

Simulation and Performance Analysis of Micro Gas Turbine Distributed Energy System

Yunjiao Gu¹, Chaohao Lu², Li Ouyang¹, Yiwu Weng²

¹Central Research Institute of Shanghai Electric Group Co., Ltd., Shanghai

²Gas Turbine Institute of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

Email: JoKoo619@hotmail.com

Received: Dec. 30th, 2014; accepted: Jan. 15th, 2015; published: Jan. 22nd, 2015

Copyright © 2015 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

Abstract

Distributed energy system which combines micro gas turbine and air conditioner has high efficiency, low emission and high flexibility. This paper establishes a distributed energy supply simulation model based on micro gas turbine. We do simulation calculation at the design point and get stable operating parameter. The simulation and analysis of dynamic property are done according to electrical load changes and cooling load changes. The result of simulation can provide the basic data for the design and application of distributed power supply system with micro gas turbine.

Keywords

Micro Gas Turbine, Air Conditioner, Distributed Energy Supply, Dynamic Simulation

微型燃气轮机分布式供能系统仿真及性能分析

古云蛟¹, 陆超豪², 欧阳丽¹, 翁一武²

¹上海电气集团股份有限公司中央研究院, 上海

²上海交通大学燃气轮机研究院, 上海

Email: JoKoo619@hotmail.com

收稿日期: 2014年12月30日; 录用日期: 2015年1月15日; 发布日期: 2015年1月22日

摘要

微型燃气轮机和溴化锂空调机组组成的分布式供能系统效率高、排放少、灵活性强。本文建立了微型燃气轮机分布式供能系统仿真模型。在系统设计点处进行仿真计算，得到稳态运行参数；并针对用户电负荷变化以及冷负荷变化的变工况性能进行动态性能仿真与分析，为微型燃气轮机分布式供能系统设计和应用提供基础数据。

关键词

微型燃气轮机，空调机，分布式供能，动态仿真

1. 引言

微型燃气轮机用于分布式供能系统，具有结构紧凑、重量轻、噪音较小、高可靠性，安装简单，少维护、可用燃料范围广以及低排放等优点[1]。由微燃机和溴化锂空调机组组成的分布式供能系统可以有效降低了燃烧排放和制冷排放，提高了能源利用率，能够满足较小用户的需求，目前这类分布式供能在学校、商场、医院、办公楼宇及商用住宅等类型建筑里有广泛应用[2]。

参照上海紫竹科技园区软件大楼微燃机分布式供能系统，本项目的系统配置和参数如图 1 所示。

2. 系统设计参数

微型燃气轮机发电机由压气机、涡轮机、燃烧室、回热器和发电机等部件组成，溴化锂吸收式制冷由发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器、溶液泵、及节流阀等部件组成。

充分考虑季节、时间等因素对冷、热负荷的不同需求，来对系统主要性能参数进行设计和配置，见表 1。

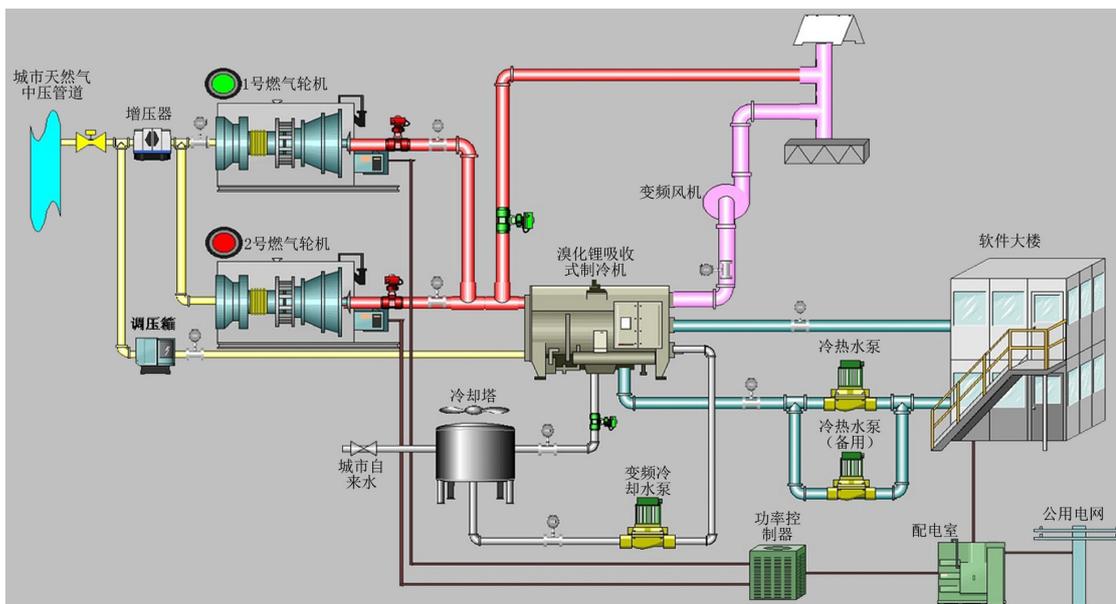


Figure 1. Diagram of micro gas turbine distributed energy supply system

图 1. 微燃机分布式供能系统图

Table 1. Main parameters of system
表 1. 系统主要参数

燃气轮机		溴化锂空调机	
功率 kW	30.0 (+0/-1)	供热量 kW	200
效率%	26.0	制冷量 kW	230
燃料流量 kJ/hr	415,000	进气流量 kg/s	0.64
排气余热 kJ/hr	327,000	进气温度℃	520
燃气进气压力 kg/cm ²	3.66~3.87	进气压力 Bar	<1.267
排气温度℃	275	冷热水流量 m ³ /hr	40
天然气量 Nm ³ /hr	21.75	冷却水流量 m ³ /hr	58
燃烧所需空气量 Nm ³ /hr	238.73	机组散热量 kJ/hr	2000

微型燃气轮机发电机的输出电为 50 Hz, 380 VAC, 单台输出功率范围 0~30 KW。溴化锂冷热空调机组在制冷工况下冷水进口/出口温度为 12℃/7℃, 允许最低出口温度 5℃; 冷却水进口/出口温度为 32℃/38℃, 允许变化范围为 18℃~34℃; 冷热水、冷却水流量调节范围为 60%~120%。

3. 分布式供能系统建模

微型燃气轮机分布式供能系统采用集总参数对象动力学模型,认为热力系统中流体工质的热力学状态参数(如温度、压力等)在空间上近于均匀分布,用某一点的参数来代表。因而其动力学过程模型完全可由常微分方程组描述,即热力学参数只是时间的函数。各个部件的模型包含相应的特性方程,并将各个部件按实际的系统结构连接成流体网格,建立系统的流体网络模型[3]。

3.1. 微型燃气轮机的模型

微型燃气轮机系统划分为以下模块:压气机,回热器,燃烧室,涡轮和转子等模块,如图 2 所示。

1) 压气机模型压气机的工作特性与压比 π 、折合转速 n/\sqrt{T} 、折合流量 $G_a\sqrt{T}/P$ 和效率 η 有关,相关模型计算公式如下:

$$\frac{G_a\sqrt{T_1}}{P_1} = f_1\left(\pi, \frac{n}{\sqrt{T_1}}\right),$$

$$\eta_c = f_2\left(\pi, \frac{n}{\sqrt{T_1}}\right),$$

$$T_2 = T_1 \left(1 + \frac{\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_c}\right),$$

$$W_c = G_a \times C_{pa} \times \Delta T_c = G_a \times C_{pa} \times \frac{T_1(\pi^{m_c} - 1)}{\eta_c},$$

其中 $m_c = \frac{k-1}{k}$ 。

2) 透平模型透平的工作特性与透平的膨胀比 π_t 、折合转速 n/\sqrt{T} 、折合流量 $G_g\sqrt{T}/P$ 和效率 η_t 四个参数有关,相关的模型计算公式为:

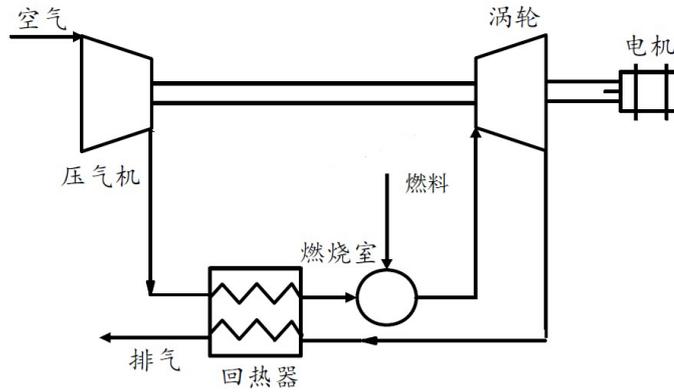


Figure 2. Schematic diagram of recuperated micro gas turbine
图 2. 回热型微型燃气轮机示意图

$$\frac{G_g \sqrt{T_3}}{P_3} = f_1 \left(\pi, \frac{n}{\sqrt{T_3}} \right),$$

$$\eta_t = f_2 \left(\pi, \frac{n}{\sqrt{T_3}} \right),$$

$$T_4 = T_3 \left(1 - \eta_t \left(1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \right) \right),$$

$$W_t = G_g \times C_{pg} \times (T_3 - T_4),$$

其中 G_g 为烟气流量, T_3 、 T_4 分别为透平进出口烟气温度, C_{pg} 为透平进出口烟气的平均定压比热容, η_t 为涡轮的效率, W_t 为微型燃气轮机输出功。

3) 燃烧室模型由于燃烧的天然气是混合气体, 燃烧室的能量守恒方程为[4]:

$$G_a h_a + G_f h_f + G_f h_u \eta_b = (G_a + G_f) h_g$$

其中 G_a 、 G_f 分别为燃烧室进口空气和燃料质量流量, h_a 、 h_f 分别为燃烧室进口空气和燃料的比焓, h_u 为燃料的地位热值, η_b 为燃烧效率, h_g 为燃烧产物比焓。

4) 回热器和转子建模回热器热交换方程:

$$T_{2a} - T_2 = \alpha(T_4 - T_2) = T_4 - T_{4a},$$

$$T_{4a} = T_4 - \alpha(T_4 - T_2),$$

$$T_{2a} = T_2 - \alpha(T_4 - T_2).$$

其中, T_2 和 T_{2a} 分别是空气进入和进出回热器的温度, α 是回热度, T_4 和 T_{4a} 分别是烟气进入和进出回热器的温度。

转子动态方程为:

$$\left(\frac{30}{\pi} \right)^2 J n \frac{dn}{dt} = P_t - P_c - P_l,$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{P_t - P_c - P_l}{J \cdot n} \times \frac{\pi^2}{900},$$

其中, 透平功率 P_t 、压气机耗功 P_c 、负载功率 P_l , J 为轴系的转动惯量与轴系的尺寸和材料有关, n 为

轴系的转速。

3.2. 吸收式制冷机的建模

吸收式空调机模型包括:发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器模块[5], 如图 3 所示。

1) 发生器模块进入发生器的稀溶液流量为 G_a , 质量分数为 ξ_a , 比焓为 H_7 , 加热量为 Q_g , 离开的冷剂蒸汽量为 D , 比焓 h'_3 , 浓溶液量是 $G_a - D$, 质量分数和比焓分别为 ξ_r 和 h_4 , 相应模型为:

$$\frac{Q_g}{D} + \frac{G_a h_7}{D} = h'_3 + \left(\frac{G_a}{D} - 1\right) h_4, \quad \frac{G_a}{D} = q_g, \quad q_g = h'_3 + \left(\frac{Q_g}{D} - 1\right) h_4 - \frac{Q_g}{D} h_7$$

q_g 为发生器的单位热负荷(质量热流量), 热负荷可以表示为 $Q_g = q_g D$ 。

2) 冷凝器模块进入冷凝器的冷剂蒸汽量为 D , 比焓为 h'_3 , 冷却水带走的热流量为 Q_k , 流出的冷却水量为 D , 比焓为 h_3 , 进入冷凝器的热流量为 Dh'_3 , 流出的热流量为 $Q_k + Dh_3$, 在稳定工况下两者应相等。即: $Dh'_3 = Q_k + Dh_3$ 。

3) 吸收器模块进入吸收器的热流量为 $Dh'_3 + (G_a - D)h_8$, 流出的热流量为 $Q_a + G_a h_2$, 在稳定工况下, 二者应相等, 即:

$$Q_a + G_a h_2 = Dh'_3 + (G_a - D)h_8, \quad \frac{Q_a}{D} = q_a, \quad q_a = h'_3 + (a - 1)h_8 - ah_2$$

q_a 为吸收器的单位热负荷, 吸收器热负荷: $Q_a = q_a D$ 。

4) 蒸发器模块进入蒸发器的冷剂水比焓为 h_3 , 流量为 D 。冷水放出的热流量为 Q_0 , 从蒸发器中流出的冷剂蒸汽量为 D , 比焓 h'_1 , 进入蒸发器的热流量为 $Q_0 + Dh'_1$, 流出的热流量是 Dh'_1 , 在稳定工况下两者应相等, 即 $Dh'_1 = Q_0 + Dh'_0$ 。

4. 分布式供能仿真运行及数据分析

微燃机分布式供能系统主机采用两台功率 30 KW 的微型燃气轮机和一台 200 KW 溴化锂吸收式制冷机。在溴化锂制冷机有补燃情况下, 微型燃气轮机与溴化锂制冷机可以独立运行, 通过调节补燃量满足各自的用户负荷。微燃机分布式供能系统的性能仿真在 MATLAB/SIMULINK 环境中完成。

4.1. 仿真运行稳态

微型燃气轮机分布式供能系统稳态参数如表 2 所示。

4.2. 变工况运行

通过调节补燃量, 可以满足微型燃气轮机和溴化锂吸收式制冷机用户负荷要求, 二者也可以独立运行。

1) 用户电负荷变化当用户的电负荷发生变化时, 通过调节微型燃气轮机的燃料量满足用户电负荷变化要求。与此同时, 微型燃气轮机余热发生变化, 可以通过调节补燃量保证溴化锂吸收式制冷机运行在设计工况(200 KW)。

下面是在 2500 秒时用户电负荷从 60 KW 下降到 50 KW 时的单台微型燃气轮机和溴化锂空调机的工作参数变化的动态过程, 如图 4, 图 5 所示。

2) 用户冷负荷变化当用户的冷负荷发生变化, 电用户不变时。可以通过调节溴化锂空调机的燃料补给量来满足用户冷负荷的要求。下面是在 2600 秒时用户冷负荷从 200 KW 下降到 180 KW 时的溴化锂空

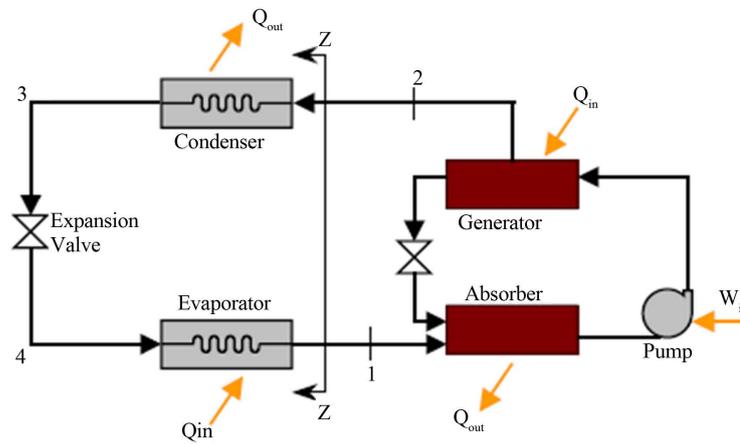


Figure 3. Flow diagram of absorption refrigeration machine
图 3. 吸收式制冷机流程图

Table 2. Steady state parameters of the distributed energy supply
表 2. 微型燃气轮机分布式供能系统稳态参数

燃气轮机参数名称	运行结果	溴化锂空调机	运行结果
压气机出口温度 K	449.3	发生器压力 MPa	0.009
空气流量 kg/s	0.3132	浓溶液出口温度 °C	98
压气机出口压力 bar	3.21	稀溶液进口温度 °C	54.5
压气机耗功 KW	40.06	出口浓溶液流量 Kg/s	0.6063
压气机压比	3.2	进口稀溶液流量 Kg/s	0.6923
回热器烟气入口温度 K	889.6	蒸汽发生量	0.086
回热器烟气出口温度 K	506.5	高压发生器加热量 KW	248.9
燃料入口流量 kg/s	0.00263	溶液热交换器换热量 KW	13.11
燃烧室出口压力 bar	3.02	吸收器热负荷 KW	237.1
燃烧室出口温度 K	1095	吸收器压力 MPa	0.00074
烟气流量 kg/s	0.3158	冷凝器热负荷 KW	213
透平出口温度 K	889.6	冷凝压力 MPa	0.0096
透平输出功 KW	76.18	冷凝温度 °C	45
燃气轮机输出功 KW	30.12	空调机输出冷量 KW	196
燃气轮机效率	0.2487	COP	0.728

调机的一些工作参数变化的动态过程，如图 6，图 7 所示。

4.3. 变工况数据分析

当在 2500 s 时用户电负荷由 60 kw 变化到 50 kw，单机微型燃气轮机输出的电功率由 30.12 kw 变为 24.67 kw，发电效率从 24.87% 变为 22.11%，透平入口温度由 1095 K 变为 1028.9 K，微型燃气轮机燃料量从 0.002611 kg/s 变为 0.00242 kg/s，在 200 s 之后达到稳定状态。从图中可以看到燃料的补给量由 0.00376 kg/s 变化为 0.00387 kg/s；燃机的排气热量由 88.12 kw 变化为 82.886 kw，也是在 200 s 之后达到稳定状态。

原因是：用户电负荷发生变化时，需要控制系统控制燃机燃料的供给量，即减少燃料量。这会致使

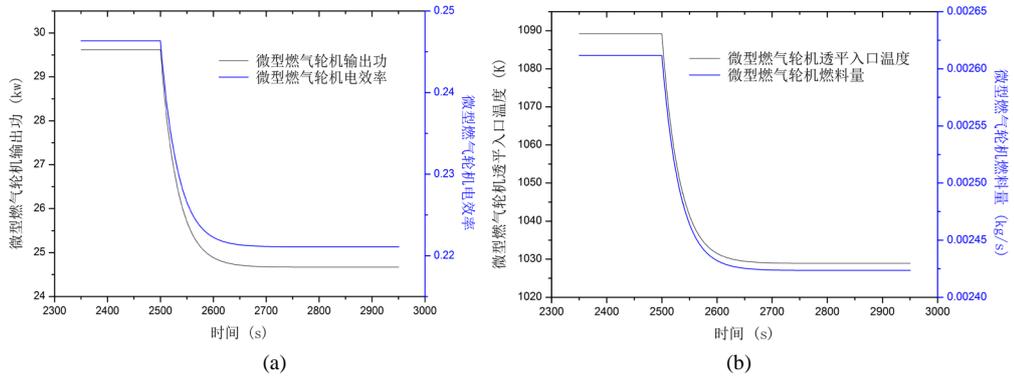


Figure 4. Diagram of micro gas turbine dynamic performance; (a) Variation of power and efficiency; (b) Variation of turbine temperature and fuel quantity
图 4. 微燃机动态性能变化图; (a) 电功率与电效率变化图; (b) 透平入口温度与燃料量变化

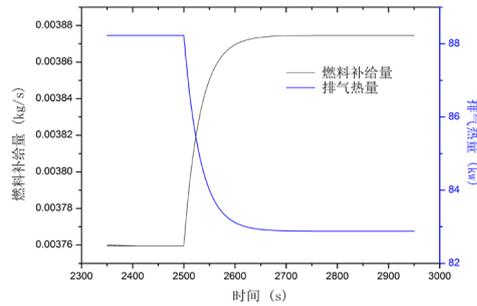


Figure 5. Variation of recovery heat and fuel supply quantity
图 5. 回收余热与燃料补给量变化图

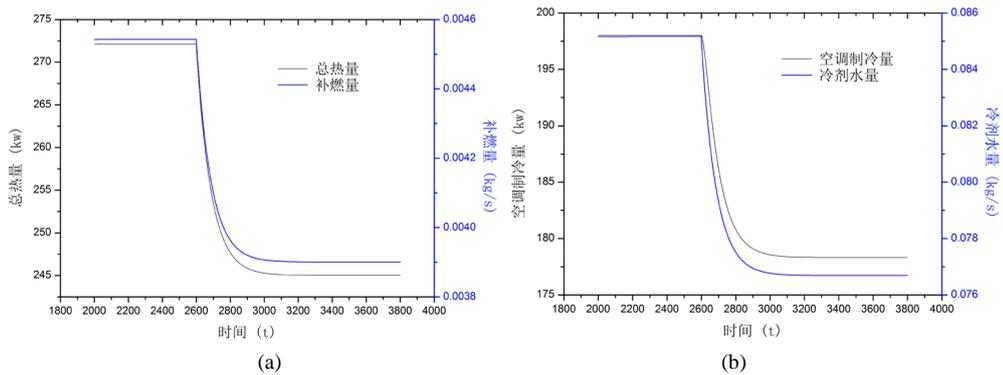


Figure 6. Variation of dynamic performance of air conditioner; (a) Variation of heat supplementary and fuel quantity; (b) Variation of refrigerating capacity and refrigerant
图 6. 空调机动态性能变化图; (a) 空调机热量与补燃料量变化; (b) 空调机制冷量与冷剂水量变化

进入到透平的温度降低，透平做功下降。因空气量基本不变，即压气机耗功不变，透平输出功减小，故燃机整体的输出功减小，发电效率降低，最后会使燃机排气热量减少。与此同时，为了使溴化锂空调机在设计点处运行，须增加溴机的燃料补给量。

当在 2600 s 时用户冷负荷由 200 kw 变化到 180 kw，输入的燃料总热量由 272.02 kw 变化为 245.03 kw，燃料补燃量由 0.00454 kg/s 变化为 0.0039 kg/s；在 430 s 之后达到稳定状态。制冷量由 197.94 kw 变为 178.32 kw，冷剂水量由 0.08513 kg/s 变化到 0.07669 kg/s，在 600 s 之后达到稳定状态。制冷效率 COP 是先上升后下降的变化过程，在 200 kw 时制冷效率是 0.72766，在 42 s 后达到最高效率 0.73889，达到稳定状态时

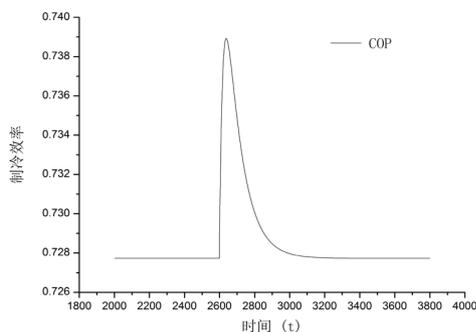


Figure 7. Variation of air conditioner refrigeration efficiency

图 7. 空调机制冷效率变化图

的效率为 0.72773。负荷达到另一个稳定状态用了 600 s。

原因是：用户冷负荷降低时，输入到溴机的总热量要求减少，致使空调的制冷量减少。而冷剂水的量也会随着制冷量的减少而减少。对于制冷效率升高的趋势，可以解释为，燃料随冷负荷响应的速度要比溴机响应速度快，即制冷量减少的速度没有燃料快造成的。

5. 结束语

1) 本文针对微燃机——溴化锂空调机分布式供能系统，建立了仿真模型。在设计点处，获得系统稳态运行参数；针对用户负荷变化情况研究了系统的变工况性能。

2) 在用户电负荷变化时，获得了燃机的燃料量、透平入口温度、燃机输出功率以及效率等参数的变化情况。在用户冷负荷变化时，获得了溴化锂空调机利用的总热量、燃料的补燃量、制冷量以及制冷效率等参数的变化情况。

3) 获得的研究数据可以为微燃机——溴化锂空调机分布式供能系统的优化设计提供重要支持。

基金项目

论文研究得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB227301)，国家自然科学基金项目(51376123)，上海市科委科技攻关计划(13dz1200401)的资助。

参考文献 (References)

- [1] 刘德平, 姜任秋 (2005) 单效溴化锂吸收式制冷机的仿真计算. *应用科技*, **12**, 63-65.
- [2] 刘亚仑, 翁一武 (2005) 微型燃气轮机冷热电联供系统仿真研究. 硕士论文, 上海交通大学, 上海.
- [3] 杨锦成, 苏明 (2009) 微型燃气轮机冷热电联供系统集成与性能仿真研究. 博士论文, 上海交通大学, 上海.
- [4] 沈维道, 童钧耕 (2007) 工程热力学. 高等教育出版社, 北京.
- [5] 翁一武, 苏明, 翁史烈 (2003) 先进微型燃气轮机的特点与应用前景. *热能动力工程*, **2**.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

