

插电式混合动力电动汽车排放和能耗评价方法研究

秦孔建^{1,2} 陈海峰¹ 方茂东¹ 张春龙¹

(1.中国汽车技术研究中心;2.清华大学)

【摘要】插电式混合动力汽车(PHEV)由于具有能够更充分地利用电能而减少传统石化燃料消耗的技术优势,成为当前电动汽车领域的研发热点。分析了插电式混合动力电动汽车技术特点和工作特性,对比研究了国内外针对这类车辆能耗和排放性能的试验方法和标准,从试验循环、测试程序、结果计算等几个方面对插电式混合动力汽车能耗和排放评价面临的关键问题进行了讨论,并针对我国当前标准体系中关于插电式混合动力汽车试验评价方法的制订完善提出了建议。

主题词:插电式混合动力电动汽车 排放 能耗 评价

中图分类号:U469.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3703(2010)07-0011-05

Investigation on the Evaluation Methods for Fuel Consumption and Emissions of PHEV

Qin Kongjian^{1,2}, Chen Haifeng¹, Fang Maodong¹, Zhang Chunlong¹

(1.China Automobile Technology & Research Center; 2. Tsinghua University)

【Abstract】Plug-in hybrid electric vehicle (PHEV), which makes more fully use of electric energy and thus reduces the consumption of traditional fossil fuel, has become a hot spot of electric vehicle research and development. Technical features and operational properties of PHEV are analyzed in the paper, and test methods and standard on fuel consumption and emission performance of such vehicles both in China and abroad are compared and studied, and some critical issues confronting PHEV in fuel consumption and emission evaluation in aspects of test cycle, test procedure, result calculation, etc., are discussed, and proposals are also put forward on the perfection of establishment of test evaluation methods of PHEV in the current standard system in China.

Key words: PHEV, Emissions, Fuel consumption, Evaluation

1 前言

插电式混合动力电动汽车(简称 PHEV)是近年来在传统的混合动力电动汽车(HEV)基础上派生的特殊形式,其车辆系统的功能结构介于 HEV 和纯电动汽车(EV)之间,兼备燃料发动机和可充放的电力储能装置(以车用动力蓄电池为例),同时还与 EV 一样,直接连接到电网上给电池充电。传统 HEV 驱动能量的最终来源实际上还是只有燃料发动机一个,除了制动能量回收之外,电池为驱动车辆所提供的能量归根结底都来自于发动机的动力输出,而只是利用电池充放电对发动机工作状态进行优化以实现动力系统的较高效率以及较低的废气排放。所以传统 HEV 的驱动主要还是依靠燃料发动机,即使系统匹配良好,所能实现的节油效果也是有限的。一般认为,相对于使用石化燃料的发动机,电能更为高效、清洁,从这个前提出发,HEV 应该尽量多消耗电能,少使用石化燃料,因此 PHEV 的概念被提出并

且很快成为研发热点。通常,PHEV 装备比传统 HEV 更大容量的电池,具备相当的纯电动行驶能力,日常使用汽车大多处于纯电动或电量消耗的混合动力运行模式,实现了电量消耗最大化、燃油消耗最小化的目的。在当前资源、环境、气候变化问题备受关注的全球背景下,各国汽车界均将 PHEV 作为重要的发展方向,大力投入技术研发,并竞相争夺标准话语权。

排放和能耗是 HEV 两个最为重要的性能指标,相对于传统 HEV,PHEV 这两项指标的测试评价更为复杂。本文从 PHEV 技术特性和工作特点出发,着重分析了围绕其能耗和排放性能进行评价的试验方法和标准,并为我国相关标准法规的制订完善提出了建议。

2 PHEV 技术特性和工作特点

PHEV 在车辆技术特点上介于 EV 和传统 HEV 之间,具备电机和发动机两个驱动力,可以利用外部

电网对车辆动力蓄电池进行充电。

同时,PHEV 在功能上具有以下特性:

a. PHEV 通常具备相当的纯电动续驶能力,所使用电池容量比传统 HEV 大。根据所要求的纯电动续驶能力大小的不同,电池容量差异也比较悬殊。美国能源部 2006 年的研究表明,纯电动续驶能力达到 20 km 的 PHEV(简称 PHEV20)可以减少 50% 的燃料消耗,但因电池容量增大而会带来约 8 000 美元的成本增加。而 PHEV40 则会增加约 11 000 美元成本,减少约 62% 的燃料消耗^[1]。

b. 所用发动机比传统 HEV 小。

c. PHEV 通常具备多个运行模式,并且遵循优先电能消耗的原则。

PHEV 运行模式如图 1 所示。从图 1 中可以看出,电池充满电或处于较高荷电水平(SOC)的状态下,PHEV 一般运行于纯电动模式或者电量消耗模式,电池电量下降较快;当 SOC 下降到允许下限时,车辆进入电量维持模式运行,电池 SOC 在这种运行模式下波动很小,总体维持平衡。某些 PHEV 可能还具备纯发动机运行模式,即电池电量消耗到允许下限值后停止工作,只由发动机单独驱动。这些都是 PHEV 可能的运行模式,视车辆设计意图的不同而采用不同的运行模式组合。

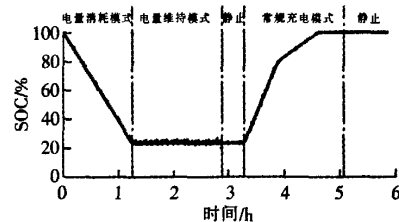


图 1 PHEV 运行模式

常见的 PHEV 运行模式组合方案有以下几种:

- a. 纯电动模式—电量消耗模式—电量维持模式—纯发动机模式
- b. 纯电动模式—电量维持模式—纯发动机模式
- c. 纯电动模式—电量维持模式
- d. 电量消耗模式—电量维持模式—纯发动机模式
- e. 电量消耗模式—电量维持模式
- f. 电量消耗模式—纯发动机模式

PHEV 具有电能量消耗比例大、运行模式多的特点,使得针对它的性能评价试验方法比较难以制订。汽车的能耗水平是以燃油消耗指标来体现和评价的,HEV 由于同时消耗电能和燃油两种类型的能源,因此进行能耗指标评价时通常需要统一到等效

的燃油消耗指标。传统 HEV 虽然运行过程中也会有电能量消耗,但所占比例一般较小,同时由于没有外接充电的功能,消耗电池电能的最终来源还是发动机燃油消耗,电池 SOC 在一个较小的范围内波动,相同的试验循环下,电能量消耗和燃油消耗之间存在线性关系,因此比较容易利用这种线性关系得到很准确的等效的燃油消耗评价结果。对于 PHEV,由于电能量消耗比例大,电池 SOC 变化的范围很大,电能量消耗与燃油消耗之间难以明确可靠的线性关系;并且 PHEV 电池的能量储备大部分来自于外部电网,而非发动机的燃油消耗,因此 PHEV 电能消耗向燃油消耗的转化也缺乏合理的依据。另外,由于 PHEV 具备多种可能的运行模式,评价时如何选择何种模式或模式组合来进行试验才能最客观反映车辆的实际能耗和排放水平,也是较难解决的问题。

3 PHEV 排放及能耗测试评价方法

制订合理的 PHEV 试验方法,需要着重解决试验循环、车辆试验模式和试验程序以及测量结果计算处理方法。

3.1 试验循环

美国 SAE J1711 是较早发布的关于混合动力汽车燃油经济性和排放试验方法的标准。其中也规定了针对具备车外充电能力车辆(Off-Vehicle Charge capable, 等同于 PHEV)的试验方法。由于 SAE J1711 只是一项协会性质的技术标准,其重点在于提出一种合理可行的试验方法,并没有明确规定应采用什么行驶工况作为试验循环,而是推荐了几个行驶工况作为参考,包括 FTP-72、HFEDS (Highway Fuel Economy Driving Schedule)、US06 (US06 Driving Schedule)和 SC03 (SC03 Driving Schedule)等,上述几种行驶工况的曲线如图 2~图 5 所示。

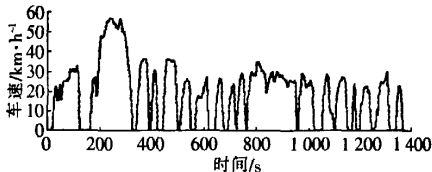


图 2 FTP-72 行驶工况曲线

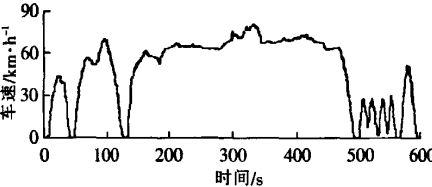


图 3 US06 行驶工况曲线

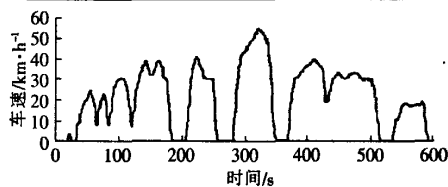


图4 SC03 行驶工况曲线

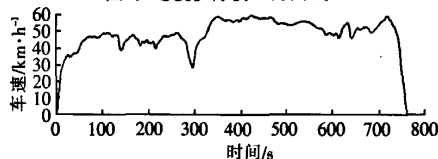


图5 HFEDS 行驶工况曲线

SAE J1711 所推荐的试验循环实际与美国法规中针对传统车辆的试验循环没有区别，这实际上是基于一种假设：PHEV 及一般 HEV 的使用状况与传统燃油车没有区别。FTP-72 是美国法规针对轻型汽车试验认证的基础性试验循环，US06 和 SC03 是 FTP-72 的附加循环，分别针对野蛮驾驶和带空调运行驾驶两种状况的试验循环。HFEDS 是高速公路行驶油耗试验循环。这几种行驶工况基本上覆盖了车辆常见的行驶模式。在 SAEJ1711 之后，SAE 还发布了针对重型混合动力汽车能耗排放试验方法的标准 SAE J2711，但其中对于如何进行重型 PHEV 的能耗排放试验并没有作出详细明确的描述。

日本汽车法规于 2009 年 7 月增添了 PHEV 排放和能耗试验方法的内容，其试验循环也是沿用与传统轻型车辆认证相同的行驶工况，即 JC08。图 6 所示是 JC08 的行驶工况曲线。

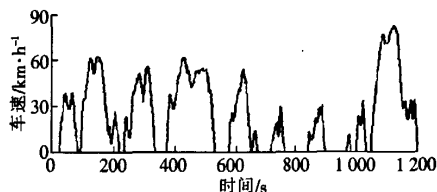


图6 JC08 行驶工况曲线

欧洲法规针对 PHEV 试验循环也采取同样的路线方案：与传统轻型车辆的认证试验循环相同。中国标准法规基本沿用欧洲体系，目前针对 PHEV 车辆的试验循环也是采用如图 7 所示的 ECE/NEDC。

综上，虽然从 PHEV 的技术特点考虑，其更适宜于市区运行，但目前的法规并未规定适应性的专用试验循环来评价 PHEV 的排放能耗等关键性能。主要原因可能归结为两个方面：其一是目前还没有足够的专门针对 PHEV 使用工况的调查数据；其二虽然对某些工况有突出的优势和适应性，但现阶段 PHEV 要获得广泛的接受度，还是需要满足使用者对传统车辆的同

等要求，即也能满足高速路行驶等基本要求。

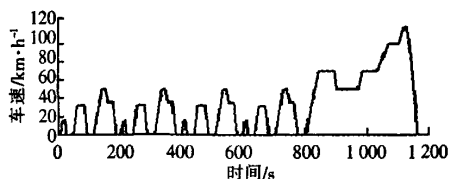


图7 欧洲 ECE/NEDC 循环

3.2 车辆试验模式和试验程序

如前所述，PHEV 通常具备多种运行模式，这使得试验时如何选取车辆运行模式，进而如何设计合理的试验程序成为一个难题。从现有的相关标准内容归纳，主要有两种试验程序设计的思路 and 方案。

第一种方案完整考虑 PHEV 可能有的各种运行模式和状态，对每一种可能的工作状态都进行试验。SAE J1711 采用了这种试验程序设计理念，其要求的试验程序见表 1 所列。

表 1 SAE J1711 中 PHEV 试验程序

充电状态	纯电动模式	混合动力模式	传统车模式
完全充电	进行	进行	——
部分充电	——	进行	进行

试验过程中，需要通过标准程序的充放电操作，依次将 PHEV 设置到不同的荷电状态，分别测量每种工作状态下的性能。从表 1 可以看到，SAE1711 规定了 PHEV 要进行 4 种不同工作状态下的试验。

第二种方案考虑 PHEV 少数典型的工作状态进行试验，欧洲法规和日本法规均采用了这种方案。针对待评价 PHEV，只进行最高充电状态和最低充电状态两种情况进行测试。从 PHEV 技术特点考虑，这两种运行状态下的测试能够反映车辆两种极端使用条件下的性能。因此，相对于 SAE J1711，在明显简化了试验程序的同时，还能保证比较客观的反映车辆的实际使用性能。图 8 和图 9 是这两种状态试验时电池 SOC 变化过程示意图。

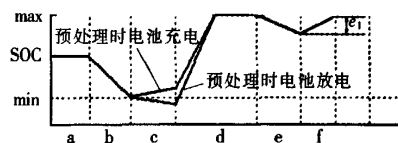


图8 最高充电试验过程

图 8 描述了最高充电试验过程中不同阶段的电池 SOC 状态：a 为初始阶段；b 为试验前放电过程；c 为预处理阶段；d 为浸车期间对车辆进行充电直至充满达到最高荷电状态；e 为试验过程；f 为利用外部电网按照标准的充电程序将电池充电至最高状

态,其中,在预处理过程中,由于测试循环和车辆技术特点可能不同,导致车辆处于充电或放电状态,从而 SOC 上升或下降,即在此阶段会出现两种可能形式。由于 e 和 f 阶段 SOC 变化量相同,所以利用 f 阶段测得的电网充电能量消耗可以确定试验过程中的电能消耗量 e_{10} 。

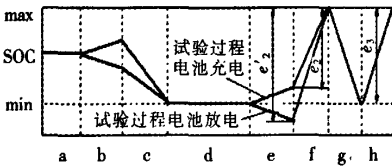


图9 最低充电试验过程

图9描述了最低充电试验 RESS 的不同阶段: a 为初始阶段; b 为预处理阶段; c 为试验前放电过程至最低荷电状态; d 为浸车期间保持最低荷电状态; e 为试验过程; f 为标准充电程序充电至最高荷电状态,记录充电量 e_2 (或 e_2'); g 为标准放电程序放电至最低荷电状态; h 为再次充电至最高荷电状态,记录充电量 e_3 。与图8类似,在预处理及试验过程中,由于测试循环和车辆技术特点可能不同,导致车辆处于充电或放电状态,从而使 SOC 上升或下降,即 SOC 会出现两种可能的变化过程。为了确定在试验阶段(e 阶段)车辆的电能量变化量,在测试循环结束后,利用外部电网反复充放电。并且通过第一次充电(f 阶段)和第二次充电(h 阶段)的电网能量消耗的差值即可确定试验过程中车辆的电能量变化量。

正在制定中的 ISO 标准 23274-2 中,提出了“全程试验”的试验程序设计思路:即从车辆充满电开始进行试验,经过电量耗尽模式 (Charge-Depleting, CD),一直测试到电池电量维持平衡 (Charge-Sustaining, CS);并且在试验过程中对车辆所处的运行模式进行判断和确认。试验过程如图10所示。

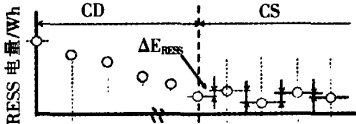


图10 ISO23274 中 PHEV 试验过程

3.3 测量结果计算处理和报告

由于考虑并测量了不同运行模式下的性能表现,要得到一个确定的性能指标,通常需要使用加权系数将不同情况下的结果综合成一个结果。为每种状态下的试验结果确定合理的加权是 PHEV 试验结果计算处理的重要问题。

SAEJ1711 虽然详细地考虑了每种可能的运行

状态,但并未提出一个测量结果的综合方法,原因在于试验程序对运行模式和状态的划分过细,而状态越多,权重系数的确定越困难,难以确定这些状态在实际使用过程中相对的频度比例关系。ISO23274 也面临同样的问题,没有提出不同状态下测量结果的综合方法。

欧洲法规则采用车辆纯电动续航里程以及充电间隔车辆平均行驶里程两个参数分别对最高充电试验和最低充电试验结果进行加权,方法如式(1):

$$C=(D_e \times C_1 + D_{av} \times C_2)/(D_e + D_{av}) \quad (1)$$

式中, C_1 为 RESS 最高荷电状态下的试验中得到的燃油消耗量; C_2 为 RESS 最低荷电状态下的试验中得到的燃油消耗量; D_e 为车辆的纯电动续航里程; D_{av} 为电池两次充电之间车辆的平均行驶里程, $D_{av}=25 \text{ km}$ 。

式(1)是用来综合 PHEV 能耗测量结果的计算公式,对于排放测量结果的计算,也采用相同原理。这个公式加权计算的思路是正确的,但加权所用参数 D_{av} 的定义及其确定的取值尚存在问题。首先按照计算公式的原理, D_{av} 与最低充电试验的测量结果相对应,则其准确的物理意义应该是:待评价 PHEV 在日常使用过程中两次完全充电之间运行于最低充电状态的平均里程,而不应是两次充电之间的平均里程;其次,将 D_{av} 的数值规定为 25 km 尚缺乏足够的技术支持。

日本法规在测量结果计算处理时,引入了“利用系数”(utility factor)这一概念对两种状态测量结果进行加权,如图11所示。

首先根据 PHEV 的纯电动里程在图11中找到该车对应的 UF,然后分别用 UF 和 (1-UF) 作为权重系数对两个状态下的测量结果进行综合。

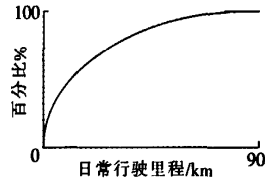


图11 PHEV 利用系数的示意

4 制订完善中国相关标准的思考和建议

4.1 现有 PHEV 相关标准的问题

在 PHEV 排放和能耗试验评价方面,中国目前的标准是:轻型 PHEV 基本沿用了欧洲的方法;而现有的重型 HEV 能耗试验方法标准未覆盖 PHEV,该标准正在修订中,新修订版本将包括 PHEV;重型

HEV 排放试验方法标准正在制订,内容也将覆盖 PHEV;同时轻型 HEV(含 PHEV)的试验方法标准也在修订中。

中国 PHEV 相关标准面临的问题主要有如下几个方面:

a. 直接沿用欧洲方法,引用标准与国内车辆技术状态、使用环境(路况、工况和驾驶特性)的适用性缺乏论证。尤其在对多种状态下的测量结果进行综合时,所采纳的权重系数的确定应该建立在对本国或地区车辆使用状况信息的足够调查的基础上。

b. 缺乏试验验证。这主要是由于标准制订时缺乏相对技术成熟的车辆产品。

c. 试验方法层次单一,体现在目前只有与法规认证相对应的试验方法,而缺乏更结合并能促进产品技术更新的方法标准。法规试验方法目的是检验产品是否能满足法规的最低要求,但 HEV 和 PHEV 的意义远不在于此,而要更准确客观地评价出这类车辆的技术优势,则需要更多考虑其技术特性的试验方法标准,同时也能更有效地推动产品技术改进、成熟。

d. 不同状态下测量结果的加权综合方法所采用参数缺乏充分依据;能耗评价表述时,电能消耗和燃油消耗的综合问题仍未解决;而排放评价是考虑可能最差排放状况还是考虑车辆综合排放水平的指导原则不明确。

4.2 完善标准体系的思考和建议

鉴于上述的问题,对中国正在修订中的 HEV 标准提出以下建议,为完善其中与 PHEV 相关试验方法的技术内容提供参考。

a. 开展与 PHEV 相关的车辆日常行驶工况特征调查,获取统计数据为标准中性能评价计算方法提供数据支持。PHEV 性能对使用环境和条件有较强的敏感性,标准作为技术规范对产品开发具有导向性作用,如果标准方法的数据基础偏离了实际情况,则产品的开发也将偏离它的目标使用环境和条件,一方面势必不能为使用者所广泛接受,另一方面也背离了发展 PHEV 促进节能减排的初衷。

b. 建立多层次的标准体系。在完善法规试验方法标准的基础上,同时建立更贴合产品技术开发和性能改进的试验方法标准。在试验程序设计方案上,法规试验方法标准的重点在于简单有效地测试车辆是否达到法规对车辆的基本要求,程序上与传统车辆尽量保持一致,而没必要通过法规试验程序评判到 PHEV 产品的所有技术细节,所以着重考虑

采取 2.2 节中的第二种方案;PHEV 技术和产品尚未十分成熟,这种前提下仅有法规试验方法的标准,不能满足产品技术更新进步的需求,针对技术开发和性能改进的试验方法标准应该更多地关注到产品的技术特性,所以采取 2.2 节中的第一种方案或者 ISO23274 的方案更为合适。

c. 法规层面的 PHEV 性能评价方法,其能耗指标应尽量客观反映车辆的综合性能水平,即将不同运行状态下的测量结果综合加权;针对排放指标则应考虑将车辆排放最恶劣状态下的测量结果作为评判依据;进行综合加权时应引入车辆利用系数这一统计数据。

d. 开展充分的实车试验验证。

5 结束语

需要开展与 PHEV 使用环境、条件相关的工况、路况、驾驶特性等调查统计工作,获得车辆利用系数等对于 PHEV 性能试验评价所必须的基础数据。

对于 PHEV 和一般 HEV 能耗指标的评价,法规试验方法应尽量反映车辆实际使用过程中的平均水平;而排放指标则应采用排放最恶劣运行模式下的测量结果作为评判依据。

应建立多层次的试验方法标准体系,在完善 PHEV 法规试验方法标准的基础上,还应制订针对 PHEV 产品技术开发和性能改进的试验方法标准。

参考文献

- 1 Simpson A. Cost-Benefit Analysis of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Technology. The 22nd International Battery, Hybrid, and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exposition, October 2006.
- 2 The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space. Recommended Practice for Measuring Fuel Economy and Emissions of Hybrid-Electric and Conventional Heavy-duty Vehicles. SAE J1711, 1999.
- 3 The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space. Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles. SAE J2711, 2002.
- 4 EN1821-2. Electrically propelled road vehicles-Measurement of road operation characteristics-Part 2: Thermal electric hybrid vehicles.1999.
- 5 国际质量监督检验检疫总局. GB/T 19753—2005 轻型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法.北京:中国标准出版社,2005.
- 6 国际质量监督检验检疫总局. GB/T 19754—2005 重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法.北京:中国标准出版社,2005.

基于 LMS Virtual.Lab 的汽车模态相关性分析与优化

张松波 周建文

(长安汽车公司汽车工程研究院)

【摘要】依据判断准则的不同,试验/分析模型相关分析可分为频率相关分析、频率及振型相关分析、交叉正交性分析和频响函数相关分析。以某车型车门模型为例,详细阐述了相关性分析和模型修正的实现过程。结果表明,使用 LMS Virtual.Lab 中的 Correlation 模块,能够快速准确地完成分析/试验模型的相关性分析及模型修正工作,有效提高有限元模型的准确度,具有很强的工程实用意义。

主题词:模态相关性 分析 LMS Virtual.Lab

中图分类号:U462 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3703(2010)07-0016-04

Vehicle Modal Correlation Analysis and Optimization based on LMS Virtual. Lab

Zhang Songbo, Zhou Jianwen

(Automobile Engineering Institute of Changan Automobile Co., Ltd)

【Abstract】According to different criteria, test/analysis model correlation analysis can break down to frequency correlation analysis, frequency and vibration model correlation analysis, cross perpendicularity analysis frequency response function correlation analysis. The paper takes a car door model as example to elaborate in details correlation analysis and the process of model revision. The results show that the use of correlation module in LMS Virtual. Lab can rapidly and accurately complete the correlation analysis of analysis/test model and model revision, can effectively improve accuracy of FE model, thus has powerful engineering application significance.

Key words:Modal correlation, Analysis, LMS Virtual.Lab

1 前言

在现代汽车设计中,CAE 分析的优势日益显现,分析结果的快速获得使汽车设计的周期大大缩短,在设计初期分析取代大量的试验,使设计成本大大降低。然而,固然有限元模型在处理复杂结构上具有明显的优势,但仅凭工程师的经验欲建立一个与试验结果相一致的有限元模型是比较难的,尤其当结构比较复杂时,没有一个正确的数学模型进行后续的响应分析或对原设计做出相应修改也就没什么意义了。结构模态在结构设计中起到很重要的作用,它是结构设计的一个目标。进行结构模态分析,了解和掌握其动力学特性,是进行结构减振设计的前提条件。模态分析可以通过模态试验和模态计算两种途径实现。在满足一定试验可靠度的前提下,模态试验的结果可作为验证模态计算结果正确性的标准,这种验证通过两者的相关性分析实现。

试验/分析相关性分析定义为:不断识别和减少测试和仿真分析误差达到满意水平的迭代过程。它是分析过程,特别是整车分析过程中一个重要组成部分。相关性分析在可接受的范围内时,才能使用该仿真模型为后续的产品设计开发提供支持。

2 试验/分析模型相关分析及相关准则

试验/分析模型相关分析是用来判断试验/分析模型在一定准则上的相符程度的。目前依据判断准则的不同可分为频率相关分析、频率及振型相关分析、交叉正交性分析和频响函数相关分析。下面将对各种相关分析做一些讨论。

2.1 频率相关分析

固有频率通常是动力学分析中最基本的参数,而且比模态向量更容易准确测量(仅限于低阶固有频率,高阶固有频率比低阶固有频率更容易受有限元模型离散程度的影响)。测量频率 ω_1 与计算频率

版社,2005.

7 国际质量监督检验检疫总局. GB/T 19755—2005 轻型混合动力电动汽车污染物排放测量方法.北京:中国标准出

版社,2005.

(责任编辑 学 林)

修改稿收到日期为 2010 年 6 月 25 日。