

Seismic Performance Analysis of Prefabricated Reinforced Concrete Continuous Beam Bridges

Guang Yang, Guangtao Xin, Yanjiang Chen, Weibing Xu

College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing
Email: 962616679@qq.com

Received: Apr. 22nd, 2019; accepted: May 7th, 2019; published: May 14th, 2019

Abstract

Based on finite element analysis software OpenSees, the numerical models of integral cast-in-place pier (RC), the prefabricated concrete pier with grouted sleeves (PCS) and the prefabricated and pre-stressed concrete pier with strands and grouted sleeves (PCSS) continuous girder bridges are established. Nonlinear time history analysis of three types of bridges is carried out and the displacement of pier top, re-centering capacity and hysteretic energy dissipation are compared. The results show that the displacement response of pier top of continuous girder bridge with prefabricated pier is less than that of cast-in-place pier continuous girder bridge, the residual displacement of PCSS continuous girder bridge is small, and it has better re-centering capacity. The hysteretic energy dissipation of PCS continuous girder bridge is similar to that of RC continuous girder bridge. The simulation method of prefabricated pier in this paper can be applied to the seismic analysis of bridge system.

Keywords

Prefabricated Piers, Continuous Girder Bridges, Seismic Performance

装配式钢筋混凝土连续梁桥抗震性能分析

杨光, 辛光涛, 陈彦江, 许维炳

北京工业大学, 建筑工程学院, 北京
Email: 962616679@qq.com

收稿日期: 2019年4月22日; 录用日期: 2019年5月7日; 发布日期: 2019年5月14日

摘要

基于OpenSees有限元分析软件, 建立了整体现浇墩(RC)、套筒连接装配式墩(PCS)和预应力套筒连接装

装配式墩(PCSS)连续梁桥的数值模型,以墩顶位移、自恢复能力和滞回耗能为指标,对比分析了三种类型桥梁的抗震性能。结果表明:整体装配式连续梁桥的抗震性能优于现浇连续梁桥;PCSS连续梁桥整体抗震性能最好,其残余位移小,具有一定的自复位能力;PCS连续梁桥的整体抗震性能与RC连续梁桥相近;本文中装配式桥墩模拟方法可以应用于桥梁体系的抗震分析研究。

关键词

装配式桥墩,连续梁桥,抗震性能

Copyright © 2019 by authors 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

随着我国经济的不断发展,城市交通网的建设任务越来越繁重,装配式桥墩施工方法在桥梁建设中被广泛使用,其具有施工质量高、施工周期短、对交通及环境影响小等优点,特别适用于施工作业平台有限的城市桥梁以及施工环境恶劣的跨海大桥。现阶段我国已经在东海大桥、杭州湾大桥等跨海桥梁中采用装配式桥墩技术,但多使用湿接缝实现桥墩与承台的连接[1] [2] [3]。目前,装配式桥梁多应用于设防烈度较低的地区,其在强震区的应用仍需进一步的研究。

国内外对装配式单墩的抗震性能开展了系列研究。Mander等[4]对干接缝预应力连接的节段拼装桥墩进行了拟静力试验研究,得出摇摆墩柱体系具有很强的自复位能力;Hewes等[5]对胶接缝外包钢套筒节段拼装桥墩试件进行了拟静力试验研究,得出采用套筒约束方案可以提高墩柱的延性性能;魏红一等[6]对套筒预埋位置不同的装配式墩进行拟静力试验,得出预制墩在合理的设计下抗震性能优于现浇墩;贾俊峰等[7]对利用灌浆波纹管锚固连接的节段拼装桥墩与现浇桥墩进行拟静力试验,得出节段拼装桥墩抗侧能力与现浇墩基本相同,节段拼装桥墩主要破坏于底层节段塑性铰区域;薛兴伟等[8]用OpenSees软件对钢筋混凝土柱在循环荷载下进行数值模拟,分别对材料本构模型参数、轴压比和配箍率进行变参数分析;王志强等[9]用OpenSees软件对东海大桥引桥桥墩进行有限元建模分析,得出无粘结预应力筋可减小桥墩的残余位移,截面中心布置预应力筋可提高桥墩抗震性能。

现阶段国内外研究成果主要集中于装配式单墩的抗震性能研究,缺少对整体装配式桥梁结构体系的研究。本文首先对研究较为广泛的装配式桥梁单墩的数值分析方法进行了对比分析,在此基础上,建立整体装配式连续梁桥数值分析模型,对整体装配式连续梁桥的抗震性能进行系列研究。

2. 装配式桥墩拟静力模拟

本文利用OpenSees有限元软件对葛继平等[10]所做的整体现浇墩(RC)和预应力钢绞线灌浆套筒连接的装配式墩(PCSS)拟静力试验进行了数值模拟。两种桥墩的主要设计参数如表1所示。

Table 1. Main design parameters of piers

表 1. 桥墩主要设计参数

桥墩类型	截面长 × 宽(mm)	试件有效高度(mm)	配筋率(%)	配箍率(%)	轴压比(%)	预应力筋配置	预应力合力(KN)
RC	830 × 700	3300	1.32	1.94	10	-	-
PCSS	830 × 700	3300	1.32	1.94	10	8A ^s 15.2	877

桥墩模型混凝土本构关系选取修正的 Kent-Park 模型(concrete02)，普通钢筋本构关系选取 Giuffrè-Menegotto-Pinto 模型(steel02)，灌浆套筒由弹性材料进行模拟，预应力筋由 steel02 施加初应力模拟，混凝土及钢筋材料的特性分别见表 2 和表 3，墩柱选取采用基于柔度的纤维单元(Nonlinear Beam-column)建立，预应力筋采用桁架单元(Truss)建立，其顶部、底部节点分别与墩柱顶部、承台底部节点用刚臂连接。接缝单元选取 ENT (Elastic-Notension Material)本构关系，即只受压本构关系模拟，弹性模量取 3.25 GPa。由于墩柱剪跨比为 5.89 大于 2，属于长柱，墩身变形以弯曲为主，可忽略接缝处剪切变形的影响。为了简化模型，把桥墩自重作为集中质量施加于顶部节点。

Table 2. Material properties of reinforcement bars
表 2. 钢筋材料特性

钢筋类型	弹性模量/Gpa	屈服强度/Mpa	硬化指数	初应力/Mpa
普通钢筋	200	470	0.02	0
预应力筋	195	1670	0.02	798

Table 3. Characteristics of concrete materials
表 3. 混凝土材料特性

混凝土类型	弹性模量/Gpa	峰值应力/Mpa	极限应力/Mpa	峰值应变
约束混凝土	32.5	31.5	6.30	0.0024
非约束混凝土	32.5	26.8	5.36	0.0020

RC 墩和 PCSS 墩的荷载 - 位移滞回曲线对比如图 1 所示。

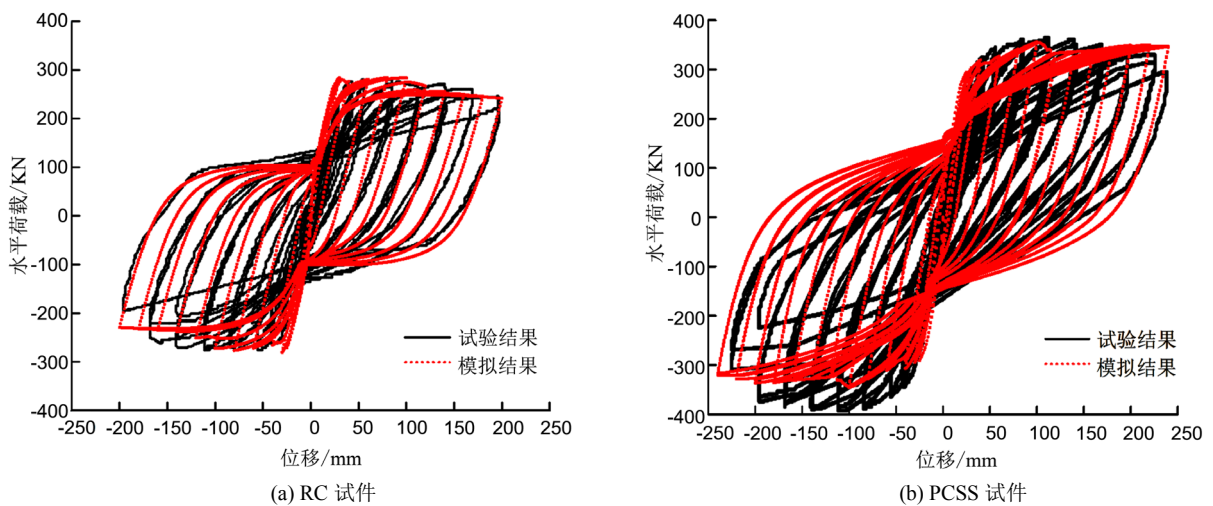


Figure 1. Hysteretic curve comparison
图 1. 滞回曲线对比

由图 1 可知，模拟的滞回曲线在出现下降段之前与试验结果较为接近，初始刚度以及极限承载力相差不大，但滞回曲线出现下降段后，模拟结果未能反映结构真实的刚度退化，由于模型并未考虑在反复荷载下钢筋断裂、混凝土损伤等问题；两者模拟的骨架曲线与试验基本一致，并且均有着明显的捏拢效应。虽然模拟结果存在一定的误差，但整体上可以模拟 RC 墩和 PCSS 墩的实际受力行为，证明了此种模拟方法的正确性，可以应用于下文整桥的研究。

3. 连续梁桥概况

本文研究对象为某一连续梁桥中的一联，跨径组合为 3×25 m，桥梁全宽 12 m，主梁采用 C40 预应力混凝土单箱双室箱梁截面，下部结构采用矩形截面双柱墩，截面尺寸为 $2.2 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ ，墩高 10 m，承台厚 2.2 m，不考虑基础形式，桥型布置如图 2 所示。桥墩采用 C40 混凝土，钢筋采用 HRB400 钢筋，截面配筋率为 1.5%，体积配箍率为 1.79%。

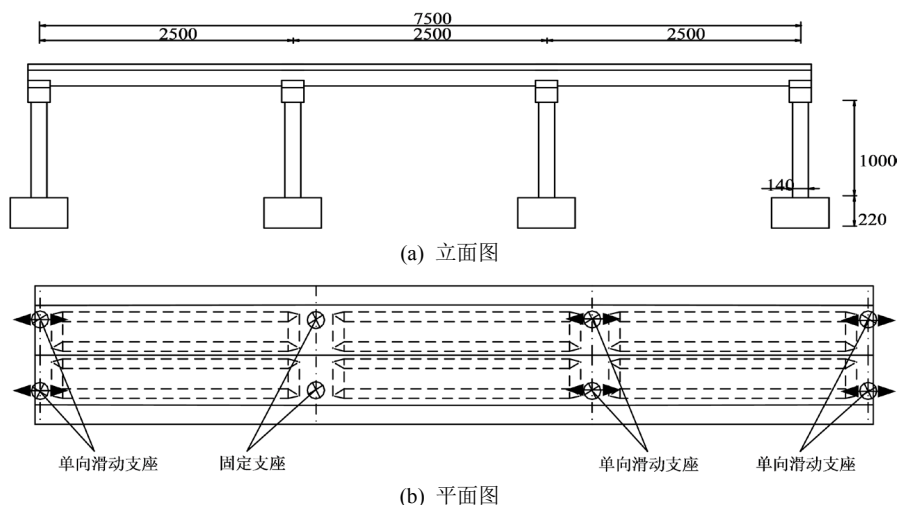


Figure 2. Bridge layout (unit: cm)
图 2. 桥梁布置图(单位: cm)

4. 有限元模型的建立

4.1. 上部结构

由于震害多出现于桥梁下部结构，因此在模拟主梁时不考虑其非线性因素，选用弹性单元(Elastic Beam Column)进行模拟，材料为单轴弹性材料，并赋予其箱梁的截面特征值，每 1 m 划分一个单元，仅考虑自重及二期恒载，二期恒载取 30 KN/m ，采用集中质量进行模拟，将每个单元的质量平均分配到两侧的节点上。将主梁放于盖梁的中心，用支座将主梁与盖梁连接。

4.2. 下部结构

盖梁采用弹性单元(Elastic Beam Column)进行模拟，赋予其盖梁的截面特征值，每个盖梁划分为 4 个单元。桥墩的建模方法与单墩建模方法相同，桥墩每 1 m 划分一个单元；为保证分析结果的精准度，桥墩纤维截面约束混凝土划分数量为 10×10 ；装配式墩划分为两个节段，每节段长 5 m；预应力筋附加轴压比为 10%，墩底约束取用固结，约束每个墩底六个方向的自由度。

4.3. 支座模拟

本桥中 1#、3#、4#墩的支座为纵向滑动支座，2#墩的支座为固定支座。本文支座采用非线性单元进行模拟。滑动支座活动摩擦系数为 2%，临界位移为 2 mm。

4.4. 地震波选取

本桥所处场地为 II 类场地，选取 EI Centro (N-S)波作为输入地震波，把 EI Centro 波按 8 度设防烈度进行调幅，调幅后地震波加速度时程曲线如图 3 所示。

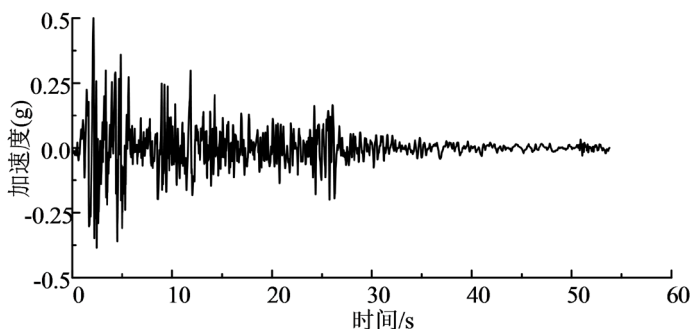


Figure 3. EI Centro wave after AM

图 3. 调幅后 EI Centro 波

5. 分析结果

对比整体现浇墩(RC)连续梁桥、套筒连接装配式墩(PCS)连续梁桥和预应力套筒连接装配式墩(PCSS)连续梁桥之间抗震性能的异同, 根据以上方法建立了三种连续梁桥有限元模型。沿单向(X向、Y向)输入地震波, 以 2-1#固定墩的墩顶位移、残余位移和滞回曲线为指标, 对比分析三种类型桥梁的抗震性能。

5.1. X 向输入结果

图 4 给出了三种类型桥梁在 X 向激励下墩顶位移时程曲线对比图, 可以看出现浇墩墩顶位移明显大于装配式墩, 其中 PCSS 墩的墩顶位移最小; 以 RC 墩的最大墩顶位移作为参考, PCS 墩最大墩顶位移减小 22.5%, PCSS 墩最大墩顶位移减小 44.1%。峰值位移的差异主要原因是灌浆套筒提高了桥梁纵向整体刚度、及预应力筋提供了一定的轴压力和自复位能力。通过对比 RC 墩和 PCS 墩在地震作用 25s 后的位移响应, 可见两者均出现了不可恢复的残余变形, 而 PCSS 墩的残余变形基本为零, 这也体现了 PCSS 墩具有良好的自复位能力, 能够保证结构在强震后能够继续使用。

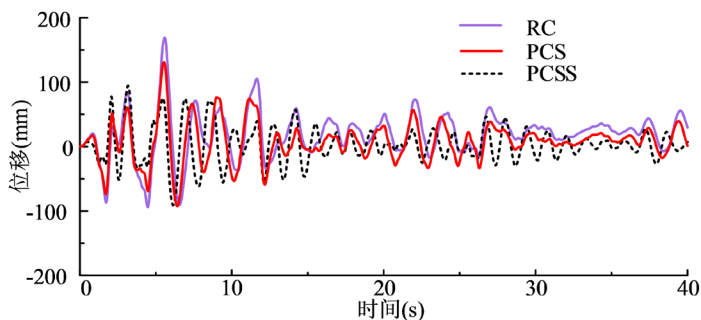


Figure 4. X-directional displacement time-history curve of pier top

图 4. 墩顶 X 向位移时程曲线

图 5 给出了三种类型桥墩在 X 向激励下的滞回曲线, 可以看出装配式墩的初始刚度大于现浇墩; RC 墩和 PCS 墩的滞回曲线比较饱满, 均表现出了较强的耗能能力, PCSS 墩耗能能力相对较弱。耗能能力的差异主要原因是 RC 墩和 PCS 墩已经进入塑性状态, 滞回环逐渐拉开表现出了良好的耗能能力; PCSS 墩处于弹塑性状态, 滞回环处于扩大初期, 从而表现出的耗能较小。三种桥墩的最大墩底剪力都处于 1500 KN 左右, 但残余位移相差较大, 其中 RC 墩和 PCS 墩残余位移都较大, PCSS 墩残余位移最小, 可忽略不计, 表明 PCSS 墩具有现浇墩所没有的自复位能力。

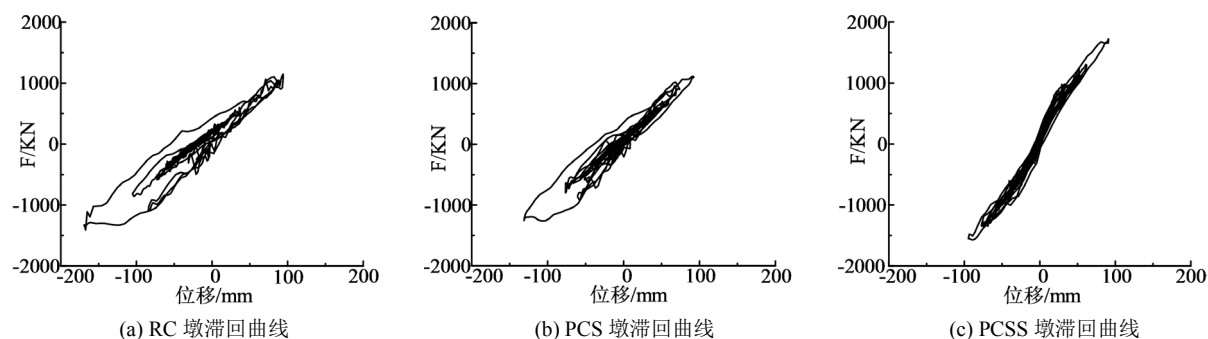


Figure 5. Hysteretic curve of pier
图 5. 桥墩滞回曲线

5.2. Y 向输入结果

图 6 给出了三种类型桥梁在 Y 向激励下墩顶位移时程曲线对比图, 可以看出现浇墩墩顶位移明显大于装配式墩, 其中 PCSS 墩的墩顶位移最小; 以 RC 墩的最大墩顶位移作为参考, PCS 墩最大墩顶位移减小 17.8%, PCSS 墩最大墩顶位移减小 40.7%。峰值位移的差异主要原因是灌浆套筒提高了桥梁横向整体刚度、预应力筋提供了一定的轴压力和自复位能力。

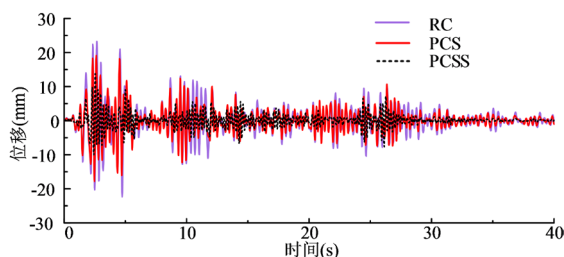


Figure 6. Y-direction displacement time history curve of pier top
图 6. 墩顶 Y 向位移时程曲线

图 7 分别给出了三种类型桥墩在 Y 向激励下的滞回曲线, 可以看出装配式墩的初始刚度大于现浇墩; RC 墩和 PCS 墩的滞回环面积相对较大, PCSS 墩耗能能力相对较弱。耗能能力的差异主要原因是 RC 墩和 PCS 墩墩处于弹塑性状态, 滞回环处于扩大初期, 从而表现出的耗能能力较小, 而 PCSS 墩处于弹性状态, 从而表现出的耗能能力较小。三种桥墩的最大墩底剪力都处于 2000 kN 左右, 但残余位移相差较大, 其中 RC 墩和 PCS 墩残余位移都较大, PCSS 墩残余位移最小, 可忽略不计, 表明 PCSS 墩具有现浇墩所没有的自复位能力。

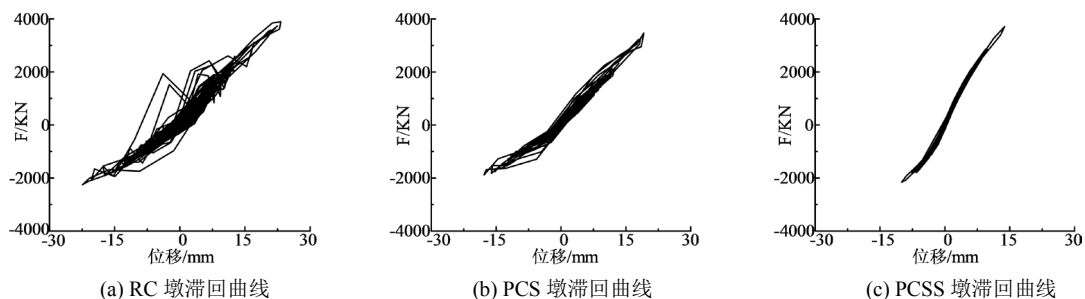


Figure 7. Hysteretic curve of pier
图 7. 桥墩滞回曲线

6. 结论

以装配式单墩数值模型为基础,分别建立了下部桥墩类型为整体现浇墩(RC)、套筒连接装配式墩(PCS)和预应力套筒连接装配式墩(PCSS)的整体装配式连续梁桥的数值模型,对比分析了三种类型桥梁的抗震性能,结果表明:

1) 本文提出基于 OpenSees 有限元软件,建立装配式桥墩方法可以应用到整体装配式桥梁体系的分析研究中。

2) 通过对比 PCS 连续梁桥和 RC 连续梁桥的地震响应可知,PCS 墩的 X 向峰值位移减小 22.5%,Y 向峰值位移减小 17.8%;由于灌浆套筒增大了整桥刚度,PCS 墩残余位移相对较小;PCS 墩耗能能力和 RC 墩相差不大。结果表明 PCS 连续梁桥整体抗震性能与 RC 连续梁桥较为接近。

3) 通过对比 PCSS 连续梁桥和 RC 连续梁桥的地震响应可知,PCSS 墩 X 向峰值位移减小 44.1%,Y 向峰值位移减小 40.7%;由于 PCSS 墩配置了预应力筋,其拥有良好的自复位能力,残余位移很小;PCSS 墩耗能能力相对 RC 墩较弱。结果表明 PCSS 连续梁桥整体抗震性能比 RC 连续梁桥好。

参考文献

- [1] 黄融, 王志强. 东海大桥抗震性能分析研究[J]. 世界桥梁, 2004(S1): 42-44.
- [2] 曾平喜, 唐衡, 冯永明. 杭州湾跨海大桥预制墩身施工技术[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会. 2005 年全国桥梁学术会议论文集: 2005 年卷. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [3] 朱治宝, 刘英. 跨海大桥大型预制墩柱的施工技术[J]. 桥梁建设, 2004(5): 50-52.
- [4] Mander, J.B. and Cheng, C.T. (1997) Seismic Resistance of Bridge Piers Based on Damage Avoidance Design. Technical Report NCEER-97-0014.
- [5] Hewes, J.T. (2002) Seismic Design and Performance of Precast Concrete Segmental Bridge Columns. University of California, San Diego.
- [6] 魏红一, 肖纬, 王志强, 等. 采用套筒连接的预制桥墩抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 44(7): 1010-1016.
- [7] 贾俊峰, 郭扬, 宋年华, 朱焰煌, 杜修力, 耿琳. 基于灌浆波纹管锚固连接的预制拼装 RC 墩柱抗震试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 211-220.
- [8] 薛兴伟, 庞兴, 周俊龙. 基于 OpenSEES 的钢筋混凝土柱拟静力分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(2): 211-216.
- [9] 王志强, 葛继平, 魏红一. 东海大桥预应力混凝土桥墩抗震性能分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 1462-1466.
- [10] 葛继平, 闫兴非, 王志强. 灌浆套筒和预应力筋连接的预制拼装桥墩的抗震性能[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 42-52.

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