

直列 4 缸发动机的曲轴箱内气流运动模拟

Crankcase breathing simulation for a 4 cylinder in-line engine

徐之勤 郑建军 陈小东 曾庆强 胡铁刚

(长安汽车动力工程研究院, 重庆市渝北区空港大道 589 号, 401120)

摘 要: 应用 CONVERGE 完成了某款直列 4 缸发动机最高转速时曲轴箱内气流运动模拟, 考虑了活塞和曲轴的运动。计算结果表明: 活塞的运动主导了曲轴箱内的气流运动; 窜气对流场的影响非常微弱; 流动损失折算成发动机功率损失总计达 0.33kW@6000rpm。

关键词: 曲轴箱通风、流动、CFD、CONVERGE

Abstract: A three dimensional crankcase breathing simulation at maximum speed of a 4 cylinder in-line engine was conducted by using CONVERGE. The motion of the pistons and the rotation of the crankshaft has been considered. The results shows that the movement of the pistons govern the flow in crankcase and blow-by has weak influence on the gas flow. The total fluid mechanic loss reaches 0.33kW at the engine speed of 6000rpm.

Key words: crankcase breathing、crankcase flow、CFD、CONVERGE

1 前言

由于汽车行业日益激烈的市场竞争和日益严格的政策法规, 使发动机的开发更加精细化, 作为发动机附属系统的曲轴箱通风系统也应得到更详尽的研究。

曲轴箱通风系统的主要功能是利用进气系统的负压, 将从活塞环和涡轮增压器浮动轴承处泄漏的窜气重新引入燃烧室, 经过尾气后处理系统转化后排入大气, 避免直接排放导致污染。在此过程中, 不可避免的携带了润滑油, 而过量的润滑油流出曲轴箱通风系统不仅导致过大的机油耗, 而且污染进气系统、燃烧室和后处理系统, 产生更严重的尾气污染, 降低发动机动力性能。所以, 在曲轴箱通风系统中设计有油气分离装置, 保证尽量少的润滑油流出。为了确保污染物不直接从曲轴箱泄露到环境中, 要求曲轴箱内也保持负压, 并有相应的国家标准。有些发动机还在曲通系统中增加了扫气功能, 降低曲轴箱内的废气浓度, 延缓润滑油的变质。

曲轴箱通风系统的工作原理和机构决定了这是一个复杂和完全瞬态的流体系统。其复杂性不仅是流场形状的复杂, 还包含曲柄连杆机构等复杂运动部件, 更有活塞漏气和润滑油喷射、飞溅等, 以及上述物理过程之间的交互影响等等物理现象。由于活塞漏气量、通风系统的出口压力及各部件的温度随工况和时间实时变化, 以及与润滑油回流的交互作用, 决定了曲轴箱通风系统是一个完全瞬态的流体系统。

从该系统的功能和结构来看,可以应用 CFD 分析技术研究曲轴箱内压力控制、流动损失、油气分离、蒸汽凝结、活塞冷却、扫气量及布置优化、润滑油回油通道布置优化等。其中曲轴箱内压力控制、气动与泵气损失既可以应用 1D 模型进行分析[1],也可以应用 3D 模型进行详细研究[2,3]。油气分离、蒸汽凝结主要在油气分离器及缸罩、链条室等较低温度区域,其中运动部件的运动对气流流动的影响有限,可以忽略部件运动应用稳态 CFD 进行研究。而活塞冷却、扫气量及布置优化、润滑油回油通道布置优化等方面的研究必须应用动网格技术进行分析,目前长安采用 CONVERGE 进行相关研究。由于目前还没找到成功案例可供直接参考,所以首先进行的是曲轴箱内气体流动分析,为后续工作开创先决条件。

2 计算模型的建立

针对长安的一款 1.5L 直列 4 缸发动机,本文选取最高转速 6000rpm 工况,对曲轴箱内运动进行计算分析。

2.1 计算网格

发动机几何模型在 ProE 中设计完成后,利用 Hypermesh 进行几何清理及表面网格划分。然后导入 CONVERGE_Studio 进行检查和设置。该模型考虑了活塞和曲轴的运动,为简化模型,暂不考虑连杆的运动,将链条室简化为拉伸体,如图 1 所示。活塞漏气入口假定在曲轴箱上与缸套相接的环状面上。网格基本尺寸 4mm,局部细化至 1mm,体网格数量 60~80 万。

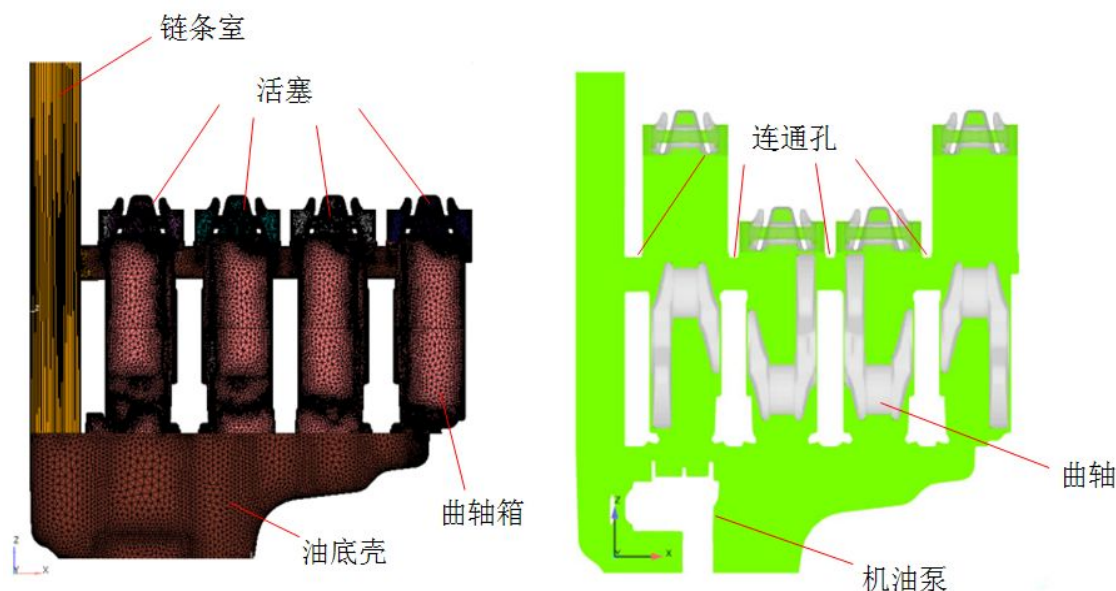


图 1 几何模型

2.2 计算设置

真实边界条件和介质属性较难获得是困扰曲轴箱通风系统研究的因素之一。本文的研究中作了简化和假设。其中 Blow-by 流量简化为时间平均流量,壁面温度根据经验假设。如表 1。

表 1 边界条件及计算设置

项目	数值/ 条件
Blow-by 流量	2.448 Kg/h
Blow-by 温度	500K
出口压力	98100Pa
缸盖、缸盖罩、前罩盖	373K
活塞	450K
缸套、曲轴箱、曲轴、油底壳、机油泵	400K
初始条件	373K, 98100Pa
气体属性	理想气体, 可压缩
计算时间	0-1440° CA
离散格式	二阶迎风格式

3 计算结果分析

3.1 收敛性判断

整个计算域的平均压力和平均温度从第 3 循环开始呈现周期性，可以认为流场已经稳定，而温度由于壁面传热的进行呈上升趋势，如果要达到稳定需要较长时间。即使最终平均温度在 400K 左右，气体属性变化不会太大，所以目前的计算结果可以对流场进行评估。以 360° CA 为 1 个循环，对第 4 个循环即 1080-1440° CA 计算结果进行分析。

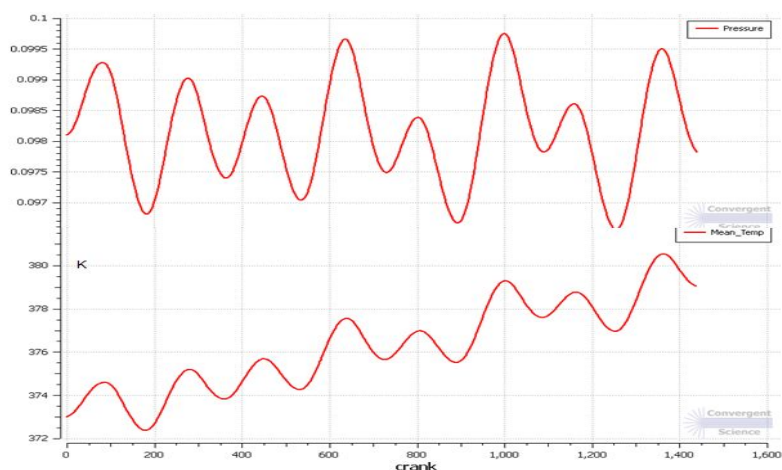


图 2 计算域平均压力、温度

3.2 速度场

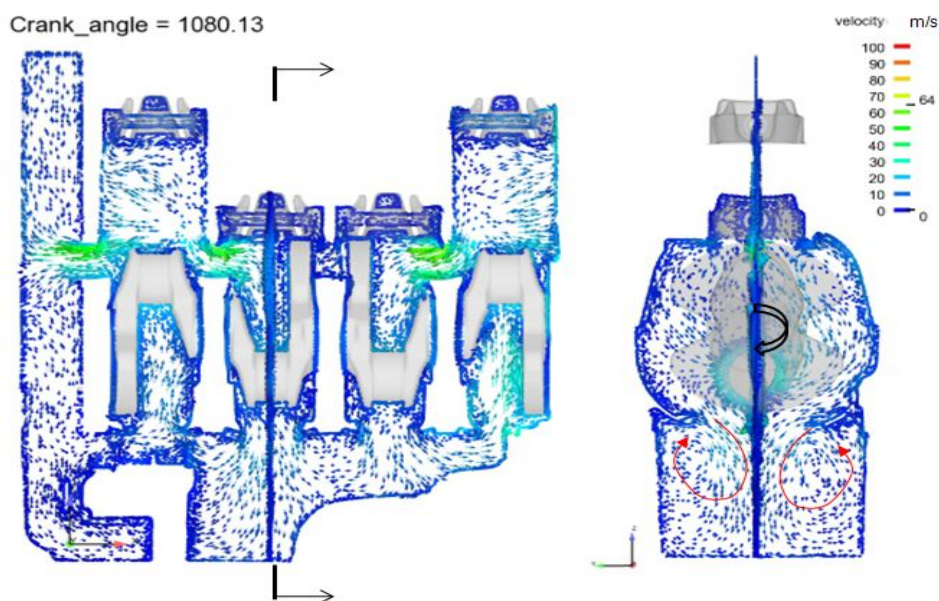


图 3 1080° CA 时刻速度场

在 1080° CA, 1、4 缸活塞从上止点开始下行, 2、3 缸活塞开始上行。虽然此时活塞速度很小, 但各缸之间连通孔内的流速在 50m/s 左右, 这是由于缸筒的截面积远大于连通孔的截面积。从第 2 缸截面上可以看到由于前一个循环流动的惯性, 在油底壳上部有对称的涡流; 由于曲轴的搅动, 曲轴箱内有一个微弱的顺时针环流。

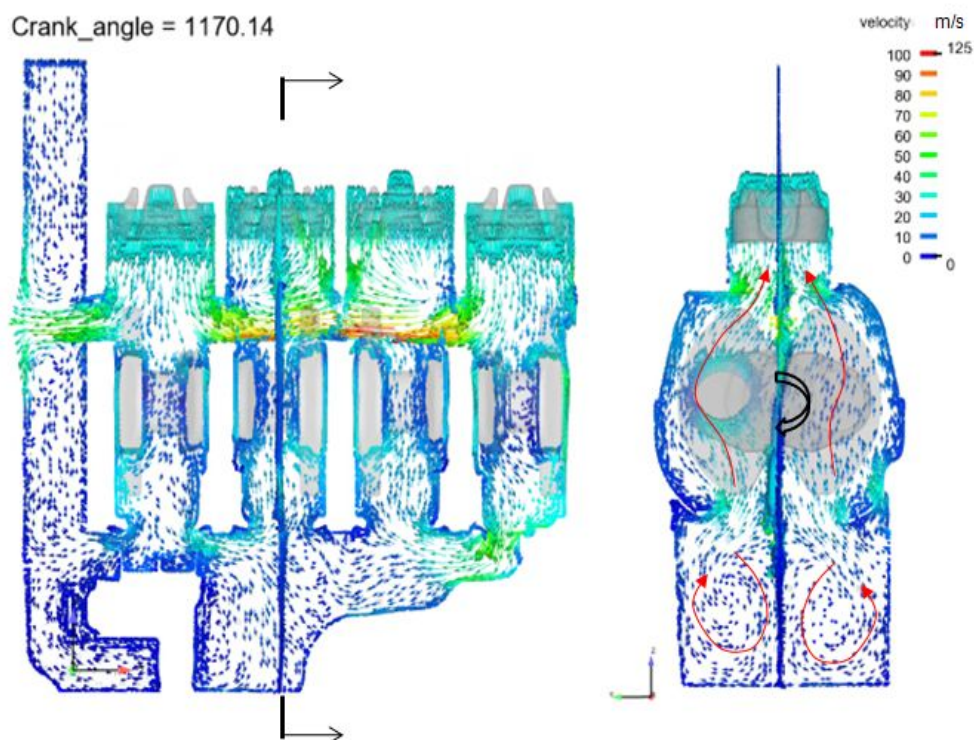


图 4 1170° CA 时刻速度场

在 1170° CA, 1、4 缸活塞正在下行, 2、3 缸活塞正在上行, 而且相对速度最大。连通孔内的流速

达到 125m/s。在第 2 缸截面上，曲轴箱内的微弱环流被破坏，形成与活塞运动方向一致的向上气流，但油底壳内保持着对称的涡流。

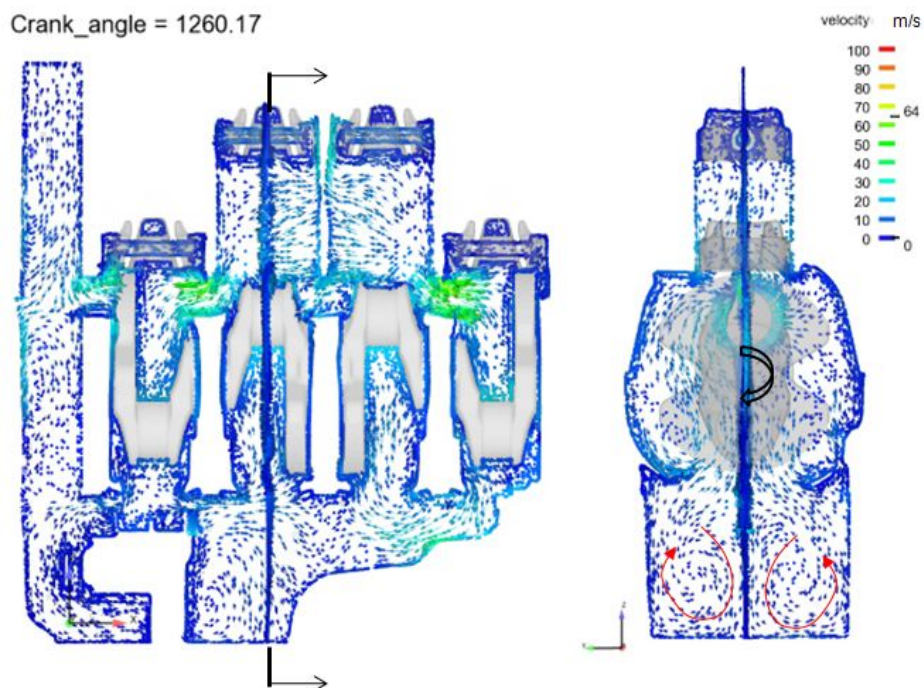


图 5 1260° CA 时刻速度场

在 1260° CA，1、4 缸活塞从下止点开始上行，2、3 缸活塞开始下行。虽然此时活塞速度很小，但各缸之间连通孔内的流速在 50m/s 左右，这是由于缸筒的截面积远大于连通孔的截面积。在第 2 缸截面上，油底壳内保持着对称的涡流。

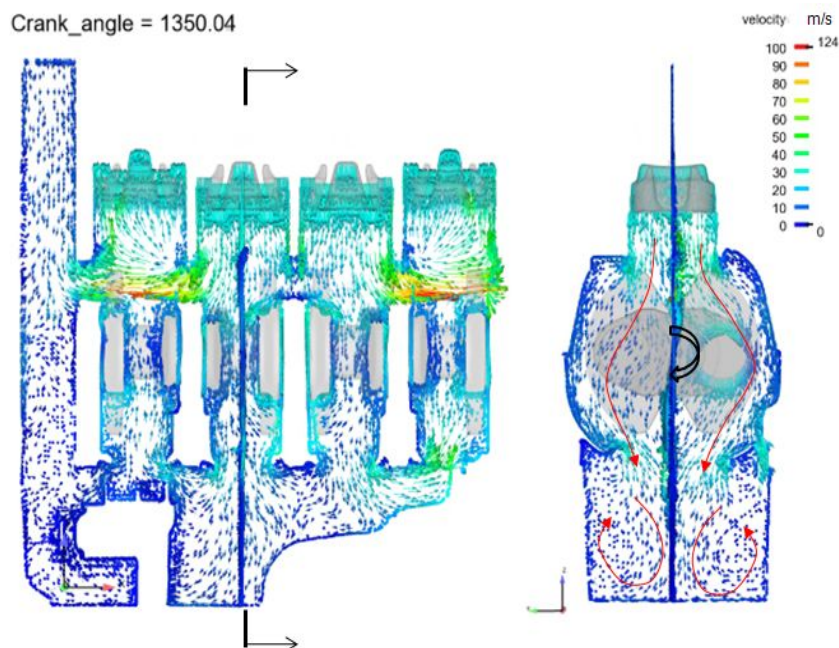


图 6 1350° CA 时刻速度场

在 1350° CA, 1、4 缸活塞正在上行, 2、3 缸活塞正在下行, 而且相对速度最大。连通孔内的流速达到 124m/s 。在第 2 缸截面上, 曲轴箱内形成与活塞运动方向一致的向下气流, 但油底壳内保持着对称的涡流。

从整个循环来看, 活塞的运动主导了曲轴箱内的气流运动。由于 Blow-by 流量小, 其流动对流场的影响非常微弱。

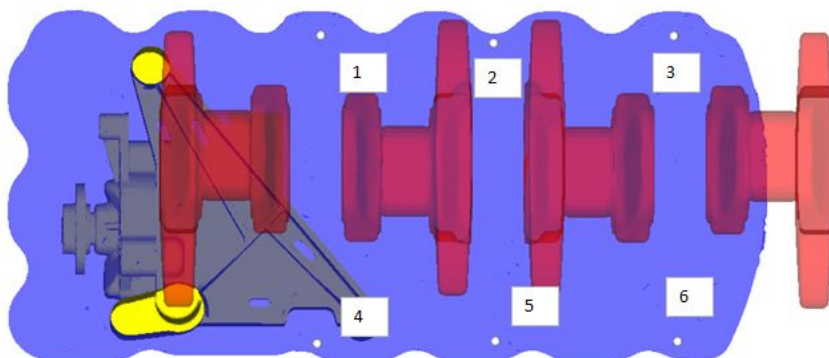


图 7 回油道可能布置位置

3.3 回油孔位置的静压

1-6 点是可能布置回油道的区域, 在产品中 1、3、4、6 布置了回油道。各区域静压差别最大达到 1KPa , 其中 4 点相对最低。

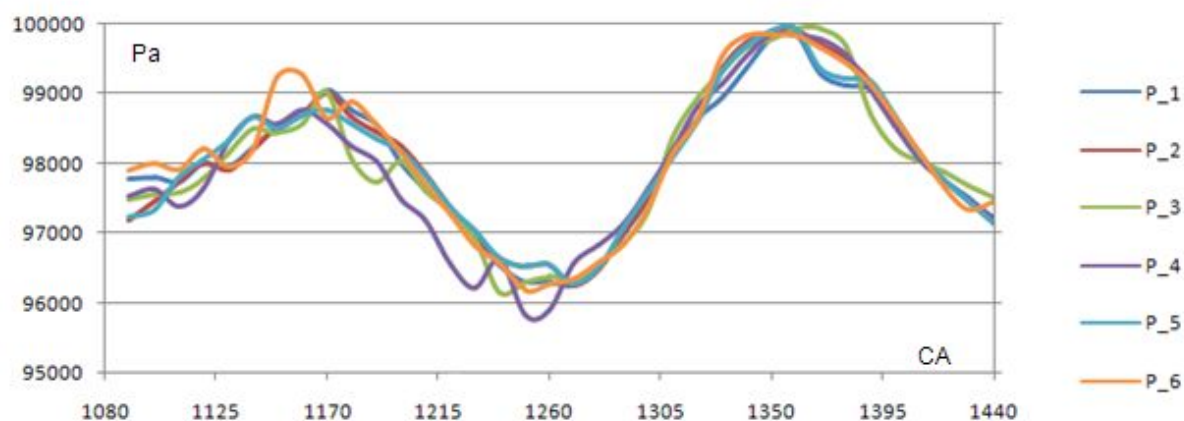


图 8 回油道可能布置位置压力

3.4 功率损失

泵气和气动损失折算成发动机功率损失总计达 $0.33\text{kW}@6000\text{rpm}$ 。其中 1 缸功率损失约其他各缸的一半, 主要原因是 1 缸与链条室连通, 腔内压力变化相对较小。曲轴的气动阻力导致的功率损失较小, 约占总量 10%。

表 2 各部件功率损失

	1 缸活塞	2 缸活塞	3 缸活塞	4 缸活塞	曲轴	总计
功率(W)	42.46	83.51	92.75	80.27	34.40	333.38

3.5 壁面换热系数

计算结果中换热系数指壁面与气体之间的换热系数，由于没有应用真实气体物性，而且没有考虑润滑油喷溅，所以实际换热系数应比表 3 所列更大。表中，曲轴、缸套及连通孔的换热系数最大，这是由于壁面附近的气流切向速度大；曲轴箱和活塞次之；链条室虽然平均换热系数最低，但在连通孔附件的换热系数可达 $100 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 。

表 3 各部件壁面换热系数

部件	链条室	曲轴	油底壳	机油泵	连通孔	曲轴箱	活塞	缸套
换热系数 ($\text{W/m}^2\text{-K}$)	49.15	136.42	55.92	65.04	163.13	91.60	71.25	140.37

4 结论

- 1、虽然曲轴的旋转会搅动曲轴箱内的气流，但活塞的运动主导了曲轴箱内的气流运动。
- 2、由于 Blow-by 流量小，其流动对流场的影响非常微弱；油底壳内始终保持着对称的涡流。
- 3、流动损失折算成发动机功率损失总计达 $0.33\text{kW}@6000\text{rpm}$ 。
- 4、可以预见，连杆的运动对曲轴箱内气流运动的影响较活塞、曲轴更小。
- 5、可以在本文计算基础上应用 CONVERGE 进行进一步研究。

5 致谢

感谢 IDAJ 叶良春、钟修林在模型调试工作中的宝贵支持。

6 参考文献

- [1] Raj P. Ranganathan. Engine Crankcase Pumping Flow Model. SAE 1999-01-0215.
- [2] Owais Iqbal, Kunal Arora. Windage Tray Design Comparison Using Crankcase Breathing Simulation. SAE 2013-01-0580.
- [3] Axel Friedrich, Christopher von Künsberg-Sarre, Helmut Eichlseder Crankcase flow of a 4 cylinder in-line ICE