

船用低速柴油机贯入式排气管性能及损失机理研究

段少远¹, 邓康耀¹, 杨名洋¹, 王 真¹, 钱跃华²

(1. 上海交通大学 动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 中船动力研究院有限公司, 上海 201206)

摘 要: 采用三维计算流体力学方法(CFD)对某型低速船用柴油机的贯入式排气管系统开展性能预测及流动损失机理研究。研究表明:支管相对贯入深度及其末端扩张角对管路系统压力损失系数有显著影响,损失随贯入深度增加逐渐降低,但存在损失最小的最佳扩张角;流场分析显示,支管内气流与总管壁面相互作用形成的涡结构是支管几何结构影响流动损失的主要原因。

关键词: 船用低速柴油机;贯入式排气管;CFD;流动损失

中图分类号: TK423.4⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)03-0001-05

Performance and Loss Mechanism Analysis of Plug-in Exhaust Pipe for Low Speed Marine Diesel Engine

Duan Shaoyuan¹, Deng Kangyao¹, Yang Mingyang¹, Wang Zhen¹, Qian Yuehua²

(1. Key Laboratory for Power Machinery & Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240; 2. China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 201206)

Abstract: The performance prediction and flow loss mechanism of a low-speed marine diesel engine's plug-in exhaust pipe were studied by using the three-dimensional computational fluid mechanics method (CFD). The results show that the relative penetration depth and the expansion angle of the branch have significant influence on the pressure loss coefficient of pipeline system. The loss decreases with the increase of penetration depth, but there is the optimal angle of expansion with minimum loss. The flow field analysis shows that the vortex structure formed by the interaction between the internal air flow and the wall surface of the main pipe is the main reason for the flow loss caused by the manifold geometry.

Key words: low-speed marine diesel engine; plug-in exhaust pipe; CFD; flow loss

0 引 言

现代大型商船一般采用大型低速二冲程柴油机作为主推进动力装置,其性能决定了整条船舶的动力性能^[1]。由于定压涡轮增压系统具有性能稳定、布置简单且涡轮效率高等优点,因而被广泛应用于大型低速船用柴油机上^[2]。贯入式几何结构是低速二冲程船用柴油机排气管的主要特点。贯入式排气管是指排气支管的出口会深入到排气总管内部,形成贯入式结构^[3]。目前针对船用定压增压的贯

入式排气管系统的性能与流动机理的研究较少。在低速机仿真模型中通常会忽略贯入段,基于经验和试验测量辅助方法,构建简单的排气管模型^[4]。因此,现有低速机排气系统模型无法可靠预测贯入式构型的性能。同时,目前国内外针对贯入式排气管的流动规律研究也较少^[5],对该构型性能异于传统无贯入式构型性能的产生机制尚无深入探讨。

本文采用三维计算流体力学方法(CFD),针对某型低速船用柴油机的贯入式排气管系统开展了性能预测及流动损失机理研究。通过建立管路系统

收稿日期: 2017-10-16

作者简介: 段少远(1992-),男,硕士生,主要研究方向为内燃机性能与仿真, duanshaoyuan@sjtu.edu.cn。

的 CFD 仿真模型和性能预测, 对该型排气系统总压损失的主要影响因素和规律进行分析, 并对流动损失机理进行探讨。

1 数值仿真方法及验证

建立某型低速船机排气管 CFD 模型, 如图 1 所示。此排气管有 6 个入口支管, 气流经过一段扩张管后流入总管, 由一支出口支管导出。为了使排气管入口与出口的流场均匀, 更容易收敛, 在入口与出口处增加了三倍管径长度的直管。

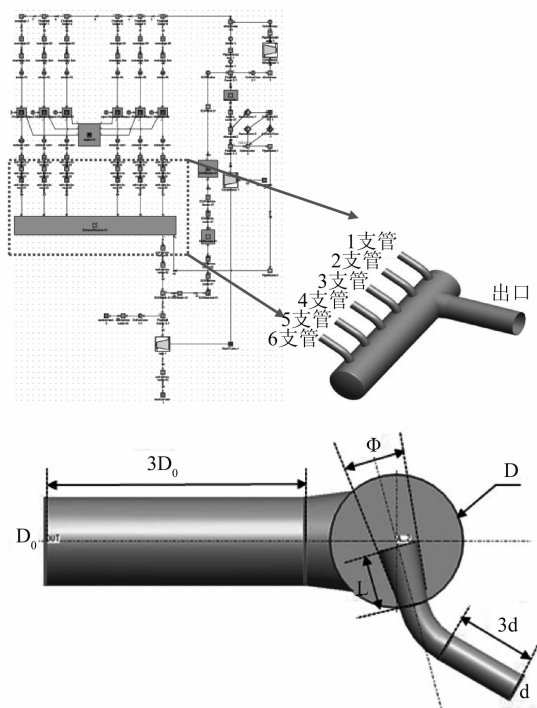


图 1 排气管几何模型

本文基于 ANSYS-CFX 开展数值仿真研究。使用 ANSYS-MESH 对模型进行非结构化网格划分, 网格总数约为 57 万; 采用雷诺平均的 N-S 方程 (RANS) 和剪切力输运 (SST) 湍流模型为流动控制方程组以及三维定常流隐式求解器进行数值求解。基于有限体积法对动量和能量方程进行离散。收敛时全局残差不高于 10^{-4} 。

为了使不同方案的计算结果具有可比性, 所有方案采用相同的边界条件。计算流体为理想气体, 进口采用质量流量入口, 出口为静压出口, 管壁面采用无滑移标准壁面边界和绝热条件。利用发动机循环模拟软件 GT-power 建立该低速船机的一维模型, 并通过试验数据进行模型校核与验证。从已标定的 GT-power 模型中获得入口质量流量和出口背压作为边界条件, 如图 2 所示。

由于支管的贯入式结构, 在排气管系统几何结

构确定的情况下新增加两个几何参数: 支管贯入总管的深度 L 以及支管末端的扩张角 φ 。以下针对这 2 种具体几何特征建立相应的 CFD 模型进行对比研究。

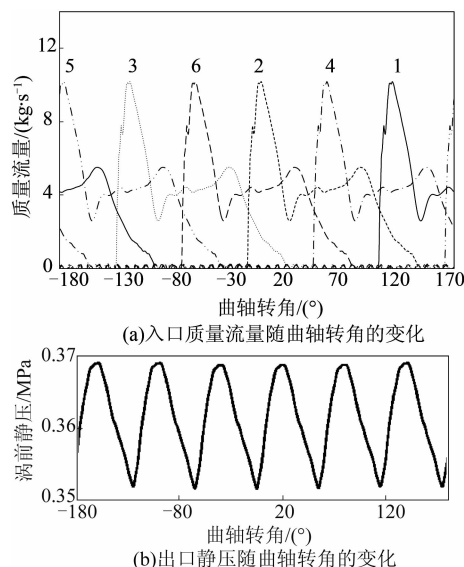


图 2 入口质量流量与出口静压随曲轴转角的变化

Bassett^[6]以定常流的试验数据来计算三分支接头的非定常流动, 结果表明: 在亚音速范围内该种处理方法产生的误差较小, 可以忽略。同时, 由于该型低速船用柴油机转速低 ($\sim 160 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$), 因而排气气流脉冲频率较低, 使得非定常衡量参数斯特劳哈数 Sr 远小于 0.1。因此, 管路系统内部的流动均可按准定常过程进行处理。

2 计算结果及分析

作为反映流体流动特性的重要参数, 总压损失系数表征了空气流通过排气总管时产生流动损失的大小^[7]。压力损失系数可表示为:

$$K = \sum_{i=1}^6 \frac{m_i}{m_{\text{total}}} \cdot \frac{P_{0i} - P_{0_out}}{P_{0_out} - P_{out}} \quad (1)$$

其中: K 是总压损失系数, P_{0i} 是 i 支管的总压, P_{0_out} 和 P_{out} 分别是出口的总压和静压, m_i 和 m_{total} 分别是 i 支管和总管的流量。

2.1 贯入深度的影响

支管贯入总管的贯入深度与总管的直径这两个几何参数的变化会对排气管内部的流动造成影响进而影响流动损失。为了获得几何构型的普遍性影响规律, 将这两个几何参数统一为支管贯入的无量纲相对深度 r :

$$r = \frac{L}{D} \quad (2)$$

其中: L 为支管贯入深度, D 为总管直径。支

管贯入相对深度这个参数具有普遍意义，能够综合考量支管插入总管的深度和总管直径的影响。

在结构参数方面：通过改变支管贯入总管的深度来获得不同的支管相对贯入深度；支管末端扩张角均为 10° ，几何模型的其他结构参数保持不变。具体数值设置如表 1。

表 1 支管贯入相对深度参数

贯入深度/mm	总管直径/mm	扩张角/ ($^{\circ}$)	相对贯入深度
0	752	10	0
150	752	10	0.2
250	752	10	0.332
350	752	10	0.465
376	752	10	0.5
392	752	10	0.521
450	752	10	0.598
550	752	10	0.731
650	752	10	0.864

在流动参数方面，选取图 2 中 52°CA 时的入口质量流量与出口静压。此时 2、4、6 支管进气，1、3、5 支管封闭；进气质量流量分别为 4.31 、 3.81 、 $3.08\text{ (kg}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ 。入口温度均为 730 K ，出口压力为 0.352 MPa 。

经过 CFD 计算获得的支管贯入相对深度 r 与总压损失系数 K 之间的关系如图 3 所示。作为反映流体流动特性的重要参数，总压损失系数表征了气流通过排气管时产生的流动损失的大小。图 3 显示了支管扩张角不变时支管贯入相对深度与总压损失系数的关系。贯入深度增加导致损失系数逐渐减小。当贯入深度从 0 增加至 0.4 时，损失系数急剧降低；贯入深度进一步增加后，损失系数变化平缓，大致稳定在 7.5 左右。

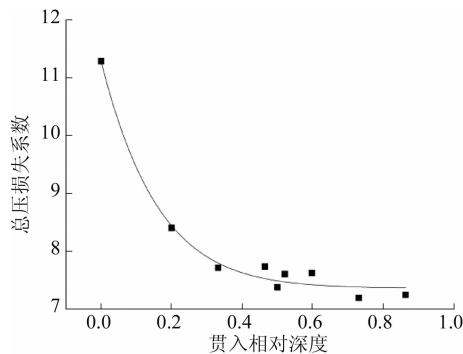


图 3 支管贯入相对深度与总压损失系数的关系

图 4 对比了支管贯入相对深度 $r = 0$ 和 $r = 0.5$ 的排气管内部流场流线投影图。由图可知：两种构型的排气管内均呈现大量的涡结构。当流体经支管进入总管后仍具有较高的动量，高动量流体保持原

方向高速冲击总管下壁面，与壁面作用后卷绕成大尺度的漩涡结构。对于无贯入构型，由于无贯入支管的干涉，在总管内形成覆盖整个管径的全尺寸涡结构（图 4（a））；然而，当有贯入支管的干涉后，该涡结构被限制在总管底部空间内，尺寸明显降低（图 4（b））。

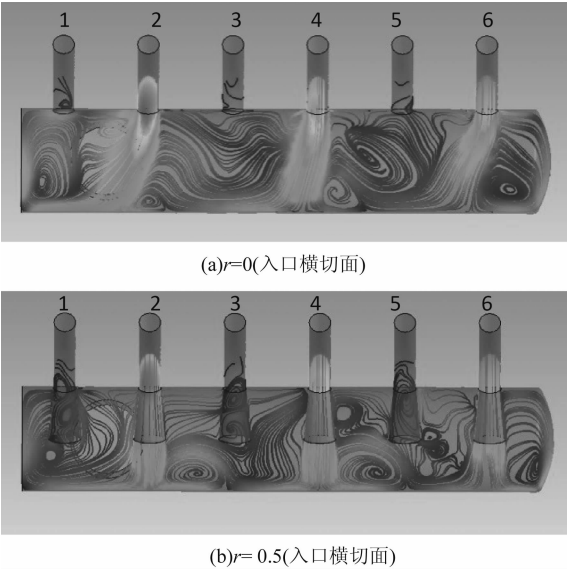


图 4 不同贯入相对深度时流线投影图

漩涡尺寸差异对未进气的支管内部流动产生显著影响，如图 5 所示。对于无贯入式构型的管路系统，大尺度的涡结构上沿已抵达未进气支管出口，对该支管内部气流形成封堵作用，进而造成高强度的低动量二次流动（图 5（b））；对于贯入式构型，由于涡的结构较小且被限制在贯入支管的管壁外侧，因此对于无进气支管的封堵作用较小，管内二次流动量较无贯入式的高（图 5（d））。对比图 5（a）、（c）可知，无支管贯入段时高速气流经进气支管后流入总管内部，之后流速迅速降低并以相对较低的流速冲击总管内壁；而由于有支管贯入段的存在，气流流出进气支管时仍保持高动量并迅速冲击总管下壁面，造成更高的能量损失。

图 6 进一步对比了两种管路构型（ $r = 0$ 和 $r = 0.5$ ）的高熵增云图。熵增云图可以清晰地表现产生流动损失的位置和强弱。两种构型的高熵增云图均显示进气支管内部处于较低的高熵增状态而未进气支管内部处于高熵增状态；并且总管内的高熵增区与涡结构位置相对应，表明总管内的高熵增是导致流动损失的关键因素。由于有支管贯入段的存在，气流以高动量的状态冲击总管下壁面，导致进气支管内产生高熵增，造成更高的能量损失。大尺度的涡结构对无进气支管的封堵作用导致无支管贯入式

构型的未进气支管内部产生非常高的熵增（图6（a）），而有支管贯入段时整体呈现相对低的熵增状态（图6（b））。这也是 $r = 0$ 时总压损失系数较高的主要原因。

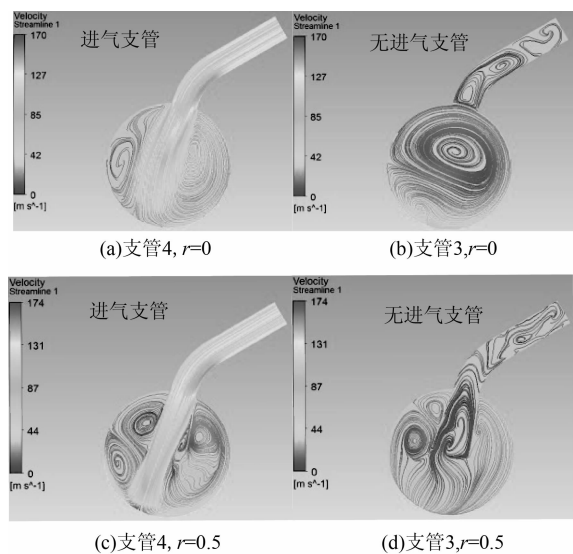


图5 支管3和支管4不同贯入深度时的流线投影图

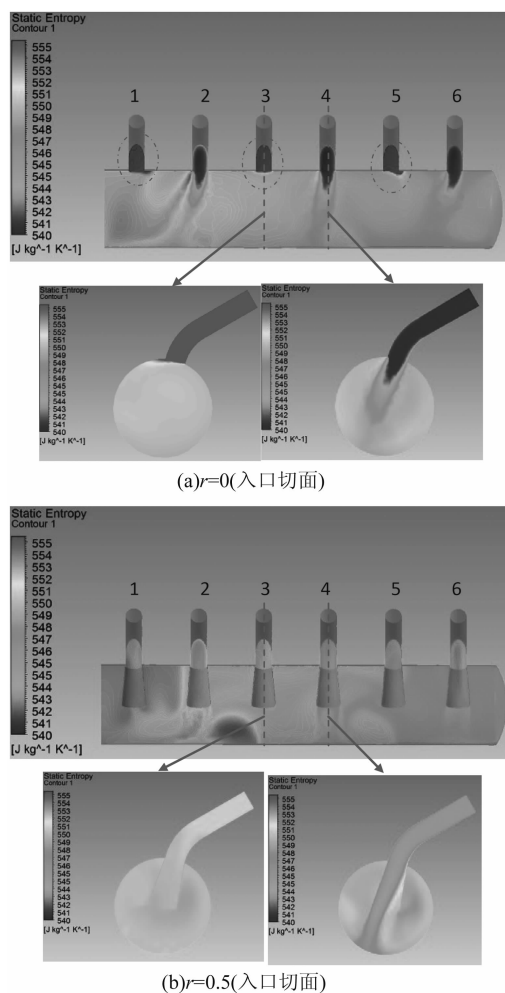


图6 不同贯入深度时的熵增云图

2.2 扩张角的影响

在结构参数方面，通过改变支管扩张角的大小来研究支管末端扩张角对流动损失的影响。其中扩张角分别设置为 0° 、 6° 、 10° 、 14° 和 20° 。支管贯入总管的深度和总管直径分别为 350 mm 和 752 mm，保持不变。几何模型的其他结构参数也保持不变。

流动参数同上节相同，保持 2、4、6 支管进气，1、3、5 支管封闭；进气质量流量分别为 4.31、3.81、3.08 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)；入口温度均为 730 K；出口压力为 0.352 MPa。

经计算获得支管扩张角与总压损失系数 K 之间的关系如图7所示。

低速船用柴油机排气支管出口处多采用扩压管的形式，目的是将进气动能转化为压力能，同时使总管内压力保持稳定^[1]。如图7所示，在支管贯入相对深度不变的条件下，随着支管末端扩张角的增大，总压损失系数呈现先减小后增大的趋势，并且在扩张角为 6° 左右时达到最小，此时总压损失系数为 6.54。当扩压角在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 之间变化时，总压损失系数迅速降低；当扩压角在 $6^\circ \sim 20^\circ$ 之间变化时，总压损失系数变化相对较缓，呈上升趋势。

图8为支管末端扩张角 $\varphi = 0^\circ$ 时的流线投影图与熵增云图。同2.1中的描述相同：排气管内呈现出复杂的流动情况，并且进气支管内部处于较低的熵增状态，而未进气支管内部处于高熵增状态。同时总管内的高熵增区与涡结构位置相对应，表明总管内部的涡结构是导致流动损失的关键因素。

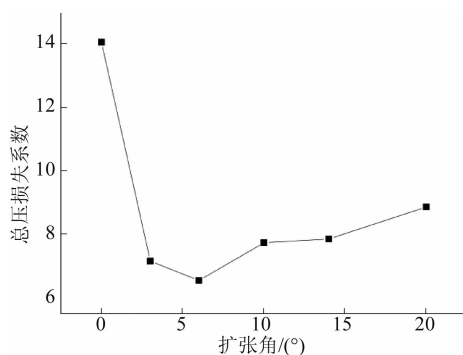
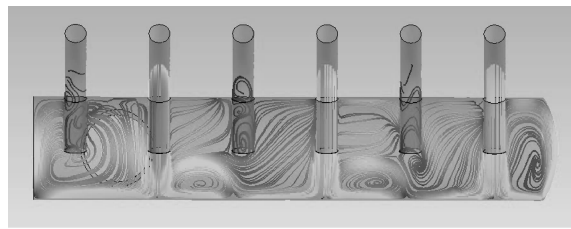


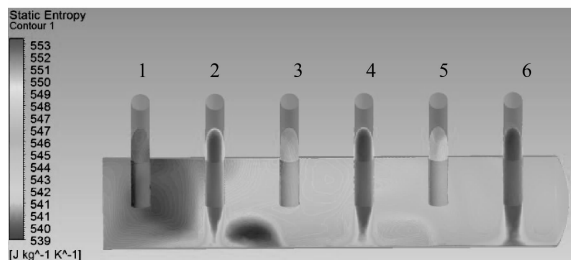
图7 支管扩张角与总压损失系数的关系

图9进一步对比了不同扩张角时进气支管的熵增云图与流线投影图。流出进气支管的气流冲击总管下壁面，在与壁面作用后卷绕成左右两个漩涡结构。在进气支管无扩张角时，气流流入总管时的动量更高，这两个涡结构的强度也更高，引起高熵增（图9（a））；而有扩张角时（ $\varphi = 6^\circ$ ），虽然扩张段存在轻微的壁面分离，但总管内部的涡结构的强

度较弱, 熵增较低, 这是有扩张角总压损失系数较低的主要原因。

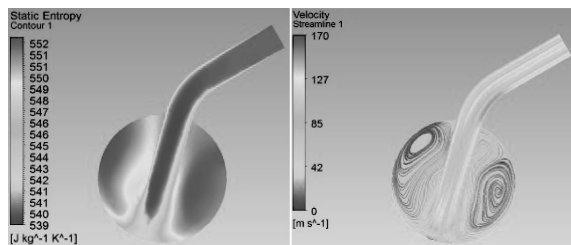


(a) $\varphi=0^\circ$ (入口切面) 时的流线投影图



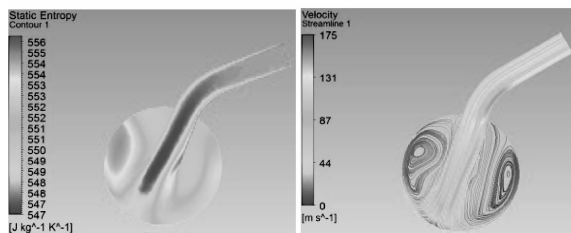
(b) $\varphi=0^\circ$ (入口切面) 时的熵增云图

图 8 无扩张角时的流线投影图与熵增云图



(a) 支管 4, $\varphi=0^\circ$ 时的熵增云图

(b) 支管 4, $\varphi=0^\circ$ 时的流线图



(c) 支管 4, $\varphi=6^\circ$ 时的熵增云图

(d) 支管 4, $\varphi=6^\circ$ 时的流线图

图 9 不同扩张角时的流线图与熵增云图

3 结 论

(1) 随着支管贯入相对深度的增大, 总压损失系数呈现逐渐减小的趋势, 在 $r > 0.3$ 后变化缓慢并逐渐趋于稳定。在支管贯入相对深度不变的情况下, 总压损失系数随着支管末端扩张角的增大表现出先剧烈减小后逐渐增大的趋势, 并且在 $\varphi = 6^\circ$ 左右达到最小。

(2) 排气总管内部的流动损失是由于复杂的涡结构引起的。贯入式的构型由于削弱了总管内部气流对无进气支管的封堵作用, 导致总压损失系数相对较低。支管末端扩张角对进气气流的降速扩压作用是降低流动损失的主要原因。

参考文献

- [1] 孙培廷. 船舶柴油机 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2002.
- [2] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] 陈大荣. 船舶柴油机设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [4] 王海燕, 张均东, 任光. 涡轮增压柴油机线性变参数模型 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28 (9): 966-969.
- [5] 李湘华, 张小姣. 柴油机排气歧管流场分析与结构优化 [J]. 柴油机, 2006, 28 (4): 25-27.
- [6] BASSETT M D, WINTERBONE D E, PEARSON R J. Calculation of steady flow pressure loss coefficients for pipe junctions [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2001, 215 (8): 861-881.
- [7] WINTERBONE D E, PEARSON R J. Theory of engine manifold design: wave action methods for IC engines [M]. John Wiley and Sons Ltd, 2000.