



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101532441 B

(45) 授权公告日 2012.06.27

(21) 申请号 200910081751.X

(22) 申请日 2009.04.10

(73) 专利权人 北京工业大学
地址 100124 北京市朝阳区平乐园 100 号

(72) 发明人 张红光 郑轶 刘凯 白明蕊

(74) 专利代理机构 北京思海天达知识产权代理有限公司 11203

代理人 张慧

(51) Int. Cl.

F02D 41/16(2006.01)

(56) 对比文件

- GB 2053508 A, 1981.02.04,
- FR 2746851 A1, 1997.10.03,
- US 4491108 A, 1985.01.01,
- EP 0939213 A2, 1999.09.01,
- US 6850832 B1, 2005.02.01,
- US 6128175 A, 2000.10.03,
- US 2007021903 A1, 2007.01.25,
- JP 7257219 A, 1995.10.09,

US 5080064 A, 1992.01.14,

李鹏威等. 天然气发动机怠速控制策略的研究. 《内燃机学报》. 2008, 第 26 卷 (第 05 期), 440-445.

张振东等. 汽油机怠速转速闭环控制系统的研究. 《农业机械学报》. 2000, 第 31 卷 (第 1 期), 12-14.

蔡昌贵, 黄韶炯. 基于 PID 的汽油机怠速控制策略. 《农机化研究》. 2006, (第 09 期), 144-146.

袁银南等. 小排量汽油机电控管理系统怠速稳定性研究. 《车用发动机》. 2007, (第 03 期), 64-67.

审查员 李基沛

权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 5 页

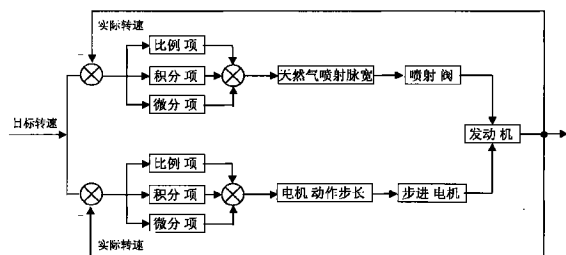
(54) 发明名称

气体燃料发动机怠速转速双闭环控制方法

(57) 摘要

本发明是一种用于实现车用气体燃料发动机怠速转速稳定的控制方法,属于内燃机电子控制领域。气体燃料发动机在怠速工况下需要在较为稳定的转速下运转,而且怠速转速要尽可能低,从而可以降低燃料消耗;但是过低的怠速转速,容易使发动机工作时发生较严重的抖动。本发明以天然气发动机的怠速转速为控制目标,采用双闭环控制算法,即对天然气喷射脉宽和旁通空气进气量分别采用 PID 算法进行闭环控制,通过怠速双闭环试验监控软件对天然气发动机进行实时控制,进而寻出最优的 PID 参数匹配,从而获得稳定的怠速转速,使天然气汽车在怠速工况下提供舒适的驾车环境。

CN 101532441 B



1. 气体燃料发动机怠速转速双闭环控制方法,通过转速传感器输出发动机的转速信号,并将转速信号输入到电控单元 ECU 中,然后进行捕捉和计算,得出当前的发动机实际转速,发动机实际转速与预先设定的目标转速进行比较,得到转速偏差;其特征在于:根据闭环控制方法分别计算出气体燃料喷射脉宽的总变化量和控制旁通空气进气量的步进电机动作步长的变化量,从而得出下一个工况点所需的气体燃料喷射脉宽和步进电机动作步长,完成对转速的双闭环控制;

气体燃料喷射脉宽和步进电机动作总步长量均有各自的控制周期,分别为 T_{Gas} 和 T_{Air} ,其取值范围分别如下:

T_{Gas} 的取值范围为 $16 \sim 80$;

T_{Air} 的取值范围为 $8 \sim 16$;

其中,气体燃料喷射脉宽的控制周期是旁通空气进气量控制周期的倍数;当 T_{Air} 或 T_{Gas} 为 4 时,代表的周期为发动机的一个工作循环;

所述的气体燃料喷射脉宽的闭环控制方法如下:

先根据以下公式计算出气体燃料喷射脉宽总变化量 ΔH_{Gas} :

$$\Delta H_{p_Gas} = K_{p_Gas} \times [e_n - e_{n-1}]$$

$$\Delta H_{i_Gas} = K_{i_Gas} \times e_n$$

$$\Delta H_{d_Gas} = K_{d_Gas} \times [e_n - 2 \times e_{n-1} + e_{n-2}]$$

$$\Delta H_{Gas} = \Delta H_{p_Gas} + \Delta H_{i_Gas} + \Delta H_{d_Gas}$$

上式中: $e_n = m - n$

m 为怠速目标转速

n 为发动机实际转速

e_n 为本次目标转速与实际转速的偏差

e_{n-1} 为上次目标转速与实际转速的偏差

e_{n-2} 为上上次目标转速与实际转速的偏差

K_{p_Gas} 为比例项系数

K_{i_Gas} 为积分项系数

K_{d_Gas} 为微分项系数

ΔH_{p_Gas} 为比例项所引起的气体燃料喷射脉宽的变化量

ΔH_{i_Gas} 为积分项所引起的气体燃料喷射脉宽的变化量

ΔH_{d_Gas} 为微分项所引起的气体燃料喷射脉宽的变化量

ΔH_{Gas} 为气体燃料喷射脉宽总变化量

再根据气体燃料喷射脉宽总变化量 ΔH_{Gas} 控制下一个工况点所需的气体燃料喷射脉宽,实现对转速的闭环控制;

所述的旁通空气进气量的闭环控制方法如下:

先根据以下公式计算出步进电机动作步长总变化量 ΔH_{Air} :

$$\Delta H_{p_Air} = K_{p_Air} \times [e_n - e_{n-1}]$$

$$\Delta H_{i_Air} = K_{i_Air} \times e_n$$

$$\Delta H_{d_Air} = K_{d_Air} \times [e_n - 2 \times e_{n-1} + e_{n-2}]$$

$$\Delta H_{Air} = \Delta H_{p_Air} + \Delta H_{i_Air} + \Delta H_{d_Air}$$

上式中： $e_n = m - n$

m 为怠速目标转速

n 为发动机实际转速

e_n 为本次目标转速与实际转速的偏差

e_{n-1} 为上次目标转速与实际转速的偏差

e_{n-2} 为上上次目标转速与实际转速的偏差

K_p_Air 为比例项系数

K_i_Air 为积分项系数

K_d_Air 为微分项系数

ΔH_p_Air 为比例项所引起的步进电机动作步长量变化

ΔH_i_Air 为积分项所引起的步进电机动作步长量变化

ΔH_d_Air 为微分项所引起的步进电机动作步长量变化

ΔH_Air 为步进电机动作步长总变化量

再根据步进电机动作步长总变化量 ΔH_Air 控制步进电机动作, 实现对转速的闭环控制。

2. 根据权利要求 1 所述的气体燃料发动机怠速转速双闭环控制方法, 其特征 在于: 所述的气体燃料为天然气或 LPG 或氢气。

气体燃料发动机怠速转速双闭环控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种气体燃料发动机怠速转速的控制方法,主要应用于控制车用气体燃料发动机的怠速工况的稳定性,从而减小气体燃料发动机的怠速转速波动量,从而获得较稳定的怠速转速。属于内燃机电子控制领域。

背景技术

[0002] 发动机的怠速工况是指油门踏板完全放开、对外无功率输出且能保持最低稳定转速、维持发动机不熄火的稳定运转工况。怠速工况是发动机最重要的运行工况之一,尤其是随着汽车保有量的不断增加,城市交通状况得不到及时改善,使发动机处于怠速工况下的运行时间越来越多。因此,对怠速工况的控制显得尤为重要。

[0003] 发动机怠速工况的运行十分复杂,具有显著的非线性、时变性和不确定性等特点。发动机在怠速工况下工作时,其转速主要受点火提前角、旁通空气进气量和燃料供给量的影响。在传统的怠速控制过程中,主要采用单闭环控制算法,即只对旁通空气进气量进行实时控制。通过调节旁通气道的空气流通截面积的大小,进而改变旁通空气的进气流量,从而完成对怠速转速的闭环控制过程。采用此种控制算法,使得燃料的供给量不能随着怠速工况的变化而变化,因此在怠速工况突变的情况下,发动机的转速波动量会增大,甚至使得发动机发生较剧烈的抖动,影响汽车的舒适性。

[0004] 所谓的PID(Proportion-Integral-Derivative)控制算法是目前工业上应用非常广泛的一种控制算法,而增量式PID控制算法是隶属于众多PID算法中的一种,因其算法简单、可靠、计算量小等优点得到了广泛的应用。增量式PID控制算法的计算式如下所示:

$$[0005] \quad \Delta H_p = K_p \times [e_n - e_{n-1}]$$

$$[0006] \quad \Delta H_i = K_i \times e_n$$

$$[0007] \quad \Delta H_d = K_d \times [e_n - 2 \times e_{n-1} + e_{n-2}]$$

$$[0008] \quad \Delta H = \Delta H_p + \Delta H_i + \Delta H_d$$

[0009] 其中 $e_n = m - n$

[0010] 注:m为怠速目标转速

[0011] n为发动机实际转速

[0012] K_p 为比例项系数

[0013] K_i 为积分项系数

[0014] K_d 为微分项系数

[0015] e_n 为本次目标转速与实际转速的偏差

[0016] e_{n-1} 为上次目标转速与实际转速的偏差

[0017] e_{n-2} 为上上次目标转速与实际转速的偏差

[0018] 式中, ΔH 为总变化量; ΔH_p 、 ΔH_i 、 ΔH_d 分别为比例项、积分项和微分项所引起的变化量。

发明内容

[0019] 本发明提供了一种新的气体燃料发动机的怠速转速控制方法,即双闭环控制方法,该方法可以减小气体燃料发动机在怠速工况下的转速波动量,从而使气体燃料发动机获得较稳定的转速输出,同时使气体燃料汽车在怠速工况下能够拥有较好的舒适性。

[0020] 本发明中的气体燃料发动机的怠速转速双闭环控制方法是基于经典的PID控制算法的基础上实现的。所谓的双闭环控制方法就是采用两套增量式PID控制算法,对怠速工况下的气体燃料的喷射脉宽和旁通空气进气量分别进行PID闭环控制,两者互不干涉,相互独立开来。

[0021] 本发明采用的具体技术方案如下:通过转速传感器输出发动机的转速信号,并将转速信号输入到电控单元ECU中,然后进行捕捉和计算,得出当前的发动机实际转速,发动机实际转速与预先设定的目标转速进行比较,得到转速偏差。根据闭环控制方法分别计算出气体燃料喷射脉宽的总变化量和控制旁通空气进气量的步进电机动作步长的变化量,从而得出下一个工况点所需的气体燃料喷射脉宽和步进电机动作步长,完成对转速的双闭环控制。

[0022] 所述的气体燃料喷射脉宽的闭环控制方法如下:先根据以下公式计算出气体燃料喷射脉宽的总变化量 ΔH_{Gas} :

$$[0023] \quad \Delta H_{p_Gas} = K_{p_Gas} \times [e_n - e_{n-1}]$$

$$[0024] \quad \Delta H_{i_Gas} = K_{i_Gas} \times e_n$$

$$[0025] \quad \Delta H_{d_Gas} = K_{d_Gas} \times [e_n - 2 \times e_{n-1} + e_{n-2}]$$

$$[0026] \quad \Delta H_{Gas} = \Delta H_{p_Gas} + \Delta H_{i_Gas} + \Delta H_{d_Gas}$$

$$[0027] \quad \text{上式中: } e_n = m - n$$

[0028] m 为怠速目标转速

[0029] n 为发动机实际转速

[0030] e_n 为本次目标转速与实际转速的偏差

[0031] e_{n-1} 为上次目标转速与实际转速的偏差

[0032] e_{n-2} 为上上次目标转速与实际转速的偏差

[0033] K_{p_Gas} 为比例项系数

[0034] K_{i_Gas} 为积分项系数

[0035] K_{d_Gas} 为微分项系数

[0036] ΔH_{p_Gas} 为比例项所引起的气体燃料喷射脉宽的变化量

[0037] ΔH_{i_Gas} 为积分项所引起的气体燃料喷射脉宽的变化量

[0038] ΔH_{d_Gas} 为微分项所引起的气体燃料喷射脉宽的变化量

[0039] ΔH_{Gas} 为气体燃料喷射脉宽总变化量

[0040] 再根据气体燃料喷射脉宽总变化量 ΔH_{Gas} 控制下一个工况点所需的气体燃料喷射脉宽,实现对转速的闭环控制。

[0041] 所述的旁通空气进气量的闭环控制方法如下:先根据以下公式计算出步进电机动作步长总变化量 ΔH_{Air} :

$$[0042] \quad \Delta H_{p_Air} = K_{p_Air} \times [e_n - e_{n-1}]$$

$$[0043] \quad \Delta H_{i_Air} = K_{i_Air} \times e_n$$

- [0044] $\Delta H_d_Air = K_d_Air \times [e_n - 2 \times e_{n-1} + e_{n-2}]$
- [0045] $\Delta H_Air = \Delta H_p_Air + \Delta H_i_Air + \Delta H_d_Air$
- [0046] 上式中： $e_n = m - n$
- [0047] m 为怠速目标转速
- [0048] n 为发动机实际转速
- [0049] e_n 为本次目标转速与实际转速的偏差
- [0050] e_{n-1} 为上次目标转速与实际转速的偏差
- [0051] e_{n-2} 为上上次目标转速与实际转速的偏差。
- [0052] K_p_Air 为比例项系数
- [0053] K_i_Air 为积分项系数
- [0054] K_d_Air 为微分项系数
- [0055] ΔK_p_Air 为比例项所引起的步进电机动作步长量变化
- [0056] ΔH_i_Air 为积分项所引起的步进电机动作步长量变化
- [0057] ΔH_d_Air 为微分项所引起的步进电机动作步长量变化
- [0058] ΔH_Air 为步进电机动作步长总变化量
- [0059] 再根据步进电机动作步长总变化量 ΔH_Air 控制步进电机动作，实现对转速的闭环控制。
- [0060] 本控制方法可以应用在天然气发动机、LPG（液化石油气）发动机、氢气发动机等气体燃料发动机上。
- [0061] 本发明中的控制方法可以减小气体燃料发动机在怠速工况下的转速波动量，从而使气体燃料发动机获得较稳定的转速输出，同时使气体燃料汽车在怠速工况下能够拥有较好的舒适性。

附图说明

- [0062] 图 1 怠速双闭环控制原理图
- [0063] 图 2 怠速双闭环试验监控界面
- [0064] 图 3 怠速双闭环与单闭环在目标转速为 1200rpm 时的转速波动图对比
- [0065] 图 4 双闭环与单闭环在目标转速为 1200rpm 时的试验结果对比
- [0066] 图 5 怠速双闭环与单闭环在目标转速为 850rpm 时的转速波动图对比
- [0067] 图 6 双闭环与单闭环在目标转速为 850rpm 时的试验结果对比

具体实施方式

- [0068] 下面结合附图对本发明作进一步说明：
- [0069] 本实施例采用两套增量式 PID 控制算法，对怠速工况下的气体燃料的喷射脉宽和旁通空气进气量分别进行 PID 闭环控制，两者互不干涉，相互独立开来，双闭环的控制原理图如图 1 所示。在发动机的运转过程中，目标转速与实际转速之间必然产生一定的转速偏差，此时，气体燃料喷射脉宽和旁通空气进气量根据各自的 PID 算法，能够得出各自的调整量，而且控制周期也可通过参数设置进行调整，从而完成双闭环控制。采用此种控制方法可以使气体燃料的喷射脉宽和旁通空气进气量各自根据怠速转速偏差进行自适应调整，当发

动机在怠速工况突变的情况下,尤其是负荷发生变化时,此时气体燃料的喷射脉宽和旁通空气进气量可以及时地做出调整,进而使发动机的转速波动变化量尽可能小,从而可以输出较为稳定的转速,使气体燃料汽车获得较好的舒适性。

[0070] 气体燃料喷射脉宽的控制方法如下:

$$[0071] \quad \Delta H_{p_Gas} = K_{p_Gas} \times [e_n - e_{n-1}]$$

$$[0072] \quad \Delta H_{i_Gas} = K_{i_Gas} \times e_n$$

$$[0073] \quad \Delta H_{d_Gas} = K_{d_Gas} \times [e_n - 2 \times e_{n-1} + e_{n-2}]$$

$$[0074] \quad \Delta H_{Gas} = \Delta H_{p_Gas} + \Delta H_{i_Gas} + \Delta H_{d_Gas}$$

[0075] 旁通空气进气量的控制方法如下:

$$[0076] \quad \Delta H_{p_Air} = K_{p_Air} \times [e_n - e_{n-1}]$$

$$[0077] \quad \Delta H_{i_Air} = K_{i_Air} \times e_n$$

$$[0078] \quad \Delta H_{d_Air} = K_{d_Air} \times [e_n - 2 \times e_{n-1} + e_{n-2}]$$

$$[0079] \quad \Delta H_{Air} = \Delta H_{p_Air} + \Delta H_{i_Air} + \Delta H_{d_Air}$$

[0080] 其中 $e_n = m - n$

[0081] 注:m 为怠速目标转速

[0082] n 为发动机实际转速

[0083] K_{p_Gas} 为比例项系数,其取值范围为 0.01 ~ 0.26

[0084] K_{i_Gas} 为积分项系数,其取值范围为 0.01 ~ 0.12

[0085] K_{d_Gas} 为微分项系数,其取值范围为 0 ~ 0.05

[0086] K_{p_Air} 为比例项系数,其取值范围为 0.01 ~ 0.58

[0087] K_{i_Air} 为积分项系数,其取值范围为 0.01 ~ 0.28

[0088] K_{d_Air} 为微分项系数,其取值范围为 0 ~ 0.04

[0089] e_n 为本次目标转速与实际转速的偏差

[0090] e_{n-1} 为上次目标转速与实际转速的偏差

[0091] e_{n-2} 为上上次目标转速与实际转速的偏差

[0092] 式中, ΔH_{Gas} 和 ΔH_{Air} 为气体燃料喷射脉宽和步进电机动作步长总变化量;
 ΔH_{p_Gas} 、 ΔH_{i_Gas} 、 ΔH_{d_Gas} 分别为比例项、积分项和微分项所引起的气体燃料喷射脉宽的变化量;
 ΔH_{p_Air} 、 ΔH_{i_Air} 、 ΔH_{d_Air} 分别为比例项、积分项和微分项所引起的步进电机动作步长量变化。除此之外,气体燃料喷射脉宽和步进电机动作总步长量均有各自的控制周期,分别为 T_{Gas} 和 T_{Air} ,其取值范围分别如下:

[0093] T_{Gas} 的取值范围为 16 ~ 80

[0094] T_{Air} 的取值范围为 8 ~ 16

[0095] 其中,当 T_{Air} 或者 T_{Gas} 为 4 时,代表的周期为发动机的一个工作循环,依此类推;以上参数的取值范围都是在型号为 JL465Q5 天然气发动机试验台架上获得。

[0096] 本实施例中的怠速双闭环控制系统在改装后的型号为 JL465Q5 天然气发动机上进行了试验研究,其主要由霍尔式转速传感器、电控单元 ECU、天然气喷射阀、点火线圈、步进电机等组成。其中霍尔式转速传感器位于分电器内,负责输出天然气发动机的转速信号,信号类型为标准的方波信号;天然气喷射阀主要负责控制天然气发动机的燃料供给;点火线圈负责产生混合气起燃时所需的高压电;步进电机负责控制旁通空气进气量。

[0097] 为了便于验证双闭环控制方法的可行性,用Visual Basic 6.0开发了天然气发动机怠速双闭环试验监控软件,使用该软件可以对天然气发动机的怠速转速进行实时的双闭环控制。该软件通过PC机与电控单元ECU之间的RS-232串行通讯,可以在线实时修改电控单元ECU中的点火提前角、怠速目标转速以及影响天然气喷射脉宽和旁通空气进气量的双PID控制参数等参量,便于进行各自的PID参数整定。

[0098] 当天然气发动机开始运转后,电控单元ECU根据发动机各路传感器采集到的信号来判断发动机当前所处的状态。若发动机处于怠速工况时,则通过冷却水温度传感器采集到的信号,来确定发动机怠速工况下所需要设定的目标转速,通过霍尔传感器输出发动机的转速信号并捕捉,从而计算出转速偏差,当偏差的绝对值不大于5rpm时,则认为天然气发动机运转平稳,此时步进电机保持原位静止不动;否则根据增量式PID控制算法得出较为理想的步进电机动作步长,步进电机的动作方向也可以通过增量式PID控制算法得出。其判断过程如下:当计算出的 ΔH_{Air} 为正数时,则此时应提高发动机转速,即应加大旁通空气道的空气进气流通面积,所以应控制步进电机的阀锥回缩,具体动作的步长量为 ΔH_{Air} 的绝对值;当计算出的 ΔH_{Air} 为负数时,则此时应降低发动机转速,即应减小旁通空气道的空气进气流通面积,所以应控制步进电机的阀锥伸出,具体动作的步长量为 ΔH_{Air} 的绝对值;当计算出的 ΔH_{Air} 为零时,则步进电机保持原位置静止。与此同时,天然气喷射脉宽也随着转速偏差的变化而实时改变,当计算出的 ΔH_{Gas} 为正数时,则此时应提高发动机转速,即增大天然气喷射脉宽;当计算出的 ΔH_{Gas} 为负数时,则此时应降低发动机转速,即减小天然气喷射脉宽;当计算出的 ΔH_{Gas} 为零时,则保持天然气喷射脉宽不变。在控制天然气喷射脉宽的PID算法中,由于天然气喷射脉宽对怠速转速的波动量影响较大,因此对其调整量进行了限制,即当计算出的 ΔH_{Gas} 大于20时,其自动取值为20;而天然气喷射脉宽和旁通空气进气量的控制周期相互独立,一般而言,天然气喷射脉宽的控制周期是旁通空气进气量控制周期的倍数。

[0099] 试验过程中,通过图2所示的天然气发动机怠速双闭环试验监控界面进行控制,其可以在线实时修改影响天然气喷射脉宽和旁通空气进气量各自的PID控制参数,进行不同条件的试验研究,从而寻求出最优的PID控制参数匹配,从而获得良好的试验效果。通过此控制的目的是要使天然气发动机的实际转速逐渐向目标转速趋近,并在目标转速附近尽可能小的范围内波动,从而使天然气发动机运转平稳。

[0100] 在此控制策略的基础上,进行了对比试验研究,而怠速目标转速分别设定为1200rpm和850rpm,进行了单闭环和双闭环的对比试验研究。所谓单闭环就是只对旁通空气进气量进行PID控制;而双闭环是在单闭环控制的基础上,增加了对天然气喷射脉宽的PID闭环控制,从而完成对比试验。

[0101] 试验数据的处理方法采用了数理统计中平均值与均方差的计算方法。在随机变量的数字特征中,除了考虑其平均值外,还要考虑其取值偏离平均值的平均偏离程度。其公式如下:

$$[0102] \quad \text{平均值: } \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$[0103] \quad \text{均方差: } S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

[0104] 其中,平均值反映了样本数据总体均值的信息,均方差反映了样本数据总体方差的信息。发动机转速采集系统可一次性采集 900 个转速数据点,即发动机曲轴旋转 450 转的转速信息,在针对怠速转速进行分析时,筛选出 900 个数据点中的最大值与最小值,从而获得了发动机在连续工作 450 转内的最大转速偏差,从而进行研究分析。

[0105] (1) 目标转速为 1200rpm

[0106] 在进行目标转速为 1200rpm 的怠速单闭环控制试验时,由以往的试验结果可以得知,当控制旁通空气进气量的比例项系数 K_p_Air 为 0.09、积分项系数 K_i_Air 为 0.03、微分项系数 K_d_Air 为 0.01、控制周期 T_Air 为发动机的两个工作循环,而天然气喷射脉宽为 130/4.16ms,点火提前角为 28°C A 时,得到的天然气发动机的怠速转速是比较稳定的。因此,在不改变旁通空气进气量的 PID 控制参数和点火提前角的基础上,增加对天然气喷射脉宽的 PID 控制,从而得到一系列的试验结果,具体如图 3 和图 4 所示。

[0107] 从图 4 中可以得知,在天然气喷射脉宽取固定值、而只对旁通空气进气量进行 PID 控制时,连续采集到的 900 个转速数据点所得出的均方差为 13.53rpm,最大转速差值为 85rpm,此时的发动机冷却水温度为 51.3°C,机油温度为 51.1°C,转速波动情况如图 3 中的 D 图所示。在坚持旁通空气进气量的怠速单闭环控制参数不变的基础上,增加了针对天然气喷射脉宽的 PID 控制,从而进行怠速双闭环的控制试验。当控制天然气喷射脉宽的比例项系数 K_p_Gas 为 0.14,积分项系数 K_i_Gas 为 0.10,微分项系数 K_d_Gas 为 0.02,控制周期 T_Gas 为发动机的 16 个工作循环时,此时连续采集到的 900 个转速数据点的均方差为 8.41rpm,而最大转速差值为 47rpm,此时的发动机冷却水温度为 69.8°C,机油温度为 67.1°C,具体如图 3 中的 A 图所示;当控制天然气喷射脉宽的比例项系数 K_p_Gas 为 0.20,积分项系数 K_i_Gas 为 0.10,微分项系数 K_d_Gas 为 0,控制周期 T_Gas 为发动机的 16 个工作循环时,此时连续采集到的 900 个转速数据点的均方差为 8.08rpm,而最大转速差值为 47rpm,此时的发动机冷却水温度为 67.1°C,机油温度为 65.7°C,具体如图 3 中的 C 图所示;当控制天然气喷射脉宽的比例项系数 K_p_Gas 为 0.14,积分项系数 K_i_Gas 为 0.10,微分项系数 K_d_Gas 为 0.01,控制周期 T_Gas 为发动机的 16 个工作循环时,此时连续采集到的 900 个转速数据点的均方差仅为 7.47rpm,而最大转速差值仅为 45rpm,此时的发动机冷却水温度为 46.3°C,机油温度为 44.1°C,具体如图 3 中的 B 图所示。

[0108] 从试验结果可以得出,当目标转速为 1200rpm 时,基于天然气喷射脉宽和旁通空气进气量的怠速双闭环控制试验效果优于怠速单闭环的控制效果,得到的转速波动量更小,从图 3 中的怠速转速变化图中可以明显得出此结论。由此可以得出,怠速双闭环控制在目标转速为 1200rpm 时可以有效地降低天然气发动机的怠速转速波动量,使其工作状态更加稳定。

[0109] (2) 目标转速为 850rpm

[0110] 在进行 850rpm 的怠速单闭环控制试验时,从以往的试验结果可以得知,当控制旁通空气进气量的比例项系数 K_p_Air 为 0.09、积分项系数 K_i_Air 为 0.03、微分项系数 K_d_Air 为 0.01、控制周期 T_Air 为发动机的两个工作循环,而天然气喷射脉宽为 110/3.52ms,点火提前角为 28°C A 时,得到的发动机怠速转速是比较稳定的。因此,在不改变旁通空气进气量的 PID 控制参数和点火提前角的基础上,增加对天然气喷射脉宽的 PID 控制,从而得到一系列的试验结果,具体如图 5 和图 6 所示。从图 6 中可以得知,在天然气喷射脉宽取固定

值、而只对旁通空气进气量进行 PID 控制时,进行了两组转速数据的采集。其中一组试验结果为连续采集到的 900 个转速数据点所得出的均方差为 8.16rpm,最大转速差值分别为 47rpm,此时的发动机冷却水温度为 71.4℃,机油温度为 65.2℃,转速波动情况如图 5 中的 E 图所示;另外一组所得到的转速均方差为 8.63rpm,最大转速差值为 50rpm,此时的发动机冷却水温度为 75℃,机油温度为 67.7℃,转速波动情况如图 5 中的 F 图所示,从这两组试验数据可以得知,此时发动机的怠速转速波动量较小,控制效果较理想。在坚持旁通空气进气量的怠速单闭环控制参数不变的基础上,增加了针对天然气喷射脉宽的 PID 控制,从而进行怠速双闭环的控制试验。控制天然气喷射脉宽的比例项系数 K_p_Gas 为 0.15,积分项系数 K_i_Gas 为 0.08,微分项系数 K_d_Gas 为 0,控制周期 T_Gas 为发动机的 16 个工作循环时,采集了一系列的试验数据,从中挑选出四组数据以供分析。第一组数据连续采集到的 900 个转速数据点的均方差为 7.69rpm,而最大转速差值仅为 40rpm,此时的发动机冷却水温度为 75.4℃,机油温度为 68.9℃,具体如图 5 中的 A 图所示;第二组数据采集到的转速数据均方差为 8.17rpm,最大转速差值为 43rpm,此时的发动机冷却水温度为 77.1℃,机油温度为 70.1℃,具体如图 5 中的 B 图所示;第三组数据采集到的转速数据均方差为 8.29rpm,最大转速差值为 44rpm,此时的发动机冷却水温度为 79.9℃,机油温度为 71.4℃,具体如图 5 中的 C 图所示;第四组数据采集到的转速数据均方差为 7.91rpm,最大转速差值为 42rpm,此时的发动机冷却水温度为 81.1℃,机油温度为 78.6℃,具体如图 5 中的 D 图所示。比较目标转速为 850rpm 的单闭环与双闭环试验结果可以得出,双闭环的怠速转速的控制效果整体而言略优于单闭环的控制效果,天然气发动机的转速波动量较小,运转更加平顺,工作噪音较小。

[0111] 综上所述,当目标转速分别取值为 1200rpm 和 850rpm 时,从试验结果可以得出,怠速双闭环控制方法能够使天然气发动机获得更好的怠速转速稳定性,此控制方法较单闭环更优。

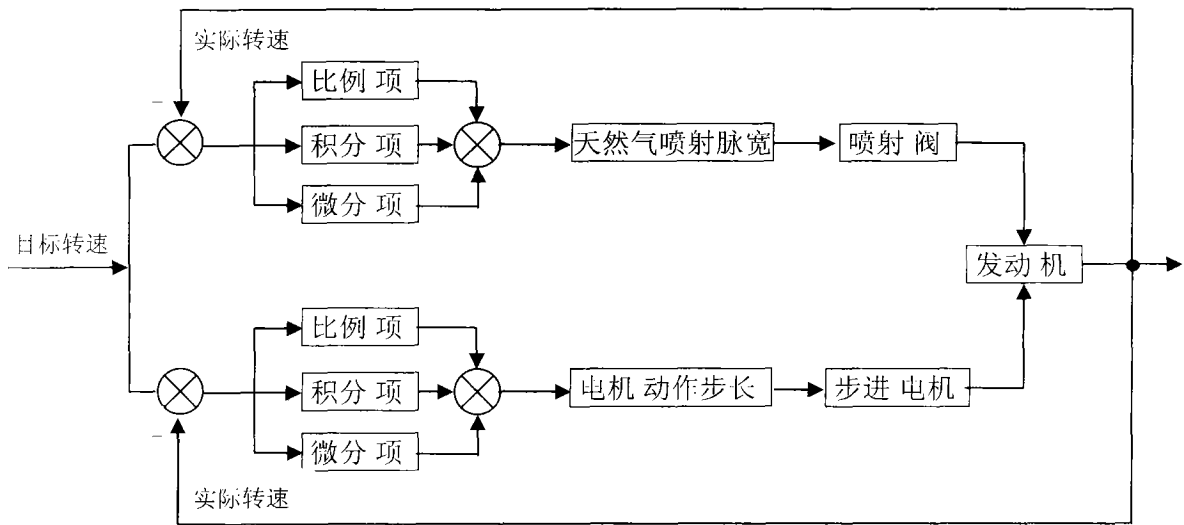


图 1

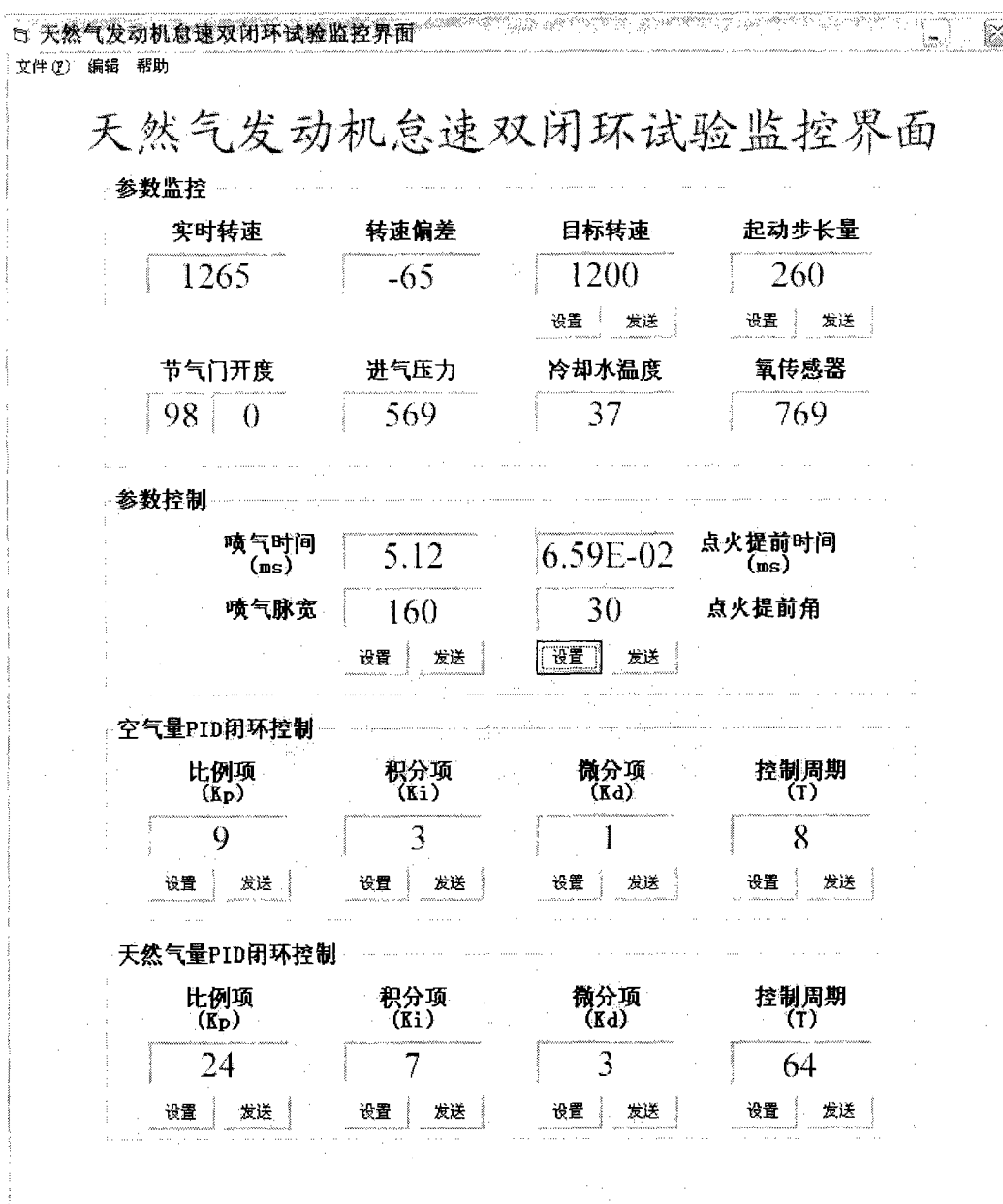


图 2

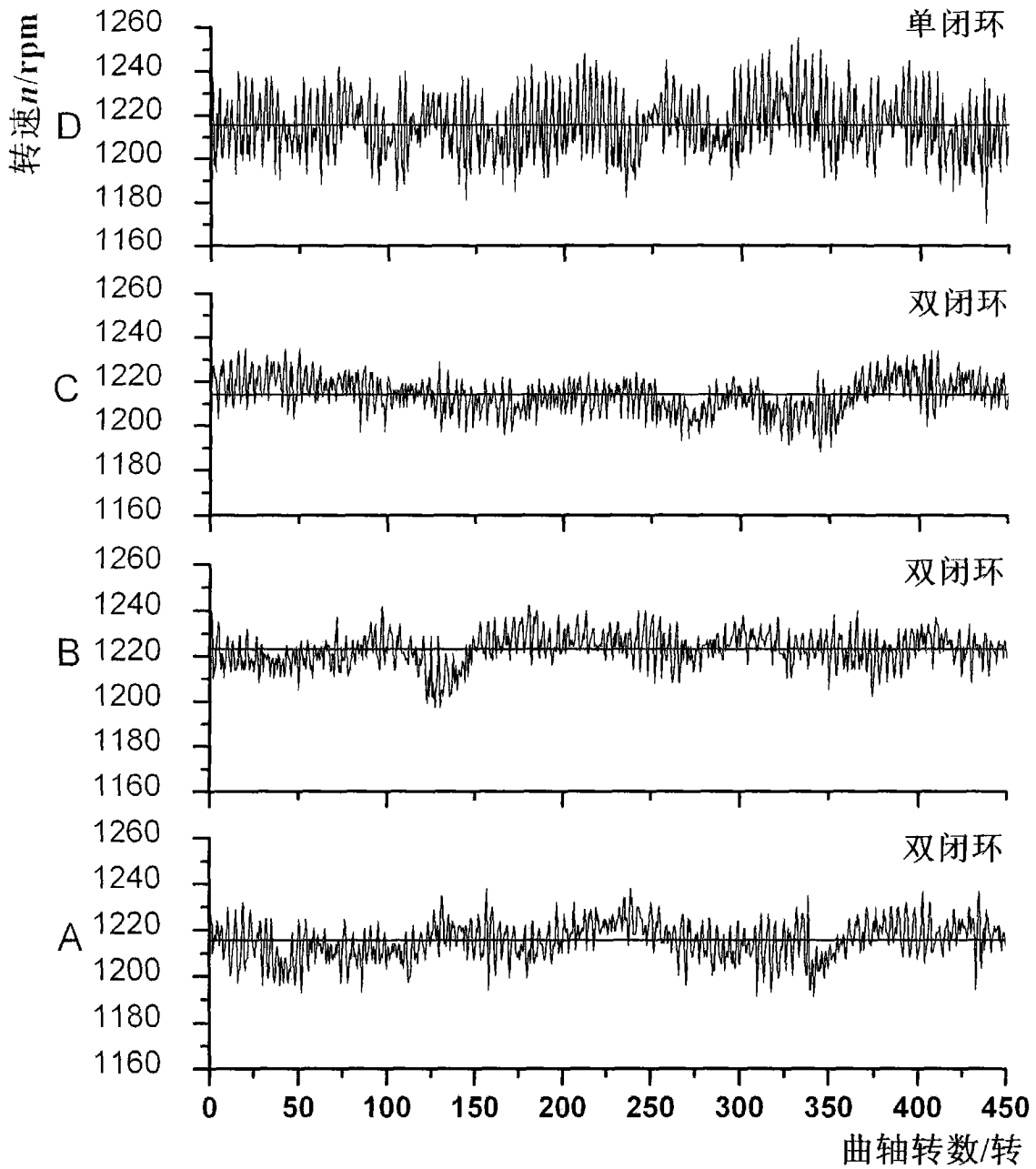


图 3

	天然气喷射脉宽 个/ms	天然气喷射脉宽的 PID 控制				算数 平均值 (rpm)	均方差 (rpm)	最小值 (rpm)	最大值 (rpm)	最大 差值 (rpm)	冷却水 温度 (°C)	机油 温度 (°C)
		比例项 K_p_Gas	积分项 K_i_Gas	微分项 K_d_Gas	控制 周期							
双闭环 A	—	0.14	0.10	0.02	64	1215.44	8.41	1191	1238	47	69.8	67.1
双闭环 B	—	0.14	0.10	0.01	64	1223.02	7.47	1197	1242	45	67.1	65.7
双闭环 C	—	0.20	0.10	0	64	1213.88	8.08	1188	1235	47	46.3	44.1
单闭环 D	130/4.16ms	—	—	—	—	1215.34	13.53	1170	1255	85	51.3	51.1

图 4

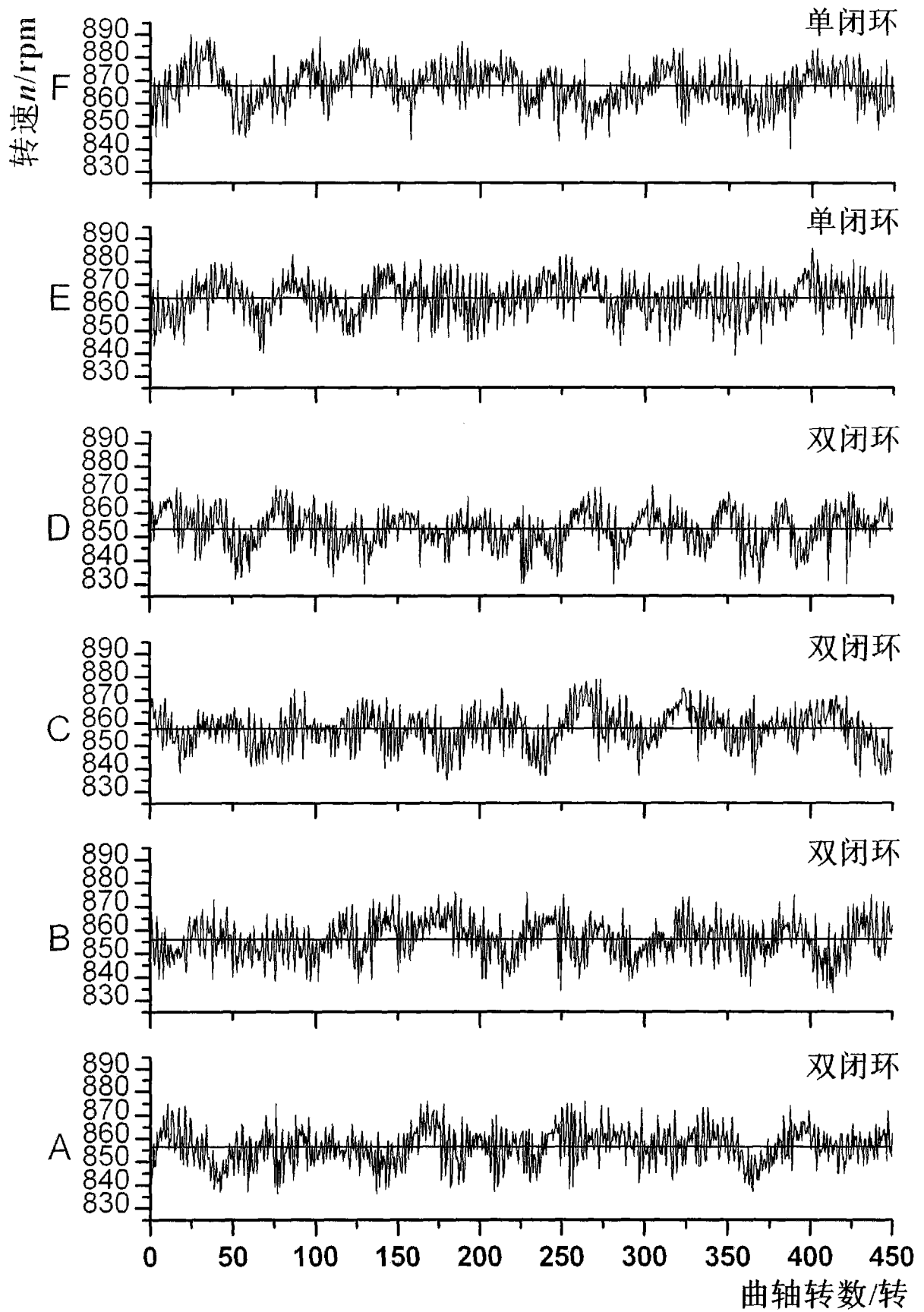


图 5

	天然气 喷射脉宽 个/ms	天然气喷射脉宽的 PID 控制				算数 平均值 (rpm)	均方差 (rpm)	最小值 (rpm)	最大值 (rpm)	最大 差值 (rpm)	冷却水 温度 (°C)	机油 温度 (°C)
		比例项 K_p_Gas	积分项 K_i_Gas	微分项 K_d_Gas	控制 周期							
双闭环 A	—	0.15	0.08	0	64	856.44	7.69	836	876	40	75.4	68.9
双闭环 B	—	0.15	0.08	0	64	855.97	8.17	833	876	43	77.1	70.1
双闭环 C	—	0.15	0.08	0	64	857.39	8.29	835	879	44	79.9	71.4
双闭环 D	—	0.15	0.08	0	64	853.21	7.91	830	872	42	81.1	78.6
单闭环 E	110/3.52ms	—	—	—	—	864.02	8.16	839	886	47	71.4	65.2
单闭环 F	110/3.52ms	—	—	—	—	867.55	8.63	840	890	50	75.0	67.7

图 6