

基于专家PID的燃气机转速控制试验

王明涛¹ 张百浩²

(1. 鲁东大学 能源与动力工程系, 山东 烟台 264025; 2. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘要: 根据历史数据和专家经验设计了燃气机转速专家PID控制器,对燃气机突加负载转速控制、燃气机变转速控制和抗干扰性能进行实验研究。结果表明:突加负载后燃气机没有出现转速降低或熄火现象,而是达到新的稳定工况且时间小于10 s;变转速调节过程中转速没有出现超调,燃气机达到新的稳定工况,时间小于20 s,专家PID控制器表现出良好的动态响应特性;对于过热度变化引起的燃气机转速波动,专家PID控制器表现出较好的抗干扰性能。

关键词: 燃气机热泵; 转速控制; 专家PID; 突加负载; 变容量; 抗干扰性能

中图分类号: TK323 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.006

引言

燃气机热泵是利用燃气发动机驱动蒸气压缩式热泵,同时回收发动机余热,实现供冷、供热的节能环保空调装置^[1]。燃气机热泵运行过程中,燃气机工况可以分为怠速工况、稳定工况和过渡工况^[2]。怠速工况和稳定工况时发动机负载和转速都比较稳定^[3];而在过渡工况下(系统负荷变化、热泵变容量调节等)热泵系统内制冷剂流量和压比的变化会引起压缩机扭矩变化,从而导致燃气机转速波动,甚至熄火或飞车。此外,燃气机的时间常数和延迟时间同热泵系统相比都非常小,如果调节不及时准确,容易产生较大的转速波动,进而造成热泵系统内制冷剂流量大幅度变化^[4]。因此,为了保证燃气机热泵的高效稳定运行,需要对燃气机转速进行有效控制。

目前,国内外学者对活塞式内燃机转速控制方式的研究主要集中于PID控制、模糊控制、变结构控制和神经网络控制等。来晓靓等人利用负荷预测PID控制方法对发动机转速进行调节^[5],可以有效改善混合动力系统中发动机的转速波动;罗小青等

人开发了PID-Fuzzy怠速控制模型^[6],怠速的最大偏差为 ± 19 r/min;廉美琳等人设计的模糊神经网络PID控制器^[7],发动机启动后仅需5 s就可以达到设定的目标转速,偏差为 ± 6 r/min;李书泽在天然气热泵系统中利用PI控制器调节燃气机转速,并进行了大量的转速控制试验,取得了良好的控制效果^[8];徐振军将神经网络非线性PID应用到燃气机的转速控制,神经网络非线性PID控制下的燃气机转速波动率小于0.5%,稳定时间小于5 s,具有良好的动态性能^[9]。

目前,发动机转速控制策略主要应用于汽车发动机的怠速控制,而应用于燃气机热泵系统中的燃气机转速控制较少。同汽车发动机的怠速工况相比,燃气机运行工况要复杂得多:(1)当外部参数和用户需求变化时,燃气机热泵需要变转速(负荷)运行;(2)供气压力变化或干扰因素会使发动机转速产生波动,甚至熄火或飞车;(3)系统运行过程中,燃气机的负载(扭矩)变化范围较大,其动、静态特性在较大范围波动,单一的控制参数难以满足控制要求。因此,本研究根据燃气机热泵系统特性、专家经验以及燃气机的不同运行工况,设计了基于专家PID的燃气机转速控制策略,并对不同运行工况的燃气机转速控制进行了实验。

1 燃气机热泵及燃气机转速控制装置

图1是燃气机热泵系统工作原理图,该系统主要由燃气发动机、蒸气压缩式热泵及数据采集和控制系统组成。数据采集和控制系统包括压力传感器、温度传感器、转速传感器、可编程控制器和步进电机等。

收稿日期: 2015-01-30; 修订日期: 2015-03-14

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2014EFP026); 鲁东大学科研基金资助项目(27860301)

作者简介: 王明涛(1983-),男,山东烟台人,鲁东大学讲师、博士。

利用霍尔传感器测量燃气机转速,为了减少误差,对燃气机转速的测量值采用平均移动滤波法进行了数字滤波。选用两相混合式步进电机及其驱动器作为执行机构,驱动节气门步进电机旋转,进而控制节气门开度大小,改变燃气机进气量,达到调节燃气机转速的目的。

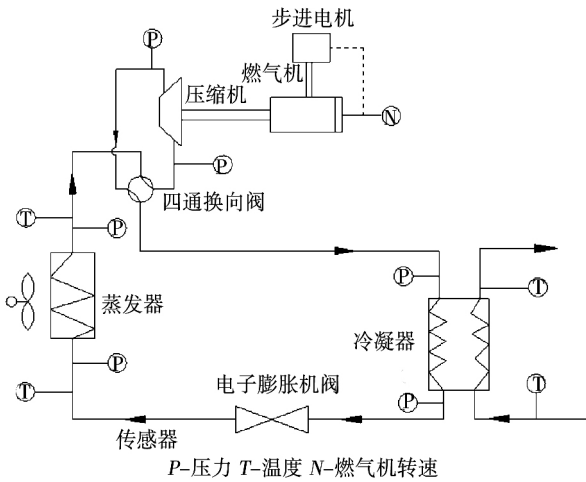


图 1 燃气机热泵系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of gas engine-driven heat pump

2 燃气机模型

在空燃比保持不变的情况下,转速控制的基本输入量是进气量。节气门开度增大时,进入气缸的空气质量增加,混合气量相应增加,燃气机输出扭矩增大,以补偿外界负载扭矩的扰动,使燃气机转速稳定在设定的目标转速^[10]。因此,燃气发动机的动态特性主要由进气管系统、进气—做功时间延迟、燃气机曲轴旋转动态特征 3 部分组成,其简化的模型结构如图 2 所示^[11]。

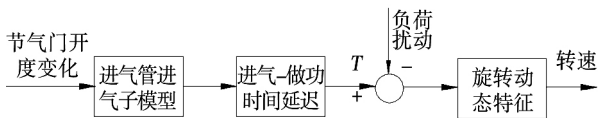


图 2 简化的燃气机模型结构

Fig. 2 Simplified model of gas engine

进气管动态特性和发动机的旋转动态特性可用一阶惯性环节来表示。对于四冲程发动机而言,其

进气管和进气道的容积非常小,进气管的充排效应相对较小,可以忽略进气管的瞬态特性。进气—做功时间延迟,取决于燃气机工作行程的离散特性,不能忽略^[12]。由此可以得到燃气机节气门输入对燃气机转速输出的传递函数为:

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: K —比例增益; T —时间常数; τ —时间延迟。

基于上述燃气机模型,燃气机转速稳定在 1 300 r/min、在燃气机的输入端施加阶跃信号(步进电机步数增加 48 步时)时燃气机转速的响应曲线,如图 3 所示。经最小二乘法辨识得到燃气机转速对步进电机的传递函数为:

$$G(s) = \frac{6.6}{0.6948s + 1} e^{-0.975s} \quad (2)$$

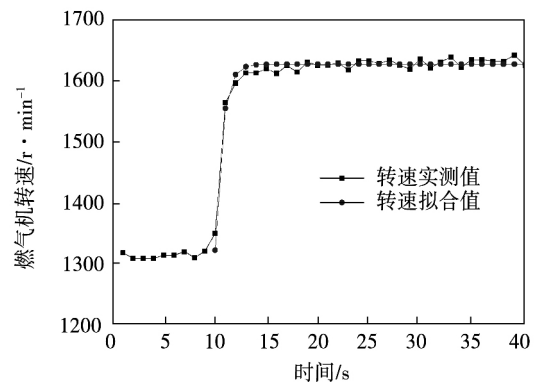


图 3 燃气机转速阶跃响应拟合结果

Fig. 3 Fitting result of engine rotary speed step response

3 专家 PID 控制器设计

燃气机转速专家 PID 控制原理如图 4 所示,控制器包括知识库、控制规则集、推理机和特征识别信息处理部分。PID 专家控制器根据工况边界条件,确定燃气机所处的运行工况,选取对应工况的 PID 参数。

本研究采用增量式 PID 控制:

$$\Delta u_n(i) = K_p [e(n) - e(n-1)] + \frac{K_p T_s}{T_i} e(n) +$$

$$\frac{K_p T_d}{T_s} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \quad (3)$$

式中: K_p —比例系数; T_i —积分时间常数; T_d —微分时间常数; T_s —采样时间 s ; $\Delta u_n(i)$ —第 i 次采样步进电机输出步数; $e_n(i)$ —第 i 次采样燃气机转速偏差 r/min 。

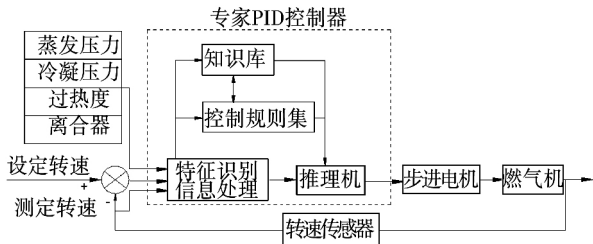


图 4 专家 PID 燃气机转速控制原理

Fig. 4 The principle of expert PID Engine rotary speed controller

3.1 知识库

实现燃气机转速有效控制的关键是燃气机工作区间知识库的建立。根据燃气机热泵的运行特性,结合人工经验和专家知识,将燃气机的运行过程分为 3 种工况:

(1) 接通离合时的燃气机转速控制。当接通离合器时,此时对燃气机突加一个较大的负载;

(2) 燃气机转速的抗干扰性能。蒸发器过热度变化、系统负荷波动时,将导致系统制冷剂流量和压比发生变化,从而会引起压缩机的负载扭矩变化,对燃气机转速的稳定性造成干扰;

(3) 热泵系统变容量调节时,燃气机的转速控制。当系统负荷发生变化时,需要实时调节燃气机转速,从而改变压缩机转速,使热泵系统制冷(热)量与建筑物负荷相匹配。

根据以上工况,利用 Ziegler - Nichols 方法整定 PID 控制参数,并结合燃气机转速控制实验,修正不同工况下的最佳 PID 参数。

3.2 控制规则集

燃气机转速专家 PID 控制规则:

A: 接通离合器时,表明突然加上很大负载,则步进电机输出 n_1 步; 关闭离合器时,表明突然卸载,则步进电机同时输出 $-n_1$ 步,即:

$$\text{规则 1: IF } Q1.0 = 0 \Rightarrow Q1.0 = 1$$

$$\text{THEN } \Delta u_n(i) = n_1$$

$$\text{规则 2: IF } Q1.0 = 1 \Rightarrow Q1.0 = 0$$

$$\text{THEN } \Delta u_n(i) = -n_1$$

B: 当转速设定值不变,燃气机转速偏差在 $\pm 50 r/min$ 以内,则认为转速进入稳定状态,步进电机输出保持不变; 当转速设定值不变,转速偏差大于 $\pm 50 r/min$,则认为转速受到干扰,启动转速抗干扰控制程序,即:

规则 3: IF

$$n(i) = n(i-1) \text{ AND } |\Delta e_n(i)| \leq 50 \text{ r/min}$$

$$\text{THEN } \Delta u_n(i) = 0$$

规则 4: IF

$$n(i) = n(i-1) \text{ AND } |\Delta e_n(i)| > 50 \text{ r/min}$$

THEN

$$Vu(i) = K_{p4} [e(i) - e(i-1) + \frac{T_s}{T_{i4}}]$$

C: 当转速设定值改变,启动变容量调节控制程序,即:

$$\text{规则 5: IF } n_s(i) \neq n_s(i-1)$$

$$\text{THEN } Vu_n(i) = K_{p5} \frac{T_s}{T_{i5}}$$

D: 燃气机转速设定值改变,当转速的超调量超过 $50 r/min$ 时,减少比例增益,减少积分时间; 当转速达到稳态的时间长、收敛慢时,增大比例增益,增大积分时间,即:

$$\text{规则 6: IF } M_p > 50 \text{ r/min}^{-1}$$

$$\text{THEN } K_{p5} \rightarrow \text{小}, T_{i5} \rightarrow \text{小}$$

$$\text{规则 7: IF } t_s > 20 \text{ s}$$

$$\text{THEN } K_{p5} \rightarrow \text{小}, T_{i5} \rightarrow \text{小}$$

规则中: i —第 i 次采样; n_1 —接通离合器步进电机输出步数; $n(i)$ —第 i 次采样燃气机转速, r/min ; $n_s(i)$ —第 i 次采样燃气机设定转速, r/min ; K_{p4} 、 K_{p5} —规则 4 和规则 5 的比例系数; T_{i4} 、 T_{i5} —规则 4 和规则 5 的积分时间 s ; $Q1.0$ —离合器开关; M_p —转速的最大超调量, r/min ; t_s —转速调节过程的时间 s 。

3.3 推理机

PID 专家控制器根据特征参数进行推理,第一步启动特征识别程序,判断每种运行工况的特征参数临界值,确定燃气机运行工况; 第二步推理求解,根据运行工况,运用规则集进行推理求解,确定采用的控制程序; 第三步整定,运行新的控制程序,以期得到控制性能的改善。当控制系统性能满足控制要求时,则参数整定结束,否则进入离线整定控制器

参数。

4 实验结果及讨论

当接通热泵系统的离合器时,相当于对燃气机突加负载,如果控制不合理,很可能造成燃气机熄火或飞车。图 5 是燃气机总速为 900 r/min、69 s 接通热泵系统的离合器、转速设定值由 900 r/min 变为 1 350 r/min 时燃气机转速动态响应过程。从图中可以看出,燃气机没有出现转速降低或熄火,达到新的稳定工况的时间小于 10 s,开机过程表现出良好的动态响应特性。

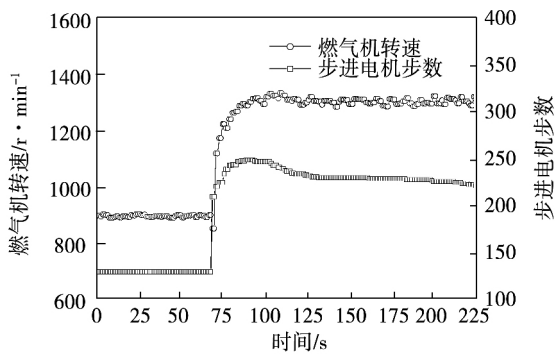


图 5 燃气机转速动态响应

Fig. 5 Dynamic response of gas engine revolving speed

图 6 是转速设定值由 1 700 r/min 变为 1 900 r/min 时,燃气机转速的动态响应过程。由图可知,大范围的转速阶跃工况下,燃气机转速表现出良好的动态特性,没有出现超调,调节过程时间小于 20 s。

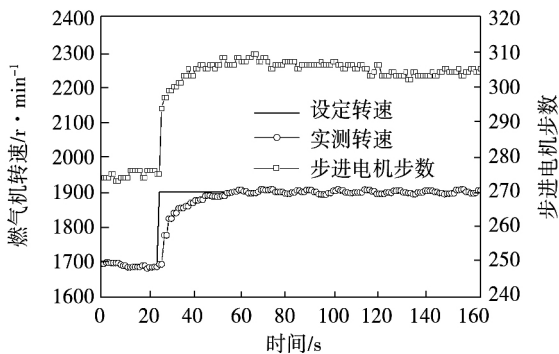


图 6 燃气机转速动态响应
(1 700 - 1 900 r · min⁻¹)

Fig. 6 Dynamic response of gas engine revolving speed (1 700 - 1 900 r · min⁻¹)

当系统负荷变化时,燃气机热泵可以通过改变燃气机(压缩机)转速调节系统制冷(热)量,使之与外界负荷相匹配。图 7 是燃气机热泵变容量调节过程燃气机转速动态响应过程。从图中可以看出,燃气机转速由 1 300 r/min 升高到 2 000 r/min,然后又依次降至 1 300 r/min 的整个运行过程中,每次转速设定值改变,燃气机转速响应速度很快,调节过程时间小于 20 s,没有出现超调,专家 PID 控制器表现出良好的动态响应特性,为燃气机热泵的变容量调节奠定基础。

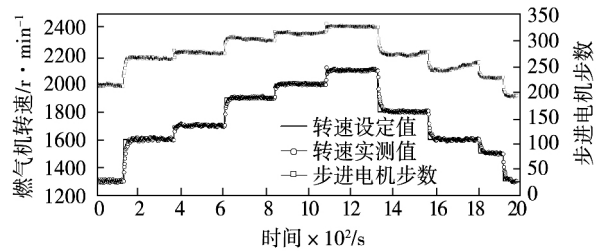


图 7 变容量调节燃气机转速动态响应过程

Fig. 7 The response process of varying capacity adjusting gas engine revolving speed

改变蒸发器的过热度,系统内的制冷剂流量和压比会发生变化,从而引起压缩机的负载(扭矩)波动,对燃气机转速造成干扰。图 8 是燃气机转速在 1 700 r/min 时,改变蒸发器过热度,燃气机转速在负荷扰动下的动态响应过程。从图中可以看出,过热度设定值由 5 降至 3 °C,又升高至 7 和 9 °C,随后降至 6 和 8 °C,过热度每次变化时,燃气机转速会有一个小波动过程,随后经过转速控制器的有效控制,又重新达到新的稳态,调节过程时间小于 30 s,燃气机转速没有出现过大超调,波动范围小于 50 r/min,专家 PID 控制器表现出良好的抗干扰性能。

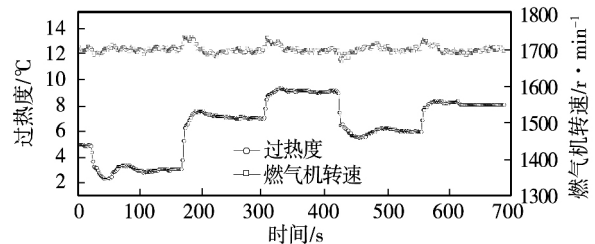


图 8 过热度变化时燃气机转速的响应曲线

Fig. 8 The response curve of gas engine revolving speed when superheat changing

5 结 论

(1) 对于可预测的突加负载和负载变化的工况,专家 PID 控制器对其进行前馈控制,可以有效减少燃气机转速的波动,增加了燃气机热泵系统的稳定性。接通离合器过程中,燃气机转速基本没有产生波动,控制效果良好。

(2) 变容量调节转速控制中,专家 PID 控制的动态响应过程平稳,呈现单向的增加,没有出现超调和波动,具有良好的变容量调节特性。

(3) 当蒸发器过热度变化时,会对燃气机转速稳定性产生干扰。对于过热度变化引起的燃气机转速波动,专家 PID 控制效果良好,转速波动范围小于 50 r/min,调节过程时间小于 30 s,表现出良好的抗干扰性能。

参考文献:

- [1] YANG Zhao ,CHENG Heng ,WU Xi. Research on improving energy efficiency and the annual distributing structure in electricity and gas consumption by extending use of GEHP [J]. Energy Policy , 2011 ,39(9) : 5192 -5202.
- [2] XU Zhen-jun ,WU Huai-zhi ,WU Mei-ling. Energy performance and consumption for biogas heat pump air conditioner [J]. Energy , 2010 ,35(12) : 5497 -5502.
- [3] TAGHAVIFAR H ,KHALILARY S ,MIRHASANI S ,et al. Numerical energetic and exergetic analysis of CI diesel engine performance for different fuels of hydrogen ,dimethyl ether and diesel under various engine speeds[J]. International Journal of Hydrogen Energy , 2014 ,39(17) : 9515 -9526.
- [4] 王明涛 ,杨 昭. 燃气机热泵改变制冷剂流量的增益调度控制 [J]. 热能动力工程 2011 ,26(6) : 654 -659.
WANG Ming-tao ,YANG Zhao. Gain dispatchment Control of a Gas-engine-driven Heat Pump by Changing the Flow Rate of Its Refrigeration Agent [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2011(6) : 654 -659.
- [5] 来晓靛 ,管 成 ,肖 扬 等. 并联油液型混合动力挖掘机发动机转速控制方法 [J]. 农业机械学报 2014 ,45(1) : 14 -20.
LAI Xiao-liang ,GUAN Cheng ,XIAO Yang ,et al. Engine Speed Control Method of Parallel Hydraulic Excavator [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering 2014 ,45(1) : 15 -20.
- [6] 罗小青 ,黄云奇. 基于 PID-Fuzzy 理论的发动机怠速控制系统研究 [J]. 小型内燃机与摩托车 2010 ,39(3) : 1 -4.
LUO Xiao-qing ,HUANG Yun-qi. Research of Engine Idle Speed Control System Based on the Theory of PID-Fuzzy [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle 2010 ,39(3) : 1 -4.
- [7] 廉美琳 ,陈泽宇 ,顾志华 等. 基于模糊神经网络整定的汽油机怠速 PID 控制 [J]. 南京师范大学学报(工程技术版) 2012 ,12(4) : 6 -10.
LIAN Mei-lin ,CHEN Ze-yu ,GU Zhi-hua ,et al. PID Control of Engine Idle Speed Based on Fuzzy Neural Network [J]. Journal of Nanjing Normal University(Engineering and Technology) ,2012 ,12(4) : 6 -10.
- [8] LI Shu-ze ,ZHANG Wu-gao ,ZHANG Rong-rong ,et al. Cascade fuzzy control for gas engine driven heat pump [J]. Energy Conversion and Management 2005 ,46(11-12) : 1757 -1766.
- [9] 徐振军 ,杨 昭 ,方 箏. 燃气机发动机调速控制与试验 [J]. 农业机械学报 2008 ,39(12) : 7 -9.
XU Zhen-jun ,YANG Zhao ,FANG Zheng. Experiment on Neural Network Nonlinear PID Controller for the Natural Gas Engine [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering , 2008 ,39(12) : 7 -9.
- [10] EBRAHIMI B ,TAFRESHI R ,MASUDI H ,et al. A parameter-varying filtered PID strategy for air-fuel ratio control of spark ignition engines [J]. Control Engineering Practice ,2012 ,20(8) : 805 -815.
- [11] 张建良 ,邵金菊 ,魏民祥. 小型航空汽油发动机模糊增益恒转速控制 [J]. 机械科学与技术 2011 ,30(2) : 195 -199.
ZHANG Jian-liang ,SHAO Jin-ju ,WEI Min-xiang. A Fuzzy Gain-Scheduled Speed Controller for a Mini Aviation Gasoline Engine. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering. 2011 ,30(2) : 195 -199.
- [12] JIMBO T ,HAYAKAWA Y. A physical model for engine control design via role state variables [J]. Control Engineering Practice , 2011 ,19(3) : 276 -286.

(丛 敏 编辑)

($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) to $1\,000\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and the temperature fell in a range from $25\text{ }^\circ\text{C}$ to $400\text{ }^\circ\text{C}$. Through an analysis the feasibility to measure the void fraction in a section of a subcritical steam-liquid two-phase flow by adopting the γ -ray method was investigated and the influence of the mass flow rate, pressure and temperature of the working medium on the measurement results by using the γ -ray method was also analyzed. It has been found that the mass flow rate and pressure of the working medium will have almost no influence on the measurement of the void fraction in a section of a subcritical steam-liquid two-phase flow by adopting the gamma-ray method while a change in the temperature by a great margin will exercise a relatively marked influence on the measurement. A comparison of the test and measurement values with those calculated by using the classic theoretical formula shows that the test and measurement values are in very good agreement with those calculated by using the Smith formula. **Key words:** sectional void fraction, γ -ray, gas-liquid two-phase flow, subcritical

基于专家 PID 的燃气机转速控制试验 = **Experiment of the Rotating Speed Control Over a Gas Engine Based on an Expert PID (Proportional Integral and Differential) Control Method** [刊, 汉] WANG Ming-tao (College of Energy Source and Power Engineering, Ludong University, Yantai, China, Post Code: 264025) ZHANG Bai-hao (College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, Post Code: 300072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(6). - 848 - 852

According to the historic data and experience from experts, designed was a rotating speed controller for gas engines based on the expert PID control method and experimentally studied were the rotating speed control of a gas engine when it was suddenly added with a load, variable speed control and anti-interference performance of the gas engine. It has been found that no rotating speed reduction and flame failure occurs to the gas engine when it is suddenly added with a load and the time required for attaining a new steady operating condition is less than 10 seconds. No overshoots of the rotating speed emerge during the variable speed control process and the time required for attaining a new steady operating condition is less than 20 seconds. The expert PID controller exhibits its good dynamic response characteristics and for the fluctuation arisen from changes of the superheating degree of the gas engine, the expert controller also displays its relatively good anti-interference performance. **Key words:** gas engine-driven heat pump, rotating speed control, expert PID (proportional, integral and differential), suddenly-added load, variable capacity, anti-interference performance