MIL-STD-1275, 810 ו-461 למטעני סוללות: רשימת תיוג לתכנון מטענים מוקשחים לרכבי 24 V

מפרט של מטען מוקשח יכול למשוך אחריו כ-1,400 עמודים של תקנים צבאיים, אבל פחות מ-150 מהם משנים את התכנון. רשימת התיוג הזאת ממפה כל דרישה להחלטת התכנון שהיא כופה ולבדיקה שמוכיחה אותה, עם החשבון מאחורי הדרישות הקשות.

תאן שואי · i@tanshuai.com · tanshuai.com

23 בנובמבר 2026

תקציר

מטען סוללות מוקשח של 24 V לרכב ולשטח הוא בבסיסו מטען ממותג רגיל עם ארבע בעיות קשות סביבו. MIL-STD-1275 מפעיל על הכניסה נחשול של 100 V ממקור של 0.5 Ω, שאף דיודת ריסון אינה יכולה לספוג, ולכן החזית צריכה מעכב נחשולים טורי שבנוי מרכיבים בדרגת 150 V. ב-MIL-STD-461 הצד הקשה הוא הפליטות ולא החסינות: כל כניסת הספק צריכה מסנן דו-שלבי על דופן המחבר, והמארז חייב להיות אטום חשמלית ולא רק מכנית. MIL-STD-810 דורש קופסה אטומה שמפזרת חום ב-55 °C+ בשמש, שורדת 26 נפילות ונושמת בגובה רב בלי להכניס מים. MTTF של 40,000 שעות לא משאיר מקום למאוורר. כל השאר, מלחות וערפל מלח ועד ESD, טמפרטורת מגע ודוח האמינות, הולך לפי פרקטיקה טובה ומאומת בבדיקה או במסמך. רוב המפרטים עדיין מפנים למהדורות משנות השמונים והתשעים; תכנון לפי המהדורות הנוכחיות ומסירת טבלת הצלבה אינם עולים כלום וחוסכים עבודה חוזרת. הסמכה אמינה דורשת שלוש יחידות ו-8 עד 16 שבועות, ולפי תעריפי מעבדות מפורסמים ביבשת סין היא עולה בערך 20,000 עד 55,000 דולר.

למה כתבתי את זה

בקשות למטענים מוקשחים מגיעות כעמוד של דרישות ורשימת תקנים: MIL-STD-810 לסביבה, MIL-STD-461 לתאימות אלקטרומגנטית, MIL-STD-1275 להספק ברכב, תקן בטיחות, ערך MTTF וכמה כללי הנדסת אנוש. המסמכים מאחורי הרשימה מגיעים לכ-1,400 עמודים. קריאה מילולית הופכת מטען לפרויקט מחקר; קריאה שטחית מחמיצה את שלושה-ארבעה הסעיפים שקובעים את תרשים המלבנים, את המארז ואת המחיר.

לאחרונה עברתי על מפרט כזה שורה אחר שורה, קראתי את התקנים עצמם ולא סיכומים שלהם, ומיינתי כל סעיף לפי מה שהוא עושה לתכנון. זו התוצאה, כתובה כרשימת תיוג למהנדסים שצריכים להפוך מפרט כזה לחומרה, ולקונים שרוצים להבין מה הם מבקשים. כל המספרים נכונים לנובמבר 2026, והסכומים בדולר אמריקאי.

התוצאות במבט אחד

איור 1. מתוך כ-1,400 עמודי תקנים, פחות מ-150 קובעים את התכנון. השאר הוא פרקטיקה טובה וניירת.



Tier 1 — Decides the architecture

Settle before the design freezes

MIL-STD-1275
Front-end topology and part voltages

MIL-STD-461 emissions
Filters at the wall, sealed seams, cable treatment

MIL-STD-810 heat, rain, dust, altitude
No fan, finned wall, vent, wall thickness

MIL-STD-810 vibration and shock
Structure, part retention, bumpers

Safety insulation
Clearances, creepage; couples with the EMI filter

Two definitions
Which 1275 revision; what "EMP protection" means

Tier 2 — Good practice, then test

Look up once, mark on the drawings

Low temperature
Parts and display rated for −40 °C

Humidity and salt fog
Coatings, sealing, no dissimilar metals

Sand and dust
Abrasion of paint and display window

Immunity tests
Usually passed by a sealed, bonded case

ESD
4 kV contact, 8 kV as margin

Human factors
Gloved handle, knob detents, character size

Tier 3 — Documents or analysis

Written, not tested

MTTF
Parts-stress prediction, MIL-HDBK-217F

Design review
MIL-HDBK-454 checklist

Factory
ESD control program, ISO 9001

Withdrawn standards
Equivalence statements

By analysis, if accepted
Low pressure, solar load, radiated EMP

מקור: The author's reading of the standards cited; page counts are those of the published documents.

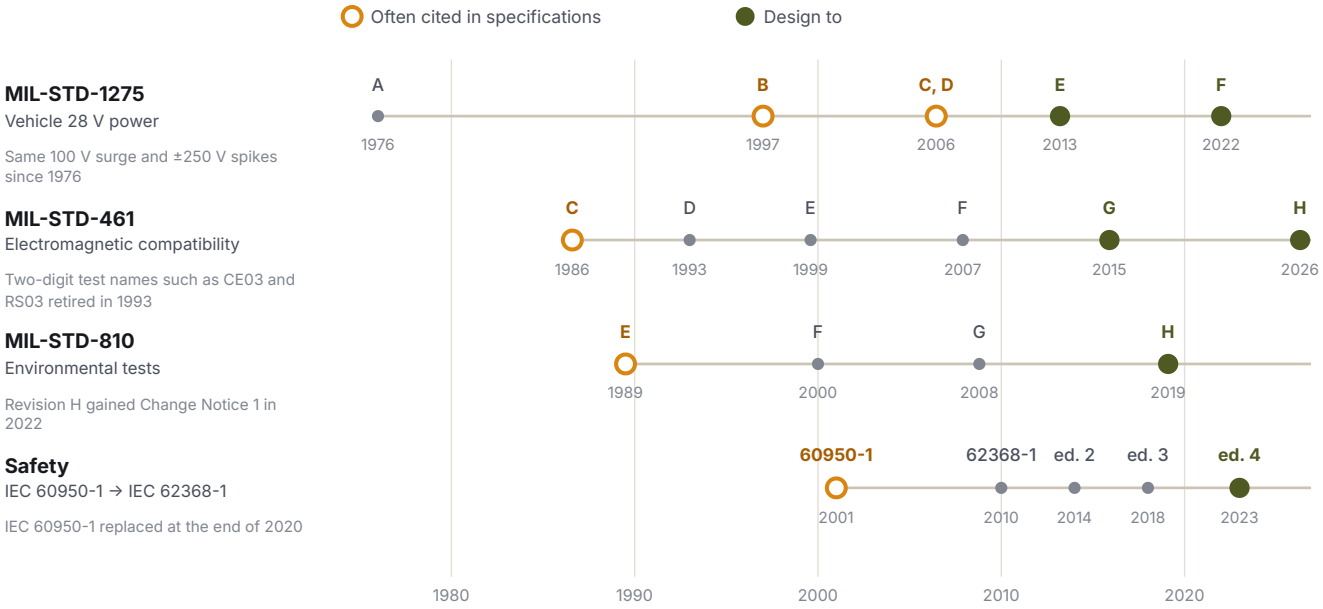
רשימת התיוג עצמה, מהדרישה להחלטת התכנון שהיא כופה ולדרך להוכיח אותה:

דרישה	מה היא עושה לתכנון	איך מאמתים
MIL-STD-1275, הספק רכב 24 V	מעכב נחשולים טורי מבוסס MOSFET עם רכיבים בדרגת 150 V, TVS לקוצים, חסימת קוטביות הפוכה בלי מפל של דיודה; טעינה מ-16 עד 33 V, עצירה וחידוש עצמאיים בזמן התנעה	בדיקה עם מחולל חולפים למהדורה המצוטטת
MIL-STD-461, EMI	מסנן LC דו-שלבי על כל כניסת הספק, מותקן על דופן המחבר; אטמים מוליכים בכל תפר; תכנון תדרי הממירים; סריקות מקדימות על האב-טיפוס הראשון	בדיקה בתא, אחרי סריקות מקדימות פנימיות
MIL-STD-810, סביבה	תא אלקטרוניקה אטום וללא מאוורר שהחום יוצא ממנו דרך צלעות; שסתום ePTFE לגובה; פינות פגוש ומחברים שקועים לנפילות; רכיבים לאחסון 40- עד 71+ °C	יחידה אחת בשרשרת האקלים, אחת בשרשרת המכנית
טמפרטורת טעינה של ליתיום-יון	למדוד כל סוללה ולטעון רק בתוך החלון שלה, בדרך כלל 0 עד 45 °C; לעצור, להסביר, לחדש מעצמו; חימום מקדים אופציונלי	בדיקה בקצוות הטמפרטורה
בטיחות, IEC 62368-1	מרווחי בידוד לפי הקריאה הגדולה יותר של הטבלאות; מארז מתכת חסין אש מעל 100 W; ידיות וכפתורים מפולימר בגלל טמפרטורת מגע	דוח בדיקה CB ובחינה
ESD	פריקת מגע בכל מה שיד יכולה לגעת בו, 8 kV כמרווח 4 kV	בדיקה, כחצי יום
MTTF של 40,000 שעות	תקציב של 25 כשלים למיליון שעות לכל המטען: בלי מאוורר, רכיבים בהפחתת דירוג	חיזוי לפי MIL-HDBK-217F, עם שיטה מוסכמת מראש
הנדסת אנוש, MIL-STD-1472	ידית לכפפות, מרווחי עצירה של 15 עד 40° בבורר, אותיות קריאות ממרחק זרוע	בחינה והדגמה עם כפפות

שלב אפס: לתכנן לפי המהדורות הנוכחיות

מפרטים לציוד מוקשח לעיתים קרובות ישנים יותר ממה שהם נראים. נפוץ למצוא את MIL-STD-810E (1989) ו-MIL-STD-461C (1986) לצד תקני בטיחות שכבר בוטלו, כי משרדי רכש מעתיקים את התבניות שלהם הלאה. שמות הבדיקות בני שתי אותיות ושתי ספרות של 461C, כמו CE03 ו-RS03, הוצאו משימוש ב-1993. MIL-STD-810 נמצא היום במהדורה H (ינואר 2019, עם הודעת שינוי 1 ב-2022); MIL-STD-461 במהדורה G (דצמבר 2015), ואחריה H באפריל 2026; MIL-STD-1275 במהדורות E (מרץ 2013) ו-F (2022). IEC 62368-1 החליף את IEC 60950-1 בסוף 2020 ונמצא במהדורתו הרביעית (2023). EN 50091-1, שעדיין מופיע במפרטי מטענים, הוא תקן ל-UPS שבוטל ב-2005.

איור 2. מפרטים עדיין מצטטים מהדורות משנות השמונים והתשעים. תכננו לפי הנוכחיות ודווחו לפי שתיהן.



מקור: Revision dates from the standards themselves and from a US test lab's revision list; IEC publication dates.

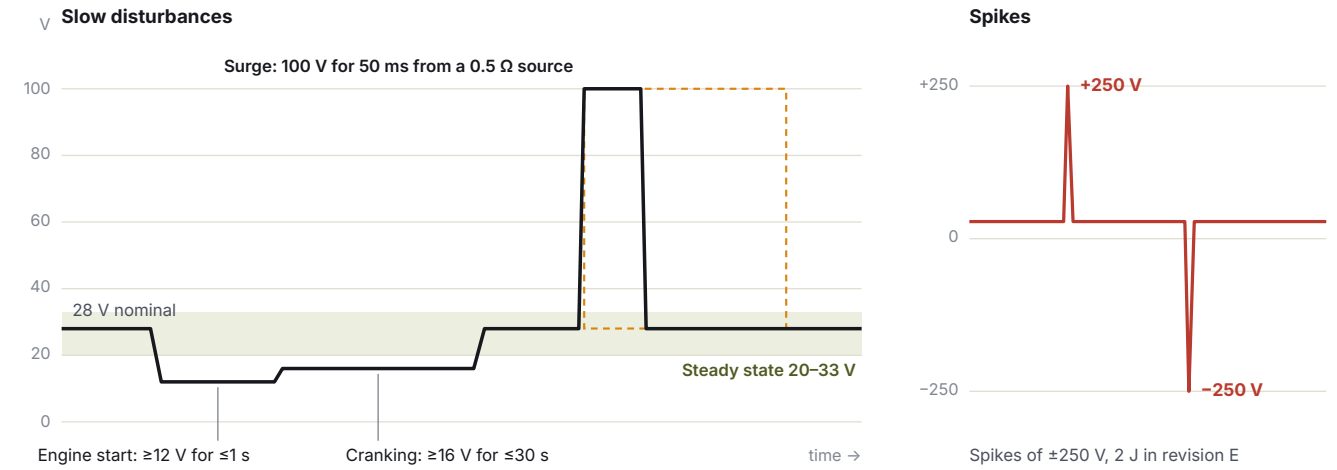
רמות החומרה ברירת המחדל של MIL-STD-810 כמעט לא השתנו בין 1989 ל-2019, ושתי העקות שמעצבות את חזית MIL-STD-1275 זהות מאז 1976, כך שתכנון לפי המהדורות הנוכחיות אינו עולה כלום. מה שהוא קונה הוא תכנון שימשיך לעבור אם הלקוח יעדכן את המפרט, ומעבדות שעדיין מריצות את השיטות. הכלל שלי: לתכנן לפי 810H, 461G או H, 1275E או F ו-IEC 62368-1:2023, לדווח תוצאות לפי מספרי השיטות שהלקוח ציטט, ולמסור טבלה של עמוד אחד שממפה ישן לחדש. כששיטה ישנה שורדת רק במעבדות מעטות, כמו פליטות המוליכות CE03 של 461C, יש לסכם את המקבילה הנוכחית לפני הזמנת תא.

שתי שאלות שייכות להודעה הראשונה, כי התשובות משנות את העלות: איזו מהדורה של MIL-STD-1275 חלה, ובאיזה קריטריון מעבר; ומה פירוש "הגנת EMP". הזרקת גלי סינוס מרוסנים לכבלים (CS116, או CS10 ו-CS11 ב-461C) לוקחת כיום אחד בתא. בדיקת פולס מוקרן (RS105, או RS05 ב-461C) היא תקציב אחר, ו-461H מחיל אותה רק על ציוד שיש לו דרישת EMP מפורשת.

MIL-STD-1275: כניסת 24 V קובעת את תרשים המלבנים

כל מהדורה של MIL-STD-1275, מ-A ב-1976 ועד E ב-2013, מכילה את אותן שתי עקות שמגדירות את התכנון: נחשול ל-100 V+ שנמשך 50 ms ממקור של 0.5 Ω, וקוצים של ±250 V. מה שהשתנה בין המהדורות הוא הנהלת חשבונות: מצבי הפעלה, אנרגיית הקוצים (15 mJ ב-B ו-D, 2 J ב-E), רצפת הצניחה בהתנעה (לא פחות מ-6 V למשך 1 s במהדורות הישנות, 12 V ב-E, ואז לא פחות מ-16 V עד 30 s בזמן סיבוב המתנע) וחלון המצב היציב, 20 עד 33 V ב-E. מהדורה F, לפי התיעוד של מחוללי הבדיקה שנבנו עבורה, מאריכה את הנחשול לכ-500 ms ממקור קשיח בהרבה ומורידה את אנרגיית הקוצים ל-250 mJ.

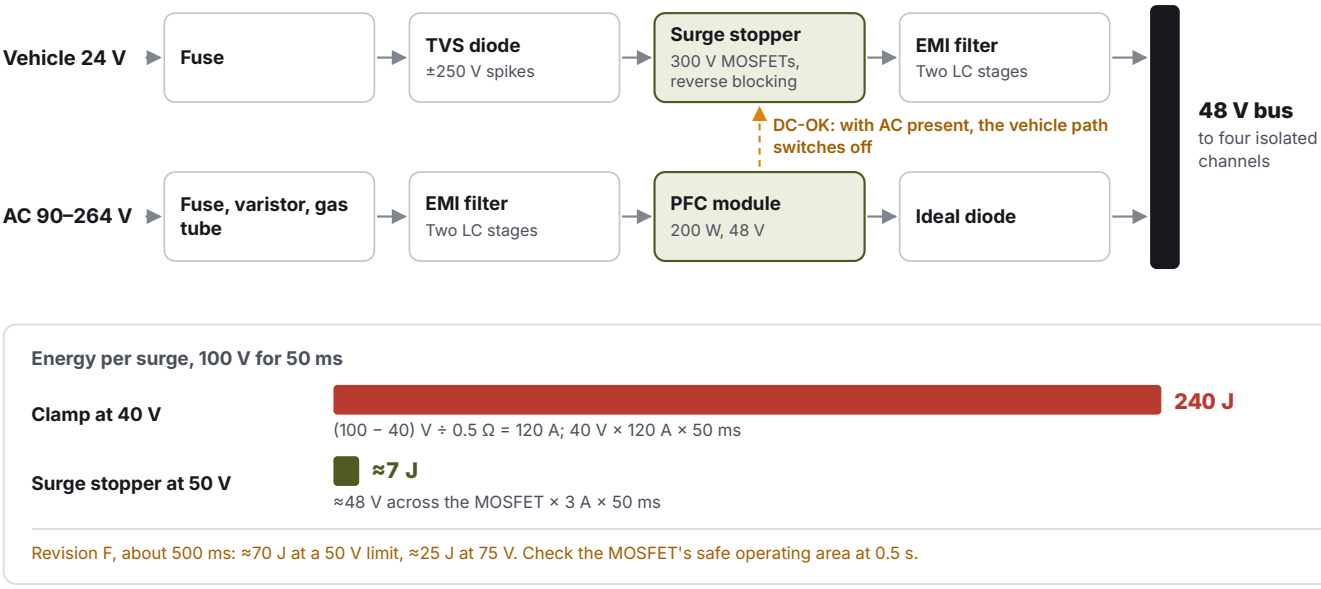
איור 3. מעטפת MIL-STD-1275E על פס רכב 28 V.



מקור: MIL-STD-1275E (2013); the revision F note is inferred from the documentation of F-rated test generators.

הנחשול הוא שפוסל את הפתרון המתבקש. אם מרסנים אותו ב-40 V עם דיודת TVS או וריסטור, המקור דוחף 120 A = 0.5 / (100 - 40) לתוך הרכיב למשך 50 ms, כלומר 240 J = 0.05 s × 120 A × 40 V ברכיב אחד. שום רכיב ריסון בגודל סביר לא יעמוד בזה שוב ושוב. מעכב נחשולים טורי פועל אחרת: MOSFET בנתיב ההספק מגביל את היציאה למתח מוגדר ומוריד את השאר, ולכן הוא מפזר רק את ההפרש בין הנחשול למתח הזה כפול זרם העומס. לעומס של 150 W שמוחזק ב-50 V זה בערך 3 A × 48 V, כלומר כ-150 W למשך 50 ms: כ-7 J, פי שלושים פחות מהריסון.

איור 4. ריסון היה צריך לספוג 240 J; מעכב נחשולים מפזר כ-7 J.



מקור: The author's design; energies calculated for a 150 W load.

שאר החזית נגזרת מכך:

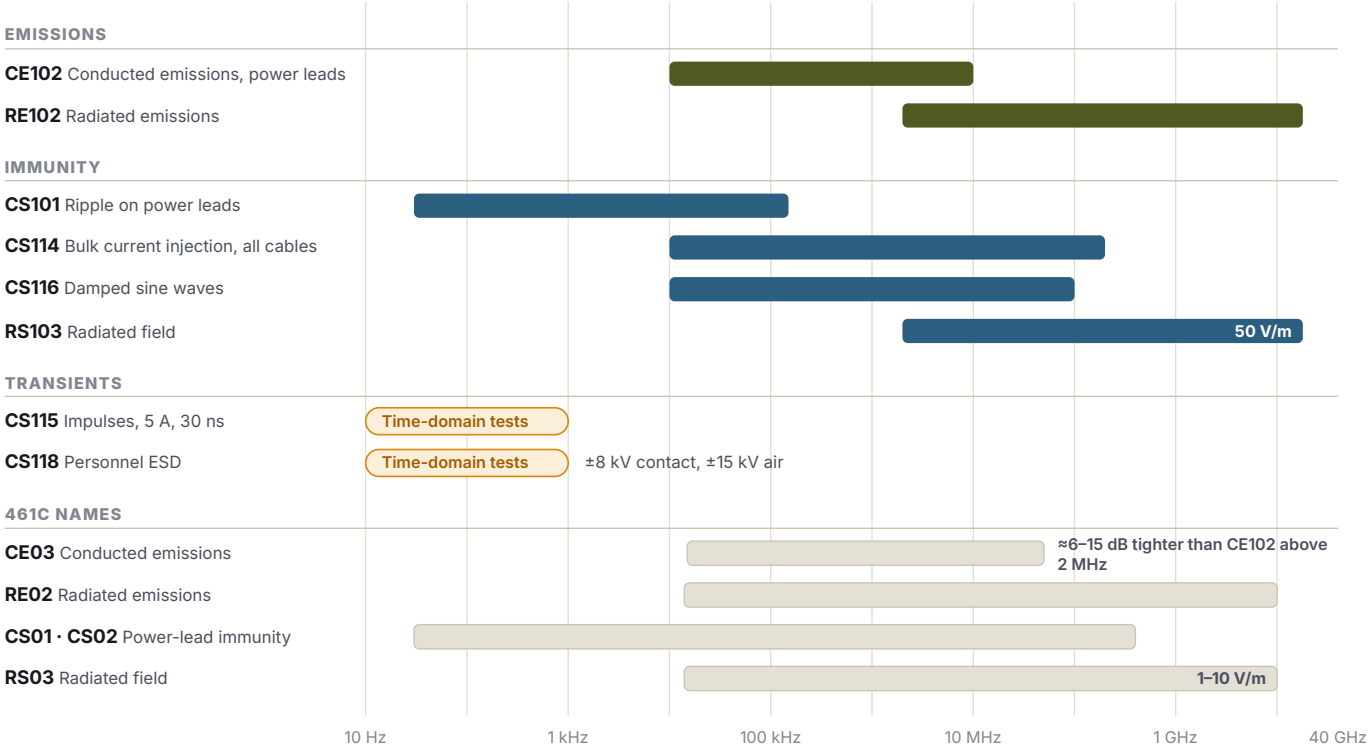
- **רכיבים בדרגת 150 V ומעלה** בנתיב הנחשול. אני משתמש ב-MOSFET של 300 V, שקונה מרווח מול הקוצים.
- **מהדורה F משנה את המספרים.** ב-500 ms, אותה הגבלה של 50 V הייתה מכניסה כ-70 J ל-MOSFET. העלאת ההגבלה לכ-75 V, שמודולי DC-DC עם כניסה של 18–75 V מקבלים ברציפות, מורידה את הזרם ל-2 A ואת המתח על ה-MOSFET לכ-24 V, כ-25 J בסך הכול; בכל מקרה יש לבדוק את אזור הפעולה הבטוח של ה-MOSFET ב-0.5 s.
- **TVS עדיין תופס את הקוצים.** ב-2 J (או 250 mJ ב-F) זו עבודה שהוא מסוגל לה.

- **קוטביות הפוכה נחסמת ב-MOSFET גב-אל-גב** תחת בקר דיודה אידיאלית, לא בדיודה טורית שהייתה מבזבזת כמה וואטים.
- **התנעה היא מצב, לא תקלה.** להמשיך לטעון עד 16 V כשאפשר. מתחת לזה, לעצור, להשאיר את התצוגה והיומן פעילים ולחדש בלי שאיש יגע ביחידה. לכתוב זאת בתשובה למפרט.
- **מודולים עם כניסה של 18–75 V עוזרים.** הם עומדים בדרך כלל ב-100 V למשך 1 s, כך ששלב אחד של הגנת נחשולים לפניהם מספיק.
- **גם אדוות נחשבת.** 1275D מתיר אדוות של 7 V שיא עד 200 kHz, ומסנן הכניסה צריך לטפל בה בלי להיכנס לתהודה.

MIL-STD-461: הפליטות הן הצד הקשה

לציוד קרקעי של צבא היבשה, MIL-STD-461G מחיל שמונה בדיקות: CE102 פליטות מוליכות בקווי ההספק (10 kHz עד 10 MHz), RE102 פליטות מוקרנות (2 MHz עד 18 GHz לציוד קרקעי), CS101 אדוות בתדר שמע בקווי ההספק (30 Hz עד 150 kHz), CS114 הזרקת זרם לכל כבל (10 kHz עד 200 MHz), CS115 פולסים מהירים, CS116 גלי סינוס מרוסנים (10 kHz עד 100 MHz), CS118 ESD מאדם (±8 kV מגע, ±15 kV אוויר) ו-RS103 חסינות מוקרנת, 50 V/m מ-2 MHz עד 18 GHz. מהדורת 461H מאפריל 2026 שומרת על גבולות הציוד הקרקעי ומהדקת את הנהלים.

איור 5. בדיקות MIL-STD-461G לציוד קרקעי של צבא היבשה, ובדיקות 461C שמפרטים ישנים עדיין מזכירים.



מקור: MIL-STD-461G (2015), Table V and test sections; MIL-STD-461C (1986), Part 4.

מטען סוללות הוא מקרה קשה מבחינת פליטות. יש בו כמה ממירים ממותגים: מתקן מקדם הספק, ממיר מבודד לכל ערוץ ושלב טעינה buck-boost לכל ערוץ. ארבעה ערוצים שעובדים בתדרים מעט שונים יוצרים תוצרי פעימה, וכבלי הסוללות והרכב הם אנטנות טובות. החסינות היא בדרך כלל הצד הקל יותר, אם כי 50 V/m ב-RS103 ראויים לכבוד. מפרט ישן מטה את הכף עוד יותר: גבול CE03 של 461C מעל 2 MHz הדוק בכ-6 dB מ-CE102 בכניסת 28 V ובכ-15 dB בכניסת 230 V, והוא נמשך עד 50 MHz במקום 10 MHz, בעוד שדרישת החסינות המוקרנת שלו היא רק 1 עד 10 V/m.

מה עובד:

- **מסנן LC דו-שלבי בכל כניסת הספק,** בנוי על דופן המחבר כך שחיווט מסונן ולא מסונן לעולם אינו חולק תא. לפי הערכתי, מטען צריך 40 עד 60 dB הנחתה בתדרי המיתוג ו-50 עד 70 dB בין 2 ל-50 MHz כדי לעמוד ב-CE03 עם מרווח.
- **תא האלקטרוניקה האטום משמש גם כמגן.** אטמים מוליכים וחיבור רציף בכל תפר הופכים את המארז לכלוב פאראדיי בלי עלות נוספת.

- **לתכנן את תדרי הממירים.** לסנכרן את ממירי הערוצים או לפזר את הספקטרום שלהם, ולהאט את קצוות המיתוג ככל שהנצילות מאפשרת.
- **לחנוק את כבלי הסוללה.** משנק משותף-אופן בכל יציאה מונע מכבלי הסוללה להקרין.
- **למדוד מוקדם.** סריקה מקדימה של פליטות מוליכות על האב-טיפוס הראשון עולה יום עם LISN ומנתח ספקטרום; גילוי בעיה בתא הרשמי עולה שבועות.

MIL-STD-810: קופסה אטומה שמפזרת חום, נושמת ושורדת נפילות

עשר הסביבות שמפרט מטען מזכיר בדרך כלל ממופות אחת לאחת לשיטות 500.3, 501.3, 502.3, 505.3, 506.3, 507.3, 509.3, 510.3, 514.4 ו-516.4 של 810E, שהפכו ל-500.6, 501.7, 502.7, 505.7, 506.6, 507.6, 509.7, 510.7, 514.8 ו-516.8 ב-810H. רמות ברירת המחדל שלהן כמעט לא השתנו בשלושים שנה. אף אחת מהן אינה קשה לבדה; יחד הן מתארות קופסה אטומה, ולקופסה אטומה שלוש בעיות: חום, לחץ ומכה.

שיטה (810E / 810H)	רמת ברירת מחדל	מענה תכנוני
לחץ נמוך (500.3 / 500.6)	4,570 מ', 57 kPa	קופסה אטומה חווה כ-44 kPa על דפנותיה; על מכסה של 340 × 240 מ"מ זה כ-3.6 kN. שסתום ePTFE משווה לחצים ושומר על המים בחוץ.
טמפרטורה גבוהה (501.3 / 501.7)	מחזור חם-יבש: 32 עד 49 °C בסביבה, 33 עד 71 °C בתוך רכבים ומארזים	הסעה טבעית ללא מאוורר דרך דופן צלעות; כל רכיב חם מוליך אליה; הקושחה מפחיתה הספק טעינה מעל 50 °C.
קרינת שמש (505.3 / 505.7)	1,120 W/m², מחזורים של 24 שעות	צבע בהיר מקטין ספיגת שמש; לסכם אם ניתוח יכול להחליף את הבדיקה.
טמפרטורה נמוכה (502.3 / 502.7)	קור בסיסי עד כ-32 °C-; קטגוריות קרות יותר בהסכמה	רכיבים ותצוגה בדרגת 40 °C-; סוללות אינן נטענות מתחת ל-0 °C.
גשם (506.3 / 506.6)	10 ס"מ לשעה, רוח 18 m/s, 30 דקות לכל פאה	תא אלקטרוניקה IP67, אטם מכסה רציף, שסתומי ניקוז בבארות.
לחות (507.3 / 507.6)	מחזורים של 10 ימים	תא אטום וציפוי קונפורמי.
ערפל מלח (509.3 / 509.7)	5% NaCl ב-35 °C, 48 שעות רטוב ו-48 שעות יבש	ציפוי המרה מתחת לצבע אבקה או CARC, ברגים מנירוסטה, ללא מגע בין מתכות שונות.
חול ואבק (510.3 / 510.7)	אבק 10.6 g/m³ ב-8.9 m/s; חול 1.1 g/m³ ב-18 עד 29 m/s	תא אטום; ציפוי וחלון תצוגה עמידים לשחיקה.
רעידות (514.4 / 514.8)	פרופיל רכב גלגלי או זחלי: לשאול איזה	לקבע רכיבים כבדים; ספוג במכסה מחזיק את הסוללות; לטעון סוללות אמיתיות בזמן הבדיקה.
הלם ונפילת שינוע (516.4 / 516.8)	26 נפילות מ-122 ס"מ	כ-10 מ"מ של עיוות מבוקר בפינות הפגוש; מחברים שקועים; שום דבר לא נוחת על מחבר.

השילוב שמפתיע אנשים הוא חום עם אטימות. ב-55 °C+ בשמש מלאה, קופסה אטומה אינה יכולה להשתמש באוויר מבחוץ, ולכן כל ההפסד חייב לצאת בהולכה ובהסעה טבעית. ב-120 W יציאה ובנצילות של 79 עד 83% המטען מאבד 25 עד 32 W, שדופן אלומיניום עם צלעות יכולה לפזר, אבל מודול AC-DC שמוריד 2 עד 3% לכל מעלה מעל 50 °C חייב להיבחר בהתאם. אם ההספק המלא חייב להיות זמין ב-55 °C+, או שהמודול גדל במידה אחת או שהקושחה מקטינה את זרם הטעינה ואומרת זאת.

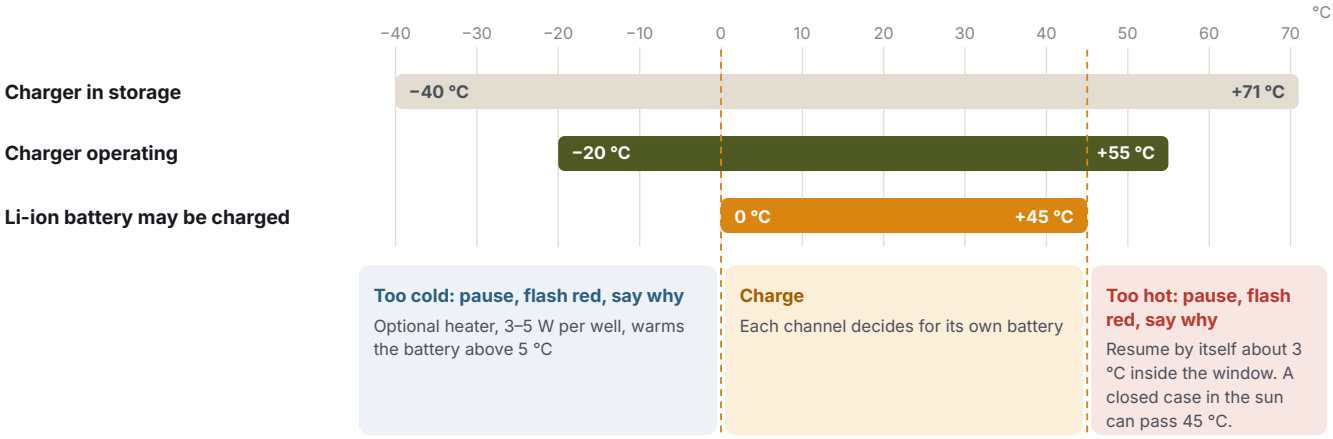
בלי מאוורר, בגלל ה-MTTF

MTTF נדרש של 40,000 שעות הוא תקציב של 25 כשלים למיליון שעות לכל המטען. הדרך המקובלת להראות זאת היא חיזוי לפי עומס הרכיבים לפי MIL-HDBK-217F Notice 2 בסביבה ניידת קרקעית, שבה לקבלים גורם סביבה גדול פי 20 מאשר בסביבה נוחה. למיסב מאוורר יש אורך חיים אופייני של כ-35,000 שעות ב-60 °C ו-22,000 ב-70 °C; בחיזוי הזה מאוורר אחד תורם כ-43 כשלים למיליון שעות, יותר מכל התקציב. זה מכריע: בלי מאוורר בפנים, רכיבים בהפחתת דירוג, ושיטת החיזוי, הסביבה והטמפרטורה מוסכמות עם הלקוח לפני שמישהו מריץ מספרים. הוכחת הערך בבדיקה אינה מעשית: תוכניות הדגמה סטנדרטיות דורשות עשרות אלפי שעות-יחידה ללא כשל.

לסוללה יש חלון טמפרטורה משלה

סוללת ליתיום-יון מותר לטעון רק בתוך חלון הטמפרטורה שהיצרן מתיר, בדרך כלל 0 עד 45 °C, בעוד שהמטען נדרש לעבוד בדרך כלל מ-10- או 20 °C- עד 55 °C+. טעינת תא קר מצפה אותו בליתיום והורסת אותו; טעינת תא חם מקצרת את חייו. לכן המטען חייב לדעת את הטמפרטורה של כל סוללה, מהתרמיסטור של הסוללה או מנתוני הסוללה החכמה, ולהחליט לכל ערוץ בנפרד.

איור 6. המטען צריך לעבוד בטווח רחב יותר מזה שבו מותר לטעון את הסוללה.



מקור: Typical Li-ion charging window from battery datasheets; charger ranges and behavior from the author's design.

ההתנהגות שאני מגדיר: מחוץ לחלון, הערוץ הזה מפסיק לטעון בעוד שהתצוגה, קריאת הנתונים והבדיקה העצמית ממשיכות לעבוד; הנורית שלו מהבהבת באדום והתצוגה אומרת למה, בשפת המפעיל; כשהסוללה חוזרת לחלון, עם היסטרזיס של כ-3 °C, הטעינה מתחדשת בלי שאיש יגע בה. אם לקוח צריך טעינה ב-10 °C-, רפידת חימום של 3 עד 5 W בכל באר מחממת קודם את הסוללה מעל 5 °C. ומכיוון שבארות של מארז סגור בשמש יכולות לעבור 45 °C, זמן טעינה מובטח תקף רק בטמפרטורה מתונה, וזה שייך להנחות הכתובות.

בטיחות, טמפרטורת מגע, ESD והנדסת אנוש

בטיחות. IEC 62368-1 החליף את IEC 60950-1 ו-UL בסוף 2020, ומהדורת 2023 שלו תיקנה את סעיפי טעינת הסוללות. קריאות מפורסמות של טבלת המרווחים שלו חלוקות (1.5 ו-3.0 מ"מ בדוח בדיקה אחד, 1.8 ו-3.6 מ"מ בקריאה של יצרן מוליכים למחצה), ולכן אני מתכנן לפי הערכים הגדולים: לפחות 1.8 מ"מ בסיסי ו-3.6 מ"מ מחוזק עד 2,000 מ', כפול 1.48 ב-5,000 מ'. מטען שמספק יותר מ-100 W הוא מעגל PS3 ודורש מארז חסין אש; מארז מתכת הוא כזה. דוח בדיקה CB שמכסה את נספח טעינת הסוללות הוא הדרך היעילה להראות את כל זה.

טמפרטורת מגע. MIL-HDBK-454 מתיר 49 °C על פקדים, 60 °C על חלקים אחרים שיד מגיעה אליהם ו-70 °C במקומות אחרים, בסביבה של 25 °C. ב-55 °C+ בסביבה, מתכת חשופה כבר עוברת 49 °C, ולכן הידיות, הכפתורים ופינות הפגוש עשויים פולימר או אלסטומר, ומשטחים חמים מסומנים. אותה הנחיה דורשת זרם זליגה של עד 3.5 mA, התנגדות הארקה של עד 0.1 Ω וקבלים שמתפרקים מתחת ל-30 V בתוך 2 s.

ESD. הדרישה המקובלת היא פריקת מגע של 4 kV במודל גוף האדם על כל פקד שמפעיל יכול לגעת בו ובמרכז כל משטח, ו-2 kV על פיני ממשק לא מחוברים. בדיקה גם ב-8 kV של CS118 ב-461G מוסיפה מרווח כמעט בלי עלות. המפעל צריך תוכנית בקרת ESD משלו, לפי ANSI/ESD S20.20 או IEC 61340-5-1.

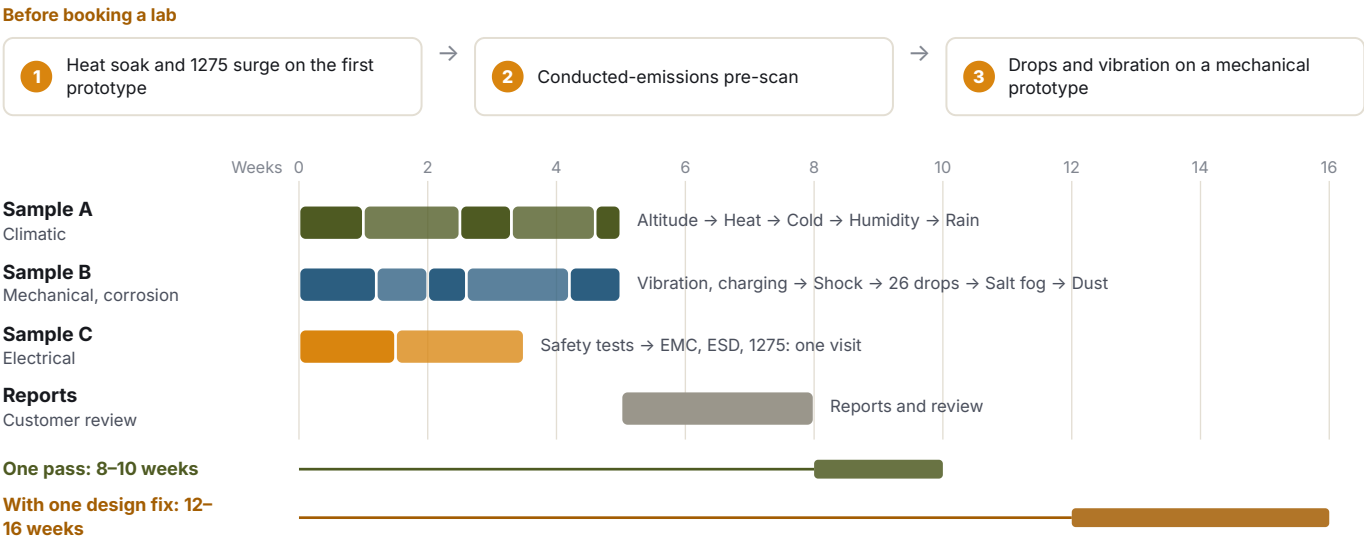
הנדסת אנוש. MIL-STD-1472 קובע לידית ליד אחת עם כפפה רוחב פנימי של 125 מ"מ, מרווח אצבעות של 50 מ"מ ועומק של 100 מ"מ (111, 48 ו-75 מ"מ ביד חשופה; 135, 75 ו-150 מ"מ בכפפות אגרוף), מומנט כפתור של 115 עד 680 mN·m עם עצירות במרווח של 15 עד 40°, ואותיות בגובה 2.5 עד 5 מ"מ במרחק צפייה של 710 מ"מ. כל זה מאומת בבחינה ובהדגמה עם כפפות, בלי עלות מעבדה.

הסמכה: שלוש יחידות, שתי שרשראות מקבילות, ביקור EMC אחד

שלוש יחידות הן מספר נוח להסמכה, שתיים המינימום. יחידה A עוברת את שרשרת האקלים: לחץ נמוך, אחסון והפעלה בחום, קור, קרינת שמש אם נבדקת, לחות וגשם. יחידה B עוברת את השרשרת המכנית והקורוזיה: רעידות תוך טעינה, שינוע, הלם תפקודי וטיפול על השולחן, 26 הנפילות, ערפל מלח ואבק. יחידה C עוברת את השרשרת החשמלית: בדיקות טיפוס של בטיחות, MIL-STD-461, ESD ו-

MIL-STD-1275. במקביל, שתי השרשראות הראשונות לוקחות ארבעה עד חמישה שבועות; EMC וחולפי הספק לוקחים שבוע וחצי עד שבועיים; דוחות וסקירת הלקוח מוסיפים שניים עד שלושה. סך הכול 8 עד 10 שבועות אם הכול עובר, ו-12 עד 16 שבועות עם תיקון תכנון אחד.

איור 7. תוכנית הסמכה לשלוש יחידות: 8–10 שבועות אם הכול עובר, 12–16 עם תיקון תכנון אחד.



מקור: The author's plan; lab rates from a Jiangsu provincial institute (2025), Taiwan's standards bureau and two US labs.

הסדר חשוב יותר מהמעבדה. לפני שמזמינים משהו, להריץ את השריית החום ואת נחשול 1275 על האב-טיפוס הראשון, אחר כך סריקת EMC מקדימה, ואז את הנפילות והרעידות על אב-טיפוס מכני. אז כמה חיסכונות מגיעים כמעט בחינם: הפעלה חמה וקרה בהזמנת תא אחת; סוללות שנטענות בזמן הרעידות, מה שגם מוכיח פעולה בתנועה; נתוני עליית טמפרטורה לדוח הבטיחות שנאספים בזמן השרייה ב-55+ °C; ESD ו-1275 באותו ביקור כמו EMC; תוכנית בדיקות אחת שמכסה את 810, 461 ו-1275, מאושרת פעם אחת על ידי הלקוח, שאז נוכח רק ב-EMC, בנפילות וברעידות. לחץ נמוך, קרינת שמש ופולס EMP מוקרן יכולים לעיתים קרובות להיות מוצגים בניתוח במקום בבדיקה.

אף מעבדה אינה מפרסמת מחירים לבדיקות צבאיות, ולכן העלויות נבנות מטבלאות תעריפים ציבוריות. מכון בדיקות מחוזי בג'יאנגסו מפרסם תאי אקלים ב-4.50 עד 37 דולר לשעה ותא EMC ב-119 עד 149 דולר לשעה; לשכת התקנים של טאיוואן מפרסמת רעידות בכ-121 דולר, בדיקת נפילה בכ-73 דולר, ESD בכ-364 דולר וסט EMC מלא בכ-2,610 דולר; בארצות הברית, מעבדה אחת מפרסמת בדיקות MIL-STD-461 מ-3,999 דולר ואחרת מחייבת שעות הנדסה ב-157 עד 377 דולר לשעה. לפי תעריפים אלה, סט מלא (461, 1275, ESD, עשר שיטות 810 ודוח בטיחות) עולה בערך 18,000 עד 45,000 דולר ביבשת סין, או 22,000 עד 54,000 דולר עם תוספת של 20% לבדיקה חוזרת, ואני מעריך 70,000 עד 115,000 דולר בארצות הברית או באירופה. המעבדות הציבוריות של טאיוואן אינן יקרות יותר מאלו של היבשת לפי התעריפים המפורסמים. האם קונה מקבל את הדוחות של מעבדה מסוימת היא שאלה מסחרית שעדיף לסגור לפני ההזמנה הראשונה.

צריכים מטען שנבנה לפי רשימת התיוג הזאת?

רשימת התיוג הזאת נולדה מתכנון של מטען כזה: מטען אטום ללא מאוורר של ארבע עמדות עם כניסות AC ו-24 V מהרכב, שנבנה כפלטפורמה שגדלה משתיים לשמונה עמדות. איך הוא בנוי, איך משלימים את החסר במפרט ואיך הוא מגיע ממפרט לדגמים הנדסיים ב-16 שבועות מופיע במטעני סוללות מוקשחים מרובי עמדות בהתאמה אישית ב-2026, וכמה עולים מטענים כאלה מופיע במחירי מטעני סוללות צבאיים מרובי עמדות ב-2026.

אם יש לכם סוללה שצריכה מטען מוקשח, שלחו את הדגם או גיליון הנתונים שלה, מספר העמדות, הספק הכניסה, התקנים הנדרשים והכמות אל i@tanshuai.com. אני משיב בשאלות שמכריעות את התכנון.

מקורות

1. MIL-STD-1275E, Characteristics of 28 Volt DC Input Power to Utilization Equipment in Military Vehicles (2013). https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1100-1299/MIL-STD-1275E_45886/
2. MIL-STD-1275B (1997). https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1100-1299/MIL_STD_1275B_777/
3. Transient Specialists, PG-1275F transient generator user manual (revision F waveforms). https://transientspecialists.com/cdn/shop/files/Users_manual_PG-1275F_rev2.pdf
4. Texas Instruments, TIDUDG1, MIL-STD-1275 protection reference design guide. https://ti.com/lit/pdf/tidudg1
5. MIL-STD-461G, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics (2015). https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461G_53571/
6. MIL-STD-461C (1986). https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461C_19034/
7. In Compliance Magazine, MIL-STD-461H: a review. https://incompliancemag.com/mil-std-461h-a-review/
8. MIL-STD-810E, Environmental Test Methods and Engineering Guidelines (1989), and 810H (2019) method equivalents. https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0800-0899/MIL-STD-810E_13775/
9. MIL-STD-1472F, Human Engineering. https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1400-1499/MIL-STD-1472F_208/
10. MIL-STD-1686C, Electrostatic Discharge Control Program. https://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1600-1699/MIL-STD-1686C_5522/
11. MIL-HDBK-217F Notice 2, Reliability Prediction of Electronic Equipment. https://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0200-0299/MIL-HDBK-217F_NOTICE-2_14590/
12. MIL-HDBK-454, General Guidelines for Electronic Equipment (listing). https://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0300-0499/
13. Texas Instruments, SLUP419, insulation requirements of IEC 62368-1. https://www.ti.com/lit/pdf/slup419
14. Genorma, EN 50091-1-1:1996 status. https://genorma.com/en/standards/en-50091-1-1-1996
15. Battery University, BU-410: Charging at high and low temperatures. https://batteryuniversity.com/article/bu-410-charging-at-high-and-low-temperatures
16. Jiangsu Administration for Market Regulation, product testing fee schedule (June 2025). https://scjgj.jiangsu.gov.cn/attach/0/7298087b18cf41529a3e43ac75aab677.pdf
17. Bureau of Standards, Metrology and Inspection (Taiwan), test fee table. https://www.bsmi.gov.tw/wSite/public/Attachment/f1784081743483.pdf
18. Sunfire Testing, MIL-STD-461 testing. https://www.sunfiretesting.com/military_device_mil-std-461/
19. Hi-Test Laboratories, 2023 rates. https://hitestlabs.com/s/2023-Rates_Update.pdf

על המחבר

תאן שואי הוא טכנולוג ומייסד עם יותר מעשרים שנות עבודה בתחומי שבבים, חומרה ותוכנת מערכת, ו-20 פטנטים רשומים. עבודתו לקחה אותו דרך עמק הסיליקון, ניו יורק, שיקגו, טאיוואן, אזור המפרץ הגדול (שנג'ן והונג קונג), וייטנאם ומלזיה, עם התמקדות ארוכה בייצור מתקדם ושרשראות אספקה. כיום הוא עובד כחוקר ומפתח בינה מלאכותית, ובונה אלקטרוניקה מוקשחת בהתאמה אישית עם שותפי ייצור בשנג'ן.

פרויקטים של מטענים מוקשחים ושיחה טכנית: i@tanshuai.com.