

CHEMICAL
ENGINEERING
CHEMICAL
ENGINEERING
CHEMICAL
ENGINEERING

工業儀錶

吳 瀧 川
陳 慶 鐘 著
涂 漢 欽

正文書局印行

依照 教育部六十五年六月頒佈課程標準編纂

工業專科學校用書

工業儀錶

編 著 者
吳 瀧 川
陳 慶 鐘
漢 欽

江苏工业学院图书馆
藏书章

正文書局印行

中華民國六十九年九月一日出版

工業儀錶

定價 二二〇元

編著者：吳瀧川 陳慶鐘 涂漢欽

發行人：黃 開 禮

發行所：正文書局有限公司

總管理處 台北市和平東路二段三五八號
電話：七〇八

門市部 台北市重慶南路一段五十九號
電話：三七二〇四三七・三二四六〇〇九

郵政劃撥帳戶第五九六一號

經銷者：全省各大書局

版權
所有
必究
翻印

本書局登記證字號：行政院新聞局版台業字第六一八號

編輯大意

1. 本書係遵照教育部六十五年六月公布之五年制工業專科學校化學工程科工業儀錶暫行課程標準編輯而成，專供五年制工業專科學校化學工程科學生第四學年上學期每週 3 小時教學之用。亦可供做其他工程科系及工廠從業人員進修參考之用。
2. 本書共七章，對化學工業中常見的各種工業儀錶之種類、構造及其應用，均說明甚詳，頗具實用。各章可獨立講授而無前後失怙之處。
3. 本書所用插圖，測定儀器圖說，力求新穎且採自國內常用型錄，以利教學及幫助學生瞭解。
4. 本書每一章之末，均附有習題，以供讀者研習，藉以融會貫通。
5. 本書所用名詞皆依照教育部公布之「化學工程名詞」、「化學儀器設備名詞」、「物理學名詞」、「機械工程名詞」及「電機工程名詞」等五書，並附有英文原名及中英文索引，以供讀者對照及查考。
6. 編者利用公餘之暇撰寫本書，雖精心校對，力求正確，奈因時間匆促，錯誤欠妥之處在所難免、祈望各界先進及教學同仁多多惠予斧正，俾再版時得以更正，在此先致萬分謝意。

吳瀧川
陳慶鐘 謹識
涂漢欽

工業儀錶

目 錄

第一章 概 論	1
1-1 量測之目的.....	1
1-2 工業儀錶之功能.....	1
1-3 工業儀錶之基本構造.....	2
1-4 工業儀錶之一般特性.....	3
1-5 工業上常用之變數.....	5
1-6 工業儀錶之標準.....	6
1-7 溫度之標準.....	7
1-8 壓力之標準.....	10
1-9 時間與頻率標準器.....	16
1-10 電功率相關量之標準.....	17
1-11 應用工業儀錶之目的及經濟價值.....	20
習 題.....	22
第二章 壓力、差壓及真空之量測	24
2-1 壓力測量之基本概念.....	24
2-2 壓力計種類.....	25
2-3 平衡測量壓力計.....	27
2-4 彈性變形壓力計.....	38
2-5 電力式壓力計.....	42
2-6 金屬壓力計元件之靜物差.....	45
2-7 真空度的測定.....	46
習 題.....	58
第三章 液體及固體之位面測定	61
3-1 液面計.....	62
3-2 機械式液位測量計.....	62

2 工業儀錶

3-3 靜壓式位面計	67
3-4 電子式液位測量計	71
3-5 放射能液位測量計	74
3-6 超音波液位測量計	76
3-7 固體位面之測量	77
習題	79

第四章 流量之量測 81

4-1 流量測定之基本概念	81
4-2 流量測定之方法	87
4-3 流速計	88
4-4 流率計	98
4-5 差壓儀器	130
4-6 體積流量計	136
4-7 質量流量計	143
4-8 測定流量時應注意事項	144
習題	148

第五章 溫度之測量 150

5-1 玻液式溫度計	150
5-2 充填式溫度計	154
5-3 雙金屬溫度計	163
5-4 熱電偶式溫度計	165
5-5 熱電溫度儀錶—毫伏特計，電勢差計	172
5-6 電阻式溫度計	181
5-7 光測高溫計	191
5-8 輻射高溫計	195
5-9 總論	198
習題	200

第六章 其它工業測量及分析儀器 202

6-1 重量與質量之測定	202
--------------	-----

6-2 密度與比重之測定	209
6-3 黏度之測定	221
6-4 濕度、露點之測定	234
6-5 輕標值之測定	244
6-6 電導度計	252
習 題	259

第七章 自動控制儀器 262

7-1 自動控制概念	262
7-2 程序控制基本機械元件及組件	265
7-3 自動控制儀器之分類	268
7-4 程序控制之方法及裝置	280
7-5 指示器	284
7-6 記錄器	288
7-7 傳送器	291
7-8 控制閥	298
7-9 控制閥之定位器	309
習 題	311

附錄一 華氏、攝氏溫標轉換表	313
附錄二 比重、波美度及 $^{\circ}\text{API}$ 的比較	320
附錄三 氣體黏度	328
附錄四 液體黏度	331
附錄五 公英制度量衡換算表	336
附錄六 工業儀器量測用標準符號	345
附錄七 中英名詞對照索引	357
附錄八 參考文獻	379
作者簡介	380

第一章 概 論

1-1 量測之目的

英國科學家卡爾文曾說過一段極精闢的話，他說：「當你能量測你所談及之事物，並給以一數字表示之，你對這件事物便已有所了解了」。這段話很明顯的了解卡氏強調，如無能力量測，則一切事物鮮有發展之可能。大凡一切事物——如工業製造過程及國際通訊等——都一定要有極精確的量測技術，因此量測之發展可謂科學之發展。

一個人到醫院去做健康總檢查，其目的乃希望醫師能給他一些健康程度的量測——諸如血壓之量測及尿液之分析量測等——使他本身瞭解自己的健康狀態，以便需要則去做補救的工作。大凡一切事物所以需要量測的工作，其目的及重要性如下：

(1)獲得品質之保證：以量測所得之結果作比較之工具，務使事物之物理性質及化學性質一致。

(2)求取物料之節省：在一製造過程中，經過量測而在製造過程中安排適當的過程狀況，可以節省原料及過程中產品之浪費，更能節省製造時間，減低機械之磨損及人力之浪費。

(3)成本之降低：由於量測結果之比較而可以得一最佳之製造狀況，由此可降低製造之成本。

(4)安全及舒適：製造過程中變數之量測，可以確保過程中之安全問題（如壓力過高發生爆炸問題等）。由於環境變數之量測而導致舒適度之曲分，由此了解如何去變更環境。

總之量測之結果可以與一標準量相比較，作為一過程改進發展之依據。譬如：(1)人之體溫要量測出在 36.7°C 左右才正常；(2)超速公路上駕車，車速不得超過每小時 90 公里才拿不到違警罰單等。

1-2 工業儀錶之功能

行量測之器具或裝置稱為儀錶（Instrument）。錶器可以說是人類知能的延伸，在許多狀況下，人類需要儀錶才能決定一個未知之量

2 工業儀錶

。所以儀錶可作如下之定義：「它是用來決定一個已知或未知量之數值大小的一種設備」。而工業儀錶（Technical instrument）顧名思義乃為在工業生產或製造及工業研究時所必備之儀錶。工業儀錶具有控制、指示、記錄及積算與工業相關之各種物理或化學特性量（Quantity）變數之功能。而一般之工業儀錶間或具備上述四種功能者，亦有僅具上述四種功能中之一項者。茲將上述四項功能略述如下：

（1）控制（Controlling）——工業儀錶之最主要功能為控制。在一切任何程序之自動控制系統中，量測為其首要手段，而控制則為其終極目的。儀錶測得變數之情況後，迅將此情況轉變為一控制的信號（Signal），再進而影響製造程序之操作，使最後能維持製造程序內之平衡。

（2）指示（Indicating）——製造程序系統中變數之變化情況，惟有靠儀表之指示，提供操作技術人員之明瞭，有如航行大海中利用羅盤指示方位。操作人員循其指示，方能決定操作條件是否需要調整。

（3）記錄（Recording）——製造程序系統中變數之瞬時變化，而導致指示的轉瞬即逝。因過去情況之變化的無法重現，可利用記錄器記錄操作進行中之一切情況變化。以提供日後操作上之參考，比較，甚或作為技術上之研究以改進製造上的缺點。

（4）積算（Integrating）——上述三種功能皆與製造程序內物質之「質」有關。但流量之量測，經由積算器（Integrator）之研算可在極短時間內獲悉在單位時間內所流過流體之「量」。對於物料之平衡，厥屬重要。

1-3 工業儀錶之基本構造

一般之基本工業儀錶，依其使用功能包括有如圖 1-1 所示探測、響應、操縱及指示等四大機構（或稱元件）：

（1）探測元件（Measuring element）——為整個儀錶最重要的第一個部份，為儀錶中最先感應之部份，此部份能將系統中變數變化之信號轉變為另一種信號。如圖 1-1 所示膨脹球莖內之流體因受溫度之改變而產生位移（Displacement），而其位移大小與待測溫度高低成一比例。又如熱電偶高溫計（Thermocouple pyrometer）中之熱探桿（measuring probe）為探測元件，它能將熱能轉變為電能。探測元件又名感測元件（Sensing element）。

(2)響應元件 (Response element) ——係將探測元件感測所產生之位移 (或其它信號) 再轉變為動能 (或另一種信號) , 進而可以做為指示之原動力。如圖 1-1 所示之布當彈簧 (Bourdon spring) 可將球莖內流體之位移轉變為連桿之位移。而熱電偶高溫計之此部份則係將熱探桿送出之電能信號轉變為檢流器 (Galvanometer) 指針偏轉之信號。

(3)操縱元件 (Manipulation element) ——係將響應元件發出之信號加以適當之變化或加大。如圖 1-1 所示之標度校正斜輪, 其目的為把響應元件送來之非綫性位移加以校正。熱電偶高溫計中之毫伏特計 (Millivoltmeter) 或電勢差計 (Potentiometer) 屬此部份。

(4)指示元件 (Indication element) ——此元件包括如圖 1-1 所示指針及標度板。

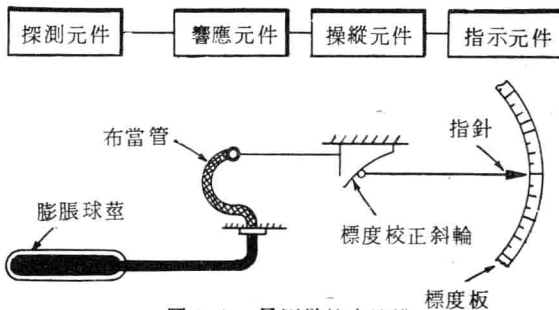


圖 1-1 量測儀錶之機構

事實上,並非一切儀錶均包括上述四大機構,例如某些簡單儀錶像玻璃水銀溫度計,僅含其中 1, 2 及 4 三種基構。某些儀錶則更形複雜,如圖 5-58 所示光測高溫計,則又遠較圖 1-1 為複雜。

1-4 工業儀錶之一般特性

當進行檢視一些在工業製造程序中遇到的變數及所使用之儀錶前,檢視者必先對儀錶之特性要有所瞭解。此等特性乃為一種儀錶被選用時應具備之能力,它可區分為靜態特性及動態特性。

I. 靜態特性 (Static characteristics)

靜態特性出現於變數不發生變化之系統中。儀錶之靜態特性有下列三種。

4 工業儀錶

1. 準確度 (Accuracy)

(1)量測儀錶之準確度：係指該儀錶指示或記錄欲量測變數之真實值之能力。其真實值與實際讀示之差謂之靜態誤差 (static error)。其準確度係以儀錶標度測定單位量之百分比表示之。

(2)控制儀錶之準確度：係指控制儀錶將變數控制到要求值 (Desired value) 之能力。受控制變數之要求值與實際值之差謂之該儀錶的靜態誤差。其準確度係以該儀錶所能保持欲控制變數之極限表示之。

2. 重現性 (Reproducibility)

(1)量測儀錶之重現性：係指儀錶多次量測某一變數之同一值時，所得結果之接近程度而言。儀錶如有十足的重現性乃指所量測出之值不產生漂移 (Drift)。所謂漂移是指在一段長時間內變數之真實值不變而實際量測值做漸進的變更。重現性又稱為精密度 (Precision)。

(2)控制儀錶之重現性：係指輸入相同信號下，儀錶之是否輸出相同信號之能力。漂移乃指當輸入信號保持不變期間，其輸出信號值在一段長時間內逐漸變更。

3. 靈敏度 (Sensitivity)

(1)量測儀錶之靈敏度：係指儀錶發生響應時變數值量測之最小改變值。其靜帶 (Dead Zone) 係指量測儀器不起響應之變數值範圍。

(2)控制儀錶之靈敏度：係指儀錶產生輸出信號改變時其輸入信號之最小改變限度。儀錶不產生輸出信號改變時，輸入信號改變範圍即為靜帶。

II. 動態特性 (Dynamic characteristics)

動態特性出現于變數正在改變之系統中，儀錶之動態特性有下列兩種：

1. 響應度 (Responsiveness)

(1)量測儀錶之響應度：係指儀錶追隨量測中變數值改變之能力。此特性與量測落後 (Measuring lag) 和靜時 (Dead time) 有關，量測落後係指該儀錶對響應變數改變之滯延；其靜時則係指儀錶對變數值改變時未能及時響應之一段時間謂之。

(2)控制儀錶之響應度：係指儀錶當輸入信號改變時，此儀錶亦產生另一輸出信號之能力。當儀錶對輸入信號改變時所受響應之滯延稱

之為控制器落後（Controller lag），其靜時則指該儀錶對輸入信號改變時未能及時響應之一段時間謂之。

2 保真度（Fidelity）

(1) 量測儀錶之保真度：係指該儀錶指示或記錄變數改變值之接近程度。其變數改變值與該儀錶實際讀數之差謂之動態誤差（Dynamic error）。動態誤差如圖 1-2 所示。

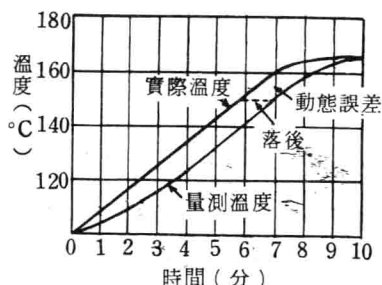


圖 1-2 溫度變化時動態誤差與落後

(2) 控制儀錶之保真度：係指該儀錶之輸出信號追隨其輸入信號改變的正確程度。該儀錶之改變輸出信號與改變輸入信號之差，乃其動態誤差。

儀錶的靜態特性與動態特性其關係可歸納如下：

特 性	要 求 者	不 要 求 者
靜態特性	準確度（Accuracy）	靜誤差（Static error）
	重現性（Reproducibility）	漂 移（Drift）
	靈敏度（Sensitivity）	靜 帶（Dead zone）
動態特性	響應度（Responsiveness）	時 滯（Time lag）
	保真度（Fidelity）	動誤差（Dynamic error）

1-5 工業上常用之變數

工業生產製造程序（Process）中各種變數係其物料或周圍環境之變化情況。變數中若能影響製造條件者，常須將變數之變化加以適當之控制至使成穩定性，而工業上常用變數之種類如下：

6 工業儀錶

1. 能量變數 (Energy Variable) :

- (1)溫度 (Temperature)
- (2)壓力和真空 (Pressure and Vacuum)
- (3)電力 (Electricity)
- (4)音響 (Sound)
- (5)放射性 (Radiation)

2. 量變數 (Quantity Variable) :

- (1)流量 (Flow)
- (2)液位 (Level)
- (3)重量 (Weight)
- (4)速率 (Speed)
- (5)厚度 (Thickness)

3. 物理與化學特性變數 (Physical and Chemical Characteristics Variable) :

- (1)密度 (Density)
- (2)比重 (Specific gravity)
- (3)濕度 (Humidity)
- (4)水分 (Moisture)
- (5)折光率 (Reflective index)
- (6)黏度及稠度 (Viscosity and Consistency)
- (7)發熱量 (Calorific value)
- (8)導電度 (Electric conductivity)
- (9)導熱度 (Thermal conductivity)
- (10)紅外線吸收 (Infrared absorption)
- (11)醃標值 (pH value)

1-6 工業儀錶之標準

由本章第一節知，不論工業儀錶在工業生產或製造上用來指示，記錄或積算，都與「量」有關。因此對每一種欲量測之量均需賦以一標準，以做為比較。本章將介紹如下之各種量之標準：

- (1)溫度之標準
- (2)壓力之標準

(3) 頻率及時間之標準

(4) 電功率相關量之標準

1-7 溫度之標準

廣義而言，溫度乃指一物體之冷或熱之比較程度。譬如吾人將左手置入「冷」水中感覺到冷；將右手放入「熱」水中感到熱。那是因為左手的「溫度」高于冷水；右手的「溫度」低于熱水。溫度既為一比較值，便需定出一冷熱的標準，某待測溫度之物體與標準值相比較，便可知該待測物體的溫度。其道理一如位能之計算以海平面為準。溫度之標準，通常選擇某物體之特殊物理性質而決定，例如水銀之體積隨溫度而改變；金屬導線之電阻隨溫度改變等。選出二標點以數值，在此二點間加以等分。溫度乃一示強量（Intensive quantity）——其高低與系統（System）之大小無關。又依熱力學第二定律——無外功作用下，熱恒由高溫向低溫傳送，故溫度之高低亦可由熱之傳送（Heat-transfer）方向瞭解。

溫度一如壓力及體積，在工業界上為一極重要的變數。例如化學作用之反應速率依操作時溫度之改變而昇降，操作溫度之高低不但影響反應完成所需的時間，而且還影響到反應物變為生成物的轉換率（Conversion factor）。因此工業界上溫度的控制成為不可缺的一環。溫度之測定更成為工業界必備的條件之一。

（I）溫度標度

溫度標度（Temperature scale），通常選擇某物體之特殊物理性質而決定，例如水銀或酒精之體積隨溫度而改變，鉑金屬線之電阻隨溫度而變化等。選出二點標以數值，在此二點間加以等分。

國際性溫度標度（International temperature scale）的制定源于早年各溫度測量儀錶製造者各有自己的一套溫度標度而顯得紊亂。一般所用的國際性溫度標度有下列數種：

(1) 華氏標度（Fahrenheit scale）首由華氏（Daniel Gabriel Fahrenheit, 1686 ~ 1736）制定。縮寫為 $^{\circ}\text{F}$ 。以一大氣壓下水之冰點為 32°F ，一大氣壓下水之沸點為 212°F 。

(2) 攝氏標度（Centigrade scale）由攝氏（Anders Celsius）於1742年制定一大氣壓下水之冰點為 0° ，一大氣壓下水之沸點為 100°

8 工業儀錶

縮寫爲 $^{\circ}\text{C}$ 。

(3)列示標度 (Réaumur scale)：列氏 (René-Antoine Ferchaltde Réaumur 1683 ~ 1757) 首用稀酒爲溫度計液，制定其冰點爲 0° ，蒸氣點 (Steam point) 爲 80° 。縮寫爲 $^{\circ}\text{R}'$ 。製糖工業常用。

(4)卡氏標度 (Kelvin scale)：卡氏 (Lord Kelvin) 定水之三相點 (Triple point — 在此狀況下冰，水及水氣達到平衡) 爲 273.16° 。縮寫爲 K 。亦即一大氣壓下之冰點爲 273.16 K ；沸點爲 373.16 K 。

(5)冉肯標度 (Rankine scale)：亦稱爲華氏絕對標度。定一大氣壓下水之冰點爲 491.69° ；沸點爲 671.69° 。縮寫爲 $^{\circ}\text{R}$ 。

上列各標度間之轉換關係如下：

$$1^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9}^{\circ}\text{C} = \frac{4}{9}^{\circ}\text{R}' \quad (1-1)$$

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{C} + 32 \quad (1-2)$$

$$^{\circ}\text{R}' = \frac{4}{9}^{\circ}\text{F} - 32 \quad (1-3)$$

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.16 \quad (1-4)$$

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 460.69 \quad (1-5)$$

圖 1-3 表示各種標度之關係。華氏標度與攝氏標度之轉換表列於附錄 1。

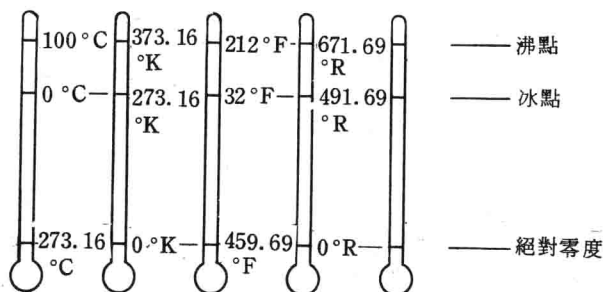


圖 1-3 各種溫度標度之關係

(II) 溫度計之校正

溫度計 (Thermometer) 及高溫計 (Pyrometer) 之校正，普通均採用間接方法，乃以定容積氣體溫度計確定幾個固定溫度點 (Fixed Temperature Point) ——如各種化學物質在標準狀態下之熔點或沸點——然後將待校儀錶之感測元件 (Sensing element) ——如熱電偶，膨脹球莖等——浸入此類化學物質中，靜觀其熔點或沸點之溫度。

熱電阻溫度計 (Thermal resistance thermometer) 及貴重金屬之熱電偶在 $0^{\circ} \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 之間，其準確度與定容積氣體溫度計相似，因此亦廣泛作為標準校正儀錶用。美國標準局曾利用：

(1) 鉑電阻溫度計在 -40° 與 450°C 之間，確立冰點 (0°C)，蒸汽點 (100°C) 及硫汽點 (444.6°C) 三個固定溫度點。並利用

(2) 貴重金屬熱電偶確立另外三個固定溫度點，即銅 (1083°C)，銻 (630.5°C) 及鋅 (419.505°C)。

溫度高于 1500°C 時，定容積氣體溫度計則不能作為標準校正用。於是應用史特凡·波子曼輻射定律 (Stefan-Boltzmann law of radiation) 以及高溫儀作為制定固定溫度點之標準。應用韋英定律 (Wien's law) 確定金之熔點 (1063°C) 為一標準之固定溫度點，然後再以此點作為校正溫度計時之根據。

下表列出工業上常用之固定溫度點 (表 1-1)

表 1-1 標準固定溫度點

	攝 氏	誤 差 ($^{\circ}\text{C}$)
絕對零度	-273.15	
氫之沸點	-269	
氫之沸點 [*]	-253.2	
氧之沸點	-182.97	± 0.02
水銀之凝固點	-38.87	
水之凝固點	0.000	
水之三相點	$+ 0.01$	± 0.0005
水之沸點	100.000	± 0.005
苯甲酸之三相點	122.36	
錫之凝固點	231.91	

鋅之凝固點	419.505	± 0.005
硫之沸點	444.60	± 0.002
鎘之凝固點	650.50	± 0.02
銀之凝固點	960.8	
金之凝固點	1063	± 0.2
白金之凝固點	1769	
鈦之凝固點	2443	
鎢之凝固點	3380	

1-8 壓力之標準

(I) 壓力之基本概念：所謂壓力 (pressure) 即為每單位面積上所受之力 (Force) 稱之，可用如下的式子表示：

$$P = \frac{F}{A} \quad (1-6)$$

式中 P = 壓力 (磅／平方英寸或稱為 psi ；磅／平方尺等)

F = 力 (磅)

A = 面積 (平方英寸，平方英尺等)

吾人打開水龍頭時，水源源不斷的流出，那是由於壓力所引起的現象。又假設一相通且大小不同的容器 (如連通管)，當水注入其中任一容器時，水就沿連通器而流到另外的容器內；停止注水時，則各容器的水位皆一樣高；此乃各容器底面每單位面積所承受的力相等之故，而此每單位面積所承受的力量稱之為壓力強度 (Intensity of pressure)。如圖 1-4 所示為一連通管。又依巴斯噶定律 (Pascal's Law)，壓力向四面八方傳送，由一容器傳向另一容器的壓力呈平衡狀態，而使各容器間保持相同的水位高。如圖 1-5 所示為巴斯噶原理。

壓力高差 (pressure head)：在液體中壓力與液體深度成正比，亦即壓力是隨液體之深度而增加，且向四面八方傳送。在此吾人可作一實驗證明其正確性；吾人可拿一塑膠杯子裝滿水，然後在不同高度的地方刺幾個孔讓水射出，吾人發現由較低之孔射出之水與較高之孔所射出之水速度相比，無疑的前者所流出之水急且遠。這可證明壓力是隨液體之深度而增加，如圖 1-6 所示。換言之，於深度較深的低