

# 同濟大學

## 工程硕士学位论文选题报告 及论文工作计划

课题名称 玻璃升降器激励下的轻量化汽车门模  
块声振耦合研究

学 号 \_\_\_\_\_

姓 名 \_\_\_\_\_

专业领域 车辆工程

所在院、系 汽车学院

校内导师 \_\_\_\_\_

校外导师 \_\_\_\_\_

选题时间 2017年 11 月 12 日

同济大学研究生院

年 月 日

## 一、立论依据

### 1. 课题来源

本课题来源于自拟的研究内容。基于实验和数值模拟方法对车窗升降器激励下的轻量化车门系统的声振耦合进行研究。

### 2. 选题依据和背景情况

汽车轻量化是实现节能减排的重要措施之一,对汽车工业的可持续发展具有重要意义。目前汽车轻量化材料在车身上得到了广泛的应用,实现汽车轻量化主要通过采用轻量化材料及应用先进的工艺技术,轻量化材料不仅可以节能减排,也可以降低汽车研发成本。

在此背景下,工程塑料在汽车上的用量逐年上升,且上升幅度居各行业之首,已经由 20 世纪 70 年代的 50 kg/辆增长到目前的 100~150 kg/辆,而发达国家汽车的塑料用量已经达到甚至超过了整车质量的 15%。汽车门系统也在这个趋势下不断的进化。其演变过程大致分成三个阶段:模块化、集成化以及轻量化。

随着工程塑料在汽车行业应用比例的提高,车门模块的轻量化已经成为必然趋势,博世和阿文美驰等优秀汽车零部件厂家纷纷推出了塑料车门模块。塑料车门模块不仅继承了集成化车门模块的高集成度,而且基板材料由钢材转变为工程塑料,升降器导轨和扶手支架等零件也集成注塑为一体,与金属车门模块相比,塑料车门模块的零部件数量减少了 30%左右,自重更是减轻达 40%之多。

随着人民生活品质的不断提高,中国的汽车产量和销量早已超过美国跃居世界首位。人们对汽车的要求已经从单纯的载人,载货的交通工具提升到对舒适,地位,智能的高度。集成了玻璃升降功能,锁,扬声器等功能的门系统,作为使用最频繁的汽车部件之一,其声学性能,如隔声,扬声器性能,玻璃及遮阳帘升降器调节噪声,开关门声品质等也受到了越来越严苛的挑战。轻量化,集成化车门系统也越来越受到主机厂的青睐。

本课题对某汽车零部件公司为某插电式混合动力车型提供的采用工程塑料底板的集成玻璃升降器导轨的车门模块进行声学研究。此款门模块的优势在于:

- 轻量化。相比传统车门系统,此款门模块减轻每扇门重量 1.2Kg。
- 提供柔性的设计空间,专车定制。
- 优化扬声器效果。在 45-100Hz 频段提升 5-9dB。
- 提升隔音性能。全频段降低 15dB 车外噪声。
- 提升玻璃升降器声学性能。通过对塑料底板的优化设计,降低底板对玻璃升降器电机激励的反馈。

随着消费者对汽车舒适性的要求逐步提高,电动玻璃升降器的噪音成为了主机厂关注的焦点。尤其是在 100Hz 左右电机一阶转频附近的共振噪声,受到国

内几乎所有主机厂的高度关注。也引发了诸多棘手的问题。例如，在该公司提供玻璃升降器项目中，玻璃升降器导轨以及电机的安装界面为主机厂车门上的钣金。部分车门钣金的模态频率与电机工作时的转频非常接近，因而产生共振噪声。

为了提高主机厂满意度，该公司对所有采购上述产品的主机厂车门进行工作状态响应分析。在产品实验验证阶段，基于整个车门总成，以 0.3v 电机端电压作为步长，做 9-16v 的扫频，同时以双耳式人工头或者 1/2” 预极化传声器拾音。通过对测试数据的快速傅里叶变化结果，判断车门或者门模块底板的共振风险，并及时通知主机厂。此做法的风险在于，得到和量产状态一样的门已经接近主机厂的产品认证阶段后期，在此阶段即便找到共振现象以及频率提交主机厂，由于临近开发周期尾声，无法对车门结构做出修改。

在新型的车门模块项目中，采用工程塑料注塑而成的底板取代了原本的车门钣金。该塑料底板集成了玻璃升降器，锁，扬声器等设备，在减轻重量的同时，也减少了装配的复杂程度。共振也从原来的钣金件转移到了工程塑料底板上。但因其设计上的柔性，更多的设计可以别用来规避车门升降器电机的激励。

此外，根据同济大学声学研究所发布的论文《1kHz 以下频率我国人群纯音等响曲线的变化趋势》，中国人群对低频段，尤其是 200Hz 以下频段的感知比西方人敏感最高达 10.4dB。针对这一地域性特性，并且结合工程塑料底板在设计上的更多可能性，将底板的声振耦合特性更早的引入产品开发流程，将有效的规避轻量化车门系统在玻璃升降器电机的激励下产生的共振现象。

### 3. 课题研究目的

现有的车门系统在玻璃升降器电机的激励下风险验证方法基于工作状态响应测试，即以 0.3v 直流电压为步长给电机做 9-16v 的扫频实验。用满足主机厂规范的上限直流电机，在车门总成上控制电机正反转以驱动玻璃升降。然后对传声器测得的时域数据做快速傅里叶变化，取得系统的共振频率。若频率接近电机的工作频率，即引擎未启动时的 12v 左右及引擎怠速时的 14v 左右，则判断为有风险。

该方法的弊端在于：首先，实验基于最接近量产状态的车门系统，此时如果发现问题，主机厂或者轻量化门模块供应商将没有足够时间作工程更改。其次，整个实验过程中，同一个电压下做三次升降，一共需要测试 150 个数据，耗费的时间多，效率不高。再者，以 0.3v 为步长进行扫频造成数据的准确度不够，容易产生对共振频率的误判。

本课题将对工程塑料制轻量化车门模块底板采用工作状态响应、实验模态以及 PU 探头近场扫描的实验方法，结合模态数值模拟，谐响应数值模拟，近场辐射数值模拟，声振强弱耦合数值模拟的 CAE（计算机辅助工程，Computer Aided Engineering）手段。研究车门系统在带负载的工作状态响应及不带负载的实验模态下的相关性；模态试验以及谐响应数值模拟的相关性；PU 近场扫描实验以及声振耦合数值模拟结果的相关性。为未来项目开发的前期提供准确的数值模拟参数，提高数值模拟结果的可靠性。同时为验证阶段探索新的认证实验方式，期望得到高效、准确的实验结果。

#### 4. 工程应用价值

本课题的理论意义和实际应用价值在于：

1) 通过基于物理样件实验和数值模型 CAE 技术相结合的方法和思路，对比实验模态结果以及谐响应数值模拟结果，通过实验进行标定和校准准确，也就是详细验证数值模拟模型的可信性及准确性。

2) 通过实验方法，研究门模块塑料底板的模态实验结果同基于塑料底板质点振速的近场辐射实验结果的相关性，优化实验方法。

3) 通过实物样件实验和 CAE 技术相结合的思路，对比实验和数值模拟的底板近场辐射结果，校准数值模拟模型。

4) 在结构模态及近场声辐射数值模型校准准确后，对车门总成进行强耦合数值模拟，预测玻璃升降器声学性能。

通过对以上四个问题的研究，提升 CAE 技术在产品开放周期中的比重，在设计阶段前期引入声学预测，提升产品性能。同时能减少实验量，降低开发成本，为企业做出贡献。

## 二、文献综述

### ➤ 国内外研究现状、发展动态

#### 1. 声振耦合问题概述

处于流体中的弹性结构在外激励的作用下产生振动,其周围的可压缩流体介质因结构振动的作用而产生压缩或者伸张运动,从而引起介质中声波的传播。与此同时,结构也同样受到介质中声场的反作用力,这种反作用力作为声载荷也同样会影响结构的振动。声学界将这种交互作用称为声振耦合<sup>[1-3]</sup>,这种耦合情况示意图如图1所示。

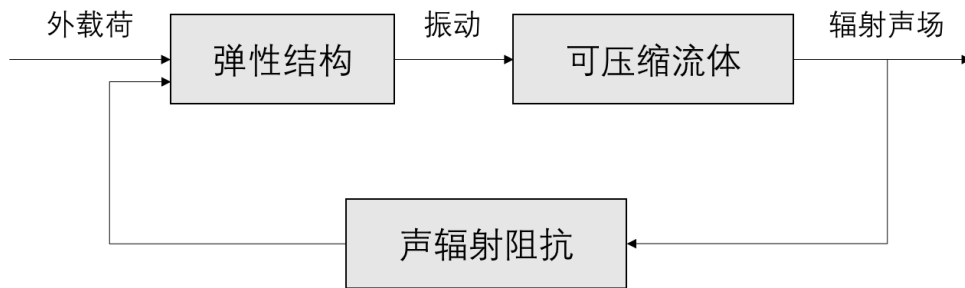


图 1. 声振耦合系统示意图

声学理论中,将声辐射阻抗定义为作用在弹性结构上的外力与结构表面振动速度之间的比值。可压缩流体介质被分为轻质流体和重质流体两类,这两类流体介质的判断标准是1989年首先由Laulgnet和Guyade<sup>[4]</sup>提出的,并得到了声学界的认可。声振耦合问题从学科来讲涉及到流体力学,振动力学,弹性力学,计算力学,声学等等从技术上讲也同样涉及到很多领域,如航空航天,石油化工,船舶海洋,土木工程甚至生物工程。因此长期以来一直是国内外学者研究的重点课题之一<sup>[5-8]</sup>。

#### 2. 声振耦合分析方法

声振耦合的分析问题是国内外学者的研究热点之一。针对结构-声耦合结构模型的建立、耦合特性分析以及影响耦合程度的各种因素等方面开展了广泛研究。研究方法大致可归纳为以下几类。

##### 2.1 解析方法

###### (1) 耦合分析法

对结构声的研究,主要就是研究结构与声之间的耦合问题,分析声振耦合问题较常用的方法是模态耦合方法,在结构和闭空间的耦合问题中,闭空间流体对结构振动的影响集中表现在结构表面的声压上,而结构振动同时又对闭空间的声压产生影响。因此,引入阻尼项,并分别建立在声压作用下的结构振动微分方程以及包括声辐射的声腔内的声波方程组。

Pretlove首先将该方法应用于弹性封闭矩形腔体的噪声分析中推导了与声腔耦合矩形板的振动表达式。Dowell<sup>[9]</sup>和Lyon从声弹性理论出发,推导出更一般的表达式。后来,Dowell提出了完整的基于模态理论的关于声振耦合系统的模型,并予以实验验证。Kubota<sup>[10][11]</sup>又提出了在高频下的进行模态分析方法。模态分析方法较适合于低频,但在实际腔体噪声分析中,结构或腔体模态能否准确获得,

直接决定着分析结果的可靠与否。因此这些基于模态的精确解析方法只能应用于简单规则的几何模型。Anyunzoghé et al<sup>[12]</sup>建立了应用于不规则腔体的改进的集成模态法,他将不规则腔体划分为不同大小的规则长方体,然后通过连接条件的匹配得到整个腔体的模态。Kim 和 Kang<sup>[13][14]</sup>提出了基于 waveguide-type 一方法的不规则腔体的声模态分析。这些方法使得模态分析方法的应用更加广泛。

## (2) 能量法

由于耦合方程求解的复杂性,耦合分析法一般适用于低频分析,只考虑起主要作用的几个振动模态。但是,在实际工程中,例如飞机机壳、汽车车身等振动与声的耦合都涉及中高频的范围,包含大量的结构和声的模态,对于这类振动和声的耦合分析通常会采用能量法。能量法主要包括统计能量分析法和能量有限元法。统计能量分析方法是以前统计物理学的原理为基础,在系统构件数量有足够多的条件下,在高频范围,假设某一结构所辐射的声功率是该结构各个模态或部分所辐射声功率之和,这种方法最早起源于航空航天领域,是上世纪六十年代首先由 Lyon, Maidank 和 Simith Jr<sup>[15]</sup>提出了一种动态系统随机振动分析方法。最初主要是应用于建筑结构和机械设备的噪声分析,而后逐渐将其应用于声振耦合问题的分析中,这种方法要求在计算的频带范围有足够多的结构和声学模态,因此适用于中频以及高频的分析。

应用统计能量法可以很好的描述系统各构件的平均振动和声学特性。系统的能量来自于外界力或声的激励。并且假设能量被均匀的储存在各个振动模态中,结构的各个模态或部分模态在某一带宽的平均平方速度可由其能量和相应的模态或部分质量的商求得。

虽然统计能量法适合求解高频问题,但是其内在缺点是基于子结构的分割,忽略了局部模型细节,因此无法用于结构细节的处理。Nefske 和 Sung<sup>[16]</sup>, Wohlever 和 Bernhard<sup>[17]</sup>等在此基础上发展了能量有限元方法。

在高频范围,应用统计能量法可以很好的描述系统各构件的平均振动和声学特性。Scharton Maidank<sup>[18]</sup>以及 Burroughs<sup>[19]</sup>和姚德源<sup>[20][21]</sup>等学者也对这一问题的研究做出了重要贡献。目前美国 Vibro Acoustic Sciences 公司已经开发出关于统计能量分析法的商用软件 Autosea。商用软件的开发使得统计能量法更广泛的应用于实际工程的分析研究中。

## 2.2 数值计算法

### (1) 有限元方法

有限元方法是目前应用较为广泛的一种数值分析方法。从二十世纪五十年代开始,有限元方法一问世就很快地应用到声辐射问题的分析计算中<sup>[22][23]</sup>,从理论上讲,有限元可适用于任何结构和声腔形状的计算,但是实际上,有限元法在处理三维声辐射问题时需划分三维空间网格,有限单元的尺寸要远远小于结构中弹性波的波长。数据准备和计算工作量庞大,如果采取边界截断来计算无限域的声辐射问题会带来误差等,因此,有限元法研究一般限制在 20-200Hz 频率的低频区域,适用于低频激励作用下复杂结构振动、内部声场计算分析。此频段的特性与车、船、飞机等乘坐舱的低频噪声很相似,因此对于车、船室内的噪声声场与振动的耦合分析多采用有限元方法。

有限元法的精度依赖于所选单元的大小,数目,而且与各单元上节点值和单元内值的关系式,即描述函数有关。Sung, Nefske 以及 Everstine<sup>[24]</sup> S. W. Wu<sup>[25]</sup>介绍了利用有限元法进行结构-流体耦合计算的情况。并在有限元的基础上又发展起来了分形有限元<sup>[26]</sup>、波包有限元<sup>[27][28]</sup>等,并应用到声辐射问题的分析,然而这些方法的研究尚处于起步阶段并各有局限性。

### (2) 边界元方法

边界元法是在经典积分方程和有限元基础上发展起来的解微分方程的数值方法<sup>[29]</sup>。其基本思想是通过微分方程的基本解将微分方程化为边界积分方程,边界元方法在边界上放松了对未知量的连续性要求,用有限元离散化思想把区域的边界离散化,通过将边界划分为一系列的“单元”,每个单元由它们的节点的值决定,每个单元节点上的自由度为声压未知和法向速度已知。和有限元法类似,对所有单元,选择恰当的描述函数,在每个小单元上进行积分。建立方程组,求出各个单元节点的声压。进而根据需要可以计算分析域内的参数。

边界元法是直接建立在问题的基本微分方程和边界条件基础上的,不需事先寻找任何泛函。结构声学边界元法基本上都是基于亥姆霍兹积分方程,用边界元方法求解结构声学问题开始于 Chen, Schwkert, Baron<sup>[30]</sup>利用简单源方法分析声辐射问题, Daddazio<sup>[31]</sup>, Ursell<sup>[32]</sup>提出了一种类似于表面亥姆霍兹积分方程的方法,利用特殊构造的一种基本函数代替传统的自由空间基本解,从而避免了奇异积分。边界元法用于处理声振耦合问题可以分为直接法和间接法。直接法是以结构表面声压和结构表面法向振速为边界量<sup>[33][34]</sup>,而间接方法则是以结构表面的声压插值和速度插值为边界量<sup>[35][36]</sup>。由于边界元方法分析时不需要外边界,更适合于无限域或者半无限域的求解<sup>[37]</sup>。

### (3) Trefftz 有限元方法和波叠加法

与基于单元的方法相比,有限元方法<sup>[38]</sup>由于继承了传统有限元方法和边界元法的优点而日益引起学者的关注。其基本思想就是将预先满足奇次控制方程的函数作为势函数,令未知系数满足某种边界条件,从而使解空间落在边界上。由于只对边界进行离散,输入数据的生成比较简单,Trefftz 公式是非奇异的,所以不存在边界的奇异问题。Jirousek 和 Leon<sup>[39]</sup>提出了杂交 Trefftz 有限元方法,秦庆华<sup>[40]</sup>提出了基于杂交 Trefftz 位移模型的修正变分原理。这种方法是将单元域内的位移场和单元域内精确满足控制微分方程的位移场联系起来,将单元域内的位移场表示成微分方程的特解和 Trefftz 完备解系的线性和,利用修正的变分原理获得刚度方程。完备解系的数学理论主要是由 Herrera 及其合作者完成的<sup>[41]</sup>。目前,Trefftz 有限元方法已经广泛应用于求解势问题、平面弹性问题、弯曲问题以及热传输等问题,有限元方法在处理孔洞、尖角以及裂纹问题时具有显著的优点<sup>[42][43]</sup>。Trefftz 有限元方法应用于声学领域的研究目前还不多见,范成高,陈南田等应用改进的 Trefftz 解析法进行复杂声腔的有源噪声控制研究。

波叠加法<sup>[44-46]</sup>—基于间接 Trefftz 法发展起来的,它更适于声场的研究,在结构和声域都不需要划分成更小的单元,而且也不需要每个单元内采用近似的形函数求解动力学方程,整个域内的压力场都由精确满足动力学方程齐次部分的波函数和满足动力学非齐次方程的特解函数组成。波函数的常数系数通过加权余量或者最小二乘法得到。波叠加法的一个重要优点就是其更适用于中频段的计算<sup>[47]</sup>。

波叠加法收敛的一个充分非必要条件是所求声域为凸形。对于非凸形的声域也就是多域问题,则需要采用将其分解成多个子域凸域组合的方法,在子域之间通过连续性条件进行耦合。

#### (4) 无网格方法

实际计算中,涉及流固耦合、局部奇异或者大变形等问题时,网格的生成很耗时,而且可能会产生扭曲或者不连续的网格,这种状况就可能导致单元定义失效,影响计算精度。近十年来,国内外学者开展了对无网格的研究。顾名思义,无网格法就是不需要对研究域或者边界进行单位网格划分,而是基于离散点的近似插值,因此可以消除单元的重构以及失效问题。无网格方法简化了计算的前处理,降低了计算难度,具有很高的研究价值。

目前,无网格方法<sup>[48]</sup>工主要有漫射元法、无单元 Galerkin 法、重构核质点法、Hp 云方法、无网格局部 Petro-Galerkin 法、点插值法等。上述凡种方法计算精度和稳定性都较好,但是需要积分背景网格,还不是真正的无网格法。另外,还有凡种不需背景网格,而是采用配点方法的无网格方法,如有限点法、Hermite 对称配点方法、以及最小二乘配点法等。配点型无网格方法的计算效率较高,但是稳定性稍差。

### 2.3 阻抗分析法

在结构声分析中,所用的机械阻抗的一般定义为:  $z=F/v$ , 其中,  $F$  为作用力,  $v$  为所作用物体的响应速度,若作用力和响应速度都在某一点测得,则上述阻抗称为点力在该点的点阻抗。位移阻抗定义为力和位移的比值,加速度阻抗定义为力和加速度的比值。由于结构噪声的传播、辐射和振动能量与振动速度直接相关,因此速度阻抗应用最广泛,称为力阻抗。

力阻抗一般定义为某一频率下,用复指数表示,其倒数称为力导纳,对于力阻抗,其实部称为力阻,虚部称为力抗。一般写成:  $Z=R+jX$ , 利用阻抗和导纳的概念研究结构受力情况时,可以避开结构的具体情况,而只需知道交界面的阻抗和导纳,因而这种分析方法更加简明并具有一般意义。对多个子系统构成的复杂结构,也可以用各个子系统的阻抗计算得到结构的总阻抗。Kim<sup>59</sup> 等人用阻抗和导纳的方法分析了结构和声的耦合问题,靳国永,杨铁军回等人利用模态叠加原理推导了结构与声压模态响应的阻抗及导纳形式的表达式。在实际工程中,阻抗的测量很容易得到,可以直接使用阻抗头进行测量。阻抗头里有两个传感器,分别测量速度和外力。而且如果已知一个物体的阻抗,就可以方便的测算出另一个物体的阻抗。



### 3. 声振耦合分析国内外研究现状

结构声振耦合的研究是目前国内外学者研究的热点问题之一。从上世纪八九十年代开始, Fuller et al, Pope et al, Pan et al 研究了声场与结构直接的耦合对腔体内声场的影响。上述研究一般都是针对形状规则的耦合结构,应用的方法也往往采用解析方法。研究内容大多集中在声波的各种入射方式、耦合系统的模型建立,以及耦合程度分析上。随着计算机技术的发展,有限元,边界元等数值方法应用于结构一声耦合系统的研究得到快速发展。

对中低频激励作用下的复杂结构的声辐射问题,目前大多采用有限元与边界元相结合的方法求解,因此,实现结构响应与声辐射响应之间的解耦问题显得十分重要。江苏大学姜哲,毛崎波等提出了声辐射模态的概念,用声辐射模态和辐射系数来描述结构振动的声辐射性质,并应用于声场重构。陈克安,李双刚等通过分析找到了结构振动模态与声辐射模态之间的对应关系,并据此通过对结构模态进行抑制和重构,从而控制结构的声辐射。

对于不同结构的声振耦合特性的研究也有很大进展。东南大学陈南,姚昊萍等通过在弹性板边界施加假想的弹簧系统模拟不同的边界条件,建立了两块弹性矩形板之间的连接模型,并得出低频段时两弹性板之间是弱耦合的结论。刘志刚与杜敬涛考虑到边界条件对结构振动以及封闭声场及其耦合特性的影响,完整的考虑了弯矩,横向剪力,面内纵向力和面内剪切力四种耦合效应,并对矩形板连接的声腔予以分析计算。何柞塘分别对无限长和有限长单层圆柱壳的振动和声辐射进行了分析,合肥工业大学以及华中科技大学的研究则更多在于波叠加法的研究,其中,高焯,陈剑等实现并改进了波叠加方法的声辐射算法并将其应用于声学灵敏度的分析计算。靳国永,刘志刚等哪}将板一腔耦合系统模拟成控制理论中的反馈与前馈系统,据此直观的分析结构一声耦合机制和决定系统耦合程度的影响因素。陶红丹建立了通过声桥耦合的双层结构声传播模型。利用傅立叶变换和逆变换技术,分别得到双层结构隔声量表达式以及两板的振动能量表达式。赵志高,黄其柏基于级数展开的方法利用边界积分法分析了声场中的多频问题。

上海交通大学,华中科技大学,以及合肥工业大学等都针对各自的学科优势,取得了不错的研究成果。

国外的研究同样是集中在有限元方法与边界元方法的有效结合,能量法,以及模态耦合分析方法上。Ute,G 等将多极点伽辽金边界元方法应用于声场辐射中;Warszawski A 利用有限元与边界元结合的方法分析研究了声波在声场及弹性结构中的声传播;Tong Z, Zhang Y 利用直接边界元方法与有限元方法相结合研究了流固耦合系统的动特性以及其声传播特性;Zhang W., Wayng 利用能量有限元方法分析了高频域薄壁弹性板在重流体作用下振动;MaceB. R 研究了统计能量分析方法中有关损耗因子以及系统模态数量的问题,在考虑面内力问题上,国外学者也取得了不错的研究成果, Gorman D. J. 考虑面内力的作用分析了在任意支承条件下的弹性矩形板的振动特性;D. Li, J. s. Vipperman 在考虑圆柱壳耦合结构以及声振耦合的基础上建立了相应的数学模型。

► 参考文献

- [1]何柞铺, 赵玉芳, 声学理论基础 [M], 北京:国防工业出版社, 1981.
- [2]何柞铺, 结构振动与声辐射 [M], 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2001.
- [3]陈克安, 有源噪声控制 [M], 北京:国防工业出版社, 2003.
- [4] B.Laulagnet, J.L.Guyader. Modal analysis of a shell acoustic radiation in light and heavy fluids[J]. Journal of Sound and Vibration, 1989, 131(3): 397-415.
- [5]M.C.Junger, D.Feit. Sound. Structure and their Interaction [M]. Cambridge, MA: M.LT.press, 1986, 151 — 176.
- [6]邢景棠, 周盛, 崔尔杰.流固耦合力学概述[[J].力学进展, 1997, 27(1): 19-38.
- [7]何琳, 朱海潮, 邱小军, 杜功焕.声学理论与工程应用 [M].北京:科学出版社, 2006.
- [8]A.J.Pretlove. Free vibrations of a rectangular panel backed by a closed rectangular cavity [J]. Journal of Sound and Vibration, 1965, 2(1):197209.
- [9]E.H.Dowell, H.M.Voss. The effect of cavity on panel vibration [J]. Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1963, 1(2): 476487.
- [10]Y Kubota, H.D.Dionne, E.H.Dowell. Asymptotic modal analysis and statistical energy analysis of an acoustic cavity [J]. Jownal of the Acoustical Society of America, 1988, 110:371376.
- [11] Y Kubota, E.H.Dowell. Asymptotic modal analysis for sound fields of a reverberant chamber. Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 30:1191 — 1198.
- [12] E.Anyunzoghe, L.Cheng. A combined integral-modal approach with pressure distribution assessment and the use of overlapped cavities [J]. Applied Acoustics, 2002, 63:12331255.
- [13]YYKim, J.H.Kand. Free vibration analysis of membranes using waveguide-type base funcitons[J]. Journal of the Acoustical Society of Americal, 1996,99:29382946.
- [14] YYKim, D.K.Kim. Applications of waveguide-type base functions for the eigenproblems of two-dimensional cavities [J].Journal of the Acoustical Society of Americal, 1999, 106:1704~1711.
- [15] R.H.Lyon, GMaidank. Power flow between linearly coupled oscillators [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(6):1265 — 1269.

- [16] S.H.Sung, D.J. Nefske. Component modes synthesis of a vehicle structure-acoustic system mode[J]. Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986, 24(6):1021 — 1026.
- [17] E.H.Dowell, G.F.Gorman, D.A.Smith. Acoustic elasticity: general theory, acoustic natural modes and force response to sinusoidal excitation including comparisons with experiment [J]. Journal of Sound and Vibration, 1977,52(4):519-542.
- [18] G Maidanik. Response of ribbed panel's reverberant acoustic field [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 54(6):809-826.
- [19] B.F.Willis, C.B.Burroughs. Vibration power transmission coefficients for the coupling of circular cylindrical shells to flat plates [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107:2883-2898.
- [20] 姚德源, 王其政.统计能量分析原理及其应用 [M].北京:北京理工大学出版社, 1995,1120.
- [21] 廖庆斌, 李舜酩.统计能量分析的响应统计估计及其研究进展[J].力学进展, 2007,37 (3):337345.
- [22] R.R.Smith, J.T.Hunt, D.Barach. Finite element analysis of acoustically radiating structures with application of sonar transducers [J]. Journal of the Acoustical Society of America 1974, 55: 1277-1288.
- [23] A.Craggs. The use of simple three-dimensional acoustic finite element for determining the natural modes and frequencies of complex shaped enclosure [J]. Journal of Sound and Vibration, 1972,23:331339.
- [24] G.C.Everstine. Finite element formulations of structure acoustics problems [J]. Computers & Structures, 1997, 65(3):307-321.
- [25] S.W Wu, S.H.Lian, L.H.Hsu. A finite element model for acoustic radiation [J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 68(3):823 — 826.
- [26] R.J.Astley. Wave envelopes and infinite element scheme for acoustical radiation [J]. Numerical Methods in Engineering, 1983.(3):507526
- [27] R.J.Astley, G.J.Macaulay, J.P.Coyette. Mapped wave envelop elements for acoustic radiation and scattering [J]. Journal of Sound and Vibration. 1994,(170):97118
- [28] R.J.Astley, G.J.Macaulay, J.P.Coyette. Three-dimensional wage-envelope elements of variable order for acoustic radiation and scattering. Part I. Formulation in the frequency domain [J]. Journal ofAcoustical Society ofAmerica. 1998, 103(1):4963.

- [29]严更, 丁方明, 边界单元法基础 [M], 重庆:重庆大学出版社.1986.1-99.
- [30] L.H.Chen, D.GSchwekert. Sound radiation from an arbitrary body[J]. Journal of Acoustical Society of America. 1963,35:1626-1632.
- [31] R.P.Daddazio, M.M.Etouney. Boundary element method in probabilistic acoustic radiation problems [J]. Transactions of the ASME: Journal of vibration and Acoustic,1990,112:556~560
- [32] F.Ursell. On the exterior problems of acoustics[C]. Proc. Cambridge Philos. Soc., 1973,74:117-125
- [33]赵键, 汪鸿振, 朱物华.边界元法计算已知振速封闭面的声辐射[[J].声学学报, 1994,19 (1): 2231.
- [34] S.Suzuki. Boundary element analysis of cavity noise problems with complicated boundary condition [J]. Journal of Sound and Vibration, 1989,130(1):7991
- [35]黎胜, 赵德有.流体加载下加筋板结构的声辐射特性[[J].应用声学, 2000,19 ( 6 ) : 2832.
- [36] R.D.Ciskowski, C. A. Brebbia. Boundary Element Methods in Acoustics [M]. CMP, 1991, 7991.
- [37] K.GBryee, J.S.Bolton, T.R.Satha, VNickolas. Radiation efficiency calculatons for verification of boundary element acoustic codes [J]. Noise Control Engineering Journal, 1996,44(5):215223
- [38] Trefftz E.Ein Gegenstack zum Ritz'schen Verfahren. Proceedings of the Second International Congress on Applied Mechanics. Zurich, Switzerland,1926.131 — 137.
- [39] J.Jirousek, N.Leon. A powerful finite element for plate bending [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1977, 12(1):7796.
- [40]秦庆华.Hybrid-Trefftz 有限元的研究进展[J].力学进展, 1998,28(1):7182.
- [41] LHerrera. General variational principles applicable to the hybrid element method [C]. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the U. S.A, 1977.2595 — 2597.
- [42] Qing-Hua Qin. Trefftz Finite Element Method and Its Applications [J]. Transactions of the ASME, Vol. 58, SEPTEMBER 2005:316337

[43] K.YSze, YK.Cheung. A hybrid-Trefftz finite element model for Helmholtz problem[J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2008; 24:2047-2060.

[44]范成高, 陈南, 张肃.基于改进 Trefftz 解析法的封闭空腔噪声有源控制[[J].动力  
学与控制学报, 2006,4 (4): 380384.

[45] W Desmet. A wave based prediction technique for coupled vibro-acoustic analysis [D]. Leuven: Katholieke University Leuven, Department of Mechanical Engineering, 1998.

[46] B. Pluymers et al. Application of an efficient wave based prediction technique for the analysis of vibro-acoustic radiation problems [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2004,168: 353364.

[47] WDesmet, B.Van Hal, P.Sas, et al. A computationally efficient prediction technique for the steady-state dynamic analysis of coupled vibro-acoustic systems [J]. Advances in Engineering Software, 2002, 33:527-540.

[48] R.A.Gingold, J.J.Moraghan. Smoothed particle hydrodynamics: theory and applications to non-spherical stars [J]. Mon Not Roy Astrou Soc, 1977, 181:375-389.

### 三、研究内容

#### 1. 主要研究内容及拟关键技术

##### ➤ 主要研究内容

1) 模态实验方法研究。对比工作状态响应分析以及实验模态分析 (EMA, Experimental Modal Analysis) 结果。以更精确的实验模态方法代替工作状态响应分析。

工作状态响应实验方法: 基于车门总成, 对玻璃升降器电机做 0.3v 直流电压为步长的 9-16v 扫频实验, 对传声器获得的声压测试结果做 FFT 分析, 获取塑料底板模态。

实验模态方法: 断开玻璃升降器电机与机构的连接, 给电机输入稳态的电压。用激光测振仪扫描塑料底板上的网格。根据测量的数据做 FRF (频域响应函数, Frequency Response Function) 分析, 通过曲线拟合获得模态参数。

2) 实验模态分析与基于有限元法 (FEM, Finite Element Method) 的模态及谐响应数值计算的相关性研究。

3) 实验模态分析与矢量声学 PU 方法测得的近场声辐射实验结果的相关性分析。

4) 矢量声学 PU 方法测得的近场声辐射实验结果与基于谐响应结果的近场辐射声振弱耦合数值模拟结果的相关性分析。

5) 基于与实验结果校准完毕的谐响应及近场声辐射的声振弱耦合数值模拟结果计算车门总成的声振强耦合数值模拟, 预测车窗升降运行时的声学特性。

##### ➤ 拟关键技术

1) 实验模态分析方法。包括预实验分析、建立模态模型、数据采集、参数识别及结果验证。

2) 近场声辐射测试。用 PU 探头扫描塑料底板表面的方法, 同时获得标量声压和矢量质点振速两个参考量, 完整地描述一个声场。

3) 基于有限元法的模态分析和谐响应分析数值模拟技术。

4) 基于有限元法耦合边界元法 (BEM, Bondary Element Method), 在谐响应结果前提下近场声辐射的数值模拟

5) 基于声振耦合动力学方程的声振强耦合 (双向耦合) 数值模拟。

## 2. 拟采取的研究方法、技术路线、实施方案及可行性分析

### ➤ 研究方法

本课题研究以数值模型计算和物理模型实验相结合，以多种实验手段为数值模型优化提供支持。最终：在实验研究方面，得到高效、准确的实验验证方法，并将此应用到产品认证中去；在数值模拟研究方面，得到准确的数值模型以及数值计算方法，将此应用到产品开发前期。

在研究过程中，广泛查阅书籍，文献等国内外相关技术资料，充分总结和借鉴国内外已有的研究成果，并在与合作企业充分交流和学习的基础上做了创新研究和尝试，使其在指导企业实际设计研发和分析优化中起到重大作用。

### ➤ 技术路线

本课题采用数值模型计算和物理模型实验相结合方式，通过实验和数值计算相互优化，对每一次数值计算，都用实验的方法来校准数值模型。最终建立一个高效，准确的实验方法用于产品认证。同时得到一个准确的数值模型，将之应用到产品研发的早期，在设计之初就能完善的考虑产品的声振特性。具体技术路线如图 2。

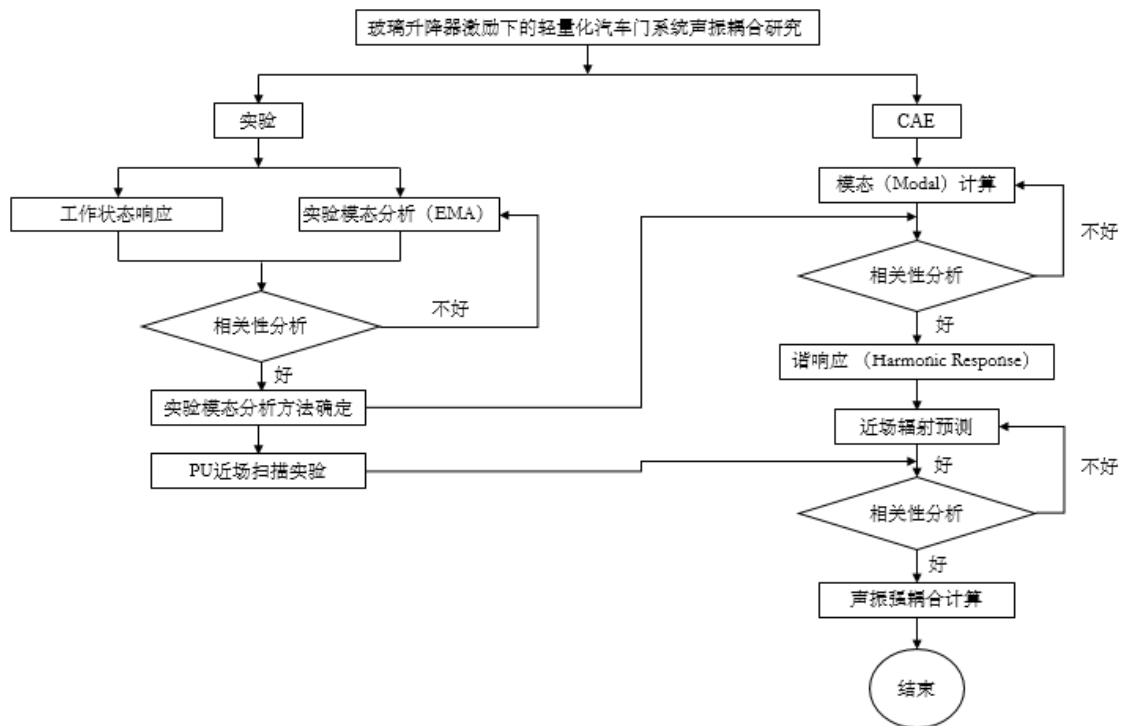


图 2 技术路线图

### ➤ 实施方案

#### 1) 工作状态响应实验

在车门总成上，用 0.3v 为台阶的 9-16v 电压调节玻璃升降，使用传声器拾音，分析得出在这个电机可能受到的电压范围下，门模块的声压反馈。

## 2) 实验模态分析

断开玻璃与玻璃升降器连接，使用特制的电机进行无负载状态下的激励。用激光测振仪扫描轻量化门模块塑料底板上的各点。使用模态测试软件进行模态计算。

## 3) PU 近场扫描

断开玻璃与玻璃升降器连接，使用产线电机进行无负载状态下的激励。用 PU 探头以密集路径扫描整个底板表面，得到近场声辐射云图。

## 4) 数值模拟

使用有限元法进行各种数值模拟计算，如结构模态数值模拟及谐响应数值模拟；采用可视化表现手段对计算结果实施后处理，并得到模态频率、质点幅频特性等关键参数，并且借由已完成的物理实验结果对该数值模型做修正与完善。利用边界元法和有限元法分别获得近场声压的弱耦合结果和近场与结构的声振强耦合结果，并评估其差异。

## ➤ 可行性分析

所在企业在 NVH 测试方面有较丰富的技术能力和设备资源，具备空气声 (Air-borne Noise, ABN)、结构声 (Structural-borne Noise, SBN) 测试，各种模态测试，矢量声学 PU 探头扫描声场的硬件能力以及实现各种声品质计算以及模态计算的软件能力。同时具备数值模拟所需的商用软件以及硬件条件。

本人从事汽车零部件 NVH 工作已经有 9 年的工作经验，其过程中积累了一定的实验以及数值模拟经验。同时还有同济大学老师们的帮助，无论是理论储备和实际操作方面，都有丰富的支持和保障。

综上所述，本课题切实可行。



#### 四、研究基础

##### 1. 所需工程技术、研究条件

- 工作站一台
- 专业声学分析软件：Head Artemis Suite;
- 专业模态实验分析软件：Me'scope
- 商用数值模拟软件：Ansys Workbench 带 ACT 插件；MSC.Actran
- 测试仪器：传感器：1/2”自由场传声器；三向加速度传感器；激光测振仪；PU 质点速度探头；Head Squadriga II 数据采集器等
- 实验所需车门总成、不同状态的定制玻璃升降器电机、轻量化塑料底板等
- CAE 所需 3D 数模

##### 2. 所需经费，包含经费来源、开支预算（工程设备、材料须填写名称、规格、数量）

本课题经费由本人公司承担包括所有软硬件以及实验样件。

五、工作计划

序号	阶段及内容	工作量估计 (时数)		起讫日期	阶段成果形式
1	前期调研：主机厂需求分析，产品实际表现分析，实验方法探索	50		2017.05-2017.09	选题依据
2	文献查找与总结	300		2017.09-2017.10	文献综述
3	工作状态响应试验及实验模态分析	250		2017.10-2017.12	实验数据
4	实验数据分析处理	250		2017.10-2018.02	实验报告
5	车门模块塑料底板参数化建模；前处理；模态，谐相应及进场辐射数值模拟	500		2018.02-2018.05	数值模拟结果
6	实验结果与数值模拟对比	200		2018.05-2018.06	优化主要影响参数
7	制定优化方案并验证	300		2018.6-2018.8	数值模拟与实验验证结果
8	声振强耦合数值模拟	200		2018.8-2018.10	声辐射预测
9	论文撰写及答辩	400		2018.10-2019.2	硕士论文
		合计	2450		

同济大学工程硕士学位论文选题报告评分表

评审项目	权重	评分标准		得分 (百分制)
一、选题依据 (A)	30%	80-100分	直接来源于生产实际或具有明确具体的工程背景，研究内容有较好的实际应用价值	
		60-80分	一定程度上来源于生产实际或具有一定的工程背景，研究内容有一定的实际应用价值	
		60分以下	脱离生产实际，无实际应用价值	
二、理论基础和专门知识 (B)	20%	80-100分	较好的掌握本专业的基础理论和系统的专门知识	
		60-80分	基本掌握基础理论和专门知识	
		60分以下	未能掌握基础理论和专门知识	
三、选题难度及先进性 (C)	30%	80-100分	研究课题具有较高的技术难度、先进性和工作量，充分体现出综合运用科学理论、技术、方法和手段解决工程实际问题的能力	
		60-80分	研究课题具有一定的技术难度、先进性和工作量	
		60分以下	研究课题不符合本领域的发展方向，先进性不明显，难度不大	
四、文字表达 (D)	10%	80-100分	条理清晰，分析严谨，文笔流畅	
		60-80分	条理较好，层次分明，文笔较流畅	
		60分以下	写作能力较差	
五、口头报告 (E)	10%	80-100分	思路清晰、逻辑性强、表述清楚	
		60-80分	基本概念清晰、层次分明、表述较清楚	
		60分以下	表述较差	
总分	总分=0.3A+0.2B+0.3C+0.1D+0.1E			

备注：评审专家只对五项指标每一项的最后一栏内打分（百分制），不必计算总分。

评审小组组成：

组成	姓名	职称	单位	签字
导师				
成员				


注：此评分表作为工程硕士研究生课程成绩单必备的材料之一

年 月 日

六、评审意见

导师（或导师组）对本课题的评价

导师签名\_\_\_\_\_

年 月 日

评审小组的审查结论

组长\_\_\_\_\_组员\_\_\_\_\_

年 月 日

工程领域领导小组意见

负责人签名\_\_\_\_\_

年 月 日