情報処理学会第47回（平成５年後期）全国大会

定量的な物理知識に基いた機器の異常診断方法

3N－5

下平丕作士
日本メックス株式会社研究開発部

１．まえがき

深い知識に基いた機器の異常診断は，強力な問題解決能力があるが，定性的な方法では組合せ爆発，定量的な方法では計算時間等の問題点がある．本報告では，定常状態を表す関係式を用いて，シュミレーションによらないで，機器の状態変数の変動量を推定することにより，機器の異常を簡便に診断する方法を提案する．

２．機器の状態を表す関係式

入力変数（操作量ｕ，外乱ｗ），状態変数ｘ，出力変数ｙを，式(1.1) のような列ベクトルで表す．集中定数系では，システムの状態方程式と出力方程式は式(1.2)，(1.3) の形に書くことができる．入力$u(t)$，$w(t)$が一定値u_s，w_sに保たれ，システムが定常状態にあるとき，式(1.4) が成立するから，ｘ，ｙは一定値x_s，y_sとなり，式(1.5)，(1.6) を満足する．

ここで対象とする異常な状態は，機器のある部分の機能が異常であるために，正常時の定常状態から連続的に変化して生じた状態であり，その機能の異常に対応した定常状態にあるものとする．

システムに異常が生じ，変数が定常値からΔu, Δw, Δx, Δyだけ変化したとき，Taylor展開により式(1.7)，(1.8) が得られる．ここで，f_xは$\partial f/\partial x$ を表す．$\|\Delta x\|$，$\|\Delta u\|$，$\|\Delta w\|$は小さいものとして，Δx, Δu, Δwに関して２次以上の項を無視し，式(1.4)，(1.5)，(1.6) を用いると，式(1.9)，(1.10)が得られる．

３．増分推定法による異常診断方法

機器の定常状態を表す関係式を式(1.11)とすると，式(1.9)，(1.10)に相当する変数の増分についての関係式は，式(1.12)で表される．機器が上記のような異常な状態にあるとき，正常な定常状態からの変数の変動量を次のようにして推定する（増分推定法と呼ぶ）．

A Method for Diagnosing Equipment Faults Based on Quantitative Physical Knowledge

Hisashi Shimodaira
Nihon MECCS Co. Ltd
1-22-10 Nishishinbashi, Minato-Ku, Tokyo, 105

表１　本文中の式

$$u=[u_1 \cdots u_k]^T,\qquad w=[w_1 \cdots w_l]^T$$
$$x=[x_1 \cdots x_m]^T,\qquad y=[y_1 \cdots y_n]^T \tag{1.1}$$
$$\frac{dx}{dt}=f(x,u,w) \tag{1.2}$$
$$y=g(x,u,w) \tag{1.3}$$
$$\frac{dx(t)}{dt}=0 \tag{1.4}$$
$$f(x_s,u_s,w_s)=0 \tag{1.5}$$
$$y_s=g(x_s,u_s,w_s) \tag{1.6}$$
$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt}=\frac{d\Delta x}{dt}&=f(x_s+\Delta x,u_s+\Delta u,w_s+\Delta w)\\&=f(x_s,u_s,w_s)+f_x(x_s,u_s,w_s)\Delta x+\\&\quad f_u(x_s,u_s,w_s)\Delta u+f_w(x_s,u_s,w_s)\Delta w+\cdots\end{aligned} \tag{1.7}$$
$$\begin{aligned}y_s+\Delta y&=g(x_s+\Delta x,u_s+\Delta u,w_s+\Delta w)\\&=g(x_s,u_s,w_s)+g_x(x_s,u_s,w_s)\Delta x+\\&\quad g_u(x_s,u_s,w_s)\Delta u+g_w(x_s,u_s,w_s)\Delta w+\cdots\end{aligned} \tag{1.8}$$
$$\begin{aligned}&f_x(x_s,u_s,w_s)\Delta x+f_u(x_s,u_s,w_s)\Delta u\\&\quad+f_w(x_s,u_s,w_s)\Delta w=0\end{aligned} \tag{1.9}$$
$$\begin{aligned}\Delta y&=g_x(x_s,u_s,w_s)\Delta x+g_u(x_s,u_s,w_s)\Delta u\\&\quad+g_w(x_s,u_s,w_s)\Delta w=0\end{aligned} \tag{1.10}$$
$$z=f(x,y) \tag{1.11}$$
$$\Delta z-f_x\Delta x-f_y\Delta y=0 \tag{1.12}$$

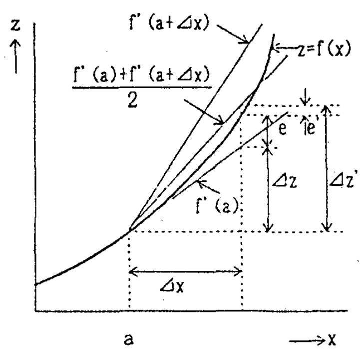

図１　関数の近似と平均係数法

まず，正常時の定常状態の変数の値により，式(1.12)の係数の値を求める．ついで，このような式を制約として，異常状態における測定点の変数の変動量を代入して制約の伝播を行うことにより，他の変数の変動量を求める．変数の変動量が大きい場合には，その式の係数を変化の前後の係数の平均値で置き換えて，再計算を行う．これを平均係数法と呼ぶ（図１参照）．

機器が正常に機能している部分については，正常な

表2　凝縮器の状態を表す変数の関係式

$$Q_c = cW(t_{w2} - t_{w1}) \quad (2.1)$$

$$t_{wm} = \frac{1}{2}(t_{w1} + t_{w2}) \quad (2.2)$$

$$Q_c = K_c F_c (t_2 - t_{wm}) \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{K_c} = \frac{1}{\alpha_r} + \frac{l_{oc}}{\lambda_o} + f_w + \frac{1}{\alpha_w} \quad (2.4)$$

$$p_2 = f_p(t_2) \quad (2.5)$$

表3　凝縮器の状態を表す変数の増分についての関係式

$$\Delta Q_c - c(t_{w2} - t_{w1})\Delta W - cW(\Delta t_{w2} - \Delta t_{w1}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\Delta t_{wm} - \frac{1}{2}(\Delta t_{w1} + \Delta t_{w2}) = 0 \quad (3.2)$$

$$\Delta Q_c - F_c(t_2 - t_{wm})\Delta K_c - K_c F_c(\Delta t_2 - \Delta t_{wm}) = 0 \quad (3.3)$$

$$\Delta K_c + K_c^2 \Delta f_w + \frac{K_c^2}{\lambda_{oc}} \Delta l_{oc} = 0 \quad (3.4)$$

$$\Delta p_2 - f_p'(t_2)\Delta t_2 = 0 \quad (3.5)$$

測定値：Δt_{w1}, Δt_{w2}, ΔW, Δp_2　　仮定：$\Delta K_c = 0$, $\Delta f_w = 0$, $\Delta l_{oc} = 0$

［式(3.1) → ΔQ_c ］↘
　　　　　　　　　　　　［式(3.3) → Δt_2 ］→［式(3.5) → Δp_2 ］$\Leftrightarrow$（比較）測定値 Δp_2
［式(3.2) → Δt_{wm} ］↗

図2　凝縮器の異常個所の推定方法

表4　正常時の測定点の変数の値と異常時の変動量

記号	正常時の変数の値	異常時の変動量	単位
p_1	1.94	0.0761	kgf/cm²abs
p_2	11.9	1.06	kgf/cm²abs
t_{w1}	20	0	℃
t_{w2}	24.8	0	℃
W	16600	0	l/h
t_r	-10	0.665	℃
θ	20	0	℃

表5　変数の正常時の値と異常時の変動量の計算値

記号	正常時の変数の値	異常時の変動量	単位
Q_c	79500	0	kcal/h
t_2	30	3	℃
K_c	870	-230	kcal/m²h℃
l_{oc}	0.05	0.0395	mm
t_1	-20	0.887	℃

機能を仮定した式(1.12)により計算した変数の変動量は，実際の変動量に一致する．機器のある部分に異常がある場合には，正常な機能を仮定した式(1.12)により計算した変数の変動量は，実際の変動量とは一致しない．これを利用して，機器の異常診断を行う．

4．空調設備への適用例

提案した方法を冷凍機を中心とした空調設備に適用した結果の一部について述べる．表2に凝縮器の状態を表す関係式を，表3にこれから導かれる変数の増分についての関係式を示す．増分推定法を用いて異常個所を推定するために，測定点の変数の変動量を代入することにより，別に定めた測定点の変動量を計算できるように，制約をグループ化する．凝縮器についての制約のグループと異常個所の推定方法を図2に示す．

測定点の変数が表4のような値になったときの異常診断を行った．図2の手順に従って計算すると，$\Delta p_2 = 0$ になり，測定値と一致しないため，凝縮器に異常があるものと推定される．そこで，Δp_2 を含む測定点の変数の変動量を用いて，ΔK_c を逆算すると-230kcal/m²h℃（正常値の26.5 %減）が得られる．これにより，凝縮器の熱伝達に異常があることが裏付けられる．

表6　記号の説明

p_1	冷媒の蒸発圧力
t_1	冷媒の蒸発温度
p_2	冷媒の凝縮圧力
t_2	冷媒の凝縮温度
Q_c	凝縮器の凝縮負荷
c	凝縮器の冷却水の比熱
W	凝縮器の冷却水量
t_{w1}	凝縮器の冷却水の入り口温度
t_{w2}	凝縮器の冷却水の出口温度
t_{wm}	凝縮器の冷却水の平均温度
K_c	凝縮器の冷却管の熱通過率
F_c	凝縮器の冷却管の面積
α_r	冷媒凝縮面における熱伝達率
λ_o	油膜の熱伝達率
l_{oc}	油膜の厚さ
f_w	水あかによる汚れ係数
α_w	冷却水に接する面における熱伝達率
t_r	冷蔵庫の室温
θ	外気の温度
f_p	飽和圧力－飽和温度関数

ΔK_cの計算には，平均係数法を用いており，式(2.3)を用いて計算した厳密な値と比較した相対誤差は1.7％である．

5．むすび

提案した方法を空調設備の異常診断に適用した結果，有効であることが分かった．提案した方法は，簡便に機器の異常診断を行う方法として有用である．