

理想声源辐射声场的数值分析

李丽君¹, 孙海信², 刘怡然¹, 孙丰山¹

(1. 山东理工大学交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 厦门大学水声通信与海洋技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要 通过声场的特性和规律分析可以识别和定位噪声源, 对噪声控制以及声源的设计提供参考。数值方法是求解有源声场的重要工具, 复杂的声辐射一般可分解为简单的声辐射叠加。研究了单极子、偶极子、活塞等几种理想声源辐射声场的解析解, 并用有限元法计算数值解, 得到相应的辐射声场, 包括声压、速度、指向性等量, 有限元法得到的数值结果与解析解吻合, 利用有限元法计算了点声源的线性阵列与平面阵列等典型的叠加声场。对各种声源的特性和辐射声场的规律以及在工程领域中的应用进行了归纳。

关键词 声源; 声场; 声压; 速度; 有限元法

中图分类号: TH16; TB535 文献标识码: A 文章编号: 1001-3997(2019)04-0192-04

DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2019.04.048

Numerical Analysis on Radiation Acoustic Field of Ideal Sound Source

LI Li-jun¹, SUN Hai-xin², LIU Yi-ran¹, SUN Feng-shan¹

(1. Shandong University of Technology, School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong Zibo 255049, China;

2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Fujian Xiamen 361005, China)

Abstract Through the analysis of the characteristics and laws of acoustic field, the acoustic source can be identified and located, which can provide reference for noise control and acoustic source design. Numerical analysis is an important tool to solve active acoustic field. Complicated acoustic radiation can be disassembled to superposition of simple acoustic radiation. In this paper, analytic solution of monopole, dipole, piston and other radiation acoustic field of ideal acoustic source was studied, and numerical solution calculated by finite element method, corresponding radiation acoustic field including acoustic pressure, velocity, directivity and other items can be acquired, numerical solution from finite element method was consistent with analytic solution. A typical superimposed sound field such as linear and planar array of point acoustic source was calculated by using the finite element method. Applications of various acoustic source radiation field were concluded.

Key Words Acoustic Source; Acoustic Field; Acoustic Pressure; Velocity; Finite Element Method

1 引言

机械传动、气流激励、物体撞击等都是声源, 声源非常复杂, 一般简化为理想声源研究。理想声源可以用解析法来推导, 但是辐射声场的规律, 包括声压、速度、声强、指向性等量, 大多与频率或声源的几何特征相关, 不同情况下有不同的规律。解析法一般用某个物理量远大于或远小于某个值的前提简化解析解, 得到近似值, 而不满足简化条件时只能采用复杂的解析解。数值方法能够计算声源的辐射声场, 得到各点的声压、速度、整个声场的传递模式及指向性等。对于复杂的面声源、不相干的道路噪声等问题, 解析法难以计算, 为解决实际工程应用中复杂的噪声控制问题, 可以采用有限元法等数值方法进行仿真分析得到数值分析结果。

对于从事噪声控制的工程技术人员, 不一定去深入研究噪声产生的机理, 但需要了解噪声源辐射声波的共性和规律。通过声场

的特性和规律可以反过来去识别和定位噪声源。采用有限元法分析了几种理想声源的辐射声场, 总结了各种声源的特性和辐射声场规律以及在工程上的应用^[1]。

2 声场数值分析理论基础

线性化的有源声波方程为:

$$\nabla^2 p - \frac{\ddot{p}}{c_0^2} = \nabla \cdot f - \rho_0 \dot{w} \quad (1)$$

式中 p —声压, 单位为 Pa; c_0 —介质中的声速, 单位为 m/s; f —体积外力集度, 单位为 N/m³; ρ_0 —介质密度, 单位为 kg/m³; \dot{w} —注入的体积速度密度, 单位为 1/s。当体积外力为 0, 声源为单极子和偶极子时, 方程为:

$$\nabla \cdot (\nabla p - q_d) + k^2 p = -\rho_0 Q_m \quad (2)$$

式中 q_d —偶极源强度, 单位为 N/m³; Q_m —单极源强度, 单位为 1/s²。

来稿日期 2018-10-04

基金项目 国家自然科学基金项目(51505261), 山东省自然科学基金项目(ZR2015AM013)

作者简介 李丽君(1977-), 女, 山东淄博人, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向: 车辆振动与噪声控制

3 理想声源的数值分析

对于理想声源,主要研究其两个方面:(1)由声源的特性确定声场的性质,如声场在空间的分布;(2)辐射声场对声源的反作用,对声源振动的影响。由此为基础,反映到工程问题上,则是如何由辐射声场的要求设计出合理的声源或进行声源识别和定位。工程上常用有限元方法可以代替复杂解析公式,得到精确直接的结果,故可用有限元技术对简单的声源进行验证。

3.1 单极源

典型的单极子声源如高速气流经喷口周期性排放的脉冲喷气、稳定气流受到周期性排放的旋笛,以及使空气作周期性位移的零倾角螺旋桨等。单极源可分为两种,一种是脉动球源^[2],一种是当球源半径非常小,可以看作点声源^[3-4]。复杂的面声源可以看作多个点声源的集合,单极源是最基本的声源。内燃机周期性排气时会产生脉动气流,接近脉动球源,当所研究的物体最高频率的波长远大于声源的物理尺寸时,一般可看作单极源^[5]。

对于无限空间辐射的自由行波,脉动球源强度为:

$$Q_m = \frac{4\pi}{\rho_0} A \delta(x-x_0) \quad (3)$$

式中 $\delta(x-x_0)$ —空间狄拉克函数。

$$A = \frac{Q \rho_0 \omega}{4\pi \sqrt{1+(kr_0)^2}} \quad (4)$$

辐射声场的解析解为:

$$p = \frac{-j\omega \rho_0 Q}{4\pi(1-jkr_0)r} e^{jk(r-r_0)} \quad (5)$$

式中 k —波数, r_0 —脉动球源半径, Q —球源体积速度, r —辐射声场的半径, ω —角频率。

单极源辐射声场的径向振动速度为:

$$v_r = \frac{-Qjk \left(1 - \frac{1}{jkr}\right)}{4\pi(1-jkr_0)r} e^{jk(r-r_0)} \quad (6)$$

单极源辐射声强为:

$$I = \frac{Q^2 \rho_0 \omega^2}{32\pi^2 cr^2 [1+(kr_0)^2]} \quad (7)$$

当 kr_0 趋于 0 时,脉动球源简化为点声源,声压为:

$$p = -j\omega \rho_0 Q \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (8)$$

径向质点速度为:

$$v_r = \frac{Qk}{i4\pi r} \left(1 - \frac{1}{ikr}\right) e^{-jkr} \quad (9)$$

半径为 1m 的球形声场中心有单极声源,体积流速 Q 为 $1\text{m}^3/\text{s}$,球形声场表面设置为全吸收的 PML(Perfect Matched Layer)边界,远场采用全积分形式计算。采用有限元法计算声场,网格的最大尺寸必须小于最小波长的 $1/6$ 。有限元法分析得到的声场,如图 1 所示。

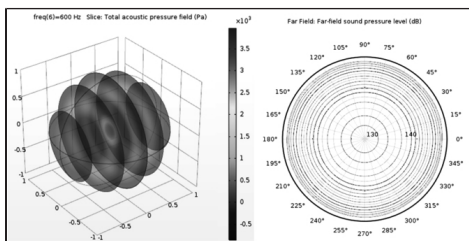


图 1 单极源球形声场切片声压云图与远场指向性

Fig.1 Acoustic Pressure and Far Field Directivity of Monopole Source

脉动球源大小一定时,如果表面振速幅值不变,频率越高,辐射声压越大,在远场处,声压与距离声源的距离成反比,球面波近似于平面波。

3.2 偶极源

风吹电线声、空气压缩机、动片和导流片、倾角不为零的螺旋桨都是常见的偶极子声源。偶极源可以看作是一个简谐振动的小球,或者由两个相距很近,振幅相同方向相反的单极源组成。偶极子声源是力声源,当流体中有障碍物存在时,流体与物体产生的不稳定的反作用力形成偶极子声源^[6-8]。偶极源辐射声场声压为:

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \left(-2j \sin \frac{kl \cos \theta}{2} \right) \quad (10)$$

式中 l —单极源之间的距离, r —场点到偶极源中心的距离, θ —场点与偶极源中心的连线与偶极源方向的夹角。偶极源辐射声场径向速度为:

$$v_r = \frac{kAl}{\rho_0 c_0} \left(j + \frac{1}{kr} \right) e^{j(\omega t - kr - \frac{\pi}{2})} \quad (11)$$

偶极源辐射声强为:

$$I = \frac{A^2 k^2 l^2}{2\rho_0 c_0 r} \cos^2 \theta \quad (12)$$

半径为 1m 的球形声场中心有偶极声源,偶极源强度为 1N/m^3 ,有限元法分析得到的声场,如图 2 所示。

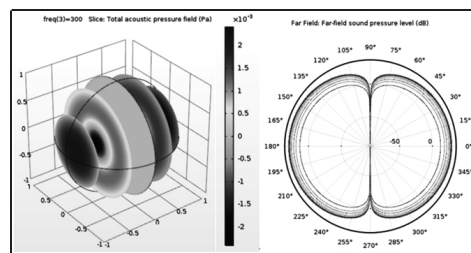


图 2 偶极源球形声场切片声压云图与远场指向性

Fig.2 Acoustic Pressure and Far Field Directivity of Dipole Source

偶极源的远场区与脉动球源一样,声压随距离成反比衰减。偶极源的指向特性在极坐标图上为 8 字形。

3.3 四极源

四极声源相当于一对强度相同相位相反的偶极声源,四极声源是应力声源,喷注噪声是气流从管口以高速喷出时产生的噪声,亚声速湍流喷注噪声是最常见的、影响最广的四极子源噪声,多极源广泛应用于横波测井技术。输气管道发生泄漏时也会产生四极子声源,通过声波传感器提取声波波动的特征量,进而通过声场分析,可以实现泄漏检测和定位。半径为 1m 的球形声场中心有四极声源,四极源由两个强度为 1N/m^3 的偶极源垂直构成,辐射声场,如图 3 所示。

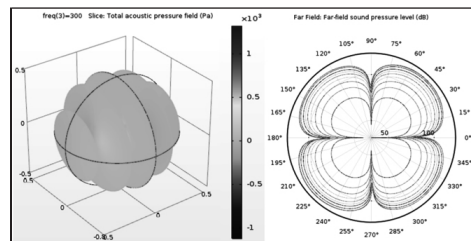


图 3 四极源球形声场切片声压云图与远场指向性

Fig.3 Acoustic Pressure and Far Field Directivity of Fourpole Source

四极源的远场区也是声压随距离成反比衰减。四极源的指向特性为两个互相垂直的8字形。

3.4 活塞声源

无限大平面障板上的平面活塞声源应用广泛,可用来解决很多实际问题。如管道口处的噪声辐射声场,以及机器噪声通过机房的墙壁向外辐射的声场。极大部分种类的电声换能器的振子都可以看作是进行着活塞式运动,其辐射特性一般都遵循活塞声源的辐射规律。

静止时活塞表面与障板表面在同一平面上,活塞以一定速度做简谐振动时,将其看做点声源在面积上的积分,可得到其辐射声场,声压为:

$$p = \iint_S dp = \iint_S j \frac{k \rho_0 c_0}{2\pi h} u_a e^{j(\omega t - kh)} ds \quad (13)$$

式中 S —活塞面积 u_a —表面振速幅值 h —一面元到空间观察点的距离。

无限大障板上半径为 0.2m 的活塞声源辐射声场,如图 4 所示。

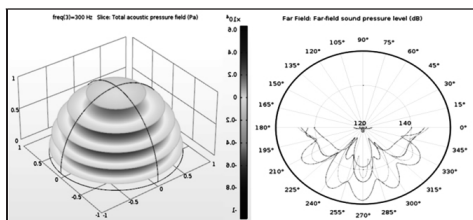


图 4 活塞声场切片声压云图与远场指向性

Fig.4 Acoustic Pressure and Far Field Directivity of Piston Source

4 点声源的叠加

在噪声控制中,噪声源常有多个点源组成且较为复杂,这样则不能等效为理想简单声源。当声源比较复杂且不相干时,可用多个简单声源叠加等效组合求解,故其辐射声场也是这些简单声源辐射的叠加。

4.1 两个同相振动点声源

两个同相振动点声源的组合辐射是构成声柱和声阵辐射最基本的模型。两个位于 $(\pm \frac{d}{2}, 0, 0)$ 、相位相同的稳态点声源,辐射声场的声压为:

$$p = -j\omega\rho_0 Q \left[\frac{e^{jkR_1}}{4\pi R_1} + \frac{e^{jkR_2}}{4\pi R_2} \right] \quad (14)$$

$$\text{其中 } R_{1,2} = \sqrt{\left(x \pm \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + z^2}$$

半径为 1m 的声场,中心有相距 0.4m,强度为 $1\text{m}^3/\text{s}$ 的两个单极源,叠加辐射声场,如图 5 所示。

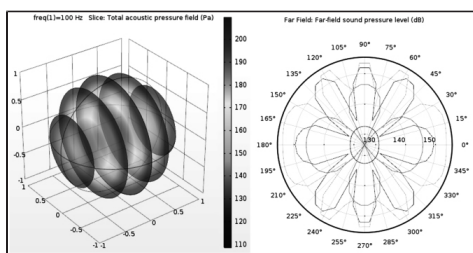


图 5 两个同相球源辐射声场声压云图与远场指向性

Fig.5 Acoustic Pressure and Far Field Directivity of Two in Phase Monopole Source

4.2 线状阵列声源

线阵列音箱能够提供非常良好的垂直覆盖面的指向性,在远距离声辐射时,可获得良好的声效果。通过分析建模可将其简化为 N 个等间距点声源组成的阵列声源模型,辐射声场是各个阵元辐射的和

$$p = -j\omega\rho_0 \sum_{n=1}^N Q_n \frac{e^{jkR_n}}{4\pi R_n} \quad (15)$$

半径为 1m 的声场,中心有相距 0.1m,强度为 $1\text{m}^3/\text{s}$ 的 5 个单极源,叠加辐射声场,如图 6 所示。

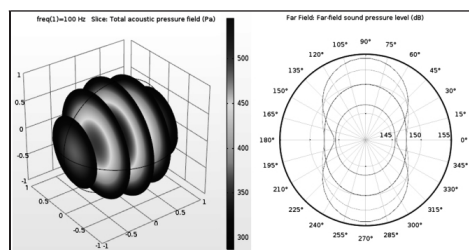


图 6 线状阵列声源声场声压云图与远场指向性

Fig.6 Acoustic Pressure and Far Field Directivity of Linear Source

4.3 贝塞尔面板

阵列式扬声器由 Philips 公司提出,称之为贝塞尔面板,在电影院、剧院和公共广播系统中广泛使用。它由多个等距离放置成行的喇叭组成,即一个单极源的平面阵列。如图 7 所示,两个相邻点声源之间的距离为 0.5m。每个单极源的幅度和相位可以根据实际需要来调整,从而可以调整阵列扬声器的声场分布和指向性^[9-10]。某贝塞尔面板的声场分析,如图 8 所示。

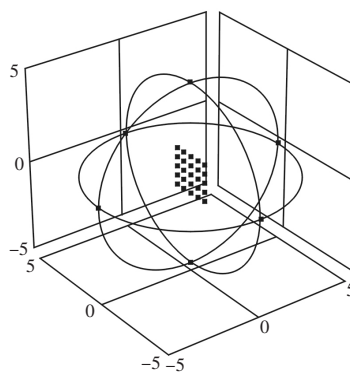


图 7 贝塞尔面板

Fig.7 Bessel Panel

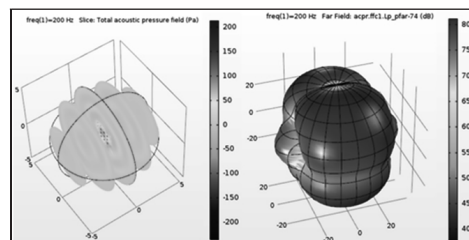


图 8 贝塞尔面板声场声压云图与空间远场指向性

Fig.8 Acoustic Pressure and Far Field Directivity of Bessel Panel

贝塞尔面板可用来等效所需要的复杂声源,通过结构辐射声场的指向特性反求声源。

5 结论

有源声场可以用有限元法等数值方法分析,复杂的声辐射

一般可分解为简单的声辐射叠加。研究了几种理想声源辐射声场的解析解和数值解,有限元法得到的数值结果与解析解吻合,总结了各种声源的特性和辐射规律以及工程应用如下:

(1)脉动球源大小一定时,频率越高,辐射声压越大,在远场处,声压与距离声源的距离成反比,球面波近似于平面波。偶极源和四极源声压随距离成反比衰减,偶极源指向特性在极坐标图上为8字形,四极源指向特性为两个互相垂直的8字形。活塞声源远场声轴线上的声压与距离成反比,不同定向面上辐射声场的指向性不同。

(2)点声源的叠加综合来看在远场区是一个球面波,声压与距离声源的距离成反比,指向性是由于多个点声源辐射的声场在空间个点的有不同的相位关系,相互叠加干涉而形成。

(3)通过声场的特性和规律可以反过来去识别和定位噪声源,对噪声控制以及声源的设计提供参考,具有一定的实际意义。

(4)在车辆噪声控制方面,利用声学有限元法进行数值仿真,从实验得到车身激励模型,计算出车内声场的声压分布和声压的频率响应,分析强迫振动的辐射板件对车内声场的贡献及找出声学影响系数最大的板件。

参考文献

- [1] 马晓晶,刘克,冯涛.旋转点声源声场的数值仿真计算[J].声学技术,2009,28(4):445-449.
(Ma Xiao-jing Liu Ke Feng Tao.Numerical simulation of rotating point source[J].Technical Acoustics,2009,28(4):445-449.)
- [2] 莫登沅,杨琼方,魏应三.脉动球源辐射噪声的快速多极边界元方法预报[J].江苏科技大学学报:自然科学版,2014,28(6):70-74.
(Mo Deng-yuan Yang Qiong-fang Wei Ying-san.Prediction of radiated noise of a fluctuating sphere using fast multipole boundary element method[J].Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition,2014,28(6):70-74.)
- [3] 陈雪莲,魏周拓.随钻单极子声反射测井数值模拟[J].石油学报,2012,35(5):835-840.
(Chen Xue-lian Wei Zhou-tuo.Numerical simulation of monopole acoustic reflection imaging logging in the logging-while-drilling condition [J].Acta Petrolei Sinica,2012,35(5):835-840.)
- [4] 卢再华,张志宏,顾建农.基于粘弹性人工边界的点声源海底地震波 ANSYS 分析方法[J].海军工程大学学报,2011,23(2):63-67.
(Lu Zai-hua Zhang Zhi-hong Gu Jian-nong.Seabed seismic wave caused by point sound source based on viscous-elastic artificial boundaries[J].Journal of Navel University of Engineering,2011,23(2):63-67.)
- [5] 刘志红,仪垂杰.旋转运动声辐射的解析方法[J].机械设计与制造,2015,(12):65-68.
(Liu Zhi-hong Yi Chui-jie.The analytic method for calculating sound radiation from rotating source[J].Machinery Design & Manufacture,2015,(12):65-68.)
- [6] 李吉,于向蕾,王建维.高速射流气动噪声传播特性研究及实验[J].机械设计与制造,2017(2):22-24.
(Li Ji Yu Xiang-lei Wang Jian-wei.High-speed jet aerodynamic noise propagation studies and experiments[J].Machinery Design & Manufacture,2017(2):22-24.)
- [7] Choi H L, Lee D J. Development of the numerical method for calculating sound radiation from a rotating dipole source in an opened thin duct[J]. Journal of Sound & Vibration,2006,295(3-5):739-752.
- [8] 蔡建程,祁大同,卢傅安.离心风机基频气动偶极子噪声的数值研究[J].西安交通大学学报,2009,43(11):66-70.
(Cai Jian-cheng Qi Da-tong Lu Fu-an.Numerical study on blade-passing frequency noise of aerodynamic dipole in a centrifugal fan[J].Journal of Xi'an Jiaotong University,2009,43(11):66-70.)
- [9] 刘哲,陈日林,滕鹏晓.基于平面传声器阵列的声源定位系统[J].声学技术,2011,30(2):123-128.
(Liu Zhe Chen Ri-lin Teng Peng-xiao.Sound source localization system based on planar microphone array[J].Technical Acoustics,2011,30(2):123-128.)
- [10] Budarapu P R, Narayana T S S, Rammohan B. Directionality of sound radiation from rectangular panels[J]. Applied Acoustics,2015(89):128-140.
- [11] Lee Geun-An. Finite element analysis for precision forging process of uninitiated transfer driven parking gear [J]. Materials Science Forum,2007,544(6):327-330.
- [12] 孙永刚,苏庆勇,封进.大型内齿圈热处理方法的有限元模拟探讨[J].热处理技术与装备,2010(5):40-42.
(Sun Yong-gang Su Qing-yong Feng Jin.Study on the finite element simulation of the heat treatment method for large internal gear ring[J].Heat Treatment Technology and Equipment,2010(5):40-42.)
- [13] 刘朝福.回火温度与次数对 SKD61 钢组织和硬度的影响[J].热加工工艺,2015(2):212-219.
(Liu Zhao-fu.Effect of tempering temperature and times on microstructure and hardness of SKD61 steel [J].Hot Working Technology,2015(2):212-219.)
- [14] J Sun K Ji CW Jiang YC Zhang. Influence of various heat treatment stages on evolution of microstructure and grain in H407 steel[J]. Metals and Materials International,2016,22(5):872-879.
- [15] M Stoicanescu E Ene A Zara. The heat treatment influence of 1.3343 high speed steel on content of residual austenite[J]. Procedia Techno-logy,2016(22):161-166.
- [16] E Tan J Ovali A Mavi, etc. Influence of repeated tempering on the machinability and microstructure of an AISI 52100 steel[J]. Materialprufung,2015,57(11-12):947-953.
- [17] A Mishra J Maity. Structure-property correlation of AISI 1080 steel subjected to cyclic quenching treatment[J]. Materials Science & Engineering A,2015(646):169-181.
- [18] RK Janutiene. Investigation of fracture of carbon steel springs used for furniture application[J]. Kaunas Univ Technol,2016(5):432-437.
- [19] Zhichao Li. Heat treatment response of steel fatigue sample during vacuum carburization and high pressure gas quenching process[J]. ASME,2015(1):1-6.
- [20] M Li Z Zhou, etc. Microstructure and mechanical property of 12Cr oxide dispersion strengthened steel[J]. Fusion Engineering & Design,2010,85(7-9):1573-1576.
- [21] A Ellermann B Scholtes. The strength differential effect in different heat treatment conditions of the steels 42CrMoS4 and 100Cr6[J]. Materials Science & Engineering A,2015,6(20):262-272.

(上接第 191 页)