

資產追蹤技術在航空海運、物流與醫藥冷鏈中的應用

編輯部整理

我們將從 近兩年間發生的最具代表性的案例入手，深度解剖這些革命性技術是如何在航空貨運、海洋運輸、循環物流載具 (RTP) 以及醫藥冷鏈中落地生根。

航空貨運：解決追蹤盲区與中斷點問題

在全球供應鏈版圖中，航空貨運雖然僅佔全球貿易貨運量的不到 1%，但卻承載了高達 35% 的全球貿易總值。在這個以「高價值、強時效、零容錯」為核心特徵的生態體系中，航空集裝器 (ULD, Unit Load Device) 是維持全球空中物流網運轉的最核心血液。然而，令人遺憾的是，直到 2024 年，航空貨運的數位化追蹤仍面臨著難以逾越的問題：

首先，機場停機坪廣闊且缺乏通信基建，金屬機庫與轉運中心形成了天然的信號遮罩；其次，數以十萬計的 ULD 標籤每年需要人工巡檢與更換電池，這不僅推高了營運成本 (OPEX)，更構成了災難性的維

運黑洞；最後，國際民航組織 (ICAO) 與各國航空安全局對無線電發射有著絕對禁止的嚴苛法規，導致設備在飛行途中不僅必須絕對靜默，且極難實現完全自動化的狀態切換。

進入 2025 年下半年至 2026 年年中，隨著「無基建化 (Infrastructure-Free)」供電、動態自組網以及「智慧飛行狀態感知」演算法的集中成熟，航空貨運的追蹤圖譜被徹底改寫。業內三大商業——DHL Express、Jettainer 與 Digital Matter 的最新實踐，精準勾勒出了下一代航空透明化的終極形態。

自供電與航空安全：DHL Express 部署三萬台 AviusULD

傳統航空 ULD 追蹤方案最大的推廣阻力，在於極度依賴重資產的地面基礎設施。早期的方案往往要求物流企業在機場的每一個登機口、每一個庫區甚至每一條傳送帶上方，安裝昂貴的 RFID 或藍牙固定閱讀

器矩陣。對於像 DHL Express 這樣業務遍佈全球數千個中轉樞紐的巨頭而言，這種要求全球機場協同改造的基建成本根本不具備可擴展性。

2025 年 10 月，DHL Express 正式對外宣佈與航空物聯創新企業 AviusULD 達成戰略合作，首期為其全球機隊部署 3 萬台全新一代 SmartULD 智慧標籤。這一舉措被 IATA (國際航空運輸協會) 在 2026 年初發布的《全球航空貨運數位化白皮書》中譽為「擺脫基建依賴的決定性里程碑」，透過硬體的創新，實現了真正的「免基建 (Infrastructure-Free)」與「免換電池」。

DHL 此次採用的 AviusULD 方案，設備內置了基於先進微能抓取 PMIC 的動能收集 (Kinetic Energy Harvesting) 系統。航空集裝器在實際流轉中處於高度物理運動狀態：在機場拖車上的每一次顛簸、在行李傳送帶上的每一次震動，乃至裝機和飛機起降時的加速度，都會被標籤內

部的微型壓電材料和機械振子敏銳地捕捉，並轉化為毫瓦級的電能儲存於高密度超級電容中。這種「以動生電」的自給自足模式，使得 ULD 在其長達 7 到 10 年的全生命週期內，永遠不需要人工拆卸與更換電池，徹底終結了航空物流追蹤的能源焦慮。

在感知維度上，這套系統集成了兩項專為 2025—2026 年航空貨運痛點量身定制的硬核感測器。首先是 Occupancy Tag (貨位滿載 / 空置感應器)，它透過超低功耗的紅外線與超聲波反射演算法，自動識別 ULD 內部的容積佔用率，使得控制塔臺能夠即時獲悉全球數萬個集裝器的「空 / 滿」狀態，從而進行最佳化的空箱調撥，極大地緩解了旺季時的 ULD 短缺危機。

其次，也是最具前瞻性的一項創新，是集成了 Lithium-Ion Fire Tag (鋰電池熱失控防爆預警系統)。近年來，隨著全球含鋰電池的 3C 消費電子及跨境電商貨物的激增，機艙內的鋰電池起火已躍升為航空貨運面臨的頭號致命威脅。AviusULD 的高分子氣體感測器能夠在鋰電池發生災難性的熱失控起火之前——即早期的「微量排氣階段 (Off-gassing)」，敏銳嗅探到極其微量的揮發性有機化合物 (VOCs) 和氫氣。一旦檢測到異常，標籤會立刻透過內

置的 LPWAN (如 LTE-M) 蜂窩模組，向貨站管理系統和機組發出最高級別的防爆預警，從而在災難發生前進行物理隔離。

根據 DHL Express 內部在 2026 年第一季度的營運數據複盤，這套無需機場額外鋪設基建的自供電方案，使其 ULD 全球盤點準確率從傳統的 85% 躍升至 99.8%。更重要的是，透過徹底砍掉每年巨額的電池更換與人工巡檢費用，整體追蹤系統的全生命週期擁有成本 (TCO) 下降了 40% 以上，同時為高價值航空冷鏈與危險品運輸提供了不可估量的安全冗余。

解決機場通信盲區： Jettainer 與 Trackonomy 的 動態混合 Mesh 自組網

如果說 DHL 的案例完美解決了能源與安全預警難題，那麼全球最大的獨立 ULD 管理商 Jettainer，則在 2025 年 11 月透過與矽谷物聯網獨角獸 Trackonomy 的深度戰略合作，試圖破冰讓業界頭痛已久的機場內部「通信盲區」。

大型國際機場的物理結構是一個極度複雜的電磁災難現場：多層的地下轉運中心、停滿金屬飛機的鋼筋混凝土巨型機庫，以及機坪上多層堆疊的金屬集裝箱，構成了一個個天然的「Faraday Cage」。在這

些區域，不僅 GNSS (全球衛星導航系統) 的微波信號完全無法穿透，甚至常規的蜂窩基站信號也會因嚴重的多徑衰減而大面積丟失。傳統的單一追蹤標籤一旦被推入這些區域，就會瞬間成為「斷線風箏」。

面對這一世界級難題，Jettainer 與 Trackonomy 並沒有盲目去提高單個 ULD 標籤的射頻發射功率 (這既違背航空法規又消耗電量)，而是極其巧妙地在系統拓撲上引入了「動態混合邊緣網關 (Dynamic Hybrid Edge-Gateway)」架構，化靜態防禦為動態組網。

在這套方案中，系統被分為「盲節點」與「移動超級節點」兩層。十萬計的 ULD 表面安裝的僅僅是成本極低、壽命極長的 BLE/LoRa 固態盲節點，它們只負責用極低的功耗向四周廣播自身的 ID 與狀態。而系統真正的「大腦」——帶有蜂窩廣域通信 (LTE-M/5G RedCap) 和強大邊緣算力的移動閱讀器 (Mobile Readers)，則被隱蔽且高密度地安裝在機場的地勤支援設備 (GSE) 上，如行李拖車、叉車、升降平臺車以及接駁車上。

由於這些地勤設備每天都在機場的各個角落穿梭，當一輛裝有移動網關的行李拖車駛入沒有任何外部網路信號的地下倉庫或偏遠停機坪時，它就像一個在黑暗中移動的探照

燈，瞬間喚醒並讀取周圍半徑 50 米內的所有 ULD 盲節點數據。一旦這輛拖車駛出地下室、重新連接到戶外的蜂窩網路，它就會立刻作為一個 Mesh 超級節點，將剛才在盲區內收集到的數百個 ULD 的時空資訊打包秒傳至雲端。這種「以動治靜」的自組網方式，利用了機場內部既有的物流車流，將原本斷裂的局域信號孤島，天衣無縫地縫合成了一張覆蓋整個機場全域的動態捕捉網。

Jettainer 在 2026 年 5 月的德國慕尼黑物流展 (Transport Logistic) 上披露了令人震驚的數據：這套動態混合架構徹底消除了傳統方案中超過 30% 的追蹤盲區。過去，地勤人員在幾平方公里的機坪上尋找一個被錯放的特定 ULD，平均需要耗費 45 分鐘甚至數小時；而在新系統的引導下，搜尋時間出現了斷崖式下跌，平均耗時縮減至 15 分鐘以內，搜尋效率 (Search-time Efficiency) 暴力提升了 60% 以上。Jettainer 執行長對此評價道：「我們不再是在機場龐大的鋼鐵叢林裡盲目撈針，這套系統讓每一輛穿梭的叉車都變成了我們的移動雷達。」

航空合規與飛行感知： Digital Matter Griffin Air 的解決方案

解決了地面與機場內的

流轉問題，航空資產追蹤還面臨著最後一項，也是最具挑戰性的考驗——航空飛行途中的合規性 (Compliance) 與「斷點續傳」。根據各國航空安全局與國際航協的強硬規定，所有含有無線電發射模組的追蹤終端，在飛機起飛到降落的整個飛行期間，必須保持絕對的射頻靜默。如果單純依靠人工去關閉數以千計的集裝箱追蹤器，在操作上不僅毫無可能，更存在極高的漏關風險；而如果設備一上飛機就徹底關機死機，又會導致昂貴冷鏈藥品在數小時飛行中的溫度與震動數據出現「永久性斷層」。

這一長久以來的行業痛點，在 2026 年 7 月迎來了終極破局。低功耗 IoT 硬體供應商 Digital Matter 正式發布了專為航空貨運打造的現象級追蹤器——Griffin Air，並迅速斬獲了全球 40 多家主流航空公司的獨立登機准入豁免。

Griffin Air 的成功，首先建立在其對極端環境的絕對統治力上。該設備通過了航空界最令人聞風喪膽的 RTCA DO-160 環境標準認證。這意味著設備在面對高空機艙的劇烈失壓、零下數十度的極寒、強烈的電磁干擾 (EMI) 以及高頻氣流震動時，不僅不會發生鋰電池爆炸，還能保證內部晶片邏輯單元的絕對穩定運行。

但 Griffin Air 真正的「護城

河」，在於其內部植入的「智慧飛行狀態感知 (Flight State Awareness)」邊緣演算法。由於飛機客艙 / 貨艙內部通常沒有 GPS 和蜂窩信號，追蹤器無法單純依靠網路信號來判斷自己是否已經起飛。Digital Matter 為此打造了一套基於 6 軸加速度計、高精度氣壓高度計與時間序列 (Time-series) 的多維機器學習演算法。

當貨物被裝入貨艙，演算法會同時監測到持續的引擎高頻震動、快速的推背加速度以及機艙內氣壓的階梯式變化。系統會在幾秒鐘內極其精準地判定「航班已起飛 (Airborne)」，並立即在底層物理切斷所有的蜂窩與藍牙射頻發射，進入「合法靜默模式」。但在整個飛行期間，設備的微控制器 (MCU) 與感測器依然處於低功耗活躍狀態，忠實地以極高頻次記錄下冷鏈貨物的溫度波動、顛簸值以及氣密性變化，並儲存在本地大容量快閃記憶體中。

當飛機落地，演算法監測到反推減速並確認高度與氣壓恢復到地面標準後，設備會自動解除靜默，瞬間連接至目的地機場的本地蜂窩網路 (利用上文提到的 SGP.32 eSIM 技術自動切換當地電信商)，並將飛行途中累積的所有環境數據，如洩洪般一次性補傳至雲端。

Digital Matter 北美地區 GTM 執行副總裁 Ilan Gluck 在

2026 年 7 月的新品發布會上精準點出了這一技術的歷史地位：「透過將智慧飛行感知與長達七年的電池壽命、堅固的『一次性部署』設計完美結合，Griffin Air 讓全球物流營運商第一次有能力在毫不增加額外合規負擔的前提下，實現跨越空、陸、倉儲全鏈路的無縫、無斷點可視性。」

海洋運輸：智慧集裝箱的規模化應用

截至 2026 年 8 月海灣地區的戰火仍舊沒有停止的跡象，紅海地緣危機常態化帶來的航線繞航、持續波動的極高運費，以及歐盟嚴苛綠色環保法規的接連落地，將全球供應鏈的神經繃到了極限。在這一宏觀背景下，智能集裝箱 (Smart Container) 的滲透率迎來了歷史性的爆發。

長期以來，海運集裝箱被視為全球供應鏈中最龐大、也最沉默的“鋼鐵黑盒”。當一艘裝載著兩萬個標準集裝箱 (TEU) 的超大型貨輪駛入大洋深處，或者當集裝箱被卸載到擁擠的港口並堆疊至七八層高時，傳統的 GPS 與蜂窩網路信號便會徹底失效。貨主與物流商面臨的是長達數周的“數據真空期”。但在 2025 至 2026 年中，這一百年海運痛點被低軌衛星與邊緣動態 Mesh 組網技術徹底撕裂。

百萬級智慧集裝箱的規模化發展

在 2024 年之前，帶有物聯網追蹤模組的智慧集裝箱主要局限於對溫度極度敏感的冷藏箱 (Reefer)。乾貨集裝箱 (Dry Container) 由於單體價值低，其數位化滲透率常年徘徊在 5% 到 8% 之間。然而，伴隨著 2025 年初 Hapag-Lloyd 宣佈完成其全球 160 萬個幹箱的全面 IoT 化改造，以及 Maersk、地中海航運 (MSC) 的戰略跟進，市場迎來了決定性的拐點。

據全球海運權威研究機構 Drewry Supply Chain Advisors 與 IoT Analytics 在 2026 年 7 月聯合發佈的最新資料顯示，全球配備即時追蹤與狀態感知功能的集裝箱占比，已歷史性地突破了 26.5% 的關鍵門檻。

促成這一爆發的核心驅動力，除了 5G RedCap 與微能抓取 PMIC 帶來的硬體幹箱追蹤器單體成本下降且十年免換電池之外，更在於“低軌衛星 (LEO) 直連”與“港口堆場盲區破解”這兩大瓶頸的徹底消亡。

多模態 Mesh 與 LEO 衛星的協同應用

集裝箱追蹤在海運場景中面臨兩種截然不同的物理阻斷：第一種是航行在大洋深處時的“無基站真空”，第二種是集裝箱在船艙內部或港口堆

場多層密集堆疊時產生的極強“Faraday Cage 電磁遮罩效應”。

針對大洋深處的信號真空，2025—2026 年的新一代集裝箱追蹤器全面標配了 NTN (非地面網路) 蜂窩 / 低軌衛星雙模架構。當貨輪駛離近海蜂窩網路覆蓋區，追蹤終端會根據內置的地理圍欄演算法，靜默切換至通過 Sateliot、Astrocast 或 Starlink 等 LEO 衛星座進行微量心跳包資料上報。即便在太平洋中心，貨主依然能每天獲取數次極其精準的位置與開關門防盜報警。

然而，更大挑戰發生在港口堆場。當數以萬計的鋼制集裝箱在碼頭緊密挨靠並堆疊至六到八層時，處於底層或中間位置的集裝箱，其對外的微波信號衰減可高達 80dB 至 100dB 以上，直接導致 GNSS 定位與外部衛星 / 蜂窩通信全軍覆沒。為了破解這一困局，2026 年的主流方案 (如 Nexxiot 與 Traxens 的最新架構) 創造性地引入了“Container-to-Container (C2C) 動態 Mesh 自組網”與“多模態環境嗅探”技術。

在此架構下，處於深層盲區的集裝箱追蹤器在探尋不到外部網路時，不再無腦加大發射功率白白耗電，而是自動降級為極低功耗的 Sub-GHz (如 LoRa) 或 BLE 節點，將自身的

ID、溫度與震動資料，通過“接力傳球”的方式，跳躍式地傳輸給堆疊在最頂層、能夠看見天空和基站的“邊緣集裝箱”。這個頂層集裝箱充當了臨時閘道 (Edge Gateway)，將下方數十個盲區兄弟的資料統一打包，通過 5G 或衛星傳回雲端。

此外，當集裝箱被港口龍門吊 (RTG) 抓取移動時，追蹤器會利用“Wi-Fi 指紋 + Cell-ID 蜂窩基站三角定位”的多模態融合演算法，與安裝在龍門吊上的工業級閱讀器進行納秒級握手。這種不需要衛星信號的室內外無縫定位機制，將港口堆場的尋箱效率提升了驚人的 50% 以上。

歐洲數字集裝箱航運協會 (DCSA) 首席執行官 Thomas Bagge 在 2026 年 5 月的漢堡海運物流峰會上對這一技術突破給出了高度定調：“當我們在 2026 年解決了深海盲區與堆疊遮罩這兩個最後的資料黑洞，智慧集裝箱便不再是一個昂貴的硬體噱頭，而是消滅每年因滯港費與壓箱費 (Demurrage & Detention, D&D) 造成數十億美元無謂損耗的唯一解藥。”

醫藥冷鏈：從靜態記錄到動態預警

全球生物醫藥產業的結構性爆發為冷鏈物流帶來了前所未有的壓力。以 GLP-1 受體激動劑 (如風靡全球的司美格魯

肽等減重與降糖藥物)、mRNA 靶向腫瘤疫苗以及個性化細胞與基因療法 (CGT) 為代表的“第四代生物製劑”產能全開。這些高分子藥物如同極其脆弱的工藝品，對溫濕度的變化呈現出“零容錯”的嚴苛要求——哪怕是在轉運機坪上經歷了短暫的 15 分鐘高溫暴曬，或是遭遇了超出閾值的物理震動，都可能導致蛋白質結構不可逆的變性與失效。

根據全球醫藥智庫 IQVIA 聯合世衛組織 (WHO) 在 2026 年 4 月發佈的《全球生物製藥冷鏈彈性報告》顯示，2025 全年，全球因溫控失效與物流延誤導致的生物醫藥直接報廢損失高達 380 億美元。面對如此驚人的財務與醫療資源黑洞，傳統的醫藥冷鏈追蹤技術已經徹底宣告破產，一場由邊緣算力與多模態傳感驅動的“動態防禦戰”在 2026 年全面啟動。

靜態記錄的局限

在 2024 年及以前，醫藥冷鏈追蹤的主流方案是使用 USB 或非即時藍牙溫度記錄儀。這些設備被放置在保溫箱內，忠實地記錄下整個運輸過程中的溫度曲線。然而，這種被業界戲稱為“溫度屍檢 (Temperature Autopsy)”的模式存在一個致命的邏輯漏洞：它只能告訴你藥物是“怎麼死”的，卻無法在它“瀕死”前拉它一把。

當這批價值連城的疫苗從歐洲空運至中東，再由卡車轉運至醫院時，如果在機場中轉環節主動溫控集裝箱 (Active Container) 的壓縮機發生故障，溫度在兩個小時內從合規的 2°C-8°C 飆升至 20°C，傳統的靜態記錄儀一無所知。直到幾天後藥物抵達最終目的地，護士將 USB 插入電腦讀取 PDF 報告時，才驚覺整箱藥物早已報廢。這種“事後諸葛亮”式的監管，在單價成百上千萬美元的新型基因療法面前，是供應鏈管理層絕對無法承受的風險。

邊緣 AI 驅動的動態預警體系

為了將“事後破壞報廢”轉化為“事前動態搶救”，以 Sensitech、Controlant 以及 Roambee 為代表的溫控供應鏈解決方案商，在 2025 年底至 2026 年中全面推出了基於 Edge AI (邊緣人工智慧) 與 5G-A/LEO 多模態通信的下一代主動監測終端。這一技術飛躍不僅實現了資料的毫秒級即時上報，更賦予了追蹤終端“預測未來”的能力。

新一代的醫藥冷鏈監控不再僅僅是一個溫度計，而是一個融合了超低功耗溫濕度、高頻震動 (6 軸 IMU)、環境光照 (監測是否遭遇非法開箱或內包裝破損) 以及氣壓感測器的多維度智慧感知中樞。其核心的技

表：深度對比：傳統靜態記錄 vs. 動態介入體系

評估	傳統靜態記錄時代	動態介入追蹤體系 (Next-Gen Cold Chain)
感知與預測能力	單點被動記錄：僅監測當前溫度，無前瞻性。	多源融合預測：溫濕 / 震動 / 光照融合，Edge AI 提前 2-4 小時預測“溫度漂移”與越限風險。
網路通信與時效	極高延遲：到達終點插 USB 或連接特定局域網讀取，盲區長達數日。	零時差線上：利用 5G RedCap/LEO 低軌衛星，實現全球海陸空全天候狀態推流。
異常回應機制	“屍檢”模式：事後追責理賠，藥物徹底報廢，影響終端病患治療。	“急救”模式：中途觸發自動工單，地勤或司機緊急補充冷源或轉移入庫，成功阻斷損耗。
硬體載體與成本	拋棄型 / 定期回收型獨立設備，電池壽命短，需大量人工干預。	高度集成至智慧保溫箱 / 託盤中，結合微能抓取技術 (Ambient IoT) 實現多年免維護。

術殺手鐮在於內部署的 TinyML (微型機器學習) 熱漂移預測演算法。

在實際流轉中，邊緣端演算法會持續採集保溫箱內的溫度變化梯度，並結合外部環境溫度進行即時對比，向雲端控制塔 (Control Tower) 發出級別最高的“預測性紅色預警”。

這種“將預警點前置”的技術，徹底啟動了供應鏈的中途動態介入 (Mid-transit Intervention) 機制。

在 2026 年的現代醫藥冷鏈體系中，“動態介入”已經演化為一套高度自動化的標準作業程式 (SOP)。

當預測性預警觸發時，雲端 AI 會自動調取涉事集裝箱的即時精準座標 (依託我們前文所述的無縫融合定位技術)，並立即在周邊 5 公里範圍內匹配可用的救援資源。如果集裝箱正滯留於迪拜國際機場的高溫機坪，系統會自動向當地簽約的地勤服務商 (Ground Handlers) 派發緊急工單；地勤人員根據

終端發出的精準 BLE 尋向信號，在 15 分鐘內精準定位到該託盤，並迅速為其補充乾冰或接入地面備用電源 (Ground Power Unit)。如果是在長途公路運輸中遭遇冷鏈車製冷機宕機，系統則會果斷指令司機改變原有路線，緊急迫降至最近的合作冷庫進行物理隔離。

結語

在航空貨運領域，免基建的動能收集標籤與動態 Mesh 自組網，聯手徹底拔除了機場停機坪與機庫的信號黑箱；飛行智慧感知演算法的突破，更是以極其優雅的方式跨越了嚴苛的航空管制，實現了空陸無縫銜接。

在海洋運輸領域，低軌衛星與港口多模態定位的雙劍合璧，硬生生將百萬級智慧集裝箱的全球滲透率推高至 25% 的歷史性拐點。

在特殊的高價值冷鏈中，我們更是見證了邊緣 AI 如何賦予追蹤終端“預知未來”的能

力，讓供應鏈管理者從被動理賠的旁觀者，變成了中途力挽狂瀾的救火隊長。

當我們把數以億計的集裝箱、託盤、ULD 和醫藥冷藏箱全部連接上線，當位置、溫度、震動、光照與碳足跡資料以毫秒級的頻率 24 小時匯入雲端時，隨之而來的是規模令人窒息的“資料海嘯”。

傳統的物流控制台 (Control Tower) 與人類調度員，在這些 TB 級的異構時空資料面前已經徹底癱瘓。如果不能有效提煉這些資料，再精準的物理追蹤也只是毫無意義的數字垃圾。

面對日益動盪的全球地緣政治、頻繁的極端天氣以及錯綜複雜的關稅壁壘，究竟該由誰來接管這些海量的物理感知資料？ CTA