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

ارتفاع، طيران، مدار

زورق هوائي تعمل بالكهرباء الهوائية المدعوم بالطاقة الشمسية للوصول المستدام إلى الفضاء

الرؤية والأسس الفيزيائية

كان حلم الطيران دائمًا مسابقة بين الصبر والقوة. ارتفع بالونيو الجويون في القرن الثامن عشر بلطف إلى السماء باستخدام الغازات الطافية، بينما اخترق مهندسو الصواريخ في القرن العشرين السماء بالنار. كلا النهجين يشتركان في الهدف نفسه - الهروب من طغيان الجاذبية - لكنهما يختلفان جذريًا في الفلسفة. يستخدم أحدهما الهواء كشريك؛ والآخر يعاملها كعائق. بين هذين الطرفين المتطرفين يوجد طريق ثالث، لم يُحقق بعد في الممارسة لكنه لم يعد مستحيلاً في المبدأ: **زورق هوائي مدعوم بالطاقة الشمسية يمكنه الطيران إلى المدار**، يرتفع أولاً بالطفو، ثم بالرفع الهوائي، وأخيرًا بدعم الطرد المركزي، كل ذلك دون وقود كيميائي.

في قلب هذه الفكرة **الدفع الكهربائي الهوائي (EAD)** - شكل من أشكال الدفع الكهربائي الذي يستخدم الحقول الكهربائية لتسريع الأيونات في الهواء. تنقل الأيونات المسرّعة الزخم إلى الجزيئات المحايدة، مما ينتج تدفقًا جماعيًا ودفعًا صافيًا على الأقطاب. بالمقارنة مع الصاروخ، الذي يجب أن يحمل كتلة تفاعلية، أو المروحة، التي تحتاج إلى شفرات متحركة، يعمل الدفع الكهربائي الهوائي **بدون أجزاء متحركة وبدون عادم داخلي**، فقط ضوء الشمس والهواء. عند ربطه بمصفوفة شمسية عالية الكفاءة وتركيبه على جسم رفع خفيف الوزن كبير الحجم، يوفر المكون المفقود للتسارع المستمر في الغلاف الجوي العلوي، حيث يكون السحب صغيرًا لكن الهواء لا يزال موجودًا.

الاقتراح بسيط الوصف لكنه صعب التنفيذ:

1. **الارتفاع** - يصعد زورق هوائي طافٍ مملوء بالهيدروجين أو الهيليوم سلبًا إلى الستراتوسفير، بعيدًا عن الطقس وحركة الطيران.
2. **الطيران** - يتسارع الزورق أفقيًا باستخدام دفع EAD، مما يزيد السرعة ببطء بينما يتسلق إلى هواء أرفع لتقليل السحب.
3. **المدار** - بعد أسابيع من التسارع المستمر، يوازن الطرد المركزي الجاذبية؛ لم يعد ال مركبة بحاجة إلى رفع، إذ أصبحت قمرًا اصطناعيًا بالإصرار لا بالانفجار.

الفكرة ليست خيالية. كل خطوة متجذرة في الفيزياء المعروفة: الطفو، الطاقة الشمسية، الكهربائية الساكنة، وميكانيكا المدارات. ما يتغير هو الإطار الزمني. بدلاً من دقائق الاحتراق، نفكر في **أسابيع من ضوء الشمس**. بدلاً من أطنان من الوقود، نعتمد على **الحقول والصبر**.

طاقة المدار

يبدأ وينتهي كل نقاش حول الطيران الفضائي بالطاقة. الطاقة الحركية لكل كيلوغرام من الكتلة المطلوبة للحفاظ على مدار دائري حول الأرض تعطى بـ

$$E_k = \frac{1}{2}v^2$$

حيث v هي السرعة المدارية. لمدار الأرض المنخفض، $v \approx 7.8 \times 10^3\ \text{m/s}$، لذا $E_k \approx 3.0 \times 10^7\ \text{J/kg}$، أو حوالي **30 ميغاجول لكل كيلوغرام**. هذا هو الطاقة المكافئة لحرق حوالي كيلوغرام واحد من البنزين لكل كيلوغرام موضوع في المدار. إنه رقم كبير، لكنه ليس كبيرًا بشكل فلكي.

الآن قارن ذلك بتدفق الطاقة الشمسية المستمر في أعلى غلاف الأرض الجوي: حوالي **1,360 واط لكل متر مربع**. إذا استطعنا تحويل جزء صغير من ذلك إلى طاقة حركية على مدار أيام أو أسابيع، يمكننا، في المبدأ، توفير الطاقة المدارية المطلوبة. تمتلك مصفوفات الخلايا الكهروضوئية الحديثة عالية الأداء قدرات محددة تصل إلى مئات الواط لكل كيلوغرام. عند $P_{\text{sp}} = 300\ \text{W/kg}$، تنتج كيلوغرام واحد من المصفوفة 300 جول لكل ثانية. على مدار يوم واحد (8.64×10^4 ثانية)، ذلك 2.6×10^7 جول - مشابه للطاقة المدارية لكيلوغرام واحد من الكتلة.

هذه المقارنة البسيطة تظهر منطق هذا النهج. الطاقة للوصول إلى المدار متاحة من الشمس في حوالي **يوم واحد لكل كيلوغرام من المصفوفة**، إذا استطعنا تحويلها بكفاءة إلى دفع. التحدي العملي هو أن السحب وعدم الكفاءة يمتصان معظمها. الحل هو الارتفاع والصبر: العمل في الهواء الرقيق حيث يكون السحب منخفضًا، وتمديد العملية على أسابيع بدلاً من ساعات.

تبادل الوقت بالوقود

تحل الصواريخ مشكلة السحب بالقوة الغاشمة - تذهب بسرعة كبيرة بحيث يصبح الهواء غير ذي صلة. أما الزوارق الهوائية، فتعمل مع الهواء؛ يمكنها التردد. إذا عُولِجَ الوقت كمورد قابل للإنفاق، يمكنه استبدال كتلة الوقود. مهمة الزورق الهوائي هي الحفاظ على تسارع صغير لكنه مستمر على فترات طويلة، ربما **بالترتيب من** $10^{-3}\ \text{m/s}^2$، حتى يتم تحقيق السرعة المدارية.

إذا استغرق الصعود إلى المدار ثلاثة أسابيع، أو حوالي 1.8×10^6 ثانية، فإن التسارع المتوسط المطلوب هو

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{t} = \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 4.3 \times 10^{-3}\ \text{m/s}^2$$

- أقل من نصف ألف من جاذبية الأرض. مثل هذه التسارعات سهلة التحمل لزورق هوائي؛ لا تفرض إجهادًا هيكليًا. الصعوبة الوحيدة هي **الحفاظ عليها**، مع الكمية الصغيرة من الدفع المتاح لكل وحدة طاقة.

إذا كانت المركبة لها كتلة $10^3\ \text{kg}$، فإن تسارعًا متوسطًا قدره $4 \times 10^{-3}\ \text{m/s}^2$ يتطلب فقط حوالي **4 نيوتن من الدفع الصافي** - أقل من وزن تفاحة. يختفي الجنون الظاهري للوصول إلى المدار بدفع تفاحة عندما يُسمح للوقت بالتمدد إلى أسابيع.

الطفو والطريق إلى الهواء الرقيق

يبدأ الزورق الهوائي رحلته كأي مركبة أخف من الهواء: بتشريد الهواء بغاز أخف. القوة الطافية تعطى بـ

$$F_b = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{gas}})gV$$

حيث V حجم الغاز و ρ الكثافات المعنية. قرب مستوى سطح البحر، $\rho_{\text{air}} \approx 1.2\ \text{kg/m}^3$، $\rho_{\text{He}} \approx 0.18\ \text{kg/m}^3$، و $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09\ \text{kg/m}^3$. يوفر الهيدروجين رفعًا أكبر قليلاً، حوالي **1.1 كجم لكل متر مكعب**، مقارنة بـ **1.0 كجم لكل متر مكعب** للهيليوم. يبدو الفرق صغيرًا لكنه يتراكم على آلاف المترات المكعبة.

لذلك يقدم الهيدروجين ميزة أداء قابلة للقياس، على الرغم من تكلفته القابلية للاشتعال. يتطلب مناطق كهربائية صارمة وإجراءات التهوية، خاصة أن المركبة تحمل أيضًا أنظمة كهربائية ساكنة عالية الجهد. يقدم الهيليوم رفعًا أقل لكنه خامل تمامًا. كلا الغازين قابلان للتطبيق؛ الاختيار يعتمد على تحمل مخاطر المهمة. في الاختبارات المبكرة العامة أو في المناطق المأهولة، يُفضل الهيليوم. للمحاولات النائية أو المدارية، قد يكون الهيدروجين مبررًا.

مع ارتفاع المركبة، تنخفض كثافة الهواء تقريبًا بشكل أسي مع ارتفاع النطاق $H \approx 7.5\ \text{km}$. عند 30 كم، تكون الكثافة حوالي $1/65$ من مستوى سطح البحر؛ عند 50 كم، $1/300$. يضعف الطفو بشكل مقابل، لكن السحب أيضًا. تم تصميم المركبة للوصول إلى **الطفو المحايد** عند ارتفاع حيث يظل شدة الشمس عالية لكن الضغط الديناميكي ضئيل - حوالي 30–40 كم في الستراتوسفير. من هناك، يبدأ التسارع الأفقي.

الرفع، السحب، والضغط الديناميكي

للحفاظ على الارتفاع أثناء التسارع، قد يعتمد الزورق الهوائي جزئيًا على **الرفع الهوائي**. لجسم رفعي، تكون قوى الرفع والسحب

$$F_L = \tfrac{1}{2}\rho v^2 A C_L, \qquad F_D = \tfrac{1}{2}\rho v^2 A C_D$$

حيث A المساحة المرجعية، C_L و C_D معاملات الرفع والسحب. بسبب أن ρ صغيرة عند الارتفاع، تكون هذه القوى صغيرة؛ تعوض المركبة بـ **مساحة كبيرة** و **وزن منخفض**.

النسبة $L/D = C_L/C_D$ تحدد كفاءة الطيران الهوائي. يمكن للطائرات الانزلاقية الحديثة تجاوز $L/D = 50$ في الهواء الكثيف. يمكن لزورق هوائي خفيف الوزن مصمم بسلاسة فائقة وملحقات ضئيلة الحفاظ على L/D فعال قدره 10–20 حتى في الهواء الرقيق. لكن مع ترقق الهواء أكثر، لا يحد الرفع الانتقال إلى الطيران المداري - يحكمه **قوة السحب**.

القوة المطلوبة للتغلب على السحب هي

$$P_D = F_D v = \tfrac{1}{2}\rho v^3 A C_D$$

وتتناسب مع مكعب السرعة. لهذا السبب تتسارع الصواريخ بسرعة: إذا ترددت، يستهلك السحب طاقتها بشكل أسي. يأخذ الزورق الهوائي الطريق المعاكس: يتسارع حيث يكون ρ صغيرًا جدًا بحيث يظل P_D محدودًا حتى عند كيلومترات في الثانية.

إذا، على سبيل المثال، $\rho = 10^{-5}\ \text{kg/m}^3$ (نموذجي قرب 60 كم ارتفاع)، $A = 100\ \text{m}^2$، $C_D = 0.05$، و $v = 1{,}000\ \text{m/s}$، فإن

$$P_D = 0.5 \times 10^{-5} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^{4}\ \text{W},$$

أو 25 كيلوواط - ضمن نطاق الشمس بسهولة. بالمقابل، عند مستوى سطح البحر، ستحتاج التكوين نفسه إلى 25 غيغاواط.

القاعدة بسيطة: **الهواء الرقيق يشتري الوقت**، و **الوقت يحل محل الوقود**.

فرصة الكهرباء الهوائية

في أوائل القرن العشرين، لاحظ الفيزيائيون أن الحقول الكهربائية القوية قرب الأقطاب الحادة في الهواء تنتج هالة زرقاء خافتة وتدفق هوائي خفيف. ينتج "ريح كهربائية" هذه من نقل الزخم بين الأيونات والمحايدات. عُولِجَت معظمًا كفضول حتى نضجت الإلكترونيات عالية الجهد. عند ترتيبها بشكل صحيح، يمكن للتأثير إنتاج دفع قابل للقياس.

يعمل الدفع الكهربائي الهوائي بتطبيق جهد عالي بين **مصدر**، سلك رفيع أو حافة تنتج أيونات، و **جامع**، قطب أوسع يستقبلهن. تتسارع الأيونات في الحقل الكهربائي، تصطدم بجزيئات الهواء المحايدة، وتنقل زخمًا أماميًا إلى الغاز. تشعر الجهاز بدفع معاكس مساوٍ.

بينما كانت العروض المبكرة متواضعة، أثبتت التجارب الحديثة - بما في ذلك طائرة أيونية بجناح ثابت **طارت بواسطة معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في 2018** - أن الطيران الثابت الصامت ممكن. ومع ذلك، سبقت الفكرة هذا الإنجاز. قبل سنوات، أظهرت أبحاث في **صيغ مبنية على تنسور ماكسويل** لدفع الكهرباء الهوائية كيف يمكن للفيزياء نفسها التوسع إلى أبعاد أكبر وهواء أرفع. في تلك الصيغة، ينشأ الدفع ليس من "ريح" بل من **إجهاد كهرومغناطيسي** مدمج على حجم منطقة التفريغ.

المعادلة ذات الصلة مشتقة من **تنسور إجهاد ماكسويل** $\mathbf{T}$، الذي للحقل الكهربائي الساكن هو

$$\mathbf{T} = \varepsilon \left(\mathbf{E}\mathbf{E} - \tfrac{1}{2} E^2 \mathbf{I} \right)$$

حيث ε هو السماحية الإبصارية للوسط، $\mathbf{E}$ هو متجه الحقل الكهربائي، و $\mathbf{I}$ تنسور الهوية. يتم الحصول على القوة الكهرومغناطيسية الصافية على جسم بتكامل هذا التنسور على سطحه:

$$\mathbf{F}_{\mathrm{EM}} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} \, dS .$$

داخل المنطقة المؤينة، يبسط هذا إلى **كثافة قوة حجمية**

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} - \tfrac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon ,$$

حيث ρ_e هي كثافة الشحنة المحلية. في غاز ذو سماحية إبصارية موحدة تقريبًا، يختفي الحد الثاني، مما يترك القوة الحجمية الكولومية الأنيقة

$$\mathbf{f} \approx \rho_e \mathbf{E} .$$

هذه التعبير الموجز هو جوهر الدفع الكهربائي الهوائي: أينما يتعايش حقل كهربائي وشحنة مكانية، تؤثر قوة حجمية صافية على الوسط.

الأيونات نفسها قليلة، لكن زخمها يُعاد إلى المحايدات من خلال التصادمات. يحدد المسار الحر المتوسط λ بين التصادمات كيفية انتشار الزخم؛ يتناسب عكسيًا مع الضغط. عند ضغوط أقل، تسافر الأيونات أبعد لكل تصادم، وتتغير كفاءة نقل الزخم. يوجد **نطاق ضغط مثالي** حيث يمكن للأيونات التصادم بشكل متكرر بما يكفي لدفع الغاز لكن ليس كثيرًا بحيث تضيع الطاقة

في تسخينه. لغلاف الأرض الجوي، يقع هذا النطاق تقريبًا بين بضعة تور و بضعة ميليتور - تمامًا النطاق المواجه بين 40 و 80 كيلومتر ارتفاع.

لذلك يصبح ظرف الزورق الهوائي المضيف المثالي لبلاطات الكهرباء الهوائية العاملة في بيئتها الطبيعية. الغلاف الجوي نفسه هو الكتلة التفاعلية.

فيزياء الدفع الكهربائي الهوائي

على النظرة الأولى، يبدو الدفع الكهربائي الهوائي غير محتمل. فكرة أن مجموعة من الأقطاب الصامتة الثابتة يمكن أن تولد دفعًا قويًا بما يكفي لتحريك زورق هوائي تبدو مخالفة للتجربة اليومية. غياب الكتلة التفاعلية المرئية أو الآلات المتحركة يتحدى الحدس. ومع ذلك، كل أيون يتحرك في حقل كهربائي يحمل زخمًا، والزخم محفوظ. يعمل الحقل كرافعة غير مرئية، والهواء كسائل عمله.

تستند أسس هذه الظاهرة ليس إلى فيزياء البلازما الغريبة بل إلى **معادلات ماكسويل** وتعبيرها الميكانيكي، **تنسور إجهاد ماكسويل**. تجعل هذه الصيغة التنسورية واضحًا أن الحقول الكهربائية ليست مجرد أنماط من الجهد - إنها تخزن وتنقل إجهادًا ميكانيكيًا في الوسط المحيط.

إجهاد الحقل وقوة الجسم الكولومية

تنسور إجهاد ماكسويل في الكهربائية الساكنة هو

$$\mathbf{T} = \varepsilon \left(\mathbf{E}\mathbf{E} - \tfrac{1}{2} E^2 \mathbf{I} \right)$$

حيث ε السماحية، $\mathbf{E}$ الحقل الكهربائي، و $\mathbf{I}$ تنسور الهوية. الحد الأول يمثل الضغط الاتجاهي على طول خطوط الحقل، والحد الثاني التوتر الإيزوتروبي الذي يقاوم انحراف الحقل.

القوة الكهرومغناطيسية الصافية على جسم مغمور في مثل هذا الحقل هي التكامل السطحي لهذا التنسور:

$$\mathbf{F}_{\mathrm{EM}} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} \, dS .$$

فيزيائيًا، يخبرنا هذا التعبير أن الحقل الكهربائي يمارس إجهادًا على حدود أي منطقة تحتوي على شحنة أو تدرجات ديبلكتريكية. لكنه يمكن إعادة كتابته في شكل حجمي محلي أكثر باستخدام نظرية التباعد:

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \rho_e \mathbf{E} - \tfrac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon .$$

الحد الأول، $\rho_e \mathbf{E}$، هو **قوة الجسم الكولومية** المألوفة: كثافة شحنة تتعرض لحقل. الحد الثاني يهم فقط حيث تتغير سماحية الوسط بسرعة، مثل عند حدود المواد. في الهواء، ε موحدة جوهريًا، لذا $\nabla \varepsilon \approx 0$، مما يترك

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} .$$

هذه المعادلة البسيطة المخادعة تشفر مبدأ الدفع الكهربائي الهوائي بأكمله. إذا وُجِدَ حجم من الغاز يتعرض فيه الأيونات (بكثافة ρ_e) لحقل كهربائي $\mathbf{E}$، فإن **كثافة قوة صافية** تؤثر على ذلك الغاز. مقدار الدفع الكلي هو التكامل الحجمي لـ $\rho_e \mathbf{E}$

على منطقة التفريغ:

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_e \mathbf{E}\, dV.$$

تشعر الأقطاب بالتفاعل المعاكس المساوي، مما ينتج الدفع.

نقل الزخم ودور التصادمات

نادراً ما تسافر الأيونات في الهواء بعيدًا قبل التصادم مع جزيئات محايدة. **المسار الحر المتوسط** λ متناسب عكسيًا مع ضغط الغاز p وقسمة σ:

$$\lambda \approx \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

حيث d قطر الجزيء. عند مستوى سطح البحر، λ صغير - بالترتيب من عشرات النانومترات. في الميزوسفير (حوالي 70 كم)، يمتد λ إلى مليمترات أو سنتيمترات.

عندما يتسارع أيون تحت الحقل، ينقل الزخم إلى المحايدات من خلال التصادمات. كل تصادم يشارك جزءًا من الزخم الاتجاهي للأيون؛ التأثير التراكمي هو **تدفق محايد جماعي** - ما يسميه المجربون **ريح أيونية**. يتحرك الغاز من المصدر إلى الجامع، وتتعرض الأقطاب لدفع تفاعلي معاكس.

في الهواء الكثيف جدًا، تصطدم الأيونات كثيرًا؛ تتشبع سرعة الانجراف، وتُفقد الطاقة كحرارة. في الهواء الرقيق جدًا، تكون التصادمات نادرة؛ تطير الأيونات بحرية لكنها لا تسحب المحايدات بفعالية. بين هذين الطرفين يوجد **نقطة حلوة** حيث يسمح المسار الحر المتوسط بنقل زخم فعال - تمامًا المنطقة التي يعبرها الزورق الهوائي في طريقه إلى الفضاء.

عند ضغوط حوالي 10^{-2} إلى 10^{-4} بار (تتوافق مع 40–80 كم ارتفاع)، يمكن للأيونات التسارع على مسافات ماكروسكوبية قبل التصادم، ومع ذلك تحدث التصادمات بتكرار كافٍ لإنتاج دفع. **الاقتران الكهربائي الهوائي** بين الحقل والغاز في أفضل حالاته.

علاقة الطاقة–الدفع

الطاقة الكهربائية المُقدَّمة إلى تفريغ هي $P = \int_V \mathbf{J}\cdot\mathbf{E}\, dV$، والتي تقريبًا IV للتيار الثابت I والجهد V. الإخراج الميكانيكي المفيد هو الدفع مضروبًا في سرعة كتلة الهواء المسرّعة، لكن في الدفع الثابت نركز على **نسبة الدفع إلى الطاقة**، T/P.

أبلغت الدراسات التجريبية عن قيم T/P تتراوح من بضعة ملي نيوتن لكل واط ($\mathrm{mN/W}$) إلى قريبة من $0.1\ \mathrm{N/W}$ تحت ظروف محسنة. في الهواء الجوي عند الضغط القياسي، EAD غير فعال؛ لكن عند الضغوط المخفضة، تزداد حركية الأيون ويمكن الحفاظ على كثافة التيار عند جهود أقل، مما يحسن T/P.

حجة أبعاد بسيطة تربط كثافة قوة الجسم $f = \rho_e E$ بكثافة التيار $J = \rho_e \mu E$، حيث μ حركية الأيون. ثم

$$f = \frac{J}{\mu},$$

لذا لكثافة تيار معينة، تحقق حركية أعلى (عند ضغط أقل) دفعًا أكثر لكل تيار. الطاقة الكهربائية الكلية هي $P = JEV$، لذا **الدفع إلى الطاقة** يتناسب كـ

$$\frac{T}{P} \approx \frac{1}{E\mu},$$

مما يعني أن الحقول الكهربائية الأقل أو حركية الأيون الأعلى تزيد الكفاءة. لكن E الأقل يقلل أيضًا التيار وبالتالي الدفع الكلي، لذا هناك نظام مثالي مرة أخرى.

هذه العلاقات ليست فضوليات نظرية - إنها تحدد تصميم كل بلاطة EAD. عند ارتفاع معين، يجب ضبط الجهد، مسافة الفجوة، وهندسة المصدر بحيث تُرضى **منحنى باسخن** (الذي يربط جهد الانهيار بمنتج الضغط–المسافة) لكن لا يتجاوز.

يمكن التعبير عن قانون باسخن للهواء تقريبًا كـ

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln[\ln(1+1/\gamma_{se})]}$$

حيث A و B ثوابت تجريبية و γ_{se} معامل انبعاث الإلكترونات الثانوية. تسمح الهندسة المتغيرة للزورق الهوائي بضبط d، مسافة الأقطاب، ديناميكيًا للحفاظ على تفريغ كوروني فعال دون قوس كهربائي مع انخفاض الضغط المحيطي أثناء الصعود.

هندسة الحقل وطوبولوجيا الإجهاد

استخدمت العروض المبكرة لـ "الرفع" سلكًا رفيعًا كمصدر وورقة مسطحة كجامع. كانت خطوط الحقل منحنية بشدة، وذهب معظم الطاقة في الحفاظ على الكورونا بدلاً من إنتاج دفع مفيد. كانت الكفاءة سيئة لأن **حقل إجهاد ماكسويل** لم يكن محاذيًا لاتجاه الدفع المرغوب.

الرؤية الرئيسية - المطورة في عمل نظري سابق لطائرة الأيون MIT - كانت معاملة الحقل الكهربائي ليس كمنتج ثانوي بل كمتغير تصميم أساسي. ينشأ الدفع من **التكامل للإجهاد الكهرومغناطيسي** على طول خطوط الحقل، لذا الهدف هو تشكيل تلك الخطوط لتكون متوازية ومتسقة عبر منطقة واسعة. التشبيه هو الهوائي: كما يقلل التدفق اللامينار السلس من السحب، تُحَدَّث طوبولوجيا الحقل الكهربائي السلسة الإجهاد الاتجاهي الأقصى.

هذه "هندسة طوبولوجيا الحقل" تعيد صياغة الجهاز كـ **محرك كهربائي ساكن** بدلاً من لعبة بلازما. بسيطرة انحناء الأقطاب، الجهود الحارسة، والطبقات الديليكتريكية، يمكن جعل $\mathbf{E}$ شبه موحد عبر مسار التسارع، مما ينتج إجهادًا شبه خطي ويتجنب التركيز الذاتي المدمر الذي يسبب القوس الكهربائي.

النتيجة هي القابلية للتوسع. عندما تُلَصَّق الأقطاب في بلاطات متر مربع، كل مع محول جهد عالي ومنطق تحكم خاص بها، يمكن تحويل ظرف الزورق الهوائي بأكمله إلى مصفوفة EAD موزعة عملاقة. لا توجد أجزاء متحركة لمزامنتها، فقط حقول لتنسيقها.

كثافة الدفع والطريق إلى القابلية للتوسع

كثافة قوة الجسم الحجمية هي $f = \rho_e E$. كثافة الشحنة في تفريغ كوروني نموذجي عند الضغط الجوي بالترتيب من 10^{-5} إلى $10^{-3}\ \mathrm{C/m^3}$. عند الضغط المخفض، يمكن أن تنخفض قليلاً، لكن الحقل الكهربائي E يمكن زيادته بأمان إلى عشرات الكيلوفولت لكل سنتيمتر دون انهيار.

إذا $\rho_e = 10^{-4}\ \mathrm{C/m^3}$ و $E = 10^5\ \mathrm{V/m}$، فإن كثافة القوة هي $f = 10\ \mathrm{N/m^3}$. منتشرة على منطقة نشطة بسماكة $1\ \mathrm{m}$، تعطي ضغط سطحي قدره $10\ \mathrm{N/m^2}$ - مكافئ لبضعة ميللباسكال. قد يبدو ذلك صغيرًا، لكن على آلاف المترات المربعة يصبح كبيرًا. سطح 1000 م² بإجهاد $10\ \mathrm{N/m^2}$ ينتج 10,000 نيوتن من الدفع، كافٍ لتسارع مركبة متعددة الأطنان عند مستويات ميلجي - تمامًا النظام المطلوب لرفع المدار على أسابيع.

توضح مثل هذه التقديرات لماذا يصبح EAD، على الرغم من كثافة طاقته المنخفضة، قابلاً للتطبيق لـ **هياكل كبيرة خفيفة الوزن** في الهواء الرقيق. بخلاف فوهة الصاروخ، التي تكتسب الكفاءة فقط عندما تكون كثافة الطاقة عالية، يكتسب EAD ميزة من المساحة. ظرف الزورق الهوائي يوفر مساحة وفيرة؛ تحويلها إلى سطح نشط تطابق طبيعية.

المنطقة الحلوة في الغلاف الجوي العلوي

لكل نظام فيزيائي، هناك نيش تشغيلي. للدفع EAD، أفضل نظام هو حيث يكون ضغط الغاز منخفضًا بما يكفي للسماح بجهود عالية ومسارات أيون حرة طويلة، لكن ليس منخفضًا جدًا بحيث يصبح البلازما خاليًا من التصادمات.

أسفل حوالي 20 كم، يكون الغلاف الجوي كثيفًا جدًا: حركية الأيون منخفضة، جهود الانهيار عالية، وتُهدر الطاقة في تسخين الغاز. فوق حوالي 100 كم، يصبح الهواء نادرًا جدًا: لا يمكن الحفاظ على التأين باستمرار، وتختفي الكتلة التفاعلية المحايدة. بين حوالي 40 و 80 كم يقع **نطاق انتقالي** - الميزوسفير السفلي - حيث يمكن للدفع EAD إنتاج أفضل نسب الدفع إلى الطاقة.

بالصدفة السعيدة، هذا أيضًا نطاق الارتفاع حيث تظل الطاقة الشمسية شبه غير مخففة والسحب الهوائي أصغر بأوامر من القدر عند مستوى سطح البحر. إنه نافذة ضيقة لكنها متسامحة، ممر طبيعي لنوع جديد من المركبات: لا طائرة ولا صاروخ، بل شيء يعيش في التداخل بينهما.

الكفاءة وتدفق الطاقة

في أي لحظة، تُقسَم الطاقة الكهربائية المدخلة P بين:

1. **الطاقة الدفعية الميكانيكية المفيدة** $P_T = T v_{\text{eff}}$، حيث v_{eff} سرعة العادم الفعالة لتدفق الهواء.
2. **خسائر التأين** P_i، الطاقة المطلوبة للحفاظ على البلازما.
3. **خسائر المقاومة** P_r، بسبب التسخين الأومي والتسرب.
4. **خسائر الإشعاع** P_γ، المصدرة كضوء (الهالة الكورونية المألوفة).

الكفاءة الكلية هي $\eta = P_T / P$. تقترح التجارب أن η يمكن أن تصل إلى بضعة بالمئة في الهواء الكثيف ومحتمل عشرات البالمئة في التشغيل منخفض الضغط المحسن. بينما متواضعة، هذه الأرقام كافية لنظام مدعوم بالطاقة الشمسية يعمل على مدى طويل، حيث يمكن تبادل الكفاءة ضد الوقت.

بخلاف الدفع الكيميائي، الذي يجب أن يصل إلى كفاءة عالية لكل ثانية لتقليل الوقود، يمكن لزورق هوائي EAD شمسي تحمل عدم الكفاءة إذا استطاع **التشغيل إلى أجل غير مسمى**. مقياس النجاح ليس الدفعة المحددة بل **الصبر المحدد**: الجولات المتراكمة على أيام.

من إجهاد ماكسويل إلى الدفع الماكروسكوبي

لتوضيح الاتصال بين نظرية الحقل والتجربة اليومية، فكر في مكثف اللوح المسطح في الفراغ. الضغط بين اللوحين هو $p = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$. إذا $E = 10^6\ \mathrm{V/m}$، فإن $p \approx 4.4\ \mathrm{N/m^2}$. اضرب في المساحة، وتحصل على القوة الميكانيكية المطلوبة لفصل اللوحين. الإجهاد الكهربائي الساكن هو حرفيًا ضغط ميكانيكي.

يحل الدفع EAD محل لوح واحد بالغلاف الجوي نفسه. الأيونات هي الوسط الذي يُنقل من خلاله إجهاد الحقل. بدلاً من الضغط الساكن، نحصل على تدفق اتجاهي. المعادلة $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ هي التمثيل الديناميكي لذلك الضغط الساكن للمكثف.

عند جمعها على سطح الزورق الهوائي، يصبح الإجهاد المتكامل متجه دفع صافي، تمامًا كما ينتج الضغط المتكامل على سطح الجناح رفعًا. التشبيه عميق: الرفع الهوائي هو تدفق الزخم للهواء المُحَوَّل بواسطة سطح؛ دفع EAD هو تدفق الزخم للأيونات المُسَرَّعَة بواسطة حقل.

طائرة الأيون MIT والإثبات التجريبي

لعقود، رفض المتشككون EAD كفضول مختبري. ثم، في 2018، أظهرت طائرة بجناح ثابت صغيرة بناها MIT **طيرانًا ثابتًا بدون مروحة** مدعومًا فقط بدفع كهربائي هوائي. وزن "طائرة الأيون" حوالي 2.5 كيلوغرام وطارت عشرات الأمتار تحت طاقة البطارية. كانت نسبة الدفع إلى الوزن صغيرة، لكن الإنجاز تاريخي: أول مركبة أثقل من الهواء مُسَتْكَمَة في الطيران بدفع أيوني.

حاسمًا، كانت النظرية والأساس المفاهيمي الذي أدى إلى ذلك العرض قيد التطوير بشكل مستقل بالفعل. الإطار النظري المقدم في **الدفع الكهربائي الهوائي** (انظر https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html) وصف الآلية نفسها في مصطلحات **إجهاد ماكسويل** و **قوة الجسم الكولومية** قبل سنوات، مع التركيز على طوبولوجيا الحقل والقابلية للتوسع بدلاً من كيمياء الكورونا.

أثبتت طائرة الأيون MIT عملية التأثير في الهواء الكثيف. يهدف مشروع Rise–Fly–Orbit إلى توسيعه إلى الهواء الرقيق، حيث تصبح الفيزياء أكثر إيجابية. إذا استطاعت طائرة صغيرة الطيران عند 1 بار، يمكن لزورق هوائي شمسي الطيران إلى المدار عند ميكروبار، مع صبر وشمس كافيين.

فضيلة البساطة

الدفع EAD أنيق مفهوميًا: لا أجزاء متحركة، لا احتراق، لا عادم عالي السرعة، لا مبردات. مكوناته قوية بطبيعتها - أقطاب، ديبلكتريكات، محولات طاقة، وجلود كهروضوئية. النظام يتوسع طبيعيًا مع المساحة، لا الكتلة.

ينتقل التحدي الفني من الديناميكا الحرارية إلى **هندسة كهربائية وعلم مواد**: منع تآكل الكورونا، إدارة تسرب الشحنة، والحفاظ على عزل جهد عالي في ضغوط متغيرة. هذه قابلة للحل بمواد حديثة وميكروإلكترونيات.

لأن آلية EAD تعتمد فقط على هندسة الحقل وحركية الأيون، فهي **معيارية جوهريًا**. يمكن معاملة كل متر مربع من جلد الزورق الهوائي كبلاطة بـ T/P وخصائص جهد معروفة. الدفع الكلي للمركبة هو مجموع متجه لآلاف البلاطات المستقلة. تسمح هذه المعيارية بالتدهور الرشيق - فشل بضعة وحدات لا يعرض الصناعة بأكملها للخطر.

الزورق الهوائي الكهربائي الهوائي كنظام

عند ربطه بالطاقة الشمسية، يصبح الدفع EAD ليس مصدر دفع فقط بل **نظام مناخي** للمركبة. الحقول نفسها التي تولد الدفع تؤين أيضًا الغازات الشبحية، تقلل شحن السطح، وتؤثر محتملًا على خصائص طبقة الحدود. يمكن للحقل الكهربائي حتى الخدمة كـ "شراع كهربائي ساكن" قابل للضبط، يتفاعل ضعيفًا مع حقل الأرض المغناطيسي أو البلازما المحيط في الغلاف الجوي العلوي.

على المدى الطويل، يمكن تخيل السيطرة النشطة على السحب بتلاعب توزيعات الشحنة السطحية - **درع سحب كهرومغناطيسي** يغير إجهاد الحقل المحلي لضبط مسار الطيران دون أسطح تحكم ميكانيكية.

هذه الإمكانيات تُحَوِّل الدفع EAD من فضول إلى تقنية تحكم طيران صلبة الحالة عامة الغرض - قابلة للتطبيق أينما يمكن استقطاب الغازات أو البلازما وتسريعها بحقول كهربائية.

الهندسة المعمارية وديناميكيات الطيران

الميزة الأساسية لمفهوم Rise–Fly–Orbit لا تكمن في مواد غريبة أو فيزياء ثورية، بل في **إعادة ترتيب المبادئ المألوفة**. الطفو، الطاقة الشمسية، والكهربائية الساكنة كلها مفهومة جيدًا. ما هو جديد هو الطريقة التي تُسَلسَلُ بها في قارة واحدة: **صعود بدون لحظة انقطاع**.

تمر الصواريخ عبر أنظمة متميزة - إطلاق، إنهاك، ساحل، مدار. أما الزورق الهوائي الكهربائي الهوائي، فتجرب فقط انتقالات تدريجية. يرتفع بالخفة، يطير بالرفع، ويدور بالقصور الذاتي. كل مرحلة تندمج في التالية، محكومة بالتفاعل الثابت نفسه للقوى الطافية والهوائية والكهربائية الساكنة.

الظرف: الهيكل كغلاف جوي

يجب أن يرضي ظرف الزورق الهوائي مطالبات متناقضة: يجب أن يكون **خفيفًا وقويًا، موصلًا ومعزولًا، شفافًا للضوء الشمسي لكنه مقاومًا للإشعاع**. هذه قابلة للتوفيق من خلال البناء الطبقي.

يمكن أن تكون الطبقة الخارجية **بوليمر مطلي بالمعدن** - على سبيل المثال، فيلم رقيق من كابتون مطلي بالألمنيوم أو بولي إيثيلين تيريفتالات. توفر هذه الطبقة درعًا فوق بنفسجي وتخدم كسطح قطب جزئي للبلاطات EAD. تحتها طبقة **ديبلكتريك** تمنع التفريغ غير المرغوب وتحدد الفجوة إلى قطب الجامع الداخلي. الهيكل الداخلي شبكة من أغشية متوترة ودعامات تحافظ على الهندسة الكلية عند ضغط داخلي زائد صغير، بالترتيب من $\Delta p \approx 300\ \mathrm{Pa}$ - فقط بضعة آلاف من ضغط الغلاف الجوي.

هذا الضغط الزائد كافٍ للحفاظ على شد الظرف لكنه غير كافٍ لإحداث كتلة هيكلية كبيرة. في الواقع، المركبة بأكملها مكثف خفيف الوزن هائل، جلده مشحون وحي مع خطوط الحقل.

الحجم الداخلي مملوء بغاز رفع - هيدروجين أو هيليوم. بسبب أن الضغط الزائد المطلوب صغير، تكون المطالبات الحاملة للحمل على المادة متواضعة. التحدي الرئيسي هو نفاذية الغاز وتدهور فوق البنفسجي على مدى مهمات طويلة، كلاهما قابل للمعالجة بطلاءات حديثة وأفلام طبقية.

الهيدروجين أو الهيليوم

اختيار الغاز يشكل شخصية المركبة.

الهيدروجين يقدم أعلى رفع، يوفر حوالي 10% طفو أكثر من الهيليوم. يصبح هذا الفرق كبيرًا عندما يصل الحجم الكلي إلى ملايين المترات المكعبة. الهيدروجين أيضًا أسهل في التوفير ويمكن توليده في الموقع بتحليل الماء بالكهرباء الشمسية. عيبه، بالطبع، القابلية للاشتعال.

وجود الكهربائية الساكنة عالية الجهد يجعل إدارة الهيدروجين غير تافهة. السلامة تعتمد على التقسيم الدقيق، الدرع الكهربائي الساكن، والتهوية. وحدات EAD نفسها مغلقة ومفصولة عن خلايا الغاز بأسوار دييلكتريكية، وتُقلَل الفروق المحتملة عبر الهيكل بتوزيع شحنة متناظر.

الهيليوم، بالمقابل، خامل وآمن لكنه يقدم رفعًا أقل وتكلفة أعلى. عيبه الرئيسي النقص؛ الاستخدام واسع النطاق قد يجهد الإمداد. للمركبات الاختبارية المبكرة ورحلات العرض العامة، الهيليوم الخيار الحكيم. لمحاولات مدارية تشغيلية في ممرات نائية، قد يكون الهيدروجين مبررًا بالأداء والتكلفة.

على أي حال، تصميم الظرف متوافق إلى حد كبير؛ فقط أنظمة التعامل بالغاز والسلامة تختلف.

الطاقة الشمسية وإدارة الطاقة

الشمس هي محرك الصناعة. كل واط من الطاقة الكهربائية يبدأ كضوء شمسي مُمْلِك من الجلد الكهروضوئي.

الكهروضوئية عالية الكفاءة فائقة الخفة - أفلام رقيقة من الغاليوم-زرنيخ أو مركبات البيروفسكايت ملصقة على سطح الزورق الهوائي - يمكن أن تحقق قدرات محددة تقترب من **300–400 واط/كجم**. ترتب المصفوفات بشكل مطابق للحفاظ على سلاسة هوائية. إدارة الطاقة موزعة: كل قسم لوحة يغذي متتبع نقطة طاقة قصوى محلي (MPPT) ينظم الجهد إلى الحافلة عالية الجهد التي تغذي بلاطات EAD.

بسبب أن المركبة تتعرض لدورات يوم–ليل، تحمل **مخزن طاقة متواضعًا** - بطاريات خفيفة أو سوبركاباسيتورات - للحفاظ على عمليات منخفضة المستوى خلال الظلام. لكن هذه ليست كبيرة؛ فلسفة تصميم النظام هي **الدفع الشمسي المباشر**، لا الطاقة المخزنة. عند الارتفاعات المدارية، يمكن للصناعة مطاردة الشمس تقريبًا باستمرار، تغوص في الكسوف فقط لفترة قصيرة.

يُدار التحكم الحراري إشعاعيًا. مع إهمال التحمل عند الارتفاع العالي، يعتمد رفض الحرارة على **أسطح عالية الانبعاثية** ومسارات التوصيل إلى المشعاعات. لحسن الحظ، عملية EAD باردة نسبيًا - لا احتراق - والحمل الحراري الرئيسي من الضوء الشمسي الممتص.

بلاطات الكهرباء الهوائية

كل متر مربع من الظرف يعمل كـ **بلاطة EAD** - خلية دفع ذاتية الاحتواء تشمل مصدرًا، جامعًا، ودائرة تحكم صغيرة. قد يكون المصدر شبكة دقيقة من النقاط أو الأسلاك الحادة عند جهد إيجابي عالي، بينما الجامع شبكة واسعة محتجزة قرب الأرض أو عند جهد سلبي. المساحة بينهما منطقة تفريغ محكومة.

عند التنشيط، تُنشِئ البلاطة حقلًا كهربائيًا $\boldsymbol{E}$، تولد كثافة شحنة $\boldsymbol{\rho_e}$، وتنتج دفعًا محليًا $\boldsymbol{f = \rho_e E}$ موجهًا مماسًا على طول السطح. بتعديل الجهود على بلاطات مختلفة، يمكن للزورق الهوائي التوجيه والإمالة والدوران دون أجزاء متحركة.

الهندسة التكيفية مفتاح. مع انخفاض الضغط المحيطي مع الارتفاع، يزداد المسار الحر المتوسط. للحفاظ على تفريغ فعال، يجب أن يزداد مسافة الفجوة الفعالة $\boldsymbol{d}$ بين المصدر والجامع تقريبًا بنسبة $\boldsymbol{1/p}$. يمكن تحقيق ذلك بـ **فواصل ديبلكتريكية قابلة للنفخ** تتوسع قليلاً مع انخفاض الضغط الخارجي، أو بـ **تعديل إلكتروني** لتدرجات الجهد لمحاكاة فجوات أكبر.

تُبلِغ كل بلاطة الاتصالات - التيار، الجهد، عدادات القوس - إلى متحكم مركزي. إذا تعرضت بلاطة لقوس أو تدهور، تُغْلَق وتُتَجَاوَز. يعني التصميم المعياري أن فقدان بلاطات فردية يؤثر قليلاً على الدفع الكلي.

من الطفو إلى الدفع

يبدأ الطيران بلطف. عند الإطلاق، يرتفع الزورق الهوائي طافيًا إلى الستراتوسفير. أثناء الصعود، يعمل نظام EAD في وضع طاقة منخفضة، يوفر دفعًا طفيفًا للاستقرار والسيطرة على الانجراف.

عند حوالي 30–40 كم ارتفاع، حيث الهواء رقيق لكنه لا يزال تصادميًا، يبدأ التسارع الرئيسي. يدور الزورق تدريجيًا إلى طيران أفقي، يوجه محوره الطويل في اتجاه الحركة المدارية المقصودة.

في البداية، يُوَازَن الدفع بين التسارع الأفقي وتعزيز الرفع. يعوض الطفو المتبقي للمركبة معظم وزنها؛ يوفر دفع EAD مكونات أمامية وصاعدة قليلاً. مع زيادة السرعة، ينمو الرفع الديناميكي ويصبح الطفو ضئيلاً. الانتقال سلس - لا توجد "لحظة إقلاع" لأن الزورق الهوائي لم يكن جالسًا على مدرج أصلاً.

الصعود لمدة ثلاثة أسابيع

فكر في كتلة مركبة تمثيلية قدرها $m = 2000\ \mathrm{kg}$. لتحقيق سرعة مدارية $v = 7.8 \times 10^3\ \mathrm{m/s}$ في $t = 1.8 \times 10^6\ \mathrm{s}$ (ثلاثة أسابيع)، الدفع المتوسط المطلوب هو

$$T = m\frac{v}{t} = 2000 \times \frac{7.8\times10^3}{1.8\times10^6} \approx 8.7\ \mathrm{N}.$$

ثمانية نيوتن - وزن برتقالة صغيرة - هو الدفع الكلي المطلوب للوصول إلى المدار إذا تُطبِقَ باستمرار لثلاثة أسابيع.

إذا كانت T/P للنظام $0.03\ \mathrm{N/W}$، نموذجي لعمل EAD الفعال عند ضغط منخفض، فإن إنتاج 8.7 نيوتن يتطلب فقط حوالي **290 واط** من الطاقة. يبدو ذلك مذهلاً صغيرًا، وفي الممارسة، ستزيد خسائر السحب الإضافية المتطلب إلى عشرات الكيلوواط. لكن ألواح شمسية تغطي بضع مئات من المترات المربعة يمكنها توفير ذلك بسهولة.

دعنا نضمن عامل أمان 100 لعدم الكفاءة والسحب: حوالي **30 كيلوواط** من الطاقة الكهربائية. مع كفاءة كلية 15% من ضوء الشمس إلى الدفع، يجب على المركبة حصاد حوالي **200 كيلوواط من الطاقة الشمسية**. هذا يتوافق مع حوالي 700 متر مربع من مساحة شمسية نشطة عند 300 واط/م² إخراج - مساحة أصغر من ملعب كرة قدم، مدمجة بسهولة على زورق هوائي طوله 100 متر.

توضح هذه الحسابات البسيطة أن **تدفق الطاقة معقول**. ما تحققه الصواريخ من خلال كثافة الطاقة، يحققه الزورق الهوائي من خلال الصبر والمساحة.

السحب والممر عالي الارتفاع

يظل السحب المنبع الرئيسي للطاقة. قوة السحب هي $F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_D$، والقوة المقابلة هي $P_D = F_D v = \frac{1}{2}\rho v^3 A C_D$.

عند 50 كم، $\rho \approx 10^{-3}\ \mathrm{kg/m^3}$. إذا $A = 100\ \mathrm{m^2}$، $C_D = 0.05$، و $v = 1000\ \mathrm{m/s}$، فإن

$$P_D = 0.5 \times 10^{-3} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^{6}\ \mathrm{W}.$$

ذلك 2.5 ميغاواط - عالٍ جدًا. لكن عند 70 كم، حيث $\rho = 10^{-5}\ \mathrm{kg/m^3}$، ينتج التكوين نفسه فقط 25 كيلوواط من قوة السحب. لذا الاستراتيجية: **اصعد وأنت تتسارع**، مُبْقِيًا على مسار حيث يظل ρv^3 ثابتًا تقريبًا.

الممر الأمثل هو واحد من هواء يرقق تدريجيًا، ربما 40–80 كم ارتفاع، حيث يوفر الغلاف الجوي كثافة محايدة كافية لعمل EAD لكن قليلة بما يكفي للحفاظ على السحب قابلاً للإدارة.

السيطرة على المركبة والاستقرار

بدون مروحيات أو زعانف، يأتي الاستقرار من تماثل الحقل. تنشيط تفاضلي للبلاطات يوفر عزم دوران. إذا أنتجت البلاطات الأمامية على اليسار دفعًا أكثر قليلاً من تلك على اليمين، يدور الصناعة بلطف. يُحَقِّق السيطرة على الإمالة بتحيز بلاطات الأعلى والأسفل. بسبب أن الدفع لكل بلاطة صغير، الاستجابة بطيئة، لكن الصناعة تعمل في نظام حيث الرشاقة غير ضرورية.

حساسات الوضعية - جيروسكوبات، مقاييس تسارع، متتبعات نجوم - تغذي نظام تحكم رقمي يحافظ على الاتجاه لأقصى شدة شمسية ومسار طيران صحيح. حجم المركبة الهائل ونظام الطيران البطيء يجعلانها مستقرة بشكل لافت.

السلامة الحرارية والكهربائية

يشمل عمل EAD عشرات إلى مئات الكيلوفولت عند تيار منخفض. في الهواء الرقيق الجاف في الستراتوسفير، يتصرف العزل بشكل مختلف: يمكن للأقواس الانتشار مسافات طويلة عبر الأسطح. لذا يعامل تصميم الزورق الهوائي الكهربائي الهيكل بأكمله كنظام جهد محكوم. مسارات موصلة متكررة، مع طبقات عزل تفصل خلايا الغاز عن خطوط HV.

القوس ليس كارثيًا - يميل إلى أن يكون محليًا ويطفئ نفسه - لكنه يمكن أن يضر بالأقطاب. تراقب كل بلاطة شكل موجتها التيارية؛ إذا ارتفع تفريغ، يقلل المتحكم الجهد أو يُطْفِئ الوحدة المتضررة لبضع ثوان.

حراريًا، غياب التحمل يعني أن أي تسخين محلي يجب نشره بالتوصيل إلى ألواح إشعاعية. تُختَار المواد لانبعاثية عالية وامتصاص منخفض في الأشعة تحت الحمراء، مما يسمح للحرارة الزائدة بالإشعاع إلى الفضاء.

التوسع والمعيارية

يتوسع النظام بالبلاطة، لا بزيادة الجهد. مضاعفة عدد البلاطات تضاعف الدفع؛ لا حاجة لتفريغات أكبر. هذا يجعل العمارة **قابلة للتوسع خطيًا** من نماذج المختبر إلى مركبات مدارية.

قد يبدأ نموذج عملي كمنصة صغيرة مملوءة بالهيليوم بعشرات المترات المربعة من سطح EAD، تولد دفعات ميلينيوتن مقاسة على ساعات. يمكن أن تتبع عروض أكبر، كل يتوسع في المساحة والطاقة. النسخة المدارية النهائية قد تمتد مئات الأمتار، مع آلاف البلاطات المستقلة التحكم، تعمل تحت طاقة شمسية كاملة لأشهر في وقت واحد.

بسبب أن جميع المكونات صلبة الحالة، فإن النظام لديه عمر خدمة طويل جوهريًا. لا توجد محامل توربين أو دورات احتراق للارتداء - فقط تآكل قطبي تدريجي وشيخوخة المواد. مع تصميم حذر، يمكن أن يصل الوقت المتوسط بين الأعطال إلى سنوات.

ملفات الصعود والانتقالات الارتفاعية

يمكن تصور المهمة الكاملة كحلزون سلس في المستوى (v, ρ): مع زيادة السرعة، ينخفض الكثافة. يُختَار المسار بحيث يظل المنتج ρv^3 - الذي يحدد قوة السحب - أسفل عتبة يمكن للنظام الشمسي توفيرها.

1. **صعود طافٍ** إلى 30–40 كم.
2. **مرحلة التسارع**: الحفاظ على $P_D \approx 20\text{–}50\ \text{kW}$ تقريبًا بضبط الإمالة والارتفاع.
3. **الانتقال إلى نظام مدار**: فوق 70 كم، يختفي الرفع والطفو، وتصبح الصناعة قمرًا اصطناعيًا لا يزال يحرث الغلاف الجوي.

الانتقال من "الطيران" إلى "المدار" ليس حدودًا حادة. يتلاشى الغلاف الجوي تدريجيًا؛ يعوض الدفع عن السحب حتى يتوقف السحب عن الأمر. يصبح مسار المركبة دائريًا بدلاً من قذيفي، ويظل عاليًا إلى أجل غير مسمى.

التوازن الطاقي والتحمل

بتكامل على الصعود الكامل، الطاقة المدخلة الكلية من الشمس هائلة مقارنة بما هو مطلوب. حتى عند معدل جمع متواضع قدره 100 كيلوواط، ثلاثة أسابيع من التشغيل المستمر تتراكم

$$E = 100{,}000 \times 1.8 \times 10^6 = 1.8 \times 10^{11}\ \text{J}.$$

ل مركبة 2000 كجم، هذا **90 ميغاجول/كجم** - ثلاث مرات متطلبات الطاقة الحركية المدارية. معظم هذه الطاقة ستُفقَد في السحب وعدم الكفاءة، لكن الهامش سخي.

هذه هي السحر الهادئ لصبر الشمس: عندما يُسمَح للوقت بالتمدد، تحل وفرة الطاقة محل ندرة الطاقة.

الصيانة، العودة، والإعادة الاستخدام

بعد إكمال مهمته المدارية، يمكن للزورق الهوائي التباطؤ تدريجيًا بعكس قطبية حقل EAD. يزداد السحب مع الهبوط؛ الآلية نفسها التي رفَعَتْهُ الآن تعمل كفرامل. يمكن للمركبة إعادة الدخول إلى الستراتوسفير والهبوط تحت الطفو المتبقي.

بسبب عدم التخلص من مراحل قابلة للإنفاق، النظام **قابل لإعادة الاستخدام كليًا**. يمكن صيانة الظرف، إعادة تعبئته بالغاز، وإعادة إطلاقه. تشمل الصيانة استبدال البلاطات أو الأفلام المتدهورة بدلاً من إعادة بناء المحركات.

بالمقابل مع الصواريخ الكيميائية، حيث يستهلك كل إطلاق خزانات ووقودًا، الزورق الهوائي EAD هو **مركبة فضائية إعادة تدوير طاقة**. الشمس تعيد التزود بها باستمرار؛ فقط الارتداء والتمزق يتطلبان تدخلًا بشريًا.

الأهمية الهندسية الأوسع

التقنيات نفسها التي تمكن زورقًا هوائيًا EAD شمسيًا - الكهروضوئية خفيفة الوزن، الإلكترونيات عالية الجهد، الدييلكتريكات الرقيقة - لها تطبيقات أرضية فورية. منصات الاتصالات الستراتوسفيرية، حساسات المناخ عالية الارتفاع، والطائرات بدون طيار طويلة التحمل كلها تستفيد من التطورات نفسها.

بتتبع نظام قادر على الوصول إلى المدار بدون وقود، نبتكر أيضًا فئة جديدة من **المركبات الجوية صلبة الحالة** - آلات تطير ليس بالاحتراق بل بتلاعب الحقل.

في هذا المعنى، يقع مشروع Rise–Fly–Orbit في سلسلة تشمل Wright Flyer والصواريخ السائلة الأولى: ليس تقنية مكتملة، بل **إثبات مبدأ** يحول ما يعنيه "الطيران".

التنظيم، الاستراتيجية، وفلسفة الصعود البطيء

فيزياء زورق هوائي كهربائي هوائي شمسي متسامحة؛ القانون ليس كذلك. قواعد الطيران الحالية تقسم السماء إلى مجالات محدودة بدقة: **المجال الجوي** المحكوم بقانون الطيران، و **الفضاء الخارجي** المحكوم بقانون الفضاء. بينهما منطقة رمادية - عالية جدًا لشهادة الطائرات، منخفضة جدًا لتسجيل المدار. يعيش الزورق الهوائي إلى المدار في ذلك الرمادي تمامًا، يتحرك باستمرار عبر ارتفاعات تابعة، على الورق، لفئة لا شيء على الإطلاق.

لماذا هو "مستحيل"

قوانين المجال الجوي تفترض مركبات تقلع وتهبط في ساعات. تتطلب محركات معتمدة، أسطح تحكم هوائية، والقدرة على التنازل عن الحركة. لا شيء من هذه الافتراضات يناسب بالونًا مستقلًا مدفوعًا بالشمس قد يتردد لأسابيع فوق 60 كم.

لوائح مركبات الإطلاق تبدأ حيث تشعل الصواريخ: إشعال منفصل، موقع إطلاق، ونظام إنهاء طيران مصمم لاحتواء الانفجارات. ليس لدى زورقنا أي من هذه. يصعد ببطء كسحابة؛ لا لحظة "إطلاق." ومع ذلك، لأنه سيفوق في النهاية ماخ 1 ويصل إلى السرعة المدارية، يقع تحت اختصاص الفضاء. النتيجة متناقضة: لا يمكنه الطيران قانونيًا كطائرة، ومع ذلك يجب ترخيصه كصاروخ لا يشبهه.

فئة مركبة جوية–مدارية هجينة

العلاج هو الاعتراف بفئة جديدة - **مركبة جوية–مدارية هجينة (HAOV)**. سماتها المحددة ستكون:

- **عبور مجال مستمر:** صعود من السطح إلى الفضاء القريب بدون مرحلة منفصلة.
- **تدفق طاقة حركية منخفض:** تبادل الزخم الكلي مع الغلاف الجوي أصغر بأوامر من صواريخ.
- **سلوك فشل آمن سلبي:** عند فقدان الطاقة، ينحرف الصناعة ويهبط؛ لا يسقط قذيفيًا.
- **تتبع تعاوني:** دائمًا مرئي للرادار والحساسات الفضائية، يبث متجه حالته كما تفعل أجهزة الاستجابة ADS-B للطائرات.

سيسمح إطار HAOV بشهادة مثل هذه الصناعات تحت **معايير قائمة على الأداء** بدلاً من **قائمة على الأجهزة** - تعريف السلامة في مصطلحات إطلاق الطاقة، بصمة الأرض، وقدرة الهبوط المستقل بدلاً من وجود محركات أو وقود.

يمكن تحديد **ممرات** محيطية أو صحراوية حيث يمكن لـ HAOVs العمل باستمرار، مراقبة بشبكات حركة الفضاء الحالية. سيكون صعودها أقل خطراً على الطيران من بالون طقس واحد، ومع ذلك لا تقدم القواعد الحالية لها طريقًا.

سياسة الصبر

يتبع التنظيم الثقافة، والثقافة مدمنة على السرعة. إنجازات الطيران الفضائي تقاس بنسب الدفع إلى الوزن والدقائق إلى المدار. فكرة أن مركبة قد تستغرق **ثلاثة أسابيع** للوصول إلى المدار تبدو، في السمع الأول، كتراجع. لكن الصبر هو ثمن الاستدامة. يقترح الزورق الهوائي مقياسًا مختلفًا: ليس "كم سريعًا نحرق الطاقة" بل "كم مستمرًا نتراكمها."

للوكالات الفضائية المعتادة على نوافذ الإطلاق والعد التنازلي، تطالب مثل هذه الصناعة بتحول في العمليات: تخطيط المهام بالفصول بدلاً من الثواني؛ إدخالات مدارية تعتمد على هندسة الشمس، لا توافر المنصة. ومع ذلك، يتوافق هذا التغيير مع الدوران الأوسع نحو **البنية التحتية الثابتة الحالة** - مركبات فضائية شمسية-كهربائية، محطات قابلة لإعادة الاستخدام، منصات مناخية مستمرة.

القيمة الاستراتيجية

توفر مركبة EAD شمسية قابلة لإعادة الاستخدام قدرات لا تستطيع صاروخ أو طائرة مطابقتها:

- **الملاحظة والتواصل عالي الارتفاع المستمر:** قبل المدار الكامل، يمكن للزورق الهوائي التردد لأشهر في الستراتوسفير العلوي، نقل البيانات أو تصوير الأرض.
- **توصيل حمولة تدريجي:** يمكن رفع حمولات صغيرة بلطف دون الصدمات الصوتية والحرارية للإطلاق.
- **النماذج الكوكبية:** على المريخ، حيث السرعة المدارية 3.6 كم/ث فقط وضغط الغلاف الجوي يفضل تسارع الأيون طويل المسار، يمكن للعمارة نفسها العمل بشكل أفضل.
- **الحفاظ على البيئة:** لا عادم، لا تسرب وقود، تأثير صوتي ضئيل.

اقتصاديًا، لن تحل HAOVs الأولى محل الصواريخ بل تكملها، تخدم فجوات حيث يفوق صبر الحمولة الإلحاح. استراتيجيًا، ستفصل الوصول إلى الفضاء القريب عن سلاسل إمداد الوقود - ميزة جذابة للوكالات الفضائية الباحثة عن بنية تحتية مستدامة.

هندسة كتاب القواعد

إنشاء فئة HAOV أقل عن الضغط السياسي وأكثر عن **القياس**. يثق المنظمين بالبيانات. الطريق إلى الأمام هو الشفافية التجريبية:

1. **عروض مبنية على الهيليوم** في ممرات نائية، مجهزة لتسجيل المسار، استخدام الطاقة، وسلوك الأعطال.
2. **الاتصالات المستمرة** المشتركة مع شبكات الطيران المدني وتتبع الفضاء لإثبات ديناميكيات طيران متوقعة.
3. **المحاكاة ونماذج المخاطر** تظهر أن تدفق الطاقة الحركية الأسوأ على المناطق المأهولة ضئيل.

بمجرد أن يرى الوكالات أدلة كمية على أن HAOV لا يمكن أن يضر بالطائرات أو السكان الأرضيين، سيتعاقب الإطار القانوني - كما فعل لبلونات عالية الارتفاع والطائرات بدون طيار قبلهما.

البعد الأخلاقي

الطيران البطيء له وزن أخلاقي. المُطلِقُون الكيميائيون يلوثون ليس لأن المهندسين مهملون بل لأن الفيزياء لا تقدم وقتًا لإعادة تدوير حرارتهم. أما الزورق الهوائي الشمسي، فلا يستهلك شيئًا غير قابل للاسترجاع. يحل محل الضجيج بالصمت، الوميض بالإشراق. سيكون صعوده مرئيًا من الأرض كنقطة ساطعة غير مستعجلة، أثر بشري يتسلق بدون عنف.

في عصر الإلحاح، مثل هذه الحركة المتعمدة بيان: أن الطموح التكنولوجي لا يحتاج إلى أن يكون متفجرًا ليكون عميقًا.

صبر الضوء

عندما يصل صاروخ إلى المدار، يفعل ذلك بتسارع غاشم: ثوانٍ من الاحتراق تترك السماء ترتجف. يصل الزورق الهوائي الكهربائي الهوائي بشكل مختلف. كل فوتون يضرب جلده يساهم بهمس من الزخم، وسيطة إلكترونات، أيونات، ورياضيات هادئة لمعادلات ماكسويل. على ثلاثة أسابيع، تتراكم هذه الهمسات إلى مدار.

التعبير نفسه - $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ - الذي يصف ميكروأمبير من انجراف الأيون في مختبر يحكم أيضًا جسم رفع ألف طن ينزلق عبر الغلاف الجوي العلوي. يتغير النطاق؛ المبدأ لا. تنسور ماكسويل، قانون كولوم، وصبر ضوء الشمس عالمي.

إذا تعلمت البشرية استغلال ذلك الصبر، نحصل على طريقة جديدة لمغادرة الأرض - واحدة يمكن تكرارها إلى أجل غير مسمى، مدعومة بنفس النجم الذي يحافظ علينا.

نحو عصر الطيران القابل للعكس

الصاروخية الكيميائية إيماءة ذات اتجاه واحد: جهد هائل للوصول إلى المدار، ونهاية مفاجئة عند إعادة الدخول. يقترح الزورق الهوائي الكهربائي الهوائي **مسارًا قابلاً للعكس**. يمكنه الصعود والهبوط حسب الرغبة، يقيم في أي مكان من التروبوسفير إلى المدار. إنه كل من مركبة فضائية ومسكن، مركبة ومحطة.

في ذلك الاستمرارية تقع انعكاس فلسفي: الطيران الفضائي ليس كمغادرة بل كامتداد للغلاف الجوي. يصبح التدرج من الهواء إلى الفراغ أرضًا قابلة للملاحة. ستُطْمِس مثل هذه الصناعات الخط بين علم الأرصاد الجوية وعلم الفضاء، محولة "حافة الفضاء" إلى مساحة عمل حية بدلاً من حاجز.

تأملات ختامية

لا فيزياء جديدة مطلوبة - فقط التحمل، الدقة، والتنظيم المُعاد تخيله. يمكن دفع ميزانية الطاقة المدارية بضوء الشمس؛ يمكن أن ينشأ الدفع من حقول كهربائية تعمل على أيونات؛ يمكن اقتراض الوقت من صبر المهندسين.

العوائق ثقافية وبيروقراطية: إقناع الوكالات بأن شيئًا يشبه بالونًا يمكن، من خلال الرياضيات والإصرار، أن يصبح قمرًا اصطناعيًا. ومع ذلك، بدأت كل تقنية تحولية كشذوذ في الأوراق.

عندما يصعد الأول من هذه السفن الكهربائية الهوائية الشمسية، سيكون تقدمه غير ملحوظ تقريبًا ساعة بساعة. لكن يومًا بعد يوم سيجمع السرعة، حتى في النهاية ينزلق خارج نطاق الطقس. لن يكون هناك هدير - فقط الهمهمة الخافتة المستمرة للحقول وتراكم الضوء الشمسي الثابت في الحركة.

ذلك سيشير إلى بداية **الوصول القابل لإعادة الاستخدام، المستدام، واللطيف إلى المدار**: طريقة للارتفاع، للطيران، ولـ - دون إضرام عود أبدًا - المدار.

المراجع والقراءة الإضافية

- **مشروع Rise Fly Orbit:** https://riseflyorbit.org/ - نظرة عامة على مفهوم الزورق الهوائي إلى المدار المدعوم بالطاقة الشمسية والبحوث ذات الصلة.
- **مقالة الدفع الكهربائي الهوائي:**
https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html - معالجة نظرية عميقة لدفع الكهرباء الهوائية باستخدام تنسور إجهاد ماكسويل وصيغة قوة الجسم الكولومية.
- Barrett, S. et al., **Nature** (2018). "Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion." - أول عرض لطائرة بجناح ثابت مدعومة بدفع أيوني صلب الحالة.
- Paschen, F. (1889). "Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure erforderliche Potentialdifferenz." **Annalen der Physik**, 273(5).
- Sutton & Biblarz, **Rocket Propulsion Elements**, 9th ed. - للمقارنة في ميزانيات الطاقة واعتبارات Δv.
- NASA Glenn Research Center, "Solar Electric Propulsion Basics." - خلفية على أنظمة الدفع الكهربائي عالية الكفاءة.