

自動車エンジンにおける燃焼制御の応答性改善に関する研究

付 景 順

要 旨

今日、世界の乗用車保有台数は5億台で10.4人に1人の割合で普及しているとされる。乗用車は我々の日常生活に便利さと豊かさを提供する必須のものとなっている。その動力源として、小型軽量かつ高出力であるところからガソリンエンジンが主流となっている。乗用車の普及とともに地球環境との調和が社会問題となり、近年のエンジンに関する技術開発は全てこの環境問題の解決に注がれてきたと言っても過言ではない。1970年に米国の上院議員 E.S. Muskie の提案に基づいて制定されたマスキー法、すなわち“自動車排ガス中の HC, CO, NO_x の排出量を 90% 以上削減する規制基準”が技術開発の起点となった。

1980年代に乗用車用ガソリンエンジンの燃料供給システムに排気抑制のための技術革新があった。気化器（キャブレッター）方式から燃料噴射（インジェクション）方式に切り替えられたことである。つまりマイクロコンピュータによる燃料噴射制御と三元触媒を組み合わせたインジェクションシステムが普及した。1990年代ではマイクロコンピュータの性能向上を活用して緻密に燃焼制御するインジェクションシステムの高精度化が進んだ。こうした技術の進展でガソリンエンジンの排気は、マスキー法から30年を経た2000年には1%以下にまで浄化された。

近年、地球温暖化防止やゼロエミッションの要求から、燃費低減と排気抑制を両立させるガソリンエンジンの切り札として、筒内噴射エンジンが登場した。燃料をシリンダへ直接に噴射するインジェクションシステムで、日本が世界をリードする希薄燃焼技術の一つである。この筒内噴射システムは燃料供給の遅れが無いことが特徴であるが、運転状況に応じて空気量を大幅かつ迅速に変動させることから、燃焼制御の応答性改善が重要な課題となっている。本研究は燃焼制御を構成する燃料制御、吸気制御、点火時期制御、空燃比制御（触媒制御）のなかで、制御アルゴリズム開発の効果が期待される吸気制御と点火時期制御に着目してその応答性改善をはかる。

本研究では制御アルゴリズムをシミュレーションで検証することから、まず、エンジンのシミュレーションモデルを構築することにした。モデリングの基本的考え方として、動特性をエンジンの物理的線形化モデルで表し、静特性を定常運転状態での実験データを用いる。吸気効率や燃焼効率といった非線形特性は、実エンジンで測定したデータを重畳する。さらにエンジンモデルの妥当性を検証するために、エンジンにトランスミッションを加えたパワートレイン系を構成して、車としての走行試験を模擬できるようにした。トランスミッション部分はメカニカルな挙動をパラメトリックモデルで記述した。走行試験の範囲での運転領域に対応できるようにシミュレータのパラメータを調整した。燃費走行試験のための10-15モード運転などをシミュレーションし、実車の特性に見合う良好な結果が得られた。この結果、エンジンのシミュレーションモデルが制御アルゴリズムの検証に利用できると判断した。

学位記番号と学位：第20号，博士（工学）

授与年月日：平成16年3月20日

授与時の所属：大学院工学研究科機械システム工学専攻博士後期課程

次に、吸気制御で最も応答遅れが課題とされるアイドル回転数制御を対象として応答性改善をはかることにした。一般に筒内噴射エンジンでは吸気制御のために電子制御スロットルを用いられる。燃費低減にはアイドル運転時の回転数を可能な限り低速にすべきであるが、電子制御スロットルの動きは吸気行程のサイクル遅れであるむだ時間により制約される。本研究では、むだ時間補償に効果の高いスミス制御方式に着目した。それはエンジン回転数の関数としてむだ時間を高精度かつ瞬時に計測できるので、スミス制御方式の欠点とされるモデル誤差が少ないからである。しかし、燃料供給や負荷の急変といった外乱によるエンジンストールの回避が必要で、そのためにフィードバック外乱補償と2自由度外乱補償の2方式を考案した。むだ時間を持つ2次遅れの制御対象において外乱に対する応答性改善の基本特性を比較した結果、スミス制御方式に2自由度外乱補償を組み合わせる方式が、応答性ならびに調整が容易という点で優れていることを明らかにした。またこれとともにモデル誤差による応答への影響も評価した。その結果、目標入力に対するスミス制御方式の効果を保ちつつ、外乱に対して即応できることが明らかとなった。エンジンモデルを用いて、アイドル回転数制御への適用をシミュレーションで検討した。エンジンモデルにおける外乱としては、揮発燃料分のパーージャステアリングの据え切り等がむだ時間の前後に印加される。シミュレーションの結果、外乱による回転数の落込みを半減できる結果を得た。これよりエンジンの燃費低減をはかるうえで、吸気制御の応答性を改善してアイドル運転時の回転数を低速化させる可能性を示した。

さらに、エンジンの点火時期制御において応答性の改善をはかった。希薄燃焼エンジンは回転数や負荷の変化に即応して空燃比が大きく変わるため、点火時期を最適調整することが難しい。ここでノッキングを僅かに生じる点火時期が、空燃比に依らず最も燃焼効率が高い。本研究ではノッキングの検出を迅速に実施する方策を取り上げることとした。従来のノッキング検出方式では8回転ほどの遅れがあり、これを1/2回転すなわち1燃焼行程内での検出を目標に検討を進めた。ノッキングは筒内圧力の共鳴振動であることから、エンジンブロックの振動センサあるいは筒内圧力センサで計測される。本研究はこうした計測された振動信号からの情報抽出、つまり信号処理技術の向上をはかった。ノッキングの生成と消滅は極めて短時間であるにもかかわらず、これまで使われてきたフーリエ変換では燃焼域にわたる平均値処理が必要であるので検出感度を低下させる欠点がある。ノッキングによる共鳴振動の検出感度を高めるために、局所的な状態変化の特徴を捉えるのに有利とされるウェーブレット変換を適用することとした。共鳴振動の検出にはマザーウェーブレット関数として、Meyer関数よりもMorlet関数が適していることをシミュレーションで明らかにした。さらにリアルタイム処理のためにウェーブレット変換の高速化をはかり、相関演算などの信号処理に関する縮約法を立案した。この縮約法はマザーウェーブレット関数の左右対称性と相関演算の領域限定を用いて、計算回数を約1/2まで削減できることを示した。エンジンに筒内圧力センサを設置して高感度に観測した結果から、ノッキングによる共鳴振動は単一モードの振動であり、同時に複数の共鳴振動モードは生じないことが分かった。この特性を利用して、オンボードでのノッキング判定法としてクランク角度に応じて共鳴振動モード間のスケール・パワースペクトルを比較する方式を提案した。この方式であれば、点火時期を1燃焼行程毎に制御することが可能となる。

本研究では、吸気制御と点火時期制御を改善した高応答燃焼制御システムを提案し、その効果をエンジンモデルによるシミュレーションで検証した。今後は、エンジンに組み込んで実験により応答性能を検証する必要がある。

主指導教員 栗原伸夫

Response improvement of engine combustion control

Jingshun FU

Abstract

So far, it is supposed that the car has spread through every 10.4 persons at one person's rate from the possession amount is 500 million in the world. With its convenience to consumers, car has become indispensable in our daily life. Gasoline engine, as the driving power of car, is also the mainstream in use for its small size, lightweight and large power. With the popularization of cars, whether the car can develop in harmony with the environmental pollution has become a social problem. It is not exaggerated that the technical development about engine is totally to solve the environmental pollution. Muskie Act, enacted in 1970, which is based on the proposal of U.S. senator E.S. Muskie becomes the standing point of technical development. The Muskie Act regulates that the emission of HC, CO and NO_x of automobile should be cut down by more than 90%.

In 1980s, there was a big technical innovation in fuel supply equipment of engine to control the mission. Fuel injection replaced carburetor, and a new injection system combined by microcomputer controlled fuel injection system and three-way catalytic became popular. In 1990s, the precision of injection system that utilizes the improved performance of microcomputer and carries out the combustion control progressed. With those technical improvements, the exhaust emission of engine was purified to 1% or less since the enactment of Muskie Act in 1970 to 2000 in 30 years.

In recent years, for the demand of global warming prevention or zero emission, direct injection engine was introduced as the trump card of a gasoline engine for the improvement of fuel economy and exhaust emission. The technique of direct injection is one of the advanced lean burn techniques of Japan in the world. Although this injection system features no delay in fuel supply, however, the air flow should be changed sharply and quickly according to the driving operation, so improving the response of combustion control has become an urgent research topic.

There are fuel control, intake air control, ignition timing control and air-fuel ratio control in the combustion control. This study pays attention to intake air control and ignition timing control which the effect of control algorithm development is expected and aims at response improvement.

Firstly, this study decided to build simulation model of engine due to the fact that the control algorithm should be verified by simulation. The principle in developing the simulator is using physical linear model to present dynamic features and collected measured data to static features. Intake air efficiency, combustion efficiency and those nonlinear characteristics are

piled up by the data from the real engine. Then, in order to verify the propriety of engine model, a power train system is constituted by adding a transmission in the engine model and make it function as a car in the fuel economy test. In the part of transmission, parametric models are used to describe the characteristics of mechanical action. The parameter of simulator is adjusted to be applicable in the operational range of fuel economy test. By the simulations of 10-15 mode and etc., the result shows that the characteristics of simulator are the same as a real vehicle. Therefore, the simulation model of engine can be used to verify control algorithm.

Secondly, the response delay is considered as a research subject in intake air control, so that it decided to aim at response improvement for the idle speed control. The most, electronic controlled throttle is used in direct injection engine for intake air control. The idle speed should be lowered as much as possible for fuel economy, however, the operation of electronic controlled throttle is conditioned by dead time, which is the cycle delay in the intake stroke. This study pays attention to Smith control, which is an effective way for dead time compensation, for the reason that there are few model errors which is the weakness of Smith control, since dead time, as the function of engine speed, can be determined accurately and instantaneously. The stall caused by disturbance such as fuel supply and sudden change of load should be avoided, so, two systems of feedback compensator and 2 freedom compensator for disturbance are devised. The basic characteristics of response improvement in these two systems for disturbance were compared on the controlled object of second order lag element with dead time. The result shows clearly that combining 2freedom compensator in the Smith control is quick in response and easy to adjust. Moreover, the interference on the response by model error was also evaluated with this. It is clear that the control system can not only keep the input effect of Smith control, but also resist the disturbance. Fuel purge or static steering and others are added before and after the part of dead time as disturbance in the engine model. It is possible to apply this system to idle speed control by means of simulating, and the result shows that it can reduce the stall caused by disturbance by half. According to this, in the aspect of improvement of fuel economy of engine, it is possible that the response improvement of intake air control can lower the idle speed.

Furthermore, the response improvement is aimed at ignition timing control of engine. The air-fuel ratio changes a lot to adjust the variation of engine speed or load for lean burn engine ; so, it is difficult to adjust ignition timing. The ignition timing to produce a knock slightly here does not depend on air-fuel ratio, but the combustion efficiency is highest. This study carries out the plan of fast knock detection. There is a delay like 8 rotations by the conventional knock detection system. In this study, the aim is to make the delay of knock detection within 1/2 rotation (in 1 combustion stroke). As the resonant vibration of pressure in cylinder, a knock is measured by vibration sensor in cylinder block or pressure sensor inside the cylinder. This study aims at collecting information of vibration signals and improving the signal processing technique. A knock can appear and disappear in a very short time, and the sensitivity detection of which is reduced. This is because by using the Fourier transform the

whole combustion process requires the average processing. In order to raise the knock detection sensitivity, the wavelet transform that is advantageous at catching the feature of local state changes is used. As the mother function in the knock detection of resonant vibration by simulating, Morlet function is more appropriate than Meyer function. raising the speed of wavelet transform is studied and the contracting method about signal processing of correlation calculation is drawn out. By using the symmetry of Mother function and limiting the range of calculating, the contracting method can reduce the time of calculating by 50%. According to the result of high sensitivity on pressure sensor in the cylinder, it is known that the resonant vibration from knock is single resonant vibration mode, and that two or more resonant vibration modes are not produced simultaneously. Based on this feature, comparing each scale power spectrum of resonant vibration modes according crank angle, as a method of onboard knock detection, is proposed. It is possible to control ignition timing in every combustion stroke by using this method.

In this study, the high response combustion control system which has improved intake air control and ignition timing control is proposed, and the effect is verified by the simulation of the engine model. In the future, it is necessary to equip this system on the engine and to verify response ability by experiment.

Professor (Chairperson) Nobuo KURIHARA