

應用 Tosca 及 Abaqus 於電動車傳動系統結構輕量化設計

陳柏堯¹, 黃礪德²

工業技術研究院 機械所 精密傳動技術部 工程師

¹E-mail: PWChen@itri.org.tw

摘要

本論文以工業技術研究院 機械與機電系統研究所 精密傳動技術部門開發之電動車傳動系統為研究對象，針對其傳動箱結構進行輕量化設計。使用有限元素軟體Abaqus建立傳動系統模型，並透過非參數最佳化分析軟體Tosca進行拓樸最佳化設計。本論文藉由文獻回顧探討結構輕量化設計與可能發生的共振問題，建立一套完整的設計流程。本流程整合結構靜態與動態分析及拓樸最佳化設計方法，使結構同時滿足強度、剛性及自然頻率的目標需求，以改善電動車傳動系統結構因輕量化可能引起的強度及振動問題。

關鍵字：電動車、傳動系統、有限元素法、拓樸最佳化方法

ABSTRACT

Weight reduction of gearbox is an effective approach for electrical vehicles to extend their driving range. Nevertheless, weight reduction will result in reduction of the stiffness of structure, which makes resonance excited that drops off the efficiency of transmission, life time of parts, and passengers comfort. Therefore, this thesis brings up a brand new method, which optimize the structure of transmission in electric vehicles. By using Abaqus finite element analysis software to build the electric vehicle transmission model. This design strategy also includes the Tosca topology optimization, and it can achieve the design goals in strength, stiffness, and natural frequency simultaneously so that we can avoid resonance to improve the transmission efficiency.

Keywords: Electric vehicle, Transmission, Finite element method, Topology optimization method

一、緒論

各國政府為減少車輛排放的污染，紛紛制定車輛的能耗與排放相關的標準規範，且標準逐年嚴苛。根據 iCCT 於 2012 年 6 月的一份報告指出，2015 年時在 NEDC 行車型態下，各國油耗標準皆必須符合 8 公升燃料 100 公里續航力的要求，且逐年更趨嚴苛。

為了符合法規要求和因應日漸嚴苛的油耗標準，各大車廠紛紛投入車輛新能源的開發。其中又以轉換效率高且發展技術相對成熟的電動車成為主流的解決方案。電動車相對於內燃機車輛的絕對優勢在以下兩點：第一點，馬達相對於引擎有極佳的能量轉換效率；第二點，馬達與減速齒輪箱的構造皆較引擎和變速箱簡單，更容易達成體積小與輕量化以減少佔用的底盤空間和節能

的目標。由於第二點的原因，車廠和車用零件供應商在投入電動車研發時，如何將電動車的動力系統輕量化成為一大發展趨勢。

本論文之研究對象為工業技術研究院 機械與機電系統研究所 精密傳動技術部門開發之電動車傳動系統。首先使用有限元素軟體 Abaqus 建立有限元素模型，並透過非參數最佳化分析軟體 Tosca 進行拓樸最佳化設計，使結構同時滿足強度、剛性及自然頻率的目標需求，以改善結構因輕量化可能引起的強度及振動問題。

二、傳動系統模型建立

電動車傳動系統模型建立方法通常依據驅動馬達法蘭搭接面及車輛鎖固點為空間限制邊界條件，及使用齒輪傳動設計分析軟體分析不同工況對於傳動系統結構的負

載，進行傳動系統初步設計，及有限元素分析的負載與邊界條件進行結構靜態與動態分析。初步設計傳動殼體結構肋的常用方法為分別以三軸的軸承座為中心延伸至殼體螺栓鎖固點，但此種設計容易過度設計結構肋，增加不必要的結構及重量，因此，本論文進行傳動系統結構優化設計，透過拓樸最佳化設計方法，輔助設計傳動殼體結構，使結構同時滿足強度、剛性及自然頻率的目標需求，以改善結構因輕量化可能引起的強度及振動問題。

三、傳動系統結構分析

本論文使用有限元素軟體 Abaqus 建立傳動系統模型及進行結構應力、動態分析。

3.1 應力分析

為了節省建模時間，使用四面體元素 C3D10 作為網格類型。在「Property」設定傳動系統結構的材料為鋁；在「Step」設定「Initial」中的「Static, General」功能；「Load」設定負載為齒輪嚙合時各軸承座的受力大小及方向，邊界條件設定為傳動系統鎖固於車架上之鎖固點位置。

3.2 動態分析

為了節省建模時間，使用四面體元素 C3D10 作為網格類型。在「Property」設定傳動系統結構的材料為鋁；在「Step」使用「Linear perturbation」中的「Frequency」功能，擷取齒輪箱 1~5000Hz（齒輪嚙合激振頻率最高為 5000Hz）範圍內的所有自然振動頻率；「Load」設定為 free（自由振動）。

四、傳動系統結構優化設計

本論文應用非參數最佳化分析軟體 Tosca 及有限元素分析軟體 Abaqus 於電動車傳動系統，本流程整合結構靜態與動態分析及拓樸最佳化設計方法，使結構同時滿足強度、剛性及自然頻率的目標需求，以改善電動車傳動系統結構因輕量化可能引起的強度及振動問題。

首先將傳動箱體結構分為左側跟右側，分別進行結構分析，求取最大應力及第一自然頻率，做為拓樸最佳化設計之限制條件，並於傳動箱體左側及右側結構建立拓樸設計區域(圖 1)，銀色為需保留的幾何非設計區域，黃色為拓樸設計區域。拓樸設計區

域內將針對結構應力進行拓樸最佳化以求得最小的結構應變能，藉由去除結構受應力較小的材料，進而達到滿足限制條件的最輕量化結構。

建立設計區域後，進行靜態受力分析與自然頻率分析，確認初步設計的拓樸設計區域是否符合拓樸最佳化之限制條件。若不符合限制條件，則需重新定義設計區域及非設計區域，直到符合所有限制條件。

確認設計的拓樸設計區域符合限制條件後，於進行拓樸最佳化之前，需明確的定義最佳化設計三大要素，也就是 1.設計變量(可以改變什麼?) 2.目標函數(想要得到的是什麼?) 3.限制條件(必須保證哪些性能指標?)，本論文之最佳化三大要素定義如下所示：

- 1.設計變量：設計區域內元素的材料密度。
- 2.目標函數：傳動系統結構應變能最小。
- 3.限制條件：限制傳動箱結構重量為設計區域 1%及第一自然頻率大於原始版本。

拓樸最佳化方法採用連續材料密度分佈法(Continuous material density parameterization)，將每個元素的材料密度當作設計變量，在 0~1 之間連續變化，經由最佳化的設計，變數越接近 1 代表此元素保留，接近 0 將元素去除。經由拓樸最佳化後得到的最佳化材料密度趨勢如(圖 2)所示。

五、結論與未來展望

5.1 結論

本論文應用非參數最佳化分析軟體 Tosca 及有限元素分析軟體 Abaqus 建立一套電動車用傳動箱體結構的優化設計流程，可以同時滿足輕量化以及提升剛性與自然頻率，達到提高效率與增加續航力的效果。優化版本比原始肋版本重量減輕 17%、第一自然頻率提升 27%、結構最大應力降低 10%；優化版本比原始無肋版本重量稍增 2.8%、第一自然頻率提升 70%、結構最大應力降低 41%(表 1)。

5.2 未來展望

本論文提出的最佳化設計流程可以有效地提高剛性與減輕重量，改善結構因輕量化可能引起的振動問題。但由於受限於現有馬達與差速器等元件之規格限制，導致尚無法達到真正的最適合電動車的設計。未來電

動車動力系統可能將會逐漸朝向分散式的電動動力系統，甚至進一步實現輪鼓馬達的驅動方式，將不再需要差速器或是傳動軸等傳統元件；然而，若未來電動車動力元件採用輪鼓馬達，對於輕量化與體積最小化的要求將會更為嚴苛。

為了提高馬達的效率與減小體積，目前馬達的技術朝著超高轉速馬達的方向發展，再搭配上高減速比的減速齒輪來達到扭力需求。如何在有限的體積與重量限制下達到更高的減速比將是未來電動車傳動系統需要克服的難題，同時衍生出高減速比及輕量化的狀況下，所產生的散熱困難問題，因此將來可以再納入結構外殼的散熱設計最佳化，以及齒輪配置與參數最佳化，使整體的設計流程更趨完善，達到更優秀的性能與更低廉的成本。

六、誌謝

本研究蒙工業技術研究院機械與機電系統研究所精密傳動技術部門（計畫編號H353CE1100）以及士盟科技公司提供技術協助，使本計畫得以順利進行，特此致謝。

七、參考文獻

- [1] Global Comparison of Light-Duty Vehicle Fuel Economy/GHG Emissions Standards, the International Council of Clean Transportation, 2012
- [2] M. Åkerblom and M. Pärssinen, “A Study of Gear Noise and Vibration”, Volvo Construction Equipment Components, 2002
- [3] Mats Henriksson, “On noise generation and dynamic transmission error of gears”, Royal Institute of Technology School of Engineering Sciences, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, 2009

八、表格

	原始版本	無感版本	優化版本
重量(kg)	11.79	9.56	9.83 比原始版本-17%重量
基頻 (Hz)	1189	887	1508 比原始版本+27%基頻 比無感版本+70%基頻
壓力 (MPa)	118.8	182.6	107.2 比原始版本-10%壓力 比無感版本-41%壓力

表 1 優化設計比較

九、圖片

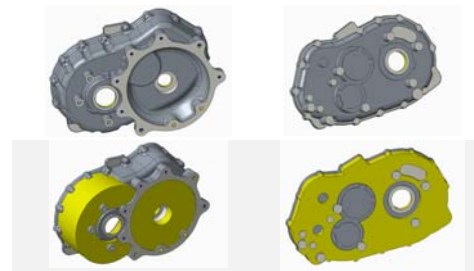


圖 1 建立設計空間

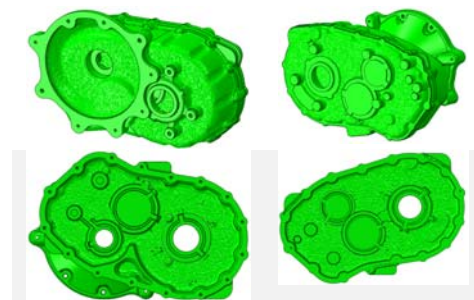


圖 2 拓模優化殼體

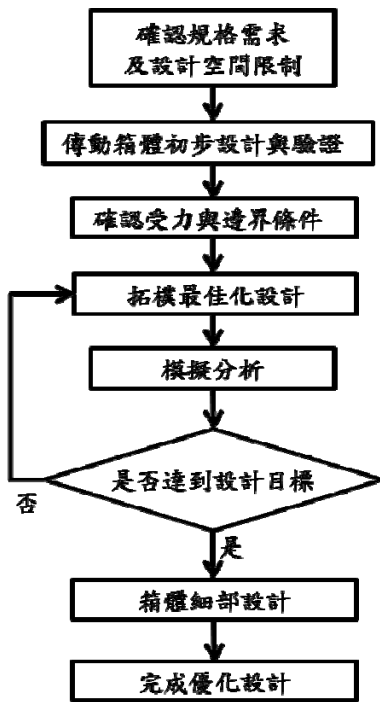


圖 2 傳動箱體結構設計流程