

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.026

大气参数对燃气轮机进气冷却效果的影响*

李 云, 陈坚红, 盛德仁*, 李 蔚
(浙江大学 能源工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对燃气轮机进气冷却的效果在不同大气参数下变化很大的问题,对燃气轮机进气冷却装置的热力过程、影响因素、经济效果等方面进行了研究。基于某电厂燃气轮机和燃气-蒸汽联合循环机组的运行数据,利用热平衡仿真软件 GateCycle 对两种发电机组系统进行模块化建模,并增加进气冷却装置,定量分析了两种发电机组进气被冷却后输出功率的增加量(即进气冷却效果)在不同大气参数(温度、相对湿度和压力)下的变化情况。研究表明,大气参数的变化,会对燃气轮机进气冷却的效果产生很大影响,两者之间呈现出一定的数值关系。

关键词: 大气参数; 燃气轮机; 进气冷却技术; 效果

中图分类号: TP24; TK2 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2015)04-0566-05

Effects of atmospheric parameters on gas turbine inlet air cooling

LI Yun, CHEN Jian-hong, SHENG De-ren, LI Wei

(College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at analyzing the effects of atmospheric parameters on gas turbine inlet air cooling technology (GTIAC), the thermodynamic process, influencing factors and economic effects of GTIAC were studied. Based on the operating parameters of turbine and gas-steam combined cycle unit in a certain power plant, the system models of two kinds of power units were built in modular modeling method by GateCycle software, a thermal equilibrium simulation software, and GTIAC equipment was installed. The output power increase of these two kinds of power units after cooling inlet air (inlet air cooling effects) under different atmospheric parameters (temperature, humidity and pressure) was analyzed quantitatively. The results indicate that the change of atmospheric parameters has a great effect on the gas turbine inlet air cooling effects, showing a certain numerical relationship between them.

Key words: atmospheric parameters; gas turbine; gas turbine inlet air cooling technology (GTIAC); effects

0 引 言

在夏季高温时段,空调等制冷设备的使用造成用电量急剧增加,发电机组需要顶峰运行。然而,主要用于调峰作用的燃气轮机机组效率却随进气温度的升高而降低^[1]。例如,GE6FA 燃气轮机的进气温度每升高 1 °C,机组出力约下降 1%,热耗率约升高

0.5%~1%。

为了解决燃机输出功率随温度升高而下降的问题,美国在 1987 年首次提出燃气轮机进气冷却技术 (gas turbine inlet air cooling technology, GTIAC)。结果表明,降低燃气轮机进口大气温度,可以大幅提高机组出力。于是进气冷却技术很快被美国各电力公司广泛使用,燃气轮机制造厂商 GE 公司也开始为 6FA 型和 9H 型燃气轮机配备进气冷却系统^[2]。另外,在沙

收稿日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375350)

作者简介: 李 云(1990-),男,宁夏固原人,主要从事电厂性能优化方面的研究. E-mail:YunL-e@hotmail.com

通信联系人: 盛德仁,男,教授,硕士生导师. E-mail:ShengDR@zju.edu.cn

特阿拉伯^[3]、伊朗^[4]和印度^[5]等西亚国家,由于石油资源丰富,燃气轮机和联合循环机组占全国发电机组的比例很高,目前关于进气冷却技术的研究成果丰硕,应用比较成熟。我国首台自行设计生产的燃气轮机进气冷却装置于1997年在深圳金岗电厂投入运行,该装置使燃气轮机在大气温度31℃、相对湿度75%的情况下,进气温度降低14℃,则燃机出力增加3.94 MW。此外,我国广州明珠电力公司、新疆塔里木油田轮南燃气轮机电站、江苏无锡华达电厂以及金华燃机电厂^[6]都引入了进气冷却装置,提高了燃机或燃气-蒸汽联合循环的运行效率和输出功率。

我国地域广阔,气候多样,从东南沿海到西北戈壁,湿度、温度和压力等大气参数变化很大。因为冷却过程为热力学过程,空气的热力参数(尤其温度和相对湿度)会直接影响进气冷却技术的效果,进而影响发电机组的发电量和经济性^[7-8]。

本研究利用某电厂燃气轮机和燃气-蒸汽联合循环机组参数,应用GateCycle软件建立机组模型,并增加了进气冷却模块。定量分析在不同大气条件下,安装进气冷却装置后机组输出功率的变化情况,得出大气参数对进气冷却效果的影响。

1 进气冷却分析

空气被进气冷却装置冷却的热力学过程是一个冷却除湿的过程。

冷却过程的原理图如图1所示。

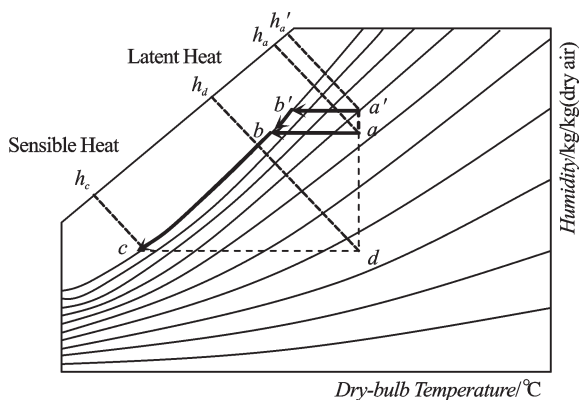


图1 冷却过程的原理图

冷却过程 $a \sim b$ 温度降低但含湿量不变,到达露点温度 T_b 空气中水蒸气饱和。继续冷却(过程 $b \sim c$),逐渐有蒸汽凝结成水滴析出,此过程空气保持饱和状态,但含湿量逐渐减小,最后达到指定温度 T_c 。含有1 kg干空气的湿空气,冷却后热量的减少量为^[9]:

$$q = (h_a - h_c) - (d_a - d_c)h_w \quad (1)$$

式中: h —湿空气的比焓, kJ/kg(干空气); d —含湿量,

kg(水蒸气)/kg(干空气); h_w —凝结水的比焓, kJ/kg。

因为冷却过程温度的变化不大(不超过100℃),所以湿空气和凝结水的比焓可以用温度表示为:

$$h = 1.005t + d(2501 + 1.86t) \quad (2)$$

$$h_w = 4.187t_c \quad (3)$$

式中: t 的单位为℃。

燃气轮机进气冷却装置的制冷系数为 ε , 则冷却装置的耗功为:

$$w_{\text{net}} = \varepsilon \cdot q \quad (4)$$

式中: w_{net} 的单位为kJ/kg(干空气)。

联立式(1~4)可得:

$$w_{\text{net}} = \varepsilon \cdot \left[\frac{1.005(t_a - t_c) + 1.86(t_a d_a - t_c d_c)}{2501 - 4.187t_c} (d_a - d_c) \right] \quad (5)$$

冷却终温 t_c 为系统设计参数,则由式(5)可得,燃气轮机进气冷却装置的耗功 w_{net} 与大气参数 t_a , d_a 成正比关系。其他参数不变时, t_a 越大, w_{net} 越大;其他参数不变时, d_a 越大, w_{net} 越大。

虽然式(5)表明单位湿空气的耗功与大气压力 p 无关,但燃气轮机的进气质量流量 Q_{air} 与大气压力成正比关系^[10]。总耗功 $W_{\text{net}} = Q_{\text{air}} \times w_{\text{net}}$, 则冷却装置的总耗功 W_{net} 与大气压力成正比。

由此可见,大气温度、湿度和压力都与燃气轮机进气冷却装置的耗功有关,所以大气参数会对进气冷却的效果产生巨大影响。

2 系统模型的建立

2.1 燃气轮机模型

为了分析燃气轮机进气被冷却后输出功率和热耗率的变化情况,本研究基于某电厂安装的PG9351FA型燃气轮机参数,利用GateCycle软件进行建模,并增加进气冷却模型。装有进气冷却装置的燃气轮机如图2所示。燃气轮机模型主要参数如下:

大气参数: 101.3 kPa, 15℃, 60%RH

天然气最低热值(LHV): 48 686.3 kJ/kg

空气质量流量: 623.7 kg/s

压气机压比: 15.4:1

燃烧室型号: DLN-2.0+

透平进气温度: 1 327℃

透平级数: 3

转速: 3 000 r/min

输出功率: 255.54 MW

热耗率: 9 786 kJ/kW·h

热效率: 36.9%

GateCycle软件建立的燃气轮机模型输出功率、热

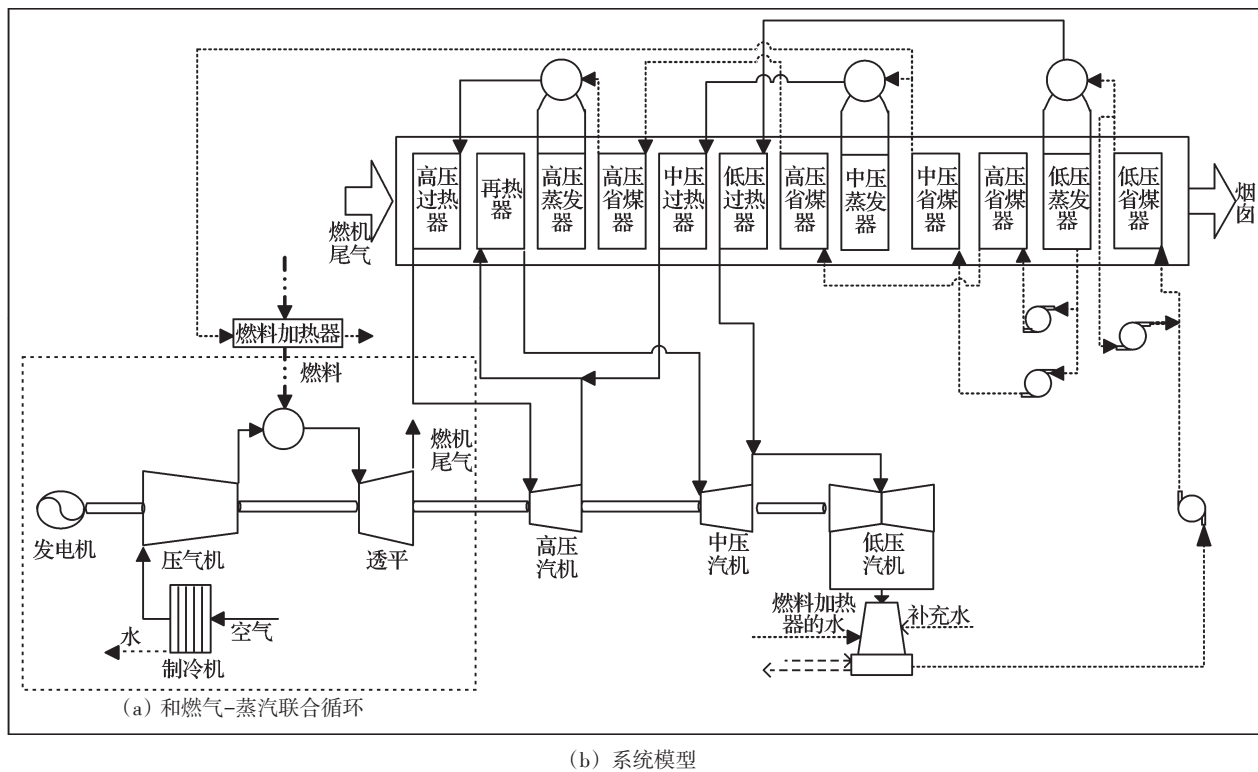


图2 装有进气冷却装置的燃气轮机

耗率和效率与实际机组参数相差小于0.3%，所以模型有效。增加进气冷却模块，其参数为：

出口温度：15 ℃

压力损失：0.5 kPa

制冷系数COP：4.8

建立的装有进气冷却装置的燃气轮机机组模型如图2(a)所示。

2.2 燃气-蒸汽联合循环模型

基于某电厂安装的109FA单轴的燃气-蒸汽联合循环机组参数，利用GateCycle软件建立模型，并增加进气冷却模块。机组模型主要参数如下：

燃气轮机型号：PG9351FA

汽轮机型号：D10

余热锅炉：三压、再热、无补燃、自然循环型

大气参数：101.1 kPa, 17.4 ℃, 78.89% RH

天然气最低热值(LHV)：48 686.3 kJ/kg

高压蒸汽出口温度：566.6 ℃

再热蒸汽出口温度：566.2 ℃

烟囱排气温度：85.9 ℃

输出功率：388.25 MW

热耗率：6 480.9 kJ/kW·h

热效率：56.2%

用GateCycle软件建立的联合循环模型输出功率、热耗率和效率与实际机组参数相差小于0.3%，所以模型有效。增加的进气冷却模块与2.1节中的参数一

致。本研究建立的装有进气冷却装置的燃气-蒸汽联合循环机组模型如图2(b)所示。

3 大气参数对进气冷却效果的影响

根据进气冷却过程分析结果可知，大气参数与进气冷却装置的耗功密切相关。同时，大气参数也会影响燃气轮机和燃气-蒸汽联合循环机组的性能参数。而进气冷却装置可以改变两种机组的性能参数。那么，在不同大气参数下，进气冷却装置对机组性能参数的改变量是如何变化的呢，这是本研究的研究重点。

3.1 大气温度对进气冷却效果的影响

本研究保持大气相对湿度和压力为设计参数，改变进气温度，通过GateCycle模型，研究大气温度对进气冷却效果的影响。

大气温度对进气冷却效果的影响如图3所示。大气压力101.3 kPa、相对湿度60%时，进气冷却对机组输出功率和热耗率的改变量随大气温度的变化情况，从图3中可以看出：

(1) 在大气压力和湿度不变的情况下，随着温度的升高，燃气轮机和燃气-蒸汽联合循环输出功率的增加量逐渐变大，即进气冷却的效果变大。

(2) 燃气轮机热耗率的变化量在23 ℃左右最大，高于或低于23 ℃，热耗率的变化量逐渐减小。因为当

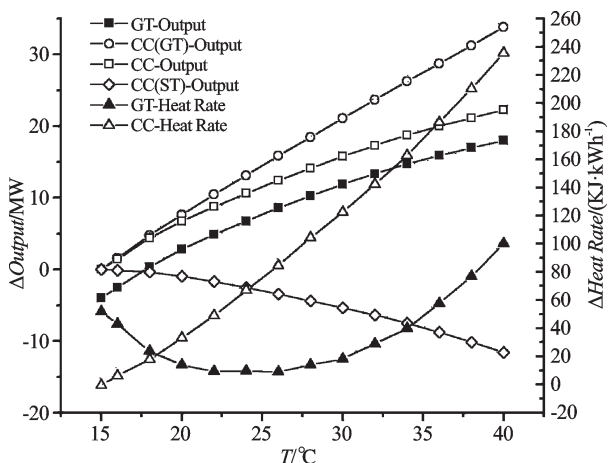


图3 大气温度对进气冷却效果的影响

温度低于 23 ℃, 机组的热耗率逐渐增大; 当温度高于 23 ℃, 进气冷却装置的热耗率逐渐增大;

(3) 燃气-蒸汽联合循环的热耗率随温度的升高逐渐增大, 表明进气冷却装置的热耗率对联合循环的影响很大。

3.2 相对湿度对进气冷却效果的影响

因为含湿量不能直接反应空气中水蒸气是否饱和, 本研究采用相对湿度来表示湿度的大小。本研究在同一大气温度和压力下, 改变大气相对湿度, 通过 GateCycle 模型, 研究相对湿度对进气冷却效果的影响。

相对湿度对进气冷却效果的影响如图 4 所示。大气温度 25 ℃、30 ℃、35 ℃、40 ℃, 压力 101.3 kPa 时, 进气冷却对机组输出功率的改变量随大气相对湿度的变化情况, 从图 4 中可以看出:

(1) 在大气温度和压力不变的情况下, 随着相对湿度的增大, 燃气轮机和燃气-蒸汽联合循环输出功率的增加量逐渐减小, 即冷却效果减小。

(2) 温度越高, 冷却效果受相对湿度的影响越大。

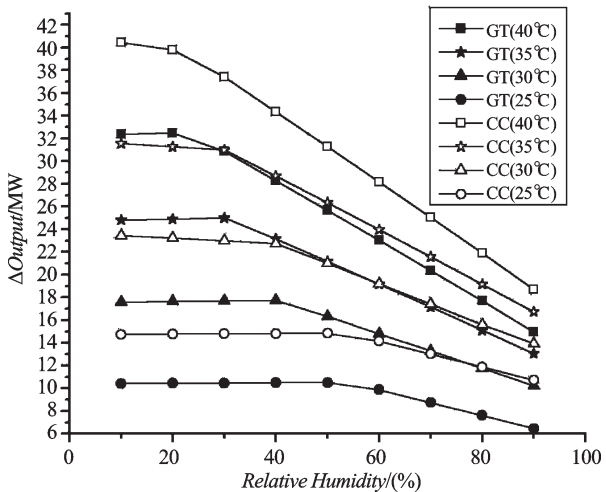


图4 相对湿度对进气冷却效果的影响

3.3 大气压力对进气冷却的影响

机组所在地海拔高度的变迁, 会引起大气压力较大幅度的变化。两者之间关系大约为:

$$p = p_0 \left(1 - \frac{Altitude}{44\ 330} \right)^{5.255} \quad (6)$$

式中: p_0 —标准大气压, 101.325 kPa; $Altitude$ —海拔高度, m。

大气压力会影响进气流量, 所以会间接影响进气冷却的耗功和发电机组特性参数。在同一大气温度和相对湿度下, 改变大气压力, 利用 GateCycle 模型, 研究大气压力对进气冷却效果的影响。

大气压力对进气冷却效果的影响如图 5 所示。大气温度 35 ℃、相对湿度 60% 时, 燃气轮机和燃气-蒸汽联合循环机组输出功率的增加量随大气压力的变化情况, 从图 5 中可以看出:

在大气温度和相对湿度不变的情况下, 随着海拔高度的增加, 大气压力降低, 燃气轮机和燃气-蒸汽联合循环输出功率的增加量逐渐减小, 即冷却效果减小。

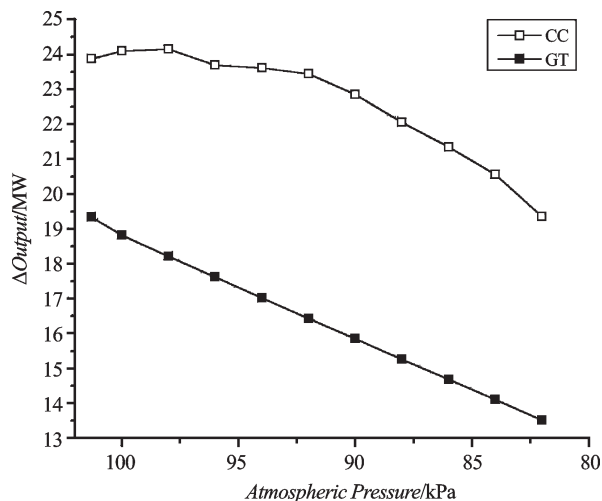


图5 大气压力对进气冷却效果的影响

4 结束语

本研究基于某电厂燃气轮机和燃气-蒸汽联合循环机组参数, 应用 GateCycle 软件建立机组模型, 并增加进气冷却装置。定量分析了机组在不同大气参数下, 安装进气冷却装置后输出功率的变化情况, 得出了大气参数与进气冷却效果之间的数值关系。

根据以上的分析结果, 电厂可以根据当地每年不同的大气条件, 计算出使用进气冷却装置的经济效果, 进而计算出进气冷却装置的投资收益率、投资回收期等经济参数, 判断进气冷却技术在当地的适用性和预估装置的经济性, 做出合理决策。

在下一阶段,本研究将考虑进气冷却装置随安装年限的增加,冷却能力和耗功量的变化对发电机组性能产生的影响,以期为用户提供更详细、准确的参考依据。

参考文献(References):

- [1] DE SA A, AL ZUBAIDY S. Gas turbine performance at varying ambient temperature[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2011, 31(14): 2735-2739.
- [2] 姜周曙,胡亚才,缪盛华. 燃气-蒸汽联合循环进气冷却系统技术经济分析[J]. **热力发电**, 2007, 36(2): 5-8.
- [3] KAKARAS E, DOUKELIS A, PRELIPCEANU A, et al. Inlet air cooling methods for gas turbine based power plants [J], **Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME**, 2006, 128(2): 312-317.
- [4] FARZANEH-GORD M, DEYMI-DASHTEBAYAZ M. Effect of various inlet air cooling methods on gas turbine per-

formance[J]. **Energy**, 2011, 36(2): 1196-1205.

- [5] MOHAPATRA A K. Thermodynamic assessment of impact of inlet air cooling techniques on gas turbine and combined cycle performance[J]. **Energy**, 2014(68): 191-203.
- [6] 洪丹丹,姜周曙,王 剑. 基于 PLC 的燃气轮机进气冷却测控系统的研制[J]. **机电工程**, 2008, 23(8): 33-35.
- [7] 徐菲菲,郑有飞,王墨霖. 燃气轮机进气冷却基于气象条件的经济分析[J]. **科学技术与工程**, 2014, 14(24): 215-220.
- [8] MOHAPATRA A K. Analysis of parameters affecting the performance of gas turbines and combined cycle plants with vapor absorption inlet air cooling [J]. **International Journal of Energy Research**, 2014, 38(2): 223-240.
- [9] 童钧耕. 工程热力学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [10] 焦树建. 燃气-蒸汽联合循环[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

李 云,陈坚红,盛德仁,等. 大气参数对燃气轮机进气冷却效果的影响[J]. **机电工程**, 2015, 32(4): 566-570.

LI Yun, CHEN Jian-hong, SHENG De-ren, et al. Effects of atmospheric parameters on gas turbine inlet air cooling[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2015, 32(4): 566-570.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 565 页)

参考文献(References):

- [1] 秦安民. 国内外汽车节能技术的发展[J]. **云南交通科技**, 1996, 12(1): 29-30.
- [2] ZHAI H B, CHRISTOPHER F H, ROUPHAIL N M. Development of a modal emissions model for a hybrid electric vehicle [J]. **Transportation Research Part D-Transport and Environment**, 2011, 16(6): 444-450.
- [3] MANSOUR C, CLODIC D. Dynamic modeling of the electro-mechanical configuration of the Toyota hybrid system series/parallel power train[J]. **International Journal of Automotive Technology on**, 2012, 13(1): 143-166.
- [4] HUBERTUS M, EDGAR W. Recent developments for the control of variable displacement motors with impressed pressure[J]. **Fluid Power**, 1996, 4(30): 79-84.
- [5] HIROKI S, SHIGERU I, EITARO K. Study on hybrid vehicle using constant pressure hydraulic system with flywheel for energy storage[J]. **SAE Paper**, 2013, 14(1): 101-102.
- [6] SUN Hui, JIANG Ji-hai, WANG Xin. Parameters matching and control method of hydraulic hybrid vehicles with secondary regulation technology [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2009, 22(1): 57-63.

- [7] 李战慧,李自光. 基于 SIMULINK 的转运车液压系统动态特性仿真研究[J]. **机床与液压**, 2005(17): 169-172.
- [8] 杜玖玉,苑士华,魏 超,等. 车辆液压混合动力传动技术发展及应用前景[J]. **机床与液压**, 2009, 37(2): 181-184.
- [9] SUN Hui, YANG Li-fu, JING Jun-qing. Hydraulic/electric synergy system (HESS) design for heavy hybrid vehicles [J]. **ENERGY**, 2010, 35(12): 5328-5335.
- [10] 朱荣辉. 汽车液压混合动力与油电混合动力的对比分析与应用[J]. **中国科技纵横**, 2011, 17(15): 60-61.
- [11] 姚 凯,李 阳,金 健,等. 液压混合动力汽车动力单元设计[J]. **液压气动与密封**, 2013(2): 55-58.
- [12] 魏英俊. 新型液压驱动混合动力运动型多用途车的研究 [J]. **中国机械工程**, 2006, 17(15): 1645-1648.
- [13] 卢东斌,欧阳明高,谷 靖,等. 四轮驱动电动汽车永磁无刷轮毂电机转矩分配[J]. **清华大学学报:自然科学版**, 2012, 52(4): 451-456.
- [14] 于安才,姜继海. 液压混合动力挖掘机回转装置控制方式的研究[J]. **西安交通大学学报**, 2011, 45(7): 30-33.
- [15] 李 胜,宋大风,曾小华,等. 重型卡车轮毂马达液压驱动系统建模与仿真[J]. **农业机械学报**, 2012, 43(4): 10-14.

[编辑:张 豪]