

基于开关型 EGO 的 A/F 自学习控制策略研究

唐 岚¹, 孟武强¹, 甘海云², 葛晓成¹

(1. 西华大学交通与汽车工程学院, 四川 成都 610039; 2. 中国汽车工程研究院有限公司, 重庆 400039)

摘 要: 基于开关型氧传感器的电控发动机空燃比闭环 PI 反馈控制方法, 对空燃比自学习控制策略进行了详细的分析, 着重研究了空燃比自学习控制策略提出的必要性、与闭环 PI 调节的关系、使能条件、控制原理, 同时设计了基于开关型氧传感器的自学习控制策略主程序和延时子程序算法, 最终从理论层面上完成了对空燃比自学习控制策略的解析。

关键词: 空燃比; 闭环控制; 积分修正; 自学习控制

中图分类号: U464

文献标识码: A

The Study of Self-Learning Control Strategy for Air Fuel Ratio Based on Switch-type EGO Sensor

TANG Lan¹, MENG Wu-qiang¹, GAN Hai-yun², GE Xiao-cheng¹

(1. School of Transportation and Automotive Engineering, Xihua University, Chengdu 610039 China;

2. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd. Chongqing 400039 China)

Abstract: The closed-loop proportional and integral feedback control strategy for air fuel ratio in an electronic control engine based on switch-type Exhaust Gas Oxygen(EGO) sensor is introduced in this paper and the A/F ratio self-learning control strategy is analyzed in detail. Additionally, the necessity and reason and the relationship with closed-loop PI regulation and enabling conditions of the A/F ratio self-learning control strategy are investigated. The main program and time delay subprogram algorithm for the self-learning control strategy based on switch-type EGO sensor are designed. Finally, the analysis of the A/F ratio self-learning control strategy is accomplished in theory level.

Key words: air fuel ratio; closed-loop control; integral correction; self-learning control

0 引言

发动机电控燃油喷射系统在控制其空燃比时一般采取两种控制策略, 即开环控制和闭环控制。开环控制时, 电子控制单元 (ECU) 根据发动机的运行工况和状态查找存储在内存中相应的控制表 (脉谱图) 和相关修正量, 并确定最终的喷油脉宽 (PW), 此时 ECU 并不对实际的空燃比的状态进行检测。而空燃比的闭环控制是在开环控制的基础上增加开关型废气氧传感器 (EGO) 的电压信号作为其控制的反馈信号 (如图 1 所示), ECU 通过采集来自 EGO 的电压信号, 再根据如图 1 中所示其他传感器的输入信号, 由查表、插值计算输出准确的 PW, 通过闭

环反馈调节 ECU 就能将空燃比控制在理论空燃比允许的误差范围内, 从而使三元催化转化器 (TWC) 的工作效率最高, 降低排放。

由于整车和发动机在批量生产装配时存在的装配误差、生产散差等导致的发动机之间的差异, 以及随着发动机在使用过程中不断磨损、疲劳、老化, 发动机使用不同的油品, 并在不同气候条件和不同海拔高度地区运行等因素, 都会造成实际空燃比长期偏离其理论值, 最终导致发动机性能下降。鉴于此, 大部分发动机电控系统都采用了一种被称为自学习控制的算法来解决以上的问题, 本文旨在对空燃比的自学习控制策略进行解析和探讨。

收稿日期: 2010-02-16

基金项目: 国家 863 项目 (2006AA11A1C1); 省级重点学科 (SZD0410)

作者简介: 唐 岚 (1965-), 女, 江西南昌人, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为汽车电控技术。

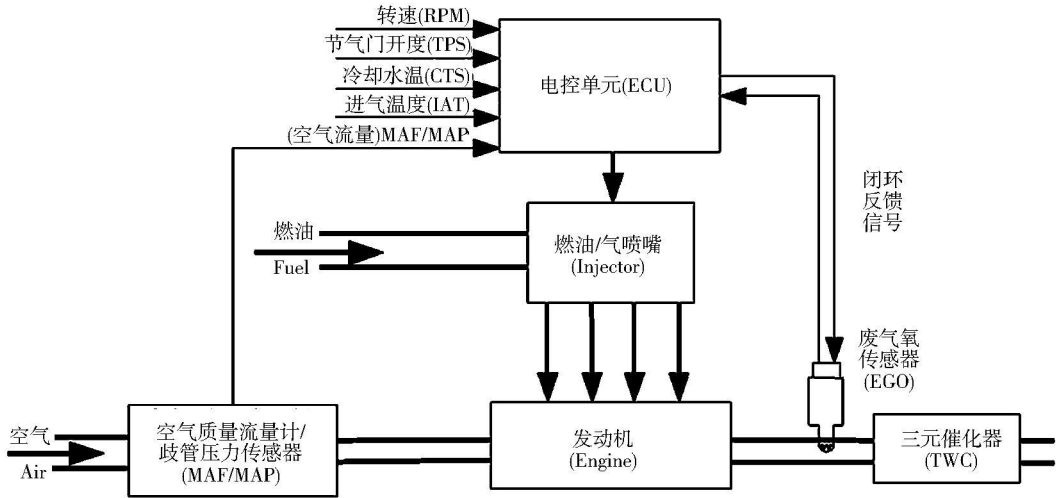


图 1 空燃比闭环控制系统组成

1 空燃比自学习控制策略的提出

发动机各种工况的基本喷油脉宽 (BPW) 是预存于 ECU 内存的, 这些数据对于某一型号的发动机来说都是确定值, 但在使用的过程中, 由于上文谈及的一些原因, 实际空燃比相对理论值的偏离可能会不断增大。虽然空燃比闭环反馈控制可以实时修正其偏差, 但其修正范围并不大, 如图 2 中 A 的情况, 一般为 $0.8 \sim 1.2$ ^[1]。当反馈的中心长期偏向稀或浓的一边时, 闭环修正就不能及时使空燃比回归到理论空燃比, 如图 2 中情况 B, 此时 λ 的平均值远远偏离了 1.0, 若仍采用 $0.8 \sim 1.2$ 范围的修正系数, 就会造成控制上的困难。在这种情况下, 为了使修正值回到正常修正范围之内, 并使反馈值的中心回到理论空燃比的位置, ECU 根据发动机此时工况, 按一定的软件控制逻辑设定一个自学习修正系数先将 λ 的平均值回到 $0.8 \sim 1.2$ 之间, 再按原来的闭环控制策略进行修正。

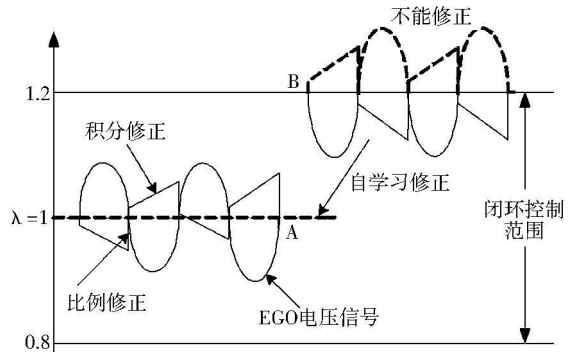


图 2 过量空气系数 (λ) 的闭环控制区间

表 1 自学习控制策略与一般控制策略的比较

比较项	一般控制策略	自学习控制策略
MAP 形成方式	脉谱在使用前就已通过标定形成, 并固化在 ECU 中	自学习结果在使用过程中才逐渐形成, 并根据工况的变动实时更新
作用对象	针对同一型号的所有发动机	针对特定的“某一台”发动机
程序数据	不会改变	时时在变动
存储方式	存储在 ROM 中	存储在 EEPROM 或者 KAM 中
控制内容	反应了制作脉谱时所用的试验样机如何对各种传感器的输入信号进行响	关注运行中的发动机如何对当前的实际工况、发动机状态变化、驾驶员操作行为等作出反应

2 空燃比闭环 PI 控制

空燃比自学习过程必须要有反馈控制, 所以只能在闭环控中才能完成^[3]。空燃比闭环 PI 控制 (如图 3 所示), 即 ECU 根据 EGO 反馈电压信号的

空燃比自学习控制策略又被称作块学习 (BLM: Block Learn Multiplier)^[2], 或长效燃油修正 (Long Term Fuel Trim), 主要用于对 BPW 进行调节, 它是一个通过逐渐变化的用来适应超出系统设计控制能力的学习值。和一般控制策略相比, 自学习控制策略的特点如表 1 所示:

高低对实际空燃比采取比例 (P) 积分 (I) 控制策略。比例修正项根据滤波前的 EGO 电压信号判别空燃比的浓稀状况, 对 BPW 进行瞬态阶跃调节 (图 3 中的比例调节)。积分项则主要用于减小空

燃比相对于理论空燃比的漂移, 它会影响空燃比波动的频率及幅值, 确保实际空燃比尽可能地在理论空燃比附近小幅而快速地震荡, 并最终回归到理论空燃比^[4]。积分修正项和比例修正项一起构成闭环修正项, 再作用到 BPW 上以影响下一循环的空燃比。闭环修正量 = 积分修正项 ± 比例修正项, 其中比例修正项的正负视 EGO 反馈的混合气浓稀状况而定。

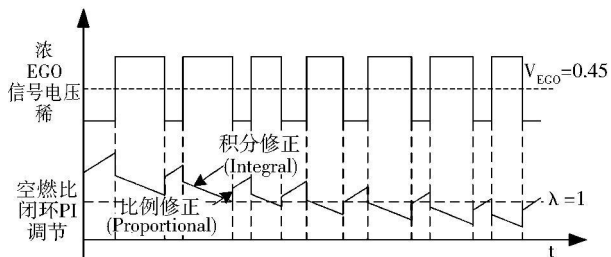


图3 空燃比闭环PI反馈控制过程

空燃比自学习控制和闭环PI调节中积分项的当前值及其死区标定阈值紧密相关。在空燃比闭环控制策略中, 一般都采用经典的离散PI控制算法, 积分调节的作用由积分延时(即积分增减的时间间隔)和积分更新步长(即积分值增减一步的大小)共同来体现。积分更新步长为一定值(可标定), 积分延时由 EGO 电压偏差量和闭环进气流量确定, 并随这两者的增大而减小。积分延时对积分作用的影响如图4中A、B两种工况所示, 工况A(高转速)中的积分延时较短, 故积分速度较快, 积分步数多, 则积分增益也较大; 而工况B(低转速)中的积分延时较长, 故积分速度较慢, 在相同的时间段内积分步数减少, 则积分增益也较小。

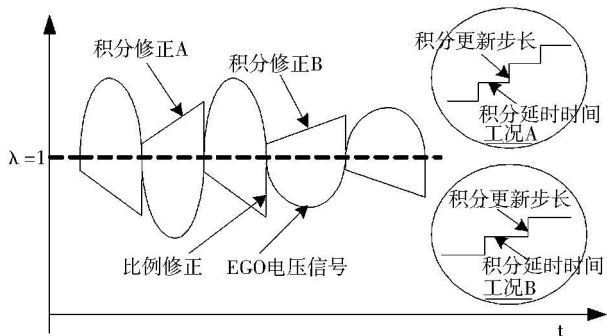


图4 变工况下积分项对空燃比的调节

积分修正值的更新是根据 EGO 反馈的混合气浓稀状况来确定的, 其更新方式为: 积分修正值 = 当前积分修正值 ± 积分更新步长, 如果实际空燃比等于理论空燃比, 则当前积分修正值不变。在计算积

分修正项时, 应对其进行最小值和最大值限定, 以确保闭环修正在合理的范围内进行, 在基于开关型 EGO 传感器的闭环 PI 控制系统中, 积分修正的复位初始值设定为 128。

3 空燃比自学习控制使能条件

因为每次自学习完成后的空燃比自学习单元值都一直保存在 ECU 内存中, 并已成为燃料喷射脉宽计算公式中的一部分, 而且自学习修正项反映的是发动机固有状态(疲劳、磨损、老化、一致性等)的变化, 这个固有状态并不随开环还是闭环而产生变化。所以在开环、闭环、冷车、热车等状态自学习修正项均要参与燃料喷射脉宽的计算。但是空燃比自学习控制功能却须在一定的工况条件下才能进行, 其具体的主要使能条件如下:

- (1) TPS、MAP 传感器没有发生故障;
- (2) 发动机水温大于设定值;
- (3) 发动机运行于闭环状态;
- (4) 开环空燃比等于理论空燃比;
- (5) 车速、海拔修正、RPM、MAP 都要大于各自设定的阈值;
- (6) 自学习单元值不处于复位状态。

除此之外, 空燃比自学习控制策略在程序中还要满足以下附加条件:

- (1) 积分延迟计时器和自学习延迟计时器都已完成延时;
- (2) 当前积分值 < 128 且混合气偏浓; 或当前积分值 > 128 且混合气偏稀。
- (3) 当前积分值 $> 128 + m$; 或当前积分值 $< 128 - m$, 其中 m 为积分项死区标定阈值。

如果以上所有的工况条件都满足, ECU 程序则通过学习当前工况并按预设的控制逻辑计算出相应的自学习修正值, 并将该值寄存在 EEPROM 内, 完成对该工况的自学习控制过程, 稳态工况下的空燃比自学习控制策略主程序流程可以归结如图5所示。

自学习过程从满足工况条件到开始更新自学习单元值需要进行延时处理, 其延时子程序流程如图6所示, 其中延时共包括两部分, 即积分延时和自学习延时。在进入空燃比自学习控制的主使能条件都满足后, 只有当积分延时计时器和自学习延迟计时器都大于其设定阈值时, ECU 主程序流程才会真正进入空燃比自学习控制程序模块, 开始更新原学习值。

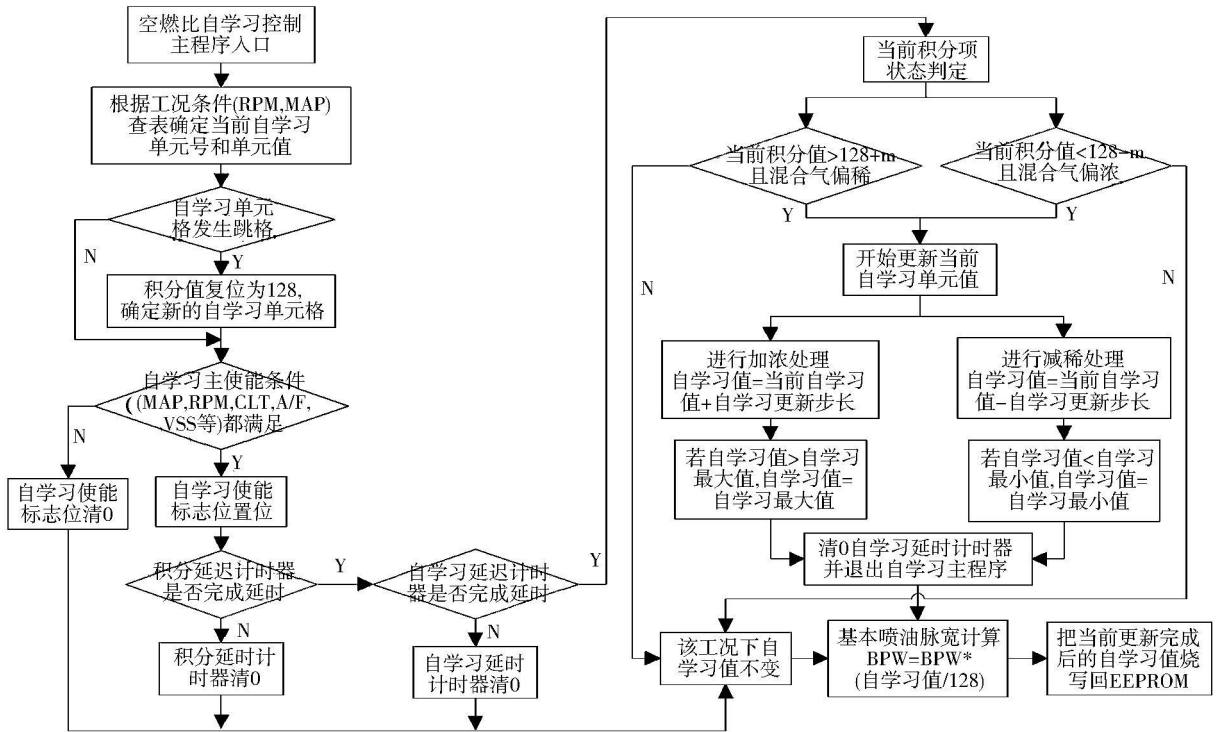


图 5 空燃比自学习程序流程

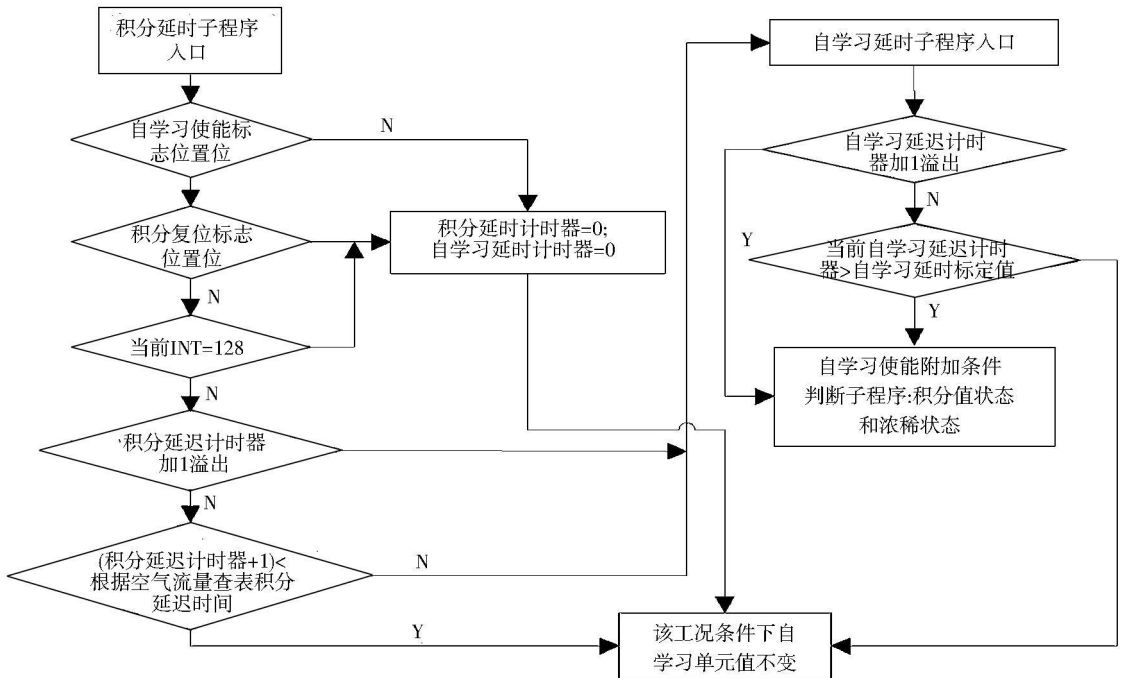


图 6 空燃比自学习延时程序流程

4 空燃比自适应学习控制原理

发动机控制系统一般定义有 22 个自学习单元, 其中包括 16 个节气门部分开度单元, 2 个减速单元

和 4 个怠速单元。自学习单元值实际上可以看作是对发动机充气效率 VE (Volumetric Efficiency) 的修正, 如图 7 所示。自适应学习控制逻辑根据转速 (RPM)

和负荷 (MAP) 的不同组合, 将 VE 表划分为 16 个块 (Block), 也称作 16 个自主学习单元 (BLM Cell), 如图 5 中的 Cell0 ~ Cell15, 此即为节气门部分开度的自主学习单元。自主学习控制策略按照其程序流程作用于 BPW 上, 并将每一工况下学习所得的自主学习值存储在对应的自主学习单元中。

每一个自主学习单元对应一定的转速和负荷节点, 且在该单元内使用一个自主学习值, 这个自主学习值将会影响单元内所有的 VE 值。自主学习单元的位置和学习值代表车辆在特定工况条件下维持 EGO 输出信号保持在正常范围的修正量。

由于自主学习过程需要一定的时间, 如果自主学习值不能在关闭点火开关后保存下来, 则下次遇到该特性变化引起的空燃比偏离时, 自主学习修正值就不能立即反映到喷射脉宽上, 这必然会导致空燃比控制精度的降低。为了能做到及时进行修正, 实现理论空燃比的高精度控制, 自主学习修正值一般都被存储在 EEPROM 中 (传统的发动机控制系统采用一个被称作 KAM 的专用存储器来存储)。当发动机再次启动时, ECU 采用最近一次存储的自主学习值来计算 BPW, 即每次发动机启动后都采用前一次运行过程中学习完成后寄存下来的最新优化后的自主学习值, 以使发动机的状态能得到持续的修正和补偿。

MAP /kPA	Volumetric Efficiency/(%)											
	RPM (r/min)											
	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1700	1800	1900	2000	2200
37	36	45	36	36	50	44	44	45	45	45	45	47
40	53	54	55	55	55	47	47	47	47	46	46	51
55	54	56	56	56	55	52	52	52	52	50	52	53
68	55	55	57	56	54	54	54	53	53	53	52	54
78	57	58	60	58	55	60	55	54	54	55	54	54
90	52	52	52	54	55	55	56	55	55	55	54	55
100	53	52	53	54	56	56	57	56	56	56	56	56
110	55	54	55	56	57	57	57	56	57	57	56	56

图 7 自主学习控制对 VE 表的修正

自主学习值的初始值全部为 128。在空燃比闭环校正的过程中, 自主学习值不断被更新然后存储。经过对闭环空燃比的学习, 记录下许多不同工况点处的自主学习值, 形成自主学习值的单元表格并将其存储到 ECU 中, 如图 8 中 (a)、(b) 两表所示。表 (a)、(b) 分别是在混合气偏稀和偏浓工况下, 空燃比自主学习修正后的结果。自主学习修正对 BPW 具体的加浓或减稀量可以通过公式计算得出, 即 $BPW = BPW * (\text{自主学习值} / 128)^{[5]}$ 。

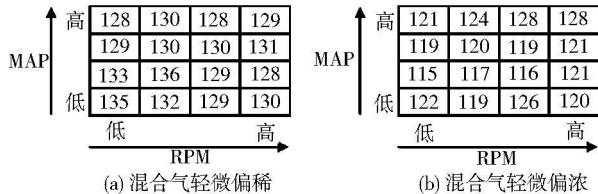


图 8 自主学习单元信息

5 空燃比自主学习控制策略的实现

自主学习过程总是发生在积分项试图抵消实际空燃比与理论空燃比的偏差, 但是调节过程尚未结束时。和积分修正过程类似, 自主学习值递增/递减的步长也为一常数 (可标定), 即自主学习值 = 当前自主学习值 ± 自主学习更新步长。稳定工况下空燃比自主学习控制过程如图 9 所示, 根据 EGO 信号可知, 在 T1 ~ T2 时段之外, 实际空燃比波动较小, 即使有较大波动也因其持续时间较短而不能触发自主学习控制逻辑, 所以此时闭环 PI 控制能够有效地对空燃比进行调节。但在 T1 ~ T2 时段内, EGO 信号显示混合气长时间偏浓, 积分修正项以一定步长向下持续减小, 试图将空燃比迅速调节回理论空燃比附近, 但即使当积分修正值超过其标定阈值的下界 (128 m) 时, 仍不能将 EGO 信号电压带回正常的变化状态, 说明此工况点对应的原标定自主学习值已不再适合此工况, 如果此时其他的使能条件也都同时满足 (RPM、MAP、CTS、A/F 等), 在经过标定的延时时间 (t1' - t1) 后, ECU 即根据空燃比自主学习控制算法开始按照一定的时间间隔和步长朝着与原积分修正相同的方向进行学习, 使之产生相当的修正效果以补偿此时发动机的状态, 促使积分项在 t2 时刻开始回调并最终回归到其正常作用域内 (t2 ~ t3)。自主学习全过程如图 9 中的 t1' ~ t3 时段。自主学习完成后, 该稳定工况的自主学习单元值就发生了改变 (即从初始值更新成了当前值), 更新后的自主学习单元值将被写入 ECU 的 EEPROM 中一直保存。

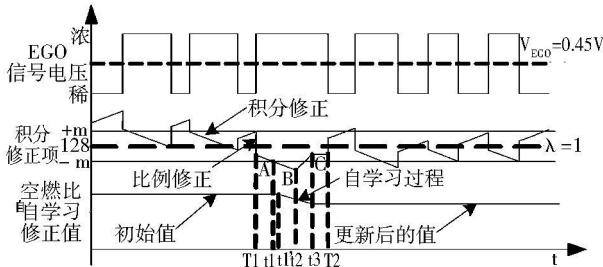


图 9 稳定工况下空燃比自主学习修正过程

Testing Iron and Zinc Bioavailability in Genetically Enriched Beans (Phaseolus Vulgaris L.) and Rice (Oryza Sativa L.) in a Rat Model [J]. Food and Nutrition Bulletin, 2000, 21(4): 428-433.

[12] Shaw N and Liu Y. Bioavailability of Iron from Purple Laver (Porphya Spp.) Estimated in a Rat Hemoglobin Regeneration Bioassay [J]. J Agric Food Chem., 2000(48): 1734-1737.

[13] Janet C King. Evaluating the Impact of Plant Biofortification on Human Nutrition [J]. J Nutr 2002(132): 511s-513s

[14] Miller D. D., and Schriker B. R. Nutritional Bioavailability of Iron [M]. American Chemical Society: Washington D. C., 1982: 9-26.

[15] Miller D. D., and Schriker B. R. Is Solubility in Vitro a Reliable Predictor of Fe Bioavailability? [J]. Biological Trace Element Research 1989(19): 11-24.

[16] Miller D. D., Schriker B. R., Rasmussen R. R. et al. An in Vitro Method for Estimation of Iron Availability from Meals [J]. Am. J Clin Nutr 1981, 34(10): 2248-2256.

[17] Heinrich H. C. Intestinal Absorption of ⁵⁹Fe from Neutron-activated Commercial Iron(III)-citrate and Iron(III)-hydroxide Polym-allose Complexes in Man. Arzneim-Forsch [J]. Drug Res, 1987(37): 105-107.

[18] Glahn R. P., Lai C., Hsu J., et al. Decreased Citrate Improves Iron Availability From Infant Formula: Application of an in Vitro Digestion/Caco-2 Cell Culture Model [J]. J Nutr 1998(128): 257-264.

[19] Glahn R. P., Gangloff M. B., Miller D. D., et al. Use of in Vitro Digestion and Caco-2 Cell Culture to Study Iron Uptake/bioavailability [J]. FASEB Journal 1994(8): A712.

[20] Gangloff M. B., Glahn R. P., Miller D. D., et al. Assessment of Iron Availability Using Combined in Vitro Digestion and Caco-2 cell Culture [J]. Nutrition Research 1996(16): 479-487.

[21] Glahn R. P., Lee O. A., Yeung A., et al. Caco-2 Cell Ferritin Formation Predicts Nonradiolabeled Food Iron Availability in an In Vitro Digestion/Caco-2 Cell Culture Model [J]. J Nutr 1998(128): 1555-1561.

[22] Glahn R. P., Lee O. A., Miller D. D. In Vitro Digestion/Caco-2 Cell Culture Model to Determine Optimal Ascorbic Acid to Fe Ratio in Rice Cereal [J]. J Food Sci, 1999(64): 925-928.

[23] Boato F., Wortley G. M., Liu R. et al. Red Grape Juice Inhibits Iron Availability: Application of an In Vitro Digestion/Caco-2 Cell Model [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry 2002(50): 6935-6938.

[24] Shumei Yun, Jean-Pierre Habicht, Dennis D. Miller et al. An In Vitro Digestion/Caco-2 Cell Culture System Accurately Predicts the Effects of Ascorbic Acid and Polyphenolic Compounds on Iron Bioavailability in Humans [J]. J Nutr, 2004(134): 2717-2721.

[25] Jeannemarie M. Beiseigel, Janet R. Hunt, Raymond P. Glahn et al. Iron Bioavailability from Maize and Beans: a Comparison of Human Measurements with Caco-2 cell and Algorithm Predictions [J]. Am J Clin Nutr 2007(86): 388 - 396.

[26] Graham R. D., Welch R. M., Bouis H. E. Addressing Micronutrient Malnutrition Through Enhancing the Nutritional Quality of Staple Foods: Principles, Perspectives and Knowledge Gaps [J]. Adv Agron 2001(70): 77-142.

[27] Fairweather-Tait S., Hurrell R. F. Bioavailability of Minerals and Trace Elements [J]. Nutr Res Rev, 1996(9): 295-324.

[28] Bouis H. E., Chassy B. M., Ochoanda J. O. Genetically Modified food Crops and Their Contribution to Human Nutrition and food Quality [J]. Trends Food Sci Technol, 2003(14): 191-209.

(编校:谭金蓉)

(上接 126页)

在空燃比的闭环 PI 控制过程中,积分修正值根据 EGO 的反馈信号不断变化更新,以对空燃比进行实时修正,并在退出闭环工况时发生积分复位。自学习修正和积分修正类似,不过它并不直接监控 EGO 的反馈信号,而只关注重复出现的积分修正值的变化,如某一工况下积分修正值持续增大或者减小。由于空燃比开环控制策略不能进行反馈检测,而自学习的结果可以用于此时的空燃比修正,所以自学习修正对开环控制策略极其必要。

6 结论

自学习控制策略对实现电控发动机空燃比的精确控制非常必要,通过自学习控制和闭环 PI 调节的共同作用,电控系统可以把对 BPW 的修正系数范围扩大到 0.5~1.5^[6](此范围因发动机 ECU 具体型号和实际标定情况而异),并能补偿由于发动机生

产散差和进气系统及供油系磨损、疲劳、老化等原因造成的空燃比偏移,最终实现对空燃比的有效而精确的控制。

参 考 文 献

[1] 李国勇. 智能控制与 MATLAB 在电控发动机中的应用 [M]. 北京:电子工业出版社, 2001.

[2] S. V. 哈奇. 汽车发动机计算机控制系统解析 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007.

[3] 曾科, 党卫华. 一种优化内燃机性能的自学习控制方法 [J]. 西安交通大学学报, 1999(10): 33-35.

[4] 刘利, 卓斌. PID 控制在电控汽油机 λ 闭环控制中的应用及相关参数的标定 [J]. 车用发动机, 2000(2): 17-20.

[5] 裴元江. 电控汽油机针对欧 III 排放的燃油控制策略研究 [D]. 天津:天津大学, 2005: 25-26.

[6] B. Hollembeak. 汽车燃油和排放控制系统结构诊断与维修 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007.

(编校:夏书林)