



Quick Start

2.6 秒で 0 回転から 30,000 回転に
到達

ヘリコプターのエンジンを高速に始動して、緊急時用の冗長安全エンジンとして使用できるようにするにはどうすればよいでしょうか。ミュンヘン工科大学のターボ機械および飛行推進科では、調整された圧縮空気を使用して、始動時間を最大 90% 短縮しています。

安 全上の理由から、現在のヘリコプターには、一般に 2 台のターボシャフトエンジンが搭載されています。この冗長性により、一方のエンジンが故障しても、もう一方のエンジンからヘリコプターの飛行維持や予防的着陸手順の開始に必要な出力が確実に得られるようになっています。そのため、複数のエンジンを持つヘリコプターでは通常、両エンジンの性能が同時に必要とされるのは離着陸時のみです。つまり、高速飛行中や上昇時にはエンジンの出力は一般的に余力がある状態です。離着陸時以外では常に、同時回転するエンジンは部分負荷域のみで動作しているため、燃料消費量は比較的高くなります (図 1)。現在では、エンジンの動作方式の最適化により、燃費向上の実現が図られています。

目的：燃費向上

燃費向上のために、Intended Single-Engine Operation (ISEO：意図的単エンジン運転) という制御方法により、1 台のエンジンをオフにすることが考えられています。この場合、残りのエンジンの出力を上げる必要がありますが、それによって一定の燃費改善効果が得られ、その結果、燃費が向上し、排気ガスの排出量が低下

します。この手法は、沖合いにあるプラットフォームへの貨物航空便や長距離の陸上接続便など、一定の速度で比較的長距離を飛行するケースで特に有用です。現状のテクノロジーを活用すれば、最大 21% の燃料を節約できるという調査も示されています。

問題：出力の喪失

ISEO モードで飛行する際は 1 台のエンジンしか使用しないため、必然的に飛行時の安全性も低下します。動作中のエンジンに何らかの問題が発生した場合でも、2 台目のエンジンの始動には標準的なスタータジェネレータで最大 26 秒かかる可能性があるため、直ちにエンジンの動作を引き継ぐことはできません。この始動フェーズでは、ヘリコプターのメインローターはオートローテーションのみで回転を続けます。つまり、回転を生じさせるのは降下中のヘリコプターの気流のみであり、ヘリコプターの高度は大幅に下がります。通常の降下速度を 15 m/秒とした場合、降下距離は 400 m 以上になる可能性があります。この時間の経過後、ようやく 2 台目のエンジンが再始動し、再び十分な出力が提供されることとなります。ISEO モードでの飛行時には、高度の低下

>>

を考慮する必要があります。これは、有効飛行範囲が制限されることを意味しており、これを回避するには、エンジン始動の迅速化が必要になります。

解決策：エンジン始動時間の短縮

通常、小型ヘリコプター用のガスタービンは、バッテリー駆動モーターで始動します。このタイプのスタータシステムは重量に合わせて最適化されているため、コアエンジンであるガスジェネレータのシャフトには限られた加速トルクしか提供できません。また、モーターとエンジン間のトランスミッションギアは、高いトルクに対応するには設計されていません。そのため、エンジンの始動フェーズを短縮するには、その他の方法が必要です。ヘリコプターの大抵のターボシャフトエンジンでは、コアエンジンシャフトの力が大きいので、圧縮空気の強力な噴射をコアエンジンのラジアルコンプレッサブレードの翼後縁に向けてることによってすばやいシャフトの回転を促すコンセプト（図2）は、極めて効果的です。

目標：信頼性の高い自動スタート

クイックスタートシステムには、完全な信頼性が求められます。また、ISEO 自体が、クイックスタートシステムを搭載する際の重量を考慮してもなお十分ほど、大幅に始動時間を短縮できるコンセプトでなければなりません。ミュンヘン工科大学の研

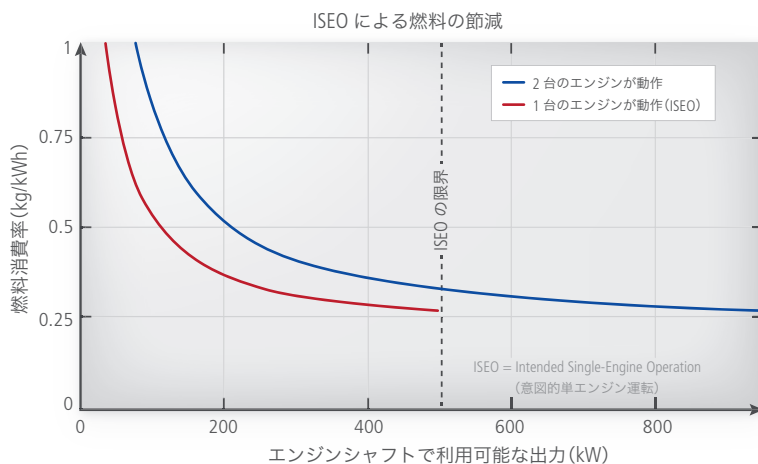
究チームは、主に解析計算を行っています。このような種類のシステムに関する実験も行っています。同大学のラボ内のテストベッドでは、この実験のために Allison 250-C20B ターボシャフトを使用しています。最初の機能テストでは、5つのラバーノズル（高速気流に適した特殊形状ノズル）を統合した改良型のラジアルコンプレッサ筐体を設計しました。同チームは最初に、テストベッド上に13パールの圧縮空気を供給して、ノズルへの給気を行いました。次のステップでは、200パールの圧縮空気タンクを使用しました。

要件と課題

高い気圧に対処しながら、エンジン制御ユニットの反応時間を最適化することは、非常に大きな課題でした。なぜなら、クイックスタート時に100分の1秒単位での計算を行いながら、一方で、制御対象のコンポーネントを迅速かつ正確に動作させる必要があるためです。始動に必要な計算上のクイックスタート時間はわずか3秒であり、その間にエンジンは停止状態から30,000回転/分まで加速します。これは、コアエンジンの設計上の回転速度の60%に相当します。この間に、コントローラは、一定の回転速度に達した際の燃料放出バルブ制御や、圧縮空気バルブを閉鎖するための信号送信など、さまざまな制御および監視タスクを実行する必要があります。また、燃焼室後部のガ

- 1 高圧タービン：燃焼室からの高温のガスを減圧した後、コンプレッサおよびトランスミッションを介して付属装置を駆動します。最高回転速度は約 50,000 rpm です。
- 2 低圧タービン：高圧タービン通過後の高温のガスを減圧してから、トランスミッションを使用してヘリコプターのローターを駆動します。最高回転速度は約 30,000 rpm、連続出力は 298 kW です。
- 3 コンプレッサ：6つの軸方向ステージとラジアルパワーステージで構成されます。最大空気流量は約 1.5 kg/s、最大圧縮比は1:7です。燃焼室に圧縮空気を供給します。
- 4 噴射エレメントと点火プラグを備えたつぼ型の燃焼室。
- 5 燃料計量ユニット。dSPACE システムで制御します。
- 6 通常のエンジン始動用の電動スターターモーター。
- 7 排気ディフューザ。排気ガスを大気圧まで減圧します。
- 8 電磁渦電流ブレーキ。dSPACE システムで制御します。ヘリコプターのローター、ヘリコプターの出力要件の順にシミュレートします。
- 9 エンジンの空気供給システム。
- 10 圧縮空気ボトル（最大 230 パール、15 リットル）。クイックスタートに必要な圧縮空気を供給します。

図1：一般的には2台のエンジンが最適とは言えない部分負荷で動作しますが、ISEOを使用すると、1台のエンジンのみがより高い負荷で動作するため、エンジンがより優れた燃費域で動作ようになります。その結果、1台のエンジンの動作のみで2台のエンジンを同時運転する場合と同等のパフォーマンスを実現することができ、燃費も向上します。



ス温度など、セーフティクリティカルな値も監視する必要があります。テスト操作ではさまざまなクイックスタートパラメータを設定する必要があるため、同大学では、計器、表示部、入力マスクなどの設定オプションが多数用意されている dSPACE ControlDesk などの GUI を活用しました。これらは極めて有用でした（図4）。

制御システムの予備開発

同大学のチームは、事前にクイックスタート制御システムをテストするため、MIL (Model-in-the-Loop) テストを実施しました。そのため、MATLAB®/Simulink® 上で、始動フェーズモデルをエンジンの既存のリアルタイム対応準非線形状態空間モデルに追加しました。同チームでは、計測データに基づいて、エンジンの通常の動作範囲を停止状態とエンジンアイドル

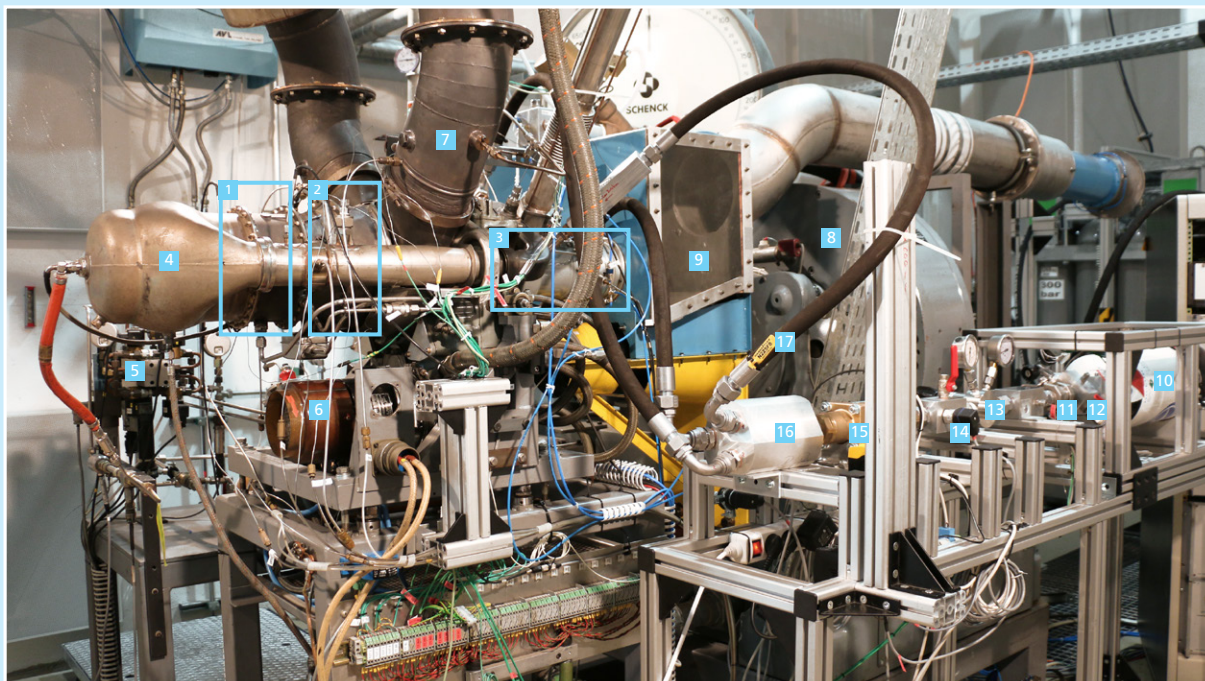


図 2 : Allison 250-C20B ターボシャフトエンジンを搭載したテストベッドの概観

- 11 ボトル充填時にメイン圧力ラインを閉鎖するためのボールバルブ。
- 12 ボトル充填バルブ、圧力計測、および温度計測用アダプタ。
- 13 ノズルの固定出力圧力を維持するための調整可能な圧力レギュレータ。
- 14 保守作業時の圧力解放制御、圧力計測、および温度計測用アダプタ。
- 15 クイックスタートでの圧縮空気解放用の同軸バルブ。dSPACE システムで制御します。
- 16 3つのノズル供給ライン用のディストリビュータブロック。
- 17 ノズルの接続用チューブ。

「オープンで強力な dSPACE リアルタイムシステムでは、MATLAB/Simulink を通じて新しい制御機能を迅速かつ効率的に実装し使用することができます。」

Martin Kerler 氏、ミュンヘン工科大学

グの間の範囲にまで拡張しました。また、実際のクイックスタートシステムを数値によって 1 次元でシミュレートし、急加速トルクなどの必須のシステム値を定義し、それらの値からバルブ開放時間などの重要な制御パラメータを導き出しました。これらの値は追加のクイックスタート制御アルゴリズムに含めました。これらの中には、燃焼室で発生した高温ガスによりコアエンジンを急加速する場合に必要な燃料の噴射量を指定するアルゴリズムもありました。同チームは、これらのアルゴリズムを早期の段階でテストすることにより、クイック

スタートを完全に自動化した場合の潜在的な問題を解決し、関連する制御アルゴリズムの妥当性を確認することができました。次に必要なステップは、試験エンジンにクイックスタートシステムを実装することでした。

統合型制御システムのセットアップ

同チームは、デュアルコア搭載 DS1007 PPC Processor Board、DS2103 Multi-Channel D/A Board、PX10 拡張ボックスの DS2002 Multi-Channel A/D Board で構成された dSPACE システムを

エンジン制御に使用しました。32 チャンネルの入出力ボードは、エンジンやクイックスタートシステムにおけるさまざまな制御タスクや監視タスク向けに十分な能力を提供します。Simulink でモデリングしたコントローラは、プロセッサボードの 2 つのコアに分散しました。1 つ目のコアでは、入出力値の前処理と後処理を行い、エンジンパラメータを監視します。これには Simulink の仮想エンジンモデルも組み込まれており、実際のエンジンと同時に動作します。2 つ目のコアは、実際の制御タスクを処理します。このようにして、1 ミ

>>

リ秒というコントローラ更新周期を実現することができました。同チームは dSPACE ControlDesk を使用して GUI を作成し、エンジンとクイックスタートシステムの制御および監視を行いました。この GUI では、エンジンの動作中でもエンジンコントローラを再コンパイルすることなく、制御パラメータを変更することができます。20 年以上にわたって定期的に更新されている dSPACE システム（ハードウェアおよび ControlDesk）と MATLAB/Simulink の組み合わせは、同大学のテストベッドにおけるテストおよび研究活動に適した強力な開発ツールになりました。また、このシステムは継続的な開発タスクにも見合う十分な低価格で提供されているため、長期間にわたり使用することができます。

最初のテスト運転の結果

200 バールの独立型圧縮空気供給システム搭載エンジンによる最初のテスト運転の目的は、エンジンをとりわけ安全性が高く再現可能な状態で迅速に始動することでした。エンジンのコンプレッサはわずか数ミリ秒で通常動作へと移行するため、圧縮空気ノズルをオフにする際の切り替え時間は特に重要でした。最初のテスト運転後、同チームが若干のパラメータを調整したところ、非定常加速プロセスから定常アイドリングへの移行を安定化することができました。クイックスタートシステムでは、エンジン始動時間が一

般的な 20° C の周囲温度で 90% 削減、すなわち 26 秒からわずか 2.6 秒に短縮されると同時に、コアエンジンの加速は 30,000 回転 / 分にまで達しました。圧縮空気タンク内の圧力は 200 バールから 100 バールに低下し、1.52 kg の圧縮空気が消費されました。

まとめと今後の展望

このテスト運転では、独立型圧縮空気供給システムを搭載した 300 kW ターボシャフトエンジンにおいて、エンジンのクイックスタートを確実に実行することができました。達成した始動時間は予測値を上回っており、理論的にはさらに短縮可能です。現在行われている追加研究の焦点は、クイックスタート時の熱力学的燃焼プロセス、システム動作が摩耗や製品ライフサイクルに与える影響、完全なヘリコプターパワートレインのエミュレーションです。さらに、同大学のチームでは、ヘリコプターに組み込み可能な、重量および体積が最適化されたバージョンをテストできるようにするため、より高圧かつ新しいノズル形状を備えた圧縮空気システムをテストしたいと考えています。dSPACE システムは、開発およびテストプロセス全体で使用されており、テストの成功に大きく貢献しています。 ■

Martin Kerler 氏、
ミュンヘン工科大学

- 1 エンジン状態の表示部
- 2 燃料消費量の表示部
- 3 エンジンパラメータの警告表示部
- 4 緊急時のエンジン制御部
- 5 通常時のエンジン制御部
- 6 クイックスタートシステムのオン/オフ部
- 7 点火プラグのオン/オフ部
- 8 電動スタータモータのオン/オフ部
- 9 MIL または HIL シミュレーションの選択部
- 10 圧縮空気供給源の選択部
- 11 通常始動またはクイックスタートの選択部
- 12 エンジン制御の選択部：ヘリコプターシミュレータまたはテストベンチ
- 13 エンジン限界値の設定部
- 14 重要なエンジンパラメータに関する警告表示パネル
- 15 エンジンおよびクイックスタートシステムに送信されるコマンドの D/A 表示部
- 16 FADEC（全デジタル電子式エンジン制御装置）入力計測値の A/D 表示部
- 17 抽気バルブ制御パネル
- 18 電磁渦電流ブレーキ制御パネル
- 19 ポンプ検出口ロック制御部
- 20 FADEC の追加表示および要素選択部

図3：ガスタービンの通常始動（赤）とクイックスタート（緑）の比較。クイックスタートでは 2.6 秒以内に最高速度の 60% に到達します。通常始動に必要な 26 秒と比較すると、開始時間は 90% 短縮されます。

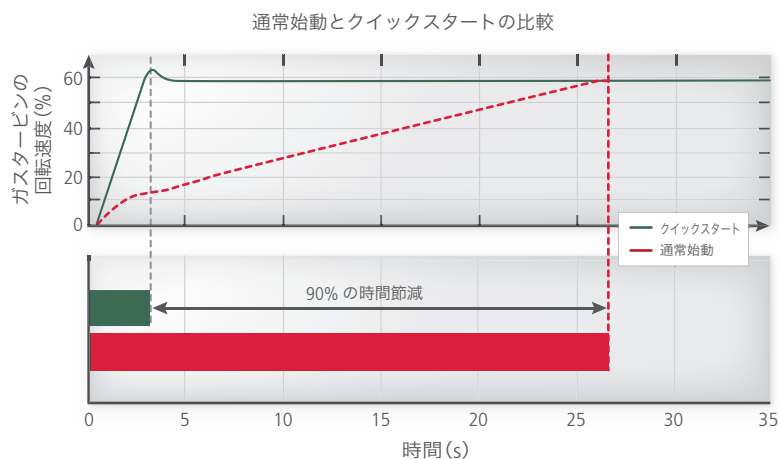




図 4 : dSPACE ControlDesk の GUI により、エンジンテストのさまざまな制御および表示パラメータを明確に表示することができます。

「dSPACE ControlDesk を使用すると、エンジンの動作に関連するすべての計測値および制御パラメータを明確に表示することができます。ControlDesk は極めて柔軟性に優れているため、新しいアイデアをすばやく実装することが可能です。」

Martin Kerler 氏、ミュンヘン工科大学

Martin Kerler 氏

ターボ機械および飛行推進科の研究員
(2017年9月末まで)、ミュンヘン工科大学 (ドイツ)

