



科技部補助

智慧能源與環控產學技術聯盟

Smart Energy and Environmental Technology Industrial-Academia Alliance

智慧環境管理講座

「預測型連續排放監測系統運用簡介」

執行單位：國立成功大學能源科技與策略研究中心

議題主講者：曾庭科博士

報告日期：2022/07/27



CONTENT

- 01 PEMS發展起緣及目的
- 02 國外PEMS相關法規
- 03 相關研究模式及文獻
- 04 目前研究模式發展架構
- 05 CEMS與PEMS成本分析
- 06 PEMS相關驗證及草案建議
- 07 結論
補充資料



01

PEMS發展起緣及目的



PEMS發展起緣及目的

起緣

- 係因CEMS本身之耗費甚為龐大，在欲達到完全符合標準之**連續排放監測系統裝設費高昂**：
 - 須執行各種檢測以通過認證，使用單位除須負擔耗材零件備品之更換、定期之保養、故障之檢修
 - 須定期執行各種檢測(RATA, RAA, CGA等)以確保測值之準確，對事業機構而言為龐大支出。
- 根據**固定污染源空氣污染物連續自動監測設施管理辦法第29條**，其內容為公私場所執行空氣污染物減量改善措施致空氣污染物排放量減少達百分之七十五以上者，得檢具相關資料報經直轄市、縣(市)主管機關核可後，以其他可證明**同等處理成效之方式替代監測方案執行**。符合管理辦法第29條規範者，亦可使用其他替代監測方案如PEMS，以作為取代原先CEMS的監測方式。

發展目的

- 預測型連排放監測系統(Predictive Emission Monitoring System)可**達到省卻另行裝設污染物監測系統之相關費用且可避免無謂且額外資源浪費**。

02

國外PEMS相關法規

美國聯邦PEMS相關法規

相關法規	重點摘要	
美國環保署 PEMS相關法規	依據1990年空氣清淨法修正案(Clean Air Act Amendment, CAAA) 的 section 114(a)(3) 和 section 504(b) 中的內容加以延伸。	
	section 114(a)(3)	主管機關可要求 1.污染源對其排放單元加強進行監測(enhanced monitoring)； 2.提出符合各項規定(compliance certifications)的申報； 3.要求主管機關(即環保署)在CAAA 1990公佈實施後的2年內必須對此條款提出具體的相關法規。
	section 504(b)	授權主管機關可依法規定監測和分析法定污染物的步驟及方法，但是需有 替代方法 可提供即時且具可信度資訊，污染源並不一定要裝設及操作連續排放監測系統(CEMS)。
聯邦管制法規 (Code of Federal Regulations) (簡稱CFR)	Title 40 環境保護範疇(40CFR)	
	40CFR60	40CFR60 (為排放標準/排放量的管制範圍)之附件B與附件A分別記載各項性能規範(Performance Specification, PS)和參考方法(Reference Methods, RM) PS-16 於環保署方2001年草擬，經2005年修改並於2009年4月24日發布生效
	40CFR64	針對小型污染源的污染控制設施所制定的法案，雖然小型污染源之排放量不大而未被強制要求裝設及操作CEMS，但美國聯邦政府特別要求此類污染源的污染控制設施應採用各項可使污染排放符合規定的監測方式(如目測判煙、定期檢測(periodic monitoring)、CEMS或PEMS)。
	40CFR75.40	Subpart E規定替代方法(alternative monitoring system)的使用時機

資料來源：1.“Clean Air Act”, <http://www.epa.gov/oar/caa/contents.html>, May 9, 2001.

2.“Alternative Monitoring Protocol: Predictive Emission Monitoring System to Determine NOX and CO Emissions from and Industrial Furnace”, <http://www.epa.gov/ttnemc01/cem/furnace.pdf>

3.“Example Performance Specification and Test Procedures for Predictive Emission Monitoring Systems”, <http://www.epa.gov/ttnemc01/cem/pems.pdf>

美國聯邦PEMS相關法規

美國環保署40CFR75對PEMS要求項目及規格

規範項目	應符合之性能規格
準確度	t-test: $d_{avg} \leq cc $ 標準檢測方法檢測值和PEMS (d_{avg})的差值平均值在97.5.%信賴區間內應小於或等於信賴係數(confidence coefficient, CC)；若無法符合前述條件，則PEMS預測值需乘上一偏移因子(bias factor)修正系統性偏低的數據
	Correlation coefficient $r \geq 0.8$ Correlation between RM and PEMS must be 0.8 or greater.
	F-test, $F\text{-value} \leq F_{critical}$ The variance ratio of PEMS and RM must be less or equal to $F_{critical}$ value.
可信賴度	監測時數有效百分率 $\geq 95\%$ 品保
品保(QA)/ 品管(QC)	PEMS的輸入參數必須操作在核准的操作範圍內
	每日進行QA/QC檢查
	PEMS使用到的操作參數之感測器必須按照製造商建議的方式進行維護保養 必須建立PEMS失控的警示系統 相對準確度(Relative Accuracy, RA)必須小於標準檢測方法平均值的10%

資料來源：簡聰文，人工智慧應用於空氣污染源燃燒優化和排放監測，中華民國燃燒學會，燃燒季刊110，第二十九卷第三期 [5]

US EPA, Performance Specification 16 for Predictive Emissions Monitoring Systems, 74 FR 12575, Pages 12575-12591, March 25, 2009. <https://www.federalregister.gov/documents/2009/03/25/E9-6275/performance-specification-16-for-predictive-emissions-monitoring-systems-and-amendments-to-testing>

美國地方PEMS相關法規

原則	- 美國聯邦政府雖然已制定各項環保法案，也授權各州與空品區PEMS依據管轄區域內的狀況制定適合當地環境法規。 - 目前已知大多數的州政府或各空品區皆已在其相關法規中針對PEMS使用提出增修條文，但其內容大多仍與聯邦環保署的規定相同。	
例外	目前僅已知阿肯色州(Arkansas)、奧克拉荷馬(Oklahoma)、賓州(Pennsylvania)、(德州TNRCC)和南加州空氣品質管理區(SCAQMD)提出了較不同的規定。	
相關法規	應變措施或提出替代方案之重點摘要	
Texas NOX RACT Approach	德州自然資源管理委員會：除了40CFR75的Subpart E之外，污染源業主或操作人員也能提出相當於40CFR75 Subpart E的替代方案，或提出40CFR75 Subpart E的規定不適用於該污染源的證明，後亦可選擇遵守 Texas NOX RACT Approach 即 "TNRCC Regulation VII (30 TAC 117) - Control of Air Pollution From Nitrogen Compounds"	
	2002年前	未達到空氣品質標準的區域(ozone nonattainment areas)內，只要污染操作單元的熱輸入量大於或等於250 MMBtu/hr時即應裝設CEMS或PEMS
	2002~2003年	任何污染操作單元的熱輸入量大於或等於100 MMBtu/hr即應裝設CEMS或PEMS
	在臭氧已符合達到空氣品質標準的區域(ozone attainment areas)是否需要裝設CEMS或PEMS，則必須逐案審查，也就是由污染源與空氣污染管制單位(Air Pollution Division)進行協商。依以下三種情況 - 對於熱輸入量大於或等於250 MMBtu/hr的污染操作單元，在其申請設置或操作許可時會被要求裝設CEMS或PEMS以符合BACT的規定； - 對於熱輸入量介於100 - 250 MMBtu/hr的污染操作單元，則依其所處的地區或民眾關心的程度等因素而可能會被要求裝設CEMS或PEMS； - 對於熱輸入量小於100 MMBtu/hr的污染操作單元則不需要裝設CEMS或PEMS。	
40CFR75 Subpart E	替代方案中的初次認證(initial demonstration of compliance)中規定必須分別在 低、中、高三種負荷下進行RATA測試 ，採用的方法為40CFR60附錄B中的性能規範。	

備註：30TAC117.213節專門規範Continuous Demonstration of Compliance的條文，其中117.213(f)則是規範了PEMS各項細節

美國地方PEMS相關法規

美國聯邦與地方PEMS法規之整理與比較表

法規	Acid rain rules 40CFR75 Subpart E (Adopted)	Texas NO _x RACT rules (Adopted)	Texas PEMS guidelines developed for the enhanced monitoring rules (Withdrawn)	SCAQMD RECLAIM rule (Proposed guidelines)
模式開發 (mapping)	-	mapping data must be submitted	mapping data must be submitted	mapping data must be submitted
初次認證 (Initial verification)	3-load level testing r>0.8 using all data normal: 720 data pts RA<10% t-test, F-test High: 24 data pts F-test Low: 24 data pts.	3-load level testing of key operating parameter r>0.8 using all data t-test using all data normal: 30 data pts, RA<20%, F-test High: 30 data pts., RA<20%, F-test Low: 30 data pts. RA<20%, F-test	3-load level testing of three most significant operating parameter 27 data pts. Representing the RA<20%	30 data pts representing the operating envelope r>0.8 using all data t-test using all data RA for NO _x <20% RA for flow rate <10% Relative st. dev. Of error (RS _d)<10% Sd<5% Error in the Y estimate S _{Y/X} <5% Confidence level (CI) at High, normal, and Low<10%
每日品質保證	無	感應器的有效性	感應器的有效性	感應器的有效性
每季品質保證	無	Conduct initial verification requirements on one unit in a class of units during the first year	以可攜式分析儀確認 RA<20%	一般的品質保證
半年品質保證	9 pts. RATA at normal load RA<10% If RA < 7.5% perform RATA annually	9 pts. RATA at normal load RA<20% If RA < 7.5% perform RATA annually	9pts. RATA RA<20% If RA<10%, perform RATA annually Callbration drift<5%	The operating envelope pass all requirements under initial verification
年品質保證	—	—	9 pt	—

加拿大PEMS相關法規

- 加拿大在1998年期間發行了相關CEMS法規。
- 近期於2021年發行新的CEMS規範取代了原先法規，即**Continuous Emission Monitoring System (CEMS) Code : AEP, Air Policy, 2021, No. 1**，並於2022年1月1日生效。重點規範內容如下：

相關法規條例	重點摘要
10.0-A	負責人必須向主管機關提供以下資料，請求批准得到使用PEMS來滿足CEMS監控之授權： (a) PEMS監測計劃 ；(b)用於發展PEMS模式之CEMS和感應器數據，其完整原始數據集包括訓練和驗證期以及任何被刪除的數據。
10.0-B	未經主管機關事先書面授權，負責人不得使用PEMS來滿足CEMS監控要求。
10.0-C	負責人必須基於(a)開發、(b)操作營運和(c)根據CEMS規範和主管機關的書面授權開發、操作和維護PEMS，以在批准中滿足CEMS監控要求。
10.0-D	在開發PEMS以滿足CEMS監控要求時，負責人必須遵守以下最低要求： ✓ PEMS模式必須基於 至少三個過程參數或變量 來預測排放濃度； ✓ 最終PEMS模式必須基於CEMS質量保證之小時排放數據與過程參數感應器數據配對需要有至少 2880個測量值 ，其必須涵蓋季節性變化； ✓ PEMS模型必須滿足CEMS規範表1(即圖2.1-1)中的工作範圍設計規範； ✓ PEMS驗證要求： (i)驗證數據集 至少包含總數據集的30% ； (ii)驗證和訓練數據集在所有操作條件下採樣相同的時間段； (iii)驗證和訓練數據集具有相同的統計特性； ✓ PEMS模型 驗證殘差要求 ： (i) 對於95%的驗證數據，與測量的CEMS數據的偏差不得超過10% ； (ii)不得顯示時間趨勢； ✓ 使用調整後的Pearson-r值來解釋模型中的過程參數數量，PEMS驗證數據和測量的CEMS數據之間的 相關性必須等於或大於0.8 。

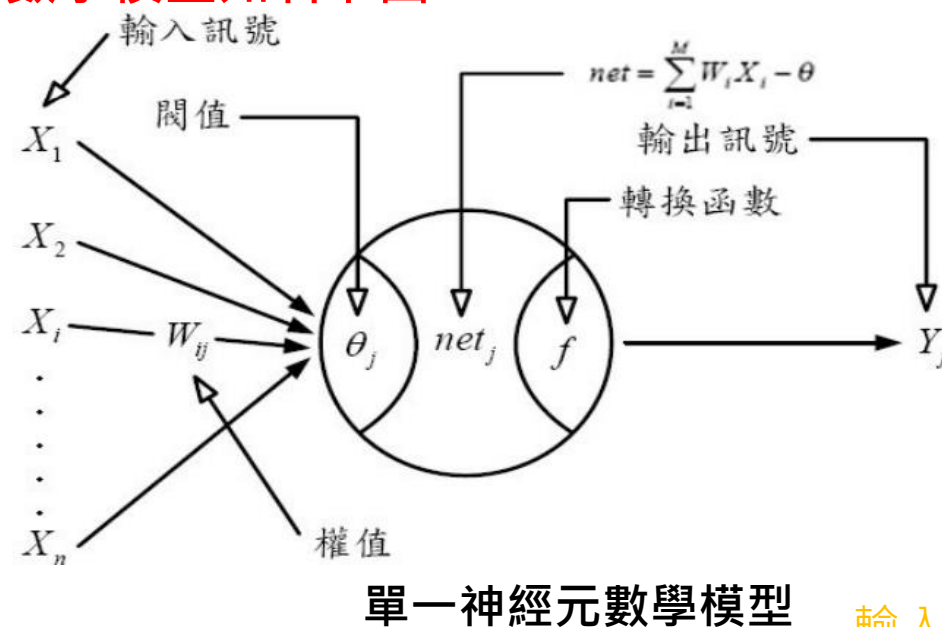
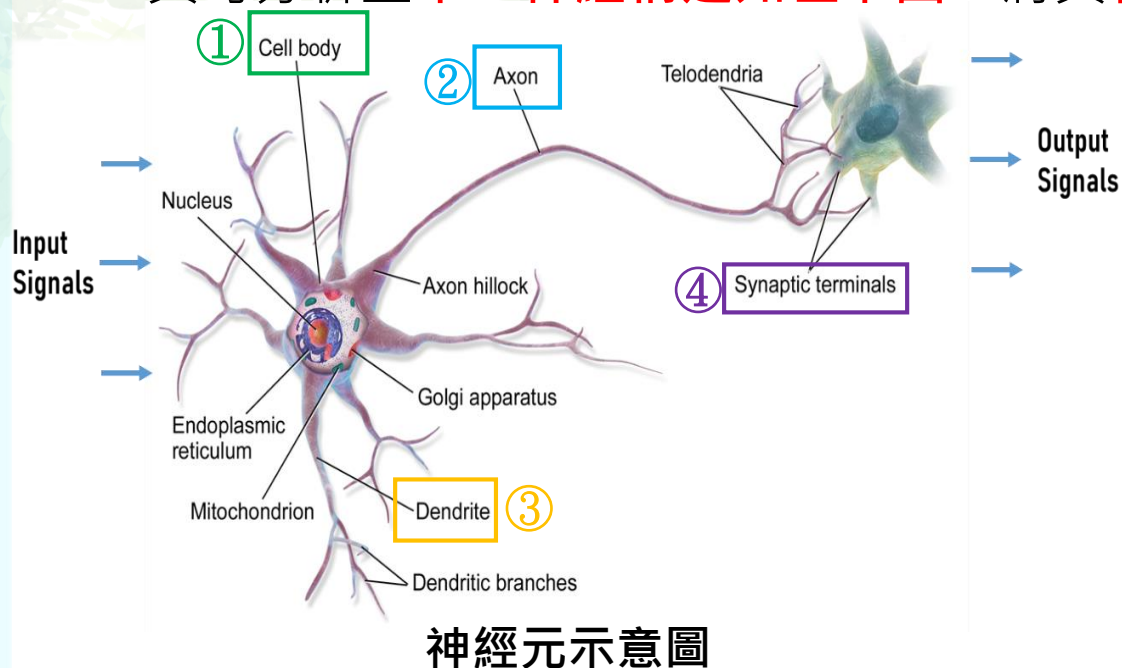
03

相關研究模式及文獻



類神經網路之基本簡介

- 人工神經網路又可稱神經網路(Neural Network, NN)或類神經網路，在機器學習和認知科學領域，是一種模仿生物神經網路(動物的中樞神經系統，特別係大腦)的結構和功能的數學模型或計算模型，用於對函式進行估計或近似。
- 其可分析至**單一神經構造如左下圖**，將其**轉換成數學模型如右下圖**。



基本構造

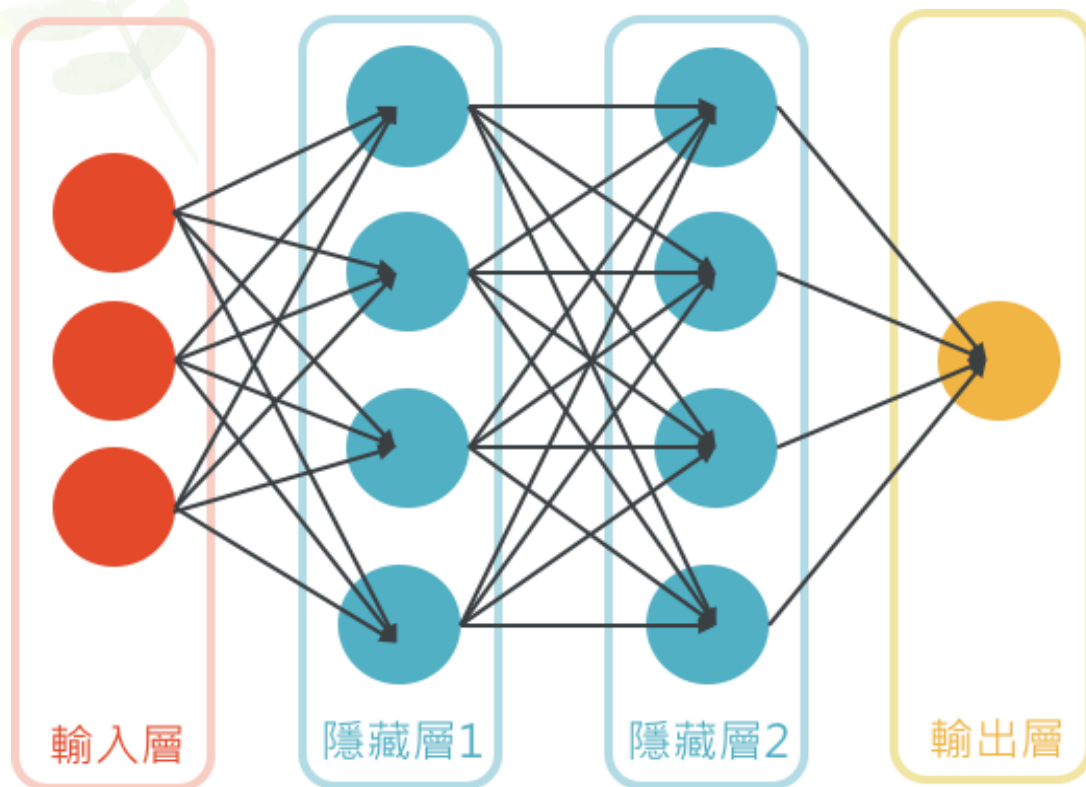
- ① **細胞體(soma, cell body)**：包覆神經核(nucleus)使細胞呈核狀的處理機構。
- ② **軸索(神經軸)(axon)**：神經細胞呈軸索狀的輸送機構。
- ③ **樹突(神經樹)(dendrites)**：神經細胞呈樹枝狀的輸入機構。
- ④ **突觸(神經節)(synapse)**：神經樹上呈點狀的連結機構(輸出)。

數學模型 $Y_j = f(\sum W_{ij} X_i - \theta_j)$

輸入訊號 (orange arrow pointing to X_i)
偏權值 (green arrow pointing to θ_j)
輸出訊號 (purple arrow pointing to Y_j)
轉換函數 (green arrow pointing to f)
連結加權值 (green arrow pointing to W_{ij})

類神經網路之基本簡介

- 由許多高度聯結的節點(或處理單元如**神經元**)所組成，用來處理資訊並對外部的輸入以網路動態來回應)。
- 若把類神經網路視為黑盒子，則此黑盒子是由許許多多節點所聯結成，一般具有三層：輸入層、隱藏層(為一層或一層以上)、輸出層。



類神經網路架構圖

基本構造

- ① **輸入層**—從外面接受訊號並將此訊號傳入類神經網路中，以方便進行訊號處理。
- ② **隱藏層**—接受輸入層的訊號，**對訊號進行處理**。
- ③ **輸出層**—接受網路處理後的訊號，並將結果傳送到外面。

運作過程

- ① **訓練過程**—訓練目的在決定網路的權重值和偏權值。
- ② **模擬過程**—目的在決定網路的預測輸出值或驗證網路的準確度。

類神經網路之PEMS應用模式

- 根據使用不同思維而演化發展出不同結構或運作的各類神經網路模式，如下所示：
 - ✓ 多層感知器類神經網路(Multilayer perceptron neural network, MLPNN)
 - ✓ RBF神經網路(Radial basis function neural network, RBFNN)
 - ✓ 廣義回歸類神經網路(Generalized regression neural network, GRNN)
 - ✓ 支持向量機(Support vector machine, SVM)
 - ✓ 基因演算法/遺傳演算法(Genetic algorithm, GA)
 - ✓ 終端學習機(Extreme Learning Machine，簡稱ELM)
 - ✓ 粒子群演算法(Particle Swarm Optimization，簡稱PSO)
 - ✓ 長短期記憶(Long short-term memory，簡稱LSTM)

類神經網路之PEMS應用模式相關案例

早期國內外類神經網路應用在PEMS之研究內容比較

作者(年份)	應用或研究地點	機組類型	類神經網路型式	輸入參數	輸出參數
Botros, et al. (2001)	TransCanada compressor stations, Alberta, Canada	GE LM1600 Gas Turbine	Multi Layer Perceptron (MLP) Radial Basis Function (RBF) Generalized Regression NN (GRNN)	ambient pressure ambient temperature the three shaft speeds (N_1 , N_2 , N_3) air compressor discharge pressure (P_3) fuel gas flow rate (Q_f) power output (Ws)	NO (ppm)
Steyskal, et al. (2001)	Engines and Energy Conversion Lab, Dept of Mech. Eng, Colorado State University	four cylinder two-stroke Cooper-Bessemer GMV-4TF natural gas engine	Multilayer feedforward ANN	23 variables	NO _x (ppm)
Krijnsen, et al. (2000)	Delft University of Technology, Netherlands	TNO Automotive using a standard 6 cylinder, 12 L heavy duty EURO-2 <i>diesel</i> engine	Supervised feedforward ANN	engine speed rack position charge air pressure charge air temperature	NO _x (ppm)
Reifman and Feldman (1998)	Commonwealth Edison's <i>coal-fired</i> power plants, Illinois	Will Conty Unit 3 (WCU-3), 278 MWe tangentially fired twin furnace	Process identification: fully connected recurrent network Process control: a multilayer feedforward network	NO _x emission boiler master fuel flow rate (BM) excess oxygen (O ₂) tilt of the burners in the superheat furnace (ST) tilt of the burners in the reheat furnace (RT)	Normalized NO _x
陳建中等人(2000)	台灣南部 某事業廢棄物焚化爐	垃圾焚化廠	Multilayer feedforward ANN	共34項	一次爐爐溫 二次爐爐溫、 CO、CO ₂ 、O ₂ 燃燒效率
莊源鍵(1998)	國內某廢棄物焚化爐	廢棄物焚化爐	簡捷化之時間延遲網路	共27項	NO (ppm) CO (ppm)

污染排放預測監測系統-軟測量

PEMS預測模式-歸類三種方法

(一)熱力學定律

NOX、CO和O₂的濃度變化和燃燒條件有直接關係，例如GE公司較新型的氣渦輪機組都已採用其公司所自行研發的模式以取代CEMS。

(二)傳統的統計方法

如台灣最早研發PEMS的案例為台電公司在1999～2002年委託成功大學環工系朱信教授研究團隊陸續在高雄興達和南部火力發電廠針對天然氣複循環發電機組(Combined Cycle Gas Turbines, CCGT)。成大團隊建立NOX、CO和O₂預測模式的方法為多變量統計迴歸模式(Multivariate Regression Model)。

(三)類神經網路

目前是商業化PEMS採取的主流工具，例如Pavilion公司所研發的軟體目前已應用在Lower Colorado River Authority的Ferguson燃氣電廠430 MW的機組上。

早期傳統的統計方法

- ◆ 民國89年度(西元2000)起針對台電公司高雄興達和南部火力發電廠進行天然氣複循環發電機組(CCGT)預測模擬。
- ◆ 選用新達電廠HT-3針對NO_x進行研究比較。

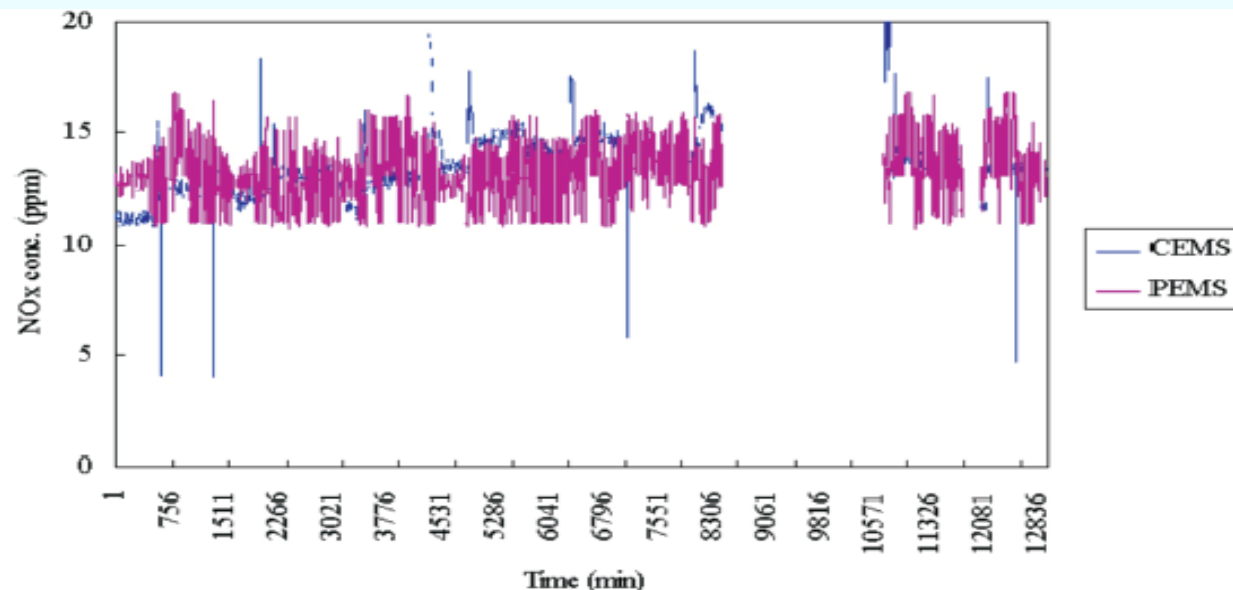
HT-3無因次線性三段模式的開發

HT-3 (HT-3A) 擬合式

$$\frac{NO_x}{12.9} = a + b\left(\frac{T_0}{387}\right) + c\left(\frac{P}{0.69}\right) + d\left(\frac{Q_F}{39478.33}\right) + e\left(\frac{T_i}{33.64}\right) + f\left(\frac{I}{130.73}\right)$$

T0	溫度	Tt	壓縮機入口溫度
P	燃燒室壓力	I	風門開度
QF	流率	Ti	壓縮機入口溫度平均值

註：天然氣複循環發電機組：(Combined Cycle Gas Turbines, CCGT)



PEMS分鐘資料(HT-3A)與CEMS監測數據比較圖

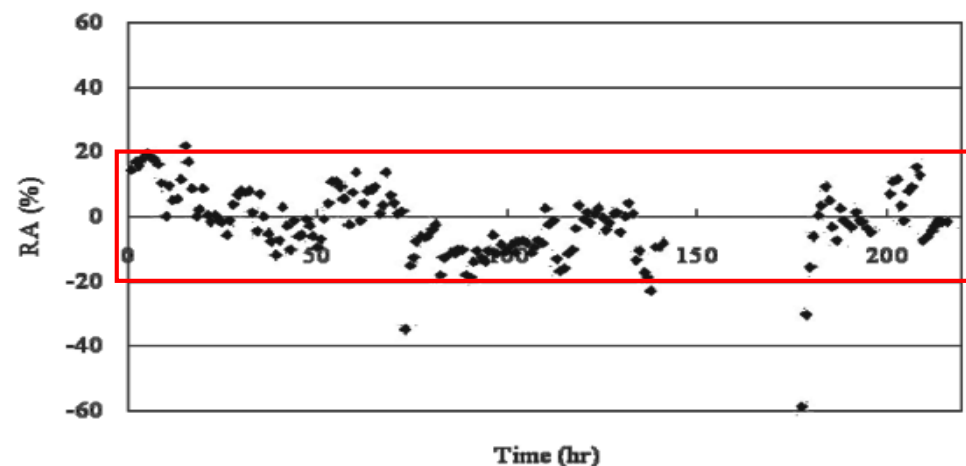


Figure 5. The RA of PEMS hourly data (HT-3A) and CEMS data.

RA分布圖

- ◆ 結果表明：HT-3(HT-3A)與CEMS數據平均RA為7.19%，符合PS-16控制在20%內。

早期傳統的統計方法

- ◆ 民國89年度(西元2000)起針對台電公司高雄興達和南部火力發電廠進行天然氣複循環發電機組(CCGT)預測模擬。
- ◆ 選用新達電廠HT-3針對NO_x進行研究比較。

HT-3(Start-Up模式)無因次之十五變數模式

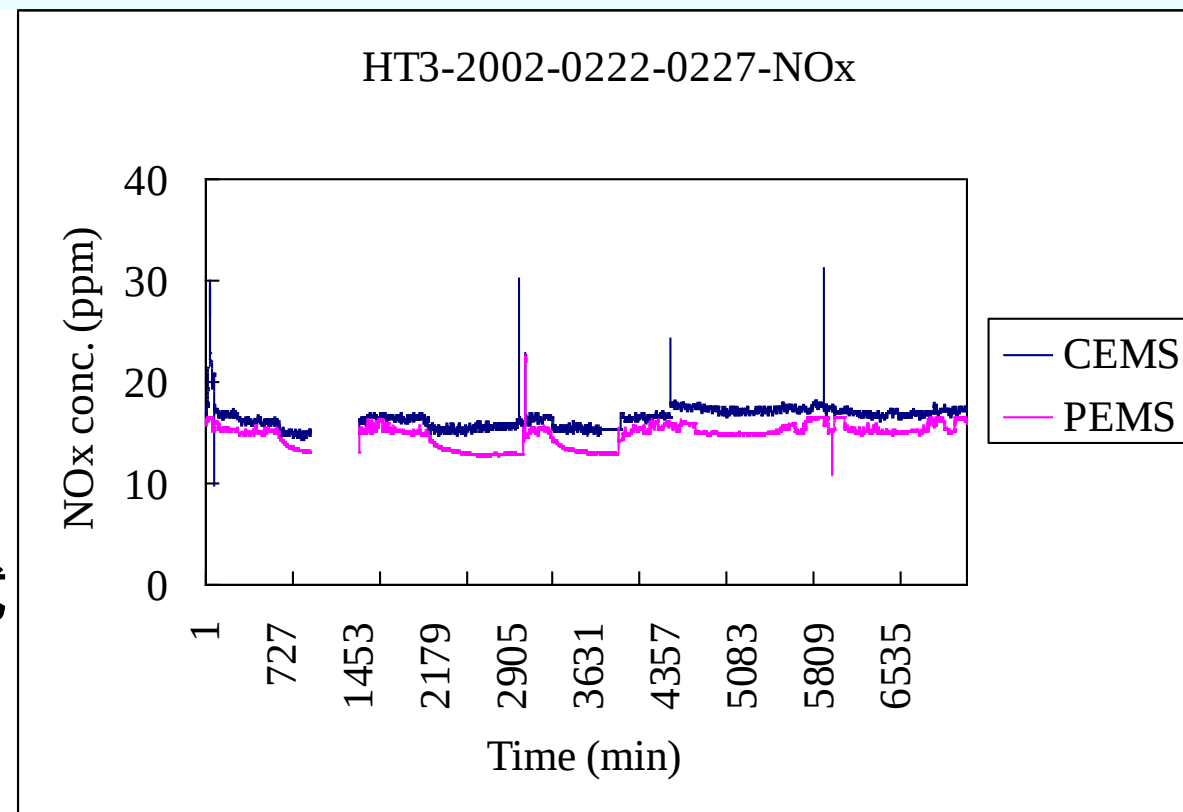
HT-3 (Start-Up模式)十五變數擬合式

$$\frac{NO_x}{NO_{x,A}} = \left[\begin{array}{l} a + b\left(\frac{T_{i1}}{T_{i,A1}}\right) + c\left(\frac{T_{o1}}{T_{o,A1}}\right) + d\left(\frac{I_1}{I_{A1}}\right) + e\left(\frac{P_1}{P_{A1}}\right) + f\left(\frac{Q_{F1}}{Q_{F,A1}}\right) \\ + g\left(\frac{T_{i2}}{T_{i,A2}}\right) + h\left(\frac{T_{o2}}{T_{o,A2}}\right) + i\left(\frac{I_2}{I_{A2}}\right) + j\left(\frac{P_2}{P_{A2}}\right) + k\left(\frac{Q_{F2}}{Q_{F,A2}}\right) \\ + l\left(\frac{T_{i3}}{T_{i,A3}}\right) + m\left(\frac{T_{o3}}{T_{o,A3}}\right) + n\left(\frac{I_3}{I_{A3}}\right) + o\left(\frac{P_3}{P_{A3}}\right) + p\left(\frac{Q_{F3}}{Q_{F,A3}}\right) \end{array} \right]$$

下標A為平均值

T0	溫度	Tt	壓縮機入口溫度
P	燃燒室壓力	I	風門開度
QF	流率	Ti	壓縮機入口溫度平均值

註：天然氣複循環發電機組：(Combined Cycle Gas Turbines, CCGT)



PEMS分鐘資料(HT-3A)15變量與CEMS監測數據比較圖

- ◆ 結果表明：HT-3A(Start-Up模式)15變量與CEMS數據平均RA為7.43%，符合PS-16控制在20%內。R值為0.98大於法規0.8。

早期傳統的統計方法

- ◆ 民國89年度(西元2000)起針對台電公司高雄興達和南部火力發電廠進行天然氣複循環發電機組(CCGT)預測模擬。
- ◆ 選用南部電廠NP-1針對NO_x進行研究比較。

NP-1(Start-Up模式)無因次之十變數模式

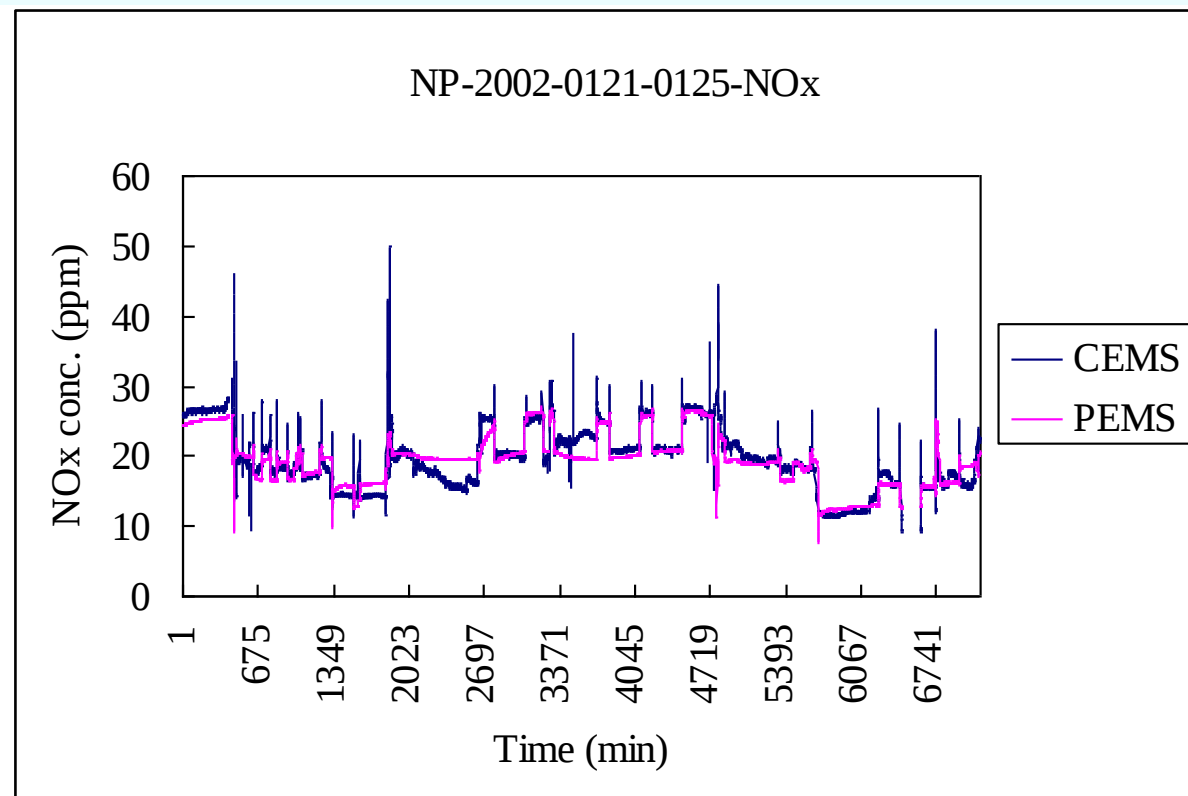
NP-1 十變數擬合式

$$\frac{NO_x}{NO_{x,A}} = \left[a + b \left(\frac{T_{i1}}{T_{i,A1}} \right) + c \left(\frac{T_{o1}}{T_{o,A1}} \right) + d \left(\frac{I_1}{I_{A1}} \right) + e \left(\frac{P_1}{P_{A1}} \right) + f \left(\frac{Q_{F1}}{Q_{F,A1}} \right) + g \left(\frac{T_{i2}}{T_{i,A2}} \right) + h \left(\frac{T_{o2}}{T_{o,A2}} \right) + i \left(\frac{I_2}{I_{A2}} \right) + j \left(\frac{P_2}{P_{A2}} \right) + k \left(\frac{Q_{F2}}{Q_{F,A2}} \right) \right]$$

下標A為平均值

T0	溫度	Tt	壓縮機入口溫度
P	燃燒室壓力	I	風門開度
QF	流率	Ti	壓縮機入口溫度平均值

註：天然氣複循環發電機組：(Combined Cycle Gas Turbines, CCGT)



PEMS 分鐘數據 (NP-1) 10 變量和 CEMS監測數據比較圖

- ◆ 結果表明：NP-1 (Start-Up模式)10變量與CEMS數據平均RA為7.76%，符合PS-16控制在20%內。R值為0.93大於法規0.8。

類神經探勘技術- IBM Intelligent Miner

◆ **民國104年度**進行可調適性連續自動監測設施(CEMS)空氣污染物排放預測及系統開發之研究。

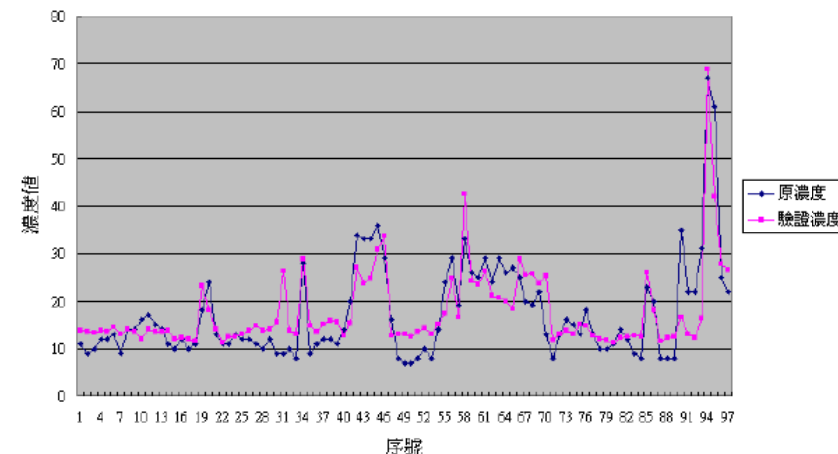
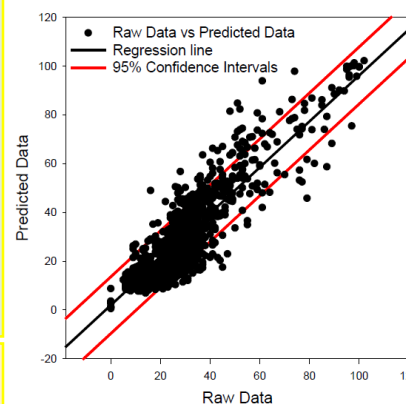
◆ 採用的資料為**某鋼鐵廠**的93年9月1日至94年8月31日止計有3,989筆數據。

◆ 選擇了類神經探勘技術搭配研究工具為IBM Intelligent Miner得研究結果為：

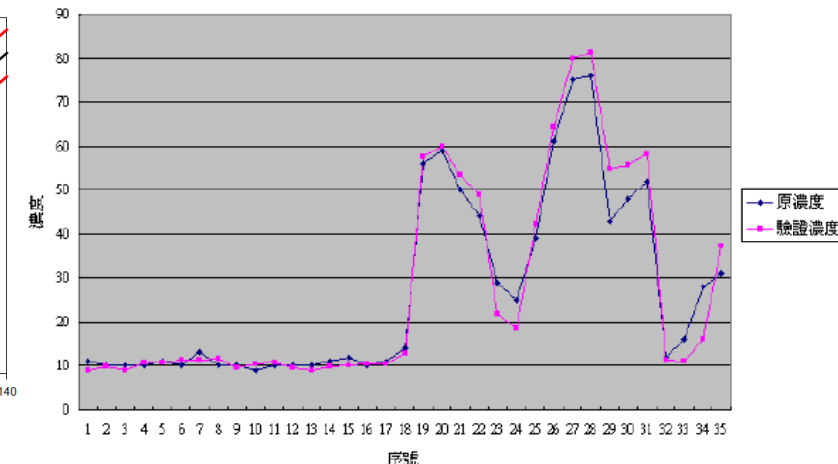
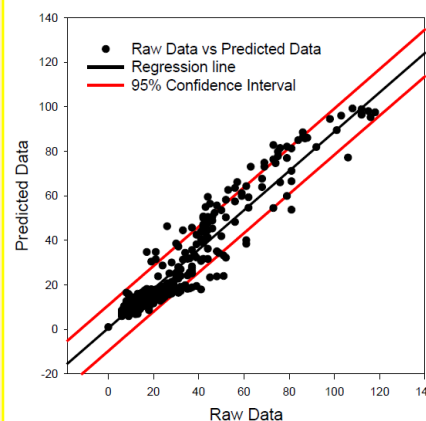
	平均RMS	最大RMS	相關係數
訓練	0.053	0.245	0.910
測試	0.040	0.2	0.958

◆ **訓練及預測**二者相關係數**呈現高度相關**。

◆ 測試時所呈現出來的趨勢圖與訓練時的趨勢圖來比較，雖在精確度上**預測較訓練時略為提升**，但仍有離原濃度值差距頗大情形出現，顯示精確度上仍是存在改善的空間。



訓練結果散佈圖(左)及濃度趨勢圖(右)

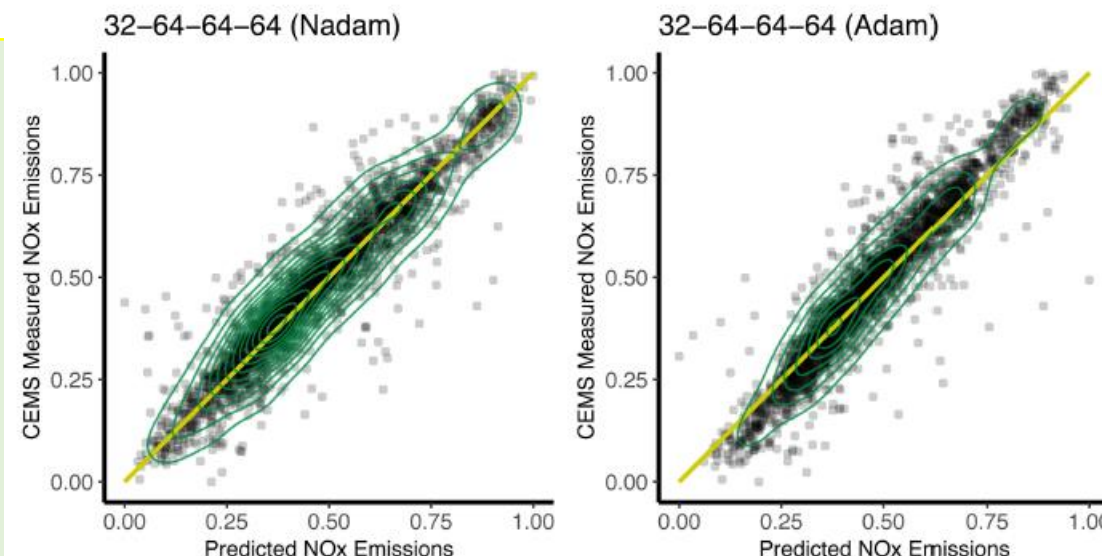


測試結果散佈圖(左)及預測趨勢圖(右)

類神經網路之PEMS應用模式相關案例

相關案例 (一)

- ◆ 開源機器學習庫Keras開發預測排放監測系統之研究含基本預測排放監測系統(PEMS)研究應用。
- ◆ 使用12086個樣本訓練九個神經網絡預測模型。基於神經網絡的模型使用八個過程參數作為輸入來預測NO_x排放。
- ◆ 在九個案例中最好的網格模型為32-64-64-64有四個隱藏層，並搭配使用Nadam方法進行優化。
- ◆ 這兩個模型在測試數據集中的平均絕對誤差(mean absolute error, MAE)最小，分別為0.5982及0.5696。
- ◆ **最佳模型的MAE為0.5982，r值為0.9451**，使用測試數據集測量和預測的排放值之間的差異為0.14%。
- ◆ 該研究將預測值與測量值進行比較，Nadam和Adam模型的預測值與CEMS測量值的一致性與其他模型更加良好。



CEMS測量的NO_x與預測的排放量

模型誤差表

模型	MAE
32-64-64-64(Nadam)	0.5982
32-64-64-64(Adam)	0.5696

備註：Nesterov accelerated Adaptive Moment Estimation，簡稱Nadam
Nesterov -加速自適應矩估計

類神經網路之PEMS應用模式相關案例

相關案例(三)

- ◆ Guotian Yang等人介紹長短期記憶(LSTM)神經網路在模擬660MW鍋爐運行參數與NO_x排放之間關係的應用。
- ◆ 藉由LSTM設定第一層神經元數量為400個，以及第二層神經元數量為100個。並且採用**dropout策略(最佳設定為0.5)**和**Adam優化器**來提高網路性能，其測試結果如右表。
- ◆ 比較了**LSTM模型**、**傳統遞歸神經網路(RNN)**模型及**最小乘支持向量機(LSSVM)**的區別。
- ◆ 結果表明，LSTM模型的性能優於RNN模型。此外，建立了高維數據的NO_x預測模型，並取得了良好的預測性能。
- ◆ LSTM能夠對燃煤鍋爐的 NO_x 排放進行建模，並且優於其他傳統的建模方法。

不同dropout的預測結果對比表

Comparisons of predicted results with different dropout.

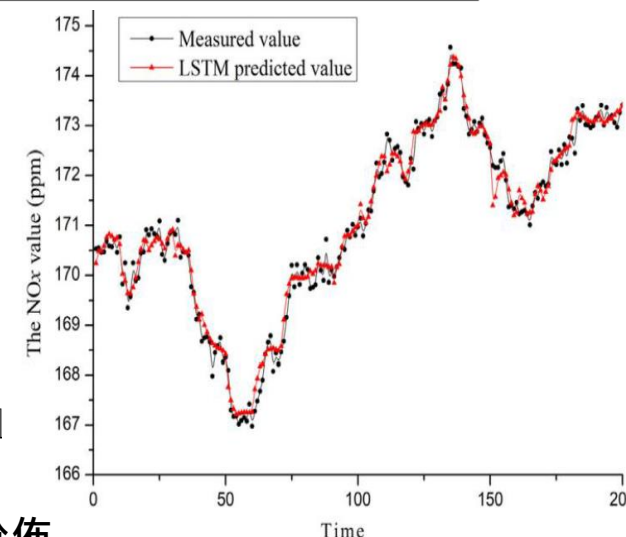
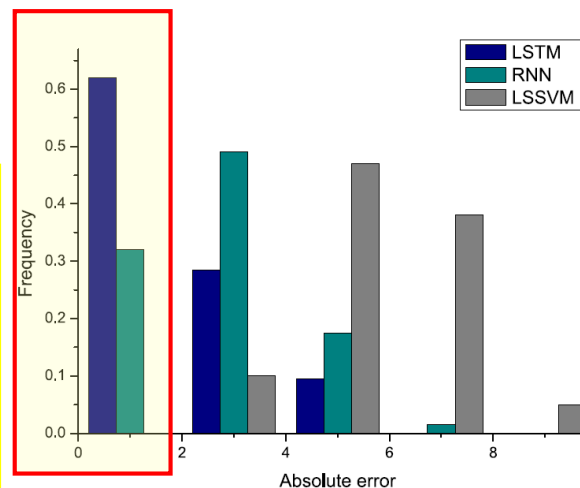
Group	Learning rate	Timestep	Dropout	RMSE	Time/s
Test	0.01	10	0	2.412	116.802
	0.01	10	0.2	2.315	120.145
	0.01	10	0.5	2.271	117.599
	0.01	10	0.8	2.528	122.626

註：dropout表示用以防止過擬合參數

不同演算法預測結果對比

Comparison of prediction results of different optimization algorithms.

Group	Learning rate	Timestep	Optimization	ACC/%	RMSE	Time/s
1	0.01	10	RMSP	22.0	3.257	117.889
2	0.01	10	SGD	27.5	3.114	115.868
3	0.01	10	ADAM	54.0	2.271	117.599



各種模型測試數據的絕對誤差分佈

LSTM預測結果圖

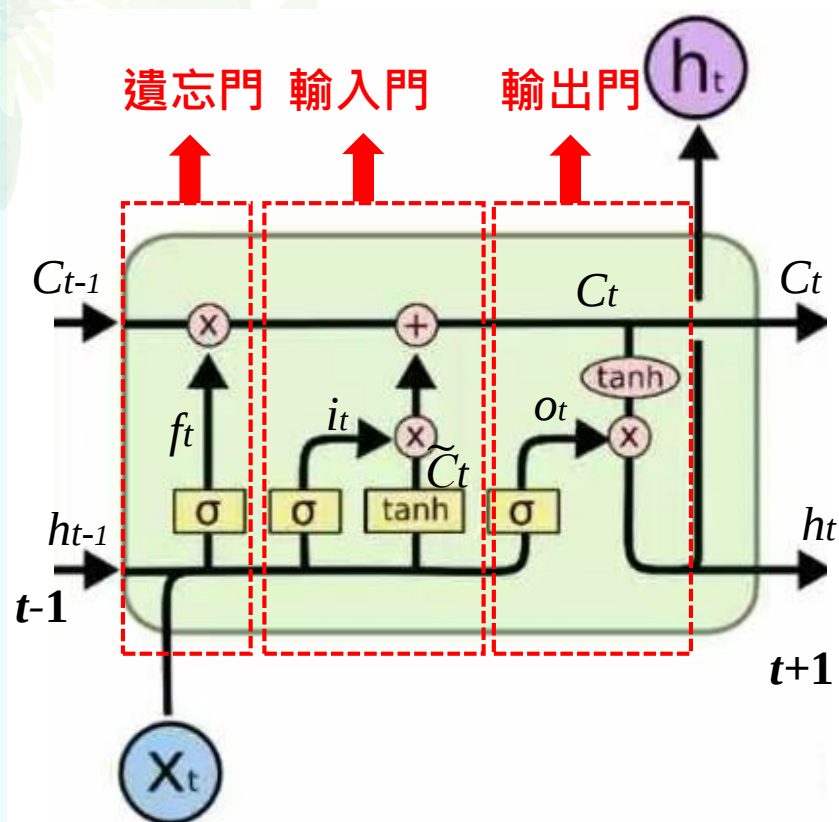
04

目前研究模式發展架構



類神經網路模式-LSTM

- ◆ 使用的類神經網路模式為長短期記憶網格(long-short term memory networks，簡稱LSTM)，LSTM比RNN(Recurrent Neural Networks)較為廣泛實用，LSTM可解決RNN存在記憶時效甚短、梯度爆炸或消失等問題。
- ◆ LSTM架構如下說明：加入3個閘門(σ)



LSTM迴圈模組圖

基本架構

- ① 第一層(遺忘門)-保留重要資訊或選擇遺忘

遺忘門輸出值 $f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f)$

- ② 第二層(輸入門)-對訊號進行處理，訓練學習後權重參數，並加入 $t-1$ 的記憶效應。

輸入值 $i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i)$

更新值 $\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C)$

更新記憶傳輸帶 $C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t$

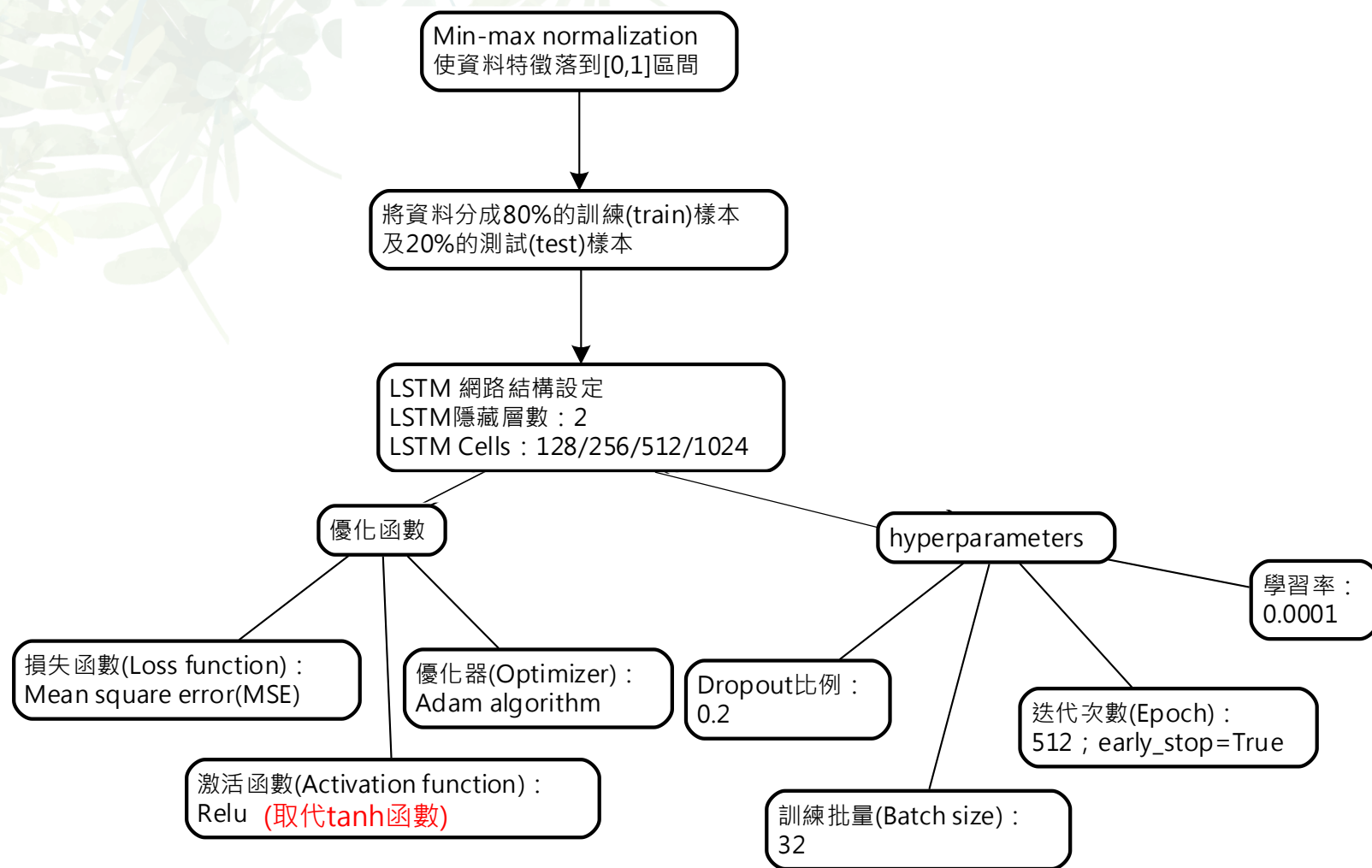
- ③ 第三層(輸出門)-透過閥決定有多少資訊需要被輸出，並複製一 h_t 作為下一次 $t+1$ 作使用。

輸出值 $o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o)$

LSTM單元輸出值 $h_t = o_t * \tanh(C_t)$

C	記憶傳輸帶或稱細胞狀態
h_t	LSTM單元的輸出
x_t	LSTM的輸入
$W_{f,i,c,o}$	權重參數
$b_{f,i,c,o}$	偏置參數

神經網路系統執行架構與模型參數



數據輸入及LSTM 網路結構與模型參數設定

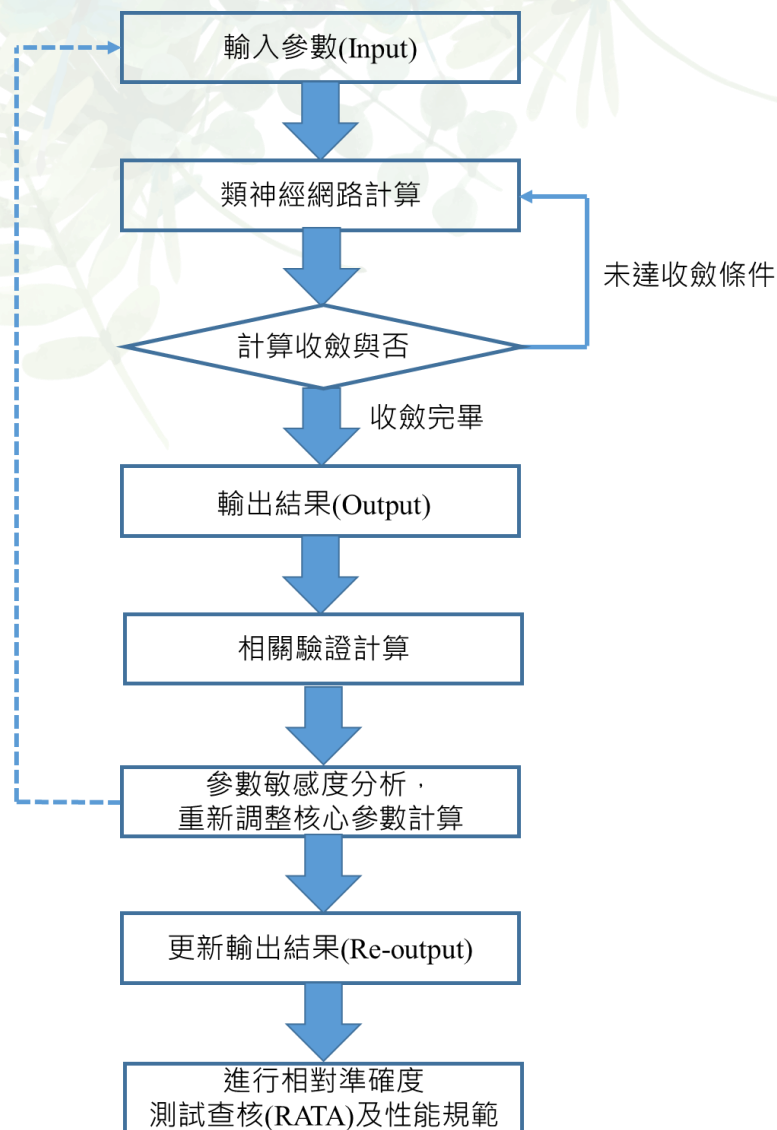
■ 優化函數

- 損失函數：作為目標函數，可作為收斂條件。
- 優化器：Adam算法-可提供收斂率的區間，並證明收斂速度在在線凸優化 (Online convex optimization) 框架下達到了最優。
- 激活函數：在無需要使用任何指數運算，只需要判斷輸入值是否大於0，減少指數函數計算量。此處使用Relu

■ Hyperparameters(超參數)

- Dropout：在訓練時每一次的迭代(epoch)皆以一定機率丟棄隱藏層神經元，被丟棄神經元不傳遞訊息，藉此達到防止過擬和狀況(Over fitting)；
- 迭代次數(epoch)：設定在512，並加入未達512而滿足收斂條件，則會提早終止迭代程序。

研究執行流程架構



研究流程圖

1.輸入參數

根據廠方給予相關資料(如污染源及防制設備)，如該焚化廠操作參數為67項的小時值數據，從2021年1月1日~2022年4月30日，共16個月共**218,880筆**數據。

2.類神經網路模式

長短期記憶網格LSTM

3.收斂條件

損失函數(Loss function)-Mean square error(MSE)

4.相關驗證計算

- ① 平均均方誤差(Mean Squared Error, MSE)
- ② 均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)
- ③ 平均絕對誤差(Mean Absolute Error, MAE)

5.參數敏感度分析

使用隨機森林法 (Random Forest)與套所算法 (Lasso algorithm)進行特徵分析。

目前研究對象-A焚化廠

- 與廠方索取製程M01之操作參數，起迄時間為2021年1月1日至2022年4月30日。
- 每小時一筆**操作參數計40項共130,627筆數據**。

A焚化廠M01操作參數表

系統	設備名稱位置	操作參數項目	單位	參數代號
一號爐	鍋爐煙道氣	爐膛壓力	mmWG	1NM01P02
		節熱器出口煙道氣溫度	°C	1NL01T01
		節熱器出口煙道氣壓力	mmWG	1NL01P01
	一號鍋爐	爐膛溫度	°C	1NM01T04
		爐膛出口溫度	°C	1NM01T20
		鍋爐出口O ₂ 濃度	%	1NM01A01
	一號爐油壓	投入及押出油壓壓力	kg/cm2G	1NS76P06
		垃圾熱值	Kcal/Kg	LHV
		垃圾投入量	Kg	HOPPER1
	一號鍋爐	汽鼓壓力	kg/cm2G	1NA01P04
		汽鼓溫度	°C	1NA01T12
		蒸氣流量	t/hr	1NA01F02
		過熱器出口蒸氣溫度	°C	1NA01T34
		過熱器出口蒸氣壓力	kg/cm2G	1NA01P10
		節熱器入口鍋爐水壓力	kg/cm2G	1RL11P06
		節熱器入口鍋爐水溫度	°C	1RL11T06
		鍋爐水導電度	°C	1RV70A01
		過熱器入口溫度	°C	1NM02T31

目前研究對象-A焚化廠

- 與廠方索取製程M01之操作參數，起迄時間為2021年1月1日至2022年4月30日。
- 每小時一筆**操作參數計40項共130,627筆數據**。

A焚化廠M01操作參數表(續)

系統	設備名稱位置	操作參數項目	單位	參數代號
一號爐	一號爐膛	一次空氣總流量	Nm3/hr	1ND01F02
		低壓預熱器蒸汽壓力	Kg/cm2G	1RH14P02
		二次空氣流量	Nm3/hr	1NG04F03
		二次空氣壓力	mmWG	1NG04P02
		活性碳下料量	kg/hr	1NK01F01
		洗滌塔石灰流量	m3/hr	1NK28F01
		洗滌塔水流量	m3/hr	1UM66F01
		袋式集塵器入口溫度	°C	1NL03T05
		袋式集塵器差壓	mmWG	1NL03P02
		渦輪機蒸氣流量	t/hr	0RA01F01
蒸氣系統	蒸氣渦輪機/發電機	渦輪機入口蒸氣溫度	°C	0RA01T03
		渦輪機入口蒸氣壓力	Kg/cm2G	0RA01P2A
		主蒸氣旁通總流量	t/hr	0RA03F01
		蒸氣渦輪機排氣壓力	Kg/cm2G	0SA01P06
		蒸氣渦輪機排氣溫度	°C	0SA01T14
		蒸氣渦輪機轉速	RPM	0SA01Y01
		渦輪機偏心位移	mm	0SA01M01
		渦輪機軸向位移	mm	0SA01M02
		渦輪機相對膨脹	mm	0SA01V02
		除氧櫃壓力	kg/cm2G	0RH11P02
		飼水導電度	us/cm	0RV27E01
		冷凝水流量	T/hr	0RM08F01

05

CEMS與PEMS成本分析



CEMS成本分析-美國

◆根據美國 “Chevron and Stone k Webster Engineering Corporation”所收集的CEMS成本資料，一套CEMS成本如下：

- 直接成本：美金195,000元(約合台幣5,850,000元)；
 - 間接成本：美金171,000元(約合台幣5,130,000元)；
 - 總安裝成本：美金366,000元 (約合台幣10,980,000元)；
 - 年操作維護成本：美金27,000元(約合台幣810,000元)；
- 其分項成本如右表所示。

美國CEMS直接/間接成本分析

	項目	安裝成本 (US\$)
直接成本	分析儀	\$40,000
	採樣設備	\$70,000
	分析儀室	\$50,000
	資料收集系統	\$35,000
	總計	195,000
間接成本	人力	\$135,000
	備品	\$21,000
	委託及認證	\$ 15,000
	總計	171,000
總安裝成本(Total Installed Cost, TIC)		\$366,000
維護成本	公共設施	\$14,000/yr
	後續維護	\$13,000/yr
總維護成本		\$27,000/yr

CEMS成本分析-我國台電

台電CEMS直接/間接成本分析

	設備名稱	監測項目	成本(新台幣)
直接成本	SICK-GM 31	SO _x /NO _x	150萬
	SICK-GM 910	CO	150萬
	FLowsICK Vel 500	VEL	40萬
	Yokogawa	O ₂	40萬
	電腦、線路、軟體	-	20萬
	小計		400萬
間接成本	安裝人力、教育訓練 (5萬/月*4人*2個月)		40萬
	測試認證 (4萬*10天)		40萬
	其他備品		80萬
	管理費 (前3項之10%計)		16萬
	稅 (前4項之5%計)		9萬
	小計		185萬
合計	585萬		

台電CEMS維護成本分析

1.定期維護費及耗材費用	一年總價(NT\$)
SO ₂ /NO 濃度監測儀SICK GM-30-2P	\$253,164
CO濃度監測儀SICK GM-900	\$104,964
O ₂ 濃度監測儀ROSEMOUNT WC-3000	\$80,280
監測儀器監控及資料處理裝置PENTIUN-350	\$49,404
記錄器與排放顯示裝置 國產486DX	\$49,404
小計	\$537,216
2.各項總校正費用	一年總價(NT\$)
SO ₂ /NO 濃度監測儀SICK GM-30	\$46,312
O ₂ 濃度監測儀ROSEMOUNT WC-3000	\$13,380
CO濃度監測儀SICK GM-900	\$17,494
小計	\$77,186
3.工程安全衛生設施及管理費用 (以1. 2.項合計之3%計)	\$18,432.06
4.營業稅(以1. 2. 3.項合計之5%計)	\$31,641.70
5.總計	\$664,475.76

CEMS成本分析比較-美國與我國

□ 經美國CEMS成本資料與台電興達廠的CEMS成本進行比較(如表所示)：

- 初設成本美國為台電興達廠的1.88倍。
- 在操作維護成本方面，美國為台電興達廠的1.23倍。

美國與我國CEMS成本比較

項目	美國	我國
直接成本	585萬	400萬
間接成本	513萬	185萬
總安裝成本	1098萬	585萬
維護成本	81萬/年	66萬/年

(1098/585=1.88)

(81/66=1.23)

PEMS成本分析-美國

- ◆ 根據美國Callidus科技公司在1997年A&WMA Conference發表的論文對PEMS及CEMS的成本比較得知，依形式與複雜度的不同，完全承包的PEMS計劃價錢從**US\$95,000到US\$120,000**。
- ◆ 根據美國Callidus科技公司在1996年Forest Products Society Conference on Process and Business Control Technologies for the Forest Products Industry發表的論文中對本身發展的 PEMS的成本為**US\$150,000到US\$300,000元**之間。
- ◆ 89年台電計劃在美國進行參觀訪問中，經由SCAQMD安排參觀南加州瓦斯公司位於加州Pico Ricera的一氣體壓縮輸送站。該壓縮站兩套ACEMS包含軟硬體安裝、模式建立與煙道檢測的總經費約為US\$600,000~800,000元，若只算軟硬體的費用則約為US\$200,000~300,000元。檢測費用為每天US\$1,000元。因此平均一套ACEMS的**總經費約為US\$300,000~400,000元**。
- ◆ 由上述所得的資訊，美國PEMS的初設成本取前述資料的中位數為US\$150,000元(折合台幣約為4,500,000元)。相較前面所述之**CEMS的初設成本美金366,000元(約合台幣10,980,000元)**，**PEMS便宜一半**。

PEMS成本分析-我國台電

民國89年度台電計劃PEMS成本

項 目			數量	單價	總價
初設成本	硬體成本	0~10 V to 4~20 mA 轉換器	20	6,000	120,000
		I/O模組	5	15,000	75,000
		線材施工	一式	40,000	40,000
		現場施工	一式	25,000	25,000
		PC個人電腦	1	50,000	50,000
		資料備份抽取式設備	1	20,000	20,000
		其他耗用材料	1	25,000	25,000
	軟體成本	軟體製作	一式	150,000	150,000
		預測模式研發製作	一式	300,000	300,000
	其他	模式研究人員薪資	12月×2人	25,000	600,000
		相對準確度測試(RATA)	24小時×5天	3,500	420,000
		業務費與管理費	12月		205,000
小 計					2,030,000
		操作人工	12月	20,000/月	240,000
		電腦耗材	12月	2,000/月	24,000
		定期及不定期維修	每年	30,000/年	30,000
小 計					294,000

綜合成本分析-美國與我國台電

- ◆ 成本分析結果可得我國與美國初設成本的比較，如下表所示。
- ◆ 表中顯示PEMS的初設成本約為CEMS的1/2~1/3。其中又以當年89年台電計劃PEMS的**成本為最低**。

國內外CEMS與PEMS初設成本比較

項 目	美 國	我 國
PEMS	450萬	203萬
CEMS	1,098萬	585萬

06

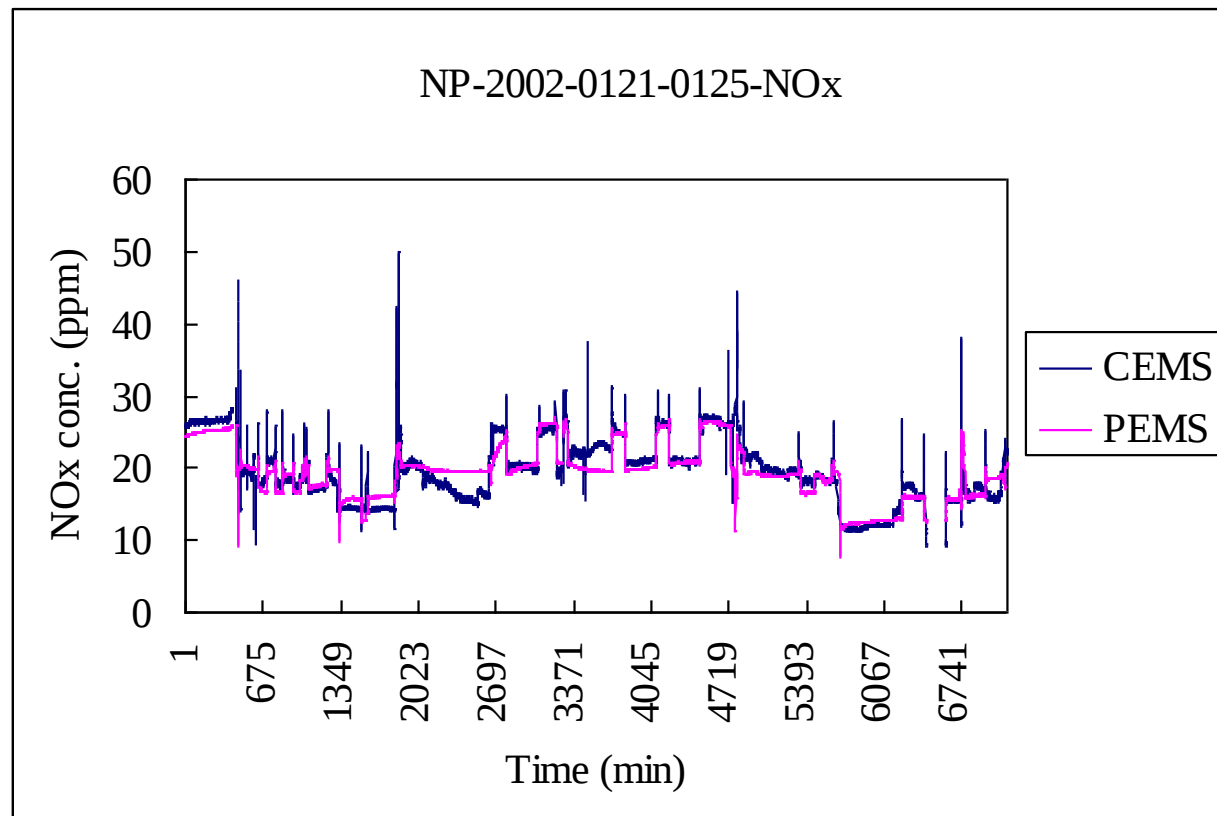
PEMS相關驗證及草案建議



模式準確度驗證

- ◆ 為了驗證新修正模式的準確度，另外取民國91年1月21~25日五天數據(案例如右)進行驗證，驗證結果如下說明。
- ◆ 由驗證圖形顯示預測結果在變動趨勢相當好，而且在數值突昇的地方也有突昇反應。
 - 相對準確度為**7.76%**在20%範圍內。
 - 相關性分析之小時相關係數(**r**)為**0.93**大於0.8。
 - **F檢定 (F-test)**得**F = 0.725**, $F < F_{119, 0.05} = 1.354$ 表示變異數差距不大。
 - **t檢定 (t-test)**得**t = -0.016**, $|t| < t_{119, 0.025} = 1.9817$ 表示偏差不大。

民國91年1月NO_x之PEMS



南火一號機含啟動模式之無因次十變數模式預測結果
與CEMS監測數據比較

環保署CEMS/PEMS法規修訂建議草案

◆ 於連續自動監測設施管理要點之

- 第三條安裝規範及基本設施規格，增列「預測排放監測設施」。
- 第十條監測設施之確認程序，增列「預測排放監測設施如附錄七」。
- 第十九條監測設施之相對準確度測試及計算方法，增列「預測排放監測設施如附錄七」。

◆ PEMS被認證之前必須先進行和通過相對準確度或其他可能的測試。PEMS最少必須分別在3種(低、中、高)不同負載下進行90組相對準確度測試(每個負載下至少各30組測試)，並進行數據之偏移測試、每個負載下的數據F-測試和數據的相關性分析。

◆ 設施規格包括設施設計、數據紀錄器、性能規格、失效感應器

◆ 品保認證程序包括

- 監測設施確認程序
- 相對準確度測試程序
- 方法性能，包括
 - **監測設施相對準確度**---小於20%
 - **監測設施偏移(t-test)**--- $d < |cc|$
 - **監測設施變異(F-test)**---小於95%信賴水準的F臨界值

監測設施性能規格

項目	規格
1.相對準確度	與標準檢驗方法測試數據之誤差 $\leq 20\%$
2.操作測試時間	≥ 168 小時
3.偏移	$d < cc $
4.相關係數	$r \geq 0.8$

07

結論



結論

一	各類資訊與文獻案例顯示這數十年來應用PEMS於固定污染源排放管道煙氣監測的案例正在快速地增加，在技術上已趨於成熟階段，不管在整體成本、準確度、精確度與穩定性都已逐漸獲得主管機關與污染源業主的信賴與肯定。
二	所蒐集到的PEMS最新修訂法規及US EPA的PEMS性能規範PS-16，得知目前與國外相關法案的現況與最新趨勢。根據研究執行項目中包含系統結果配合國外相關PEMS與性能規範PS-16進行計算分析驗證結果，可供未來環保署訂定相關PEMS規範與性能規格時， 可參考本土化規格修訂我國之性能規格。
三	根據CEMS及PEMS成本分析，提供未來環保署執行PEMS相關法規，可建議廠方可依循各類相關類神經網路進行模型建置預測時，對於原本廠方執行CEMS相關監測數據流程， 可節省相關執行程序及額外費用。

THANK YOU