

## 汽油发电机转速前馈-反馈控制系统

段其昌<sup>1</sup>, 段 盼<sup>2</sup>, 董 平<sup>3</sup>, 程 伟<sup>1</sup>, 林 森<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044;  
3. 南京中兴力维软件有限公司, 江苏 南京 211153)

**摘要:** 汽油机的转速稳定性是影响汽油发电机电气性能指标的一个重要因素, 本文在分析其工作原理的基础上提出了一种电流前馈、转速负反馈式的系统结构, 并且把反馈控制器设计为模糊控制、PID控制和保持模态相结合的多模态控制器. 利用MATLAB工具进行的仿真和实际配机试验结果都表明, 采用此算法后该转速控制系统的稳态性能和动态切换性能都比采用常规PID控制时有明显改善, 证实了所提方法的有效性.

**关键词:** 汽油发电机; 电流前馈; 多模态控制; 模糊控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Feedforward-feedback speed control system of gasoline generator

DUAN Qi-chang<sup>1</sup>, DUAN Pan<sup>2</sup>, DONG Ping<sup>3</sup>, CHENG Wei<sup>1</sup>, LIN Sen<sup>1</sup>

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
3. Nanjing ZTE LiWei Software Ltd, Nanjing Jiangsu 211153, China)

**Abstract:** The speed stability of a gasoline generator is an important factor that affects its electrical performances. To tackle this problem, we propose a control system consisting of current feedforward and speed feedback in a closed-loop. The feedback controller is a multimodal controller composed of the fuzzy control, PID and maintain mode. Simulation of speed control is implemented by MATLAB, and the experimental results show that the present controller has superior characteristics in the static and dynamic performances of speed stabilization, in the comparison with the traditional PID scheme. It is efficient in speed regulation for gasoline generator.

**Key words:** gasoline generator; current feedforward; multimode control; fuzzy control

### 1 引言(Introduction)

小型汽油机具有体积小、重量轻、价格低廉、使用方便等显著优点, 因而具有广阔的发展前景. 近年来我国小型汽油机的品种、产量、出口量都得到迅速增长. 但随着国民经济的发展, 对小型汽油机的排放、噪声等系列质量指标都有了更严格的要求. 调速性能是影响小型汽油机诸多质量指标的一个关键因素, 目前小型汽油机转速调节主要通过机械元件来实现, 存在惯性滞后严重及摩擦阻力大、调节粗糙等缺陷, 转速调节精度和自动化程度都较低<sup>[1]</sup>.

汽油发动机具有非线性、多工况的特点, 其动态特性随转速和负载的变化而变化. 目前, 已有一部分学者对汽油机的控制进行了研究. 在文献[2, 3]中, 分别应用滑模控制、 $u$ 综合方法针对汽车用汽油机的转速控制进行了研究, 而文献[4, 5]分别应用QFT鲁棒控制,  $H_\infty$ 动态输出反馈控制对小型无人直升机发动机的恒速控制进行了研究, 但其只进行了仿真分析, 未有实际配机试验结果.

在上述的几种控制方法中, 大多将发动机系统视为单一的一类不确定或参数摄动系统来进行研究, 未考虑发动机在不同工况下的不同动态性能, 也未从负载扰动前馈补偿的角度来改善系统动态性能. 本文分析了小型汽油发电机工作机理, 得出破坏系统稳态的主要因素为系统负载的突变, 对于这类扰动, 可以采用前馈补偿的方法来消除. 因此, 提出一种结合前馈控制、传统PID、模糊控制等方法的前馈-多模态反馈控制算法. 采用此种方法, 对系统在工况变化时采用模糊控制, 在稳态时采用线性PID控制, 并利用前馈补偿来抑制负载扰动. 通过仿真分析和配机试验均证实这种方法对改善小型汽油发电机稳态和动态综合性能具有有效性.

### 2 汽油发电机建模(Modeling of gasoline generator)

汽油发电机包括一对共轴安装的汽油机和同步发电机. 四冲程汽油机的一个工作循环由进气、压缩、燃烧膨胀、排气4个冲程组成, 其中燃烧膨胀冲

程是产生转矩的. 汽油机与负载转矩的平衡公式为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(T_{\text{eng}} - T_{\text{load}}), \quad (1)$$

其中:  $\omega$ 是汽油机角速度, 单位rad/s;  $t$ 是时间,  $J$ 是汽油机的转动惯量,  $T_{\text{eng}}$ 是汽油机输出转矩,  $T_{\text{load}}$ 是负载转矩. 下文将对4个冲程建立数学模型.

1) 进气冲程建模, 表示了给定转速和节气门开度下汽缸中进气量、进油量的数值. 假定节气门的开度角为 $\theta$ , 单位是度, 那么进气管(喉管)进入的气体流速可以表示为两个函数的乘积<sup>[6,7]</sup>:

$$m_{\text{ai}} = f(\theta) \cdot g(P_{\text{m}}), \quad (2)$$

其中:  $m_{\text{ai}}$ 为进入进气导管的质量流速, 单位是g/s;  $P_{\text{m}}$ 是导管压力, 单位bar,  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ . 该乘积项中因子 $f(\theta)$ 是关于节气门开度角的经验公式函数:

$$f(\theta) = 2.821 - 0.052\theta + 0.103\theta^2 - 0.0063\theta^3. \quad (3)$$

因子 $g(P_{\text{m}})$ 是关于导管压力的函数:

$$g(P_{\text{m}}) = \begin{cases} 1, & P_{\text{m}} < \frac{P_0}{2}, \\ \frac{2}{P_0} \sqrt{P_{\text{m}}P_0 - P_{\text{m}}^2}, & \frac{P_0}{2} < P_{\text{m}} < P_0. \end{cases} \quad (4)$$

其中 $P_0$ 为大气压, 单位是bar.

综合公式(2)~(4), 就得到了以节气门开度、外界大气压和导管压力为输入, 以进入进气导管的质量流速为输出的方程式.

根据气体状态方程, 喉管处的压力变化可以表示成进入和流出喉管的气体质量流速的函数:

$$\frac{dP_{\text{m}}}{dt} = \frac{RT}{V_{\text{m}}}(m_{\text{ai}} - m_{\text{o}}), \quad (5)$$

其中:  $R$ 是与气体状态相关的常数,  $V_{\text{m}}$ 是进气导管的容积,  $m_{\text{ai}}$ 为进入进气导管的质量流速,  $m_{\text{o}}$ 是流出进气导管的质量流速.

在特定的汽油机转速下, 流出喉管的总质量流速 $m_{\text{o}}$ 和导管压力 $P_{\text{m}}$ 、转速 $\omega$ 之间存在着如下的经验公式:

$$m_{\text{o}} = -0.366 + 0.08979\omega P_{\text{m}} - 0.0337\omega P_{\text{m}}^2 + 0.0001\omega^2 P_{\text{m}}. \quad (6)$$

其中 $\omega$ 为汽油机的角速度.

2) 压缩冲程相对于进气冲程延迟一个角度, 用纯时间延迟来模拟.

3) 膨胀做功冲程, 产生的平均转矩参照了参考文献[6]中用回归方程方法得出的实验结论, 表示成

$$T_{\text{eng}} = -181.3 + 37.96m_{\text{ao}} + 4.91\frac{A}{F} - 0.85\left(\frac{A}{F}\right)^2 + 0.26\sigma - 0.0028\sigma^2 + 0.027\omega - 0.000107\omega^2 + 0.00048\sigma\Omega + 2.55\sigma m_{\text{ao}} - 0.05\sigma^2 m_{\text{ao}}. \quad (7)$$

其中:  $T_{\text{eng}}$ 是汽油机产生的转矩,  $m_{\text{ao}}$ 是流出喉管的空气质量流速,  $m_{\text{eo}}$ 是流出喉管的燃料质量流速,  $A/F$ 表示空燃比,  $\sigma$ 为点火提前角, 单位是rad.

以空燃比表示混合气的组分不太方便, 它与过量空气系数 $\alpha$ 的关系是<sup>[8]</sup>

$$\frac{A}{F} = \frac{m_{\text{ao}}}{m_{\text{eo}}} = \alpha L_0, \quad m_{\text{o}} = m_{\text{ao}} + m_{\text{eo}}. \quad (8)$$

其中 $L_0$ 是与汽油性质和空气性质燃烧相关的一个常数, 与混合气的成分无关. 从文献[8]可知,  $L_0 = 14.80$ .

4) 排气冲程, 该冲程不产生转矩.

由建模过程可知, 转速形成过程具有形如物理量平方项和变量相乘等非线性及时变性环节, 增加了转速控制的难度.

同步发电机的转速与其发出交流电频率之间存在关系, 其中 $p$ 为极对数,  $n$ 为转速, 单位r/min,  $f$ 是发出的交流电频率, 单位Hz. 空载电势 $E_0$ 可以表示为 $E_0 = C_e \Phi_0 n$ , 其中 $\Phi_0$ 是转子磁通, 对于已经制造好的电机来说,  $C_e$ 是个常数, 称为同步发电机的电动势常数. 电磁阻转矩表示为 $T = C_T \Phi_R I_q$ , 其中 $\Phi_R$ 表示合成磁通量,  $I_q$ 表示电枢电流的交轴分量,  $C_T$ 是转矩常数.

小型同步发电机可以忽略其电枢电阻和漏抗, 这时端电压 $\dot{U}$ 、电枢电流 $\dot{I}$ 、空载电动势 $\dot{E}_0$ 、气隙合成电动势 $\dot{E}_\delta$ 、电枢反应电动势 $\dot{E}_a$ 之间满足如下矢量关系:  $\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 - \dot{E}_a \approx \dot{U}$ ,  $\dot{E}_a = j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$ , 故

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q, \quad (9)$$

其中:  $\dot{E}_0$ 表示转子空载感应电动势;  $\dot{I}_d$ 表示直轴电流分量, 与 $\dot{E}_0$ 成 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ ;  $X_d$ 是直轴电抗;  $\dot{I}_q$ 是交轴电流分量, 与 $\dot{E}_0$ 垂直,  $X_q$ 是交轴电抗. 假定 $\dot{E}_0$ 与电枢电流 $\dot{I}$ 之间的夹角为 $\psi$ , 称为内功率因数角, 得到图1所示的向量图(以带电阻电感性负载的情况为例), 其中 $I_d = I \sin \psi$ ,  $I_q = I \cos \psi$ .

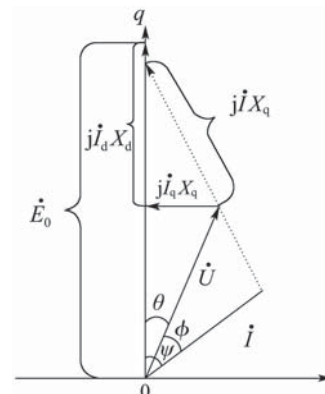


图1 同步发电机向量图

Fig. 1 Vector diagram for synchronous generator

对式(9)在 $d$ 轴和 $q$ 轴进行分解, 得到如下公式:

$q$ 轴和 $d$ 轴分别为:

$$E_0 = U \cos \theta + I_d X_d, \quad (10)$$

$$U \sin \theta = I_q X_q. \quad (11)$$

### 3 系统结构分析(Analysis of system structure)

#### 3.1 控制任务分析(Analysis of control tasks)

在本控制系统中, 同步发电机与汽油机共轴连接, 汽油机的转速稳定性直接决定了发电机的发电质量. 而汽油机内部有一个惯性很大的飞轮, 且发动机内部涉及化学、热、机械、流体等子系统, 整个发动机系统是一个非线性、时变的复杂系统, 只用简单模型很难精确描述其模型结构. 本文从不基于精确模型的智能控制算法出发, 设计了一个多模态反馈控制器来对系统转速进行精确闭环控制.

发动机转速的波动主要是由于发电机负载变化的干扰, 当发电机负载发生切换时, 发电机定子电枢电流 $I$ 首先变化, 引起输出电压、电磁阻转矩的变化, 最终引起发动机转速的变化, 因此定子输出电流 $I$ 直接反映了所加负载的扰动. 根据前馈控制原理, 先检测到定子电枢电流 $I$ 的变化量, 获得了负载变化情况, 再根据此扰动量进行调节. 这样可以有效减少系统过渡时间, 改善调节品质.

综上所述, 所设计的前馈加反馈式汽油发电机转速控制系统结构如图2所示. 实际控制过程可简单描述为: 当负载扰动发生后, 通过电流检测电路可快速得到干扰量 $I_N(n)$ , 干扰量通过前馈控制器, 得到补偿信号输出到控制器后, 产生补偿作用, 及时消除扰动对被控量的影响. 而多模态反馈控制器的作用是保证系统的控制精度.

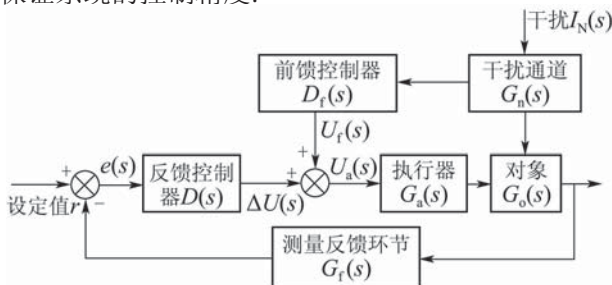


图2 转速控制系统结构图

Fig. 2 Structure of speed regulation system

#### 3.2 前馈控制策略(Strategy of feedforward control)

前馈控制器按照控制规律和控制作用, 可以分为静态前馈和动态前馈两种<sup>[9]</sup>. 由实验可知, 发电机额定电流 $I_N(n)$ 与稳定运行时节气门开度和蝶阀驱动信号之间具有一一对应关系. 通过施加静态前馈作用, 用前馈控制器快速抑制因所加负载变化而引起的转速波动, 前馈控制器输出与干扰量 $I_N(n)$ 关系可

表示为

$$u_f(n) = f(I_N(n)). \quad (12)$$

这个函数是从多次实验获得, 把各个负载等级下的负载-节气门开度、负载扰动量-节气门开度变化值等关系列表存储, 前馈控制器根据所测的负载电流以及扰动量, 输出控制量来调节节气门开度.

#### 3.3 反馈控制策略(Strategy of feedback control)

常规PID算法主要解决线性时不变系统的控制问题. 当固定参数的PID控制器应用于非线性、时变系统和复杂系统时, 随着被控对象的参数发生改变, 系统性能会变差甚至不稳定<sup>[10]</sup>. 这就需要采用其他的控制方法来解决, 常用的有自适应控制、最优控制、模糊控制、神经元控制和专家控制等. 其中, 模糊控制是智能控制系统中常用的一种方法, 它模拟人类的思维方式, 把对复杂系统的控制规则化知识化而且运算迅速, 只是稳定控制精度比PID差. 如果把模糊控制和数字式PID控制结合起来, 这样就既具有模糊控制算法编制灵活和适应性强的优点, 又具有PID控制精度高的特点<sup>[11,12]</sup>. 多模态切换反馈控制器的结构如图3所示.

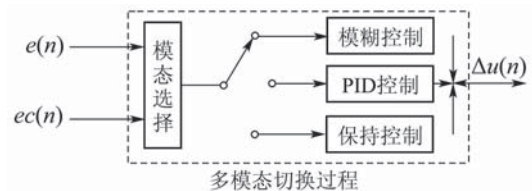


图3 多模态控制的切换机制示意图

Fig. 3 Illustration for the mode switch mechanism of multimode control

其中PID采用增量式PID控制, 表示式如下:

$$\Delta u(n) = u(n) - u(n-1) = K_P[e(n) - e(n-1)] + K_I e(n) T. \quad (13)$$

其中 $T$ 是采样周期. 增量式PID控制只考虑误差增量, 受累积误差的影响较小, 因而有更高的精度; 一定程度上解决了积分饱和问题, 有利于控制的平滑<sup>[13]</sup>. 保持模式即保持当前的控制量不变:

$$u(n) = u(n-1). \quad (14)$$

而模糊控制模态的详细结构如图4所示.

模糊控制算法是由输入定标、模糊化、模糊决策、反模糊化和输出定标5个部分组成的. 本文采用二维模糊控制器, 即以误差 $e$ 、误差的变化量 $ec$ 作为输入, 控制增量 $\Delta u$ 为输出. 语言变量值取7个, 分别为“负大”、“负中”、“负小”、“零”、“正小”、“正中”、“正大”等7个词汇, 用符号表示为NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB. 根据模糊关系 $\Delta u = (e \times ec) \circ R$ , 输入量为 $e$ 和 $ec$ , 输出量为 $\Delta u$ .



根据工程经验和试验总结,得模糊决策规则,见表1.

表1 模糊控制规则  
Table 1 Fuzzy control rules

| $ec$ | $e$ |    |    |    |    |    |    |
|------|-----|----|----|----|----|----|----|
|      | NB  | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB   | NB  | NB | NM | NM | NM | NS | NS |
| NM   | NM  | NM | NS | NS | NS | ZO | PS |
| NS   | NM  | NM | NS | NS | ZO | PS | PM |
| ZO   | NM  | NM | NS | NS | ZO | PS | PM |
| PS   | NM  | NS | ZO | PS | PM | PM | PM |
| PM   | NS  | ZO | PS | PS | PM | PM | PM |
| PB   | PS  | PS | PM | PM | PM | PB | PB |

3.4 反馈控制中的模态及切换问题(Mode and switch problem of feedback control)

在机器启动和负载切换阶段,由于转速偏差和偏差变化率都很大,需要采用模糊控制,利用其对模型参数适应性强的特点,来处理系统中的非线性;当偏差很小或趋于零,此时偏差在允许的范围,使用保

持控制;其他条件下,使用PID控制进行一定的精细调节<sup>[7,8]</sup>. 综上所述,用产生式规则表示的模态切换条件如下:

Rule 1: If  $|e(n)| > M_1$ , or  $e(n) \cdot ec(n) > M_2$ ,  
Then  $\Delta u(n) = K_d \cdot \Delta u = K_d \cdot \sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot \Delta U_i)$ ;

Rule 2: If  $\Delta u(n) = K_d \Delta u = K_d \sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot \Delta U_i)$ ,  
Then  $\Delta u(n) = 0$ ;

Rule 3: If  $M_3 \leq |e(n)| \leq M_1$ , and  $e(n) \cdot ec(n) \leq M_2$ , Then

$$\Delta u(n) = K_p \cdot [e(n) - e(n-1)] + K_I \cdot e(n).$$

其中Rule 1~3分别为模糊控制模态、保持模态和PID控制模态及其切换规则. 需要注意的是,切换阈值 $M_1$ 不可以设置得太小,避免在误差和误差变化已经较小的情况下运行模糊控制;保持控制的进入阈值 $M_3$ 也不可以设置得太大,否则会导致调节过程反复波动和控制不灵敏. 仿真中得到的一个理想组合为 $M_1 = 120, M_2 = 10000, M_3 = 30$ .

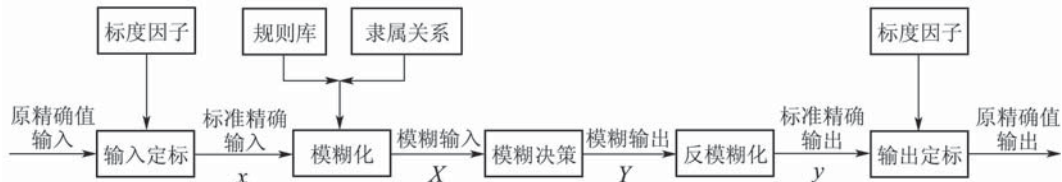


图4 模糊控制器的结构

Fig. 4 Structure diagram of fuzzy controller

4 仿真及试验结果(Results of simulation and experiment)

用MATLAB/Simulink工具建立四冲程汽油发电机的前馈-反馈控制系统模型,如图5所示. 其中

前馈控制器、数字式PID等子系统使用控制工具箱中的现成模块,而汽油机模块、同步发电机模块、模糊控制运算、模态选择函数等需要自定义算法实现. 反馈控制器的MATLAB结构如图6所示.

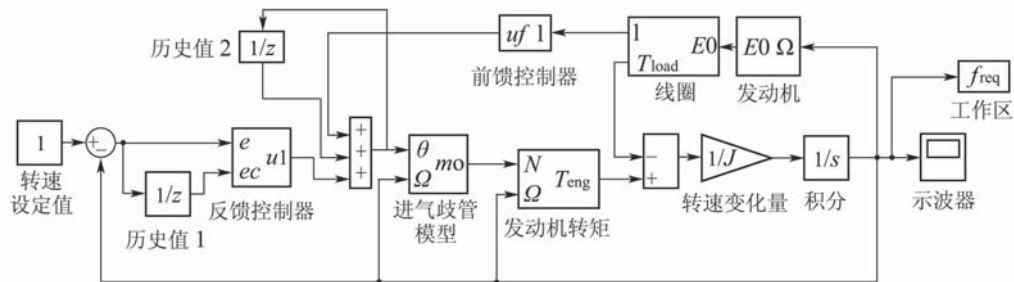


图5 转速控制系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of speed regulation system

启动仿真过程需要赋予初始转速 $N$ 、初始节气门开度 $\theta$ 以及设定负载变化规律,发电机所带电器负载值 $R_s = U_N^2 / P_{load} N$ ,其中 $U_N$ 是负载的额定工作电压. 本文的仿真过程使用的负载变化规律如

下,单位为W:

$$P_{loadN}(t) = \begin{cases} 0, & 0s \leq t < 20s, \\ 1000, & 20s \leq t < 40s, \\ 1500, & 40s \leq t < 60s. \end{cases} \quad (15)$$

上述负载条件下, 在MATLAB中对该控制系统进行仿真, 结果如图7所示。

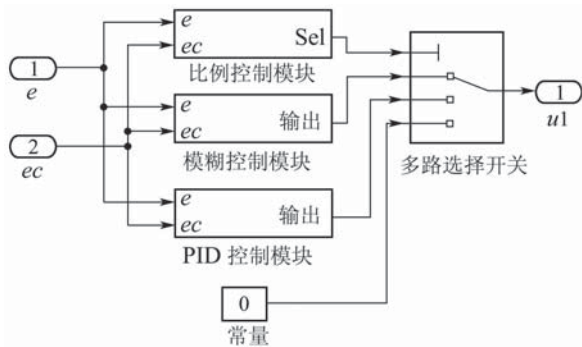
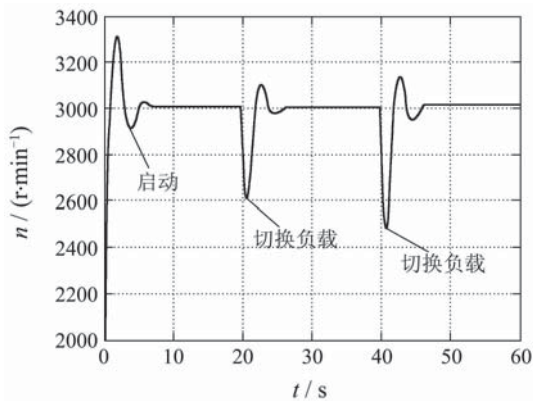
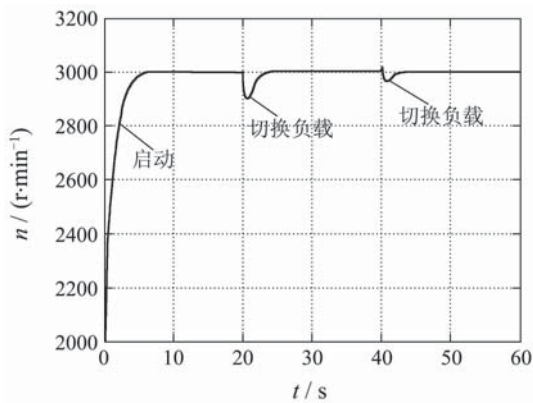


图6 反馈控制子系统仿真模型

Fig. 6 Simulation model of feedback control subsystem



(a) PID控制



(b) 前馈-反馈控制

图7 负载变化时的转速仿真结果

Fig. 7 Speed simulation result at the transition of load

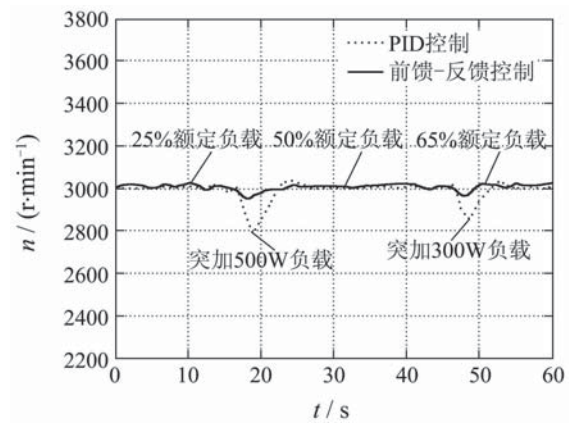
仿真结果表明, 采用前馈-反馈多模态控制算法以后, 在不同负载等级下系统静态转速波动率均小于1%, 并且负载切换过程中转速的超调量小于8%, 过渡时间小于3s. 各方面性能比采用常规PID控制均有较大提高。

为了验证本算法的实用性, 在实验室进行了配机试验. 该试验采用的样机是用重庆三鼎通

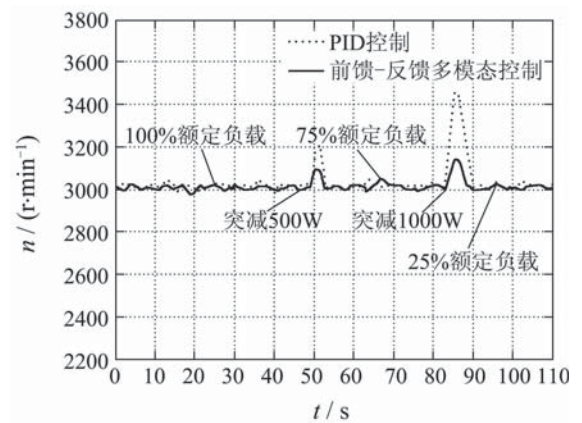
用机械公司生产的SDQF2-II型单缸、强制风冷四冲程通用小型汽油发电机改装而成, 其缸径×行程为68 mm×54 mm, 压缩比8.5:1, 额定输出功率2 kW. 将原来汽油发电机中的机械调速器用自主研发的数字调速器代替, 并进行了大量试验。

图8为根据部分实验数据生成的转速变化曲线, 图8(a)为突加负载时的转速波动曲线, 图8(b)为突卸负载时的转速波动曲线。

表2和表3分别是稳态试验和瞬态试验测试数据分析。



(a) 加载试验



(b) 卸载试验

图8 配机试验结果比较

Fig. 8 Comparison of engine matching results

表2 稳态性能试验

Table 2 Test of steady state performance

| 序号 | 负载百分比/% | 额定转速/<br>(r/min) | 最高转速/<br>(r/min) | 最低转速/<br>(r/min) | 转速波动率/% |
|----|---------|------------------|------------------|------------------|---------|
| 1  | 100     | 3000             | 3040             | 2977             | 2.1     |
| 2  | 75      | 3000             | 3035             | 2982             | 1.77    |
| 3  | 50      | 3000             | 3022             | 2990             | 1.07    |
| 4  | 25      | 3000             | 3048             | 2973             | 2.5     |

表3 瞬态性能试验

Table 3 Test of transient performance

| 测量次数 | 最高瞬时转速/(r/min) | 最低瞬时转速/(r/min) | 瞬态转速偏差 $\sigma_1$ /% | 瞬态转速偏差 $\sigma_2$ /% | 转速调节时间/s |
|------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------|
| 1    | 3285           | 2593           | 9.5                  | -13.6                | 3.2      |
| 2    | 3326           | 2582           | 10.9                 | -13.9                | 3.5      |
| 3    | 3310           | 2589           | 10.3                 | -13.7                | 3.0      |

从以上实验数据分析可知,采用本数字调速器后,该汽油发电机的转速波动率 $\leq 2.5\%$ ,转速稳定时间 $\leq 3.5$  s,瞬态调速率在加载时低于13.9%,卸载时低于10.9%,性能指标完全达到了国标《工频汽油发电机组技术条件》中的G2等级<sup>[14,15]</sup>。

采用前馈-反馈多模态控制算法,改进了汽油发电机的调速性能。

## 5 结论(Conclusion)

本文首先对小型汽油发电机建立数学模型,并分析了其转速控制的特点,设计出一种电流前馈-转速反馈式转速控制系统,并提出结合模糊控制、PID和保持模态的多模态控制器作为反馈控制器。经过仿真和实际配机试验结果表明,所设计的转速控制方法能有效改善汽油发电机转速调节系统的动态和稳态性能。

## 参考文献(References):

- 王恒.我国小型汽油机现状及“十一五”期间的发展思路[J].摩托车技术,2005,17(8):8-12.  
(WANG Heng. The present situation of chinese-made small gasoline engine and the development idear in the “11th-Five-Year-Plan” [J]. *Motorcycle Technology*, 2005, 17(8): 8-12.)
- LU M X, LOH RNK. Modeling, design and implementation of discrete sliding mode for an engine IDLE speed control system[C]//*Proceedings of the American Control Conference*. Anchorage, AK: ACC Press, 2002: 1984-1989.
- HROVAT D, BODENHEIMER B. Robust automotive IDLE speed control design based on  $\mu$ -synthesis[C]//*Proceedings of the 1993 American Control Conference*. Evanton, IL, USA: American Autom. Control Council, 1993: 1778-1783.
- 邵金菊,魏民祥.小型汽油机恒转速QFT鲁棒控制[J].电子科技大学学报,2008,37(6):951-954.  
(SHAO Jinju, WEI Minxiang. Robust speed control of mini gasoline engine based on QFT[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2008, 37(6): 951-954.)
- 邵金菊,魏民祥.基于LMI活塞式发动机恒转速 $H_\infty$ 动态输出反馈控制[J].航空动力学报,2007,22(7):1195-1199.  
(SHAO Jinju, WEI Minxiang. Piston engine speed  $H_\infty$  dynamic output feedback regulation based on LMI[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(7): 1195-1199.)
- 郭军华,张敏.小型汽油机调速系统建模与仿真研究[J].计算机仿真,2004,22(3):8-12.

- (GUO Junhua, ZHANG Min. Modeling and simulation of gasoline engine speed-governing system[J]. *Computer Simulation*, 2004, 22(3): 8-12.)
- CROSSLEY P R, COOK J A. A nonlinear engine model for drive-train system development[C]//*International Conference on Control '91*. London, UK: IEEE, 1991: 921-925.
- 刘永长.内燃机原理[M].武汉:华中科技大学出版社,2000.  
(LIU Yongchang. *Principle of Internal Combustion Engine*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1998, 2000.)
- 唐功友,张宝琳.受扰非线性离散系统的前馈反馈最优控制[J].控制理论与应用,2006,23(1):25-30.  
(TANG Gongyou, ZHANG Baolin. Feedforward and feedback optimal control for nonlinear discrete-time systems with deterministic disturbances[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 25-30.)
- 陈锦.小型高速汽油发电机组数字控制系统与控制算法研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.  
(CHEN Jin. *Research on the digital control system and algorithm of small high-speed gasoline*[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.)
- 封文春,林贵平.弹射座椅多参数多模态控制仿真分析[J].系统仿真学报,2007,19(10):2283-2286.  
(FENG Wenchun, LIN Guiping. Multi-parameter and multi-mode control simulation analyses of ejection seat[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(10): 2283-2286.)
- ZOU X Y, LI Z Y. Multimode discrete control for wheeled mobile robots[C]//*Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 983-988.
- TAN K K, HUANG S, FERDOUS R. Robust self-tuning PID controller for nonlinear systems[J]. *Industrial Electronics Society*, 2002, 12(7): 753-761.
- 兰州电源车辆研究所. JB/T 10304-2001. 工频汽油发电机组技术条件[S].北京:中国机械工业联合会,2001.  
(Lanzhou Institute of Power Vehicles. JB/T 10304-2001. *Gosoline generating sets of 50 Hz technical conditions*[S]. Beijing: China Machinery Industry Federation, 2001.)
- 天津内燃机研究所. JB/T 5135.1-2001. 通用小型汽油机台架性能试验方法[S].北京:中国机械工业联合会,2001.  
(Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute. JB/T 5135.1-2001. *General stility small gasoline engine — performance test method*[S]. Beijing: China Machinery Industry Federation, 2001.)

## 作者简介:

段其昌 (1953—),男,教授,博士生导师,目前研究方向为测控、太阳能风能发电等, E-mail: qc\_d@sina.com.cn;

段盼 (1985—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性理论与优化控制, E-mail: duanpankamino@163.com;

董平 (1982—),男,硕士研究生,主要研究方向为基于网络的控制系统远程故障诊断, E-mail: success\_person@163.com;

程伟 (1981—),男,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式技术, E-mail: chw365@163.com;

林森 (1984—),男,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式技术以及工业自动化, E-mail: 346170001@qq.com.