

第 20 章 飞机观测

20.1 概述

本章叙述在现代商业飞机上进行自动气象测量的方法,其集合名称为飞机气象数据中继系统 (AMDAR)。此处叙述的方法也可用于其它装备仪器的飞机。

专用于气象业务的长距离无人驾驶飞机正在研制中,如飞行探测 (Holland, Me Geer 和 Youngren, 1992)。由于尚未投入业务使用,在此不加叙述。

AMDAR 系统工作在配有复杂的导航和其它传感系统的飞机上。包括测量空速、气温和气压等。其它与飞机位置、加速度和方向等有关的数据从飞机导航系统中获取。飞机上还装有机载计算机,用于飞行管理和导航系统。在 AMDAR 系统中,数据经进一步处理后自动馈入飞机通讯系统以向地面发送,或者是在飞机上另一套专用处理软件包,从飞机上直接获取原始数据并独立推导其它气象变量。

在 AMDAR 系统中,这些设备用来实时编制和传送气象报告。报告中包括水平风速和风向、气温、高度 (相对于参照气压面)、湍流的测量以及飞机位置。

气象观测的原始数据需进行多种修正和复杂的处理,才能得到可代表飞机周围自由气流中的真实气象测量值。所有有关处理程序的全面叙述,超出了本指南的范围,此处只能简述其原理,附录里有一些细节,并列出一一些参考文献供阅读。

20.2 风速和风向的测量

从飞机上测量三维风矢量是一个很复杂的问题。利用从飞机导航系统 (一般是惯性导航系统) 和空速系统 (一般是皮托管) 获得的数据,加上从温度传感器获得的数据,可以计算出具有很高准确度的飞机相对于地面的速度 (V_g) 和空气相对于飞机的速度 (V_a), 于是即可得到风矢量 (V)

$$V = V_g - V_a \quad (20.1)$$

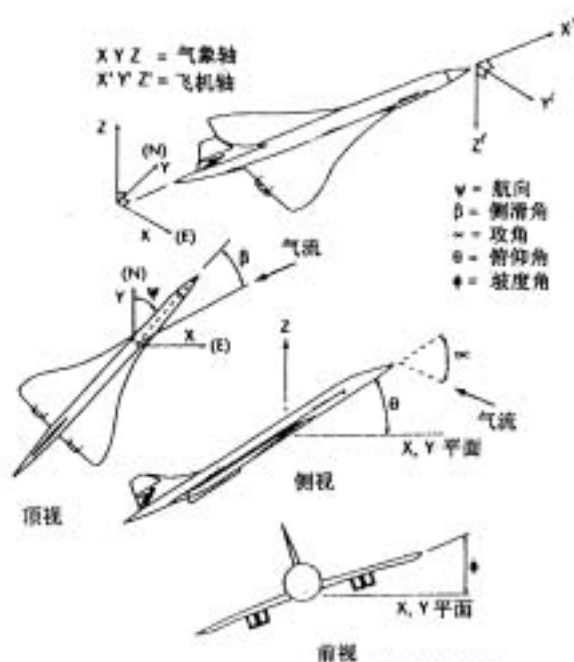


图 20.1 飞机参考轴及姿态角

矢量 V_g 和 V_a 需准确测量, 因为典型的水平风 ($\cong 30m/s$) 比飞机的地速和真空速 (200 至 $300m/s$) 小很多。要完全解出这些三维矢量, 需要测量飞机的俯仰角、坡度角、侧滑角以及飞机相对于气流的垂直攻角 (图 20.1)。在正常水平飞行时, 俯仰角、侧滑角和攻角都很小, 可以忽略不计。但飞机操纵可能造成很大误差, 不过操纵时一般只是坡度角有较大变化。所以计算风数据时, 通常把坡度角超过一定阈值时的数据排除。

对于大多数应用, 只测量风的水平分量。这时要求输入的数据缩减为只需空速、航向和地速。航向和地速取自导航系统, 真空速需根据空速指示器的校正空速计算出来。水平风的分量 (u, v) 为:

$$u = -|V_a| \sin \varphi + u_g \quad (20.2)$$

$$v = -|V_a| \cos \varphi + v_g \quad (20.3)$$

式中 $|V_a|$ 是真空速的量值, φ 是相对于真北的航向, u_g 和 v_g 是地速的分量。

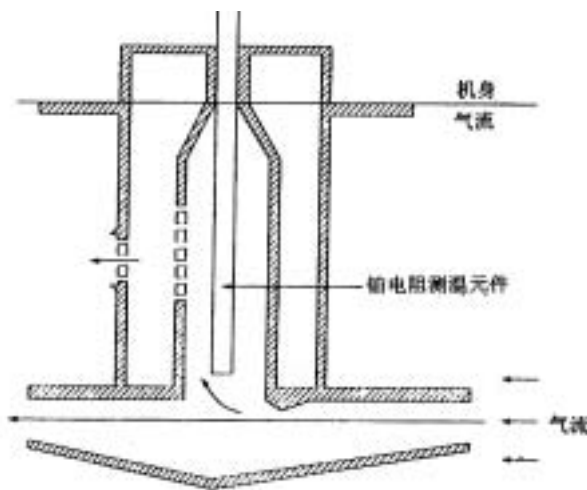


图 20.2 飞机测温探头

20.3 气温的测量

准确测量气温是推导其它气象要素的基础。例如, 它用以修正表速, 从而影响到风速分量的计算。

很多商业飞机装备有内置型温度探头。图 20.2 所示即为一个典型的例子。感应元件是一个铂电阻测温元件。元件腔的设计是让云水粒子分流, 不致打在元件上。但有报道称 (Lawson and Cooper, 1990) 在积云中元件被打湿。

探头实际测得的温度是空气总温度 (TAT)。而静止空气温度 (SAT), 即自由气流的温度, 与空气总温不同。因为气流被元件腔和测温元件减速时, 压缩及黏性摩擦的增温以及空气在元件上的不完全阻滞。使温度发生了变化。SAT (T_o , 以 K 为单位) 和测得温度 (T_1) 的关系如下式:

$$T_o = \frac{T_1}{\left(1 + \lambda \frac{(\gamma - 1)}{2} M^2\right)} \quad (20.4)$$

式中 γ 是干空气比热之比 (c_p / c_v): M 是马赫数 (真空速除以自由大气中的音速): λ 为探头的恢复系数, 它包括了空气黏性对 SAT 的效应和空气在测温元件上不完全阻滞的效应。

详细的论述参见权威的空气动力学著作, 如 Abbott and von Doenhoff (1959) 或 Commasch, Sherby

and Connolly (1958)。

对于商业飞机上装备的常用的探头， $\lambda = 0.97$ 取 $\gamma = 1.4$ ，则 SAT 为 $T_1 / (1 + 0.194M^2)K$ 。典型的喷气式商业飞机巡航速度的马赫数约为 0.8，可得

$$T_o \cong T_1 / 1.124 \quad (20.5)$$

如果 $T_o = 223K (-50^\circ)$ (20.6)

$$T_1 = 251K (-22^\circ) \quad (20.7)$$

则在巡航高度上典型的温度修正值为 -28° 。

元件在云中被打湿时，蒸发降温所造成的误差可达 3° 左右。可以用其它设计元件如国家大气研究中心（美国 NCAR）研制的返流式探头（见 Rodi and Spyers-Duran, 1972）可以消除这种误差。

20.4 气压测量

静压可用接至静压头的电子气压表直接测得。虽然飞机压强传感器感受设计为测量静压（自由大气的压强）的，但这个变量并不直接在飞机气象报告中发布。报告的是按照国际标准大气（ICAO, 1964）这个气压值所对应的高度值。飞行在定常高度上的飞机实际上是在等压面上飞行，这简化了全球导航的规则。标准大气假设，在 11km 以下气温随高度线性下降，每 km 降低 6.5° ，海平面温度和气压分别为 15° 和 1013.25hPa。从 11 到 20km，温度假设为常数： -56.5° 。

20.5 马赫数

计算马赫数是为了修正气温的测量值和空速的测量值（指示空表速）。在干空气中，音速正比于绝对温度（静态）的平方根。但从 20.3 节我们知道，飞机传感器并不能直接测量到静止大气温度，所以使用了独立测量马赫数的方法。计算马赫数 M 的方程为：

$$M^2 = \frac{2}{(\gamma - 1)} \left\{ \left(\frac{p_s}{p_o} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right\} \quad (20.8)$$

式中 p_o 为静压（在未被扰动的气流里）； p_s 为总压（ $p_o + p_d$ ）； p_d 为动压，由下式计算：

$$P_d = \frac{1}{2} \rho V_C^2 \quad (20.9)$$

此处 V_C 为校准空速； ρ 为空气密度。

量 p_o 和 V_C 可以从飞机数据系统中获得， ρ 取常规值。进一步的信息可查 Abbott and von Doenhoff (1959) 或 Dommasch, Sherby and Connolly (1958) 等权威著作。

20.6 湍流

湍流，特别是晴空湍流（无云时的湍流）是航空中一个重要的、有潜在危险的现象。虽然对商业飞行来说，航线已经过设计避开湍流，飞机仍不可避免地会遭遇到预想不到的颠簸，根据飞机仪器装备可以测量出与正常平飞时的偏离。垂直加速度（垂直于飞机水平参考面）用加速度表测量。输出的数据是参照重力加速度，并以重力加速度为单位标度，并可按下表来分级。但是，湍流对飞机危害的严重性主要取决于空速、飞机重量、高度以及湍流本身的性质。因此，一架飞机可根据遭遇的峰值加

速度按照下表中的粗略关系发出湍流报告，但其它飞机应用有局限。同样的阵风对不同的飞机会有不同的影响。

湍流按峰值加速度的分级

湍流级别	峰值加速度*
无	小于 0.15g
轻度	0.15g 至 0.5g
中度	0.5g 至 1.0g
重度	大于 1.0g

*此加速度可正可负,表示对正常重力加速度（1.0g）的偏离

另一个湍流指标是导出的相当垂直阵风速度。它定义为，叠加在稳定水平风之上的能造成所测飞机加速度的瞬间垂直阵风速度。阵风对飞机的作用取决于质量和其它特征，把所有这些考虑进去可计算出与飞机无关的阵风速度。反过来计算，可以求得给定相当垂直阵风对不同飞机造成的影响。

导出相当垂直阵风由下式给出(Sherman, 1985)：

$$U_{dc} = \frac{Am\Delta n}{V_c} \tag{20.10}$$

这里 U_{dc} 为导出的相当阵风速； Δn 为飞机垂直加速度偏离 1g 的峰值模量，单位为 g；m 为飞机总质量； V_c 为出现加速度峰值时的校准空速；A 是决定于飞机类型的参数，与飞机质量、高度和写赫数相关不大。

澳大利亚飞机即用 AMDAR 编码格式常规发布此垂直阵风参量，单位为 m/s（参考 20.9 节）。

Cornman，Morse and Cunning（1995）新近的工作提出根据飞机垂直阵风加速度数据计算涡旋耗散率。涡旋耗散率是数值模式预报大气湍流时使用的关键参数之一，看来可能比峰值加速度或相当阵风速度更有用。

20.7 相对湿度

开发商业飞机上日常使用的湿度传感器是近来的热点（Fleming ang Hills，1993）。到目前为止，候选的技术大多数基于地面自动气象站使用的传感器（如固态器件、冷却镜面露点传感器等）。实际使用需解决的困难主要是放置传感元件的腔室的设计问题（即要求把温度、湿度传感器放在同一个标准腔室内，并保证温度测量准确度不降低）。传感器的漂移及其对喷气式飞机燃油蒸汽和其它大气污染物的敏感性，对传感器最大工作寿命造成了困难。现在估计约六个月的工作寿命，对于航线业务来说可能是无法接受的。但是，大气中的水汽对业务天气预报的重要性，给解决这个业务难题以极大的推动力。数据格式及自动飞机报告的计划，已考虑了今后自动湿度测量发展的前景。

20.8 测量的准确度

推导出的各种变量的误差有多种来源。温度和风矢量的计算是相互独立的，但都要用到空气静压，而后由高度表测量得到。

在计算水平风矢量（或风速和风向）时的简化假设，严格要求不存在侧滑，而常规的飞机测量系

统中又没有侧滑这个变量。因而，除非飞机是在水平飞行而且姿态调整很好，否则风的测量是不可靠的。对于大多数应用来说，坡度角被用作质量指标，风的计算可否接受，视坡度角是否小于 3° 至 5° 。业务使用的结果表明，在所报告的数据中，风矢量的误差大约在 $1 \sim 2\text{m/s}$ 左右（Nash，1994）。

温度测量的误差来源包括安装和传感器误差，以及包括马赫数计算在内的修正过程的不确定度所造成的误差。尽管所要求的处理过程很复杂，使用 ASDAR（WMO，1992）的业务经验表明，在巡航高度上的平均温度误差在 1°C 左右。

飞机传感器系统的校准值可发生变化，推荐定期用同一机场和大约同一时间的探空资料和雷达风探测资料，与飞机上升或下降时的资料进行比对，来监测飞机系统的工作状况。已进行的比对结果表明，飞机测风和气温的不确定度与常规探空测量相差无几（Stickland，1991），其后 Nash（1994）和 WMO（1992）的发现也与这个结果一致。

20.9 实际业务系统

现在已有一系列 AMDAR 系统在业务运行，包括 ASDAR、KLM AMDAR、澳大利亚 AMDAR 以及北美的气象数据收集和报告系统（MDCRS）。这些报告都包括廓线模式数据（上升/下降），也包括巡航模式数据。

ASDAR

这是飞机到卫星的数据中继系统。ASDAR 在全球大气研究计划（GARP）第一次全球试验（FGGE）中提出作为观测系统，经过其后成功的开发，已为很多 WMO 会员国部署在业务系统中。ASDAR（WMO，1992）使用一个专用数据处理器从飞机系统中提取原始数据，计算所要求的气象变量，格式化气象编码条文经国际地球同步卫星的国际数据收集系统（IDCS）转发出去（见附录）。

KLM AMDAR

这个系统把为 ASDAR 开发的功能的软件移植于飞机状况监测系统（ACMS）中。其数据用甚高频（VHF）飞机通讯系统经由国际航空通讯学会（SITA）网络下传给航线运营者（KLM），然后传送至荷兰皇家气象研究所（KNMI）气象中心，最后用 WMO AMDAR 编码格式发布。使用商业 SATCOMS 格式的变型已开发出来。

澳大利亚 AMDAR

这个系统（Sherman，1985）类似于 KLM AMDAR，但它是在 ASDAR 技术规格未完成时开发出来的。它使用独立开发的软件。在 20.6 节中已指出湍流是按导出相当阵风速度编报的。数据用甚高频飞机通讯和报告系统（ACARS）下传，用 AMDAR 编码格式广泛传播。

MDCRS

在北美使用的气象数据收集报告系统（MDCRS）是航空无线电公司（ARINC）根据与美国联邦航空管理局（FAA）的合同开发出来的（Taylor，Landot and Ligler，1990）。这个系统接收从商业飞机上通过 ACARS 下传的多种各公司自定格式的气象报告，处理成通用格式后转发给华盛顿特区的国家气象中心。

20.10 未来飞机气象数据中继（AMDAR）系统

全球空中导航系统的开发与通讯系统的发展紧密联系在一起。因此，未来的空中导航系统与一种

自动航空监视 (automatic dependent surveillance) (ADS) 系统的发展结合在一起 , 后者又决定于全球卫星飞机通讯系统的发展。全球飞机通讯系统是在航空电信网 (ATN) 计划 (Wells 等 , 1990) 之下的一个开放网络上漫游。这将把甚高频 (VHF) 和卫星通讯 (Satcom) 系统连接入一个通用开放网。

商业飞机成功的天气导航 , 特别是为了提供飞行安全 , 减少油耗和机身疲劳 , 以及保障乘客安全 , 要求有更准确的飞行天气预报。为 ADS 进行的飞机位置自动报告可以把自动气象报告包容进去。在这些报告中的数据 , 与现行 AMDAR 系统中的完全一样 , 同时应把湍流和湿度等要素包括进去。

参考文献

- Abbott, I. H. and von Doenhoff, A. E., 1959: *Theory of Wing Section*. Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 69 pp.
- Dommasch, D. O., Sherby, S. S. and Connolly, T. F., 1958: *Aiplane Aerodynamics*. New York, Pitman 560 pp.
- Cornman, L. B., Morse, C. S. and Cuning, C., 1995: Real-time estimation of atmospheric turbulence severity from *in situ* aircraft measurements. *Journal of Aircraft*, Volume 32, Number 1, pp. 171-177.
- Fleming, R. J. and Hills, A. J., 1993: Humidity profiles via commercial aircraft. *Proceedings of the Eighth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Anaheim, California, September 1993, J 125-J129.
- Holland, G. J., McGeer, T. and Youngren, H., 1992: The autonomous aerosonde for economical atmospheric soundings anywhere on the globe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73, pp. 1987-1998.
- International Civil Aviation Organization, 1964: *Manual of the ICAO Standard Standard Atmosphere*.
- Lawson, R. P. and Cooprt , W. A., 1990: Perfomance of some airborne thermometers in clouds. *Jouranl of Atmospheric and Ocean Technolgy*, 7, pp480-494.
- Nash, J., 1994: Upper wind observing systems used for meteorological operations. *Annales Geophysicae*, 12, pp. 691-710.
- Rodi, A. R. and Spyers-Duran, P. A., 1972: Analysis of time response of airborne temperature sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 11, pp. 554-556.
- Sherman, D. J., 1985: *The Australian implementation of AMDAR/ACARS and the use of derived equivalent gust velocity as a turbulence indicator*. Structures Report No. 418, Department of Defence, Defence Science and Technology Organistion, Aeronautical Research Laboratories, Melbourne, Victoria.
- Stickland, J. J., 1991: *Comparisons of AMDAR and Balloon Soundings*. Bureau of Meteorology, Australia (unpublished).
- Taylor, D. L., Landot, D. and Ligler, G. T., 1990: Automated meteorological reports. *Proceedings of the Aeronautical Telecommunications Symposium on Data Link Integration*, Annapoeia, Maryland, May 1990, pp. 141-144.
- Wells, V. E., *et al.*, 1990: Migration of ACARS to the Aeronautical Telecommunication Network. *Proceedings of the Aeronautical Telecommnications Symposium on Data Link Integration*, Annapolis, Maryland, May 1990, pp. 209-216.
- World Meteorological Organization, 1992: Development of the aircraft to satellite data relay (ASDAR) system (D. J. Painting). *WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-92)*, Instruments and Observing Methods Report No. 49, WMO/TD-No. 462, Geneva, pp. 113-117.

附录

飞机至卫星数据中继 (ASDAR) 观测和数据处理

观测的组成

每次观测包括下述气象信息：

- (a) 观测的时刻，用世界协调时 (UTC) 制，分辨至分钟；
- (b) 观测时的经纬度，分辨至弧分；
- (c) 观测时的位势高度，参照标准大气，分辨至英尺；
- (d) 风速，分辨至 kn；
- (e) 风向，参照真北，分辨至 1 度；
- (f) 周围温度，分辨至 0.1 ；
- (g) 湍流，按 4 级编报。

观测阶段

一般原则

由于下面将要提到的原因，某些数据只有飞机飞行在稳定状态时进行观测方才有效。特别是不可在飞机转弯时观测，但高度可以以基本定常的速率升高或降低。

大气是不均匀的，甚至可以在很短的距离内有很大的变化。因此，在某一时刻观测的数据，有可能不足以代表飞机周围大气的情况。平飞时观测用以计算 100km^2 网格格点上预期的情况，因而观测应能代表一段距离，如 10km 的平均情况。为达到这个要求，对某些观测点的数据，在计算程序上必须进行平均或平滑处理。而要使观测有效，飞机必须在远长于平均过程相应的时段内，保持稳定的飞行状态。

爬高或下降时，主要的兴趣在于数据随高度的变化。此时数据值的变化比平飞时快得多，较长时间的平均或者平滑均不恰当。但是，数据的可靠性仍依赖于飞行的稳定性。如果在进行某次观测时飞机处于不稳定状态，则这次观测需标注上“不稳定”标识符。

爬高

大型客机的爬高速度与探空仪相差不大。把探空数据纳入大气模式计算程序的方法已经成熟，因而应使飞机测数据集尽可能接近探空数据集。直接模仿不可能达到，因为 ASDAR 所观的观测数目至少比探空少一个量级，但是，ASDAR 数据每秒更新一次，该系统里有一个强有力的处理器。在开始的 100hPa 以下，每 10hPa 观测一次，此后直到巡航高度每 50hPa 观测一次。

为了编码的一致性，在存储及传送之前，气压转换为以英尺表示的高度值。

平飞

每 7 分钟进行一次观测标准，若飞行变得不稳定，则该观测需标注以“不稳定”。

正常（垂直）加速度测量的分析用以指示平均过程时段内是否有湍流存在。分级表示为：无、轻度、中度和重度，对观测记录加以相应的标注。

需要注意，在上升或下降时，飞机可能在空中交通管制批准的多个高度上保持平飞。如果满足稳定状态判据，保持高度时的观测视为平飞观测。

在常规平飞之间，ASDAR 搜寻明显的最大风速，如果发现则进行附加观测。这个观测记录也须加以标注。

下降

下降的观测方式与上升时观测相似，不同的是，地面之上 100hPa 内每 10hPa 一次的观测无从进行，飞行着陆以后方能确定地面高度。

数据来源

ASDAR 必须能与装备多种不同数据源的不同飞机相匹配。很多飞机上装备的是老式模拟量飞行数据计算机 (ADC)，其计算大气静温和真空速的准确度大大低于观测要求。大气静温对飞机飞行来说不是很重要的参数，即使在现代飞机上，其计算准确度也不能满足气象学家的要求。不过高度和气流速度的测量准确度很高，数字化后可用于其它数据之推导中。

连接到任何 ASDAR 飞机系统的惯性导航系统 (INS)，能提供出关于飞机位置、航向、轨迹角和地速的数据，其准确度完全满足气象观测的要求。风速风向的计算在 INS 中进行，使用来自 ADC 的有时可疑的真空速，这个导出量的误差可使计算出来的风矢量数值偏低。

此外，INS 计算的风只在飞机没有侧滑时可靠。由于无侧滑角（或侧向速度）测量，只能以坡度角为零来保证不存在侧滑（假定飞机操纵很好）。

出于这些考虑，导致这样一个概念，即 ASDAR 只收集完成数字化后的直接测得的初始数据。所有指定初始数据的数字化，或者在飞行数据记录系统的飞行数据收集单元里进行，或在 INS 中进行，并且有时在 ADC 中进行。为了简化其复杂性，ASDAR 设计为只接收数字化数据，并且在程序中设置大量指针以指明各种不同特殊安装的特定设备组合。经过这样处理，不管飞机装备标准如何，所有导出量的计算均在 ASDAR 中进行。其附带的优点是，气象学家知道每项观测的计算方式如何。

下表列出初始数据及其缩写词。

飞机数据系统中可获得的初始数据

参数	缩写	单位	量程
纬度	LAT	度	90 ° S 至 90 ° N
经度	LONG	度	180 ° E 至 180 ° W
气压高度	ALT	英尺	-10000 至 50000
校准空速	CAS	kn	30 至 400
空气总温	TAT		-50 至 99
地速	GSP	kn	0 至 2000
轨迹角	TRACK	度	0 至 360
真航向	HDGT	度	0 至 360
坡度角	ROLL	度	-180 至 180
常规加速度	NMA	g	-3 至 6
故障*	FAIL	-	是/否

*数据源为飞机系统

数据质量

故障

需监测初始数据源的故障标记或状态指示位.由于在一次测量中各种初始数据相互密切联系,任何一项故障指示均导致这一次测量无效。

准确度

由于有可能标明一次观测中的初始数据源的性质，决定除飞机操纵对空气速度测量的作用外，主要的误差源很可能是大气温度测量的性质。用于一个指示位标明一个观测是来自高准确度或是低准确度数据源。

类似地，有可能飞机上使用的是 Omega 导航系统，而不是惯性导航系统，其初始数据属于低准确度，对之相应加以标明。

数据处理

一次观测所需进行的处理不同寻常。需遵循下述程序：

- (a) 确认稳定状态，上升、平飞、或下降；
- (b) 从平滑后的 ALT 计算周围气压。平滑时间取决于飞行状态；
- (c) 从平滑后的 CAS (v_c) 计算动压 (p_a)，然后计算总压 (p_s)。平滑时间取决于飞行状态；
- (d) 根据总压 (p_s) 和静压 (p_0) 计算马赫数 (M)；
- (e) 从平滑后的 TAT 和 M 计算空气静温 (SAT)；
- (f) 根据 SAT 和 TMN 计算真空速；
- (g) 根据 GSP、TRACK、HDGT 和 TAS 计算风矢量的分量，南—北分量 (u) 和东—西分量 (v)；
- (h) 用观测平滑函数处理 SAT 、 u 、 v 数据；
- (i) 从 u 、 v 计算风向 WA 和风速 WSP ；
- (j) 在适当的时间完成观测。

附注：(1) 计算每秒进行一次；

(2) 使用准静态测量的平均或滑动平均很有用，这时其有效分辨率可以提高，提高的倍数接近于平均时所用数据点数的平方根。在很多飞机上，TAT 仅数字化到 1 的分辨率。对于 TAT 进行滑动平均有助于提高分辨率。