

行政院及所屬各機關出國報告  
(出國類別：實習)

# 煙氣排放模式(PEMS)作為標準監測 方法之技術

服務機關：台灣電力公司

出國人職稱：一般工程師

姓名：翁財發

出國地區：美國

出國日期：91 年 10 月 31 日至 11 月 13 日

報告日期：92 年 1 月 6 日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：「煙氣排放模式(PEMS)作為標準監測方法之技術」

頁數 37 含附件： 是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：翁財發/台灣電力公司/

工安環保處/一般工程師/(02)2366-7209

出國類別： 1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：91 年 10 月 31 日至 91 年 11 月 13 日 出國地區：美國

報告日期：92 年 1 月 6 日

分類號/目：G3/電力工程

關鍵詞： PEMS、CEMS、煙氣排放模式、煙氣監測技術

內容摘要：(二百至三百字)

本公司過去十餘年來已在各火力電廠建立連續排放監測系統 (CEMS , Continuous Emission Monitoring System) , 可利用過去累積之大量 CEMS 監測資料為基礎, 運用統計學及燃燒學理論, 並結合資訊及通訊技術, 選擇適當機組推導建立完備之煙氣排放模式 PEMS (Predictive Emission Monitoring System), 預測其排放狀況, 以取代機組原有之 CEMS 監測系統。

本實習主要係針對 PEMS 煙氣排放模式技術研發近況、美國 PEMS 相關法規及案例說明、PEMS 模式建置技術及軟硬體設備、品保品管制度以及相對準確度測試等技術加以研討, 冀藉此提昇本公司建置火力電廠發電機組 PEMS 模式系統之技術能力, 有助於本公司將來向環保主管機關爭取認可, 以 PEMS 模式做為煙氣標準監測方法, 俾節省大量煙氣監測費用, 減少電廠營運成本, 提高公司經營績效。

# 目 錄

頁次

壹、出國緣由 .....	1
貳、出國行程 .....	2
參、實習內容 .....	3
一、前言 .....	3
二、PEMS 煙氣排放模式 .....	4
三、美國 PEMS 相關法規及案例 .....	6
四、PEMS 模式建置技術及軟硬體設備 .....	13
五、品保品管制度 .....	15
六、相對準確度測試 .....	15
肆、感想與建議 .....	20
附錄 A、以統計方法建立 PEMS 模式之原理 .....	A-1
附錄 B、美國環保署 PEMS 性能規範 PS-16 草案 .....	B-1

## 壹、出國緣由

近年來國外有關機構已普遍對預測型排放監測系統 (PEMS , Predictive Emission Monitoring System) 進行技術研發，運用統計學及燃燒學理論，並結合資訊及通訊技術，對個別機組鍋爐建立煙氣排放模式，預測其排放狀況，並向政府環保主管機關爭取認可，取代機組原有之連續排放監測系統 (CEMS , Continuous Emission Monitoring System) ，以節省大量煙氣監測費用。

本公司過去十餘年來已在各火力電廠建立連續排放監測系統，可運用過去累積之大量 CEMS 監測資料為基礎，選擇適當機組推導建立完備之 PEMS 模式系統，俾將來爭取環保主管機關認可，做為煙氣標準監測方法。

鑒此，乃研擬並奉准赴美國實習「煙氣排放模式(PEMS)作為標準監測方法之技術」，冀藉此汲取美國之經驗與技術，以提昇本公司建置 PEMS 模式系統之技術能力，有助於本公司將來向環保主管機關爭取認可，以 PEMS 模式做為煙氣標準監測方法，以節省機組之煙氣監測費用。

## 貳、出國行程

一、日期：九十一年十月三十一日

內容：往程

地點：台北 洛杉磯

二、日期：九十一年十一月一日至七日

內容：實習 PEMS 煙氣排放模式技術

地點：南加州大學

三、日期：九十一年十一月八日至十一日

內容：實習 PEMS 品保品管制度及相對準確度測試技術

地點：華盛頓大學

四、日期：九十一年十一月十二日至十三日

內容：返程

地點：西雅圖 台北

## 參、實習內容

### 一、前言

行政院環境保護署為確實掌握大型污染源的空氣污染物排放情形，已於民國 82 年起依據空氣污染防治法第二十一條訂定「固定污染源空氣污染物連續自動監測設施管理要點」及相關之品保品管技術規範，並於民國 91 年公告應設置空氣污染物連續自動監測設施(Continuous Emission Monitoring Systems，簡稱 CEMS)之固定污染源，建立完整之煙氣監測體系。CEMS 系統實施多年來其測值已廣泛應用於空氣污染之管制及規劃，並作為徵收空污費之依據以及空氣品質惡化緊急應變時計算減量大小，成效顯著。

純就環境監測而言，國內外 CEMS 技術方面已累積有相當豐富的建置及操作經驗，然就國內外截至目前為止的運作經驗得知，CEMS 之耗費甚為龐大，一套完全符合標準之連續排放監測系統裝設費就高達十五至三十萬美元，在正式操作運轉前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、定期保養、故障檢修外，並須定期執行各種檢測，諸如相對準確度測試稽查(Relative Accuracy Test Audit, RATA)、相對準確度稽查(Relative Accuracy Audit, RAA)和標準氣體稽查(Cylindrical Gas Audit, CGA)等以確保測值之準確，對使用單位而言實是一筆不小的支出與工作負擔，因而促使業者轉而尋求其它較經濟較便利的替代監測技術。

自 1980 年初期即有針對某些排放情形穩定的污染源(如燃用天然氣之氣渦輪機組)運用燃燒原理或統計模式以預測其污染物排放情形之構想，並進行研發，此種監測技術通稱為預測型連續排放監測系統(Predictive Emission Monitoring System，簡稱

PEMS)，目前在美國、瑞典、澳洲和印度已有將 PEMS 應用於發電廠、紙廠、化工廠、天然氣輸送加壓站等之實例。

美國早在 1990 年公告修訂之清淨空氣法修正案(CAAA)已將 PEMS 納入，但在 1994 年以前 PEMS 系統因為無法準確地預測排放濃度，不易為環保主管機關所接受，嗣經有關單位多年的研發努力，截至目前為止，在美國已有超過 200 組以上的排放設備建置 PEMS 系統且已被環保主管機關所接受認可，頗具實用前景。

## 二、PEMS 煙氣排放模式

目前 PEMS 模式有二大類：first-principle modeling 及 statistical modeling。

### **First-Principle Models**

First-principle modeling 技術是運用熱力學、動力學及流體力學方程式來描述整個燃燒的物理及化學過程，以達到預測排放濃度的目的，此類模式主要是由一組代數或偏微分方程式來描述系統狀態，但此技術有以下的缺點：

1. 求解理論方程式，通常需要較長的時間，對於即時回饋系統可能不適用。
2. 比較 first-principle models 推估結果與硬體量測數據，發現其較不準確，因為每一種操作單元都有它們自己的特性，而此模式無法將所有製程的特性都考慮進來。
3. first-principle models 是一種非常困難的理論且其發展與維護的費用很高。
4. 針對某些複雜製程，如聚合、玻璃纖維、橡膠、食品、製藥及生化反應，無法寫出準確的 first-principle models，且大部份高價值的產品製程都沒有好的 first-principle models 可以適用。

## **Statistical Models**

Statistical modeling 技術是運用統計迴歸的方式來產生排放模式，統計模式又區分為線性迴歸模式及非線性迴歸模式，最簡易的線性迴歸模式是利用誤差最小二方法來預測排放濃度，線性迴歸模式可以模擬線性過程或非線性過程中的線性要件，然而大部分的排放設備所展現的是非線性的行為，因此大部份線性迴歸模式不如非線性迴歸模式準確。

根據國外經驗，若要以 first-principle 為基礎，建立精確完整的 PEMS 模式，其困難度頗高，必須將其考慮因子和條件簡化，否則無法快速和精確的解出方程式。因此，目前在美國 PEMS 模式的研究和商用軟體大多是採用以燃燒設備的各項操作參數、大氣條件和以往的排放測值進行統計迴歸，由眾多參數中得到對預測項目影響較大的幾個參數之經驗模式，有關以統計方式建立 PEMS 模式之原理可參考附錄 A。

## **New Approach to predict emissions**

最新的煙氣排放預測模式則是結合了 first-principle modeling 及 statistical modeling 兩種技術，此種最新的預測方法關鍵在於過去十年在非線性迴歸技術上有了突破性發展，目前學術上已發展相當成熟的多變數統計程序分析 (Multivariate Statistical Process Control, MSPC)，如以主成份分析方法 (Principal Component Analysis, PCA) 利用線性組合的方法將原先有線性關連的變數，轉換成彼此正交的新變數，以此消去變數之間的線性關係，進而監督變數之間的關連性，及利用部份最小平方法 (Partial Least Square, PLS) 事先建立操作變數及品質變數之間的預測模式，以模式的預測誤差判斷製程是否仍在預期的操作狀態，再與類神經網路技術 (Artificial Neural Network, ANN) 的整合應用，線上即時提供製程的異常偵測和預警，並模擬製程變數/



參數與排放的關係，進而確認排放污染物是否超過法規的限量，以提供操作人員儘早處理的先機。

PEMS 模式共有以下幾項優點：

1. PEMS 已經被美國環保署及許多地方環保單位所接受認可。
2. PEMS 初設成本約美金七萬至十二萬五千元，而 CEMS 則需美金十五萬至三十萬元左右。
3. PEMS 年操作維護成本約美金一萬至二萬元，而 CEMS 則需美金五萬至八萬元左右。
4. PEMS 已被證明具 CEMS 準確性。
5. Sensor Validation System 提供 PEMS 逐分 (minute-by-minute) 的品質保證檢核，且比 CEMS 有較佳之可靠度。
6. PEMS 可提供工廠操作過程中有價值的重要資訊，而 CEMS 僅能提供排放數據，同時 PEMS 可提供如何操作及最佳化製程以達到最大產能輸出、最小污染排放之重要資料。

許多業者不願使用 PEMS 究其原因是因為他們無法完全相信 PEMS 所具有之準確性，這是過去業界及環保主管機關所關切的，然而今日已有 200 組以上 PEMS 系統被建置及使用，故這項疑慮與缺失已不復存在。但 PEMS 有一缺點是在 PEMS 數據收集及認證過程中對製程操作之潛在衝擊，這些衝擊在 PEMS 系統規劃過程中就須慎重地考量，以避免對生產造成不利影響。

### 三、美國 PEMS 相關法規及案例

#### (一)美國 PEMS 相關法規整理

美國政府所訂定的環保法規一般是先由聯邦政府訂出一通用法案之後，各州政府或空氣品質管理區再依其所管轄地區的污染狀況訂定更嚴格的法規與標準。以下分別就其聯邦環保署與州環

保處或空氣品質管理局所訂定 PEMS 相關法規加以描述。

#### 1.美國聯邦 PEMS 相關法規

美國環保署目前所制定的 PEMS 相關法規主要是依據 1990 年清淨空氣法修正案 (Clean Air Act Amendment, CAAA) 的 section 114(a)(3) 和 section 504(b) 中的內容加以延伸。其中，section 114(a)(3) 提到環保主管機關可要求污染源對其排放單元加強進行監測，並提出符合各項規定的申報，且要求環保主管機關在 1990 年清淨空氣法修正公佈實施後的二年內必須對此條款提出具體的相關法規。至於 section 504(b) 則是授權環保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，但是只要有替代方法可提供即時且十分值得信賴的資訊，污染源並不一定要裝設及操作連續排放監測系統 (CEMS)。截至目前為止，美國聯邦政府尚未完成 PEMS 的單一法規，但是在許多法案中已納入 PEMS 的相關規定，如 Code of Federal Regulation Title 40: Environmental Protection, Chapter I-Environmental Protection Agency, 40CFR，其適用時機和場合分別如下區別：

- (1) 空氣品質維護改善計畫：40CFR51, 52
- (2) 污染控制設施的監督：40CFR64
- (3) 排放標準/排放量的管制：40CFR60, 75
- (4) 許可證管理 (Permits)：40CFR70, 71, 72
- (5) 總量管制/排放量交易：40CFR96, 97

上述諸多法案中，以 40CFR 60 (NSPS), 40CFR75 (CEMS) 與 PEMS 相關。因為在進行 PEMS 認證中所必須進行的相對準確度測試稽查 (Relative Accuracy Test Audits, RATA) 中所使用的各項性能規範 (Performance Specification, PS) 和參考方法 (Reference Methods, RM) 分別列在 40CFR60 的附錄 A 和 B 中，而品保/品管的規定則在 40CFR60 的附錄 F 中。至於 40CFR75

則是因應酸雨問題而特別針對發電業制定比 40CFR60 更嚴格的規定。

雖然 PEMS 的概念自 1980 年代初期即被提出，但是直到 1990 CAAA 將 PEMS 納入之後才開始蓬勃發展，由於法案執行初期許多產業界對 PEMS 的使用仍有許多疑慮，美國環保署本身對其各項細節的釐清也尚不清楚，因此美國環保署在 1997 年先針對工業加熱爐在 CEMS 中的替代方法中提出了使用 PEMS 時的規定，並比照 40CFR60 和 75 中所規定的性能規範 (Performance Specification) 提出了 PEMS 的性能規範樣本供各界參考，在累積近十年的執行經驗之後，美國環保署為了因應產業界、環保顧問公司和地方環保主管機關所提出的各項建議，因此其署內在 2001 年已著手草擬 PEMS 的性能規範 PS-16 (Procedure for Certifying Predictive Emission Monitoring Systems) 詳附錄 B，以使 PEMS 的執行更合情合理及更利於推動。其內容主要包括 PEMS 的使用範圍、性能規範摘要、所需要的設備、樣品收集、保存和傳送等規定、品質管制、數據的計算和分析和方法性能是否符合規定的判定標準。茲將重點摘要如下：

- (1) 污染源所安裝的 PEMS 在進行初次認證工作中應該執行相對準確度測試稽查 (RATA) 並檢查 PEMS 模式參數連接的感應器之準確性；當燃燒設施的環境或操作條件（例如更換燃料種類、燃燒器位置或角度調整、燃燒器型式更新）有所調整時，必須在 60 天內重新進行認證的工作。
- (2) 此次 PS-16 草案和以往所提出的參考性能規範最大的不同點在於，過去污染源在提出 PEMS 認證時必須採用的標準是最嚴格的 40CFR75，但是對大多數的污染源而言，40CFR75 過於嚴苛且其本身的狀況可能並不需要符合如此嚴厲的要

求，若一定要按照 40CFR75 的內容執行各項工作，則其工作負擔與成本必然使污染源業者打退堂鼓，轉頭回到使用傳統的 CEMS。因此為了順利推廣 PEMS 的執行和使用，此次 PS-16 草案中則針對不同狀況提出了三種方案：

- a. 第一種方案是當 PEMS 被用來作為控制設備操作維護情況的指標 (Indicators of Control Device Operation and Maintenance)時，其相對準確度測試(Relative Accuracy, RA)最少只需在低、中、高三種負載狀況下進行 9 組測試（每種負載狀況下各進行 3 組測試）。
- b. 第二種方案是當 PEMS 是被用作為污染源是否符合連續排放標準(Continual Compliance Standards)或用來取代已安裝的 CEMS 時，其 RA 最少只需在低、中、高三種負載狀況下進行 27 組測試（每種負載狀況下各進行 9 組測試）。另外，還需要計算數據的偏移(bias)、在低、中、高三種負載狀況下的 F-test 以及數據的相關性分析(correlation analysis)。
- c. 第三種也是最嚴苛的方案則是當 PEMS 被用在總量管制排放量交易市場中計算排放量(Market Trading Program)時，其各項工作則應依據 40CFR75 subpart E 的內容執行，該法規明訂應進行 720 組測試。

(3) 在 PEMS 所需設備方面則分別描述如后：

- a. 設計 PEMS 時的注意事項包括污染物或稀釋氣體預測模式應採用二個以上的輸入參數（若模式中的輸入參數少於三個時應先獲得主管機關的許可）參數操作範圍的限定、污染源特有的操作條件描述、大氣條件的蒐集以及闡明模式發展所採用的方式為熱力學定律、統計迴歸或類神經網路的原理。

- b. 在 PEMS 的設計中也必須納入檢查輸入參數感應器的運作正常性與否的功能，系統每天應至少一次以自動或人工的方式進行檢查感應器是否運作正常以及操作參數是否超出設計範圍等項目。
- (4) 在數據的蒐集、保存與傳送方面，此性能規範則列出相對準確度的測試步驟、如何選擇參考方法(Reference Method, RM)的適用編號和測量地點，測試完成後比較同一時段的 RM 值和 PEMS 數據，最後則規定檢測數量依不同情況而可分為 9 組以上、27 組以上或 40CFR75 的 720 組。
- (5) 在進行品質保證的步驟方面則比照 40CFR60 的附錄 F 步驟 1（與我國的「固定污染源空氣污染物連續自動監測設施品質保證作業規範」雷同）規定進行。由於 PEMS 並未採用硬體的監測儀器，因此並不需要以標準氣體進行查核(Cylinder Gas Audits, CGA)工作。
- (6) 在數據的計算與分析方面可分為二大類：
- a. 相對準確度的計算包括算術平均數(arithmetic mean)、標準偏差(standard deviation)、信賴係數(confidence coefficient)和相對準確度(relative accuracy)等項目。其中，PEMS 的相對準確度必須小於 20%（以 RM 數據的平均值為比較基準時）或小於 10%（以排放標準為比較基準時），二者之間的選擇標準則以較寬鬆的一方為原則。另外，當排放情形低於排放標準的 1/4 時，則 PEMS 的相對準確度一律以不超過排放標準的 20%為判定標準：
  - b. PEMS 是否符合法規標準的計算則包含了偏移測試(bias test)、F-test 和相關性分析(correlation analysis)。其中，如果算數平均值比信賴係數的絕對值大，則 PEMS 即不符合 bias test 的規定；如果由檢測數據所計算得到的 F 值比在

95%信賴區間的 critical F-value 大，則此 PEMS 即為不被認可的模式；此外，若由檢測數據所計算得到的相關係數  $r$  值小於 0.8，則此 PEMS 亦不被認可。

## 2. 美國地方 PEMS 相關法規

美國聯邦政府雖然已制定各項環保法案供各界遵循，但是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的法規。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 的使用提出增列或修訂條文，但是其內容大多數仍與聯邦環保署的規定相同；目前僅已知阿肯色州 (Arkansas)、奧克拉荷馬 (Oklahoma)、賓州 (Pennsylvania)、德州 (Texas) 和南加州空氣品質管理區 (SCAQMD) 提出了較不同的規定。

美國加州現行及草擬中的 PEMS 相關法規包括：

- (1) California Environmental Protection Agency, Air Resources Board 在 2001 年 4 月提出了一份 "Proposed Determination of Reasonably Available Control Technology and Best Available Retrofit Control Technology for Stationary Spark-Ignited Internal Combustion Engines" 的草案：
- (2) "SCAQMD rule 1135: Emissions of Oxides of Nitrogen from Electric Power Generating Systems";
- (3) "SCAQMD rule 2012: Requirement for Monitoring, Reporting, and Record-keeping for Oxides of Nitrogen Emissions";
- (4) "SCAQMD (RECLAIM) rule 218: Stack Monitoring";
- (5) "SCAQMD rule 301: Permit Fees";
- (6) "San Joaquin Valley Unified Air Pollution Control District rule 4354: Glass Melting Furnaces";
- (7) Mojave Desert AQMD rule 1159: Stationary Gas Turbines".

德州自然資源管理委員會在執行 PEMS 工作所依據的法規除了 40CFR75 的 Subpart E 之外，污染源業者或操作人員也可提出相當於 40CFR75 Subpart E 的替代方案，或者提出 40CFR75 Subpart E 的規定不適用於該污染源的證明，最後當然也可選擇遵守 Texas NO<sub>x</sub> RACT Approach，也就是 "TNRCC Regulation VII (30 TAC 117)-Control of Air Pollution From Nitrogen Compounds"。此法規規定在德州臭氧未達到空氣品質標準的區域(ozone nonattainment areas)內，到 2002 年以前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；在 2002 年及 2003 年之間，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。至於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。

## (二)美國 PEMS 案例介紹

### 1. NO<sub>x</sub> PEMS on a 221 MMBtu/hr Natural Gas Fired Boiler

Arkansas Eastman 公司於 1993 年 5 月根據 40CFR Part 60, Subpart D 規定，於此燃氣鍋爐建置一套先進型非線性 PEMS 系統，並於 1993 年 6 月通過 RATA 認證，此 PEMS 的初設成本祇有 CEMS 的三分之一，PEMS 與 CEMS 測試結果比較如圖一，即使在 fast dynamics regions 此 PEMS 模式仍能與監測之 NO<sub>x</sub> 排放數據密合，目前此系統已運作了 8-9 年，同時通過每一次的 RATA 測試，據 Arkansas Eastman 公司估計，建置此 PEMS 系統平均每年較設置 CEMS 硬體系統節省美金約二萬五千元的操作維護費用。

### 2. NO<sub>x</sub> and CO PEMS in a 100 MW Cogeneration Gas Turbine

德州 Freeport 的 Dow chemical 公司有一部 100MW 汽電共

生燃氣氣渦輪機組，此機組有 184 個程序變數，所建置之 PEMS 模式共使用 17 個重要參數輸入以決定 NO<sub>x</sub> 及 O<sub>2</sub> 的排放濃度，R<sup>2</sup> 值達 0.997，圖二為此 PEMS 預測值與 CEMS 監測數據比較，相對於相對準確度要求 RA < 20%，此 PEMS 在低、中、高三種負載狀況下，NO<sub>x</sub> 之 RATA 測試結果分別為 2%、3%及 4%。此外 Dow chemical 公司還有 15 部機組亦都裝置 PEMS 系統，且均獲良好執行成果，根據 Dow chemical 公司估計相對於建置 16 套 CEM 硬體設施，該公司所建置之 16 套 PEMS 系統在初設成本方面節省美金三百萬以上，年操作維護成本節省美金十五萬以上。

#### 四、PEMS 模式建置技術及軟硬體設備

整個 PEMS 的構想是透過監測鍋爐、氣渦輪機之類的燃燒設施操作參數，透過以熱力學或統計迴歸方式為基礎的數學模式，由電腦程式加以預測，因此 PEMS 的硬體組成包括：

1. 大氣環境參數感應器。
2. 燃燒機（鍋爐或氣渦輪機）控制參數感應器。
3. 安裝有預測軟體（以基本熱力學定律或統計迴歸為基礎）之電腦系統。
4. 數據紀錄器。

PEMS 建置之成敗端賴監測資訊系統之良窳，實際上 PEMS 本身即為一資訊系統，運作時與 CEMS 差異在於其並無真正之污染物監測儀器，但其它感應器（溫度、壓力、流量等）及後端之資料傳輸、顯示、紀錄系統仍然存在，若已有之 CEMS 欲轉為 PEMS，其監測系統許多部份仍可保留繼續運用。

與其它領域數學模式類似，PEMS 亦多運用統計分析方法推



估排放量，即蒐集各種燃燒機運轉參數及污染物長期排放資料，依其特性推導建立數學模式；但亦有運用燃燒學理論進行研發，即以燃燒時所產生之化學變化計算排放污染物濃度，將理論轉為數學公式。

目前 PEMS 模式主要有二大類，第一類是以熱力學為基礎所開發的 PEMS 模式，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；第二類則是以統計迴歸或類神經網路的方式所研發的 PEMS 模式，此類 PEMS 模式是目前大部分公司所採用的方式，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。

以統計迴歸為基礎所建立的 PEMS 模式，其建立方法是以燃燒設備的各項操作參數、大氣條件和以往的排放測值進行統計迴歸，由眾多參數中得到對預測項目影響較大的幾個參數之經驗模式。其步驟如下：

1. 由工廠資訊系統或網路平台蒐集製程操作的歷史記錄，並將其輸入軟體模式中，如圖三。
2. 透過數據前處理將錯誤異常數據剔除，並將不同來源尺度的數據加以整合。數據處理通常包括跳脫點移除、雜訊過濾、數據重建等。
3. 數據經過處理後，運用這些數據來建構 PEMS 軟體模式，主要的應用技術是多變數統計程序分析(MSPC)及類神經網路技術(ANN)。
4. 建構好的軟體模式需要經過訓練，並進行個別變數的測試，並可輸入較低靈敏度的變數以測試此軟體模式的靈敏度。此訓練、回憶、測試、預測、組態的過程即為監控確效(Sensor Validation)，如圖四。

5. 將 PEMS 模式安裝至廠內，並與 PEMS 程式感應器銜接到電腦系統所需要的介面，然後進行線上即時(Real time)測試。
6. 對已安裝好的 PEMS 設計 RTRA 檢測工作，委請一具認證資格的檢測公司進行檢測工作。
7. 所建置之 PEMS 系統通過 RATA 測試，則可向環保主管機關申請認證，若未能通過 RATA 測試，則必須重新進行模式建立和 RATA 測試步驟，直到通過環保主管機關要求的 PEMS RATA 為止。

## 五、品保品管制度

根據美國環保署 PEMS 性能規範 PS-16 草案，在 PEMS 初次認證測試前應具體提出一份品質保證計畫，以確認所建置之 PEMS 模式所得到的數據具有一定水準以上的品質。進行品保品管的步驟則是比照 40CFR60 的附錄 F 步驟 1 規定進行，此步驟與我國的「固定污染源空氣污染物連續監測設施品質保證作業規範」雷同，由於 PEMS 並未採用硬體的監測儀器，因此並不需要以標準氣體進行查核(Cylinder Gas Audit, CGA)工作。該性質規範相對準確度稽查(Relative Accuracy Audit, RAA)是指在污染源正常情況下的 3 種不同負載進行 3 組參考方法(Reference Method, RM)測試，而相對準確度測試稽查(Relative Accuracy Test Audit, RATA)則是指在污染源正常情況下的 3 種不同負載進行 9 組 RM 測試。

## 六、相對準確度測試

根據美國環保署性能規範 PS-16 草案，相對準確度(RA)是指 PEMS 輸出值和以參考方法所測得的數據比較之準確度。所謂 RA 是指在特定的測試組數下，PEMS 輸出結果和 RM 測試數據之間

的差值平均值加上 2.5%信賴係數，然後除以測試結果的平均值或排放標準。相對準確度步驟如下：

(一) 為了測知 PEMS 之相對準確度，必須針對污染源運轉範圍內三個不同負載下進行 RM 測試。分別在低中高三個負載下進行法規指定的 RM 測試組數。在測試期間，必須嘗試在適當範圍內調整那些會影響排放濃度或排放率的關鍵參數之大小。

1. 參考方法的測量位置：為 RM 挑選一個可被接受的採樣點，以確保偵測排放情形的結果具有代表性。確認該位置至少離最接近的擾流處（譬如控制設備、污染物產生點或其他污染物濃度或排放流率會改變的地點）在距離相當於煙囪直徑 2 倍以上的下游處以及煙囪直徑 0.5 倍以上的上游處。只要你同時符合下列幾個條件，你可以使用煙囪直徑 0.5 倍以上的下游處取代煙囪直徑 2 倍以上的下游處之規定：污染物濃度改變的原因只是由稀釋氣體的洩漏所引起的，譬如從空氣加熱器發生漏氣的情形。測量時必須在相同位置同時測量氣態污染物和稀釋氣體。

2. 採樣點(Traverse Points)：挑選適當的採樣點以確保所採得的樣本具有代表性。每隔 3 公分以內即設立一個採樣點並進行 RM 測試，但不可以在離煙囪或煙道 3 公分以內的位置設立採樣點。最少需要幾個採樣點則必須依下列情況而定：

(1) 建立一通過煙囪中心點以及在任何 expected stratification 的方向上的採樣測量線。

(2) 在煙囪內徑同一線上的 16.7%、50.0%和 83.3%處設立最少三個採樣點。

(3) 如果煙囪內徑大於 2.4 公尺，可以選擇同一線上離煙囪或煙道管壁算起的 0.4、1.2 和 2.0 公尺處為三個採樣點。不可以在濕式洗滌塔或有二股不同污染物濃度氣流混合處之後的地點依照此選項設立採樣點。

3. 參考方法：除非另有其他特別指定適用的法規，你必須使用 40CFR60 附錄 A 中所指定的測試方法進行 RM 測試。
4. RM 和 PEMS 數據的相關性：在 PEMS 輸出結果的永久紀錄中標記每一組 RM 測試開始和結束的細節（包括當天確實的時間），依照下列步驟把相對應的時間和時段之 PEMS 輸出結果與 RM 測試數據建立其關連性，測量 PEMS 和其相對應時間的 RM 測試值的整體污染物濃度。

如果重要，也要考慮系統的回應時間(response time)並確認該組數據是在相同的溼度、溫度和稀釋氣體濃度基準下進行。

比較每一 PEMS 平均值和其相對應的 RM 平均值。依據下列各項指導準則(guidelines)進行比對。

如果	然後	再然後
RM 有儀器或非儀器 整體採樣技巧 (integrated sample technique)	直接比較 RM 和 PEMS 之結果。	
RM 有單點採樣技巧 (grab sample technique)	將測試期間所有單點採 樣樣本的結果加以平 均。測試組數必須包括 3 組個別的單點測量。	比較在測試期間的 RM 平均值和 PEMS 輸出結果。

5. 用於污染控制設備之操作與維護監測的 PEMS 所需之參考方法  
測試組數：

在下列不同負載下進行至少 9 組的 RM 測試。

3 組在低負載下進行。

3 組在中負載（一般正常操作範圍）下進行。

3 組在高負載下進行。

亦可以選擇執行 9 組以上的 RM 測試。如果執行 9 組以上的測試，最多可以排除 3 組測試結果，只要用來決定是否符合 RA 規定的總測試組數必須大於或等於 9 組，而且每個負載下至少要有 3 組測試。同時所有的測試結果均須申報，包括那些被排除在計算結果內的測試數據。

6. 用於監測排氣狀況是否連續合格的 PEMS 所需之參考方法測試組數：

在下列不同負載下進行至少 27 組的 RM 測試。

9 組在低負載下進行。

9 組在中負載（一般正常操作範圍）下進行。

9 組在高負載下進行。

亦可以選擇執行 27 組以上的 RM 測試。如果執行 27 組以上的測試，最多可以排除 3 組測試結果，只要用來決定是否符合 RA 規定的總測試組數必須大於或等於 27 組，而且每個負載下至少要有 9 組測試。同時所有的測試結果均須申報，包括那些被排除在計算結果內的測試數據。

7. 用於總量管制排放量交易市場的 PEMS 所需之參考方法測試組數：按照 40CFR75 Subpart E 的規定。

(二)數據的計算與分析方面可分為二大類：

1. 相對準確度的計算包括算術平均數(arithmetic mean)、標準偏差(standard deviation)、信賴係數(confidence coefficient)和相對準確度(relative accuracy)等項目。其中，PEMS 的相對準確度必須小於 20%(以 RM 數據的平均值為比較基準時)或小於 10%(以排放標準為比較基準時)，二者之間的選擇標準則以較寬鬆的一方為原則。另外當排放情形低於排放標準的 1/4 時，則 PEMS 的相對準確度一律以不超過排放標準的 20%為判定標準；
2. PEMS 是否符合法規標準的計算則包含了偏移測試(bias test)、

F-test 和相關性分析(correlation analysis)。其中，如果算數平均值比信賴係數的絕對值大，則 PEMS 即不符合 bias test 的規定；如果由檢測數據所計算得到的 F 值比在 95% 信賴區間(confidence level)的 critical F-value 大，則此 PEMS 即為不被認可的模式；另外，如果由檢測數據所計算得到的相關係數 r 值小於 0.8，則此 PEMS 模式亦不被認可。

## 肆、感想與建議

1. 根據美國經驗，1994 年以前業者對 PEMS 系統並不大感興趣，因為其預測準度較差，近年來，由於統計迴歸技術的突破，並結合人工智慧類神經網路及資訊、通訊等科技，使得 PEMS 模式預測準確性大大提高，截至目前為止，已有超過 200 部以上的排放設備建置 PEMS 系統，且均已獲得環保主管機關認證，實用遠景可期。
2. 就目前國內外運轉經驗，CEMS 系統耗費甚為龐大，就初設成本而言，機組建置 PEMS 系統祇需 CEMS 系統一半費用左右，約可節省美金十萬元，另每年操作維護成本方面，PEMS 系統亦可較 CEMS 系統節省好幾萬美金，採用 PEMS 系統可節省大量的監測費用，降低電廠營運成本。
3. 本公司自民國 88 年起即已開始進行 PEMS 之建置技術研發計畫，並以南部及興達電廠複循環機組作研究測試，俾建立 PEMS 模式，累積實測數據與經驗。目前我國 PEMS 尚無明確適用之法規，雖然各種標準方法及管理規範原應由環保主管機關研擬公佈，嗣由業者遵循；惟此一 PEMS 技術具有節省人力及經費特性，在實際應用上，本公司南部電廠及興達電廠分別有四部及五部德製西門子同型燃氣複循環機組，通霄電廠有六部燃氣複循環機組，未來大潭電廠亦可能有六至十二部同一型號之燃氣複循環機組，若能經過立法以 PEMS 系統替代 CEMS 系統，則可為公司省下大筆可觀的監測設施設置成本及運維成本，因此本公司當不待環保主管機關頒布 PEMS 相關規定，持續進行技術研發，參酌國內外經驗，逐步建立 PEMS 標準監測、品保品管及驗證程序，並將成果提供環保主管機關作為制定法規參考，促其儘速修法頒布實施。

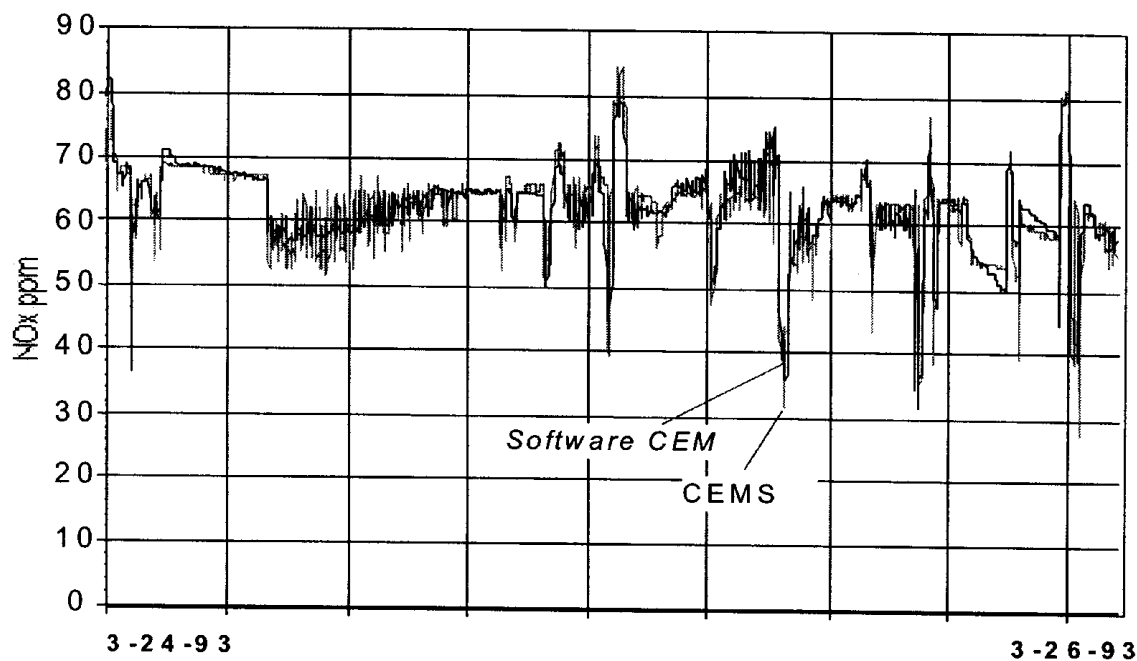


Figure 1. Comparison of *Software CEM* to a CEM on a boiler at Arkansas Eastman

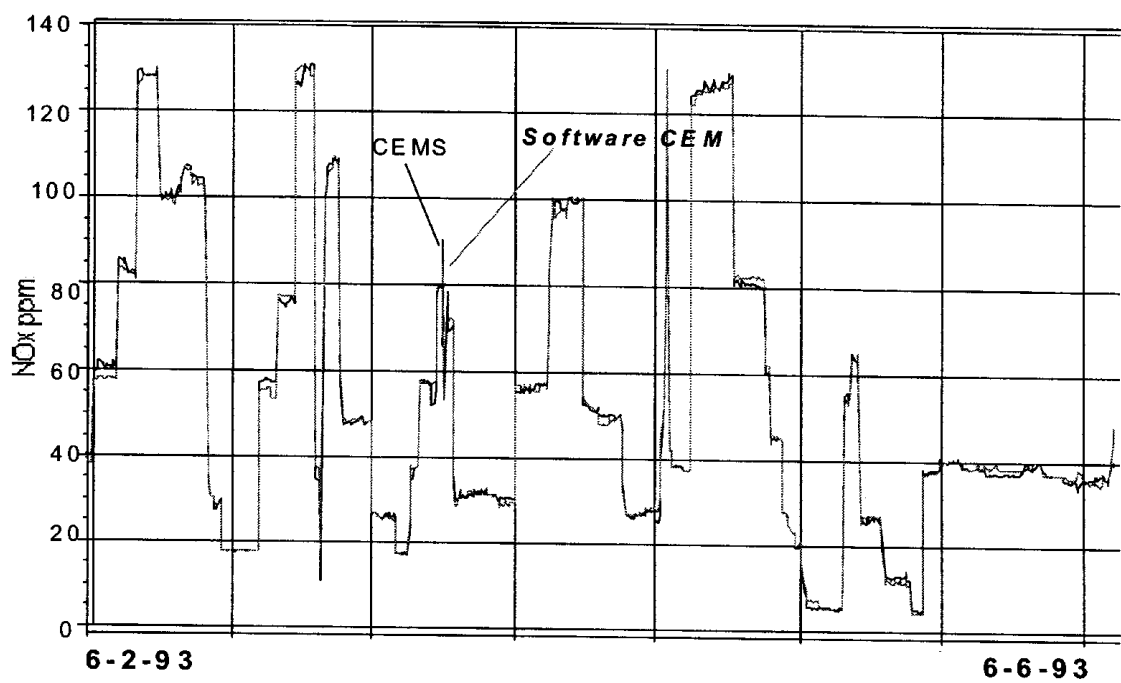


Figure2. NO<sub>x</sub> Emissions from a 100 MW turbine at Dow Chemical in Freeport, Texas



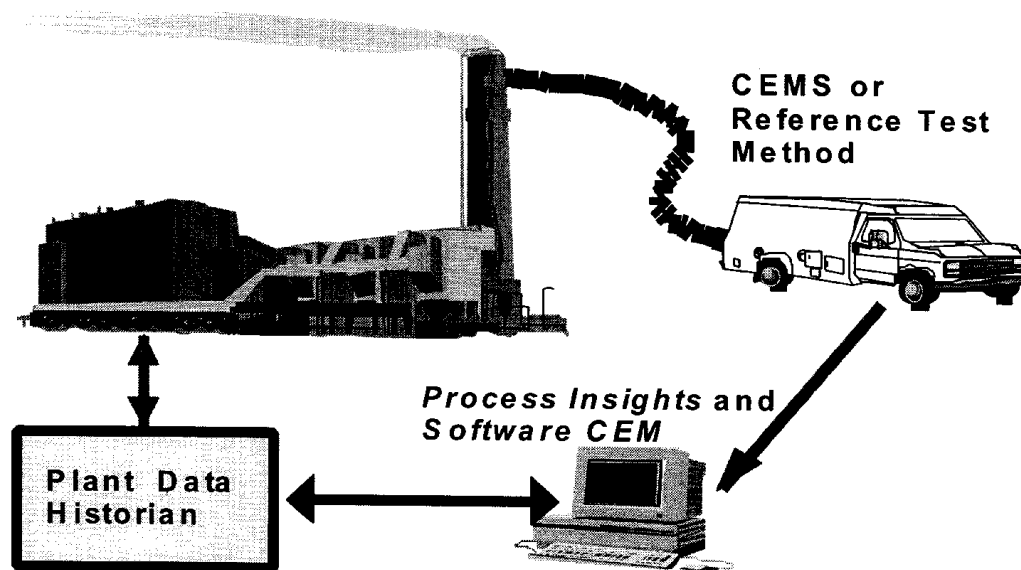


Figure 3. Process and emissions data are collected simultaneously from the process data historian and by a hardware CEMS or a reference test method monitoring van. The *Software CEM* is built with *Process Insights* by correlating these two sets of data. The *Software CEM* is installed on the plant computer and runs real-time, continuously.

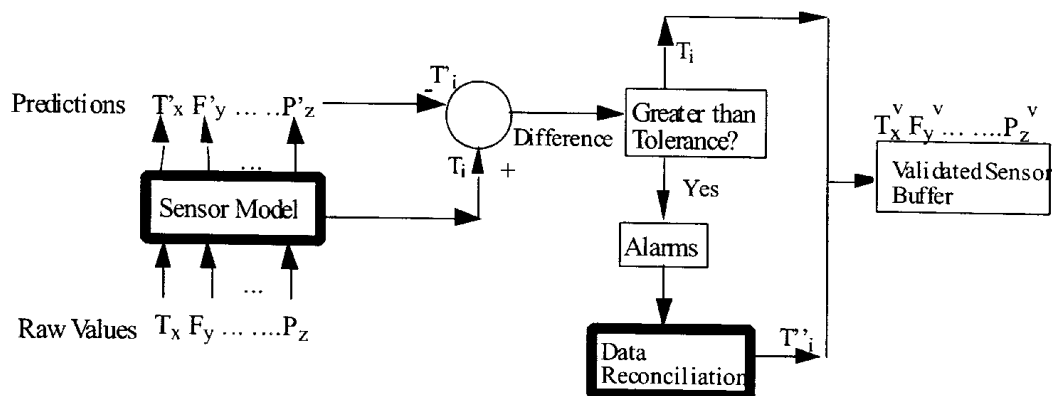


Figure4. Flow diagram for a typical Sensor Validation System

圖一 圖四資料來源：Wesley J. Box & Paul Reinermann, III, Predictive Emission Monitoring system - An alternative to hardware analyzers for continuous monitoring, Pavilion Boulevard, Austin, Texas.

## 附錄 A 以統計方法建立 PEMS 模式之原理

若有 p 個獨立變數

$$\hat{y}_j = b_0 + b_1x_{1j} + b_2x_{2j} + \dots + b_px_{pj}$$

$\hat{y}_j$  : 表示欲預測之變數

$b_i$  : 各個獨立變數之係數

$x_{ij}$  : 表示與  $\hat{y}_j$  有關聯之獨立變數

$$b_0 = \bar{y} - b_1\bar{x}_1 - b_2\bar{x}_2 - b_3\bar{x}_3 - \dots - b_p\bar{x}_p$$

$\bar{y}$  : 為  $\hat{y}_j$  之平均數

$\bar{x}_i$  : 為  $x_{ij}$  之平均數

複迴歸平方和，SSR

$$SSR = \sum (\hat{y}_j - \bar{y})^2$$

剩餘平方和，SSE

$$SSE = \sum e^2$$

$$= \sum (y_j - \hat{y}_j)^2$$

$$= \sum \left\{ y_j - \left[ (\bar{y} - b_1\bar{x}_1 - b_2\bar{x}_2 - \dots - b_p\bar{x}_p) + b_1x_{1j} + b_2x_{2j} + \dots + b_px_{pj} \right] \right\}^2$$

$$= \sum \left[ (y_j - \bar{y}) - b_1(x_{1j} - \bar{x}_1) - b_2(x_{2j} - \bar{x}_2) - \dots - b_p(x_{pj} - \bar{x}_p) \right]^2$$

$$= \sum \left[ y_j - b_1x_{1j} - b_2x_{2j} - b_3x_{3j} - \dots - b_px_{pj} \right]^2$$

對  $b_i$  偏微上式

$$b_1\sum x_1^2 + b_2\sum x_1x_2 + b_3\sum x_1x_3 + \dots + b_p\sum x_1x_p = \sum x_1y$$

$$b_1\sum x_1x_2 + b_2\sum x_2^2 + b_3\sum x_2x_3 + \dots + b_p\sum x_2x_p = \sum x_2y$$

$$b_1\sum x_1x_p + b_2\sum x_2x_p + b_3\sum x_3x_p + \dots + b_p\sum x_p^2 = \sum x_py$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma x_1^2 + \Sigma x_1 x_2 + \dots + \Sigma x_1 x_p \\ \Sigma x_1 x_2 + \Sigma x_2^2 + \dots + \Sigma x_2 y \\ \vdots \\ \vdots \\ \Sigma x_1 x_p + \Sigma x_2 x_p + \dots + \Sigma x_p^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma x_1 y \\ \Sigma x_2 y \\ \vdots \\ \vdots \\ \Sigma x_p y \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow A \times B = G$$

$$A^{-1} \times G = B$$

A：表示 x 變數之矩陣

B：表示 b 係數之矩陣

G：表示 xy 變數之矩陣

測試複迴歸之顯著性，F value

$$\begin{aligned} F &= \frac{\Sigma(\hat{y} - \bar{y})^2 / p}{\Sigma(y - \hat{y})^2 / n - p - 1} \\ &= \frac{SSR / p}{SSE / (n - p - 1)} \quad v_1 = p, v_2 = n - p - 1 \quad (v_1, v_2 \text{ 表示自由度}) \\ &= \frac{SSR / p}{SSE / (n - p - 1)} \end{aligned}$$

## 附錄 B 美國環保署 PEMS 性能規範 PS-16 草案

# PERFORMANCE SPECIFICATION 16 PROCEDURES FOR CERTIFYING PREDICTIVE EMISSION MONITORING SYSTEMS

### 1.0 *Scope and Application*

1.1 **Applicability.** You, the source owner or operator, must use this performance specification (PS) to determine if your predictive emission monitoring system (PEMS) has acceptable initial performance. Conduct this evaluation after you install the PEMS or at other times if instructed to do so by an applicable regulation. If your PEMS contains a diluent (O<sub>2</sub> or CO<sub>2</sub>) measuring component, this must be tested as well.

1.1.1 **Initial Evaluation of an Installed PEMS.** We, the regulators, require that a relative accuracy (RA) and other potential tests be passed before your PEMS is acceptable for use. A continuing sensor evaluation procedure must also be in place to certify your PEMS. The amount of testing and data validation required depends upon the regulatory requirements of your PEMS. Performance criteria is more rigorous when your PEMS is used to determine continual compliance with an emission limit than when your PEMS is used as an indicator of control device operation and maintenance. If your PEMS will be used in an emission marketing program, the performance specifications in Subpart E of 40 CFR Part 75 must be followed. In most cases, we require additional periodic checks of PEMS performance to ensure the long-term quality of data. These periodic checks are listed in Procedure 1 of Appendix F of 40 CFR Part 60. If warranted, we may require that you repeat these periodic performance evaluations at times other than scheduled. You are always responsible for validating, maintaining, and operating your PEMS properly.

1.1.2 **Reevaluating the PEMS After a Change in Operations or Critical PEMS Component.** You must repeat the relative accuracy (RA) test when you change the operating range of your emissions unit beyond that evaluated in the initial test. For example, if you initially operated the emissions unit at 80-100 percent of its range, you would have performed the initial test under these conditions. Later, if you wanted to operate the emission unit at 50-100 percent of its range, you must conduct another RA test under these new conditions. You must

conduct the second RA test within 60 days of changing operations. The test must demonstrate that your PEMS provides acceptable data when operating in the new range. This requirement also applies when you change a critical PEMS parameter.

## *2.0 Summary of Performance Specification.*

In addition to equipment and measurement location requirements, the following performance evaluations are required.

### **2.1 PEMS Used as Indicators of Control Device Operation and Maintenance.**

**2.1.1** A minimum 9-run, 3-level (3 runs at each level) RA test must be performed.

### **2.2 PEMS Used for Continual Compliance Standards or to Replace an Installed Continuous Emission Measurement System.**

**2.2.1** A minimum 27-run, 3-level (9 runs at each level) RA test must be performed.

**2.2.2** Bias test of data.

**2.2.3** F-test of data at each level.

**2.2.4** Correlation analysis of data.

**2.3 PEMS Used in a Market Trading Program.** Same as 40 CFR 75, Appendix E.

## *3.0 Definitions.*

The following definitions apply to this PS.

**3.1 Centroidal Area** means that area in the center of the stack (or duct) composing no more than 1 percent of the stack cross-sectional area and having the same geometric shape as the stack.

**3.2 PEMS** means the total equipment required to predict an emission concentration or emission rate. The system may consist of any of the following major subsystems: sensors and sensor interfaces, emission model, diluent emission model, data recorder, and sensor evaluation system.

**3.3 Sensors and Sensor Interface** means the equipment that measures the process

input signals and transports them to the emission prediction system.

3.4 *Emission Prediction System* means the model, algorithm, or equation that uses process data to generate an output that is proportional to the emission concentration or emission rate. Potential systems that employ only 1 or 2 variables may not be acceptable as PEMS. Use of such systems is subject to the Administrator's approval on a case-by-case basis. The emission prediction system may or may not generate emissions data corrected for a specific diluent (e.g., O<sub>2</sub> or CO<sub>2</sub>).

3.5 *Diluent Emission Prediction System* means the prediction system or equipment that uses process data to generate an output proportional to the diluent gas concentration.

3.6 *Data Recorder* means the equipment that provides a permanent record of the PEMS output. The data recorder may include automatic data reduction capabilities and may include electronic data records, paper records, or a combination of electronic data and paper records.

3.7 *Sensor Validation System* means the equipment used by some PEMS to periodically assess the quality of sensor input data. In most cases, the sensor validation system is a submodel that periodically cross-checks sensor inputs against other inputs and known relationships. Some sensor validation systems generate and use substitute sensor inputs (reconciled inputs) when it deems a particular sensor has failed.

3.8 *Reconciled Process Data* means substitution sensor data that is generated by a sensor validation system to replace the input data from a sensor that has failed.

3.8 *Reference Value* means a PEMS baseline value established by reference method (RM) testing under conditions when all sensors are functioning properly.

3.9 *Relative Accuracy* means the accuracy of the PEMS when compared to a reference method at the source. The RA is the average difference between the PEMS and RM data for a specified number of runs plus a 2.5 percent confidence coefficient, divided by the average of the RM tests or the emission standard.

3.10 *Defective sensor* means a sensor that is responsible for PEMS malfunction or that operates outside the approved operating envelope.

3.11 *Operating envelope* means the defined range of a parameter input that is established during PEMS development.

4.0 *Interferences.* [Reserved]

5.0 *Safety.* [Reserved]

6.0 *Equipment and Supplies.*

6.1 *PEMS Design.* You must define and detail the design of your PEMS. You must also establish the following as applicable.

6.1.1 *Number of Input Parameters.* Acceptable PEMS normally employ more than two input parameters or variables. You must obtain permission to use a PEMS having less than three input variables.

6.1.2 *Parameter Operating Envelopes.* You must specify the input parameters you select to operate your PEMS and define their operating envelopes before you conduct the RA test. Subsequent to the RA test, the PEMS must be operated within these envelopes at all times for the system to be acceptable. You must verify through documentation against RM (or reference standards) the integrity of your PEMS over these parameter envelopes before the RA test is conducted. If this condition is not met, the PEMS operation will be limited to the range of parameter inputs encountered during the RA test.

6.1.3 *Source-Specific Operating Conditions.* Identify any source-specific operating conditions, such as fuel type, that your PEMS will be specifically certified for. Your approval to use the PEMS will be limited to the specific unit and fuel type for which validation testing was conducted.

6.1.4 *Ambient Conditions.* Explain whether and how ambient conditions and seasonal changes will affect your PEMS.

6.1.5 *PEMS Based on Physical Principles.* If your PEMS is developed on the basis of physical principles, you must identify the specific physical assumptions or mathematical manipulations that justify its suitability. If your PEMS is developed on the basis of linear or nonlinear regression analysis, you must make available the paired data used to develop or train the model.

6.2 *Data Recorder Scale.* If you are not using a digital recorder, you must choose a recorder scale that accurately captures the desired range of potential emissions. The lower limit of your data recorder's range must be no greater than 20 percent of the emission standard that applies to your emission unit. The upper limit of your data recorder's range must be determined following the table immediately below. If you obtain our approval, you may use other lower and upper recorder limits.

If PEMS is measuring...	And if...	Then your upper limit...
Uncontrolled emissions, such as NO <sub>x</sub> at the stack of a natural gas-fired boiler	No regulation says otherwise	Must be 1.25 to 2 times the average potential emission level
Uncontrolled emissions, such as NO <sub>x</sub> at the stack of a natural gas-fired boiler	A regulation says otherwise	Must follow the other regulation
Controlled emissions		Must be 1.5 to 2.0 times concentration of the emission standard that applies to your emission unit
Continual compliance emissions for an applicable regulation		Must be 1.1 to 1.5 times the concentration of the emission standard that applies to your emission unit

6.3 Defective Sensor Detection. Your PEMS design must allow for automatic or manual determination of defective sensors at least daily. This evaluation may be conducted through a sensor validation system, comparison of redundant sensors, a spot check of sensor input readings at a reference value, operation, or emission level, or other procedure that detects faulty or failed sensors. You must also incorporate a system to detect when parameter envelopes are exceeded.

7.0 *Reagents and Standards.* [Reserved]

8.0 *Sample Collection, Preservation, Storage, and Transport.*

8.1 Sensor Location and Repair. We recommend you install sensors at an accessible location in order to perform repairs and replacements. Permanently installed platforms or ladders are not required. Sensors may even be located in an area which would require you to shut the emissions unit down to repair or replace a sensor. If necessary after repairing or replacing a sensor, you must



correct the process data to match the data obtained from the originally tested sensor or conduct another RA test.

8.2 Relative Accuracy Procedure. To determine the RA of your PEMS, you must conduct RM tests at three operating levels of your unit's range. Conduct the specified number of RM tests at the low, normal, and high operating levels. During these tests, you must attempt to vary the key parameters that affect the emission concentration or emission rate over their operating envelopes.

8.2.1 Reference Method Measurement Location. Select an accessible measurement point for the RM that will ensure that you measure emissions representatively. Ensure the location is at least two equivalent stack diameters downstream and a half equivalent diameter upstream from the nearest flow disturber such as the control device, place of pollutant generation, or other place where the pollutant concentration or emission rate can change. You may use a half diameter downstream instead of the two diameters if you meet both of the following conditions:

Changes in the pollutant concentration are caused solely by diluent leakage, such as leaks from air heaters.

You measure pollutants and diluents simultaneously at the same location.

8.2.2 Traverse Points. Select traverse points that ensure you obtain representative samples. Conduct all RM tests within 3 cm of each selected traverse point but no closer than 3 cm to the stack or duct wall. The minimum requirements for selecting traverse points are as follows:

(a) Establish a measurement line across the stack that passes through the center and in the direction of any expected stratification.

(b) Locate a minimum of three traverse points on the line at 16.7, 50.0, and 83.3 percent of the stack inside diameter.

(c) If the stack inside diameter is greater than 2.4 meters, you may locate the three traverse points on the line at 0.4, 1.2, and 2.0 meters from the stack or duct wall. You cannot use this option after wet scrubbers or at points where two streams with different pollutant concentrations are combined.

(d) You may select other traverse points if you can show they provide a representative sample.

If you desire to test at only one traverse point, use the following procedure or other information to show that the single point yields representative results.

- (a) Use Method 1 to establish the number and location of traverse points that are normally used to sample the stack or duct.
- (b) Following the RM procedures, measure emissions at each traverse point for a period of two minutes plus twice the response time of the RM.
- (c) Determine the average of the emissions from all traverse points.
- (d) Choose the traverse point with emissions closest to the average emissions from all points as the sampling location for the RM tests.
- (e) You may select a different traverse point if you can show us that it provides a representative sample.

8.2.3 Reference Methods. Unless otherwise specified in the applicable regulations, you must use the test methods in Appendix A of this part for the RM test.

8.2.4 Correlation of RM and PEMS Data. Mark the beginning and end of each RM test run (including the exact time of day) on the permanent record of PEMS output. Correlate the PEMS and the RM test data as to the time and duration using the following steps.

Determine the integrated pollutant concentration for the PEMS for each corresponding RM test period.

Consider system response time, if important, and confirm that the pair of results are on a consistent moisture, temperature, and diluent concentration basis.

Compare each average PEMS value to the corresponding average RM value. Use the following guidelines to make these comparisons.

If...	Then...	And then...
The RM has an instrumental or integrated non-instrumental sampling technique	Directly compare RM and PEMS results.	
The RM has a grab sampling technique	Average the results from all grab samples taken during the test run. The test run must include 3 separate grab measurements.	Compare this average RM result with the PEMS result obtained during the run.

8.2.5 Number of Reference Method Tests for Operation and Maintenance PEMS. Conduct at least nine sets of RM tests at the following unit operating levels.

✓ Three at a low level.

✓ Three at the normal level.

✓ Three at a high level.

You may choose to perform more than nine RM tests. If you perform more than nine tests, you may reject a maximum of three tests as long as the total number of test results used to determine the relative accuracy is greater than or equal to nine and each operating level has at least three tests. You must report all data, including the rejected data.

8.2.6 Number of Reference Method Tests for Continual Compliance PEMS. Conduct at least 27 RM tests at the following unit operating levels.

Nine at a low level.

Nine at the normal operating level.

Nine at a high level.

You may choose to perform more than 27 RM tests. If you perform more than 27 tests, you may reject a maximum of three tests as long as the total number of tests used to determine the RA is greater than or equal to 27 and each operating level has at least nine tests. You must report all data, including the rejected data.

8.4.5 Number of Reference Method Tests for Market Trading PEMS. Follow the requirements of Subpart E in 40 CFR Part 75.

8.5.5 Reporting. Summarize in tabular form the results of the RA test. Include all data sheets, calculations, and charts (records of PEMS responses) necessary to verify your PEMS's meeting the performance specifications. Include in the report the documentation used to establish your PEMS parameter envelopes. Consult the EPA regional office or permitting authority with jurisdiction over your emissions unit for additional requirements.

9.0 *Quality Control.* You should incorporate a quality assurance plan beyond the initial PEMS validation test to verify the your system is generating quality data. For compliance PEMS, the provisions of Procedure 1 of Appendix F, 40 CFR Part 60, or similar procedures, must be performed. Under Procedure 1, the quarterly option for cylinder gas audits is not applicable. For this PS, the relative accuracy audit (RAA) is a 3-run RM test at the normal unit operating level, and a relative accuracy test audit (RATA) is a 9-run, 3-level RM test.

10.0 *Calibration and Standardization.* [Reserved]

11.0 *Analytical Procedure.* [Reserved]

12.0 *Calculations and Data Analysis.*

12.1 Nomenclature.

B = PEMS bias adjustment factor.

cc = Confidence coefficient.

$d_i$  = Difference between each RM and PEMS run.

$\bar{d}$  = Arithmetic mean of differences for all runs.

$e_i$  = Individual measurement provided by the PEMS or RM at a particular level.

$e_m$  = Mean of the PEMS or RM measurements at a particular level.

$e_p$  = Individual measurement provided by the PEMS.

$e_v$  = Individual measurement provided by the RM.

F = Calculated F-value.

n = Number of RM runs.

PEMS<sub>i</sub> = Individual measurement provided by the PEMS.

PEMS<sub>iAdjusted</sub> = Individual measurement provided by the PEMS adjusted for bias.

$\overline{\text{PEMS}}$  = Mean of the values provided by the PEMS during the failed bias test.

r = Coefficient of correlation.

RA = Relative accuracy.

$\overline{\text{RM}}$  = Average RM value. In cases where the average emissions for the test are less than 50 percent of the applicable standard, substitute the emission standard value here in place of the average RM value.

S<sub>d</sub> = Standard deviation of differences.

S<sup>2</sup> = Variance of your PEMS or RM.

t<sub>0.025</sub> = t-value for a one-sided, 97.5 percent confidence interval (see Table 16-1).

12.2 Relative Accuracy Calculations. Calculate the mean of the RM values. Calculate the differences between the pairs of observations from the RM and the PEMS output sets. Finally, calculate the mean of the differences, standard deviation, confidence coefficient, and PEMS relative accuracy, using Equations 16-1, 16-2, 16-3, and 16-4, respectively.

12.2.1 Arithmetic mean. Calculate the arithmetic mean of the differences between paired RM and PEMS observations using Equation 16-1.

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad \text{Eq. 16-1}$$

12.2.2 Standard Deviation. Calculate the standard deviation of the differences using Equation 16-2 (positive square root).

$$S_d = \left( \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n d_i \right)^2}{n}}{n-1} \right)^{1/2} \quad \text{Eq. 16-2}$$

12.2.3 Confidence Coefficient. Calculate the confidence coefficient using Equation 16-3 and Table 16-1.

$$cc = t_{0.025} \frac{S_d}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq. 16-3}$$

12.2.4 Relative Accuracy. Calculate the relative accuracy of your data using Equation 16-4.

$$RA = \frac{|d| + |cc|}{RM} \times 100 \quad \text{Eq. 16-4}$$

12.3 Compliance PEMS Tests. If your PEMS will be used for continual compliance purposes, or if you are replacing a CEMS with a PEMS, conduct the following tests.

12.3.1 Bias Test. Conduct a bias test to determine if your PEMS is biased relative to the RM. Determine the PEMS bias by comparing the confidence coefficient obtained from Equation 16-3 to the arithmetic mean of the differences determined in Equation 16-1. If the arithmetic mean ( $\bar{d}$ ) is greater than the absolute value of the confidence coefficient ( $cc$ ), the PEMS has failed to meet the bias test requirement. If the PEMS fails to meet the bias test requirement, adjust the future values obtained from the PEMS using Equation 16-5.

$$PEMS_{i\text{Adjusted}} = PEMS_i \times B \quad \text{Eq. 16-5}$$

Where:

$$B = 1 + \frac{|\bar{d}|}{PEMS} \quad \text{Eq. 16-6}$$

12.3.2 F-test. Conduct an F-test for each of the RA data sets collected at the three different operating levels. The F-test will determine if the sample variances of the PEMS and RM differ more than might be expected on the basis of chance. Calculate the variance of the PEMS and the RM using Equation

16-7.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - e_{\pi})^2}{n-1} \quad \text{Eq. 16-7}$$

Determine if the variance of the PEMS is significantly different from that of the RM by calculating the F-value using Equation 16-8.

$$F = \frac{S_{PEMS}^2}{S_{RM}^2} \quad \text{Eq. 16-8}$$

Compare the calculated F-value with the critical value of F at the 95 percent confidence level with n-1 degrees of freedom. The critical value is obtained from a table for F-distribution. If the calculated F-value is greater than the critical value, the proposed PEMS is unacceptable.

12.3.3 Correlation Analysis. Calculate the correlation coefficient either manually using Eq. 16-9, on a graph, or by computer using all of the paired data points. The PEMS correlation must be 0.8 or better for your PEMS to be acceptable.

$$r = \frac{\sum e_p e_v - \frac{(\sum e_p)(\sum e_v)}{n}}{\left[ \left( \left( \sum e_p^2 \right) - \frac{(\sum e_p)^2}{n} \right) \left( \left( \sum e_v^2 \right) - \frac{(\sum e_v)^2}{n} \right) \right]^{1/2}} \quad \text{Eq. 16-9}$$

### 13.0 Method Performance.

13.1 PEMS Relative Accuracy. The RA of the PEMS must be no greater than 20 percent when based upon the average RM data (which must be measured in the units of your emission standard), or 10 percent when based upon the emission standard, whichever is less stringent. For emissions below 1/4 of the emission standard, 20 percent RA based upon the emission standard may be used.

13.2 PEMS Bias. If the arithmetic mean ( $\bar{d}$ ) is greater than the absolute value of the confidence coefficient (cc), the PEMS has failed to meet the bias test requirement and a bias adjustment must be made to the PEMS data.

13.3 PEMS Variance. If the calculated F-value is greater than the critical F-value at the 95-percent confidence level, your PEMS is unacceptable.

13.4 PEMS Correlation. If the calculated r-value is less than 0.8, your PEMS is unacceptable.

14.0 Pollution Prevention. [Reserved]

15.0 Waste Management. [Reserved]

16.0 References. [Reserved]

17.0 Tables, Diagrams, Flowcharts, and Validation Data.

Table 16-1. t-Values for One-sided, 97.5 Percent Confidence Intervals for Selected Sample Sizes†

n-1	t <sub>0.025</sub>	n-1	t <sub>0.025</sub>
1	12.706	15	2.131
2	4.303	16	2.120
3	3.182	17	2.110
4	2.776	18	2.101
5	2.571	19	2.093
6	2.447	20	2.086
7	2.365	21	2.080
8	2.306	22	2.074
9	2.262	23	2.069
10	2.228	24	2.064
11	2.201	25	2.060
12	2.179	26	2.056
13	2.160	27	2.052
14	2.145	> 27	t-Table

† Use n equal to the number of data points (n-1 equals the degrees of freedom).