

称号及び氏名	博士（工学）松葉匡彦
学位授与の日付	平成 17 年 1 月 31 日
論文名	「空気調和機による温度・湿度制御系の設計および調整に関する研究」
論文審査委員	主査 伊東 弘一 副査 角田 敏一 副査 吉田 篤正

論文要旨

建物の空調システムは、居住空間や製造施設の温度・湿度・空気質や気流を所望の状態に維持するため、冷房・暖房や外気の取り入れを行う役割を担い、空調機などにより空気の状態を調節し室内へ供給している。温度・湿度の維持に対しては、各種熱源から供給される熱媒により内部で発生する熱負荷や外部からの熱を除去すると同時に、居住空間の空気質維持のため、内部で発生する CO₂ などの濃度が規制レベルを超えないよう常に外気取り入れと排気を行う必要がある。空調システムは熱交換プロセスであるが、熱交換のポテンシャルとなる温度差に比べ、制御の外乱となる外気状態や内部負荷の影響が大きく、制御工学の視点からは平衡点の移動が無視できない水準にある。

空調システムの上位に位置するビルディング・オートメーション・システムは、建物使用者の多種多様な要望に応えるべく、近年、分散型制御が主流となっている。テナント別に完結した温度調節システム構成を採るビルマルチタイプが併用される場合もある。通常、上位では電気・防犯・防災・空調機能を統合的に監視し、各機能は、システム間で連携をとりつつそれぞれは独立に運転されている。また、空調システム自身も危険分散の観点から分散型制御が多い。機能実現のため、状況に応じて各部の機能や設定を自動またはオペレータ操作により変更することもしばしば行われている。下位の制御はそれぞれに個別の自動運転機構を備え、上位からの指令に従って作動する。個々の下位制御ループは上位または居住者用操作端末からの設定変更に対して速やかに追従しつつも、制御ループを安定に維持しなければならない。

下位の制御ループに目を向けてみると、商用建物では、一物件で多数のループが存在し、また生産系ではないため制御対象の多様さ・複雑さのわりに一つ一つの制御構造は簡易で

あり、それぞれの制御系では他の制御系の動作が静特性に基づく設備設計当初の期待通りであることを前提として考えられている場合が大半である。また、取り入れ外気温度・湿度や内部負荷の変動といった純粋な外乱に加え、冷凍機の容量制御等による冷水温度の変動や他の空調機での制御弁の動作による弁前後差圧変動に伴う流量特性の変化、変風量制御による風量変化など、他の制御系の動作に起因した、応答特性に寄与する変動要素が多く存在する。空調機での温度調節にはコイル通過水量を変化させる制御弁が一般的に用いられているが、前記の変動要素に加えて弁の特性は通常非線形であり、制御設計問題としては扱いにくい対象となっている。

一方、社会的な要求として、環境維持のための省エネルギー方策が空調システムにも取り入れられてきている。その多くが、複数の制御系の連携を必要とするものであり、建物空調システム全体の効率向上のためには個々の制御系が適切に動作するよう調整されていることが要求される。

従来の空調制御では、静的な解析として、コイルの熱交換特性、送水機の運転台数および圧力特性と配管抵抗特性とで決まる流量特性などの設備設計や、動的な問題解決として、経験に基づく実績値が制御対象ごとに用いられていたが、典型例に当てはまらない事例、装置構成の変更などに遭遇すると、適正パラメータの探索に時間が掛かるか、またはたどり着くことができない場合が多く、空調制御のための制御設計および調整の工学的アプローチが必要となっている。

本論文では、制御工学の視点から、空調機を中心とする温度制御系および温度・湿度多変数制御系について、制御対象の伝達関数または同定による状態空間モデルの記述、およびパラメータ設計と応答解析に関する具体的な特性とその取り扱いを示した。まず1入力1出力系を扱い、空調機による温度制御系の伝達関数表現に基づき幾つかのPID制御系における調整法を示した。さらに、多入力多出力系については、室内温度・湿度制御系の多次元状態空間モデルによるモデル化および制御系設計手法を導入し、実験プラントに適用して妥当性と有効性に関する知見を得た。

本論文は、以下の8章より構成されている。

第1章では、空調における自動制御の現状と課題とを示し、研究の意義について述べた。また、これまでの研究例を示すとともに、本論文の目的と概要を述べた。

第2章では、操作量の飽和特性やセンサの応答特性を考慮してPIDコントローラのための各種調整法の特性を明らかにした。想定したいくつかの伝達関数について代表的な調整法による目標値ステップ入力、ステップ外乱に対する制御性能の比較から、プラントの特性に応じた調整法の選択が効果的であること、空調システムを時不変線形系と見なした場合、限界感度法が幅広いプラントに対して安定した性能が得られ、また最適化手法は偏差を抑える効果が高いことを確認した。

第3章では、1入力1出力系において2つのPIDコントローラにより2自由度PIDコントローラを構築した。制御対象を1次おくれ+むだ時間系とし、最適化手法および部分的モ

デルマッキング法の 2 つの調整法による制御性能の比較, およびモデル化誤差の影響の評価を行った. 本手法により, 目標値応答, 外乱応答のそれぞれを満足することができた. また, 部分的モデルマッキング法は 2 自由度 PID コントローラに対して有効であり, またノミナルモデルに対する PID パラメータを用いてもモデル化誤差に耐性があることが判った.

第 4 章では, 1 入力 1 出力の温度制御系を想定し, 操作量である冷水弁の動作点の違いによる伝達関数の変動の影響に対し, ロバスト性を考慮した PID 調整法を構築した. 制御対象の伝達関数を 1 次おくれ+むだ時間系として開ループステップ応答による同定および 2 ディスク混合感度型ロバスト設計問題の適用によりロバストな PID コントローラの調整法の構築と制御性の評価を行った. 冷水弁による温度制御系の伝達関数は, むだ時間は推定可能な範囲でほぼ一定であったが, 冷水弁の開度が小さくなると定常ゲインおよび時定数は指数的に大きくなる特性を有することを確認した. また, ノミナルモデルに対する限界感度法によるパラメータゲインを, プラント伝達関数の正規化むだ時間に応じた割合で修正する方法でロバスト性を考慮した PID パラメータを導出する方法を構築した. さらに制御実証実験結果からはロバスト性を考慮した PID パラメータにより, 制御量が振動的になりにくい安定した制御性能を得られることを示した.

第 5 章では, 室内温度・湿度制御系において空調機と制御対象空間とを一つの多入力多出力 AR モデルとして扱い, 同定を行った. 測定データに対する主成分分析によりモデル構造を決定し, 構築したモデルについて数値解析を行った. 各操作端に独立な正規分布乱数を入力して得られた応答からトレンド成分を除去することで, 動作領域における室内温度・湿度の応答モデルを構築することが可能である. モデルを用いたステップ応答の定性的な傾向および, 正規分布乱数入力に対する応答の実測値との比較により, モデルの妥当性が確認された.

第 6 章では, 第 5 章の手法により求めた多次元 AR モデルより状態方程式および出力方程式を導き, LQG 制御を用いて制御系設計を行った. また LQG 制御に, 目標値変更に対する最適予見フィードフォワード補償を追加し, 制御性の改善を図った. 両者を実験用プラントに適用し, 制御性の評価を行った. LQG 制御を用いることで, 温度・湿度の目標値を個別または同時に変更した場合の追従性, および外乱や温度・湿度間の干渉に対しても良好な制御性能を得られることを示した. LQI 制御に比べて温度・湿度の干渉の度合いが LQG 制御とすることで低減される. フィードフォワード補償を追加した制御では, LQG 制御のみの場合に比べて設定値変更後初期の操作端の動きに無駄がなくなり, 追従性が改善した. また LQG 制御で生じることがあった操作量が飽和する状況も改善される.

第 7 章では, 結論として各章から得られた結果に基づき主要な成果をまとめ, 空調システムの制御設計および調整について総括した.

審査結果の要旨

本論文は、空調システムの制御に関連した技術開発課題のなかで、温度制御、温度・湿度制御の空気調和機を含むダイナミクスに基づく制御パラメータの決定法を取り上げて分析し、その効果を解明したもので以下の成果を得ている。

- (1) デジタル PID コントローラの代表的な調整手法について、空調対象室(以下プラント)の伝達関数を仮定し、操作量の飽和特性やセンサの応答特性を考慮した数値シミュレーションにより、動特性と調整手法との組み合わせによる制御性能を明らかにした。その結果として、幅広いプラントに対して限界感度法が安定した制御性能を与え、また最適化手法は対象によらず偏差を抑える効果が高く、次いで部分的モデルマッチング法がよい制御性能を与えることを見出した。
- (2) 1入力1出力の1次おくれ+むだ時間系で近似したプラントに対し、2つのPID コントローラにより2自由度PID コントローラを構成し、上述の最適化手法および部分的モデルマッチング法による制御性能の比較、およびモデル化誤差の影響を明らかにした。本手法により、目標値応答、外乱応答のそれぞれを満足することができること、とくに部分的モデルマッチング法は2自由度PID コントローラに対して有効であり、またノミナルモデルに対するPID パラメータを用いてもモデル化誤差に耐性があることを見出した。
- (3) 1入力1出力の温度制御系について、操作量(冷水弁)の動作点の違いによる伝達関数の変動の影響に対し、ロバスト性を考慮したPID 調整法を提案した。冷水弁による温度制御系の伝達関数を1次おくれ+むだ時間系と見なすと、むだ時間は比較的变化が小さく、定常ゲインおよび時定数は操作量の減少に伴い指数的に増大する特性を有することを示した上で、2ディスク混合感度型ロバスト設計問題の適用により、プラント伝達関数の正規化むだ時間に

応じてノミナルモデルに対する限界感度法によるパラメータゲインを修正する方法でロバスト安定な PID パラメータを導出する実用的な方法を提案した。さらに制御実証実験結果を通じて、本手法の適用により制御量の振動が少ない安定した制御性能を得られることを見いだした。

(4) 室内温度・湿度制御系において空調機とプラントとを一つの多入力多出力 AR モデルで表すことを提案し、その同定手法を示した。各操作端に独立な正規分布乱数を入力して得られた応答の測定データに対する相関分析および主成分分析により決定されたモデル構造について、ノイズパワー寄与率の評価よりトレンド成分の除去が動作領域における室内温度・湿度の応答モデル構築に有効であることを見出した。さらに、得られたモデルの妥当性は数値シミュレーションにて確認された。

(5) 上述の手法により求めた多次元 AR モデルより状態方程式および出力方程式を導き、LQG 制御による制御系設計、さらには目標値変更に対する最適予見フィードフォワード補償を LQG 制御に追加した設計手法を提案した。両者を実験用プラントに適用し、行った制御性の評価では、LQG 制御を用いることで、温度・湿度の目標値を個別または同時に変更した場合の追従性、および外乱や温度・湿度間の干渉に対しても良好な制御性能を得られる、フィードフォワード補償を追加した制御では、LQG 制御のみの場合に比べて設定値変更後初期の操作端の動きに無駄がなくなり、追従性が改善されることを見いだした。

以上の諸成果は、空調制御の品質を向上する上で、必要不可欠な要件である。

- (1) 動特性の把握に基づく設計
- (2) 空調条件変化時の安定性確保
- (3) 追従性の向上

の解決に、斬新かつ極めて効果的な手法を提供するものであり、空調制御によ

る環境負荷低減の推進に貢献するところが大きい。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。

3. 審査委員会の所見

本委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。