

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.09.004

# 新型油气混合器的内部流场分析\*

解 胜<sup>1</sup>, 翟 华<sup>1,2\*</sup>

- (1. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 合肥工业大学 工业与装备技术研究院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**针对油气混合器进油量和进气量影响润滑点可靠润滑的问题,对油气混合器的工作原理、内部流场、出口管路内油气两相流分布情况等方面进行了研究。结合计算流体力学两相流基本原理,建立了新型油气混合器的流体域模型;在此基础上,分析了新型油气混合器的工作原理,利用CFX软件对新型油气混合器的内部流场进行了数值仿真模拟,检验了其形成油气的效果,并分析了出口管路内油气两相流的分布情况。研究表明:该油气混合器可精确调控进油量和进气量,达到油膜厚度可控,从而保证满足润滑油膜均匀性、连续性和稳定性的要求;同时,该分析过程为类似油气混合器之类复杂混合器的设计,提供了一种有效的功能检验方法,可进一步对油气混合器的工作性能进行评价,并对其结构进行优化。

**关键词:**计算流体力学;油气混合器;气液两相流场;CFX分析

中图分类号:TH117.2,TP391.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)09-1057-05

## Analysis of the internal flow field of new oil-gas mixer

XIE Sheng<sup>1</sup>, ZHAI Hua<sup>1,2</sup>

- (1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Industrial & Equipment Technology Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the oil-gas mixers' oil inflow and air inflow can influence the reliability of lubrication points, experimental studies on the oil-gas mixer's working principle, internal flow field and the distribution of oil-gas two phase flow field in the outlet pipeline were carried out. The fluid domain model of new oil-gas mixer was established combined with the two-phase flow theory of the (CFD). On the basis, the working principle of the new oil-gas mixer was analyzed. In order to test the effect of the oil-gas formation, the numerical simulation of the new oil-gas mixer's internal flow field was carried out by CFX software. And the distribution of oil-gas two phase flow field in the outlet pipeline was studied. The results indicate that the oil-gas mixer can control the oil inflow and the air inflow accurately, and the thickness of the oil film can be controlled as well. Accordingly, the reliability of lubrication points and the uniformity, continuity and stability of the lubrication oil film can be ensured. And the analysis process provides an effective functional test method for the design of the complex mixer. The performance of the oil-gas mixer can be further evaluated, and its structure can be optimized.

**Key words:** computational fluid dynamics CFD; oil-gas mixer; gas-liquid two phase flow field; CFX analysis

## 0 引 言

油气润滑是一种新兴、环保、节能的精细润滑技术,相对于传统润滑方式,尤其适用于高温、重载、高

速、极低速及有冷却水和脏物侵入润滑点等恶劣工况<sup>[1]</sup>。目前,国外关于油气润滑技术的研究和应用已经接近完善,一些润滑设备品牌公司研发出自己专利产品,占据很大市场份额。国内对油气润滑系统的整

收稿日期:2016-04-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305116);安徽省合芜蚌自主创新试验区专项资助项目(20130205)

作者简介:解 胜(1991-),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事液压系统和元件设计、计算机仿真、界面力学方面的研究. E-mail: winner\_xs@163.com

通信联系人:翟 华,男,教授. E-mail:jxzhaihuajx@sina.com

体理论、油气润滑参数和管道布置问题研究缺乏,尚无成熟产品<sup>[2]</sup>。

随着计算机仿真技术的发展,目前部分学者开始采用 CFD 技术研究管路中的两相流。国外学者致力于气液两相流机理的理论研究,S. Ghora 等<sup>[3]</sup>采用数值仿真和实验相结合的方法,研究了气体速度和体积分数对油气润滑管路中气液两相流界面的影响,其得到的数值仿真和实验结果相互吻合。Schubring 等<sup>[4]</sup>通过实验分别测量出水平管路中顶部、底部和水平方向的油膜厚度,分析了油膜分布规律,并进一步确定了环状流稳定流动的条件。A. Parvareh 等<sup>[5]</sup>在研究水平和竖管道中的气液两相流形成机理时,采用 CFD 仿真和 ERT 试验检测相结合的方法,研究了一种简单的油气混合器中气液混合情况,两种方法的结果具有很好的 consistency。Moon 等<sup>[6]</sup>在研究了油气润滑系统影响因素的基础上,基于表面响应法建立了预测模型,并对该模型进行了检验,结果表明该模型在不同油含量工况下具有一定的可靠性。

国内学者则致力于气液两相流在工程实践中运用的实验研究。王建文<sup>[7]</sup>研究了油气润滑中环状流形成条件,分析了不同雷诺数对润滑油铺展的影响。卢高林等<sup>[8]</sup>研究了油气润滑中环状流周向分布均匀性和润滑油流动稳定性。王科等<sup>[9]</sup>采用 VOF 模型对水平管高速气流下的气液两相液膜波动进行仿真,显示了卷吸夹带现象。李志宏等<sup>[10]</sup>对水平管路中油气两相环状流提出了新的供油方式。谢黎明等<sup>[11]</sup>研究了雷诺数对气液两相流中油滴大小和连续性的影响。杨铁林等<sup>[12]</sup>研究了可调式油气混合器及其控制回路,实现了空气和油比例混合。张永锋<sup>[13]</sup>设计了一种实验用油气混合器,可观察到气体和润滑油混合过程,为理论和实验研究提供了直观方法。这些油气混合器结构较为复杂,可以实现油气按比例混合,比传统油气混合器有很大进步,但仍然存在易损件以及一些性能不足,为进一步提高油气润滑性能效率,需要对其进行改进,因此对其结构研究及评价非常必要<sup>[14]</sup>。

目前针对油气润滑系统应用研究较多,而对其关键技术研究较少,高水平系统主要进口,因此对油气润滑系统关键部件研究非常必要。

本研究结合两相流原理,在结构设计基础上,建立混合器进口处流域模型,对内部流场进行数值仿真,揭示油气形成机理。

## 1 新型油气混合器

油气润滑系统中润滑油以压缩空气为动力,沿着

输送管壁波浪形地向前移动。润滑油和压缩空气在混合器中混合,润滑油在压缩空气的作用下形成油滴,非连续地粘附在管道内壁上,随着压缩气体快速流动,油滴移动并逐渐被气体吹散变薄,并沿管壁流动形成连续油膜,油膜厚度逐渐变薄但不会凝聚或与气体融合,形成典型环状流沿管路传输,最终进入润滑点。油气混合润滑可以把连续的、均匀的微量环状油膜输送到需要润滑的位置,在摩擦副表面可以形成连续的油气两相膜阻止摩擦面的直接接触。压缩空气为油滴流动提供动力,也而且对润滑点起到了冷却作用。

油气混合流的形成如图 1 所示。

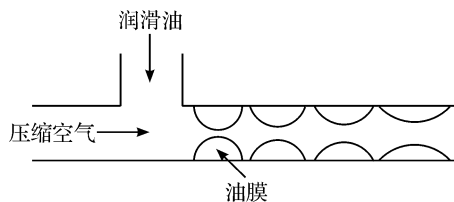


图 1 油气混合流的形成示意图

油气混合器作为油气混合系统的关键部分,润滑油和压缩空气在其中进行混合,使油液很好地分散成油滴,均匀分散在管道表面。

油气混合器内部结构如图 2 所示。

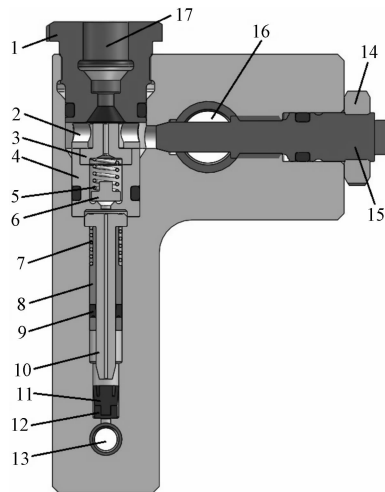


图 2 油气混合器内部结构三维图

1—喷嘴;2—聚气罩;3—止回阀阀座;4—止回阀阀体;5—止回阀弹簧;6—止回阀阀芯;7—计量阀弹簧;8—计量阀衬套;9—Y 型密封圈;10—计量管;11—切换阀;12—切换阀护垫;13—润滑油入口;14—空气流量调节螺母;15—空气流量控制阀阀芯;16—空气入口;17—油气出口

新型油气混合器包括润滑油计量阀、止回阀、切换阀、空气流量控制阀、空气入口、润滑油入口以及油气出口等。计量阀精确计量润滑油每次冲程的供给量;止回阀可以防止润滑油回流;切换阀配合计量阀工作,防止计量阀计量管中的润滑油回流;流量控制阀控制

空气流入的流量。工作过程:油泵供油,润滑油从入口进入,推动切换阀,挡住计量管下口,同时润滑油推动弹簧进入计量阀;油泵卸载,切换阀落下,打开计量管下口,腔体中的润滑油在弹簧的作用下进入计量管,同时止回阀阀芯被打开,上次冲程计量管中的润滑油进入止回阀中,完成一次计量并发射一个冲程的润滑油至止回阀中。止回阀中的润滑油在每次计量冲程后通过阀座排出,与聚气罩中的空气混合。压缩空气由空气入口进入,通过调节流量控制阀的阀芯位置来调节进入聚气罩中的空气流量。润滑油和压缩空气在聚气罩部位进行混合,使油液分散成油滴后从油气出口排出,形成混合油气。计量阀每个冲程发射的润滑油量与计量阀下部分的计量空间有关。油气中润滑油的含量可以通过发射频率来控制。

该新型油气混合器可精确调控进油量和进气量,油膜厚度可控。为确保润滑点的可靠润滑,满足润滑油膜均匀性、连续性和稳定性的要求,需根据油气润滑系统中压缩空气和润滑油特性,深入研究气液两相流体的环状流型形成机制,对该新型油气混合器的内部流场及其出口管路内的油气两相流的分布情况进行研究,检验其形成的油气效果。

## 2 数值模拟

### 2.1 数学模型

由于油气混合器中气液两相有明显分界面,可以采用VOF两相流模型。VOF两相流模型每个计算单元内两相的体积分数和为1。对于空气和润滑油两相流,设空气体积分数为 $\beta$ ,则润滑油体积分数为 $1-\beta$ ,那么两相流的流体密度为<sup>[15]</sup>:

$$\rho = \alpha\rho_a + (1 - \beta)\rho_o \quad (1)$$

式中: $\rho_a$ —空气的密度, $\rho_o$ —润滑油的密度, $\beta$ —空气的体积分数。

油气混合器内部流场中,润滑油和空气两相流并没有混合,由于压缩空气作用,润滑油沿管道内壁呈环状地向前移动,随后逐渐形成一层薄薄的连续油膜。由质量守恒定律可知,单位时间内流出油气混合器的总流体质量等于油气混合器内部流场的质量减少的时间变化率。因此可推导出油气混合器内部流场流体流动的连续性方程<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中: $t$ —时间; $u, v, w$ — $x, y, z$ 方向上的分速度; $\rho$ —流体密度。

同时,根据牛顿第二定律,油气混合器内部流场遵循动量守恒方程,即纳维-斯托克斯方程<sup>[15]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u V) &= \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v V) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w V) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $P$ —流体微团上的压强; $f_x, f_y, f_z$ — $x, y, z$ 方向上的体积力; $\tau_{ij}$ —作用在垂直于 $i$ 轴的平面上 $j$ 方向的切应力; $\nabla \cdot V$ —速度散度。

具体公式如下:

$$\nabla \cdot V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

### 2.2 几何模型与网格划分

油气从油气混合器中流出后,逐渐在管路中运行一段距离后才能形成稳定的油膜,而油气混合器结构尺寸较小,因此管道长度与油气混合器结构尺寸就不成比例,建立的几何模型很难划分网格,难以达到收敛的效果,需要进行简化处理。为简化几何模型,笔者通过对初始段管道中油气运动状态进行仿真,研究油气润滑薄膜的衍生过程,可以避免过长的油气管道对几何模型结构的不利影响。

由于CFX的几何模型是指流体流过的区域,而混合阀的内部区域,即空气和润滑油流过的区域比较复杂,不适合在ICEM CFD中直接建立几何模型,本研究先用SolidWorks软件画出几何模型,将其导入ICEM CFD,然后在ICEM CFD中修补几何模型。几何模型的最大三维尺寸为26 mm × 28 mm × 41 mm。

将几何模型导入ICEM CFD后,首先要划分出几何体的不同表面,即为不同的表面命名并创建part。本研究总共创建36个part,每个部分用不同的颜色加以区分。

网格划分时,先设定全局网格参数,最大网格尺寸设定为0.4 mm,采用三角形网格。然后本研究对所有的圆弧面区域进行局部网格参数设定,采用四面体网格,其他网格参数不变。生成网格后再进行质量检查和修改。经过多次修改后,最终各类网格质量均在0.7以上,网格质量较好,可以进行分析。网格数量为437 427,节点数75 713。几何模型网格划分结果如图3所示。

### 2.3 模拟方法

在材料属性方面,空气温度为25℃,润滑油的摩尔质量为330 kg/kmol,密度为0.875 g/cm<sup>3</sup>,比热容为1 880 J/(kg·k),动力粘度为0.271 25 Pa·s。

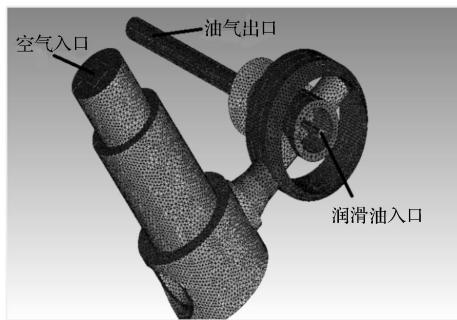


图3 油气混合器 ICEM CFD 网格划分图

进出口边界条件为:进口边界有两个,分别是润滑油进口和空气进口,设定输入空气入口速度为60 m/s,润滑油入口速度为0.03 m/s,冲程周期为0.5 s。

出口边界是油气出口。考虑到油气润滑会在润滑部位产生一定的气密封压强,压强要高于大气压强,可以设定为静压出口,相对压力设定为700 Pa。

设置全局初始条件:对于瞬态模拟,必须要设定初始条件,设定相对压力为700 Pa; $U$ 、 $V$ 、 $W$ 三方向速度均为0;选用VOF两相流模型;空气体积分数为1,润滑油体积分数为0,这表明一开始油气混合器中充满空气而没有润滑油。设置求解控制器:设定最小计算步长为1,最大计算步长为200;时间量程类型选为物理时间量程,物理时间量程为0.2 s,表示每个计算步的时长。设置输出控制器:设定输出变量为空气速度、空气体积分数、润滑油速度、润滑油体积分数。

### 3 实验及结果分析

计算完成后,可以得到每个计算步长的空气速度、空气体积分数、润滑油速度、润滑油体积分数。计算步长共为200步,物理时间量程为0.2 s,故整个模拟过程时长为40 s。由于空气相比于润滑油几乎充满整个气液混合域,空气体积分数接近于1且变化很小,对仿真结果的分析没有作用,本研究不予研究。在前几个计算步长中,由于润滑油还未开始排出,润滑油的体积分数较大,当润滑油开始稳定排出后,润滑油的体积分数减小并趋于稳定。由于润滑油是按冲程周期性注入,润滑油的体积分数也呈周期性变化。因此可以得出润滑油的体积分数变化符合油气润滑实际情况,并且油气中润滑油的含量可以通过冲程周期来控制。故该油气混合器可精确调控进油量,从而达到油膜厚度可控。润滑油体积分数随计算步长的变化情况如图4所示。

后处理中本研究选用速度流线来描述油气混合器中空气和润滑油的运动状态。速度流线是在流场中每

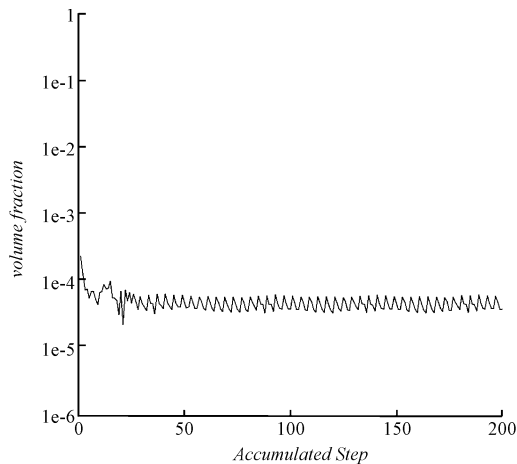


图4 润滑油体积分数

一点上都与速度矢量相切的曲线,它给出该时刻不同流体质点的速度方向,而速度流线条数表示不同流体在混合域中的体积分数。

润滑油速度曲线如图5所示。

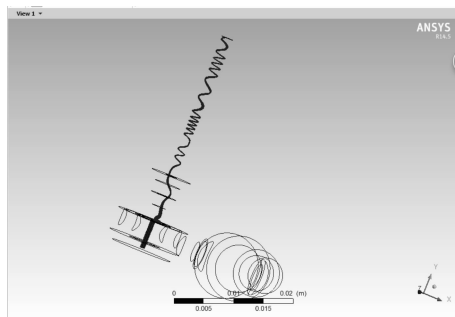


图5 润滑油速度曲线图

空气与润滑油速度曲线如图6所示。

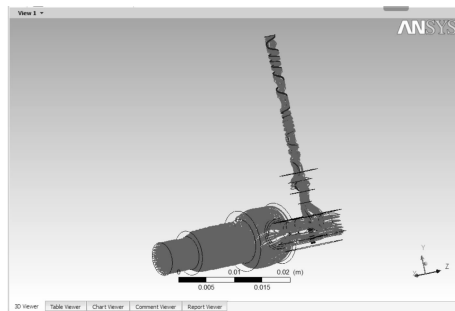


图6 空气与润滑油速度曲线图

灰色曲线表示空气速度曲线。压缩空气首先直线状前进,经过油气混合器聚气罩的回旋环道部位时,压缩空气形成旋气流,并以旋气流的形式推动从止回阀中流出的润滑油,使其逐渐改变前进方式。经过一段管道后,润滑油沿管内壁以环状前进,而大部分空气在油气管道中部流动。同时,空气与润滑油两者之间有明显的边界,并不相互混合,这点可与油雾润滑相区别。黑色曲线表示润滑油速度曲线,润滑油首先充满

计量阀管路,并在管路中沿直线前进;润滑油经过止回阀到达聚气罩部位,由于空气的旋气流作用使得润滑油开始改变前进方式。在经过一段管道后,润滑油逐渐变为沿管道内壁呈环状向前移动。

由于空气流量远远大于润滑油流量,即形成的油气混合物中只含有少量的润滑油,大部分为压缩空气。同时,由油气管道的出口压力为 700 Pa,油气混合器内的作用压力为 1 MPa,而在油气的整个输送过程中压力的损失可忽略不计,因此油气从管道中出来时会由于压力的作用呈喷射状,从而精确到达润滑点。

以上所得结论与油气润滑的两个关键点相符合:

(1)在油气管道初始段,由于压缩空气的作用,使润滑油沿着管道内壁呈环状地向前移动,随后逐渐形成一层薄薄的连续油膜;

(2)空气与润滑油两者之间有明显的边界,并不相互混合。经油气混合形成的油气流通过油气分配器的分配,最后以一股极其精细的连续油滴流喷射到润滑点。该新型油气混合器可以形成有效的油气,可确保润滑点的可靠润滑,保证满足润滑油膜均匀性、连续性和稳定性的要求,达到油气润滑良好的润滑效果。

同时,该新型油气混合器可精确调控进油量和进气量,达到油膜厚度可控,可以适用于多种不同润滑工况。

## 4 结束语

本研究在分析了新型油气混合器工作原理的基础上,结合 CFD 两相流基本原理,建立新型油气混合器的流体域模型,利用 CFX 软件对新型油气混合器的内部流场进行数值仿真模拟,对其出口管路内的油气两相流的分布情况进行了研究,检验其形成油气的效果。

分析结果显示:该新型油气混合器满足润滑油膜均匀性、连续性和稳定性的要求,可达到良好的润滑效果;同时可精确调控进油量和进气量,达到油膜厚度可控,可适用于多种不同润滑工况。在此基础上,可进一步对油气混合器的工作性能进行评价,并对其结构进行优化。该分析过程为类似油气混合器之类复杂混合器的设计,提供了一种功能检验方法,在投入生产前提高所设计的混合器的有效性。

## 参考文献(References):

- [1] 杨和中,刘厚飞. TURBOLUB 油气润滑技术(一)[J]. 润滑与密封,2003,28(1):107-110.
- [2] 曾群锋,刘成,张进华. 高速轴承油气润滑系统的研究及应用现状[J]. 润滑与密封,2015,40(3):103-108.
- [3] GHORAI S, NIGAM KDP. CFD modeling of flow profiles and interfacial phenomena in two-phase flow in pipes[J]. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**,2006,45(1):55-65.
- [4] SCHUBRING D, SHEDD T. Two-phase wavy-annular flow in small tubes[J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**,2009,52(5-6):1619-1622.
- [5] PARVAREH A, RAHIMI M, ALIZADEHDAKHEL A, et al. CFD and ERT investigations on two-phase flow regimes in vertical and horizontal tubes[J]. **International Communications in Heat and Mass Transfer**,2010,37(3):304-311.
- [6] MOON J, LEE H, KIM S. Lubrication characteristics analysis of an air-oil lubrication system using an experimental design method[J]. **International Journal of Precision Engineering & Manufacturing**,2013,14(2):289-297.
- [7] 王健文. 油气润滑输送中两相流的形成[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2009,35(2):324-327.
- [8] 卢高林,李锻能. 油气润滑运送管内环状流的特性分析[J]. 机电工程技术,2010,39(1):30-32.
- [9] 王 科,白博峰. 高速气液两相液膜卷吸夹带数值模拟研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(6):968-970.
- [10] 李志宏,孙启国,吕洪波. 油气润滑系统水平管路中环状流的形成过程及特性研究[J]. 润滑与密封,2012,37(7):49-52.
- [11] 谢黎明,朱绪胜,王 岩. 气液两相流在管内流动的数值研究[J]. 制造技术与机床,2011(4):72-74.
- [12] 杨铁林,王永昌. 可调式油气混合器及其控制回路[J]. 机械设计与制造,1994(5):48.
- [13] 张永锋. 油气润滑系统应用理论与实验研究[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2011.
- [14] 刘 东. 轧机油气润滑系统优化改造[J]. 液压气动与密封,2013,33(4):76-78.
- [15] 孔祥东,姚静,俞 滨,等. 油气润滑系统发展综述[J]. 润滑与密封,2012,37(6):91-95.
- [16] Tu Jiyuan, Guan Heng Yeoh, Liu Chaoqun. Computational Fluid Dynamics-A Practical Approach[M]. Ireland:Elsevier,2008.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

解 胜,翟 华. 新型油气混合器的内部流场分析[J]. 机电工程,2016,33(9):1057-1061.

XIE Sheng, ZHAI Hua. Analysis of the internal flow field of new oil-gas mixer[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(9):1057-1061.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>