雨刷之預應力分析與振動特性探討

王栢村[1] 黃凱昱[1] 王文志[1] 王裕豐[2] 許富翔[2] 劉慶豐[2]
[1]國立屏東科技大學 機械工程系
[2]山多力國際股份有限公司
wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

雨刷在與擋風玻璃接觸受到了輕微的法向力，以使在刷拭過程中能保持接觸。雨刷在刷拭過程可能引起不必要的噪音或振動是重要的議題。本文目的在探討雨刷與擋風玻璃接觸的靜態變形和應力分佈，以及雨刷的振動特性。首先介紹雨刷結構，並規劃探討雨刷之預應力和模態分析的分析方法。在初期研究，以線性和彈性限材料模型假設，構建雨刷包括骨架，橡膠條和關節的有限元素模型。預應力分析係考慮雨刷受法向力安置在擋風玻璃上，以求得雨刷變形和應力分佈，以及橡膠條沿著接觸表面上的反作用力。雨刷橡膠條反作用力以及應力分佈之較小變動量，推定為可減少可能的噪音或振動的較佳設計。也分別對骨架和雨刷進行理論模態分析（TMA），分別針對雨刷在自由邊界以及與擋風玻璃接觸時進行分析，以了解其振動特性，有助於對雨刷之設計考慮。結果顯示，在預應力狀態，雨刷的變形和反作用力可以合理的預測。也可得到可能會引發不必要振動之雨刷振動模態。本文針對雨刷的靜態和模態分析進行理論分析，尚需要實驗之驗證分析，然而，預測的靜態響應和振動模態，仍有助於雨刷的回饋設計。

關鍵字：雨刷、預應力、模態分析

1. 前言

現今汽車普遍使用電動刮水器(俗稱雨刷)，作用是清除附著在汽車玻璃上的雨、霧、灰塵、泥及去除各種會影響駕駛行車視線的物質，以確保駕駛的行車安全，而雨刷作動下產生振動噪音問題日益受到重視，其原因是駕駛員在行駛時會因為雨刷振動進而產生噪音造成駕駛人聽覺上的不舒適。

在先期研究當中，張等人[1]探討汽車刮水器摩擦引起的噪聲特性試驗分析中顯示，刮水器可分為換向噪聲及刮刷噪聲，換向噪聲及刮刷噪聲特性則會因為玻璃上水量的多寡有所影響。張與黃[2]探討雨刷器非線性黏滑振動及其對刮刷效果的影響，在不同刮刷速度下，黏滑現象的發生及振動特性具有複雜的非線性特徵。黃與陳[3]探討汽車單臂雨刷動態分析，利用 ADAMS 及 ANSYS 建構虛擬模型，進行雨刷與擋風玻璃之間的動態分析，研究發現，作動過程中的變形量均勻且對稱分佈於膠條兩側，應力及應變也呈現均勻分布現象。賴[4]針對雨刷貼附力流場分析研究探討，並假設不同風速及角度進行分析，推斷升力強度會影響雨刷脫離玻璃表面。林等人[5]探討雨刷系統流場的數值分析與研究，利用數值模擬方法觀察雨刷受空氣動力作用的狀態，結果顯示，雨刷桿高度與雨刷桿上方開口大小，影響雨刷系統的阻力與升力最大。

本文採用 ANSYS 有限元素分析軟體，針對傳統雨刷進行靜力分析，求得雨刷之變形及應力分佈；接著再進行有無邊界效應下雨刷之振動模態特性探討，並觀察有無預應力效應下自然頻率與模態振型是否會有明顯差異，未來將探討理論與實驗模態分析之比對驗證，以確認分析模型的等效性。

2. 整體雨刷結構與分析流程

圖 1 及圖 2 為整體雨刷示意圖與結構爆炸圖，主要是由接頭(連接搖臂)、大骨架及中骨架兩支、小翅四支、鋼板兩條(支撐膠條)及膠條所組成，元件與元件間由銷所固定，而雨刷之膠條分別被四個小翅上的夾爪所夾，雨刷全長 500.0mm，大骨架 289.8mm，中骨架 137.3mm，小翅 73.9mm，整體雨刷零件總表可見表 1 所示。本文利用 ANSYS 有限元素分析軟體針對傳統式雨刷進行自由邊界及固定邊界下之雨刷靜力分析與模態分析，如圖 3 雨刷理論分析流程圖所示，探討雨刷受壓力作用下所造成的變形和應力分佈及振動模態特性之探討，並擬定四項分析項目:

(1) 針對整體雨刷進行靜力分析，以求得雨刷之變形、反作用力及結構應力分佈。
(2) 針對雨刷之骨架部分進行模態分析，探討在無安裝雨刷膠條之自然頻率與模態振型。
(3) 針對整體雨刷進行模態分析，並以自由邊界下進行分析，觀察其自然頻率和模態振型。
(4) 針對整體雨刷進行模態分析，並在膠條上設定固定邊界，垂直玻璃面之方向 UY=0，以模擬實際邊界下，有無預應力效應之自然頻率及模態振型。

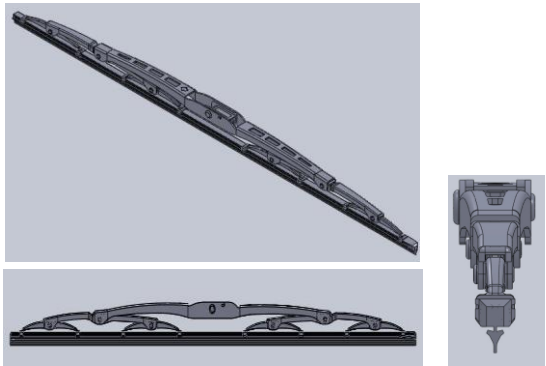


圖 1 整體雨刷結構示意圖

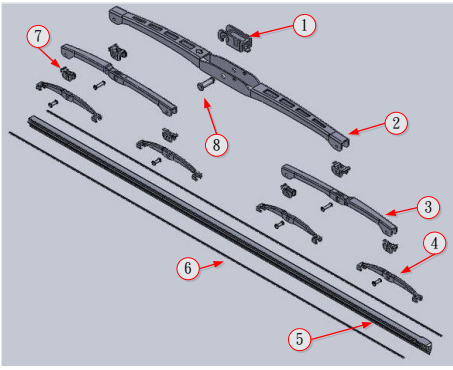


圖 2 整體雨刷結構爆炸圖

3. 整體雨刷結構靜力分析

本節討論整體雨刷結構之靜力分析，首先利用繪圖軟體繪製雨刷 CAD 圖檔，再將圖檔匯入 ANSYS 有限元素分析軟體中，建構雨刷之理論有限元素模型。擬定分析假設，各元件與元件接合以 bonded 方式，材料性質設定等向性(isotropic)材料，並考慮雨刷膠條與玻璃間接觸邊界，且在雨刷上方接受一法向力安置在擋風玻璃上，觀察雨刷的變形及應力狀態。

在元素選擇方面，除了鋼板及銷使用線性立方體元素 solid186，其餘皆使用線性角錐體元素 solid187，各元件之接觸分析設定，使用主動接觸元素(contac170)及被動接觸元素(target170)，針對雨刷結構特性，如圖 2 所示，由上而下，在上為主動接觸元素，下部元件為被動接觸元素，元素分割採 free mesh 方式進行元素分割，共有 243732 個節點、124348 個元素。位移限制條件主要在膠條底部，垂直玻璃面之 y 方向設定為 0，負荷條件在雨刷大骨上設定兩個方向向下之負荷，如圖 4 所示，以模擬搖臂施加於雨刷上之力，其大小總合為 10N，相當於每單力作用在雨刷上 130208.33(N/m^2)。

圖 5 為整體雨刷變形圖，雨刷在受力作用後會發生變形，而在膠條中可明顯觀察出有波浪之變形現象，此乃因為膠條為軟性材料，如表 1 所示，其楊氏係數相對其他零件小很多。圖 6 為整體雨刷膠條底部反作用力曲線圖，圖中顯示膠條底部反作用力位置與反作用力所形成曲線呈現左右對稱，但右端中骨翅反作用力略高，而反作用力較大區域在小翅與膠條接觸之部分，而造成膠條底部反作用力現象推斷為膠條底部與擋風玻璃之間的摩擦係數影響。圖 7 為整體雨刷膠條底部應力分佈圖，圖中顯示應力分佈與應力值之相對位置。第一主應力 S_1、第二主應力 S_2 及第三組應力 S_3 分佈結果可推算出麥西斯應力 Seqv。從圖 6 及圖 7 雨刷膠條底部反作用力曲線圖與應力分佈圖觀察，應力曲線與反作用力曲線有一致的趨勢，顯示雨刷膠條底部反作用力值的變動將影響雨刷膠條底部應力值大小的主要原因。

表 1 整體雨刷零件總表

編號	名稱	數量	密度 (kg/m^3)	楊氏係數 (GPa)	蒲松比
1	接頭	1	1380	3.4	0.3
2	大骨架	1	7981	242.8	0.29
3	中骨架	2	7981	242.8	0.29
4	小翅	4	7981	242.8	0.29
5	膠條	1	1000	0.0071	0.49
6	鋼板	2	8000	200.0	0.28
7	襯套	6	7981	242.8	0.29
8	銷	7	8000	200.0	0.28

備註:材料參數設定參考網路資訊

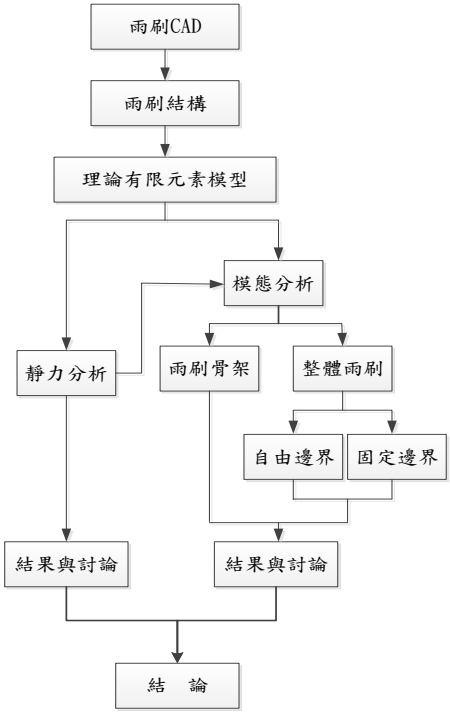


圖 3 雨刷理論分析流程圖

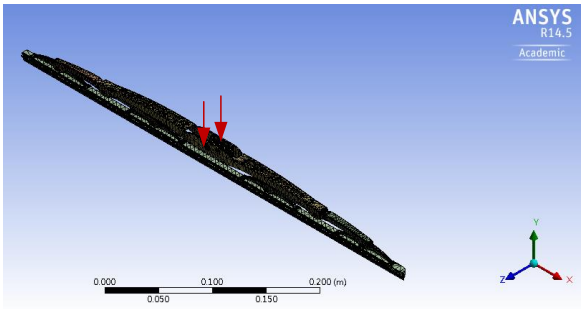


圖 4 整體雨刷有限元素模型

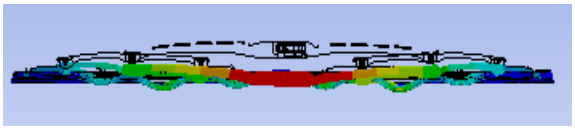


圖 5 整體雨刷變形圖

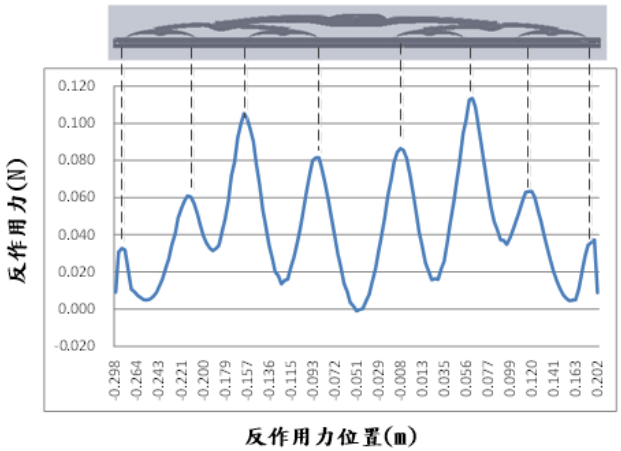


圖 6 整體雨刷膠條底部反作用力曲線圖

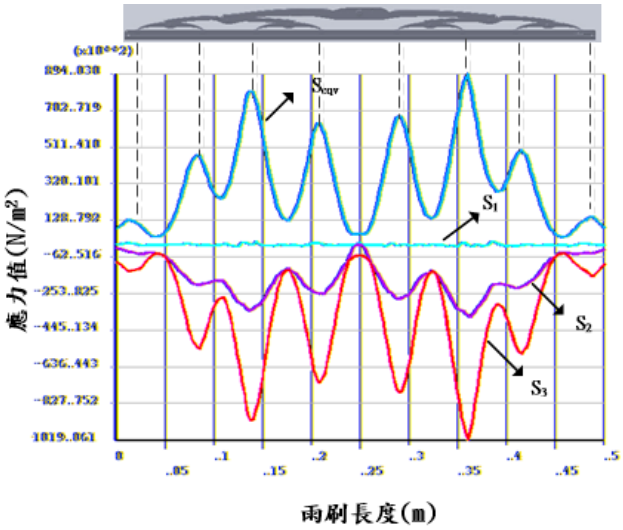


圖 7 整體雨刷膠條底部應力分佈圖

4. 雨刷模態分析

本節主要針對雨刷進行模態分析，分別對自由邊界及固定邊界下有無預應力效應之雨刷模態分析，並將雨刷之模態參數相互比較，觀察雨刷自然頻率與振動模態特性是否有關連性，後續可利用雨刷理論模態分析之結果與實驗模態分析進行模型驗證之比較，以確認雨刷理論模態分析的可行性。

4.1 自由邊界下雨刷模態分析

針對自由邊界下進行雨刷模態分析，主要是預先了解雨刷基本的自然頻率及振動特性，因此將分為雨刷骨架(不含膠條)及整體雨刷(含膠條)模態分析，並且不考慮雨刷預應力效應。雨刷材料參數設定如表 1 所示，各元件接觸設定係採用上節整體雨刷結構靜力分析之設定條件。第一部分為雨刷骨架(不含膠條)之模態分析，探討雨刷骨架(不含膠條)之自然頻率與振動特性。第二部分為整體雨刷(含膠條)模態分析，此次分析模型中加入雨刷膠條結構進行模態分析，探討整體雨刷的自然頻率與模態振型，並與前次雨刷骨架之模態參數進行比較，包括:自然頻率與振動模態特性，觀察雨刷之振動特性是否相同。

表 2 及表 3 為自由邊界下雨刷骨架與整體雨刷自然頻率總表，分別探討前 8 個模態，從表 2 及 3 中，整體雨刷(含膠條)相對於雨刷骨架(不含膠條)之自然頻率低，推測是受到膠條的質量效應影響，使得整體雨刷(含膠條)之自然頻率下降。物理意義方面，前兩個模態呈現 z 方向及 y 方向旋轉模態，圖 8 及圖 9 為自由邊界下雨刷骨架(不含膠條)與整體雨刷(含膠條)之 y 方向第一側向振動模態，兩者物理意義相同，主要在雨刷大骨上有兩個藍色之節點。

圖 10 為雨刷膠條等分圖，將膠條分為 7 個區段，目的為辨別膠條局部模態之物理意義，圖 11 為預應力下膠條 z 方向側向振動模態振型圖，物理意義解讀以+、-號代表振動方向，其表示為 1+,3-,4+,5+,7+，而造成膠條不均勻變化現象主要是受到膠條屬於軟性材質的影響。未來可利用雨刷骨架(不含膠條)及整體雨刷(含膠條)理論與實驗模態分析之比對驗證，以確認分析模型的等效性。

4.2 固定邊界下有無預應力之雨刷模態分析

從自由邊界下雨刷模態分析結果初步了解雨刷的基本振動特性後，為了使分析結果更貼近於實際雨刷之邊界條件，本節將雨刷膠條底部設定位移限制(垂直玻璃面之方向 UY=0)，模擬雨刷貼附玻璃表面之狀態。除了設定雨刷與玻璃表面位移限制條件外，另外需加入預應力效應，預應力係考慮雨刷上方受一法向力安置於擋風玻璃上，以模擬雨刷貼附於擋風玻璃之預壓力效應。預壓力係採用上節雨刷結構靜力分析之設定。

表 4 為固定邊界下有無預應力之雨刷自然頻率總表，表 4(a) 與 4(b)整體雨刷模態及膠條局部模態比較表，從表 4(a)中有、無預應力效應之自然頻率值相近，且自然頻率誤差百分比皆在±3%以內，表 4(b)預應力效應明顯比無預應力效應之雨刷模態分析呈現較多的膠條局部模態，且與自由邊界下雨刷模態分析中所產生的膠條局部模態之振動特性一致。圖 12 為預應力下膠條 z 方向側向振動模態振型圖，膠條之物理意義判讀已不適用於先前之理念(膠條均分成 7 等份)，而是將膠條分成 11 等份，並以+、-號代表振動方向。

表 5 為有無預應力之雨刷整體模態振型表，表中顯示物理意義皆呈現相同的振動模態特性，其中預應力之自然頻率明顯比無預應力高，唯有第一個模態自然頻率是小於無應力之條件。

表 2 自由邊界下雨刷骨架自然頻總表

mode	FEA(Hz)	物理意義
F-01	**44.4**	**z 方向旋轉剛體模態**
F-02	**77.7**	**y 方向旋轉剛體模態**
F-03	**230.4**	**y 方向第一側向振動模態**
F-04	**347.9**	**y 方向第二側向振動模態**
F-05	425.8	z 方向第一側向振動模態
F-06	505.5	z 方向第二側向模態
F-07	564.2	y 方向第一側向振動模態 (中間)
F-08	600.1	Z 方向第一扭轉模態

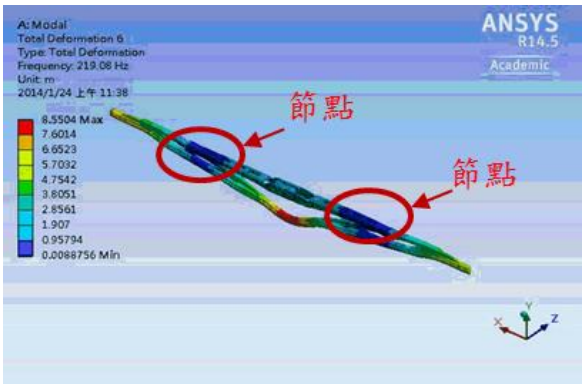


圖 9 自由邊界下整體雨刷之 y 方向第一側向振動模態

圖 10 雨刷膠條等分圖

表 3 自由邊界下整體雨刷自然頻率總表

mode	FEA(Hz)	物理意義
F-01	**24.5**	**z 方向旋轉剛體模態**
F-02	**51.1**	**y 方向旋轉剛體模態**
F-03	**219.0**	**y 方向第一側向振動模態**
F-04	254.2	膠條 z 方向側向振動模態 (1+,4-,7+)
F-05	**270.8**	**y 方向第二側向振動模態**
F-06	283.5	膠條 z 方向側向振動模態 (1+,4-,7-)
F-07	290.9	膠條 z 方向側向振動模態 (1+,3-,4+,5+,7+)
F-08	304.1	膠條 z 方向側向振動模態 (1+,3-,4+,5-,7-)

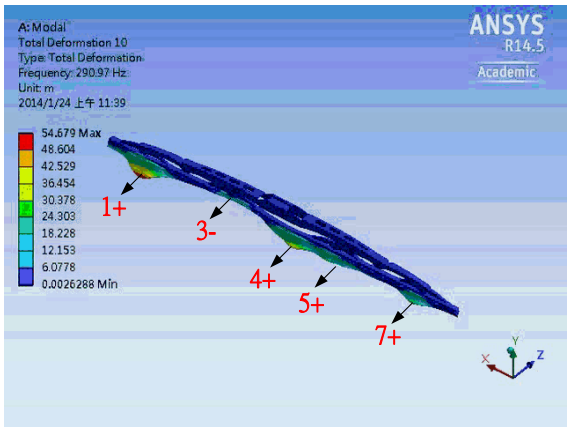


圖 11 預應力下膠條 z 方向側向振動模態振型圖

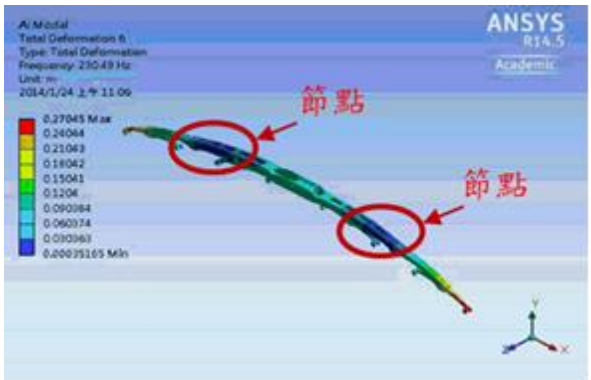


圖 8 自由邊界下雨刷骨架之 y 方向第一側向振動模態

表 4 固定邊界下有無預應力之雨刷自然頻率總表
(a) 整體雨刷模態比較表

無預應力		預應力			
mode	FEA (Hz)	mode	FEA (Hz)	物理意義	誤差 (%)
F-01	51.1	F-01	50.2	y 方向旋轉剛體模態	-1.79
F-02	189.0	F-02	192.0	y 方向第一側向振動模態	1.56
F-03	254.7	F-05	258.5	y 方向第二側向振動模態	1.47
F-09	401.0	F-18	411.1	y 方向第三側向振動模態	2.45

表 4 固定邊界下有無預應力之雨刷自然頻率總表(續)
(b)膠條局部模態比較表

無預應力			預應力		
mode	FEA (Hz)	物理意義 (z 方向側向振動)	mode	FEA(Hz)	物理意義 (z 方向側向振動)
F-04	261.0	1+,4-,7+	F-03	220.3	6+
F-05	300.3	1+,3-,5+,7-	F-04	251.8	4+,6-
F-06	308.0	1+,3-,4+,5-,7+	F-06	276.4	3+,5-,6+
F-07	339.5	1+,3+,5+,7+	F-07	294.7	2+,3+,5+,6-,7+
F-08	354.3	1+,2-,3+,5-,6+,7-	F-08	302.1	2+,3+,4-,5+,6-,7-
F-10	406.2	1+,2-,3+,6-,7+	F-09	313.3	2+,3-,4+,5-,6+,7-
--	--	--	F-10	323.6	1+,2-,4+,5-,6+,7-
--	--	--	F-11	339.9	2+,3-,4+,5-,6+,7-
--	--	--	F-12	345.4	1+,2-,3+,4-,5-,6+,7-
--	--	--	F-13	362.4	1+,2-,3+,4-,5+,6-
--	--	--	F-14	373.2	1+,2-,3+,4-
--	--	--	F-15	394.3	1+,2-,3+,4-,5,6-,7+
--	--	--	F-16	400.2	2+,3-,4+,5-,6+,7-
--	--	--	F-17	409.1	1-,2+,3-,4+,5-,6+,7-,8+,9-,10+,11-

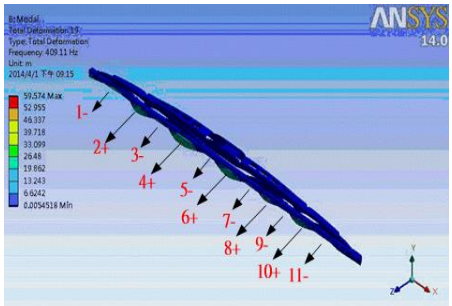
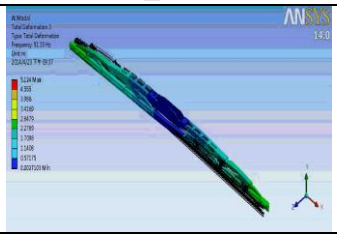
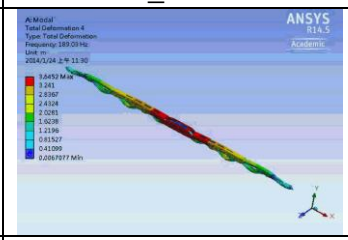
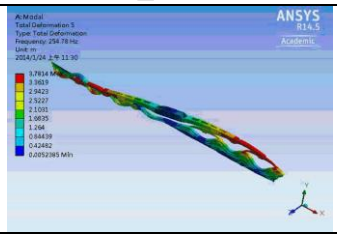
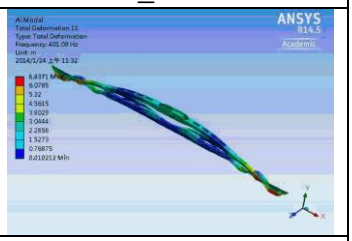
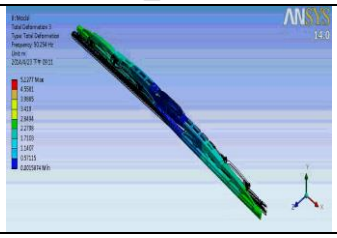
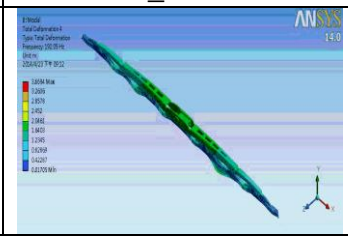
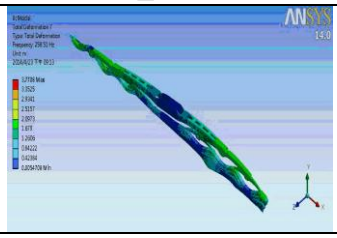
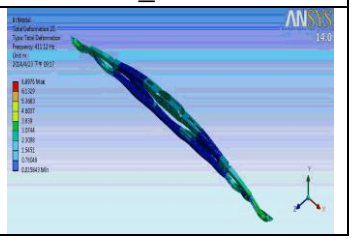


圖 12 預應力下膠條 z 方向側向振動模態振型圖

表 5 有無預應力之雨刷整體模態振型表

無預應力	F-01_51.1Hz	F-02_189.0Hz	F-03_254.7Hz	F-09_401.0Hz
				
預應力	F-01_50.2Hz	F-02_192.0Hz	F-05_258.5Hz	F-18_411.1Hz
				

5. 結論

本文針對雨刷之預應力分析與振動特性探討，其中考慮整體雨刷結構及雨刷之骨架。首先以雨刷進行靜力分析，可得膠條底部反作用力及應力值，接著以自由邊界與固定邊界下之雨刷模態分析，得到有無邊界下之模態參數，包括:自然頻率及振動模態特性，綜合以上討論，可得以下結論:

1. 從雨刷靜力分析中，雨刷膠條底部反作用力與應力值分佈大小主要出現在小翅和膠條接觸區域且呈現左右對稱，主要因為產生在膠條上之摩擦係數不同而造成不均勻現象，後續可經由雨刷結構之修正，使雨刷膠條底部反作用力與應力值分佈呈現均勻狀態，振動量大小可能有所改善。
2. 從骨架之模態分析、自由邊界及固定邊界下雨刷模態分析，皆出現 y 方向旋轉剛體模態與側向振動模態，如表 2~4 所示，此振動特性與實際雨刷作動情形相符合。在無預應力與有預應力雨刷模態中，自然頻率與振動模態特性有一致的趨勢，如表 5 所示，已順利達到模擬實際邊界之狀況。未來將探討理論與實驗模態分析之比對驗證，以確認分析模型的等效性。

6. 致謝

承蒙山多力國際股份有限公司提供傳統雨刷 CAD 圖檔，以利本次順利研究雨刷之預應力分析與振動模態特性探討。

7. 參考文獻

[1]. 張立軍，徐飛，王小博，2010，「汽車刮水器摩擦引起的噪聲特性試驗分析」，*同濟大學學報*，第38卷，第7期，第1062-1068頁。
[2]. 張立軍，黃萌，2012，「雨刷器非線性黏滑振動及其對刮刷效果的影響」，*同濟大學學報*，第40卷，第9期，第1376-1381頁。
[3]. 黃榮文，陳建良，2013，「汽車單臂雨刷動態分析」，*車輛工程學刊*，第10期，第103-114頁。
[4]. 賴文光，2013，「雨刷貼附力流場分析研究」，*中華民國第十八屆車輛工程學術研討會*，屏東，論文編號:A2-023。
[5]. 林秋豐，洪敏發，曾全佑，蔡建雄，戴昌賢，藍俊嘉，2005，「雨刷系統流場的數值分析與研究」，*技術學刊*，第20卷，第4期，第325-332頁。

.

Pre-stressed Analysis and Vibration Characteristic Study for a Wiper

Bor-Tsuen Wang[1], Kai-Yu Huang[1], Wen-Chih Wang[1], Yu-Li Wang[2], Fu-Fasiang Hsu[2], Ching-Feng Liu[2]
[1]Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and Technology
Pingtung, 91201, Taiwan
[2]Sandolly International Co. Ltd.

Abstract

The wiper in contact with the windshield is subject to a slight normal force to remain the contact during wiping process. The wiper in operating condition probably incurring unwanted noise or vibration is of concern. This work aims to examine the static deformation and stress distribution of the wiper in contact with the windshield as well as the wiper's vibration characteristics. The wiper structure is introduced, and the analytical approach in studying the pre-stressed condition and modal analysis on the wiper is laid out. For the preliminary study, the linear and elastic material model is assumed to construct the finite element model of the wiper, including the skeleton, rubber strip and joints. The pre-stressed analysis of the wiper rested on the windshield is conducted to obtain the structural deformation and stress distribution as well as the reaction force along the rubber strip on the contact surface. The smaller variation of the reaction force and the rubber strip stress is presumed to be better design for reducing the possible unwanted noise or vibration. Theoretical modal analysis (TMA) is also performed on the skeleton and the wiper, respectively. In particular, the wiper in free boundary condition and rested on the windshield are also studied to examine their vibration characteristics for wiper design consideration. Results show the wiper's deformation and reaction force in the pre-stressed condition can be reasonably predicted. Some vibration modes that may incur the unwanted vibration can also be identified. The work shows the pre-study for theoretical static and modal analysis on the wiper. Experimental work should be followed to validate the analytical results. However, the predicted static response and vibration modes can be useful for the feedback design of the wiper.

Keyword: wiper, pre-stressed , modal analysis