

电动车电池搭载结构强度优化设计分析

杨伟良¹, 吴建勋²

(1.财团法人车辆研究测试中心, 彰化县, wlyang@artc.org.tw; 2.财团法人车辆研究测试中心, 彰化县, rebox_wu@artc.org.tw)

摘要: 本文主要探讨电动车开发过程中, 配合动力系统改变, 针对电力来源之电池模块搭载结构, 以有限元素方法进行结构强度设计研究。本研究采用 HyperWorks/Optistruct 之尺寸优化(Size Optimization)与形貌优化方法(Topography), 搭配车辆行驶各种路面时, 可能遭遇在纵向、侧向及垂直向之最大 G 值静力工况, 对搭载电池之平板结构, 以结构加劲(Bead)方式进行优化设计分析, 并以动态显式(Explicit)分析软件 LS-Dyna, 进行电池搭载结构之高 G 值动态冲击仿真分析, 以确保电池搭载结构于车辆碰撞过程中不致破坏。本研究结果显示先以静力工况进行 Bead 之形貌优化设计分析, 再以尺寸优化(Size Optimization)设计分析, 可获得符合基本结构强度要求且较轻的结构设计, 之后再另以较耗时之动态工况确认电池搭载结构冲击强度, 可缩短整体优化设计分析所需的时间, 此方法可供未来电池搭载结构设计分析参考使用。

关键词: 电动车, 优化, 减重

1 引言

近年来, 随着油价不断高涨, 人们在车辆运输的产业中, 不断地寻求可能的替代能源, 伴随着环保意识的抬头, 电动车富有节能与环保的特性, 已然成为大家致力的发展重点。配合电动车的开发, 传统的发动机与油箱, 预期将逐步被马达与电池所取代, 然而目前在电池技术的发展上, 仍有诸多的瓶颈限制, 往往在追求更大的动力及续航力时, 必须使用大量的电池储存电源, 也因此造成车载空间的压缩与整车重量的增加, 为解决电池的存放问题, 一般设计会在车辆底板或后行李箱区域, 向下延伸搭载空间。本研究即在探讨如何设计向下延伸之搭载结构能够提供足够之承载刚性, 又能够以较简便的方式建立搭载结构, 以减轻车辆的重量负担。

2 电池搭载结构设计流程

电池搭载结构一般会先以整车动力需求来确定所需搭载电池的空间及重量, 在确定需求后, 电池搭载系统的设计空间便可确立下来, 而开发过程中, 为避免电池模块与其它物体碰触或撞击, 一般会以封闭的方式将电池组包覆起来, 因此多会采用平板结构作为搭载结构设计, 再依据强度需求, 采用适当板厚之钢板搭建或角铁补强, 来确保搭载结构之安全性。

由图 1 所示, 流程一为搭载结构较简易之开发流程, 在获得设计空间及载重信息后, 便可依据车辆于一般行驶道路之需求, 定义强度及刚性条件, 并利用尺寸优化手法来增加或减少板厚, 以求得符合设计需求之电池搭载结构结果 A。又由于电池模块为提供马达足够电力来驱动车辆, 因此电力输出多为大电流之设计, 因此必须再经过结构非线性之动态冲击测试, 以确保车辆在任何严苛之碰撞条件下, 电池搭载结构仍能提供足够之安全性, 避免电搭载结构损坏而造成电池模块外露或损坏之危险。

由于平板结构在承受 out-of-plane 载荷时, 其结构刚性甚低, 因此流程二加入形貌优化手法, 便是希望藉由加 bead 的方式, 来增加相同厚度之平板结构于各方向之结构刚性, 以减少搭载结构之设计重量。在后续的分析中, 将比较流程一与流程二之设计结果差异。

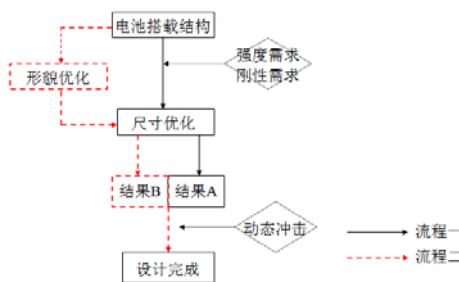


图1 电池搭载系统开发流程

3 有限元素模型设定与分析

3.1 有限元素模型与工况设定

分析模型主要以电池之搭载结构为主,采用薄壳(shell)元素进行仿真,元素尺寸采用 10mm,电池组则运用质量点(comm2)进行简化模拟,此外,另以刚体(rbe2)元素来连结质量点与底板锁附点,作为电池组之传力设定;而在边界拘束部份,则假设车辆底板与电池搭载结构上缘紧密接合,且接合周围不产生变形,因此拘束搭载结构上缘节点之所有自由度,最终之有限元素模型如图 2 所示。

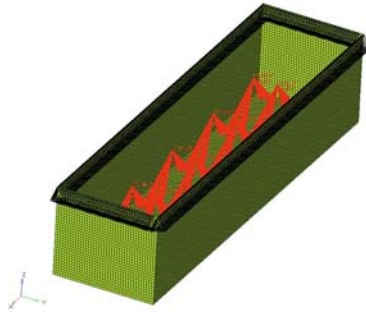


图2 电池搭载结构有线元素模型

本电池搭载结构长×宽×深为 1500mm×390mm×350mm,模型板材部份采用 SS400 之钢板,经真实应力应变转换后,该材料之降伏应力为 245Mpa,极限应力为 480MPa,极限应变为 0.18;搭载之电池组共 20 个,每个电池组重量为 5kg,总重 100kg。

配合电动车开发,整车需进行相关之运动性能评估,而搭载结构则必须通过各种行驶状态可能发生之 G 值静力工况,本研究将考虑整车经过各式路面所产生之垂直力、转向所造成之侧向力以及煞车所需承受之前向力,分别为 3G、1G 及 2G,此外亦设定搭载结构第一模态需高于 30Hz,以避免行使过程产生之共振行为,最后再以动态冲击确认搭载结构强度。

3.2 尺寸优化分析

完成搭载结构相关有限元素模型外观定义后,首先以流程一之方法,运用 HyperWorks/Optistruct^[1]之尺寸优化功能,来进行原设计之板厚确认。因此定义搭载结构左、右、前、后及底板部份之板厚为设计变量,变量范围为 0.5mm~4mm,初始值为 0.5mm,而在静力工况拘束条件部份,避免车辆行使可能造成周围板件晃动而撞击或扯动电池模块相关本体或管路,因此限制左右、前后及底板位移值分别需小于 3mm、2mm 及 5mm,并且每个板件在相关静力工况下,不应产生永久变形,因此须限制其应力值需小于降伏强度×0.8(安全系数),即为 196MPa,在模态分析工况中,亦设定第一模态需大于 30Hz 作为拘束条件,最后以最小重量作为优化目标。

搭载结构之初始设计如图 3,在各静力工况中,以垂直向 3G 载荷之分析结果最为严苛,观察图 4 之等效应力应变图可知,红色区皆已超过 196MPa。图 5 为搭载结构初始设计之第一模态图,自然频率为 2.5Hz,远低于 30Hz。尺寸优化分析后的结果,如图 6 所示,左、右、前、后及底板部份之板厚分别为 0.68mm、0.67mm、0.55mm、0.55mm 及 3.05mm,图 7 显示结构之垂直变形及应力结果已大幅下降至 0.56mm 及 96.4MPa,搭载结构之第一模态振型如图 8 所示,第一模态自然频率为 30Hz,符合设计需求。依据分析结果,采用可行之板厚设计应为:左、右、前、后及底板厚度分别为 0.7mm、0.7mm、0.6mm、0.6mm 及 3.1mm,搭载结构重量则为 20.83 公斤。

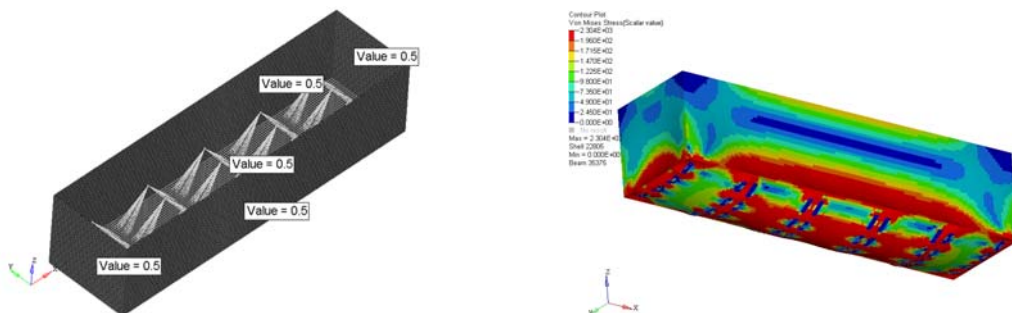


图3 搭载结构初始设计(厚度=0.5mm)

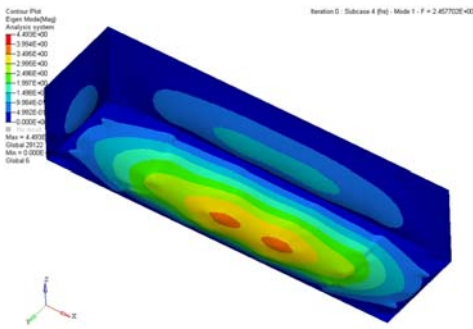


图5 初始设计之第一模态图(第一模态自然频率=2.5 Hz)

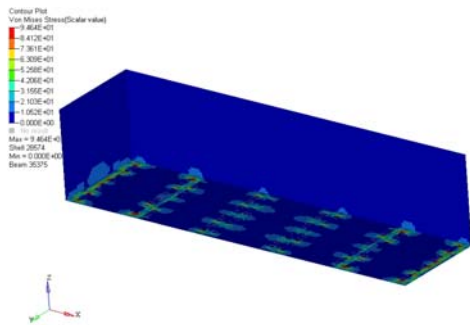


图7 尺寸优化设计之垂直3G工况等效应力分布图

图4 初始设计之垂直3G工况等效应力分布图(红色区超过196MPa)

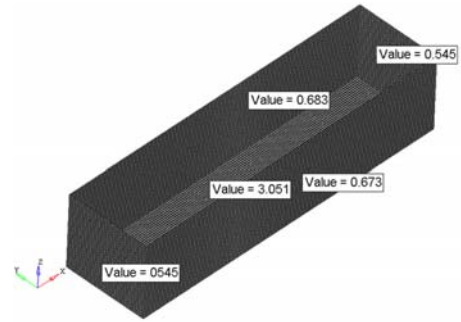


图6 搭载结构尺寸优化结果

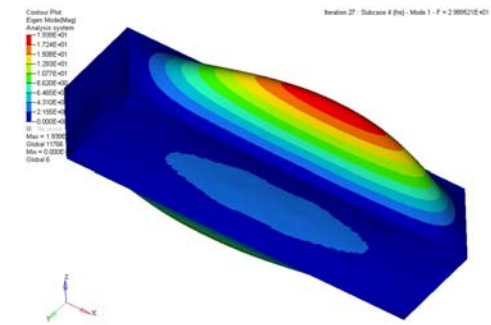


图8 尺寸优化设计之第一模态图(第一模态自然频率=30Hz)

3.3 形貌优化搭配尺寸优化分析

完成流程一之尺寸优化后, 另以流程二进行电池搭载结构优化分析。分析仍使用 3.1 节所建构之有限元素模型, 但使用 0.7mm 作为形貌优化设计之初始设计板厚, 工况部份仍旧以相关静力工况及模态条件, 来评估结构强度及刚性结果。此外, 形貌优化必须定义出设计区域, 本分析中, 将相同受力特性之前板与后板, 以及左右两侧板分别规划为两个设计区块 I 及 II, 底板则另外规划为第三个设计区块 III, 设计区块之 bead 设计参数为宽度最小为 40mm, 深度最深为 12mm。

形貌优化之分析结果如图 9 所示, 结构主要增加 bead 位置为底板区域, 对结构最严苛之垂直 3G 受力工况之形貌优化前后应力分布结果, 如图 10 所示, 在相同厚度 0.7mm 状态下, 经过形貌优化后之结构垂直变形及应力结果已由 29.1mm 及 1185MPa 大幅下降至 0.6mm 及 99.5MPa, 搭载结构之第一模态振型如图 11 所示, 第一模态自然频率由 4.0Hz 提升为 30Hz, 符合设计需求。依据分析结果采用可行之板厚设计应为: 左、右、前、后及底板厚度皆为 0.7mm, 搭载结构重量则为 10.71 公斤。

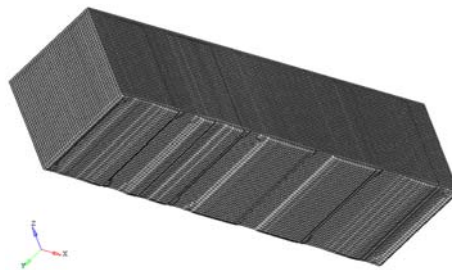


图9 形貌优化结果示意图(等厚 0.7mm)

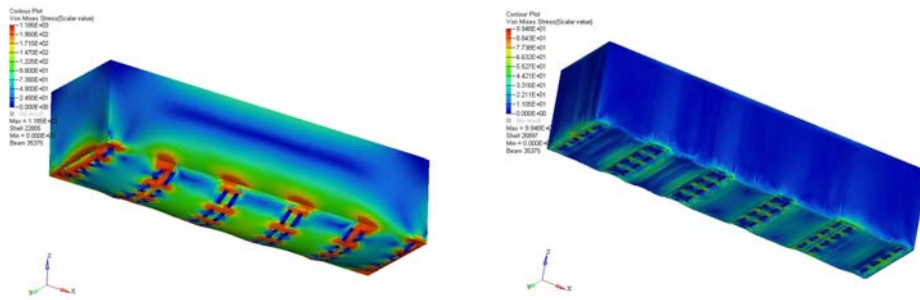


图 10 形貌优化前(左图)后(右图)之垂直 3G 工况等效应力分布图(scale=3)

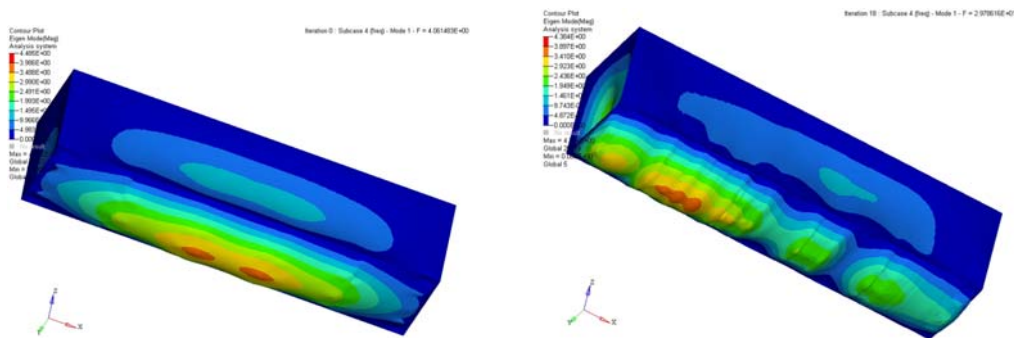
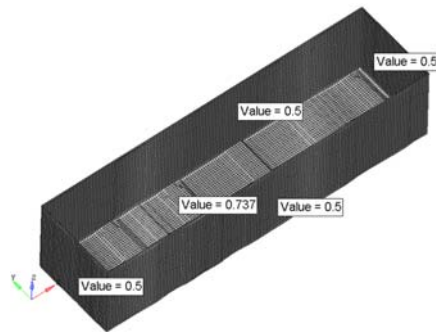


图 11 搭载结构形貌优化前(左图)后(右图)结构第一模态图(scale=30)

经由形貌优化后之结构，将继续采用尺寸优化来进行结构可能之减重设计，而相关之工况及变量则沿用 3.2 节之设定，经由尺寸优化后之厚度结果如图 12 所示，前、后、左及右侧板厚下降至 0.5mm，底板板厚增加为 0.74mm，垂直向 3G 载荷分析之等效应力结果分布图如图 13 所示，最大等效应力为 105MPa，搭载结构之模态振型如图 14 所示，第一模态为 30Hz，符合设计需求。依据分析结果采用可行之板厚设计应为：左、右、前及后板厚度皆为 0.5mm，底板厚度为 0.8mm，搭载结构重量则为 9.08 公斤。



如图 12 搭载结构形貌优化后之尺寸优化结果

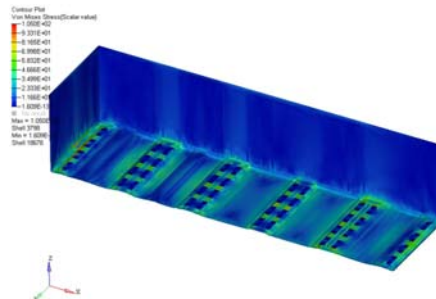


图 13 搭载结构形貌优化后之尺寸优化垂直 3G 工况等效应力分布图

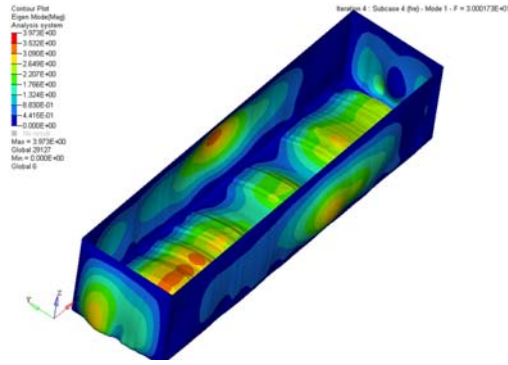


图 14 搭载结构形貌优化后之尺寸优化第一模态图(scale=30)

3.4 高 G 值动态仿真分析

由流程一及流程二分析结果比较可发现，流程二之形貌优化后再进行尺寸优化设计流程，可获得较好之减重效果的搭载结构设计，因此高 G 值之动态仿真分析将以流程二所设计出之电池搭载结构，以显示动态有限元素分析软件 LS-DYNA^[2]进行动态冲击分析。

分析将采用峰值为 30G 之加速度曲线，如图 15 所示，模拟整车碰撞产生之减速度结果。冲击模拟则比照加速型台车试验之环境设定，使用该曲线加载加速度于电池搭载结构上缘之所有节点之 X 方向，评估冲击过程中，结构是否产生破坏。

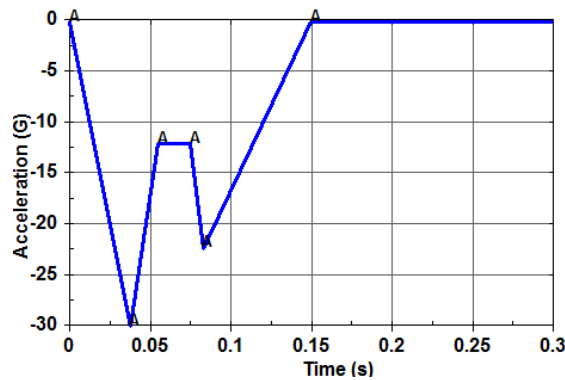


图 15 加速度曲线图

分析结果如图 16 所示，在冲击过程中，结构最大等效应力值为 287.9MPa，低于材料之极限强度，因此设计流程二所减重优化之电池架搭载结构仍可符合设计要求。

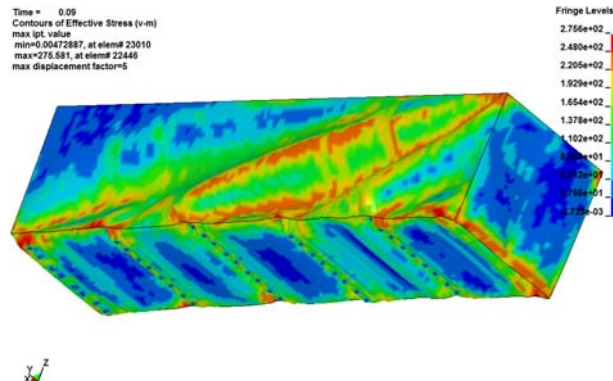


图 16 电池搭载结构冲击分析之等效应力分布图 (scale=5)

3.5 优化分析结果

将本文所探讨之优化分析结果汇整如表 1 所示，可发现形貌优化后再进行尺寸优化之分析结果，可有效将搭载结构之设计重量由 20.83kg 减少至 9.08kg，减重达 11.75 公斤。

表 1 优化结果表

优化手法	厚度(mm)					工况响应			重量 (kg)
	左板	右板	前板	后板	底板	垂直向 3G 工况		第一模态 (Hz)	
						最大等效应力 值(MPa)	Z向最大位移 值(mm)		
尺寸优化	0.7	0.7	0.6	0.6	3.1	96.4	0.56	30	20.83
形貌优化	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	99.5	0.60	30	10.71
形貌+尺寸优化	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	105	0.59	30	9.08

4.结论

本文分析结果可得知，分别使用流程一及流程二所产出之电池架搭载结构，结果 B 可比结果 A 少 11.75 公斤，减重比达 56%，因此，本次设计将形貌优化纳入分析考虑可有效加强结构刚性，并可获得较好的轻量化设计，再经由动态冲击分析验证后，本设计亦通过所设定之设计要求。

参考文献

- [1] HyperWorks/Optistruct user's manual
- [2] LS-DYNA keyword user's manual