勞動部勞動及職業安全衛生研究所
INSTITUTE OF LABOR, OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, MINISTRY OF LABOR

地址：新北市汐止區橫科路407巷99號
電話：(02)26607600
傳真：(02)26607732
網址：http://www.ilosh.gov.tw

ISBN 978-986-04-4682-1
00100
9789860446821
GPN:1010400753
定價：新台幣100元

高速流動有機溶劑之靜電荷與燃燒測試 ILOSH103-S504

103年度研究計畫ILOSH103-S504

高速流動有機溶劑之靜電荷與燃燒測試

The Research of Electrostatic Charge and Combustion Test for High-Speed Flow Organic Solvents

ILOSH103-S504

高速流動有機溶劑之靜電荷與燃燒測試

The Research of Electrostatic Charge and Combustion Test for High-Speed Flow Organic Solvents

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

ILOSH103-S504

高速流動有機溶劑之靜電荷與燃燒測試

The Research of Electrostatic Charge and Combustion Test for High-Speed Flow Organic Solvents

計畫主持人：吳鴻鈞、林獻山
計畫主辦單位：勞動部勞動及職業安全衛生研究所
研究期間：中華民國 **103** 年 **7** 月至 **103** 年 **12** 月

本研究報告公開予各單位參考
惟不代表勞動部政策立場

勞動部勞動及職業安全衛生研究所
中華民國 **104** 年 **4** 月

摘　要

有機溶劑作業及生產、儲存易燃物質之場所最容易因靜電產生災害，以液體輸送作業所產生的靜電次數最高。當靜電累積並生靜電放電現象時，容易造成火災或爆炸等不幸的事故，造成人員傷亡及財產損失，因此必須做好完善的預防措施。

研究結果發現，在管長2.9m的PVC管、輸送速度2.5m/sec輸送過程中，其產生之電荷量以乙腈(78nC)為最大；在管長4m的PVC管、輸送速度3.5m/sec輸送過程中，其產生之電荷量以二甲基亞碸(412nC)為最大。在鋼管輸送過程中，其產生之電荷量以乙腈(25nC)為最大。

建議未來在有機溶劑輸送作業時，可因應作業環境、程序及材料的不同，實施接地、增加溼度、限制速度、抗靜電材料與靜電消除器等靜電危害防制方法，並視情況同時採用二種或二種以上的靜電危害防制方法。

關鍵詞：有機溶劑、高速輸送、電荷量

Abstract

Places where the operation and production of organic solvents, and the storage of flammable substances take place are of high risk of accidents from static electricity. The highest production of static electricity is in liquid transport. When electrostatic discharge takes place, it easily leads to unfortunate incidents of fires or explosions, causing casualties and property losses, and therefore preventive measures must be carried out thoroughly.

This study finds that at tube length of 2.9m PVC pipe with conveying speed of 2.5m/sec, the maximum amount of charge generated is 78nC (acetonitrile). At tube length of 4m PVC pipewith conveying speed of 3.5m/sec, the maximum amount of charge reaches 412nC (dimethyl sulfoxide). In steel pipe transportation, the maximum amount of charge is 25nC (acetonitrile).

It is recommended that during organic solvent delivery operations, hazard prevention methods such as ground, increasing the humidity, speed limit, antistatic materials, and static elimination be adopted based on the operating environment, different procedures, and materials used. Also, two or more electrostatic hazard control methods could be used as situation requires.

Keywords: Organic Solvents, High-speed Delivery, Electric Charge

目錄

摘　要 i
Abstract ii
目錄 iii
圖目錄 v
表目錄 vi
第一章 計畫概述 1
第一節 背景分析 1
第二節 研究目的 2
第二章 文獻回顧 3
第一節 非導電性易燃液體 3
第二節 有機溶劑概述 4
第三節 有機溶劑特性探討 7
第三章 工作重點與實驗規劃 9
第一節 工作重點 9
第二節 實驗規劃 9
第四章 結果與討論 12
第一節 有機溶劑甲苯高速輸送量測結果 12
第二節 有機溶劑二甲苯高速輸送量測結果 12
第三節 有機溶劑二甲基亞碸高速輸送量測結果 13
第四節 有機溶劑二甲基甲醯胺高速輸送量測結果 14
第五節 有機溶劑乙腈高速輸送量測結果 15
第六節 有機溶劑丙酮高速輸送量測結果 16
第七節 有機溶劑乙酸乙酯高速輸送量測結果 16
第八節 靜電危害防制方法[7] 17
第五章 結論與建議 21
第一節 結論 21
第二節 建議 21

誌謝 22
參考文獻 23

圖目錄

圖 1 物質在管道內流動產生靜電….....4
圖 2 非導電性液體累積靜電示意圖.....4
圖 3 實驗裝置…….....9
圖 4 實驗裝置用鋼管.....10
圖 5 數字電荷儀…….....10

表目錄

表 1 作業製程與靜電產生方式.....1
表 2 有機溶劑之電阻率.....2
表 3 七種有機溶劑之爆炸特性.....7
表 4 七種有機溶劑之電阻率、密度、動黏度.....7
表 5 七種有機溶劑之電導率、介電常數、遲豫時間.....8
表 6 甲苯高速輸送量測結果.....12
表 7 二甲苯高速輸送量測結果.....13
表 8 二甲基亞碸高速輸送量測結果.....14
表 9 二甲基甲醯胺高速輸送量測結果.....15
表 10 乙腈高速輸送量測結果.....15
表 11 丙酮高速輸送量測結果.....16
表 12 乙酸乙酯高速輸送量測結果.....17
表 13 導電率與靜置時間關係.....18

第一章 計畫概述

第一節 背景分析

民國 97 年 11 月 11 日，桃園縣某防水塗料生產公司發生火災爆炸意外，經調查後發現，該公司輸送甲苯及有機溶劑過程中，因流體本身磨擦及與橡膠輸送管磨擦所產生靜電引起爆炸。民國 102 年，中油前鎮區 61 號碼頭發生油槽發生爆炸，調查後發現是因為甲苯以高速空氣(30m/s)輸送時，產生靜電放電致使油槽炸毀[1]。

靜電為大自然中的一種自然現象，當天氣較為乾燥時容易因物質的磨擦或接觸而產生靜電現象，如家中、工廠、自然界等幾乎都能遇到靜電放電的現象。一般而言，容易因靜電產生災害之場所，以有機溶劑作業及生產、儲存易燃物質之場所最為常見，當中以液體輸送作業所產生的靜電次數最高，高達 229 次(如表 1) [1]。該類場所當靜電累積並生靜電放電現象時，容易造成火災或爆炸等不幸的事故。輕者造成人體感到不適，嚴重者可能引燃周圍環境的易燃性物品，進而發生火災或爆炸事故，造成人員傷亡及財產損失，因此必須做好完善的預防措施。

表 1 作業製程與靜電產生方式

	磨擦帶電	剝離帶電	流動帶電	噴出帶電	感應帶電	總計
材料成品輸送作業	18		1	1	2	25
液體輸送作業	140		60	8	7	229
粉體輸送方式	32				1	36
混和及攪拌作業	15	1	5	11	1	55
過濾及篩選作業	6	3	3	3	1	16
合計	169	35	78	74	23	551

液體在管線內流動所產生的流動電流和電荷密度的飽和值與液體流速的二次方成正比，而液體的電阻率在 10^{10}~$10^{12}\Omega m$ 範圍時很容易就能產生靜電，另外當管線有過濾器時，液體靜電量更會明顯增加 10~200 倍。一般常見有機溶劑電阻率如表 2 所示。

表 2 有機溶劑之電阻率

溶劑名稱	電阻率(Ω · cm)	溶劑名稱	電阻率(Ω · cm)
甲苯	2.5×10^{13}	過氯乙烯	5.0×10^{12}
二甲苯	2.8×10^{13}	乙酸丁酯	9.2×10^{8}
礦油精	2.6×10^{13}	三氯乙烯	6.1×10^{11}
乙腈	1.4×10^{5}	氯乙烯單體	1.3×10^{10}
丙酮	1.7×10^{12}	四氯乙烷	2.1×10^{9}
已酸已酯	1.7×10^{7}	石腦醚	3.5×10^{10}
丙烯酸丁酯	1.6×10^{9}	環已烷	2.1×10^{14}
酚	4.0×10^{6}	石油醚	2.7×10^{13}
四氯化碳	1.0×10^{14}	乙醚	2.5×10^{12}
二甲基甲醯胺	1.4×10^{4}	二甲基亞碸	3.3×10^{7}

電阻率高的物質所產生的靜電極難散失，因此容易產生靜電火花。輸送產品中含有的雜質量越多，產生的靜電也越大。

第二節 研究目的

藉由本研究規劃的實驗，針對甲苯、二甲苯、二甲基亞碸、二甲基甲醯胺、乙睛、丙酮等有機溶劑，在不同材質(塑膠管、鐵管) 、長度及速度中輸送時所產生電荷進行測量，實驗數據可作為這些有機溶劑未來在管路輸送時控制速度的重要條件。

第二章 文獻回顧

第一節 非導電性易燃液體

在化工、石化、製藥等製程工廠中，廣泛使用各種如乙醇和甲苯等易燃液體，當液體在管道中流動時就會產生靜電(如圖 1)，但從靜電危害預防方面而言，具有不同的電導度。靜電本身並不存在危害，其危害在於靜電荷累積到一定程度並有接受放電的物件時，就可能發生靜電釋放，形成引火源。因此要消除靜電的危害，需要避免形成靜電累積，或使產生的靜電及時消散。

當液體物料處於靜電接地的容器內，液體在進入容器之前所累積的靜電可以通過靜電接地裝置消散掉。消散速度取決於液體本身的電導率，如果液體本身的電導率高並且容器接地妥當，就可以非常快地消散掉事先累積的靜電；反之電導率低的液體就需要相當長的時間才能完成所累積靜電的消散。當液體的靜電荷持續積累時，即使容器有良好的靜電接地，也會不斷形成靜電累積，具有潛在的火災爆炸危險性(如圖 2)。

據美國 NFPA77-2007 標準的定義，如果液體物質的電導度大於 10^4 pS/m，屬於導電性的液體；如果小於 10^4 pS/m 而大於 50pS/m，屬於半導電性的液體；當電導度小於 50 pS/m 時，就屬於非導電性的液體[2][3]。的電導率與溫度也有關聯，因為電導率取決於離子的移動，當溫度升高時導電性會有所增強。

對於導電性液體，操作過程中只要靜電接地妥當，就不會形成靜電累積而帶來危害。就半導電性的物質而言，在槽車裝卸、物料輸送等作業中，由於要求採用金屬管道並配合適當的靜電接地，風險也相對較小；精密工業由於廣泛採用非金屬襯裏的材質、多相操作和使用小孔篩檢等原因，同時意味著較大的風險。研究指出電導度在 1000pS/m 左右的易燃液體，在流經小孔篩檢、液體噴霧等操作也存在靜電累積並釋放提供引火源的危害[4]。

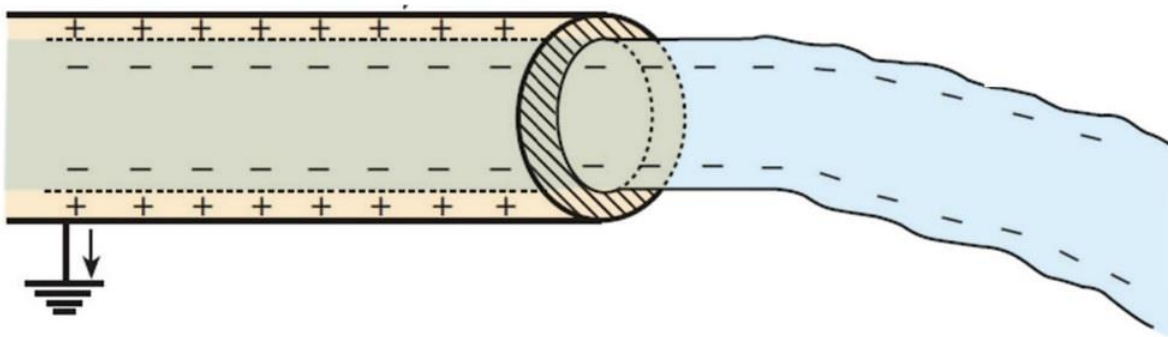

圖 1 物質在管道內流動產生靜電

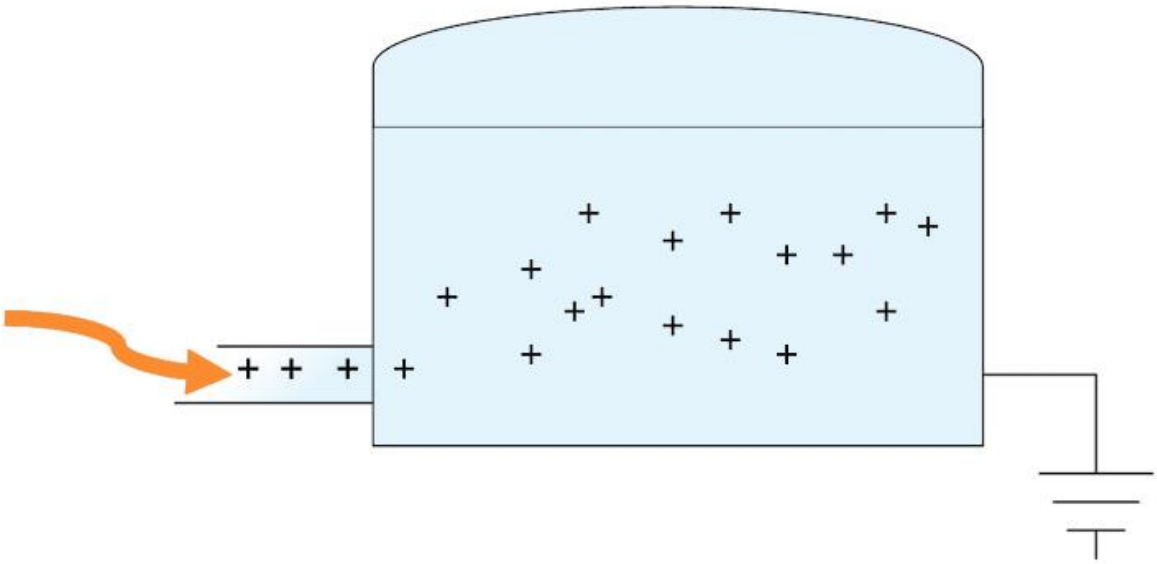

圖 2 非導電性液體累積靜電示意圖

第二節 有機溶劑概述

一、甲苯

甲苯(Toluene)，分子式：C_7H_8，是一種無色，帶特殊芳香味的易揮發液體。甲苯是芳香族碳氫化合物的一員，它的很多性質與苯很相像，在現今實際應用中常常替代有相當毒性的苯作為有機溶劑使用，還是一種常用的化工原料，可用於製造炸藥、農

藥、苯甲酸、染料、合成樹脂及滌綸等。同時它也是汽油的組分之一。

二、二甲苯

二甲苯(Dimethyl Benzene)為無色透明液體；是苯環上兩個氫被甲基取代的產物，存在鄰、間、對三種異構體，在工業上，二甲苯即指上述異構體的混合物。尤其對二甲苯在工業上使用較多，在討論二甲苯時，大多以對二甲苯為討論對象。二甲苯具特臭、易燃，與乙醇、氯仿或乙醚能任意混合，在水中不溶。沸點為 137~140℃。二甲苯毒性中等，也有一定致癌性。污染主要來自於合成纖維、塑料、燃料、橡膠，各種塗料的添加劑以及各種膠粘劑、防水材料中，還可來自燃料和煙葉的燃燒氣。

三、二甲基亞碸

二甲基亞碸(Dimethyl Sulfoxide 或 DMSO)，是分子式為$(CH_3)_2SO$ 的化學物質。為一無色液體，並為重要的極性非質子溶劑。它可與許多有機溶劑及水互溶。具有極易滲透皮膚的特殊性質，造成使用人員感覺類似牡蠣般的味道。同時也是許多化學反應的常用溶劑，尤其在 S_N2 烷基化反應中是極佳的溶劑。若使用氫氧化鉀為鹼將吲哚烷基化，能得到極高產率；亦可使用苯酚取代吲哚進行相似的反應。二甲基亞碸可與碘甲烷反應而生成銃離子，並與氫化鈉反應而生成硫葉立德。因為硫氧基對其共軛鹼的穩定化作用，二甲基亞碸中的甲基略具酸性(pK_a=35)。

二甲基亞碸是常用的有機溶劑中，溶解能力最強的一種。它可以溶解大部份的有機物，包括碳水化合物、聚合物、肽，以及很多的無機鹽和氣體。可以溶解相等於自身 50-60%重量的溶質(其他一般溶劑只可以溶解 10-20%)，所以在樣本管理和高速藥物篩檢中具有相當的重要性。在某些條件下，當二甲基亞碸與醯氯接觸時，會發生爆炸性反應。

四、二甲基甲醯胺

二甲基甲醯胺(Dimethylformamide, DMF)是一種透明液體，能和水及大部分有機溶劑互溶，為化學反應的常用溶劑。主要是利用甲酸和二甲基胺製造的。純二甲基甲醯胺無味，但工業級或變質的二甲基甲醯胺有魚腥味，因其含有二甲基胺的不純物。名稱來源是由於它是甲醯胺(甲酸的醯胺)的二甲基取代物，而二個甲基都位於氮原子上。二甲基甲醯胺是高沸點的極性(親水性)非質子性溶劑，能促進 S_N2 反應機構的進行。二甲基甲醯胺在強鹼(如：氫氧化鈉)或強酸(如：鹽酸或硫酸)的存在下是不穩定

的(尤其在高溫下)，並水解為甲酸與二甲基胺。

五、乙腈

乙腈(Acetonitrile; Methyl cyanide)，又稱氰基甲烷，化學式 CH_3CN。乙腈是無色的液體，最簡單的有機腈，並廣泛用作極性非質子溶劑。乙腈是無色有類似乙醚氣味的液體，易燃，燃燒時伴有明亮的火焰。可和水、甲醇、四氯化碳、乙酸甲酯、乙酸乙酯、二氯乙烷及許多非飽和烴類溶劑互溶。是合成橡膠、樹脂、纖維及製藥工業的良好溶劑。也可用於合成乙胺、乙酸等，或合成維生素 A、可的松、碳胺類藥物及其中間體的溶劑。此外也可以作為一些化學品的合成前體。美國四個主要生產乙腈的生產商是：Ineos 公司、杜邦公司、j.t.貝克化學和 Sterling Chemicals。1992 年，在美國交易的乙腈達 32.3 萬磅（約合 14,700 噸）。2008 年 10 月左右出現了一次乙腈的供應短缺，其原因是中國政府為了實現其綠色奧運的承諾，關閉和限產了很多化工廠，再加上出口退稅政策的改變，乙腈出口驟減。此外 2008 年 9 月襲擊美國德州的颶風艾克導致許多工廠設備嚴重受損，產能也受到一定的影響。

六、丙酮

丙酮(Acetone)也稱作二甲基酮、二甲基甲酮，簡稱二甲酮，或稱醋酮、木酮，是最簡單的酮，為一種有特殊氣味的無色可燃液體。常溫下為無色透明液體，易揮發、易燃，有芳香氣味。與水、甲醇、乙醇、乙醚、氯仿和吡啶等均能互溶，能溶解油、脂肪、樹脂和橡膠等，也能溶解醋酸纖維素和硝酸纖維素，是一種重要的揮發性有機溶劑。

對人體具有肝毒性，對於黏膜有一定的刺激性，吸入其蒸氣後可引起頭痛、支氣管炎等癥狀。如果大量吸入，還可能失去知覺。日常生活中主要用於脫脂、脫水、固定等等。在血液和尿液中為重要檢測項目。有些癌症患者尿液樣本中的丙酮水平會異常升高。另外採用低碳水化合物食物療法減肥的人，其血液、尿液中的丙酮濃度也會異常地高。

七、乙酸乙酯

乙酸乙酯(Ethyl Ethanoate)是乙酸中的羥基被乙氧基取代而生成的化合物，結構簡式為 $CH_3COOCH_2CH_3$。是無色易燃易揮發的液體，有特殊香味。微溶於水，易溶於有機溶劑。其用途可作為人造水果的要素、硝酸纖維素、假漆、瓷漆、飛機翼塗料等

的溶劑、合成無煙火藥、人造皮革、照相用底片、電極板、人造絲、香水、清潔紡織品、製藥時添加香味。可用於食品上之合成香料，並作為氮-亞硝基雙乙醇胺的萃取溶劑、隱形眼鏡的除霉、塗料塑膠的溶劑及其他溶劑。

第三節 有機溶劑特性探討

七種有機溶劑的爆炸特性如表 3 所示，除二甲基亞碸的閃火點 89℃較高外，二甲苯為 27℃、二甲基甲醯胺為 7℃、乙腈為 5.5℃、甲苯為 4.4℃。關於物質最小點火能量，甲苯為 0.24mJ、二甲苯為 0.2mJ、二甲基亞碸為 0.48mJ、丙酮為 1.15mJ、乙酸乙酯為 1.42mJ。

表 3 七種有機溶劑之爆炸特性

化合物名稱	(英文)	閃火點(℃)	著火濃度下限(LFL)(空氣中百分比)	著火濃度上限(UFL)(空氣中百分比)	自燃溫度(AIT)(℃)	最小點火能量(mJ)
甲苯	Toluene	4.4	1.2	7.1	536	0.24
二甲苯	Dimethylbenzene	27	1.1	7.0	527	0.2
二甲基亞碸	Dimethyl sulfoxide	89	2.6	42	215	0.48
二甲基甲醯胺	Dimethylformamide	7	1.3	17.7	155	----
乙腈	Acetonitrile	5.5	4.4	16	524	-----
丙酮	Acetone	-18	2.5	13	465	1.15
乙酸乙酯	Ethyl ethanoate	-4	2.0	11.5	426	1.42

七種有機溶劑的電阻率(Resistivity)、密度(Density)、動黏度(Kinematic viscosity)如表 4 所示。

表 4 七種有機溶劑之電阻率、密度、動黏度

	Resistivity (Ω-cm)	Density (g/cm^3)	Kinematic viscosity (m^2/s)
甲苯	2.5×10^{13}	0.867	0.68×10^{-6}
二甲苯	2.8×10^{13}	0.861	—
二甲基亞碸	3.3×10^{7}	1.092	—
二甲基甲醯胺	1.4×10^{4}	0.944	—
乙腈	1.4×10^{5}	0.776	0.35×10^{-6}
丙酮	1.7×10^{12}	0.791	0.42×10^{-6}
乙酸乙酯	2.17×10^{-5}	0.902	5.10×10^{-6}

七種有機溶劑的電導率(Conductivity)、介電常數(Dielectric constant)、遲豫時間(Relaxation times)如表 5 所示。

表 5 七種有機溶劑之電導率、介電常數、遲豫時間

	Conductivity (S/cm)	Dielectric constant	Relaxation times
甲苯	4.00×10^{-14}	2.4	4.3
二甲苯	3.57×10^{-14}	1.8	0.68
二甲基亞碸	3.0×10^{-8}	47.2	—
二甲基甲醯胺	7.14×10^{-5}	38.3	—
乙腈	7.0×10^{-6}		
丙酮	5.88×10^{-13}	21	3.1×10^{-5}
乙酸乙酯	4.6×10^{4}	6.02	

第三章 工作重點與實驗規劃

第一節 工作重點

本研究工作重點為探討有機溶劑輸送爆炸跟輸送速度之關係，可從電學 V=IR 和 I=(Q/t)關係中探討(V：電壓、I：電流、R：電阻、Q：電量)，因此當 Q 越大，I 值也越大，I 值越大時帶入 V=IR 式中，若在同一種有機溶劑中 R 值不變，則 V 值增大。其次在能量公式中 $E=(1/2)\,CV^2$ 或 $E=(1/2)\,QV$ 中，當 V 值越大時，其能量 E 成次方增大。以甲苯為例，其最小點火能量經計算後約為 2.4×10^{-4}J，非常接近最小點火能量，因此有引發爆炸之疑慮。

其次有機溶劑在高速流動下噴濺時會產生霧滴(mist)，這種霧滴會造成 Spray electrification(噴霧電氣化)，此時就會容易產生靜電[5]。霧滴週遭的空氣屬於絕緣性極高的氣體，靜電荷消散速度緩慢，電阻率比 $10^{10}\Omega$cm 小的溶劑帶有很強的靜電，稍一不慎就有可能引發火災。在本實驗七種有機溶劑中二甲基亞碸、二甲基甲醯胺、乙腈、乙酸乙酯等四種溶劑電阻率都比 $10^{10}\Omega$cm 小，換言之，若實驗稍一不慎，都有可能引起爆炸。

第二節 實驗規劃

本研究所使用之實驗裝置示意圖如圖 3、外觀如圖 4 所示。有關有機溶劑輸送爆炸與輸送速度關係實驗規劃如下：

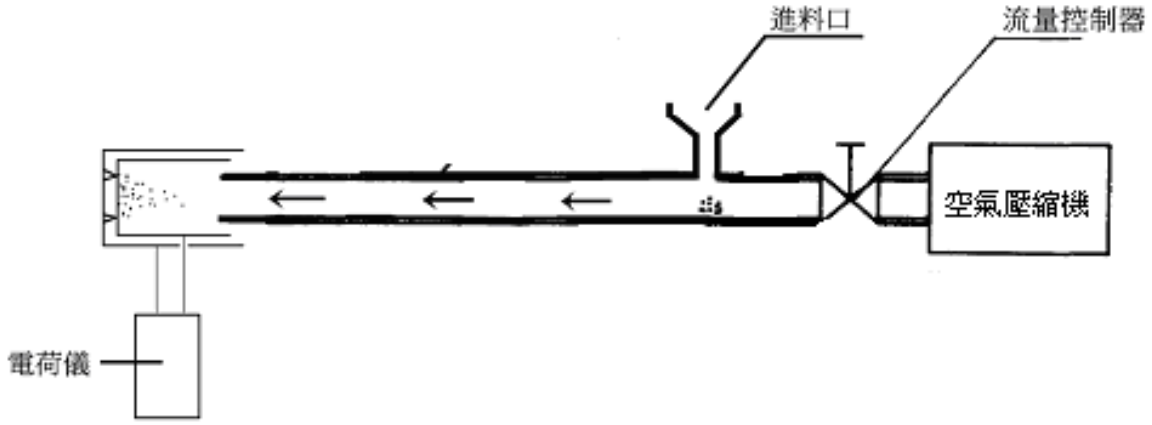

圖 3 實驗裝置[6]

圖 4 實驗裝置用鋼管

一、實驗材料

(一) 七種有機溶劑：甲苯(Toluene)、二甲苯(dimethylbenzene)、二甲基亞碸(dimethyl sulfoxide DMSO)、二甲基甲醯胺(dimethyl formamide DMF)、乙睛(Acetonitrile)、丙酮(acetone)、乙酸乙酯(ethyl ethanoate)。

(二) 輸送管材質：鋼管、PVC 管

(三) 輸送管內徑管長：內徑(D)1cm，管長：1m、2m、2.9m、4m

二、實驗儀器裝置

實驗儀器：EST111 型數字電荷儀，外觀如圖 5 所示。

圖 5 數字電荷儀

(一) 測量範圍：±10pC~±20μC (±1×10^{-11}~±2×10^{-5})。

(二) 顯示：3 1/2 位元發光數碼管顯示，可以顯示電荷的正負極性。負極性顯示“－”號。

(三) 准 確 度：± (0.5% 讀數 + 2 數位)。

(四) 電源：220V 50HZ 交流電 耗電約 3W。

(五) 使用環境：-10℃~45℃ 80% RH。

(六) 尺寸：210 mm x 260 mm x 70 mm。

(七) 質量：約 2kg。

三、實驗流程及步驟

(一) 調整管內空氣流速，至實驗所進行的流速。

(二) 取有機溶劑 1~40g(視電荷儀有無量測到靜電電荷決定有機溶劑的試驗量)，放入進料口位置。

(三) 記錄電荷儀電荷量。

(四) 改變管內流速重複前述(一~三)步驟，記錄電荷儀電荷量，如此可獲得不同流速的電荷量。

(五) 改變管長重複前述(一~三)步驟，記錄電荷儀電荷量，如此可獲得管長不同的電荷量。

(六) 更換有機溶劑種類重複前述(一~三)步驟，記錄電荷儀電荷量，如此可獲得不同種類有機溶劑的電荷量。

第四章 結果與討論

第一節 有機溶劑甲苯高速輸送量測結果

甲苯高速輸送量測結果如表 6 所示。實驗結果顯示 PVC 管在相同管長之下，輸送速度越快其電荷量越高。在 PVC 管輸送過程中電荷量較在鋼管輸送過程中高。

表 6 甲苯高速輸送量測結果

管長(m)	風速(m/sec)	電荷量 nC	
		PVC 管	鋼管
0.3	1.06	0	0
0.3	2.12	0	0
0.3	3.18	0	0
0.3	4.24	0	0
1	1.06	1.32(20.48g)	0.03(20.16g)
1	2.12	1.08(5.48g) 1.72(20.56g)	0.03(20.56g)
1	3.18	2.06(20.36g)	0.05(20.13g)
1	4.24	2.32(20.19g)	0.05(20.13g)
2	1.06	2.87(20.21g)	0.14(20.15g)
2	2.12	3.11(20.31g)	0.25(20.09g)
2	3.18	3.37(20.84g)	0.51(20.13g)
2	4.24	3.64(20.47g)	1.45(20.43g)
2.9	2.50	3.82(20.52g)	1.53(20.12g)
4	1.06	9.27(20.12g)	0.01(20.87g)
4	2.12	11.7(20.54g)	0.57(20.40g)
4	3.18	13.26(20.32g)	0.95(20.43g)
4	3.50	14.25(20.12g)	1.23(20.62g)
4	4.24	15.48(20.32g)	1.36(20.81g)

第二節 有機溶劑二甲苯高速輸送量測結果

二甲苯高速輸送量測結果如表 7 所示。實驗結果顯示 PVC 管在相同管長之下，輸

送速度越快其電荷量越高。在 PVC 管輸送過程中電荷量較在鋼管輸送過程中高。

表 7 二甲苯高速輸送量測結果

管長(m)	風速(m/sec)	電荷量 nC	
		PVC 管	鋼管
0.3	1.06	0	0
0.3	2.12	0	0
0.3	3.18	0	0
0.3	4.24	0	0
1	1.06	0.32(20.13g	0.16(20.53g)
1	2.12	0.43(20.15g	0.18(20.16g)
1	3.18	0.56(20.16g	0.18(20.18g)
1	4.24	0.67(20.19g)	0.18(2016g)
2	1.06	0.67(20.12g)	0.48(20.16g)
2	2.12	0.88(20.32g)	0.60(20.66g)
2	3.18	1.13(20.25g)	0.72(20.64g)
2	4.24	1.60(20.85g)	0.91(20.32g)
2.9	2.50	1.73(20.12g)	1.12(20.36g)
4	1.06	1.72(20.32g)	0.17(20.54g)
4	2.12	2.13(20.15g)	0.23(20.08g)
4	3.18	3.15(20.36g)	0.32(20.12g)
4	3.50	3.63(20.12g)	0.41(20.15g)
4	4.24	4.25(20.17g)	0.46(20.06g)
4	8.48	5.67(20.42g)	0.72(20.34g)

第三節 有機溶劑二甲基亞碸高速輸送量測結果

二甲基亞碸高速輸送量測結果如表 8 所示。實驗結果顯示 PVC 管在相同管長之下，輸送速度越快其電荷量越高。在 PVC 管輸送過程中電荷量較在鋼管輸送過程中高。

當輸送管長到 4m 時，隨著流動速度增加，其電荷量明顯極增大，在風速 1.06m/sec 時電荷量為 72nC，在風速 2.12m/sec 時電荷量為 214nC，在風速 3.18m/sec

時電荷量為 372nC，在風速 4.24m/sec 時電荷量為 626nC，並於實驗過程出現白色煙霧。

表 8 二甲基亞碸高速輸送量測結果

管長(m)	風速(m/sec)	電荷量 nC	
		PVC 管	鋼管
0.3	1.06	0	0
0.3	2.12	0	0
0.3	3.18	0	0
0.3	4.24	0	0
1	1.06	1.32(40.12g)	0.15(40.23g)
1	2.12	1.78(40.38g)	0.15(40.25g)
1	3.18	2.12(40.25g)	0.17(40.32g)
1	4.24	3.14(40.39g)	0.18(40.39g)
2	1.06	2.80(40.42g)	0.21(40.16g)
2	2.12	9.33(40.73g)	0.41(40.13g)
2	3.18	15.32(40.25g)	1.24(40.02g)
2	4.24	28.0(40.79g)	2.25(40.12g)
2	8.48	7.08(20.60g)	15.24(20.52g)
2.9	2.50	23.7(40.30g)	1.89(40.13g)
4	1.06	72(40.33)	0.25(40.18g)
4	2.12	214(40.12g)	0.36(40.12g)
4	3.18	372(40.26g)	10.92(40.13g)
4	3.50	412(40.32g)	11.23(40.12g)
4	4.24	626(40.38g)	1.79(40.07g)

第四節 有機溶劑二甲基甲醯胺高速輸送量測結果

二甲基甲醯胺高速輸送量測結果如表 9 所示。實驗結果顯示 PVC 管在相同管長之下，輸送速度越快其電荷量越高。在 PVC 管輸送過程中電荷量較在鋼管輸送過程中低。

表 9 二甲基甲醯胺高速輸送量測結果

管長(m)	風速(m/sec)	電荷量 nC	
		PVC 管	鋼管
0.3	2.50	0	0
1	2.50	0	0
2	2.50	5.56(20.32g)	6.26(20.34g)
2	4.24	6.34(20.57g)	8.37(20.32g)
2	8.48	7.08(20.60g)	15.24(20.52g)
2.9	2.50	6.72(20.52g)	10.24(20.38g)
4	1.06	5.24(20.13g)	11.23(20.32g)
4	2.12	6.25(20.25g)	13.26(20.19g)
4	3.18	7.83(20.16g)	15.28(20.21g)
4	3.50	8.72(20.32g)	16.32(20.18g)
4	4.24	9.10(20.48g)	19.4(20.48g)
4	8.48	9.27(20.16g)	23.3(20.34g)

第五節 有機溶劑乙腈高速輸送量測結果

乙腈高速輸送量測結果如表 10 所示。實驗結果顯示 PVC 管在相同管長之下，輸送速度越快其電荷量越高。在 PVC 管輸送過程中電荷量較在鋼管輸送過程中高。

表 10 乙腈高速輸送量測結果

管長(m)	風速(m/sec)	電荷量 nC	
		PVC 管	鋼管
0.3	2.5	0	0
1	2.5	32	8.26
2	2.5	52	12.25
2.9	2.5	78	15.36
4	3.18	132(20.22g)	17.20(20.36g)
4	3.5	156(20.34g)	25(20.16g)
4	4.24	251(20.13g)	34(20.19g)

第六節 有機溶劑丙酮高速輸送量測結果

丙酮高速輸送量測結果如表 11 所示。實驗結果顯示 PVC 管在相同管長之下，輸送速度越快其電荷量越高。在 PVC 管輸送過程中電荷量較在鋼管輸送過程中高。

表 11 丙酮高速輸送量測結果

管長(m)	風速(m/sec)	電荷量 nC	
		PVC 管	鋼管
0.3	1.06	0	0
0.3	2.12	0	0
0.3	3.18	0	0
0.3	4.24	0	0
1	1.06	0.67(40.24g)	1.25(40.25g)
1	2.12	0.75(40.26g)	1.36(40.32g)
1	3.18	0.83(40.36g)	1.47(40.15g)
1	4.24	0.92(40.16g)	1.58(40.17g)
2	1.06	1.23(40.14g)	2.96(40.12g)
2	2.12	1.67(40.28g)	3.39(39.34g)
2	3.18	1.88(40.20g)	3.72(39.56g)
2	4.24	3.00(40.28g)	4.40(39.81g)
2.9	2.50	2.32(40.12g)	4.13(40.15g)
4	1.06	2.56(40.23g)	4.05(40.20g)
4	2.12	3.42(40.25g)	4.08(40.26g)
4	3.18	4.32(40.36g)	4.11(40.25g)
4	3.50	4.62(40.17g)	4.13(40.34g)
4	4.24	5.18(40.37g)	4.16(40.20g)
4	8.48	7.24(40.65g)	5.79(40.39g)

第七節 有機溶劑乙酸乙酯高速輸送量測結果

乙酸乙酯如表 12 所示。實驗結果顯示 PVC 管在相同管長之下，輸送速度越快其電荷量越高。在 PVC 管輸送過程中電荷量較在鋼管輸送過程中高。

表 12 乙酸乙酯高速輸送量測結果

管長(m)	風速(m/sec)	電荷量 nC	
		PVC 管	鋼管
0.3	1.06	0	0
0.3	2.12	0	0
0.3	3.18	0	0
0.3	4.24	0	0
1	1.06	3.25(20.42g)	0.15(20.21g)
1	2.12	3.50(20.36g)	0.17(20.31g)
1	3.18	3.75(20.55g)	0.17(20.16g)
1	4.24	3.95(20.63g)	0.18(20.18g)
2	1.06	8.68(20.58g)	0.23(20.63g)
2	2.12	8.80(20.18g)	0.27(20.58g)
2	3.18	8.91(20.32g)	0.32(20.12g)
2	4.24	8.96(20.18g)	0.46(20.56g)
2.9	2.50	8.94(20.16g)	0.38(20.16g)
4	1.06	10.74(20.48g)	0.41(20.23g)
4	2.12	10.92(20.52g)	0.42(20.32g)
4	3.18	11.12(20.68g)	0.58(20.12g)
4	3.50	11.20(20.35g)	0.61(20.22g)
4	4.24	11.31(20.45g)	0.67(20.32g)
4	8.48	12.10(20.12g)	0.92(20.11g)

第八節 靜電危害防制方法[7]

在有機溶劑輸送過程中，靜電災害的防治往往被忽視的，一般會誤認為有機溶劑不是帶電物質，不會因引起火災。反而會覺得有機溶劑是易燃物質，防止火災方面只要遠離火源，或禁止煙火即可。

一般而言靜電危害防制方法可分為接地、增加溼度、限制速度、抗靜電材料、與靜電消除器等五種。工業製造過程中，因作業環境、程序及材料的不同，所實施的靜電危害防制方法亦會有所不同。選用時必須考量現場製程環境、條件與限制，甚至經

費、管理系統與人力素質等因素。沒有一種靜電危害防制方法可以適用於所有的工業製程或情況，有時同時採用二種或二種以上的靜電危害防制方法。

一、接地

靜電危害防制方法中，接地是最有效且經濟的方法。但靜電接地與靜置時間必須互相配合才可達到最高的效果，一般在運輸、儲存、裝卸、調和等作業過程中，不可避免地發生攪拌、沉降、過濾、搖晃、衝擊、噴射、發泡，及流動等接觸分離的相對性運動，而將可能產生、積聚靜電荷；但由於這些物質，具有很高的表面與體積電阻，其表面與內部電荷無法透過接地迅速地洩漏，亦無法迅速地與設備設施內壁之電荷中和消散，故需要一個較長之洩漏消散過程。應採取配合靜置時間及其他靜電消除措施，以確保靜電荷已消散至安全範圍內。因此，靜電接地與靜置時間之關係如下表 13：

表 13 導電率與靜置時間關係

靜置時間 (S) / 體積 (m^3) / 導電率 (S/m)	＜10	10～50	50～500	500～5000	＞5000
$>10^{-8}$	1	1	1	2	2
10^{-8}～10^{-12}	2	3	10	30	30
10^{-12}～10^{-14}	4	5	60	120	120
$<10^{-14}$	10	15	120	200	240

(一) 將金屬導體直接接地，或利用金屬導體緊密接合於靜電消散材料之物體上，藉以進行間接接地，均可使物體上之靜電迅速向大地洩漏。

(二) 將絕緣性材料施行間接接地，於一般情況下，並無法防制危險性帶電，因此，應採取接地以外之靜電防制措施。

(三) 下列之靜電非導體除施行間接接地外，尚應配合必要之靜置時間。

1. 體積電阻率為 10^{10}~$10^{12}\Omega\cdot m$ 之非金屬體；
2. 表面電阻率為 10^{11}~$10^{13}\Omega$ 之固體表面；
3. 導電率為 10^{-10}~10^{-12}S/m 之液體。

對於上述規定以外之靜電非導體，如應施行間接接地外，亦應須搭配如採取加靜電消除器或靜電消除劑等其他措施來防止靜電危害。

(四) 金屬導體若具有絕緣塗料塗佈，或利用玻璃、鐵氟龍等絕緣材質包覆時，金屬導體即使接地，仍能在此膜上產生靜電帶電。因此當帶電量較大時，應採取其他靜電防制措施。

(五) 靜電消散材料係表面進行導電性處理，將使表面電阻低於 $10^9\Omega$ 時，於此表面上可裝設緊密結合之金屬導體，進行間接接地。

(六) 一般於侷限空間流動或懸浮之粉體，管內流動或自噴嘴噴出之液體等，經由接地仍將無法有效防止帶電，應配合其他靜電防制措施。

二、增加濕度

增加作業環境中空氣的相對溼度，在目前傳統產業的製程中亦是常見的靜電危害防制方法。在高溼度(R.H.> 65 ％)環境中，如果物質表面具親水性，則容易吸附空氣中的水份，進而降低物質的表面電阻值，增加電荷散逸的速率，將電荷蓄積程度降至最低。這類物質包括棉、紙及醋酸纖維素等。工廠製程中通常會採用加濕器、地面灑水、或水蒸氣噴出等方法，增加作業環境中空氣的相對溼度。

若物質表面為非親水性，則不易吸附空氣中的水份，致無法降低物質的表面電阻值，因此不能增加電荷散逸的速率。這類物質包括部份人造聚合物如：ABS(Acrylonitrile – Butadiene - Styrene，丙烯腈- 丁二烯 – 苯乙烯)、Teflon(鐵氟龍，氟碳聚合物)等。這類高斥水性物質需要相對溼度提高至 80% ，甚至 90% 以上，才能有效降低物質的表面電阻值，將電荷蓄積程度降至最低。

三、抗靜電材料

製程中物質所蓄積的靜電會經傳導路徑向大地散逸。若傳導路徑為絕緣性材料(導電性低)則靜電散逸率低，若傳導路徑為導電性材料(導電性高)則靜電散逸率高。物質的表面電阻係數小於 10^{11} Ω/m^2 或體積電阻係數小於 10^{10} Ωm，即可避免物質蓄積過量的靜電。該類物質稱為抗靜電材料。但在含易燃性物質的作業場所中，則抗靜電材料的表面電阻係數需小於 10^8 Ω/m^2 或體積電阻係數需小於 10^6 Ωm。

對於工業製程中使用的各種材料，可用下列方法使之成為抗靜電材料：物質本身具有抗靜電能力(如：棉、木材、紙及土壤等)、在絕緣材料的表面塗佈抗靜電物質(如碳粉、抗靜電劑等)、在絕緣材料製造過程中加入導電或抗靜電物質(如碳粉、金屬、抗靜電劑、導電性纖維等)。

四、靜電消除器

利用高壓電在空氣中產生帶電離子。由於異性電荷會互相吸引而中和，離子可中和帶靜電物體的電荷，使其電荷蓄積程度降至最低，因此不會發生靜電放電。靜電消除器大致可分為被動式、主動式及輻射源式等三種。選擇靜電消除器時，必須考量作業環境因素才能發揮最大的靜電消除效果。一般而言，靜電消除器架設位置應接近帶靜電物體而遠離接地金屬物件，以發揮最大的靜電消除效果。此外，需注意因電離所產生臭氧的工業衛生問題，以及高壓電源與帶電體產生短路及放電所引發的工業安全問題。

五、限制速度

工業製程中兩種物體可能因摩擦而產生靜電，並逐漸累積而發生靜電危害事故，因此降低摩擦速度可減緩靜電的產生，達成防制靜電危害事故發生的目的。在工業製程中受限於物質特性與產量要求，限制速度的靜電危害防制方法，通常多應用於易燃性液體的輸送作業。

灌裝大型油罐車時，液體在管內的容許流速可參考此公式計算：$VD \leq 0.8$ 其中 V(m/s)為液體流速、D(m)為管內徑，大型油罐車出口流速可超過上述公式的計算值，但是不得大於 5m/s。灌裝一般汽車罐車時，液體在管內的容許流速可按 $VD \leq 0.5$ 此式計算。如果沒有特殊要求，一般以 4~5m/s 為限。以上是針對大型管件的輸送，若是一般小型輸送管件可以參考日本的靜電安全指南中的計算公式；$vd = 0.25\ (\sigma \cdot L)^{1/2}$，其中 v(m/s)為最大流速限制值、d(m)為填充用配管之直徑、σ(pS/m)為液體之導電度、L(m)：槽水平剖面之對角線長度，以一般 80~200mm 管徑的配管來說，以 σ=0.8pS/m 帶入公式，流速的大約落在 2~6m/s，不過一般建議導電度在 10^{-10} S/m 以上的液體，最大流速也要限制在 10m/s 以下。

為了確保安全，應安裝超速警報器或自動控制流速裝置，可避免隨意增大流速而發生事故，另外灌裝時，液體應從槽車等大型容器底部進入，或將注入管伸入容器底部，設備和管道應選用適當的材料，儘量使用金屬管材，少用或不用塑料管，因塑膠管帶靜電約為金屬管的 8 倍，如必須使用時，也應採用可導電的管子或內設金屬絲、網的管子，並將金屬絲、網的一端可靠接地，或採用靜電屏蔽措施等。

第五章 結論與建議

綜合上述研究執行結果，本研究計畫可以歸納出以下之結論與建議：

第一節 結論

一、七種有機溶劑在 PVC 管輸送過程中，在管長 2.9m、輸送速度 2.5m/sec，其產生電荷量以乙腈(78nC)為最大，其次是二甲基亞碸(23.7nC)、依次是乙酸乙酯(8.49nC)、二甲基甲醯胺(6.72nC)、甲苯(3.82nC)、丙酮(2.32nC)、二甲苯(1.73nC)。

二、七種有機溶劑在 PVC 管輸送過程中，在管長 4m、輸送速度 3.5m/sec，其產生電荷量以二甲基亞碸(412nC)為最大，其次是乙腈(156nC)、依次是甲苯(14.25nC)、乙酸乙酯(11.20nC)、二甲基甲醯胺(8.72nC)、丙酮(4.62nC)、二甲苯(3.63nC)。

三、七種有機溶劑在鋼管輸送過程中，在管長 2.9m、輸送速度 2.5m/sec，其產生電荷量以乙腈(15.36nC)為最大，其次是二甲基甲醯胺(10.24nC)、依次是丙酮(4.13nC)、二甲基亞碸(1.89nC)、甲苯(1.53nC)、二甲苯(1.12nC)、乙酸乙酯(0.38nC)。

四、七種有機溶劑在鋼管輸送過程中，在管長 4m、輸送速度 3.5m/sec，其產生電荷量以乙腈(25nC)為最大，其次是二甲基甲醯胺(16.32nC)、依次是二甲基亞碸(11.23nC)、丙酮(4.13nC)、甲苯(1.23nC)、乙酸乙酯(0.61nC)、二甲苯(0.41nC)。

第二節 建議

一、有機溶劑輸送作業時，可選擇的靜電危害防制方法可分為接地、增加溼度、限制速度、抗靜電材料、與靜電消除器等五種。

二、因應作業環境、程序及材料的不同，所實施的靜電危害防制方法亦會有所不同。沒有一種靜電危害防制方法可以適用於所有的工業製程或情況，有時同時採用二種或二種以上的靜電危害防制方法。

誌謝

本研究計畫參與人員除本所吳研究員鴻鈞外，另包括蘭陽技術學院化妝品應用系林獻山助理教授等人，謹此敬表謝忱。

參考文獻

[1] 張日誠：易燃液體輸送靜電爆炸案例探討。勞工安全衛生研究所報告 2010。

[2] Static Electricity Guidance for Plant Engineers. Graham Hearn Wolfson Electrostatics Limited, University of Southampton.

[3] Handling Flammable Liquids Chilworth Technology. Inc. Beta House, Chilworth Science Park, Chilworth, Southampton, Hampshire, SO16 7NS.

[4] Hearn G. L. Electrostatic ignition hazards arising from fuel flow in plastic pipelines. J. Loss Prev. in the Proc. Ind 2002; 15: 105-109.

[5] 太田 潔：化學工廠靜電危險性評估與對策。住友化學株式會社；2004。

[6] 許宏德：粉體輸送管路帶電及除電特性之實驗研究。第七屆全國職場安全週得獎論文；2010。

[7] 吳鴻鈞、朱陳春、唐緊、張日誠：請注意有機溶劑管線輸送時靜電爆炸風險。勞工安全衛生研究所報告 2009。

高速流動有機溶劑之靜電荷與燃燒測試
著(編、譯)者：吳鴻鈞、林獻山

出版機關：勞動部勞動及職業安全衛生研究所
22143 新北市汐止區橫科路 407 巷 99 號
電話：02-26607600　　http://www.ilosh.gov.tw
出版年月：中華民國 104 年 4 月
版(刷)次：1 版 1 刷
定價： 100 元
展售處：
五南文化廣場
台中市中區中山路 6 號
電話：04-22260330

國家書店松江門市
台北市松江路 209 號 1 樓
電話：02-25180207

● 本書同時登載於本所網站之「出版中心」，網址為：
http://www.ilosh.gov.tw/wSite/np?ctNode=273&mp=11
● 授權部分引用及教學目的使用之公開播放與口述，並請注意需註明資料來源；有關重製、公開傳輸、全文引用、編輯改作、具有營利目的公開播放行為需取得本所同意或書面授權。

GPN: 1010400753
ISBN: 978-986-04-0894-2