

乾濕球溫度對於相對濕度量測誤差之影響

Effects of the Relative Humidity Error from Measuring Dry Bulb and Wet Bulb Temperatures

國立中興大學農機系副教授

陳 加 忠
Chiachung Chen

國立嘉義農專農機科講師

沈 德 欽
Der-Chin Sheng

國立中興大學農機系副教授

雷 鵬 魁
Perng-Kwei Lei

摘 要

此研究中，探討以乾、濕球溫度值計算相對濕度之誤差特性。並以 ASHRAE 公式標準值比較經驗公式之適用性。比較乾、濕球溫度之量測誤差對於相對濕度值之計算誤差之影響能力。利用吸風式溫濕球溫度計以研究濕球溫度量測作業所需風速與作業時間。試驗結果顯示經驗公式中 Penman 公式最佳，準確度為 $\pm 0.3\%$ RH。乾、濕球溫度量測誤差同為高估或低估時，對相對濕度值計算之準確性影響不顯著。兩種溫度各為高估與低估時，對相對濕度計算值則造成嚴重誤差。此研究中吸風式乾濕球溫度計所需之風速為 $3 \sim 5\text{m/s}$ ，作業時間為 60 秒以上。

關鍵詞：乾球溫度，濕球溫度，相對濕度，量測誤差，濕度計。

ABSTRACT

The errors of relative humidity by the calculation from the measurement values of dry bulb and wet bulb temperatures were analyzed. Four empirical equations used to calculate the RH value were compared with the standard values that adopted from the ASHRAE Standard model. The calculated bias and relative errors derived from the measured errors of temperature were evaluated. The required ventilation speed and period of an aspirated psychrometer were studied. The results of this study indicate that the Penman equation was the best empirical models to calculate the RH values. The accuracy is 0.3% . As the measuring errors for dry and wet bulb temperatures had the same pattern of over-estimated or underestimated values, the effect of the accuracy for the calculated RH values was insignificant. As one temperature is underestimated and the other is over-estimated, the calculated errors become so serious. An airspeed of $3\text{m/s} - 5\text{m/s}$ and the operating period of 60 sec is the adequate technique for the measuring of wet bulb temperature.

Keywords : Dry bulb temperature, Wet bulb temperature, relative humidity, Measuring error, Psychrometer.

一、前言

為穩定生產與克服不良大氣環境之影響，國內農業生產已逐漸採用各型設施。在畜產方面，密閉性雞舍已開始引入國內。而園藝作物生產方面，設施與溫室之利用面積也逐年增加。設施內部之環境控制已開始為業者所重視，而環控系統之成敗取決於環境因子量測之準確性。

國外之設施環境監控對象向來以溫度為主。近年來，由於農業生產已逐漸移往熱帶地區，設施內部的空氣水份對生物之影響性已開始有所研究。例如溫室內部相對濕度對於作物之影響研究中，Hand 氏 (1988) 探討相對濕度對於溫室內作物病害之影響性，Aikman 氏及 Houter 氏 (1990) 與 Holder 氏及 Holter 氏 (1990) 研究濕度對於蕃茄作物之影響，Stanghellin 氏及 Jong 氏 (1995) 則討論溫室環境模式中相對濕度參數之模式建立與驗證。在畜產方面，相對濕度對動物之影響可由 THI 與 BGHI 等指標得知 (Buffington et al., 1981)。近年來，更有多篇之相關研究 (Randall, 1983; Veit et al., 1985; Ross et al., 1988)，顯示濕度量測在畜產之重要。

農業環境下使用之相對濕度量測技術主要應用有電子式相對濕度計，乾濕球溫度計，露點溫度計等 (山口, 1975, Albright, 1990)。露點溫度計因售價昂貴，使用步驟繁雜，利用者較少，通常僅為研究人員採用以做為比較標準，用以評估其他量測設備之性能 (Barber and Gu, 1989a; Costello et al., 1991a)。

利用電子原理開發而成的相對濕度計近年來逐漸受到重視。Erdebil 氏及 Leonard 氏 (1992) 探討三型電子濕度計在畜舍內之量測性能，Hao 與 Leonard 氏 (1994) 則比較兩型電容式濕度計在高氨濃度與灰塵環境下的耐久性。Mitchell 氏 (1985) 曾比較六型濕度計之作業性能。國內在此方面之研究，包括電阻式與電容式濕度計之四種性能研究 (陳氏等, 1990)，並開發完成相對濕度之標準校正裝置 (陳與曹, 1992b)。利用電容式濕度計對濕度量測之研究結果已應用於溫室內部微氣候模式之建立與驗證 (陳等, 1992a)，細霧冷卻系統之開發 (陳及陳, 1994a) 與不織布直覆栽培之研究 (陳

氏等, 1994b)。

以乾球溫度與濕球溫度之量測值進行相對濕度之量測作業已廣泛為業者採用，此型設備具有簡易，方便且成本低廉之特點。以 ASHRAE (1982) 為例，已建立此技術之應用準則。利用量測所得之乾濕球溫度，配合經驗公式以計算相對濕度值，此種技術之影響因子包括溫度量測設備之準確性，濕球溫度計之加濕物質是否純淨，使用之加濕用水是否乾淨，通過濕球溫度感測元件表面之風速是否足以達到熱力平衡狀態。利用此型量測技術最主要的限制條件如下：

(1) 加濕設備需要經常補充用水並加以維護。

(2) 通過濕球溫度感測元件之表面風速應高於一定數值。

濕球溫度之量測原理簡介如下 (White and Ross, 1991)。將溫度感測元件外面纏附吸水物質，再以大氣強制通過元件表面，在大氣空氣未飽和狀態，水氣自溫度感測元件上蒸發，因此溫度逐漸降低至一最低平衡點，此時之溫度計稱為濕球溫度。Penman 氏 (1958) 對此現象提出熱力學平衡理論：在濕球溫度量測中，溫度降低引起之顯熱變化損失等於空氣中水氣增加所得到之潛熱。顯熱之能量 H_s 為 $C_p \cdot (T_d - T_w)$ ， C_p 為空氣比熱， T_d 與 T_w 為所量測乾濕球溫度，潛熱能量 H_l 為 $L \cdot (W_s - W)$ ， L 為在溫度 T_d 時水之蒸發潛熱， W_s 為飽和狀態下絕對濕度， W 為在 T_d 狀態下絕對濕度。由 H_s 等於 H_l 之關係，可導出相對濕度之計算公式 (ASHRAE, 1982; ASAE, 1993)。White and Ross (1991) 評論此技術，認為大氣之相對濕度愈高，此技術愈加準確，而 T_d 與 T_w 值相差愈大，準確性愈差。

在溫室環境系統中，荷蘭溫室即採用乾濕球溫度之量測以計算相對濕度。國內台糖公司所開發之環控系統亦使用此種技術 (黃, 1991)。為改良利用乾濕球量測以計算相對濕度之作業性能，Barber 與 Gu 氏 (1989a) 進行此種量測技術與其他三型濕度計於畜舍環境應用下之準確性，結果發現吸風式 (aspirated) 乾濕球溫度計 (Psychrometer) 之準確性最良，塵埃之累積並未影響此型濕度計之性能。然而此研究者發現在常溫狀態 (24°C)，溫度量測誤差為 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 時，相對濕度之量測誤差為 $\pm$

一、前言

為穩定生產與克服不良大氣環境之影響，國內農業生產已逐漸採用各型設施。在畜產方面，密閉性雞舍已開始引入國內。而園藝作物生產方面，設施與溫室之利用面積也逐年增加。設施內部之環境控制已開始為業者所重視，而環控系統之成敗取決於環境因子量測之準確性。

國外之設施環境監控對象向來以溫度為主。近年來，由於農業生產已逐漸移往熱帶地區，設施內部的空氣水份對生物之影響性已開始有所研究。例如溫室內部相對濕度對於作物之影響研究中，Hand 氏 (1988) 探討相對濕度對於溫室內作物病害之影響性，Aikman 氏及 Houter 氏 (1990) 與 Holder 氏及 Holter 氏 (1990) 研究濕度對於蕃茄作物之影響，Stanghellin 氏及 Jong 氏 (1995) 則討論溫室環境模式中相對濕度參數之模式建立與驗證。在畜產方面，相對濕度對動物之影響可由 THI 與 BGHI 等指標得知 (Buffington et al., 1981)。近年來，更有多篇之相關研究 (Randall, 1983; Veit et al., 1985; Ross et al., 1988)，顯示濕度量測在畜產之重要。

農業環境下使用之相對濕度量測技術主要應用有電子式相對濕度計，乾濕球溫度計，露點溫度計等 (山口, 1975, Albright, 1990)。露點溫度計因售價昂貴，使用步驟繁雜，利用者較少，通常僅為研究人員採用以做為比較標準，用以評估其他量測設備之性能 (Barber and Gu, 1989a; Costello et al., 1991a)。

利用電子原理開發而成的相對濕度計近年來逐漸受到重視。Erdebil 氏及 Leonard 氏 (1992) 探討三型電子濕度計在畜舍內之量測性能，Hao 與 Leonard 氏 (1994) 則比較兩型電容式濕度計在高氨濃度與灰塵環境下的耐久性。Mitchell 氏 (1985) 曾比較六型濕度計之作業性能。國內在此方面之研究，包括電阻式與電容式濕度計之四種性能研究 (陳氏等, 1990)，並開發完成相對濕度之標準校正裝置 (陳與曹, 1992b)。利用電容式濕度計對濕度量測之研究結果已應用於溫室內部微氣候模式之建立與驗證 (陳等, 1992a)，細霧冷卻系統之開發 (陳及陳, 1994a) 與不織布直覆栽培之研究 (陳

氏等, 1994b)。

以乾球溫度與濕球溫度之量測值進行相對濕度之量測作業已廣泛為業者採用，此型設備具有簡易，方便且成本低廉之特點。以 ASHRAE (1982) 為例，已建立此技術之應用準則。利用量測所得之乾濕球溫度，配合經驗公式以計算相對濕度值，此種技術之影響因子包括溫度量測設備之準確性，濕球溫度計之加濕物質是否純淨，使用之加濕用水是否乾淨，通過濕球溫度感測元件表面之風速是否足以達到熱力平衡狀態。利用此型量測技術最主要的限制條件如下：

(1) 加濕設備需要經常補充用水並加以維護。

(2) 通過濕球溫度感測元件之表面風速應高於一定數值。

濕球溫度之量測原理簡介如下 (White and Ross, 1991)。將溫度感測元件外面纏附吸水物質，再以大氣強制通過元件表面，在大氣空氣未飽和狀態，水氣自溫度感測元件上蒸發，因此溫度逐漸降低至一最低平衡點，此時之溫度計稱為濕球溫度。Penman 氏 (1958) 對此現象提出熱力學平衡理論：在濕球溫度量測中，溫度降低引起之顯熱變化損失等於空氣中水氣增加所得到之潛熱。顯熱之能量 H_s 為 $C_p \cdot (T_d - T_w)$ ， C_p 為空氣比熱， T_d 與 T_w 為所量測乾濕球溫度，潛熱能量 H_l 為 $L \cdot (W_s - W)$ ， L 為在溫度 T_d 時水之蒸發潛熱， W_s 為飽和狀態下絕對濕度， W 為在 T_d 狀態下絕對濕度。由 H_s 等於 H_l 之關係，可導出相對濕度之計算公式 (ASHRAE, 1982; ASAE, 1993)。White and Ross (1991) 評論此技術，認為大氣之相對濕度愈高，此技術愈加準確，而 T_d 與 T_w 值相差愈大，準確性愈差。

在溫室環境系統中，荷蘭溫室即採用乾濕球溫度之量測以計算相對濕度。國內台糖公司所開發之環控系統亦使用此種技術 (黃, 1991)。為改良利用乾濕球量測以計算相對濕度之作業性能，Barber 與 Gu 氏 (1989a) 進行此種量測技術與其他三型濕度計於畜舍環境應用下之準確性，結果發現吸風式 (aspirated) 乾濕球溫度計 (Psychrometer) 之準確性最良，塵埃之累積並未影響此型濕度計之性能。然而此研究者發現在常溫狀態 (24°C)，溫度量測誤差為 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 時，相對濕度之量測誤差為 $\pm$

5 % RH，在低溫狀態(10℃)，溫度量測±0.5℃則引起±10 % RH量測誤差。為改良此型溫度計之作業性能，Barber氏等(1989b)比較四型乾濕球溫度計之作業性能，並開發兩型濕度計。第一種為利用噴霧方式供應濕球溫度感測元件上吸水物質所需水量，第二種為以機械動作將濕球溫度感測元件浸入供水容器內以吸附水份。利用此兩型感測器可清洗吸水物質上之灰塵，並改良傳統供水方式所需之維護問題。所用之通風速度為1.3m/s至2.1m/s。到達濕球平衡狀態所需時間僅為兩分鐘。Costello氏等(1991a)開發之新型乾濕球濕度計係將濕球溫度感測元件固定浸入盛水容器，在執行量測之前再提出水面，以2.5m/s至10m/s範圍之風速通過表面以進行量測。在超過4分鐘之通風時間後進行濕球溫度量測，以露點溫度計為標準儀器比較，此種量測技術之誤差在畜舍環境內約為5.0 % RH。

Costell 與 Breey(1991b)研究濕球溫度計到達濕球平衡狀態之控制策略，考慮濕球溫度到達最低值之影響因子為通過之空氣速度，空氣熱力性質與感測元件之熱質傳物性。研究結果以量測過程中，濕球溫度連續量測值到達最低值為真實濕球溫度值，而通常需要240秒之通風時間。感測元件之大小、直徑、電子元件反應時間對均此通風時間造成影響。

由上述之研究文獻可知，乾濕球濕度計之量測性能取決於以下之條件：

- (1)溫度量測元件具有良好之準確性。
- (2)量測所得之濕球溫度為熱力平衡狀態下真實之濕球溫度。
- (3)用以計算相對濕度之應用公式準確性良好。

在條件(2)中，濕球溫度量測通過濕球感測元件所需之風速與到達熱力平衡狀態所需時間並未有一致結果。ASHRAE學會(1982)之推薦標準為3.0 ~ 5.0m/sec，世界氣象組織(WMO, 1971)為2.5m/s ~ 10.0m/s，ASAE學會則採用大於5.0m/s之風速(White and Ross, 1991)。到達濕球溫度所需時間亦不相同。

Gate氏(1993)曾以乾球溫度量測誤差與相對濕度之量測誤差評估以兩參數計算露點溫度之相

對誤差值。溫度之量測誤差對於相對濕度計算值之影響尚未有所探討。以乾濕球溫度計算相對濕度之公式有兩類：一類為理論公式，另一類為經驗公式，兩類公式之準確性比較需要加以評估，以為使用者參考。

此研究目的如下：

- 1.比較以乾濕球溫度計算相對濕度各項公式之準確性。
- 2.以迴歸分析技術，改良相對濕度計算公式之準確性。
- 3.探討乾、濕球量測誤差對於相對濕度計算值相對誤差值影響性。
- 4.以吸風式乾濕球濕度計試驗通風之風速與通風時間對於濕球溫度量測之影響。

二、理論探討

(一)相對濕度計算之理論公式

自乾球與濕球溫度以計算相對濕度之理論公式如下(ASAE, 1993)

$$1. RH = \frac{P_s}{P_{ws}} \dots\dots\dots (1)$$

RH：相對濕度(小數點)

P_s ：空氣中水份之蒸氣壓(Kpa)

P_{ws} ：空氣中水份在此特定溫度下之飽和蒸氣壓(Kpa)

2.飽和蒸氣壓(P_{ws})之公式

$$\ln(P_{ws}) = \frac{A_1}{T_k} + A_2 + A_3 T_k + A_4 T_k^2 + A_5 T_k^3 + A_6 T_k^4 + A_7 \ln(T_k) \dots\dots\dots (2)$$

T_k ：溫度(K^0)

$A_1 \sim A_7$ 為計算常數(constant)。

3.以乾球溫度Td，濕球濕度Tw計算RH值。

$$P_{s,wb} - P_s = B * (T_w - T_d) \dots\dots\dots (3)$$

$$B = \frac{1006.93 * (P_{s,wb} - P_{atm}) (1 + 0.15577 \frac{P_v}{P_{atm}})}{0.62194 * h_{fg}} \dots\dots\dots (4)$$

在此：

$P_{s,wb}$ ：在溫度為 T_w 時之飽和蒸氣壓，可利用公式(2)計算

P_{atm} ：大氣壓力，通常為101.5KPa。

h_{fg} ：在濕球溫度 T_w 時，水之蒸發潛熱
(Latent heat of vaporization)。

濕球溫度計以紗棉覆蓋，紗棉另一端放入盛水容器之內，所用水質均經過淨水裝置以減少雜質。

溫度計在測定之前，以 YokoGawa IM2793-01E 型標準電壓產生裝置 (Decade Resistance Box) 進行校正，經校正後之溫度量測誤差為 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

風速量測所用之熱線型風速計為 Swema Air-30 型，準確性為 0.05m/sec 。

為用以比較濕球溫度，利用 Rotronic GT-P 型濕度計量測與計算所得之濕球溫度為標準值。此形濕度計經校正後，濕度之準確性為 $\pm 0.7\%$ RH (陳氏，1990)。

(二) 試驗步驟

在三種不同相對濕度下之大氣環境進行風速與作業時間對於濕球溫度量測準確性影響能力之研究。所用之風速計有 1.0m/s 、 2.0m/s 、 3.0m/s 、 4.0m/s 與 5.0m/s 五種。進行試驗時，將乾濕球溫度計 Rotronic GT-P，相對濕度計與 DL-T datalogger 連結。在固定風速之下，開動風扇，每 2sec 記錄一次，在濕球溫度連續一分鐘未有變化時，停止記錄並完成此次試驗。

(三) 數據分析

1. 相對濕度計算公式之比較

在乾球溫度為 20°C 、 30°C 、 35°C 與 40°C 之狀況下，以公式(2)、(3)、(4)計算在不同濕球溫度條件下，所得的相對濕度值為標準值比較公式(6)、(7)、(8)與(9)之準確性與適用範圍。

2. 預期相對誤差之比較

以 20°C 、 30°C 與 40°C 之乾球溫度條件下，比較乾濕球溫度之量測誤差值對相對濕度計算值之預期相對誤差 Erms 值。

3. 比例誤差之比較

以(2)項相同狀況下，比較量測誤差量 (DRH) 與比例誤差值 (Err) 之影響。

四、結果與討論

(一) 相對濕度所用計算公式之比較

以 ASHARE(Eq.4) 之計算公式所得相對濕度值為標準值，用以比較其他 Penman 公式 (Eq.6)，Goff-gratch 公式 (EEq.7)，福岡公式 (Eq.8) 與 Harrison 公式 (Eq.9) 之相對濕度計算值之準確性。

乾球溫度之條件為 $20, 30, 35$ 與 40°C ，配合濕球溫度之範圍以包括國內大氣環境之各種溫濕度狀況。其計算結果如表 1。

表 1. 不同公式計算所得相對濕度值比較

乾球溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	濕球溫度	Eq (4) ASHRAE公式	Eq (6) Penman公式	Eq (7) Goff-Gratch式	Eq (8) 岡田式	Eq (9) Harrison式
40	30	93.92	93.89	93.88	93.81	93.84
	38	88.08	88.02	88.00	87.47	87.92
	36	77.05	76.95	76.91	75.86	76.77
	34	66.86	66.72	66.65	65.08	66.46
	32	57.43	57.26	57.18	55.06	56.93
	30	48.71	48.53	48.42	45.80	48.13
	28	33.19	32.97	32.82	29.15	32.48
	22	19.90	19.64	19.45	14.73	19.08
	20	13.98	17.69	13.48	18.24	13.12
	34	93.45	93.42	93.41	93.08	93.37
35	32	81.10	81.02	80.98	79.98	80.86
	30	69.67	69.56	69.49	67.83	69.30
	28	59.11	58.96	58.86	56.54	58.62
	26	49.33	49.16	49.03	46.04	48.74
	24	40.28	40.08	39.92	36.27	39.60
	22	31.90	31.67	31.49	27.17	31.14
	20	24.14	23.87	23.66	18.68	23.30
	18	16.93	16.63	16.39	10.75	16.0
	29	92.87	92.84	92.82	92.40	92.77
	28	86.01	85.96	85.92	85.07	85.83
30	27	79.41	79.33	79.28	78.0	79.14
	26	73.06	72.96	72.89	71.20	72.72
	24	61.08	60.94	60.82	58.28	60.59
	22	49.97	49.79	49.64	46.25	49.36
	20	39.84	39.46	39.27	35.03	38.98
	18	30.13	29.66	29.64	34.55	29.3
	19	91.17	91.14	91.11	90.39	91.05
	18	82.06	82.00	82.52	81.10	82.42
	17	74.46	74.35	74.25	72.11	74.10
	16	66.55	66.40	66.27	63.42	66.10
20	15	58.93	58.73	58.58	55.0	58.36
	14	51.56	51.33	51.12	46.85	50.90
	13	44.46	44.18	43.94	38.95	43.70
	12	37.59	37.26	36.99	31.29	36.75
	10	24.55	24.11	23.78	16.65	23.54

由表 1 所示，岡田公式計算之結果僅在高相對濕度 (RH = 70 %) 以上，與 ASHARE 標準值較近。而 70 % RH 以下之環境，則有嚴重之偏離現象。顯示此公式適用範圍並不高。其他三公式與標準值十分接近，以迴歸分析之結果如下：

1. Penman 公式

$$Y_1 = -0.389 + 1.0039X, R^2 = 0.9999, SE = 1.49 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (10)$$

Y_1 : Penman 公式之計算值。

X : ASHARE 公式之計算值。

2. Goff-Gratch 公式

$$Y_2 = -0.6883 + 1.00684X, R^2 = 0.9998, SE = 5.42 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (15)$$

Y_2 : Goff-Gratch 公式之計算值。

3. Harrison 公式

$$Y_3 = 1.1293 + 0.98916X, R^2 = 0.9999, SE = 2.925 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (15)$$

Y₃: Harrison 公式之計算值。

比較 $Y = a + bX$ 之迴歸直線係數值，Y_i 值與 X_i 值若愈相接近，迴歸係數 a 應與數值 0.0，b 與 1.0 無顯著差異。公式(13) - (15) 僅公式(13) 之斜率值 1.0039 與數值 1.0 以 t 檢定結果無顯著差異，且公式(13) 具有最小之 SE 值。以 ASHRAE 公式與其他三公式之數值相減，所得之結果稱為計算誤差 (Calculated bias)。三公式之計算誤差值與標準值之分佈狀態如圖 2a，2b 與 2c 所示。由計算誤差之分佈可知 Penman 公式均於 0.4 % 之內，Goff-Gratch 公式之計算誤差則高達 0.7 %，Harrison 公式之計算誤差更大。相對濕度愈高，三經驗公式之計算誤差值愈小。

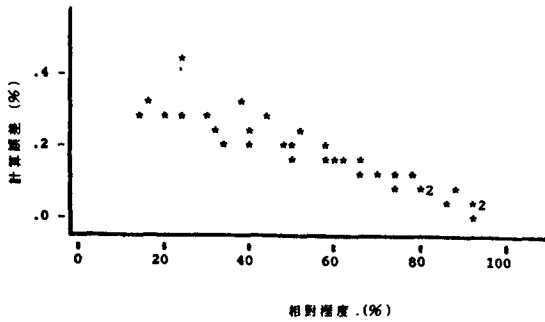


圖 2.(a)

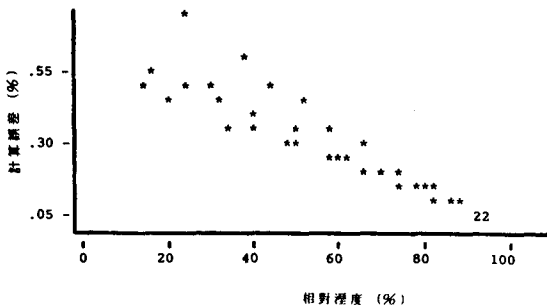


圖 2.(b)

由上述之比較結果可知，自文獻資料所得四公式中岡田公式並不適用，Penman 式之計算結果最接近 ASHRAE 公式之標準值。在國內大氣濕度通常高於 50 % RH 之大氣狀態下偏差值均低於

0.3 % RH，已合乎實用要求。且此公式形式： $P_s = P_{swb} - 0.0664(T_d - T_w)$ 亦容易以計算器加以計算，不需要使用電腦軟體進行數值分析，具有簡易使用之優點。

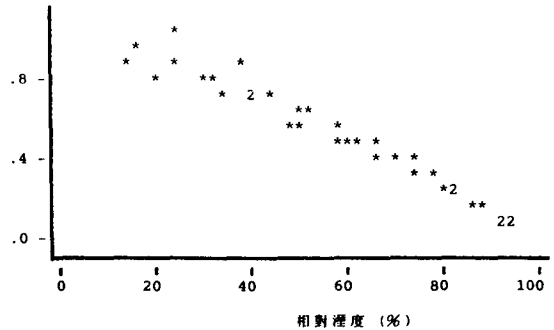


圖 2. 相對濕度公式之計算誤差
(a). Penman 公式，(b). Goff-Gratch 公式
(c). Harrison 公式

(二) 相對濕度計算之預期誤差

以 ASHRAE(1982) 之公式，代入公式(10) 中，以計算乾濕球量測誤差引起之預期誤差值。因 $\partial RH / \partial T_d$ 與 $\partial RH / \partial T_w$ 之計算公式過於漫長繁鎖，此研究中並未列出。

在三乾球溫度 (20，30 與 40 °C) 與各不同濕球溫度條件下，假設乾、濕球溫度量測元件之量測誤差相等，代入公式(10) 之 DT_d 與 DT_w 值，計算所得之預期相對誤差值如表 2 所示。由表 2 可知，在相同之量測誤差條件下 (DT_d = DT_w)，乾球溫度愈小，濕球溫度愈高，預期之誤差愈大。例如在 30 °C 之乾球溫度條件下，DT_d 與 DT_w 誤差數值各為 0.5 °C 時，預期誤差幾乎均高於 3.0 %。可知若相對濕度之量測準確性要求為 3.0 % 以下，乾濕球溫度之量測元件之容許誤差不得過 0.5 °C。由表 2 之數據可用以得知在滿足相對濕度量測之準確範圍內，乾、濕球溫度元件之準確性限制。

由於公式(10) 中所有計算過程均包括平方和項次，誤差值正負號 (量測特性之高估或低估性) 對相對濕度計算值之影響能力未能凸顯。

(三) 相對濕度計算值之相對誤差：

為考慮溫度元件量測誤差之高估或低估現象對於相對濕度計算值之誤差性，以 Err 比例誤差值加以評估。乾球溫度 30 °C 時，三濕球溫度 (28, 24

與 20 °C) 在不同量測誤差下計算所得之 DRH 與 ERR 值如表 3。

表 2. 乾濕球溫度計之量測誤差對相對濕度計算值之預期相對誤差

Td	Tw	RH 計算值	預期相對誤差 (DTd=DTw) DTd值 (°C)				
			0.1	0.2	0.5	1.0	1.5
40	38	88.08	0.86	1.31	3.28	5.56	9.84
	34	86.86	0.53	1.10	2.77	5.55	8.32
	30	48.71	0.48	0.955	2.39	4.78	7.16
	26	33.19	0.42	0.84	2.11	4.22	6.33
	22	19.45	0.38	0.77	1.92	3.84	5.76
30	29	92.82	0.81	1.62	4.1	8.10	12.15
	23	79.28	0.75	1.50	3.76	7.51	11.27
	24	60.82	0.68	1.36	3.39	6.78	10.18
	21	44.36	0.63	1.25	3.11	6.23	9.34
	18	26.94	0.58	1.16	2.91	5.81	8.72
20	18	82.52	1.02	2.04	5.10	10.2	15.50
	16	66.27	0.96	1.93	4.82	9.64	14.46
	14	51.13	0.92	1.83	4.59	9.17	13.26
	12	37.00	0.88	1.76	4.39	8.78	13.18
	10	23.78	0.85	1.69	4.23	8.47	12.70

表 3. 乾濕球溫度量測誤差對相對濕度計算值之比例誤差特性 (乾球溫度 Td = 30 °C)

	Δ Td Δ Tw	ΔT=0.2°C				ΔT=0.5°C				ΔT=1.0°C				
		+0.2	-0.2	+0.2	-0.2	+0.5	-0.5	+0.5	-0.5	+1.0	-1.0	+1.0	-1.0	
		+0.2	-0.2	-0.2	+0.2	+0.5	-0.5	-0.5	+0.5	+1.0	-1.0	-1.0	+1.0	
A. Tw=28°C														
RH: (96)		86.06	85.96	83.40	88.68	86.13	85.98	75.60	82.80	86.26	85.74	73.54	100	
RH=86.09%														
DRH (96)		-0.06	0.04	2.6	-2.68	-0.13	0.02	10.4	-6.8	-0.26	0.26	12.46	-14	
ERR (96)		-0.07	0.05	3.0	-3.12	-0.15	0.02	12.1	-7.9	-0.3	0.3	14.49	-16.3	
B. Tw=24°C														
RH:		61.22	60.93	58.94	63.26	61.44	60.31	55.83	66.64	61.78	60.34	50.89	72.55	
RH=61.08%														
DRH		-0.14	0.15	2.14	-2.18	-0.36	0.37	5.25	5.56	-0.7	0.74	10.19	-11.47	
ERR		-0.23	0.25	3.50	-3.57	-0.59	0.61	8.60	-9.1	-1.14	1.21	16.68	-18.78	
C. Tw=20°C														
RH:		39.91	39.45	37.95	41.46	40.24	39.10	35.43	44.2	40.79	38.51	31.42	45.01	
RH=39.68%														
DRH		-0.23	0.23	1.73	-1.78	-0.56	0.58	4.25	4.52	-1.11	1.17	8.26	-9.42	
ERR		-0.58	0.58	4.36	-4.49	-1.14	1.46	10.71	-1.4	-2.80	2.95	20.82	-23.74	

由表 3 與表 2 比較可知，以公式(10)計算所得之 Erms 值雖為綜合評估下誤差量化指標，但未能顯示乾球、濕球溫度量測元件誤差所引起之相對濕度真實誤差性。以 Td = 30 °C，Tw = 24 °C，RH = 61.08 % 為例，在量測誤差為 0.2 °C 時，若乾濕球溫度均為高估 (Td = 30.2 °C，Tw = 24.2 °C)，RH = 61.22 %，RH 值計算誤差並不嚴重。兩種溫度均低估時 (Td = 29.8 °C，Tw = 23.8 °C)，RH = 60.93 %。RH 計算值亦未嚴重偏離，然因乾、濕

球溫度一項過高，另一項過低時，計算誤差則加大，例如 Td = 30.2 °C，Tw = 23.8 °C，RH₃ = 58.94，DRH = 2.14。Td = 29.8 °C，Tw = 24.2 °C，RH₄ = 63.26 °C，DRH = 2.18 %。

在量測誤差為 0.5 °C 時，兩者高估之情況下 (30.5 °C，24.5 °C)，DRH = -0.36 %，兩者低估時 (29.5 °C，23.5 °C)，DRH = 0.37 %，誤差不嚴重，然而兩者之量測誤差有正負之分時，如 30.5 °C 與 23.5 °C 之狀況下，DRH = 5.25 %，在 29.5 °C 與 24.5 °C 時，DRH = -5.56 %。由此可知在乾濕球溫度量測元件誤差為任意性正負值時，此情況下 (30 °C 與 24 °C)，0.5 °C 之量測誤差對相對濕度值計算所得誤差範圍自 -5.56 % 至 5.25 %。表 2 中此情況之 Erms = 3.39 %，由此可知自公式(10)計算之 Erms 值雖然為許多研究人員採用以計算評估誤差值 (Gates, 1993; Hordan et al., 1991) 但對 RH (Td，Tw) 之計算公式誤差評估並不適用。

乾濕球為溫度量測誤差為 1.0 °C 時，在兩者高估：Td = 31 °C，Tw = 25 °C，RH₁ = 61.78 %，兩者低估時，Td = 29 °C，Tw = 23 °C，RH₂ = 60.34%，雖然量測誤差已高達 1.0 °C，但是由於同時高估或同時低估之作用，計算之 RH 值與原正確狀況下之 RH 值之誤差仍低於 1.0 %。然而在高估與低估未同時存在時 (1) Td = 31 °C，Tw = 23 °C，DRH = 10.2 % (2) Td = 29 °C，Tw = 25 °C，DRH = -11.5 %。1 °C 之量測誤差造成 ± 10 % RH 之計算值偏差。表 2 中此狀況下 Erms = 6.78 %，可知 Erms 值未能凸現此偏差值。

由表 3 中可知，在乾、濕球兩者之誤差均同時高估或低估時，對 RH 值計算值之影響不大，在量測誤差為 1.0 °C 時，同因高、低估之影響幾乎在 1.0 % RH 之內，但若一為高估值，另一項為低估值 1.0 °C 之誤差則造成高達 10 % 之 RH 值計算誤差。利用乾濕球溫度計以量測相對濕度已有百餘年之歷史，而乾濕球溫度計之誤差為隨機出現之正負值，對相對濕度計算值之影響一直為研究人員所忽略。

自 ASHRAE 公式 (Eq.3) 與其他經驗公式 (Eqs.6, 7,8,9) 中可說明此現象，每個公式均包括 (Td - Tw) 項，在兩者高估與低估情況下，[(Td + ΔT)

與 $(T_d - T_w)$ 值相同，因此對RH值計算之影響性僅只有影響 P_{swb} 值，因而影響程度不大。在 T_d 與 T_w 值，一為高估，一為低估之情況下，原 $(T_d - T_w)$ 值則成為 $(T_d - T_w + 2 \Delta T)$ 或是 $(T_d - T_w - 2 \Delta T)$ 值，因此對 P_s 值之計算影響程度增大。

$T_d = 30^\circ\text{C}$ ， $T_w = 28, 24$ 與 20°C 之情況下各 $(T_d \pm \Delta T, T_w \pm \Delta T)$ 之情況下，計算值之偏差DRH與Err值如圖3a與3b所示。由圖4a中可， T_w 值愈大，DRH值愈大。 $T_w = 28 \Delta$ 時， $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之乾濕球溫度誤差，造成DRH值為 $-11.5\% \sim 10.2\%$ 。 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 之誤差則造成DRH值為 $-13.2 \sim 12.3\% \text{ RH}$ 。對相對誤差而言，濕球溫度愈高，Err值反而愈小。以 $T_w = 20^\circ\text{C}$ 為例，乾濕球溫誤差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，Err值為 $-10 \sim 9.2\%$ ， $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 之誤差則使Err值為 $-17.0 \sim 16\%$ ，由此可得知 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 之偏差對於量測之準確性影響。

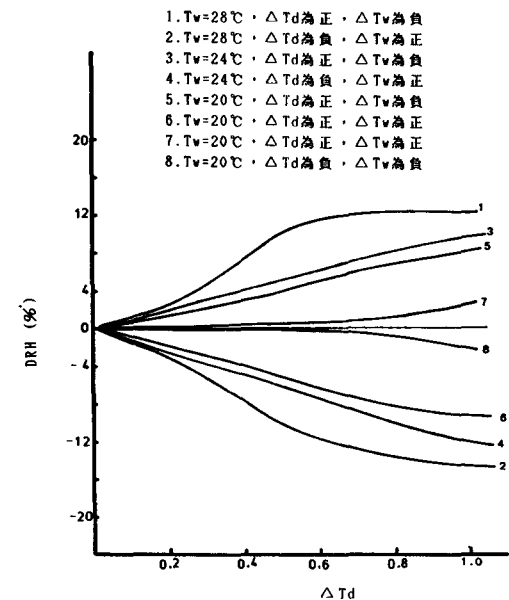


圖 3a. $T_d = 30^\circ\text{C}$ ，RH 值計算誤差

高溫狀態下($T_d = 40^\circ\text{C}$)，四濕球溫度因溫度量測誤差引起之計算誤差DRH與比例誤差Err值如圖4a，4b。如同圖3a，3b。濕球溫度愈高DRH值愈，Err值則愈小。在溫度量測誤差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 時DRH值接近於 $-4 \sim 4.0\%$ ，Err值則接近 $-10 \sim 8.0\%$ 。誤差 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ ，DRH值為 $-12 \sim 10\%$ ，Err值為 $-18 \sim 16\%$ 。

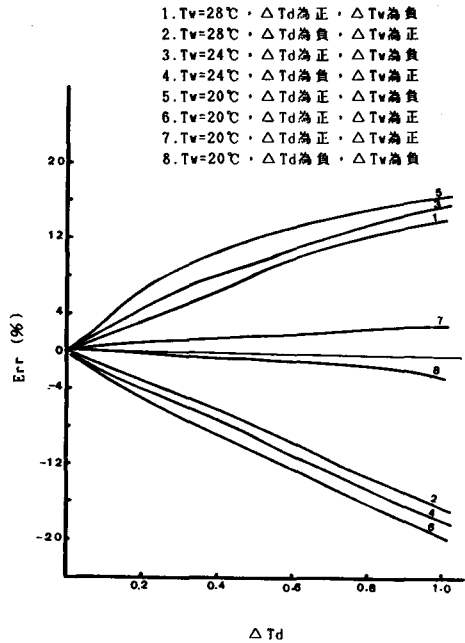


圖 3b. $T_d = 30^\circ\text{C}$ ，RH 值之相對誤差

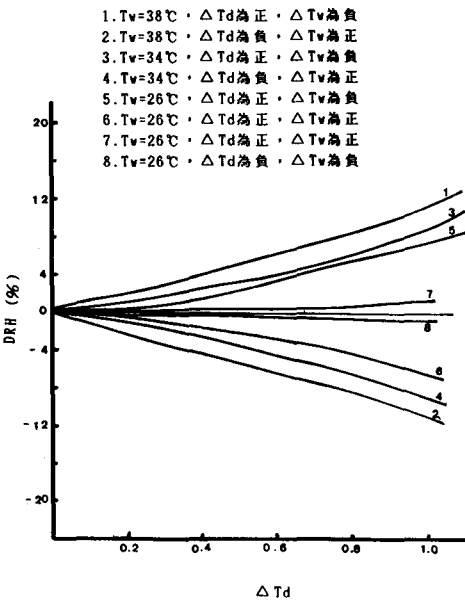


圖 4a. $T_d = 40^\circ\text{C}$ ，RH 值計算誤差

低溫之大氣狀態， $T_d = 20^\circ\text{C}$ ，溫度量測誤差對DRH與Err值之影響更為顯著(圖5a，5b)。 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之誤差至DRH值為 $-8 \sim 7.0\% \text{ RH}$ ，Err為 $-17 \sim 15\%$ 。 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 之誤差值則導至DRH值為

-13 ~ 13 % RH，Err 值則為 -28 ~ 30 % (未顯示於圖 5b)。乾濕球溫度同為高估或同為低估狀態，對 DRH 與 Err 值影響並不大，僅在 Tw 值極低時 (Tw = 12 °C)，影響性稍大。

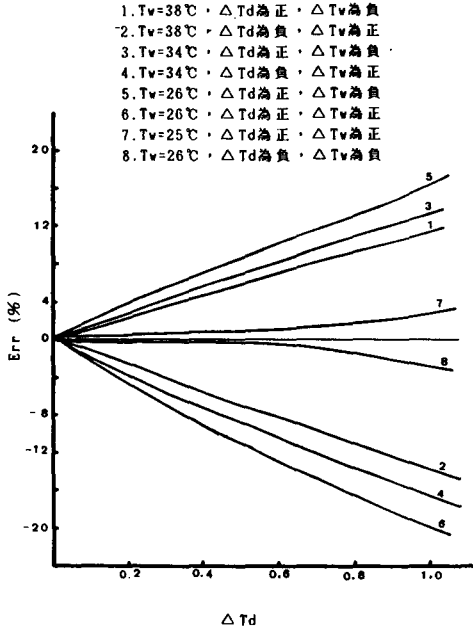


圖 4b. Td = 40 °C，RH 值之相對誤差

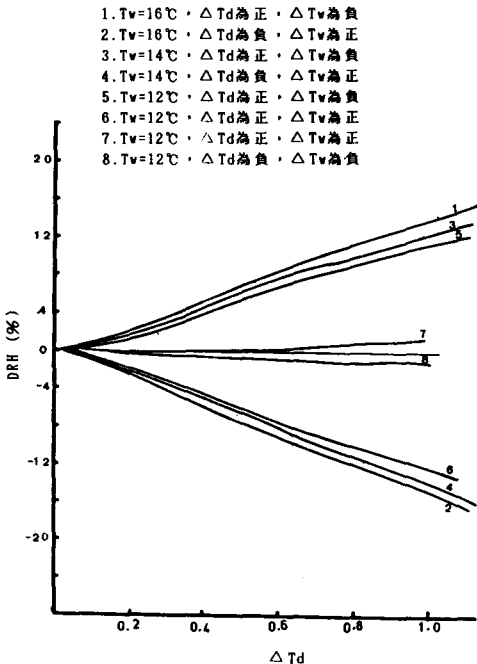


圖 5a. Td = 20 °C，RH 值計算誤差

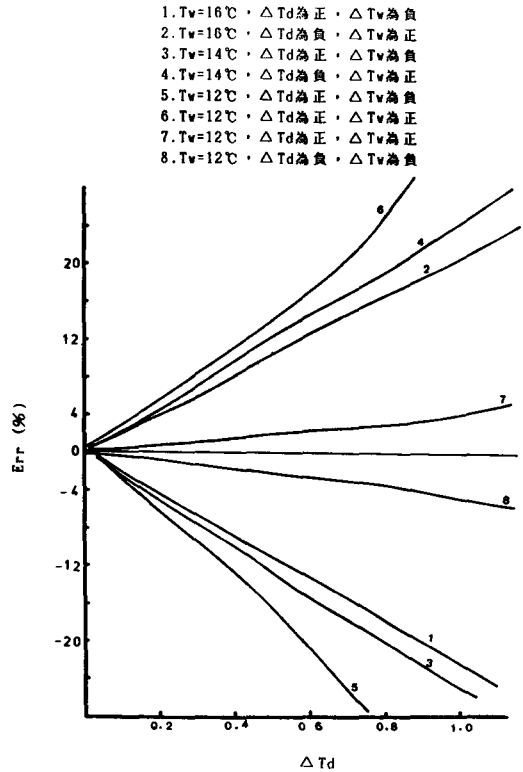


圖 5b. Td = 20 °C，RH 值之相對誤差

由上述結果可知，以傳統之 Erms 值觀念無法評估乾濕球溫度感測元件之誤差值對於 RH 值計算之影響，以 DRH 之範圍與 Err 比值可知誤差之嚴重性，由於量測誤差為任意性分佈，因此可知以 DRH 值範圍代表誤差性較為合理。

乾濕球溫之量測誤差來源除了本身校正之準確性，量測訊號之處理、雜訊之干擾、溫度感測元件受風速（對流熱）與太陽光日射量（輻射熱）等影響之外，在濕球量測方面，通過濕球溫度計之風速、作用之時間均影響了量測之準確性。利用乾濕球相對濕度計，則可推衍比較各類誤差，再由各種誤差來源 (Source) 所綜合而成之誤差量，加以評估計算相對濕度值之不準確性。

四通風時間與風速對濕球溫度量測之影響

以此研究中所製作之濕球溫度量測裝置（圖 1）進行濕球溫度量測，在三種相對濕度條件（45 ~ 50 %，60 ~ 65 % 與 80 ~ 80 % RH）之量測結果十分類似。大氣相對濕度對此型吸氣式乾濕球溫度計量側所需作業時間影響不顯著。

在大氣溫度 28.2°C ， $\text{RH} = 65\%$ ， $T_w = 22.1^{\circ}\text{C}$ 之狀況下，風速 1.0m/s 與 2.0m/s 對於濕球溫度量測值之影響如圖 6a 所示。在最初通風作業前 20 秒內，濕球溫度迅速降低而在 180 秒後逐漸穩定，但是與實際濕球溫度均有 0.8°C 之差距，換言之，以 1m/sec 之風速，無法達到熱力學上濕球平衡狀態。以 2m/sec 之風速到達濕球溫度穩定狀態所需時間約為 120 秒，而量測所得溫度與真實溫度約有 $0.3 \sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 之差距。

3m/sec 之風速對濕球量測之影響性如圖 6b 所示。在 60 秒後趨向平衡，量測所得溫度與真實溫度十分接近。 4m/sec 與 5m/sec 之風速量測結果如圖 6c。作業時間在 60 秒後，量測溫度近濕球溫度。

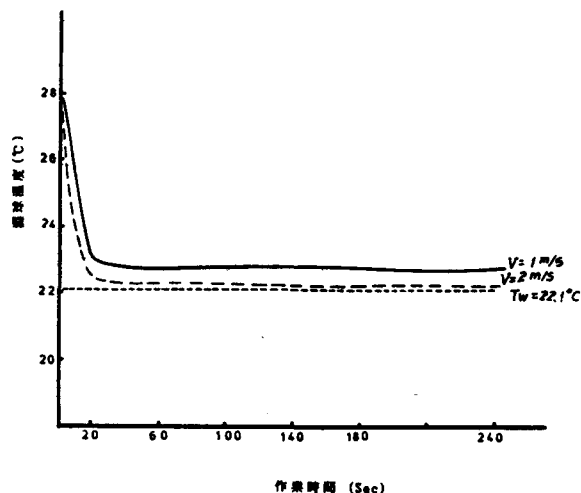


圖 6a.

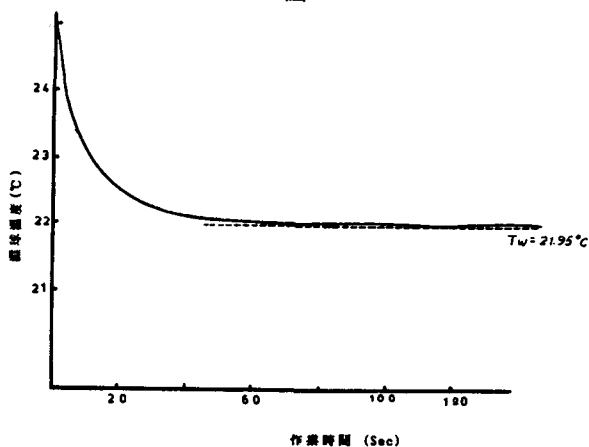


圖 6b.

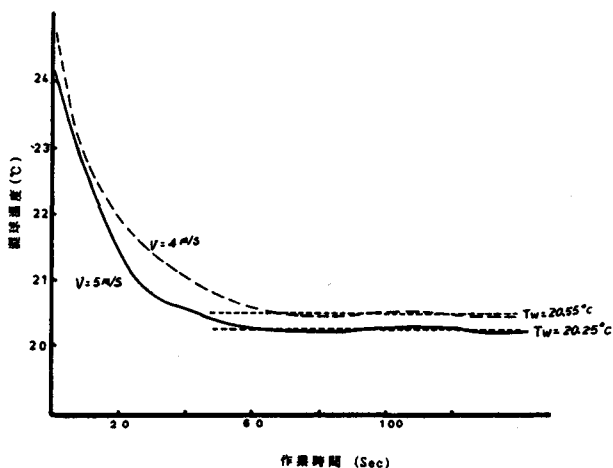


圖 6c.

圖 6. 風速之濕球量測特性
(a). 1m/s 與 2m/s ，(b). 3m/s ，(c). 4m/s 與 5m/s

由上述結果可知，以 3m/sec 之通風風速，作業時間超過 60sec ，此研究中所用之吸氣式乾濕球溫度計對量濕球溫度可得到良好之準確性。對高濕環境 ($80 \sim 85\%$) 與低濕環境 ($45 \sim 50\%$) 而言，測定之結果均十分接近。因此以 3m/sec 以上之風速，進行 60 秒以上之通風，再進行濕球溫度量測，應用此技術可避免量測數值之誤差。此研究結果與 ASHRAE 學會 (1982) 之使用標準風速 $3.0 \sim 5.0\text{m/sec}$ 相同。

五、結 論

綜合上述研究之結果，此研究所得結論如下：

1. 在以乾濕球溫度計算 RH 值之經驗公式中，Penman 公式之準確性最好。相對濕度愈高誤差愈小。與 ASHRAE 公式比較，計算偏差低於 0.4% 以下。岡田氏公式則不適用。
2. 以預期誤差值之概念未能說明乾、濕球量測誤差對於相對濕度值之影響。量測誤差同為高估或低估時，對相對濕度值影響不大。然而各為高估或低估時，則引起顯著之誤差值 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 之溫度誤差，造成 5% RH 以上之誤差， $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 之溫度誤差，造成約 10% RH 以上之計算誤差。
3. 此研究所製作之吸風式乾濕球溫度計，濕球量，

測所時間約 60 秒以上，作業風速應高於 3.0m/s，此結果與 ASHRAE 推薦標準相同。

六、參考文獻

- 陳加忠、曹之祖、賴建洲。1990。電子相對濕度計之性能評估。農業工程學報 36(4)：79-96。
- 陳加忠、陳志昇、黃照明。1992a。溫室環境模式之研究(II) 模式之驗證與應用。中華農業研究 41(1)：99-114。
- 陳加忠、曹之祖。1992b。相對濕度計標準校正裝置之製作試驗。中華農業研究 41(4):371-381。
- 陳加忠、陳志昇。1994a。溫室細霧冷卻系統之開發與性能研究。農業工程學報 40(2):78-87。
- 陳邦華、陳加忠、張武男。1994b。不織布直覆式栽培對覆蓋物內微氣候之影響。興大園藝 19：71-79。
- 黃東瑞。1991。溫室環境自動控制技術簡介。臺糖研究所 臺南。
- 山口 智治。1975。濕度計測と機器。農業設施 15(30)：24-32。
- 岡田 益己。1985。濕度および關係諸量と計算法。農業氣象 40：407-409。
- JIS。1981。Z8806 濕度測定方法。
- Aikman, D. P. and G. Houter. 1990. Influence of radiation and humidity on transpiration: implications for calcium levels in tomato leaves. J. Hort. Science 65 :31-39.
- Albright, L. d. 1990. Environment control for animals and plants. St. Joseph. MI: ASAE.
- ASAE Standards, 40th ed. 1993. D271.2, Psychrometric data. St. Joseph, MI: ASAE.
- ASHRAE. 1982. Standard method for measurement of moist air properties. ANSI/ASHRAE Standard 41.6-1982. The Amer. Soc. Heating, Refri. and Air-cond. Eng., Atlanta, GA.
- Barber, E. M. and D. Gu. 1989a. Performance of an aspirated psychrometer and three hygrometers in livestock barns. Applied Engineering in Agriculture 5(4): 595-599.
- Barber, E.M., D. Gu and H.L. Classen. 1989b. Development and testing of low-maintenance aspirated psychrometers for continuous use in livestock barns. Applied Engineering in Agriculture 5(4): 601-610.
- Buffington, D.E., A. Collazo-Arocho, G.H. Canton and D. Pitt. 1981. Black globe-humidity index as comfort equation for dairy cows. Trans. of the ASAE 24: 711-714.
- Costello, T.A., I. L. Berry and R.C. Benz. 1991a. A fan-actuated mechanism for controlled exposure of a psychrometer wet bulb sensor to a dusty environment. Applied Engineering in Agriculture 7 (4):473-477.
- Costello, T.A. and I. L. Berry. 1991b. Control algorithms for an aspirated psychrometer. Applied Engineering in Agriculture 7(6):767-770.
- Erdebil I. and J. J. Leonard. 1992. Laboratory testing of humidity sensors for use in animal environments. Canadian Agricultural Engineering 34(3): 267-271.
- Gate, R.S. 1993. Dew point temperature error from measuring dry bulb temperature and relative humidity. Trans. of ASAE 36(6): 1799-1780.
- Goff, J. A. and S. Gratch. 1945. Thermodynamic properties of moist air. Trans. Amer. Soc. Heat Vent. Eng. 51: 125-164.
- Harrison, L.D. 1965. Fundamental concepts and definitions relating to humidity. In "Humidity and Moisture", eds. A. Wexler, Measure Contr.Sci. Ind. 3: 3-70.
- Hand, D. 1988. Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops. ACTA Hort. 229: 143-158.
- Hao, H. and J. J. Leonard. 1988. performance of thin-film humidity sensors in poultry and swine environments. Canadian Agricultural Engineering 36(4): 273-277.
- Holder, R. and K. E. Cockshull. 1990. Effects of humidity on the growth and yield of glasshouse tomatoes. J. Hort. Sci. 65: 31-39.
- Jordan, K. A., R. O. Kuehl and J. I. Sewell. 1991. Chap.