航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Jan. 15 2018 Vol. 29 No.01 32-36

基于探空气球系统的高空高速飞行器空速校准方法研究

张甲奇*，刘朝君，多瑞楠
中国飞行试验研究院，陕西 西安 710089

摘　要：针对高空高速飞行器的空速系统校准，提出了一种基于高空气象探测气球系统的空速校准方法。通过探空气球系统获取飞行空域的大气数据，以此为基础完成对飞行器的空速系统校准。飞行试验结果表明，采用探空气球系统对高空高速飞行器进行空速系统校准，方法可行、结果可信。

关键字：高空高速；飞行器；空速校准；探空气球；GPS 系统

中图分类号：V279　　**文献标识码：**A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.01.032

近年来，随着航空技术的迅猛发展，军用领域对飞行器的飞行高度、速度提出了更高的要求。美国、俄罗斯等航空航天大国对高空高速飞行器开展了大量研究，并已开展了相关的飞行试验。此类飞行器多为无人驾驶，飞行高度通常在平流层，飞行速度达到马赫数 *Ma*3 以上，具有航速快、航程远、机动性强、生存力高等特点，在未来军事领域具有重大战略意义[1]。

飞行器基本飞行参数（如速度、高度、迎角、姿态角等）的准确性直接影响飞行安全与飞行性能。然而，任何空速系统都会存在误差，必须通过飞行试验予以修正。高空高速飞行器飞行高度大、飞行速度快，外界大气压力低、激波作用强，对飞行器空速测量影响较大，尤其飞行速度，必须进行修正[2]。

目前，飞行试验中多采用 GPS 速度法完成飞行器的空速系统校准，GPS 速度法需要在飞行中采用正反航向、三边法等消除风速影响。高空高速飞行器高空飞行转弯半径极大，不适合采用 GPS 速度法校准空速系统。为此，本文借助气象领域的高空探测气球系统，获得飞行器飞行空域大气的真实静压、静温、风速、风向等参数，以此为基础完成对飞行器空速系统的校准。此方法只需飞行器在试验高度保持稳定平飞、无须进行正反航向飞行，能够降低飞行成本、缩短试飞周期，对无法进行正反航向飞行的飞行器也能够完成空速系统校准。

1 GPS 高空探测气球系统

高空高速飞行器大多在平流层飞行。平流层一般指由对流层以上到 50km 左右的空间，在此高度范围气流运动相当平稳，尘埃很少，大气的透明度很高，是高空高速飞行器的理想飞行环境[3]。

GPS 高空探测气球系统是测量、研究高空平流层大气的重要工具，主要由高空气球、探空仪和地面接收站组成，如图 1 所示。该系统通常以 5~6m/s 速度上升，高度可达 30km 以上。探空仪通过引线搭载于高空气球，内含先进的 GPS 模块[4] 及各类大气传感器，可探测三维位置坐标以及大气压力、温度、风速、风向、湿度、露点温度等气象数据。测量精度高、灵活性好、释放不受气候因素影响，在大气研究和天气预报中起到重要作用。

收稿日期：2017-05-09；　退修日期：2017-06-12；　录用日期：2017-12-12
* 通信作者 . Tel.：029-86837938　E-mail：785784835@qq.com
引用格式：Zhang Jiaqi, Liu Chaojun, Duo Ruinan. Research of sounding balloon-based high-altitude high-speed vehicles airspeed calibration method [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (01): 32-36. 张甲奇，刘朝君，多瑞楠 . 基于探空气球系统的高空高速飞行器空速校准方法研究 [J]. 航空科学技术，2018, 29 (01): 32-36.

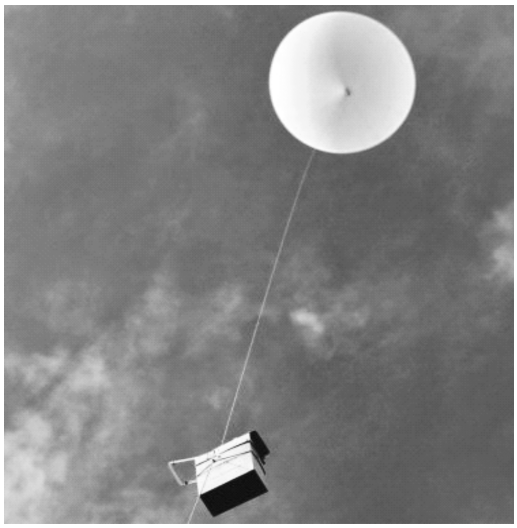

图 1　高空气象探测气球系统
Fig. 1　High-altitude weather sounding balloon system

2 校准方法

(1) 校准原理

在基于探空气球系统的空速校准中，以 GPS 高度为关联量，将探空仪采集的大气参数转换到飞行器所在高度的大气参数，以此完成对飞行器空速系统的校准。空速校准原理如图 2 所示，其中 V_w 为风速，φ_w 为风向，p 为大气真实静压，T 为大气真实静温。

图 2　基于探空气球系统的空速校准方法
Fig. 2　Airspeed calibration method using sounding balloon system

(2) 数据处理方法

基于探空气球系统的空速校准数据处理可采用速度法和压力法进行。速度法是利用探空仪获得的风速、风向和静温，并结合飞行器地速 V_g、总压 p_t（认为无失真）测量结果完成空速系统校准，校准方法如图 3 所示。压力法是利用探空仪测得的大气静压值，并结合飞行器测得的总压完成空速系统校准，校准方法如图 4 所示。数据处理的两种方法使用的主要公式为式 (1) ~ 式 (7)。

$$V_t = V_g + V_w \tag{1}$$

$$\alpha = \sqrt{kRT} \tag{2}$$

$$Ma = \frac{V_t}{c} \tag{3}$$

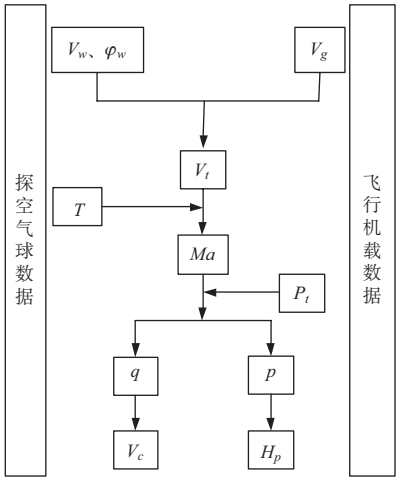

图 3　数据处理 – 速度法（图修改）
Fig. 3　Data processing–speed method

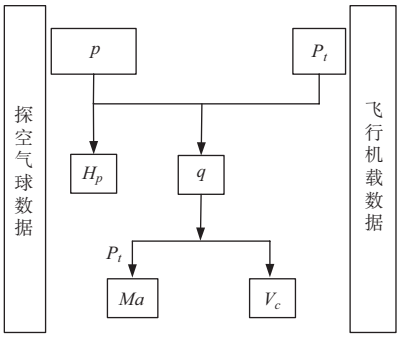

图 4　数据处理 – 压力法
Fig. 4　Data processing–pressure method

$$q = p_t - p \tag{4}$$

$$\frac{q}{p} = f(Ma) \tag{5}$$

$$q = f(V_c) \tag{6}$$

$$p = f(H_p) \tag{7}$$

式中：$\vec{V}_t$ 为飞行器真空速；$\vec{V}_g$ 飞行器地速；$\vec{V}_w$ 为当地风速；c 为当地声速；R 为气体常数；k 为绝热指数；Ma 为马赫数；q 为来流动压；V_c 为飞行器空速；H_p 为气压高度。

从图 3 和图 4 可以看出，速度法原理相对复杂，求解过程环节较多。压力法求解过程简单，环节少。速度法求解不需要探空仪测量的压力值，在外界大气压力较小（H_p>30km）、静压测量精度不够的情况下，宜采用速度法。压力法求解只需要探空仪测量的大气压力值，在风速、风向变化较大时，压力法具有较好的稳定性。

(3) 误差分析

$$\Delta C = C_{探空仪当地当时} - C'_{飞行器当地当时} \tag{8}$$

式中：C 为大气采集参数。基于探空气球系统的空速校准

方法主要误差来源是由于探空仪与飞行器所在位置和测量时刻不同，导致大气参数之间差异对空速系统校准带来的误差。通常，高空大气稳定，局部空域、短期内大气参数变化量很小，不同位置和时刻测量的大气参数差异很小，对空速校准结果的影响较小。

3 数据分析

(1) 大气测量参数

对于某次空速校准试飞科目，分别于飞行前和飞行后两次释放探空气球，完成飞行空域的大气参数测量，两次测量时间间隔为 3h。通过数据处理、分析两次测量结果，得出飞行空域的大气参数，以进行飞行器空速系统的校准。

式 (9) ~ 式 (12) 定义了两次测量结果的相对变化量关系。其中，0 代表第一次释放探空气球采集得到的大气参数值，3 代表间隔 3h 后第二次得到的大气参数值。图 5~ 图 8 为间隔 3h 试验空域大气静压、温度、风速和风向相对变化量。

$$\sigma_{p_s} = \frac{p_{s3} - p_{s0}}{p_{s0}} \tag{9}$$

$$\sigma_{T_s} = \frac{T_{s3} - T_{s0}}{T_{s0}} \tag{10}$$

$$\sigma_{\psi_w} = \frac{\psi_{w3} - \psi_{w0}}{\psi_{w0}} \tag{11}$$

$$\sigma_{V_w} = \frac{V_{w3} - V_{w0}}{V_{w0}} \tag{12}$$

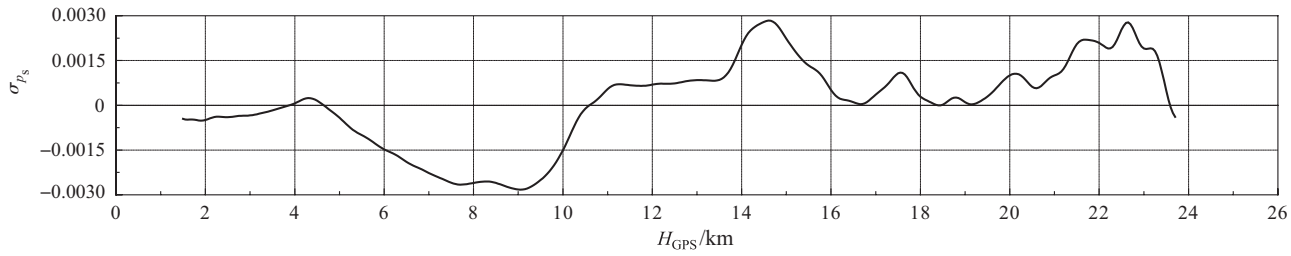

图 5 大气压力值的变化量（间隔 3h）

Fig. 5 Atmospheric pressure changing (3h apart)

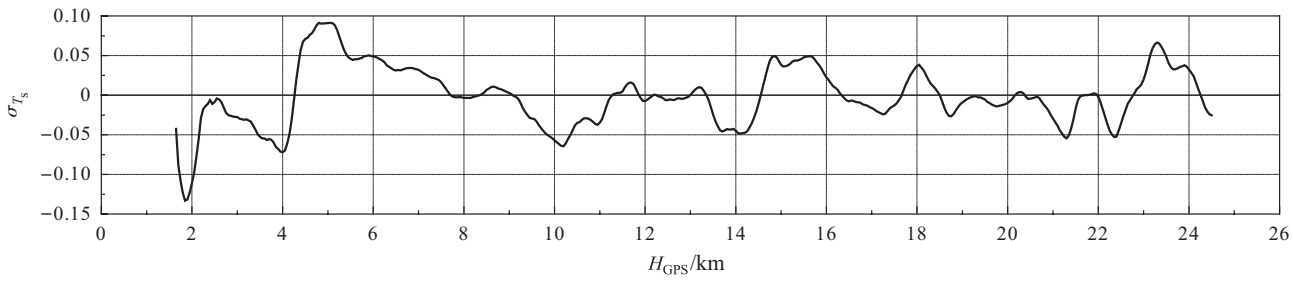

图 6 大气温度值的变化量（间隔 3h）

Fig. 6 Atmospheric temperature changing (3h apart)

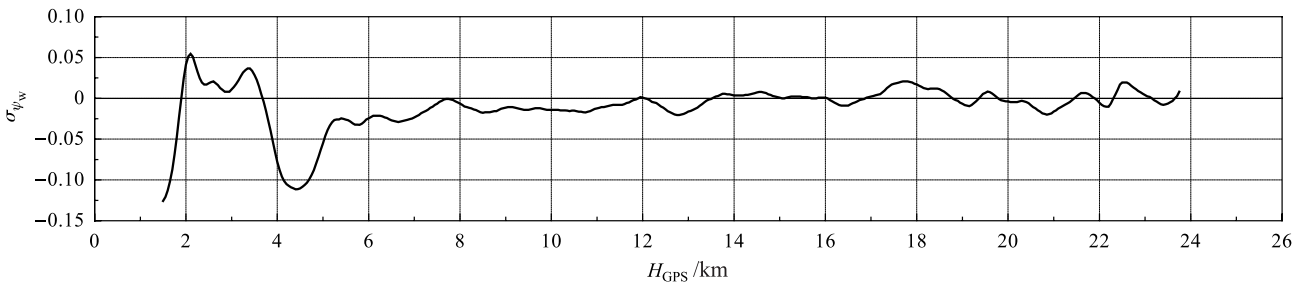

图 7 大气风速值的变化量（间隔 3h）

Fig. 7 Wind direction changing (3h apart)

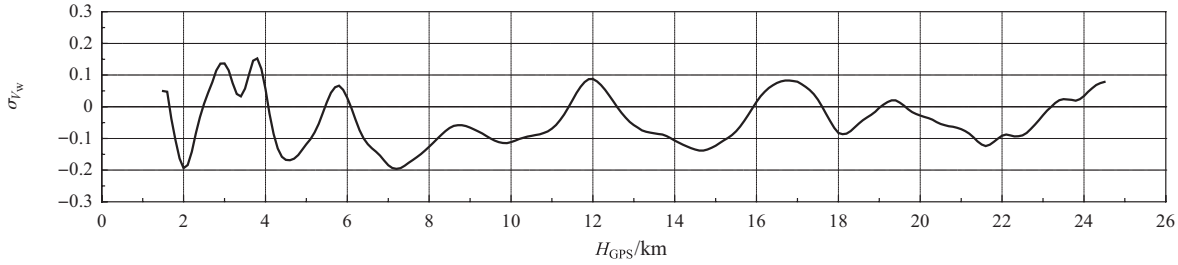

图 8　大气风速值的变化量（间隔 3h）
Fig. 8　Wind speed changing（3h apart）

从图 5~ 图 8 可以看出，相对低空，高空（H_p>11km）大气参数整体相对稳定，变化量较小。其中，大气压力的相对变化量最小，不大于 0.3%；风速的相对变化量最大，也不大于 8%。

通过对飞行空域的大气参数测量结果分析可以看出，高空大气运动相当平缓，短期内大气压力值、温度、风速、风向随时间的变化量相对较小，在空速校准中可认为大气参数保持不变。

（2）空速校准结果

通过两次飞行试验完成飞行器空速系统校准，式（13）~ 式（15）定义了校准结果与机载结果的相对量关系，表 1 为飞行器空速校准结果。

$$\sigma_{Ma} = \frac{Ma - Ma_{\mathrm{i}}}{Ma_{\mathrm{i}}} \tag{13}$$

$$\sigma_{H_p} = \frac{H_p - H_{P_{\mathrm{i}}}}{H_{P_{\mathrm{i}}}} \tag{14}$$

$$\sigma_V = \frac{V - V_{\mathrm{i}}}{V_{\mathrm{i}}} \tag{15}$$

式中：下标 i 为机载值，Ma，H_p，V 为马赫数、气压高度、表速的校准值。

表 1　两种方法得到的校准结果
Table 1　The result of two calibration method

数据处理方法	校准量	架次 1	架次 2
压力法	σ_{Ma}	11.50%	13.59%
	σ_{H_p}	4.84%	5.62%
	σ_V	0.89%	1.28%
速度法	σ_{Ma}	11.70%	14.45%
	σ_{H_p}	4.96%	6.02%
	σ_V	0.91%	1.37%

由表 1 可以看出，对飞行器巡航状态的空速校准，两次试验（不同日期）得到的校准结果相当，满足试验精度要求，这说明采用探空气球系统开展高空高度飞行器空速校准方法可行。此外，对于同一飞行架次，压力法和速度法得到的校准结果差异很小，这也表明两种数据处理方法均可得到有效结果。

4 结束语

目前，常规空速校准方法难以有效地完成高空高速飞行器空速系统校准。结合高空大气特点，本文提出了借助于高空探测气球系统完成飞行器空速系统的校准，并通过飞行试验证明方法可行、结果可信，能够用于高空高速飞行器空速系统校准。

参考文献

[1] 孙鹏，杨建军 . 临近空间装备发展现状及应用研究 [J]. 飞航导弹，2010（11）：38–39.
Sun Peng，Yang Jianjun. The developing situation and application research of near-space equipment[J]. Winged Missiles Journal，2010（11）：38–39.（in Chinese）

[2] 郗超，成婷婷 . 基于 GPS 侧风影响下的空速校准方法研究 [J]. 航空科学技术，2015，26（5）：53–56.
Xi Chao，Cheng Tingting. Research of a GPS-based airspeed calibration method under crosswind[J]. Aeronautical Science & Technology，2015，26（5）：53–56.（in Chinese）

[3] 黄炯，肖迪娥 . 中高层气象气球的应用研究 [C]// 第 31 届气象学会年会，2014.
Huang Jiong，Xiao Dier. The application research of weather balloon for middle and upper atmosphere[C]// The 31st Meteorological Society Annual Meeting，2014.（in Chinese）

[4] 孙钟德，戴月，卢莹，等 . GPS 探空气球运行轨迹可视化研究

[C]// 第 31 届气象学会年会，2014.
Sun Zhongde, Dai Yue, Lu Ying, et al. The study of trajectory visualization of GPS sounding balloon[C]// The 31st Meteorological Society Annual Meeting, 2014. (in Chinese)

（责任编辑　朱赫）

作者简介

张甲奇（1989— ）男，硕士，工程师。主要研究方向：无人机性能试飞。

Tel：029-86837938

E-mail：785784835@qq.com

Research of Sounding Balloon-based High-altitude High-speed Vehicles Airspeed Calibration Method

Zhang Jiaqi*, Liu Chaojun, Duo Ruinan

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: Aiming at the airspeed calibration for high-altitude high-speed vehicles, a new method was adopted based on high-altitude to calibrate the airspeed system. Using the weather balloon probed air data of high-altitude to calibrate the airspeed system of high-altitude high-speed vehicles was discussed in the paper. Fight test results show that the method was reliable and effective.

Key Words: high-altitude high-speed; vehicles; airspeed calibration; sounding balloon; GPS system

Received: 2017-05-09; **Revised:** 2017-06-12; **Accepted:** 2017-12-12

***Corresponding author. Tel. :** 029-86837938 **E-mail:** 785784835@qq.com