

# Development and Testing of a Prototype Tool for HVAC Control System Commissioning

Phillip Haves, Ph.D., C.Eng. Dorte R. Jorgensen

Timothy I. Salsbury Arthur L. Dexter, Ph.D.

ASHRAE Trans., Vol. 102, Part 1, pp. 483-491 (1996)

## HVAC制御システムのコミッショニングのための基本ツールの開発とテスト

2000/6/7 京都大学 吉田治典・村井大介

### 要約

本論文では、HVAC制御のコミッショニングを支援する基本ツールの開発について述べる。この研究は、設計事務所、建築請負業者、制御機器メーカーが協同して行った。本ツールは連合王国(UK)の商業用ビルで実際に行われているコミッショニングを観察して作成された。まず、コミッショニングの間によく発生する不具合や問題点を明らかにして、一連のテスト手順がこれらの不具合や問題点を検知できるように、また可能であれば診断まで行えるように開発された。テスト手順は、詳細なコンピュータシミュレーションと小型のAHUを用いた研究室実験と、また最近コミッショニングが行われた商業用ビルの現場において開発された。その後、基本ツールは大型空調実験システムで試験された。本研究では、テストの方法、ならびに本手順が提供できる情報がどんなものかを示すために、実オフィスビルのHVACシステムで行われた種々のテスト結果を示す。

### 序

ビルの環境制御の性能は設計段階よりも運用段階に問題があり、それは、HVACシステムの不適切なコミッショニングに起因することが多い。産業界はコミッショニング作業の向上を目指して多数の基準を作ってきたが(ASHRAE1989, BSR1A1992など)、制御システムのコミッショニングはまだ不適切なことが多い。これには以下の理由が考えられる。

- ・工事の遅れによりコミッショニングの時間が削減される。
- ・コミッショニングを実施する専門家が不足している。
- ・性能に関するある側面の仕様書、特に動的挙動性能を十分に明記した仕様書は作成が困難である。
- ・一年のうちのある時期に、入居者のいない状態でHVACシステムを試験しても十分に性能を検証できない。

ルーティン化したコミッショニング作業を自動化すればこれらの問題は少なくなる。つまり、自動化により異なるサブシステムを同時にコミッショニングすることが可能になり、コミッショニング技術者はその作業から開放されて自動コミッショニングシステムで検知された問題の処置

に当たることができる。また、自動化により竣工後のリコミッショニングも容易になるという利点も生まれる。

本論文では、空調機のコイルや混合ボックスに関する制御のコミッショニングに用いられる一連の自動化された手順について報告する。テストの手順は、事務所ビルにおける空調システムのコンピュータシミュレーションによって開発され、実ビルの手動テストによって検証された。その後、大規模な空調実験装置を用い、本当の不具合の内容を隠して発見・診断が可能かどうかを調べてこの基本自動コミッショニングシステムの性能をテストした。

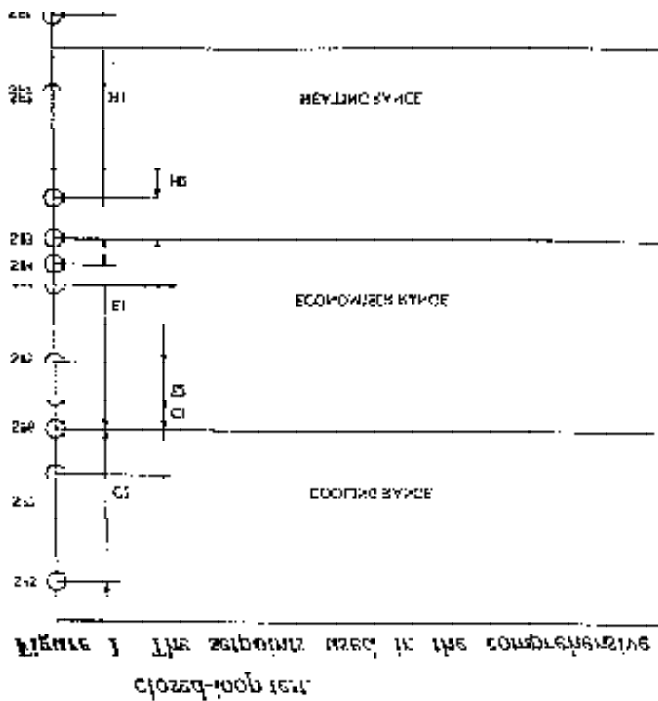
次節ではテストの手順と各テストの作動状況結果の例を示す。その次の節では、システムが正常に作動しているかどうか、不具合がないかどうかを調べる際、テスト結果がどのように解析されるかを述べる。

### テスト手順

閉ループテストと開ループテストという2種類のテスト手順を開発した。閉ループテストは、全運転領域のテストと、ある特定の運転ポイント周辺の性能を調べるテストの2種類の利用方法がある。閉ループテストはシステムが正常に運転されるかどうかを比較的短時間に確認できるが、機器に存在する不具合の検知に限定される。開ループテストは、閉ループテストで検知された不適切な運転の原因を診断するために用いることができ、また時間が十分にあれば、個々の機器をより徹底的にテストすることもできる。狭義の閉ループテストは、開ループテストで診断された不具合を取り除いた後に、特定の運転条件下で閉ループ運転が正常に機能するかどうかを調べるために用いられる。全運転モードかつ全運転ポイントで正常な運転がなされているかどうかを確認することは時間がかかり過ぎて非実用的なため、システムは、一般的な方法、つまり重要と思われるいくつかの不具合があるかないかを調べることによってテストする。

### 閉ループテスト

総合閉ループテストは、全運転領域にわたる幾つかの運転ポイントにおいて制御性能を調べ、特定の運転ポ



イントでシステムの運転状態を分析してある不具合の存在を検知する。制御性能を調べる目的は、テストがなされる運転領域全体において安定な運転がなされるかどうかを確認し、外乱を除去しながら設定値を維持し続ける制御性能を検証することにある。実際には入居以前のビルで生ずる外乱は非常に少ないため、制御性能のテストは特定の運転ポイントで設定値の変化が許容できる範囲にあることを確認するに留まらざるを得ない。

制御性能は、容量テストと制御テストを繰り返し行って検証する (Jorgensen and Dexter 1991)。容量テストでは、HVACシステムの性能をオンラインで監視しながら過度なオフセット誤差(設定値からのズレ)を生じないで設定値が維持できるかどうかを調べる。制御テストでは、設定値を順々に変えて、ある定められた時間システムの動特性を監視し、過渡応答が許容される範囲にあるかどうかを調べる。

データ収集のサンプリング時間は、空調システムの動特性に関する予備的知識と、ビル制御システムと通信のサンプリング時間の両方を基に選択される。生データはデジタル処理を施す。第一段階の処理は、ノイズの影響を減ずるためにセンサーからのデータをローパスフィルター(高周波数を除去するフィルター)に通すことである。テストデータの解析については後述する。図1に示すように、加熱コイル、冷却コイル、混合ボックスで構成されるAHUの総合閉ループテストは、8つの室温設定値を用いたステップ応答テストと容量テストからなる。これらの設定値は、供給空気に求められる温度幅全域をカバーしている。この範囲は、還気温度が外気温より高く、給気ファンがコイルの下流側にあると仮定して、以下のように計算される。

$$t_{mix} = f_{min}t_{out} + (1 - f_{min})t_{ret} \quad (1)$$

$$t_2 = t_{mix} + \Delta t_{sf} \quad (2)$$

$$t_1 = t_{mix} + a_h(t_{hwi} - t_{mix}) + \Delta t_{sf} \quad (3)$$

$$t_3 = t_{out} + \Delta t_{sf} \quad (4)$$

$$t_4 = t_{out} - a_c(t_{out} - t_{cwi}) + \Delta t_{sf} \quad (5)$$

ここで、

$t_{mix}$  : 外気導入率の最小値  $f_{min}$  をとした時の混合空気温度

$t_{out}$  : 外気温度

$t_{ret}$  : 還気ファンの後で計測された還気温度

$f_{min}$  : 外気導入率の最小値

$\Delta t_{sf}$  : 供給ファンによる温度上昇(想定値)

$a_h$  : 加熱コイルの熱交換係数(設計値)

$a_c$  : 冷却コイルの熱交換係数(設計値)

$t_{hwi}$  : 加熱コイルへの供給水温度

$t_{cwi}$  : 冷却コイルへの供給水温度

温度  $t_1$  と  $t_4$  はシステムを基に推定した供給空気の最大値と最小値である。温度  $t_2$  と  $t_3$  は、それぞれ、加熱コイル運転と混合ボックス運転、混合ボックス運転と冷却コイル運転の「境界」である。SP3= $t_2$  の時、加熱コイルのバルブは完全に閉で混合ボックスでは外気導入率が最低値となっている(還気空気が外気温より高いと仮定しているため)。SP6= $t_3$  の時、冷却コイルのバルブは完全に閉で混合ボックスは最大の外気導入率となる。定常状態でバルブやダンパーの位置が予測値から大きく外れるならばシステムに不具合があることを示唆する。本研究とは独立して開発された定性モデルに基づく不具合検知の方法について説明した Glass 他(1994)の研究において、この温度  $t_2$  と  $t_3$  は「ランドマーク」と定義されている。

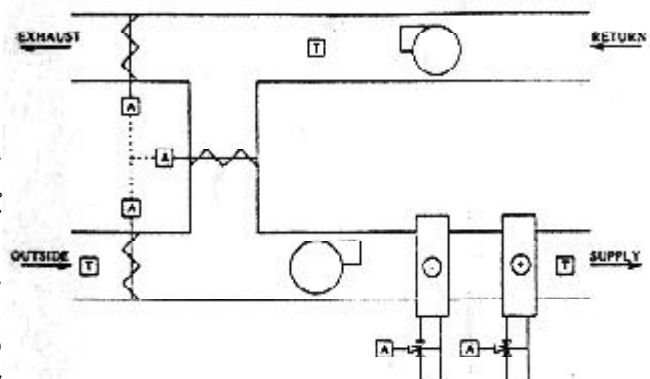


Figure 2 The air-handling unit of the laboratory test rig. The temperature sensors used in the tests are denoted by 'T' and the actuators by 'A.'

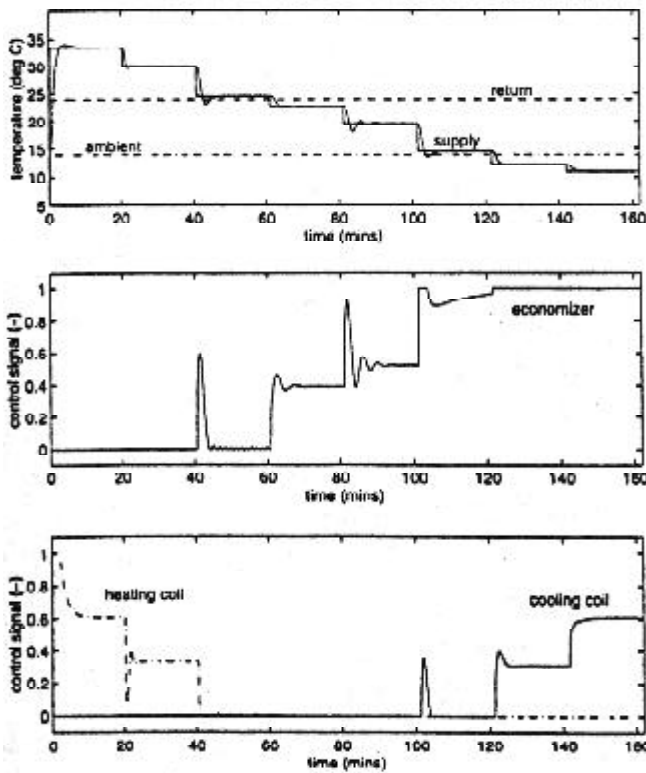


Figure 3 The comprehensive closed-loop test performed on a simulated plant.

残りの温度設定値 (SP1とSP2, SP4とSP5, SP7とSP8) は、それらが最大ゲインか最小ゲインとなるように、サブレンジ近傍の点として選ばれる。コイルの場合、最大ゲインはバルブがほぼ閉まった状態のとき、最小ゲインはバルブが完全に開いた状態のときに生じる。混合ボックスの場合、最大ゲインはダンパーがレンジのほぼ中央に位置するとき、最小ゲインはダンパーが完全閉か完全開のときに生じる。これらの一般的事実を裏付ける例はDexter(1993)によって示されている。

空調機のシミュレーションと、図2に示すような大型の実験装置による総合閉ループテストを行なった。シミュレーションと実験装置の主な違いは、シミュレーションでは給気ファンがコイルの下流域にあることである。図3は空調機シミュレーションによるテスト結果である。簡便のため、外気導入割合の最小値  $f_{min}$  を0とした。給気ファンによる温度上昇  $\Delta t_{sf}$  は0.6Kである。人工的な不具合は導入せず、制御器は注意深く適切に調整した。テストで生じた唯一の不満足な挙動は3番目の設定値(24.6)付近で現れた振動で、これはバルブがほとんど閉まった状態で起こる加熱コイルの非線形挙動に由来するものである。

図4は同じ総合閉ループテストに関する大型空調実験装置の結果を示す。現実的な状況で制御や不具合検知の手順が評価できるように、実験装置は、意図的に、研究室の基準ではなく平均的な商業用ビルを基準にした設計とコミショニングがなされた。また、シ

ミュレーションの場合と同様、外気導入量は最小値  $f_{min}$  を0とし、人工的な不具合は導入していない。冷暖房を切った状態で別のテストを行い、給気ファンによる温度上昇をセンサーで計測すると、温度上昇は殆どないことが分かった。このことは、給気ファンによる温度上昇が、偶然にも給気温度センサーの校正誤差に等しくなることを示す。外気温や還気温度センサーも同じような誤差があることが分かった。従って、「境界」温度であるSP3とSP6は、それぞれが還気気温と外気温に近い値をとることになる。

図4から2つの問題があることが明らかである。加熱コイルと混合ボックスで振動現象が現れることと、冷房要求が少な過ぎることである。第一の問題は制御装置の調整不良のため、第二の問題は冷凍機の一時的な故障のためである。図3や図4に示したデータを自動化コミショニングの標準ツールで解析した結果は「テスト結果例の分析」の節で詳しく述べる。

### 開ループテスト

開ループテストは、プラントの個々の要素あるいはサブシステム(つまり、混合ボックス、加熱コイル、冷却コイル)に関する制御変数と制御信号の、静的・動的な関連を検査するために行われる。テストは次のように実行される。ビル制御システムは、必要なテスト状態となるように準備してから、テスト対象である制御ループを手動モードにする。この制御装置に関連するアクチュエーターへの制御信号は、予め定めたテスト手順に従うように変え、テストデータを制御システムから収集する。テスト手順は、アクチュエーターで必

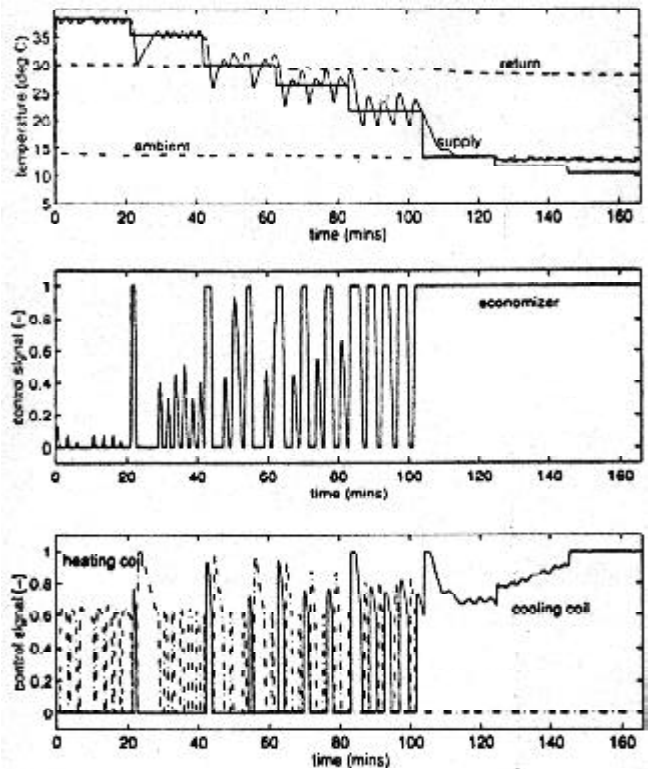


Figure 4 The comprehensive closed-loop test performed on a laboratory test rig.

要とされる位置が一連のステップ状になるように変化させる。このステップ数は、要素の応答特性を知るのに必要な精度、測定ノイズと各ステップ間の偏差、テストに必要な時間、などを考慮し、妥協で決める。各ステップ間の差は、各要素のプロセス特性の先験的知識を反映している。もし、限られた数の明瞭な不具合を判別するだけでよいなら、コイルや混合ボックスの静的な応答は、少数のステップ数で確認できる。開ループテストではPI制御の適正なパラメータ値を推定するために、各ステップにおける動的応答も用いる。

図5に最近完成した事務所ビルの冷却コイルで行った開ループテストの手動試験の結果を示す。縦軸は空気側のアプローチで、コイルによる温度低下を無次元で示す量である。

$$a = \frac{t_{ao} - t_{ai}}{t_{wi} - t_{ai}} \quad (6)$$

ここで  $t_{ai}$  と  $t_{ao}$  は、入口空気温と出口空気温であり、 $t_{wi}$  は入口水温である。この実験で用いられているバルブのアクチュエーターは、バルブ特性を線形特性にでも指数特性(イコールパーセント)にでも設定することができる。コイルは冷却水流を変えることにより制御されているので、コイルの非線形特性を補正するためには指数特性が選択されねばならない。図5は、このコイルで観察された正しい指数特性と不具合のある線形特性を示している。不具合時の特性は、制御バルブがかなり大きめに選定されたときのものに似ている。これはHVACシステムでよく見られる一般的な不具合である。

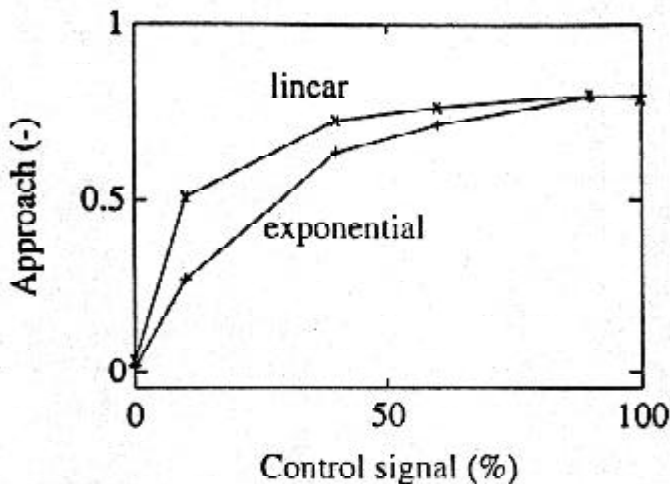


Figure 5 Process control characteristic for a cooling coil with incorrect (linear) compensation for the valve characteristics. The characteristic with correct (exponential) compensation is shown for comparison.

個々のテストを行う前に、そのテストが実行できるかどうか、またその価値があるかどうかを知るために様々な検査を行う。AHUの加熱コイルや冷却コイルに関しては、以下の事前検査を行う。

- ・給気流量はおよそ設計値と等しいか。
- ・入口空気温度と入口水温の差は、十分、計測誤差よりも大きい出口温度変化を達成できるほど大きい。

混合ボックスの場合に関しても、外気温度と還気温度の差が十分大きいかどうかという同様の検査を行う。テストデータの分析には計測ノイズの影響を低減するためにローパスフィルターで処理する。次に、当該センサーの変動記録が、定常状態と考えてよいほど十分小さくなる時間を決める。これは、開ループテストの結果を分析する過程で、定常性を仮定しているからである。対象とする量が直接計測されていない場合も、その他の計測値からの推測が可能であれば、その値を推定する。簡単な例として、混合空気温度と給気温度の計測値からコイルを通過する温度変化を推定するために、給気ファンによる温度上昇の推定値を用いるといった例が挙げられる。

最近完成した3棟のオフィスビルで、加熱コイル、冷却コイル、混合ボックスに関する開ループテストが実施され、その結果がDexter(1993)によって報告されている。

### テストデータの分析

各テストで収集されたデータは、実務家の知識に基づいて作られたエキスパートシステムによって分析される(Anderson et.al.1989;Haberl et.al.1989)。このエキスパートシステムは、以下に示す6つの不具合状態、ならびに正常運転状態を検知するように設計されている。

- 第1グループ： アクチュエーターとダンパー間の接続不良、アクチュエーターモーターの損傷など。(一般的な兆候：制御信号の変化に制御変数が反応しない。)
- 第2グループ： スイッチの逆作動、接続状態の異常など(一般的な兆候：制御信号により制御変数が誤った方向に変化する)
- 第3グループ： バルブのサイズ設計ミス、不適切なバルブ性能など(一般的な兆候：プロセス特性が非線形となる)
- 第4グループ： ダンパー弁の損傷、固形物によるバルブの閉塞など(一般的な兆候：プラントが完全に停止しない)
- 第5グループ： 不適切な制御器の構成、不適切なプラント容量など(一般的な兆候：コントローラが設定値を維持できない)

第6グループ：コントローラの調整不良、不適切な制御方法など（一般的な兆候：閉ループ運転時における不適切な応答）

テストデータセットは主たる特性を示すような数種類の値に集約する。熱のプロセス過程に関しては、温度計測は、プロセスで用いられる熱供給源と被供給源の温度を用いて基準化される。（例えば冷却コイルの場合、入口空気温度と供給水温）。これら、特性（feature）と呼ばれる定量的な計測値は、ある不具合状態あるいは正常な運転状態の兆候に対する定性的な説明と深く関連する。正常な運転状態を特徴づける特性は、異なる不具合モードを特徴づける特性とは異なることが重要である。AHUプロセスの専門家の知識から必要な特性が選択された。閉ループの静的挙動は次の3つの特性によって表現される。

基準化ゲイン：制御運転レンジに対する実制御量の比  
閉止誤差：完全閉のバルブやダンパーからの漏洩  
曲率：非線形性の程度

もう一つ、「最小レンジ」という特性が使われる。それは、雑音対信号の比であり、テストの信頼性を知るために使われる。

閉ループでは、外乱に対する制御装置の設定値維持性能を示すために次の3つの特性が使われる。

制御信号の異常：設定値とのズレが限界値を超える時間の  
測度

被制御変数の挙動：設定値付近のハンチングの振幅と頻度  
絶対平均誤差：オフセットエラーの大きさ

また、設定値にステップ変化を与えたときの経時変化を表すために次の2つの特性が使われる。

被制御変数の異常：一定になるまでの時間  
(the time taken to settle)

制御信号の反転：アクチュエーターが往復挙動をする

### 回数の指示値

正常運転、不具合運転の兆候を表す言語表現が定義され（例えば、「プロセス特性が非線形である」）、その特性値は、ある兆候の存在を示す信頼度に変換される。システムが特定の故障状態や正常状態にあると考えられる度合いを決めるために、IF-THENルールが使用される。

例えば、

IF（プロセス特性が非線形である）AND（基準化ゲインが十分大きい）AND（最小絶対レンジが適切なレベルである）THEN（第3グループの不具合が存在する）

これらのルールは、データ自体の質や、ある不具合の兆候が部分的に隠蔽されるという可能性などを考慮して作成される。言語表現の不適切さを考慮するために、ファジーロジックに基づく推論エンジンを使用するエキスパートシステムが、ルールと観測された兆候との合致度の推定結果を信頼度レベルという測度としてユーザーに知らせる。

特定テストの分析結果は、「正常運転状態である」、「ある不具合が存在する」、「テストから結論を得ることが出来な

い」のいずれかである。運転が正常であると診断された場合、テストが続行される。テストから結論を得ることが出来ない場合には、同じテストをもう一度繰り返す。何度もこうしたことが起こる場合は、異なる運転状態でテストを繰り返すようにプログラムされている。閉ループテストがうまくゆかない場合は、機器に不具合があるか、または制御器の再調整が必要であることを示している。一方、開ループテストでは、機器の挙動を調べると共にPI制御器の適切なパラメータ値を推定できるので、両方の可能性を調べることができる。開ループテストがうまくゆかない場合は不具合リストを再点検する必要がある。

## テスト結果例の分析

### 閉ループテストの分析

表1,2,3は、図3に示したシミュレーションによる総合閉ループテストの分析結果であり、運転性能を各設定値における不具合発生の確からしさ、ならびにその信頼度で示してある。表1は設定値に対するステップ応答の分析結果を、表2は各設定値での容量テストに対する応答の分析結果を示す。ステップ応答テストは、24.6の設定値で制御信号の反転が多過ぎるため不合格である。

表3は、各容量テストの終わりに推定した定常時の制御信号を示すと共に、これらの制御信号が、その運転点における正常な運転における予測値と一致するかどうかの評価を示している。その結果、定常状態の制御信号は各設定値で予測したものと一致した。

表4,5,6は、図4に示した研究室の実験装置で実施した総合閉ループテストの分析結果である。表4は、設定値のステップ変化に対する応答の分析結果であり、表5は、各設定値における容量テストに対する応答を分析した結果である。結果はほぼすべての運転点で制御性能が不十分なことを示している。

表6には、各容量テストの終わりに推定した定常時の制御信号を示すと共に、これらの制御信号がその運転点における正常な運転における予測値と一致するかどうかの評価を示している。振動現象が観測されたので、表の最初から6つの設定値に対する値は記されていない。混合ボックスと冷却コイルの転換点(13.4)で不適切な運転の可能性が高く、またその確度も高いことは、制御系の外部に不具合が存在することを明確に示している。

### 開ループテスト

指数関数または一次関数型のバルブ特性に切り替えることが出来る制御器を持つ冷却コイルのプロセス特性を図5に示す。そのコイルを用い、手動モードで制御した開ループテストで得たデータの分析結果を表7に示す。

最小絶対レンジの値は十分大きく、各テストで満足なデータが得られたと考えられる。正常な特性の場合には、曲率以外のすべての特性が正常である。この曲率は少し大きい値を取るが、これはおそらくバルブのサ

イズが過大なためと思われる。エキスパートシステムは、第4グループ(非線形性)の不具合が存在する可能性を示した。これは、曲率がやや大きく制御性能に影響が及ぶことを示している。

制御性能に影響を与える程度に十分大きな曲率があるとして扱くと、第4グループの(非線形)不具合の存在を示すようになる。しかし、プラントが正常に運転されているという確からしさは3倍以上あり、正常運転がなされていると診断される。不正な特性の場合、曲率は大変大きくなり、エキスパートシステムは明確に「非線形性」という不具合の存在を示す。

## 結論

コミッショニング作業の自動化はコストを下げ、かつHVACシステムの制御に対するコミッショニングを完全なものとする。空調機の熱機器要素が正常に運転されているか不具合があるかを見分け、その兆候から不具合を分類するための手法を説明し、実ビルにおける実験と研究室の実験システムを用いたテストでその性能を示した。

コミッショニングの自動化により、現在よく起こる問題が軽減されるが、その前に、幾つかの現実的な問題があることを認識しなければならない。例えば、ある特定のテストを実施するかどうかを決定することは常に複雑な問題である。なぜならば、運転状態や、前回のテスト結果や、他のサブシステム(ボイラー、冷凍機など)が利用できるかどうかを考慮しなければならないからである。さらに、元の性能仕様は不完全だったり不適切だったりするので、特定の状況に合致するように変えねばならないかもしれない。更に、テスト中に起こる外乱に対する予見できない影響も配慮しなければならない。また、コミッショニング技術者は中央監視盤による遠隔計測が出来ない場合やその信頼性が低い場合は、手でデータ入力を行う必要性もあるだろう。従って、コミッショニング作業の間はコミッション技術者との密接な関わりが必要であるし、あいまいなテスト結果を評価するにはコミッション技術者の知識や経験も必要となる。従って、自動化されたコミッショニング技術は、コミッショニング技術者に代わるものではなく、彼らを補佐するものと捉えるべきである。

本報告で示した方法に基づきコミッショニングツールの基本形(プロトタイプ)を開発した。そして上記したように、実物大の研究用空調システムのコミッショニングに適用して、そのツールの第一段階の評価をおこなった。コミッショニング自動化のプロジェクトに関与していない実験スタッフによって、数々の「不明」な不具合がシステムに導入された。これらすべての不具合はうまく検知され、大抵の場合、正しく分類された。実験の詳細は別の文献に詳しく述べた(Salsbury et al.1995)。

## 謝辞

本研究はUK科学技術調査委員会とUK産業省によって進められているVACR LINKプログラムに基づく調査プロジェクトの一環として、BICC、ビル調査を専門とするHaden Young社、Ove Arup Partnershipとの共同で行われた。

## REFERENCES

- Anderson, D., L. Graves, W. Reinert, J. F. Kreider, J. Dow, and H. Wubbena. 1989. A quasi-real-time expert system for commercial building HVAC diagnostics. ASHRAE Transactions 95(2).
- ASHRAE. 1989. ASHRAE Guideline 1, Commissioning of HVAC systems. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- BSRIA. 1992. Commissioning of BEMS--A code of practice. Bracknell, U.K.: Building Services Research and Information Association.
- Dexter, A. L., P. Haves, and D. R. Jorgensen. 1993. Development of techniques to assist in the commissioning of HVAC control systems. Proceedings of CIBSE National Conference, Manchester, U.K.
- Glass, A. S., P. Gruber, M. Roos, and J. Todtli. 1994. Preliminary evaluation of a qualitative model-based fault detector for a central air-handling unit. Proceedings of 3rd IEEE Conference on Control Applications, Glasgow.
- Habel, J. S., L. K. Norford, and J. V. Spadaro. 1989. Diagnosing building operational problems. ASHRAE Journal 36(6).
- Jorgensen, D. R., P. Haves, and A. L. Dexter. 1992. Current practice in commissioning HVAC control systems. Internal Report OUEL 1920/92. Oxford: University of Oxford, Department of Engineering Science.
- Jorgensen, D. R., and A. L. Dexter. 1991. Automating the commissioning of building control systems. Proceedings of European Simulation Multi-Conference. Copenhagen.
- Salsbury, T. I., P. Haves, A. L. Dexter, and D. R. Jorgensen. 1995. Experimental evaluation of a prototype tool for HVAC control system commissioning. Submitted for publication in Proceedings of CIBSE National Conference. Eastbourne, U.K.