

新加坡空調水系統效率量測方法分 析報告

一、前言

隨著設備效率逐步提升與普及，國際標準均逐步朝向提升系統效率的方向訂定，並發展對應技術，以進一步提升整體能源效率。以新加坡為例，其能源多仰賴鄰近國家輸入，因此非常注重能源使用效率，故新加坡建設局(Building & Construction Authority)制定Building Control Act建築管理法強制規管新建物之能源使用效率。新加坡Building Control Act 2013年版揭示了綠建築標章Green Mark，針對建築各設備明定使用效率規範，其中針對建物耗能占比最大之中央空調系統進行效能之分級（見表1），要求新建與既有（冰機汰換）建物之中央空調系統至少需滿足Green Mark 認證級的水準。

表1、Green Mark新建建築空調系統能效標準

水冷式機組	新建非住宿類建築 - 水冷式機組		既有非住宿類建築 - 水冷式機組	
	建築尖峰冷房負荷 (RT)		建築尖峰冷房負荷 (RT)	
	<500	>=500	<500	>=500
	空調設計系統能效 DES (kW/RT) 低限值		空調系統能效 DES/OSE (kW/RT) 低限值	
Green Mark 認證級	0.80	0.70	0.85	0.75
Green Mark 金級	0.80	0.70	0.80	0.70
Green Mark 金+級	0.70	0.65	0.75	0.68
Green Mark 白金級	0.70	0.65	0.70	0.65
氣冷式機組	新建非住宿類建築 - 氣冷式機組		既有非住宿類建築 - 氣冷式機組	
	建築尖峰冷房負荷 (RT)		建築尖峰冷房負荷 (RT)	
	<500	>=500	<500	>=500
	空調設計系統能效 DES (kW/RT) 低限值		空調系統能效 DES/OSE (kW/RT) 低限值	
Green Mark 認證級	0.90	0.80	1.10	1.00
Green Mark 金級	0.90	不適用	1.00	不適用
Green Mark 金+級	0.85		0.85	
Green Mark 白金級	0.78		0.78	

然而在進行效率規管前，必需制定標準之量測方法，以新加坡Green Mark而言，其參考ASHRAE Guide 22及 AHRI 550/590制定空調水系統量測方法 MEASUREMENT & VERIFICATION (M&V) GUIDELINES FOR CENTRAL AIR-CONDITIONING PLANT，其中說明中央空調水系統感測器所需之精確度、架設方法與數據查核方式，主要內容包含

- (1). 中央空調水系統量測儀表準確度需求
- (2). 中央空調水系統儀表安裝規範
- (3). 量測數值之準確度驗證

以下，本報告即針對新加坡中央空調量測方法中上述三大項目逐一介紹。

二、中央空調水系統量測儀表準確度需求

而 Green Mark 所謂的空調系統能效 Design System Efficiency(DES)、Operational System Efficiency(OSE)定義範圍採中央空調之水側系統綜合效率，即以單位為kW/RT之指標，其中kW為空調主機、空調水泵、空調冷卻水塔之系統總耗能kW，RT為中央空調水系統之場域使用冷凍噸。所需使用之感測器為數位電表、流量計、管路溫度計及管路流量計，因此針對各感測器美國ASHRAE Guideline 22、新加坡SS591及我國CNS12575均對各感測器量測不確定度有所定義，如表2所示。

表 2、量測儀表不確定度彙整

規範名稱	電力量測 不確定度	流量量測 不確定度	溫差量測 不確定度	系統 kW/RT 量測 誤差(不確定度)	
美國 ASHRAE Guideline 22	1%	1%	2%	2.45%	建議不 超過 5%
	1.5%	2%	2%	3.2%	
	1.5%	3%	3%	4.5%	
	1.5%	3%	4%	5.22%	
新加坡 SS 591	±2%	±1%(全口徑內嵌式) ±2%(夾式或插入式)	±0.05°C (單 sensor) ±1.3% (溫差)	±2.6%	±3.1%
我國 CNS 12575	±0.5%	±2%	±0.1°C (單 sensor) ±2.8% (溫差)	±3.5%	
註： 1. 系統不確定度計算= $\sqrt{(T^2+F^2+P^2)}$ (ASHRAE Guideline 22、SS 591 之計算方法) 其中： T：溫差量測不確定度 F：流量量測不確定度 P：電力量測不確定度 2. 溫差量測不確定度= $\sqrt{(t_i^2+t_o^2)} \div \Delta t_d$ (SS 591 之計算方法) 其中： t _i ：入水溫度 sensor 量測不確定度 t _o ：出水溫度 sensor 量測不確定度 Δt _d ：冰水設計溫差，新加坡取 5.5°C，我國取 5°C					

其中美國與新加坡均以系統80%運轉時間，其kW/RT量測總誤差不得超過5%為指標。首先針對上述量測儀表進行分析：

- (1) 電力量測：由於目前數位電表之開發趨於成熟，各國大多使用數位電表進行建物設備電力量測，其不確定度約略為±1%左右，大多均可由現場量測勾表方式進行校正。
- (2) 流量量測：量測流量主要有嵌入式（即裝設於管內之流量計）、插入式或夾式（夾於水管外側）幾種模式，而目前之技術均可做到不確定度±2%，然而其遭遇之問題為場域管路短小、長時間使用準確度失真與定期校驗成本...等。
- (3) 溫度量測：管路溫度計約略可分為非接觸套筒式與接觸親水式兩種，國

內中央空調系統多使用成本較低之套筒式溫度計，其誤差較大，精確度約為 $\pm 0.3^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，使kW/RT進行驗證時較難符合量測規範。而親水式溫度計其精確度約為 $\pm 0.05^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 間，可降低量測誤差，但其成本為套筒式之數倍，且目前國內親水式溫度計之量測方案多需仰賴進口，增加技術導入成本。將來國內若導入中央空調效率標準時，均需將上述儀表之優缺點進行通盤考量。



圖1、親水式溫度計（上方）與套筒式溫度計（下方）比較圖

三、中央空調水系統儀表安裝規範

中央空調水系統由冰水主機、冰水泵、冷卻水泵及水塔風扇四個成份組成，而現場管路又依冰水管路設計而分成一次側（無區域泵）及一二次側（含區域泵）系統，而新加坡量測規範依水路與冰水提供形式將量測系統分為以下四種：

- (1) Constant Primary Chilled-Water System
- (2) Variable Primary Chilled-Water System
- (3) Constant Primary & Variable Secondary Chilled-Water System
- (4) Series Counter Flow Chilled-Water System

以下將針對上述四種水路進行熱平衡計算與感測器架設說明，包含流量計安裝位置、溫度計安裝位置、溫度計數量、冰機電表數量及熱平衡計算方式等進行說明。

(1) Constant Primary Chilled-Water System

水路說明：每台冰機各有對應之冰水一次泵，無冰水區域泵

冰水流量計安裝位置：FM1於冰水回水過平衡管(BPV)後近冰水泵共管處。

冷卻水流量計安裝位置：FM2於冷卻水回冰機處近冷卻水泵共管處。

冰水出水溫度計安裝位置：CHWS於平衡管(BPV)後近場域共管處

冰水入水溫度計安裝位置：CHWR於過平衡管(BPV)後近冰機共管處

冷卻水出水溫度計安裝位置：CWS於冷卻水出水塔進冷卻水泵前共管處

冷卻水入水溫度計安裝位置：CWR於冷卻水入水塔前共管處

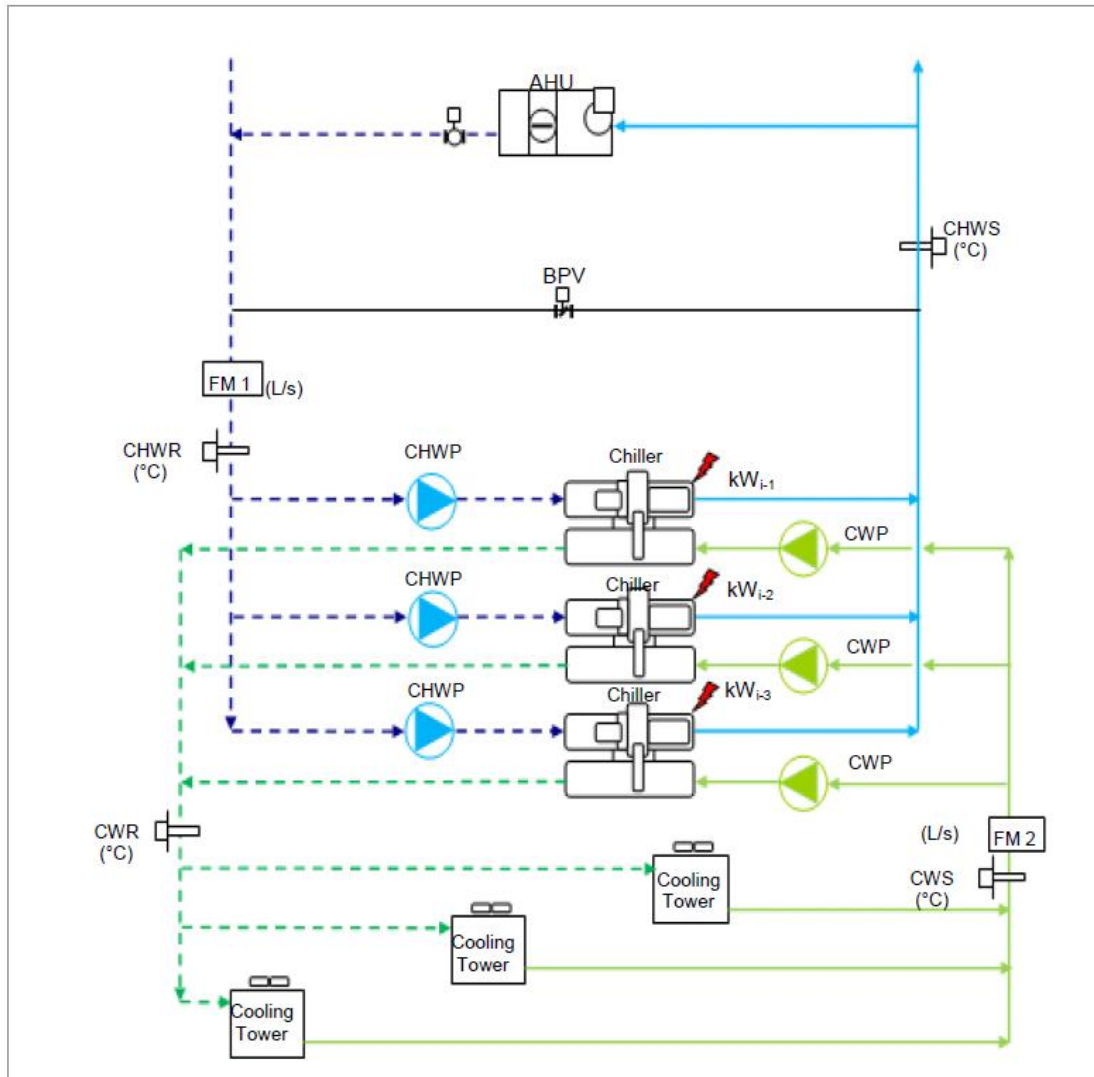


圖2、Constant Primary Chilled-Water System管路圖

其中 $C_p = 4.19 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ，熱平衡計算方式如下：

$$\text{A: } q_{\text{evaporator}} = m \times C_p \times \Delta T = \text{FM1} \times C_p \times (\text{CHWR} - \text{CHWS})$$

$$\text{B: } q_{\text{condenser}} = m \times C_p \times \Delta T = \text{FM2} \times C_p \times (\text{CWR} - \text{CWS})$$

$$\text{C: } W_{\text{input}} = kW_{i-1} + kW_{i-2} + kW_{i-3}$$

$$\text{Percent heat balance} = [(A + C) - B] / B \times 100\%$$

(2) Variable Primary Chilled-Water System

水路說明：冰水一次泵組經共管後再輸入至冰機組，無冰水區域泵

冰水流量計安裝位置：FM1於冰水回水過平衡管(BPV)後近冰水泵共管處。

冷卻水流量計安裝位置：FM2於冷卻水回冰機處近冷卻水泵共管處。

冰水出水溫度計安裝位置：CHWS於平衡管(BPV)後近場域共管處

冰水入水溫度計安裝位置：CHWR1於過平衡管(BPV)後近冰機共管處，
CHWR2於過冰水泵組後共管處

冷卻水出水溫度計安裝位置：CWS於冷卻水出水塔進冷卻水泵前共管處

冷卻水入水溫度計安裝位置：CWR於冷卻水入水塔前共管處

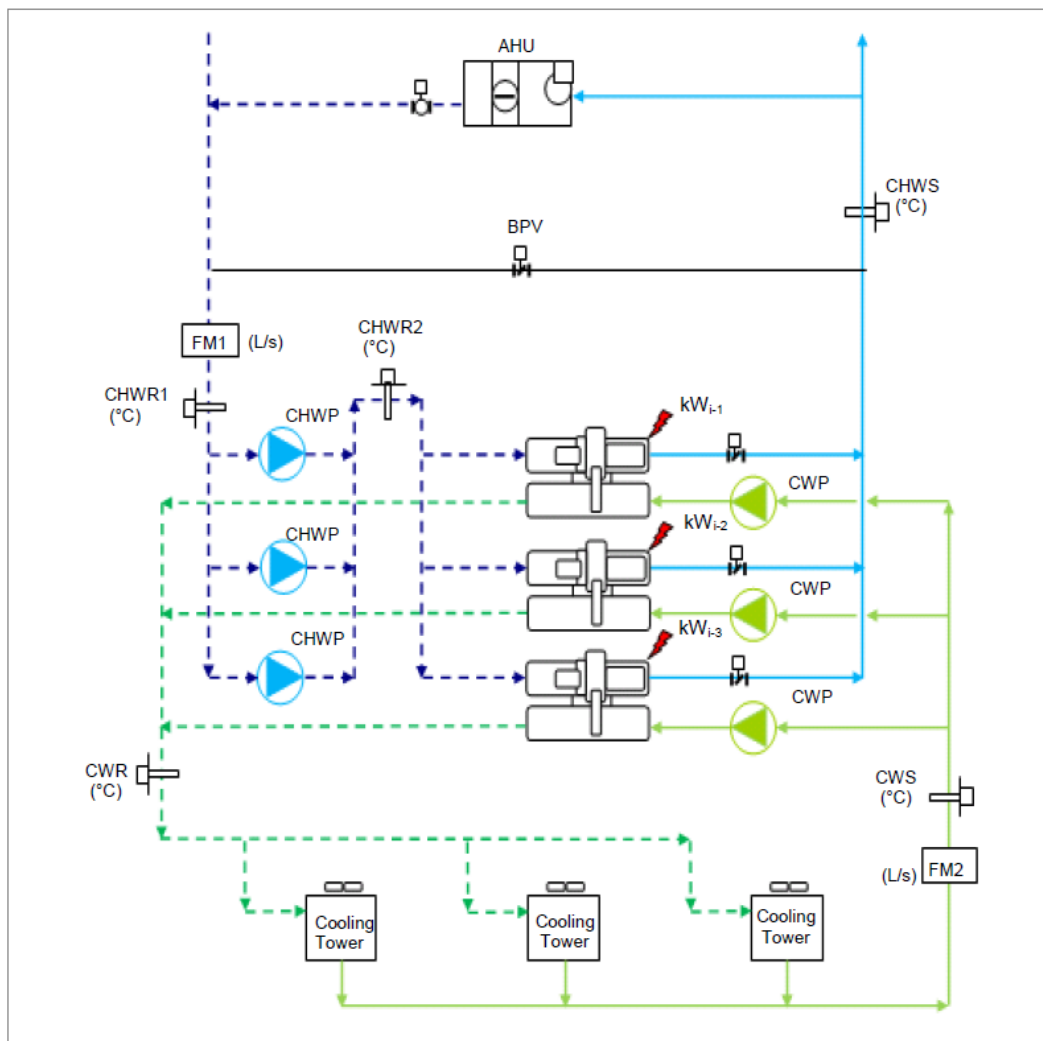


圖3、Variable Primary Chilled-Water System管路圖

若使用CHWR1代替CHWR2需考慮冰水泵並聯的效率，熱平衡計算方式如下：

$$A: \quad q_{\text{evaporator}} = FM1 \times Cp \times (CHWR2 - CHWS)$$

$$B: \quad q_{\text{condenser}} = FM2 \times Cp \times (CWR - CWS)$$

$$C: \quad W_{\text{input}} = kW_{i-1} + kW_{i-2} + kW_{i-3}$$

$$\text{Percent heat balance} = [(A + C) - B] / B \times 100\%$$

(3) Constant Primary & Variable Secondary Chilled-Water System

水路說明：每台冰機各有對應之冰水一次泵，且共管後具冰水區域泵組

冰水流量計安裝位置：FM1於出場域共管處，FM2於冰水平衡管上

冷卻水流量計安裝位置：FM3於冷卻水回冰機處近冷卻水泵共管處

冰水出水溫度計安裝位置：CHWS1於出冰機組共管處，CHWS2於出冰水區域泵組共管處

冰水入水溫度計安裝位置：CHWR於過平均管後近冰水泵共管處

冷卻水出水溫度計安裝位置：CWS於冷卻水出水塔進冷卻水泵前共管處

冷卻水入水溫度計安裝位置：CWR於冷卻水入水塔前共管處

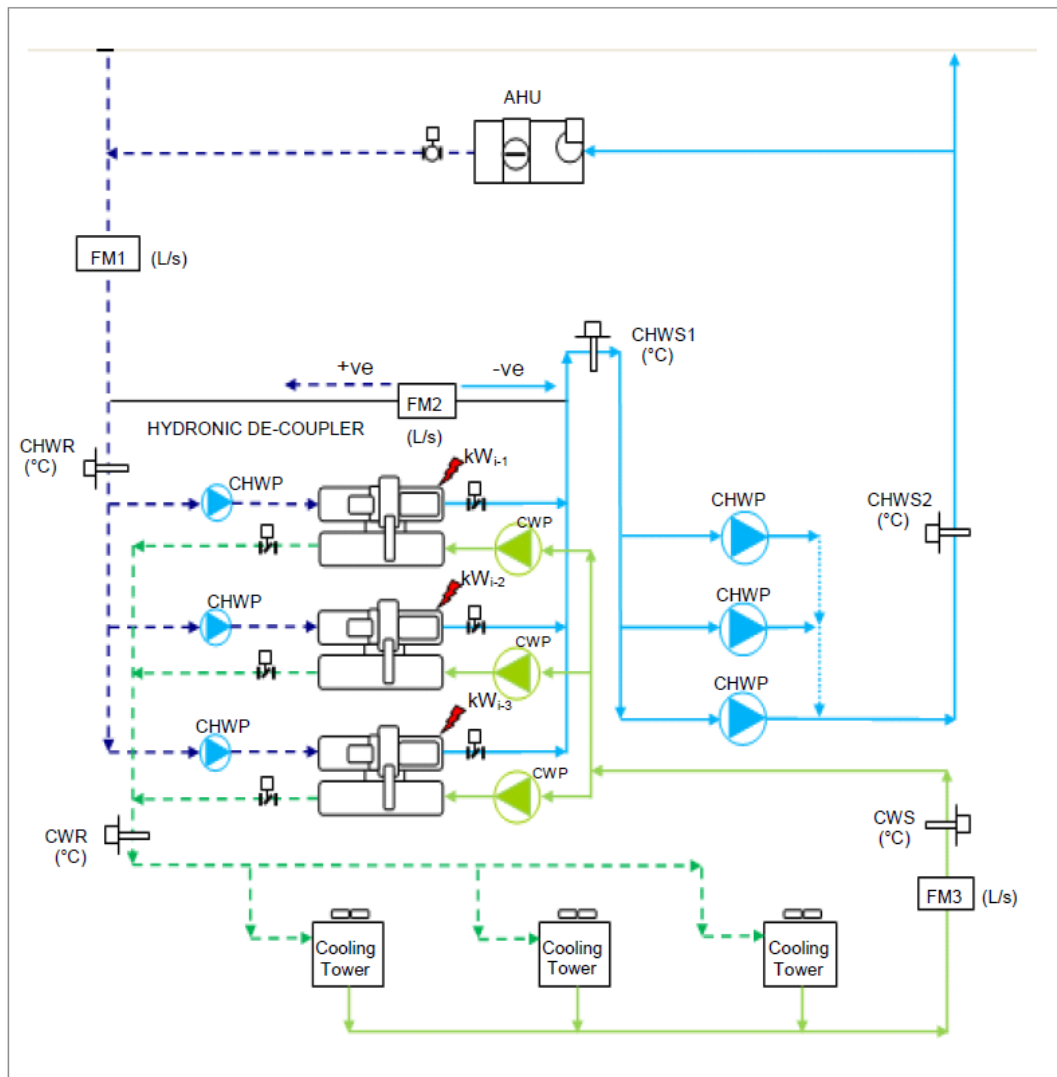


圖4、Constant Primary & Variable Secondary Chilled-Water System管路圖

若使用CHWS2代替CHWS1需考慮區域泵並聯的效率，熱平衡計算方式如下：

A: $q_{\text{evaporator}} = (FM1 + (+/-FM2)) \times C_p \times (CHWR - CHWS1)$

B: $q_{\text{condenser}} = FM3 \times C_p \times (CWR - CWS)$

C: $W_{\text{input}} = kW_{i-1} + kW_{i-2} + kW_{i-3}$

Percent heat balance = $[(A + C) - B] / B \times 100\%$

(4) Series Counter Flow Chilled-Water System

水路說明：冰機組共用冰水泵組，無冰水區域泵

冰水流量計安裝位置：FM1於冰水回水過平均管(BPV)後近冰水泵共管處。

冷卻水流量計安裝位置：FM2於冷卻水回冰機處近冷卻水泵共管處

冰水出水溫度計安裝位置：CHWS於平均管(BPV)後近場域共管處

冰水入水溫度計安裝位置：CHWR1於過平均管後近冰水泵共管處，CHWR2於過冰水泵近冰機組處

冷卻水出水溫度計安裝位置：CWS於冷卻水出水塔進冷卻水泵前共管處

冷卻水入水溫度計安裝位置：CWR於冷卻水入水塔前共管處

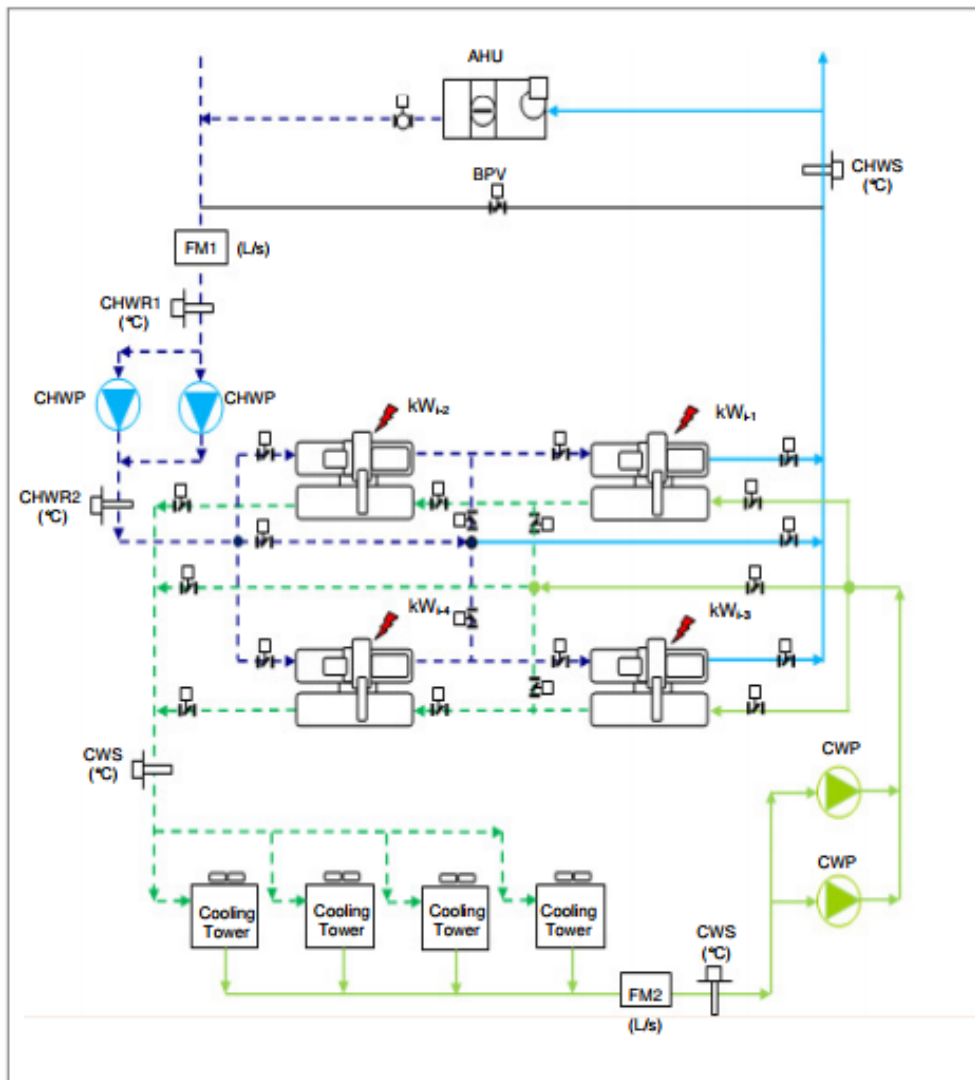


圖5、Series Counter Flow Chilled-Water System管路圖

若使用CHWR1代替CHWR2需考慮冰水泵並聯的效率，熱平衡計算方式如下：

A: $q_{\text{evaporator}} = FM1 \times Cp \times (CHWR2 - CHWS)$

B: $q_{\text{condenser}} = FM2 \times Cp \times (CWR - CWS)$

C: $W_{\text{input}} = kW_{1,1} + kW_{1,2} + kW_{3,3} + kW_{4,4}$

Percent heat balance = $[(A + C) - B] / B \times 100\%$

四、量測數值之準確度驗證

以新加坡量測標準之定義，若量測時間內80%之數據其熱平衡誤差小於5%，則判定為數據有效，反之則判定數據無效，需重新進行感測器校正。表3為一量測數據之範例，由儀表量測之溫度、流量及可分計算出Heat Gain及Heat Rejected數值（表3中(h)及(i)欄），再配合冰機耗電（表3中(g)欄）則可算出熱平衡誤差（表3中(j)欄），並可將熱平衡誤差以圖表呈現，示意圖如圖6所示。

表3、量測驗證範例數據表

	(a) Chilled water supply temperature	(b) Chilled water return temperature	(c) Chilled water flow rate	(d) Condenser water supply temperature	(e) Condenser water return temperature	(f) Condenser water flow rate	(g) Chiller kW	(h) Heat Gain	(i) Heat Rejected	(j) Percent Heat Balance
dd/mm/yyyy hh:mm	°C	°C	L/s	°C	°C	L/s	kW	kW	kW	%
16/06/2010 15:00	6.70	12.60	84.10	29.4	35.5	97.65	308	2,079.04	2,495.84	-4.36
16/06/2010 15:01	6.71	12.50	84.20	29.5	35.4	97.60	309	2,042.70	2,412.77	-2.53
16/06/2010 15:02	6.72	12.30	84.30	29.6	35.3	97.55	310	1,970.95	2,329.79	-2.10
16/06/2010 15:03	6.73	12.10	84.20	29.7	35.2	97.50	311	1,894.53	2,246.89	-1.84
16/06/2010 15:04	6.74	12.20	84.10	29.8	35.1	97.55	312	1,923.99	2,166.29	3.22
16/06/2010 15:05	6.75	12.00	84.00	29.9	35	97.60	311	1,847.79	2,085.61	3.51
16/06/2010 15:06	6.74	12.30	84.10	29.8	35.1	97.65	310	1,959.23	2,168.51	4.64
16/06/2010 15:07	6.73	12.10	84.20	29.7	35.2	97.60	309	1,894.53	2,249.19	-2.03
16/06/2010 15:08	6.72	12.10	84.30	29.6	35.3	97.55	308	1,900.31	2,329.79	-5.21
16/06/2010 15:09	6.71	12.20	84.20	29.5	35.4	97.50	309	1,936.86	2,410.30	-6.82
16/06/2010 15:10	6.70	12.40	84.10	29.4	35.2	97.55	310	2,008.56	2,370.66	-2.20
Percentage of heat balance within $\pm 5\%$ =										82%

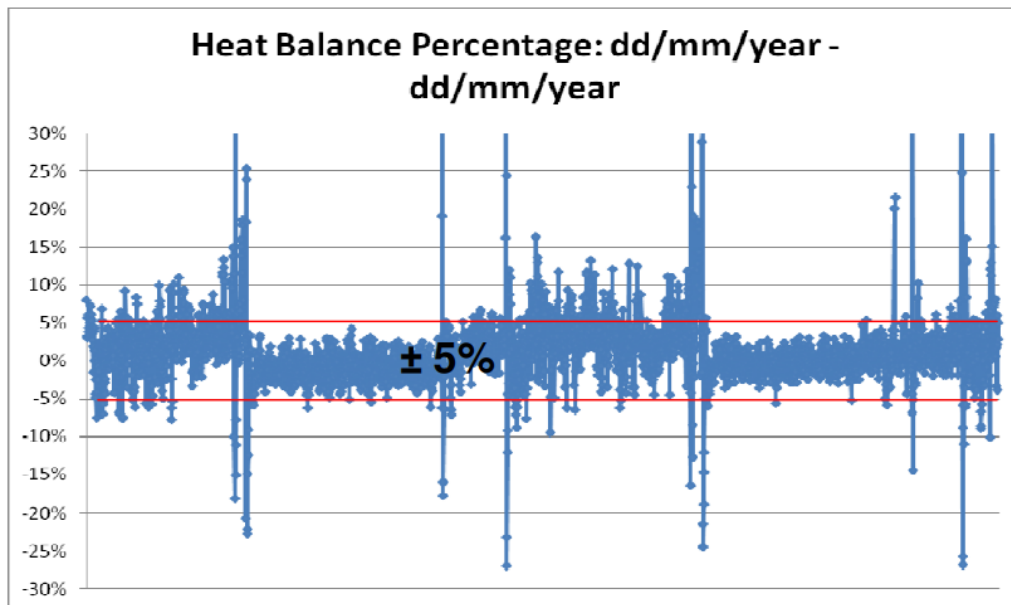


圖6、熱平衡誤差圖

最後進行熱平衡誤差計算，可將表3中(j)欄熱平衡誤差進行統計，可得到資料共22筆，其中4筆資料熱平衡誤差大於5%，18筆資料熱平衡誤差小於5%，合格數共占82%，即判定該水系統符合熱平衡量測規範80%以上。

表4、誤差統計表

	Quantity	Unit	Formula
Sum of total electrical energy used	6814	kWh	(A)
Sum of total cooling produced	12,202	RTh	(B)
Sum of total heat rejected	14,367	RTh	(C)
Chiller Plant Efficiency	0.56	kW/RT	(A) / (B)
Total Heat Balance Data Count	22	-	(D)
Data Count > 5% error	0	-	(E)
Data Count < 5% error	4	-	(F)
Data Count within $\pm 5\%$ error	18	-	(G) = (D) – (E) – (F)
% Heat Balance within $\pm 5\%$ error	82	%	(G) / (D) x 100%

五、結論

綜合上述3點分析，可發現新加坡對於中央空調量測方法已有明確規範，以下規範重點，值得我國參酌：

1. 中央空調水側儀表準度(不確定度)規範而言，新加坡SS 591嚴於美國ASHRAE Guideline 22 建議值($\pm 5\%$)；我國現行CNS 12575標準稍差於新加坡SS 591，但仍可符合ASHRAE Guideline 22 建議值。未來可應該國內中央空調實際量測狀況考慮是否要調整感測器量測準確度。
2. 就電表而言，由於目前數位電表開發技術已趨成熟，大多可以校驗方式降低感測誤差。
3. 就流量計而言，嵌入式流量計所遭遇問題為維護與校驗困難，而外夾式流量計則遭遇到管路長度限制與準確度問題，應多進行數據搜集與實際測試了解該兩種模式之特性，並依場域需求選擇適用之型式。
4. 就溫度計而言，由於其溫度誤差對於量測不確定度影響極大，建議選擇高精度溫度感測器，並可考慮引進親水式溫度計可提供另一種溫度量測解決方案。
5. 就儀表安裝而言，新加坡量測規範所制定四種感測器安裝位置與熱平衡計算方式應可符合國內之中央空調系統。
6. 就數值準確度驗證部份，若要進行數據準確度驗證時，該建物需建置圖控軟體或者建物能源管理系統，因此在建置成本上會造成一定的負擔，應可考慮是否配合能管系統建置補助進行初期之推廣。
7. 對於新建建築及既有建築執行空調設備改善汰換者，其空調水系統量測儀表

較有可能達到熱平衡誤差5%之要求，然而對於未有改修動作之既有建築因其既有儀表設備裝設時間長，在進行校正或更新均會遇到成本與施工不便等困難。因此，在將量測規範導入求既有建築空調系統前，必需做更進一步之研究與普查。

六、參考文獻

[1] BCA GMEB_annexc : MEASUREMENT & VERIFICATION (M&V)
GUIDELINES FOR CENTRAL AIR-CONDITIONING PLANT :

https://www.bca.gov.sg/GreenMark/others/GMEB_annexc.pdf

[2] BCA Green Mark for Existing Non-Residential Buildings Version 3.0 :

https://www.bca.gov.sg/GreenMark/others/gm_nonresiv3.pdf

[3] Measurement & Verification Pte Ltd Measurement Solutions :

<http://www.mnv.com.sg/products-services/products/measurement-solutions/>