技術ノート TECHNICAL NOTE

五孔アローヘッド型ピトー管による迎角測定*1 Measurement of Angle of Attack Using a Five-Hole Arrow Head Pitot Tube

太田 裕文*2・若松 直哉*3
Hirobumi OHTA and Naoya WAKAMATSU

Key Words: Five-Hole Pitot Tube, Angle of Attack Measurement, Experiment

Abstract

A five-hole arrow head pitot tube is tested to measure flight velocity and angle of attack. This paper presents experimental equations with corrective coefficients. These equations enables us to calculate flight velocity and angle of attack in terms of the measured pressure. The time lag corresponding to the change of angle of attack is also reported.

1. はじめに

模型飛行機を用いた飛行実験では、軽量、小型、低価格な測定器を使い機体の迎角や飛行速度を測定することが望まれる。この目的のため本稿では、五孔アローヘッド型ピトー管の特性を検定する。また、測定圧力から計算機を用いた繰り返し計算により迎角と流速を求められるようにするため、補正係数を導入して実験結果を良く近似する計算式を求めると共に、ピトー管による測定にどの程度の時間遅れがあるかも報告する。

2. 五孔アローヘッド型ピトー管

検定した五孔アローヘッド型ピトー管の先端部分拡大図とその断面図を第1図に示す。今回はこのピトー管の迎角と流速の変化に対する特性のみを検定するので、使用する測圧孔は上方、中央、下方の3つのみである。またこれらの測圧孔による圧力を順に P_T , P_C , P_B とすると、後で示すように迎角と流速に対する特性の検定には、差圧 $(P_C - P_T)$ 及び $(P_C - P_B)$ を測定すれば十分である。また、上方及び下方の測圧孔のある面がピトー管中心軸となす角 θ_T , θ_B は、測定の結果 $\theta_T = 44^\circ$, $\theta_B = 48^\circ$ であった。

*1 平成3年10月8日、第29回飛行機シンポジウムで発表。
平成4年3月11日原稿受理

*2 名古屋大学工学部航空学科

*3 名古屋大学大学院工学研究科

3. 測圧孔圧力と迎角、流速の関係

ピトー管の迎角 α 、一様流の速度 U 、静圧 P_S のとき、流れを理想流と仮定すれば、各測圧孔にベルヌーイの定理を用いて、

$$P_T = P_S + 1/2 \rho U^2 \sin^2(\theta_T - \alpha) \quad (1)$$

$$P_C = P_S + 1/2 \rho U^2 \cos^2 \alpha \quad (2)$$

$$P_B = P_S + 1/2 \rho U^2 \sin^2(\theta_B + \alpha) \quad (3)$$

が得られる。これらの式を α 及び U について解けば、

$$\alpha = f(P_C - P_T, P_C - P_B) \quad (4)$$

$$U = g_1(P_C - P_T, \alpha) \quad (5)$$

または

$$= g_2(P_C - P_B, \alpha) \quad (6)$$

の形で得られるので、ピトー管で測定した差圧 $(P_C - P_T)$, $(P_C - P_B)$ から迎角 α が求まり、続いて流速 U が得られることがわかる。しかしこれらは理想流を仮定しているから、現実にはどの程度成り立つかを以下のようにして実験により検討した。

4. 検定実験とその結果

検定ではピトー管迎角 α を $-30^\circ \sim +30^\circ$ まで 5° 間隔に設定し、さらに各迎角で流速 U を $10 \sim 30$ m/s まで 5 m/s ごとに変化させ、各場合について前述の $(P_C - P_T)$ と $(P_C - P_B)$ を測定した。

その測定圧力から、式(4)～(6)を用いて迎角と流速を計算した結果を第2図に示す。図からわかるようにこれらの式から求めた値は真値とかなりずれており、真値からのずれの標準偏差を計算したところ、迎角で約 3.2° 、流速で約 6.2 m/s である。このずれの原因はベルヌーイの定理と現実流との差、ピトー管先端の面の角度、測定孔の大きさ等による影響と思われる。

第1図 五孔アローヘッド型ピトー管

第2-1図 計算式(4)より求めた迎角

第2-2図 計算式(5)より求めた流速

検定ではこの他に、ピトー管をサーボモータで振らせ、迎角を正弦波的に変化させたときの測定圧力の時間遅れについても測定した。今回の検定に使用した差圧器は歪ゲージ式のもので、その結果は迎角の振幅や周波数、流速の大きさにはほとんど関係なく、迎角変化に対し測定圧力は約0.4~0.6秒の時間遅れがあることが確認できた。しかもこの時間遅れは、はじめ130 cm あったピトー管と差圧器をつなぐチューブを半分の65 cm にしてもほとんど変化しない。

5. 迎角と流速の計算式の導出

上記の実験結果と計算式との差を埋め、式から迎角と流速の計算ができるようにするため、文献1)にならって補正係数 μ , μ' を導入し、式(1)~(3)を次のように書き改める。

$$P_T = P_s + 1/2 \mu' \rho U^2 \sin^2(\theta_T - \alpha) \quad (7)$$

$$P_C = P_s + 1/2 \mu \rho U^2 \cos^2 \alpha \quad (8)$$

$$P_B = P_s + 1/2 \mu' \rho U^2 \sin^2(\theta_B + \alpha) \quad (9)$$

ここで μ , μ' の値は、各流速ごとに実験結果とこれらの式との差が最小になるように決定した。その結果、 μ , μ' は流速をパラメータとする関数になるが、これらを多項式で近似したところ、

$$\mu = a_0 + a_1 U^{0.5} + a_2 U + a_3 U^2 + a_4 U^3 \quad (10)$$

$$\mu' = a'_0 + a'_1 U^{0.5} + a'_2 U^2 + a'_4 U^3 \quad (11)$$

と置いたときに非常に良い近似が得られた。これらを第3図に示す

また、式(7)~(9)から α と U を求めると、

$$\alpha = f'(P_C - P_T, P_C - P_B, \mu, \mu') \quad (12)$$

$$U = g'(P_C - P_T, \alpha, \mu, \mu') \quad (13)$$

または

$$= g''(P_C - P_B, \alpha, \mu, \mu') \quad (14)$$

となり、式中に当然のことながら μ , μ' が入ってくるが、圧力項は式(4)~(6)と同様やはり差圧の形をしており、補正係数の導入によっても絶対圧を測定す

第3図 補正係数と流速の関係

第4-1図 新計算式(12)より求めた迎角

第4-2図 新計算式(13)より求めた流速

る必要のないことがわかる。

以上より測定圧力から迎角と流速を求める補正係数を導入した一連の式(10)～(14)が求まったことになる。しかし式(10)と(11)では未知量である流速 U を用いて補正係数を計算するため、実際には以下に示すアルゴリズムを繰り返す必要がある。

- ① あらかじめ μ と μ' をある値に仮定する。
- ② ①で仮定した μ , μ' を用いて、式(12)～(14)から α と U を求める。
- ③ ②で求まった U を式(10), (11)に代入して μ と μ' を計算する。この計算値が①で仮定した値と一致すればこのときの α と U が求める迎角と流速である。

一致しなければ計算によって今求めた μ と μ' をあらためて μ と μ' の仮定値として再び②へ戻り、一致するまでこの手順を繰り返す。

このアルゴリズムの繰り返し回数については、補正係数の初期値を流速 20 m/s のときの値と仮定して計算したところ、ほとんどの場合 2～3 回の計算で終了した。これは文献 1) でも同様に報告している。

この方法で、検定時のデータを用いて計算させたところ、第 4 図に示す結果が得られた。これは補正係数を導入する前の計算式による結果である第 2 図と、グラフの縦軸のスケールの違いに注意しながら比較すれば明らかなように、大迎角の所を除いてほぼ全域で真値に近い値が得られるように改善されている。真値からのずれの標準偏差は補正係数を導入した計算式では迎角で 2.5° 、流速で 1.2 m/s となり、導入前の 3.2° 、 6.2 m/s と比べ特に流速の精度の改善がめざましいことがわかる。さらにピトー管の使用範囲を迎角: $-20^\circ \sim +20^\circ$ 、流速: $15 \sim 30 \text{ m/s}$ に制限すると、この標準偏差はさらに 0.8° 、 0.9 m/s まで下がる。

6. ま と め

多孔型ピトー管で迎角と流速を測定する場合、その測定は迎角や流速の瞬間的な値よりも連続的な変化を求めることが目的のときも多い。このような際に今回導出した補正係数による計算手法は、すべて式で表現されているため非常に有用で、測定圧力データを A/D 変換によってパソコンに取り込めば、迎角と流速の値とその時間変化を短時間で求めることが可能になる。

しかしその一方で、ピトー管から得られる圧力は、0.5 秒前後の時間遅れを伴い、この時間遅れは飛行機のフィードバック制御の目的には無視できない。しかしポストフライトデータを用いた運動解析では、時間遅れを補正することにより迎角データとして利用可能である。

参考文献

- 1) 坂井紀穂, 稲垣敏治: 球形五孔型ピトー管の特性, 航技研報告, TR-971 (1988)。