

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.06.018

热-渗耦合的井抽灌系统对地温场的影响

席培胜, 王 兴

(安徽建筑大学 土木工程学院 合肥 230601)

摘 要:针对水源热泵抽灌对地温场的影响,运用 Comsol Multiphysics 多物理场全耦合软件建立热-渗耦合的数值计算三维模型。对比分析不同回灌量下地温场分布云图和不同回灌量下地温场的分布规律,得出单井回灌量越大热影响半径越大、同时热峰面向抽水井方向运移速度越快,达到热贯通时间越短;前期系统运行回灌井附近区域温度变化明显,后期系统运行对回灌井周边较远区域温度变化较影响明显;不同位置热运移规律均与渗流速度相关,影响半径基本与渗流速度呈正比。

关键词:井抽灌系统;地温场;热量运移;热-渗耦合

中图分类号:X124

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)06-119-06

Analysis of temperature field around groundwater heat source wells under coupled thermal conduction and groundwater advection conductions

Xi Peisheng, WANG Xing

(Department of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: For studying the effect of the groundwater heat source wells working on the temperature field, the Comsol Multiphysics is used to build a three dimensional numerical model which couples thermal conduction and groundwater advection conductions. Some conclusions have been concluded by contrasting five different conditions that under different quantities of heat exchanged water put into the recharge well and a detail analysis of one. With the quantity of recharged heat exchanged water becoming larger, the influence radius expands and the heat surface between the two wells transfers more quickly to the pumping well. Temperature of the region close to the recharge areal increases obviously in early stage, while temperature of the region not so close to the recharge area is more influenced in later stage. The temperature is closely relate to the seepage velocity and has nothing to do with position. Influence radius is almost proportional to seepage velocity.

Key words: groundwater heat source wells; temperature field; heat transfer; thermal-advection coupled

随着我国经济快速发展,能源危机日趋严重,化石能源日趋枯竭,同时也产生了较为严重的环境污染。地热资源作为一种绿色、无污染、可再生能源,在各国政策的鼓励下开发利用逐渐升温。

地下水源热泵井抽灌系统是目前应用较广的一种地热资源开采形式。研究主要集中在地下水源热泵相关工程设计和施工技术问题^[1-6];水源热泵抽、灌水引起固相颗粒运动的力学特性^[7];孔隙度、渗透率对地温

收稿日期:2014-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372281;41172273)

作者简介:席培胜(1968-),男,安徽建筑大学副教授,主要从事地下结构、地基处理、环境岩土工程研究,

(E-mail)xipeisheng@163.com。

场演化的影响^[8-10];热-流-固耦合渗流数学模型^[11-14]等方面。对由于抽灌地下水导致的水头差引起强对流热交换,系统运行中热能运移以及地温场的演化规律等方面研究较少,导致系统运行中后期效率降低,甚至无法正常运行的情况时有发生。

笔者运用数值模拟建立基于热-渗耦合的对井抽灌整体三维模型,研究回灌井周边的温度场分布及非自然渗流对温度场影响规律。

1 对井抽灌系统

对井抽灌系统是一种理想的循环换热模型,运行系统如图 1 所示。1 个运行周期分为冬季供热和夏季供冷 2 个时期。冬季从抽水井抽取温度较高的水,放热后再将较低温度的水由回灌井回灌到地层中;夏季将抽水井与回灌井互换,将温度较低的水抽出进行吸热,然后再将温度较高的水通过回灌井回灌到地层中。以下主要研究供冷周期运行 100 d 的地温场变化规律。

同一含水层中抽取冷水、回灌热水必然导致回灌井周边温度场变化,温度较高的水必然向抽水井方向渗流。若两井距离设置不合理,热水峰面就会迁移到达抽水井,从而导致抽、灌井之间热量贯通,导致系统的失效,此现象即为热贯通^[10]现象。

2 模型建立

ComsolMultiphysics 是一款仿真数值分析软件,利用 Darcy 渗流和多孔介质热传导模块实现地下水渗流与热传导耦合。多孔介质热传导理论以 H. Darcy 确立 Darcy 渗流理论为起点。1858 年 H. Darcy 为了解决法国第戎城给水问题,进行了均质直立砂柱渗流实验,得出流体通过砂柱横截面流量与横截面积以及水头差成正比,与沙柱高度成反比的结论。其后经历 100 多年研究,逐步确立多孔介质热传导理论。多孔介质是由多相物质共同占据的一种空间组合体,以固相为骨架,由液体、气体或气液相占有孔隙,相对于其中一相,其他相都弥散在其中,至少部分空隙相互连通。其传热过程主要包括:固体骨架与固体颗粒之间导热过程;液相、气相的导热和对流换热过程;液、气相与固体颗粒对流换热过程;固体颗粒之间、固体颗粒与气相之间的辐射过程^[15-17]。

根据试算与实际工程经验计算模型长、宽、高分别为 160、80、40 m;抽、灌井井径均为 1.2 m;为了便于分析,建模时在 $z=20$ m 平面设置 31 个温度探针,探针位置分布见图 2 所示(平面坐标同图 1, $z=20$ 时 xy 平面坐标);网格划分如图 3 所示;计算参数:含水层孔隙率 0.2;渗透率 $1.2e-8$ m²;水密度 1 000 kg/m³;水黏度取 0.001 Pa·s;水的导热系数取 0.6 W/(m·°C);水比热容取 4 200 J/(kg·°C);固体密度 2 600 kg/m³;固体导热系数 1.8 W/(m·°C);固体比热容取 2 000 J/(kg·°C);固体比热率取 1.0。

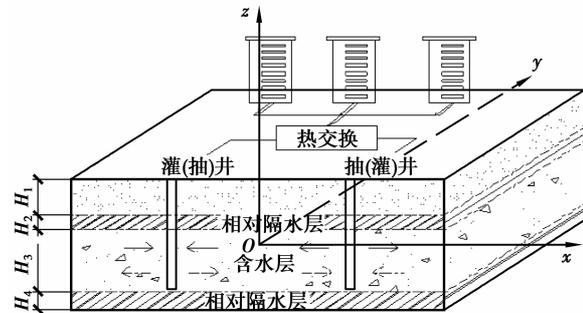


图 1 典型对井抽灌系统示意图

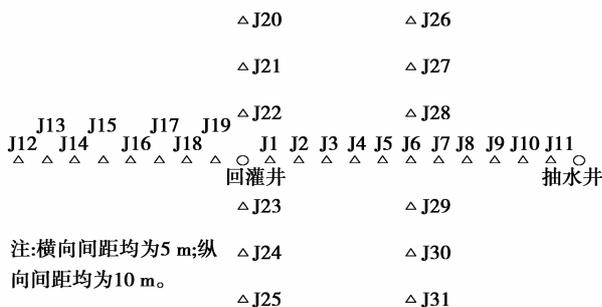


图 2 温度探针布置图

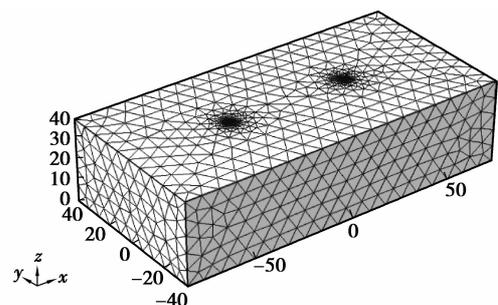


图 3 模型网格划分图

计算模型初始及边界条件设置:在 Darcy 渗流模块忽略地下水自然对流的影响,偏保守考虑认为模型边界与外界没有水流交换;在多孔介质传热模块设定整体初始温度为 293 K,回灌水温度设置为 313 K;同样设定模型边界与外界没有热交换。按表 1 分别计算 5 种不同回灌量下系统运行 100 d 的温度场分布。

表 1 不同水头差对应的渗流速度

抽灌井水头差 $\Delta h/m$	相对压力 $\Delta P/Pa$	水力梯度 I	平均渗流速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	回灌量 $Q/(m^3 \cdot d^{-1})$
1	100	0.017	2.00E-06	553
2	200	0.033	4.00E-06	1 106
3	300	0.050	6.00E-06	1 659
4	400	0.067	8.00E-06	2 212
5	500	0.083	1.00E-05	2 765

3 计算结果分析

初始状态及 5 种不同回灌量下系统运行 100 d 地温场分布云图如图 4 所示。

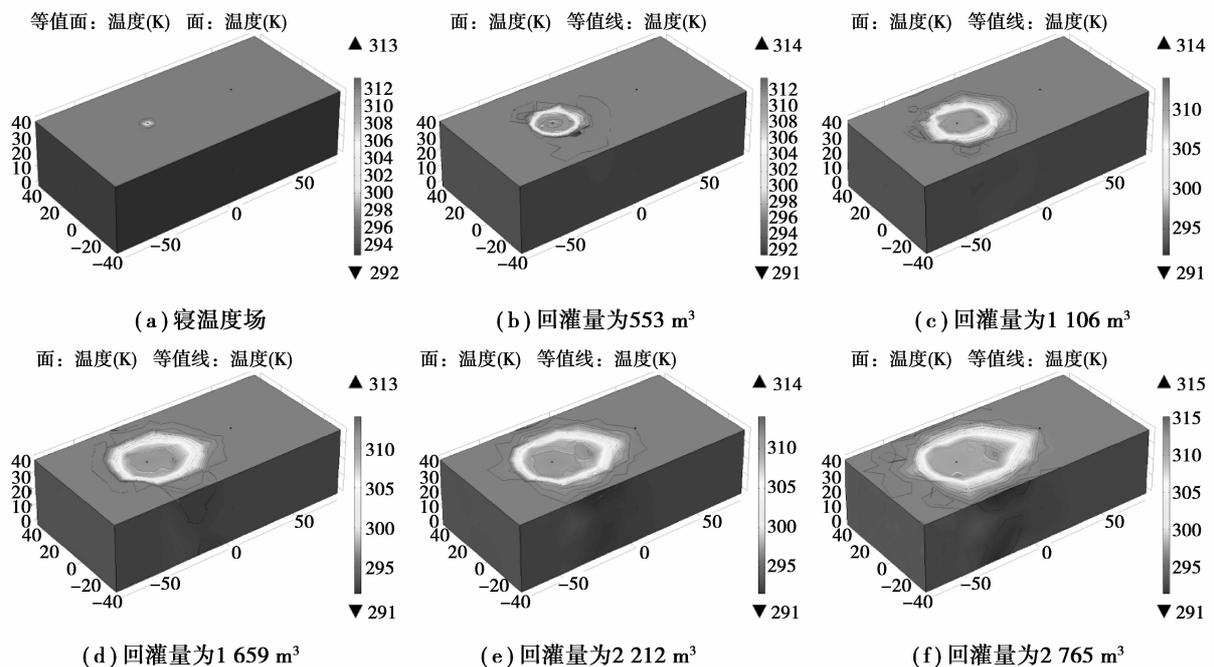


图 4 系统运行 100 d 温度场分布云图

1) 不同回灌量回灌井周边温度场分布均呈环状,变化趋势为温度从回灌井向外逐渐降低。

2) 对温度变化梯度分析可知,在距离回灌井一定距离范围内温度降低很小,当超出这一范围后温度急剧下降,直降至初始温度,这是由于土和水的导热系数较小,单纯热传递只能传递较小部分热量,只有温度较高的回灌水渗流到达后温度才会明显升高,可得出渗流是影响回灌井热影响半径的主要因素。

3) 从运行 100 d 温度云图可以看出,随着回灌量的不断增加,热影响范围不断扩大。当回灌量达到 2 212 m³/d 时,热影响范围扩散至抽水井,即从回灌的热水渗流到抽水井,又被抽出从而达到了热贯通。这对系统运行是非常不利的,2 212 m³/d 即是此单井回灌量的极限。

4) 由于抽水与回灌导致抽、灌井连线方向水头差较其他方向上大, 而渗透路径也较短导致水力梯度较大, 并最终以地下水渗流速度表现。渗流速度是影响热影响范围的主要因素, 从而导致热传导环偏离圆形向抽水井方向凸起。

图 5 为回灌量为 $2\ 212\text{m}^3/\text{d}$ 时, 各探针监测点温度随时间变化曲线。图 5(a) 显示, 距回灌井较近点的温度很快升高至回灌水温度, 但距离较远点在短期内温度没有明显变化; 随着距离增加, 探针监测的温度同样随着时间增长而逐渐升高, 但升高速度逐渐降低, 温度变化曲线由上凸变为下凹; 曲线斜率整体由先大后小变为先小后大, 表明前期系统运行回灌对周边温度影响明显, 后期运行对较远的范围温度影响明显。对比探针监测点 1-11、12-22、26-28 发现不同方向温度变化均符合上述规律。在进行系统设计时, 应权衡系统运行时间与系统运行对周边温度场的影响。

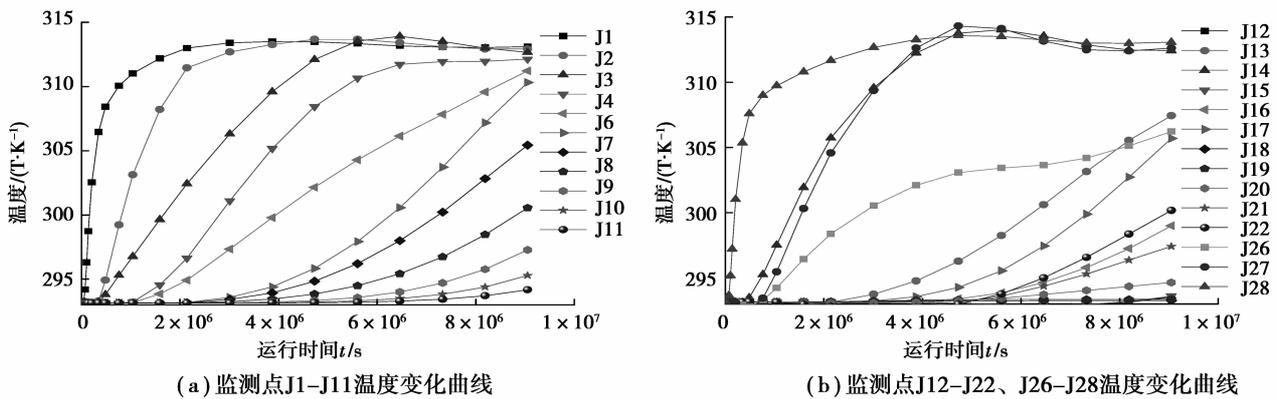


图 5 监测点温度随时间变化曲线

为研究同一水平面内热量变化及迁移规律, 取 $z=20\text{ m}$ 的 xy 平面进行分析, 如图 6 所示; 图 7 列出 $z=20\text{ m}$ 水平面上 $x=0$ 、 $x=-30$ 、 $y=0$, 以及距抽灌井不同位置上温度变化曲线。

图 6 可以直观反映:

1) 回灌井周边温度场分布, 等温线疏密和温度梯度的走向。

2) $x=0$ 处温度变化曲线呈中心对称, 中间温度较高, 向两端迅速减小。随着时间推移温度曲线不断升高; 升高值同样中间大, 向两端逐渐减小。当 y 坐标值超过 15(-15) 后温度不再变化。

3) 在 $x=-30$ 位置, 即穿过回灌井 y 方向, 温度曲线呈轴对称是因为模型及边界条件轴对称。在不同工况下, 回灌井周围小范围内温度均达到回灌水温度, 随着时间推移达到最高温度范围不断向外扩展, 但后期扩展速度相对于前期有所减缓。100 d 此方向上热影响半径约为 26 m。

4) $y=0$ 位置即穿过回灌井 x 方向, 温度曲线不对称是由于地下水渗流不均匀引起的。沿 x 轴正方向地下水渗流速度大于负方向, 热量的运移主要受渗流影响, 因此在正方向热影响范围远大于负方向。

图 7(d) 是不同时间, 抽、灌井之间温度分布曲线。随时间推移热影响范围逐渐增大, 但变化速率逐渐放缓, 主要原因是在距离回灌井较远处地下水渗流速度大大减小, 从而导致热传导对温度场影响不再被渗流所掩盖, 并逐渐呈现。

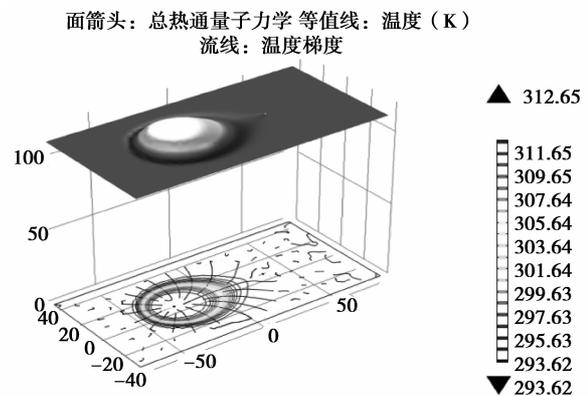


图 6 $z=20\text{ m}$ 的 xy 平面温度分布

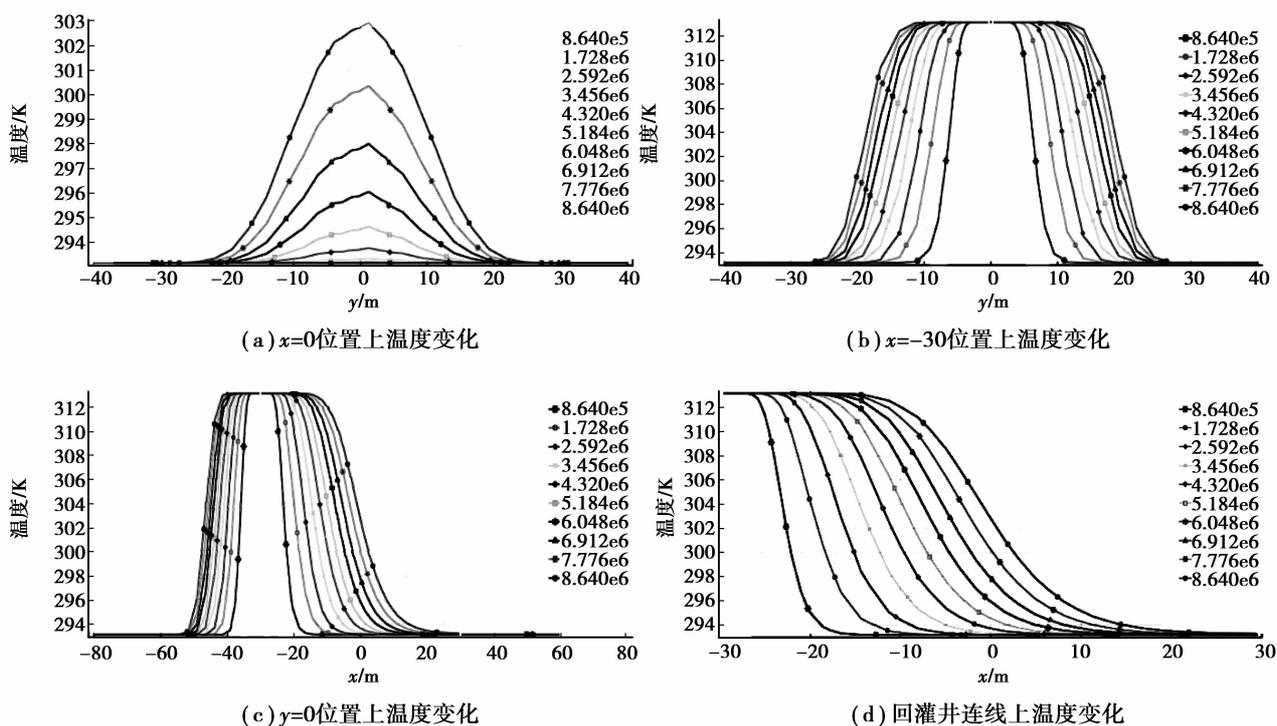


图7 不同运行时间不同位置温度变化曲线

4 结论

应用 Comsol Multiphysics 数值分析软件中 Darcy 渗流、多孔介质热传导模块耦合模拟分析了水源热泵中抽、灌对井系统对地温场的影响,分析得出以下结论:

1) 回灌量越大,热影响半径越大,影响范围越呈现向抽水井方向凸起;同一回灌量下,随系统运行时间的增长,热影响范围逐渐向外扩展,后期系统运行扩展速度较前期有所减缓。

2) 距回灌井较近区域内探针温度在较短时间内即升高至回灌水的温度,温度变化速率先大后小;距回灌井较远区域内探针温度变化规律正好相反;存在一个环状曲面,其温度随时间呈线性变化。

3) 地温变化规律均与地下水渗流相关。渗流速度越大,热运移速度越快,影响范围越大。

参考文献:

- [1] 王旭升. 地下水源热泵的特点和地下工程问题[C]. 地温资源与地源热泵技术应用论文集(第二集). 北京:地质出版社, 2008:163-168.
- [2] 张德祯,闫银花,王宏,等. 水源热泵热源井群布局及供水-回灌系统可行性分析[C]. 地温资源与地源热泵技术应用论文集(第二集). 北京:地质出版社,2008:206-213.
- [3] 童明伟,秦增虎,张二峰. 有限容积的湖水源热泵冬季供暖运行分析[J]. 重庆大学学报,2012,35(8):6-10.
TONG Mingwei, QIN Zenghu, ZHANG Erfeng. Operating analysis on finite volume of lake water source heat pump in winter heating[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(8): 6-10.
- [4] 王勇,韩传璞,李文,等. 开式地表水源热泵系统取水能耗限值确定方法[J]. 重庆大学学报,2011,34(3):110-115.
WANG Yong, HUAN Chuanpu, LI Wen, et al. The determination method of limit energy consumption of water supply in open-loop surface water source heatpump systems[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(3): 110-115.
- [5] Wang Z H, Chen G H. Heat and mass transfer during low intensity convection drying[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(17): 3899-3908.
- [6] Shi L, Xie Q Y, Chen X D, et al. Developing a database for emergency evacuation model[J]. Building and Environment, 2009, 44(8): 1724-1729.
- [7] 王松庆,张旭,高军. 地下水源热泵取水引起颗粒运动的理论分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(2):273-277.
WANG Songqing, ZHANG Xu, GAO Jun. Theoretical analysis on mobilization of aquifer particles induced by groundwater

- source heat pump pumping[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2010, 38(2): 273-277.
- [8] 孟宪军, 林豹, 王巍. 渗透率和孔隙度对地下水源热泵地温场演化的影响[J]. 制冷, 2010, 29(4): 66-69.
MENG Xianjun, LIN Bao, WANG Wei. The influence of permeability and porosity for the groundwater temperature field's change of the groundwater source heat pump system[J]. Refrigeration, 2010, 29(4): 66-69.
- [9] Sutton M C, Rick T, Nutter D W, et al. An algorithm for approximating the performance of vertical bore heat exchangers installed in a stratified geological regime[J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108(2): 177-184.
- [10] 胡继华. 地下水源热泵水力学机理及其对地下温度场影响研究[D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2009.
- [11] Liu W. A general mathematical modeling for heat and mass transfer in unsaturated porous media; all application to free evaporative cooling[J]. Heat and Mass Transfer, 1995, 31(1): 49-55.
- [12] 孔祥言, 李道伦, 徐献芝, 等. 热-流-固耦合渗流的数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(2): 269-275.
KONG Xiangyan, LI Daolun, XU Xianzhi, et al. Study on the mathematical models of coupled thermal-hydrological (THM) processes[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(2): 269-275.
- [13] 盛金昌. 多孔介质流-固-热三场全耦合数学模型及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(Sup1): 3028-3033.
- [14] SHENG Jinchang. Fully coupled thermo-hydro-mechanical model of saturated porous media and numerical modelling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup1): 3028-3033.
- [15] Matsumoto M, Hokoib S, Hatanob M. Model for simulation of freezing and thawing processes in building materials[J]. Building and Environment, 2001, 36(6): 733-742.
- [16] Ramamoorthy M, Hui J, Chiasson A D, et al. Optimal sizing of hybrid ground-source heat pump systems that use a cooling pond as supplemental heat rejecter—a system simulation approach[J]. ASHRAE Transactions, 2001, 107(1): 606-616.
- [17] Chiasson A D, Spitler J D, Rees S J, et al. A model for simulating the performance of a shallow pond as a supplemental heat rejecter with close-loop ground-source heat pump systems[J]. ASHRAE Transactions, 2006, 122(2): 107-212.
- [18] Wissink J G. DNS of separating low Reynolds number flow in a turbine cascade with incoming wakes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 626-636.

(编辑 陈移峰)

《重庆大学学报》“风电装备”专刊征稿启事

尊敬的专家、学者:

为进一步提升期刊的学术质量和学术影响力,促进期刊专题化及特色化发展,集中展示“风电装备”领域最新研究成果,聚焦发展前沿,促进学术交流,推动风电装备产业持续快速发展,学报拟于 2014 年 12 月集中刊发“风电装备”专题论文,欢迎赐稿。

※ 选题方向

1) 风电装备产业分析; 2) 风电装备现状及发展趋势; 3) 风电整机设计分析; 4) 风机叶片设计分析; 5) 风电传动链设计分析; 6) 风电增速齿轮箱设计分析; 7) 风电装备控制技术; 8) 风电装备试验技术; 9) 风电装备诊断技术; 10) 风电装备可靠性技术; 11) 风电装备制造关键技术。

※ 投稿方式

征稿截止日期: 2014 年 9 月 30 日

编辑部投稿网址: <http://qks.cqu.edu.cn/cqdxzrcn/ch/index.aspx>

联系电话: 023-65112126; 65111217; 65102302

※ 注意事项

1) 学报稿件要求具体可参考以下网址 http://qks.cqu.edu.cn/cqdxzrcn/ch/reader/view_news.aspx?id=20090323151419001&journal_id=cqdxzrcn

2) 稿件需通过编辑部官方网站注册投稿,投稿时的拟投栏目请选择“风电装备专题”。

《重庆大学学报》编辑部

2014 年 6 月 15 日