

# 考量建築減振應用實務之多元調諧質量阻尼器 參數設計研究

涂佳瑋(Jai-Wei Twu)

國立聯合大學土木與防災工程學系

王哲夫(Jer-Fu Wang)

國立聯合大學土木與防災工程學系

林其璋(Chi-Chang Lin)

國立中興大學土木工程學系/朝陽大學營建工程學系

## 摘要

高層建築裝設調諧質量阻尼器(TMD)以降低地震或風引起的晃動，為現代建築達成安全與舒適目標的一種營建新技術，TMD 從最初單一 TMD，逐漸出現一棟多元 TMD 之案例，例如台北南山廣場大樓裡即安裝兩個 TMD。TMD 除與建築結構互制外，各個 TMD 之間亦會互相影響，因此本文主要針對一真實建築結構裝設多元 TMD 之案例，探討各種實務運行之境況進行參數設計並分析其減振效用，以決定較佳之設計方案，此外亦考量實務上 TMD 組成元件盡可能採用均一規格而並偏離最佳設計參數時，對其減振效用之影響。本研究以 MATLAB 發展多元 TMD 之圖像介面程式，可適用於多元 TMD 各個單元裝設於不同平面與立面位置之參數設計與減振效用分析，為營建工程中 TMD 規劃之有利工具。

**關鍵詞：**調諧質量阻尼器、營建耐震減振科技

## A Case Study on the Design of Multiple Tuned Mass Dampers for a Real Building

### Abstract

For safety and comfortability purposes, tuned mass dampers are commonly used to reduce the response of a high-rise building due to environmental loadings, such as winds and earthquakes. The early TMD applications are usually a building installed with a single TMD. In recent years, applications with multiple tuned mass dampers are more frequent than before, for example, the dual TMDs in the Taipei Nan Shan Plaza building. This paper presents a study of a three-TMD case for a real building, which is currently in construction. The purpose is to determine an optimal set of design parameters of the three TMD units with the consideration of several scenarios during the operation of the building. In addition, the influence of adjusting the physical parameters of TMD components to identical values were also discussed. The results of the paper can be a reference for the future applications with multiple TMDs.

**Keywords:** tuned mass damper, vibration control technology, architectural building

## 一、前言

調諧質量阻尼器(Tuned Mass Damper, 簡稱 TMD)為一種安裝於結構之單自由度運動減振裝置。早期相關研究以單一 TMD 之設計參數最佳化與其減振效用為重點，TMD 開始應用於高樓建築至今多為單一 TMD 之案例，例如，2004 年完工台灣首例台北 101 大樓之單擺式 TMD。現今有愈來愈多實務案例開始於結構安裝多個 TMD，例如台北南山廣場大樓的雙 TMD。安裝多元 TMD 其目的不乏考量施工安裝之便利性或空間限制而化整為零，或建築景觀上的特殊規劃。事實上，多元 TMD 不但可達到對單一結構頻率減振時降低對頻率變化的敏感度[1-3]，亦可以將各個 TMD 單元獨對結構之各個模態進行減振以適應不同環境外力的特性[4-6]。而本研究之目的，即針對一規劃安裝三組 TMD 之實際高樓建築案例進行最佳設計參數探討，當中考量數種運行上之境況，由減振效用決定一最佳方案。此外，本研究亦討論在經濟考量上，TMD 各元件之規格盡可能均一之情況下而偏離最佳設計值時，對於三組 TMD 之減振效用之影響。本研究期能提供未來業界對於多元 TMD 設計方案之參考。

## 二、案例建築結構與其減振需求概述

### 2.1 建築結構簡述

本研究案例建築結構為國內某四十多層新建大樓，透過該結構 ETABS 建模分析得到其前三個模態頻率與其主控方向如表 1 所示。該結構低樓層構材為鋼骨鋼筋混凝土，其上方至頂層為鋼構造，結構模態阻尼比假設為 1%。

表 1 案例主結構模態頻率、週期與阻尼比

Parameters	1 <sup>st</sup> Mode	2 <sup>nd</sup> Mode	3 <sup>rd</sup> Mode
Dominate Direction	Y	X	RZ
Modal periods(sec) (ETABS)	4.472	4.049	3.066
Modal frequency(Hz) (ETABS)	0.2236	0.2470	0.3261
Modal Damping (Assumed)	0.01	0.01	0.01

### 2.2 TMD 安裝與減振效用(結構等效阻尼比)需求

案例結構之減振需求為減振後結構水平雙向之主要模態等效阻尼比均達 2.5%以上。減振裝置採用與台北 101 大樓相同之調諧質量阻尼器(Tuned Mass Damper ,TMD)，預計裝三組 TMD，其中一組為單擺式，另兩組為雙向直線滑軌式，TMD 總質量為 320 噸。為有效運用 TMD 之質量來降低兩水平向結構反應，單擺式 TMD 預設採用單一質量雙向運動單擺，而滑軌式則採用單一質量上下兩層雙向軌道，三組 TMD 預期減振方向之質量分配與安裝樓層如表 2；安裝位置與 TMD 型態如圖 1 示意。其中滑軌式雙向質量差為 4 ton，係因上層 TMD 除減振質量外，上有固定元件與支撐構架之額外質量，將一同成為下層軌道 TMD 之減振質量。

表 2 案例建築三組 TMD 質量與擺放位置

TMD No.	Y 向	X 向	Location
TMD1(Pendulum-type)	200ton	200ton	35~37FL
TMD2(Sliding-type)	58ton	62ton	34FL
TMD3(Sliding-type)	62ton	58ton	34FL

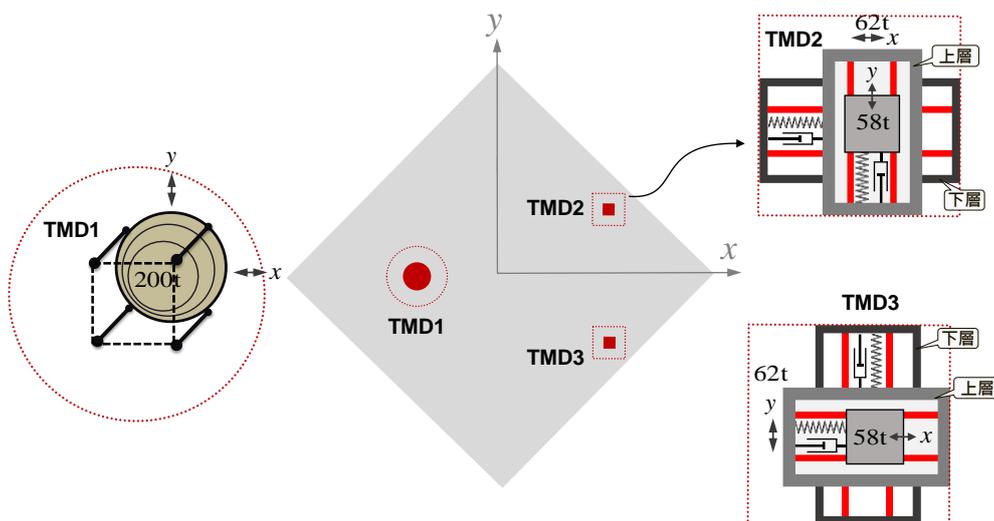


圖 1 三組 TMD 擺放位置與型態示意圖

### 2.3 TMD 參數設計工具

本研究 TMD 設計採用之軟體工具，係以國立中興大學林其璋教授團隊所研發之圖像介面後處理程式為基礎，依案例結構開發客製化處理介面並進行設計軟體升級。原處理程式雖為針對多元 TMD 所開發，惟所有 TMD 單元均限制雙設於相同平面與立面位置，且所有 TMD 單元之參數均須一同進行最佳化。本研究將軟體升級使多元 TMD 各單元可分布於任意立面與平面位置，且可進行最佳化設計或輸入已知參數進行減振效益分析，並且可設定部分參數固定、部分參數作最佳化設計，對於實務上有特殊考量時，此升級之設計軟體具有更高之彈性。

## 三、多元 TMD 參數設計實務考量探討

### 3.1 考量不同運行境況之最佳化

本案例三組 TMD 中，單擺式 TMD (即 TMD1)之質量為另兩組 TMD 個別質量之 3.33 倍，故 TMD1 為維持減振效用之關鍵 TMD。在設計參數的最佳化上，除了可考量三組 TMD 一同進行參數最佳化(境況 1)，本研究亦考量另外三種設計境況，如表 3 所示。其中境況 2 係考量當 TMD2 與 TMD3 因維修而暫停運作、僅境況 1 下設計之 TMD1 獨立運作時之減振效用；境況 3 則假設僅 TMD1 獨立運作狀況下之最佳參數與減振效用；境況 4 則是將 TMD 參數設定為境況 3 下之設計參數，再與 TMD2 與 TMD3 一同作用，以對 TMD2

與 TMD3 進行最佳化。

表 3 案例結構多元 TMD 之設計參數最佳化四種境況考量

境況	境況內容
1	三組 TMD(200 噸、60 噸、60 噸)同步最佳化，並且同時作用。
2	三組 TMD 同步最佳化下，僅單擺式 TMD (TMD1)單獨作用。
3	單擺式 TMD (TMD1)獨立最佳化，並且單獨作用。
4	單擺式 TMD(TMD1)獨立最佳化參數固定，併同滑軌式 TMD(TMD2 及 TMD3)重新最佳化後一同作用。

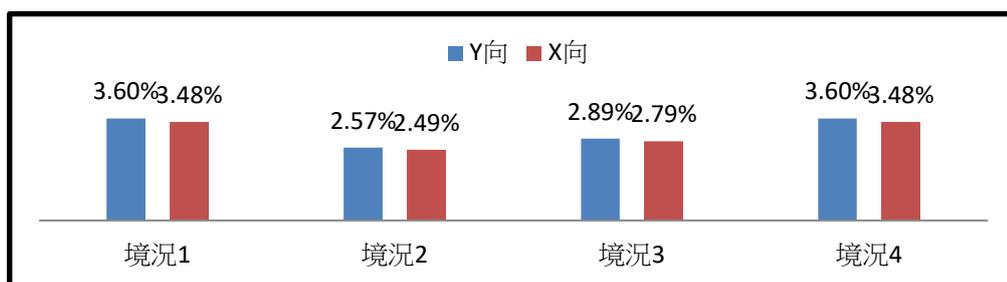


圖 2 案例結構四種境況之多元 TMD 等效阻尼比

由以上四種境況下所得最佳參數對結構兩水平向等效第一模態阻尼比進行分析，結果如圖 2 所示，可發現境況 1 與境況 4，不管是三組同步最佳化還是 TMD1 先獨自最佳化，最佳化流程均能利用調整滑軌式 TMD 來使得三組 TMD 整體效用達到最佳。但若考量 TMD 運行期間若滑軌式 TMD 未運作僅單擺式 TMD 獨自運作時，境況 3 將較境況 2 為佳，且等效阻尼比兩方向均達到需求之 2.5% 以上，亦即考量此特殊境況之發生，境況 4 將較境況 1 為佳，故本研究建議以境況 4 之參數進行此三組 TMD 之設計。

表 4 案例結構多元 TMD 考量境況 4 之 TMD 設計參數

TMD 參數	控制結構第 1 模態 (Y 向)			控制結構第 2 模態 (X 向)		
	TMD1 (單擺)	TMD2 (滑軌)	TMD3 (滑軌)	TMD1 (單擺)	TMD2 (滑軌)	TMD3 (滑軌)
質量(Ton)	200	58	62	200	62	58
最佳設計頻率比	0.9997	0.9472	1.0628	0.9998	0.9493	1.0600
最佳設計阻尼比	0.0424	0.0186	0.0203	0.0404	0.0188	0.01870
設計勁度係數 (KN/m)	395	103	138	481	135	157
設計阻尼係數 (KN-s/m)	23.81	2.87	3.76	25.08	3.44	3.57

### 3.2 考量單擺 TMD 雙向等擺長之減振效用

由表 4 可見，單擺式 TMD 之最佳設計勁度係數於兩水平方向並不同，代表單擺 TMD 的兩向自然週期也不同，導致雙向的需求擺長不等長。固然可藉由額外機構設計成雙向不等長或不等週期的單擺，然額外機構代表額外的元件，不論在力學上將產生摩擦來源，在施工以及後續的維護上，亦將需額外的工作而衍生費用，故以單一擺長雙向運動對後續維護將為較佳之方案。

故本研究針對雙向固定擺長(固定勁度係數)的設計提出六種方案，如表 5 所示。分別針對六種方案重新調整三組 TMD 之參數，並分析各方案下之三組 TMD 之整體減振效用，如圖 3 所示。由圖中顯示，Case 5(TMD1 兩向勁度均設為兩向最佳勁度之平均值，其餘參數重新最佳化)對於結構 Y 向與 X 向之等效阻尼比相較於前節之最佳設計僅分別由 3.60%與 3.48%微幅降至 3.5%與 3.4%，故建議採取此方案將單擺 TMD 設計為雙向等擺長。

表 5 六種單擺式 TMD 雙向等擺長設計方案

Case	境況內容
1	TMD1 兩向勁度均設為 X 向最佳勁度 395 KN/m，其餘參數重新最佳化。
2	TMD1 兩向勁度均設為 X 向最佳勁度 395 KN/m，TMD2 與 TMD3 參數維持原最佳值不變，僅 TMD1 阻尼係數重新最佳化。
3	TMD1 兩向勁度均設為 Y 向最佳勁度 481 KN/m，其餘參數重新最佳化。
4	TMD1 兩向勁度均設為 Y 向最佳勁度 481 KN/m，TMD2 與 TMD3 參數維持原最佳值不變，僅 TMD1 阻尼係數重新最佳化。
5	TMD1 兩向勁度均設為兩向最佳勁度之平均值 438 KN/m，其餘參數重新最佳化。
6	TMD1 兩向勁度均設為兩向最佳勁度之平均值 438 KN/m，TMD2 與 TMD3 參數維持原最佳值不變，僅 TMD1 阻尼係數重新最佳化。

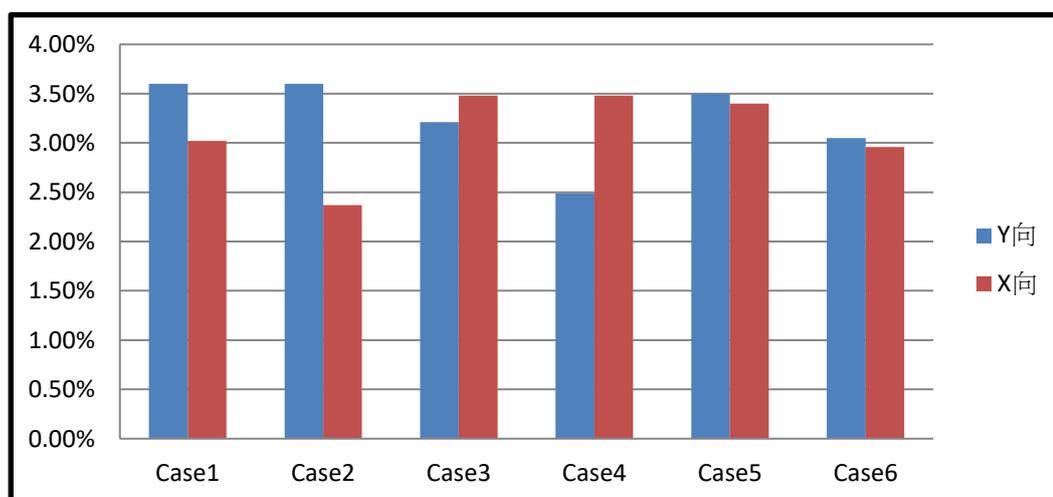


圖 3 六種單擺 TMD 雙向等擺長(等勁度)方案下之結構等效阻尼比

表 6 方案五單擺式 TMD 雙向等擺長設定下之三組 TMD 設計參數

方案五 TMD 參數	控制結構第 1 模態 (Y 向)			控制結構第 2 模態 (X 向)		
	TMD1 (單擺)	TMD2 (滑軌)	TMD3 (滑軌)	TMD1 (單擺)	TMD2 (滑軌)	TMD3 (滑軌)
質量(Ton)	200	58	62	200	62	58
設計勁度係數 (KN/m)	438	112	111	438	167	144
設計阻尼係數 (KN-s/m)	22.75	2.66	2.81	22.11	3.59	3.04

### 3.3 考量參數均一化之減振效用

由表 6 可見方案五除了單擺 TMD 兩向勁度係數(擺長)為均一值，其餘參數皆非。為了減少施工的複雜度以及採購的成本，故 TMD 的元件規格數量盡量減少，本研究嘗試將方案五中原本即相近之參數進行均一化並分析其減振效用，以判斷是否可行。均一化項目如下：

- (1)單擺式 TMD 之雙向阻尼係數均設定於 22.5 KN-s/m。
- (2)兩滑軌式 TMD(TMD2 與 TMD3)之各方向阻尼係數均設定為 3.5 KN-s/m。
- (3)兩滑軌式 TMD(TMD2 與 TMD3)之 X 向勁度係數均設定為 155.5 KN-s/m。
- (4)兩滑軌式 TMD(TMD2 與 TMD3)之 Y 向勁度係數均設定為 111.5 KN-s/m。

如此得到之結構兩方向等效阻尼比變化如表 7 所示。表 7 中括弧內為減振效用降低百分比。由表中數據發現，經過參數均一化之設計方案對結構 X 向之減振效用影響甚微，而 Y 向之減振效用不減反而微幅上升，判斷係因上述均一化之策略能將方案五因等擺長設定造成之 Y 向減振效用損失再往原始最佳值方向拉回。

表 7 方案五三組 TMD 設計參數均一化前後結構等效阻尼比之變化

方案	X 向等效阻尼比(%)	Y 向等效阻尼比(%)
境況 4 最佳參數	3.50	3.60
方案五參數均一化前	3.40 (-2.9%)	3.50 (-2.8%)
方案五參數均一化後	3.39 (-3.1%)	3.53 (-1.9%)

## 四、結論

本研究針對一案例高樓建築安裝三組 TMD 進行參數設計研究，首先考量四種 TMD 運行境況，最後採取先最佳化主要單擺 TMD，再合併另兩組較小之滑軌 TMD 以進行滑軌 TMD 參數之最佳化。此設計策略雖得到與三組 TMD 一同最佳化者相同之減振效用，然考量滑軌 TMD 有因維修而停止運作之可能境況下，前者之設計策略在單擺 TMD 單獨運行時將具有較佳之減振效用。此組原始最佳設

計參數各 TMD 之最佳參數數值均不同，特別是單擺 TMD 為雙向不同頻率，在考量六種單擺 TMD 雙向等擺長設計方案情況下，再將單擺 TMD 雙向阻尼係數、兩組滑軌 TMD 之各方向阻尼係數、兩組滑軌 TMD 之 X 向勁度係數、及兩組滑軌 TMD 之 Y 向勁度係數等參數進行均一化，發現對案例結構 X 與 Y 方向之等效阻尼比僅由最佳 TMD 之 3.5%與 3.6%，分別降至 3.39%與 3.53%，在減振效用上影響甚微，然預期能大幅降低雙向不同擺長與元件規格過多所需要的施工與後續維護成本。故本研究提出之多元 TMD 設計策略應有相當參考價值，可供未來 TMD 實務參考。

## 五、參考文獻

1. Lin, C. C., Wang, J. F. and B. L. Chen, "Train-Induced Vibration Control of High-Speed Railway Bridges Equipped with Multiple Tuned Mass Dampers ", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 10, No. 4, 2005.
2. Wang, J. F. and C. C. Lin, "Seismic Performance of Multiple Tuned Mass Dampers for Soil-Irregular Building Interaction System", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, pp. 5536-5554, 2005.
3. Vellar, L.S., Ontiveros-Pérez, S. P., Fleck Fadel Miguel, L. and L. Fleck Fadel Miguel, "Robust Optimum Design of Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control in Buildings Subjected to Seismic Excitation", *Shock and Vibration*, Article ID 9273714, 2019.
4. Zuo, H., Bi, K. and H. Hao, "Using Multiple Tuned Mass Dampers to Control Offshore Wind Turbine Vibrations under Multiple Hazards", *Engineering Structures*, Vol. 141, pp. 303-315, 2017.
5. Lin, C.S., Liu, F., Zhang, J., Wang, J.F. and C.C. Lin, "Vibration Control for Serviceability Enhancement of Offshore Platforms against Environmental Loadings", *Smart Structures and Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 403-414.
6. Hussan, M., Rahman, M.S., Sharmin, F., Kim, D. and J. Do, "Multiple Tuned Mass Damper for Multi-mode Vibration Reduction of Offshore Wind Turbine under Seismic Excitation", *Ocean Engineering*, Vol. 160, pp. 449-460, 2018.