

Seismic Performance Analysis of Frame-Rocking Wall Structures

Wei Nie, Shuxian Liu, Shasha Lu*, Wei Wang, Tianbao Liang, Li Nie, Lin Wang, Wei Zhang

School of Civil Engineering, Liaoning Technology University, Fuxin Liaoning
Email: *lilyherb@163.com

Received: Mar. 2nd, 2019; accepted: Mar. 19th, 2019; published: Mar. 26th, 2019

Abstract

In order to study the seismic performance of the frame-swing wall structure system, a six-story concrete frame model is designed according to the seismic code of concrete. The structural model of the frame-swing wall and the frame structure model are established by the finite element software. And combined with the shaking table experiment, the seismic response of the two models before and after the additional rocking wall is obtained. The analysis results show that the inter layer displacement angle of the model after the additional rocking wall tends to be consistent, and the concentration of deformation between the layers is effectively controlled, which improves the failure mode of the structural "strong column weak beam" and forms the failure mechanism of the overall yield. Compared with the typical shear failure characteristics of the frame structure, that is, the overall deformation is "U" type, the overall deformation of the frame rocking wall is "swinging" type, which can effectively control the displacement concentration of the bottom layer of the structure, and has a good shock absorption effect.

Keywords

Frame Rocking Wall Structure, Shaking Table Experiment, Overall Yielding

框架 - 摇摆墙结构 抗震性能的研究

聂 伟, 刘书贤, 路沙沙*, 王 伟, 梁天宝, 聂 莉, 王 林, 张 伟

辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新
Email: *lilyherb@163.com

收稿日期: 2019年3月2日; 录用日期: 2019年3月19日; 发布日期: 2019年3月26日

*通讯作者。

文章引用: 聂伟, 刘书贤, 路沙沙, 王伟, 梁天宝, 聂莉, 王林, 张伟. 框架 - 摇摆墙结构抗震性能的研究[J]. 土木工程, 2019, 8(2): 413-419. DOI: 10.12677/hjce.2019.82048

摘要

为研究框架-摇摆墙结构体系的抗震性能, 本文根据混凝土抗震规范设计了一个6层混凝土框架模型, 通过有限元软件分别建立框架摇摆墙结构模型与框架结构模型, 通过静力非线性分析方法, 并结合振动台实验, 得到附加摇摆墙前后两个模型的地震响应。分析结果表明: 附加摇摆墙之后的模型的层间位移角趋于一致, 结构层间变形的集中得到有效控制, 改善了结构“强柱弱梁”的破坏模式, 形成整体屈服的破坏机制; 且相比于框架结构典型的剪切破坏特征, 也即整体变形呈“U”型, 框架摇摆墙的整体变形呈“摇摆”型, 能有效控制结构底层的位移集中, 具有很好的减震效果。

关键词

框架摇摆墙结构, 振动台实验, 整体屈服

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

通过大量的震害调查和研究表明, 由于地震的不确定性因素, 结构的破坏形式无法很好地控制, 破坏机制无法精准地预测, 成为现在很多研究人员的主要难题。然而根据抗震设计的相关规范, “强柱弱梁”机制(或“梁铰机制”)是人们在长期的工程实际与震害调查中总结得到的延性框架结构理想的损伤机制, 即在强震下框架结构的梁端、底层柱脚或顶层柱顶容许损伤屈服, 并通过损伤屈服部位的塑性变形耗散地震输入能量, 而框架柱的其他部位则不应屈服以确保结构的整体性。与其相对应的是对结构抗震不理想的层屈服机制(或“柱铰机制”)[1]; 然而在实际工程中一味地增强柱子的承载力, 不仅增加了经济成本而且对于建筑的整体稳定性提高效果不佳, 结构延性增大的同时, 它的损伤程度也大大的提高; 所以只有当结构的损伤按照人们所设计的损伤模式方向进行发展, 这样才能在结构的损伤机制得到控制的时候, 提高结构的延性设计, 才能在抗震性能上得到很好的发展, 因此有必要从结构体系本身出发[2], 寻找新的抗震方式。近年来美日学者提出将“可恢复功能城市”(resilient city)作为未来抗震合作研究的主要方向[3]。作为可恢复功能结构[4]一种的自复位结构体系成为了近年来的研究热点之一。然而国内虽然已有很多关于摇摆墙的研究, 但是大部分只是通过软件的模拟去分析摇摆墙在控制结构变形以及破坏机制的优越性, 通过振动台实验去验证分析的研究并不多, 本文主要结合振动台实验以及软件模拟进行对比分析; 而且通过国内有关摇摆墙的实验分析中可知, 大部分只是通过摇摆墙的摇摆来实现其对地震能量的耗散, 这种方式相比于纯框架可以实现一定程度上的耗能, 但是其耗能能力有限, 相对于强大的地震能量, 仅仅通过“牺牲”摇摆墙来实现耗能并不能立竿见影; 所以本文在设计框架与摇摆墙连接件时既设置了弹簧增强摇摆墙的耗能能力, 又实现了震后可以更换连接件的可能, 减少了经济的损失。

2. 框架摇摆墙结构体系

历次地震的震害现象表明, 框架结构的抗震性能较差, 并没有表现出人们期望的有利于抗震的弯曲型破坏, 也没表现出耗能能力较大的梁铰机制或混合铰机制破坏形式[5]。为了更好的发挥框架结构整体的抗震性能, 改变框架结构典型的破坏机制, 很多专家学者从结构体系出发, 出现了“受控摇摆结构体

系”的概念，就是通过控制结构的侧向变形模式来避免因地震作用而引起的结构损伤比较集中的问题，来实现结构预期损伤机制并保证结构的预期抗震性能[1]，即框架-摇摆墙结构体系；而摇摆墙是经过特殊构造，墙底与基础铰接连接，具有一定的转动能力，并通过连梁或者阻尼器等水平连接措施将框架部分与摇摆墙有效连接，保证两者在地震作用下能够协同工作[6]。相比于框架结构，框架摇摆墙结构，其一阶周期与原结构相比基本不变，结构整体承受的地震力没有明显改变[7][8]。摇摆墙-框架结构体系的特点有：1) 利用摇摆墙控制结构的变形模式；2) 保护墙体免受损伤[6]。框架摇摆墙结构体系的出现在很大程度上控制了框架结构的变形模式，实现了整体破坏机制的发生，如图1所示。

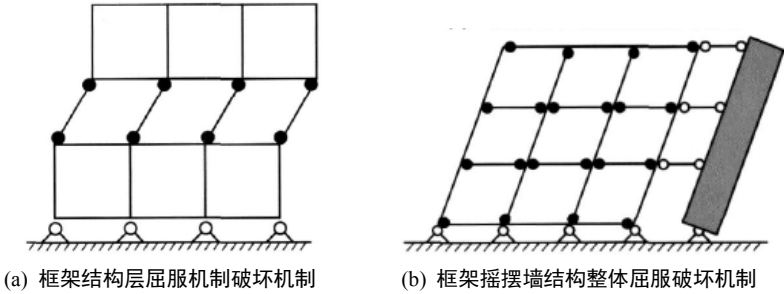
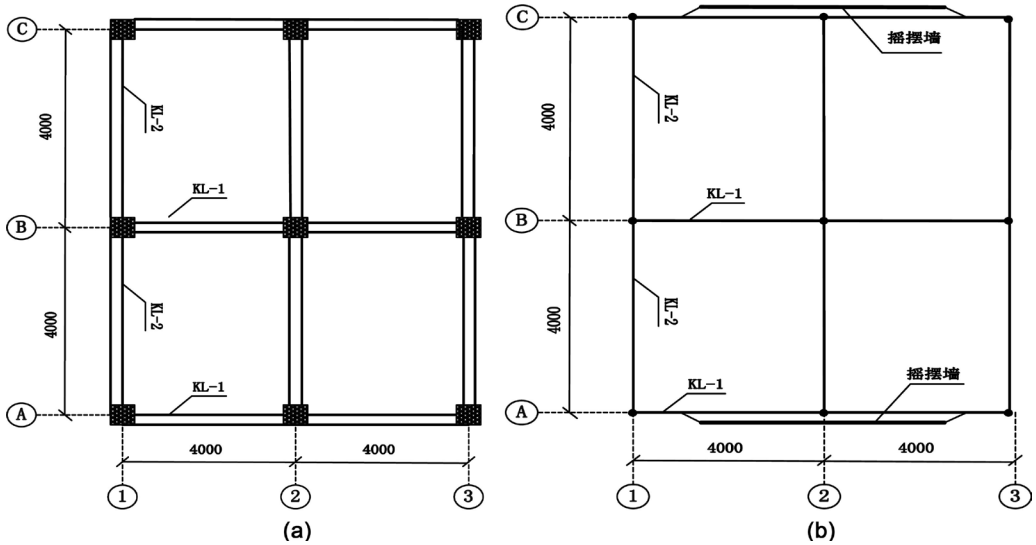


Figure 1. Damage modes of two structures
图1. 两种结构的破坏模式

3. 框架摇摆墙振动台试验

地震模拟振动台试验获得地震工程知识的重要方法之一，通过振动台台面输入地震动来模拟地震对工程结构模型的惯性作用，然后得到模型结构的动力反应，获得工程结构抗震性能的一系列指标，本文中的动力试验是在辽宁工程技术大学实验实训中心地震模拟振动台上进行；实验的目的是对比分析框架结构与框架摇摆墙结构在相同的地震波不组的地震烈度下的抗震性能，通过对比分析，进而提出更好的抗震加固方法和理论，为今后的研究提供理论依据。

根据振动台性能以及试验室的使用空间结合振动台试验相似设计的基本方法对于模型进行 1/10 缩尺，参照建筑抗震设计规范[9]制作两榀两跨，每跨分别为 400 mm 的 6 层混凝土框架模型与混凝土框架摇摆墙模型，两种模型的布置图及实物图如图2所示，每层层高 300 mm，梁板柱的配筋如图3所示。摇摆墙的尺寸设置为





(c)

Figure 2. Plan of concrete frame-rocking wall. (a) Plan of concrete frame structure; (b) Plane layout of concrete frame-rocking wall structure; (c) Actual diagram of concrete frame-rocking wall structure
图 2. 混凝土框架 - 摇摆墙结构图。(a)混凝土框架结构平面图; (b)混凝土框架 - 摇摆墙平面布置图; (c)混凝土框架摇摆墙实物图

280 mm × 30 mm × 1800 mm; 摇摆墙与框架结构的连接件设计时整个结构体系的关键部分, 本文参考摇摆墙“摇摆”耗能复位的特性[10], 利用弹簧与螺杆设计了一套可更换的连接件, 既可以实现无地震作用时水平传力, 又可以在输入地震波时耗散地震能量和震后释放弹性势能恢复结构的位置, 实现自复位功能, 具体结构见图 4 所示。

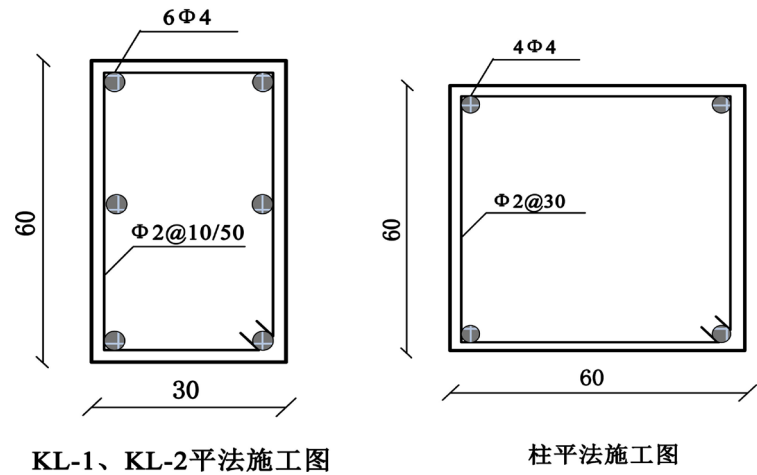


Figure 3. Reinforcement diagram of beam and column
图 3. 梁柱配筋图

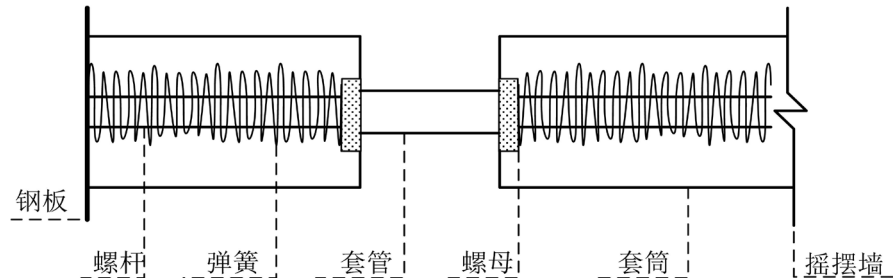


Figure 4. Diagram of connector between rocking wall and frame structure
图 4. 摇摆墙与框架结构连接件示意图

通过振动台实验对框架结构与框架摇摆墙结构输入相同的 EI Centro 波, 实验结果表明, 两个模型在 7 度, 8 度频遇与罕遇烈度相同的地震作用下, 框架摇摆墙结构的破坏程度显著低于框架结构, 且框架结构的底层出现贯穿性的裂缝, 柱子的裂缝发展迅速, 层屈服破坏的特征明显; 而框架摇摆墙结构在不同地震烈度下作用时, 塑性铰出现在梁端, 并且发展趋势稳定, 整体的裂缝发展较缓慢, 破坏程度明显低于框架结构, 在一定程度上能够实现整体屈服破坏的机制, 很好的控制结构的变形; 而且通过框架结构与框架摇摆墙结构整体结构的位移曲线如图 5 所示可知, 相比于软件模拟的结果, 实验结果测得的位移大于软件模拟中的 1.215 倍, 但是整体的位移趋势变化基本上一致, 框架结构仍然表现出典型的层屈服机制的破坏特征, 框架摇摆墙结构整体变形均匀。

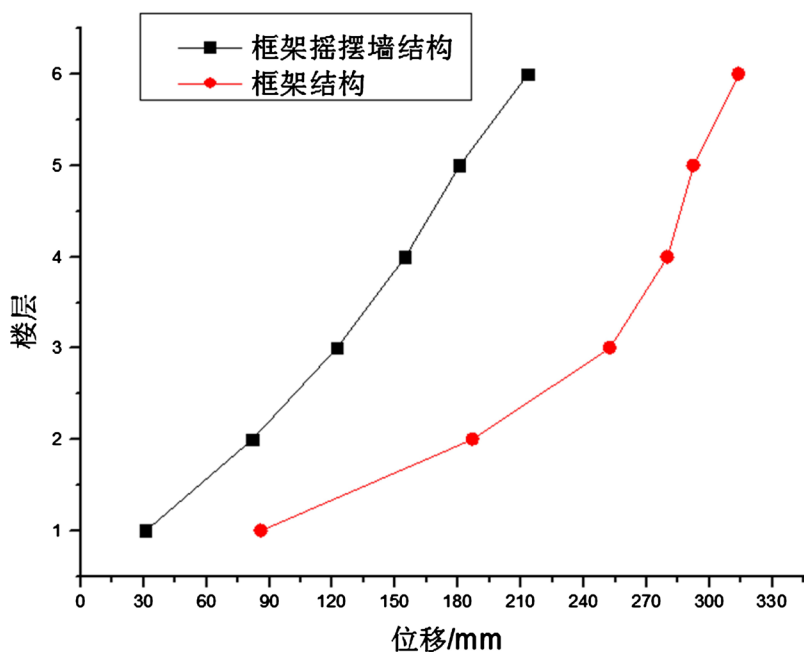


Figure 5. The deformation of structure

图 5. 结构的位移图

4. 框架摇摆墙结构有限元模拟

对于上部混凝土框架摇摆墙结构的模拟, 本文使用有限元软 ABAQUS 整体式模型建立混凝土框架结构有限元模型[2]对摇摆墙—框架结构进行静力非线性分析; 模型的混凝土本构关系采用软件中提供的混凝土损伤塑性本构关系, 在定义材料时可适当提高混凝土的等级, 由 C40 代替 C30 混凝土, 进而提高钢筋的抗拉作用; 模型的框架梁与柱均采用三维线形梁单元(B31), 混凝土摇摆墙以及楼板均采用具有广泛适用性的线形减缩积分的四边形三维壳单元(S4R), 最终通过有限元软件建立框架摇摆墙结构模型如图 6 所示。

剪力墙一直在房屋抗震减灾中起着很重要的作用, 但是框架摇摆墙结构模型相比于框架剪力墙结构, 将剪力墙的底部由固定连接变成铰连接, 释放了墙体底层的弯矩, 改善了墙体的受力状态, 使整个结构在弯矩最大的位置出现在剪力不大的中间层, 而剪力最大的底层弯矩却不大, 这在很大程度上避免底层弯矩与剪力过大造成层屈服机制的发生, 可以充分发挥框架结构整体的抗震性能; 而框架摇摆墙相比于框架结构, 其主要的特点就是控制结构的变形模式, 通过摇摆墙的“摇摆”来实现耗散地震能量以及恢复结构位置实现自复位功能[11]。通过图 7 所示框架结构与框架摇摆墙结构的位移曲线, 框架结构呈现典

型的剪切破坏特征，底层变形大，顶层的变形小，结构整体的变形趋势呈现“U”形，具有明显的层屈服破坏特点；而框架摇摆墙结构由于摇摆墙的摆动，耗散了一部分输入框架结构的能量，有效控制了结构层间变形的集中，整体的结构变形基本上呈现直线状态，实现了整体屈服的破坏机制，使框架结构各个楼层的抗震能力得到了充分的发挥，显著提高了结构的整体抗震性能。

通过对比图 7 两种结构的层间位移角可以看出，框架结构底层明显为结构的薄弱层，层间位移角接近 $1/50$ ，而且底层的位移角约为顶层的 4.5 倍，具有框架结构剪切破坏的特征；而框架摇摆墙结构整体的位移角变化相比于框架结构比较均匀，且底层的位移角小于 $1/120$ ，减低了约 0.4 倍，提高了框架结构的承载能力。

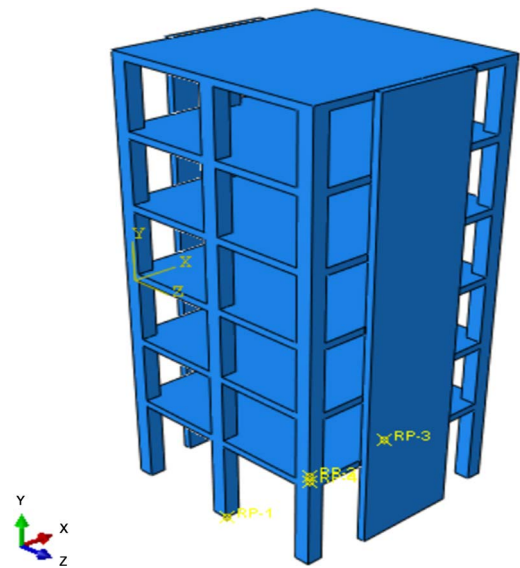


Figure 6. Model of concrete frame-rocking wall
图 6. 混凝土框架 - 摇摆墙结构模型

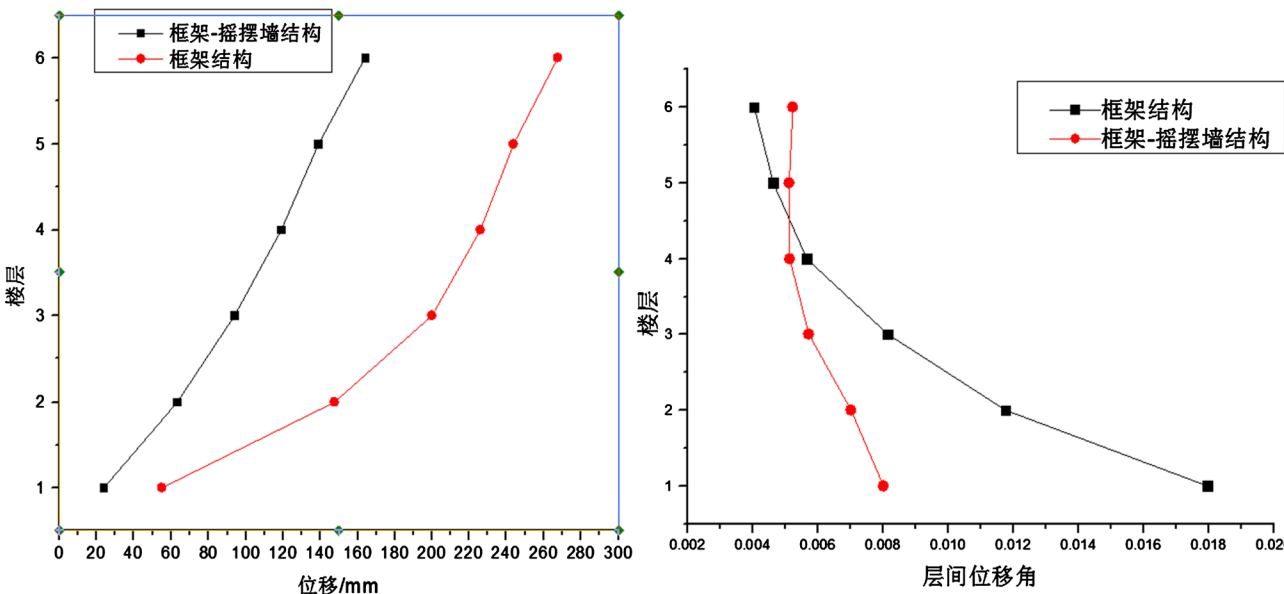


Figure 7. The deformation of two models
图 7. 两个模型的位移图

5. 结论

通过振动台实验以及有限元软件 ABAQUS 对框架结构与框架摇摆墙结构进行建模对比分析, 分析结果如下:

- 1) 框架摇摆墙结构在相同的地震作用下, 破坏程度以及承载能力有很大的改善和提高, 并且裂缝发展缓慢, 梁端出铰先于柱端出铰, 在一定程度上实现了“强柱弱梁”的破坏机制。
- 2) 框架摇摆墙结构由于墙底设置成铰接, 相比于框架剪力墙, 改善了底层弯矩与剪力较大造成的集中变形, 改变了墙体的受力状态。
- 3) 框架摇摆墙结构相比于框架结构主要的特点是控制了结构的变形模式, 改变了结构薄弱层的受力状态, 使结构整体变形均匀, 层间位移角趋于一致, 实现了整体屈服破坏机制, 充分发挥了框架结构各个楼层的抗震能力, 显著提高了框架结构的抗震性能。

基金项目

本文工作来自于国家自然科学基金项目(项目编号: 51474045)的相关研究。

参考文献

- [1] 曲哲. 摇摆墙-框架结构抗震损伤机制控制及设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [2] 张富文. 一种框架摇摆墙结构的实现形式及其有限元分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(17): 213-217.
- [3] 吕西林, 陈云, 毛菟君. 结构抗震设计的新概念: 可恢复功能结构[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(7): 941-947.
- [4] 吕西林, 周颖, 陈聪. 可恢复功能抗震结构新体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014(4): 130-139.
- [5] 李斌. 基于破坏机制的框架结构和框架—支撑结构抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2012.
- [6] 曲折, 叶列平. 摇摆墙-框架体系的抗震损伤机制控制研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(4): 40-50.
- [7] 曹海韵, 潘鹏, 叶列平. 基于推覆分析混凝土框架摇摆墙结构抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 240-244.
- [8] 曹海韵, 潘鹏, 叶列平, 等. 混凝土框架摇摆墙结构体系的抗震性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(1): 64-69.
- [9] 建筑抗震设计规范(GB 50011-2010) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报, 2011, 32 (9): 1-10.
- [11] 潘鹏, 曹海韵, 叶列平, 等. 混凝土框架增设摇摆墙前后抗震性能比较[A]. 土木建筑与环境工程, 2010: 326-328.

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: 2326-3458, 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: hjce@hanspub.org