

科學圖書大庫

溫度壓力與流量測定基本原理

譯者 呂安陸

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

溫度壓力與流量測定基本原理

譯者 呂安陸

徐氏基金會出版

一版序言

有人說科學與科學史是不可分的，這一點我相信。在光速的測定上，若許多其他做相同工作的人在企圖與挫折被忽視的話，則如何能夠鑑賞Mickelson與Morley在這方面的偉大功績呢？如果不先遵循馬克士威（Maxwell），克希荷夫（Kirchoff），與維恩（Wien）的途徑，我們如何能領會普蘭克（Max Planck）的量子論的奧妙呢？所以對於熱與流動的測定，除非我們對伽利略（Galileo），達文西（da Vinci），牛頓（Newton），柏努力（Bernoulli），皮氏（Pitot），焦耳（Joule），凱爾文（Kelvin），Weisbach，Herschel，及其他竭力去感知溫度、壓力、與流動的人們的努力全部了解，我們就無法鑑賞今日呈現我們面前的精美儀器與技術。

人們說，在每一個成功的男人的背後，總有一個聰明的女人。如同這句話一樣，在每一個成功的包含機械的計畫、標度、或測試的背後，總有一位了解測定的工程師。不管你在設計及製造上花費了多少心力，最後的實地測試會判定你努力的成果。熱比率是否適合？是否引擎表現高至所期望的？是否冷卻裝置適當？等等問題可能排出一大串。這本書是為涉及溫度、壓力、及流率測定的工程師及相關的工作者設計為工作參考，以及為工科學生作教科書的。它在流體力學，熱力學，及熱傳學的範疇內對於機械工程師特別有用。它對於溫度、壓力、及流率的測定技術提供了通盤的回顧以及實際數據。每一個論題均經深入處理，而其應用均為以實際解出的數值例題來說明。這本書在所有必需的方程式、校正、圖解、曲線、及數據表等方面都是完備的。

這本書所討論的主題是我在西屋公司蒸氣與航空氣體渦輪部工作的這些年蒐集的。它們也受到了我出席各次（ASME）美國機械工程學

會，ASTM，與ASA在測定方面委員會的影響。這本書所包含的材料在基本上是我多年在Drexel 理工學院夜間部授課時一個學期課程內容。這些主題經由學生對這些材料的回應顯出非常高的興趣。

這本書的某些部分會出現在許多其他的出版物中。有三本我寫的書構成這本書的基礎，這幾本書是“溫度及其測定 (Temperature and Its Measurements) ”一九六三年七月出版；“流體流動測定 (Fluid Flow Measurement) ”一九六六年元月出版；及“壓力及其測定 (Pressure and Its Measurement) ”一九六七年十月出版；所有這些書都出現在Electro- Technology 的科學與工程叢刊 (Science and Engineering Series) 中。

我們都是研究熱及流動機具公司的人員，對於有些名字不在此序言中而有貢獻的人我感到內心不安。在此我要感謝對此書有任何功績的人。在課文的適當處可能引用的參考資料都引註原始作者。除此之外，我特別感謝我的妻子的耐心及其對初稿的打校技術。

我希望各位讀者和我一樣的享受閱讀這些材料。

荷里岡，賓西凡尼亞

羅勃特·班尼勉克

一九六八年十月

序 言

在準備這一版時，我曾盡量的將過去十年間在溫度、壓力、及流動測定上曾經發生的主要改變列於其中。特別是，國際實用溫標改變了。這個新溫標（IPTS-68）在此領域內是主要的法則，爲了反映這一點，我將第四章完全重寫。第六章討論電阻測溫術，也反映了IPTS的改變。美國國家標準局（NBS）在一九七四年發佈了新的溫差電偶參考表。於是，第七章經過修訂，使其包含了在工業上最常用的溫差電偶型式的最新溫度對電動勢表。同時，循此相同的途徑，國家標準局曾發佈了用於計算機應用產生新參考表值的方法。這些定出電動勢爲溫度函數的乘方多項式置於第七章中。在第二部分裏，很多新材料添進了第十七章內，以計及測壓栓的誤差，探針障礙效應，在壓力梯度中探針的功效等等。在第三部分裏，討論流動測定，第二十一，二十二，及二十三章均經改寫，加入了關於ASME洩放係數，膨脹因子，及類似方面的新資料。有一個全新部分是第十章，在這一章裏討論了統計學及不確定性等重要論題在工程測定值上的應用。我也曾盡力改正在第一版內所發生的重大錯誤，並提供了更完整及最新的參考文獻。最後，在每一章裏又額外加了些解好的例題，且在每一章末了加了問題以作幫助教授這些主題的材料。

我對我的妻子對她持續的耐心，以及初稿重新打字，再度表示謝意。最後，祝福本書的最終使用者、學生、教師與研究人員。

荷里岡，賓西凡尼亞

羅勃特·班尼迪克

一九七六年八月

目 錄

第一部分 溫度及其測定方法

第一章 早期預測冷熱程度的嘗試	3
1-1 一般普遍對於冷熱的知覺	3
1-2 以往發展情形概述	3
1-3 參考文獻	6
第二章 空氣溫度計	8
2-1 波義耳——馬瑞特定律	8
2-2 查理——給呂薩克定律	9
2-3 克拉柏隆狀態方程式	9
2-4 雷諾特理想氣體	11
2-5 參考文獻	13
代表符號	14
第三章 溫度的熱力學觀點	16
3-1 凱氏熱力學溫標	16
3-2 熱力學定理及同一性質	18
3-3 絕對溫度的實際獲得	20
3-4 參考文獻	22
代表符號	23

第四章 國際實用溫標	25
4-1 固定點	25
4-2 內插法及內插方程式	26
4-3 標準經驗溫標	28
4-4 預言	41
4-5 參考文獻	43
代表符號	44
第五章 液體溫度計	46
5-1 原理與定義	46
5-2 桿的刻度校準	47
5-3 玻璃特性的記註	51
5-4 參考文獻	51
代表符號	52
第六章 電阻測溫術	53
6-1 原理	53
6-2 感測器	54
6-3 電路與電橋	57
6-4 方程式及其解	59
6-5 凱蘭得係數	67
6-6 參考文獻	72
代表符號	73
第七章 溫差電測溫術	75
7-1 基本關係的歷史發展	75
7-2 凱爾文關係	79
7-3 溫差電學的微視觀點	84
7-4 溫差電學的巨視觀點	86

7-5	溫差電路的一些定律·····	89
7-6	基本溫差電路·····	92
7-7	電路組件中的不穩定性·····	102
7-8	溫差電的參考表·····	104
7-9	溫差電路分析·····	113
7-10	參考文獻·····	136
	代表符號·····	138
第八章 光測高溫術·····		141
8-1	歷史回顧·····	141
8-2	光測高溫術原理·····	144
8-3	刻度校訂·····	154
8-4	雙色光測高溫計·····	156
8-5	自動光測高溫計·····	156
8-6	參考文獻·····	158
	代表符號·····	158
第九章 溫度感測器的刻度校準·····		160
9-1	總 論·····	160
9-2	受控制的溫度環境·····	161
9-3	內插法·····	171
9-4	由刻度校準數據求溫度·····	176
9-5	參考文獻·····	184
	代表符號·····	185
第十章 不穩定性與統計學·····		187
10-1	總 論·····	187
10-2	統計的關係·····	189
10-3	參數之變異·····	203
10-4	不確定性之考慮·····	210

10-5	不確定性向結果的推進	211
10-6	所需的測定值數量	214
10-7	參考文獻	218
	代表符號	219
第十一章	運動流體中的溫度測定	221
11-1	理想化的氣體	221
11-2	理想化的氣體—溫度—感測探針	222
11-3	理想化的氣體——溫度關係	222
11-4	理想化的液體	224
11-5	真實氣體效應	225
11-6	真實液體效應	227
11-7	恢復因子	228
11-8	氣體的動態校正因子	237
11-9	特別動態校正因子	239
11-10	動態校正因子的應用	241
11-11	參考文獻	242
	代表符號	243
第十二章	裝置方式對溫度感測器的效應	246
12-1	用於流體裝置的組合熱傳遞方程式	246
12-2	組合的熱傳遞方程式解	251
12-3	某些有用的熱傳遞係數	256
12-4	流體的應用及實例	263
12-5	固體的應用	267
12-6	參考文獻	270
	代表符號	271
第十三章	瞬間溫度測定	274
13-1	總論	274

13-2	一級回應的數學發展	276
13-3	二級回應	279
13-4	以實驗方法求時間常數	283
13-5	時間常數的應用	285
13-6	修正的考慮因素	287
13-7	增進回應的方法	290
13-8	參考文獻	293
	代表符號	294

第二部分 壓力及其測定

第十四章 壓力的概念 297

14-1	概 念	297
14-2	歷史回顧	300
14-3	簡短的摘要	302
14-4	參考文獻	303
	代表符號	303

第十五章 壓力標準 305

15-1	負重活塞壓力計	305
15-2	液柱壓力計	311
15-3	微量液柱壓力計	315
15-4	氣壓計	319
15-5	麥克里德壓力計量器	325
15-6	參考文獻	330
	代表符號	331

第十六章 習用壓力換能器原理 334

16-1	定 義	334
16-2	機械壓力換能器	335

16-3	電壓力換能器	341
16-4	參考文獻	347
	代表符號	347
第十七章 運動流體中壓力的測定		349
17-1	定 義	349
17-2	數學關係	349
17-3	靜壓力的感測	353
17-4	感測總壓力	372
17-5	橫向梯度效應	376
17-6	擾動效應	381
17-7	推論總壓力	382
17-8	參考文獻	382
	代表符號	384
第十八章 瞬間壓力測定		387
18-1	總 論	387
18-2	用於氣體的數學發展	387
18-3	充滿液體的壓力系統的回應	399
18-4	參考文獻	401
	代表符號	402
第三部分 流量及其測定		
第十九章 流率的概念		406
19-1	概 念	406
19-2	歷史回顧	409
19-3	參考文獻	410
	代表符號	411

第二十章 開放流道流動

20-1 一般關係	412
20-2 自由流出的水閘	417
20-3 浸沒流出的水閘	419
20-4 堰	423
20-5 參考文獻	425
代表符號	425

第二十一章 封閉流道流動的理論流率

21-1 總論	427
21-2 定密度流體	428
21-3 可壓縮的流體	430
21-4 臨界流動關係	433
21-5 參考文獻	435
代表符號	436

第二十二章 洩放係數

22-1 總論	438
22-2 ASME流動噴嘴	442
22-3 HEI流動噴嘴	457
22-4 ASME細腰流量計	459
22-5 ASME直角邊緣孔口	459
22-6 參考文獻	468
代表符號	469

第二十三章 膨脹因子

23-1 總論	471
23-2 以實驗法測定Y	473
23-3 以分析法決定Y	473

23-4	實驗法與分析法的Y值比較	475
23-5	噴嘴與細腰流量計的膨脹因子	475
23-6	孔口的膨脹因子	483
23-7	在流體計量中的一個問題	484
23-8	參考文獻	485
	代表符號	485
第二十四章 裝置及不確定性		487
24-1	流動計的裝置	487
24-2	不穩定性	488
24-3	決定流率不確定性的實例	499
24-4	參考文獻	503
	代表符號	503
題解		506
索引		

第一部份 溫度及其測定方法

“ “……我們可以把某些一定的溫度，例如正在溶化的冰，稱爲一單位或其他任何我們想指定的數，來對溫度測定的數量定一個單位或程度。……”

William Thomson (1854)

第一部分總論

第一部分討論與溫度有關的事物，包括：以前人們認爲溫度是什麼；早期測定溫度的努力；現在人們認爲它是什麼；在實驗室裏如何去體認它；以及測定溫度的各種不同的慣用方法。

今天，在科學上認爲溫度是基本變數之一。如果沒有溫度的概念，則熱力學、流體力學、熱傳學、航空動力學、太空航空學、化學、及物理學等，都會失去方向。但是，當我們查驗溫度的基礎時，對溫度的重要性及意義發現許多令人困惑的事。例如：早期的科學家雖然對人類的體溫的恆定性毫不懷疑，但對於水的冰點則非常肯定的存有疑問，且認爲它是可變的。或者，更有當討論到“潛熱”，“燃素”(Phlogiston)，“熱素”(Caloric)這些詞彙時，所有這些項目，都被引入描述一個微妙的“精神”概念中。

一位偉大的美國科學史家George Sarton曾經說過“如果某一個人，他對某一件事物的簡要發展經過都不知道，他在這一方面便不能算是專家”。爲了符合這一要求，我們確信，若要想精通溫度的測度，就

必須如同熟悉現有測溫術的各種儀器與技術一樣的去了解測溫術的壓力發展。

因此，在第一部分裏，我們的目的是描繪出令人滿意的溫度概念的發展經過，然後簡要的敘述測溫術的主要進展，進而討論國際實用溫標，稍詳細的以國際實用溫標為基準去體認溫度的各種實用方法。諸如：灌裝液體的玻璃溫度計，電阻溫度計，溫差電偶溫度計（熱電偶溫度計），及光測高溫計等；並討論穩定狀態時熱回應與熱回復的觀念；非流動溫度的概念；以及特別考慮當我們想要測定在運動中流體或固體內的溫度時，所遭遇到的裝置上的問題。

第一章 早期預測冷熱程度的嘗試

“……當我獲悉水在一定的熱度沸騰時，我立即渴望製造一隻溫度計，……”

Daniel Gabriel Fahrenheit (1706)

1 - 1 一般普遍對冷熱的知覺

溯往遠古，人類對冷熱的程度就有了相當的瞭解，例如：熾熱的太陽，冰冷的水，炙人的沙漠，陰冷的森林，滾燙的油，凍人的冰，等等。的確，從表面上來看，冷和熱的變化是無窮的。然而由於痛感的緣故，人類的感官雖然很靈巧，但除了有限的範圍，無法區別冷熱的極端，甚且在不痛的範圍內，也只能感覺出相對的冷熱程度。因此，從科學的觀點來看，人類的感官是一種不十分圓滿的感溫工具。

1 - 2 以往發展情形概述

根據幾件古老的資料，發明測定冷熱工具的人，首推伽利略 (Galileo Galilei) [1]*，他有一個學生叫維維亞尼 (Vincenzo Viviani) 在“伽利略的一生” (Life of Galilei) 中寫道：“……一五九二年底，大約是伽利略在 Padua 大學擔任數學講座教授的時期，他發明了用玻璃製成，內裝空氣及水的溫度計，……”，還有，威尼斯的 Francesco Sagredo 在一六一三年五月九日給伽利略的信裏

* 大多數有關測溫術的早期歷史可在參考文獻 [1]，由 H. C. Bolton 所寫的一本小冊子內找到。

寫着“……對於你發明的量熱工具，我做了幾種合適的形式，可以用來量得不同地方溫度的差別，……”。伽利略所設計的量熱工具會受到大氣壓力的影響，現在這種工具稱為“氣壓溫度計（Barothermoscope）”。

“Thermometer（溫度計）”這個字首先出現在文獻上是一六二四年在一本由J. Leurechon所寫的一本名為“La R'ecreation Math'ematique）”的書中，作者敘述溫度計是“……一種由玻璃製成，上端有個小泡，其下為一長頸的工具，好一點的是一支細長的管子，它的末端小泡裝滿了水，……依據哲（科）學家們的做法，把管子上畫一條沿縱軸方向的直線，再將此直線分成八個刻度，用來決定熱度的改變程度……”。

大約在一六五四年，他斯卡尼（義大利的一個行政區）大公Ferdinand II，做了一種普通形式的驗溫器（Thermoscope，顯示溫度變化，而不很準確的工具），灌了酒精後將測溫部分小泡及管子成半球狀的密封起來，這是第一種不受壓力影響的測溫工具。

一六六四年，虎克（Robert Hooke）把他的溫度計的零點定在“……當小泡放進結冰的蒸餾水中時，管內液面的位置……”

荷蘭科學家兼數學家惠更斯（Christion Huygens）察覺到早期的高溫測定者所遭遇的困難。他在一六六五年元月二日的一封信裏寫道“……先獲取一個冷與熱的普遍概念及一定的標準，找出溫度計小泡與管子容量的一定比例，將是有益的。然後再在水開始凝結的時候當作是冷的開始，或者更好一點的是，將沸水的溫度當作開始……”。

一六六五年，波義耳（Robert Boyle）說“……我們很難找出一個標準，這個無以名之的量（溫度）有幾種差異，而使我們感覺無所依從，且用來測定冷熱的溫度計又是如此難以捉摸的東西，看起來不可能像時間，距離，重量那樣可靠。”

一六六七年，Cimento研究院的L. Magalotti對於建立溫度計標度的敘述說明了以往的絕對武斷，“……下一件事是把工具的細長部分（或稱管部）用圓規分成十等分，用白漆畫上刻度，你可以用綠玻璃或黑漆在兩個分割之間再分一半，這些小分割最好是用肉眼來做，這