

國立中央大學機械工程學系

畢業專題研究報告



具顆粒阻尼器轉子之動平衡及減振實驗設計

指導教授：吳育仁 博士

專題生：106303565 陳泓霖

106303567 曾柏翔

中華民國 110 年 1 月 5 日

目錄

摘要-----	2
研究動機及研究目標-----	2
實驗平台及參數定義-----	3
實驗流程及分析目標-----	8
實驗數據及結果-----	10
結論及未來展望-----	15
參考文獻-----	16

一. 摘要

對於傳統系統而言，抑制減振一直以來都是非常重要的課題，而振動的產生往往都是因為裝配或是加工誤差等因素所導致，進而產生動不平衡的狀況。先前的文獻已經證實顆粒阻尼確實具有減振效果，且顆粒阻尼的觀念也廣泛的應用於土木工程、機械工程及航空工程的領域之中。故我們將「應用顆粒阻尼技術進行轉子動平衡及振動抑制」。

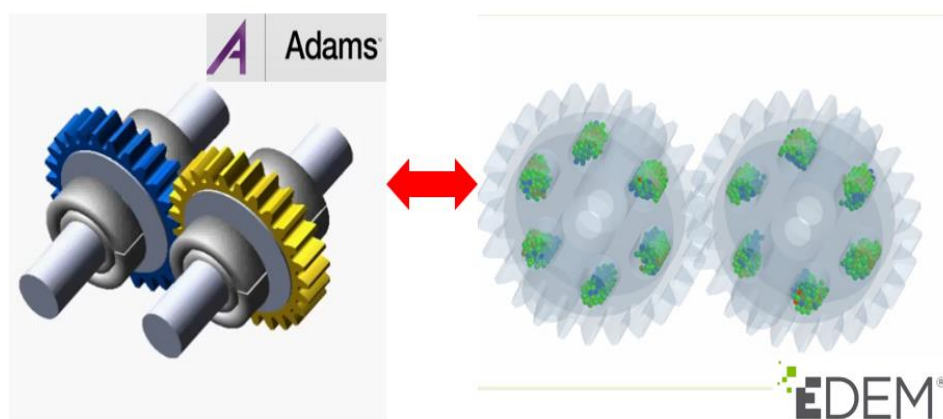
二. 研究動機及研究目標

2.1 研究動機

轉子運動過程中會因質心偏移而產生離心慣性力、並引發振動，使得加速轉子及其配對零件之失效。而先前已有文獻提到轉動零件之兩端壁上孔洞中放置阻尼顆粒可有效抑制振動。但並未提到說是否在任何轉速下都適用顆粒阻尼進行減振，是否在高或低轉速時呈現不同的減振趨勢，以及孔徑是否與顆粒半徑有相關性，還有是否使用不同顆粒材質能提升減振的效果。因此我們決定在製作動平衡實驗前，優先改善以上提及的項目，以此觀念為基礎拓展至未來動平衡實驗中。

2.2 研究目標

首先我們會先設計實驗平台方便實驗進行。接著我們會建立一個 ADAMS-EDEM 雙向耦合 CAE 模型(圖一)，方便得出實驗數據後可以與模擬數據進行比對。再來我們會根據不同轉速、填充率、粒徑、材質的情況下進行探討，得出改善以上這幾種參數後可以得到一個最佳的減振效果。



圖一、ADAMS-EDEM 的雙向耦合 CAE 模型示意圖

三. 實驗平台及參數定義

利用控制器控制磁滯負載及馬達(圖三)，再將控制器與電腦程式連接，透過程式給定所需的工作條件，如輸入轉速和負載比。經由三軸加速規量測轉動過程中所產生的振動，透過訊號擷取卡回傳至電腦，最後使用 NOVIAN 程式進行頻譜分析。我們的 X 軸為水平徑向，Y 軸為軸向方向，Z 軸為垂直徑向，也就是重力方向，加速規附著於圖二中靠近磁置負載的那塊軸承座上進行振動量測。

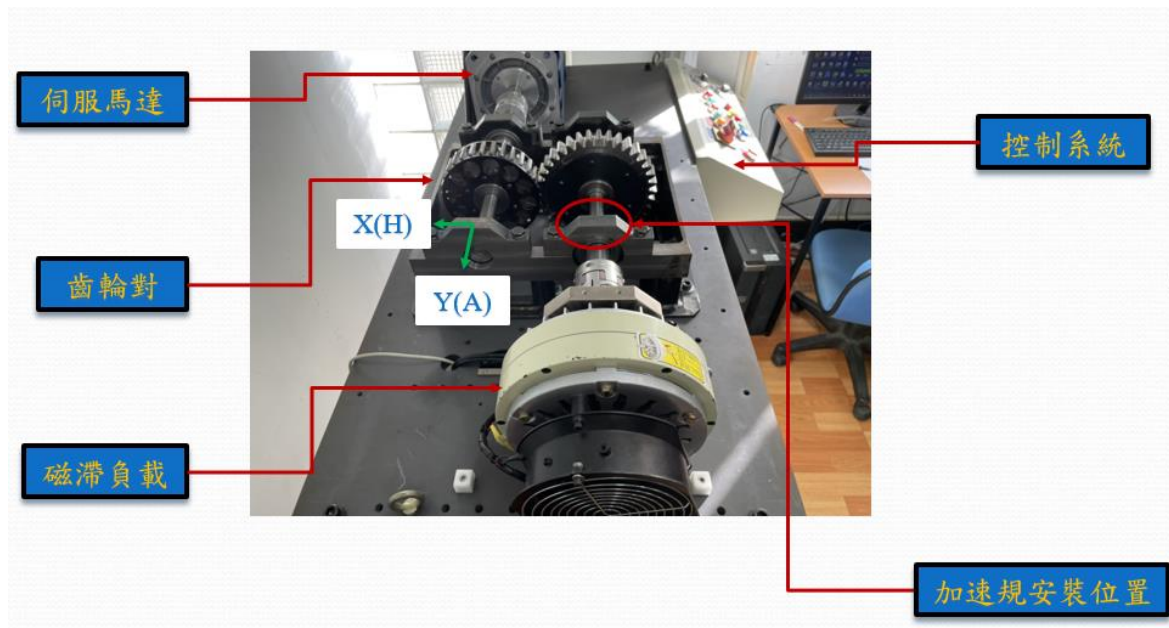
訊號取樣設定

在電腦分析的部份我們是利用Novian程式進行訊號分析，在量測時，我們採用的是Hanning window進行處理，主要是為了降低Leakage(洩漏)的效應，再來因為是隨機訊號的傅立葉頻譜分析且著重頻率解析，所以採窗函數。

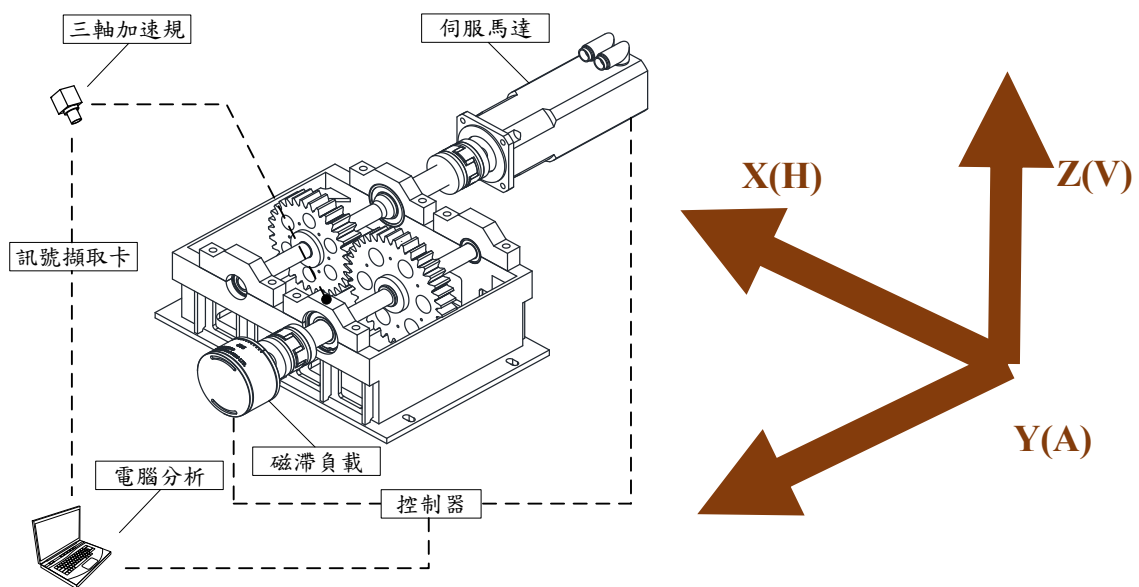
量測的頻域位於0~2000 Hz之間，Resolution設定為6400 Lines，意思是將我們的訊號分割成6400個等份，方便我們進行各段的頻譜分析，每筆數據的額定功率都設定為420 W，量測次數皆為五次，量測時長皆為20 sec，取其中的5-15秒之間的訊號，而不採用前幾秒的訊號是為了使得齒輪穩定轉動，顆粒確實的附著於孔洞壁面，得到的數據也會較為穩定。

窗函數	Hann 窗	量測模式	RMS
加速規類型	IEPE	額定功率	420 W
量測頻域	0~2000 Hz	顆粒填充率	20%~80%
Resolution	6400 lines	量測次數	5
頻譜精度	0.32 Hz	量測時長	20 sec
濾波範圍	2 Hz(high pass)	取樣時長	5-15 sec

表一、訊號設定

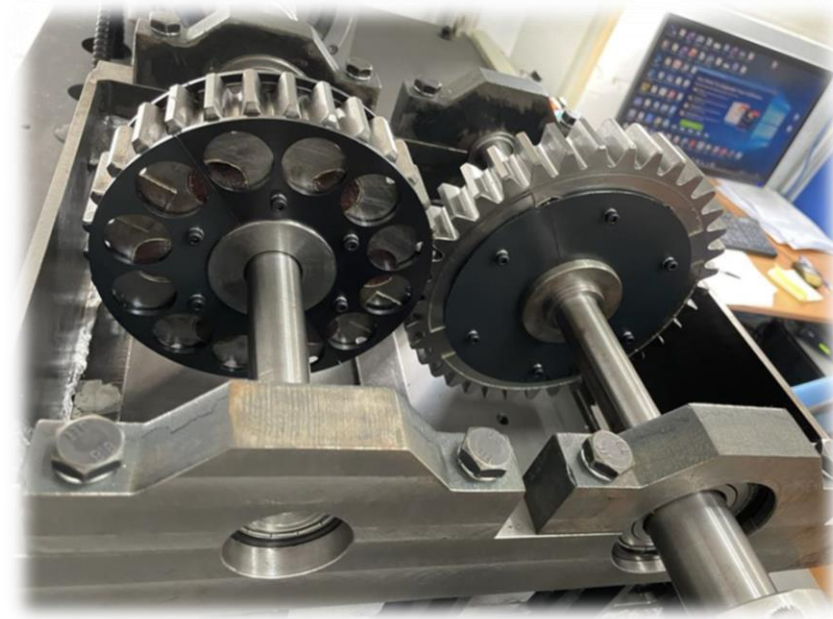


圖二、實驗機台示意圖



圖三、實驗整體設備示意圖

在本專題中，為了驗證顆粒阻尼相較於一般傳統系統有較佳的減振效果，在實驗中特別加工了數個與 60%填充率質量相當的等效質量片，並將其安裝在齒輪兩側，透過螺絲進行鎖固，如圖四所示。



圖四、60%等效質量片示意圖

於齒輪的兩側設計了壓克力板(圖五)，並用螺絲鎖固，使得顆粒置於齒輪孔洞中而不外漏。另外特別於壓克力板的兩端各開一個對稱的長方形，一來方便填裝顆粒，二來不會因為開洞而造成靜不平衡。



圖五、壓克力板示意圖

顆粒填充率計算

$$\frac{4}{3}\pi r^3 x = \pi R^2 L \cdot 0.64 \cdot X$$

x : 顆粒數目

r : 顆粒半徑

R : 孔洞半徑

L : 齒面寬

X : 顆粒填充率

0.64 : 球體隨機堆積密度

首先我們先利用圓柱公式計算一個孔洞所佔有的體積後，將其乘上0.64(即球體隨機堆積最大密度)，後來再乘上 X ，也就是我們的顆粒填充率，如圖五左，為80%的填充率，我們便乘0.8。再透過球體公式計算出一顆顆粒佔有多少的體積，便可由等式推算出一個孔洞可以填充多少的顆粒。

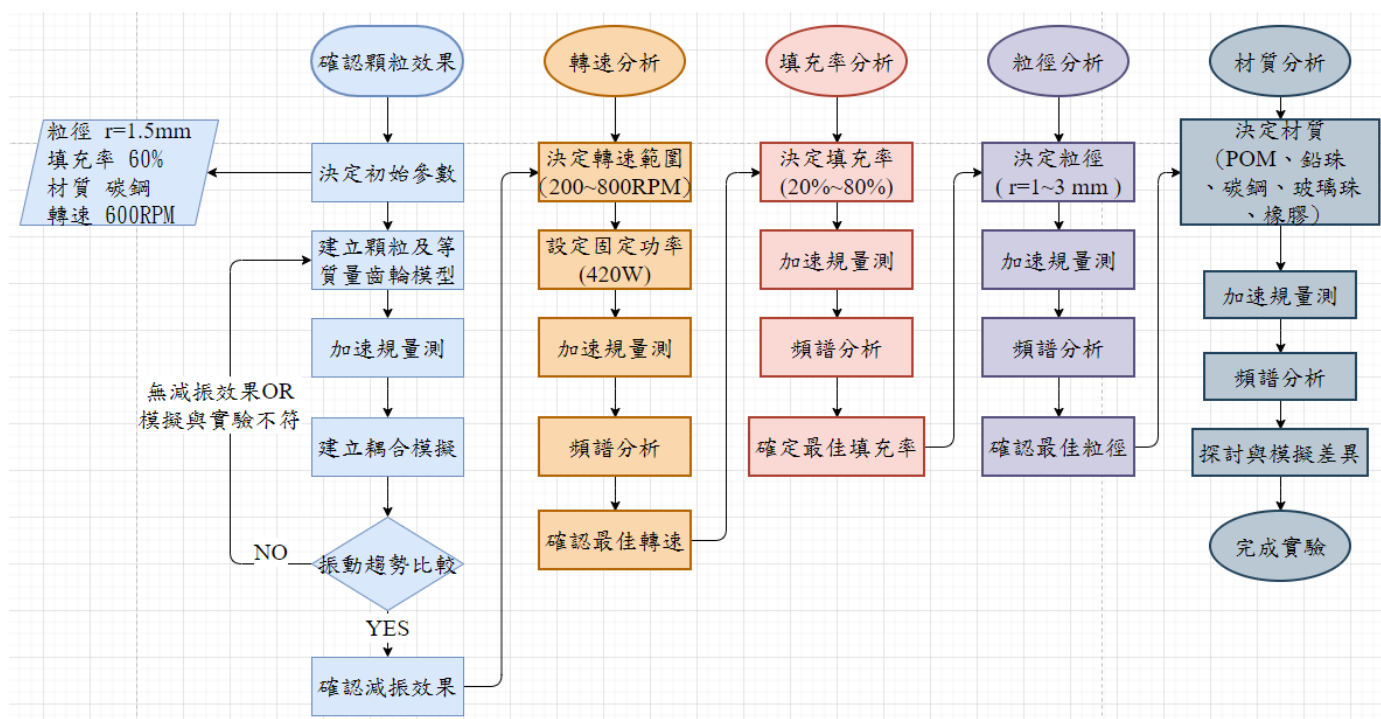
齒輪&軸承參數			
	齒輪 1	齒輪 2	
模數	5	5	mm
齒數	31	37	齒
壓力角	20.0	20.0	deg
齒面寬	30.0	25.0	mm
孔之半徑	12.5	15.0	mm
孔距離齒輪質心	50.0	50.0	mm
	軸承 A	軸承 B	
軸承型號	SKF 6207	SKF6004	
軸承外徑	72.0	42.0	mm
軸承內徑	35.0	20.0	mm
軸承厚度	17.0	12.0	mm

表二、齒輪及軸承相關參數

四．實驗流程及分析目標

4.1 實驗流程

一開始我們先確認我們實驗機台是否具有顆粒減振效果，因此我們採用文獻中的參數設定，使用粒徑為 $r=1.5\text{ mm}$ 、填充率 60%、顆粒材質為碳鋼，且在 600 RPM 的轉速下進行實驗驗證，確認實驗機台具有減振效果後，接著才開始進行變數的探討，我們將依序進行轉速、填充率、粒徑和材質的探討，而我們會將每一次所得到的最佳參數挪用到下一個變數分析中。



圖六、實驗流程圖



圖七、顆粒填充率示意圖



圖八、不同顆粒半徑示意圖



圖九、不同材質示意圖

4.2 分析目標

對於實驗的分析目標我們有 RMS 值分析、嚙合頻分析、Overall 能量分析三種。

1. **RMS 分析**: 針對加速規量測獲得之「時域加速度」訊號，運用 Mathematica 程式計算出方均根(RMS)，可避免正負值相消的問題，並可表達極端振動及總和能量之趨勢，單位為 m/s^2 。
2. **嚙合頻分析**: 針對經快速傅立葉轉換後頻譜上之齒輪「嚙合頻率」進行分析，可單獨表達齒輪能量之趨勢。單位為 $(\text{mm/s})^2$ ，即速度單位的平方，視為一種能量單位。
3. **Overall 能量分析**: 根據頻譜上振動幅值進行計算，反推獲得運動之總能量，可顯示系統總能量之趨勢。根據規範，本實驗機台為中低轉速，通常使用速度單位，即為 mm/s 。

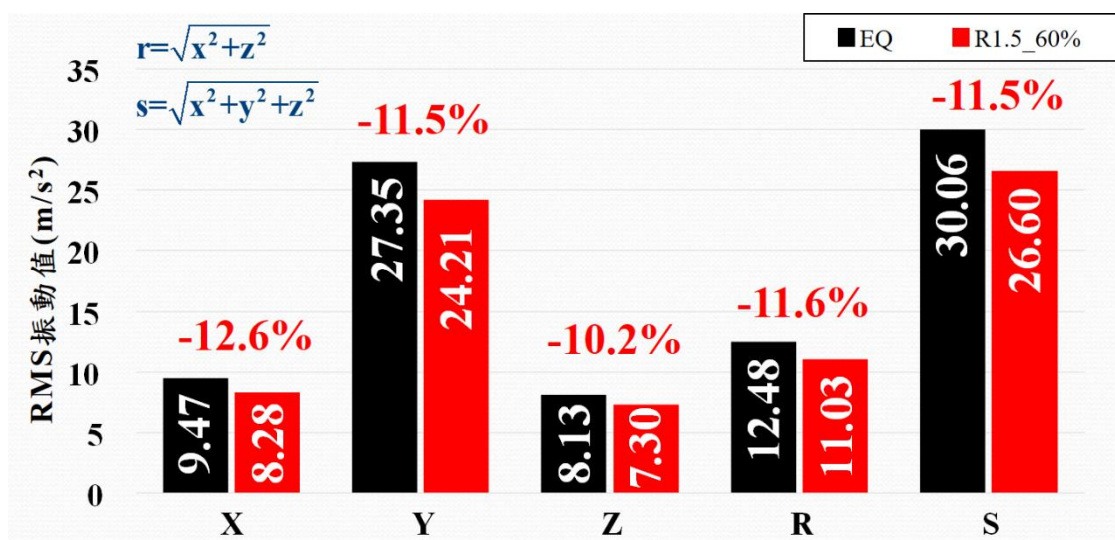
五. 實驗數據及結果

5.1 驗證顆粒減振效果

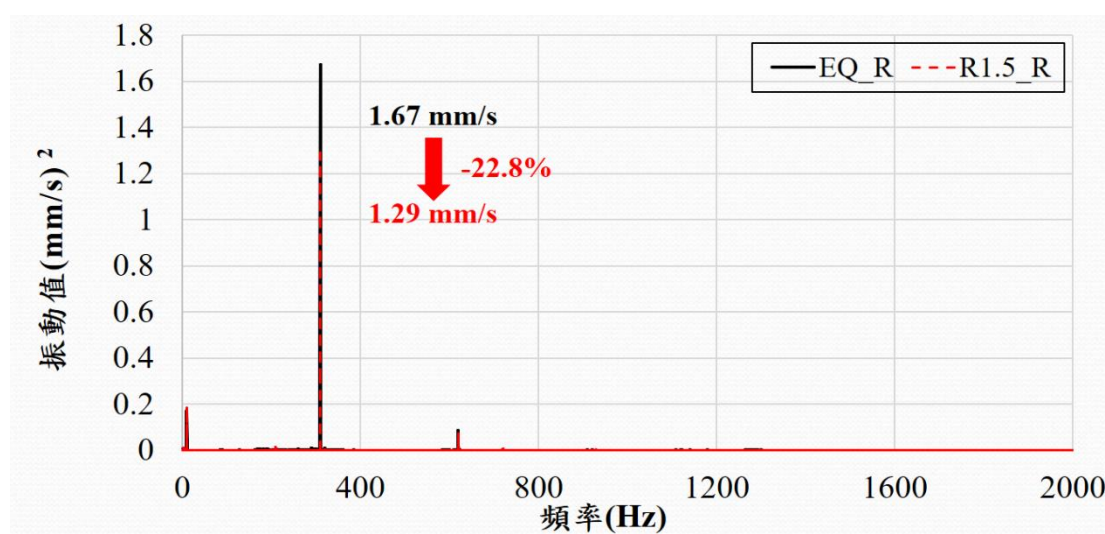
首先看到的是初始確認實驗機台是否具有顆粒減振效果的數據，有 RMS 值分析、嚙合頻分析、Overall 能量分析三種結果。圖中黑色的數據為未填充顆粒，只安裝等效質量片的振動值，而紅色的部分則為以文獻參數進行實驗的振動值。在 **RMS 值分析**的結果確認各軸向

上皆有良好的減振效果；在嚙合頻率 310 Hz 的位置可見到減振效果；

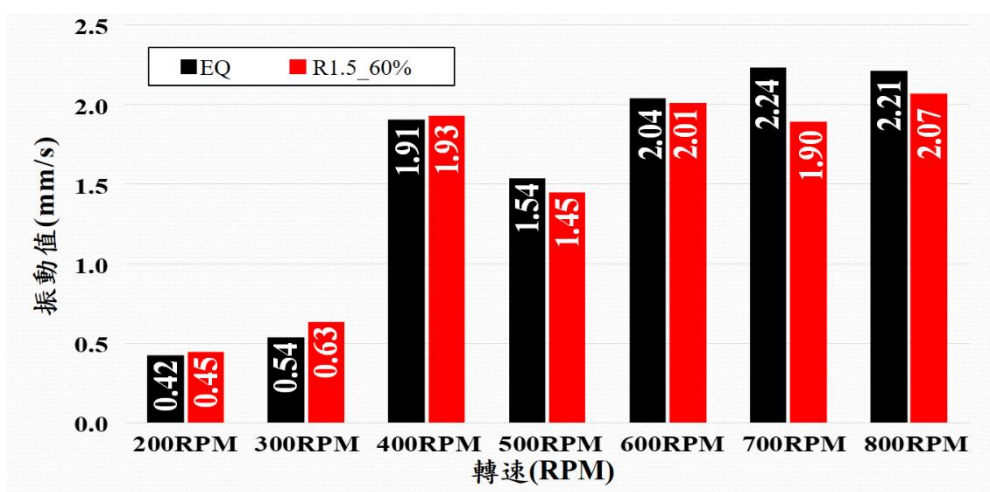
在 **Overall** 能量分析可注意到 500 RPM 以上皆有減振效果。推估在低轉速時，因為顆粒無法有效貼合壁面，因此產生部分掉落現象，此現象將會產生額外的振動值。



圖十、驗證顆粒減振效果 RMS 值分析



圖十一、驗證顆粒減振效果嚙合頻分析

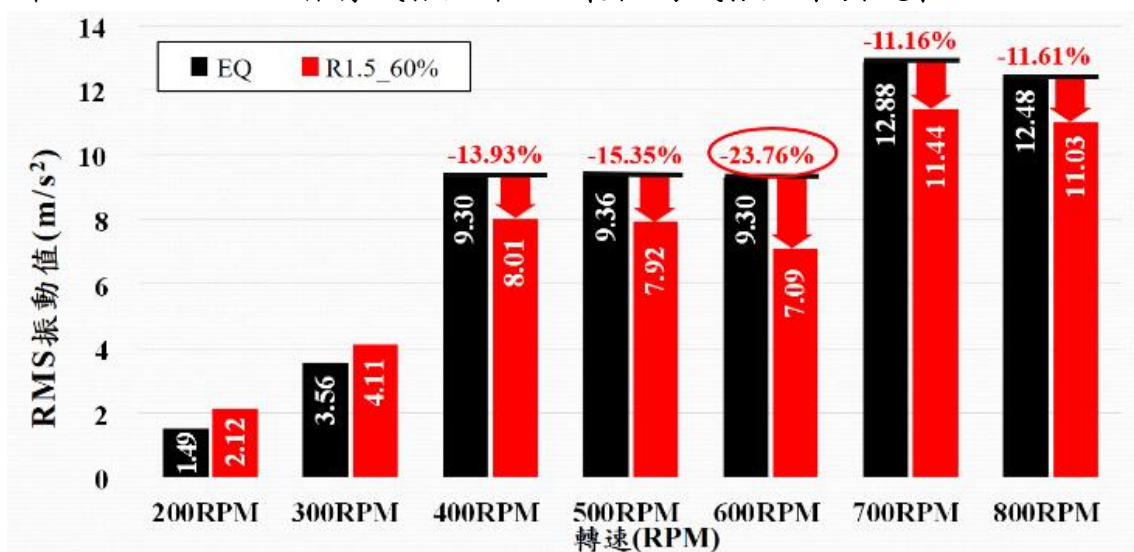


圖十二、驗證顆粒減振效果 Overall 能量分析

而經過上述分析可確認實驗機台具有與文獻相符的減振效果，並且我們將三種數據進行標準差計算後，得出 **RMS 值的標準差最小**，較為穩定，因此後續的變數分析，我們將皆以 RMS 值來進行分析。

5.2 轉速分析

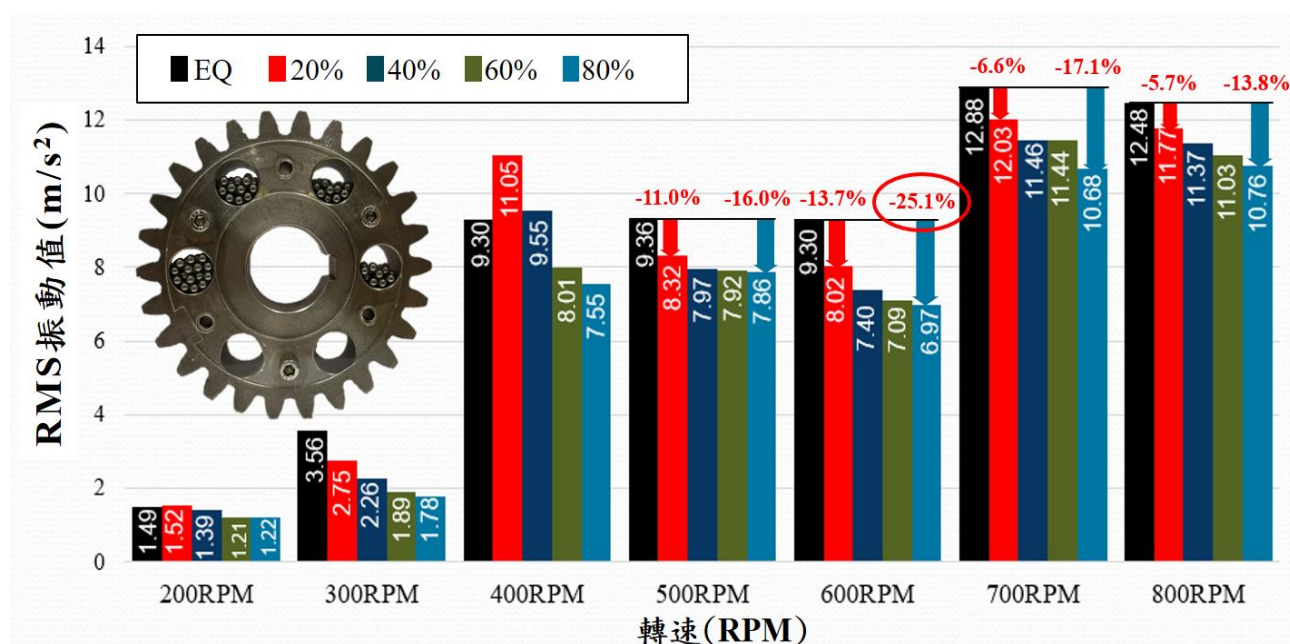
我們針對 200 至 800 RPM，間距為 100 的轉速進行分析，可看出在 400 RPM 以上皆有減振效果，而最佳的減振效果出現在 600 RPM。



圖十三、轉速分析數據結果

5.3 填充率分析

我們針對 20%、40%、60%和 80%，以及等效質量 5 筆數據進行比較，可得出在各填充率下皆有減振效果，而 **80%有最佳的減振效果**，推估是由於顆粒是透過摩擦來抑振，因此顆粒填充率越高，將有越好的減振效果。並且在 80%中，我們能注意到 600 RPM 又有最佳的減振效果，這也再次驗證了我們上一個轉速分析的結果。

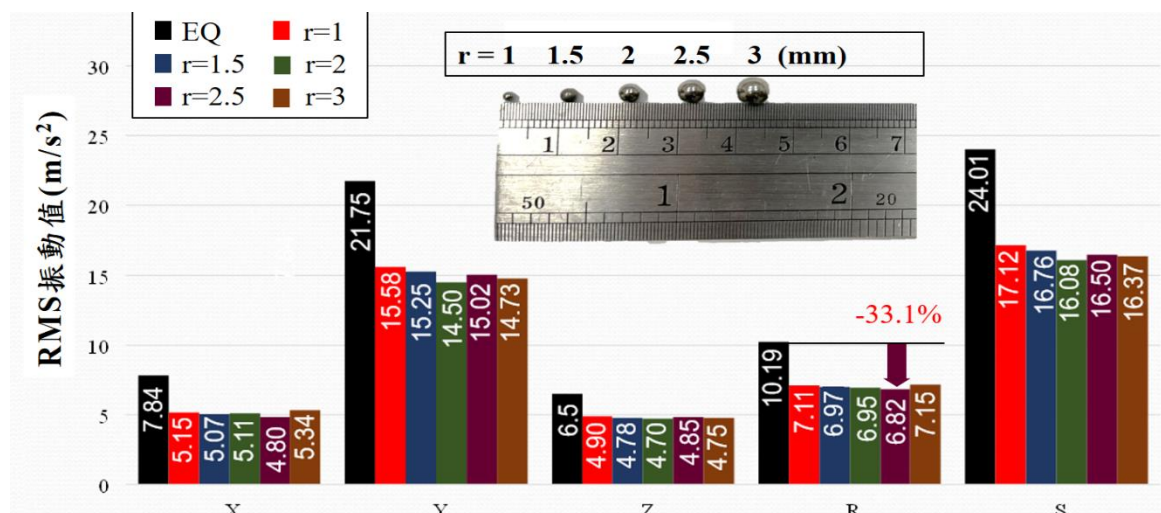


圖十四、填充率分析數據結果

5.4 粒徑分析

我們採用顆粒半徑為 1、1.5、2、2.5、3 mm，以及等效質量 6 筆數據進行比較，可得出在任何尺寸的粒徑下皆有減振效果，而**最佳的粒徑發生在 r=2.5 mm 時**，這也符合文獻所提及，孔徑與粒徑的比值

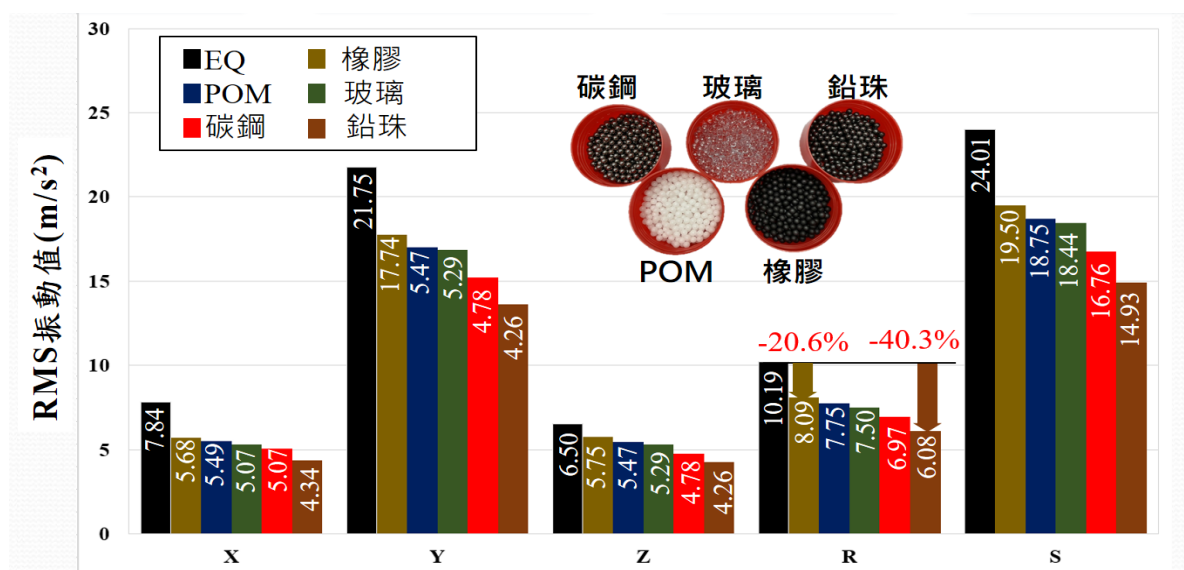
為 6:1 會有最佳的減振效果。



圖十五、粒徑分析數據結果

5.5 粒徑分析

我們採用材質有碳鋼、玻璃、鉛珠、POM 和橡膠，以及等效質量 6 筆數據進行比較，可從結果看出各材質皆有減振效果，而鉛珠具有最佳的減振效果，推估當顆粒材質密度越大時，將產生越大的離心力，進而增加摩擦力，使得減振效果增加。



六. 結論及未來展望

6.1 結論

我們確立了轉速、填充率、粒徑和材質，四種變數最佳的參數，並且可從實驗結果中，得到隨著我們變數的調整，減振效果有越來越明顯的趨勢。一開始採用文獻的參數設定為粒徑 $r = 1.5 \text{ mm}$ 、填充率 60 %、顆粒材質碳鋼，分析出在 600 RPM 時有 **23.8%** 的減振效果，而後修正了最佳填充率 80%，減振效果來到了 **25.1%**，接著再修正了最佳粒徑為半徑 2.5 mm，減振效果提升到了 **33.1%**，最後採用我們所有的最佳變數，也就是**轉速 600 RPM、填充率 80%、材質鉛珠、粒徑 $r = 2.5 \text{ mm}$** 的條件進行量測，可以得到 **40.3%** 的顯著減振效果。

6.2 未來展望

在確立了最佳的齒輪嚙合減振效果後，我們計畫將此結果應用到**轉子動平衡**上，希望能透過填充顆粒來取代傳統增加質量塊校正動平衡的方式，一方面可以達到轉子動平衡的校正，另一方面可以達到運轉時振動的抑制。

在本次實驗過程中，我們明顯感受到當齒輪嚙合和顆粒摩擦碰撞時，會產生巨大的噪音，因此我們未來期望能對於**噪音進行改善**，以利顆粒阻尼減振系統能應用到更多領域中。

七. 參考文獻

- [1] 吳育仁、藍仕成、翁武燕 (民 107)。應用多體動力學及離散元素法於具阻尼顆粒齒輪及軸承系統抑振之研究。取自「機械新刊」。
- [2] H.M. Lankarani, P. Nikraves (1990). "A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems," *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, Vol. 112, No. 3, pp. 369-376.
- [3] N. Ahmad, R. Ranganath, A. Ghosal (2017) . "Modeling and experimental study of a honeycomb beam filled with damping particles," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 391, pp. 20-34.
- [4] W.Q. Xiao, Y.X. Huang, H. Jiang, H. Lin, J.N. Li (2016). "Energy dissipation mechanism and experiment of particle dampers for gear transmission under Centrifugal Loads," *Particuology*, Vol. 27, pp. 40-50.
- [5] 吳育仁、李珍璽 (民 108)。具阻尼顆粒齒輪傳動系統之動力學模型建立與抑振量測實驗。取自「國立中央大學碩博士論文」。