

# 混合动力燃气热泵空调系统的 能量分析模型<sup>\*</sup>

东南大学 李应林<sup>☆</sup> 张小松

**摘要** 在分析燃气发动机和蓄电池的动态负荷特性基础上,建立了混合动力燃气热泵(HPGHP)空调系统的能量分布模型,并进行了计算。结果表明,压缩机需求部分负荷的概率分布和燃气发动机直接对压缩机输送的功率与压缩机总功率的比值对 HPGHP 系统动力系统的热效率影响较大;当这个比值高于某个临界值时,HPGHP 系统动力系统的热效率比常规燃气热泵空调系统高。

**关键词** 混合动力燃气热泵空调系统 燃气发动机 蓄电池组 压缩机需求负荷 热效率

## Energy modeling for a hybrid power gas-engine-driven heat pump air conditioning system

By Li Yinglin<sup>★</sup> and Zhang Xiaosong

**Abstract** Analysing the dynamic load characteristics of gas engine and batteries, establishes the energy-coupled mathematical model of the hybrid power gas-engine-driven heat pump (HPGHP) air conditioning system, and carries out related calculation. The results show that two factors—the probability distribution of compressor part load demand and the ratio of the power directly from the gas engine to the compressor to the total power output of the compressor—impact notably the thermal efficiency of the power system of HPGHP system, and that the thermal efficiency of the power system of HPGHP system is higher than that of the conventional GHP system in the condition that the power ratio is larger than a critical value.

**Keywords** hybrid power gas-engine-driven heat pump air conditioning system, gas engine, battery bank, compressor load demand, thermal efficiency

★ Southeast University, Nanjing, China

### 0 引言

在最近公布的国家能源领域长期规划中具体提出了 2020 年能源科技发展思路,即把节约能源放在首位,促进节能型社会的建立;以煤炭为主体,以电力为中心,加快发展水电、核电,保障油气安全;坚持远近结合,积极推进可再生能源和新能源的发展。其中优先主题之一是加强发展节能和提高能效的技术,开发和推广新型先进冷暖空调系

统及设备是建筑领域的节能技术重点之一。燃气热泵空调系统是一种以天然气为主要能源、以发动机驱动蒸气压缩式热泵的空调系统,其一次能源利用率高达 1.4 以上,具有高效、环保、实现电力削峰

①<sup>☆</sup> 李应林,男,1979 年 6 月生,在读博士研究生  
210096 东南大学文昌 10 舍 322 室  
(0) 13851427963  
E-mail:lyl79doclyl@eyou.com

收稿日期:2006-07-17

修回日期:2006-09-27

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:50376052)

及燃气填谷等诸多优点,供热运行模式下的能源利用率约高出空气源热泵 50%。

## 1 混合动力燃气热泵空调系统及其能量分析模型

### 1.1 混合动力燃气热泵空调系统

在燃气热泵空调运行过程中,燃气发动机通常在部分负荷工况下运行,当运行工况随热泵空调负荷频繁变化时,发动机通常偏离标定工况,发动机工况的改变主要通过控制燃料流量来实现,随着燃料流量的变化,发动机的工况频繁变动,发动机运行稳定性变差,热效率降低,排放增大。在对已有的混合动力技术和燃气热泵技术的研究基础上<sup>[1-3]</sup>,本文提出了一种新型的将混合动力系统和热泵有机融合在一起的混合动力燃气热泵空调系统(hybrid power GHP, HPGHP)。在该系统的动力系统中,燃气发动机和蓄电池组这两种动力源的合理匹配可以使燃气发动机保持在最佳油耗经济区运转,同时使燃气发动机的排放得以改善,实现系统排放低和燃油经济性好的目标。图 1 为一种并联式混合动力燃气热泵空调系统的原理图。

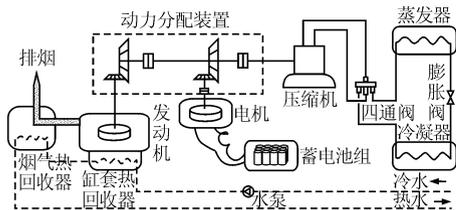


图 1 并联式混合动力燃气热泵空调系统原理

### 1.2 HPGHP 系统中燃气发动机动态负荷特点

在并联式混合动力燃气热泵系统中,通过电动机启动克服了传统燃气发动机启动的缺点,在规定的工况下系统控制策略始终控制发动机工作在高效区域,如图 2 所示。

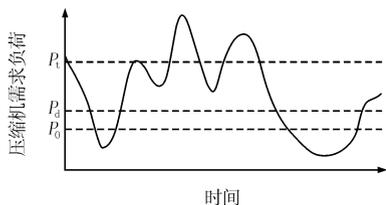


图 2 压缩机需求负荷-时间随机变化关系

发动机高效区域有一个上临界功率  $P_1$ , 有一个下临界功率  $P_d$ , 燃气发动机启停的临界功率为  $P_0$ 。当压缩机需求功率  $P_c$  在  $P_1 \sim +\infty$  范围内时, 燃气发动机在  $P_1$  工况下运行, 不足的功率由蓄电池组承担; 当压缩机需求功率  $P_c$  在  $P_d \sim P_1$  范围

内时, 燃气发动机通过自动调节转速来适应  $P_c$ ; 当  $P_c$  在  $P_0 \sim P_d$  范围内时, 燃气发动机在  $P_d$  工况下运行, 富裕的功率向蓄电池充电; 当  $P_c$  在  $0 \sim P_0$  范围内时, 燃气发动机停止运转,  $P_c$  完全由蓄电池组来承担。

### 1.3 HPGHP 系统中蓄电池动态负荷特点

与燃气发动机类似, 为了提高蓄电池的循环使用寿命和充放电性能, 蓄电池也有一个荷电状态(state of charge, SOC)上下临界点(20%~80%), 如图 3 所示。在系统运行过程中, 蓄电池的荷电状态必须始终处在 SOC 临界范围内<sup>[4]</sup>, 当 SOC 接近下临界点时, 需立即停止放电, 否则会导致蓄电池过度放电, 影响蓄电池的性能, 此时需改为由发动机承担压缩机负荷, 并向蓄电池充电; 当 SOC 接近上临界点时, 需立即停止充电, 否则会导致蓄电池充电过度, 也会影响蓄电池的性能<sup>[4-6]</sup>。

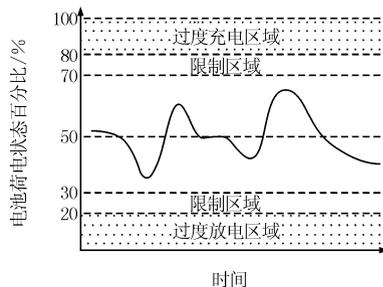


图 3 蓄电池荷电状态-时间变化关系

通过对燃气发动机工作区域、蓄电池 SOC 状态的控制, 在满足空调负荷的同时, 建立相关控制策略和方法, 以系统最小燃料消耗量、最佳热泵空调系统性能为控制目标, 可以达到节能、提高燃料利用率的目的。

### 1.4 HPGHP 系统中两种动力能量耦合简化数学模型

与常规燃气热泵空调系统(GHP)的发动机相比, HPGHP 系统发动机的标定功率要小些, 这是因为在 HPGHP 系统中, 蓄电池组对燃气发动机功率起到了削峰填谷的作用, 满足空调负荷的压缩机需求功率可以超过发动机的最大功率, 而在常规 GHP 系统中, 满足空调负荷的压缩机需求功率必须在发动机的功率范围之内。HPGHP 系统中两种能量耦合的流程如图 4 所示。

为了简化计算, 作如下假设: 1) 假设 HPGHP 系统中蓄电池组经过一个压缩机需求负荷周期后,

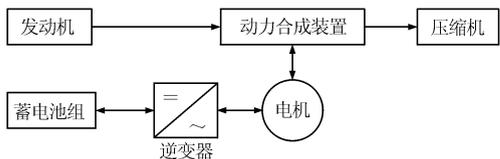


图 4 混合动力燃气热泵空调系统能量耦合流程简图

荷电状态 SOC 恢复到初始的荷电状态,即蓄电池组在一个压缩机需求负荷周期内所充的电全部放掉,所放的电全部来自所充的电;2) 不考虑蓄电池组在充放电过程中的散热;3) 假设在一个压缩机需求负荷周期内,压缩机需求负荷按照负荷率 100%,75%,50%,25%阶段跳跃式变化,且各自的概率因子为  $A, B, C, D$ ;4) 假设在一个压缩机需求负荷周期内,发动机始终工作在 75%~100%输出功率范围内,发动机额定输出功率与制冷系统最大需求负荷匹配。

根据以上假设,混合动力燃气热泵系统对压缩机输送功率的热效率  $\eta_h$  为

$$\eta_h = \{[\eta_{11}(A+B) + \eta_{12}(C+D)]\beta + \eta_{12}\eta_2^2\eta_3\eta_4(1-\beta)\}\eta_5 \quad (1)$$

常规的燃气热泵系统对压缩机输送功率的热效率  $\eta_c$  为

$$\eta_c = \eta_{11}A + \eta_{12}B + \eta_{13}C + \eta_{14}D \quad (2)$$

式(1),(2)中  $\eta_{11}, \eta_{12}, \eta_{13}, \eta_{14}$  分别为发动机输出负荷 100%,75%,50%,25%时的热效率; $\beta$  为发动机直接对压缩机输送的功率占整个压缩机功率的比例; $\eta_2$  为逆变器交直流互变的效率; $\eta_3$  为发电机效率; $\eta_4$  为电动机效率; $\eta_5$  为动力合成装置和压缩机之间的轴效率。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 参数选择

在 HPGHP 系统中,  $\eta_2$  取 0.85,  $\eta_3$  取 0.9,  $\eta_4$  取 0.9,  $\eta_5$  取 0.98。发动机负荷率 100%,75%,50%,25%时的热效率分别为 0.38,0.36,0.32,0.28。

### 2.2 计算结果分析

要比较 GHP 系统和 HPGHP 系统的性能,只需比较两种热泵对压缩机提供动力的热效率。从图 5 可以看出,当概率因子  $A, B, C, D$  不变时,  $\beta$  值有一个临界值  $\beta_0$ ,当  $\beta = \beta_0$  时,  $\eta_h = \eta_c$ ,当  $\beta < \beta_0$  时,  $\eta_h < \eta_c$ ,当  $\beta > \beta_0$  时,  $\eta_h > \eta_c$ 。表明在 HPGHP 系统中,  $\beta$  高于某个临界值时, HPGHP 系统的热效率  $\eta_h$  比 GHP 系统的热效率  $\eta_c$  高。

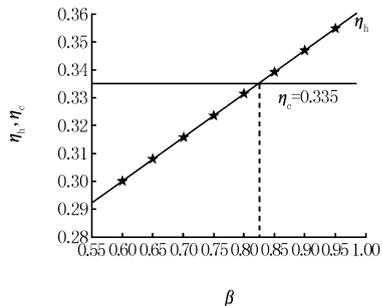


图 5  $\eta_h$  和  $\eta_c$  与  $\beta$  的变化关系  
( $A=0.25, B=0.25, C=0.25, D=0.25$ )

图 6 表明,临界值  $\beta_0$  随概率因子  $A, B, C, D$  取值的不同而发生变化,其中  $A, B$  取值越大,临界值  $\beta_0$  越大,表明在 HPGHP 系统中,当压缩机功率高负荷运行工况占多数时,  $\beta$  应该比较大,否则 HPGHP 系统的热效率  $\eta_h$  会低于 GHP 系统的热效率  $\eta_c$ ;反之,当压缩机功率低负荷运行工况占多数时,  $\beta$  取较小的值时(也就是蓄电池组对压缩机输送的功率占压缩机总需求功率的比例较大时),就可以使得 HPGHP 系统的热效率  $\eta_h$  高于 GHP 系统的热效率  $\eta_c$ 。

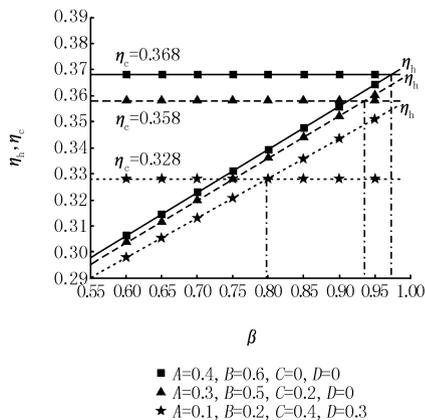


图 6  $\eta_h$  和  $\eta_c$  与不同部分负荷概率因子及  $\beta$  的变化关系

综上所述,要提高混合动力燃气热泵空调系统中动力系统的热效率,亟待解决的关键问题是动力合成装置与制冷系统压缩机的动态负荷匹配,对蓄电池组和燃气发动机功率进行有效的能量管理是解决问题的一个有效途径。蓄电池组容量不仅与动力系统有关,还与热泵空调负荷、系统初投资、蓄电池组散热损失等因素有关,如何确定蓄电池组容量与发动机功率的匹配是需要深入研究的问题。

表 3 计算结果

目的	■效率/%	■损失/kW	■损失率/%
冷却水系统	10.94	359.3	13.9
制冷机系统	43.40	904.5	35.1
空气处理系统	31.30	929.4	36.0
空调对象系统	33.50	386.3	15.0
整个空调系统	7.10	2 579.5	100

表中, ■损失率计算式为  $\alpha_k = \frac{\Delta E_{x,k}}{\sum_{i=1}^4 \Delta E_{x,i}}$ 。

#### 4 结论

随着人类活动对生态环境的改变和破坏的日益加深,已经非常有必要重新审视空调制冷技术的应用给人们带来的利与弊。本文利用热力学第二定律的 ■分析方法,对常规空调系统进行了分析,得出以下结论。

4.1 从节能和环保的观点看,传统的空调方式在能量利用方面有许多不合理性,其消耗的是大量高品位的机械能,而换取的却是低品位冷量 ■,能量的质量不匹配。要实现空调系统的真正节能,不仅仅是从数量上节约,更重要的是要做到能质匹配,从用能方式上进行本质的改变。应探讨尽可能大量地使用低品位的能量,例如天然冷源,做到能质匹配。目前正在推广和应用的较

高温度低温水大面积冷辐射吊顶技术,正是这方面的一种体现。

4.2 输送能耗占空调能耗的比例较大,要从输送方式、气流组织方式上研究、开发和推广新的空调方式。例如,直接制冷剂系统和独立新风系统新技术。

4.3 空调房间的 ■损失较大的原因在于输送和利用的能质的不匹配。应在减小温差和增大流量之间进行合理选择。

4.4 合理的空调系统,仅利用冷或热都是不尽合理的,应该是冷热兼用,例如制冷系统冷凝热和排风余热的利用等。

#### 参考文献

- [1] 宋之平,王加璇. 节能原理[M]. 北京:水利电力出版社,1985
- [2] 朱明善. 能量系统的 ■分析[M]. 北京:清华大学出版社,1985
- [3] 傅秦生. 能量系统的热力学分析方法[M]. 西安:西安交通大学出版社,2005
- [4] 陈宏方. 高等工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社,2003
- [5] 宋孝春. 民用建筑制冷空调设计资料集[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003

(上接第 13 页)

#### 3 结论

3.1 在 HPGHP 系统中,对蓄电池组的荷电状态 SOC 和发动机输出功率进行合理而有效的能量管理是获得整个系统最佳燃料经济性的有效途径。

3.2 在 HPGHP 系统中,发动机直接对压缩机输送的功率与整个压缩机功率的比值是影响动力系统热效率的关键因素之一,只有当这个比值高于某个临界值时,HPGHP 系统的动力系统的热效率才高于常规的 GHP 系统的动力系统。

3.3 在 HPGHP 系统中,当压缩机需求功率低负荷运行工况占多数时,蓄电池组对压缩机输送的功率在一定的比例范围内增大,可以保证 HPGHP 系统的动力系统的热效率高于 GHP 系统的动力系统。

#### 参考文献

- [1] Emadi A, Rajashekara K, Williamson S S, et al. Topological overview of hybrid electric and fuel cell

vehicular power system architectures and configurations[G]// IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005,54 (3): 763-770

- [2] Arai J, Yamaki T, Yamauchi S, et al. Development of a high power lithium secondary battery for hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2005, 146 (1/2): 788-792
- [3] Huang K D, Tzeng S C. A new parallel-type hybrid electric-vehicle[J]. Applied Energy, 2004, 79 (1): 51-64
- [4] Nelson R F. Power requirements for batteries in hybrid electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2000,91 (1): 2-26
- [5] Lukic S M, Emadi A. Effects of drive train hybridization on fuel economy and dynamic performance of parallel hybrid electric vehicles[G]// Vehicular Technology on IEEE Transactions, 2004, 53(2):385-389
- [6] Al-Hallaj S, Selman J R. Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications[J]. Journal of Power Sources, 2002,110(2): 341-348