

固 态 正 交 风 速 表

F. W. Hagen R. V. Deleo

一、引 言

美国 Rosemount 公司研制了一种正交即全方位风速表, 利用气动信号测量风速和风向。传感器是一种结实的固态装置, 无运动部件, 经得起野外粗放式应用, 并能在世界范围内各种恶劣气候环境下提供精确可靠的风资料。传感器有电气除冰装置, 适合全天候工作。传感器产生经放大的压差, 它与正交方向的风速成正比。内部的固体压力变换器用于产生一个模拟电压, 其大小和南—北、东—西正交方向的风速成线性关系。输出电压可以记录下来或用于驱动一个直观显示器。风速测量范围达 150 海里/小时。

下面介绍该风速表的详细结构和工作原理, 并提供所获得的大量风洞试验数据, 包括随风速和风向变化的典型的数据。总的工作精度为 ± 1.5 海里/小时, 或风速的 4%, 满足实际应用的要求。

二、工作原理

Rosemount 正交风速表无运动部件, 它所检测的是与风速分量有关的压力。传感器是圆柱形的, 垂直安装, 图 1 是 874 BN 型正交风速表的外形图。图 2 是系统的示意图。压力感应孔位于仪器的圆柱段, 通常位于 A-A 剖面处。正常情况下, 传感器内部被分隔成四个小室。四个对称正交排列的小孔分别与每个小室相通, 这是基本传感器的一个必要条件。一组小孔位于东西方向, 另一组位于南北方向(参见图 2)。感应孔这样安装可



图 1 874 BN 型正交风速表外形图

使南北小室之间的压力差与动压(q)和 $\cos^2\theta$ 之积成正比, 这里 θ 是风的合成矢量 (V_R) 与正北之间的夹角。同理, 东西小室的压力差输出与动压和 $\sin^2\theta$ 之积成正比, 如方程

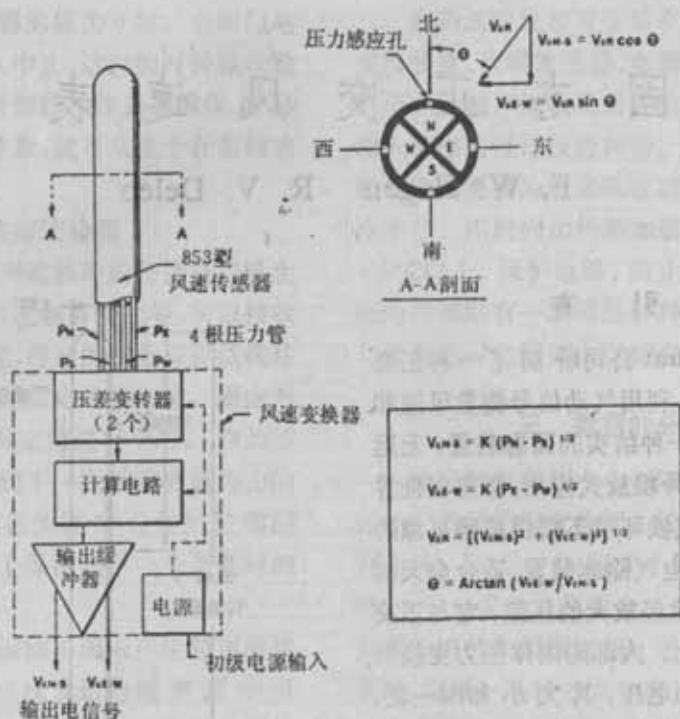


图 2 典型的正交风速表系统示意图

(1)和(2)所示。

$$(P_N - P_S) = Aq \cos^2 \theta \quad (1)$$

$$(P_E - P_W) = Aq \sin^2 \theta \quad (2)$$

式中 A 是放大系数, 大于 1.0, 通过简单相加得出方程(3)

$$\begin{aligned} (P_N - P_S) + (P_E - P_W) \\ = Aq (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = Aq \end{aligned} \quad (3)$$

动压定义为

$$q = \frac{1}{2} \rho V_w^2 \quad (4)$$

式中 V_w 为真合成风速, ρ 为空气密度。将 q 值代入方程(1), (2), (3), 并应用下面的(5), (6)两式

$$V_w \cos \theta = V_{N-S} \quad (5)$$

$$V_w \sin \theta = V_{E-W} \quad (6)$$

可推导出方程(1a), (2a) 和(3a), 从而得到 V_{N-S} , V_{E-W} 和 V_w

$$V_{N-S} = \left[\frac{2(P_N - P_S)}{A\rho} \right]^{1/2} \quad (1a)$$

$$V_{E-W} = \left[\frac{2(P_E - P_W)}{A\rho} \right]^{1/2} \quad (2a)$$

$$V_w = \left[\frac{2[(P_N - P_S) + (P_E - P_W)]}{A\rho} \right]^{1/2} \quad (3a)$$

利用标准海平面密度 ρ_{SL} 可将这些方程分别简化为(1b), (2b) 和(3b)。 V_{CN-S} 和 V_{CE-W} 是经校准的正交风速, V_{CR} 是合成校准风速。

$$V_{CN-S} = K(P_N - P_S)^{1/2} \quad (1b)$$

$$V_{CE-W} = K(P_E - P_W)^{1/2} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} V_{CR} &= K[(P_N - P_S) + (P_E - P_W)]^{1/2} \\ &= [(V_{CN-S})^2 + (V_{CE-W})^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (3b)$$

式中 K 是传感器的校准常数。

来自正交风速传感器的四个压力按照规定的路线直接送入风速变换器。由于已知校准常数 K , 故能获得线性电压输出, 它与根据方程(1b)和(2b)得到的正交方向上的校准风速成正比。合成校准风速由方程(3b)得到。风向通过下式求得:

$$\theta = \arctan(V_{CE-W} / V_{CN-S}) \quad (7)$$

校准风速和真风速的关系用密度比的平方根表示:

$$V_w = V_{CR} \left(\frac{\rho_{SL}}{\rho} \right)^{1/2} \quad (8)$$

在多数情况下, 校准风速可作为记录输出。事实上, 这正是我们所要求的, 因为它代表了

实际的动压和运动气团的合力。这个校准风速与作为所有飞机空速指示器标准的校准空速是相同的。

如果需要的话,我们可以很容易地做出密度订正来获取真风速。根据关系式

$$\frac{\rho_{SL}}{\rho} = \left(\frac{P_{SL}}{P} \right) \left(\frac{T}{T_{SL}} \right) \quad (9)$$

可以得出:

$$V_R = V_{CR} \left[\left(\frac{P_{SL}}{P} \right) \left(\frac{T}{T_{SL}} \right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

式中 P 是绝对大气压, T 是大气的绝对温度, 下标 SL 表示标准海平面。风向角 θ 可由校准风速方程(7)或真风速推导出来

$$\theta = \arctan(V_{E-W}/V_{N-S}) \quad (11)$$

三、传感器结构

四个压力感应孔位于传感器顶部加热段,与传感器里面四个小室联接(图2 A-A剖面的 N, S, E 和 W 表示四个小室)。四根压力管从传感器组件直接引到下面的变换器组件。

传感器采用电加热,能全天候工作。使用自动调节电阻加热器,在气温低于 32°F ; 风速为 40 海里/小时时,其最大功率约为 350 瓦。在空气静止、温度接近 70°F 时,功率减小到 200 瓦左右。

传感器加热段装有挡板,防止水进入压力管内部。电加热器使聚集在压力感应孔区的水沸腾蒸发掉。为了进一步防止水的吸入,在传感器下部的四个压力管内各增设一个排水小室。其上的排水塞子用以排放吸入小室的积水。由于传感器头部被遮挡,大大减少了水的注入量,只有在极其恶劣的天气下才需要用排水装置。通常水在传感器头部被加热器加热直接蒸发。

四、典型特性数据

Rosemount 正交风速传感器是通过大量风洞试验进行研制的。NOAA 在弗吉尼亚的斯特林测试和评估处用 NWS 设备研制实

验室的 4 英尺 $\times$ 4 英尺风洞进行了试验;美国运输部使用麻省理工学院莱特兄弟风洞实验室中的 7.5 英尺 $\times$ 10 英尺可变密度风洞进行试验;Rosemount 公司则在 Rosemount 跨音速风洞装置的直径 30 英寸的低速试验段进行了试验。还通过风杯风速表在风中对比较,以及在地面车辆前部和皮托静压管对比,对正交风速表的性能进行了检验。传感器也在几架直升飞机上做过飞行试验。

Rosemount 公司对 874 BN 型风速表进行风洞试验,试验风速 (V_{CR}) 从 2.5 到 50 海里/小时。图 3,4,5 分别给出 V_{CR} 等于 5.5, 20.4 和 50.6 海里/小时的有代表性的试验数据。图中,风速表测得的两个正交风速 V_{EN-S} 和 V_{EW-W} , 在 0 到 360° 的全部风向变化范围内,每隔 10° 用一个数据点表示。风洞中的实际正交分量 V_{CN-S} 和 V_{CW-W} 则用两条正弦-余弦形状的曲线表示。结果表明测得的正交风速分量与实际的风分量一致性很好。

利用方程(3b)把两个正交分量合成,可以获得合成风速 (V_{CR}) 的测量结果。把每 10° 的数据点资料和代表实际合成风速 V_{CR} 的实线进行比较。在三种试验风速 ($V_{CR} = 5.5, 20.4, 50.6$ 海里/小时)情况下,实际风速和测量值一致性很好。每张图的中间给出了测量的合成风速与实际风速的偏差。

测量风向是利用方程 7, 从两个正交风分量获得的。风向的测量值与实际值之差在图 3,4,5 的下部表示出来。风向在整个 $0-360^\circ$ 旋转范围内一致性非常好。

根据图 3,4,5 给出的风洞试验数据以及在 V_{CR} 等于 2.5, 10, 30 和 40 海里/小时时另外得到的类似数据,对完整的 874 BN 系统进行了误差分析。图 6 给出了最大风速误差,在 7 种试验风速中各取 36 个试验点 (θ 从 $0-360^\circ$, 每隔 10° 取一个点)。图中给出了试验数据的标准偏差的 1, 2, 3 倍值(即 $1\sigma, 2\sigma, 3\sigma$), 其中, 3σ 的值代表了每种风速的全部 36 个数据点。图 6 所给出的各点,其偏差值

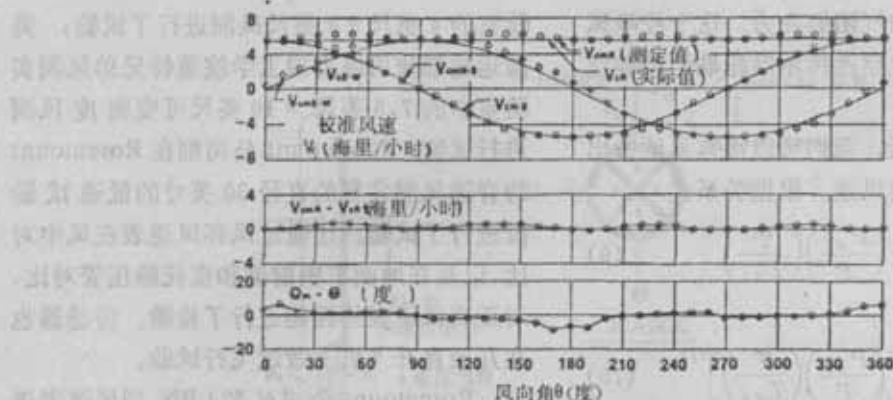


图 3 Rosemount 874 BN 型正交风速表风速和角度输出, $V_{cs}=5.5$ 海里/小时

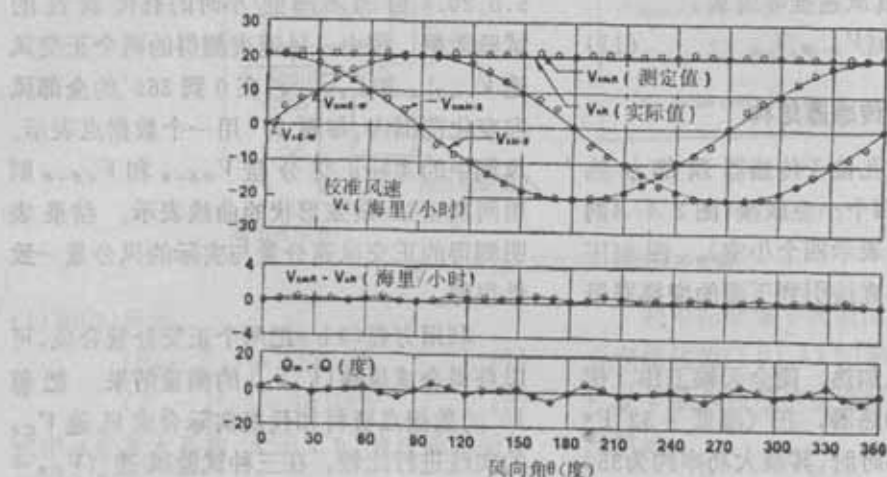


图 4 Rosemount 874 BN 型正交风速表风速和角度输出, $V_{cs}=20.4$ 海里/小时

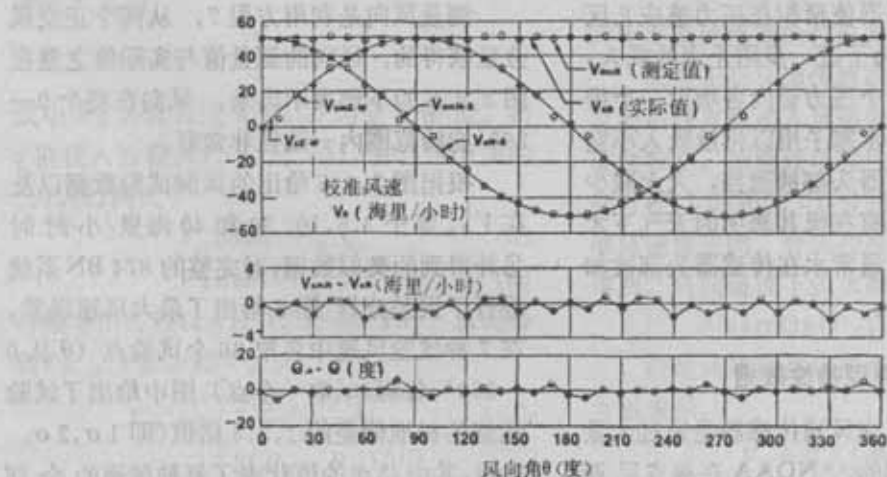


图 5 Rosemount 874 BN 型正交风速表风速和角度输出, $V_{cs}=50.6$ 海里/小时

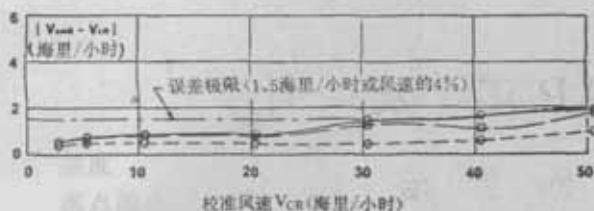


图 6 Rosemount 874 BN 型正交风速表最大风速误差(Rosemount 风洞数据)。

- 3 倍标准偏差 3σ (全部 36 点),
- 2 倍标准偏差 2σ (36 点中的 35 个),
- ◇ 1 倍标准偏差 1σ (36 点中的 25 个)

(即便是比较大的) 都在 1—5 海里/小时或风速的 4% 这一误差限度内。这些点包括了所有误差来源, 如风洞的不稳定性和仪器读出时产生的任何误差。图中多数试验点的 $1\sigma, 2\sigma$ 值都比 1.5 海里/小时或风速的 4% 这一误差范围小得多。对于 30 海里/小时以下的试验风速, 1σ 值在 0.5 海里/小时以内; 对于 50.6 海里/小时的试验风速, 1σ 小于 ± 1 海里/小时。

图 7 表示测算出的气流方向的最大误差, 它给出了 7 种试验风速下每种 $1\sigma, 2\sigma$ 和 3σ 的点。当 V_{cn} 大于 10 海里/小时, 所有数据点误差都在 $\pm 6^\circ$ 以内, 图中把 6° 作为实际气流方向的误差上限。 V_{cn} 小于 10 海里/小时, 最大误差增大: V_{cn} 为 5.5 海里/小时, 增大到 8° ; V_{cn} 为 2.5 海里/小时, 增大到 20° 。这是

符合实际情况的, 因为当风速接近零时, 风向变得不确定。值得注意的是测算的气流角的 1σ 值在 2.5 海里/小时只有 10° , 在 5.5—50.6 海里/小时的全部试验条件下都小于 $\pm 2^\circ$ 。

五、874 BN 型正交风速表的技术条件

874 BN 型正交风速表可以在世界上任何地方可能出现的最恶劣的环境条件下提供

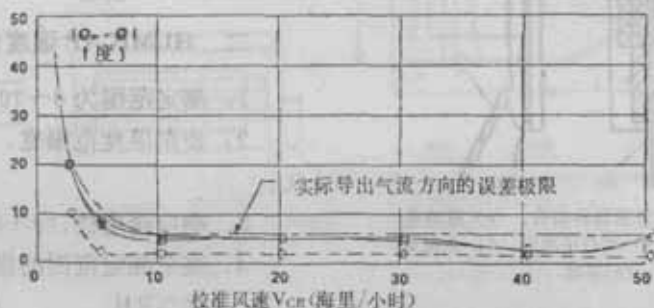


图 7 Rosemount 874 BN 型正交风速表导出气流方向最大误差(Rosemount 风洞数据)。

- 3 倍标准偏差 3σ ,
- 2 倍标准偏差 2σ ,
- ◇ 1 倍标准偏差 1σ

准确可靠的风速资料。该风速表有电子除冰装置, 无运动部件。874 BN 是一个结实的固态装置, 能在野外恶劣条件下工作。工作电源电压为交流 120 V 或 240 V, 能输出 0— ± 10 V 直流模拟输出信号, 不论南北还是东

西方向都与风速成线性关系。有四个量程: 50, 75, 100 和 150 海里/小时。

许继武摘译自 «5th. Sym. Meteo. Obs. and Ins.» 章育仲校