

Simulation and Simulation of Internal Pressure MBR Wastewater Treatment Process Based on CFD

Xuefei Dai, Chunqing Li, Ming Ma

School of Computer Science and Software Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin
Email: daixuefei21@163.com

Received: May 16th, 2019; accepted: Jun. 4th, 2019; published: Jun. 11th, 2019

Abstract

MBR (membrane bioreactor) is an emerging high-efficiency water treatment technology in recent years. Its working principle is to use the membrane separation equipment to intercept the activated sludge and macromolecular organic matter in the sewage. The essence of this process is solid-liquid separation. To study the wastewater treatment process of MBR, we simulated the process using CFD-related software. First, the membrane module portion of the internal pressure MBR is selected for modeling and meshing. Then, we use the Euler multiphase flow model to set the fluid in the membrane tube as water and suspended particles. The model was solved by FLUENT calculation, and it was found that after 500 iterations, the residual curve converges at about 17 times. Finally, the calculation results were imported into the post-processing software for visualization. It was observed that the pressure distribution and water flow direction of the membrane module were consistent with the actual situation. At the same time, the actual data of a sewage treatment plant was used for calculation and verification, which proved that the model is reliable and effective.

Keywords

CFD, MBR, Euler Multiphase Flow Model

基于CFD的内压式MBR污水处理过程的模拟与仿真

戴雪飞, 李春青, 马 明

天津工业大学计算机科学与软件学院, 天津
Email: daixuefei21@163.com

收稿日期：2019年5月16日；录用日期：2019年6月4日；发布日期：2019年6月11日

摘要

MBR (膜生物反应器)是近年来新兴的一种高效水处理技术,其处理原理为利用膜分离设备将污水中的活性污泥和大分子有机物截留住,这个过程本质就是固液分离。为研究MBR的污水处理过程,我们使用CFD相关软件对这一过程进行模拟仿真。首先选定内压式MBR的膜组件部分进行建模和网格划分。然后使用欧拉多相流模型,分别将膜丝管内流体设置为水与悬浮颗粒。通过FLUENT计算求解本模型,发现500次迭代后,残差曲线约在17次时收敛。最后把计算结果导入后处理软件使其可视化,观察发现膜组件各处压力分布和水流走向与实际相符。同时使用某污水厂的真实数据进行了计算验证,证明本模型是可靠有效的。

关键词

CFD, 膜生物反应器, 欧拉多相流模型

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

MBR (膜生物反应器)是一种将生物反应技术与膜分离技术结合的新兴污水处理技术,它与传统污水处理工艺相比具有占地面积小、过滤效率高、出水水质好等优点[1]。MBR由膜分离单元和生物反应单元两个部分组成。其中,膜组件(膜分离单元)部分的工作原理是利用膜丝管分离污水中的杂质与透过液,这个过程本质就是固液分离[2]。用实体设备研究固液分离过程时,实验过程复杂繁琐、成本消耗较大,而且膜丝内部流场很难精准监测。为解决这个问题,我们可以借助计算机对这一过程进行模拟仿真。利用CFD相关软件,先对膜组件进行建模,然后求解计算该模型,最后将计算结果可视化。通过生成的各种可视化云图,我们可以直接观察到膜组件的固液分离过程及其周围流体的运动情况。同时本文进行了大量的实验分析,证明了本模型的有效性和可靠性。

2. 内压式 MBR 建模

2.1. 内压式膜组件与外压式膜组件

本文研究选用的是天津天膜公司生产的UOF-4型膜组件的8英寸中空纤维膜。中空纤维膜是一种外形与纤维相似、具有自支撑作用、内含一个或多个孔的圆柱状膜。它具有填充密度大、单个膜组件回收率高、耐压性较好等优点。该膜组件分内压式和外压式两种。如图1所示,内压式膜组件运行时,原料液(污水)从膜丝管一端流入,透过液从管壁挤出,杂质从膜丝管的另一端流出[3]。图2为外压式膜组件,原料液从管外侧挤入管内,透过液从管两端流出,杂质被膜丝管壁拦截在外面。通常,采用何种运行方式取决于分离过程和料液性质。但根据MBR的市场反馈来看,内压式MBR在实际使用中的抗污染性优于外压式MBR。因为它的膜表面更光滑且死角少,膜过流面上冲洗强度高,所以污染物不易滞留[4]。从MBR今后发展来看,内压式极可能由于其抗污染性强而占据大部分市场。因此本文研究选取了内压式MBR。

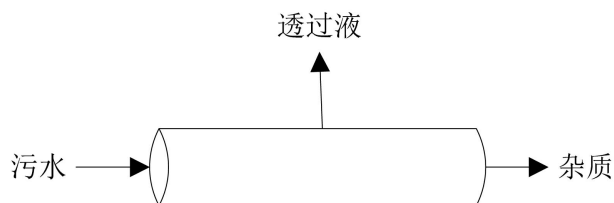


Figure 1. Internal pressure membrane module
图 1. 内压式膜组件

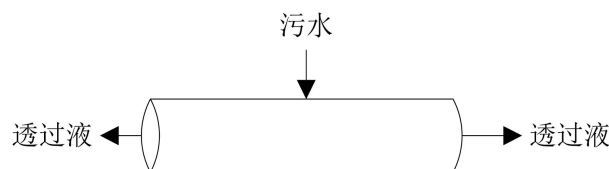


Figure 2. External pressure membrane module
图 2. 外压式膜组件

2.2. Eulerian (欧拉)多相流模型

多相流是指两种或两种以上不同相的流体混合在一起的流动。在本文使用的建模软件 FLUENT 中，有欧拉法和拉格朗日法两种处理多相流的方法。本文采用欧拉法，它是把不同的相处理成互相贯穿的连续介质。各相的体积率是时间和空间的连续函数，其体积率之和等于 1。

FLUENT 中包含三种基于欧拉方法的多相流模型，分别为：VOF (流体体积)模型、Mixture (混合物)模型和 Eulerian (欧拉)模型。通常来说，对于活塞流和分层/自由面流动，使用 VOF 模型；对于离散相混合物，使用 Mixture 模型或 Eulerian 模型。本文研究内容是内压式 MBR 的固液分离过程，所以选取 Eulerian 模型，它与 Mixture 模型相比更为精确。选择 Eulerian 模型后，我们分别设置水和悬浮固体(杂质)这两相，然后展开后续的求解计算。

2.3. 建模软件

本文采用的 CFD 仿真软件为 ANSYS16.0。它由前处理器，计算求解器和后处理器三部分组成。前处理环节是向 CFD 软件输入所求问题的相关数据。我们在这一步的工作是建立模型、划分网格并且保证得到高质量网格。本文采用的是集成于 ANSYS Workbench 平台的 ICEM CFD 软件。计算求解器负责读入网格模型，检查网格质量并设置边界条件，最后利用其内置算法计算并生产残差曲线。后处理部分负责将求解器的计算结果以图的方式呈现出来，以便有效地观察和分析计算结果，本文使用的是 CFD-Post 软件[5]。

3. 建立模型

本文建模的原型是 UOF-4 型膜组件，其内部浇注约 3000~3500 根膜丝管，对实物建模难度非常大。但是我们研究重点在模拟其固液分离过程，所以建模时只保留外侧水槽和少量膜丝(后续实验结果证明，简化后的模型能够正确模拟出内压式 MBR 的固液分离过程)。内压式 MBR 的工作原理是利用膜丝管壁上的微孔析出透过液、拦截杂质颗粒。由于杂质颗粒的直径都大于壁孔，所有一个壁孔和多个壁孔的拦截效果是相同的，可以把膜丝壁上的无数个孔简化为一个。如图 3 所示，本模型由外侧水槽和三根中空纤维膜丝管组成，每根膜丝管壁上开有一个小孔。污水从入水口流经水槽后流入膜丝管。在入口压力的作用下，小分子水从微孔中流出，大分子杂质颗粒无法透过微孔被拦截，以达到固液分离的目的[6]。

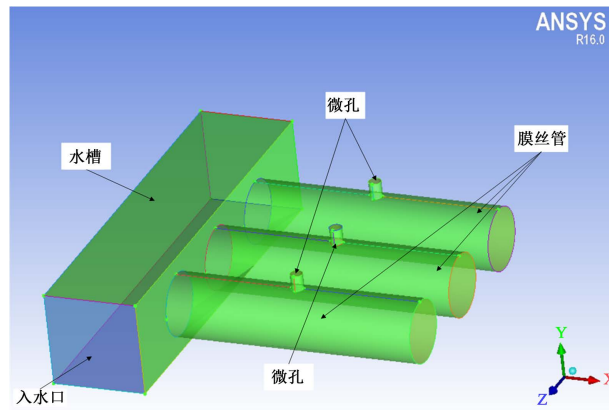


Figure 3. Membrane component model
图 3. 膜组件模型

膜组件模型建好后，将建成的三维模型进行网格划分，本文使用的是 ICEM 软件。网格划分有结构化和非结构化两种划分方法。严格意义上讲，结构化网格是指网格区域内所有内部点都具有相同的毗邻单元。它可以很容易地实现区域的边界拟合，与实际模型接近。所以本文使用结构化网格划分。本模型由一个六面体和六个圆柱组成，其中圆柱部分采用针对圆弧几何模型的 O 型切分[7]。最后形成的网格文件如图 4 所示。网格划分成功后，为保证导入 FLUENT 中求解计算时收敛，需对网格质量进行检查。图 5 为默认标准“Determinant 2*2*2”判断的网格质量，生成网格数量约 11 万个，网格参数 Quality 趋向于 1，Quality 质量达到 0.5。网格质量符合标准，可以保存并导出 mesh 文件进行后面的求解计算[8]。

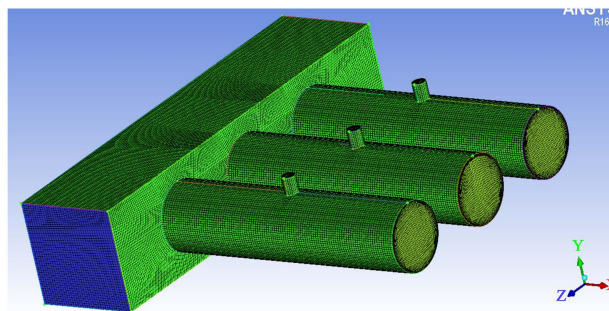


Figure 4. Structured grid
图 4. 结构化网格

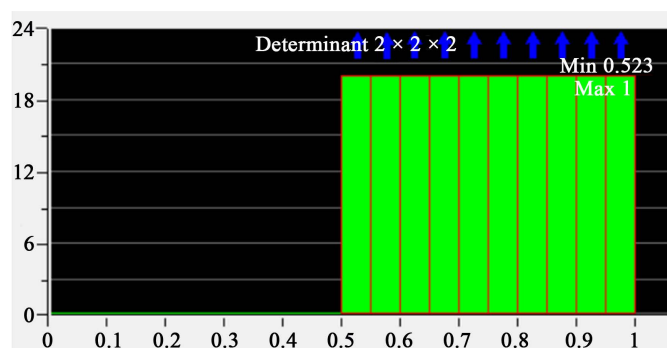


Figure 5. Grid quality
图 5. 网格质量

4. 分析求解

将已画好网格模型的 mesh 文件导入 FLUENT 中，进行计算求解，步骤如下：

4.1. 求解模型描述

- 1) 进行网格检查，保证最小体积不为负。
- 2) 选择稳态基于压力瞬态求解器；设置重力加速度和长度单位为毫米。
- 3) 打开多相流欧拉模型，选择物理状态层流。
- 4) 在 materials 节点里，导入已有材料——水，并创建悬浮固体 sand (设置 sand 的密度为 2500 kg/m^3 ，粘性为 10 kg/m-s)。其中水为主相，悬浮固体为次相。并设置悬浮固体的颗粒直径为 0.00001 mm (大于膜丝管壁孔直径)。
- 5) 设置边界条件，入口边界条件为压力入口，出口边界条件为压力出口。在次相边界条件中，设置悬浮固体的体积分数。

4.2. 求解过程描述

- 1) 求解算法选择基于相的耦合算法，梯度选择基于单元体的最小二乘法
- 2) 动量方程选择一阶迎风格式，体积分数选择一阶迎风格式。松弛因子默认。
- 3) 设置收敛阈值和监视窗口，窗口用来监视出口处悬浮固体的体积分数。
- 4) 初始化后，进行迭代计算产生残差曲线。

4.3. 计算结果

图 6 是生成的残差曲线。残差曲线的精度与模型精度、网格密度和网格无关性及数值误差有关。所以为使其收敛，在建立模型、划分网格时需要反复优化。图示曲线在第 17 次迭代时收敛，说明建立的模型正确，可以将数值求解的结果导入后处理软件中。图 7 为出口处悬浮固体体积分数，x 轴表示迭代次数，y 轴表示出口处悬浮固体的体积分数。y 轴始终为零，说明出口处没有出现悬浮固体，本模型成功模拟出膜丝过滤污水时的实际情况。最后保存文件，将计算结果导入后处理软件中，以图的方式体现出来 [9]。

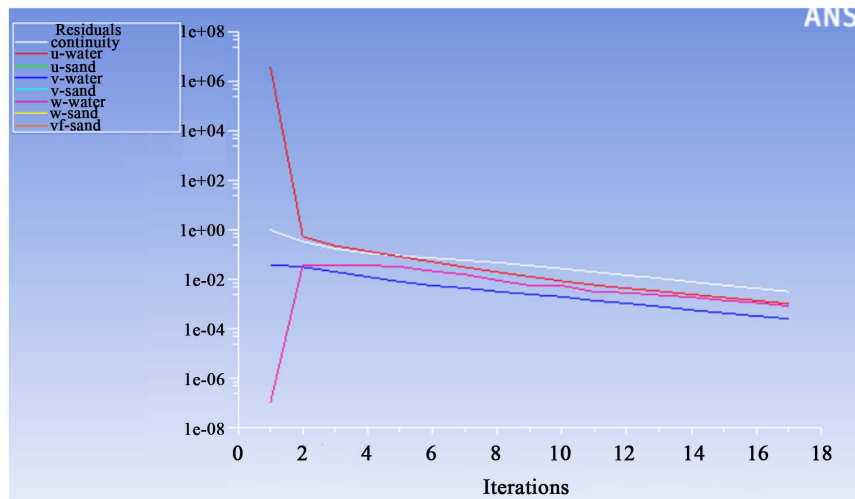


Figure 6. Residual curve

图 6. 残差曲线

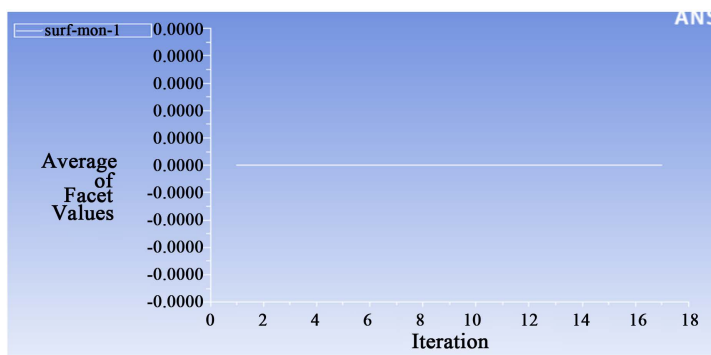


Figure 7. Suspended solids volume fraction

图 7. 悬浮固体体积分数

将 FLUENT 的计算结果导入 CFD-Post 后处理软件中, 可使计算结果以云图的方式显示出来。图 8 为整体压力云图, 图 9 所示为 xy 截面压力云图。由于设置了压力入口, 因此在入口处水流压力最大, 出口处最小, 从入水口到出水口压力依次递减。云图符合实际结果。图 10 为流线图, 它显示了管内水流情况。可以看到水从入口进入, 水槽内的水流向管内流入, 有透过液从微孔流出。流线图所显示的水流走向与膜组件实际运行时的结果是相符的[10]。

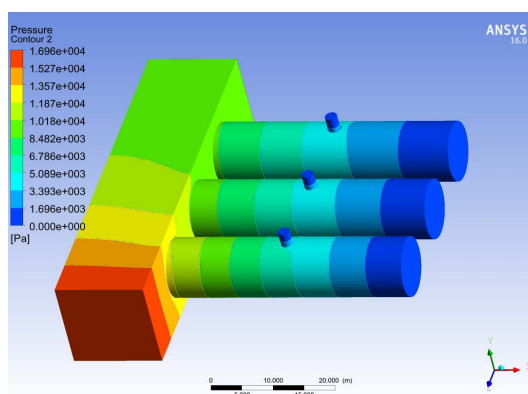


Figure 8. Overall pressure cloud

图 8. 整体压力云图

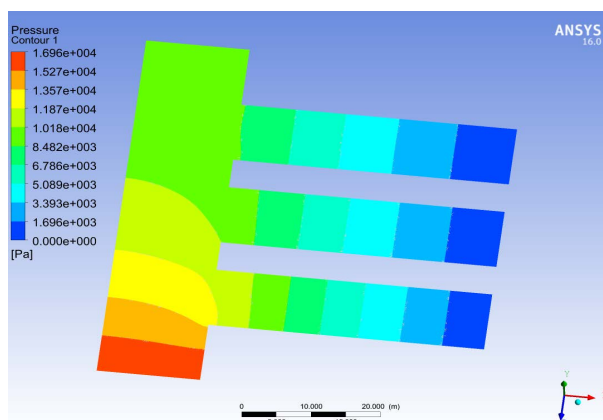


Figure 9. xy plane pressure cloud

图 9. xy 面压力云图

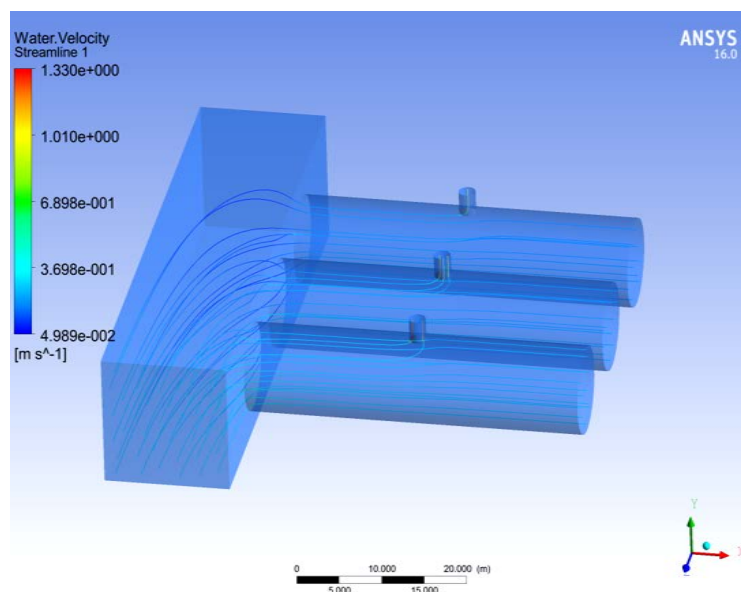


Figure 10. Streamline diagram

图 10. 流线图

图 11 是出口处悬浮固体体积分数云图，图中显示 sand 体积分数为零，即出口处没有悬浮固体，所有悬浮固体都被微孔拦截，说明本模型成功的模拟了内压式 MBR 的固液分离过程。

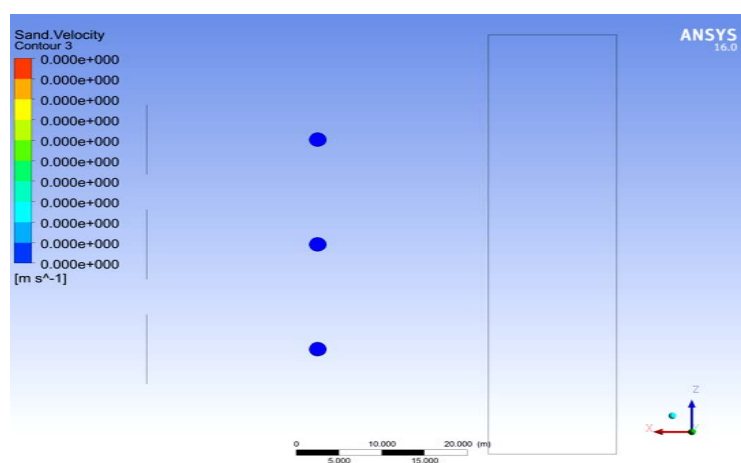


Figure 11. Suspended solids volume fraction

图 11. 悬浮固体体积分数云图

5. 模型验证

为验证本模型的可靠性，我们选取石家庄某污水处理厂的 MBR 系统运行的实际数据进行检验。测试时，选择多组不同 sand 浓度的污水数据，将 sand 的体积分数作为次相边界条件，然后用本模型计算出出口处 sand 的体积分数。实验结果如表 1 所示。表中前三列的进水量、过膜前 sand 浓度和过膜后 sand 浓度是由污水处理厂提供的真实数据，最后一列是由 CFD 求解器计算出的结果。表中数据表明，求解器计算后的 sand 体积分数为零，与实际情况基本一致，本模型实现了用 CFD 软件模拟内压式 MBR 的固液分离过程。

Table 1. Sewage plant data and calculated data comparison**表 1.** 污水厂数据与计算数据对比

进水量(m ³ /h)	过膜前 sand 量(mg/l)	过膜后实际系统 sand 量(mg/l)	过膜后模型计算 sand 量(mg/l)
2.5	109	0	0
2.5	251	0	0
2.5	207	0	0
2.5	226	0	0
2.5	169	0	0
2.5	180	0	0
2.5	269	0	0
2.5	235	0	0
2.5	229	0	0
2.5	307	0	0
2.5	268	0	0

6. 结论分析

为研究膜生物反应器的污水处理过程,我们利用 CFD 软件对其进行建模来模拟这一过程。在研究对象的选取上,选择更易控制污染的内压式 MBR。首先,使用 ICEM 建立膜组件的三维模型,然后使用结构化网格划分方式对所建模型进行网格划分。由于污水处理的本质就是固液分离,所以在求解计算模型时选择 FLUENT 软件中的欧拉多相流模型,将管内流体定义为固液两相流。最后将数值求解的结果导入后处理 CFD-Post 软件中。通过观测所生成的压力云图,我们发现模型入水口压力最大,出水口压力最小,膜组件内部的压力从入水口到出水口依次递减。所生成的悬浮固体体积分数图显示出水口的杂质体积为零,说明出水口无杂质,本模型能有效地滤除杂质。最后用某污水厂的真实数据进行测试检验,发现模型计算出的 sand 浓度和系统实际处理后的浓度都为零,证明本模型是有效可靠的。通过研究发现,把 CFD 相关软件应用到 MBR 领域是可行的,得到可靠结果的同时节约了大量的工程设计成本和实验成本。

参考文献

- [1] 胡小佳. 污水处理厂 MBR 工艺的应用分析[J]. 中国设备工程, 2018(14): 131-133.
- [2] 刘丰源, 辛嘉英. 膜生物反应器在污水处理中的应用研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2018, 34(4): 412-417.
- [3] 毋海燕. 膜生物反应器中膜污染问题的研究新进展[J]. 城市道桥与防洪, 2018(8): 19-20, 169-172.
- [4] 李云, 蒋进元, 白璐, 戴建坤. 大理某 MBR 城镇污水处理厂技术诊断及优化分析[J]. 给水排水, 2018, 54(8): 59-62.
- [5] 杨子祥. 基于多尺度计算的 MBR 模拟仿真[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2013.
- [6] 韩娜. 基于 CFD 技术的离心泵出口流态模拟及分析[J]. 农机化研究, 2018(9): 34-38.
- [7] Mansouri, Z., Settari, A. and Khamane, H. (2018) Computational Investigation of Heat Load and Secondary Flows Near Tip Region in a Transonic Turbine Rotor with Moving Shroud. *Applied Thermal Engineering*, **136**, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.012>
- [8] 范进之, 李桦. 高精度有限体积法与间断有限元法的比较[J]. 国防科技大学学报, 2014(5): 33-38.
- [9] 成娟, 舒其望. 计算流体力学中的高精度数值方法回顾[J]. 计算物理, 2009(5): 633-655.
- [10] 柳蒙蒙, 陈梅雪, 杨敏, 郁达伟, 郑嘉熹, 魏源送, 冀春苗, 王晓爽, 常江. 基于 CFD 的大型膜生物反应器的设计及运行优化[J]. 环境工程学报, 2018, 12(2): 552-558.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-498X，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ijm@hanspub.org