第3卷 第4期 应用气象学报 Vol. 3, No. 4
1992年11月 QUARTERLY JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY November 1992

测风雷达坐标测定误差与测风误差的关系及其应用

尹恩发
(空军气象研究所,北京,100085)

提 要

对雷达测风的风向、风速误差传递函数的准确式和近似式进行了比较分析,指出了近似式的适用范围和修正方法。应用这两个近似式对不同精度雷达进行的计算表明,701雷达在一个相当大的范围内达不到 WMO 的测定风向、风速精度的要求;若将雷达精度提高到0.12°、20m,则可基本满足要求;对更高要求的用户,使用0.06°、10m 精度的一次雷达是合适的。

1. 风向、风速误差传递函数准确式

(1)风向量函数

设 T_1 时刻(从放球瞬间算起)测得的探空仪位置为 P_1,其方位、仰角和斜距为 α_1、δ_1、r_1;T_2 时刻位置为 P_2,相应坐标为 α_2、δ_2、r_2。在如图 1 的左旋直角坐标系中,平均风向量函数为:

$$\vec{V}=\frac{\overrightarrow{OC_2}-\overrightarrow{OC_1}}{T}=\frac{1}{T}\{[r_2\cos\delta_2\cos\alpha_2-r_1\cos\delta_1\cos\alpha_1]\vec{i}+[r_2\cos\delta_2\sin\alpha_2-r_1\cos\delta_1\sin\alpha_1]\vec{j}\} \tag{1}$$

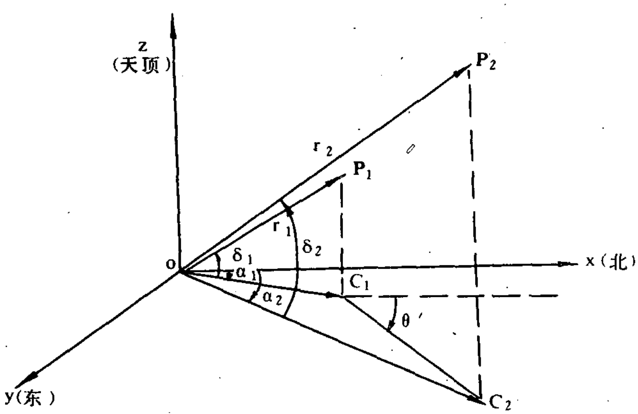

图 1 风向量图

1991年2月26日收到,10月5日收到修改稿。

其中,$T=T_2-T_1$。

若雷达测定方位、仰角、斜距的标准差分别为 σ_a、σ_δ 和 σ_r,它们对风向量引起的误差包括风速误差 σ_v 和风向误差 σ_d。

(2)风速误差传递函数准确式

由标准误差传递理论[1],并注意到 $\sigma_{a_1}=\sigma_{a_2}=\sigma_a,\sigma_{\delta_1}=\sigma_{\delta_2}=\sigma_\delta,\sigma_{r_1}=\sigma_{r_2}=\sigma_r$,得

$$\sigma_v^2=\frac{2}{T^2}\left[\frac{(H_1\mathrm{ctg}\delta_1)^2+(H_2\mathrm{ctg}\delta_2)^2}{2}\sigma_a^2+\frac{H_1^2+H_2^2}{2}\sigma_\delta^2+\frac{\cos^2\delta_1+\cos^2\delta_2}{2}\sigma_r^2\right] \tag{2}$$

式中 H_1,H_2 是气球高度。

由于标准差传递公式中只忽略了高阶无穷小量,故称为风速误差传递函数的准确式。

(3)风向误差传递函数的准确式

由风向量函数式(1),并令 $x=\mathrm{tg}\theta'$,有

$$x=\mathrm{tg}\theta'=\frac{r_2\cos\delta_2\sin\alpha_2-r_1\sin\alpha_1\cos\delta_1}{r_2\cos\delta_2\cos\alpha_2-r_1\cos\delta_1\cos\alpha_1}$$

则风向函数是 $\theta=\theta'+180°=180°+\mathrm{arctg}x$

根据误差传递理论[1],并注意到 $\sigma_{a_1}=\sigma_{a_2}=\sigma_a,\sigma_{\delta_1}=\sigma_{\delta_2}=\sigma_\delta,\sigma_{r_1}=\sigma_{r_2}=\sigma_r$,得风向误差传递函数准确式如下:

$$\sigma_d^2=\frac{1}{(TV)^4}\{[(D_1^4+D_2^4)+2D_1^2D_2^2\cos^2(\alpha_2-\alpha_1)-2D_1D_2(D_1^2+D_2^2)\cos(\alpha_2-\alpha_1)]\sigma_a{}^2+\sin^2(\alpha_2-\alpha_1)\cdot[D_2^2H_1^2+D_1^2H_2^2]\sigma_\delta^2+\sin^2(\alpha_2-\alpha_1)\cdot[D_2^2\cos^2\delta_1+D_1^2\cos^2\delta_2]\sigma_r^2\} \tag{3}$$

其中 D_1,D_2 为水平距离。$D_1=H_1\mathrm{ctg}\delta_1$、$D_2=H_2\mathrm{ctg}\delta_2$.

2. 风向、风速误差传递函数近似式

(1)风速误差传递函数近似式

令:前后两次测定的平均高度为 $H=(H_1+H_2)/2$;

平均高度 H 以下整个高度内的平均气球升速为 $\overline{W}=H/\frac{T_1+T_2}{2}$;

平均高度以下的平均风速大小为,$\overline{V}=(r_1\cos\delta_1+r_2\cos\delta_2)/(T_1+T_2)$;$Q=\overline{V}/\overline{W}$;

平均仰角为 δ,$\cos\delta=(\cos\delta_1+\cos\delta_2)/2$

由式(2)可得近似式

$$\sigma_{va}^2=\frac{2}{T^2}\left[H^2Q^2\sigma_a^2+H^2\sigma_\delta^2+\frac{Q^2}{1+Q^2}\sigma_r^2\right] \tag{4}$$

这就是 WMO 推荐的雷达测定风速的近似误差公式[2,3]。

(2)风向标准差传递函数近似式

采用与风速近似式同样的近似条件,可得风向误差近似式如下:

$$\sigma_{da}^2=\frac{2H^2Q^2}{(TV)^4}\{H^2Q^2[1-\cos(\alpha_2-\alpha_1)]^2\sigma_a^2+H^2\sin^2(\alpha_2-\alpha_1)\sigma_\delta^2+\frac{Q^2}{1+Q^2}\sin^2(\alpha_2-\alpha_1)\sigma_r^2\} \tag{5}$$

3. 风速标准差近似式的适用范围

按照下述方法可以确定近似式对准确式的相对偏差达到一定界限(如 10%)时,气球坐标的取值范围。

分别将近似式(σ_{va}^2)各项除以准确式(σ_v^2)相应项,求极值,可得第一(二、三)项之比在 $D_1/D_2 \to 1$,($H_1/H_2 \to 1$,$\cos\delta_1/\cos\delta_2 \to 1$)时,有极大值为 1。整个近似式除以整个准确式,求极值,结果相同。计算(略)结果如下表:

表 1 近似值与准确值的相对偏差

相对偏差 $\frac{\sigma_{va}-\sigma_v}{\sigma_v}$		0	−10%	−17%	−30%	−40%	−50%
D_1/D_2、H_1/H_2、$\cos\delta_1/\cos\delta_2$	上限	1	2	2.7	4.8	9.9	∞
	下限	1	0.5	0.4	0.2	0.1	0

由表可见:

①整个近似式与准确式之比,有最大值 1,即用近似式算出的误差偏小。其极限值是 −50%,这种情况只有在仰角 90°读数时才会出现。

②大误差的准确估计,可以由探测记录计算 D_1/D_2、H_1/H_2、$\cos\delta_1/\cos\delta_2$,查表得到相对偏差值,再叠加到近似式的计算值上得到。

③当水平距离、高度、仰角余弦的相对改变不大时,近似式的相对偏差可以忽略。这是除正过顶和第一个读数层以外的全部实际情况。

④若规定相对偏差允许值是 −10%,则 D_1/D_2、H_1/H_2、$\cos\delta_1/\cos\delta_2$ 的上下限分别为 2 及 0.5,由此可在实测记录中区别出近似式的适用范围。

下面举一个实例(1989 年 1 月 15 日遵化 705 雷达)来说明近似式的适用范围,如表 2。

表 2 实例

时间(min)	δ(°)	α(°)	r(m)	d(°)	V(m/s)	D(m)	D_1/D_2	H_1/H_2	$\cos\delta_1/\cos\delta_2$
0	0.0	90.0	30			30			
1	65.0	17.5	540	197	4	228	0.13	0	2.4
2	77.0	340.0	900	75	2	196	1.16	0.56	1.94
3	86.0	8.0	1260	320	1	84	2.3	0.69	3.29
4	72.6	76.5	1700	266	8	514	0.16	0.78	0.22

可见,第一个读数层(0—1 分钟)和与第 3 分种读数($\delta>85°$)有关的 D_1/D_2、$\cos\delta_1/\cos\delta_2$、$H_1/H_2$ 偏离 1 较远(>2,<0.5),近似式偏差超过 −10%,若不修正已不能使用。

经过大量实例分析,可以认为,中空以上过顶,一般都不需要考虑近似式不适用的问题,只有低空($H<1500$m)正过顶($\delta>85°$)才需要考虑近似式的偏差问题。如果避免在 $\delta>85°$范围内读数,处理记录时,适当拉长或缩短两次读数的时间间隔,这个问题也可得到解决。这样,就完全可以用近似式来估计风速误差了。

4. 风向标准误差近似式的适用范围

将近似式的 σ_α 项分成三项,分别除以准确式的相应三项,求极值,得在 $D_1/D_2 \to 1$ 时有

极大值 1，情况与风速近似式相似。将近似式的 σ_δ、σ_r 项除以准确式的相应项，求二元函数的极值[4]，得到不满足极值存在的必要条件，没有极值。

与风速近似式比较，风向近似式对准确式的偏差要小。因为风速近似式各项的偏差，在 D_1/D_2、H_1/H_2、$\cos\delta_1/\cos\delta_2$ 偏离 1 时，是一致偏小的，而风向则不一定，有时可能是相抵消的。

因此，风向近似式的适用坐标范围（如允许偏差为－10%），完全可以采用风速的坐标范围。实际探测资料的分析也证明，只是在靠近雷达天线处放球的第一个读数层和低空（$H<1500$m）正过顶（$\delta>85°$）时，才需要考虑风向近似式的偏差问题。

5. 风向风速传递近似式的应用

现装测风雷达和正在研制的测风雷达的精度可归纳为三类，一是以 701 雷达为代表，$\sigma_\alpha=\sigma_\delta=0.15°$，$\sigma_r=80$m；二是以 705（改进型）雷达为代表，$\sigma_\alpha=\sigma_\delta=0.12°$，$\sigma_r=20$m；三是以 5cm/3cm 一次雷达为代表，$\sigma_\alpha=\sigma_\delta=0.06°$，$\sigma_r=10$m。

若以 H 为自变量，以 V、$Q=\dfrac{\overline{V}}{\overline{W}}$、$\alpha_2-\alpha_1$ 及 $T=T_2-T_1$ 为参变量，使用上述三类雷达的精度数据，用风速标准差近似式（4）和风向标准差近似式（5），可算出其风向、风速误差表（略）。

需要说明，参变量 T 均是按我国现行的读数规则确定的，即放球后 20 分钟内，取间隔 $T=1$ 分钟；20—40 分钟时，$T=2$ 分钟；>40 分钟，$T=4$ 分钟。

WMO 要求的高空风精度是：风速误差在风速<10m/s 时，为±1m/s，在风速>10m/s 时，为±10%；风向误差在风速<25m/s 时，为±10°，在风速>25m/s 时，为±5°。

将计算得的风向、风速误差（标准差）与 WMO 的要求对比，可得以下结论：

（1）701 雷达

风速误差，在以下 4 个坐标段内达不到要求：

①$H<900$m，$Q\leqslant 2$（$\overline{V}\leqslant 12$m/s）；

②$H=900$—5000m 之间，$Q\leqslant 3$（$\overline{V}\leqslant 18$m/s）；

③$H=11000$—15000m 之间，$1.7\leqslant Q\leqslant 2$（10m/s$\leqslant\overline{V}\leqslant$12m/s）；

④$H=30000$m，$Q=1.7$（$\overline{V}=10$m/s）。

风向误差，在 $H\leqslant 2000$m，$135°>|\alpha_2-\alpha_1|>45°$，及过顶期间一般都不满足 WMO 的要求。

（2）705（改进型）雷达

风向风速误差都满足 WMO 的要求，在极个别情况下接近临界值。如大风情况下，$\alpha_2-\alpha_1\approx 90°$时，风向误差可达 4.83°，很接近允许界限的 5°。

（3）5cm/3cm 新测风雷达

完全满足，且超过 WMO 的要求。这就提供了加密观测以获取更详细资料的可能性。如在 0—5 分钟内，可加密到 10 秒一次，5—40 分钟，可加密到 30 秒一次，>40 分全中可加密到 1 分钟 1 次。

由此可见，在采用国内现行读数间隔 T 的情况下，应该使用测角标准差 $\sigma_\alpha=\sigma_\delta\leqslant$

0.12°,测距标准差 $\sigma_r \leqslant 20m$ 的测风雷达,701 雷达应该有计划地逐步退出日常业务工作;为探测更精细、更准确的高空风资料,应该研制和使用 3cm 或 5cm 一次测风雷达,这正是 70 至 80 年代以来,国外大量研制和使用 3cm/5cm 一次雷达的重要原因。

参 考 文 献

[1] 袁希光编著,《传感器技术手册》,973—977,国防工业出版社,1989 年。

[2] 屠一元编著,《大气探测 Ⅱ》,46—53,空军气象学院出版,1986 年。

[3] WMO-NO. 8,《GUIDE TO METEOROLOGICAL INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION》,p12—13, Fifth edition, Secretariat of the WMO-Geneva-Switzerland, 1983.

[4] 《简明数学手册》编写组编,《简明数学手册》,p3—142,上海教育出版社出版,浙江人民出版社 1972 年 10 月第 1 次重印。

THE RELATIONSHIPS BETWEEN UPPER WIND ERRORS AND BALLOON COORDINATE ERRORS SOUNDED BY RADAR AND THEIR UTILIZATION

Yin Yufa

(*Air Force Meteorological Research Institute, Beijing*, 100085)

Abstract

The comparison between the accurate and the approximate expressions of transfer functions of the wind speed and direction errors with balloon coordinate errors sounded by radar is conducted. The suitable range of approximate expression and its correction method are given. The results show that the 701 type radar can not meet in a certain scope the requirement given by WMO about the accuracy of upper wind vector. If the accuracy of angle-measurement is risen to 0.12°, and the accuracy of distance-measurement to 20m, the WMO's requirement can be basically reached. It is appropriate to use the 5cm or 3cm radar with angle accuracy 0.06° and distance accuracy 10m for some users.