

氏名	宮 田 征 門
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第2881号
学位授与の日付	平成20年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科都市環境工学専攻
学位論文題目	空調システムのモデルベースによる検証と最適化に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 吉田 治典 教授 竹脇 出 教授 鉾井 修一

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、空調システムの性能検証プロセスの省力化と自動化を目指して、空調システムの性能をモデルベースで検証して最適化する手法に関する研究成果をとりまとめたものであり、以下の8章から成る。

第1章は序論であり、ライフサイクルに亘ってシステムの性能を検証して適正な運転状態に保つことが重要であると認知されるようになった背景に関して述べ、近年の複雑化した空調システムの性能を検証するためには検証プロセスを支援する手法の開発が重要であることを示している。

第2章では、モデルを利用した性能検証手法の方法論に関して述べている。本論文で使用する空調機器モデル、室の熱負荷推定モデル、熱交換杭と地盤の伝熱モデルのモデル式とパラメータ決定法を示し、複数の部位のモデルを相互に組み合わせてシステムシミュレーションを作成する方法を示している。

第3章では、空調二次側システムの重要な要素である可変風量ファン、冷水コイル、要求風量制御装置に対する性能検証法を示している。可変風量ファンは複数の部品から成るため、従来のファン本体を対象とした検証ではなく、構成部品を含めたファンシステムとしての性能を検証することが重要である。各部品のモデルを組み合わせてシステムの性能を推定するモデルの作成手順を示し、これを用いて性能を検証する手法を示した。冷水コイルの入口空気温湿度はコイル断面に対して面的な分布を持つ。通常、分布を無視してコイルの性能を検証しているが、これは適切な検証とは言えない。簡易に空気温湿度の面分布を考慮するモデルを新たに開発し、その有効性を示した。制御装置の性能を検証するためには、通常行われている制御出力値が制御目標値に達するかを確かめるだけではなく、特性がダイナミックに動くデータを用いて動特性を検証することが重要である。動的に制御信号値が変化するデータを使用するアクティブテストの方法を示し、実システムに適用して不具合を検知できることを確かめた。

第4章では、VAV(可変風量)式空調システムの不具合がエネルギー消費量に与える影響を分析し、不具合の検知・診断手法を示している。VAVシステムは複数の機器が自動制御ロジックで制御される複雑なシステムであるため、不具合がエネルギー消費量に与える影響は明確ではない。そこで、温熱環境実験室にあるVAVシステムにおいて、正常運転時と不具合運転時の運転データをそれぞれ計測して比較し、例え不具合が室内温熱環境に悪影響を与えなくとも、約20~50%のエネルギー浪費を引き起こすことを示した。また、モデルを用いて不具合によるエネルギー損失量を推定するツールを開発した。次に、VAVシステムの不具合検知・診断手法の開発を行った。大規模建物では風量を調整するVAVユニットの設置台数が多いため、合理的に不具合を検知する手法の開発が求められている。通常収集可能な室温センサ信号値と開度要求信号値を用いて求めた判定変量にスミルノフ・グラブス検定を適用して不具合を検知・診断する手法を開発した。これを実際に不具合が頻発している大規模建物に適用した結果、現在行っている全台数点検に比べて80%近く労力や費用を削減できることを示した。

第5章では、季節蓄熱機能を有する空調システムに対して、運用開始後3年間に亘ってシミュレーションを用いてシステ

ムの性能検証を行い、省エネルギーの意味で運転法を最適化したプロセスとその結果を示している。実システムにおいて実験的に試行錯誤で最適な運転法を見出すことは時間がかかり現実的ではない。最適な運転法を効率よく見出す手法の一つとして、モデルを組み合わせで作成したシミュレーションを用いる手法を示し、実システムに適用した。手法を適用したシステムは、冬季の外気が持つ冷熱を地盤に蓄熱し、これを冷房期の熱源として使う季節蓄熱機能を有するシステムである。有限要素法による杭と地盤の非定常伝熱計算モデルと空調機器のモデルを組み合わせで作成したシミュレーションを開発し、3年間で計4回の運転最適化を実施した。その結果、初年度の運転法と比べて、蓄採熱量は約50%増加し、システムCOP(効率)は3.61から7.15に向上することを実証している。

第6章では、シミュレーションを利用した建物のエネルギーベースライン推定法に関する研究成果を示している。建物のエネルギー消費量は気象条件や建物の運用条件によって変動するため、ベースラインをこれら変動要因の影響を考慮して合理的に推定する手法が重要である。シミュレーションによる推定法は様々な変動要因の影響を組み込むことができるため、従来の回帰式による手法よりも合理的であるが、適用事例は少なく手法は確立されていない。本論文では、気象条件や建物の運用条件を時々刻々と与えられるように改良した非定常熱負荷計算モデルとエネルギー消費量推定モデルを組み合わせるベースライン推定モデルを作成する手法を開発した。本手法を実建物に適用し、計測データを用いてモデルの検証を行った結果、日積算エネルギー消費量の二乗平均平方根誤差は約4~8%となり、精度よくベースラインを推定できることを示した。今まで適用事例が殆どなかったシミュレーションによるベースライン推定を実建物に適用し、十分な精度でベースラインを推定できることを実証している。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

空調システムの性能は現状では必ずしも適切に維持・管理されておらず、不具合が発生してエネルギー損失を引き起こしている。これを解消するためには、ライフサイクルに亘りシステムの性能が十分に発揮できているかどうかを検証して適切な運転状態に保つことが必要である。本論文は、空調システムの性能検証プロセスの省力化と自動化を目指して、空調システムの性能をモデルベースで検証し最適に運転する手法に関する研究成果をとりまとめたものである。以下に得られた成果の概要を示す。

1. 空調二次側システムで汎用的に用いられる主要な要素である、可変風量ファン、冷水コイル、要求風量制御コントローラに対して、モデルベースで検証を行う際に生ずる種々の問題点を明らかにし、これを解消する性能検証手法を示した。
2. 室温に影響を与えない空調システムの不具合であっても、約20~50%のエネルギー損失を引き起こすことを実験によって明らかにすると共に、任意のシステムで生ずる不具合によるエネルギー浪費量を推定するツールを開発した。
3. 風速センサが設置されていない可変風量(VAV)ユニットに対する不具合検知・診断手法を開発し、実在する大規模建物にその手法を適用して有効性を実証した。その結果、従来の点検法と比較して80%近く検証のための労力や時間が削減できることを示した。
4. 実システムでは適切な運転法を見出すことが難しい、季節蓄熱機能を有する空調システムに対し、シミュレーションを利用して3年間に亘る性能検証と運転性能の分析を行いながら最適な運転法を見出した。その結果、初年度と比較すると3年後の蓄採熱量は約50%増加し、システム効率(COP)は3.61から7.15に向上することを実証した。
5. 時々刻々変化する気象条件や運用条件を入力できる新たなシミュレーションツールと、これを用いて建物の消費エネルギーのベースラインを補正する手法を開発し、実システムにこの手法を適用して精度を検証した。その結果、日積算エネルギー消費量の二乗平均平方根誤差は約4~8%となり、精度良くエネルギー消費量を推定できることを確認した。

以上、本論文は、空調システムの性能の検証と最適化を、モデルベースで効率的かつ適切に実施する手法を示すと共に、それを実システムで実証したもので、空調システムの省エネルギーに対して、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年1月28日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。