

太阳能光伏-内燃机发电及余热利用系统热力学分析

贾俊曦 涂茂林

(哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 对利用太阳能和生物质能的联合冷热电系统(CCHP)进行热力学分析。系统由内燃机和太阳能光伏电池供电, 由吸收式制冷及热水系统进行余热回收。太阳能光伏电池采用五参数模型, 内燃机为零维、单区模型。分析转速和压比对内燃机输出功率、排气排放物和气缸内传热的影响。结果显示: 太阳能光伏电池效率为14%, 日发电量500 kWh; 内燃机热效率可以达到37%。转速提高后, 整体CCHP电效率提高2.8%, 余热利用效率提高10%。内燃机的压缩比增大后, CCHP电效率增大0.52%, 整体冷热电效率几乎不变。整个CCHP系统电效率为20%, 冷热电联合效率可以达到40%。

关键词: 太阳能光伏; 生物质气化; 内燃机; 吸收式制冷; 联合冷热电系统

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 1004-7948 (2023) 10-0013-04

doi: 10.3969/j.issn.1004-7948.2023.10.004

Thermodynamic analysis of a solar photovoltaic-internal combustion engine power generation and waste heat utilization system

JIA Jun-xi TU Mao-lin

Abstract: Thermodynamic analysis of combined systems of cooling, heating and power (CCHP) using solar and biomass energy is conducted. The system is powered by an internal combustion engine and solar photovoltaic cells, and waste heat is recovered by absorption refrigeration and hot water systems. The solar photovoltaic cell adopts a five-parameter model, and the internal combustion engine is a zero-dimensional single-zone model. The effects of speed and pressure ratio on internal combustion engine output, exhaust emissions and heat transfer in cylinders are analyzed. The results show that the solar photovoltaic cell efficiency is 14%, and the daily power generation is 500 kWh. The thermal efficiency of the internal combustion engine can reach 37%. As the speed increased, the overall CCHP electrical efficiency is increased by 2.8%, and the waste heat utilization efficiency is increased by 10%. As the compression ratio of the internal combustion engine increases, the CCHP electric efficiency is increases by 0.52%, and the overall cooling and heating electric efficiency is almost unchanged. The electrical efficiency of the entire CCHP system is 20%, and the combined efficiency of cooling, heating and power can reach 40%.

Key words: solar photovoltaic; biomass gasification; internal combustion engine; absorption refrigeration; combined cooling heating and power

1 概述

随着能源需求总量以及碳排放要求的日益提高, 高效可持续能源利用系统日益受到关注。分布式能源系统安装在用户附近, 可以就地生产并供应多种负荷。联合冷热电系统(CCHP)可以利用各种可再生能源, 通过多种原动机做功或发电, 并配有余热回收系统, 是高效清洁的能量利用方式^[1]。

CCHP的能量来源包括风能、太阳能和生物质能。太阳能光伏(PV)发电是较为成熟的技术, 但由于太阳辐射

具有不稳定性及多变性, 在需要连续供电的场合, 作为唯一供电来源的可能性较低^[2]。为了克服这一缺点, 可以将其与其他可再生能源(如生物质能)联合, 共同提供电力。利用生物质能发电、制冷及余热利用CCHP的研究较多^[3]。利用生物质能的CCHP以生物质气化后合成气为燃料, 类似于以天然气和煤气化为燃料的CCHP^[4], 生物质能的合理应用可在一定限度上减少一次能源中天然气的消耗量。

在发电装置方面, CCHP可以采用各种热机(如燃气

作者简介: 贾俊曦(1977—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源开发与利用。

收稿日期: 2023-01-14

引用本文: 贾俊曦, 涂茂林. 太阳能光伏-内燃机发电及余热利用系统热力学分析[J]. 节能, 2023, 42(10): 13-16.

轮机、内燃机、斯特林机、微型燃气轮机或燃料电池)发电。尽管微型燃气轮机、燃料电池发电方式的电效率更高^[5],但是内燃机发电方式的投资少、技术成熟,在30 kW至1 000 kW的小型生物质气化发电系统中得到了应用^[6]。在内燃机的余热利用方面,吸收式制冷得到较为广泛的应用。周东一^[7]等利用溴化锂吸收式制冷对汽车发动机余热进行利用。杨培志^[8]等采用吸附式空调技术,利用燃料电池提供动力的汽车的余热。李小华^[9]等也进行了类似的研究。张焱^[10]等将汽车散热器和吸收式制冷结合在一起,研究不同工质对制冷系统性能的影响。

文中构建以太阳能和生物质能为能量来源的联合冷热电系统(CCHP),以生物质气化气通入内燃机发电,辅助以光伏发电,采用吸收式制冷和热水换热器进行余热回收。对CCHP进行热力学分析并探究转速和压比对内燃机输出功率、排气排放物和气缸内传热的影响。

2 太阳能光伏-内燃机发电及余热利用系统

太阳能光伏-内燃机发电及余热利用系统如图1所示。系统由太阳能光伏电池、生物质气化炉及净化单元、内燃机、吸收式制冷单元及热水桶组成。图中数字代表流动的节点。生物质在气化炉中进行空气气化,生成的气体经净化单元处理进入储气筒,供内燃机使用。气体进入内燃机燃烧做功,其排气排放物仍具有较高温度,此余热可将环境温度下的给水加热,热水进入水桶,一部分对外提供热水,另一部分作为吸收式制冷单元的高温热源,为制冷系统提供热量,由制冷单元的蒸发器对外提供所需要的制冷量。

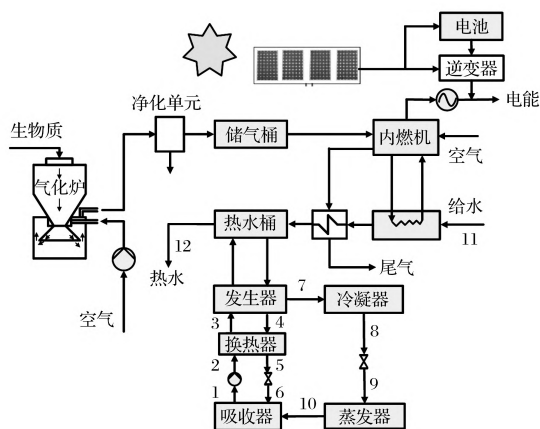


图1 太阳能光伏-内燃机发电及余热利用系统

3 各部件数学模型

3.1 太阳能光伏(PV)电池模型。

太阳能光伏电池等效电路如图2所示。光伏电池的 $I-V$ 关系为:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_D \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{\alpha} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I ——输出电流, A; I_{ph} ——光电流, A; I_D ——二极管饱和电流, A; I_{sh} ——分路电流, A; V ——

输出电压, V; R_s ——串联电阻, Ω ; α ——热电压, V; R_{sh} ——分路电阻, Ω 。

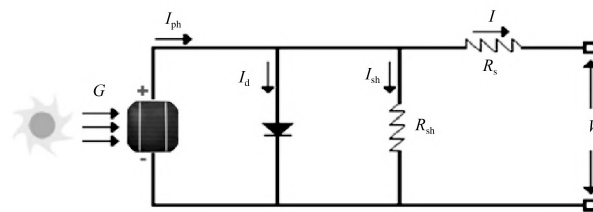


图2 太阳能光伏电池等效电路

根据生产商给出的出厂参数,利用牛顿-拉夫逊数值方法^[11],求得方程中的5个参数。电池的输出功率 P_{solar} 为:

$$P_{solar} = IV \quad (2)$$

太阳能光伏电池的功率 η_{PV} 为:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{solar}}{AG} \quad (3)$$

式中: A ——太阳能电池的面积; m^2 , G ——太阳的投入辐射, W/m^2 。

太阳的高度角 α_h 和天顶角 θ 的关系为:

$$\sin \alpha_h = \cos \theta = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (4)$$

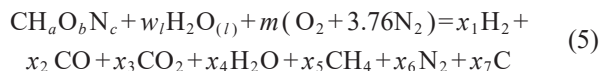
式中: δ ——赤纬角, $^\circ$; φ ——时角, $^\circ$; ω ——纬度, $^\circ$ 。

由高度角公式可以求得日照时间,由天顶角可以求得太阳能电池板的有效投入辐射。

采用京瓷公司(Kyocera) KD205GH-2P 205W型光伏电池进行计算,其开路电压为33.2 V,短路电流为8.36 A,最大输出功率为205 W。选取处于北纬 45° 的哈尔滨为研究地区,利用式(4)计算可得8月份单日的日照时间平均为13.83 h,若太阳的辐射水平为 $750 W/m^2$,其对应的峰值日照时数为5.49 h,太阳能电池的日发电量为545 kWh。

3.2 气化炉数学模型

下吸式气化炉具有维护费用低、燃气品质较高的特点^[4]。采用下吸式气化炉生成合成气,气化炉的总反应为:



控制体内的能量守恒方程为:

$$\sum_{i=1}^6 n_i^{k-1} H_i^{k-1} + n_7^{k-1} C_{p,C} (T^{k-1} - T_0) + m_{ash} C_{p,ash} (T^{k-1} - T_0) = \sum_{i=1}^6 n_i^k H_i^k + n_7^k C_{p,C} (T^k - T_0) \quad (6)$$

由质量守恒、化学反应平衡、能量守恒原理可以得出气化炉出口气体成分^[12]。

3.3 四冲程内燃机模型

内燃机气缸直径为101.6 mm,冲程为88.4 mm,连杆长度为144.9 mm,气缸数为8。

根据曲轴半径 R 、连杆长度 L 、气缸孔径 B 及与气缸体积 V 的关系,得到内燃机转角 θ 与气缸内压力 P 、温度

T 及体积 V 的关系^[13]。

$$\frac{dP}{d\theta} = -\left(\frac{P}{V}\right)\frac{dV}{d\theta} + \left(\frac{P}{T}\right)\frac{dT}{d\theta} \quad (7)$$

根据理想气体状态方程和质量守恒方程,求得气缸内压力与转角的关系。

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\pi B^2}{4} \left(R \sin \theta + \frac{R^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 \theta}} \right) \quad (8)$$

生物质气化后生成的合成气喷入气缸内燃烧并推动活塞做功,部分热量通过气缸壁以对流换热的方式散失到环境中。

$$\frac{dT}{d\theta} = T(\gamma - 1) \left[\frac{1}{PV} \left(m_{\text{fuel}} \cdot LHV \cdot \frac{dx_b}{d\theta} - \frac{dQ_{\text{wall}}}{d\theta} \right) - \frac{1}{V} \frac{dV}{d\theta} \right] \quad (9)$$

式中: m_{fuel} ——燃料质量, kg; LHV ——燃料热值, J/kg; x_b ——能量释放份额; Q_{wall} ——气缸壁散热损失, J。

联立求解上述微分方程可得内燃机缸内参数随转角变化的关系。

生物质合成气的燃烧热 Q_{comb} 最终转化为内燃机的输出功率 P_{ICE} 、气缸水套的冷却热量 Q_{cool} 、排气排放物热量 Q_{ex} 及不可回收的散热损失 Q_{loss} 。内燃机整体的能量守恒方程为:

$$Q_{\text{comb}} = Q_{\text{cool}} + Q_{\text{ex}} + P_{\text{ICE}} + Q_{\text{loss}} \quad (10)$$

内燃机的热效率 η_{ICE} 为其发出功率与通入的合成气发热值之比。

$$\eta_{\text{ICE}} = \frac{P_{\text{ICE}}}{\dot{m}_{\text{fuel}} LHV_{\text{syngas}}} \quad (11)$$

式中: P_{ICE} ——内燃机功率, W; \dot{m}_{fuel} ——气体质量流量, kg/s; LHV_{syngas} ——合成气低热值, J/kg。

3.4 单效溴化锂-水吸收式制冷模型

内燃机排气排放物及冷却水的余热采用单效溴化锂-水吸收式制冷回收。其主要部件包括发生器、蒸发器、冷凝器、吸收器及溶液换热器,制冷剂为水,吸收剂为溴化锂。根据能量守恒和质量守恒原理列出各个部件的方程^[14]。

发生器的质量守恒和能量守恒方程为:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7 \quad (12)$$

$$Q_g = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_3 h_3 \quad (13)$$

蒸发器的质量和能量守恒方程为:

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (14)$$

$$Q_e = \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_9 h_9 \quad (15)$$

吸收式制冷的性能系数 COP 为:

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (16)$$

式中: Q_g ——制冷量, W; Q_e ——吸热量, W。

3.5 系统电效率及总效率

整个系统的冷负荷为蒸发器总的传热量。

$$Q_{\text{cooling}} = Q_e \quad (17)$$

系统的热负荷为提供热水的热量,给水的入口温度

为25℃,出口水温为60℃。

$$Q_{\text{heating}} = \dot{m}_{11} (h_{11} - h_{12}) \quad (18)$$

整个系统的净输出电功率 W_{net} 为:

$$W_{\text{net}} = P_{\text{ICE}} + P_{\text{solar}} \quad (19)$$

整个CCHP的电效率和整体冷热电效率为:

$$\eta_{\text{el}} = \frac{W_{\text{net}}}{\dot{m}_{\text{biomass}} LHV_{\text{biomass}} + AG} \quad (20)$$

$$\eta_{\text{CCHP}} = \frac{Q_{\text{cooling}} + Q_{\text{heating}} + W_{\text{net}}}{\dot{m}_{\text{biomass}} LHV_{\text{biomass}} + AG} \quad (21)$$

式中: Q_{heating} ——制热量, W; \dot{m}_{biomass} ——生物质质量流量, kg/s; LHV_{biomass} ——生物质低热值, J/kg。

4 计算结果及分析

4.1 数学模型验证

为了验证模型的准确性,将各部件的计算结果和其他实验数据进行对比,气化炉、吸收式制冷模型验证结果如表1和表2所示。模型计算和对比文献吻合良好,可以用来进行系统分析。

表1 气化炉模型验证结果

/%

项目	CO	H ₂	CO ₂	CH ₄	N ₂
本文	21.83	20.30	8.26	1.00	48.61
文献[14]	19.60	17.20	9.90	1.40	51.90

表2 吸收式制冷模型验证结果

项目	Q_g /kW	Q_e /kW	Q_d /kW	Q_c /kW	COP
本文	259.45	213.56	247.47	201.29	0.775 8
文献[15]	246.21	206.15	241.34	201.29	0.817 5

4.2 整体性能计算结果

计算可得光伏电池效率为14%,内燃机热效率达到35%,制冷的COP可达77%。系统性能计算结果如表3所示。系统整体电效率为18%,系统总效率为35%。

表3 系统性能计算结果

项目	数值
P_{solar} /kW	102
P_{ICE} /kW	227
Q_{cooling} /kW	131
Q_{heating} /kW	170
$\eta_{\text{el}}/\%$	18.32
$\eta_{\text{CCHP}}/\%$	35.08

4.3 转速和压比对系统性能影响

系统中65%以上的电力由内燃机提供,内燃机转速及压缩比对其输出功率有重要影响。

转速对内燃机能量分配的影响如图3所示。转速增加时,相同时间内完成的热力循环次数增加,导致输出功率增加;转速增加使完成一个热力循环需要的时间减少,燃气向气缸壁传热的时间减少,因而冷却系统热量所占比例下降,使排气排放物热量所占份额增加。在高

转速区域,由于活塞与气缸壁的摩擦增加,燃料中燃烧热转化成输出功率的份额下降,不可回收损失份额增大。内燃机热效率为34%~36%。

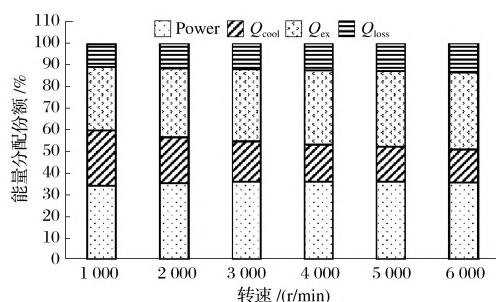


图3 转速对内燃机能量分配的影响

内燃机转速对系统电效率和整体效率的影响如图4所示。提高转速相当于增加了内燃机的燃料流量,系统的冷热电输出均得到提高。同时输出电能中内燃机发电份额与太阳能发电份额之比增大,内燃机的发电热效率大于太阳能发电效率。因此,总的电效率从16.93%增加到19.45%。在高转速区域,系统整体电效率增大程度减小。当转速从1 000 r/min增加到6 000 r/min时,余热系统回收了12%~22%的能量,冷热电联合效率从29%增加到41%;转速越高,余热回收对整体效率提高的贡献程度越大。

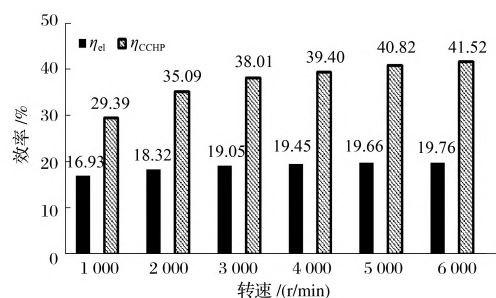


图4 内燃机转速对系统电效率和整体效率的影响

计算表明转速为4 000 r/min,压缩比从8提高到11后,内燃机热效率从36.0%提高到37.3%,且其增大程度越来越小。压缩比增大时,内燃机排气能量所占份额轻微减少,不可回收损失基本保持在12%左右。内燃机压缩比(CR)对系统整体性能的影响如图5所示。对于整个CCHP,压缩比增大使整体电效率提高约0.5%,达到19.97%,整体的冷热电效率几乎不变,因为内燃机排气和冷却水能量基本不随CR变化。

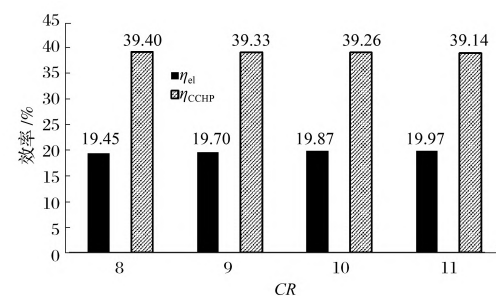


图5 内燃机压缩比CR对系统整体性能的影响

5 结语

对基于太阳能及生物质能的CCHP系统进行热力学分析,研究工作参数对系统电效率和总效率的影响。主要结论如下:太阳能光伏电池的最大功率随太阳辐射强度增大而增大,日照强度为750 W/m²时,对应的峰值日照时数为5.5 h,日发电量为545 kWh。转速提高后,内燃机的热效率和输出功率均增大。相应的CCHP电效率和总效率均提高。文中转速提高后整体CCHP电效率提高了2.8%,余热利用效率提高了10%以上,对余热利用效率的提高程度要大于对电效率的提高。内燃机的压缩比从8增大到11后,热效率提高1%左右,CCHP电效率增大0.52%,整体冷热电效率几乎不变。文中太阳能发电效率为14%,内燃机热效率可达37%,CCHP电效率可以达到20%,余热利用系统回收了10%~20%的能量,使整个系统的冷热电效率达到40%。

参考文献

- [1] Stryi-Hipp G. Renewable heating and cooling [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016.
- [2] Wang J J, Han Z P, Guan Z M. Hybrid solar-assisted combined cooling, heating and power systems: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 133: 1-26.
- [3] Segurado R, Pereira S, Correia D, et al. Techno-economic analysis of a trigeneration system based on biomass gasification [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 103: 501-514.
- [4] Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction [M]. Amsterdam: Elsevier, 2018.
- [5] 赵展. 生物质气化-燃料电池发电系统性能分析[J]. 可再生能源, 2011, 29(6): 115-120.
- [6] Wang J J, Mao T Z, Sui J, et al. Modeling and performance analysis of CCHP system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas [J]. Energy, 2015, 93: 801-815.
- [7] 周东一, 石楚平, 袁文华, 等. 利用汽车发动机余热的溴化锂吸收式制冷研究[J]. 节能, 2008, 27(6): 23-26.
- [8] 杨培志, 陈焕新. 燃料电池汽车余热驱动的吸附式空调系统性能分析[J]. 热科学与技术, 2008, 7(3): 256-261.
- [9] 李小花, 唐景立. 利用汽车余热的吸收式制冷系统的研究[J]. 制冷与空调, 2013, 27(2): 130-136.
- [10] 张焱, 张世双, 姜曙, 等. 利用发动机余热驱动的汽车制冷空调系统[J]. 节能, 2022, 41(9): 30-32.
- [11] Duffie J A, Beckman W A. Solar engineering of thermal processes [M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [12] Zang G Y, Jia J X, Shi Y Y, et al. Modeling and economic analysis of waste tire gasification in fluidized and fixed bed gasifiers [J]. Waste Management, 2019, 89: 201-211.
- [13] Colin R F, Allan T K. Internal Combustion Engines. Applied Thermosciences [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.
- [14] Jayah T H, Aye L, Fuller R J, et al. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying [J]. Biomass Bioenergy, 2003, 25 (4): 459-469.
- [15] Rubio-mays C. NPL model of a LiBr-H₂O absorption refrigeration system for the minimization of the annual operating cost [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 37: 10-18.