工程筆記 · 設計清單

充電器怎麼滿足 MIL-STD-1275、810、461：車載加固充電器設計清單

一份加固充電器的規格書，背後可能牽出約 1,400 頁軍用標準，但真正改變設計的不到 150 頁。這份清單把每條要求對應到它逼出來的設計決策和證明它的試驗，難點附上算式。

譚帥 · tanshuai.com · i@tanshuai.com

2026 年 11 月 23 日

摘要

車載和野戰用的加固型 24 V 電池充電器，本質上是一台普通的開關電源充電器，外面裹著四道難關。MIL-STD-1275 在輸入端加一個來自 0.5 Ω 源阻的 100 V 突波，任何箝位二極體都吸收不了，所以前端必須用 150 V 級器件做串聯突波抑制。MIL-STD-461 的難點在發射而不在抗擾：每個電源輸入都要在連接器壁上做兩級濾波，機箱不僅要機械密封，還要電氣密封。MIL-STD-810 要的是一個密封箱：+55 °C 日曬下能散熱，能扛 26 次跌落，到了高海拔能呼吸卻不進水。40,000 小時的 MTTF 則容不下一台風扇。其餘各項，從溼熱、鹽霧到靜電、觸控溫度和可靠性報告，都按成熟做法設計，再用試驗或文件證明。多數規格書仍引用 1980 和 1990 年代的版本；按現行版本設計、再附一張新舊對照表，幾乎不花錢，還能免去返工。一套可信的鑑定試驗需要三台樣機、8 到 16 週；按中國大陸公開的實驗室收費，約 2 萬到 5.5 萬美元。

為什麼寫這篇

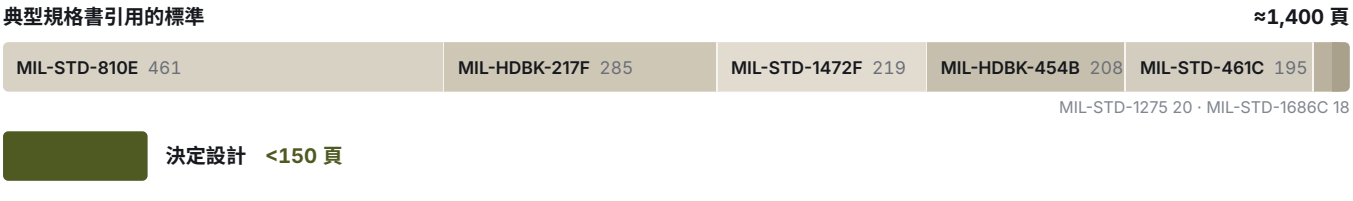
加固充電器的需求，來的時候通常是一頁要求加一串標準：環境看 MIL-STD-810，電磁相容看 MIL-STD-461，車載電源看 MIL-STD-1275，再加一個安全標準、一個 MTTF 數字和幾條人機工程規定。這串標準背後的文件加起來約 1,400 頁。逐字照做，充電器就成了科研專案；只是掃一眼，又會漏掉真正決定方塊圖、機箱和價格的那三四條。

我最近把這樣一份規格書逐行過了一遍，讀的是標準原文而不是二手摘要，並把每一條按它對設計的影響分了類。這篇就是結果，寫成一份清單：給要把這類規格書變成硬體的工程師，也給想弄清自己到底在要什麼的買方。文中數字截至 2026 年 11 月，金額以美元計。

結論一覽

圖 1. 約 1,400 頁標準中，決定設計的不到 150 頁，其餘是成熟做法和文書工作。

一份典型加固充電器規格書背後的文件，以及每部分對工作的影響。



來源: 作者對所引標準的閱讀；頁數為已發布文件的頁數。

清單本身：從要求，到它逼出來的設計決策，再到怎麼證明：

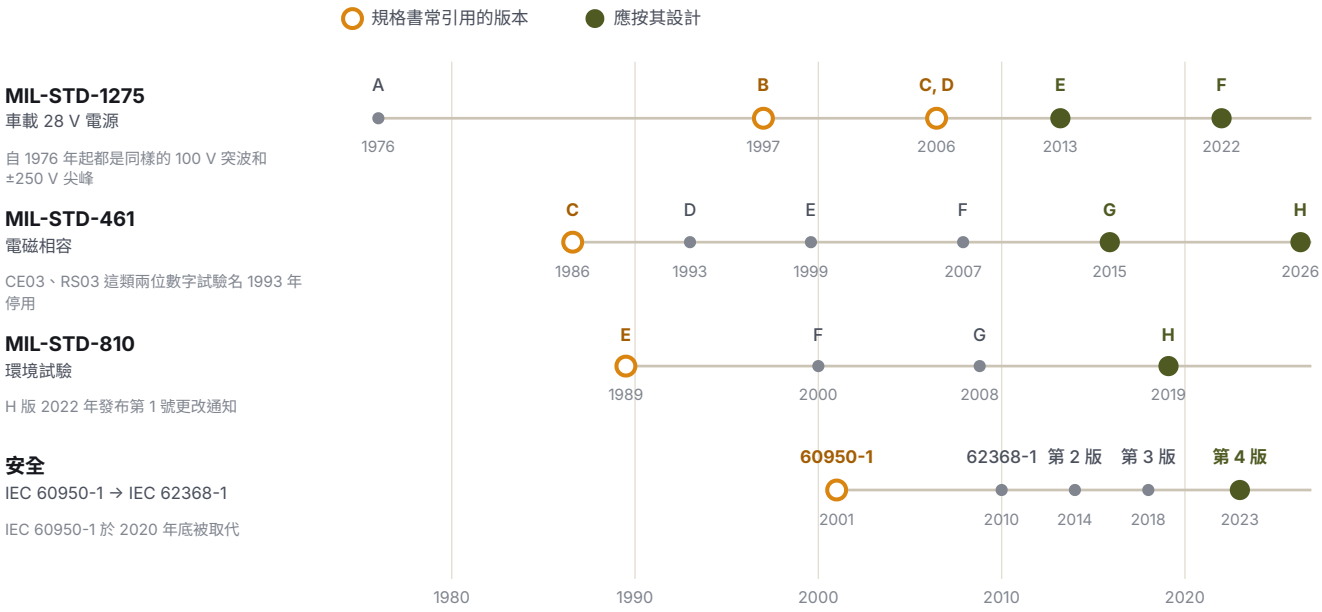
要求	對設計的影響	怎麼驗證
MIL-STD-1275，24 V 車載電源	串聯 MOSFET 突波抑制，器件 150 V 級；TVS 吸收尖峰；反極性保護不用二極體壓降；16 到 33 V 照常充電，發動機起動時自動暫停、自動恢復	用對應版本的瞬態發生器試驗
MIL-STD-461，電磁相容	每個電源輸入兩級 LC 濾波，裝在連接器壁上；每條接縫用導電密封條；規劃各變換器的開關頻率；首台樣機就做預掃描	先內部預掃描，再進暗室正式測試
MIL-STD-810，環境	電子艙密封、無風扇，熱量經散熱鰭匯出；ePTFE 透氣閥應對海拔；角護塊和凹裝連接器應對跌落；器件按 −40 至 +71 °C 儲存選型	一台樣機走氣候鏈，一台走力學鏈
鋰電池充電溫度	測每塊電池的溫度，只在其視窗內充電，一般為 0 至 45 °C；超出就暫停、提示原因、自動恢復；可選預熱	在溫度極限下試驗
安全，IEC 62368-1	電氣間隙按標準表格的較大讀數設計；100 W 以上要防火外殼；提手和旋鈕用聚合物，以滿足觸控溫度	CB 測試報告加檢查
靜電放電	手能碰到的地方都做 4 kV 接觸放電，8 kV 作餘量	試驗，約半天
MTTF 40,000 小時	整機失效率預算只有每百萬小時 25 次：不用風扇，器件降額	按 MIL-HDBK-217F 預計，方法事先約定
人機工程，MIL-STD-1472	提手按戴手套尺寸，旋鈕檔距 15 至 40°，字體在一臂距離可讀	檢查，加戴手套演示

第零步：按現行版本設計

加固裝置的規格書往往比看上去老。常見的情況是 MIL-STD-810E（1989 年）、MIL-STD-461C（1986 年）和早已作廢的安全標準並列，因為採購部門是沿用舊模板寫的。461C 那種兩位字母加兩位數字的試驗名，比如 CE03 和 RS03，1993 年就已停用。MIL-STD-810 現在是 H 版（2019 年 1 月，2022 年發布第 1 號更改通知）；MIL-STD-461 是 G 版（2015 年 12 月），2026 年 4 月又出了 H 版；MIL-STD-1275 是 E 版（2013 年 3 月）和 F 版（2022 年）。IEC 62368-1 在 2020 年底取代了 IEC 60950-1，現行為第 4 版（2023 年）。還常出現在充電器規格書裡的 EN 50091-1，其實是 UPS 標準，2005 年已經撤銷。

圖 2. 規格書仍在引用 1980 和 1990 年代的版本。按現行版本設計，兩頭都出報告。

加固充電器要滿足的四類標準的版本演進。按現行版本設計，按客戶引用的版本出報告。



來源: 版本日期取自標準原文和一家美國測試實驗室的版本清單；IEC 出版日期。

MIL-STD-810 的預設嚴酷度在 1989 到 2019 年之間幾乎沒變，決定 MIL-STD-1275 前端的兩項應力自 1976 年起也一直沒變，所以按現行版本設計幾乎不增加成本。換來的是：客戶哪天更新規格書，設計照樣能過；實驗室也還開著這些方法。我的做法是：按 810H、461G 或 H、1275E 或 F、IEC 62368-1:2023 設計，試驗結果按客戶引用的方法號出報告，另附一頁新舊對照表。某些老方法只剩少數實驗室還在做，比如 461C 的 CE03 傳導發射，訂暗室前就要和客戶約定用哪個現行等效方法。

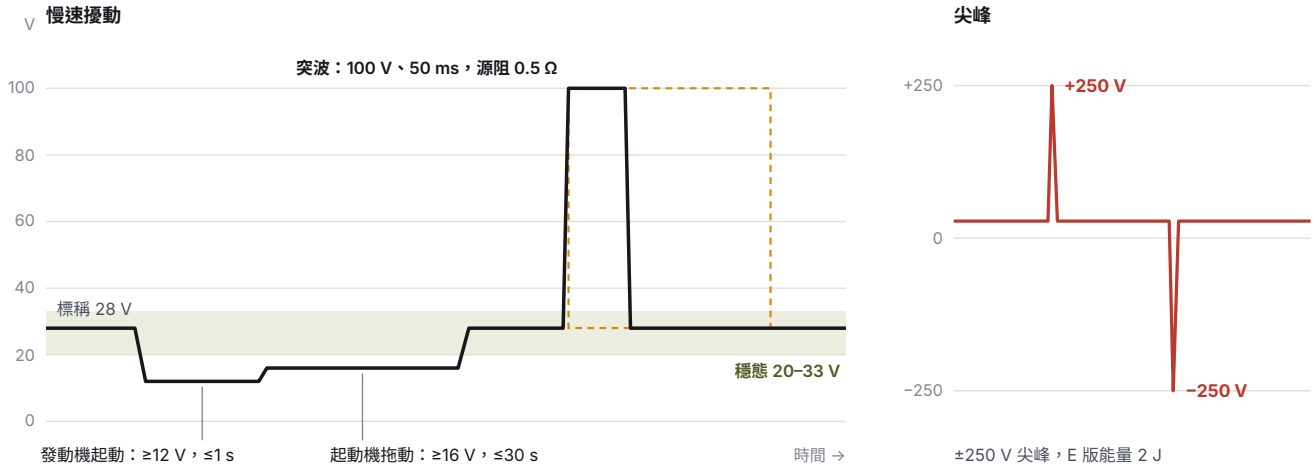
有兩個問題要寫進第一封郵件，因為答案會改變成本：適用 MIL-STD-1275 的哪個版本、按什麼判據；"EMP 防護"指什麼。線纜注入阻尼正弦（CS116，或 461C 的 CS10 和 CS11）大約只要一個暗室日；輻射脈衝試驗（RS105，或 461C 的 RS05）是另一個預算量級，而且 461H 只對明確有 EMP 要求的裝置才適用。

MIL-STD-1275：24 V 輸入決定方塊圖

MIL-STD-1275 從 1976 年的 A 版到 2013 年的 E 版，都包含同樣兩項決定設計的應力：一個從 0.5 Ω 源阻打進來、持續 50 ms 的 +100 V 突波，以及 ±250 V 的尖峰。各版之間改的是記賬方式：工作模式、尖峰能量（B、D 版 15 mJ，E 版 2 J）、發動機起動跌落的下限（舊版本不低於 6 V、持續不超過 1 s，E 版提高到 12 V；之後起動機拖動期間不低於 16 V、最長 30 s），以及穩態視窗（E 版為 20 至 33 V）。從為 F 版製造的測試發生器的說明書推斷，F 版把突波延長到約 500 ms，源阻更低，尖峰能量則降到 250 mJ。

圖 3. MIL-STD-1275E 對 28 V 車載母線的包絡。

充電器車載輸入必須承受、並照常工作的電壓包絡。時間軸不按比例。



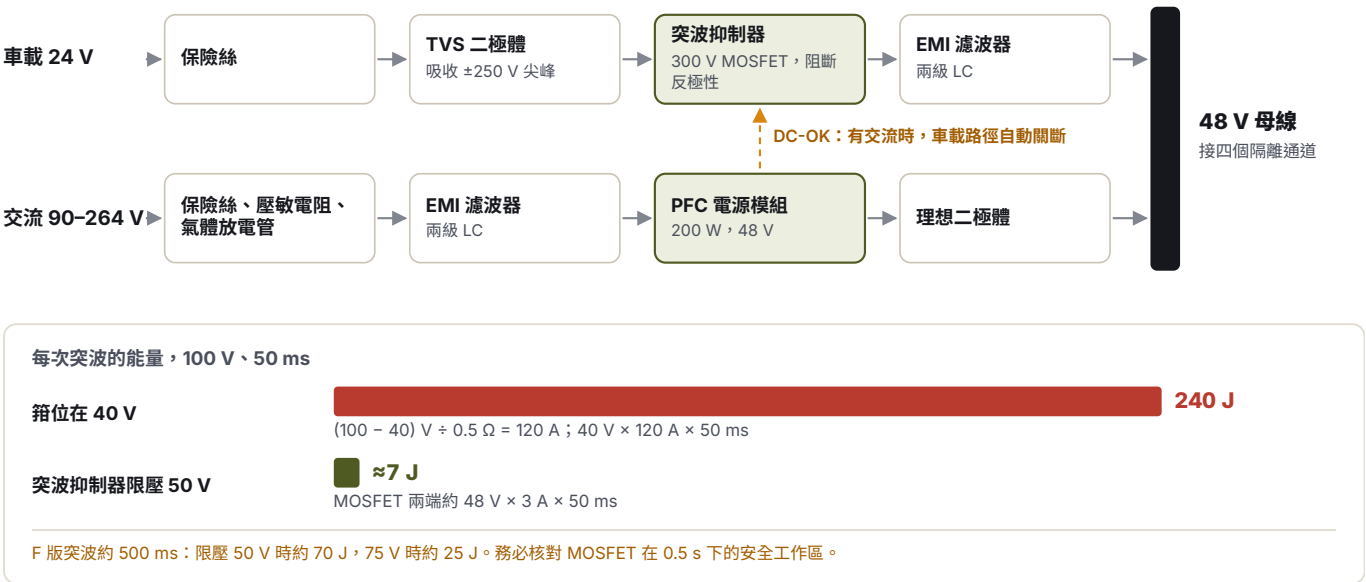
F 版：突波持續約 500 ms，源阻低得多

來源: MIL-STD-1275E（2013 年）；F 版說明由 F 版測試發生器的資料推斷。

正是這個突波，排除了最直觀的做法。用 TVS 二極體或壓敏電阻把它鉗在 40 V，源端會向箝位器件灌入 (100 − 40) / 0.5 = 120 A，持續 50 ms，一個器件要吃下 40 V × 120 A × 0.05 s = 240 J。尺寸合理的箝位器件，沒有一個能反覆承受。串聯突波抑制器的思路不同：電源路徑上的 MOSFET 把輸出限制在設定電壓，多出來的電壓由它自己承擔，所以它的耗散只是突波電壓與設定電壓之差乘以負載電流。負載 150 W、輸出限在 50 V 時，大約是 48 V × 3 A，即約 150 W 持續 50 ms，約 7 J，比箝位少三十倍。

圖 4. 箝位要吸收 240 J，突波抑制器只耗散約 7 J。

加固充電器的兩路輸入，以及排除用箝位對付 MIL-STD-1275 突波的那筆賬。



來源: 作者的設計；能量按 150 W 負載計算。

前端其餘部分由此推出：

- **突波路徑上的器件要 150 V 級以上。** 我用的是 300 V 的 MOSFET，對尖峰也留足餘量。

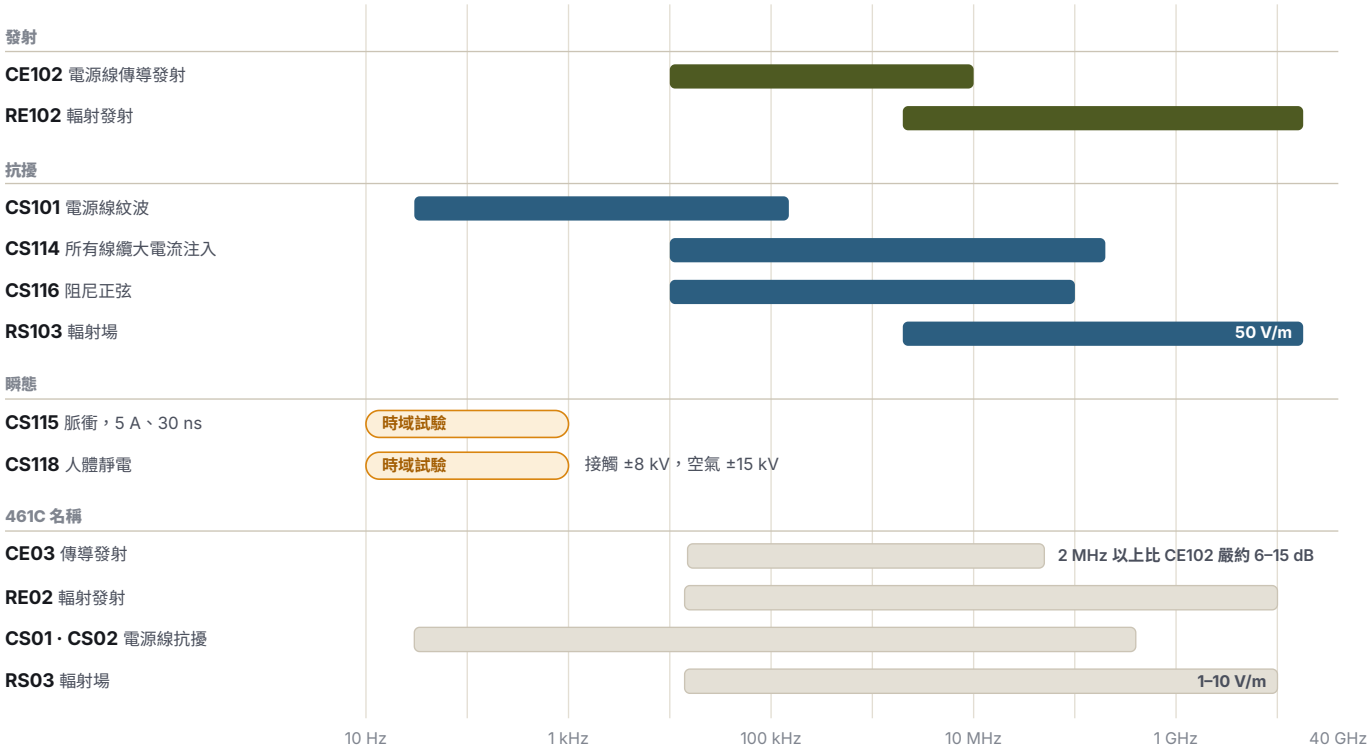
- **F 版會改變數字。** 突波長到 500 ms，同樣限在 50 V，MOSFET 要承受約 70 J。把限壓點提到約 75 V（18–75 V 輸入的 DC-DC 模組可以長期承受），電流降到 2 A，MOSFET 兩端電壓降到約 24 V，總共約 25 J。無論哪種，都要核對 MOSFET 在 0.5 s 下的安全工作區。
- **尖峰仍交給 TVS。** 2 J（F 版為 250 mJ）在它的能力範圍內。
- **反極性用理想二極體控制器驅動的背靠背 MOSFET 阻斷，** 不用串聯二極體，否則要白白浪費好幾瓦。
- **發動機起動是一種工況，不是故障。** 能充就一直充到 16 V；低於 16 V 時暫停，但顯示和日誌保持工作，結束後無需任何人操作，自動恢復。答覆規格書時要寫明這一點。
- **18–75 V 輸入的模組幫了大忙。** 它們一般能承受 100 V、1 s，所以前面一級突波保護就夠了。
- **紋波也要算。** 1275D 允許最高 200 kHz、峰值 7 V 的紋波，輸入濾波器要能處理而不發生諧振。

MIL-STD-461：難點在發射

對陸軍地面裝置，MIL-STD-461G 適用八項試驗：CE102 電源線傳導發射（10 kHz 至 10 MHz）、RE102 輻射發射（地面裝置 2 MHz 至 18 GHz）、CS101 電源線低頻紋波抗擾（30 Hz 至 150 kHz）、CS114 所有線纜的大電流注入（10 kHz 至 200 MHz）、CS115 快速脈衝、CS116 阻尼正弦（10 kHz 至 100 MHz）、CS118 人體靜電（接觸 ±8 kV，空氣 ±15 kV），以及 RS103 輻射抗擾，2 MHz 至 18 GHz、50 V/m。2026 年 4 月的 461H 保持陸軍地面裝置的限值不變，收緊的是試驗程序。

圖 5. MIL-STD-461G 對陸軍地面裝置的試驗專案，以及舊規格書仍在引用的 461C 試驗。

對數軸上的頻率範圍，以及舊規格書仍在引用的 MIL-STD-461C 試驗。



來源: MIL-STD-461G（2015 年）表 V 及各試驗章節；MIL-STD-461C（1986 年）第 4 部分。

電池充電器在發射上是個難對付的品類。它裡面有好幾級開關變換器：功率因數校正一級，每個通道一個隔離變換器，每個通道再一個升降壓充電級。四個通道的開關頻率略有差異，會產生拍頻；電池引線和車輛線纜又是很好的天線。抗擾通常是相對容易的一側，不過 RS103 的 50 V/m 也不能輕視。舊版規格書會讓天平更偏向發射：461C 的 CE03 在 2 MHz 以上，28 V 輸入比 CE102 嚴約 6 dB，230 V 輸入嚴約 15 dB，而且要測到 50 MHz 而不是 10 MHz；它的輻射抗擾要求卻只有 1 到 10 V/m。

管用的做法：

- **每個電源輸入一個兩級 LC 濾波器，** 裝在連接器壁上，讓濾波前後的走線永遠不在同一個腔裡。按我的估算，充電器要在開關頻率處提供 40 到 60 dB 衰減，在 2 到 50 MHz 提供 50 到 70 dB，才能有餘量地透過 CE03。
- **密封電子艙兼作遮蔽體。** 每條接縫用導電密封條、連續搭接，機箱就成了法拉第籠，不必額外花錢。
- **規劃各變換器的頻率。** 讓各通道變換器同步或擴頻，在效率允許的範圍內放慢開關沿。
- **給電池引線加共模扼流圈。** 每個輸出口一個，防止電池線纜向外輻射。
- **儘早測量。** 首台樣機用 LISN 加頻譜儀做一次傳導發射預掃描，只要一天；到正式暗室才發現問題，要搭進去幾週。

MIL-STD-810：能散熱、會呼吸、扛得住跌落的密封箱

充電器規格書裡常見的十種環境，正好一一對應 810E 的 500.3、501.3、502.3、505.3、506.3、507.3、509.3、510.3、514.4 和 516.4 方法，在 810H 中分別變為 500.6、501.7、502.7、505.7、506.6、507.6、509.7、510.7、514.8 和 516.8。三十年來，這些方法的預設嚴酷度幾乎沒變。單看每一項都不難，合起來描述的是一個密封箱，而密封箱有三個問題：熱、氣壓和衝擊。

方法（810E / 810H）	預設嚴酷度	設計對策
低氣壓（500.3 / 500.6）	4,570 m，57 kPa	密封箱內外壓差約 44 kPa，作用在 340 × 240 mm 的蓋板上約 3.6 kN。ePTFE 透氣閥平衡氣壓，同時擋住水。
高溫（501.3 / 501.7）	乾熱迴圈：環境 32 至 49 °C，車內和箱內誘發溫度 33 至 71 °C	無風扇，靠散熱鰭自然對流；所有發熱件都傳導到鰭板；50 °C 以上由韌體降低充電功率。
太陽輻射（505.3 / 505.7）	1,120 W/m²，24 小時迴圈	淺色塗裝減少吸熱；與客戶約定能否用分析代替試驗。
低溫（502.3 / 502.7）	基本寒冷型約 −32 °C，更冷的類別另行約定	器件和顯示屏按 −40 °C 選型；電池在 0 °C 以下不充（見下文）。
淋雨（506.3 / 506.6）	10 cm/h，風速 18 m/s，每面 30 分鐘	電子艙 IP67，蓋板連續密封條，電池井設排水閥。
溼熱（507.3 / 507.6）	10 天迴圈	密封電子艙加三防漆。
鹽霧（509.3 / 509.7）	5% NaCl、35 °C，溼 48 小時加幹 48 小時	粉末或 CARC 塗層下做轉化膜，緊韌體用不鏽鋼，避免異種金屬直接接觸。
砂塵（510.3 / 510.7）	粉塵 10.6 g/m³、8.9 m/s；沙塵 1.1 g/m³、18 至 29 m/s	電子艙密封；塗層和顯示窗耐磨。
振動（514.4 / 514.8）	輪式或履帶式車輛譜，需問清是哪種	重器件加固；蓋內海綿壓住電池；試驗時給真電池充電，證明行駛中可用。
衝擊與運輸跌落（516.4 / 516.8）	從 122 cm 跌落 26 次	角護塊預留約 10 mm 的可控變形；連接器凹裝；任何姿態都不讓連接器先著地。

最容易出問題的組合是散熱加密封。+55 °C 的滿日照下，密封箱用不上外部空氣，全部損耗只能靠傳導和自然對流帶走。輸出 120 W、效率 79% 到 83% 時，損耗為 25 到 32 W，帶散熱鰭的鋁壁散得掉；但 AC-DC 模組在 50 °C 以上每度要降額 2% 到 3%，選型時必須算進去。如果 +55 °C 下必須給出全功率，要麼模組升一檔，要麼由韌體降低充電電流並如實顯示。

不用風扇，是 MTTF 決定的

要求 MTTF 40,000 小時，等於整台充電器的失效率預算只有每百萬小時 25 次。常規的證明方法是按 MIL-HDBK-217F Notice 2、在地面移動環境下做電子元件應力法預計；這個環境下電容的環境係數是良性環境的 20 倍。風扇軸承的特徵壽命在 60 °C 時約 35,000 小時，70 °C 時約 22,000 小時；在這套預計裡，一台風扇就貢獻約每百萬小時 43 次失效，

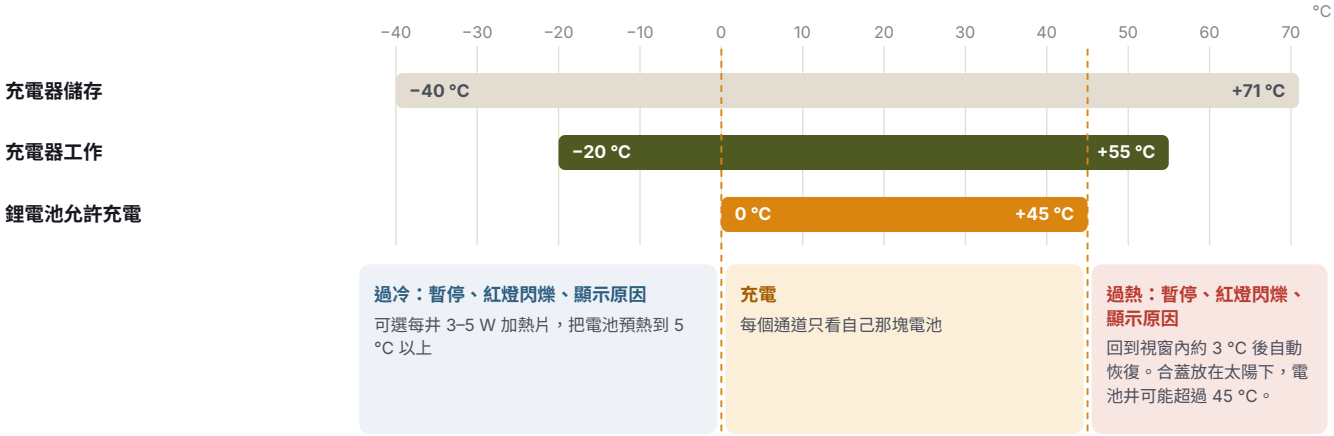
比整機預算還多。結論很明確：內部不裝風扇，器件降額，預計方法、環境和溫度在動筆前就和客戶約定。想用試驗證明這個數字不現實：標準的驗證方案需要幾萬個無故障台時。

電池有自己的溫度視窗

鋰電池只能在製造商允許的溫度視窗內充電，一般是 0 至 45 °C；而充電器通常被要求在 −10 或 −20 °C 到 +55 °C 之間工作。低溫充電會析鋰、損壞電芯；高溫充電會縮短壽命。所以充電器必須知道每塊電池的溫度，來自電池包的熱敏電阻或智慧電池資料，並且每個通道單獨判斷。

圖 6. 充電器的工作範圍比電池允許充電的範圍寬。

加固充電器和典型鋰電池的溫度範圍，以及每個通道在邊界上的行為。



來源: 典型鋰電池充電視窗取自電池規格書；充電器範圍和行為來自作者的設計。

我規定的行為是：超出視窗時，該通道停止充電，但顯示、資料讀取和自檢照常工作；它的指示燈紅色閃爍，螢幕用操作者的語言說明原因；電池回到視窗內、留約 3 °C 回差後，無需任何人操作自動繼續充電。如果客戶要求在 −10 °C 也能充，可在每個電池井加 3 到 5 W 的加熱片，先把電池預熱到 5 °C 以上。另外，合蓋放在太陽下時，電池井溫度可能超過 45 °C，所以承諾的充電時間只在中等溫度下成立，這一點要寫進書面假設。

安全、觸控溫度、靜電與人機工程

安全。 IEC 62368-1 在 2020 年底取代了 IEC 和 UL 60950-1，2023 年版修訂了電池充電條款。各方對它的電氣間隙表讀法不一（一份測試報告讀作 1.5 和 3.0 mm，一家半導體廠商讀作 1.8 和 3.6 mm），我按較大值設計：海拔 2,000 m 以下，基本絕緣至少 1.8 mm，加強絕緣至少 3.6 mm；5,000 m 時乘以 1.48。輸出超過 100 W 屬於 PS3 電路，需要防火外殼，金屬機箱即可滿足。最省事的證明方式，是一份覆蓋電池充電附錄的 CB 測試報告。

觸控溫度。 MIL-HDBK-454 在 25 °C 環境下允許：操作件 49 °C，其他可觸及部位 60 °C，其餘表面 70 °C。環境到了 +55 °C，裸露金屬本身就已超過 49 °C，所以提手、旋鈕和角護塊用聚合物或彈性體，高溫表面加警示標識。同一條指南還要求漏電流不超過 3.5 mA、搭接電阻不超過 0.1 Ω、電容在 2 s 內放電到 30 V 以下。

靜電。 常見要求是：操作者能碰到的每個操作件、每個面的中心，做 4 kV 人體模型接觸放電；不通電的介面針腳做 2 kV。再按 461G 的 CS118 加測 8 kV 作為餘量，幾乎不增加成本。工廠還要有自己的靜電控制程序，按 ANSI/ESD S20.20 或 IEC 61340-5-1 執行。

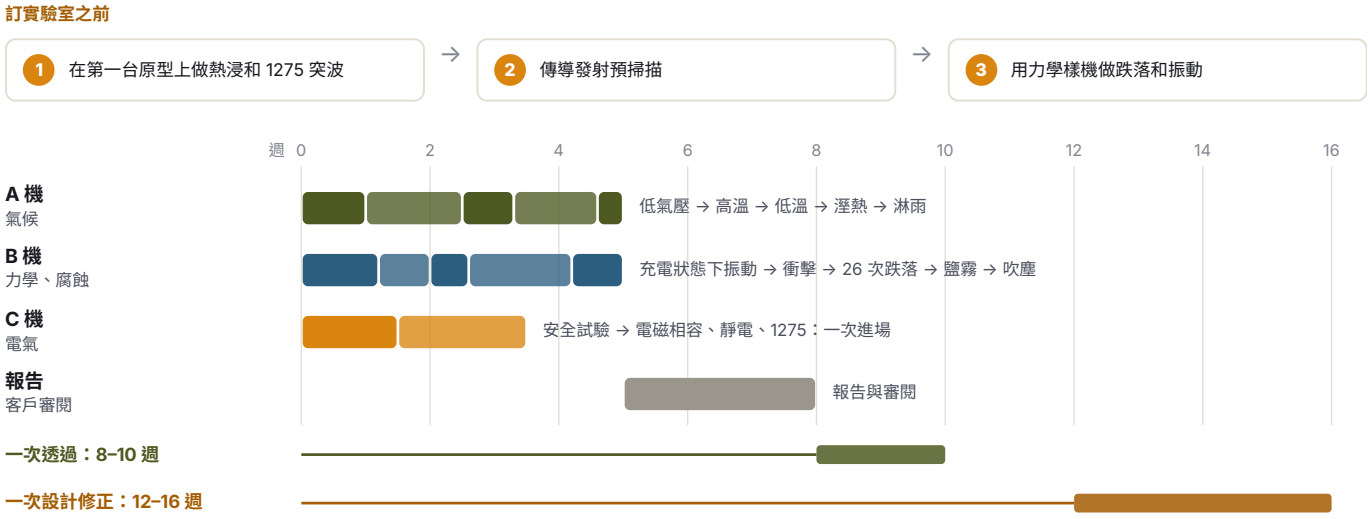
人機工程。 MIL-STD-1472 規定，戴手套單手提手的內寬 125 mm、指隙 50 mm、深度 100 mm（裸手為 111、48、75 mm，戴連指手套為 135、75、150 mm）；旋鈕力矩 115 至 680 mN·m，檔距 15 至 40°；視距 710 mm 時字體高 2.5 至 5 mm。這些都靠檢查加戴手套演示來驗證，不產生實驗室費用。

鑑定試驗：三台樣機、兩條並行鏈、一次電磁相容進場

鑑定試驗三台樣機比較從容，兩台是底線。A 機走氣候鏈：低氣壓、高溫儲存與工作、低溫、太陽輻射（如需實測）、溼熱、淋雨。B 機走力學與腐蝕鏈：充電狀態下振動、運輸、功能衝擊與工作台操作、26 次跌落、鹽霧、吹塵。C 機走電氣鏈：安全型式試驗、MIL-STD-461、靜電和 MIL-STD-1275。前兩條鏈並行約 4 到 5 週；電磁相容和電源瞬態 1.5 到 2 週；報告和客戶審閱再加 2 到 3 週。一次全部透過是 8 到 10 週，需要一次設計修正則是 12 到 16 週。

圖 7. 三台樣機的鑑定計劃：一次透過 8–10 週，一次設計修正 12–16 週。

按週計的鑑定試驗計劃，從第一項試驗算起；此前已在樣機上排除主要風險。



按公開收費估算的實驗室費用

中國大陸	美國或歐洲
$18,000–45,000	**≈$70,000–115,000**
含 20% 複測預備金為 $22,000–54,000	估算

來源: 作者的計劃；實驗室費率來自江蘇一家省級檢驗研究院（2025 年）、台灣標準檢驗局和兩家美國實驗室。

順序比實驗室更重要。訂實驗室之前，先在第一台原型上做熱浸和 1275 突波，再做電磁相容預掃描，然後用力學樣機做跌落和振動。這樣一來，幾項節省幾乎白來：高低溫工作放在同一次溫箱預約裡做完；振動時讓樣機真的給電池充電，同時證明行駛中可用；+55 °C 恆溫時順便採集安全報告需要的溫升資料；靜電和 1275 與電磁相容同一次進場完成；一份試驗大綱覆蓋 810、461 和 1275，客戶批准一次，之後只需見證電磁相容、跌落和振動這幾天。低氣壓、太陽輻射和輻射型 EMP 脈衝，往往可以用分析代替試驗。

沒有實驗室公開軍標測試的價目，所以費用只能用公開收費表自下而上地估。江蘇一家省級檢驗研究院公佈的價格是：氣候箱每小時 4.5 到 37 美元，電磁相容暗室每小時 119 到 149 美元；台灣標準檢驗局公佈的價格是振動約 121 美元、跌落約 73 美元、靜電約 364 美元、整套電磁相容約 2,610 美元；在美國，一家實驗室的 MIL-STD-461 測試報價"3,999 美元起"，另一家的工程師工時為每小時 157 到 377 美元。按這些費率估算，一整套試驗（461、1275、靜電、十個 810 方法和一份安全報告）在中國大陸約 1.8 萬到 4.5 萬美元，加 20% 複測預備金後為 2.2 萬到 5.4 萬美元；在美國或歐洲，我估計要 7 萬到 11.5 萬美元。按公開收費，台灣的公立實驗室並不比大陸貴。買方是否接受某家實驗室的報告，是商務問題，最好在第一次預約前就談定。

需要按這份清單做一台充電器？

這份清單來自一次實際設計：一台密封、無風扇的四槽充電器，有交流和 24 V 車載兩路輸入，做成一個可從兩槽擴充套件到八槽的平台。它怎麼造、規格書裡的空缺怎麼補、怎樣在 16 週內從規格書做到工程樣機，寫在《2026 加固多槽電池充電器客製：從規格書到工程樣機只要 16 週》裡；這類充電器賣多少錢，見《2026 多槽軍用電池充電器價格調研》。

如果你有電池需要一台加固充電器，請把電池型號或規格書、槽位數、輸入電源、需要滿足的標準和數量發到 i@tanshuai.com。我會回覆那幾個決定設計的問題。

資料來源

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

關於作者

譚帥，技術專家和創業者，在晶片、硬體和系統軟體領域工作二十多年，擁有 20 項授權專利。他的工作經歷遍及矽谷、紐約、芝加哥、台灣、粵港澳大灣區（深圳和香港）、越南和馬來西亞，長期關注先進製造和供應鏈。如今他是一名 AI 研發者，同時與深圳的製造夥伴一起做客製加固電子產品。

加固充電器專案與技術交流：i@tanshuai.com。