

המדחף

19/05/03 ניצן אלישיב טיס פרטי ,182, RG מהנדס תו"נ, דוקטורט בחקר ביצועים

בדיחה ידועה :

הבוחן: "מה התפקיד של המדחף במטוס?"

החניך: "לצנן את פניו של הטייס"

הבוחן: "????!?!?"

החניך: "תעצור אותו בטיסה, מיד תראה איך כל גופו של הטייס מתמלא זיעה וחום..."

אז למי שעדיין חושב שמה שמסתובב לפנים זה מאוורר, מיועד המאמר הבא. מבוסס על מאמר של John Deakin כפי שהתפרסם ב – AVWEB. תורגם ועובד על-ידי.

טייסים נוטים להתייחס למדחף כדבר מובן מאליו, הוא ישנו שם לפנים, בוא ניתן לו להסתובב, והכל בסדר..

אבל המדחף הוא אולי החלק הקריטי ביותר והעומד בעומס הגבוה ביותר בכל המטוס. בבדיקה לפני טיסה אנו נוטים לרפרף עם העין על המדחף ולרשום V וירטואלי בראש. המהדרים עוד טופחים על מרכזו ובודקים "שהוא מחובר לגוף".. רוב התקלות המכניות במטוס ניתנות לפתרון "לפי הספר" תוך בחינת אפשרויות זהירה. למעשה, רוב התקלות צריכות להיות מטופלות שכבד ראש וללא חפזון. אולם כשל במדחף אינו נותן את הפריבילגיה הזאת. כשל מדחף צריך להיות מטופל במהירות ובדייקנות, מתוך הזכרון והידע של הטייס.

נתחיל את הסיפור עם "טחנת רוח" או "שבשבת" (WINDMILL במקור, יקרא להלן "אפקט טחנת הרוח") אם תשים שבשבת צעצוע ברוח, היא תסתובב. יותר מכך, מהירות הסיבוב תלויה באופן ישיר ברוח ובעוצמתה.

יש הרבה מקבילות בין שבשבת הצעצוע לבין הדבר הזה שמסתובב בחזית המטוס. אפילו כשהמנוע כבוי בזמן טיסה, אתה יכול לשנות את את סלד המדחף המסתובב ברוח ע"י שינוי המהירות האוירית שלך. אנו קוראים לזה "אפקט טחנת הרוח" מן הסתם...

קצת רקע היסטורי

בימייה הראשונים של התעופה, כל המדחפים היו בעלי פסיעה קבועה. הויכוח שניטש בין האויראים היה על מהי זווית הפסיעה הרצויה. היו "מדחפי כח", "מדחפי נסיקה" ו"מדחפי שיוט". לכח – היו צריכים מדחף שיסתובב במהירות גבוהה כבר בתחילת ההמראה, אבל מדחף כזה מגביר את מהירות הסיבוב ככל שגדלה מהירות המטוס באויר - עובר את מגבלת הסלד ומאבד מיעילותו. שים "מדחף נסיקה" על המטוס, לא תצליח להשיג את הסלד הנדרש להמראה. התאוצה תהיה איטית וריצת ההמראה ארוכה, אבל תגיע למלוא הסלד בזמן הטיפוס. בשיוט, המדחף והמנוע יגיעו למצב של OVERSPEED, ויצטרכו למשוך מצערת לאחור, ולאבד כח כמובן. לבסוף, "מדחף שיוט", יסתובב בסלד הנדרש במהירות שיוט נורמלית. יגרום לצריכת דלק טובה, אבל לא תצליח להמריא אלא אחרי ריצה ארוכה מאד. זהו למעשה המדחף בעל הפסיעה הקבועה שאנו מוצאים עד היום ברוב המטוסים החד מנועיים "למתחילים" – כדוגמת סונה 152 ו-172. מדחפים אלה אינם אופטימליים להמראה ונסיקה וגם טווח היעילות שלהם בשיוט הוא מוגבל. הסיבה היחידה שהם עושים את עבודתם היא שהמטוס הוא איטי יחסית, 50-100 קשר, ומסלולי ההמראה מספיקים, כי נבנו למטוסים גדולים יותר. במדחף פסיעה קבועה הסלד משתנה עם שינוי כח המנוע ומהירות האויר.

מדחפי פסיעה משתנה

לא לקח הרבה זמן לאבות תהעופה להמציא "מדחף מתכוונן קרקעי". עם מספר כלים פשוטים, בעבודה ישירה על ראש ציר המדחף (HUB), ניתן היה לכוון את המדחף למצב "כח" או "שיוט". בכל מקרה, ברגע שהמטוס באויר – זה מדחף פסיעה קבועה עם כל מגבלותיו.

אחר כך הומצא "מדחף בעל פסיעה מתכוונת", מתקן פרימיטיבי בעיקרו, שלא דרש כלים ואפשר לטיס לשנות את הפסיעה מתוך התא בזמן טיסה. התפיסה הרעיונית היתה לאפשר לטייס לשנות את זווית להבי המדחף באופן ישיר. ברגע שנקבעה הפסיעה, הסלד תלוי שוב בכח ומהירות אויר.

מדחף בעל מהירות קבועה

לבסוף הומצא המדחף בעל המהירות הקבועה. שאר המאמר יעסוק במדחף מסוג זה, משום שזה מה שאנו מוצאים ברוב מטוסי המדחף של היום. שוב, יש הרבה ואריאציות במכניקה, יש כאלה המשתמשים במנוע חשמלי היושב שראש הציר, אולם רוב השיטות הן שילוב של לחץ שמן המנוע, קפיצים, לחץ שמן מוגבר ממשאבה מיוחדת, לחץ אויר או יחידות אירודינמיות בכדי לשנות את הפסיעה של הלהבים.

כל כח אירודינמי שואף להוריד את זווית ההתקפה על כל פרופיל אירודינמי. מדחפים אינם יוצאים מהכלל, מאחר שהם פרופילים אירודינמיים מסתובבים. הכוחות האירודינמיים שואפים לכוון את הלהבים למצב של פסיעה שטוחה ככל האפשר.

כדי שהמושגים יהיו ברורים:

פסיעה שטוחה היא פסיעה נמוכה (זווית נמוכה יותר במעלות) האמריקאים אומרים "FLAT" או "LOW", האנגלים – "FINE". אצלנו מקובל לאמר פסיעה עדינה – המשמעות העיקרית היא של סלד גבוה יותר. יש לשים לב לצירוף המושגים המבלבל "פסיעה נמוכה = סלד גבוה".... ההיפך מכך הוא כמובן פסיעה גבוהה - HIGH באמריקאית, COARSE באנגלית... ו -פסיעה גסה אצלנו. שוב הבלבול - פסיעה גבוהה = סלד נמוך.... במטוסים החד מנועיים של התעופה הקלה (יותר לא אזכיר זאת, כי המאמר הוא עליהם) משתמשים בקפיץ פנימי חזק מאד הדוחף את הלהבים לפסיעה עדינה, כאשר לחץ שמן פועל כנגד כח זה. במקרה של תקל במנגנון הבקרה, הלהבים תמיד יחזרו למצב העדין, ואז המדחף הופך להיות מדחף פסיעה קבועה מסוג מדחף כח.

רק לידיעה כללית – במטוסים רב מנועים המנגנון הפוך. במקרה של תקלה הלהבים חוזרים למצב של פסיעה גסה – סלד נמוך, ועד לשלב הנקרא "הנצה" – הלהב עומד בזווית ישרה לרוח היחסית כך שהמנוע ה"מת" לא יוסיף גרר ויאפשר להטיס את המטוס עם מנוע או מנועים שנשארו "חיים".

הערה לשונית – בכל מערכות המדחף ישנה מערכת שליטה על מהירות הסיבוב. נקראת במקור GOVERNOR. לא הצלחתי למצוא תרגום עברי למילה זו ולכן אשתמש במושג המקורי "גוברנור"

כיצד נשלטת מהירות הסיבוב?

בסה"כ, לב המערכת הוא לשחרר את הטיס מהצורך לכוון את המדחף, כי אם לקבוע סלד רצוי ולתת למנוע לעשות את שלו. נתאר להלן מערכת אחת שכזו, שהיא הנפוצה ביותר וממחישה את שיטת הפעולה – גוברנור המדחף.

הגוברנור מקבל תנועה סיבובית מן המנוע ע"י מערכת גלגלי שיניים. ככל שהמנוע מסתובב יותר מהר- כך גם הגוברנור, ולהיפך. (דרך אגב – עקרון הפעולה המתוחכם לכאורה, לקוח ישירות ממנועי הקיטור של המאה ה-19, שם היתה מערכת של מטוטלת מסתובבת שברגע שהמהירות של המנוע היתה גדולה מדי, היתה פותחת שסתום לשחרור לחץ קיטור וע"י כך מחזירה את המנוע לסלד שנקבע לו).

בראש ציר הגוברנור מחוברות משקולות סיבוב. משקולות אלה מפעילות כח נגדי לקפיץ חזק הנקרא "קפיץ המהירות". ידית הסלד בתא הטיס קובעת את העומס על קפיץ זה. אם המנוע מסתובב יותר מהר מהסלד שנקבע, כח צנטריפוגלי דוחף את המשקולות החוצה כנגד לחץ הקפיץ. תנועה זו מזיזה שסתום המאפשר לשמן לזרום בכיוון הרצוי כדי לשוב את להבי המדחף לזווית פסיעה יותר גדולה. אם הסלד יורד מתחת לרצוי, המשקולות נמשכות חזרה למרכז, מזיזות את השסתום כך שלחץ השמן ישוב את להבי המדחף לפסיעה יותר עדינה – והגדלת הסלד. כאשר הסלד הוא בדיוק לפי הרצוי לטיס, המשקולות מאזנות את לחץ הקפיץ והשסתום סוגר את זרם השמן ושומר על להבי המדחף בזווית הפסיעה הרצויה.

רוב מערכות הגוברנור מכילות גם משאבת עזר לשמן המגבירות את לחץ השמן המגיע מהמנוע מרמה של כ- PSI 50 רמה של כ- PSI 200 הדרושה כדי לשוב את זווית הפסיעה.

במציאות, המשקולות כל הזמן מצבעות תנועות תיקון קלות כדי לשמור על הסלד הרצוי, או ע"ה הזרמת מעט לחץ שמן לתוך המערכת (להגדלת פסיעה) או שחרור לחץ (להקטנת פסיעה).

מה קורה בזמן טיסה

בזמן שהמנוע כבוי, ובהנחה שכיבינו אותו בצורה מסודרת, ידית הסלד מוכנסת עד הסוף. המדחף יהיה בזווית השטוחה ביותר שלו, מקום שם השאיר אותו לחץ הקפיץ. נקרא בלשון המקצועית: "על המעצור המכני של פסיעה עדינה". כשידית הסלד מוכנסת עד הסוף, אנחנו דורשים מהמנוע לתת לנו סלד מלא להמראה – כ-2700. ידית הסלד דוחסת את הקפיץ למקסימום, ומאחר ואין שום כח צנטריפוגלי הדוחף את המשקולות החוצה, הן מוכנסות עד הסוף, מכוונות את לחץ השמן לשמור על פסיעה עדינה להעלאת סלד.

התנעה

בהתנעת המנוע אנו מביאים את הסלד ל-1000. לחץ השמן עולה. אבל הוא לא עושה כלום כרגע, מאחר וידית הסלד מוכנסת עד הסוף, נדרש סלד מקסימום, אבל המדחף כבר הכי שטוח שיכול להיות. כשלחץ השמן יעלה עם פעולת המנוע, להבי המדחף כבר יהיו על המעצור המכני. הסלד, בודא, מפוקח ישירות ע"י כח המנוע (מצערת, לחץ סעפת – זוכרים?...) מאחר שאין זרימת אויר שתגרום ל"אפקט השבשבת" כשהמטוס חונה.

בדיקות לפני המראה

הייצן קורא להרצת מנוע ב-1700 עד 1800 סלד לצורך בדיקות לפני המראה. עקרונית יש להביא את המנוע לאמצע טווח הפעולה שלו. המספר הוא יותר מסורת מאשר מדע, אם כי טווח זה נותן תשובה טובה לגבי בדיקת המגנטו ומאפשר לבדוק את פסיעת המדחף. אין חשיבות אם המספר הוא בדיוק 1700 או 1800. גם 1500 או 1900 סלד יתנו בדיקה טובה.

בבדיקות אלו, ידית הסלד עדיין מלוא מהלכה קדימה. הגוברנור מבקש להגיע לסלד מקסימלי (2400 עד 2700 לפי סוג המטוס), ולהבי המדחף עדיין בפסיעה עדינה. עכשיו נמשוך את ידית

הפסיעה לאחור. לצורך ההסבר נניח שאנו עושים זאת לאט לאט. משכנו כאינץ' אחד – ירד הלחץ על קפיץ המהירות, והוא ברמה של נניח 2300 סלד. מאחר וסלד הבדיקה (1700-1800) הוא נמוך יותר, המשקולות עדיין בפנים והמערכת מנסה להגדיל סלד ע"י הקטנת זווית הפסיעה. מאחר והלהבים בזווית "על מעצור מכני" ואין אפשרות לרדת יותר, הגוברנור מקבל מצב של UNDER SPEED.

משוך את הידית עוד אינץ' לאחור, לנקודה שהיא בדיוק 1700 סלד. עכשיו, סוף סוף משהוא קורה... משיכת הידית לאחור הורידה עוד יותר את הלחץ על קפיץ המהירות, כך שהכח הצנטריפוגלי על המשקולות כבר דוחף אותן החוצה ל"נקודת האיזון" – הנקודה בה לחץ הקפיץ שווה לכח הצנטריפוגלי. עדיין, שום דבר לא קורה במדחף מאחר והגוברנור רוצה 1700 סלד ואנחנו באמת ב-1700 סלד. הלהבים יהיו עדיין על המעצורים, אבל קצת תנועה לאחור תורגש. לבסוף, משוך את ידית הפסיעה עד הסוף לאחור. פעולה זו הפחיתה עוד יותר את הלחץ על קפיץ המהירות והסלד הוא מספק בשביל לדחוף את המשקולות להפתח. זה נקרא מצב OVER SPEED, מאחר שהמדחף מסתובב (רגעית) יותר מהר ממה שהגוברנור מבקש. המשקולות גורמות ללחץ השמן להכנס למערכת וסוף סוף הלהבים מתחילים לשנות פסיעה לכוון גסה. מאחר ושינינו רק את ידית הפסיעה, (כח המנוע – לחץ סעפת- נשאר ללא שינוי) תגרם ירידת סלד.

כמה פעמים צריך לבדוק את מחזור המדחף? אם הסלד יורד בצורה חלקה ונכונה- פעם אחת מספיקה. אם אתה רוצה להיות בטוח לחלוטין – בדוק עוד פעם אחת. שלש פעמים זה כבר מעל ומעבר.

המראה

בזמן ריצת ההמראה מומלץ לבדוק את שעון הסלד, לחץ הסעפת, ולחץ הדלק. שאר השעונים גם הם ראויים לבדיקה, אך השלישייה הזאת (כמה מפתיע, המספר 3...) הם הקריטיים. על מד לחץ סעפת – למדנו במאמר הקודם. ולחץ דלק – צריך להיות קרוב או מעל לקו האדום.

מה עם הסלד? בנקודה מסויימת אתה צריך לראות את המחט על הקו האדום. (פלוס מינוס 50) מד סיבובי המנוע המכני, נוטה להציג שגיאות אחרי תקופת שימוש ממושכת. השגיאות הן בדרך כלל כלפי מטה. יכול להיות שהמדחף נותן את המקסימום, אולם השעון מציג קריאה יותר נמוכה.

בכח מלא, כשהגוברנור מבקש סלד גבוה, המטוס מתחיל את ריצת ההמראה. ככל שהמהירות גדלה, מתחיל להשפיע אפקט השבשבת והעומס על המדחף קטן ואז הסלד עולה למקסימום. המשקולות נדחפות החוצה לנקודת האיזון. המהירות עולה עוד, המדחף ישאף לעבור את המגבלה, אבל אז המשקולות יפתחו מעט, ויאפשרו ללחץ השמן לחדור למערכת ולהגדיל את הספיעה, מורידים את הסלד חזרה לנקודת המקסימום. התהליך חוזר על עצמו כל הזמן עד שנשנה את כיווני המנוע.

מיד לאחר הניתוק מהקרקע, שיעור טיפוס חיובי, מהירות אוירת גדלה, קיפול גלגלים (איפה שיש..). צריך להפחית מעט את הסלד – שני סיבובים על בורג הכיוון העדין, זה משחרר מעט לחץ על קפיץ המהירות, המשקולות מיד יפתחו עוד, לחץ השמן יגביר את זווית הפסיעה – הסלד ירד... כאשר סיבובי המנוע בפועל תואמים את הסלד המכוון, המשקולות ינועו פנימה, ויחזרו למצב של "על המהירות".

ככל שמהירות האויר תגדל, ואנו לא משנים שום דבר אחר, העומס על המדחף יקטן, המדחף ישאף להגדיל סלד, המשקולות ישובו לאזן והסלד יחזור למצבו הנדרש.

עד המעצורים – משני הכיוונים

זכור, כתבנו קודם על מדחף מתכוונן שבו הטיס היה קובע את זווית הפסיעה ישירות. לעומתו, המדחף בעל המהירות הקבועה – בו הטיס קובע סלד והגוברנור אחראי לשמור על מהירות הסיבוב ע"י שינוי זווית הפסיעה.

אבל ישנם גבולות. אם הלהבים מגיעים עד המעצור העליון או התחתון בזמן הטיסה, הגוברנור כבר לא יכול לעשות כלום. הסלד יקבע ע"י כח המנוע ומהירות האויר. בפועל, ברגע שהפסיעה נקבעה עד המעצור, יש לך מטוס מסוג מדחף פסיעה קבועה רגיל. מתי זה קורה? כח נמוך ומהירות אויר נמוכה יעשו זאת – למשל כשאתה בפייל ומושך מצערת לסרק. אם המנוע אינו מייצר מספיק כח כדי לשמור את הסלד הרצוי ואין מספיק אפקט שבשבת להנעת המדחף, הלהבים יגיעו בסופו של דבר לנקודת הפסיעה הנמוכה, מנסים לשמור סלד, ולאחר מכן- הסלד ילך ורד. יכול להתרחש גם כשמנמיכים במהירות גבוהה, כאשר מהירות האויר באיזור הקשת הצהובה. אפקט השבשבת יוריד עומס מהמדחף, תתפתח נטיה לקביעת פסיעה גסה יותר כדי לשמור סלד רצוי (בד"כ 1800). כשהלהבים מגיעים למעצור העליון, הם אינם יכולים לנוע יותר והסלד יעלה. שוב-המדחף שלך הפך להיות מדחף פסיעה קבועה. אין בזה שום נזק, רק תזכור שהגוברנור לא התקלקל. משיכת ידית הפסיעה עד הסוף לאחור, עד לשיא הפסיעה הגסה (וסלד נמוך) לא יהיה לה שום השפעה מאחר והלהבים כבר בנקודת השיא. רק הפחתה במהירות האויר או הכח יביאו את הסלד חזרה למספר המכוון ע"י הידית.

המדחף בשיוט

כיצד נקבע את כיווני המנוע בשיוט, ומה ננסה להשיג בכך? זכור שכאשר אנו מדברים על כנפיים ומהירות ל"טווח מקסימלי" או "שעור גלישה מקסימלי" או "שיעור שקיעה מינימלי", אנו מנסים לשנות את יעילות הכנף ע"י שינוי זווית ההתקפה שלה. אנו יכולים לטוס מהר, להעלות את הגרר הטפיל, או שיכולים להאט על מנת למזער אותו. בנקודה מסויימת נשיג את שיעור העילוי המקסימלי "L/D MAX". ע"י שינוי סלד בשיוט, אנו עושים אותו דבר. סלד גבוה ישיג כח גבוה, אבל יעלה לנו בגרר גבוה. (וגם צריכת הדלק..). כמו כל פרופיל אירודינמי, למדחף יש זוויות אופטימליות גם כן. אלא שנתוני היעילות אינם מצויים בידי הטיס, ולרוב יגבר הצורך לשמירת מהירות אופטימלית של המטוס. אבל בהכללה – לכל כח נתון, הסלד הנמוך ביותר יפחית חיכוך בתוך המנוע, וזה אולי הפרמטר היותר חשוב. יש לזכור עם זאת שלכל מדחף יש יעילות גבוהה בסלד נתון. לצורך הדגמה, נחשוב על מדחף בהנצה מלאה – הלהבים עם שפת ההתקפה ישירות לרוח – יוצרים מינימום גרר. עכשיו נסובב את הפסיעה בעדינות רבה, וניצור זווית קטנה כזו שתיתן 1 סלד. מה יקרה עכשיו? הלהבים פועלים כמו כל פרופיל א"ד עם מהירות וזווית התקפה קטנה. הם מייצרים מעט מאד עילוי, וכמעט כולו הוא בכיוון הסיבוב, כך שתוספת הגרר היא שולית. המדחף מתקדם קדימה לתוך הרוח במהירות של המטוס, ולמהירות זו אנו צריכין להוסיף את מהירות הסיבוב. למתענינים – זו הנוסחה:

מהירות קצה הלהב = שורש מרובע (רדיוס בריבוע X מהירות זוויתית בריבוע + TAS בריבוע)
כאשר: מהירות זוויתית ברדיאנים לשניה
TAS ברגל לשניה
רדיוס המדחף ברגל
התוצאה תתקבל ברגל לשניה.

במטוסי התעופה הקלה, בדרך כלל מדחף המסתובב בחצי מהסלד המקסימלי שלו "טס" פי שתיים יותר מהר מהמטוס, ובשיא הסלד הוא כחמש פעמים יותר מהיר מהמטוס. בכל מקרה לא תראה מדחף שמהירותו עולה על 600 קשר, מאחר ואז הוא מתקרב למהירות הקול, ומתרחשות תופעות א"ד לא רצויות שהרעש הוא רק הקלה שבהן.

זו, דרך אגב, הסיה להכנסת מערכת תמסורת בין המנוע והמדחף (בדגמים מסוימים – במיוחד אזמים). מנוע יעיל יותר כשהוא מסתובב מהר יחסית, ואילו המדחף יעיל יותר במהירות נמוכה יחסית. הנעה ישירה היא פשרה בין השניים.

WINDMILLING - אפקט "טחנת הרוח"

נחזור לתרגיל המחשבתי שהוצג קודם – בו אנו שולטים ישירות על זווית הפסיעה. המנוע מסתובב ע"י המדחף, הוא אינו מפתח שום כח, המצערת סגורה, המגנטו כבוי. מהנתונים שהזכרנו למעלה – במהירות של כ-500 סלד קצה המדחף נע פי שניים יותר מהר מהמטוס, כאשר חצי מהמהירות זו תנועת המטוס וחציה זה מהמהירות הסיבובית. לא ניתן לדעת בדיוק מה זווית הפסיעה, אבל ברור שכדי לסובב במהירות כזו יש לייצר מספיק "עילוי" וזה אומר זווית התקפה משמעותית.

כמו בכנף בזווית התקפה גבוהה המייצרת רכיב של גרר, גם המדחף עכשיו מייצר "עילוי" שמסובב אותו, וגרר הפועל אחורה ומאט את המטוס. זווית הפסיעה נעה בין 0-42 (לפי סוג המטוס) כך שניתן לראות כי אם המדחף מפיק מספיק עילוי כדי להסתובב ולסובב את המנוע בכזאת מהירות, הוא מן הסתם מייצר כמות אדירה של גרר!!

עכשיו, נחשוב שאנו יכולים לקבוע את הלהבים בזווית שטוחה לחלוטין. ללא מנוע פועל, המדחף יגרום להאטה נוספת עד שיעצר, כשהלהבים נדחפים דרך האויר ב90 מעלות. יותר גרר מאשר בהנצה, אך לא כל-כך הרבה כמו בזמן שהלהבים התנהגו כמשטח אירודינמי.

מתוך זה, אנו יכולים לראות כי מדחף בטחנת רוח זהה למטוס דואה ללא כח מנוע. מדחף עומד, זהה למטוס הנופל כמו אבן ללא מהירות אופקית. איזה מצב יתן לנו יותר "עילוי" ופחות מהירות אנכית?

לכן, מדחף באפקט טחנת הרוח הוא הגרוע ביותר מבחינת יעילות המטוס, מדחף עומד הוא טוב יותר, ומדחף במצב הנצה הוא האידיאלי למקרה שהמנוע לא פועל.

המאמר המקורי באנגלית: Pelican's Perch #16:Those Marvelous Props