

# 气动噪声相似关系及在风洞试验中的应用

王毅刚, 危巍, 杨洋, 李启良

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 研究以基本气动噪声源(单极子声源、偶极子声源和四极子声源)向远场辐射声功率和物体运动过程中产生的气动噪声与运动速度、物体特征尺寸、距观测点距离和介质特性等的关系, 推出了相似运动物体向远场辐射气动声的相互转换关系式, 并利用气动声学风洞对高速列车模型产生的远场气动噪声进行测量, 据此关系式从低风速测量结果推出了高风速结果, 用试验数据进行验证。研究表明, 此关系式反映了原型和模型之间在远场辐射气动噪声的相互关系, 对模型试验结果分析和向原型的转换具有一定的借鉴作用。

**关键词:** 气动噪声; 气动声学相似; 声功率; 声学风洞; 高速列车模型

中图分类号: O422

文献标志码: A

## Aerodynamic Noise Similar Relationship and Its Application to Wind Tunnel Test

WANG Yigang, WEI Wei, YANG Yang, LI Qiliang

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai, 201804)

**Abstract:** Based on the sound powers of the basic aerodynamic sound sources (monopole source, dipole source and quadrupole source) radiating to the far field and their relations with the moving speed, the feature size, the distance from the observation point and the media characteristics etc, a conversion formula of the aerodynamic sound pressure level (SPL) radiating to the far field between the model and the prototype was derived. Moreover, the aerodynamic SPL outside the flow for a high-speed train model was measured in an aero-acoustic wind tunnel. Based on the testing results and the conversion formula, the aerodynamic SPL of the high-speed train model at higher wind speed was derived from them at lower wind speeds. At the same time, the correctness of the conversion formula has been verified by the testing data. The studies above show that the conversion formula reveals the relationship of the aerodynamic noise in the far field between prototype and model and plays an

important role to analyze the testing results and convert the data in the model experiment.

**Key words:** aerodynamic noise; aeroacoustic similarity; sound power; aero-acoustic wind tunnel; high-speed train model

模型实验是气动声学实验中常用的方法之一, 众多学者一直在探索气动声学的相似准则用来解决模型试验中的各种相似规律<sup>[1-3]</sup>, 一方面希望得到模型和原型之间所满足的相似关系, 正确设计模型试验, 另一方面希望建立模型实验结果和原型之间的转换关系。研究结果也可用于指导模型试验和数据分析<sup>[4-7]</sup>。由于模型实验类别多, 气动噪声源复杂, 这些研究探索性较多, 针对性较强, 普适性不够, 因此, 研究工作需要进一步开展。本研究针对模型的气动声学实验结果和原型之间的对应关系从基本声源的声功率的角度, 探索模型和原型之间的声压关系, 以高速列车模型气动噪声风洞实验数据为基础, 建立高速列车模型和实物之间的关系, 并以实验数据验证研究结果的可靠性。由于试验研究在低速风洞中进行, 所以, 本研究适应于低速不可压缩流动范围。

## 1 模型和原型的气动声关系

气体流动或者物体和气体相互作用引起气体的扰动是气动声产生的根源, 传统的线性声学将这种源形象地划分为单极子声源、偶极子声源和四极子声源<sup>[8]</sup>。流体体元自身体积或质量随时间变化, 产生膨胀和收缩的周期性脉动所辐射的声波被认为是单极子声波。流体体元在外力作用下质心作周期性的摆动所辐射的声波被认为是偶极子声波。流体体元受到周期性的剪切应力作用产生周期性的应变, 且

收稿日期: 2016-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(51375342), 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室资助项目

第一作者: 王毅刚(1964—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为噪声与振动控制。E-mail: yigang.wang@sawtc.com

通讯作者: 李启良(1980—), 男, 工学博士, 副研究员, 主要研究方向为汽车空气动力学和气动噪声。E-mail: qiliang.li@sawtc.com

剪应力成对出现所辐射的声波被认为是四极子声波。

通常物体和气流之间的相互作用所产生的声源不一定是单一声源,它是多种声源相位及时间交叉的特别集合体,是由这三类声源组成,其向外的辐射就形成气动声。根据文献[9]可知,单极子声源向外辐射的声功率为

$$W_M = \iint_S I_M dS = \frac{4\pi r^2 p_{eM}^2}{\rho_0 c_0} = C_M r^2 p_{eM}^2 \quad (1)$$

式中: $W_M$ ,  $I_M$  分别为单极子声源向外辐射的声功率和声强; $S$ ,  $r$  分别为声源包络面面积和包络面半径; $P_{eM}$  为包络面上的声压; $\rho_0$ ,  $c_0$  分别为空气的密度和声速,  $C_M = 4\pi/\rho_0 c_0$ 。

偶极子声源向外辐射的声功率为

$$W_D = \iint_S I_D dS = \frac{4\pi r^2 k^2 b^2}{3\rho_0 c_0} p_{eD}^2 = C_D r^2 p_{eD}^2 \quad (2)$$

式中: $W_D$ ,  $I_D$  分别为偶极子声源向外辐射的声功率和声强; $b$  为偶极子两个脉动球的距离; $k = \omega/c_0$  为波数; $\omega$  为角频率; $P_{eD}$  为组成偶极子的单极子包络面上的声压,  $C_D = 4\pi k^2 b^2 / 3\rho_0 c_0$ 。

根据文献[10]可知,四极子声源向外的辐射声压为

$$p_Q \approx -j \frac{k^2 A b^2}{r} \cos \theta \sin \theta e^{j(\omega t - kr)} \quad (3)$$

式中: $P_Q$  为声压; $A$  为声压振幅; $r$  为测点与声源的距离; $\theta$  为  $r$  与声源面的夹角; $j$  为复数的虚数单位。

经推导得到其质点的径向运动速度为

$$v_{r,Q} = \frac{1}{\rho_0} \int \left( -\frac{\partial p}{\partial r} \right) dt = j \frac{k^2 A b^2}{\rho_0 c_0 r} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) \cos \theta \sin \theta e^{j(\omega t - kr)} \quad (4)$$

声强为

$$I_Q = \frac{1}{T} \int_0^T \text{Re} p_Q \text{Re} v_{r,Q} dt = \frac{|A|^2 k^4 b^4}{2\rho_0 c_0 r^2} \cos^2 \theta \sin^2 \theta \quad (5)$$

四极子声源向外的辐射声功率为

$$\begin{aligned} W_Q &= \iint_S I_Q dS \\ &= \iint_S I_Q r^2 \sin \theta d\theta d\varphi \\ &= \frac{4\pi}{15\rho_0 c_0} |A|^2 k^4 b^4 \\ &= \frac{8\pi r^2 k^4 b^4}{15\rho_0 c_0} p_{eQ}^2 = C_Q r^2 p_{eQ}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式(4)~(6)中: $v_{r,Q}$  为径向质点速度; $W_Q$  为四极子声源辐射的声功率; $I_Q$  为声强; $P_{eQ}$  为组成四极子的单极子声源辐射的声压; $C_Q = 8\pi k^4 b^4 / 15\rho_0 c_0$ 。

从式(1),(2)和(6)可以看出,三种声源向外的辐射声功率具有相同的形式,均与距观察点距离,该点的声压和系数成正比,即,  $W = C r^2 p_e^2$ 。其中, $C$  分别代表  $C_M, C_D, C_Q$ ;  $p_e$  为有效声压,分别代表  $p_{eM}, p_{eD}, p_{eQ}$ 。

辐射的声压级为

$$S_{PL} = 10 \log_{10} (p_e^2 / p_{ref}^2) = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{C r^2 p_{ref}^2} \right) \quad (7)$$

式中, $P_{ref}$  为参考声压。

物体运动过程中产生的气动声与物体运动速度,特征尺寸和介质特性有关,根据文献[10],三种声源声功率有以下关系:

$$\begin{cases} W_M = K_M \frac{\rho_0 U^4 L^2}{c_0} \\ W_D = K_D \frac{\rho_0 U^6 L^2}{c_0^3} \\ W_Q = K_Q \frac{\rho_0 U^8 L^2}{c_0^5} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $K$  为系数,其下标  $M, D, Q$  分别表示单极子、偶极子和四极子; $U$  为气流速度; $L$  为物体特征尺寸。将式(8)三种声源声功率分别代入(7)中,可得:

$$\begin{cases} S_{PL,M} = 10 \log_{10} \left( \frac{K_M}{C_M} \frac{\rho_0 U^4 L^2}{c_0 r^2 p_{ref}^2} \right) \\ S_{PL,D} = 10 \log_{10} \left( \frac{K_D}{C_D} \frac{\rho_0 U^6 L^2}{c_0^3 r^2 p_{ref}^2} \right) \\ S_{PL,Q} = 10 \log_{10} \left( \frac{K_Q}{C_Q} \frac{\rho_0 U^8 L^2}{c_0^5 r^2 p_{ref}^2} \right) \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可知,声压级与特征尺寸  $L$  的平方成正比,与测量点位置  $r$  的平方成反比。而声压级与速度的关系会因声源类型而异,单极子与速度的四次方成正比,偶极子声源与速度的6次方成正比,四极子声源与速度的八次方成正比。

对于运动物体而言,假设其运动过程中产生的气动噪声是由不同数量的单极子声源、偶极子声源和四极子声源组成,设有  $A_M$  个单极子、 $A_D$  个偶极子以及  $A_Q$  个四极子。根据公式(9),在距离  $r$  处,物体产生的声压级可表示为

$$S_{PL} = 10 \log_{10} [(A_M p_{eM}^2 + A_D p_{eD}^2 + A_Q p_{eQ}^2) / p_{ref}^2] \quad (10)$$

由式(9)~(10)得:

$$\begin{aligned} S_{PL} &= 10 \log_{10} \left( X_1 \frac{U^4 L^2}{r^2} + X_2 \frac{U^6 L^2}{r^2} + X_3 \frac{U^8 L^2}{r^2} \right) \\ &= 10 \log_{10} \frac{L^2}{r^2} (X_1 U^4 + X_2 U^6 + X_3 U^8) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $X_1, X_2, X_3$  分别为待定系数,

$$X_1 = A_M K_M \frac{\rho_0^2}{4\pi p_{ref}^2} \quad (12a)$$

$$X_2 = A_D K_D \frac{3\rho_0^2}{4\pi c_0^2 k^2 b^2 p_{ref}^2} \quad (12b)$$

$$X_3 = A_Q K_Q \frac{15\rho_0^2}{8\pi c_0^4 k^4 b^4 p_{ref}^2} \quad (12c)$$

对于两个气动声学相似的物体(原型和模型),其声压级转换关系为

$$\Delta S_{PL} = S_{PL_1} - S_{PL_2} = 10\log_{10}\left(\frac{L_1^2 \cdot r_2^2}{L_2^2 \cdot r_1^2}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{X_1 U_1^4 + X_2 U_1^6 + X_3 U_1^8}{X_1 U_2^4 + X_2 U_2^6 + X_3 U_2^8}\right) \quad (13)$$

由式(11)和(13)可以看出,如果求得  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ ,就可以估算物体运动向远场辐射的噪声大小,对于气动声学相似的原型和模型就可以得到它们之间的远场声压级转换关系,所求声压级为总声压级,没有考虑和频率之间的关系。

## 2 低风速风洞气动噪声测试结果向高风速的推导

通常,低速风洞在试验段的风速不一定能够满足所有实验的需求.如同济大学的气动-声学风洞其最高风速为  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,而对高速列车而言,其实际运行速度可以超过  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,甚至更高.为了在试验条件下得到更高速度的气动噪声结果,可以利用式(13)获得.但对于更高速时,如马赫数超过 0.3,该公式不能使用。

### 2.1 高速列车模型的气动噪声试验

#### (1) 气动声学风洞试验平台

同济大学气动声学风洞为开口式风洞,喷口面积  $27 \text{ m}^2$ ,试验段长度  $15 \text{ m}$ ,最高风速为  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,试验段为半消声室,如图 1 所示.在风速为  $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下,背景噪声仅为  $61 \text{ dB(A)}$ .  $\text{dB(A)}$ 表示对声信号进行 A 计权处理后的单位。

#### (2) 高速列车试验模型

选取某高速列车三车编组 1:8 缩比模型(不含受电弓导流罩),模型固定在支撑底板上,如图 2 所示.主要气动噪声来自于头尾、转向架、车连接部位和车与底板间的支撑和间隙。

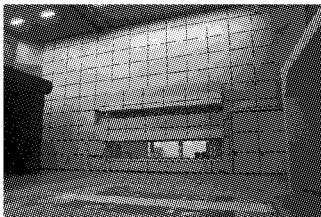
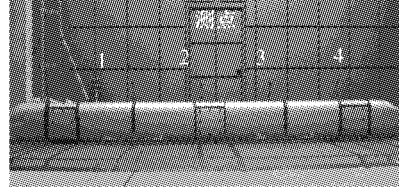


图 1 气动声学风洞试验段  
Fig.1 Test section of the aero-acoustic wind tunnel

#### (3) 测点位置

为了测量列车模型的远场噪声,在平行于列车模型且距其中心线  $7.5 \text{ m}$ ,间隔  $3 \text{ m}$ ,离地面高度为  $0.8 \text{ m}$  布置 4 个自由场传声器,传声器加防风罩(该区域有较小的风速),处于流场外.如图 2 所示。



a 高速列车模型位置



b 传声器位置

图 2 高速列车模型,风洞中的安装位置及传声器测点位置

Fig.2 High-speed train model, its installation and locations of microphones

#### (4) 声压级测量结果

在风洞试验中测得 1:8 模型在 4 种风速下 4 个测点的声压级,见表 1.可以根据表 1 中前 3 个风速下声压级测量结果得到式(13)中的待定系数,用最后一个风速的测量结果来验证式(13)的正确性。

表 1 不同速度外场测点声压级  $S_{PL}$

速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{dB(A)}$			
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
50.00	72.1	72.7	72.4	72.3
55.56	75.0	75.6	75.4	75.3
63.89	78.8	79.4	79.2	79.0
69.44	81.3	81.9	81.5	81.4

### 2.2 基于风洞试验结果的相似关系式建立

根据式(13)中,针对三个风速和测量得到的声压级可以形成矩阵方程(14)。

$$\frac{r^2}{L^2} \begin{bmatrix} 10^{\frac{S_{PL_1}}{10}} \\ 10^{\frac{S_{PL_2}}{10}} \\ 10^{\frac{S_{PL_3}}{10}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1^4 & U_1^6 & U_1^8 \\ U_2^4 & U_2^6 & U_2^8 \\ U_3^4 & U_3^6 & U_3^8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

利用  $50, 55.56$  以及  $63.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  三种速度大小及其声压级,通过求解矩阵方程(14),求得待定系数  $X_1, X_2, X_3$ . 见表 2。

表 2 待定系数求值

Tab.2 Undetermined coefficient

待定系数	速度/(m·s <sup>-1</sup> )			
	50.00	55.56	63.89	
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
X <sub>1</sub>	-133.168 3	-152.898	-404.917	-556.061
X <sub>2</sub>	0.355 61	0.408 29	0.537 21	0.641 08
X <sub>3</sub>	0.000 001 36	0.000 001 56	-0.000 019	-0.000 039

$$\Delta S_{PL_1} = S_{PL_1} - S_{PL_2} = 10\log_{10}\left(\frac{L_1^2 \cdot r_2^2}{L_2^2 \cdot r_1^2}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{-133.168 3U_1^4 + 0.355 61U_1^8 - 0.000 001 36U_1^8}{-133.168 3U_2^4 + 0.355 61U_2^8 - 0.000 001 36U_2^8}\right) \quad (15)$$

测点 2:

$$\Delta S_{PL_2} = S_{PL_1} - S_{PL_2} = 10\log_{10}\left(\frac{L_1^2 \cdot r_2^2}{L_2^2 \cdot r_1^2}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{-152.898U_1^4 + 0.408 29U_1^8 - 0.000 001 56U_1^8}{-152.898U_2^4 + 0.408 29U_2^8 - 0.000 001 56U_2^8}\right) \quad (16)$$

测点 3:

$$\Delta S_{PL_3} = S_{PL_1} - S_{PL_2} = 10\log_{10}\left(\frac{L_1^2 \cdot r_2^2}{L_2^2 \cdot r_1^2}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{-404.917U_1^4 + 0.537 21U_1^8 - 0.000 019U_1^8}{-404.917U_2^4 + 0.537 21U_2^8 - 0.000 019U_2^8}\right) \quad (17)$$

测点 4:

$$\Delta S_{PL_4} = S_{PL_1} - S_{PL_2} = 10\log_{10}\left(\frac{L_1^2 \cdot r_2^2}{L_2^2 \cdot r_1^2}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{-556.061U_1^4 + 0.641 08U_1^8 - 0.000 039U_1^8}{-556.061U_2^4 + 0.641 08U_2^8 - 0.000 039U_2^8}\right) \quad (18)$$

利用式(15)~(18),预测同一模型比例在 69.44 m·s<sup>-1</sup>时的声压级,并以试验所得数据进行对比.表 3 给出了不同 U<sub>1</sub> 时推算出测点 1~4 在风速为 69.44 m·s<sup>-1</sup>的声压级.与试验测量值相比差值最大 0.33 dB,与实验测量结果较为吻合.说明利用式(15)~(18)可以从低风速时的试验结果推算较高风速下的值(气流流动在不可压缩范围内).

表 3 69.44 m·s<sup>-1</sup>速度下声压级预测以及试验数据对比  
Tab.3 S<sub>PL</sub> comparison between conclusion and test at 69.44 m·s<sup>-1</sup>

测点	测量值 S <sub>PL</sub> /dB(A)	U <sub>1</sub> / (m·s <sup>-1</sup> )	式(15)~ (18)	两者相 差/dB(A)
测点 1	81.3	50.00	80.97	0.33
测点 2	81.9		81.57	0.33
测点 3	81.5		81.46	0.04
测点 4	81.4		81.07	0.33
测点 1	81.3	55.56	80.99	0.31
测点 2	81.9		81.59	0.31
测点 3	81.5		81.44	0.06
测点 4	81.4		81.07	0.33
测点 1	81.3	63.89	81.02	0.28
测点 2	81.9		81.63	0.27
测点 3	81.5		81.41	0.09
测点 4	81.4		81.07	0.33

### 3 讨论

式(11)和(13)是根据物体运动产生的气动噪声向远场辐射的声功率推导出来的,得到的是远场气

动噪声的总声压级,不能预测声压级的频谱特性.该式所表达的气动噪声声压级及两相似运动物体间的气动噪声关系与物体的特征长度 L,远场观察点到物体的距离 r,物体运动的速度和流体物理特性有关.所以,如果两运动相似的物体(如原型和模型)可以利用上述关系式开展下述方面的预测工作,气动噪声值为总声压级:

测点 1:

(1)已知物体低速运动时的气动噪声,推算较高速度下物体产生的气动噪声(在不可压缩范围内);

(2)已知物体在某观测点产生气动噪声,推算物体在另一观测点产生的气动噪声;

(3)不同大小的物体,如模型和原型,已知模型产生的气动噪声,推算原型产生的气动噪声;

(4)特征尺寸、观察点距离、运动速度都不同的两物体,已知其中一个物体的气动噪声,推算另一物体的气动噪声.

### 4 总结

研究工作基于在模型实验中存在的模型与原型产生的气动声如何转换的问题,从物体运动产生的气动声向远场辐射的声功率大小入手,认为物体产生的气动声是由不同数量的单极子声源、偶极子声源和四极子声源组成,其向远场辐射的气动声是由这些声源辐射声叠加而成;另外,物体运动产生气动噪声表现出的单极子声源、偶极子声源和四极子声

源辐射特性与物体运动速度的不同次方、物体的特征尺寸和远场观察点到物体的距离有关. 根据这些关系推导出两运动相似物体(如原型和模型)向远场辐射噪声的关系式,从而建立了原型和模型向远场辐射气动噪声的相似关系,得到了计算远场气动噪声总声压级的相似关系式. 为了验证和进一步说明这一关系,利用气动声学风洞对某1:8高速列车模型产生的远场气动噪声总声压级进行测量,并利用上述关系,从低风速试验结果推出了较高风速的结果,验证了上述建立的关系式的正确性,并进一步讨论了这一关系式更广泛的应用能力. 所以,研究工作建立了运动相似物体产生的气动噪声向远场辐射的总声压级相似关系,对模型试验结果分析和向原型的转换具有一定的借鉴意义.

#### 参考文献:

- [1] 顾大伟, 钟芳源. 气动声学相似理论与试验研究[J]. 航空动力学报, 1987, 2(4): 289.  
GU Dawei, ZHONG Fangyuan. Aeroacoustic similarity principles and their experimental investigation [J]. Journal of Aerospace Power, 1987, 2(4): 289.
- [2] 居鸿宾, 钟芳源. 自由场气动声学相似理论与实验研究[J]. 空气动力学学报, 1996, 14(1): 31.  
JU Hongbin, ZHONG Fangyuan. Theoretical and experimental research on aeroacoustic similarity in free space [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1996, 14(1): 31.
- [3] 周心一, 吴有生. 流体动力噪声的相似关系研究[J]. 声学学报, 2002, 27(4): 373.  
ZHOU Xinyi, WU Yousheng. Study of similarities for fluid-dynamic noise [J]. Acta Acoustica, 2002, 27(4): 373.
- [4] Neise W. Application of similarity laws to the blade passage sound of centrifugal fans[J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 43(1): 61.
- [5] Neise W, Barsikow B. Acoustic similarity laws for fans [J]. ASME, Journal of Engineering for Industry, 1982, 104(2): 162.
- [6] Nagakura K. Localization of aerodynamic noise sources of Shinkansen trains [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3-5): 547.
- [7] 高永卫, 乔志德. 螺旋桨风洞实验气动声学相似准则研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 23(4): 430.  
GAO Yongwei, QIAO Zhide. Experimental research of propeller aeroacoustic scaling law in wind tunnel [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 23(4): 430.
- [8] Rimsky-Kprakov A V. Aerodynamic noise sources [J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 43(2): 199.
- [9] Farassat F. Introduction to generalized functions with applications in aerodynamics and aeroacoustics [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 230(2): 460.
- [10] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
MA Dayou. Modern acoustics theory foundation [M]. Beijing: Science Press, 2004.