



經濟部能源科技研究發展計畫

一一二年度第二季知識物件

空調機系統識別研析

中華民國112年6月



目錄

第一章 前言	2
第二章 系統識別簡介	2
第三章 系統識別實驗案例	6
第四章 結論	6
參考文獻	12

圖目錄

圖 1. 系統識別	3
圖 2. 壓縮機與膨脹閥開度數據擷取	7
圖 3. 蒸發器溫度與過熱度數據擷取與識別準備	7
圖 4. 室內溫度數據擷取與識別準備	8
圖 5. 壓縮機與膨脹閥開度數據擷取(一對二)	9
圖 6. 蒸發器溫度與過熱度數據與識別準備(房間1)	10
圖 7. 蒸發器溫度與過熱度數據與識別準備(房間2)	10
圖 8. 室內溫度數據擷取與識別準備(左為房間1，右為房間2)	11



第一章 前言

一般空調系統大多數時間運轉於非全載之條件下，而可變冷媒流量系統由於在部分負載下具有相當的節能效益、可靈活的搭配控制以及室外機佔據之空間較小等優勢，在商業與住宅建築中使用量逐年成長。但可變冷媒流量系統由於對應的零組件數量增加，且內機之間的控制會互相影響，因此導致系統控制變得更為複雜，所以如何進行穩定的控制與提高其節能特性就變得相當的重要。在實現空調系統控制方面需要一套可用的系統識別法則，以得到系統模型，再做系統控制邏輯開發，並將此控制邏輯製作成系統控制板。利用在小規模的環境裡進行控制法則開發，未來可以擴大應用在大場域的使用上，開發一個能在小規模與大規模都可裝置的空調系統，而不需要用整整一年的資料來決定控制方式。這些控制技巧與邏輯在未來更大規模場域依然可以控制每一間房間的舒適度。目前的控制，雖然方便實現，但最佳的控制點在系統規模變大時，卻變得極為複雜，這理由即是系統間的耦合問題。冷媒在整個系統內分配是牽一髮動全身，使用人工試誤法調整極為耗費時間，而且場地改變時必須一切重新來過，因此在現實的狀況下極不符合效益。此外，根據美國能源部資料，智慧型空調控制系統比起傳統控制約可減少10%耗電，因此良好的控制系統是空調節能不可或缺的。

第二章 系統識別簡介

常見的空調系統識別做法是，命令壓縮機與開度按照設定的刺激訊號

去觀察系統的過熱度、蒸發器溫度與室內溫度的反應。利用系統識別的工具得到系統的統馭方程式。這方法用來得到輸出反應與受控體受刺激的相互關係，如圖1所示。

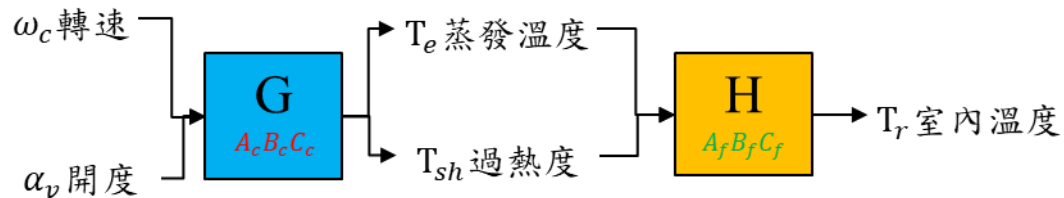


圖1、系統識別

系統識別 (system identification) [1~3] 是利用統計學，從量測到的數據來建構動力系統數學模型的方法。系統識別也包括最佳試驗設計，利用迴歸分析有效的產生具足夠資訊的數據，以及模型降階等。系統識別是一種機械學習。動態數學模型 (dynamical mathematical model) 是用數學方式來描述系統或是過程的動態特性，可能是時域特性或是頻域特性，例如：物理系統過程，像是因為受引力影響而掉落的物體；經濟體系過程，像是反應外在影響的股票市場。

系統識別有許多可能的應用，其中一個是控制理論。系統識別是現在資料驅動控制系統的基礎，其中系統識別整合到控制器設計中，也建立控制器最佳程度的證明基礎。

系統識別所需資料：系統識別可以同時使用輸入及輸出資料（例如特徵系統實現演算法），也可以只使用輸出資料（例如頻域分解）。一般而言，同時使用輸入及輸出資料會有較準確的結果，不過有些情況下並無法得到輸入的資料。

系統識別最佳實驗設計：系統識別的好壞和輸入的好壞有關，而後者是系統工程師可部份控制的範圍。因此，系統工程師已長期應用試驗設計的原則在其設計中。近年來，越來越多的工程師開始使用最佳實驗設計的理論，來指定可以產生最大準確度估計量的輸入。

解析物理系統的方法中，白箱模型是以第一原理建立的模型，例如一個物理過程利用牛頓運動定律來建立其模型。不過因為許多系統的模型非常的複雜，無法在合理的時間內進行模擬，因此在實際應用上會有所限制。

另一種更常用的作法是從對系統行為及外在影響（系統的輸入）的量測開始，再設法在不完全知道系統內真實運作的情形下，找到兩者之間的關係。此作法稱為系統識別，常見的方式有灰箱模型和黑箱模型兩種。

灰箱模型：系統運作中的模型無法完全知道，不過可以用對系統的知識以及實驗資料來建立模型。模型中還有一些參數是不確定的，可以用系統識別來估測。舉例來說，用 Monod 方程模擬微生物生長，其中包含了底物濃度以及生長速率之間的雙曲線關係。此時也可用底物中結合的分子來調整兩者關係，不需具體知道結合方式或是分子的種類。灰箱模型也稱為半物理模型。

黑箱模型：沒有任何模型的資訊，大部份系統識別的演算法屬於這一型。

在非線性系統識別中，將灰箱模型描述為先假設模型的架構，再估

測其模型參數。若模型架構已知，參數估測相對簡單很多，不過大部份情形都不是如此。或者可以利用 NARMAX 方式來識別線性或是非線性的系統。此方法的靈活度比較高，可以用在灰箱模型中（此時演算法已有已知的結構）或是黑箱模型中（需要在系統識別過程中識別其結構），此作法的另一個好處是針對線性系統，演算法會選擇線性項，而針對非線性系統，演算法會選擇非線性項，因此識別的靈活度可以提高很多。

在開發控制系統時，工程師的目標是讓控制系統（包括受控系統、回授迴路以及控制器）有良好的性能。性能一般是依照系統的模型去設計其控制律來達成的，而系統的模型可能需要根據實驗資料加以識別。假如模型識別的目的是為了控制用，和傳統系統識別最重要的不同在於，傳統系統識別目的是要找到最接近實際資料的系統，但控制用的系統識別目的是只要找到夠好的，可以滿足閉迴路控制性能模型即可。最近這類的分析方式稱為「為控制進行的識別」（identification for control），簡稱 I4C。

舉例來說，考慮一系統，其真實的傳遞函數是： $G_o(s)=1/(s+1)$ ，而識別到的模型如下：

$$\hat{G}(s) = \frac{1}{s}$$

若以傳統系統識別的觀點來看， $\hat{G}(s)$ 不是 $G_o(s)$ 的良好模型。 $\hat{G}(s)$ 和 $G_o(s)$ 在低頻的相位和大小都不同，而且 $G_o(s)$ 是漸近穩定系統，而 $\hat{G}(s)$ 只是穩定系統而已。不過若在控制應用上 $\hat{G}(s)$ 仍然是很好的模型。若利用負回授的比例控制器，配合很大的增益值 K ，配合 $G_o(s)$ 的閉迴路傳遞函數為

$$\frac{KG_o(s)}{1 + KG_o(s)} = \frac{K}{s + 1 + K}$$

而配合 $\hat{G}(s)$ 的是

$$K\hat{G}(s)/(1 + K\hat{G}(s)) = \frac{K}{s + K}$$

因為 K 很大，可以得到 $1+K \sim K$ 。因此這二個閉迴路傳遞函數相當接近。

因此，若使用此控制律時， $\hat{G}(s)$ 是真實系統「完整可接受的」識別模型。

總而言之，模型是否適合控制使用，不只要考慮系統和模型的差異程度，也要考量要使用的控制器。因此，在 I4C 架構下，給定控制性能的目標，控制工程師需要在識別階段設計，使以模型為基礎的控制器在真實系統中的性能越高越好。若不去識別出系統的模型，而是直接在實驗數據上作業，有時在設計控制器時會更方便。這就是直接資料驅動控制系統的做法。

第三章 系統識別實驗案例

接下來分別進行一對一與一對二系統識別探討。

一對一系統識別：

圖3為圖2根據圖1流程的方式使用 ω_c 壓縮機轉速與 α_v 膨脹閥開度得到 T_c 蒸發器溫度與 T_{sh} 過熱度，使用系統識別得到它們之間的狀態方程式 A_c 、 B_c 。計算時先將反應得出的數值平移到對稱的地方。

$$\dot{x} = A_c x + B_c u$$

$$x = [T_e \quad \dot{T}_e \quad T_{sh} \quad \dot{T}_{sh}]^T$$

$$u = [\omega_\alpha \quad \alpha_1]^T$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0084 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0153 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.0006 & -0.0001 \\ 0 & 0 \\ 0.0074 & -0.0006 \end{bmatrix}$$

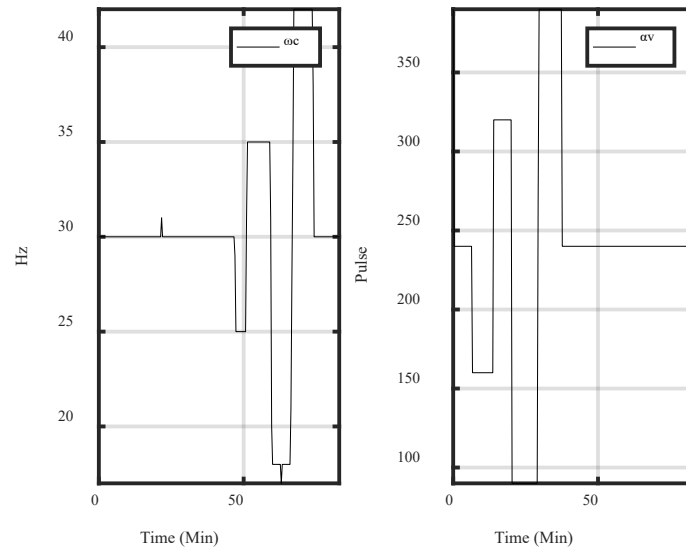


圖2、壓縮機與膨脹閥開度數據擷取

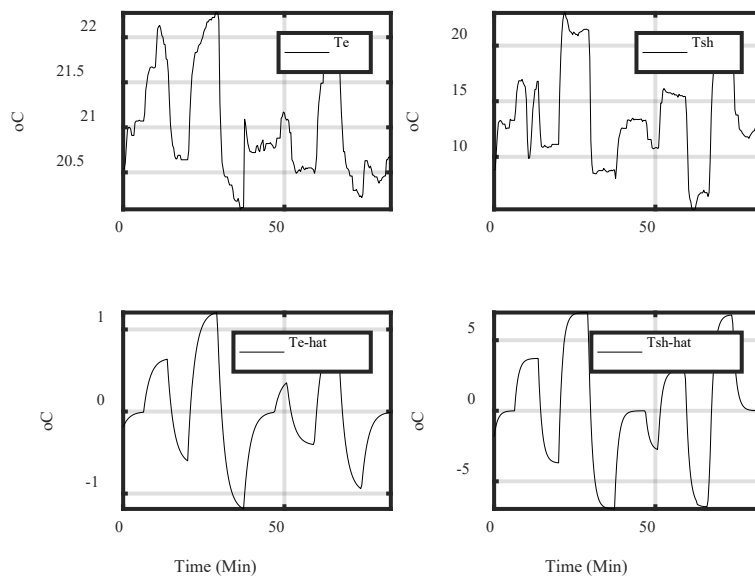


圖3、蒸發器溫度與過熱度數據擷取與識別準備

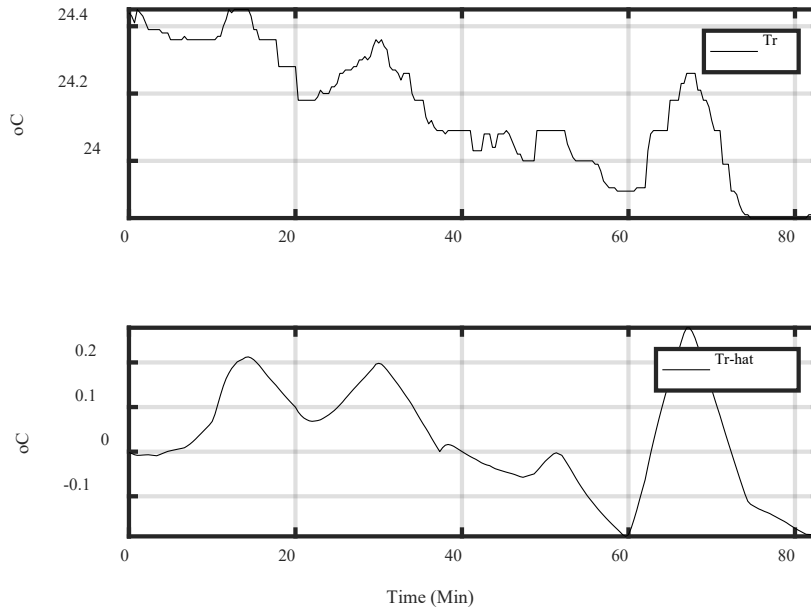


圖4、室內溫度數據擷取與識別準備

最後，根據圖1流程的方式，使用圖3中 T_e 蒸發器溫度與 T_{sh} 過熱度及圖4室內溫度 T_r ，以系統識別得到它們之間的狀態方程式 A_f 與 B_f ，完成一對一系統識別。同樣地，計算時先將反應得出的數值平移到對稱的地方。

$$\dot{x} = A_f x + B_f u$$

$$x = [T_r \quad \dot{T}_r]^T$$

$$u = [T_e \quad T_{sh}]^T$$

$$A_f = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0015 \end{bmatrix}$$

$$B_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 8.8830e-04 & -6.6300e-05 \end{bmatrix}$$

一對二系統識別：

一對二系統識別同樣根據圖1流程的方式使用圖5中的 ω_c 壓縮機轉速與兩個 α_v 膨脹閥開度得到圖6和圖7中的兩組 T_e 蒸發器溫度與 T_{sh} 過熱度，利用系統識別得到它們之間的狀態方程式 A_c 及 B_c 。



$$\dot{x} = A_c x + B_c u$$

$$x = [T_{e1} \quad \dot{T}_{e1} \quad T_{sh1} \quad \dot{T}_{sh1} \quad T_{e2} \quad \dot{T}_{e2} \quad T_{sh2} \quad \dot{T}_{sh2}]^T$$

$$u = [\omega_\alpha \quad \alpha_1 \quad \alpha_2]^T$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0042 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0047 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0002 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0074 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0.0004 & -0.0000 & 0.0000 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.0037 & -0.0004 & -0.0001 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.0002 & 0.0000 & -0.0000 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.0055 & -0.0002 & -0.0004 \end{bmatrix}$$

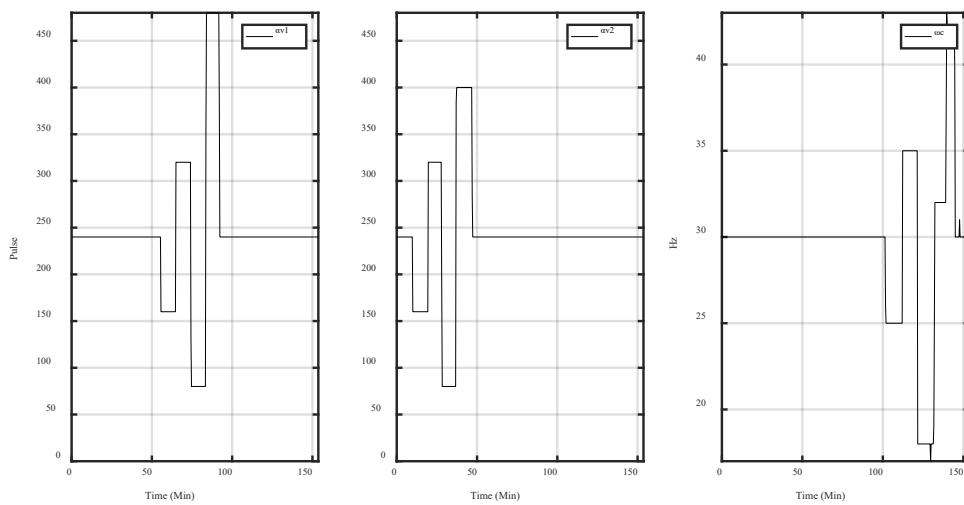


圖5、壓縮機與膨脹閥開度數據擷取(一對二)

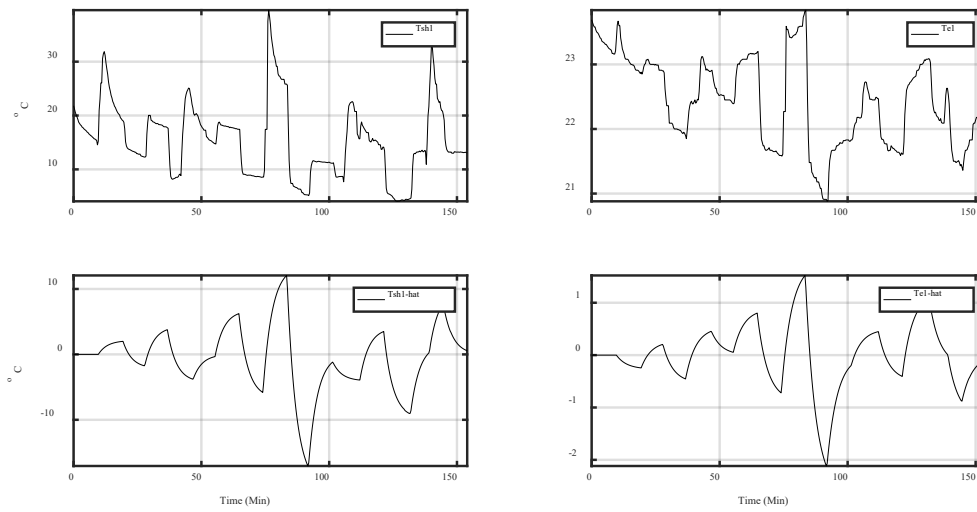


圖6、蒸發器溫度與過熱度數據與識別準備(房間1)

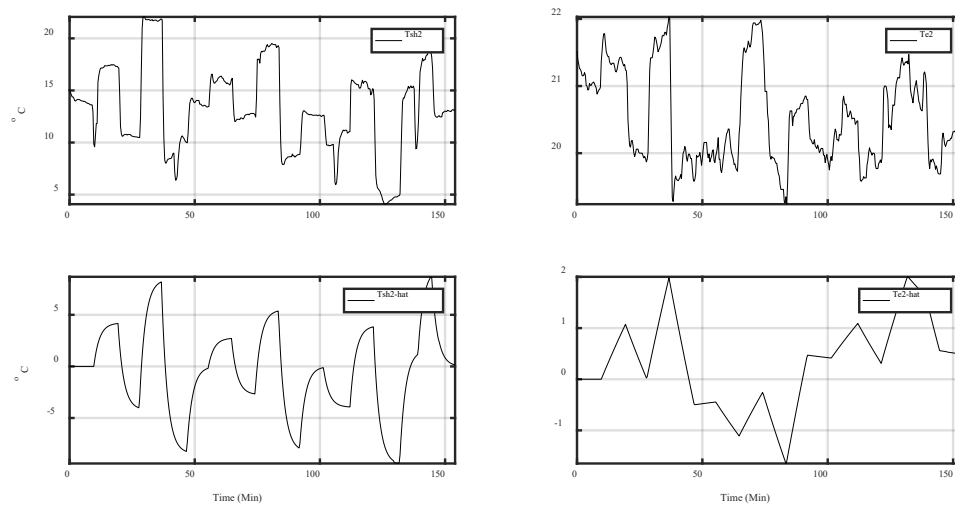


圖7、蒸發器溫度與過熱度數據擷取與識別準備(房間2)

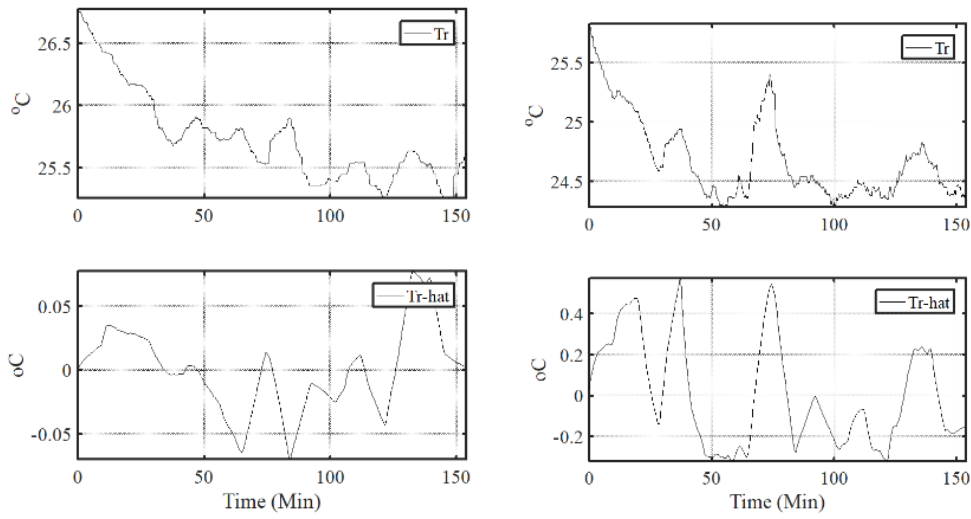


圖8、室內溫度數據擷取與識別準備(左為房間1，右為房間2)

與一對一系統識別類似，根據圖1流程的方式，使用圖6 與圖7兩個房間的 T_e 蒸發器溫度和 T_{sh} 過熱度以及圖8的室內溫度 T_r ，最後得到一對二系統的狀態方程式 A_f 與 B_f 。

$$\dot{x} = A_f x + B_f u$$

$$x = [T_r \quad \dot{T}_r]^T$$

$$u = [T_e \quad T_{sh}]^T$$

$$A_{f1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0025 \end{bmatrix} \quad A_{f2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.003 \end{bmatrix}$$

$$B_{f1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.0015 & -2.4051e-06 \end{bmatrix}$$

$$B_{f2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.0017 & 2.0327e-05 \end{bmatrix}$$

第四章 結論

1. 系統識別需要命令壓縮機轉速、膨脹閥開度和風扇轉速依照規律的變化而得。所以在系統識別之前需要確認可以對系統的各元件有命令權。



2. 對於各大元件可以命令各家廠商通常會有的 Modbus 通訊格式，如此可以加速系統識別實行。
3. 系統識別可以得到系統的狀態模型，而此模型可以當成實際的房間與空調機的關係式。本文據此得到一對一(room1)與一對二(room1 和 room2)的狀態方程式。
4. 根據美國能源部資料，智慧型空調控制系統比起傳統控制約可減少 10%耗電，因此良好的控制系統是空調節能不可或缺的。

參考文獻

- [1] S. Torsten, System identification, New York: Prentice-Hall, Inc., 1989.
- [2] A. K. Tangirala, Principles of system identification: Theory and Practice, CRC Press, 2014.
- [3] Matlab, The Mathworks.
- [4] <https://www.energy.gov/energysaver/articles/energy-saver-101-info-graphic-home-heating>