网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20160317.1056.022.html **期刊网址**: www.ship-research.com

引用格式:李环, 刘聪尉, 吴方良,等. 水动力噪声计算方法综述[J]. 中国舰船研究,2016,11(2):72-89.
LI Huan, LIU Congwei, WU Fangliang, et al. A review of the progress for computational methods of hydrodynamic noise[J]. Chinese Journal of Ship Research,2016,11(2):72-89.

水动力噪声计算方法综述

李环, 刘聪尉, 吴方良, 陈灿
中国舰船研究设计中心,湖北 武汉 430064

摘　要: 准确量化评估水动力噪声,对研制反潜水面舰船、安静型潜艇和隐身鱼雷等高性能航行体具有重要意义。由航行体型线变化、表面曲率不连续和各种扰动引起的三维非定常外流场是航行体水动力噪声的源场。分述航行体表面湍流边界层、空腔振荡、空化和粗糙度诱发水动力噪声的机理和研究进展。在分析水动力噪声数值预报难点的基础上,综述流体动力噪声计算方法研究进展。着重比较在航行体水动力噪声工程预报方面有较好前景的3种方法:声类比法、粘声分离法和声边界条件法。

关键词: 航行体; 水动力噪声; 流噪声; 计算方法
中图分类号:U661.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1673-3185.2016.02.011

A review of the progress for computational methods of hydrodynamic noise

LI Huan, LIU Congwei, WU Fangliang, CHEN Can
China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: It is of great importance to accurately evaluate submarine's hydrodynamic noise in order to develop anti-submarine surface warships, stealthy submarines and torpedoes as well as to optimize their hydrodynamic and acoustic performance. Specifically, the three dimensional unsteady flow field over the vehicle is usually caused by the changes of profile, discontinuity of surface curvature, and various perturbations. In this paper, the research progress of the vehicle's hydrodynamic noise induced by the turbulent boundary layer on the surface, cavity oscillations, cavitation, and roughness are introduced, respectively. By analyzing the difficulties in the numerical prediction of hydrodynamic noise, different computational methods of flow induced noise are summarized. A comparison is finally made among three methods in particular, all of which are potential schemes that can be applied in predicting vehicle's hydrodynamic noise.

Key words: underwater vehicle; hydrodynamic noise; flow noise; computational method

0 引　言

水动力噪声和气动噪声同属于流体动力学噪声。流体动力学噪声是指由运动流体与固定边界相互作用及流体内部湍流所引起的辐射噪声,其主要机理是固体与流体的相对运动及流体自身的不规则运动,所激起的流体内部应力和压力扰动在介质内的传递[1]。研究气动噪声的学科称为气动声学。随着现代计算技术和能力的发展,从降低飞行器喷气噪声到控制起落噪声,不同时期所面临的特定飞行器噪声问题推进了气动声学的研究进展[2],并催生出计算气动声学(Computational

收稿日期: 2015-05-19 **网络出版时间**: 2016-3-17 10:56
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1430236,51479041,51279038)
作者简介: 李环,男, 1983年生, 硕士, 工程师。
刘聪尉(通信作者),男, 1990年生, 硕士, 助理工程师。
吴方良, 男, 1975年生, 博士, 高级工程师。

Aero-Acoustic,CAA)理论、方法和技术[3]。同理,研究水流场中噪声的产生、传播、流声耦合作用以及激励边界二次发声等噪声问题的学科称为水动力声学。

水动力声学应用对象主要是水面及水下航行体,包括水面舰船、潜艇和鱼雷等。舰艇[4]和鱼雷[5]皆属复杂的噪声源分布体,其水下噪声主要由机械噪声、推进噪声和水动力噪声3部分组成。水动力噪声由航行体结构受表面湍流脉动压力激励及突体、附体、空腔与湍流脉动压力相互作用产生。若不涉及流动诱发的结构共振发声,水动力噪声也称为流噪声。当航行体达到一定航速时,航行体表面的边界层还可能产生湍流和涡流的分离,进而可能在某些部位的表面产生空化现象,产生的空泡在破裂时能辐射出强烈的噪声。水面舰船水动力噪声的强度随航速的增加而迅速增大,其辐射声功率与航速的5~7次方成正比。航速增加1倍,水动力噪声增加15~18 dB[6]。在较低航速下,水动力噪声对水下航行体辐射噪声的贡献往往被机械噪声和螺旋桨噪声掩盖,当航速大于10~12 kn时,水动力噪声的影响就凸显出来,并在水下辐射噪声中占有较大比例,其影响不容忽视。并且随着机械噪声和螺旋桨噪声的有效控制,水动力噪声对航行体声辐射的作用还将增加,可能成为主要噪声源。

水动力噪声研究涉及国防军事,国外鲜有公开发表的水动力噪声试验和数值计算的文献。国外潜艇先进国家陆续开发了一些面向工程应用的、比较成熟的水动力噪声计算软件。俄罗斯可计算航行器机械噪声、螺旋桨噪声和流噪声,得到给定工况下水下噪声总噪声级和水下噪声数理模型[7];英国的船舶噪声计算软件(NDES)可估算船舶结构噪声[8];英国Frazer-Nast公司的FNV-Noise软件可预报敷盖消声瓦的潜艇近场和远场噪声[9];法国Metravib R.D.S公司的GAP软件可计算直径5 m的典型潜艇低、中频噪声[10];德国土伦海军Cer2dan DCN采用传递函数法预报装艇设备产生的流噪声[11]。此外,俄罗斯还拥有全套鱼雷声学设计指南和水下噪声计算方法,并有着丰富的鱼雷隐身设计经验,早在20世纪60年代就已经成功运用于多型鱼雷的设计制造中[5]。

在国内,一些相关研究院所和高校等[12-14]通过应用商业化通用软件或引用俄罗斯技术对全附体潜艇等航行体的水动力性能及流噪声、自噪声特性进行了计算流体动力学(CFD)及相关试验研究,在流场数值模拟、水动力噪声生成及传播机理等方面取得了一定的成果。目前流噪声预报方法是以Lighthill声类比为理论基础。在计算内核上存在流场、声场信息获取不全、声场和流场物理耦合作用机理解释不清、计算精度不高等缺点,不能满足高精度水动力噪声考核和预报要求。此外,商业软件的计算代码不是开源的,一般使用者无法得知基于气动声学开发的流噪声计算模块是否针对气动特性做了适应性的调整,求解过程中是否做了近似处理或引入了经验参数等问题,制约了水动力噪声的研究发展。

随着水动力噪声对航行体隐身性能影响日趋严重,开展航行体水动力噪声性能评估和总体性能优化设计的需求日益迫切,需要分析水动力噪声产生机理、传播特性和流声耦合等问题,研究适用于水流场,具有高精度量化结果的噪声计算方法,为水动力噪声声学优化设计(譬如型线设计、附体布置、流水孔设计等)提供可靠的量化分析支撑,进而提出有效的水动力噪声控制方法,实现改善航行体水动力和噪声的目标。

1 水动力噪声源

以潜艇为例分析航行体各水动力噪声源的发声机理和噪声特性。

由于潜艇型线变化和表面曲率不连续,来流在潜艇壳外形成非定常流场。在潜艇艏部声呐平台区,艇艏层流边界层转捩为湍流边界层,受到压力梯度、扰动水平、壁面粗糙度等因素的强烈影响,湍流涡运动引起宽频率范围的压力波动,形成流噪声。湍流作用形成的流噪声是主要的自噪声源,在艏部平台区,影响声呐探测能力的最主要因素就是流噪声。

在潜艇中部上层建筑和围壳区,边界层分离流动和水流经过附体与主体表面构成的角区,产生复杂的三维分离流动和涡,尤其在附体根部,边界层和压力场相互作用,在前缘形成由上游向下游运动的“马蹄涡”,与壳体表面的复杂分离流动引起的泄出涡一起向下游发展,进入推进器桨盘面或航行器尾流场,成为重要流噪声源。另一方面,旋涡在突体表面产生湍流脉动压力会直接产生噪声,同时激励壳壁振动并辐射噪声。

此外,当水流自艇艏到达流水孔边缘时,由于表面不连续,流动产生分离,沿流向横跨开孔的内、外流之间,存在不稳定的剪切层波动,其振荡产生的非定常流体脉动压力和旋涡运动,直接导致流动噪声,并直接激发结构噪声。

图1所示为潜艇水动力噪声源发声示意图。以下重点分析湍流边界层和空腔振荡这2个航行体主要噪声源，并简述附体空化和粗糙度对噪声的贡献。

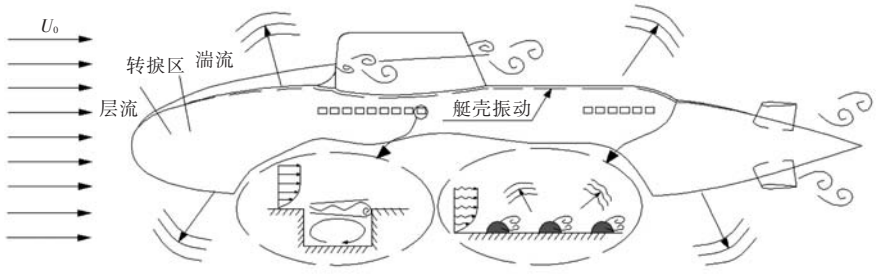


图1 潜艇水动力噪声源发声示意图

Fig.1 Hydrodynamic noise sources of a submarine

1.1 湍流边界层噪声

当舰船、潜艇或鱼雷航行时，壳体边界层由层流逐渐发展为高度复杂的三维非稳态、带旋转的不规则流动——湍流边界层。湍流中随机性和拟序结构运动的规律性，导致流体的各种物理参数（如速度、压力和温度等）随时空近乎随机变化。湍流物理参数的这种脉动，是诱发水动力噪声的首要原因。对拟序结构加以抑制和破坏，能大幅降低噪声[15]。

湍流的拟序结构是指流场中出现的条带结构、各种大涡结构，及其他有组织的流条、流团等。充分发展湍流边界层中的大涡结构包括展向大涡、发卡涡和流向涡，它们的相互作用、能量串级过程以及猝发过程的不断进行，存在于大量随机小涡的背景流场之中[16]。大尺度涡旋的尺度可与流场大小相比拟，取决于流动的边界条件[17]；小尺度涡旋的尺度可能只有流场尺度的千分之一，主要取决于粘性力的影响。湍流拟序结构在统计意义上有规律，但并非完全确定性的结构，其对湍流流动的产生及由此产生的各种物理效应，及水动力噪声起决定作用。Hardin[18]认为湍流边界层的主要声源是边界层中流向涡和初期展向涡之间相互作用，导致二次失稳，形成马蹄涡结构的这一过程。粘性底层的猝发现象可能是次要的二次声源。湍流的另一个重要特点是流体内不同尺度涡旋的随机运动引起流场中各物理量的脉动。大尺度涡的间歇现象和湍流边界层缓冲区内拟周期性猝发现象是引起低频脉动的原因[19-20]，而湍流边界层中内部涡量转移的小尺度涡运动[21]是引起高频脉动的原因。

与湍流边界层噪声关系密切的是脉动压力，包括边界层内部的脉动压力和湍流拟序结构对边壁作用产生的脉动壁压。脉动壁压可视为由垂直于边壁的脉动流速 v' 引起，主要来自靠近边界层底层的拟序结构和猝发现象，也综合反映了对湍流生成贡献最大的缓冲区拟序结构的影响。Skudrzyk等[22]的研究给出了对湍流脉动压力的定量描述。与一般噪声不同，湍流边界层脉动压力同时在频率域和波数域具有特定分布，其主要能量集中于高波数的迁移峰附近。梁在潮[23]通过陡槽试验认为，对于平顺壁面湍流，脉动壁压主要是由低频大尺度拟序结构引起。壁面有突变的湍流，突变处会诱发大尺度旋涡。大旋涡不完全规则的周期运动，加上小尺度涡体的随机作用，使脉动壁压振幅大、频率低，频率分布近似正态分布规律。

湍流边界层脉动压力不仅是声呐平台区的重要自噪声源，还是壁面振动的激励源。湍流边界层噪声主要由2部分组成，湍流边界层直接辐射噪声和湍流边界层脉动压力激励结构振动产生的辐射噪声。

湍流边界层直接辐射噪声的预报是将边界层脉动压力作为“力源”代入到声类比方程预报相应的辐射噪声。Lighthill[24]以喷气飞机自由湍流噪声为研究对象，改写N-S方程，提出声类比理论，将流体噪声源分为单极子源、偶极子源和四极子源3种，分别对应扰动的质量、力和自由湍流噪声，这在水动力声学中也是适用的。

湍流边界层脉动压力激励结构振动产生的噪声涉及流体、结构和声场的耦合作用。对湍流边界层脉动压力这一随机过程进行统计描述的方法为对空间—时间数据，包括自相关函数和互相关函数进行傅里叶变换可得自功率谱密度和互功率谱密度。脉动压力平方的均值 $\overline{p'^2}$ 是对湍流边界层附近压力脉动总能量的度量。壁面压力点功率谱 $\Phi(\omega)$ 模型是以自功率谱密度为基础，将每点处能量按频率分解，被用于估算平板频率响应（ω

为角速度），如Chase-Howe模型[25]、Goody模型[26]和Smol'yakov模型[27]就是基于低速不可压缩流实验数据提出的，与风洞实验结果比较发现Goody模型更适合工程应用[28]。归一化波数—频率谱$\widetilde{\Phi}_{p'p}(k_x, k_z, \omega)$则是在互功率谱密度基础上，将能量按波长分解（$\boldsymbol{k}$为波数向量，$k_x$，$k_z$为波数分量）。通过大量的试验测量拟合出来的经验表达式，即归一化波数—频率谱模型，可用于模态分析以及分析压力脉动对结构体的作用。首先确定湍流脉动压力的波数—频率谱，然后求解结构耦合振动，最后计算外部区域辐射声场或内部区域自噪声场。Corcos模型[29]是最经典的波数—频率谱模型。后来研究者在Corcos模型基础上加以改进，提出Chase[30]模型和Smol'yakov-Tkachenko[31]等模型并进行比较。Howe[25]在Chase模型的基础上考虑了低马赫数（Ma）条件下的平面粗糙度的影响。李福新等[32]将平板尺度及壁面剪切应力脉动对湍流壁压脉动的影响计入到Chase的理论模型中，从而消除Chase模型中的奇异点，并对平板尺度及壁面剪切应力脉动所起的作用进行分析。Borisyuk等[33]以流线型的壳体模型为研究对象，计算不同湍流脉动压力的作用下模型的振动与声辐射情况，验证了在低马赫数湍流激励作用下，Chase和Smol'yakov模型能准确预报分析结构振动和声辐射。王春旭等[34]运用6种脉动压力波数—频率谱模型对槽道流边界层脉动压力自功率谱进行预报，并引入试验结果进行对比，认为Corcos模型物理意义明确，但预报精度稍差；Chase模型表达式复杂，经验性更强，预报精度较高，但物理意义不明晰。此外，能否易于在空间—时间域和波数—频率域之间相互转换，是波数—频率谱模型应用于声学分析的重要考察指标。Smol'yakov-Tkachenko模型不能直接进行傅里叶变换，Graham[31]对Chase模型进行归一化所得的Chase Ⅰ模型可以将波数—频率谱转换成互功率谱[28]，并通过与安静风洞的实验数据进行比较，发现Chase Ⅰ模型更适合工程应用。

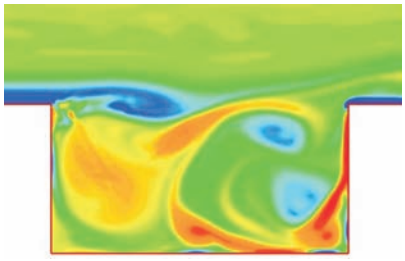
进一步的问题是：湍流边界层中直接辐射和结构应激振动二次辐射哪一个噪声源更为主要？学术界的争论焦点主要在比较壁面剪应力脉动产生的偶极子声源和湍流壁压脉动产生的四极子声源，从而确定湍流边界层辐射噪声的主要因素。Haddle和Skudrzyk[35]通过测量鱼雷形金属壳和实心木料浮体的辐射噪声，认为所测得的声级主要来自湍流边界层内的直接辐射。Vrecchic和Wiley[36]认为湍流边界层噪声在高频段主要是由于直接辐射产生，而湍流边界层固体边界的挠性振动常在低频段占主要地位。Hardin[18]通过保留流体力学基本方程中的高阶项，详细讨论了湍流边界层的声辐射机理，认为湍流壁压脉动是湍流边界层的主要声源，边界层声源辐射效率随着马赫数增大而上升，效率远小于自由喷流和剪切层，是因为顺流增长缓慢和壁面的消除效应。李福新等[32]认为平板的壁面剪切应力脉动实际上可作为声波的传播项而不是湍流边界层中的噪声源项，它描述了平板壁面剪切流动对在平板壁面附近声波传播模式的改变，抑制而非强化湍流壁压脉动的作用，即对声波起吸收作用。进而认为，平板湍流边界层的直接声辐射为四极子声辐射，而非偶极子声辐射；平板湍流边界层辐射声压谱的谱峰出现在中频段，声辐射的能量集中于平板表面粗糙度引起的湍流边界层的声辐射[37]。Pan等[38]用大涡模拟（LES）和Lighthill声类比理论计算光滑的刚性平板上充分发展的湍流边界层，结果表明：对于低马赫数，偶极子源辐射噪声的功率谱决定全场辐射噪声的功率谱，即偶极子源在声辐射场占主导地位，四极子的贡献在一定程度上可以忽略。

可见，进一步研究湍流随机性和拟序结构运动的规律性，明确其对水动力噪声的决定机制，准确掌握湍流边界层内部的脉动压力特性和脉动壁压特性，定量分析比较湍流边界层直接辐射和结构应激振动二次辐射2种噪声源，从而归纳湍流边界层噪声的辐射特性，是湍流边界层噪声的未来研究方向之一。

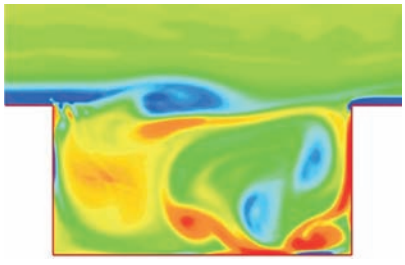
1.2　空腔振荡噪声

空腔诱发的水动力噪声主要体现在空腔自持振荡发声，主要产生自潜艇表面流水孔结构，这一类表面开口会破坏船体外形连续性，从而降低航行器的水动力性能、增大航行阻力[39]，并产生较强的水动力噪声[40]。图2所示为典型的空腔不可压缩流振荡过程。

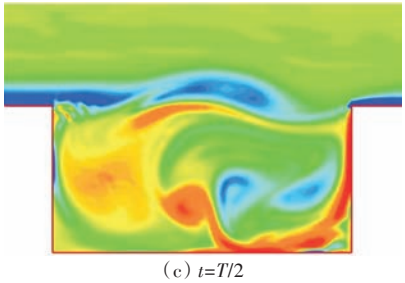
研究空腔自持振荡发声条件和振荡特征是降低空腔诱发水动力噪声的基础。Rockwell和Naudascher[41]依据流激振荡的诱因，把空腔振荡分成流体动力学相互作用、流声共振相互作用和流体弹性相互作用3种形式。Gharib和Roshko[42]采用试验手段研究开式空腔的水流激发振荡问题，认为空腔振荡可分为自维持振荡模式（Self-sustained oscillation）和尾流模式（Wake mode）。当腔长和来流边界层动量损失厚度之比超过80后，自持振荡为剪切层模式。当比值超过



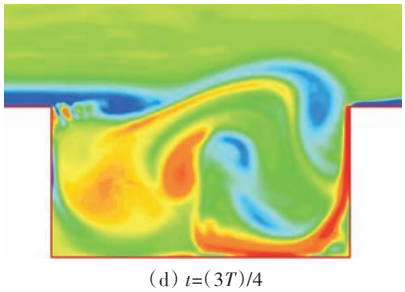
(a) t=0



(b) t=T/4



(c) t=T/2



(d) t=(3T)/4

图2 在来流 U_0=0.31 m/s时,涡量场周期 T 内演变图[41]

Fig.2 The evolution of vorticity field in a period of cavity oscillation computed with 2D LES, the medium is water, U_0=0.31m/s

120后,为尾流模式,阻力会从0.01左右突然增大到0.3左右。很多研究表明,开腔不可压流动中,来流层流边界层会因为剪切层的不稳定性产生自持振荡[43-46]。然而,当来流边界层为湍流时,湍流边界层诱发自持振荡的条件尚不明确[44]。Pereira和Sousa[47]发现湍流边界层流经开腔后周期性振荡的剪切层。Lin和Rockwell[48]也在水槽实验中发现了自持振荡,认为振荡与大尺度涡结构有关。相比之下,Grace等[49]通过分析实验所得湍流来流边界层的速度和压力数据,并没有发现空腔发生自持振荡的迹象。Chatellier等[50]在实验中发现混合层自持振荡,并理论分析了低马赫数下湍流空腔流动的脉动行为。他们认为振荡过程并不由相干结构周期性脱落控制,而是由自然不稳定混合层的对流波决定。然而,Ashcroft和Zhang[51]通过对瞬时脉动速度场的Galilean分解,发现大尺度涡结构的脱落。通过PIV方法发现了相干涡结构,但是严格意义上的涡结构并不总是出现,认为压力谱中的小峰值是弱纯音成分,但并未发现强烈的自持振荡。

借助更强大的计算能力和分析手段,空腔振荡研究的流场计算方法由基于雷诺平均N-S方程(RANS)逐步发展至直接数值模拟(DNS)[52],LES[53]和分离涡模拟(DES)[54]等更高阶方法。声场计算方法则出现了由声类比理论[54-55]向CAA方法[56]发展的趋势。研究对象从简单的空腔模型发展到更复杂的组合模型[55]。可见,就计算方法而言,空腔水动力噪声与潜艇外流场水动力噪声并无二致。对于空腔水动力振荡条件、模式和幅值等研究还有待突破。

1.3 水动力空化噪声

水动力声学中,空化是特别重要的噪声源。空化的体积改变在本质上属于非定常质量变化,因而可视作单极子噪声源。水面舰艇推进器空化问题最为严重,通常从次声频到超声频的整个频谱上都占优势,而潜艇和鱼雷处于深潜航行状态时,空化现象并不突出,但一旦发生空化,就成为主要噪声源。对于液体低压区内生长的空化核,当其半径大于临界半径时便会失稳而发生空化。在正压区内空泡溃灭产生的高速射流会不断冲击使固壁面发生空蚀,同时辐射出强烈的空化噪声,加大了结构物的振动。

流体动力空化产生途径包括流体流动本身或物体在液体中运动相互作用2个方面。Ross[57]根据空化发生的位置把流体动力产生的空化分为以下6类:管路内部,如弯头、阀门等处产生的水力空化;浸没在流体中运动的三维物体表面产生的体空化;浸入在流体中相对流体运动的二维升力翼表面产生的空化;在线涡的涡核中产生的旋涡空化;三维物体尾流涡流中产生的尾流—湍流空化;射流的涡流中的射流空化。

当航行体航速够高时,其表面的边界层可能产生湍流和涡流的分离,进而在一些部位表面可能产生空化现象。对水下10~15 m深处航行的潜艇和鱼雷等水下航行体,当其速度小于10 m/s时,基本不会发生体空化,而当速度大于40 m/s时,空化几乎肯定会发生[58],产生的空泡在破裂时会辐射强烈的噪声。

国内外研究者对于空泡溃灭和空化噪声辐射

等问题进行了大量理论分析。Reyleigh[59]建立不可压缩流中理想球形气泡运动方程式，可以进行空泡溃灭研究，但不适用于空泡溃灭至很小半径的情况。Plesset等[60-62]通过考虑更多实际因素，从不同角度修正Reyleigh方程。对于偏离球形不大的空泡，Benjiamin等[63-66]对空泡的非球形溃灭过程或运动过程分别作了理论方面的研究和数值计算。目前尚未建立完善的理论解决偏离球形很大的空泡运动。

对于固壁面附近的空泡溃灭形成的射流现象，目前还没有解析结果，主要依据数值计算，包括有限差分法[67-68]、修正的MAC方法[66]、变分法[67]和边界元法[69]，整体或分阶段[70]分析空泡溃灭的过程。

为了直观地显示空泡溃灭的过程，实验手段从电解泡、火花泡发展到激光方法产生空泡。目前激光方法能产生球对称性更优良的空泡，保证试验结果与数值解的可比性[71]。空泡溃灭噪声周期比一般压力传感器响应时间短得多[72]，为克服这一困难，Vogel等[73]设计了一套光路用来测量空泡溃灭的实际时间，排除水听器的响应时间影响，修正得到实际空化噪声的值，与数值结果[74]相一致。戚定满等[71]对空化噪声试验结果[75]进行整理，发现空化辐射的噪声与泡中心到壁面的无量纲距离 γ 有关。详细分析比较了不同 γ 情况下，空泡发声过程和发射噪声的大小。此外还发现实验测量的噪声声压级与测量的位置也有很大的关系，辐射噪声具有强烈的各向异性。Sanada等[76]利用全息照相技术也发现了类似的现象。

1.4　粗糙度

表面粗糙度影响来流湍流的畸变、湍流的微尺度运动、水动力压力的辐射、表面涡的产生和脱落，从而极大地加强湍流边界层噪声。声源噪声机理具有很强的非线性耦合作用，难以相互分离。Howe[77]通过在壁面随机分布刚性半球，考察刚性壁面湍流边界层发声的理论模型，基于经典理想流体绕射理论，忽略了壁面粘性应力，认为湍流边界层粗糙度噪声最初是由半球的湍流水动力近场（伪声）诱发的。

这一近似适用于表面粗糙度雷诺数 $Re_\tau = k_s u_\tau / \nu > 10$ 的情况，其中粗糙高度 k_s 通过拟合均匀边界层速度剖面的对数曲线得到。刚性半球突出于壁面，超过粘性底层，满足表面水力粗糙度准则（$Re_\tau > 5$）。Howe进一步研究壁面粘性应力对绕射机制可能的影响。通过假设粗糙度单元充分小以至于完全包含于粘性底层（$Re_\tau < 5$），使平面满足壁面粘性“无滑移”条件，发现在全频率范围内存在粗糙度噪声，辐射噪声由于粘性效应提高最多2 ~3 dB。然而，Howe绕射理论假设所有显著的湍流压力源都在粗糙度单元的上方，只适合粗糙度单元并未从穿透缓冲区的情况。并未考虑湍流与壁面相互作用时，尾流形成、涡的脱落等局部效应产生的新噪声源。因此，粗糙度噪声的远场辐射频谱可以表达成：关于光滑壁面水动力压力脉动频率波数谱 $P_R(x,\omega)$ 的距离平均壁面平面 R 处控制面的无穷积分。

前文介绍了一系列光滑壁面波数频率谱模型[27-30]，这些模型通过摩擦速度 u_τ、边界层厚度 δ 和涡对流速率 U_c 等与 $P_R(x,\omega)$ 建立联系。对粗糙度适度的表面，可以同Howe[78]一样假设粗糙表面同光滑壁面压力谱特征的主要差异是通过 u_τ 和 δ 表征。通过这一假设在迁移峰附近可得到很好的近似值[79]。因此在这种方法中，可用光滑壁面公式近似计算粗糙壁面波数频率谱，而用 u_τ 和 δ 的增大以弥补加强的表面阻力和湍流产生[21]。

积分通常基于在迁移峰附近有大幅峰值的壁面压力谱，利用渐进逼近的方法[80-81]得到。Howe提出计算 $P_R(x,\omega)$ 的经验公式，可调系数取值通过Hersh[82]对管壁布置各种大小砂砾模拟不同粗糙度的试验得到，但并没有充足的数据确定所有的系数值，因此，目前尚不能得到 $P_R(x,\omega)$ 的真实值。Liu[80]等先基于Howe[81]理论模型，对光滑壁面模型归一化波数—频率谱积分得到 $P_R(x,\omega)$，与利用波数空间直接数值积分的方法的结果以及实验中光滑和粗糙平板的噪声谱结果进行比较（图3），验证数值方法近似预测远场辐射粗糙度噪声的频谱形状和真实值，进而分析表面粗糙度对总体噪声的贡献。

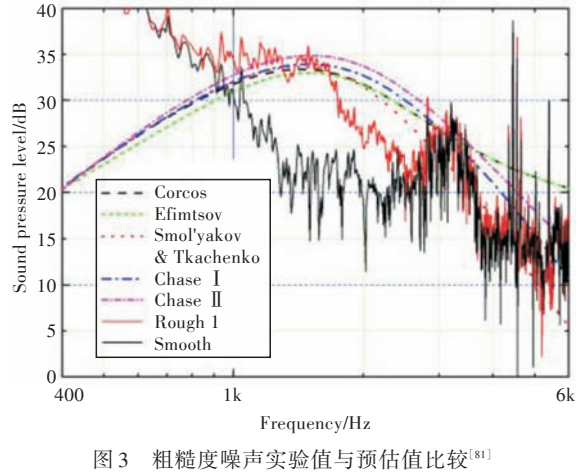


图3　粗糙度噪声实验值与预估值比较[81]

Fig.3　Comparison between experimental and predicted roughness noise spectra

对于湍流边界层粗糙度噪声，利用实验数据对现有的频率波数谱模型进行修正，建立合理的预测模型是下一步研究的方向。数值试验技术将会成为湍流边界层脉动压力频率—波数谱模型研究的新途径[83]。

研究表明，当航行体高速运动时，表面粗糙度噪声在高频水动力噪声中占重要地位。由表面粗糙度引起的噪声包括：1）增加层流边界层中的扰动涡和扰动效率，从而引起转捩区和湍流区产生的附加流噪声；2）由于湍流边界层中近壁面压力脉动增大，结构应激二次声辐射的增强；3）由于边界层压力脉动增大，吸附水中空泡核引起的空泡噪声；4）粗糙体突出湍流边界层粘性底层而产生的直接辐射的涡旋噪声[84-86]。

由于考虑粗糙度，壁面状态更加复杂，其对近壁面流动影响的物理模型复杂性也随之增加：流动雷诺数、边界层排挤厚度、航行体的线型，转捩点位置等流体力学参数和固体表面特性均同直接辐射及壳体振动声辐射有关[87]。研究有效改变以上参数来实现噪声控制是分析水动力噪声中粗糙度影响的发展方向之一。

1.5 小 结

综上所述，当航行体航行时，外壳全部或部分暴露在流体中，物面边界层会由层流发展为湍流。湍流边界层内拟序结构运动规律决定了随机的速度扰动，并产生随机的脉动压力。而突体、附体、空腔也会引起航行体外流场湍流形成，产生较强脉动压力。航行体航速过高时，还会产生剧烈的空化噪声。随机脉动压力和空化溃破过程一方面直接产生辐射噪声，另一方面激励物面弹性结构振动并产生辐射噪声。按照声类比理论，水中流入的质量或热量不均匀时产生单极子声源，如圆柱振动非定常排开流体、空泡噪声和湍流边界层中粘性底层的湍流猝发的随机脉冲冲击壁面发声等；流体中有障碍物存在时，流体与壁面产生不稳定的反作用力时产生偶极子声源，如螺旋桨的旋转声、随机涡发声、圆柱表面交替涡脱落产生正负压力脉冲等；水中没有质量或热量介入，也没有障碍物存在，唯有粘滞应力作用而发声时属于四极子声源，如喷流湍流噪声、脱落涡产生的湍流应力等。

2 水动力噪声数值计算方法

研究水动力噪声时，整个流场划分为声近场和声远场2个部分：声近场包括声源区域，即流场区域，描述声的非线性产生过程，不仅包含有纯的声能量源，声与流动的相互作用（声的散射、输运、衰减等）过程也都包含其中；另一部分描述声的线性传播过程，称为声远场，为声的传播区域。近场、远场划分如图4所示。

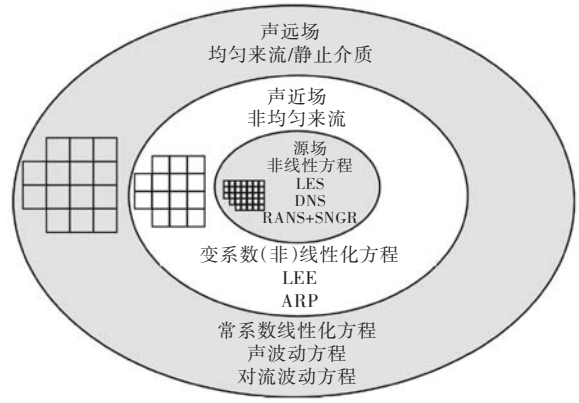


图4 混合CAA技术的近场远场划分示意图[87]
Fig.4 Domain decomposition for hybrid CAA-techniques

2.1 水动力噪声数值预报难点

可压缩N-S方程描述了所有水动力声学现象：水动力噪声产生、水动力场和声脉动场间的相互作用以及声波传播。不同于计算流场平均量的常规CFD技术，水动力噪声数值预报面临以下很多新的挑战：

1）噪声频带宽。分辨率决定能识别的所有声波中最小波长或最高频率。一个波长内至少需要10个网格节点模拟。

2）水动力/声能量不对等。声场包含能量远小于流场。水动力速度脉动大小的均方根量级一般为1 m/s，声场速度脉动在80 dB时为5×10^{-4} m/s；声场运动的幅度远小于湍流场运动幅度。以上不对等现象在低马赫数下更为明显，因为压力脉动是由偶极子和四极子产生，分别是马赫数的3次和4次幂。要确保数值误差远小于声波幅度，否则声场解会被计算产生的噪声毁坏。水动力噪声计算必须有高阶准确性。

3）截然不同的长度尺度。流动噪声问题中涉及的流场长度尺度涵盖了从最小的Kolmogorov微尺度l_η到最大涡的尺度L。声学问题尺度是波长λ，常常远大于l_η。为了精确模拟噪声产生机理，源域网格尺寸远小于单纯模拟声学传播时的网格。在离源域很远处，CFD进行流动仿真通常可使用尺寸较大的网格，但出于声学模拟的需要，需要减小网格尺寸。另一方面，计算时间步长受限于最小网格尺寸，收敛条件CFL数大于临界值时出现数值不稳定。因此有限差分格式的CFL数

必须越高越好。

4）传输特性。声波各向同性，无色散、无耗散，以声速传播；而熵波和涡波是高色散、高耗散、高方向性的，它们以和流动相同的速度沿时均流方向传播。声波出现在整个计算域，一直到远离声源的地方。数值技术中的声波与物理实际波的特性（振幅、波长、频率、传播速度）稍有区别。这个区别就是所谓的耗散和色散误差。由于很多CFD程序是色散、各向异性的，甚至是高耗散的，这种人工色散和耗散适用于求解水动力脉动，但对于声波衰减却是不适用的。为了保证数值准确性在全计算域一致，水动力噪声计算技术的数值耗散和色散要小。Tam和Webb[88]的色散关系保持（DRP）方法将有助于解决这个问题。

5）边界条件。计算域是有限尺寸的，而大量气动/水动声应用是发生在无边界域内（即自由场），所以需要在计算域的人工边界上加上边界条件。CFD应用中，对于流体动力脉动量而言，可以接受一定程度上较为粗糙的近似，而且也能获得较为满意的结果。但是声脉动量幅值很小，发生在边界上的虚假数值反射和其是一个量级，这样计算的流体动力噪声在应用中是不能接受的。所以要采用无反射边界条件[89]，使得流体动力脉动和声脉动在离开计算域时的反射达到最小。

6）非线性。非定常流动产生水动力噪声是一个非线性、非稳态的复杂过程，其控制方程为依赖时间的可压缩N-S方程。在分析噪声产生机理时需要考虑非线性，而在声波传播中不需要严格考虑非线性。目前的湍流模拟，包括RANS，非定常RANS和LES等方法，数值解都过滤掉了具有小空间尺度和高频率的脉动。目前尚未系统分析这种过滤对解的影响。

以上分析的预报难点是气动声学和水动力声学共同面临的。同时，水动力声学又有不同于气动声学之处，尤其是水的可压缩性极弱，水动力声学的马赫数极低。因此，有必要借鉴气动声学计算理论，发展适用于水流场的噪声计算预报方法。噪声预测方法层级如图5所示。

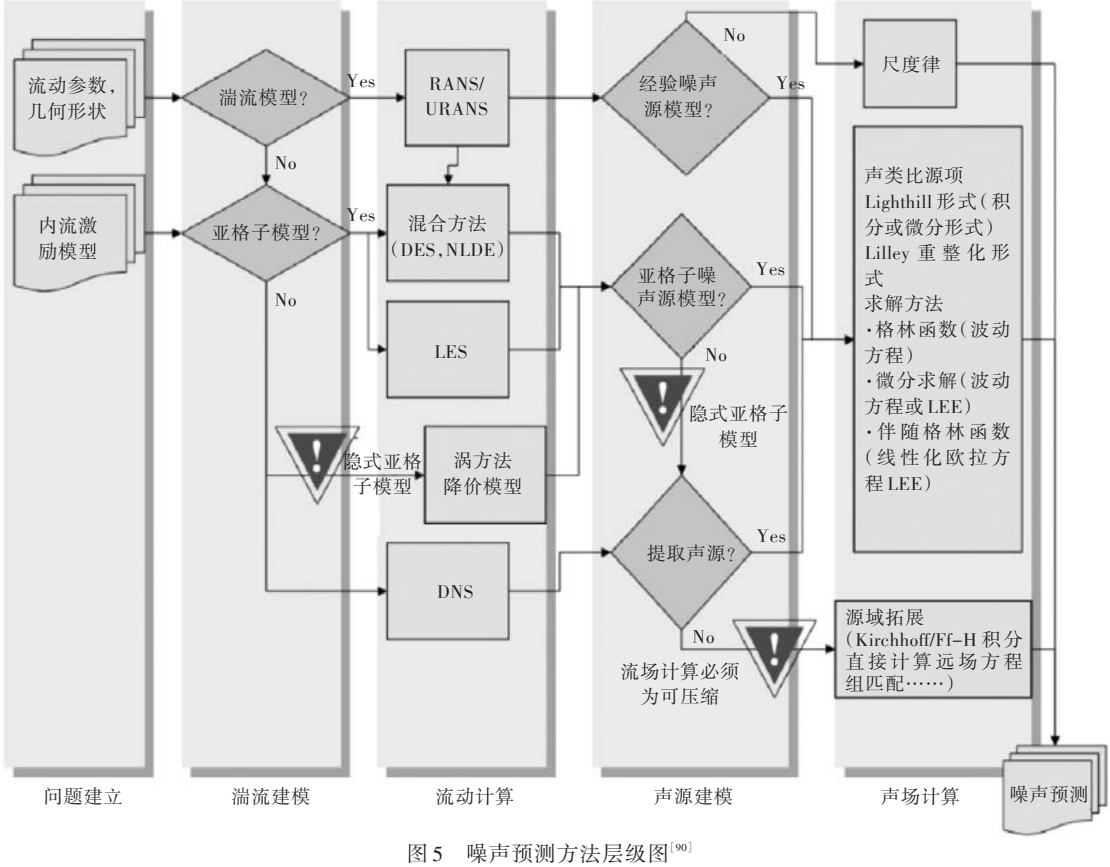


图5　噪声预测方法层级图[90]

Fig.5　A hierarchy of noise prediction methods

水动力噪声计算方法可分为直接计算方法和混合计算方法。

2.2　直接计算方法

直接计算方法的目标是同时计算非定常流动及其产生的噪声。

DNS，即用N-S方程直接求解流动和声音产生，是最精确的方法。该方法的优点是不受流动状态（如低马赫数、高雷诺数）或是声源性质（如紧致声源）等条件的限制，就能计算声音的产生和传

播。特别适合模拟宽频带的湍流噪声。利用DNS模拟湍流的流场和声场是一个双重挑战。一方面,因为需要模拟流动的所有尺度,但当前的高性能计算机只能处理低雷诺数、形状简单的外流场。另一方面,由于声扰动一般不及水动力扰动的千分之一,故难以区分出频带中的压力脉动(伪声)成分。由于DNS需要巨大的计算资源,特别是当流动处于低马赫数时,计算区域受到极大限制,很难在较长距离上计算声场。因此,在计算能力突飞猛进之前,DNS只适用于较高马赫数条件下的气动声研究。作为验证和发展非定常流动和噪声产生模型的标准检查程序,DNS研究正逐渐从理论模型(如旋转涡对[91])的研究,发展到全流域的直接计算,包括超/亚音速喷流[92-93]、湍流涡环[94]、亚音速空腔流[52]和带喷嘴的超音速剪切层[95]等。Garrec等[96]在高雷诺数流动下运用多尺度网格和多时间步长对机翼后缘进了直接噪声计算。

与DNS相比,LES较好地平衡了计算成本和收益[97]。使用LES方法需要注意亚格子模型的准确性同离散误差密切相关,两者对流噪声计算都有很大影响。因此要求高精度、低色散、低耗散的数值格式和高精度、小耗散的亚格子模型。要确保网格有足够的分辨率,识别所有频率的声波。

近场用DNS或LES求解流场后,可以在远场建立合适的网格,采用简化的控制方程,如线性化欧拉方程或波动方程计算声场。在流场和声场重叠区域的要求网格使用高质量的插值格式,控制方程要确保远场近场网格信息的准确稳定的传输[98]。这类在远场和近场边界上进行数据传递的计算方法可称为声边界条件方法[99]。使用声边界条件的主要优势是,当边界变量仅包含声脉动时,这种方法可以看做是LES在这个区域的声学延续,不出现噪声源。如果流动区域计算是精确的,可以认为这种耦合方法给出了最精确的结果。

2.3 混合计算方法

不同于直接计算方法,混合计算方法并不在求解流场的同时,一次性捕获辐射声场,而是在预报流场后,通过另一种不同于流场的计算方法,重新计算获取声场结果。

2.3.1 湍流模型/声类比

声类比方程由N-S方程导出,方程右端代表等效声源,按照单极子、偶极子、四极子等方式在理想介质中进行辐射。等效声源是先验、预先可知的;方程是声学波动方程,控制表示声音在理想介质中的传播过程。适当选取湍流模型,求解非定常流场后,可用来计算等效声源,再运用古典声学求解声学波动方程,就能预报声场。求解过程中,流场和声场是解耦的。

最经典的声类比理论是Lighthill[24]在1952年提出的,适用于自由空间假设下静止流体中自由湍流发声问题。Proudman[100]将它用于计算低马赫数和高雷诺数流动下,衰减的各向同性湍流的声辐射。Curle[101]研究了壁面边界条件的影响,提出壁面边界层的脉动压力将产生偶极子源的声辐射,利用基尔霍夫方法求解声远场。随后,Ffowcs-Williams和Hawkings[102]考虑运动固体边界的影响,得到一个较为普遍的结果,即Ffowcs Williams Hawkings(FW-H)方程。目前声类比方法可以预测在流动的流体介质中,具有任意运动状态的物体表面湍流边界层的噪声辐射声功率。研究者正致力于声类比理论的一般化[103],或是探究更详尽、恰当的源项表达式[104-105]。

声类比理论在水动力噪声预报方面的优势,在于对低马赫数可以忽略压缩性对声音产生的影响,故而近场源域的计算采用不可压缩流的控制方程。因而国内很多学者都使用声类比理论预报潜艇水动力噪声。刘明静等[106]通过对SUBOFF潜艇模型计算,验证绕艇体三维粘性流场计算方法的正确性。在此基础上结合FW-H公式,计算潜艇艏部声呐流噪声声压级,得到不同的艏部声呐结构形式在艏端的不同部位处对压力场和流噪声场的影响规律。杨琼方等[107]采用LES/BEM混合方法预测拖曳和自航状态下SUBOFF模型涡量场和流噪声场特性,研究附体和艇艉桨对涡量场和流噪声等效声中心的影响。江文成等[108]运用无紧致声源假定的边界元法和基于紧致声源假设的FW-H方程考察水滴型潜艇的流噪声,并与大型循环水槽中测得的试验值进行了比较。吴秋云等[109]采用LES/Lighthill混合方法研究了凸体和空腔组合模型的噪声特性。陈力[110]设计了适用于声学模拟的运动边界的锐化界面浸没边界格式,并采用混合LBM/K-FWH方法模拟旋转椭圆柱的噪声辐射。黄胜等[111]采用LES/FWH混合方法模拟艇桨一体的非定常流场和流噪声声场,分析了螺旋桨水动力系数脉动的周期性和艇体的声学指向性。蒋涛等[112]利用LES/Curle混合方法计算潜艇流噪声。张咏鸥等[113]采用商业软件ACTRAN基于有限元/无限元求解Lighthill声类比方方程,研究类阀空腔模型的流噪声。马瑞贤[114]采用弱耦合流固耦合算法和LES方法计算柔性舵非定常绕流场,进一步求解FWH方程计算其远场声辐射。

声类比方法主要是建立了声源和远场之间的关系,在其线性模型中,反射、衍射以及一些非线性因素不被考虑,其主要用于预测声场远场。其共同存在的问题是都假定采用自由空间的格林函数描述声场,基于紧致声源和低马赫数等假设。紧致声源假设要求声源尺寸远小于声波波长,然而在不少场合该假定并不成立,二者尺寸是相当的。在这种情况下,可以将声学类比与边界元法(BEM)[115]、有限元分析方法(FEM)[116-117]结合求解,这为考虑声波传播中流固耦合的影响提供了可能。曾文德等[118]运用CFD和BEM相结合的方法,预报SUBOFF全附体潜艇流噪声,得到特征点的总声级和潜艇声场指向性分布规律,其计算模拟结果符合一般的声学规律。

2.3.2 RANS随机噪声产生模型

水动力噪声的计算时间主要花费在声源域的计算上。RANS方法由于缺少瞬时流场信息,单独使用不足以预测噪声。基于一系列随机傅里叶模式之和,重构时空随机湍流速度场,能提供声源项的统计描述[119],这类模型称为随机噪声产生模型(Stochastic Noise Generation and Radiation, SNGR)。联合采用随机噪声产生模型[120-124]的声学计算方法,只需定常流场即可,计算量小,目前已用于混合噪声[125]、射流噪声[126]和汽车雨刮侧视镜流噪声[127-128]等实际问题,缺点是需要构造与实际问题相适应的湍流扰动量时空分布的模型,湍流模型选取直接影响计算结果,方法的通用性有待检验。陈荣钱[129]比较了2种混合方法:基于RANS/SNGR和声波传播方程的耦合方法以及基于LES和声波传播方程的耦合方法。

2.3.3 离散涡方法/声类比

另一种求解非定常流动的策略是涡方法[130-131],其本质是求解非定常无粘的动力学模型,因而用于模拟粘性流动时成本大幅降低。准确性取决于涡离散的尺度。一旦计算模型经过更多详尽计算、试验结果的验证,就能提供一个有效的仿真工具,研究几何参数对流动和噪声的影响。涡方法求解非定常流动后,将流场数据提交至声类比求解器,即可求解噪声。

二维流动问题中,采用的是有限尺寸的涡斑和点涡。可以联合不可压缩势流方法求解特定形状体动力学问题。Guo[132-133]利用势流保角变换、涡斑数值解和二维FW-H方程计算翼型的前缘和后缘流动分离及其产生的噪声。Howe[134-135]基于涡方法的非定常流动模型预报后缘传播反射噪声问题。这些方法能对与辐射噪声有关的设计变量进行快速评估。Guo的计算结果与实验数据吻合较好,但是,噪声预报的准确性仅限于简化的二维流动模型。使用涡方法模拟三维流动,仍面临着很大的挑战,需要用到涡丝、三维涡斑和涡管。涡丝表示流动的无粘不变量(如环量),如若发生扭曲,有必要重新参数化和光顺。三维涡斑和涡管也受到严格的限制,保持涡量自由发散,同时维持无粘不变量恒定。如果涡方法能进一步考虑固体边界的影响,有可能成为研究噪声产生过程的有效方法。

2.3.4 粘声分离法

这类方法与声类比不同,噪声产生过程的控制方程是不可压缩N-S方程,而计算辐射噪声时则使用简化后的可压缩N-S方程。Hardin和Pope[136]提出粘声分离方法预报低马赫数流动产生的噪声。该方法首先计算近场不可压缩流场由于压强变化所引起的密度变化,称为水动力密度修正。水动力密度修正对时间的导数控制等熵压强(密度)脉动和速度脉动。声音传播通过扰动下可压缩非粘性方程的数值解获得。同声类比理论相比,分步的优势是可直接获得声源强度,并说明了声音辐射和散射的原因。粘声分离方法被应用于计算二维空腔的声音产生[137],以及一对旋转的涡产生的声辐射[138-139]。Shen和Sørensen[140]进一步研究方程,通过稍微改变变量的基本分解形式来修正公式,并依此计算球体在等熵流中的脉动和不等熵的圆柱绕流问题[141]。Slimon等[142]基于马赫数对可压缩N-S方程进行展开,忽略关于马赫数的二阶及更高阶项得到相似形式的声场控制方程。Ewert等[143]采用分离源项的方法,将速度(势)分为3种:时均速度、无散有旋扰动速度和无旋声学扰动速度;由声学扰动和时均速度决定第1种速度势,反映能量变化的第2种速度势和由有旋速度和应力张量决定的第3种速度势。进而推导了一系列带源项的线性声扰动方程,源项由可压或不可压流动决定。对于低马赫数流动,建立了第3种速度势和不可压压强脉动的关系。Zheng等[144]采用旋转双涡算例和无粘涡同有限长弹性边界的耦合作用算例,基于粘声分离方法计算,将结果与解析解作比较,良好的吻合性证实了其适用于流固声耦合问题。Schmitt和Pitsch[145]基于粘声分离法,推导了低马赫数下,变密度化学反应流动的声场控制方程。

2.3.5 带源项的线性化欧拉方程

由于声类比方程左边的波动方程对于声波的反射、衍射以及一些非线性因素不予考虑，只能用于预测声场远场。将N-S方程的流动变量分解成时均量和脉动量，并忽略粘性和高阶项得到线性化欧拉方程（LEE）。类似声类比理论重写N-S方程，但用LEE来描述声波在非均匀时均流动中的近场传播[146]。其中右端源项是声源区模拟的计算结果，分别表示是连续方程、动量方程和能量方程的声源。它们也许包含非定常质量、力和能量源，还有气（水）动声源，以及可以根据时间依赖源域结果计算的非线性和热粘性相互作用现象。时均流变量可以通过计算对总的传播区域的RANS方程轻松获得。对于低马赫数和等熵应用，仅在动量方程中采用源项[67]，且和Lighthill提出的源项是相同的。李坤[147]采用无网格方法求解LEE研究管道声模态传播特性和管道声学元件的声学性能。

对于大多数应用，源域内的湍流量比声变量幅度大几个量级，并没有将脉动量分离为声脉动量和湍流脉动部分。后一个气动脉动量可以认为是从流场计算中获得的，因此对于LEE不是未知的，只需要求解声脉动部分。对于这种分解，所有包含湍流脉动量的项可以看做源项，而包含声脉动量的部分留在左边[148]。如果要消除伪声的作用，可以认为声变量是无旋的，湍流脉动是有旋的，进而使用气动/声分裂技术[149]。

2.3.6 涡声理论

Powell等[150-152]对于流体发声的内部机理、声波与湍流的相互作用等基础问题进行了研究，认为涡的运动、产生和破裂是产生流噪声的原因，可仅将流变量的有旋部分看做声源，建立了涡声理论，将流体辐射噪声与涡量的大小联系起来，在低雷诺数等熵流动下较好预测了二维或三维紧致旋涡声源噪声。涡声理论在揭示湍流边界层流动噪声产生的物理本质方面提供了理论基础。对等熵低马赫数流，涡声方程[135]为：

$$\left\{\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}-\nabla^2\right\}B=\nabla\cdot(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{v}) \tag{1}$$

式中：$B=p/\rho+v^2/2$ 为流体总焓；$\boldsymbol{\omega}$ 为流动涡矢量，$\boldsymbol{\omega}=\nabla\times\boldsymbol{v}$；$\boldsymbol{v}$ 为速度矢量。

式（1）左边的微分表达式描述了声波在非均匀流体中的传播过程，右边表示涡声源，控制方程中将声音产生项和传播项分列等式两边的形式和声类比是类似的。对于等熵低速流动，涡声源的物理意义为涡线在速度场中的拉伸变形所产生的声。换言之，涡声理论认为气动（水动力）噪声来源于涡的拉伸和破裂。对于定常无旋流动，总焓为常数，表明流场中无声波产生。

可见，涡声理论将流动辐射噪声与涡量的大小联系起来，已知流场的涡量大小、变化和运动情况，即可分析得到辐射噪声。Howe等[153-157]又进一步用涡声理论研究了涡环、钝物后涡区、轴向流中涡系等涡系模型的声辐射问题。欧阳华等[158]应用基于CFD的涡脱落噪声预测模型预测风机气动噪声，结果与实验吻合较好。

2.4 小 结

以上综述基本涵盖了所有流体动力声学计算方法，所述方法包括流声耦合计算和解耦计算，第一节中介绍的频率—波数谱模型预报壁面振动噪声属于半经验、半理论方法。在考察航行体水动力噪声时，应当同时考虑边界层直接辐射和艇壳受激二次发声。合适的水动力噪声计算方法应当准确计算声源场脉动量以及声源项，用高阶声场控制方程估计远场声辐射，并能精准提取流固耦合发声的激励源，计算结构振动声辐射。未来水动力噪声计算的目标应当是考虑流固双向耦合和进一步考察流固声耦合的综合效应。

就目前的计算机计算能力和计算方法的实用性而言，可应用于水动力声学的方法，尤其是在航行体水动力噪声工程预报上有较好前景的是声类比法、粘声分离法和声边界条件法这3种方法，其比较如表1所示。

将计算气动声学方法转化为水动力噪声计算方法，首先应该探索各种计算方法的可行性和精确性，通过量化结果衡量算法的有效性，在水介质中实现粘声分离方法计算是对声类比、声边界条件法的补充，以便进行相互印证和比较。其次，通过比较可以看到，综合考察流固声耦合作用的声边界条件方法是目前计算水动力噪声最全面的方法。然而对于三维、大尺度、复杂工况下的工程实际问题，粘声分离方法在流场计算量方面有显著优势；又因为能够综合考虑流体发声，声音的辐射、散射，单向流声耦合作用，与声类比方法相比，粘声分离法更加精确。最后，在利用声传播控制方程计算声场方面，粘声分离方法与声边界条件方法有共通之处，实现粘声分离方法可为声边界条件方法提供帮助，具有借鉴意义。

表1　声类比法、粘声分离法和声边界条件法比较

Tab.1 Comparison of three computational methods of hydrodynamic noise

	声类比法	粘声分离法	声边界条件法
流场控制方程	流域计算可以用RANS 精度要求较低	低阶格式CFD、不可压 精度要求不高	可压缩LES 精度要求较高
声传播控制方程	线性化的波动方程 用等效源项替代整个发声流场	线性化欧拉方程高阶有限差分格式	线性化欧拉方程 高阶有限差分格式
源域和声域间耦合方式	流场计算提供声场方程的等效源项；源项不包含流场声脉动	流场计算提供声场方程能量方程的源项和流动参数；不可压压强包含流场的声学特性	流场计算为声场提供声边界条件；传达全部流场信息
计算域范围	在全声场计算流场；流场与声场在同一区域先后计算	在全声场计算流场；流场计算开始后任意时刻可以开始计算声场	流场与声远场分开，仅在边界处重叠；流场可以更紧凑
缺　点	需要声源的先验知识，不能预测声音产生；声源项不能表达声源内的声脉动	三维计算正确性尚未验证	要求高精度流场计算
优　点	方法简洁，源域计算精度要求不高 用单极子、偶极子和四极子可表述移动表面的声辐射、噪声载荷和脉动雷诺应力	源域计算精度要求不高 直接获得声源强度，并说明了声音辐射和散射的原因 流场、声场可同步计算 适用于等熵流动和不等熵流动	当边界变量包含声脉动时，声域计算成为LES的声学延续，且不增加额外的噪声源 精确的流域计算给出精确的结果

3　结　语

对于水动力噪声问题，LES湍流模型与FW-H声学模型组合能够一定程度上模拟流场及噪声辐射，但存在有流场、声场信息获取不全、声场和流场物理耦合作用机理解释不清、计算精度不高等缺点，尚不能满足潜艇水动力噪声精准预报的发展要求。目前，航行体水动力噪声方面有许多突出问题亟待解决，如噪声机理研究有待深入、数值计算方法的工程应用化、航行体水动力噪声源识别及其对声辐射场贡献量、高性能反潜水面舰船、“安静型”潜艇和“隐身”鱼雷的声学设计和总体性能优化等。应当在已有的机理研究基础上，建立合理的多物理场耦合模型，消化吸收先进的声场算法理论，开展适用于水动力声场传播特性的计算方法研究，开发水动力噪声估算软件，为航行体总体优化设计和水动力噪声研究提供有力的技术支撑，追赶国外先进技术，缩短国内外研究差距。

参考文献：

[1] 周心一，吴有生. 流体动力性噪声的相似关系研究[J]. 声学学报，2002，27(4)：373-378.
ZHOU Xinyi，WU Yousheng. Study of similarities for fluid-dynamic noise [J]. Acta Acustica，2002，27(4)：373-378.

[2] MCALPINE A，ASTLEY R J. Review：aeroacoustics research in Europe：the CEAS-ASC report on 2011 highlights[J]. Journal of Sound and Vibration，2012，331(21)：4609-4628.

[3] TAM C K W. Computational aeroacoustics[M]. New York：Cambridge University Press，2012.

[4] 谭林森，骆东平，吴崇健，等. 潜水器动力舱振动与声辐射[J]. 华中理工大学学报，1999，27(11)：7-9.
TAN Linsen，LUO Dongping，WU Chongjian，et al. The vibration and sound radiation of submarine dynamic cabin[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology，1999，27(11)：7-9.

[5] 刘凯，朱石坚，丁少春. 鱼雷减振降噪技术应用与发展[J]. 鱼雷技术，2008，16(6)：24-27.
LIU Kai，ZHU Shijian，DING Shaochun. Application and development of vibration and noise suppression technology for torpedo [J]. Torpedo Technology，2008，16(6)：24-27.

[6] 李东升，吕世金，俞孟萨. 水面舰船水动力辐射噪声工程估算[C]//水下噪声学术论文选集(1985-2005). 苏州：中国造船工程学会，2005：83-91.

[7] 伏同先. 俄罗斯潜艇声学设计和噪声控制特点分析[J]. 舰船工程研究，1995(2)：31-35.

[8] JENKINS C J，JAMES J H. Theoretical acoustics and its application to submarine radiated noise [C]//Proceeding of the UDT-90 Undersea Defence Technology Conference. London：Microwave Exhibitions and

Pubns Ltd, 1990: 609-614.

[9] BEATTIE G A, KENCHINGTON C J. The assessment of tiling strategies for naval vessel[C]//Proceedings of VDT 1994 Conference, 1994: 176-181.

[10] GARNIER B, AVOLER C. GAP a simple model to calculate vibration & sound radiation of submarines [C]//The Royal Institution of Naval Architects Warship International Symposium on Conventional Navy Submarines, 1988: 3-5.

[11] SILHONETTE L, CHATEL G. Underwater noise control strategy for submarine equipments[C]//Proceedings of VDT 1992 Conference, 1992: 59-62.

[12] 卢云涛, 张怀新, 潘徐杰. 全附体潜艇的流场和流噪声的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2008, 27(9): 142-146.
LU Yuntao, ZHANG Huaixin, PAN Xujie. Numerical simulation of flow-field and flow-noise of a fully appendage submarine[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9): 142-146.

[13] 高霄鹏. 舰艇水动力噪声的数值分析与拖曳模测试技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

[14] 张楠, 沈泓萃, 姚惠之, 等. 孔穴流激噪声的计算与验证研究[J]. 船舶力学, 2008, 12(5): 799-805.
ZHANG Nan, SHEN Hongcui, YAO Huizhi, et al. Validation and calculation of flow-induced noise of cavity[J]. Journal of Ship Mechanics, 2008, 12(5): 799-805.

[15] 林建忠. 湍流的拟序结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

[16] 童秉刚, 张炳暄, 崔尔杰. 非定常流与涡运动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[17] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

[18] HARDIN J C. Acoustic sources in the low Mach number turbulent boundary layer [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90 (2): 1020-1031.

[19] CORRISIN S, KISTLER A L. Free-stream boundaries of turbulent flows: NACA-TR-1244[R]. Baltimore, MD, United States: Johns Hopkins University, 1955.

[20] KINE S J, REYNOLDS W C, SCHRAUB F A, et al. The structure of turbulent boundary layers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 30(4): 741-773.

[21] SCHLICHTING H. Boundary layer theory[M]. New York: McGraw-Hill Book Company Int., 1955.

[22] SKUDRZYK E J, HADDLE G P. Noise production in a turbulent boundary layer by smooth and rough surfaces[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1960, 32(1): 19-34.

[23] 梁在潮. 工程湍流[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.

[24] LIGHTHILL M J. On sound generated aerodynamically. I. general theory[J]. Proceedings of the Royal Society A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences), 1952, 211(1107): 564-587

[25] HOWE M S. Surface pressures and sound produced by turbulent flow over smooth and rough walls [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90(2): 1041-1047.

[26] GOODY M. Empirical spectral model of surface pressure fluctuations[J]. AIAA Journal, 2004, 42(9): 1788-1794.

[27] SMOL'YAKOV A V. Calculation of the spectra of pseudosound wall-pressure fluctuations in turbulent boundary layers[J]. Acoustical Physics, 2000, 46 (3): 342-347.

[28] MILLER T S. Turbulent boundary layer models for acoustic analysis[D]. Kansas: Wichita State University, 2011.

[29] CORCOS G M. The resolution of turbulent pressures at the wall of a boundary layer[J]. Journal of Sound and Vibration, 1967, 6(1): 59-70.

[30] CHASE D M. The wave-vector-frequency spectrum of pressure on a smooth plane in turbulent boundary-layer flow at low Mach number[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90 (2), 1032-1040.

[31] GRAHAM W R. A Comparison of models for the wavenumber-frequency spectrum of turbulent boundary layer pressures[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 206(4): 541-565.

[32] 李福新, 张宇文. 低波数下平板湍流边界层壁压起伏的波数—频率谱[J]. 西北工业大学学报, 1999, 17(1): 9-14.
LI Fuxin, ZHANG Yuwen. Wavenumber frequency spectrum of the turbulent boundary layer wall pressure of a plate at acoustic and subconvective wavenumbers[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1999, 17(1): 9-14.

[33] BORISYUK A O, GRINCHENKO V T. Vibration and noise generation by elastic elements excited by turbulent flow[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 204(2):213-237.

[34] 王春旭, 曾革委, 许建. 湍流边界层脉动压力波数—频率谱模型对比研究[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(1): 35-40.
WANG Chunxu, ZENG Gewei, XU Jian. A comparative study of models for the wavenumber-frequency spectrum of TBL fluctuation pressure [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(1): 35-40.

[35] HADDLE G P, SKUDRZYK E J. The physics of flow

noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1969, 46(1B): 130-157.

[36] VRECCHIC E A, WILEY C A. Noise radiated from a turbulent boundary layer[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1973, 53(2): 596-601.

[37] 李福新, 张宇文, 石秀华. 平板湍流边界层的声辐射[J]. 应用力学学报, 2000, 17(3): 17-22.
LI Fuxin, ZHANG Yuwen, SHI Xiuhua. Direct acoustic radiation from turbulent boundary layer[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2000, 17(3): 17-22.

[38] PAN Y C, ZHANG H X. LES method for investigation of noise generated by turbulent boundary layer[J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(6): 990-1001.

[39] 李环, 方涛, 吴方良, 等. 不可压缩空腔流的振荡模式[J]. 力学学报, 2013, 45(5): 782-186.
LI Huan, FANG Tao, WU Fangliang, et al. The oscillation mode of incompressible cavity flow[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(5): 782-186.

[40] 刘聪尉, 吴方良, 李环, 等. 空腔不可压缩流动特征及其声学特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2014, 29(2): 218-224.
LIU Congwei, WU Fangliang, LI Huan, et al. Investigation on the characteristics of incompressible flow and acoustic fields of cavity[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics(Ser. A), 2014, 29(2): 218-224.

[41] ROCKWELL D, NAUDASCHER E. Review-self-sustaining oscillations of flow past cavities[J]. Journal of Fluids Engineering, 1978, 100(2): 152-165.

[42] GHARIB M, ROSHKO A. The effect of flow oscillations on cavity drag[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 177: 501-530.

[43] ROCKWELL D, NAUDASCHER E. Self-sustained oscillations of impinging free shear layers[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1979, 11(1): 67-94.

[44] ROCKWELL D, KNISELY C. The organized nature of flow impingement upon a corner[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, 93(3): 413-432.

[45] BURROUGHS C B, STINEBRING D R. Cavity flow tones in water[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95(3): 1256-1263.

[46] HOWE M S. Low Strouhal number instabilities of flow over apertures and wall cavities[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(2): 772-780.

[47] PEREIRA J C F, SOUSA J M M. Experimental and numerical investigation of flow oscillations in a rectangular cavity[J]. Journal of Fluids Engineering, 1995, 117(1): 68-74.

[48] LIN J C, ROCKWELL D. Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity[J]. AIAA Journal, 2001, 39(6): 1139-1151.

[49] GRACE S M, DEWAR W G, WROBLEWSKI D E. Experimental investigation of the flow characteristics within a shallow wall cavity for both laminar and turbulent upstream boundary layers[J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(5): 791-804.

[50] CHATELLIER L, LAUMONIER Y, GERVAIS Y. Theoretical and experimental investigations of low Mach number turbulent cavity flows[J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(5): 728-740.

[51] ASHCROFT C, ZHANG X. Vortical structures over rectangular cavities at low speed[J]. Physics of Fluids, 2005, 17(1): 015104.

[52] ROWLEY C W, COLONIUS T, BASU A J. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 455(3): 315-346.

[53] GENG D H, WANG Y. Prediction of hydrodynamic noise of open cavity flow[J]. Transactions of Tianjin University, 2009, 15(5): 336-342.

[54] 刘敏, 张宁, 周友明, 等. 不同形式表面开孔水下回转体流噪声特性研究[J]. 中国造船, 2012, 53(2): 12-18.
LIU Min, ZHANG Ning, ZHOU Youming, et al. Flow induced noise simulation of two underwater fenestrated revolution bodies[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(2): 12-18.

[55] 王玉, 王树新, 刘玉红. 刚性壁面三维陷落腔涡流器噪声机理研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(11): 1321-1328.
WANG Yu, WANG Shuxin, LIU Yuhong. Research on turbulent flow noise mechanism of 3D rigid cavity[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(11): 1321-1328.

[56] 李晓东, 刘靖东, 高军辉. 空腔流激振荡发声的数值模拟研究[J]. 力学学报, 2006, 38(5): 599-604.
LI Xiaodong, LIU Jingdong, GAO Junhui. Numerical simulation of flow-induced oscillation and sound generation in a cavity[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(5): 599-604.

[57] ROSS D. 水下噪声原理[M]. 《水下噪声原理》翻译组, 译. 北京: 海洋出版社, 1983.

[58] COLE R H. Underwater explosions[M]. Princeton: Princeton University Press, 1948.

[59] RAYLEIGH L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. Philosophical Magazine Series 6, 1917, 34(200): 94-98.

[60] PLESSET M S, CLWPMAN R B. Collapse of an ini-

tially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 47(2): 283-290.

[61] NOLTINGK B E, NEPPIRAS E A. Cavitation produced by ultrasonics[J]. Proceedings of the Physical Society: Section B, 1950, 63(9): 674-685

[62] GILMORE F R. The growth or collapse of a spherical bubble in a viscous compressible liquid: No. 26[R]. California: California Institute of Technology Report, 1952: 26-42.

[63] BENJAMIN T B, ELKS A T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A(Mathematical, Physical and Engineering Sciences), 1966, 260(1110): 221-240.

[64] SHIMA A. The behavior of a spherical bubble in the vicinity of a solid wall[J]. Journal of Basic Engineering, 1968, 90(1): 75-89.

[65] MITCHELL T M, HAMMITT F G. Asymmetric cavitation bubble collapse[J]. Journal of Fluids Engineering, 1973, 95(1): 29-37.

[66] HSIEH D Y. Variational methods and dynamics of nonspherical bubbles and liquid drops[C]//Proceedings of the 1973 Symposium on Finite-Amplitude Wave Effects in Liquids. Copenhagen, 1974.

[67] BAILLY C, JUVÉ D. Numerical solution of acoustic propagation problems using linearized Euler equations [J]. AIAA Journal, 2000, 38(1): 22-29.

[68] SZSMRCZAK W G, ROGERS J C W, SOLOMON J M, et al. A numerical algorithm for hydrodynamic free boundary problems[J]. Journal of Computational Physics, 1993, 106(2): 319-336.

[69] ZHANG S G, DUNCAN D H, CHANINE G L. The final stage of the collapse a cavitation bubble near a rigid wall[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 257: 147-181.

[70] LUNDGRER T S, MANSOUR N N. Vortex ring bubbles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 224: 177-196.

[71] 戚定满, 鲁传敬, 何友声. 空泡溃灭及空化噪声研究综述[J]. 上海力学, 1999, 20(1): 1-9.
QI Dingman, LU Chuanjing, HE Yousheng. A review of bubble collapse and cavitation noise[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 1999, 20(1): 1-9.

[72] EBELING K J, ZUM V K. Cavitation sblasen in wesser[J]. Acuatica, 1978: 511-517.

[73] VOGEL A, LAUTERBORN W. Acoustic transient generation by laser-produced cavitation bubbles near solid boundaries[J]. Acoustic Society of America, 1988, 84(2): 719-731.

[74] HICKLING R, PLESSET M S. Collapse and rebound of a spherical bubble in water[J]. Physics of Fluids, 1964, 7(1): 7-14.

[75] TOMITA Y, SHIMS A. Mechanisms of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 169: 535-564.

[76] SANADA N, TAKAYAMA K, ONODERA O, et al. Interaction of an air bubble with a shock wave generated by a micro-explosion in water[C]//Proceeding of the Interaction Symposium on Cavitation. Japan, 1986: 67-72.

[77] HOWE M S. The turbulent boundary-layer rough-wall pressure spectrum at acoustic and subconvective wavenumbers[J]. Proceedings of the Royal Society A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences), 1988, 415(1848): 141-161.

[78] HOWE M S. On the generation of sound by turbulent boundary layer flow over a rough wall[J]. Proceedings of the Royal Society A(Mathematical, Physical and Engineering Sciences), 1984, 395(1809): 247-263.

[79] CHASE D M. Modeling the wavevector-frequency spectrum of turbulent boundary layer wall pressure [J]. Journal of Sound and Vibration, 1980, 70(1): 29-67.

[80] LIU Y, DOWLING A P. Assessment of the contribution of surface roughness to airframe noise[J]. AIAA Journal, 2007, 45(4): 855-869.

[81] HOWE M S. Acoustics of fluid-structure interactions [M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1998.

[82] HERSH A S. Experimental investigation of surface roughness generated flow noise [C]//Proceedings of the 8th American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aeroacoustics Conference. Atlanta: AIAA, 1983.

[83] 俞孟萨, 吴有生, 庞业珍. 国外舰船水动力噪声研究进展概述[J]. 船舶力学, 2007, 11(1): 152-158.
YU Mengsa, WU Yousheng, PANG Yezhen. A review of progress for hydrodynamic noise of ships[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(1): 152-158.

[84] WALDERHAUG H. Paint roughness effects on skin friction [J]. International Shipbuilding Progress, 1986, 33: 96-103.

[85] LEWKOWICZ A K, DAS D K. Turbulent boundary layers on rough surfaces with and without a pliable overlayer: a simulation of marine fouling[J]. International Shipbuilding Progress, 1986, 33: 174-186.

[86] 田军, 徐锦芳, 薛群基. 水下流噪声及其消减措施[J]. 材料科学与工程, 1996, 14(2): 27-30.

TIAN Jun, XU Jinfang, XUE Qunji. The progress of flow noise reduction methods[J]. Materials Science and Engineering, 1996, 14(2): 27-30.

[87] DE ROECK W. Hybride methodologies for the computational aeroacoustic analysis of confined, subsonic flows[D]. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2007.

[88] TAM C K W, WEBB J C. Dispersion-relation-preserving finite difference schemes for computational acoustics [J]. Journal of Computational Physics, 1993, 107(2): 262-281.

[89] TAM C K W, DONG Z. Radiation and outflow boundary conditions for direct computation of acoustic and flow disturbances in a nonuniform mean flow[J]. Journal of Computational Acoustics, 1996, 4 (2): 175-201.

[90] COLONIUS T, LELE S K. Computational aeroacoustics: progress on nonlinear problems of sound generation[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2004, 40 (6): 345-416.

[91] MITCHELL B E, LELE S K, MOIN P. Direct computation of the sound from a compressible co-rotating vortex pair[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 285: 181-202.

[92] FREUND J B, LELE S K, MOIN P. Numerical simulation of a Mach 1.92 turbulent jet and its sound field [J]. AIAA Journal, 2000, 38(11): 2023-2031.

[93] FREUND J B. Noise sources in a low-Reynolds-number turbulent jet at Mach 0.9[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 438: 277-305.

[94] RAN H Y, COLONIUS T. Numerical simulation of sound radiated from a turbulent vortex ring[C]//Proceedings of the 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2004.

[95] BARONE M F, LELE S K. A numerical technique for trailing edge acoustic scattering problems [C]//Proceedings of the 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2003.

[96] LE GARREC T, GLOERFELT X, CORRE C. Direct noise computation of trailing edge noise at high Reynolds numbers [C]//Proceedings of the 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference). Vancouver, British Columbia Canada: AIAA, 2008.

[97] EWERT R, SCHRÖDER W. On the simulation of trailing edge noise with a hybrid LES/APE method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 270(3): 509-524.

[98] FREUND J B, LELE S K, MOIN P. Matching of near/far-field equations sets for direct computation of aerodynamic sound [C]//Proceedings of the 15th Aeroacoustics Conference. Long Beach, CA: AIAA, 1993.

[99] DE ROECK W, RUBIO G, BAELMANS M, et al. Towards accurate hybrid prediction techniques for cavity flow noise applications[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 61(12): 1363-1387.

[100] PROUDMAN I. The generation of noise by isotropic turbulence[J]. Proceedings of the Royal Society A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences), 1952, 214(1116): 119-132.

[101] CURLE N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound[J]. Proceedings of Royal Society A(Mathematical, Physical and Engineering Sciences), 1955, 231(1187): 505-514.

[102] FFOWCS WILLIAMS J E, HAWKINGS D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1969, 264(1151): 321-342.

[103] GOLDSTEIN M E. A generalized acoustic analogy [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 488: 315-333.

[104] BOGEY C, GLOERFELT X, BAILLY C. Illustration of the inclusion of sound-flow interactions in lighthill's equation [J]. AIAA Journal, 2003, 41 (8): 1604-1606.

[105] CABANA M, FORTUNÉ V, JORDAN P. A look inside the lighthill source term[C]//Proceedings of the AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Cambridge: AIAA, 2006.

[106] 刘明静, 马运义. 潜艇艏部声呐流噪声计算方法研究[J]. 船海工程, 2009, 38(5): 46-49.
LIU Mingjing, MA Yunyi. Analysis on hydrodynamic noise simulation around submarine fore region[J]. Ship and Ocean Engineering, 2009, 38(5): 46-49.

[107] 杨琼方, 王永生, 张明敏. 潜艇涡量场和流噪声等效声中心的数值预报[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 64-70.
YANG Qiongfang, WANG Yongsheng, ZHANG Mingmin. Numerical simulation of vorticity field and determination of equivalent acoustic source of flow noises for submarine[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(5): 64-70.

[108] 江文成, 张怀新, 孟堃宇. 基于边界元理论求解水下潜艇流噪声的研究[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2013, 28(4): 453-459.
JIANG Wencheng, ZHANG Huaixin, MENG Kunyu. Research on the flow noise of underwater submarine based on boundary element method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(4): 453-459.

[109] 吴秋云，朱光，刘玉红，等. 水下航行器声通讯安装结构涡流噪声分析[J]. 天津大学学报，2012，45(10)：881-887.
WU Qiuyun，ZHU Guang，LIU Yuhong，et al. Analysis of vortex noise generated by acoustic communication mounted on autonomous underwater vehicle [J]. Journal of Tianjin University，2012，45(10)：881-887.

[110] 陈力. 基于格子Boltzmann方法的水下流噪声数值预报方法研究[D]. 武汉：华中科技大学，2013.

[111] 黄胜，郑小龙，王超，等. 带螺旋桨的潜艇流场及流噪声的数值计算研究[C]//第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会论文集——F船舶与海洋工程流体力学. 青岛：全国水动力学会，2014.

[112] 蒋涛，马军，张萌. 基于大涡模拟的潜艇流噪声预测技术[J]. 海军工程大学学报，2013，25(6)：64-68.
JIANG Tao，MA Jun，ZHANG Meng. Prediction of submarine hydrodynamic noise by using large eddy simulation[J]. Journal of Naval University of Engineering，2013，25(6)：64-68.

[113] 张咏鸥，张涛，刘继明，等. 基于Lighthill声类比的流激噪声三维计算及验证[J]. 舰船科学技术，2014，36(9)：55-59，64.
ZAHNG Yong'ou，ZHANG Tao，LIU Jiming，et al. Three dimensional simulation and validation of the flow-induced noise based on Lighthill's acoustic analogy theory[J]. Ship Science and Technology，2014，36(9)：55-59，64.

[114] 马瑞贤. 舰船柔性舵流噪声产生机理研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014.

[115] CROAKER P，KINNS R，KESSISSOGLOU N，et al. Hybrid CFD/BEM approach to predict flow induced noise[C]//Proceedings of 20th International Congress on Acoustics，ICA 2010. Sydney，Australia：ICA，2010.

[116] OBERAI A A，RONALDKIN F，HUGHES T J R. Computational procedures for determining structural-acoustic response due to hydrodynamic sources [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering，2000，19(3/4)：345-361.

[117] OBERAI A A，RONALDKIN F，HUGHES T J R. Computation of trailing-edge noise due to turbulent flow over an airfoil[J]. AIAA Journal，2002，40 (11)：2206-2216.

[118] 曾文德，王永生，杨琼方. 全附体潜艇流噪声数值计算[J]. 兵工学报，2010，31(9)：1204-1208.
ZENG Wende，WANG Yongsheng，YANG Qiongfang. Numerical calculation of flow noise of submarine with full appendages[J]. Acta Armamentarii，2010，31(9)：1204-1208.

[119] BÉCHARA W，BAILLY C，LAFON P，et al. Stochastic approach to noise modeling for free turbulent flows[J]. AIAA Journal，1994，32(3)：455-463.

[120] VÉDY E，VAN LIER L，SNELLEN M. A Computational aeroacoustics method for real engineering applications[C]//Proceedings of the 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference，2004.

[121] EWERT R，EMUNDS R. CAA slat noise studies applying stochastic sound sources based on solenoidal digital filters [C]//Proceedings of the 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (26th AIAA Aeroacoustics Conference). Monterey，California：AIAA，2005.

[122] EWERT R. Slat noise trend predictions using CAA with stochastic sound sources from a random particle mesh method (RPM)[C]//Proceedings of the 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference). Cambridge：AIAA，2006.

[123] DASH S M，KENZAKOWSKI D C，PAPP J L. Progress in jet turbulence modeling for aero-acoustic applications[C]//Proceedings of the 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit. Breckenridge：AIAA，2002.

[124] BLOM C R A，VERHAAR B T，VAN DER HEIJDEN J C，et al. A linearized euler method based prediction of turbulence induced noise using time-averaged flow properties [C]//Proceedings of the 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit，2001.

[125] KHAVARAN A，BRIDGES J. Modelling of fine-scale turbulence mixing noise[J]. Journal of Sound and Vibration，2005，279(3/5)：1131-1154.

[126] TAM C K W，AURIAULT L. Jet mixing noise from fine-scale turbulence[J]. AIAA Journal，1999，37 (2)：145-153.

[127] BLOM C P A，HAGMMEIJER R，BIESHEUVEL A，et al. A Three-dimensional quadrature-free discontinuous galerkin method for computational aeroacoustics [C]//Proceedings of the 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit，2001.

[128] SNELLEN M，VAN LIER L，GOLLIARD J，et al. Prediction of the flow-induced noise for practical applications using the SNGR methods[C]//Proceeding of Tenth International Congress of Sound and Vibration. Stockholm，Sweden：ICSV，2003：3859-3866.

[129] 陈荣钱. 基于声波传播方程的计算气动声学混合方法研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2012.

[130] LEONARD A. Computing three-dimensional incompressible flows with vortex elements[J]. Annual Re-

view of Fluid Mechanics, 1985, 17(1): 523-559.

[131] COTTET G H, KOUMOUTSAKOS P D. Vortex methods: theory and practice[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[132] GUO Y P. Application of the Ffowcs Williams/Hawkings equation to two dimensional problems[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 403: 201-221.

[133] GUO Y P. Prediction of flap side edge noise[C]// Proceedings of the 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, 1999.

[134] HOWE M S. Trailing edge noise at low Mach numbers[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 225 (2): 211-238.

[135] HOWE M S. Theory of vortex sound[M]. New York: Cambridge University Press, 2002.

[136] HARDIN J C, POPE D S. An acoustic/viscous splitting technique for computational aeroacoustics[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 1994, 6(5/6): 323-340.

[137] HARDIN J C, POPE D S. Sound generation by flow over a two-dimensional cavity[J]. AIAA Journal, 1995, 33(3): 407-412.

[138] LEE D J, KOO S O. Numerical study of sound generation due to a spinning vortex pair[J]. AIAA Journal, 1995, 33(1): 20-26.

[139] EKATERINARIS J A. Upwind scheme for acoustic disturbances generated by low-speed flows [J]. AIAA Journal, 1997, 35(9): 1448-1455.

[140] SHEN W Z, SØRENSEN J N. Comment on the aeroacoustic formulation of Hardin and pope[J]. AIAA Journal, 1999, 37(1): 141-143.

[141] SHEN W Z, SØRENSEN J N. Aeroacoustic modelling of low-speed flows[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 1999, 13(4): 271-289.

[142] SLIMON S A, SOTERIOU M C, DAVIS D W. Computational aeroacoustics simulations using the expansion about incompressible flow approach[J]. AIAA Journal, 1999, 37(4): 409-416.

[143] EWERT R, SCHRÖDER W. Acoustic perturbation equations based on flow decomposition via source filtering[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 188(2): 365-398.

[144] ZHENG T H, TANG S K, SHEN W Z. Simulation of vortex sound using the viscous/acoustic splitting approach [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2011, 35(1): 39-56.

[145] SCHMITT C, PITSCH H. Reactive linearized equations of perturbed compressible variables for low-Mach number variable-density flows[J]. Journal of Computational Physics, 2015, 281: 1-27.

[146] BOGEY C, BAILLY C, JUVÉ D. Computation of flow noise using source terms in linearized Euler's equations [J]. AIAA Journal, 2002, 40 (2): 235-243.

[147] 李坤. 基于无网格方法的声学问题数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

[148] CHU B T, KOVÁSZNAY L S G. Non-linear interactions in a viscous heat conducting compressible gas [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1958, 3 (5): 494-514.

[149] DE ROECK W, BAELMANS M, DESMET W. Aerodynamic/acoustic splitting technique for computation aeroacoustics applications at low-Mach numbers [J]. AIAA Journal, 2008, 46(2): 463-475.

[150] POWELL A. Theory of vortex sound[J]. The Journal of Acoustical Society of America, 1964, 36 (1): 177-195.

[151] HOWE M S. Contributions to the theory of aerodynamic sound, with application to excess jet noise and the theory of the flute[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 71(4): 625-673.

[152] MÖHRING W, MÜLLER E A, OBERMEIER F. Problems in flow acoustics[J]. Reviews of Modern Physics, 1983, 55(3): 707-724.

[153] HOWE M S. On the scattering of sound by a rectilinear vortex [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 227(5): 1003-1017.

[154] HOWE M S. Sound generated by fluid-structure interactions[J]. Computers and Structures, 1997, 65 (3): 433-446.

[155] LEUNG R C K, KO N W M. The interaction of perturbed vortex rings and its sound generation [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 202 (1): 1-27.

[156] DUNNE R C, HOWE M S. Wall-bounded blade-tip vortex interaction noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 202(5): 605-618.

[157] KONNO K, ICHIKAWA Y H. Strong interference of sound pressure generated by vortex soliton with axial flow [J]. Chaos, Solutions and Fractals, 1995, 5 (12): 2485-2493.

[158] 欧阳华, 田杰, 吴亚东, 等. 基于涡声理论的低速轴流风机气动噪声研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(5): 765-768.
OUYANG Hua, TIAN Jie, WU Yadong, et al. Research of aerodynamic noise source of low speed axial fans based on vortex-sound theory[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(5): 765-768.