

试油测试燃烧器噪声场的计算

彭贤强^{1,*} 刘玲莉²

(1. 中国石油长城钻探工程有限公司测试公司, 北京 100101; 2. 中国石油勘探开发研究院亚太研究所, 北京 100083)

摘要 在试油测试期间, 燃烧器喷射和燃烧产生的噪声会对人员和环境造成较大的危害, 故有必要对燃烧过程中噪声预测展开研究, 其结果对于评估平台燃烧噪声危害、优化作业设计及进一步采取降噪措施有重要意义。结合测试燃烧器实际情况提出相应声学计算模式。基于经典燃烧噪声理论及流体动力学噪声的 Lighthill 理论, 通过相似准则的量纲分析方法推导出喷射及燃烧噪声计算公式, 并通过声波叠加原理得到声源噪声。同时考虑指向性、扩散衰减、空气吸收、水喷淋消音等减噪因素建立测试燃烧器的噪声计算模型。结合测试燃烧器高压喷射的湍流及多相流特点开展 CFD 数值模拟计算, 数值模拟计算噪声声压级结果与噪音模型计算结果吻合较好。通过该噪声模型计算结果与现场实测数据及某西方公司软件计算结果比较, 表明该计算模型可以较好的应用于测试燃烧器噪声预测。

关键词 测试燃烧器; 喷射噪声; 燃烧噪声; 水喷淋; 数值模拟

中图分类号 X593 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)10-6077-04 DOI 10.12030/j.cjee.201504143

Calculation of noise field of the welltesting burner

PENG Xianqiang^{1,*} LIU Lingli²

(1. Welltesting Company, Greatwall Drilling Corporation, Beijing 100101, China; 2. Research Institute of Asia Pacific Region, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract The jet and combustion noise generated by the burners during the well testing period could be detrimental to the wellbeing of the operational personnel, as well as the environment. It is therefore necessary to study the prediction of noise in the combustion process, as the results have significance for evaluating the noise hazards, optimizing the design, and adopting further noise-reduction measures. One acoustic calculation mode was presented, relevant to the practical situation of the burner. Based on the classical theory of combustion noise and the Lighthill aerodynamic theory, the formula for calculating the jet and combustion noise was deduced by dimensional analysis of the similitude criterion. Subsequently, the resource noise was indicated by considering sound superposition. Furthermore, a calculation mode for the burner noise was established by considering factors such as the background noise, orientation, diffusion attenuation, absorbance of air, and the water spray. CFD numerical simulation was carried out, taking into account the character of turbulence and the multiphase flow formed by the high pressure jetting of the burner. The result of calculating the sound pressure level by numerical simulation agreed well with that calculated by the noise mode. Comparing the results found by a foreign software application, the onsite monitored noise data, and the calculation results of the analytical mode showed that the analytical calculation mode was preferable for predicting the noise of the well testing burner.

Key words welltesting burner; jet noise; combustion noise; water spray; numerical simulation

平台燃烧器是海上石油钻井平台上不可或缺的关键设备, 勘探测试过程中原油需要通过它实现洁净燃烧, 陆地上也越来越多地引入燃烧器, 然而在燃烧器应用过程中产生的噪声会对人员及设备造成较大的危害。目前在伊朗南帕斯海上放喷测试、土库曼斯坦萨曼杰佩气田放喷测试过程中就面临噪声太大的问题, 同时在国内四川页岩气现场由于距周边

人群太近也面临噪声干扰的问题。所以有必要对燃烧器噪声预测开展研究, 该研究结果对于评估燃烧噪声危害、优化设计及进一步采取降噪措施有重要意义。目前为止还没有关于测试燃烧器噪声计算的成果文献, 相关研究有基于 LIGHTHILL 等^[1-2]提出的流体动力学噪声理论, 结合实验结果发展出的关于喷射噪声^[3-7]解析算法研究, 以及基于计算流体

基金项目: 长城钻探工程有限公司局级科研课题(2013B09)

收稿日期: 2015-04-15; 修订日期: 2015-06-15

作者简介: 彭贤强(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 试油测试及安全环保。E-mail: pengxq.gwcd@cnpc.com.cn

* 通讯联系人

力学理论的数值模拟方法来认识喷嘴复杂流场规律并进行噪声场模拟计算的研究。对于复杂噪声的主要手段还是数值手段,不方便于现场直接计算预测使用。故在此考虑建立一套简单易行的适合于燃烧器噪声的解析算法模型并编制软件以适合于现场噪声预测应用。

1 燃烧器噪声声学计算模型

燃烧器产生的噪声主要为燃烧过程本身产生的低频燃烧噪声和由气流高速喷射以及随之吸入的大量空气与之燃烧剧烈混合而产生的高频射流噪声,见图1。

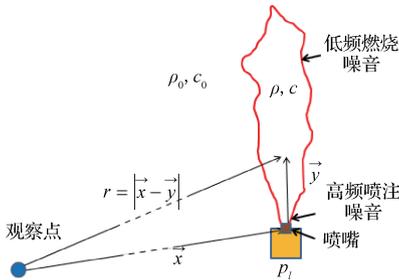


图1 测试燃烧器喷注及燃烧噪声

Fig. 1 Jet and combustion noise from well testing burner

1.1 声学计算模式

考虑到海上平台为大气空间、可以忽略地面、植被、传播空间等影响,同时存在水喷淋等因素影响,声学计算公式^[8]可以简化为式(1),其中 L_M 为喷注及燃烧产生的噪声, D_1 为方向修正系数, D_s 为距离衰减量, D_L 为大气吸收衰减量, D_w 为水喷淋的消声量。

$$L_s = L_M - D_1 - D_s - D_L - D_w \quad (1)$$

1.2 声源噪声计算

1.2.1 喷嘴喷注噪声

测试燃烧器喷嘴结构一般为油气双旋流结构,压缩空气和产液经旋流混合在喷嘴内部实现油气碰撞和混合,并从喷口喷出到大气空间从而实现油气的雾化,符合喷注的特征。故可以采用一般喷注在 90° 方向距离1 m处产生的声压级的通用公式^[9],式中: M_0 和 T_0 为空气的分子质量和室温, d 为喷口直径,mm; R 为气室压力 P_1 与大气压力 P_0 之比; r 为距声源的距离,m; k_{j1} 、 k_{j2} 、 k_{j3} 、 k_{j4} 、 k_{j5} 为系数。

$$Lp_j = k_{j1} + k_{j2} \lg \frac{(R-1)^4}{R^2 - R + 0.5} + k_{j3} \lg \frac{TM_0}{T_0 M} + k_{j4} \lg d + k_{j5} \lg r \quad (2)$$

1.2.2 燃烧噪声

根据经典燃烧实验得出燃烧噪声基本方程^[10]如式(3)所示,其中 $V(t)$ 为气泡体积, ρ_0 和 c_0 为空气

平均密度和声速, $\dot{V}(t)$ 为气泡体积的二阶导数,该方程说明燃烧噪声是由于燃烧气体不稳定扩散产生的。湍流焰的发声机制,可以认为是由于在整个燃烧区中统计分布的大量单极子声源产生的复合效应。

$$p'(r,t) = \frac{\rho_0}{4\pi r} \dot{V}(t - r/c_0) \quad (3)$$

该方程直接求解比较困难,在此采用根据相似准则的量纲分析方法求解喷注噪声的方法来进行相似求解。式(3)可变为 $\frac{dp}{dt} = \frac{\rho_0}{4\pi r} \frac{d}{dt} \left(\frac{dV(t-r/c_0)}{dt} \right)$,其中 dp/dt 比例于 p/t , d/dt 比例于 $1/t$, dV/dt 比例于 V/t ,即 $\frac{p}{t} \left(\frac{\rho_0}{r} \cdot \frac{1}{t} \cdot \frac{V}{t} \right)$,考虑到 V/t 比例于燃烧流体流量 q ,则可调整为 $p \left(\frac{\rho_0}{r} \cdot \frac{V}{t} \right) \left(\frac{\rho_0}{r} q \right) \frac{q}{r}$,按照声压级计算公式,则燃烧噪声可以表达为式(4),其中 q 的单位为 $m^3 \cdot s^{-1}$, k_{b1} 、 k_{b2} 、 k_{b3} 为系数,会根据燃烧物质油气的不同而有所差别。

$$Lp_b = 20 \lg \frac{P}{P_0} = k_{b1} + k_{b2} + \lg q - k_{b3} \lg r \quad (4)$$

1.2.3 测试燃烧器喷注燃烧噪声声源一般通式

由于高压喷射故 90° 方向1 m处的声压级^[9]为:

$$L_{pj} = k_{j1} + k_{j2} \lg(R-1) + k_{j3} \lg d \quad (5)$$

则测试燃烧器喷注燃烧声源噪声一般通式可表示为:

$$L_M = k_{m1} + k_{m2} \lg(R-1) + k_{m3} \lg d + k_{m4} \lg q \quad (6)$$

式中: k_{m1} 、 k_{m2} 、 k_{m3} 、 k_{m4} 可根据喷注噪声、油气燃烧取不同的值。当高压喷注在临界流喷注情况下,根据气液两相临界流动流量 $q = \frac{P_1 d^c}{qr q}$,则最终测试燃烧器

喷注燃烧噪声一般通式可以简化表示为式(7)。

$$L_M = K_{M1} + K_{M2} \lg q + K_{M3} \lg d \quad (7)$$

1.2.4 噪声的叠加和减法

可以基于声音的叠加公式计算喷射燃烧产生的噪声,见式(8),其中的分贝附加值可通过查表获得^[11]。

$$L_M = 10 \lg [10^{(L_{p1}/10)} + 10^{(L_{p2}/10)}] = L_{pj} + \Delta L_p \quad (8)$$

1.3 噪声的指向性

喷注噪声部分实际上具有一定的指向性^[9,12],一般最大噪声分布在喷口轴向 $30^\circ \sim 45^\circ$ 范围内,在 90° 往后 120° 乃至 180° 相对声压级降低直到10 dB左右。不同方位噪声 $D_1 = D_M(f_1(\theta) - 1)$ 。

$$f_1(\theta) =$$

$$\begin{cases} 1.19 & 15^\circ \leq \theta < 30^\circ \\ -0.00556(\theta - 245) & 30^\circ \leq \theta < 60^\circ \\ -0.00102(\theta - 1.07 \times 10^3) & 60^\circ \leq \theta < 135^\circ \end{cases} \quad (9)$$

1.4 空气吸收衰减

雨、雪、雾等对声波的散射能引起声能的衰减大约每 1 000 m 衰减不到 0.5 dB,可以忽略不计。空气吸收衰减^[11]见式(10), α 为空气吸声系数。

$$D_l = \alpha(r_2 - r_1) \quad (10)$$

1.5 水喷淋消声

喷淋水雾在燃烧器附近一般有 2 道(见图 2),包括降温水幕以及助燃喷淋。对于助燃喷淋改变介质密度而增加声阻抗发生反射,具备宽频带消声特性,见式(11)^[11]。向前助燃水喷淋发生气液两相介质混合时彼此作用产生摩擦消耗一部分声能可忽略,所以不考虑式(11)右边第一项。

$$\Delta L_{pw} = 20\lg\left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}\right) + 10\lg\left(\frac{1}{1-\gamma}\right) \approx 10\lg\left(\frac{1}{1-\gamma}\right) \quad (11)$$

式中: $\gamma = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}\right)$, ρc 为声阻抗率,20℃时空气声阻抗为 $413(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-3}$,水为 $1\,440\,000(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-3}$ 。

细厚绵密且有一定分布范围的降温水幕具备一定的隔声效果。按照单层匀质墙的隔声量计算,结合透声系数的定义及平面声波理论^[11],考虑到燃烧器水喷淋水幕隔声为喷雾和气雾混合,面密度较小,则相应平均隔声量经验公式为:

$$R_w = 13.51\lg m + 14, m \leq 200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2} \quad (12)$$

则总体水喷淋消声量为:

$$D_w = 10\lg\left(\frac{1}{1-\gamma}\right) + 13.51\lg m + 14 \quad (13)$$

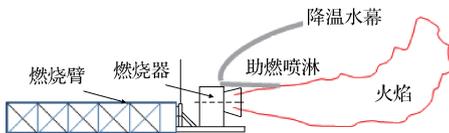


图 2 测试燃烧器及水喷淋系统

Fig. 2 Well testing burner and its water spray system

2 实际应用及分析

2.1 数值模拟对比

应用 Fluent 软件模拟,燃烧器被置于 $\phi 40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 的圆柱形计算区域的中心处,采用结构化六面体网格,在燃烧器内部尤其是速度梯度变化较大的旋流喷嘴部位采用局部网格加密;在出口外的非主流区和周边环境采用相对稀疏的网格;在喷嘴出口处网格采用渐扩式网格划分。油和气入口根据实际工况采用速度入口边界,环境空气速度为 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,区域边界采用压力出口边界,环境压力为 1 个标准大气压,壁面采用标准壁面函数方法处理。

针对海上平台燃烧器的油、气双旋流雾化喷嘴,使用采用雷诺应力模型和欧拉多相流模型^[13-15]对带有油气双旋流雾化喷嘴的平台燃烧器的三维射流流场进行模拟计算,利用宽频噪声源模型^[16]预测该燃烧器近场噪声场从而确定主要声源位置,并结合 F-W-H 模型^[17]计算燃烧器的离散噪声分布,见图 3。

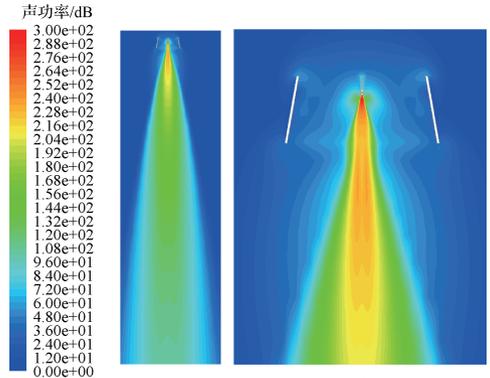


图 3 燃烧器近场宽频带噪声声压级分布云图

Fig. 3 Distribution of sound pressure level of wide range frequency noise field near the burner

表 1 将数值模拟结果与通过解析模型软件计算结果进行了对比,该偏差属于单向偏差,解析计算结果小于模拟计算结果,总体来说吻合较好。说明由解析方法建立的模型能够较好预报平台燃烧器的射流流场及噪声声压量级。

表 1 数值模拟与解析软件结果对比

Table 1 Comparison of results between calculation model and numerical simulation

测点距离/m	模拟结果/dB	解析结果/dB	误差/dB
17.20	109.59	107.41	-2.18
18.73	108.9	106.67	-2.23
20.25	108.26	105.99	-2.27
21.77	107.62	105.36	-2.26
23.30	107.06	104.77	-2.29
24.82	106.41	104.22	-2.19

2.2 现场噪声测量对比

声级计也称噪声计,它是用来测量噪声的基本仪器。在中东某海上平台通过现场手持声压记录仪进行现场噪声监测,记录结果与计算结果进行对比(表 2)。偏差与现场周围噪声包括平台噪声、操作误差及输入参数误差等因素有关系。该偏差是单向偏差,实测噪声略大于计算噪声,整体吻合较好。某西方公司软件计算结果偏低,主要是由于西方公司计算软件仅考虑燃烧噪声因素,未考虑喷注噪声因素。

表2 软件计算与现场监测结果对比

Table 2 Comparison between software calculation result and onsite monitoring data

测点距离/m	某软件结果/dB	计算结果/dB	现场结果/dB	误差/dB
(0,0)	108.8	111.7	114.6	-2.9
(0,5)	108.7	111.6	113.9	-2.3
(0,10)	108.3	111.2	113.2	-2.0
(0,26)	106.0	108.9	111.3	-2.4
(0,44.5)	103.7	106.6	107.9	-1.3
(0,50)	102.4	105.2	107.4	-2.2
(0,66)	101.1	103.9	106.3	-2.4

3 结论

本文针对海上试油测试特点提出一套适用于测试燃烧器噪声计算的模型。相比于同类型西方公司软件,该模型除燃烧噪声外噪声源上还考虑了喷注噪声的因素,同时重点考虑了水喷淋系统、方向性等因素,形成统一的声学计算通式。该模型实现了简化的同时又有较好的计算精度,方便现场使用。通过噪声计算软件与数值模拟及在现场的实测噪声数据比较,说明该计算模型可以较好的应用于平台燃烧噪声计算。该研究结果对于评估平台燃烧噪声危害、优化设计有重要意义,并对下一步工艺降噪改进措施指明方向。

参考文献

- [1] Lighthill M. J. On sound generated aerodynamically. I. General theory. *Proceedings of the Royal Society of London A*, **1952**, 211(1107): 564-587
- [2] Lighthill M. J. On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound. *Proceedings of the Royal Society of London A*, **1954**, 222(1148): 1-32
- [3] 马大猷, 李沛滋, 戴根华, 等. 湍流喷注噪声的压力关系. *物理学报*, **1978**, 27(2): 122-125
MA Dayou, LI Peizi, DAI Genhua, et al. Pressure dependence of turbulent jet noise. *Acta Physica Sinica*, **1978**, 27(2): 122-125(in Chinese)
- [4] 马大猷, 李沛滋, 戴根华, 等. 高压阻塞喷注的湍流噪声. *声学学报*, **1979**(3): 176-181
MA Dayou, LI Peizi, DAI Genhua, et al. High pressure extension of choked jet turbulent noise theory. *Acta Acustica*, **1979**(3): 176-181(in Chinese)
- [5] 马大猷, 李沛滋, 戴根华, 等. 阻塞喷注的冲击噪声. *声学学报*, **1980**(3): 172-182
MA Dahyou, LI Peizi, DAI Genhua, et al. Shock associated noise from choked jets. *Acta Acustica*, **1980**(3): 172-182(in Chinese)
- [6] 丰乐平, 马大猷. 脉动喷注噪声与稳态喷注噪声的关系. *声学学报*, **1990**, 15(5): 378-383
FENG Leping, MA Dahyou. Relations between pulsed jet noise and steady jet noise. *Acta Acustica*, **1990**, 15(5): 378-383(in Chinese)
- [7] 戴根华, 李沛滋. 恒压源脉动喷注噪声特性. *声学学报*, **1992**, 17(5): 375-381
DAI Genhua, LI Peizi. Characteristics of noise from pulsed jet with steady chamber pressure. *Acta Acustica*, **1992**, 17(5): 375-381(in Chinese)
- [8] 刘书娟, 赵芳, 韩奇. 噪声预测软件中预测模式浅析-关于 SoundPlan 和 CadnaA 噪声预测软件中预测模式的初步探讨//第十一届全国噪声与振动控制工程学术会议论文集. 北京, **2009**: 488-490
LIU Shujuan, ZHAO Fang, HAN Qi. Forecast pattern analysis of noise software-about some discussion over forecast pattern of SoundPlan and CadnaA noise prediction software. *Noise and Vibration Control*, **2009**: 488-490(in Chinese)
- [9] 马大猷. 湍流喷注噪声定律的发展. *声学学报*, **1987**, 12(5): 322-328
MA Dahyou. Development of the turbulent jet noise. *Acta Acustica*, **1987**, 12(5): 322-328(in Chinese)
- [10] DOWLING A. P., MAHMOUDI Y. Combustion noise. *Proceedings of the Combustion Institute*, **2015**, 35(1): 65-100
- [11] 张弛, 徐南. 噪声污染控制技术. 2 版. 北京: 中国环境出版社, **2013**
- [12] 郝鹏飞, 杨京龙, 杨岱强. 自由射流噪声场实用计算公式的建立//第八届全国环境与工业流体力学会议论文集. 绵阳: 中国力学学会, **2005**
HAO Pengfei, YANG Jinglong, YANG Daiqiang. Establishment of the practical formula of the calculation of free jet flow noise field. *Hangzhou: National Environmental and Industrial Fluid Mechanics Conference*, **2005**(in Chinese)
- [13] 蒙伟安, 穆塔里夫·阿赫迈德, 严荣波. T型管流场混合多相流与欧拉多相流模型的数值研究. *机械设计与制造*, **2012**(2): 27-29
MENG Weian, AHMAT M., YAN Rongbo. Numerical research on flow field of T-tube by mix-multiphase flow model and Euler-multiphase flow model. *Machinery Design & Manufacture*, **2012**(2): 27-29(in Chinese)
- [14] 黄思, 王国玉. 双锥型旋流器内液-液分离过程的流动数值模拟. *农业工程学报*, **2006**, 22(5): 15-19
HUANG Si, WANG Guoyu. Numerical simulation of liquid-liquid turbulent separation flows in a double-cone hydrocyclone. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **2006**, 22(5): 15-19(in Chinese)
- [15] 王兴, 郑刘, 周月荣, 等. 不同喷嘴射流流场结构及噪声. *推进技术*, **2011**, 32(3): 365-369
WANG Xing, ZHENG Liu, ZHOU Yuerong, et al. Flow field structure and noise for different nozzles. *Journal of Propulsion Technology*, **2011**, 32(3): 365-369(in Chinese)
- [16] LI Huibin, SUN Zhenlian, PENG Xin. Turbocharger noise prediction using broadband noise source model. *Journal of Beijing Institute of Technology*, **2010**, 19(3): 312-317
- [17] 韩忠华, 宋文萍, 乔志德. 基于 FW-H 方程的旋翼气动声学计算研究. *航空学报*, **2003**, 24(5): 400-404
HAN Zhonghua, SONG Wenping, QIAO Zhide. Aeroacoustic calculation for helicopter rotor in hover and in forward flight based on FW-H equation. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, **2003**, 24(5): 400-404(in Chinese)