

การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและอากาศพลศาสตร์ - ขับเคลื่อนโดยแม็กซ์เวลล์และคูลอมบ์

ข้อมูลเชิงลึกที่น่าสนใจในเรียงความนี้มาจากการทดลองนับสิบครั้งที่ผู้เขียนดำเนินการระหว่างปี 2016 ถึง 2018 โดยสำรวจการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและอากาศพลศาสตร์ด้วยแหล่งพลังงานที่หลากหลาย (AC และ DC) รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ และประเภทตัวปล่อยไอออน การทดลองเหล่านี้บรรลุจุดสูงสุดในการสร้างโรเตอร์ขนาด 80 ซม. ที่แสดงด้านล่าง ซึ่งบรรลุความเร็วหมุน 18 รอบต่อวินาทีโดยใช้แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 6 กิโลโวลต์ และเพียงประมาณ 100 มิลลิวัตต์ของกำลังไฟฟ้าขาเข้า

การทดลองชุดนี้เผยให้เห็นว่าประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับการกระจายและรูปแบบของสนามไฟฟ้าสถิตมากกว่าการเคลื่อนไหวยของอากาศหรือกระแสไอออนเอง การสังเกตการณ์เหล่านี้วางรากฐานสำหรับการปรับโครงสร้างทางทฤษฎีของการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและอากาศพลศาสตร์ที่ตามมา

การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและอากาศพลศาสตร์ - เครื่องยนต์เจ็บบ

การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและอากาศพลศาสตร์ (EAD) - มักเรียกว่าแรงผลักไฟฟ้าและไฮโดรไดนามิก (EHD) หรือ “ลมไอออน” - เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่หายากซึ่งดูเหมือนนิยายวิทยาศาสตร์: อุปกรณ์ที่เคลื่อนที่อย่างเจ็บบผ่านอากาศโดยไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวย ไม่มีการเผาไหม้ และไม่มีไอเสียที่มองเห็นได้ สารานุกรมได้ยืนยันเกี่ยวกับมันครั้งแรกในช่วงต้นทศวรรษ 2000 ผ่านโครงการ “ลิฟเตอร์” ในสวนหลังบ้าน และอีกครั้งในปี 2018 เมื่อ MIT แสดง “เครื่องบินไอออน” ที่ลอยผ่านยิมนาสตึก

อย่างไรก็ตาม ฟิสิกส์พื้นฐานมีประวัติศาสตร์ที่ยาวนานและซับซ้อนมากขึ้น เกือบศตวรรษก่อน โรเบิร์ต ทาวน์เซนด์ บราวน์ และพอล เบียเฟลด์ สังเกตว่าคาปาซิเตอร์แรงดันสูงสามารถสร้างแรงผลักขนาดเล็กแต่ต่อเนื่องได้ บราวน์ให้เครดิตผลกระทบนี้กับ “ต่อต้านแรงโน้มถ่วง” วิทยาศาสตร์สมัยใหม่ ซึ่งติดอาวุธด้วยกฎของแม็กซ์เวลล์และคูลอมบ์ ยอมรับว่าความจริงนั้นละเอียดอ่อนกว่า - และในหลายแง่ ลึกซึ้งกว่า

การขับเคลื่อน EAD ไม่ใช่เรื่องการเป่าลมด้วยไอออน มันเกี่ยวกับ **การปั่นสนามไฟฟ้า** เพื่อให้ **ความเค้นไฟฟ้าสถิต** ที่เกิดขึ้นสร้างแรงกลไกสุทธิ ในแง่นี้ อุปกรณ์ EAD ขับเคลื่อนโดยแม็กซ์เวลล์และคูลอมบ์: โดยรูปแบบและพลวัตของสนามไฟฟ้าเอง

ภาพลวงตาของลมไอออน

ทามวิศวกรส่วนใหญ่เกี่ยวกับการขับเคลื่อน EHD และคุณจะได้ยินเรื่องราวต่างๆ: ตัวปล่อยที่แหลมผลิตไอออนผ่านการปล่อยโคโรนา; ไอออนเหล่านี้เร่งตัวไปยังอิเล็กโทรดเก็บสะสม โดยชนกับโมเลกุลอากาศที่เป็นกลางระหว่างทางและถ่ายโอนโมเมนตัมให้พวกมัน ก๊าซที่เป็นกลางเคลื่อนที่ - ลมไอออนดังกล่าว - และตามกฎข้อสามของนิวตัน อุปกรณ์จะได้รับแรงผลักที่เท่ากันและตรงข้าม

ภาพนี้ไม่ผิด แต่ไม่สมบูรณ์

ในทางปฏิบัติ ไอออนมีมวลที่ละเอียด การชนของพวกมันกับที่เป็นกลางเกิดขึ้นบ่อยครั้ง ใช้ แต่โมเมนตัมที่ถ่ายโอนต่อการชนนั้นเล็กน้อย สำคัญยิ่งกว่านั้น **ไม่มีแรงกลไกที่สำคัญใดๆ ที่กระทำโดยตรงต่อปลายเข็มหรือตัวเก็บสะสม “ลม”** เป็นผลพลอยได้ ไม่ใช่แหล่งกำเนิดของการขับเคลื่อน

เครื่องยนต์ที่แท้จริงอยู่ที่ **สนามไฟฟ้า** ที่เร่งไอออนเหล่านั้น - ในการกระจายใหม่ของพลังงานไฟฟ้าสถิตเมื่อประจุอวกาศก่อตัวและไหล

ความดันสนามและความเค้นของแมกซ์เวลล์

สมการของแมกซ์เวลล์อธิบายว่าสนามไฟฟ้าสถิตและถ่ายโอนโมเมนตัมผ่าน **เทนเซอร์ความเค้นของแมกซ์เวลล์**:

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

การรวมเทนเซอร์นี้เหนือพื้นผิวของวัตถุใดๆ จะให้ **ความดันไฟฟ้าสถิตสุทธิ** ที่กระทำต่อมัน ความดันนี้ - ไม่ใช่การเคลื่อนไหวยของอากาศ - คือสิ่งที่ผลักดันเครื่องผลักดัน EHD ไปข้างหน้า

เมื่อเกิดการปล่อยโคโรนา เมฆของไอออนจะก่อตัวรอบตัวปล่อย ไอออนเหล่านี้ทำสองสิ่งสำคัญ:

1. **พวกมันบังคับใช้สนามไฟฟ้าของตัวปล่อยบางส่วน** ความเข้มสนามท้องถิ่นลดลงใกล้ปลาย แต่ยังคงแข็งแกร่งในปริมาตรโดยรอบ
2. **พวกมันบิดเบี้ยวรูปแบบสนามโดยรวม** ด้านหนึ่งของตัวปล่อย เส้นสนามสิ้นสุดที่พื้นผิวที่ขรุขระใกล้เคียงหรือโครงสร้างที่ต่อกราวด์ ด้านอื่น เส้นเหล่านั้นยื่นออกไป ถูกทำให้เป็นกลางบางส่วนโดยประจุอวกาศ

ผลลัพธ์คือ **ความไม่สมดุลในความดันไฟฟ้าสถิต** บนระบบตัวปล่อย-ตัวเก็บสะสม - แรงสุทธิ โมเมนตัมไหลจากสนามไปยังอิเล็กโทรด ไม่ใช่ผ่านการชนโมเลกุล

กฎของคูลอมบ์ในการทำงาน

ในระดับที่ง่ายที่สุด กำลังที่เกี่ยวข้องอธิบายโดยกฎของคูลอมบ์:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2} \hat{r}$$

องค์ประกอบพื้นผิวที่ขรุขระแต่ละตัวของโครงสร้าง EHD ดึงดูดหรือผลักใส่ภูมิภาคที่ขรุขระอื่นๆ ในสภาพแวดล้อมของมัน แรงผลักทั้งหมดคือผลรวมเวกเตอร์ของปฏิสัมพันธ์คูลอมบ์นับไม่ถ้วนเหล่านี้ ซึ่งถูกปรับรูปร่างอย่างต่อเนื่องโดยไอออนที่เคลื่อนไหวยซึ่งปรับโมดูลสนาม

ในสถานะคงที่ของโคโรนา ชั้นบางของไอออนบวกนั่งระหว่างตัวปล่อยแรงดันสูงและตัวเก็บสะสมที่ค่อนข้างลบ (หรือสภาพแวดล้อมโดยรอบ) ไอออนเหล่านี้ทำหน้าที่เป็น **ตัวกลาง**: พวกมันบังคับใช้การดึงดูดระหว่างตัวปล่อยและตัวเก็บสะสมบางส่วน และโดยการเคลื่อนไหวย รับผิดชอบความไม่สมมาตรของสนามอย่างต่อเนื่อง การป้อนไฟฟ้าที่คงที่รักษาความไม่สมดุลนี้ แปลงพลังงานศักย์ไฟฟ้าสถิตเป็นแรงกลไก

บทเรียนจากนาซาและขีดจำกัดของกระบวนการทัศน์ลมไอออน

ในช่วงต้นทศวรรษ 2000 นาซาและผู้รับเหมาของพวกเขากลับมากทวนอุปกรณ์แบบบีเฟลด์-บราวน์ภายใต้การศึกษากาบริเทคและทาลลีย์ AIAA โดยใช้คาปาซิเตอร์ไม่สมมาตรแรงดันสูงทั้งในสภาพอากาศและสุญญากาศ การทดลองมีจุดมุ่งหมายเพื่อทดสอบว่าผลกระทบสามารถคงอยู่ได้โดยปราศจากอากาศ

ผลลัพธ์ชัดเจน - และเผยให้เห็นโดยไม่ได้ตั้งใจ

ในโหมดอากาศ โรเตอร์บรรจุการหมุนที่วัดได้ยาก (1-2 รอบต่อนาที) และแรงพลักในช่วง 10-100 μN - ต่ำกว่าที่คาดไว้หลายขนาดถ้าอุปกรณ์ใช้ประโยชน์จากผลกระทบแรงโน้มถ่วงจริงๆ การเคลื่อนไหวทั้งหมดถูกกล่าวโทษที่การปล่อยโคโรนาธรรมดาและลมไอออนที่อ่อนแอ

ในสุญญากาศ ที่ความดันลงถึง 10^{-6} Torr การเคลื่อนไหวหยุดสนิท สัญญาณชั่วคราวใดๆ ถูกติดตามไปยังก๊าซออกหรือประจุพื้นผิวที่เหลือ โดยปราศจากโมเลกุลอากาศเพื่อรักษาการไอออนไว้ สนามไฟฟ้าสถิตกลายเป็นสมมาตร และแรงหายไป

นักวิจัยสรุปว่าแรงพลักขยายตัวโดยประมาณเชิงเส้นกับความหนาแน่นอากาศ - การค้นพบที่มักถูกอ้างถึงเพื่อ “หักล้าง” การขับเคลื่อน EAD เป็นไปไม่ได้ในสุญญากาศ แต่ที่ที่แสดงจริงๆ คือบางอย่างที่ลึกซึ้งกว่า: **โดยปราศจากสื่อเพื่อขนส่งประจุอวกาศ สนามไฟฟ้าสูญเสียความไม่สมมาตรที่ผลิตโดยความดันไฟฟ้าสถิต**

กล่าวอีกนัยหนึ่ง การทดสอบในช่วงแรกเหล่านี้ยืนยันโดยบังเอิญ **การตีความความเค้นของแมกซ์เวลล์** ของการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและอากาศพลศาสตร์ มันไม่ใช่แรงโน้มถ่วง หรือการลากไอออนเพียงอย่างเดียว - มันคือการมีอยู่ของ **ความไม่สมดุลสนามที่ใกล้เคียงโดยประจุ** ที่สำคัญ

อุปกรณ์กาบริเทค ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อความเรียบง่ายและความสมมาตร ขนาด **ที่เก็บประจุ** ที่สำคัญหรือ **ไดอิเล็กทริกที่สร้างรูปแบบสนาม** รูปแบบเปิดของพวกเขากระจายเส้นสนามไปยังสภาพแวดล้อม สูญเสียพลังงานไฟฟ้าสถิตส่วนใหญ่

ตรงกันข้าม โรเตอร์ EPS-อะลูมิเนียมที่อธิบายที่นี้รวมประจุตามผิวตัวนำที่กำหนดชัดเจน อนุญาตให้บริเวณประจุอวกาศ **ป็น** สนามท้องถิ่น ผลลัพธ์: แรงพลักที่ใช้ได้กับน้อยกว่า 6 กิโลโวลต์และประมาณ 100 มิลลิวัตต์ - ประสิทธิภาพดีกว่าถึงสองขนาดในประสิทธิภาพพลังงาน

การค้นพบเหล่านี้สะท้อนธีมที่สอดคล้องกัน: **ประสิทธิภาพไฟฟ้าและอากาศพลศาสตร์ไม่เกิดจากแรงดันหรือการไหลของอากาศ แต่จากการควบคุมที่อปโลจีประจุและรูปแบบสนาม**

ผลกระทบของที่เก็บประจุ

ฟิล์มเบาเหนียวแก๊สและฉนวนทำงานมากกว่าแค่ตัวนำ - มันสร้าง **ที่เก็บประจุพื้นที่กว้างใหญ่** ที่ขยายความไม่สมมาตรของสนามไฟฟ้า ในออกแบบปัจจุบัน โพลีสไตรีนขยาย (EPS) ทำหน้าที่เพียง **โครงสร้างรองรับน้ำหนักเบา** พื้นผิวทั้งหมดของมันหุ้มด้วยฟิล์มอะลูมิเนียมที่ **ต่อเนื่องทางไฟฟ้ากับแหล่งแรงดันสูง** EPS เพิ่มฟังก์ชันไฟฟ้าอย่างมาก; มูลค่าของมันอยู่ในการเปิดใช้งานพื้นผิวตัวนำขนาดใหญ่ด้วยมวลต่ำสุด

ผิวตัวนำที่กว้างขวางนี้เก็บประจุโดยตรงจากแหล่งพลังงาน อนุญาตให้การปล่อยโคโรนาทำงานต่อต้าน **สนามไฟฟ้าสถิตที่ขรุขระล่วงหน้า** แกนที่จะสร้างจากศูนย์ในแต่ละรอบ พื้นผิวสูงของฟิล์มเพิ่มค่าความจุที่ใช้งานได้อย่างมาก - ในขนาด 10-100 pF cm⁻² ขึ้นอยู่กับพื้นผิวและความโค้ง - และแปลงแรงดันที่ใช้ที่ล้อมตัวเป็น **สนามไฟฟ้าท้องถิ่นที่แข็งแกร่งกว่ามาก**

เมื่อโคโรนาจุดติด ฟิล์มทำหน้าที่เป็นอ่างอิงศักรย์ที่ทำให้เสถียร ไอออนที่ปล่อยออกมาปรับโมดูลสนามท้องถิ่นเล็กน้อยแต่ไม่ครอบคลุม; แทนที่จะ ประจุพื้นผิวที่เก็บไว้รักษาความไม่สมมาตรที่มั่นคงซึ่งผลิตแรงผลักต่อเนื่องด้วยกำลังต่ำมาก

จากมุมมองความเค้นของแม็กซ์เวลล์ แรงเป็นสัดส่วนกับการรวมของความเข้มสนามและ梯度ของมัน:

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

และฟิล์มใหญ่ที่ชาร์จดีทำให้ทั้งสองค่าทั้งหมดสูงสุดโดยไม่ต้องแรงดันหรือกระแสสูงกว่า นี้อธิบายว่าทำไมโรเตอร์กำลังต่ำแรงดันต่ำถึงบรรลุการหมุนที่สำคัญ: มันแทนที่ **พลังงานไฟฟ้าสถิตที่เก็บไว้** ด้วยการสูญเสียกระแสไอออนหนักของรูปแบบ “ลมไอออน” ธรรมดา - รูปแบบปฏิบัติของ **ประสิทธิภาพไฟฟ้าสถิต**

รูปแบบของประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพของเครื่องผลักดัน EHD ไม่ได้กำหนดโดยความเร็วการไหลของอากาศ แต่โดย **ประสิทธิภาพในการปั่นสนามไฟฟ้า** พารามิเตอร์หลักรวมถึง:

- **ความไม่สมมาตรสนาม:** องค์ประกอบทิศทางสุทธิของ梯度ความดันไฟฟ้าสถิต
- **การกระจายความหนาแน่นประจุ:** วิธีที่เมฆไอออนปรับเปลี่ยนสนามนั้นผ่านการบังคับใช้บางส่วน
- **การคู่ค่าความจุ:** ประจุทั้งหมดที่เก็บไว้บนพื้นผิวตรงข้ามต่อโวลต์ที่ใช้
- **ช่องทางสูญเสีย:** การสูญเสียโคโรนา การรวมใหม่ และการรั่วไหลของไดอิเล็กทริก

การออกแบบที่จำกัดและปั่นสนาม - ตัวอย่างเช่น โดยการวางพื้นผิวที่กว้างที่ชาร์จตรงข้ามใกล้ตัวปล่อย - สามารถบรรลุการปรับปรุงขนาดใหญ่ในแรงผลักต่อวัตต์ สนามไฟฟ้าทำงาน; ไอออนเพียงช่วยให้สนามคงความไม่สมมาตรและไดนามิก

ทบทวนบีเฟลด์-บราวน์

การสังเกตการณ์เริ่มต้นของบราวน์เกี่ยวกับแรงผลักจากคาปาซิเตอร์ไม่สมมาตรเกิดขึ้นก่อนความเข้าใจสมัยใหม่ของเราต่อฟิสิกส์พลาสมา โดยปราศจากกรอบของความเค้นแม็กซ์เวลล์หรือพลวัตประจุอวกาศ มันเป็นธรรมชาติที่จะคิดว่าผลกระทบอาจเกี่ยวข้องกับแรงโน้มถ่วง ข้อเท็จจริงที่ว่าเครื่องผลักดัน EHD ผลิตแรง “ต่อต้าน” เวกเตอร์สนาม (และบางครั้งแนวตั้งขึ้น) ทำให้ความสับสนยิ่งยิ่งขึ้น

มองผ่านเลนส์ของวันนี้ “ต่อต้านแรงโน้มถ่วง” ของบราวน์คือเพียงความดันไฟฟ้าสถิตที่ทำให้มองเห็นได้ ความคล้ายคลึงในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ - ทั้งพลังงานศักย์แรงโน้มถ่วงและไฟฟ้าสถิตลดลงเป็น $1/r^2$ - ทำให้ความสับสนเข้าใจได้ในทางประวัติศาสตร์ แต่ฟิสิกส์นั้นเป็นไฟฟ้าชนะทั้งหมด

มุมมองและบริบทสมัยใหม่

การวิเคราะห์ล่าสุดและการสนทนาระหว่างเพื่อนร่วมงานเสริมสร้างการปรับโครงสร้างนี้ของการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและอากาศพลศาสตร์เป็น **ปรากฏการณ์梯度สนาม** แทนที่จะเป็นเครื่องยนต์ลมไอออน ในโครงสร้างลิฟเตอร์คลาสสิก กระแสโคโรนาในขนาดมิลลิแอมป์ที่หลายสิบลอโวลต์ผลิตความหนาแน่นแรงผลักในช่วงไมโคร-ถึงมิลลินิวตันต่อวัตต์ - สะท้อนว่าพลังงานสนามไฟฟ้าส่วนน้อยสิ้นสุดเป็นความเค้นกลไกที่กำกับทิศทาง ในทางตรง

กันข้าม โรเตอร์ EPS ที่หุ้มฟิล์มแปลงกฎฟิสิกส์เดียวกันเป็นกระบวนการ **ขับเคลื่อนโดยประจุ**: พื้นผิวตัวนำที่กว้างรักษา **梯度 E** ที่แข็งแกร่งด้วยกระแสต่ำสุด แลกเปลี่ยนการสูญเสียดริฟต์กับพลังงานสนามที่เก็บไว้

ความแตกต่างนี้สะท้อนการเปลี่ยนแปลงที่กว้างขึ้นในการวิจัยร่วมสมัย **ตัวกระตุ้นการปล่อยบาร์เรียร์ไดโอดอิเล็กทรอนิกส์** ในการควบคุมอากาศพลศาสตร์ยังได้แรงบันดาลใจจากความเค้นของแมกซ์เวลล์แทนที่จะเป็นการไหลอากาศจำนวนมาก บรรลุประสิทธิภาพ 10–100 N kW⁻¹ เมื่อรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดถูกปรับสำหรับความไม่สมมาตร **รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดลอยและการกักขัง** ที่ศึกษาที่ ONERA และในโปรแกรม EHD ของ EU แสดงการเพิ่มขึ้นสองถึงห้าเท่าในแรงผลักโดยการปั่นเปลือกไอออน - นั่นคือตรรกะการออกแบบของโรเตอร์ที่เก็บประจุ และใน **สภาพแวดล้อมอากาศบาง** เช่น ชั้นสตราโตสเฟียร์บนหรือชั้นบรรยากาศดาวอังคาร ที่การลากไอออนอ่อนลงแต่ความเค้นไฟฟ้าสถิตคงอยู่ พื้นผิวที่ร่ายประจุสามารถรักษาการขับเคลื่อนได้นานหลังจากที่การออกแบบธรรมดาล้มเหลว

ฟิสิกส์สอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์กับกรอบโมเมนตัมพอยติงของแม่เหล็กไฟฟ้าคลาสสิก: แรงผลักตรงกับ **梯度** ของความหนาแน่นพลังงานสนาม,

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

หมายความว่าระบบดึงโมเมนตัมโดยตรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ไอออนคือตัวเร่งปฏิกิริยาที่รักษาความไม่สมดุล ไม่ใช่สารตั้งต้นปฏิกิริยาเอง นี้อธิบายว่าทำไมในทดลองสุญญากาศที่สนามกลายเป็นสมมาตร แรงผลักจึงหายไป - คำว่า **∇E** ล้มสลาย ในทางตรงกันข้าม ในโรเตอร์ที่เก็บฟิล์ม พิวค่าความจุทำให้ **E** ชันและมีทิศทาง ผลิตประมาณ **0.1–1 mN** ของแรงผลักเทียบเท่าคู่หมุนจากกำลังขาเข้าเพียง **100 mW** - ประสิทธิภาพ 10–100 เท่าของอุปกรณ์ลากไอออน

พารามิเตอร์	การออกแบบลมไอออนธรรมดา	โรเตอร์ที่เก็บประจุฟิล์ม	นัยยะ
แรงดันไฟฟ้า	20–50 kV	< 6 kV	ความเสี่ยงการทะลุต่ำกว่า การขยายขนาดง่ายกว่า
กำลัง	1–10 W	≈ 0.1 W	แรงผลักสูงกว่า 10–100× / W
กลไกแรงผลัก	การชนไอออน-ที่เป็นกลาง	梯度 สนาม (ความเค้นของแมกซ์เวลล์)	แทบไม่ขึ้นกับความหนาแน่นอากาศ
ตัวเร่งหลัก	ช่องว่างตัวปล่อย-ตัวเก็บสะสม	ที่เก็บค่าความจุฟิล์ม	ประจุที่เก็บ > กระแสชั่วคราว
ประสิทธิภาพ (N kW ⁻¹)	0.01–0.1	1–10 (อนุมาณ)	เป็นไปได้สำหรับไมโคร-UAV

การเปรียบเทียบเช่นนี้เน้นการหมุนแนวคิด: **จากการขับเคลื่อนโดยกระแสไปสู่การขับเคลื่อนโดยประจุ** จากการเคลื่อนไหวของสสารไปสู่การปั่นสนาม พรหมแดนถัดไปคือที่เรียกว่า **สถาปัตยกรรมไฟฟ้าสถิต** - การใช้การปรับให้เหมาะสมทางคอมพิวเตอร์และวัสดุขั้นสูง (ตัวปล่อยนาโนทิวบ์คาร์บอน ฟิล์มลาย ไดโอดอิเล็กทรอนิกส์เมตะวัสดุ) เพื่อเพิ่มสูงสุด **$\int E \cdot \nabla E$** โหมด DC พัลส์ไฮบริดสามารถใช้ประโยชน์จากการเก็บประจุชั่วคราวเพิ่มเติมในขณะที่ลดผลพลอยได้เคมี

สรุป - ขับเคลื่อนโดยแม็กซ์เวลล์และคูลอมบ์

การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและอากาศพลศาสตร์ไม่ใช่ความอยากรู้อยากเห็นที่แปลกประหลาดหรือความผิดปกติทางวิทยาศาสตร์ มันคือการแสดงออกโดยตรงของกฎแม็กซ์เวลล์และคูลอมบ์ - เครื่องจักรขนาดใหญ่ที่แปลงพลังงานศักย์ไฟฟ้าสถิตเป็นการเคลื่อนไหวย้อนความไม่สมมาตรสนามที่ควบคุม

ที่ซึ่งนักประดิษฐ์ยุคแรกเห็น “ต่อต้านแรงโน้มถ่วง” และโครงการสมัยใหม่เห็น “ลมไอออน” เรื่องจริงนั้นเรียบง่ายและลึกซึ้งกว่า: **สนามไฟฟ้ามีความเค้น** ปั่นความเค้นนั้น และคุณสามารถถึงตัวเองผ่านอากาศโดยไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวย โดยไม่มีเชื้อเพลิง และโดยไม่มีเสียง

นั่นคือความอัจฉริยะที่เจียบของการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและอากาศพลศาสตร์ - จริงๆ แล้ว **ขับเคลื่อนโดยแม็กซ์เวลล์และคูลอมบ์**

อ้างอิง

1. Talley, C. et al. **การประเมินผลกระทบบีเฟลด์-บราวน์: การทดสอบเครื่องผลักดันคาปาซิเตอร์ไม่สมมาตรในสุญญากาศและบรรยากาศ.** AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. **เครื่องมือไฟฟ้าเคมี.** U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. **การบินของเครื่องบินด้วยการขับเคลื่อนไอออนสถานะของแข็ง.** *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. **การควบคุมการไหลของอากาศโดยตัวกระตุ้นพลาสมาไม่ความร้อน.** *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. **การควบคุมการไหล EHD และตัวกระตุ้นพลาสมา.** NASA Technical Reports Server, 2015.
6. โปรแกรม EHD ONERA: **การขับเคลื่อนไฟฟ้าและไฮโดรไดนามิกและการควบคุมการไหล.** รายงานภายใน 2018–2023.