真空冷凍乾燥機監控系統設計

田景瑞*　　朱弘仁　　蔡明堂
正修技科技大學電機工程系

摘　要

本文主要目的是設計一套可商業化的實務型真空冷凍乾燥機監控系統(Vacuum freeze-dryer SCADA System)。透過設計一套高效能真空冷凍乾燥機監控系統，並且達到三個主要目的。他們分別是；第一，使得真空冷凍乾燥機精確地執行真空乾燥工作。第二，收集並記錄真空冷凍乾燥流程相關參數。本文首先收集真空冷凍乾燥機的相關資料，包括收集真空冷凍乾燥原理、基本機械結構與控制箱配電架構。真空冷凍乾燥機常稱為凍乾機，凍乾的脫水流程，不同於加熱使得產品的水分蒸發。凍乾是一種低溫的脫水過程，必須先使冷凍產品溫度降至極低的溫度。接著，降低冷凍空間的壓力讓產品的水分昇華達。最後，透過工作流體對產品適當的加熱以增強產品脫水效率。真空冷凍乾燥機的機械結構可以分成三個主要部分，它們分別是凍乾倉體、滷水主機與真空泵。凍乾倉體包含乾燥倉與凝結倉，它們是兩個相通的不銹鋼倉體。滷水主機包含壓縮機、滷水泵、撒水泵、冷卻風扇、冷卻水泵與加熱器。本文真空冷凍乾燥機的監控系統將採用具有網頁伺服器(Web Server)功能的智慧型監控系統(SCADA)。本文所採用之智慧型監控系統有別於傳統的資料採擷與監控(SCADA)系統，執行大數據分析及人工人工智慧決策。同時，本監控系統也可以平行地與不同工作平台交換資訊或存入獨立的其它資訊庫，也可輸出即時狀態於不同的行動設備，或以瀏覽器監視。

關鍵字: 真空冷凍乾燥，脫水，監控系統

The Design of Vacuum freeze-dryer SCADA System

Ching-Jui Tien*　Hung-Jen Chu　Ming-Tang Tsai
Department of Electric Engineering
Cheng-Shiu University
Kaohsiung, Taiwan 833, R.O.C.

ABSTRACT

The project will first collect relevant information of the vacuum freeze-dryer, which include the

principle of vacuum freeze-drying and the basic structure of a vacuum freeze- dryer and its power distribution cabinet. Vacuum freeze-drying is also called freeze-drying or low-pressure low-temperature drying. In domestic, most of people call a vacuum freeze-dryer a freeze-dryer or a lyophilizer. The dehydration process of vacuum freeze-drying is different from heating to make the product's moisture evaporate. First, reduce the temperature of the product to be dried to an extremely low temperature. Then, reduce the pressure in the freezer space to allow the product's moisture to sublimate. Finally, the product is appropriately heated through the working fluid to enhance the product dehydration efficiency. A vacuum freeze dryer can be divided into three main parts, which are the freeze-drying chamber, the brine unit and the vacuum pump. The vacuum freeze-dryer SCADA system will be designed to have a Web server function. The SCADA system will be a vertically integrated cloud service, the exchange of words and graphs, and control IoT equipment. This SCADA system will be used upward in cooperation with cloud services, which can perform big data analysis and artificial intelligence decisions. At the same time, the SCADA system can also exchange information with different working platforms in parallel, and the system can also collect information and control equipment of various controllers and IOT devices down.

Key Words: Vacuum freeze-drying, Dehydration, SCADA

一、前　言

真空冷凍乾燥法在食物上的應用，相傳最早起源於南美洲祕魯印加人對於馬鈴薯和其他農作物的冷藏儲存[1]。他們把農作物放置在馬丘比丘（Machu Picchu，其意是「古老的山」），因為山上的低氣溫可以使農作物冷凍。此外，高海拔的低氣壓可以使農作物所含的水分逐漸蒸發掉。由此看來，利用真空冷凍乾燥概念的始祖很可能就是印加人。在二次世界大戰期間，真空冷凍乾燥的應用主要是為了保存盤尼西林與血漿，之後才漸漸應用在食物保存上，因為真空冷凍乾燥食物的保存期限比添加防腐劑的效果長也較好。它的另一個特色是產品重量輕，因此被用來當作太空人食物的儲存技術。真空冷凍乾燥法是把冷凍、真空和乾燥 3 種技術結合起來，簡稱「凍乾」（freeze drying），又稱為「昇華乾燥」。主要是利用凍結和真空的技術移除食物、藥物或農牧產品中的水分，降低產品的溼度。經過真空冷凍乾燥後的食物、藥物和農牧產品，可以在室溫下長期保存而不至於腐壞，也可以在需要使用時加水讓它復原。有關真空冷凍乾燥發展近程：1994 年美國 Schoen 等人[2]首先利用電腦軟體針對產品計算真空冷凍乾燥過程中其溫度及壓力。接著收集真空冷凍乾燥實驗產品的實際溫度及壓力並加以比較，分析發現電腦估測值與實際相當接近。最後真空冷凍乾燥產品的外形完整與電腦預測結果相近。1994 年德國 Schelenz 等人[3]運用 X-Relay 的雷射量測技術去觀測裝於容器內的物質於真空冷凍乾燥過程中的凍結情況，發現物質本體和容器杯底的厚度將影響其凍結的結果。1997 年英國 Franks[4]使用計算機計算出真空冷凍乾燥過程中相關影響乾燥的變數，並配合熱化學與機械熱力學公式，經過多次的反覆實驗，結果順利驗證變數的影響程度。1998 希臘 Krokida 等[5]針對不同的農產品進行真空冷凍乾燥實驗，

利用壓力與產品的凍結溫度做交叉比對，結果顯示產品一開始的凍結溫度將明顯地乾燥的程度。1999 年德國 Heinzelmann[6]等探討魚油中的多元不飽脂肪酸使用一般乾燥法與真空冷凍乾燥法將其乾燥保存的品質差異，經由實驗發現採用進行真空冷凍乾燥法乾燥的魚油中的多元不飽脂肪酸具有良好的品質。1999 年 Chen[7]等人研究使用真空冷凍乾燥玫瑰花和康乃馨後保存效果，經實驗發現真空冷凍乾燥過程中不同的真空度將導致花瓣的顏色和花瓣的彈性。2001 年美國 Wolkers[8]等人進行血漿保存研究，其目的在於延長血漿中含血小板和血紅素的保存時效，以提高血漿的使用效率。2001 年印度 George 等[9]使用不同厚度的胡蘿蔔薄片進行真空冷凍乾燥實驗。利用數學建立模型來預測胡蘿蔔切薄片真空冷凍乾燥過程中水分等物質量轉移量的情形。2002 年瑞典 Brulls[10]等以藥瓶做真空冷凍乾燥實驗。研究的重點在於分析藥瓶底部曲率、藥瓶的填充量、凍乾機倉體內的壓力與藥倉體內藥瓶放置棚板上的位置等這些因素對藥瓶內物質昇華時的熱轉移量和熱累積量。2001 年徐偉智[11]提出利用程式控制器（PLC）搭配資料採集與監控系統（SCADA）技術的應用搭配運用物聯網（Internet of Things, IOT）技術服務導入產業自動化，可提升控制自動化達成控制智能化。2019 年石明弘[12]提出工業物聯網(IIoT)是將具有感知、監控能力的感測器與機器結合，透過機器間的通訊與互動，將採集到的數據經過處理分析後傳送至工廠控制中心制定生產策略，進而提高生產效率與降低成本，最終實現真正的工業設備資訊化。2019 年王尹廷[13]提出利用感測器進行預防性診斷，將感測器數據即時上傳雲端，發送警訊給使用者。另外，架設可以顯示即時數據的動態網頁平台，並運用網頁或行動裝置 App 等來傳遞相關通知或警訊，達到一個結合物聯網的預防性診斷系統。2015 年 J. Lee 等人[14]對各類產業而言，使用先進完整的資訊分析與計算，能更有效率地執行工作、團隊協同合作與彈性調度資源。而此種改變現有製造業樣貌的現象即為工業 4.0。

二、真空冷凍乾燥

物質的狀態與其溫度和壓力有關，物質有固、液、汽三態。水（H2O）的三相狀態平衡圖如圖 2-1 示所。在圖 2-1 中 OA、OB、OC 三條曲線分別代水和冰、水和水蒸汽、水和冰蒸汽等兩相共存狀態時的壓力和溫度之間的關係。此三條曲線分別稱爲溶化線、沸騰線和昇華線。將圖 2-1 圖面分爲I、II、III三個區域，並分別稱爲固相區、液相區和氣相區。箭頭 1、2、3 分別表示冰溶化成水，水汽化成水蒸汽和冰昇華成水蒸汽的過程。曲線 OB 的頂端有一點 K 稱爲臨界點，其溫度爲 374℃。若水蒸汽的溫度高於其臨界溫度 374℃時，無論壓力如何增加，水蒸汽也無法變成水。三條曲線的交點 O，爲固、液、汽三相其存的狀態，稱爲三相點，其溫度爲約 0.01℃，壓力約爲 610 Pa。在三相交會點以下(由縱軸觀察)，不會有液相存在。 若將冰的壓力保持低於 610 Pa，且給冰加熱，則冰就會直接變成汽相，而不經液相，這一固態相直接轉液態相過程稱爲昇華。

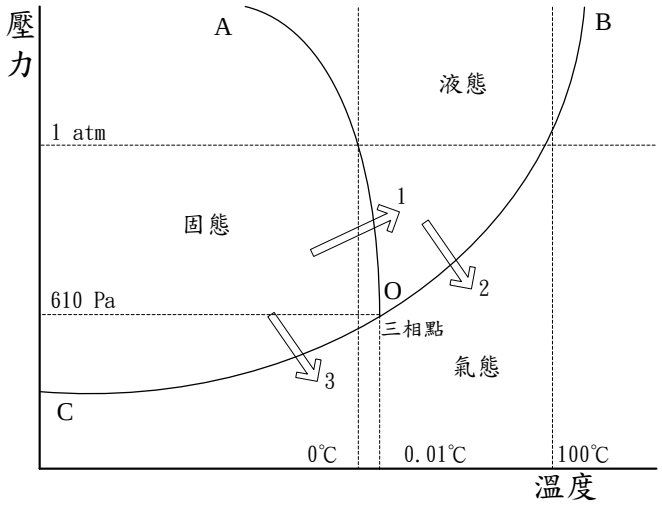


圖 2-1 水的三相平衡圖

脫水乾燥是保持物質不腐敗的方法其中之一。傳統乾燥有許多方法，如曬乾、煮乾、烘乾、噴霧乾燥和真空乾燥等。但這些乾燥方法都是溫度在 0℃以上或者更高的溫度環境下進行。但是，這些傳統乾燥所得的產品，可能導致體積縮小、材質變硬。甚至，有些物質發生了氧化，因而材質內一些不穩定化學成分，大部分可能會損失掉。例如蛋白質、維生素這些熱敏性的物質，將會發生性質改變；因此，產品中的微生物會因為這些傳統乾燥方法失去生物活力。傳統乾燥後的物質不易在水中溶解和外觀或性能不能恢復；因此，產品乾燥後的與乾燥前在形狀上相比也會有很大的差別。

真空冷凍(凍結)乾燥是一種能讓產品外型保持原樣的乾燥方式。真空冷凍乾燥是先將含水材料凍結到混合含水材料共晶點溫度以下，使水分變成固態的冰。然後，在較高的真空度下，使冰直接昇華爲水蒸氣，再用真空系統中的水汽凝結器將水蒸氣冷凝並可能在管排結成冰。真空冷凍乾燥需要的極低水汽壓力即是靠真空的狀況下達到。含水水分的材料因為水分在低溫低壓下昇華，從而獲得乾燥製品的技術。真空冷凍乾燥後，物質本身留在凍結的冰架子中，從而使得乾燥製品不失原有的固體骨架結構，保持物料原有的形態，且製品復水性(Rehydration)或稱再水合性極好。乾燥過程是水的物態變化和移動的過程，這種變化和移動發生在低溫低壓下。因此，真空冷凍乾燥的基本原理就是低溫低壓下傳質傳熱的物理作用。避免了化學、物理和酶的變化，從而確保了製品物性在保存時不易改變。相較一般的曬乾、烘乾、煮乾、噴霧乾燥，真空冷凍乾燥有許多突出的優點，如表 2-1 所示：

表 2-1 真空冷凍乾燥的優點

優點類別	優點說明
保留營養與防止變質	1. 不會發生變性或失去生物活力。 2. 食品的營養成分和風味損失很少。 3. 揮發性成份和受熱變性的營養成分損失很小。 4. 微生物的生長和酶的作用無法進行。因此能保持原來的性狀。 5. 在真空下乾燥，物料處於高度缺氧狀態，易氧化的物質得到了保護。 6. 乾燥能排除 95-99%以上的水分，使乾燥後產品能長期保存而不變質。
保持外觀	1. 由於材料在昇華脫水以前先經凍結，形成穩定的固體骨架，所以水分昇華後，體積、形狀幾乎不變，保持了原來的結構。 2. 真空冷凍乾燥後的物質疏鬆多孔，呈海綿狀，加水後溶解迅速而完全，具有很理想的速溶性和復水性。

2.1 真空冷凍乾燥機流程

本文主要目的是設計一套實務型的真空冷凍乾燥機監控系統，真空冷凍乾燥機系統之設備依任務可簡單區分為滷水機、冷卻水塔、滷水槽組、真空泵、灑水泵、乾燥倉與凝結倉，如圖 2-2 所示。其任務說明，如表 2-2 所示。真空冷凍乾燥機系統依工作流體，可區分為冷媒管路、冷卻水管路、滷水管路、真空管路、熱水管路與排水管路。管路任務說明，如表 2-3 所示。

表 2-2 真空冷凍乾燥機系統之設備

項次	設備名稱	任務說明
1	滷水機	滷水機的任務是透過冷媒對滷水及凝結倉內之空間進行降低溫。
2	冷卻水塔	冷卻水塔的任務是透水散熱風將過滷水機的高溫高壓冷媒的熱量散熱到大氣中。
3	滷水槽組	滷水槽組的任務是藉由滷水帶走預凍階段乾燥倉內產品的熱量以及在解析乾燥階段對產品加熱以加速除去產品的殘餘水分。
4	真空泵	真空泵的任務是將乾燥倉與凝結倉的空氣抽離到倉外，讓倉內的可以保持一定的真空度。
5	乾燥倉	真空冷凍乾燥的乾燥倉其主要工作是提供低溫低壓環境使待乾燥產品於降溫至共晶點溫度以下，達到共晶點溫度以下,使水分變成固態的冰。
6	凝結倉	凝結倉內裝置有冷凍管排，管排內有常溫高壓冷媒。乾燥倉內的空氣由於真空泵的汲取動作，空氣的水分經過冷凍管排將被管排內的冷媒吸取熱能並凝結成冰附著於管排表面上。
7	灑水泵	在真空冷凍乾燥流程完成停機後，凝結倉內冷凍管排上的冰塊可藉由灑水泵噴灑溫水將融冰，再由排水管將冰水排出倉外，為下一次真空凍乾乾燥做準備。

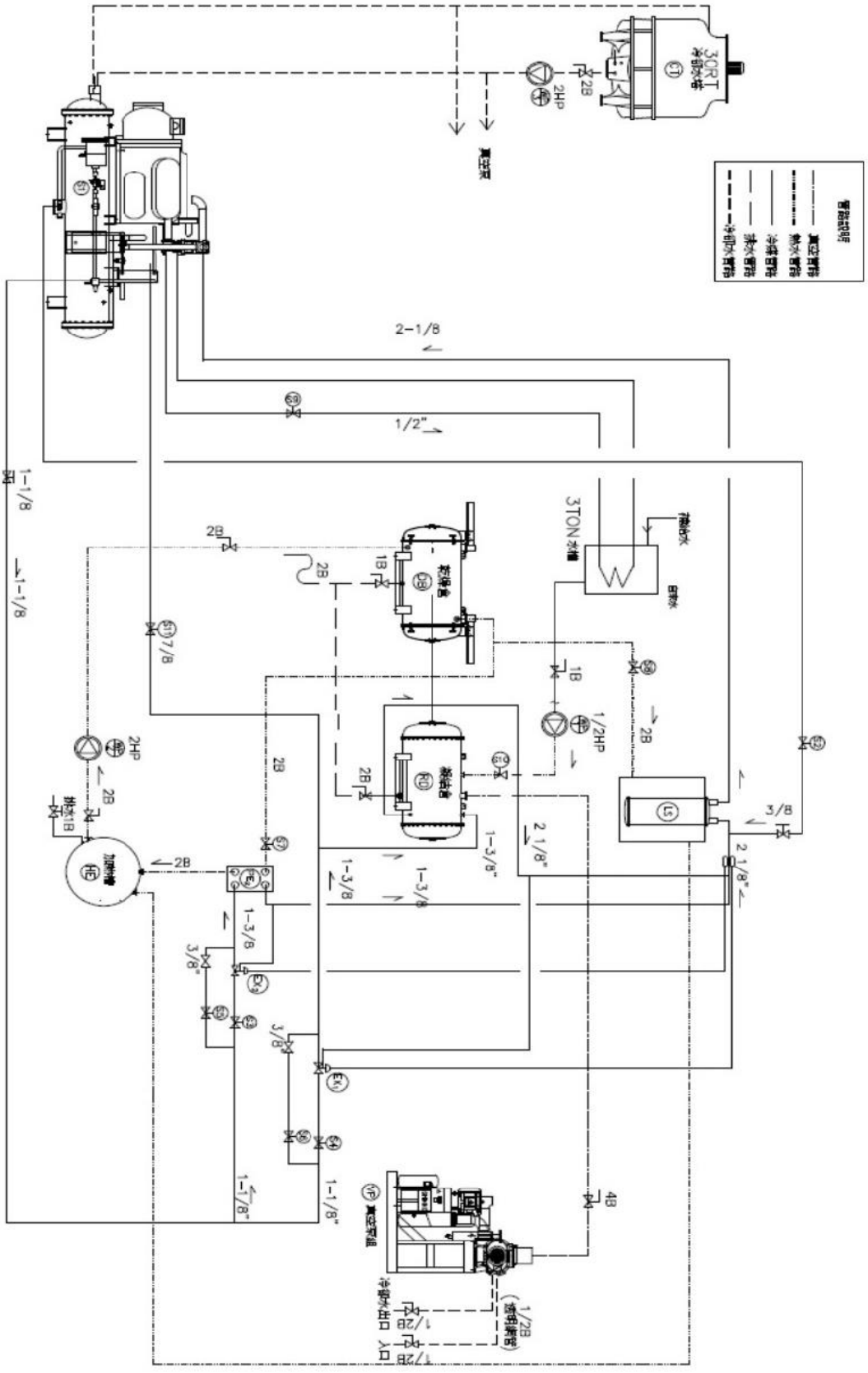


圖 2-2 真空冷凍乾燥系統流程圖

表 2-3 真空冷凍乾燥機系統之管路

項次	設備名稱	任務說明
1	冷媒管路	提供真空冷凍乾燥機的冷媒進行冷凍循環的路徑。
2	冷卻水管路	將真空冷凍乾燥機運轉時所產生的熱量藉由水帶到外氣之中。
3	真空管路	提供真空泵將倉體內空氣排出真空冷凍乾燥機之外，大氣之中。
4	滷水管路	提供滷水泵將滷水輸送到乾燥倉與冷媒液氣分離器循環路徑。
5	熱水管路	提供灑水泵將熱水輸送到冷凝倉路徑，將冰塊溶解。
6	排水管路	提供乾燥倉與冷凝倉溶冰和清洗後將水排出。

2.2 真空冷凍乾燥機配電系統

本文的配電系統包含 1 台 30 HP 壓縮機、1 台 2HP 滷水泵、1 台 0.5HP 撒水泵、1 台 2HP 冷卻水泵、1 台 0.5HP 冷卻風扇、2 台 5HP 真空泵及 1 台 5.5KW 加熱器。配電系統單線圖如圖 2.3 所示。

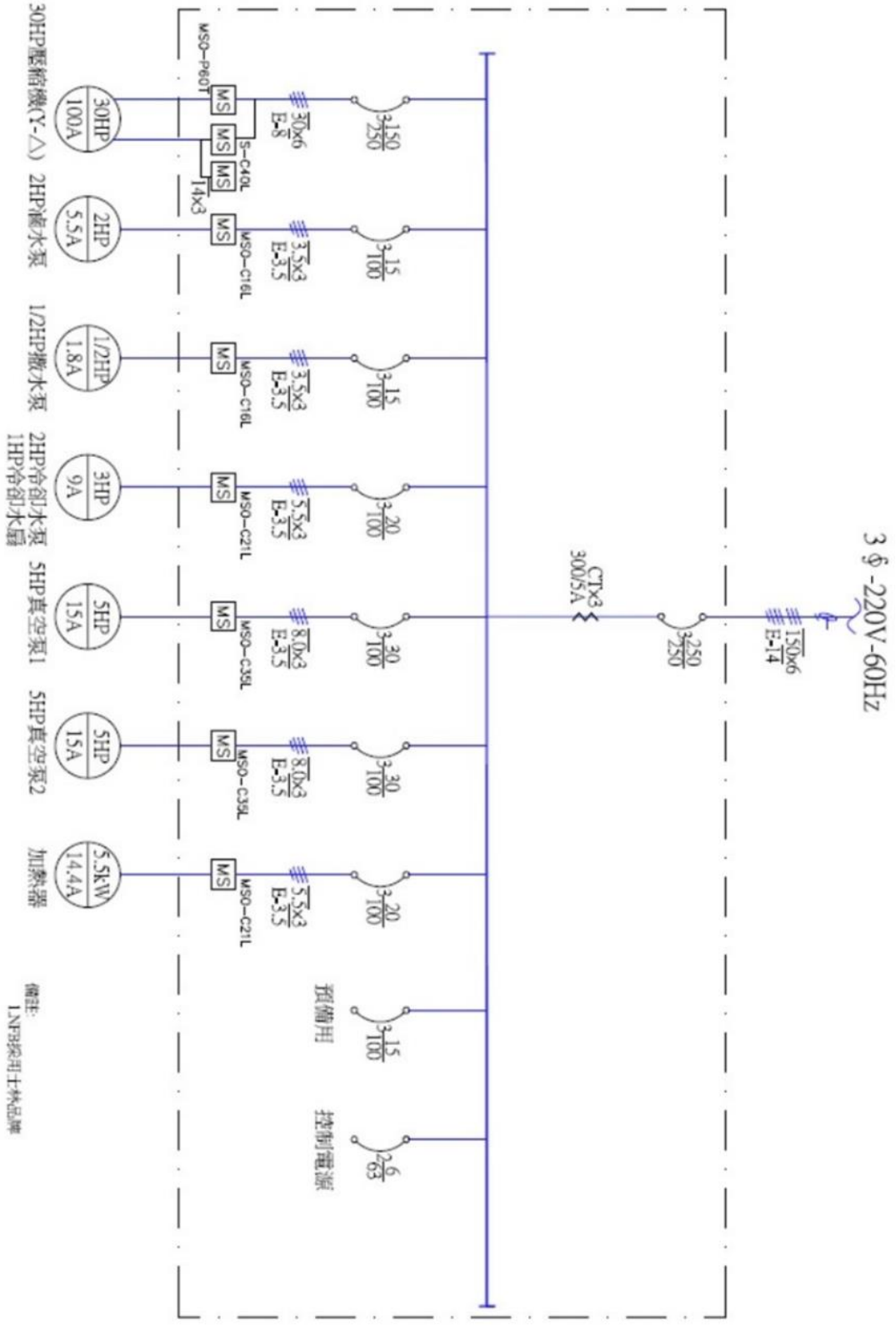

3 ϕ -220V-60Hz
150x6
E-14
250
250
CTx3
300/5A
150
250
30x6
E-8
15
100
3.5x3
E-3.5
15
100
3.5x3
E-3.5
20
100
5.5x3
E-3.5
30
100
8.0x3
E-3.5
30
100
8.0x3
E-3.5
20
100
5.5x3
E-3.5
15
100
2.6
63
MSO-P60T
MS
MS
MS
MS
5-C40L
4x3
MSO-C16L
MSO-C16L
MSO-C21L
MSO-C35L
MSO-C35L
MSO-C21L
30HP
100A
2HP
5.5A
1/2HP
1.8A
3HP
9A
5HP
15A
5HP
15A
5.5kW
14.4A
30HP壓縮機(Y-△)
2HP渦水泵
1/2HP潛水泵
2HP冷卻水泵
1HP冷卻水扇
5HP真空泵1
5HP真空泵2
加熱器
預備用
控制電源
備註:
1.NFB採用士林品牌

圖 2-3 動力配電單線圖

2.3 真空冷凍乾燥機監控系統

本文採用套裝軟體-研華 WebAccess 與西門子 DDC(Direct digital controller)作為監控系統的主要架構。本文的監控系統主要是以集線器將控制器與人機介面(觸控電腦)的 Modbus TCP/IP 匯集並進入監控主的監控系統。控制器透過 RS485 下接動力盤及真空計，人機介面下接集合式電表。監控系統架構如圖 2-4 所示。DDC 可以視為是一種分散式(Distributed control)與可程式(Programmable)控制器，具備小點數、獨立控制、快速反應、容易編成的特性。相較於傳統的 PLC 方案， DDC 可以就近安裝於設備旁，可以增加通訊安全及節省線路費用。

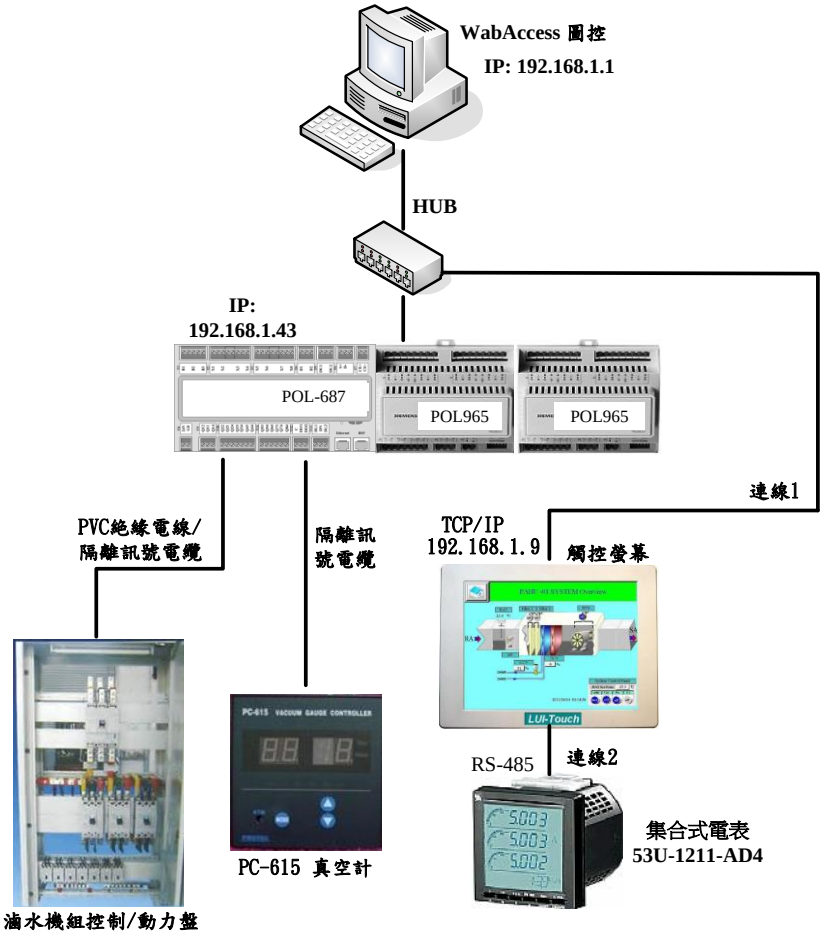


圖 2-4 監控系統架構圖

DDC 由於可以獨立控制，相較於傳統 IO 模組，降低通訊線路或異常造成的風險，更可有效減少通訊負荷，增加控制的即時性。而 DDC 程式的編輯器簡易上手快，完整的控制函數降低程式編程門檻，因此不需要專業的程式工程師就可以完成程式的編輯與修改。DDC 除了具備基本的算數與邏輯運算外，還有數學運算、定時控制、PID 運算、溫/溼度/焓值等空調運算等，可以快速滿各類控制需求。DDC 控制器優點歸納如下：

1. 多工操作，允許在操作同時進行其它運算工作。
2. 降低保修成本，具備自我故障診斷功能，不必維修人員新臨現場。

3. 優越控制，DDC 可實現各類邏輯功能，配合系統需求執行精確控制。

4. 高度靈活控制，依系統需求重新編寫程式，不必更換硬體。

5. 適用性高，DDC 可取代傳統控制組件，適用於各類系統。

真空冷凍乾燥機監控系統利用直接數位控制器度(DDC)採集收集各滷水機高壓壓力、低壓壓力、高壓吐出溫度、低壓回流管溫度、冷媒入口溫度、滷水出水溫、滷水入水溫、冰水水溫、冷卻水水溫、電壓、電流與外氣溫度等等運轉數據資料。

有別於傳統的資料採擷暨監控(SCADA)，本文採用工業物聯網應用軟體平台，WebAccess 監控軟體(研華公司產品)，以其自有的豐富的通訊驅動程式以及透過網路強大的遠端管理維護等特性。該應用軟體可收集各種設備所提供的資料，包含各行業通用的通訊協定、傳統的工業通訊設備、標準的資料庫、物聯網裝置等。透過程式運算等分析手法透過警報管理、報表、曲線等方式做本地端的數據處理。跨平台的 Dashboard 圖形界面，簡單利用內建的長條圖、曲線圖、圓餅圖等分析圖形或者事件記錄 widget 來展示資訊處理結果，讓用戶直接使用手機、平板等移動裝置，透過瀏覽器就可以隨時隨地查看即時狀態、追溯歷史記錄。可以輔助即時做決策。

WebAccess 具備開放介面與標準資料庫作為媒介，整合研華內部軟體套件，並與企業軟體 MES 系統、ERP 系統進行資料交換及整合，在工廠自動化、金屬加工、電力與能源、水處理、智慧建築以及石油與天然氣等各行業發展垂直應用。為了符合現階段物聯網及工業 4.0 服務的需求，WebAccess 也可以結合雲服務行業夥伴提供私有雲解決方案，透過 MQTT 將資料上傳到雲端 WebAccess，存入大數據資料庫，在雲端平台上發展大數據分析及設備預防保養等應用。

2.4 真空冷凍乾燥流程

真空冷凍乾燥機的控制流程邏輯可劃分為三個主要階段，第一階段：凍結階段(亦稱作預凍階段) 、第二階段：昇華階段(Sublimation, 級乾燥 MD)與第三階段：解析乾燥階段(Desorption, 二級乾燥 SD)。第一階段的控制邏輯是要讓凍乾的產品的溫度降溫至約-15℃，冷媒改走凝結倉循環路徑，凝結倉溫度降至-20℃，則第一階段完成。第二階段的控制邏輯是要控制乾燥倉與凝結倉可達-40℃，當產品溫度到達設定時，則第二階段完成。第二階段的控制邏輯與第一階段相同，但是其滷水與產品目標溫度設定不同。控制本文流程圖所示各溫度及時設定值，均為開放式的設計，可以由真空冷凍乾燥系統之人機介面輸入。

真空冷凍乾燥首先將含有大量水分的材料降溫冷凍到該材料的共晶點溫度以下，使其水分凍結成固態的冰。共晶點是物料中所含水分完全凍結時的溫度。材料凍結到共晶點溫度以下，使材料內的水分會變成固態的冰，然後在較高的真空度下，可以使冰由固態直接昇華爲水蒸氣，再用真空系統中的水汽凝結器(凝結倉)將水蒸氣冷凝。乾燥過程是水的相態變化和移動的過程。這種變化和移動發生在低溫低壓下。因此，真空冷凍乾燥的基本原理就是低溫低壓下進行深度熱傳。

2.4.1 預凍階段(Pre-Freezing Process)

真空冷凍乾燥處理的第一步驟為預凍，其主要作用如下，分別為(1) 將預凍材料降溫至共晶點溫度以下使得的材料內水分形成冰晶，將水由材料中分離而出，(2)確保材料的冰晶格(matrix) 間質區（interstitial region）水的流動性趨近於零，已完全凍結材料表表沒有水在其間流動。(3) 確保材料具備有均質的冰晶格，可使材料有足夠的開孔率，以利在下一階段的乾燥過程中，水汽昇華時有最小的流動阻力。若材料沒有完成預凍處理就執行抽真空，則在乾燥倉內的材料到達沸騰壓力時，材料的水分會產生沸騰的現象。因為沸騰的關係，材料會因為水沸騰的關係而有突沸現象產生，材料水分產生劇烈蒸發液噴出在表面凍結，如此也會導致材料的表面凹凸不平，材料結構破壞。反之，若材料在預凍階段可以降溫到共晶點溫度以下，則進行乾燥可以讓材料保持最佳乾燥特性。如果材料沒有完全結晶在乾燥階段時，溫度上升到熔點時，則產品會發生熔化，乾燥後的產品將發生體積縮小、出現氣泡與顏色加深。預凍階段監控畫面如圖 2-5 及圖 2-6 所示。預凍階段可敍述如下：

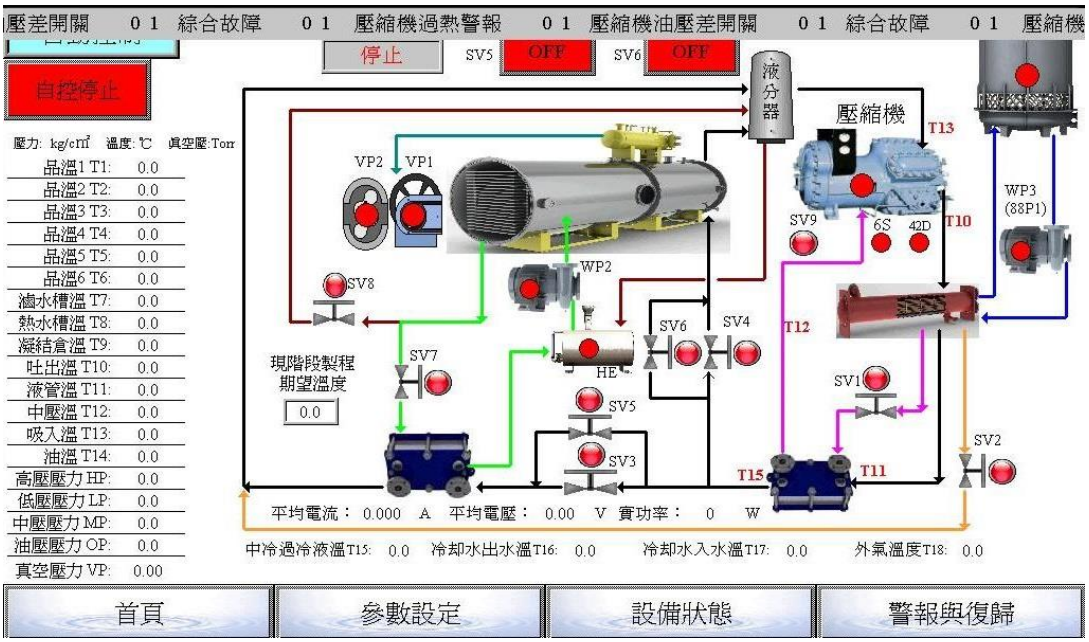


圖 2-5 真空冷凍乾燥系統流程監控畫面

1.啟動冷卻水泵(WP3)及冷卻水塔風扇(CT)。

2.延遲時間到後，打開滷水泵循環電磁閥 SV7 及滷水泵 WP2。

3.延遲時間到後，壓縮機啟動。高壓吐出溫度 T10 若高於設定值，則液噴電磁打開(ON)以降溫。高壓吐出溫度 T10 若低於設定值則液噴電磁關閉(OFF)。熱水槽溫度若低於設定值，則熱水加熱電磁閥打開(ON)。熱水槽溫度若高於設定值，則熱水加熱電磁閥關閉(OFF)。

4.延遲時間到後，打開中壓液噴電磁閥 SV1(ON)。

5.延遲時間到後，打開滷水冷媒電磁閥 SV3(ON)。

6.判定品溫 T1~T6 是否到達設定值。若品溫到達設定值，SV3 關閉(OFF)；凝結倉冷媒電磁閥。



圖 2-6 真空冷凍乾燥系統訊息監控畫面

2.4.2 昇華乾燥階段(Primary Process, MD)

初級乾燥或稱昇華乾燥。真空冷凍乾燥材料的乾燥可以分為兩階段，在材料內的固態冰消失前，稱為初級乾燥。材料經過上述預凍階段後，已經完全變成凍結的材料，需要以下三個條件才能昇華：(1)真空冷凍乾燥倉內必須保持較低真空，在低溫下飽和蒸氣壓須大於乾燥倉內的水蒸汽分壓才可開始昇華。(2)凝結倉的溫度須低於已凍結之料才能使水分由材料內昇華出來，水分在通過冷凝盤管時會被補獲並冷凝成冰霜，如此也可延長真空幫浦的壽命。(3)為了保持材料內冰的持續昇華，抽氣速率與真空度必須控制在適當範圍。另一方面，也必須供給材料適當熱量以利水分昇華。由上述可知真空乾燥機腔體的真空度與昇華速率有相當的關聯性。已知氣體分子的平均自由徑(λ)與壓力(P)成反比。因為在常壓下 λ 值很小，所以昇華後的水蒸氣分子很容易碰撞到其他氣體分子；但當壓力下降至 0.1 Torr 時，平均自由徑(λ)將放大 105 倍，因而使水分昇華的速度加快，故真空腔體真空度必須維持一定低值以下。在初級乾燥階段，雖然材料內的冰晶已完全消失，但為了確保材料內 90%以上水分昇華，需保持一段時間再進行第二級乾燥。昇華乾燥階段監控畫面如圖 2-7 所示。初級階段可敍述如下：

1.判定凝結倉內溫度 T9 是否到達設定值。若 T9 到達設定值，油封真空泵 VP1 啟動(ON)。

2.判定乾燥倉內真空度否到達第一階段設定值。若到達設定值，魯式真空泵 VP2 啟動(ON)。

3.判定滷水溫度 T7 是否高於設定值。若高於 設定值則乾燥倉滷水循環電磁閥 SV8 打開

(ON)，輸出滷水至液分器降溫。若否則預凍滷水循環電磁閥 SV7 打開。若 T7 低於設定值則預凍滷水循環電磁閥 SV7 與滷水槽加熱器打開(ON)。

4.判定品溫 T1~T7 是否都到達設定值。若到達設定值，則進入第二階段乾燥處理；若否，則重復 1~3 步驟直至 MD 階段預設的時間已到，即使 T1~T7 沒有全部達到設定溫度。



圖 2-7 昇華乾燥階段各項設定監控畫面

2.4.3 解析乾燥階段(Secondary Process, SD)

在完成初級乾燥後，便可進行第二級乾燥處理解析乾燥階段，第二級乾燥過程最主要的任務就是去除材料中所殘留的水分。經過初級乾燥過程後，材料的水分已被除掉 90%，而第二級乾燥主要目的就是除盡材料中剩餘的 10%。剩餘的水分其中包括了化合物結晶水、表面與毛細作用吸附的水分等。因為各種作用力的束縛其乾燥速度明顯下降。因此，提高材料溫度於其共晶點以上，但不致於發生融化，可以促進殘餘水分氣化。但提高的溫度不能超越材料極限溫度，否則材料的穩定性、營養份含量會因高溫而下降，此階段棚板的溫度控制在 0~30℃。當材料的溫度接近棚板的極限溫度時，第二級乾燥過程則結束，到此整個真空冷凍乾燥過程結束。解析乾燥階段可敍 述如下：

1.判定滷水溫度 T7 是否高於設定值。若高於 設定值則乾燥倉滷水循環電磁閥 SV8 打開(ON)，輸出滷水至液分器降溫。若否則預凍滷水循環電磁閥 SV7 打開。若 T7 低於設定值則預凍滷水循環電磁閥 SV7 與滷水槽加熱器打開(ON)。

2.判定品溫 T1~T7 是否都到達設定值。若到達設定值，則結束真空冷凍乾燥準備關機；若否，則重復 1~2 步驟直至 SD 階段預設的時間已到，即使 T1~T7 沒有全部達到設定溫度。

3.真空冷凍乾燥結束。

4.油封&魯式真空泵關閉(OFF)。

5.滷水加熱器關閉(OFF)。

6.延遲時間到後，電磁閥 SV1、SV3 與 SV4 關閉(OFF)。

7.判定低壓壓力是否低於設定值，若是則關機。

8.壓縮機關機。

9.延遲時間到後，滷水泵 WP2 關閉(OFF)。

10.延遲時間到後，預凍滷水循環電磁閥 SV7 與乾燥倉滷水循環電磁閥 SV8 關閉(OFF)。

11.延遲時間到後，冷卻水泵(WP3)及冷卻水塔風扇(CT)關閉。

12.延遲時間到後，系統關閉。

三、真空冷凍乾燥實驗

本文將分別以芒果、波蘿密、鳳梨作為真空冷凍乾燥的實驗材料，以驗證本文真空冷凍乾燥監控系統。蔬果在開始進行真空冷凍乾燥第一階段預凍前，我們必須對材料先進行消毒。目前常用的方式有氣體殺菌法、高溫殺菌法與輻射殺菌法。本文利用殺青作為乾燥前的消毒工作，同時為了避免乾燥失敗，材料厚度不宜太厚。

本實驗首先是將已消毒完成的材料平置於棚板上圖 3-1 所示，並將感溫棒置入於材料內以量測材料的品溫。棚板是熱交換器型式的一種，在其腔體內有彎彎曲曲路徑使降溫或加熱流體(滷水)在內流動與待乾燥材料進行熱交換。



圖 3-1 乾燥材料置於棚板上

預凍主要目的是將自由水凝固成冰晶，以保持材料進行乾燥時，材料形體不會發生縮減或崩塌，也可避免在抽真空時不會因為水分沸騰而致使乾燥後產品外表的不美觀。所以預冰過程需要急速凍結的方式進行，溫度降越低越快越好可使產品內部的冰晶顆粒變小而多，不會撐破細胞膜而改變產品在乾燥後的風味。但是，過低的溫度則會拉長乾燥的時間。一般而言，材料中心溫度在-18℃左右。完成預凍階段後即進行昇華乾燥(也稱第一階段乾燥)。將凍結後的產品置於密閉的低真空度的倉體中供給熱源。因為在真空下熱對流會變得比較差，提供穩定的熱源供給於產品，乾燥時間會明顯縮短；而過多的熱源則產品會出現崩解的現象，造成乾燥後的品質大打折扣。由材料昇華而出的水分會被吸附在凝結倉的低溫冷凝盤管上並凝結成冰霜，如圖 3-2 所示。昇華階段完成後，接著行解析乾燥(第二階段乾燥)，在第一接段乾燥後，殘存的水分強力吸附在昇華後留下的空洞管壁週遭，因此需提高供熱溫度以利解析出來的。圖 3-3 與圖 3-4 分別為昇華乾燥與解析乾燥的鳳梨成品。由圖 3-3 可看出，只有昇華乾燥處理的鳳梨仍包含不少水分，而做完解析乾燥的鳳梨則明顯更加乾燥。圖 3-7、圖 3-8 與圖 3-9 為鳳梨真空冷凍乾燥實驗時之各參數歷史曲線監控畫面，在不同取樣間隔及時間，對不同環境之下乾燥實驗時之監控畫面。



圖 3-2 凝結倉冷凝盤管



圖 3-3 昇華乾燥後的鳳梨



圖 3-4 解析乾燥後的鳳梨



圖 3-5 真空冷凍乾燥後的芒果



圖 3-6 真空冷凍乾燥後的波蘿密

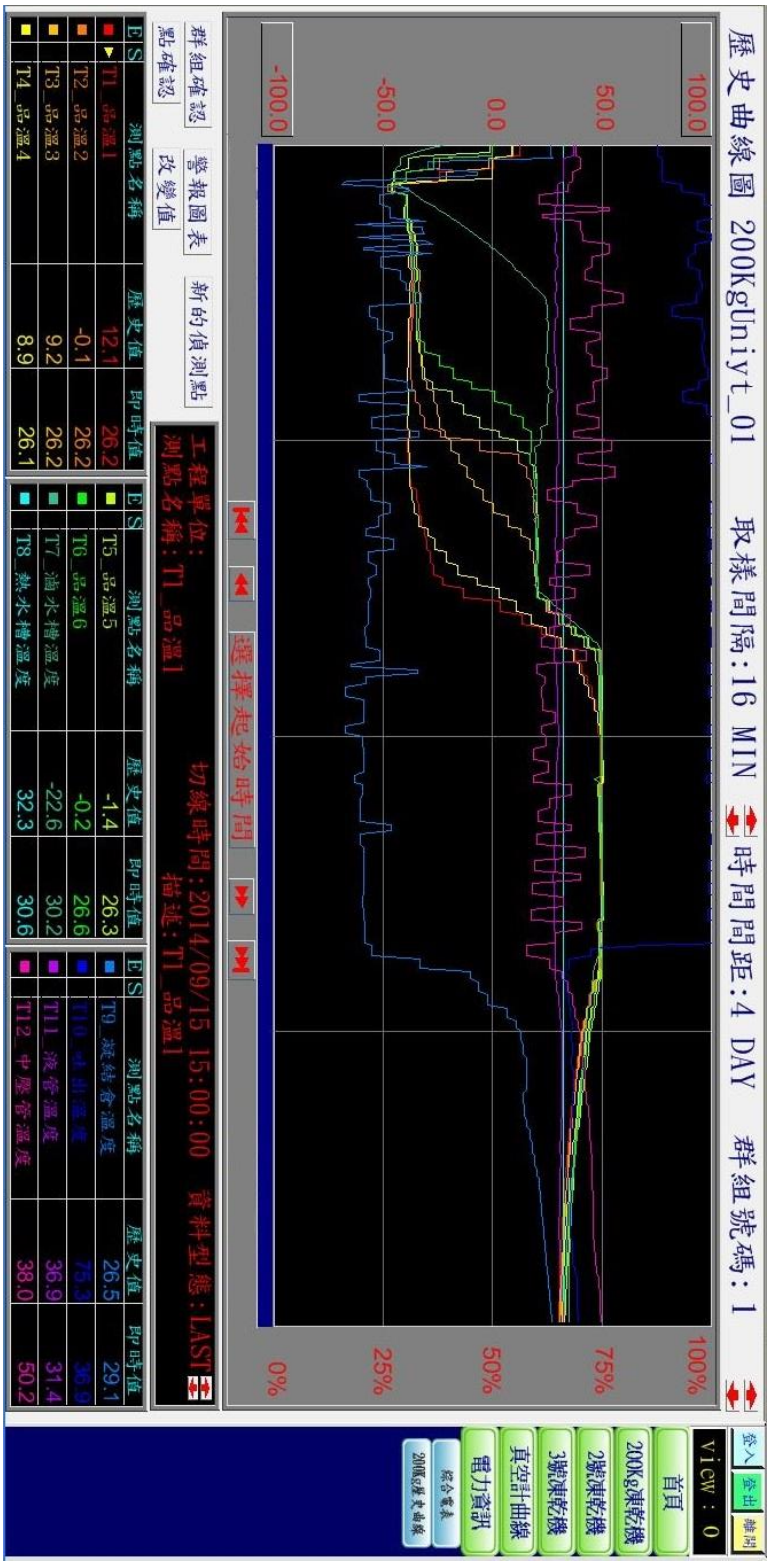


圖 3-7 真空冷凍乾燥系統歷史曲線監控畫面-A



圖 3-8 真空冷凍乾燥系統歷史曲線監控畫面-B

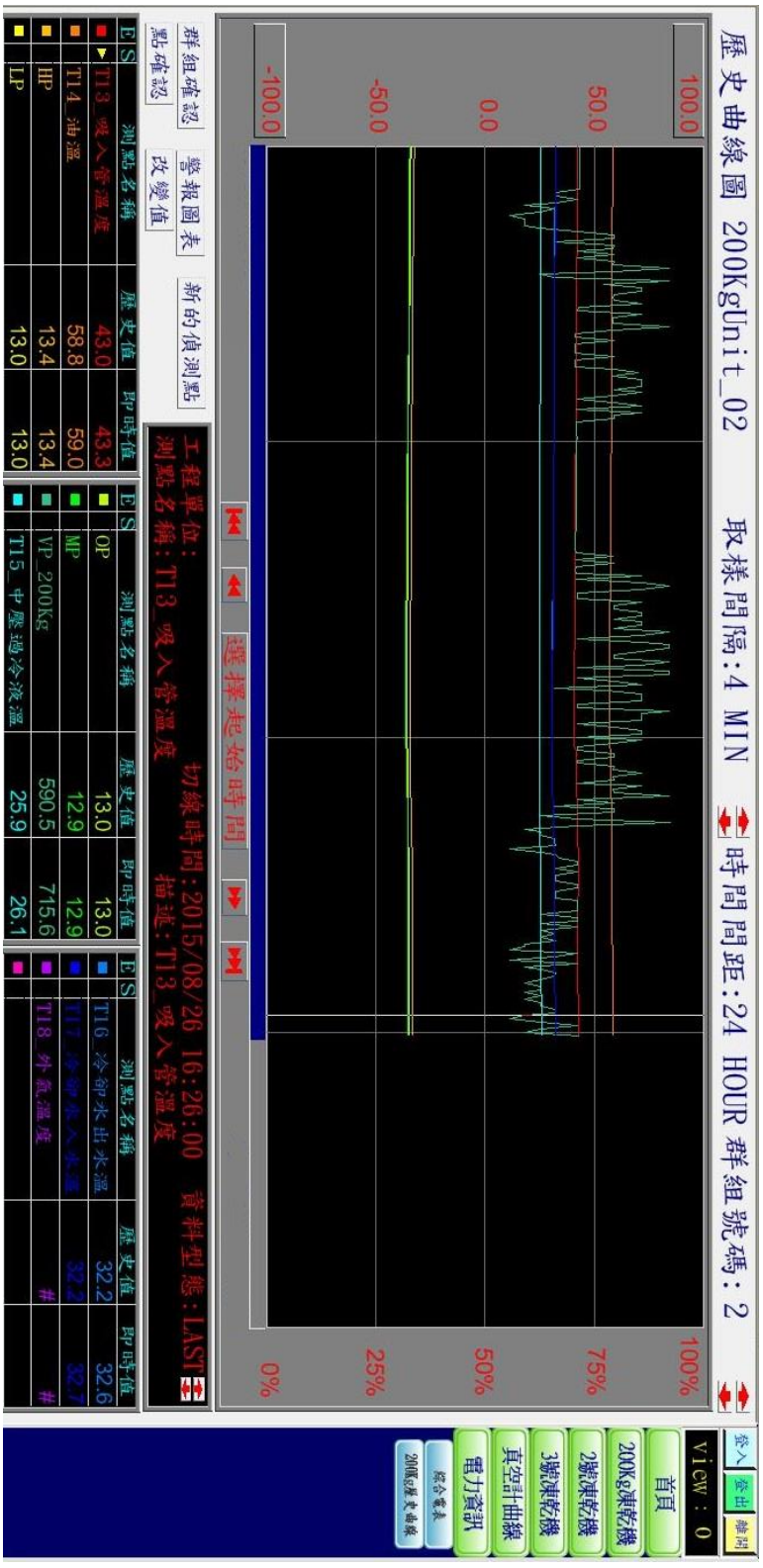


圖 3-9 真空冷凍乾燥系統歷史曲線監控畫面-C

四、結　論

本文採用雙段壓縮機使系統蒸發溫度達到-50℃以下，可使產品凍結溫度可達到-40℃~-45℃之間，系統管路上增加了板式熱交換器使控制棚板加熱量的滷水可以與冷媒做熱交換而可得到穩定的棚板加熱量。另一方面，透過監控系統的歷史記錄曲線，發現棚板加熱量過高，使凍乾物品造成塌陷，如此擋住了水分析出的通路，而拉長了凍乾製程的時間。因修改後的系統凍乾物品無崩解現象發生，在乾燥過程相當順利，水分析出的通路也未被阻擋住，因此凍乾製程時間也因此而大大的縮短。由此可知監控系統具有改善便提高設備的性能的功能，如此可減少不必要能源的浪費，並提高凍乾物的品質。

參考文獻

1. 科技大觀園，冷凍真空乾燥取自 https://scitechvista.nat.gov.tw/c/mPke.htm..
2. Macro P. Schoen, Bryan K. Braxton, Larry A. Gatlin, Raymond P. Jefferis, “A simulation model for the primary drying phase of the freeze-drying cycle”, International Journal of Pharmaceutics, Vol.114, pp.159-170,1995.
3. Gerlinde Schelenz, J. Engel, H. Rupprecht, “Sublimation during lyophilization detected by temperature profile and X-ray technique”, International Journal of Pharmaceutics, Vol.113 , pp.133-140 ,1995.
4. Felix Franks, “Freeze-drying of bioproducts: putting principles into practice”, European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, Vol.45, pp.221-229 ,1998.
5. M. K. Krokida, V. T. Karathanos & Z. B. Maroulis “Effect of Freeze-drying Conditions on Shrinkage and Porosity of Dehydrated Agricultural Products” Journal of Food Engineering, Vol.35, pp. 369-380 ,1998.
6. Katrin Heinzelmann, Knut Franke, “Using freezing and drying techniques of emulsions for the microencapsulation of fish oil to improve qxidation stability”, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, Vol.12, pp. 223-229 ,1999.
7. Wei Chen, Karen L.B. Gast, Sheri Smithey, “Yhe effects of different freeze-drying processes on the moisture content, color, and pfysical strength of roses and carnations”, Scientia Horticulturae, Vol.84 , pp.321-332 ,2000.
8. Willem F. Wolkers, Fern Tablin, John H. Crowe, “From anhydrobiosis to freeze-drying of eukaryotic cells”, Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Vol.131, pp.535-543 ,2002.
9. Fames P. George, A.K. Datta “Development and validation of heat and mass transfer models for freeze-drying of vegetable slices” Journal of Food Engineering, Vol.52, pp. 89-93 ,2002.
10. M. Brulls, A. Rasmuson, “Heat transfer in vial lyophilization”, International Journal of Pharmaceutics, Vol.246, pp.1-16 ,2002.
11. 徐偉智，「傳統釀酒廠之 SCADA 架構應用」，國立高雄第一科技大學，碩士論文，2001。

12. 石明弘，「工業物聯網之 SCADA 系統設計與實作」，國立臺灣海洋大學，碩士論文，2019。
13. 王尹廷，「物聯網在工程自動化診斷之應用研究」，國立臺灣師範大學，碩士論文，2019。
14. J. Lee, B. Bagheri, and H.A. Kao,“A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems.” Manufacturing Letters, vol. 3, pp. 18-23, 2015.