

Study on Intelligent Power Consumption Strategy of Cement Plant Based on Virtual Power Plant

Yu Gong¹, Liqiang Shi¹, Yao Xu¹, Xiaoyin Chen¹, Baohua Wang², Naiyun Sang²

¹Yancheng Power Supply Branch, Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yancheng Jiangsu

²Institute of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu

Email: i_m_SunNY@163.com

Received: Apr. 4th, 2018; accepted: Apr. 19th, 2018; published: Apr. 26th, 2018

Abstract

As the automation degree of production process is increasing day by day, the coal consumption index of cement enterprises has come to decline year by year, but the electric power consumption still shows a trend of increasing with high electricity expenses. In this context, a mathematical model for the production electricity load based on adjustable equipment in cement plant is established. And the electric load modeling of temperature control equipment is taken into account when considering the environmental comfort degree of production area. On this basis, considering the user's purchasing power cost, the optimal operation model of industrial intelligent power consumption is established. Finally, taking a cement plant in Yancheng, Jiangsu as an example, the economy of the optimized operation model of industrial intelligent power management is analyzed.

Keywords

Cement Manufacturing, Virtual Power Plant, Intelligent Power Consumption

基于建立虚拟电厂的水泥厂智能用电策略研究

龚 或¹, 史利强¹, 徐 瑶¹, 陈晓萌¹, 王宝华², 桑乃云²

¹国网江苏省电力有限公司盐城供电分公司, 江苏 盐城

²南京理工大学自动化学院, 江苏 南京

Email: i_m_SunNY@163.com

收稿日期: 2018年4月4日; 录用日期: 2018年4月19日; 发布日期: 2018年4月26日

文章引用: 龚或, 史利强, 徐瑶, 陈晓萌, 王宝华, 桑乃云. 基于建立虚拟电厂的水泥厂智能用电策略研究[J]. 智能电网, 2018, 8(2): 160-167. DOI: 10.12677/sg.2018.82019

摘要

随着生产工艺以及自动化程度的不断提高,水泥企业的煤耗指标呈现逐年下降的趋势,但水泥综合电耗仍呈递增趋势,企业用电费用居高不下。在此背景下,建立基于水泥厂中可调节设备的生产用电负荷的数学模型,并且在计及生产工作区环境舒适度的情况下对温控设备用电负荷建模,以空调节约的电能建成虚拟电厂。在此基础上,综合考虑用户的购电成本建立工业智能用电的优化运行模型。最后,以江苏盐城某水泥厂为例分析了工业智能用电管理的优化运行模型的经济性。

关键词

水泥生产, 虚拟电厂, 智能用电

Copyright © 2018 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

能源消耗问题不仅是企业发展的制约因素,而且是关乎国民经济和社会发展的重大问题。全国工业总能耗居高不下,其中建材工业是耗能大户,而水泥制造业的能耗是建材工业能耗中的主要因素。可见,对于水泥企业能耗管理问题的研究刻不容缓。水泥生产的主要消耗能源是煤炭和电力,随着生产工艺以及自动化程度的不断提高,水泥企业的煤耗指标呈现逐年下降的趋势,但水泥综合电耗仍呈递增趋势,企业用电费用居高不下[1]。

本文对江苏盐城某水泥厂进行研究,建立可调节负荷用电模型,在满足企业每天产量的前提下,基于峰谷时段的电价信号进行用电负荷调度,降低用电成本;在工业生产过程中,除了可调节的生产设备,还包括空调等保证生产环境舒适的温控设备,所以对温控设备的用电行为优化也是智能用电中需要考虑的问题,在满足工作人员舒适度的情况下对空调的设置温度进行优化,实现水泥厂空调的节能,并且将节约出来的电能作为虚拟电厂的出力供水泥厂生产设备使用。通过对水泥厂用电策略的优化,实现对负荷曲线调峰填谷,减少电网电压压力,减少用电高峰时切负荷的目的。

2. 基于可调节设备的生产用电负荷建模

2.1. 水泥生产流程

新型的干法水泥制造工艺是一种以悬浮预热和窑外分解技术为核心,将先进科学技术和自动化生产应用于整个水泥生产过程的现代水泥生产方法,采用新型原料、燃料均化和节能粉磨技术及其装备,严格控制噪声污染与粉尘排放,具有高效、优质、低耗和环保的特点。

水泥设备包括水泥回转窑、旋风预热器、篦式冷却器,生产过程包括处理原料、制备生料、制备燃料、烧成熟料和粉磨水泥等几个工序[2]。

2.2. 负荷分析

企业中用电设备大致可分为可调节负荷和不可调节负荷,对于那些每天只需运行一段时间的负荷称为可调节负荷,而有些设备的运行时间固定不能改变,这种就是不可调节负荷。不可调节负荷一天耗电

量理论上不可改变，所以只能对可调节负荷进行调度优化，以得到可调节负荷用电最省的目的。

该水泥企业除去不可调节的用电负荷，剩下的可调节负荷按处理阶段的不同整理如表 1 所示。

2.3. 生产用电设备负荷模型

对可调节负荷的控制就是在不同的时间对设备给予开或关的状态来实现负荷变化，为了简化计算，认为负荷工作时功率为定值，不工作时功率为零[3]。

假设在用电管理中，设 n 为工厂用电设备数，各设备 $i = [1, 2, \dots, n]$ ，计划在一天 24 小时中对设备进行控制，令 $N = [1, 2, \dots, 24]$ 。电价一般是按小时定制的，但设备在运行时不一定在某个完整的小时里工作，也就是说设备的工作状态可能在 24 小时里可能是分散的，每次工作时间不一定相同。为充分考虑用电设备的实际使用情况，本模型将每个小时再分成几个相同时间 Δt 的部分，则一天的时段数为 $l = 24/\Delta t$ 。

引入变量 x_i^t 表示设备 i 在 t 时段里工作情况，因为设备只有开和关两个状态，所以令

$$x_i^t = \begin{cases} 1, & \text{用电设备打开} \\ 0, & \text{用电设备关闭} \end{cases}$$

设第 i 个可调节负荷的平均功率为 $P(i)$ ，($i = [1, 2, \dots, n]$)，则可中断负荷在 t 时刻的用电功率为：

$$p_t^p = \sum_{i=1}^n x_i^t P(i) \tag{1}$$

1) 等式约束

为保证工厂生产作业的正常运行，每个可调节负荷在一天中的运行时间一定和工厂必需的工作时间相等，只是运行时间段不确定，即第 i 个可调节负荷在尖、峰、平、谷的运行时间之和为定值：

$$\sum_{t=1}^{24} x_i^t \cdot \Delta t = T_i \tag{2}$$

其中： T_i 为该负荷每天所需的运行时间。

2) 不等式约束

供电公司和客户会签订一个的每个时段最大需求量的协议值 D ，这就要求在每个时间段所有负荷之和都不能大于最大需求量。在尖、峰、平、谷时段令不可调节负荷的平均功率分别为 P_J, P_M, P_0, P_m ，可调节负荷在这四个时段的平均功率分别为 $\bar{P}_J, \bar{P}_M, \bar{P}_0, \bar{P}_m$ ，则这两部分之和满足以下不等式约束：

$$\begin{cases} \bar{P}_J + P_J \leq D \\ \bar{P}_M + P_M \leq D \\ \bar{P}_0 + P_0 \leq D \\ \bar{P}_m + P_m \leq D \end{cases} \tag{3}$$

Table 1. Third kind of adjustable load statistics table

表 1. 第三类可调节负荷统计表

安装位置	设备名称
处理原料	破碎石灰石电动机；石灰石入配料库皮带输送机；石灰石预均化堆场皮带输送机
制备生料	生料磨选粉机；原料入生料磨皮带输送机；生料磨主电动机；生料入库提升机；生料磨系统风机
制备燃料	煤磨系统排风机；煤磨主电动机；煤磨选粉机
烧成熟料	窑尾废气排风机；；熟料破碎机；窑头废气排风机；生料入窑提升机；窑主传电动机；熟料拉链输送机；冷却机系统鼓风机；一次风机；窑尾高温风机
粉磨水泥	水泥磨系统风机；水泥磨主电动机；辊压机主电动机；水泥磨选粉机
安装位置	设备名称

3. 计及舒适度的温控设备用电负荷建模

3.1. 空调能量消耗模型

假设用智能表来管理每个房间的空调, 智能电表对第二天的室外温度分布有准确的估计。基于这一信息, 一个特定区域内的若干房间的智能电表可以相互通信, 并在 24 小时内优化每一天的能源使用计划[4]。假设一切通信的状态良好, 当天实时室外温度及对下一天的室外温度预测比较精确, 则可通过设置每一台空调在各个时间段的最优温度, 使空调达到节能的目标。

空调能耗与室内外温度有关, 考虑了 m 个空调每天工作 n 个小时, 假设 $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ 、 $t \in \{1, 2, \dots, n\}$, 则第 i 个空调在第 t 小时的能量消耗可写成用当前室内温度 $T_{i,t}$ 、上一个时间段温度 $T_{i,t-1}$ 以及目前的室外温度 $T_{out,t}$ 表示的函数方程[5]:

$$P_{i,t} = \frac{T_{i,t} - T_{i,t-1} - \alpha(T_{out,t} - T_{i,t-1})}{\beta_i} \quad (4)$$

其中 α, β_i 是与温度有关的参数, 分别指的是传热和热效率。

假设第 t 个小时里的 $P_{i,t}$ 是恒定的, 所以所有空调在第 t 小时里的总的能源消耗计算公式如式(5)所示。

$$P_t = \sum_{i=1}^m P_{i,t} \quad (5)$$

3.2. 热舒适指标的选取

在夏天, 如果为了节电我们一般把空调温度调高, 但一天中的某个时刻的空调设置温度较高会影响房间里人们的热舒适度。而热舒适度对人们的办公效率和生活质量有着密不可分的影响, 所以单纯的温度控制无法满足人们的热舒适度要求。本文结合设置温度的控制和热舒适的控制建立了一种考虑热舒适度的空调整能方法, 从而使用户感觉舒适的同时减少空调能源消耗。

丹麦的 Fanger 提出了一种表征人体热反应的评价指标, 即预测平均投票数(PMV)。PMV 代表了同一环境中大多数人的冷热感觉的平均, 它是由人体产热和散热的差值计算出来的, 此差值一般与房间中的用户的运动和服装有关。PMV 可以用经验公式(6)表示, 其值作为人体热感觉的主观评价标准[6]。

$$PMV = (0.32e^{-0.042M/A} + 0.032) \cdot L \quad (6)$$

其中 M ——活动量, 单位为 kcal/h; A ——人体的表面积, 单位为 m^2 ; L ——通过 Fanger 舒适方程计算出的体热负荷, 单位为 $kcal/m^2h$ 。

PMV 的取值范围是 $-3 \sim +3$, 分别对应了人体的冷感觉和热感觉, 如图 1 所示, PMV 将人体的热感觉分为 7 个层次, 当室内 PMV 值在 $[-1, +1]$ 以内时, 人体感觉较为舒适, 所以在人体舒适的范围内, 制冷时提高 PMV 的设置值和制热时降低 PMV 的设置值可以降低空调负荷和节约能源[7]。

热舒适的影响因素分为环境因素和人体因素, 其中人体因素为人体代谢率和衣服热阻, 在研究过程中一般设为恒定, 而空气温度、空气流速、相对湿度和平均辐射温度等环境因素是控制 PMV 的关键[8]。

3.3. 虚拟电厂的模型

前面对水泥厂的空调进行了节能设计, 节约下来的电能相当于建了“虚拟电厂”。建设虚拟电厂还有很多好处, 一是不需要耗煤, 在我国煤炭资源日益紧张的今天, 这项措施可以利用现有的电能创造出更大的效益。二是不需要占地, 把工厂建在虚拟的世界里, 而把效益带到真实的世界来。三是不需要考虑环境污染问题[9]。所以建设一个虚拟电厂, 在某些意义上来说好于建立一个真实的电厂。

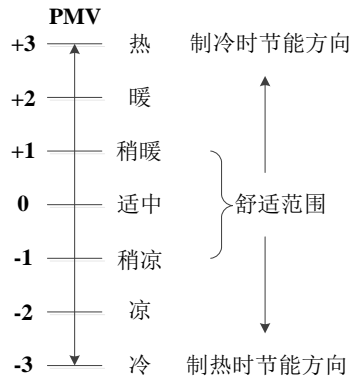


Figure 1. Comfort index PMV and energy saving
图 1. 舒适指标 PMV 与节能

这里建立的虚拟电厂以每小时为单位，出力为空调节约的电能，用来供给工业负荷，从而减少一天的用电费用。假设原本空调的设置温度是固定的，在对空调的设置温度进行优化后，根据空调能耗与温度设置值的关系，可得到 t 时刻空调的设置温度优化前后的功率值，所以虚拟电厂在 t 时刻发出的功率为：

$$p_t^b = p_t^- - p_t^+ \tag{7}$$

其中 p_t^- 和 p_t^+ 分别为 t 时刻空调的设置温度优化前后的功率值。

由于瞬时功率不能超过交流额定功率，所以有：

$$\begin{aligned} 0 \leq P_t^- \leq P_{\max} \\ 0 \leq P_t^+ \leq P_{\max} \end{aligned} \tag{8}$$

当室内 PMV 值在 $[-1,+1]$ 以内时，人体感觉较为舒适，所以舒适度要求为：

$$-1 \leq \text{PMV} \leq 1 \tag{9}$$

4. 智能用电管理的数学模型

4.1. 目标函数

在电力公司采用价格型需求响应机制下，智能用电管理可以采用一天中用电费用最小为目标对用电负荷进行优化调整，模型中除了对工业可中断负荷用电顺序进行优化外，还将水泥厂的空调节约出的电能作为虚拟电厂的出力，假设这部分电的购买价格是固定的，并可以用数学方式描述如下[10]：

$$\min V_{\text{cost}} = \sum_{t=1}^n \lambda_t p_t^a \cdot \Delta t + \sum_{t=1}^n \gamma p_t^b \cdot \Delta t \tag{10}$$

式中： λ_t 为时刻 t 的工业用电电价； γ 为虚拟电厂的固定电价； p_t^a 和 p_t^b 分别为时刻 t 的工业用电功率和虚拟电厂功率。

式(10)所描述的目标函数中考虑了优化可中断负荷的用电顺序及其工厂空调节电建立的虚拟电厂对工厂购电消费的影响。

4.2. 约束条件

1) 电功率平衡约束

$$p_t^p = p_t^a + p_t^b \tag{11}$$

式中： p_i^t 为工业用户在时刻 t 时消耗的功率。

2) 发电机组出力约束

$$P_{\min,i} \leq P_i^t U_i^t \leq P_{\max,i}, t=1, \dots, T; i \in N \quad (12)$$

式中： P_i^t 第 i 个机组在 t 时刻的出力， U_i^t 为开关变量，以 0, 1 分别表示机组开、停状态。

3) 基于可中断负荷的生产用电约束，如式(2)和式(3)。

4) 计及舒适度的温控设备用电约束，如式(8)和式(9)。

上面所建立的工业用户智能用电优化模型为混合整数线性规划问题，可以采用 MATLAB 环境下的 YALMIP 求解。YALMIP 是一位“集大成者”，它不仅自己包含基本的线性规划求解算法，比如 linprog (线性规划)、bintprog (二值线性规划)、bnb (分支界定算法)等，而且还对 cplex、GLPK、lpsolve 等求解工具包进行了更高层次的包装。

5. 算例分析

5.1. 算例数据

本文原始数据来自江苏盐城某水泥工业用户，其地方规定的峰谷时段和电价如表 2 所示。

根据表 1 中水泥厂可调节负荷的分类，将每个处理阶段的可调节负荷看做一个整体，即五个负荷 P1-P5，通过对各设备功率的分析得到这五个负荷各自的平均功率，另统计了这五个负荷平时工作的时间段，以便得到各负荷一天中运行的时间，可调节负荷运行参数明细表如表 3 所示。

由于 19:00 以后，室外环境温度变化很小，所以选择的天气数据为夏季 7 月份从 7:00 到 19:00 内的整点时的平均天气值，仿真当天的室外温度情况如图 2 所示，相对湿度为 93%，平均辐射温度较强，风速为微风，人体代谢率为 58.15 W/m^2 ，衣服热阻为 0.5 clo。空调一天内的使用时长为 12 个小时，分别对应一天中从 7:00 到 19:00 内的整点值。假设未优化前的设置温度是固定的，优化后的空调设置温度的取值范围为 $[23^\circ\text{C}, 26^\circ\text{C}]$ 中的整数值，在空调耗电模型中常量取值分别为 $\alpha = 0.9, \beta = -10$ [11]。

Table 2. Peak and valley period and electricity price in a cement plant

表 2. 某水泥厂峰谷时段和电价

	时段	时长/h	电价/元/kWh
尖峰	11:00~12:00; 19:00~21:00	3	1.4
高峰	9:00~11:00; 18:00~19:00; 21:00~23:00	5	1.3
平段	7:00~9:00; 12:00~18:00	8	0.8
低谷	23:00~7:00	8	0.3

Table 3. Adjustable load operating parameters

表 3. 可调节负荷运行参数明细表

负荷编号	功率/kW	运行时段	运行时间/h
P1	1800	7:00~21:00	14
P2	7800	6:00~22:00	16
P3	6200	9:00~17:00	8
P4	5500	5:00~23:00	18
P5	14000	8:00~22:00	14

5.2. 用电情况分析

在 MATLAB 中采用 YALMIP 建模求解，可以得出各个可调节负荷的用电时段以及优化后的空调设置温度，为了更形象的说明工业智能用电管理的优化运行模型的经济性，本文对三个情景下的用电费用进行了计算和比较，3 个情景分别如下：① 情景 1：未对工业用电进行优化；② 情景 2：优化工业可中断负荷的用电顺序，结果如表 4 所示；③ 情景 3：在情景 2 下计及空调节能而产生的虚拟电厂出力，出力如表 5 所示。各个情景下的用电费用如表 6 所示。

情况 1 和情况 2 对比发现：水泥厂在采用优化可中断负荷的用电策略后其一天的电费比之前节约 45%；

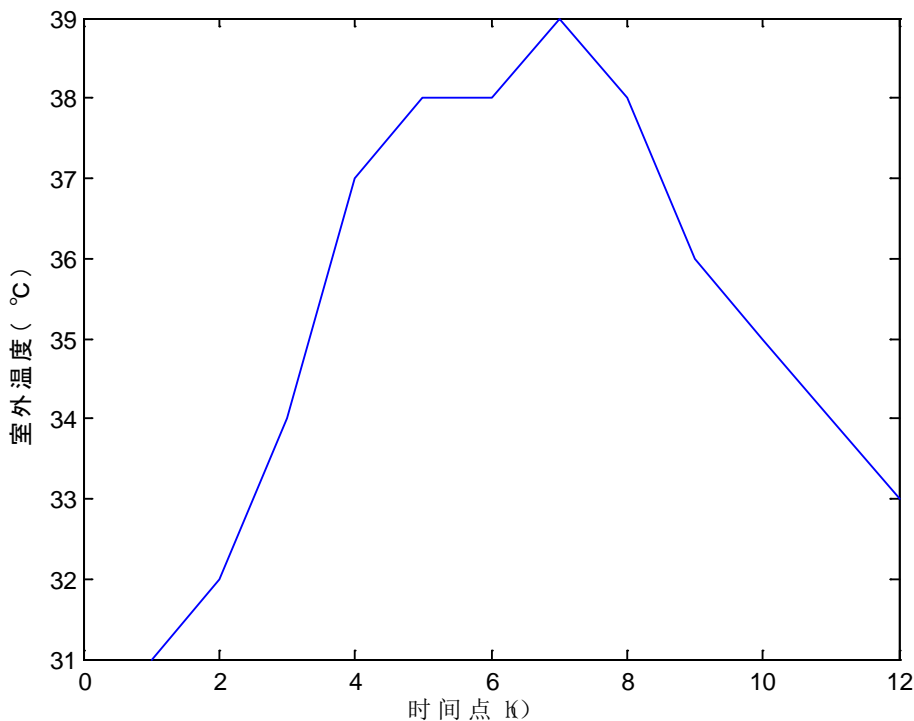


Figure 2. The temperature on the day of prediction

图 2. 预报当天的温度

Table 4. The electric order of the optimized industrial interruptible load

表 4. 优化后的工业可中断负荷的用电顺序

负荷编号 P _i	工作的时间段 t
P1	1,2,3,4,5,6,12,13,14,15,16,17,23,24
P2	1,2,3,4,5,6,7,8,12,13,14,15,16,17, 23,24
P3	1,2,3,4,5,6,7,8
P4	1,2,3,4,5,6,7,8,10,12,13,14,15,16,17,18,23,24
P5	1,2,3,5,6,7,8,12,13,14,15,16,23,24

Table 5. The output of virtual power plant produced by air conditioning energy saving

表 5. 空调节能而产生的虚拟电厂出力

时刻 t	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
出力/kW	30	27	17	18	18	18	8	9	19	18	18	18

Table 6. Electricity cost under different power consumption conditions
表 6. 不同用电情况下的用电费用

场景	可中断负荷用电费用/元	温控设备用电费用/元	总的费用/元
1	502,938	1454	504,392
2	273,180	1454	274,454
3	273,038	1218	274,256

情况 2 和情况 3 对比发现：若考虑空调整能构成的虚拟电厂对水泥厂用电的影响，用电费用也会相对减少，温控设备越多，则成本降低得更明显。

6. 结语

本文以江苏盐城某水泥厂为研究对象，建立可调节负荷用电模型，在满足企业每天产量的前提下，基于峰谷时段的电价信号进行用电负荷调度，降低用电成本，随后，基于可中断负荷建立水泥厂用电管理的数学模型，并计及生产工作区环境舒适度对温控设备用电负荷建模。在此基础上，建立了以用户总用电成本最小化为目标的智能用电优化模型。算例结果表明，在电价信号的引导下通过对可调节负荷对应的设备的在每个时间段的开断进行控制，将能将节约出来的空调电能建成“虚拟电厂”供水泥厂生产部分用电，使得企业在尖峰时段用电量较少，低谷时段用电量较多，不仅能减少用电成本，而且能起到削峰填谷的作用。

参考文献

- [1] 张宁. 水泥生产电耗预测与用电负荷优化调度技术研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- [2] 刘松辉, 汪澜, 王俊杰. 水泥厂粉磨设备用电模式研究[J]. 水泥 CEMENT, 2014(12): 31-32.
- [3] 代家强. 面向工商业负荷的智能用电量管理建模及优化研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2013.
- [4] 陈俊生. 面向智能用电的需求响应技术及家庭用户用电策略研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [5] Dang, J. and Harley, R.G. (2012) Air Conditioner Optimal Scheduling Using Best Response Techniques. Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, Johannesburg, 1-5.
<https://doi.org/10.1109/PowerAfrica.2012.6498655>
- [6] Yonezawa, K., Yamada, F., et al. (2000) Comfort Air-Conditioning Control for Building Energy-Saving. *Proceedings of the 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 3, 1737-1742.
- [7] Sato, K., Samejima, M., et al. (2012) A Scheduling Method of Air Conditioner Operation Using Workers Daily Action Plan towards Energy Saving and Comfort at Office. *Emerging Technologies & Factory Automation*, 17, 1-6.
- [8] 张清琳. 温度控制与热舒适控制空调系统舒适性及节能性比较研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [9] 陈少梁. 虚拟电厂的负荷优化调度研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [10] 于娜, 于乐征, 朱景明. 峰谷分时电价下过程工业用户的用电响应模型[J]. 东北电力大学学报, 2014, 34(4): 17-21.
- [11] 姚玉玺. 基于遗传算法的校园空调节能方法研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.

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: 2161-8763, 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: sg@hanspub.org