高圧燃料ポンプの静音化*

渡部 眞徳^{*1}, 徳尾 健一郎^{*1}, 町村 英紀^{*2}

Acoustic Improvement of High Pressure Fuel Pump

Masanori WATANABE^{*1}, Kenichiro TOKUO and Hideki MACHIMURA^{*1} Hitachi LTD, Hitachi Research Laboratory
Horiguchi 832-2, Hitachinaka-city, Ibaraki, 312-0034 Japan

Recently, the need for noise reduction of high pressure fuel pump has been increasing due to rising environmental consciousness and improving comfort. Based on our acoustic investigation under idling condition, we identified that the solenoid noise and the compression noise are dominant on high pressure fuel pump. We have investigated the acoustic improvement technique of the solenoid noise for high pressure fuel pump and came to a conclusion that the solenoid noise can be reduced ca. 3dB by using optimization of control parameters and a reduced spring force. In this paper, we explain the concept of noise reduction, the control method and the extent of acoustic improvement.

Key Words : High Pressure Fuel pump, Acoustic Improvement, Noise Reduction

1. 緒 言

近年、快適性の向上の観点から自動車コンポーネントに対して静粛性のニーズが高まっている。直噴エンジンの主要部品である高圧燃料ポンプにおいては、エンジンの回転数が低いアイドリング時の騒音低減が求められている。これまでの研究から、高圧燃料ポンプの主な騒音源は、電磁弁の衝突音と、高圧脈動に起因する騒音であることが分かっている。高圧脈動音に関しては、吐出弁の形状の最適化によって静音化を達成している⁽¹⁾。従って、本研究は、電磁弁音をターゲットとして静音化を検討した。電磁弁音は、弁の開閉による衝突音であるため、騒音低減には、弁の応答性を向上し、弁動作を制御して、衝突時の弁速度を遅くする必要がある。そこで、本研究では、構造と制御の両面から静音化のアプローチを検討した。ただし、コスト低減の観点から制御による方策をメインにし、構造での変更を最小限にした。本報告では、構造と制御による静音化の手法及び騒音低減効果について述べる。

2. 直噴エンジンの燃料供給システム

図1に直噴エンジンの燃料供給システムの概要を示す。本ポンプの主な構成部品はカム、プランジャ、電磁アクチュエータを備えた吸入弁、吐出弁である。カムはエンジンのカムシャフト等の回転動力を用いて駆動され、プランジャを往復運動させる。本ポンプには、燃料タンク内にあるフィードポンプから燃料が供給され、プランジャが下降する時に吸入弁を開き加圧室に流入される。プランジャが上昇する時に、吸入弁を閉じ加圧室内の燃料が圧縮され、圧力上昇によって吐出弁が開き、高圧燃料が吐出される。吐出された燃料はコモンレールを経てインジェクタから噴射される。本ポンプではエンジン燃焼に必要な燃料を吐出するよう ECU(Engine Control Unit)により流量制御を行っている。吸入弁は電磁アクチュエータによって閉弁動作を電氣的に制御できる構造となっており、電磁弁と呼ばれる。プランジャ下降時に加圧室に流入した燃料は、プランジャ上昇時に、吸入弁が開弁

* 原稿受付 2012 年 10 月 18 日 改訂原稿受付 2013 年 7 月 19 日

^{*1} 正員, (株)日立製作所 日立研究所 (〒312-0034 茨城県ひたちなか市堀口 832-2)^{*2} 正員, 日立オートモティブシステムズ(株)

E-mail: masanori.watanabe.or@hitachi.com

保持されていれば吸入側へ戻され、吸入弁が開弁すれば加圧室内で加圧され吐出される。プランジャ上昇時に吸入弁が開弁されるタイミングを制御して、吸入側へ戻される燃料と加圧される燃料の割合を変えることによって、吐出される流量を制御することができる。

Fig.1 Schematic drawing of direct injection fuel system

3. 高圧燃料ポンプの騒音の特徴

図2に実車ででの騒音測定位置を示す。同図に示すように遠距離音場用と近接音測定用の2つを用意した。遠距離測定用は、ポンプ本体から前方に60cm、上方向に60cm、直線距離で約80cmの位置に設置し、近接音測定用は、ポンプの直上10cmの位置に設置し、ボンネットを開けてエンジンカバーを取り外した状態で、アイドリング運転時に実施した。

Fig.2 Measurement position of noise

図3に遠距離測定用マイク位置での騒音のSTFT(Short Time Fourier Transform)結果を示す。この結果から、1.0kHz～2.0kHzと4.0kHz～5.0kHzの2つの周波数帯域が支配的であることが分かる。また、同図の圧力測定結果から、前者は加圧行程、後者は吸入行程に同期して発生していることが分かる。これまでの研究から、前者は加圧行程時に発生する高圧脈動音であり、後者は吸入工程時に電磁弁(吸入弁)が開弁する衝撃音であることが分かっている⁽¹⁾。そこで、本研究では後者の電磁弁音の低減について検討した。

Fig.3 Acoustic measurement result

4. 電磁弁音の低減

図4に電磁弁の構造を示す。左図は弁が閉じた状態で、右図は開いた状態である。本研究対象の電磁弁はノーマルクローズ式電磁弁である。ノーマルクローズ式とは、通常の電動アクチュエータ非通電時に吸入弁が閉弁し、通電時に開弁する方式である。電動アクチュエータ非通電時は、ばねの荷重によって吸入弁は閉弁方向（図中左方向）に付勢される。アンカーは吸入弁部材と一体に形成されており、通電されると、アンカーとコアとの間に磁気吸引力が発生し、アンカーを開弁方向（図中右方向）に付勢する力が働く⁽²⁾。電磁弁の衝突音は、アンカーがコアに衝突する時に発生する。この衝突音を低減するためには、磁気吸引力を必要最小限に抑え、アンカーがコアに衝突する速度を低減する必要がある。本研究では、必要な磁気吸引力を小さくするためにばね荷重を低減し、衝突速度を緩和するために電流値を制御した。

Fig.4 Structure of solenoid valve

ばね荷重を低減すると弁の応答性が向上する反面、弁のシール性劣化などのロバスト性が低減する可能性があるため、本研究では、それを鑑みてロバスト性確保の面からばね荷重の低減率を現状から 60%とした。図5に現状とばね荷重低減時での最小駆動電流の比較を示す。同図より、ばね荷重を 60%低減することで駆動電流を現状の 100%に対して約 30%まで低減できることが分かる。

Fig.5 Comparison of minimum current between current condition and reduced spring force

次に、電流値を制御する方法として、静音制御方式を考案し適用した。図6に従来の制御方法と静音制御方法の概念図を示す。従来手法とは図4に示す電磁弁を用いた制御方法であり、図6に示すように通電時に磁気吸引力によって弁が開弁方向に移動するのが特徴である。本制御方法は従来方法をベースに静音のための電流制御を施したものである。従来手法では、吸入工程の中盤でコイルに通電していたが、本制御方法では、吸入工程早期にコイル通電を開始する。それにより吸入工程時に吸入する開弁方向の流体力を利用することができ、少ない電磁力で開弁操作ができるようになる。更に、吸入弁が開弁動作をはじめる時に高い電流を与え、衝突する前には低い電流を与える。これにより、アンカーの初期動作を確実にいきかつ衝突前の期間でのアンカーの速度を抑えることができるので衝突時の騒音を低減できる。

Fig.6 Concept of noise reduction

図7に本制御方式で用いる制御パラメータ(PON, FON 及び PWM)を示す. ここで, プランジャが上死点 (TDC) の位置を基準として, 電流を与え始めるカム回転角を PON (Pulse ON) (deg)と定義する. 通電開始後, 100%通電し, 素早い電流立ち上がり促す期間を FON(First ON) (ms)と定義する. その後, 周期的(パルスの)に電流の ON と OFF を繰り返す PWM (Pulse Width Modulation)制御を行い, その Duty 比(ある時間区間に占める ON の割合)により電流を制限する. ここではその PWM duty 比を PWM(%)と定義する. 従って, PON は弁体が動き始めるタイミングを, FON は弁体の動き始めの速度を, PWM は弁体の後半の速度をそれぞれ制御していると考えられる. 本制御コンセプトは, 弁体に働く流体力や, 電気, 機械的遅れなど, 定量的に予測困難な要素の影響を受け, 机上で制御定数を決めるのは困難であるため, 実車を用いてパラメータ最適化を行った. 最適化にはポンプコントローラ³⁾を用いた. 本コントローラは, エンジンから出力されるクランク/カム信号, 燃料圧を読み取り, 上記のパラメータに合わせて任意のポンプ駆動波形を生成することができる. そこで, 本試験ではエンジン制御は既存の ECU を用い, ポンプの駆動信号を本コントローラから与えて, 3つの制御パラメータ(PON, FON 及び PWM)の最適化を行った.

Fig.7 Control parameters

図8に PON と FON の PWM をスイープした時の騒音に対する感度を示す. 左図は FON を固定して PON を現状から 5 段階でスイープした場合, 右図は PON を固定し FON を現状から 3 段階でスイープした場合の PMW の違いによる騒音レベルを示している. 同図で, PWM が高い場合(図の右方向)には PON と FON を変化させてもほとんど騒音レベルに変化がないが, PWM が低い場合(図の左方向)には PON と FON の変化(低減)に追従して騒音レベルが低減(最大約 4dB)していることが分かる. このことは, PWM を下げることによって, PON と FON の騒音の感度を上げることができ, それらの値の変更で現行レベルより騒音低減が可能となることを示している.

Fig. 8 Sensitivity to noise of PON and FON for swept PWM

Fig.9 Sound pressure level for swept PON and FON under minimum PWM

図9は、荷重低減ばね設置時にPMWを最も下げた状態で、PONとFONをスイープした時の騒音レベルの測定結果である。PONとFONともに小さくする方が騒音の低減効果は高いことが分かる。しかしながら、これらの制御パラメータはポンプ動作に影響を及ぼすため、ポンプが正常に吐出動作出来る範囲でパラメータを最適化する必要がある。そこで、実際には、電磁弁動作を保証できる下限値を把握することとした。最低動作限界は、PON、FON及びPWMの3つのパラメータが相互に影響するため、本研究では、まず、各PON、FONの組合せで、ポンプが正常に吐出動作できる下限のPWMを実験的に求め、次に、ポンプが正常に吐出動作できる状態を確保して、最適な制御パラメータの組み合わせを決定した。

図10に荷重低減ばねと電流制御パラメータ最適化時の騒音レベルの測定結果を示し、図11にSTFT結果を示す。これらの図には、現行量産品での結果を同時に示している。図10より、現行量産品に比べて騒音を約3dB低減できていることが分かる。なお、今回使用したポンプは、電磁弁の衝突音が支配的であるため、本低減効果は衝突音の低減効果であると考えられる。図11のSTFT結果においても、4kHz近傍の弁の衝突に起因する高周波騒音が低減できていることが分かる。同図には、電流値も同時に示している。電流の波形は、従来(左図)のように、ゆっくりと電流を上げていくより、今回(右図)のように最初に電流を大きく流し、弁が衝突する手前で電流をカットして、ゆっくり衝突させること、つまり、“ソフトランディング”が騒音低減に有効であることが分かる。

Fig.10 Sound pressure level of reduced force spring and control parameter optimization

Fig.11 STFT of reduced force spring and control parameter optimization

5. 結 言

高圧燃料ポンプの電磁弁音の低減を目的として、必要とする電磁吸引力の低減および電流の制御方法を検討した結果以下の結論を得た。(1)ばね荷重を低減することにより弱い電磁力に対しても高応答な弁駆動を可能にした。(2)電磁弁のアンカーがコアに衝突する直前に駆動電流を低減する静音制御手法を確立した。(3)ポンプコントローラにより駆動電流の制御パラメータ(PON、FON及びPWM)を最適化した。(4)上記の結果、電磁弁音を現行量産品から3dB低減できた。

文 献

- (1) 徳尾健一郎, 有富俊亮, 今野仁志, 町村英紀, “ロバストデザインによるポンプ脈動音の低減”, 日本機械学会演論文集 B 編, Vol. 78, No. 776 (2012), pp2054-2061.
- (2) 徳尾健一郎, 有富俊亮, 臼井悟史, “直噴ガソリンエンジン用高圧燃料ポンプの開発”, 日本機械学会演論文集 B 編, Vol. 77, No. 779 (2011).
- (3) Jonathan Borg, Kenichiro Tokuo, Shiro Yamaoka and Masanori Watanabe, “On the simulation and control of a gasoline direct injection pump”, SIA (Societe des Ingenieurs de l'Automobile) European Mechatronics Meeting. Paris (2009).