既設任意ダクトの流量調整* (第2報)

(昭和29年7月20日受理) 会 員 新 津 靖**

〃 倉 橋 明 次

——→ 摘 要 ←——

研 究 目 的

既に設置されている任意ダクトを対象として、従来のダクト設計法による不完全な流量分布を所定流量に修正する実用的方法について検討しようとするものである。

研 究 結 果

前報の第1法に引続いて、実用的でかつ簡潔な修正方法として第2法を提唱し、実験によってその適用性を確めた。すなわち送風機圧力は前報ダクト一般関係式からは支管流量の項と各本管流量の項の和として表わされるが、後者の項を送風機全風量の項で置換え、これに対する各支管流量比による関数としてダクト内の圧力が表示されるとするもので、取扱いが第1法に比較して簡単になり、しかも容易に制御抵抗値を算出することができる。すなわち

$$P = \sum_{m=1}^n K'_m Q_m^2 + K_m Q_m^2 + k_m q_m^2 \\ = K_n Q_n^2 + k_m q_m^2$$

この式が第2法の基礎をなすダクト関係式である。(符号は本文参照)

5. 任意ダクトの一様分配 (第2法)

第1法はダクトの一般関係式における未知数を現在の流れの状態を基礎にして推定する方法であり、前報(19)式と前提条件との関係からは未知数と関係式数との平衡がとれないので、挿入抵抗係数値 Δk_m を求めることはできない。

よって (11), (17) 式において、送風機圧力を支管動圧で表示しうる圧力と送風機に連結した本管 n の本管動圧で表示した圧力の和と考える。ここに後者の圧力の項において K_m を管系流量 Q_n の自乗で表わした抵抗係数とすると (11), (17) 式より次のようになる。

$$P = \sum_{m=1}^n K'_m Q_m^2 + K_m Q_m^2 + k_m q_m^2 \\ = K_n Q_n^2 + k_m q_m^2 \dots\dots\dots (33)$$

すなわち送風機圧力を、定数係数項の支管部分と変数係数項の本管部分に分つ。従って (33) 式の上式と下式の K_m の意味は異なる。

この関係を一様分配の関係式 (19) 式に入れると次式を得る。

$$\{ (k_n - k_{(n-1)}) + (\Delta k_n - \Delta k_{(n-1)}) \} = \{ K_{(n-1)} - K_n \} n^2 \\ \{ (k_{(n-1)} - k_{(n-2)}) + (\Delta k_{(n-1)} - \Delta k_{(n-2)}) \} = \{ K_{(n-2)} - K_{(n-1)} \} n^2 \\ \dots\dots\dots$$

$$* P = K_n Q_n^2 + (k_n + \Delta k_n) q^2 \quad (a)$$

$$= K_{(n-1)} Q_n^2 + (k_{(n-1)} + \Delta k_{(n-1)}) q^2 \quad (b)$$

$$= \dots\dots\dots$$

$$= K_m Q_n^2 + (k_m + \Delta k_m) q^2 \quad (m)$$

$$= \dots\dots\dots$$

$$= K_2 Q_n^2 + (k_2 + \Delta k_2) q^2 \quad (s)$$

$$= K_1 Q_n^2 + (k_1 + \Delta k_1) q^2 \quad (t)$$

$$\dots\dots\dots (34)$$

(34) 式において順次上の式から二つの式を組合せる。

すなわちまず (a) = (b)

$$K_n Q_n^2 + (k_n + \Delta k_n) q^2 = K_{(n-1)} Q_n^2 \\ + (k_{(n-1)} + \Delta k_{(n-1)}) q^2$$

$$\therefore \{ (k_{(n-1)} - k_n) + (\Delta k_{(n-1)} - \Delta k_n) \}$$

$$= \{ K_n - K_{(n-1)} \} \left(\frac{Q_n}{q} \right)^2$$

しかして

$$Q_n = nq \quad \therefore \left(\frac{Q_n}{q} \right)^2 = n^2$$

よって

* Flow Control of a Given Duct System. (Part 2)

** Y. Nitsu, M. Kurahashi, Member. 大阪大学工学部

$$\left. \begin{aligned} \{(k_m - k_{(m-1)}) + (\Delta k_m - \Delta k_{(m-1)})\} &= \{K_{(m-1)} - K_m\} n^2 \\ \dots\dots\dots \\ \{(k_2 - k_1) + (\Delta k_2 - \Delta k_1)\} &= \{K_1 - K_2\} n^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (35)$$

もし各支管の形状寸法が同一であるときには

$$k_1 - k_2 = \dots\dots\dots = k_m = \dots\dots\dots = k_{(n-1)} = k_n \equiv k$$

よって一般に挿入抵抗係数は次のように簡単になる

$$\Delta k_m - \Delta k_{(m-1)} = \{K_{(m-1)} - K_m\} n^2 \dots\dots\dots (35')$$

従って一般に第 m 支管路に挿入すべき抵抗係数値 ξ_m は次のようになる。

$$\xi_m = \sum_1^m (\Delta k_m - \Delta k_{(m-1)}) \dots\dots\dots (36)$$

すなわち ξ_m は一般に Δk_m の中のいずれか一つを基準に選べば順次算出できる。この場合 ξ_m 自体の負の値は抵抗挿入の意味を失うものであるから、 Δk_m の最低値を基準値 0 として求めればよい。

よってこのような抵抗体により制御される圧力差 ΔP_m は

$$\Delta P_m = \xi_m q^2 = \xi_m \frac{1}{2g\gamma} \left(\frac{1}{f_m} \right)^2 q^2 \dots\dots\dots (37)$$

しかして制御体の抵抗係数 ξ_m としては最も性質のよく分った標準ノズル、またはオリフィスを用いる場合には次のような関係式により使用寸法を算出する。

$$\left. \begin{aligned} \xi_m &= \left(\frac{1}{m'} - 1 \right) \left(\frac{2.75}{m'} - 1.56 \right) \dots (\text{オリフィス}) \\ \xi_m &= \left(\frac{1}{m'} - 1 \right) \left(\frac{1.04}{m'} - 1 \right) \dots\dots\dots (\text{ノズル}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (38)$$

$$\text{ここに } m' = \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad d = \text{オリフィス又はノズル径} \\ D = \text{支管径}$$

この場合制御体としては別に上記のノズル又はオリフィスに限ることはなく、その抵抗制御性質さえ明白であれば何を用いても差支えない。

次に一般に K_m の性質について考えると、(33) 式より分るように K_m は管路流れに応じて変化する係数値で厳密には複雑な性質のものである。しかしこれを大局的に送風機の全流量 Q_n に対するその支管流量 q_m の大きさにより如何に変化するかという性質を掴み、所要の一樣分配の場合の流量比 $q_m/Q_n = 1/n$ のときにとるべき K_m の値を推定し、この値から制御抵抗値を近似的に算出しようとするものである。

すなわち一般に K_m は流量比 $(q_m/Q_n) = r$ の関数と考える。

$$K_m = f \left(\frac{q_m}{Q_n} \right) = f(r) \dots\dots\dots (39)$$

しかして現在のダクトの流れの状態を 1 の状態として接尾符号 1 を附して表示し、 K_m をこの状態によって

Taylor 展開すると

$$\begin{aligned} K_m &= f(r_1) + \left(\frac{df}{dr} \right)_{r=r_1} (r - r_1) \\ &+ \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2 f}{dr^2} \right)_{r=r_1} (r - r_1)^2 \\ &+ \frac{1}{3!} \left(\frac{d^3 f}{dr^3} \right)_{r=r_1} (r - r_1)^3 + \dots\dots\dots (40) \end{aligned}$$

しかして一樣分配のときには $r = q_m/Q_n = 1/n$ であるから

$$\begin{aligned} (K_m)_{r=\frac{1}{n}} &= f(r_1) + \left(\frac{df}{dr} \right)_{r=r_1} \left(\frac{1}{n} - r_1 \right) \\ &+ \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2 f}{dr^2} \right)_{r=r_1} \left(\frac{1}{n} - r_1 \right)^2 \\ &+ \frac{1}{3!} \left(\frac{d^3 f}{dr^3} \right)_{r=r_1} \left(\frac{1}{n} - r_1 \right)^3 + \dots\dots\dots (40') \end{aligned}$$

(a) 第 1 近似

$$(K_m)_{r=\frac{1}{n}} = f(r_1) + \left(\frac{df}{dr} \right)_{r=r_1} \left(\frac{1}{n} - r_1 \right) \dots\dots (41)$$

K_m の $r = 1/n$ の値を上式のようにおく。

この場合には現在のダクト流れの 1 状態の外に、適当な方法 (例えば任意の支管路の弁を絞る等) でダクト流れの状態を変化させ、その時を 2 の状態とする。しかしこの時の流れの関係式は次のようになる。

$$P_2 = K_{m_2} Q_{n_2}^2 + (k_m + k'_{m_2}) q_m^2 \dots\dots\dots (42)$$

ここに k'_{m_2} は 1 の状態から 2 の状態に管路の流れの状態に変化を与えるため、支管路に附加した抵抗係数値であり、これは必ずしも各支管全部に附加する必要はなく、適当に最も効果的な支管を選定して行えばよい。しかもこの k'_{m_2} の値が未知の場合には、その支管が本管に合流又は分流する直前において静圧を測定することにより $(k_m + k'_{m_2}) q_m^2$ を求めればよい。なお前報で述べた前提条件 2) から送風機圧力 P_2 と流量 Q_{n_2} の関係が既知であるから (42) 式より K_{m_2} の値を算出し得る。しかしてその時の流量比を r_2 とすると (40) 式より一次の項までとると次の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned} K_{m_2} &= f(r_1) + \left(\frac{df}{dr} \right)_{r=r_1} (r_2 - r_1) \\ \therefore \left(\frac{df}{dr} \right)_{r=r_1} &= \frac{K_{m_2} - f(r_1)}{(r_2 - r_1)} \dots\dots\dots (43) \end{aligned}$$

この $(df/dr)_{r=r_1}$ の値を (41) 式に代入すれば、一樣分配の場合にとるべき $(K_m)_{r=1/n}$ の値が求まる。これらの K_m の値を (35) 又は (35') 式に入れて制御抵

抗値を算出する。

(b) 第2近似

$$(K_m)_{r=\frac{1}{n}} = f(r_1) + \left(\frac{df}{dr}\right)_{r=r_1} \left(\frac{1}{n} - r_1\right) + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dr^2}\right)_{r=r_1} \left(\frac{1}{n} - r_1\right)^2 \dots\dots\dots(44)$$

K_m が $r=1/n$ においてとるべき値を上式のようにおく、この場合には1, 2 状態のダクト流れの外に、更に状態3の流れを求める。しかしてその時の流れの関係式は

$$P_3 = K_{m3} Q_{n3}^2 + (k_m + k_{m3}') q_m^2 \dots\dots\dots(42')$$

ここに k_{m3}' は3の状態をうるために支管に附加した抵抗体の抵抗係数であることは前の場合と同様であり、流量比 $r=r_3$ における K_{m3} の値を算出する。よって

$$K_{m3} = f(r_1) + \left(\frac{df}{dr}\right)_{r=r_1} (r_3 - r_1) + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dr^2}\right)_{r=r_1} (r_3 - r_1)^2 \dots\dots\dots(45)$$

この(45)式に(43)式の $(df/dr)_{r=r_1}$ の値を入れて $(d^2f/dr^2)_{r=r_1}$ を求める。よってこれらの値から(44)式により一様分配のときにとるべき K_m の値を求めうる。以下例題によってこの解法を述べる。

6. 理論と実験結果の比較

第2図は実験例として用いた既設任意管路を示し、各支管の吸入流量が一様になるよう修正しようとするのである。

すなわち内径 43 mmφ の一様真鍮本管に5本の内径 25 mmφ、長さ 508 mm の同一真鍮支管を直角に、支管

(第 2 図)

ピッチ 1007 mm で分岐接合した管路系であって、各支管端には支管径に等しい丸味をもった木製吸引整流ラッパを設けてある。

まずこの管路がどのような流量分布特性をもっているかを調べるため、支管端より 120 mm の位置で支管吸込み静圧 ΔP を測定する。また第5支管軸より 960 mm 離れた下流位置で本管静圧 P_n を測定し、同時に本管端を 30HP の Vacuum Pump に連結した途中管路において全風量を測定する。

しかして支管吸込み静圧 ΔP は

$$\Delta P = \left(\zeta_i + \lambda \frac{l}{d} + 1 \right) \frac{\gamma}{2g} w^2$$

であるから支管形状寸法同一の場合には、支管吸込み静圧の平方根に比例して全風量 Q_5 を分配すれば各支管の流量を知りうる。すなわちこの管路の各支管静圧を図示のように測定し、全風量 Q_5 に対する各支管流量比 q_m/Q_5 および支管圧力項 $k_m q_m^2$ を求めると第1表に示

(第 1 表)

状 態	風 量 Q_5 kg/s	q_m/Q_5					$k_m q_m^2$					$K_m Q_5^2$				
		m					m					m				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	5.235×10^{-2}	0.115	0.137	0.171	0.240	0.337	9.3	13.0	20.4	40.2	79.2	124.2	120.5	113.1	93.3	54.3
	5.550	0.116	0.137	0.173	0.239	0.335	10.5	14.8	23.4	44.9	88.0	139.5	135.2	126.6	105.1	62.0
	5.744	0.115	0.136	0.174	0.240	0.334	11.8	15.5	25.5	48.4	93.7	148.2	144.5	134.5	111.6	66.3
	5.972	0.117	0.139	0.174	0.238	0.333	12.4	17.4	27.3	51.3	100.7	159.6	154.6	144.7	120.7	71.3
	6.196	0.117	0.138	0.174	0.236	0.336	13.4	18.5	29.4	54.3	109.9	171.6	166.5	155.6	130.7	75.1
2	5.244×10^{-2}	0.131	0.156	0.199	0.271	0.244	11.9	17.0	27.6	51.5	99.1	130.6	125.5	114.9	91.0	43.4
	5.583	0.132	0.156	0.198	0.271	0.243	13.7	19.4	31.2	58.1	111.8	148.8	143.1	131.3	104.4	50.7
	5.854	0.132	0.155	0.198	0.271	0.244	15.2	20.9	34.2	63.9	123.9	159.8	154.1	140.8	111.1	51.1
	6.039	0.133	0.155	0.199	0.269	0.244	16.5	22.2	36.8	67.2	131.7	169.0	163.1	148.7	118.3	53.8
	6.452	0.133	0.156	0.198	0.270	0.242	18.8	25.9	41.5	77.2	148.5	193.2	186.1	170.5	134.8	63.5

状態	風量 Q_5 kg/s	$K_m / \frac{1}{2g\gamma} \left(-\frac{1}{F}\right)^2$				
		m				
		1	2	3	4	5
1	5.235×10^{-2}	2.355	2.284	2.144	1.769	1.029
	5.550	2.353	2.281	2.136	1.773	1.046
	5.744	2.333	2.275	2.118	1.757	1.044
	5.972	2.325	2.253	2.108	1.759	1.039
	6.196	2.323	2.254	2.106	1.769	1.017
2	5.244×10^{-2}	2.467	2.371	2.171	1.719	0.820
	5.583	2.433	2.340	2.147	1.707	0.829
	5.854	2.423	2.337	2.135	1.685	0.775
	6.039	2.408	2.326	2.118	1.685	0.766
	6.452	2.412	2.323	2.128	1.683	0.793

すようになる．これがこの管路の状態 1 の流動特性である．

次に状態 2 として，流動特性を変えるために第 5 支管の流入端から 254 mm のところに 19.27 mmφ のオリフィスを挿入し，前と同様の測定を行って第 1 表の状態 2 の値を得た．すなわち支管圧力項 $k_m q_m^2$ については管路入口損失 $\zeta_i = 0.05$ ，摩擦損失係数 $\lambda = 0.023$ として別途計算した値と実験値がよく符合することを確かめ，この流体摩擦損失係数を用いて本管への合流直前における支管静圧を算出したものである．もっともこの $k_m q_m^2$ の値は実験的に本管，支管接合部で直接測定してもよいわけである．なお 2 の状態の第 5 支管には前述のようにオリフィスを挿入したので，その抵抗体による圧力損失は (38) 式による値を用いた．

また第 1 表にはこれらの結果から算出される各風量に対する $K_m Q_5^2$ および $K_m \frac{1}{2g\gamma} \left(-\frac{1}{F}\right)^2$ の値をも示したがこの表にみるように K_m は吸込み全風量の変化に対する変動は殆んどないと考えられる．

よってこれら 1, 2 状態について流量を変化させた 5 回の実験結果から，その平均値をとれば $K_m \frac{1}{2g\gamma} \left(-\frac{1}{F}\right)^2$ および $q_m / Q_5 = r$ の値は第 2 表のようになる．

この値から第 1 近似によって 1, 2 状態の関係式(43)

(第 2 表)

状態	$K_m / \frac{1}{2g\gamma} \left(-\frac{1}{F}\right)^2$					q_m / Q_5				
	m					m				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	2.338	2.269	2.122	1.765	1.035	0.116	0.137	0.173	0.239	0.335
2	2.429	2.339	2.140	1.696	0.797	0.132	0.156	0.198	0.270	0.243

式を用い $(df/dr)_{r=r_1}$ の値を求め，これを (41) 式に代入して一様分配の時にとるべき K_m の値を計算すると

$$K_{1r=\frac{1}{2}} = 2.816 \frac{1}{2g\gamma} \left(-\frac{1}{F}\right)^2$$
$$K_{2r=\frac{1}{2}} = 2.501 \frac{1}{2g\gamma} \left(-\frac{1}{F}\right)^2$$
$$K_{3r=\frac{1}{2}} = 2.141 \frac{1}{2g\gamma} \left(-\frac{1}{F}\right)^2$$
$$K_{4r=\frac{1}{2}} = 1.852 \frac{1}{2g\gamma} \left(-\frac{1}{F}\right)^2$$
$$K_{5r=\frac{1}{2}} = 0.686 \frac{1}{2g\gamma} \left(-\frac{1}{F}\right)^2$$

しかしてこの場合には各支管抵抗 $k_1 = k_2 = \dots = k_5 = k$ であるから (35') および (36) 式から，各支管に挿入すべき制御抵抗体の抵抗係数は第 1 支管を基準 0 とすれば次の第 3 表のようになり，またオリフィスを用いて抵抗制御を行う時のその寸法計算値は同表に示すようになる．

(第 3 表)

支管番号	ζ_m	オリフィス径 d (mm)		
		計算値	理論値	実験使用値
1	0	—	—	—
2	0.899	21.2	22.6	21.10
3	1.926	19.5	20.1	19.27
4	2.750	18.6	18.2	18.80
5	6.076	16.5	16.6	16.65

ここに表中のオリフィス径は既に発表²⁾した管路関係式より求めた理論的な計算値であり，第 2 法の近似解法で算出した値と比較的よく一致する．なお合流抵抗係数については G. Vogel³⁾ が本管径 43 mm，支管径 25 mm の直角分岐管で行った結果を本管，支管の流量比の二次関数として表わした値 ($\zeta_b = -0.80 + 3.07(q/Q) + 4.94(q/Q)^2$, $\zeta_a = 2.38(q/Q) - 1.00(q/Q)^2$ ，ただし ζ_b は支管より本管へ合流する際の圧力損失係数であり， ζ_a は本管より支管へ合流する場合の圧力損失係数である) を用いた．また表中には計算したオリフィス径に相当するものとして，実験に使用したオリフィスの寸法をも記載

した。

実験結果は第3図に示す通りであって図中点線(○印)は既設管路そのままの自由合流を行わせた場合の流量分布を示し、各支管の吸入量に大きな差のあることが分る。しかしてこの状態を一様合流に修正するために前述の算出オリフィスを各支管路に挿入した場合の実験結果が実線(●印)で示してある。

(第3図)

7. 結 言

従来のダクト設計法はいずれもダクト各部の抵抗係数の近似一定値を用いて寸法を計算する概算法であるから、完全に所要の流量分布状態を実現させることは困難である。従って現在紡績工場内の調和空気ダクト等はいずれも正確に所定流量の分流および合流を行っていないものが多いと考えて差支えない。

よってこのように管路性質の明確でない既設ダクトにおいて、いかにして流量分布を所要値にするかの修正方法につき第1法および第2法を提唱して、両者を比較検討し、第2法について実験を行い、この方法が実際の近似解法として適切かつ簡単であることを見出した。なおこれらの方法は既設の気体又は液体流動管路に適用しうるもので応用範囲は広い。

参 考 文 献

- 1) 沖 巖；機械学会論文集，第4巻，第14号 昭13-2，77頁
- 2) 著者；繊維機械学会誌，第5巻，第3号，29頁
- 3) G. Vogel, F. Petermann, E. Kinne : Hydr. Inst. T. H. München, Mitt. (2) (1928), (3) (1930), (4) (1931)

書 評

新 刊 機 械 力 学

亘 理 厚 著 [昭和16年東大工学部航空学科卒業] ¥ 330 送料 30
[東京大学助教授 工学博士]

機械力学とは、機械工学と力学との共通部分である。ゆえにその内容は著者の序にあるとおり、機械の運動学と振動学と自動制御学とより成立つ。すなわち回転体や往復体のアンバランスの問題と、振動発生の原因を究めその対策としての防振、吸振の問題との二つが、本書の花形的役割を演じている。

本書は著者の大学における講義の経験から、初学者にも分りやすいように書かれており、しかもいつのまにか相当高度の知識を読者に教えこんでしまう。非線型振動、安定問題および交流理論に端を発し、自動制御方面で利用されている種々の方法までが、充分と思われる程度に解明されている。

機械技術者は若いうちに高等数学をよく勉強しておかなければならぬという声をきくが、今日のように専門化し分業化してしまった機械工業の形態において、その全員に数学を要求するのは無理というものであろう。わたしはこの数学という声のかわりに機械力学という言葉置きかえたい。

機械力学こそは、すべての機械技術者の座右に置かれるべきものであって、これによって故障対策を立て、思わぬ失敗を繰返さないようにすることがある程度できるのではないかと思う。

この意味において本書の刊行を喜び、ひろく諸賢に推薦する次第である。(S W 生)

発行所 東京都千代田区神田駿河台3-9 共立出版株式会社