون

ملاحظات براون المبكرة حول الدفع من المكثفات غير المتماثلة تسبق فهمنا الحديث لفيزياء البلازما. دون إطار إجهاد ماكسويل أو ديناميكيات الشحنة المكانية، كان من الطبيعي التفكير في أن التأثير قد يشمل الجاذبية. الحقيقة أن دافعات EHD تنتج قوة "ضد" متجه الحقل (وأحياناً عمودياً إلى الأعلى) زادت فقط من الغموض.

من خلال عدسة اليوم، كان "مضاد الجاذبية" لبراون مجرد ضغط كهروستاتيكي مرئي. التشابه في الشكل الرياضي - كلاهما طاقة الجهد الجاذبي والكهروستاتيكي ينخفضان كـ$1/r^2$ - جعل الالتباس مفهوماً تاريخياً، لكن الفيزياء كهربائية مغناطيسية بالكامل.

الآراء والسياق الحديث

تعزز التحليلات الأخيرة ومناقشات الأقران هذه إعادة الصياغة للدفع الكهربائي الهوائي كـ**ظاهرة تدرج حقلي** بدلاً من محرك رياح أيونات. في تكوينات الرفعة الكلاسيكية، تيارات التاج في حدود الميلي أمبير عند عشرات الكيلوفولت تنتج كثافات دفع في نطاق الميكرو- إلى الميلي نيوتن لكل واط - انعكاس لمدى قلة الطاقة الحقلية الكهربائية التي تنتهي كإجهاد ميكانيكي

موجه. بالمقابل، يحول الدوار المغلف بـEPS الغشاء نفس القانون الفيزيائي إلى عملية **مدفوعة بالشحنة**: يحافظ السطح الموصل الواسع على تدرج $\boldsymbol{E}$-قوي بتيار زهيد، متبادلاً خسائر الانجراف بطاقة الحقل المخزنة.

يُعكس هذا التمييز تحولاً أوسع في البحث المعاصر. **مشغلات تفريغ الحاجز العازلي** في التحكم الهوائي يشتقون أيضاً قوتهم السطحية من إجهاد ماكسويل بدلاً من تدفق الهواء الجماعي، محققين كفاءات 10-100 $\mathrm{N\,kW^{-1}}$ عندما تُعدل هندسة القطب لعدم التماثل. **هندسات القطب العائم والحصر** تحت الدراسة في ONERA وداخل برامج EHD الأوروبية تظهر زيادات في الدفع بنسبة 2 إلى 5 أضعاف من خلال تشكيل غلاف الأيون - بالضبط منطق التصميم لدوار خزان الشحنة. وفي **بيئات الهواء الرقيق**، مثل الستراتوسفير العلوي أو الغلاف الجوي المريخي، حيث يضعف سحب الأيونات لكن يبقى الإجهاد الكهروستاتيكي، يمكن للأسطح الغنية بالشحنة الحفاظ على الدفع طويلاً بعد فشل التصاميم التقليدية.

تتوافق الفيزياء بشكل جيد مع إطار زخم بوينتينغ للكهرومغناطيسية الكلاسيكية: يتوافق الدفع مع تدرج كثافة طاقة الحقل،

$$F \approx \varepsilon_0 \int (\boldsymbol{E} \cdot \nabla \boldsymbol{E}), dV$$

مما يعني أن النظام يسحب الزخم مباشرة من الحقل الكهرومغناطيسي. الأيونات محفزات تحافظ على عدم التوازن، وليست كتلة التفاعل نفسها. هذا يفسر لماذا، في تجارب الفراغ حيث يصبح الحقل متماثلاً، يختفي الدفع - ينهار مصطلح $\nabla \boldsymbol{E}$. بالعكس، في الدوار خزان الغشاء، يحافظ الجلد السعوي على $\boldsymbol{E}$ شديد الانحدار والاتجاه، منتجاً حوالي $\mathbf{1\ mN–0.1}$ من الدفع المكافئ للعزم من فقط $\mathbf{100\ mW}$ طاقة إدخال - 10-100 مرة كفاءة أجهزة سحب الأيونات.

المعلمة	التصميم التقليدي لرياح الأيونات	الدوار خزان الغشاء المشحون	الدلالة
الجهد	20–50 كيلوفولت	< 6 كيلوفولت	مخاطر انهيار أقل، توسع أسهل
الطاقة	1–10 واط	≈ 0.1 واط	10–100× دفع أعلى / واط
آلية الدفع	تصادمات الأيون-المحايد	تدرج الحقل (إجهاد ماكسويل)	مستقل إلى حد كبير عن كثافة الهواء
العامل الرئيسي	فجوة المنشئ-الجامع	خزان الغشاء السعوي	الشحنة المخزنة > التيار العابر
الكفاءة ($\mathrm{N\,kW^{-1}}$)	0.1–0.01	1–10 (مستنتج)	قابل للتطبيق للطائرات بدون طيار الدقيقة

تُبرز مثل هذه المقارنات تحولاً مفهومياً: **من الدفع المدفوع بالتيار إلى الدفع المدفوع بالشحنة**، من تحريك المادة إلى تشكيل الحقول. الحدود التالية هي ما يمكن تسميته **هندسة كهروستاتيكية** - استخدام التحسين الحسابي والمواد المتقدمة (منشئات أنابيب الكربون النانوية، أغشية منقوشة، عوازل ميتامادة) لتعظيم $\int \boldsymbol{E} \cdot \nabla \boldsymbol{E}$. يمكن لأوضاع DC النبضية الهجينة استغلال تخزين الشحنة العابرة أكثر مع تقليل المنتجات الكيميائية الجانبية.

الخاتمة - مدعوم بماكسويل وكولوم

الدفع الكهربائي الهوائي ليس فضولاً غريباً أو شذوذاً زائفاً علمياً. إنه تجسيد مباشر لقوانين ماكسويل وكولوم - آلة ماكروسكوبية تحول طاقة الجهد الكهروستاتيكي إلى حركة من خلال عدم التماثل الحقلي المتحكم فيه.

حيث رأى المخترعون المبكرون "مضاد الجاذبية" وترى المشاريع الحديثة "رياح الأيونات"، القصة الحقيقية أبسط وأعمق: **الحقول الكهربائية تمتلك توتراً**. شكل ذلك التوتر، ويمكنك سحب نفسك عبر الهواء دون أجزاء متحركة، ودون وقود، ودون صوت.

هذا هو العبقرية الهادئة للدفع الكهربائي الهوائي - حقاً، **مدعوم بماكسويل وكولوم.**

المراجع

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.