

奈米塗層提升系統環境耐受力

突破無人機電子防護瓶頸

隨著軍用無人機(UAV)計畫快速推進，電子系統可靠度也面臨更高要求。現代無人機已不再只是單純的監視平台，而是逐步整合人工智慧(AI)、自主導航、安全通訊、電子戰系統、高解析度影像及邊緣運算。隨著這些技術持續演進，工程設計面臨一項日益重要的挑戰：如何確保支援關鍵功能的電子系統，在平台服役期間維持可靠運作。

多年來，環境防護多著重於IP67、IP68等防護等級。這些等級有助於評估設備抵抗粉塵與水侵入的能力，但並非用來涵蓋電子系統在長期軍事服役中可能遭遇的所有失效機制。隨著任務時間延長、無人機系統日趨複雜，工程設計的目標也從單純防水，延伸至更全面的任務生存能力——亦即在任務期間維持關鍵功能的能力。

潛在失效機制將影響任務整備能力

電子系統的劣化通常逐漸形成，可能

與反覆暴露於潮濕、冷凝、振動、溫度循環、污染物及腐蝕環境有關。無人機可能順利通過資格驗證測試，且在初期部署時運作正常，數月後卻開始出現間歇性故障。

裸露導體的腐蝕、機殼內部水氣累積、漏電流、金屬枝晶生長，以及反覆熱膨脹產生的機械應力，都可能逐步降低系統可靠度。由於故障常間歇出現，維護檢查時也較難重現與診斷。

圖1說明環境暴露如何引發一連串變化，最終可能導致任務失敗。這也顯



飛行器執行長途飛行任務

示，可靠度工程除了單次資格驗證測試，還須考慮長期環境影響。

僅憑IP68無法確保長期可靠度

防護等級是評估設備環境防護能力的重要指標；然而，符合IP68並不必然代表電子系統在實際運作條件下能維持長期可靠度。

實驗室測試是在受控條件下評估特定環境情境；實際部署時，電子系統則可

能同時承受快速溫度變化、高度變化、含鹽空氣、濕度、振動及機械衝擊。即使機殼已密封，反覆溫度循環仍可能造成內部冷凝；密封件與連接器老化，也可能隨時間降低機殼的防護效果。

因此，防護等級通常被視為整體環境防護策略的一環。

為因應這些挑戰，NanoFlowX開發超薄奈米塗層技術，其超薄奈米塗層技術則針對電子系統的長期環境失效機制提供另一種防護方式，同時兼顧可製造性、可維護性及散熱表現。此類技術並非取代既有的工程設計，而是提供改善關鍵電子系統環境耐受力的另一種選擇。

臺灣國防現代化提高對可靠度的要求

臺灣持續投資國防自主與無人系統，推動航太電子與本土製造發展。同時，高濕度、季節性降雨、高溫及沿海鹽分暴露，也使電子系統面臨腐蝕與受潮劣化風險。對預期在海事環境運作的無人機而言，空氣中的鹽分微粒與冷凝現象，是平台服役期間持續面臨的可靠度課題。隨著相關計畫逐步成熟，可靠度工程不再只是品質保證工作，也逐漸成為影響長期運作整備能力的重要因素。

現代無人機電子系統需要新的防護策略

現代軍用無人機整合多種電子子系



圖1 電子系統的失效連鎖反應



統，包括飛行控制器、電子調速器(Electronic Speed Controller, ESC)、AI運算模組、射頻通訊系統、GPS接收器、慣性測量單元(IMU)、電光／紅外線(Electro-Optical/Infrared, EO/IR)酬載、電池管理系統、加密資料鏈及任務專用酬載電子系統。這些系統都須在嚴苛環境中維持穩定的電性。

傳統保形塗層在許多應用中仍能提供有效防護。然而，印刷電路板(PCB)布局日益緊湊，元件密度提高及熱負載增加，也帶來新的製造與可靠度挑戰。

工程師因此必須在環境防護、散熱表現、可製造性、可維護性及生產效率之間取得平衡。

這些需求促使製造商評估能改善長期可靠度、又不致使製程過度複雜的新方法。

可靠度驗證日益貼近實際應用環境

資格驗證測試也在演進。實際任務環境中的電子系統，往往同時受到溫度、濕度、振動、污染物、鹽分暴露及機械衝擊等多重應力影響；這些因素可能在無人機服役期間持續相互作用。

因此，加速壽命測試、環境循環測試、腐蝕分析及任務剖面模擬，對驗證系統長期可靠度愈來愈重要。

可靠度驗證的目標已不再侷限於確認系統是否通過單一環境測試，而是著重

於評估電子系統在經歷多次任務部署、長期儲存、運輸，以及多年累積的環境暴露後，是否仍能持續維持其可靠運作效能。

表面工程改善電子系統環境耐受性

隨著可靠度要求提高，先進表面工程技術逐漸受到航太與國防產業關注。相較於只依靠較厚的防護層，這些方法嘗試在微觀尺度控制水氣與電子表面的相互作用，同時減少額外厚度，並盡量維持散熱表現。

相關應用持續擴展至飛行控制電子系統、射頻系統、導航設備、通訊模組、感測器、電力電子及AI運算硬體。

這反映出工程觀念的轉變：電子防護不只是製造流程中的一道工序，也逐漸被視為影響系統可靠度、可維護性、任務可用率及整體運作效能的因素。

NanoFlowX技術概覽

依NanoFlowX提供的資料，其超薄奈米塗層技術旨在保護任務關鍵電子系統，並協助簡化製造流程。以下為原廠列出的測試與技術特性；實際適用範圍仍應以受測樣品、條件及報告為準。

原廠列示的測試與特性

- 通過IPC-CC-830測試
- 進行MIL-I-46058C相容性測試



飛行器於夜間降雨環境下執行任務

- 展示IP67／IP68防護表現
- 經鹽霧測試
- 超薄奈米塗層
- 適用於連接器，塗覆時無須進行遮蔽處理
- 可返工
- 可在數分鐘內塗覆
- 重量增加幅度極少
- 對散熱表現的影響極小

改善平台全生命週期的可靠度

改善電子系統可靠度的效益，不限於環境防護。減少腐蝕相關故障，有助於降低維護需求、延長儲存壽命、提高任務可用率、減少非計畫性維修，並降低

軍用無人機平台的全生命週期成本。

隨著國防單位更加重視整備狀態與長期維持運作，可靠度工程也成為任務成功的重要一環。

從環境防護走向任務生存能力

軍用無人機將持續受惠於AI、自主系統、通訊及感測技術的進步；但平台的長期效能，仍取決於支援這些技術的電子系統是否可靠。對臺灣國防產業而言，理解失效機制、在貼近實際的環境條件下驗證電子性能，並評估新一代防護策略，有助於提高整備能力、延長服役壽命及降低維護成本。 

(本文由NanoFlowX/杰鼎先進科技有限公司提供)