自動車エンジンとエレクトロニクス

Electronic Control of Automotive Engine

井上 恵太*, 青木 啓二**
Tokuta INOUE Keiji AOKI

Key Words: Internal Combustion Engine, Control Device, Automobile Electronic Control, Fuel System, Ignition System

1. ま え が き

エレクトロニクス, 特にマイクロコンピュータの応用は各分野でめざましいものがあるが, 自動車への応用もその例外ではない. 特にエンジンの電子制御は排気, 燃費, 騒音の各法規制および高性能化への要求によって, 精力的に研究開発が行われてきた.

エンジンの場合の制御対象は燃料供給系, 点火系が代表的なものであるが, 新たに各種の可変機構が開発導入されつつあり, またセンサ, アクチュエータの進歩によって, 従来不可能であった高精度, 高応答の制御も可能となってきた.

さらに最近ではエンジン単体制御から, トランスミッション等自動車のパワートレインを一体とした制御に進みつつあるが, ここでは対象をエンジンに限定, エレクトロニクス応用の最近の状況を解説する.

2. エレクトロニクスによるエンジン制御

自動車用ガソリンエンジンの総合電子制御の代表例を図1に示す⁽¹⁾. 従来機械的, アナログ的に制御されていた燃料供給系および点火系は, 電磁弁式燃料噴射システムおよびフルトランジスタイグナイトシステムに変わり, これらをマイクロプロ

セッサを中心とした車載コンピュータがデジタル制御している. さらに, アイドルスピードコントロールバルブ (ISCV) は, エンジン冷却水温および負荷を検知して吸入空気量を制御しアイドル回転数を所定のレベルに保つ. また, 燃料供給系および点火系にはそれぞれフィードバック制御が加えられている. すなわち, 排気系に装着された O_2 センサが排気ガス中の酸素濃度から空燃比を検知し, 常に理論混合比になるように燃料量を制御する. これによって, NO_x , HC, CO 三成分同時処理用触媒コンバータの浄化率が最高に保たれることになる. また, エンジン本体に装着されたノックセンサがノッキングを検知し, 点火時期をノックしない限界に制御する.

このようにマイクロコンピュータによる制御は, 基本的にはあらかじめ定めた特性値をメモリにたくわえそれを再現する方式であるが, フィードバック制御の制御性向上ロジックおよび各要素

図1 エンジンの総合電子制御システム

* 正員, トヨタ自動車(株)東富士研究所(〒410-11 裾野市御宿1200).

** トヨタ自動車(株)東富士研究所(〒410-11 裾野市御宿1200).

の経時変化に対する補正制御ロジックが加えられ、さらに故障モードの記録・読み出しによる故障診断機能も付加されて、従来の機械的な制御システムにくらべはるかに応答性が高くかつ安定な制御が可能となっている。一方、電子制御固有の問題としてフェイルセーフおよびバックアップに対する考え方がある。このシステムの場合は、センサの異常信号に対しては判別ロジックを内蔵しており、エンジン破損につながらないよう点火時期または噴射量を制限している。また、マイクロプロセッサ自身の作動不良により噴射信号や点火信号が出なくなった場合は、あらかじめ定めた一定信号を発生し（バックアップモード）緊急運転を可能としている。

3. ガソリン燃料供給系

電磁式噴射弁の動作時間により供給燃料量を制御する電子式燃料噴射装置（以下 EFI）において、マイクロプロセッサを用いたデジタル制御導入に伴い、従来のアナログ制御にはなかった新しい制御法が導入され、排気浄化、燃費低減、エンジン動力性能向上の面で、重要な役割をはたしている。

この EFI の噴射燃料量計算法には大別して 2 種類がある。すなわちムービングベーン形や、熱線形のエアフローセンサでエンジンの吸入空気量を直接計測し、この吸入空気量から燃料噴射量を計算する“L-J”方式と、吸入管圧力およびエンジン回転数から間接的に吸入空気量を求め噴射量を計算する“D-J”方式とである。

図 2 非同期噴射効果

3.1 “L-J”方式への応用 通常 EFI では、燃料は各吸気ポートに装着されたインジェクタから点火タイミングあるいは一定のクランク位置に同期して、エンジン 1 回転当たり 1 回全シリンダ同時に噴射される。

このような同時噴射システムでは、噴射実行中にスロットル弁を急開して加速した場合、スロットル弁急開タイミングにすでに吸気中のシリンダでは、噴射燃料が大幅に不足するため、失火状態となる。この現象は車両でのショックと大きな前後振動につながる。このためスロットル急開時には同期噴射以外に図 2 のごとく、新たに非同期噴射制御を行い、加速性を改善している⁽²⁾。

非同期噴射制御では、非同期量を最適化するため、1 回の非同期噴射量と実行回数は、スロットル弁変化速度、エンジン回転数、エンジン冷却水温等の関数としてマイクロプロセッサで計算され与えられる。

さらに同期噴射実行中に非同期噴射要求が発生した場合は、同期噴射終了後に非同期噴射が実行されるよう制御されている。

3.2 “D-J”方式への応用 “D-J”方式は“L-J”方式に比較し、吸気圧力損失が小さい、システムの搭載性が良い等のメリットがある反面、従来のアナログ電子回路をベースとしていた場合は、空燃比制御精度が劣り、最近では“L-J”方式が主流となっていた。

しかし、マイクロプロセッサによるデジタル制御化により上記問題点を解決した新しい“D-J”方式が最近国内で導入されている。

このシステムでは、空燃比制御精度向上のために新しい制御法が用いられている。

一般に EFI エンジンではインジェクタはインテークバルブ方向に取付けられており、噴射燃料のかなりの部分はいちどインテークバルブ近傍に付着してからシリンダに吸入される。従ってスロットル開弁時は吸気圧が大気圧に近づいて蒸発量がへり付着量が増大するため、空燃比は希薄側に、逆にスロットル閉弁時は、吸気圧は負圧側になり、付着量が減少して空燃比は過濃側に変動する。“L-J”方式では、エアフローメータはスロットル弁上流にあるため、開弁時はオーバシュート、閉弁時はアンダシュート現象を起こし、これらの空

燃比変動が自動的に過渡補正される。一方, “D-J”方式では吸気管圧力は過渡状態においても, シリンダへの吸入空気量に比例するため, 大幅に空燃比が変動してしまう。

そこで, 吸気圧とエンジン回転数で決まるメイン噴射量のほかに, 吸気圧力, 吸気圧変化率, エンジン回転数, および, 冷却水温等により, 付着量に相当する補正量を計算して実行噴射量とする補正制御ロジックを採用することにより, 図3に示すよう著しく改善されている⁽²⁾。

また, “D-J”方式ではこのような過渡補正以外に, エンジンの経時変化による制御空燃比ずれという別の解決すべき課題がある。これは, 吸排

気弁のタペットクリアランスやピストンリングの経時変化による体積効率変化や, ブローバイガス量変化により起こる空燃比ずれ現象である。

この問題解決のため, O_2 センサに基づくフィードバック補正量の平均値が常に一定になるようにメイン噴射量の補正係数を更新する空燃比学習制御御が取り入れられている。

図4はインテークバルブのタペットクリアランスが変わり, 体積効率が変化した時の空燃比ずれと学習制御の効果を示したものである。

この学習補正係数はコンピュータのメイン電源が切られても, バックアップされメモリに常に保持されている。

3.3 希薄燃焼システムへの応用 O_2 センサ

と三元触媒を用いた理論空燃比フィードバックシ

図3 “D-J” EFI 過渡補正効果

図4 “D-J” 空燃比学習制御効果

図5 希薄燃焼システム

システムに対し、より低燃費を実現する図5に示すような希薄燃焼システムが最近導入された⁽³⁾。

このシステムでは要求希薄空燃比をあらゆるエンジン状態において、高精度に実現するためのリーンミクスチャセンサによるフィードバック制御システムと希薄燃焼限界を拡大するための独立噴射システムという二つの新たなシステムが採用されている。

このフィードバック制御では、エンジン回転数と吸気管圧力から決定される目標空燃比と現在の空燃比を比較し、燃料噴射量を修正し出力する。

目標空燃比は、通常の加速域で22.5、定速走行域は21.5、アイドリング時は15.5で、高速域はエンジン回転数が上昇するに従って空燃比は濃くなり、最高回転数付近では16程度に設定されている。また、独立噴射制御による燃焼改善効果が図6に示されている。

吸気流のスワール比をコントロールするバルブ

図6 独立噴射による燃焼改善効果

が閉の場合、独立噴射の噴射タイミングを負荷に応じて最適化することにより同時噴射に比較して大幅に燃焼改善でき、空燃比で25まではトルク変動を許容値以下に抑えることが可能となっている。このシステムは従来の O_2 センサフィードバックシステムに比較し10モード燃費で約20%の向上を実現している。

図7 点火進角特性比較

図8 電子進角システム

4. 点 火 系

点火系の電子制御としては、吸入空気あるいは吸気管圧力およびエンジン回転数より最適な点火時期を実現する電子進角と、ノッキングを検出して点火時期をフィードバック制御するノックコントロールシステムが一般化している。

図7は従来の遠心ガバナーとダイヤフラムを用いた機械式と、マイクロプロセッサによる電子制御方式の点火進角特性を比較したものである。

また、電子進角システムが図8に示されている。基本目標進角値は吸気圧力およびエンジン回転数を関数として表にされており、点火ごとに吸気圧およびエンジン回転数から補間計算により算出され、冷却水温やスロットル弁の位置に応じて補正され出力される。

電子進角は従来の機械式に比較し、3~5%の燃費向上が達成できる。

ところで高圧縮比エンジンやターボエンジンでは、最大出力進角より手前の点火時期でノッキン

グが発生する場合が多い。従って目標進角はノッキングが起こる手前の進角に設定する必要があるが、ノッキング発生点火時期は吸入空気温、湿度、大気圧、あるいは使用燃料成分により大幅に変化してしまうため、エンジンの安全を考慮して設定すると、通常的环境下ではエンジン出力が低下してしまう問題がある。そこでエンジンのノッキング状態を検出し点火時期をフィードバックするノックコントロールシステムが開発された。図9はマイクロプロセッサによるデジタル式ノックコントロールシステムのブロックダイヤグラムを示している。圧電セラミックスを利用した共振形ノックセンサからの入力信号は、バンドパスフィルタを介し、センサの平均レベルを判定するための半波積分回路、およびセンサの最大出力点、つまり最大ノック強度を検出するためのピークホールド回路による波形処理後、A-D変換器に入力される。ノックのフィードバック制御はソフト的に実行される。ノック判定は積分回路出力値とピークホールド回路出力値を比較することにより行われ、ノックを検出すると点火ごとに約 2°CA きざみで遅角し、ノックが発生しないところでは $1/16^{\circ}\text{CA}$ きざみで進角される。さらにノック制御の過渡応答性を向上するため、ノック学習制御が付加されている。これは、遅角量がある一定の範囲を越すような条件では、その超過量に応じた修正量を計算して学習しておき、その分をあらかじめ補正する制御法で、この修正量は常にメモリにバックアップされている。

5. 可 変 機 構

エンジン性能、燃費等のいっそうの向上のために、最近、新しい分野として、各種の可変機構、例えば、可変吸気システム、可変シリンダシステム、可変バルブタイミングシステム等が開発され始めている。

5.1 可変シリンダシステム これは加速時や、高速走行時など高出力を必要とするときは全シリンダ動作するが、アイドリングや、低速、低負荷走行など出力をさほど必要としない運転および、減速時は作動シリンダ数を半減して、ポンピング損失を減らし、低燃費を実現するシステムで

図9 デジタルノックコントロールシステム

ある。

作動シリンダ数を減少させる方法には単に燃料の供給を止める燃料カット方式や、燃料カットするとともに新気の代わりに排気を還流させる排気還流方式、および、吸排気弁を強制的に停止するバルブロック方式があるが、バルブロック式がもっとも燃費低減効果大きい。図 10 はバルブロック方式可変シリンダシステムである⁽⁴⁾。吸排気弁停止はオイルコントロールバルブを介し、弁停止装置付きロッカーアームへの油圧を制御することにより行われる。シリンダ半減域は燃費、ドライバビリティの関係からアイドリングおよび、減速時を含む図 11 の斜線部の低速・低負荷域に限定さ

れている。ただし斜線部内の運転域であっても、始動時、エンジンが冷間時、トランスミッションが 1 速または 2 速にセレクトされた時には、全シリンダ運転となる。このシリンダ切換えパターンでは、10 モード運転におけるシリンダ半減時間割合は 66% に達し、全シリンダ運転システムに比較し、約 20% の燃費低減が可能である。

5.2 可変吸気システム このシステムは吸気系の音響特性を変化させ吸入効率を増加させ、エンジンの出力を向上するシステムである。図 12 は 6 シリンダエンジンでの可変吸気システムの例で、吸気系は 1～3 番シリンダ群と 4～6 番シリンダ群に二分割され、2 箇所のエンジン回転でピー

図 10 バルブロック式可変シリンダシステム

図 11 可変シリンダ動作パターン

図 12 可変吸気システム

図 13 ディーゼル電子制御システム

図 14 噴射量特性比較

クを持つ吸気特性Aが得られている。

さらにこの二つの吸気系の間に吸気制御弁を設け弁を開けることにより、吸気系の音響特性を変化させ異なった吸気特性Bが得られる。

エンジン運転状態に応じて、制御弁を開閉し、吸気特性A、Bを使い分けることにより、吸気効率の高い特性を連続的に得て、全域にわたり動力性能を高めることが可能である。

6. ディーゼル燃料噴射系

ディーゼルエンジンでの電子制御化はガソリンエンジンに比較し歴史が浅く、1981年にトラック用列形噴射ポンプを用いた噴射時期制御システムが、さらに1982年に分配形噴射ポンプを用いた図13に示すような噴射量、噴射時期を電子制御する

本格的集中電子制御システムが導入された⁽⁵⁾。噴射量は従来と同様スピルリングの位置を変えることにより制御されるが、このシステムでは、スピルリングはリニアソレノイドにより自動制御されている。噴射量パターンは図14のごとく、従来のメカニカルポンプにくらべ複雑な制御が可能で、これにより排気規制を満足しつつ、加速性のすぐれたエンジン動力性能を実現している。噴射量と同様、噴射時期もタイミング制御弁による油圧制御により、自由に制御可能となり、排気、燃費、ドライバビリティ上、大きなメリットが得られている。

7. あとがき

以上、述べたごとく自動車用エンジン制御に対するエレクトロニクスの応用は、従来機能のエレクトロニクスへのおきかえに関する限りその展開の第1段階を終えつつあり、関係技術者の努力により信頼性の確立、コストダウンといった要求にも順次答えつつある。

しかし一方個人移動、貨物輸送の手段としての自動車の重要性はますます増大しており、今後“Fun to drive”への要求は、いっそう大きくなるものと思われる。排気、燃費、騒音といった最低限の要求をみたしたエレクトロニクス技術が、エンジンの高性能、快適性へむかって活用されなければならない時期がきているといえよう。

(原稿受付 昭和59年7月11日)

文 献

- (1) Ono, H., ほか3名, SAE Paper, No. 830423 (1983).
- (2) Toyda, T., ほか3名, SAE Paper, No. 800894 (1980).
- (3) 小林・ほか4名, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, 841 (昭59-5), 35.
- (4) 遠藤, 自動車技術, 37-3 (昭58), 301.
- (5) Miyagi, H., ほか3名, IPC Paper, No. 830862 (1983).