

研究の課題名

電気油圧サーボ機構を応用した 急速圧縮膨張装置の最適制御

茨城工業高等専門学校 助教授

報告者 小堀 繁治

報告日 2004年(平成16年)4月20日

1. 本研究の意義、特色

内燃機関の基礎実験装置として電子制御一油圧駆動式で、単発の急速圧縮膨張装置を開発した。最大行程96mm、往復時間50msでピストンを動かすと最大軸推力は80kNにも達する。ピストンの動的位置精度の向上を目的にピストンとスプール変位を同時にフィードバックしているため、その特性は非常に複雑である。そのためゲイン調整は経験による所が大きく、しばしば制御系の暴走を引き起こした。そこで本研究の目的は動作の数値計算コードを構築し、実験データと比較検討を行い、装置の特性を明らかにすることである。

2. 実施した研究の具体的内容、結果

試作した急速圧縮膨張装置(RCEM)の要求性能は最大駆動周波数20Hz、最大行程96mm、最大燃焼圧力10MPaであり、燃焼室の被駆動ピストン直径を100mmとするとピストンの駆動に要する軸推力は約80kNとなる。作動油圧を20.6MPaとすると、要求される駆動ピストン直径は80mm、軸直径は24mmとなり、この要求性能を得るために、スプール弁の仕様はスプール直径40mm、スプール最大変位±5mmとなった。このスプールを動作させるために折点周波数120Hz、最大流量 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ のサーボ弁(YUKENSVD-F13-60)を使用した。

RCEMの特性を明確にするため、動作の数値計算コードを構築した。本装置ではピストンの高い動的位置精度を実現するため、ピストンとスプール変位を同時にフィードバックさせた。数値計算はサーボ弁、スプール弁、アクチュエータ、ピストン駆動用アキュムレータ、スプール駆動用アキュムレータおよび燃焼室について流量式、状態式および運動方程式を連立させ、油の圧縮性を考慮して、差分法により時間刻み0.001msで行った。計算に際して、1)スプール弁の流量係数0.57一定、2)スプール弁の漏れはない、3)各部の摩擦を無視、4)燃焼室内とアキュムレータ内の窒素ガスの状態変化におけるポリトロップ指数は1.4一定、5)サーボ弁の位相遅れは仕様書の値を用いる。参考までに20Hzの位相遅れは2msである。

大流量の作動油が要求されるアクチュエータの場合、スプール弁の漏れ流量を抑えるため、オーバーラップ(L)を大きくする傾向がある。一般にLが大きくなると、ピストンの立ち上がりの遅れと共に不感帯も大きくなり、ピストンの制御性が悪化するので、このLはシステム性能を決定する重要な設計因子となる。そこでL=0mmと設計値であるL=0.7mmで、ピストンの動きを20mmのステップ入力に対する応答、即ち過渡応答で調べた。実験結果においてスプールは約2ms後に動き始め、それに伴いピストンも動き始める。ピストン変位は目標値に対してオーバーシュートし、12ms後に最大値25mmに達した。その後、極小値をとり、22ms後に定常状態となった。一方、L=0.7mmの計算結果ではピストンの動き始めは同じだが、18ms後に定常状態となり、オーバーシュートは観察されなかった。また定常値は18mmとなり、目標値に達しなかった。L=0mmの計算結果は実験に近い傾向を示した。即ちオーバーシュート

が観察され、16ms後に最大値25mmとなり、その後多少振動が観察されたが目標値の20mmに一致した。この理由として実験ではオーバーラップが設けられているものの、実際にはスプールとケース間には隙間があるので油の漏れが生じている。これは実際のオーバーラップを小さくする効果があるので、数値計算において $L=0.7\text{mm}$ より $L=0\text{mm}$ の方が実験値に近くなったと思われる。

次に実験においてストロークを96mmとし、往復時間50msで単発往復試験を行った。その結果、スプールは6ms後、それに伴いピストンも10ms後に動き始めた。ピストンの往復時間は約48msでほぼ正弦曲線を忠実に再現している。しかしストロークが96mmに達すると4ms程度の停止期間が存在する。これはストローク不足を防ぐために、ピストンをケースのエンドプレートに衝突させた結果である。この計算結果においてもスプールとピストン変位共に実験値をほぼ忠実に再現した。尚、ゲインを小さくすると停止期間は変化せず、フルストロークしなかった。

数値計算において単発で往復させた場合について、オーバーラップがピストンの動きに与える影響について更に調べた。 $L=0\text{mm}$ にすると、ピストンの立ち上がり時間が6ms、往復時間が50ms、フルストローク時の停止期間は1ms以下にまで小さくすることができた。また逆に $L=1\text{mm}$ にすると、ピストンの立ち上がり時間が大幅に遅れ、フルストローク時の停止期間は更に長くなり、ピストン波形は矩形に近くなる。以上の結果から、スプール弁のオーバーラップは0mmが望ましい。しかし、実際問題として作動油の漏れ問題、また加工に関連して高精度を維持することが困難であるので、本装置の $L=0.7\text{mm}$ は妥当かと思える。機械加工の精度が保障されるならば0.5mmまでオーバーラップを小さくしてみたい。

最後に実験と数値計算の両方で往復時間を変化させ、各周波数に対する位相遅れとゲインを求めボード線図に表した。その結果、実験と計算結果の一致性は高かった。一連の研究結果から構築した電子制御—油圧駆動方式の急速圧縮膨張装置の数値計算コードは妥当であり、ほぼ忠実に模擬できることが分かった。

この数値計算を用いて、RCEMのゲイン調整をコンピュータ上で行った。その結果、スプールゲインには安定領域が存在し、小さすぎても大きすぎてもピストンは暴走することが分かった。スプールゲインを安定範囲内で大きくすると、ピストンの立ち上がり時間が早くなるが、ゆっくりと移動開始位置に戻る。またピストンの移動距離が短くなる傾向がある。このような状態でピストンストロークを大きくするためにピストンゲインを大きくすると、暴走することが分かった。一方、スプールゲインを小さくすると、ピストンの立ち上がり時間が遅くなり、フルストローク後、素早くピストンが移動開始位置に戻る。またピストンストロークは大きくなる。以上の結果からRCEMのゲイン調整は初めに適切なスプールゲインを決定し、その後、ピストンゲインを暴走寸前まで大きくすれば、ピストンゲインを最大にし、応答性も高くなることが分かった。

更に性能を向上するためにゲイン以外のパラメータを変化させ、RCEMの性能を評価した。その結果、ピストンのストロークを維持した状態で高応答性を実現するためには、1) スプール質量の軽量化、2) スプールを駆動するためのサーボ弁とスプール弁をつなぐ接続管内体積の減少、が有効であることが分かった。

以上の結果を元にRCEMのゲイン調整を行った。その結果、ピストンの挙動は計算で得られた挙動とほぼ同じ傾向を示すことが観察された。更に、計算から得た装置の特性を考慮すれば、容易にゲイン調整でき、またピストンの動きをモニターするだけで、スプールおよびピストンゲインの次の調整量が分かるので、容易にゲイン調整できることが分かった。本研究結果はRCEMだけではなく、電気制御—油圧駆動方式の油圧制御機器全般のゲイン調整に用いることができると考えられる。

3. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

小堀繁治 茨城工業高等専門学校 助教授

4. 研究実施時期

平成15年4月1日から16年3月31日まで

5. 本研究に関連して発表した主な論文等

高過給ディーゼル機関の着火遅れに関する研究、日本機械学会論文集(B編) 69巻 684号 (2003-8)

6. 内外における関連研究の状況

現在の所、アクチュエータピストンの移動速度が6m/sを越え、軸推力80kN、移動距離96mm以上の電気制御一油圧駆動方式のエンジンシミュレータは東京工業大学、武蔵工業大学、三菱重工、つくばの機械研究所にあるだけで、未だ経験によるゲイン調整を行っている。シミュレーションコードはどこも所持していないので、本研究結果が最も進んでいると思われる。

7. 今後の発展に対する希望

今回、スプール弁の作動油の漏れを考慮しなかったが、漏れを考慮すれば更に一致性が高くなるので、次年度に期待したい。漏れを考慮した動作シミュレーションが完成したならば論文として投稿する予定である。今回、ディーゼルエンジン用のシミュレータを対象としたが、本研究を参考にし、スケールダウンしたRCEMを設計製作したい。この装置が完成すれば電気油圧サーボ機構を理解するための教育機器として学生実験等で活躍できると思われる。もし安価なサーボ弁、サーボアンプ等がございましたら紹介頂きたい。