ملاحظة هندسية

معايير MIL-STD-1275 و810 و461 لشواحن البطاريات: قائمة تحقق تصميمية لشواحن المركبات المقوّاة بجهد 24 فولت

قد تستدعي مواصفات شاحن مقوّى نحو 1,400 صفحة من المعايير العسكرية، لكن أقل من 150 منها تغيّر التصميم. تربط قائمة التحقق هذه كل متطلب بالقرار التصميمي الذي يفرضه والاختبار الذي يثبته، مع الحسابات وراء الصعب منها.

تان شواي · i@tanshuai.com · tanshuai.com

23 نوفمبر 2026

الملخص

شاحن البطاريات المقوّى بجهد 24 فولت للمركبات والميدان هو في جوهره شاحن تبديلي عادي تحيط به أربع مشكلات صعبة. يضع MIL-STD-1275 على مدخله ارتفاعًا مفاجئًا إلى 100 فولت من مصدر بمقاومة 0.5 أوم، لا يستطيع أي صمام تثبيت امتصاصه، فتحتاج الواجهة الأمامية إلى مانع ارتفاعات تسلسلي مبني من قطع من فئة 150 فولت. ويجعل MIL-STD-461 الانبعاثات، لا المناعة، الجانب الصعب: يحتاج كل مدخل قدرة إلى مرشح ثنائي المرحلة عند جدار الموصل، ويجب أن تُحكم العلبة كهربائيًا كما تُحكم ميكانيكيًا. ويطلب MIL-STD-810 صندوقًا محكمًا يتخلص من الحرارة عند +55 °م تحت الشمس، ويصمد أمام 26 سقطة، ويتنفس على الارتفاعات دون دخول الماء. ومتوسط زمن حتى العطل قدره 40,000 ساعة لا يترك مكانًا لمروحة. وكل ما عدا ذلك، من الرطوبة ورذاذ الملح إلى التفريغ الكهروستاتيكي وحرارة اللمس وتقرير الموثوقية، يتبع الممارسة الجيدة ويُتحقق منه بالاختبار أو بالوثائق. ولا تزال معظم المواصفات تذكر إصدارات من الثمانينيات والتسعينيات؛ والتصميم وفق الإصدارات الحالية مع تسليم جدول مقابلة لا يكلّف شيئًا ويتجنب إعادة العمل. ويحتاج تأهيل موثوق إلى ثلاث عينات ومن 8 إلى 16 أسبوعًا، ووفق أسعار المختبرات المنشورة في البر الصيني يكلّف نحو 20,000 إلى 55,000 دولار.

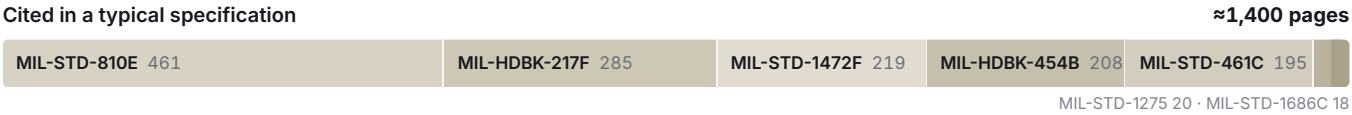
لماذا كتبت هذا

تصل طلبات الشواحن المقوّاة على شكل صفحة متطلبات وقائمة معايير: MIL-STD-810 للبيئة، وMIL-STD-461 للتوافق الكهرومغناطيسي، وMIL-STD-1275 لقدرة المركبة، ومعيار سلامة، ورقم لمتوسط الزمن حتى العطل، وبعض قواعد العوامل البشرية. والوثائق وراء تلك القائمة تبلغ نحو 1,400 صفحة. إن قُرئت حرفيًا حوّلت الشاحن إلى مشروع بحثي. وإن تُصفّحت سريعًا أخفت البنود الثلاثة أو الأربعة التي تحدد المخطط الكتلي والعلبة والسعر.

عملت مؤخرًا على مواصفات كهذه سطرًا بسطر، وقرأت المعايير نفسها لا ملخصاتها، وصنّفت كل بند بحسب ما يفعله بالتصميم. هذه الورقة هي النتيجة، مكتوبة قائمةَ تحقق للمهندسين الذين عليهم تحويل مواصفات كهذه إلى عتاد، وللمشترين الذين يريدون معرفة ما يطلبونه. كل الأرقام أدناه صحيحة حتى نوفمبر 2026، والمبالغ بالدولار الأمريكي.

النتائج في لمحة

الشكل 1. من نحو 1,400 صفحة من المعايير، أقل من 150 تحدد التصميم. والباقي ممارسة جيدة وأوراق.



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

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

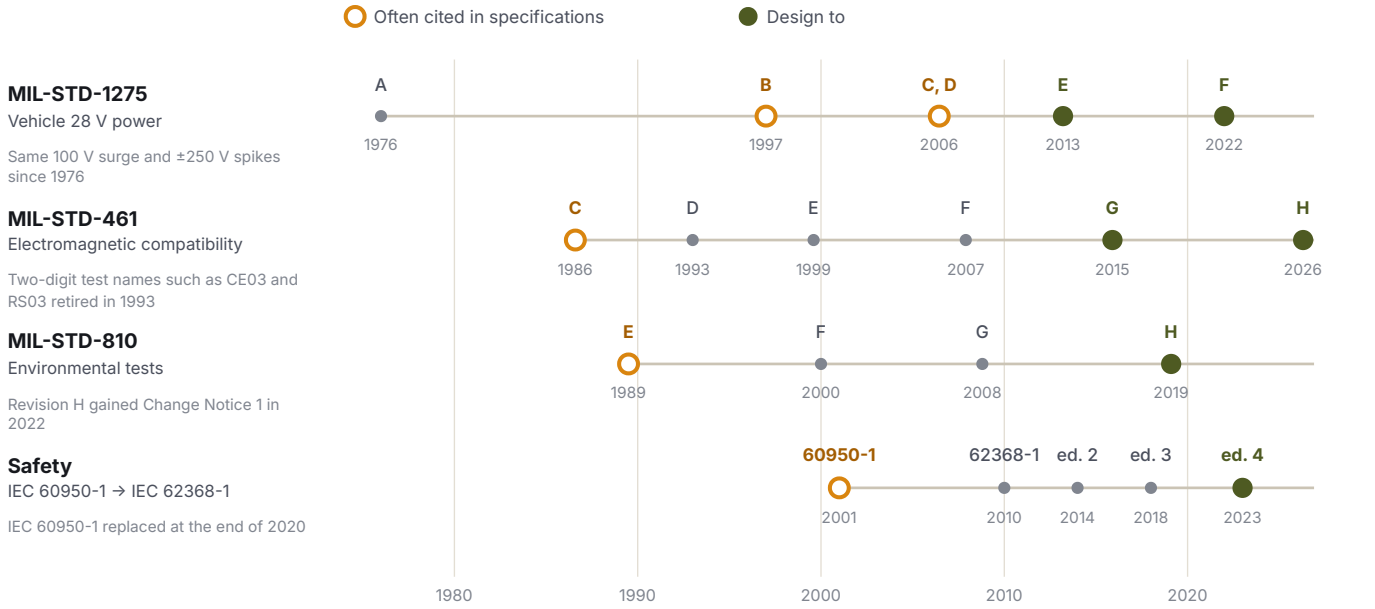
قائمة التحقق نفسها، من المتطلب إلى القرار التصميمي الذي يفرضه وطريقة إثباته:

المتطلب	ما يفعله بالتصميم	كيف يُتحقق منه
MIL-STD-1275، قدرة مركبة 24 فولت	مانع ارتفاعات تسلسلي بترانزستور MOSFET وقطع من فئة 150 فولت، وصمام TVS للنبضات، وحجب لعكس الأقطاب دون هبوط جهد صمام ثنائي؛ شحن من 16 إلى 33 فولت، وتوقف واستئناف تلقائي أثناء تشغيل المحرك	اختبار بمولّد عوابر مبني للإصدار المذكور
MIL-STD-461، التداخل الكهرومغناطيسي	مرشح LC ثنائي المرحلة على كل مدخل قدرة، مثبت عند جدار الموصل؛ حشيات موصلة على كل وصلة؛ تخطيط ترددات المحوّلات؛ مسوح أولية على النموذج الأول	اختبار في الغرفة، بعد مسوح داخلية أولية
MIL-STD-810، البيئة	حجرة إلكترونيات محكمة بلا مروحة تخرج حرارتها عبر الزعانف؛ فتحة ePTFE للارتفاعات؛ مصدات زوايا وموصلات غائرة للسقطات؛ قطع مصنفة لتخزين من -40 إلى +71 °م	عينة عبر السلسلة المناخية، وعينة عبر السلسلة الميكانيكية
حرارة شحن الليثيوم أيون	قياس كل بطارية والشحن داخل نافذتها فقط، عادةً من 0 إلى 45 °م؛ توقف، وبيان السبب، واستئناف تلقائي؛ تسخين مسبق اختياري	اختبار عند أطراف الحرارة
السلامة، IEC 62368-1	خلوصات مصممة على القراءة الأكبر للجداول؛ غلاف معدني مقاوم للحريق فوق 100 واط؛ مقابض ومفاتيح من البوليمر لحرارة اللمس	تقرير اختبار CB وفحص
التفريغ الكهروستاتيكي	تفريغ تلامسي 4 كيلوفولت على كل ما تصل إليه اليد، و8 كيلوفولت هامشًا	اختبار، نحو نصف يوم
متوسط زمن حتى العطل 40,000 ساعة	ميزانية 25 عطلًا لكل مليون ساعة للشاحن كله: لا مروحة، وقطع مخفّضة الإجهاد	توقع وفق MIL-HDBK-217F، مع الاتفاق على الطريقة مسبقًا
العوامل البشرية، MIL-STD-1472	مقبض بحجم يناسب القفازات، ودرجات مفتاح متباعدة من 15 إلى 40°، وحروف مقروءة على مسافة ذراع	فحص وعرض عملي بالقفازات

الخطوة صفر: صمّم وفق الإصدارات الحالية

غالبًا ما تكون مواصفات المعدات المقوّاة أقدم مما تبدو. من الشائع أن تجد MIL-STD-810E (1989) وMIL-STD-461C (1986) بجانب معايير سلامة أُلغيت منذ ذلك الحين، لأن مكاتب المشتريات تنسخ قوالبها إلى الأمام. وقد أُحيلت أسماء اختبارات 461C المكونة من حرفين ورقمين، مثل CE03 وRS03، إلى التقاعد في 1993. ووصل MIL-STD-810 الآن إلى الإصدار H (يناير 2019، مع إشعار التغيير 1 في 2022)؛ وMIL-STD-461 إلى G (ديسمبر 2015)، ثم H في أبريل 2026؛ وMIL-STD-1275 إلى E (مارس 2013) وF (2022). وحلّ IEC 62368-1 محل IEC 60950-1 في نهاية 2020 وهو في طبعته الرابعة (2023). أما EN 50091-1، الذي لا يزال يظهر في مواصفات الشواحن، فهو معيار لمزودات الطاقة غير المنقطعة أُلغي في 2005.

الشكل 2. لا تزال المواصفات تذكر إصدارات من الثمانينيات والتسعينيات. صمّم وفق الحالية وأبلغ عن النتائج مقابل كليهما.



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

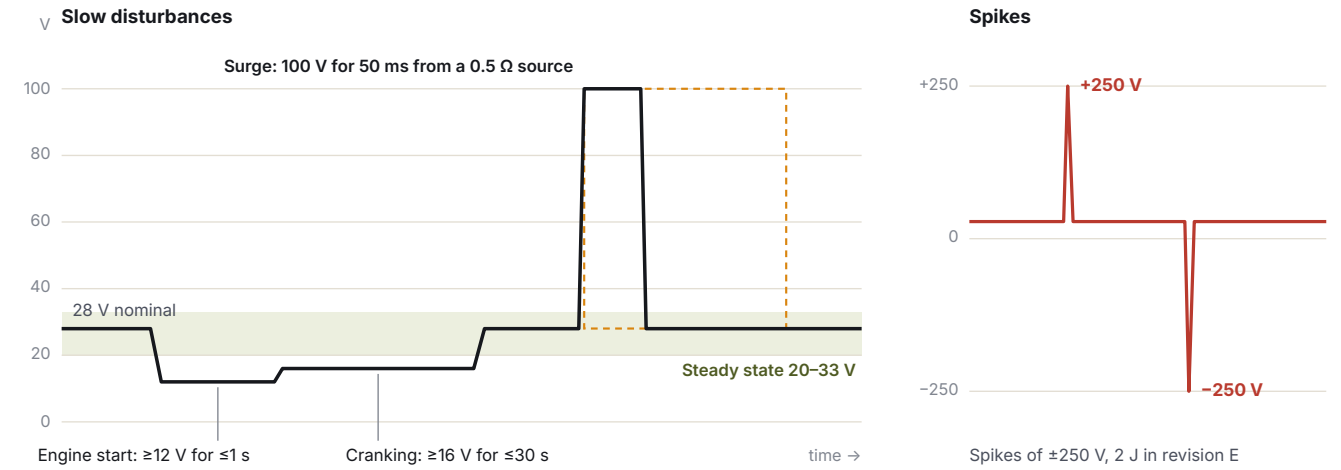
تكاد شدّات MIL-STD-810 الافتراضية لم تتغير بين 1989 و2019، والإجهادان اللذان يشكلان الواجهة الأمامية لـMIL-STD-1275 هما نفسهما منذ 1976، لذا فإن التصميم وفق الإصدارات الحالية لا يكلّف شيئًا. وما يشتريه هو تصميم سيظل ناجحًا إن حدّث العميل المواصفات، ومختبرات لا تزال تجري الطرق. قاعدتي هي التصميم وفق 810H و461G أو H و1275E أو F و62368-1:2023 IEC، والإبلاغ عن النتائج مقابل أرقام الطرق التي ذكرها العميل، وتسليم جدول من صفحة واحدة يقابل القديم بالجديد. وحيث تبقى طريقة قديمة في مختبرات قليلة فقط، مثل انبعاثات CE03 الموصلة في 461C، اتفق على المكافئ الحالي قبل حجز الغرفة.

سؤالان يجب أن يكونا في البريد الأول، لأن إجابتيهما تغيّران التكلفة: أي إصدار من MIL-STD-1275 ينطبق، وبأي معيار نجاح، وما المقصود بـ"الحماية من EMP". حقن الكابلات بموجات جيبية مخمدة (CS116، أو CS10 وCS11 في 461C) يستغرق نحو يوم في الغرفة. أما اختبار النبضة المشعة (RS105، أو RS05 في 461C) فميزانية مختلفة، ولا يطبقه 461H إلا على المعدات التي تحمل متطلب EMP صريحًا.

MIL-STD-1275: مدخل 24 فولت يحدد المخطط الكتلي

يحتوي كل إصدار من MIL-STD-1275، من A في 1976 إلى E في 2013، على الإجهادين نفسيهما اللذين يحددان التصميم: ارتفاع مفاجئ إلى +100 فولت لمدة 50 ملي ثانية من مصدر بمقاومة 0.5 أوم، ونبضات ±250 فولت. وما تغيّر بين الإصدارات هو المحاسبة: أوضاع التشغيل، وطاقة النبضات (15 ملي جول في B وD، و2 جول في E)، وأرضية انخفاض الجهد عند تشغيل المحرك (لا أقل من 6 فولت لمدة ثانية في الإصدارات الأقدم، و12 فولت في E، ثم لا أقل من 16 فولت لمدة تصل إلى 30 ثانية أثناء التدوير)، ونافذة الحالة المستقرة، من 20 إلى 33 فولت في E. أما الإصدار F، بحسب وثائق مولّدات الاختبار المبنية له، فيمدّ الارتفاع المفاجئ إلى نحو 500 ملي ثانية من مصدر أصلب بكثير ويخفض طاقة النبضات إلى 250 ملي جول.

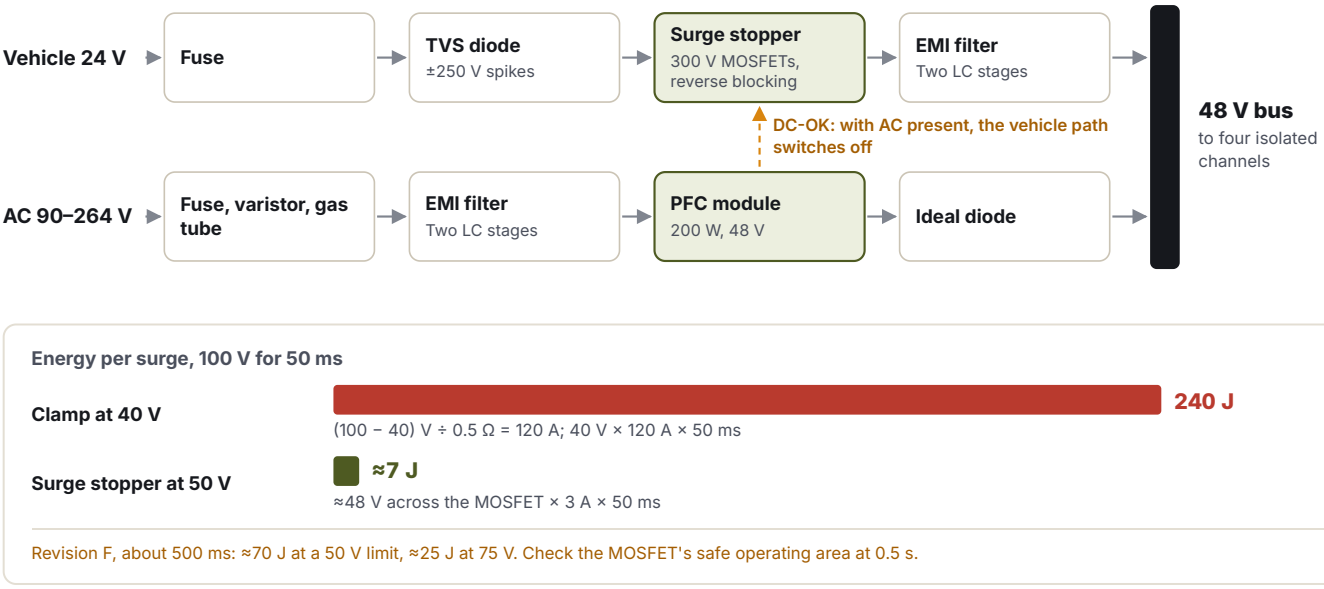
الشكل 3. غلاف MIL-STD-1275E على ناقل مركبة 28 فولت.



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

الارتفاع المفاجئ هو ما يستبعد الجواب البديهي. ثبّته عند 40 فولت بصمام TVS أو مقاوم متغير، فيدفع المصدر (100 - 40) / 0.5 = 120 أمبير في المشبك لمدة 50 مللي ثانية، ما يضع 40 فولت × 120 أمبير × 0.05 ثانية = 240 جول في قطعة واحدة. لا مشبك بحجم معقول يتحمل ذلك مرارًا. أما مانع الارتفاعات التسلسلي فيؤدي المهمة بطريقة مختلفة: ترانزستور MOSFET في مسار التغذية يحدّ خرجه عند جهد محدد ويُسقط الباقي، فلا يبدد إلا الفرق بين الارتفاع وذلك الجهد، مضروبًا في تيار الحمل. لحمل 150 واط مثبت عند 50 فولت، يكون ذلك نحو 48 فولت × 3 أمبير، أي قرابة 150 واط لمدة 50 مللي ثانية: نحو 7 جول، أقل بثلاثين مرة من المشبك.

الشكل 4. على المشبك أن يمتص 240 جول؛ ومانع الارتفاعات التسلسلي يبدد نحو 7 جول.



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

وبقية الواجهة الأمامية تنبع من ذلك:

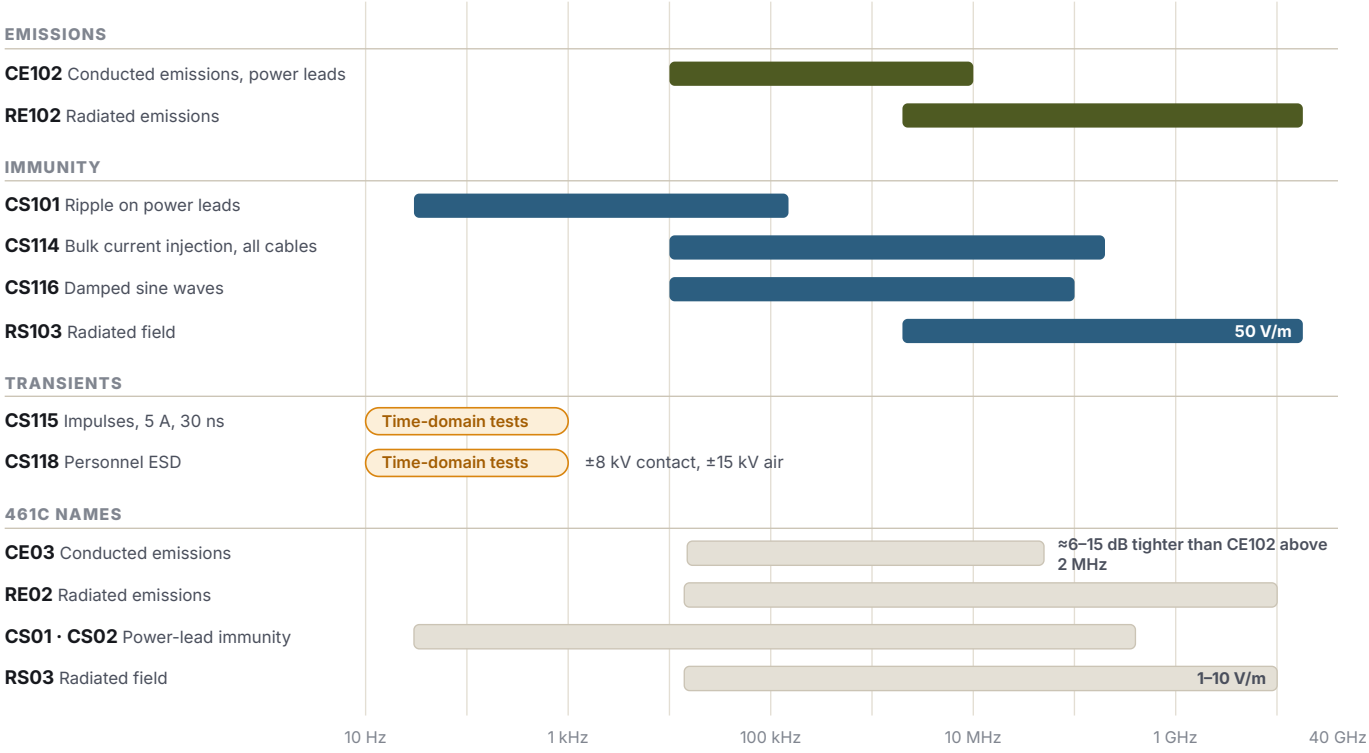
- **قطع مصنفة لـ150 فولت أو أكثر** في مسار الارتفاع. أستخدم ترانزستور MOSFET بجهد 300 فولت، ما يمنح هامشًا أمام النبضات.
- **الإصدار F يغيّر الأرقام.** عند 500 مللي ثانية، سيضع حد 50 فولت نفسه نحو 70 جول في الترانزستور. ورفع الحد إلى نحو 75 فولت، وهو ما تقبله وحدات DC-DC ذات مدخل 18–75 فولت باستمرار، يخفض التيار إلى 2 أمبير والجهد على الترانزستور إلى نحو 24 فولت، أي نحو 25 جول إجمالًا؛ وتحقق في الحالتين من منطقة التشغيل الآمنة للترانزستور عند 0.5 ثانية.
- **صمام TVS لا يزال يلتقط النبضات.** عند 2 جول (أو 250 مللي جول في F) فهذه مهمة يستطيعها.

- **عكس الأقطاب يُحجب بترانزستوري MOSFET متقابلين** تحت متحكم صمام ثنائي مثالي، لا بصمام ثنائي تسلسلي يهدر عدة واطات.
- **تشغيل المحرك وضع تشغيل، لا عطل.** واصل الشحن حتى 16 فولت حيث أمكن. وتحت ذلك، توقف مؤقتًا، وأبقِ الشاشة والسجلات حية، واستأنف دون أن يلمس أحد الوحدة. واذكر ذلك في الرد على المواصفات.
- **الوحدات ذات مدخل 18–75 فولت تساعد.** فهي تتحمل عادةً 100 فولت لمدة ثانية، فتكفي أمامها مرحلة واحدة من الحماية.
- **التموج مهم أيضًا.** يسمح 1275D بتموج قمته 7 فولت حتى 200 كيلوهرتز، وعلى مرشح المدخل أن يتعامل معه دون رنين.

MIL-STD-461: الانبعاثات هي الجانب الصعب

لمعدات الجيش الأرضية، يطبق MIL-STD-461G ثمانية اختبارات: CE102 للانبعاثات الموصلة على أسلاك القدرة (10 كيلوهرتز إلى 10 ميغاهرتز)، وRE102 للانبعاثات المشعة (2 ميغاهرتز إلى 18 غيغاهرتز للمعدات الأرضية)، وCS101 للتموج بالترددات الصوتية على أسلاك القدرة (30 هرتز إلى 150 كيلوهرتز)، وCS114 لحقن التيار الكلي على كل كابل (10 كيلوهرتز إلى 200 ميغاهرتز)، وCS115 للنبضات السريعة، وCS116 للموجات الجيبية المخمدة (10 كيلوهرتز إلى 100 ميغاهرتز)، وCS118 للتفريغ الكهروستاتيكي من الأشخاص (±8 كيلوفولت تلامسي، ±15 كيلوفولت هوائي)، وRS103 للمناعة المشعة، 50 فولت/متر من 2 ميغاهرتز إلى 18 غيغاهرتز. ويحتفظ إصدار 461H في أبريل 2026 بحدود معدات الجيش الأرضية ويشدد الإجراءات.

الشكل 5. اختبارات MIL-STD-461G لمعدات الجيش الأرضية، واختبارات 461C التي لا تزال المواصفات القديمة تسميها.



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

شاحن البطاريات حالة صعبة في الانبعاثات. فهو يحتوي عدة محوّلات تبديلية: مصحح معامل القدرة، ومحوّل معزول لكل قناة، ومرحلة شحن رافعة وخافضة لكل قناة. أربع قنوات تعمل بترددات مختلفة قليلًا تنتج نواتج تداخل، وأسلاك البطاريات وكابلات المركبة هوائيات جيدة. والمناعة عادةً الجانب الأسهل، وإن كانت 50 فولت/متر في RS103 تستحق الاحترام. والمواصفات الأقدم تزيد الميل: حد CE03 في 461C فوق 2 ميغاهرتز أشد بنحو 6 ديسيبل من CE102 على مدخل 28 فولت وبنحو 15 ديسيبل على مدخل 230 فولت، ويمتد حتى 50 ميغاهرتز بدل 10، بينما متطلب المناعة المشعة فيه 1 إلى 10 فولت/متر فقط.

ما ينجح:

- **مرشح LC ثنائي المرحلة على كل مدخل قدرة،** مبني على جدار الموصل كي لا تتشارك الأسلاك المرشحة وغير المرشحة حجرة واحدة. بتقديري، يحتاج الشاحن إلى توهين من 40 إلى 60 ديسيبل عند ترددات التبديل ومن 50 إلى 70 ديسيبل من 2 إلى 50 ميغاهرتز لتلبية CE03 بهامش.
- **حجرة الإلكترونيات المحكمة تعمل درعًا أيضًا.** الحشيات الموصلة والربط المتصل على كل وصلة تحوّل العلبة إلى قفص فاراداي دون تكلفة إضافية.

- **خطط ترددات المحوّلات.** زامن محوّلات القنوات أو انشر طيفها، وأبطئ حواف التبديل حيث تسمح الكفاءة.
- **اخنق أسلاك البطارية.** خانق للنمط المشترك عند كل مخرج يمنع كابلات البطارية من الإشعاع.
- **قِس مبكرًا.** مسح أولي للانبعاثات الموصلة على النموذج الأول يكلّف يومًا مع LISN ومحلل طيف؛ واكتشاف مشكلة في الغرفة الرسمية يكلّف أسابيع.

MIL-STD-810: صندوق محكم يتخلص من الحرارة ويتنفس ويصمد أمام السقطات

البيئات العشر التي تسميها مواصفات الشواحن عادةً تقابل واحدًا بواحد طرق 810E: 500.3 و501.3 و502.3 و505.3 و506.3 و507.3 و509.3 و510.3 و514.4 و516.4، التي أصبحت 500.6 و501.7 و502.7 و505.7 و506.6 و507.6 و509.7 و510.7 و514.8 و516.8 في 810H. وتكاد شدّاتها الافتراضية لم تتغير في ثلاثين عامًا. ليست أي منها صعبة وحدها؛ لكنها معًا تصف صندوقًا محكمًا، وللصندوق المحكم ثلاث مشكلات: الحرارة والضغط والصدمات.

الطريقة (810E / 810H)	الشدة الافتراضية	الاستجابة التصميمية
الضغط المنخفض (500.3 / 500.6)	4,570 م، 57 كيلوباسكال	يرى الصندوق المحكم نحو 44 كيلوباسكال عبر جدرانه؛ وعلى غطاء 340 × 240 مم يعني ذلك نحو 3.6 كيلونيوتن. فتحة ePTFE تعادل الضغط وتمنع الماء.
الحرارة العالية (501.3 / 501.7)	دورة حارة جافة: 32 إلى 49 °م في المحيط، و33 إلى 71 °م داخل المركبات والأغلفة	حمل حراري طبيعي بلا مروحة عبر جدار مزعنف؛ كل جزء ساخن يوصل حرارته إليه؛ ويخفض البرنامج الثابت قدرة الشحن فوق 50 °م.
الإشعاع الشمسي (505.3 / 505.7)	1,120 واط/م²، دورات 24 ساعة	اللون الأفتح يقلل الكسب الشمسي؛ اتفق على ما إذا كان التحليل يمكن أن يحل محل الاختبار.
الحرارة المنخفضة (502.3 / 502.7)	البرودة الأساسية حتى نحو -32 °م؛ والفئات الأبرد بالاتفاق	قطع وشاشة مصنفة لـ-40 °م؛ ولا تُشحن البطاريات تحت 0 °م (انظر أدناه).
المطر (506.3 / 506.6)	10 سم/ساعة، رياح 18 م/ث، 30 دقيقة لكل وجه	حجرة إلكترونيات IP67، وحشية غطاء متصلة، وصمامات تصريف في تجاويف البطاريات.
الرطوبة (507.3 / 507.6)	دورات 10 أيام	حجرة محكمة وطلاء مطابق.
رذاذ الملح (509.3 / 509.7)	5% كلوريد الصوديوم عند 35 °م، 48 ساعة رطبة و48 جافة	طلاء تحويلي تحت طلاء مسحوق أو CARC، ومثبتات من الفولاذ المقاوم للصدأ، ولا تلامس بين معادن مختلفة.
الرمل والغبار (510.3 / 510.7)	غبار 10.6 غ/م³ عند 8.9 م/ث؛ رمل 1.1 غ/م³ عند 18 إلى 29 م/ث	حجرة محكمة؛ وطلاء ونافذة شاشة مقاومان للتآكل.
الاهتزاز (514.4 / 514.8)	ملف مركبة بعجلات أو بجنازير: اسأل أيهما	ثبّت القطع الثقيلة؛ وسادة إسفنج في الغطاء تثبت البطاريات؛ اشحن بطاريات حقيقية أثناء الاختبار لإثبات التشغيل أثناء الحركة.
الصدمة والسقوط أثناء النقل (516.4 / 516.8)	26 سقطة من 122 سم	نحو 10 مم من التشوه المتحكم به في مصدات الزوايا؛ موصلات غائرة؛ لا شيء يسقط على موصل.

المزيج الذي يفاجئ الناس هو الحرارة مع الإحكام. عند +55 °م تحت الشمس المباشرة، لا يستطيع الصندوق المحكم استخدام الهواء الخارجي، فعلى كل الفقد أن يخرج بالتوصيل والحمل الطبيعي. عند 120 واط من الخرج، يفقد شاحن بكفاءة 79 إلى 83% من 25 إلى 32 واط، وهو ما يستطيع جدار ألومنيوم مزعنف التخلص منه، لكن وحدة AC-DC تخفض قدرتها 2 إلى 3% لكل درجة فوق 50 °م يجب أن تُختار بحجم يناسب ذلك. وإن وجب توفر الخرج الكامل عند +55 °م، فإما أن تكبر الوحدة مقاسًا أو يقلّص البرنامج الثابت تيار الشحن ويذكر ذلك.

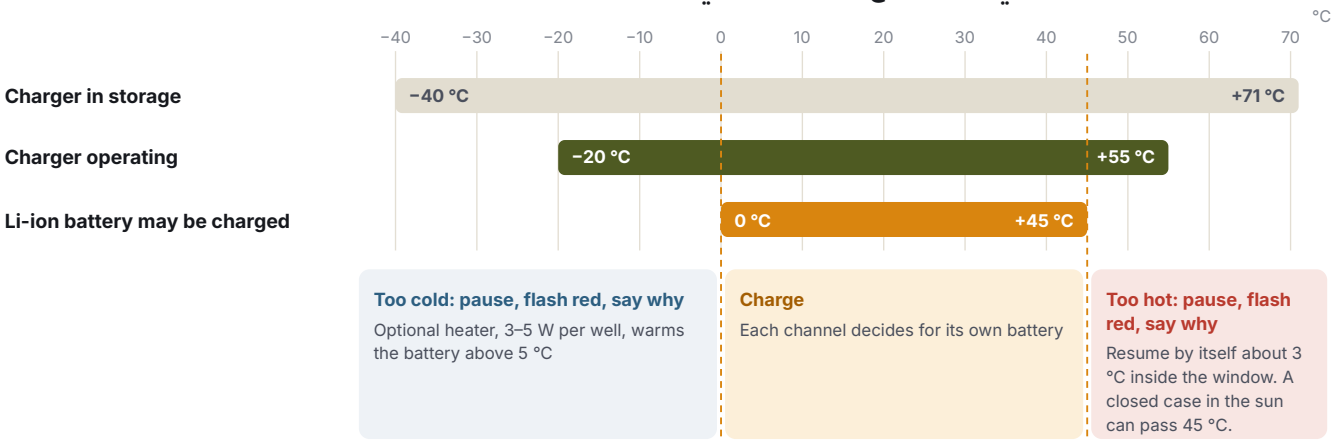
لا مروحة، بسبب متوسط الزمن حتى العطل

متوسط زمن حتى العطل مطلوب قدره 40,000 ساعة يعني ميزانية 25 عطلًا لكل مليون ساعة للشاحن كله. والطريقة المعتادة لإثباته هي توقع إجهاد القطع وفق MIL-HDBK-217F الإشعار 2 في بيئة المركبات الأرضية المتحركة، حيث تحمل المكثفات عامل بيئة أكبر بعشرين مرة من البيئة الحميدة. يبلغ العمر المميز لمحمل المروحة نحو 35,000 ساعة عند 60 °م و22,000 عند 70 °م؛ وفي ذلك التوقع تساهم مروحة واحدة بنحو 43 عطلًا لكل مليون ساعة، أكثر من الميزانية كلها. وهذا يحسم الأمر: لا مروحة في الداخل، وقطع مخفّضة الإجهاد، والاتفاق مع العميل على طريقة التوقع والبيئة والحرارة قبل أن يحسب أحد الأرقام. أما إثبات الرقم بالاختبار فغير عملي: خطط الإثبات القياسية تحتاج إلى عشرات آلاف ساعات تشغيل للوحدات دون عطل.

للبطارية نافذة حرارتها الخاصة

لا يجوز شحن بطارية الليثيوم أيون إلا داخل نافذة الحرارة التي يسمح بها صانعها، عادةً من 0 إلى 45 °م، بينما يُطلب من الشاحن عادةً أن يعمل من -10 أو -20 °م حتى +55 °م. شحن خلية باردة يرسّب الليثيوم ويدمرها؛ وشحن خلية ساخنة يقصّر عمرها. لذا يجب أن يعرف الشاحن حرارة كل بطارية، من مقاوم الحرارة في الحزمة أو من بيانات البطارية الذكية، وأن يقرر لكل قناة على حدة.

الشكل 6. على الشاحن أن يعمل في نطاق أوسع من النطاق الذي يجوز فيه شحن البطارية.



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

السلوك الذي أحدده: خارج النافذة تتوقف تلك القناة عن الشحن بينما تواصل الشاشة وقراءة البيانات والاختبار الذاتي العمل؛ ويومض مؤشرها بالأحمر وتذكر الشاشة السبب بلغة المشغّل؛ وحين تعود البطارية إلى النافذة، بتخلف نحو 3 °م، يُستأنف الشحن دون أن يلمسه أحد. وإن احتاج عميل إلى الشحن عند -10 °م، ترفع وسادة تسخين من 3 إلى 5 واط في كل تجويف البطارية فوق 5 °م أولًا. ولأن تجاويف علبة مغلقة تحت الشمس قد تتجاوز 45 °م، فإن زمن الشحن الموعود لا يصح إلا عند حرارة معتدلة، ومكانه في الافتراضات المكتوبة.

السلامة وحرارة اللمس والتفريغ الكهروستاتيكي والعوامل البشرية

السلامة. حلّ IEC 62368-1 محل IEC 60950-1 وUL في نهاية 2020، وراجعت طبعته لعام 2023 بنود شحن البطاريات. وتختلف القراءات المنشورة لجدول الخلوص فيه (1.5 و3.0 مم في تقرير اختبار، و1.8 و3.6 مم في قراءة صانع أشباه موصلات)، لذا أصمم وفق القيم الأكبر: 1.8 مم على الأقل للعزل الأساسي و3.6 مم للمعزز حتى 2,000 م، مضروبة في 1.48 عند 5,000 م. والشاحن الذي يسلّم أكثر من 100 واط دائرة PS3 ويحتاج إلى غلاف مقاوم للحريق؛ والعلبة المعدنية غلاف كهذا. وتقرير اختبار CB يغطي ملحق شحن البطاريات هو الطريقة الفعالة لإثبات كل ذلك.

حرارة اللمس. يسمح MIL-HDBK-454 بـ49 °م على أدوات التحكم، و60 °م على الأجزاء الأخرى التي تصل إليها اليد، و70 °م في غيرها، عند محيط 25 °م. وعند محيط +55 °م يتجاوز المعدن العاري 49 °م أصلًا، لذا تكون المقابض والمفاتيح ومصدات الزوايا من البوليمر أو المطاط، وتُوسم الأسطح الساخنة. ويطلب الدليل نفسه تيار تسرب لا يتجاوز 3.5 مللي أمبير، ومقاومة ربط لا تتجاوز 0.1 أوم، ومكثفات تتفرغ تحت 30 فولت خلال ثانيتين.

التفريغ الكهروستاتيكي. المتطلب المعتاد هو تفريغ تلامسي 4 كيلوفولت بنموذج جسم الإنسان على كل أداة تحكم يلمسها المشغّل وفي مركز كل سطح، و2 كيلوفولت على أطراف الواجهات غير المغذاة. والاختبار أيضًا عند 8 كيلوفولت لـCS118 في 461G يضيف هامشًا دون تكلفة تقريبًا. ويحتاج المصنع إلى برنامج تحكم خاص به في التفريغ الكهروستاتيكي، وفق ANSI/ESD S20.20 أو IEC 61340-5-1.

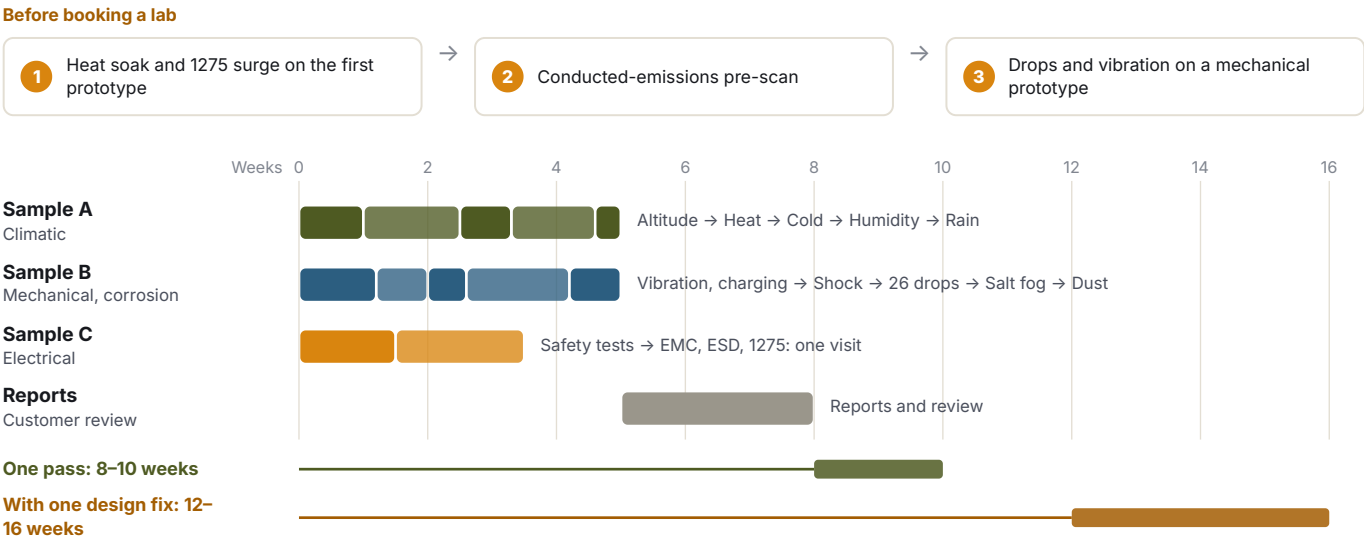
العوامل البشرية. يحدد MIL-STD-1472 مقبض اليد الواحدة لليد المرتدية للقفاز بعرض داخلي 125 مم، وخلوص للأصابع 50 مم، وعمق 100 مم (111 و48 و75 مم لليد العارية؛ و135 و75 و150 مم للقفازات الثقيلة)، وعزم دوران المفاتيح بين 115 و680 مللي نيوتن·متر مع درجات متباعدة من 15 إلى 40°، وحروفًا بارتفاع 2.5 إلى 5 مم على مسافة رؤية 710 مم. ويُتحقق من كل ذلك بالفحص وعرض عملي بالقفازات، دون تكلفة مختبر.

التأهيل: ثلاث عينات، وسلسلتان متوازيتان، وزيارة EMC واحدة

ثلاث عينات هي العدد المريح للتأهيل، واثنتان الحد الأدنى. تجري العينة A السلسلة المناخية: الضغط المنخفض، والتخزين والتشغيل في الحرارة العالية، والحرارة المنخفضة، والإشعاع الشمسي إن اختُبر، والرطوبة والمطر. وتجري العينة B سلسلة الميكانيكا والتآكل: الاهتزاز أثناء الشحن، والنقل، والصدمة الوظيفية والتداول على المنضدة، والسقطات الـ26، ورذاذ الملح والغبار. وتجري العينة C السلسلة الكهربائية: اختبارات نوع

السلامة، وMIL-STD-461، والتفريغ الكهروستاتيكي، وMIL-STD-1275. وعند تشغيلهما بالتوازي تستغرق السلسلتان الأوليان أربعة إلى خمسة أسابيع؛ والتوافق الكهرومغناطيسي وعوابر القدرة أسبوعًا ونصفًا إلى أسبوعين؛ وتضيف التقارير ومراجعة العميل أسبوعين إلى ثلاثة. وهذا يعني 8 إلى 10 أسابيع إن نجح كل شيء، و12 إلى 16 أسبوعًا مع تصحيح تصميمي واحد.

الشكل 7. خطة تأهيل لثلاث عينات: 8–10 أسابيع إن نجح كل شيء، و12–16 مع تصحيح تصميمي واحد.



Lab cost at published rates	
Mainland China	US or Europe
$18,000–45,000	**≈$70,000–115,000**
$22,000–54,000 with a 20% retest allowance	estimate

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

الترتيب أهم من المختبر. قبل حجز أي شيء، أجرِ التشبّع الحراري وارتفاع 1275 على النموذج الأول، ثم مسح EMC أوليًا، ثم السقطات والاهتزاز على نموذج ميكانيكي. وعندها تأتي وفورات عدة شبه مجانية: التشغيل في الحرارة والبرودة في حجز غرفة واحد؛ وشحن البطاريات أثناء الاهتزاز، ما يثبت أيضًا التشغيل أثناء الحركة؛ وبيانات ارتفاع الحرارة لتقرير السلامة تُجمع أثناء التشبّع عند +55 °م؛ والتفريغ الكهروستاتيكي و1275 في زيارة EMC نفسها؛ وخطة اختبار واحدة تغطي 810 و461 و1275، يوافق عليها العميل مرة واحدة، ثم لا يحضر إلا EMC والسقوط والاهتزاز. وغالبًا ما يمكن إثبات الضغط المنخفض والإشعاع الشمسي والنبضة المشعة EMP بالتحليل بدل الاختبار.

لا ينشر أي مختبر أسعار الاختبارات العسكرية، لذا يجب بناء التكاليف من جداول الرسوم العامة. يدرج معهد اختبار إقليمي في جيانغسو الغرف المناخية بـ4.50 إلى 37 دولارًا للساعة وغرفة EMC بـ119 إلى 149 دولارًا للساعة؛ ويدرج مكتب المعايير في تايوان الاهتزاز بنحو 121 دولارًا، واختبار السقوط بنحو 73 دولارًا، والتفريغ الكهروستاتيكي بنحو 364 دولارًا، ومجموعة EMC كاملة بنحو 2,610 دولارات؛ وفي الولايات المتحدة يعلن مختبر عن اختبار MIL-STD-461 ابتداءً من 3,999 دولارًا، ويحتسب آخر وقت الهندسة بـ157 إلى 377 دولارًا للساعة. وبالبناء من هذه الأسعار، تكلّف مجموعة كاملة (461 و1275 والتفريغ الكهروستاتيكي وعشر طرق من 810 وتقرير سلامة) نحو 18,000 إلى 45,000 دولار في البر الصيني، أو 22,000 إلى 54,000 دولار مع مخصص 20% لإعادة الاختبار، وأقدّرها بـ70,000 إلى 115,000 دولار في الولايات المتحدة أو أوروبا. والمختبرات العامة في تايوان ليست أغلى من مختبرات البر الرئيسي بأسعارها المنشورة. أما قبول المشتري لتقارير مختبر بعينه فمسألة تجارية يُفضّل حسمها قبل الحجز الأول.

تحتاج إلى شاحن مبني وفق قائمة التحقق هذه؟

جاءت قائمة التحقق هذه من تصميم شاحن فعلي: شاحن محكم بلا مروحة بأربعة منافذ، بمدخلي تيار متردد و24 فولت من المركبة، مبني منصةً تتوسع من منفذين إلى ثمانية. كيف بُني، وكيف تُسد الفجوات في المواصفات، وكيف ينتقل من المواصفات إلى العينات الهندسية في 16 أسبوعًا، كل ذلك في شواحن بطاريات مقوّاة متعددة المنافذ حسب الطلب في 2026، وكم تكلّف شواحن كهذه في أسعار شواحن البطاريات العسكرية متعددة المنافذ في 2026.

إن كانت لديك بطارية تحتاج إلى شاحن مقوّى، فأرسل طرازها أو ورقة بياناتها، وعدد المنافذ، وقدرة المدخل، والمعايير المطلوبة، والكمية إلى i@tanshuai.com. أرد بالأسئلة التي تحسم التصميم.

المصادر

1. MIL-STD-1275E, Characteristics of 28 Volt DC Input Power to Utilization Equipment in Military Vehicles (2013). https://everyspec.co /m/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/fi les/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-ST /D/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://everys /pec.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-a nd-low-temperatures
16. Jiangsu Administration for Market Regulation, product testing fee schedule (June 2025). https://scjgj.jiangsu.gov.cn/attach/0/729808 7b18cf41529a3e43ac75aab677.pdf
17. Bureau of Standards, Metrology and Inspection (Taiwan), test fee table. https://www.bsmi.gov.tw/wSite/public/Attachment/f1784081 743483.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

عن المؤلف

تان شواي تقني ومؤسس لديه أكثر من عشرين عامًا من العمل عبر الرقائق والعتاد وبرمجيات الأنظمة، و20 براءة اختراع ممنوحة. أخذته أعماله عبر وادي السيليكون ونيويورك وشيكاغو وتايوان ومنطقة الخليج الكبرى (شنجن وهونغ كونغ) وفيتنام وماليزيا، مع تركيز طويل على التصنيع المتقدم وسلاسل التوريد. يعمل اليوم باحثًا ومطورًا في الذكاء الاصطناعي، ويبني إلكترونيات مقوّاة حسب الطلب مع شركاء تصنيع في شنجن.

لمشاريع الشواحن المقوّاة والنقاش التقني: i@tanshuai.com.