希 薄 燃 焼 の 空 燃 比 制 御*

守 田 栄 之**, 瀧 山 武***

Air Fuel Ratio Control for A Lean Mixture Combustion

Shigeyuki MORITA and Takeshi TAKIYAMA

If a gasoline engine can be run with a lean air-fuel mixture, a considerable improvement is expected in fuel consumption and in exhaust emissions. Especially in the case of automobile use, this effect is remarkable because of a peculiarity in the high frequency usage of engines operating under a partial load. Therefore, investigation of lean air-fuel ratio combustion has been put forward zealously. But it seems to have been concentrated on aspects of hardware improvements such as the shape of a combustion chamber, the configuration of an intake manifold, etc. This study was attempted under these circumstances as a software approach. It means a real time optimization control of an air-fuel ratio with the object of maximum indicated thermal efficiency by using an on-line digital computer. As a result of the control operations, an expected improvement was attained.

Key Words: Internal Combustion Engine, Application of Control, Real Time Optimization, Indicated Thermal Efficiency, Lean Air-Fuel Ratio Combustion

1. ま え が き

ガソリン機関は希薄燃焼での運転が可能であれば燃費率向上, 排気浄化面での利点は大きく, 特に自動車用機関のごとく中・軽負荷での使用頻度が高いものではその効果は顕著である。このため従来より燃焼室形状, 吸気管形状の改良や最近では吸気スワール条件を可変ジオメトリ制御するものなど, いわばハード面での研究(後者は制御であるが形状変化による燃焼特性の解明などに重点があると考えハード面と分離する)が種々進められてきた⁽¹⁾⁽²⁾。

ところでそのハード面での改良性能を極限まで引き出す制御方式としては現用のごときフィードホワード形の開ループ適応制御⁽³⁾でなしに目的とする評価関数自体をフィードバックする閉ループ適応形の制御⁽⁴⁾⁽⁵⁾が望まれる。本研究はこのようないわばソフト面に関するもので閉ループ適応制御で, しかも従来欠点とされた急加減速時の機関失速を解消するものである。

供試機関(4サイクル, 322.6 cc, 燃料噴射, OHV)

は通常のくさび形燃焼室を有するもので特別希薄燃焼が可能というものではないが本機関のハード特性としての最高の希薄空燃比運転を可能とする。

2. 制 御 装 置

図1に試作制御装置の概略を示す⁽⁶⁾。評価関数(J , 以降同様の記号定義法を多用す)は図示熱効率(η_i)であって η_i 最高と空燃比(A/F)の希薄化は後述のとおり同義である。動作概要を説明すると要求図示仕事($\bar{W}_i$)に応じて概算初期燃料噴射量(F_0)をフィードホワード系(図の③, 以下FF系)でまず与え, 次にオプティマイザ系(図の②, 以下Opt系)で微少燃料(ΔF)減少を行い, これを繰返し燃料噴射量 F を漸次減少させ, A/F を希薄化, 最適化する。そしてこの A/F 希薄化により生ずる図示仕事(W_i)出力の変化はレギュレータ系(図の①, 以下Reg系)によって補正する(以上の動作はTuningの意でTu動作, Tuモードと称す)というもので無論デジタルコンピュータ制御である。

このTu動作が追従し得ないような急過渡時はFF系により粗制御ではあるがフィードホワード制御運転する(FFモードと称す)というもので機関失速の恐れはない。なお図で α は W_i サイクル変動を緩和する一

* 昭和61年9月28日 北海道支部第28回講演会において講演, 原稿受付 昭和61年3月24日。

** 正員, 大阪市立大学工学部 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)。

*** 学生員, 大阪市立大学大学院。

次フィルタ定数($\alpha=0.9$), $\bar{W}_i$ は W_i 平滑化信号, θ は吸気絞り弁開度, g_a は吸気量, n_o は機関回転数, K は Reg 系ゲイン, T は制御周期, k はその刻み数である。

3. 最 適 化

図2は実験運転域〔機関トルク(T_e)=6.0~9.0 N·m, $n_o=25\sim40$ s⁻¹〕内の供試機関の実測データで、

図1 制御装置概略

図2 η_i , W_i -A/F 特性

上述の Tu 動作を実施した場合の θ , η_i 挙動をあらかじめ解析的に検討したものである。つまり太線でその W_i 軌跡を示すごとく $A/F=10.5$ 近傍より $\Delta F(0.52$ mg/cycle) を減じると W_i は増加しそれを Reg 系が補正し、という前述 Tu 動作を繰返しなが W_i 平均値は一定(したがって運転点は同一)のまま A/F を希薄化していく。その場合 $J=\eta_i$ 最高点は η_i 曲線自体の単峰性から一見その頂点と思われるが、 η_i 軌跡に示すごとく Reg 系による θ 開動作のための η_i 増大があり、右端の希薄限界が最適 A/F となる。

なおこの希薄限界はそれ自体幅を有し、機差や経年変化、暖機状態等により微妙に変化するものであることは周知のとおりで、本制御のごとき実時間の修正機能を有するもののみが希薄限界で極限化できる。

図3はこの Tu 動作を実運転で行い上述の事柄を確認したもので横軸に $T(n_o$ の関数、実験運転域で 0.13 s) の刻み k で表した時間を、縦軸には F など機関諸量を示す。この場合の Reg 系はゲインスケジュール付の LQI 最適制御系を用いているが、これについては文献⁽⁷⁾に詳しい。 F の ΔF 階段状減少(16 T ごと)に伴う A/F 希薄化にもかかわらず $\bar{W}_i$, W_i は Reg 系による θ の適宜の加減で $\bar{W}_i$ どれだけの値を保持している。そして A 時点で希薄限界域に突入し、失火サイクルの比率が増大することによる W_i 平均値の低下を回復しようと θ が急開するのが見られる。この A 時点までは η_i は単調増加(W_i サイクル変動による微少変動は除く)し、 $J=\eta_i$ 最高の A/F 最適点は希薄限界に

図3 定常運転時の Tu, Ho 動作

あるという上述の解析が確認された。これらより、
 (i) Reg 系を装備して初めて真の η_i 最高が可能、
 (ii) A/F 修正方向は希薄化の単一方向、(iii) A/F 初期値は相当希薄寄りにセットできる、などがいえる。

4. 最適点発見法

$J=\eta_i$ 最高を目的とする場合、希薄限界に突入しなければ真の限界は不明であるということからその最適点発見法は多少特異なものとなる。実用的には少し手前の燃焼変動がある制限値内の η_i 最高という J が考えられるが、ここでは条件なしの η_i 最高を目的として以下のような発見法を試みた。

4.1 発見法 図3 A 時点での θ 急開挙動と、それ以前の θ 挙動（以下 θ 波と称す）とは図よりわかるとおり顕著な差異があるのでこれにより識別する方法である。このため θ 波の実験データを多数オフライン処理しその特徴を抽出した。

θ 波は LQI 使用 Reg 系の高速性ゆえに ΔF 外乱補正のみならず W_i サイクル変動をも抑制しようとする θ 挙動で、短～長ささまざまな周期成分を持ち、その振幅も大小さまざまなものである。図4(a)は A/F 域別に整理した振幅分布を示す。平均値は $A/F=12\sim13$ で θ

図4 θ 波特徴と最適点発見法

閉方向に移動し、 $A/F=13$ 以上になると開方向に転ずるがこれは図2の挙動解析と合致する。このように分布平均値は変化するものの分布幅は 0.052 rad 以内である。図4(b)は θ 波周期を見るためのパワースペクトルで、ほぼ $1/8T$ Hz 近傍にピークを持つが非常にブロードである。

図4(c)は図3の θ 波および θ 急開挙動を模式的に描いたものである。まず前述より識別サンプリング周期はピークの $8T$ で固定し $\{\theta(k)-\theta(k-8)\}$ で発見しようとした（識別サンプリング自体は毎 k ごと実行）。

この場合の θ 変動幅（図の矢傾斜に当たる）は θ 波周期と識別サンプリング開始時の θ 波位相に関係する。①のようにちょうど周期が $8T$ の θ 波ならば位相に無関係に矢傾斜は常に零となる。しかし $16T$ の θ 波の場合、②位相ならば矢傾斜は零だが、③位相ならば最大となる。④の $5.3T$ の θ 波も図の位相で最大傾斜となる。種々の周期、位相があるがいずれにしても前述振幅解析よりその時の最大 θ 変動幅は 0.052 rad 以内である。これに対して θ 急開挙動は⑤のごとくはるかに大きい。以上から式(1)を最適点発見アルゴリズムとした。なおこれは実験的にも識別動作を確認した。

$$|\theta(k)-\theta(k-8)| > 0.052 \text{ rad} \dots\dots\dots (1)$$

4.2 発見後の処置 前記による発見時にはすでに A/F が希薄限界を超えており失火サイクルが多くなっているため早急にやや過濃側に戻す必要がある。そこで

(i) θ を急開直前の値まで閉める。このため Reg 系は閉ループのまま $\bar{W}_i$ を瞬時 ($10T$ 間のみ) 式(2)で演算される $\Delta \bar{W}_i$ だけ人為的に下げる。 $\partial W_i / \partial \theta$ は θ による W_i の感度で図2の該当値を制御装置に記憶させておく。

$$\Delta \bar{W}_i = |\theta(k)-\theta(k-8)| \times \partial W_i / \partial \theta \times (1-\alpha) \dots\dots\dots (2)$$

(ii) F を安全率を考慮して $\Delta F' = 2 \times \Delta F$ だけ強制的に増量する。

という処置を実行する。このことはプログラムのなもので真の A/F 最適値から多少の劣化を生ずるかも知れない。しかしながら真の希薄限界で運転することは失速防止上困難で、またこの付近では図2 η_i 軌跡もゆるやかで、 η_i 目減り分も小さい。したがって、本論文ではこれを最適化上の誤差と考え、最適 A/F などの語はこの誤差を含んだ意味で用いている。なお開ループ適応形制御のこの劣化はさらに大きいことは論を待たない。

図5 制御フローチャート概略

図3 A 時点より右側はこの発見法, 処置で制御運転されている例で, 結局初期値より η_i は増大する。なお Tu モードはこの処置までを指すこととし, 以降を Hold の意より Ho 動作, Ho モードと称す。またこの発見, 処置によって生ずる機関諸量の変動も比較的小さい。

4.3 過渡時アルゴリズム 前述は定常運転時のもので過渡運転時にはこれに $\tilde{W}_i(k)$ の変化による θ 挙動が重畳する。したがって発見アルゴリズム, 処置の $\Delta\tilde{W}_i$ は同様の考え方で式(3), (4)とした。

$$|\theta(k) - \theta(k-8) - \{\tilde{W}_i(k) - \tilde{W}_i(k-8)\} \times (\partial W_i / \partial \theta)^{-1}| > 0.052 \text{ rad} \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta\tilde{W}_i = |\theta(k) - \theta(k-8) - \{\tilde{W}_i(k) - \tilde{W}_i(k-8)\} \times (\partial W_i / \partial \theta)^{-1} \times (\partial W_i / \partial \theta) \times (1 - \alpha) \dots\dots (4)$$

$\Delta F'$ は同一の $2 \times \Delta F$ である。

5. 制 御 運 転

図5は1章記載の制御動作を制御コンピュータにプログラムした時のフローチャート概略である。定常運転もしくは緩過渡時には Tu モードに入り, 3, 4章記述の A/F 最適化が Opt 系, Reg 系で実行され, Tu モード完了後 Ho モードに入る。Ho モードの場合定常運転時なら図3のようにそのままよいが緩過渡時には A/F 値が変化し Tu 動作を再実行する必要がある。しかしあまり頻繁な Tu 動作実行は総合的に得策ではないので一度最適化した A/F を基準とした F を式(5)により比率制御している。

$$F_k = F^0 + K_h \{\tilde{W}_i(k) - \tilde{W}_i(k)^0\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで F_k は Ho モード時の F , F^0 は最適化終了時点の F , $\tilde{W}_i(k)^0$ はその時の $\tilde{W}_i(k)$, K_h は F 比率制御係数で本運転域では $0.04 \text{ mg/cycle} \cdot \text{N} \cdot \text{m}$ である。この比率制御時にも最適性劣化の可能性がある。

Tu モードが追従できない急過渡時(図の ϵ , 制御装置を種々運転し実験的に $d\tilde{W}_i/dT > 0.32 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{T}$ と

図6 制御運転の一例

定めた)には FF モードで運転することになる。これは図1 FF 系に示すごとく $F = F_0(\tilde{W}_i)$ としてテーブル記憶させてある Tu モードの初期値 F_0 と同一のものによる粗制御運転である。この場合は最適 A/F 運転ではないが一般にこの時間比は小さく軽視できる。

図6は定常および緩急の加減速を含む運転条件での制御運転の一例を示す。図上部の各モード遷移や縦軸機関諸量の動きより今まで述べたことが総合的に実行されていることがわかる。

6. む す び

以上 $J = \eta_i$ 最高の A/F 制御を行い所期の動作を確認した。本研究実施に当たり, 本学大学院生 岡内享, 4 回生 臼本宏昭, 日下部弘樹の諸君の協力を得た。謝意を表する。

文 献

- (1) 齊藤, 機誌, 88-797 (昭60), 71.
- (2) 藤井, 機誌, 87-797 (昭59), 53.
- (3) 例えば, 守田, 自動車技術, 35-2 (昭56), 181.
- (4) Schweitzer, P. H., ほか2名, ASME Publ., 67-WA/DGP-2, (1967), 1.
- (5) 東野・ほか3名, 内燃機関, 15-188 (昭51), 9.
- (6) 守田, 機論, 52-477, B (昭61), 1580.
- (7) 守田・片柴, 機論, 51-468, B (昭60), 2688.