

הנעה אלקטרו-אווירודינמית - מופעלת על ידי מקסוול וקולון

התובנות המוצגות במסה זו נובעות מעשרות ניסויים שביצע המהנדס בין 2016 ל-2018, שחקרו הנעה אלקטרו-אווירודינמית עם מגוון רחב של מקורות כוח (AC ו-DC), גיאומטריות אלקטרודות וסוגי מאייני יונים. חקירות אלה הגיעו לשיא בבניית הרוטור של 80 ס"מ המוצג להלן, שהשיג מהירות סיבוב של 18 סל"ד בעזרת פחות מ-6 קילוולט וכ-100 מיליוואט בלבד של כוח חשמלי כניסה.

קמפיין הניסויים הזה חשף כי הביצועים תלויים הרבה יותר בהתפלגות ובגיאומטריה של שדות אלקטרוסטטיים מאשר בתנועת האוויר או בזרם היונים עצמו. התצפיות הטילו את היסודות למיפוי מחדש התיאורטי של הנעה אלקטרו-אווירודינמית שממשיך להלן.

הנעה אלקטרו-אווירודינמית - המנוע השקט

הנעה אלקטרו-אווירודינמית (EAD) - לעיתים קרובות מכונה דחף אלקטרו-הידרודינמי (EHD) או "רוח יונים" - היא אחת מהטכנולוגיות הנדירות ההן נראות כמו מדע בדיוני: מכשיר שמתקדם בשקט דרך האוויר ללא חלקים נעים, ללא בעירה וללא פליטה נראית לעין. הציבור שמע עליה לראשונה בתחילת שנות ה-2000 דרך פרויקטי "ליפטרים" בחצרות אחוריות, וב-2018 שוב כאשר MIT הדגים "מטוס יונים" מחליק דרך חדר כושר.

עם זאת, הפיזיקה הבסיסית יש לה היסטוריה ארוכה ומורכבת יותר. כמעט מאה שנים קודם לכן, תומאס טאונסנד בראון ופול ביפלד צפו שקבלים מתח גבוה יכולים לייצר דחף קטן אך מתמשך. בראון ייחס את האפקט ל"אנטי-גרביטציה". המדע המודרני, חמוש בחוקי מקסוול וקולון, מכיר בכך שהאמת עדינה יותר - ובמקרים רבים, עמוקה יותר.

הנעה EAD אינה עוסקת בנשיפת אוויר עם יונים. זה עוסק בפיסול שדות חשמליים כך שהמתחים אלקטרוסטטיים הנובעים ייצרו כוח מכני נקי. במשמעות זו, מכשירי EAD מופעלים על ידי מקסוול וקולון: על ידי הגיאומטריה והדינמיקה של שדה החשמל עצמו.

אשליית רוח היונים

שאלו את רוב המהנדסים על הנעה EHD ותשמעו סיפור פשוט: מאיין חד מייצר יונים באמצעות פריקה כתרונית; יונים אלה מאיצים לעבר אלקטרודת איסוף, מתנגשים במולקולות אוויר ניטרליות בדרך ומעבירים להן תנע. הגז הניטרלי זז - ה"רוח היונית" המפורסמת - ועל פי חוק שלישי של ניוטון, המכשיר חווה דחף שווה ומנוגד.

תמונה זו אינה שגויה, אך היא חלקית.

בפועל, ליונים מסה זניחה. התנגשויותיהם עם ניטרליים תכופות, כן, אך התנע המועבר בכל התנגשות קטן. חשוב מכך, אין כוח מכני משמעותי שפועל ישירות על קצה המחט או על האיסוף. ה"רוח" היא תוצר לוואי, לא המקור, להנעה.

המנוע האמיתי נמצא ב**שדה החשמלי** שמאיץ את היונים הללו - בהפצה מחדש של האנרגיה האלקטרוסטטית כשטעינה מרחבית נוצרת וזורמת.

לחץ שדה ומתח מקסוול

משוואות מקסוול מתארות כיצד שדות חשמליים מאחסנים ומעבירים תנע דרך **טנסור מתח מקסוול**:

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

שילוב הטנסור הזה על פני השטח של כל גוף נותן את **הלחץ האלקטרוסטטי הנקי** שפועל עליו. לחץ זה - לא תנועת האוויר - הוא זה שדוחף מנוע EHD קדימה.

כאשר מתרחשת פריקה כתרונית, ענן של יונים נוצר סביב המאיין. יונים אלה עושים שתי דברים קריטיים:

1. **הם מסווים חלקית את שדה החשמל של המאיין**. עוצמת השדה המקומית יורדת ליד הקצה, אך נשארת חזקה בנפח הסובב.

2. **הם מעוותים את גיאומטריית השדה הכוללת**. מצד אחד של המאיין, קווי השדה מסתיימים על משטחים טעונים קרובים או מבנים מושרשים. מצד שני, הם מתפרסים החוצה, חלקית מנוטרלים על ידי הטעינה המרחבית.

התוצאה היא **חוסר איזון בלחץ אלקטרוסטטי** על מערכת המאיין-איסוף - כוח נקי. התנע זורם מהשדה לאלקטרודות, לא דרך התנגשויות מולקולריות.

חוק קולון בפעולה

ברמה הפשוטה ביותר, הכוחות המעורבים מתוארים על ידי חוק קולון:

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

כל אלמנט שטח טעון של מבנה EHD מושך או דוחה כל אזור טעון אחר בסביבתו. הדחף הכולל הוא סכום וקטורי של אינטראקציות קולומביות אלה הרבות, שמעוצבות מחדש באופן רציף על ידי היונים הנעים שמודולטים את השדה.

במצב יציב של כתרון, שכבה דקה של יונים חיוביים יושבת בין מאיין מתח גבוה לאיסוף יחסית שלילי (או הסביבה הסובבת). יונים אלה משמשים **כמתווכים**: הם מסווים חלקית את המשיכה בין המאיין לאיסוף, ובתנועה שלהם מאפסים באופן רציף את אי-הסימטריה של השדה. הכניסה החשמלית הקבועה שומרת על חוסר האיזון הזה, והופכת אנרגיה פוטנציאלית אלקטרוסטטית לכוח מכני.

לקחים מנאס"א ומגבלות פרדיגמת רוח היונים

בתחילת שנות ה-2000, נאס"א וקבלני המשנה שלה חזרו לבחון מכשירים מסוג ביפלד-בראון במסגרת מחקרי Talley AIAA-1 ו-Gravitec. באמצעות קבלים א-סימטריים מתח גבוה בסביבות אטמוספריות וואקום, הניסויים נועדו לבדוק אם האפקט יכול להימשך בהיעדר אוויר.

התוצאות היו חד-משמעיות - ומקריות חושפניות.

במצב אטמוספרי, הרוטורים השיגו סיבוב בקושי ניתן למדידה (1-2 סל"ד) ודחף בטווח 10-100 μN - סדרי גודל נמוכים יותר ממה שצפוי אם המכשירים באמת ניצלו אפקט גרביטציוני. התנועה יוחסה לחלוטין לפריקה כתרונית קונבנציונלית ורוח יונים חלשה.

בוואקום, בלחצים עד 10^{-6} Torr, התנועה נפסקה לחלוטין. כל אות זמני נקשר להפרשה גזית או טעינה שיורית על פני השטח. ללא מולקולות אוויר לשמירה על יינון, השדה האלקטרוסטטי הפך סימטרי, והכוח נעלם.

חוקרי המקרה הסיקו שהדחף משתנה באופן גס ליניארי עם צפיפות האוויר - ממצא שמוזכר לעיתים קרובות כדי "להפריך" הנעה EHD כאילו שהיא בלתי אפשרית בוואקום. אבל מה שבאמת הודגם היה משהו עמוק יותר: **ללא מדיום להובלת טעינה מרחבית, השדה החשמלי מאבד את אי-הסימטריה שמייצרת גרדיאנטים של לחץ אלקטרוסטטי.**

במילים אחרות, הניסויים המוקדמים האלה אישרו במקרה את **פרשנות מתח מקסוול** של הנעה אלקטרו-אווירודינמית. זה לא היה גרביטציה, ולא גרירה יונית פשוטה - זו הייתה הנוכחות של **חוסר איזון שדה מתווך על ידי טעינה** שחשובה.

מכשירי Gravitec, שנבנו לפשטות ולסימטריה, חסרו כל **מאגר טעינה** משמעותי או **דיאלקטרי מעצב** שדה. הגיאומטריות הפתוחות שלהם פיזרו קווי שדה לסביבה, מבזבזים את רוב האנרגיה האלקטרוסטטית.

לעומת זאת, הרוטור EPS-אלומיניום המתואר כאן ריכז טעינה לאורך עור מוליך מוגדר היטב, המאפשר לאזור הטעינה המרחבית **לפסל** את השדה המקומי. התוצאה: דחף שימושי בפחות מ-6 קילוולט וכ-100 מיליוואט - ביצועים טובים כמעט בשני סדרי גודל ביעילות אנרגטית.

תגליות אלה מהדהדות נושא עקבי: **יעילות אלקטרו-אווירודינמית אינה נובעת ממתח או זרימת אוויר, אלא משליטה בטופולוגיית הטעינה ובגיאומטריית השדה.**

אפקט מאגר הטעינה

דף קל על ליבה קשיחה ומבודדת מתנהג כיותר מסתם מוליך - הוא יוצר **מאגר טעינה שטח גדול** שמגביר את אי-הסימטריה של השדה החשמלי. בעיצוב הנוכחי, פוליסטירן מורחב (EPS) משמש אך ורק **כתמיכה מבנית קלה**, פני השטח כולו עטוף בנייר אלומיניום **שמחובר חשמלית באופן רציף למקור מתח גבוה**. ה-EPS מוסיף פונקציה חשמלית זניחה; ערכו נעוץ באפשרות של שטח מוליך גדול במסה מינימלית.

העור המוליך הנרחב הזה מאחסן טעינה ישירות מהמקור, המאפשר לפריקה הכתרונית לפעול נגד **שדה אלקטרוסטטי טעון מראש** במקום לבנות אחד מאפס בכל מחזור. שטח הפנים הגבוה של הנייר מגביר באופן דרמטי את הקיבולת האפקטיבית - בסדר גודל של $100-10 \text{ pF cm}^{-2}$, תלוי במרקם ובקמירות השטח - והופך מתח מופעל צנוע לגרדיאנט שדה חשמלי מקומי חזק בהרבה.

כאשר הכתרון נדלק, הנייר משמש כהתייחסות פוטנציאל מייצבת. היונים המופלטים מודולטים את השדה המקומי באופן קל אך אינם שולטים בו; במקום זאת, הטעינה השטחית המאוחסנת שומרת על אי-סימטריה יציבה שמייצרת דחף רציף בכוח נמוך מאוד.

מנקודת מבט של מתח מקסוול, הכוח פרופורציונלי לשילוב של עוצמת השדה וגרדיאנט:

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

והנייר הגדול והטעון היטב ממקסם את שני המונחים ללא צורך במתח גבוה יותר או זרם גבוה יותר. זה מסביר מדוע רוטור בעל הספק נמוך ומתח נמוך יכול היה להשיג סיבוב משמעותי: הוא החליף **אנרגיה אלקטרוסטטית מאוחסנת** בהפסדי זרם יוני כבדים של גיאומטריות "רוח יונים" קונבנציונליות - צורה מעשית של **יעילות אלקטרוסטטית**.

גיאומטריית היעילות

היעילות של מנוע EHD אינה נקבעת על ידי מהירות זרימת האוויר, אלא על ידי **היעילות שבה השדה החשמלי מעוצב**. הפרמטרים המרכזיים כוללים:

- **אי-סימטריית שדה:** הרכיב הכיווני הנקי של גרדיאנט הלחץ האלקטרוסטטי.
- **התפלגות צפיפות טעינה:** כיצד ענן היונים משנה את השדה הזה באמצעות מסווה חלקי.
- **קישור קיבולי:** הטעינה הכוללת המאוחסנת על משטחים מנוגדים לכל וולט מופעל.
- **ערוצי הפסד:** הפסדי כתרון, רקומבינציה ודליפת דיאלקטרי.

עיצובים שמגבילים ומעצבים את השדה - למשל, על ידי הצבת משטח רחב טעון באופן מנוגד קרוב למאיין - יכולים להשיג שיפורים בסדרי גודל בדחף לכל וואט. השדה החשמלי מבצע את העבודה; היונים רק מאפשרים לשדה להישאר א-סימטרי ודינמי.

בחינה מחדש של ביפלד-בראון

התצפיות המוקדמות של בראון על דחף מקבלים א-סימטריים קודמות להבנתנו המודרנית של פיזיקת הפלזמה. ללא המסגרת של מתח מקסוול או דינמיקת טעינה מרחבית, היה טבעי לחשוב שהאפקט עשוי לכלול גרביטציה. העובדה שמנועי EHD מייצרים כוח "נגד" וקטור השדה (ולעיתים אנכית כלפי מעלה) רק העמיקה את התעלומה.

כפי שנראה דרך עדשת היום, "אנטי-גרביטציה" של בראון הייתה פשוט לחץ אלקטרוסטטי שהפך גלוי. הדמיון בצורה המתמטית - גם אנרגיות פוטנציאליות גרביטציוניות ואלקטרוסטטיות יורדות כמו $1/r^2$ - הפך את הבלבול להיסטורית מובנת, אך הפיזיקה היא לחלוטין אלקטרומגנטית.

פרספקטיבות והקשר מודרני

ניתוחים עדכניים ודיונים בין עמיתים מחזקים את המיפוי מחדש הזה של הנעה אלקטרו-אווירודינמית **כתופעת גרדיאנט שדה** ולא כמנוע רוח יונים. בתצורות ליפטר קלאסיות, זרמי כתרון בסדר גודל של מיליאמפר בעשרות קילוולט מייצרים צפיפויות דחף בטווח מיקרו- עד מילי-ניוטון לכל וואט - השתקפות של כמה מעט מאנרגיית שדה החשמלי מסתיימת כמתח מכני מכוון. לעומת זאת, הרוטור EPS העטוף בנייר הופך את אותו חוק פיזיקלי לתהליך **מונע על ידי טעינה**: המשטח המוליך הרחב שומר על גרדיאנט E חזק עם זרם מינימלי, מחליף הפסדי סחיפה לאנרגיית שדה מאוחסנת.

ההבחנה הזו מהדהדת שינוי רחב יותר במחקר העכשווי. **אקטואטורים לפריקת מחסום דיאלקטרי** בשליטה אווירודינמית גם משליכים את כוח פני השטח שלהם ממתח מקסוול ולא מזרימת אוויר נפחית, משיגים יעילויות של 10-100 $N\ kW^{-1}$ כאשר גיאומטריית האלקטרודות מכוונת לאי-סימטריה. **גיאומטריות אלקטרודות צפות והגבלה** הנחקרים ב-ONERA ובתוכניות EHD של האיחוד האירופי מראים עליות של פי שתיים עד חמש בדחף על ידי עיצוב נדן היונים - בדיוק הלוגיקה של עיצוב הרוטור מאגר הטעינה. וב**סביבות אוויר דליל**, כמו הסטרטוספירה העליונה או האטמוספירה של מאדים, שבה גרירת יונים נחלשת אך מתח אלקטרוסטטי נשמר, משטחים עשירים בטעינה יכולים לשמור על הנעה זמן רב לאחר כישלון עיצובים קונבנציונליים.

הפיזיקה מתיישרת בצורה מושלמת עם מסגרת תנע פוינטינג של אלקטרומגנטים קלאסי: הדחף תואם לגרדיאנט של צפיפות אנרגיית שדה,

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

מה שפירושו שהמערכת שואבת תנע ישירות משדה האלקטרומגנטי. היונים הם זרזים ששומרים על חוסר האיזון, לא המסה הריאקטיבית עצמה. זה מסביר מדוע, בניסויי ואקום שבהם השדה הופך סימטרי, הדחף נעלם - המונח ∇E קורס. לעומת זאת, ברוטור מאגר הנייר, העור הקיבולי שומר על E תלול וכיווני, מייצר כ- 1 mN - 0.1 דחף שווה ערך למומנט מכוח כניסה של 100 mW בלבד - פי 10-100 מיעילות מכשירי גרירת יונים.

פרמטר	עיצוב רוח יונים קונבנציונלי	רוטור מאגר טעינה בנייר	השלכה
מתח	20-50 קילוולט	> 6 קילוולט	סיכון פריצה נמוך יותר, קנה מידה קל יותר
הספק	1-10 W	$\approx 0.1 \text{ W}$	דחף גבוה פי 10-100 W /
מנגנון דחף	התנגשויות יון-ניטרלי	גרדיאנט שדה (מתח מקסוול)	עצמאי ברובו מצפיפות אוויר
גורם מפתח יעילות (N kW^{-1})	פער מאיין-איסוף 0.01-0.1	מאגר קיבולי בנייר 1-10 (מוסק)	טעינה מאוחסנת < זרם זמני ישים למיקרו-UAV

השוואות כאלה מדגישות סיבוב קונספטואלי: **מהנעה מונעת על ידי זרם להנעה מונעת על ידי טעינה**, מתנועת חומר לעיצוב שדות. הגבול הבא הוא מה שאפשר לקרוא לו **ארכיטקטורה אלקטרוסטטית** - שימוש באופטימיזציה חישובית וחומרים מתקדמים (מאיני ננו-צינורות פחמן, ניירות ממוספרים, דיאלקטריים מטה-חומרים) כדי למקסם $\int E \cdot \nabla E$. מצבים DC פולסיים היברידיים יכולים לנצל עוד יותר אחסון טעינה זמני תוך הפחתת תוצרי לוואי כימיים.

מסקנה - מופעלת על ידי מקסוול וקולון

הנעה אלקטרו-אווירודינמית אינה סקרנות אקזוטית או אנומליה פסאודו-מדעית. זו ביטוי ישיר לחוקי מקסוול וקולון - מכונה מקרוסקופית שממירה אנרגיה פוטנציאלית אלקטרוסטטית לתנועה דרך אי-סימטריית שדה מבוקרת.

מקום שבו ממציאים מוקדמים ראו "אנטי-גרביטציה" ופרויקטים מודרניים רואים "רוח יונים", הסיפור האמיתי פשוט יותר ועמוק יותר: **שדות חשמליים מחזיקים מתח**. עצבו את המתח הזה, ואתם יכולים למשוך את עצמכם דרך האוויר ללא חלקים נעים, ללא דלק וללא רעש.

זה הגאונות השקטה של הנעה אלקטרו-אווירודינמית - באמת, **מופעלת על ידי מקסוול וקולון**.

מקורות

1. Talley, C. et al. **הערכת אפקט ביפלד-בראון: ניסויי דחף קבלים א-סימטריים בוואקום ובאטמוספירה**. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. **מכשיר אלקטרו-קינטי**. U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.

3. Wilson, S., Barrett, S. R. **טיסת מטוס עם הנעה יונית מצב מוצק.** *Nature* **563**, 532–535. (2018).
4. Moreau, E. **שליטה בזרימת אוויר באמצעות אקטואטורים פלזמה לא-תרמיים.** *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. **שליטה בזרימה EHD ואקטואטורים פלזמה.** NASA Technical Reports Server, 2015.
6. תוכנית EHD של ONERA: **הנעה אלקטרו-הידרודינמית ושליטה בזרימה.** דוחות פנימיים 2018–2023.