航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
May. 25 2019 Vol. 30 No.05 46-50

气压高度误差对适航标准的符合性方法研究

秋路*，赵翔，屈飞舟
中国飞行试验研究院，陕西 西安 710089

摘　要：运输类飞机适航标准规定了气压高度误差的可接受范围，按照条款要求，表明符合性时需要将试验高度处的气压高度误差向海平面进行换算。相比ERJ、ARJ在适航审定试飞时采用的等静压误差处理方法，本文从是否考虑压缩性的角度出发，建立了适用性更高的气压高度误差转换方法，并通过某型飞机试飞结果分析进行了验证与说明。

关键词：静压系统；气压高度误差；适航标准；符合性方法

中图分类号：V217+.1　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.05.009

气压高度是表征飞行状态的一项关键参数，取决于飞机周围未受扰动的大气静压值。飞机上未经校准的静压测量系统存在延迟误差、位置误差等，其测量值与真实值存在差异，导致气压高度与指示空速均存在误差，一般通过空速系统校准试飞获取。运输类飞机适航标准CCAR 25中规定了气压高度误差的可接受范围，要求将试验高度处的气压高度误差进一步换算为海平面处的误差[1]，须研究高度变化对气压高度误差或静压测量误差的影响。ERJ飞机在表明气压高度误差对适航标准的符合性时，假设静压测量误差不随高度变化[2]，ARJ飞机借鉴了这种思路。然而，考虑空气压缩性时，该假设并非完全适用。本文在解读相关标准后，从静压测量误差的基本原理出发，建立了适用性更强的气压高度误差换算方法，并通过相关算例进行了分析与说明。

1 适航标准要求

CCAR 25对静压系统误差的定量要求体现为对空速指示系统误差及气压高度误差的规定，具体如下：

1.1 CCAR 25.1323 空速指示系统

在下列状态的整个速度范围内，空速的安装误差（不包括空速指示仪表校准误差）不得超过3%或5kn，两者中取大值：(1) V_{MO}~$1.23V_{SR1}$，襟翼在收上位置；(2) $1.23V_{SRO}$~V_{FE}，襟翼在着陆位置。

说明：该条款规定了指示空速误差，该误差源于静压误差、总压误差，后者可通过总压管合理设计进行控制，故空速系统校准试飞通常忽略总压误差，因此该条款隐含了对静压测量误差及气压高度误差的要求。

1.2 CCAR 25.1325 静压系统

每个静压系统的设计和安装必须使在海平面标准大气下所指示的气压高度的误差（不包括仪表校准误差），在$1.23V_{SRO}$(襟翼展态)至$1.7V_{SR1}$(襟翼收态)速度范围内对应的飞机形态下，每100kn不超过±10m，速度小于100kn时，气压高度误差允许为±10m。

说明：在表明符合性时，将试验高度处的气压高度误差向海平面换算，或将海平面气压高度误差标准向试验高度处转换。

2 试飞方法

如果空速指示系统和高度表使用同一静压孔，并且只要计及了整个迎角范围内总压的任何误差，可使用空速误差及高度表误差之间的理论关系，由空速校准导出高度表校准[3]。

收稿日期：2019-01-31；退修日期：2019-02-15；录用日期：2019-03-11
*通信作者. Tel.：029-86830577　　E-mail：lucia_qiu@163.com
引用格式：Qiu Lu, Zhao Xiang, Qu Feizhou. Research on the compliance method of barometric altitude error to airworthiness standards[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(05): 46-50. 秋路，赵翔，屈飞舟. 气压高度误差对适航标准的符合性方法研究[J]. 航空科学技术，2019，30(05)：46-50.

现代飞机普遍装有大气数据系统，空速与气压高度一般使用同一静压源，总压管的设计保证了其在正常迎角范围内的测量误差可忽略，因此静压系统气压高度误差可直接通过空速系统校准获取，计算方法如式(1)所示：

$$\begin{cases} V_C = V_I + \Delta V \\ q_{ci} = 101325\left(\left(1 + 0.133265 \times 10^{-6} V_I^2\right)^{3.5} - 1\right) \\ q_{cT} = 101325\left(\left(1 + 0.133265 \times 10^{-6} V_C^2\right)^{3.5} - 1\right) \\ \Delta p_s = -\Delta q_c = q_{ci} - q_{cT} \\ p_{si} = 101325 \times \left(1 - \dfrac{H_{pi}}{44330.8}\right)^{5.25588} \\ p_{sT} = p_{si} + \Delta p_s \\ H_{pT} = 44330.8 \times \left(1 - \left(\dfrac{p_{sT}}{101325}\right)^{\frac{1}{5.25588}}\right) \\ \Delta H_p = H_{pT} - H_{pi} \end{cases} \tag{1}$$

式中：下标i为测量值，下标T为真实值。

空速系统校准的本质是获取真实静压，常用的校准方法有拖锥法、总静压支杆法、标准机伴飞法、飞越塔法、雷达法、GPS法等[4]，均为常规方法，具体细节不再赘述。

3 试飞数据处理方法

按照CCAR 25.1325的要求，表明气压高度误差对适航标准的符合性时，试飞数据处理包含两部分，分别为获取试验高度处的气压高度误差、气压高度误差转换。

在空速系统校准中，获取气压高度误差的数据处理方法如图1所示。

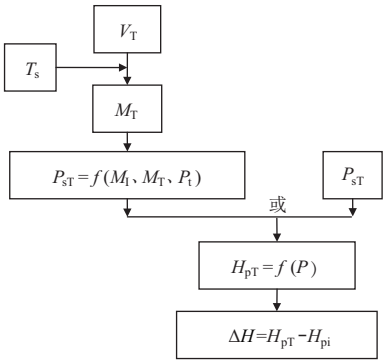

图1 试验高度处气压高度误差的计算方法

Fig.1 Method of calculating pressure altitude error at test point

气压高度误差换算的关键为分析静压测量误差随高度的变化。从流动特性的角度分析，静压测量值与真实值之间的误差取决于马赫数、迎角、侧滑角、雷诺数及普朗特数。当忽略热交换、侧滑角很小、静压孔不位于大的附面层内(雷诺数的影响可忽略)、迎角在使用范围内与升力系数成线性关系时，静压系统的位置误差可表示为[5,6]：

$$\frac{\Delta p_s}{q_{ci}} = f(Ma_i, \alpha) = f(Ma_i, C_L) = f\left(Ma_i, \frac{n_z W}{\delta}\right) \tag{2}$$

式中：Δp_s为静压测量误差，q_{ci}为动压测量值，n_z为风轴系法向过载，W为飞机质量，压力比$\delta = p_{si}/p_0$，p_0为海平面标准大气压力。

从空气可压缩与否的角度考虑，按照速度范围进行分类，可以简化式(2)。

(1) 忽略压缩性影响

飞行速度较低时，压缩性影响可忽略，式(2)可近似为：

$$\frac{\Delta p_s}{q_{ci}} = f(\alpha) = f(C_L) = f\left(\frac{n_z W}{V_I^2}\right) \tag{3}$$

飞机稳定平飞时，n_z=1，位置误差仅与W/V_I^2有关，给定V_I、W，Δp_s为常数，与高度无关，在气压高度换算时，进行相同V_I处的等Δp_s处理即可。

(2) 考虑压缩性影响

飞行速度较高时，压缩性影响不可忽略，但此时空速变化引起的升力系数变化相对较小，若忽略升力系数的影响，则式(2)近似为[6]：

$$\Delta p_s / q_{ci} = f(Ma_i) \tag{4}$$

分析可知，给定Ma_i，以$\Delta p_s/q_{ci}$表示的静压测量误差为常数，在气压高度换算时，进行相同Ma_i处的等$\Delta p_s/q_{ci}$处理即可。

基于上述原理，进行以下两种转换：

(1) 试验高度处的气压高度误差向海平面的换算

(a) 忽略压缩性影响

$$\begin{cases} \Delta H_{pt} = H_{pT} - H_{pt} \\ \Delta p_{st} = p_{sT} - p_{st} \\ \Delta p_{s0} = \Delta p_{st} \\ \Delta H_{p0} = 44330.8 \times \left(1 - \left(\dfrac{101325 - \Delta p_{s0}}{101325}\right)^{\frac{1}{5.25588}}\right) \end{cases} \tag{5}$$

(b) 考虑压缩性影响

$$\begin{cases} \Delta H_{pt} = H_{pT} - H_{pt} \\ \Delta p_{st} = p_{sT} - p_{st} \\ q_{c0} = \left(101325 - \Delta p_{s0}\right) \times \left(\left(1 + 0.2Ma_t^2\right)^{3.5} - 1\right) \\ \Delta p_{s0} = q_{c0} \times \Delta p_{st} / q_{ct} \\ V_{I0} = 2.7393 \times 10^3 \sqrt{\left(\left(\dfrac{q_{c0}}{101325} + 1\right)^{\frac{1}{3.5}} - 1\right)} \\ \Delta H_{p0} = 44330.8 \times \left(1 - \left(\dfrac{101325 - \Delta p_{s0}}{101325}\right)^{\frac{1}{5.25588}}\right) \end{cases} \tag{6}$$

(2) 海平面气压高度误差标准向试验高度处的转换

(a) 忽略压缩性影响[2]

$$\begin{cases} \Delta H_{p0} = 10 \times V_I / 185.2 \\ \Delta p_{st} = \Delta p_{s0} = 101325 \times \left(1 - \left(1 - \dfrac{\Delta H_{p0}}{44330.8}\right)^{5.25588}\right) \\ p_{st} = 101325 \times \left(1 - \dfrac{H_{pt}}{44330.8}\right)^{5.25588} \\ \Delta H_{pt} = 44330.8 \times \left(1 - \left(\dfrac{p_{st} + \Delta p_{st}}{101325}\right)^{\frac{1}{5.25588}}\right) - H_{pt} \end{cases} \tag{7}$$

(b) 考虑压缩性影响

转换公式见式(8)：

$$\begin{cases} \Delta H_{p0} = 10 \times V_{I0} / 185.2 \\ \Delta p_{s0} = 101325 \times \left(1 - \left(1 - \dfrac{\Delta H_{p0}}{44330.8}\right)^{5.25588}\right) \\ q_{c0} = 101325\left(\left(1 + 0.133265 \times 10^{-6} V_{I0}^2\right)^{3.5} - 1\right) \\ Ma_0 = 2.2361 \times \sqrt{\left(1 + \dfrac{q_{c0}}{101325 - \Delta p_{s0}}\right)^{\frac{1}{3.5}} - 1} \\ p_{st} = 101325 \times \left(1 - \dfrac{H_{pt}}{44330.8}\right)^{5.25588} \\ q_{ct} = p_{st} \times \left(\left(1 + 0.2Ma_0^2\right)^{3.5} - 1\right) \\ V_{It} = 2.7393 \times 10^3 \sqrt{\left(\left(\dfrac{q_{ct}}{101325} + 1\right)^{\frac{1}{3.5}} - 1\right)} \\ \Delta p_{st} = q_{ct} \times \Delta p_{s0} / q_{c0} \\ \Delta H_{pt} = 44330.8 \times \left(1 - \left(\dfrac{p_{st} + \Delta p_{st}}{101325}\right)^{\frac{1}{5.25588}}\right) - H_{pt} \end{cases} \tag{8}$$

式(5)～式(8)中，下标t为试验高度，下标0为海平面高度。

分别根据式(1)、式(7)、式(8)对CCAR 25.1323、25.1325进行转换，得到不同气压高度、不同空速条件下的气压高度误差要求，如图2～图4所示，气压高度5000m处的结果对比如图5所示。分析可得出以下结论：

(1) 保持指示空速不变，25.1323、25.1325可接受的气压高度误差随气压高度的增加而增加，前者为非线性变化，后者为线性变化。

(2) 保持气压高度不变，25.1323、25.1325可接受的气压高度误差随指示空速的增加而增加，前者为非线性变化，后者为线性变化。

(3) 相比25.1323，25.1325可接受的气压高度误差较小，要求更严格。

(4) 按照25.1325的要求，将海平面标准向试验高度转换时，考虑压缩性时，在指示空速较大时，可接受的气压高度误差更小；表征考虑压缩性与不考虑压缩性要求的两条线并未相交，意味着可压缩与不可压缩分界处的气压高度误差要求并不连续，导致这一现象的原因为理论分析时的简化假设引入了一定误差。

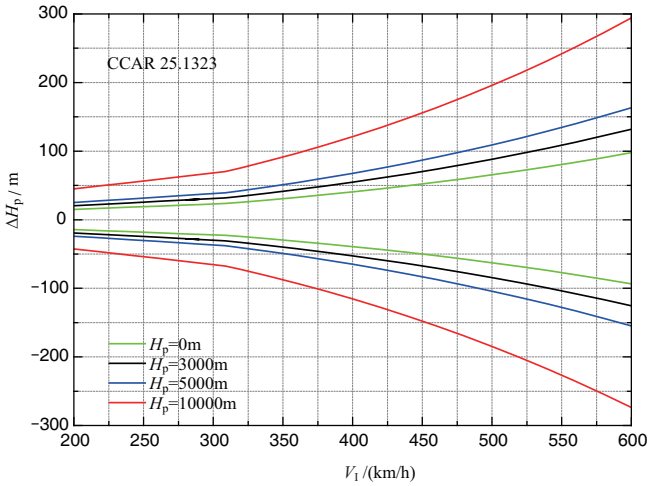

图2 CCAR 25.1323对气压高度误差的要求

Fig.2 Requirements for pressure altitude error in CCAR 25.1323

4 算例分析

某型飞机大气数据系统的气压高度与指示空速共用一组静压源，采用GPS正反航向法完成了空速系统校准试飞，并按照本文研究的方法进行了数据处理与分析，图5给出了气压高度5000m处巡航构型的气压高度误差试飞结果，分析可知：

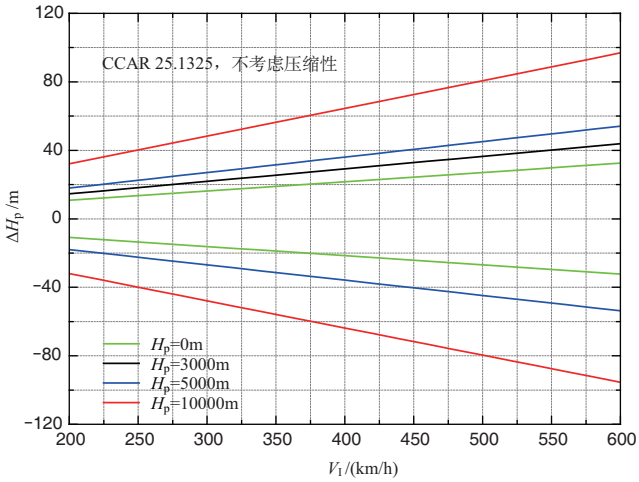

图3 CCAR 25.1325对气压高度误差的要求(不考虑压缩性)

Fig.3 Requirements for pressure altitude error in CCAR 25.1325 (without compressibility)

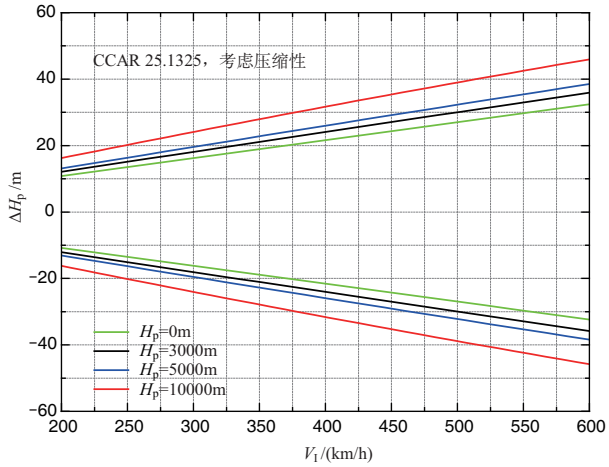

图4 CCAR 25.1325对气压高度误差的要求(考虑压缩性)

Fig.4 Requirements for pressure altitude error in CCAR 25.1325 (with compressibility)

(1) 该状态下的气压高度误差完全满足CCAR 25.1323的要求；

(2)不考虑压缩性影响时，完全满足CCAR 25.1325的要求，但在高速段考虑压缩性影响时，部分试验点(V_I=580km/h、600km/h)的结果不满足要求。

上述分析表明，进行气压高度误差在海平面与试验高度处的转换时，考虑压缩性与否会影响试验结果对CCAR 25.1325的符合性评价。然而，对于具体的试验结果，还需进一步分析试验方法本身的误差和不确定性，条件允许时还可采取拖锥法、飞越塔法等进行对比验证。

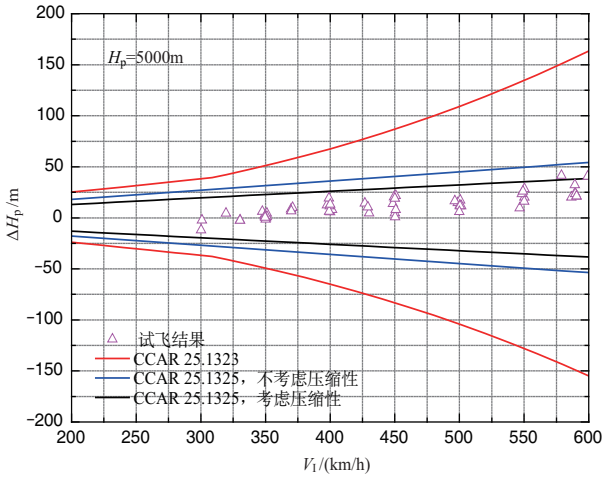

图5 气压高度5000m处三种要求的对比

Fig.5 Comparisons of the three requirements at a pressure altitude of 5000m

5 结论

本文重点研究了气压高度误差随气压高度的变化规律及其在试验高度与海平面之间的转换方法，适用于静压测量系统未经校准的运输类飞机气压高度误差试飞，研究表明，在进行转换时是否考虑压缩性会影响高速试验点的评判，可压缩与不可压缩分界处的气压高度误差要求有待进一步研究。

本文将适航标准向不同气压高度处的转换使试验结果的评估更直观、更便捷，对CCAR 25.1323、25.1325的对比分析有助于试飞工程师理解标准中隐含的静压误差要求，相关成果对运输类飞机气压高度误差试飞有一定的借鉴指导意义。

参考文献

[1] CCAR 25-R4 运输类飞机适航标准[S]. 中国民用航空局，2011.

CCAR 25-R4 airworthiness standards: transport category[S]. Civil Aviation Administration of China, 2011.(in Chinese)

[2] EMBRAER. Pitot static calibration [R]. ERJ190-100 Report No.190FTR015.

[3] 修忠信，由立岩. 运输类飞机合格审定飞行试验指南[M]. 上海：上海交通大学出版社，2013.

Xiu Zhongxin, You Liyan. Flight test guide for certification of transport categorly airplanes[M]. Shanghai：Shanghai Jiaotong

University Press, 2013. (in Chinese)

[4] Edward A. Haering Jr. Airdata measurement and calibration [R]. NASA Technical Memorandum104316, 1995.

[5] AC-21-13 在RVSM空域实施300米(1000英尺)垂直间隔标准运行的航空器适航标准[S]. 中国民用航空局, 2007. AC-21-13 Airworthiness Approved Aircraft Actualizing Perpendicularity Space in RVSM Airspace[S]. Civil Aviation Administration of China, 2007. (in Chinese)

[6] Anderson J D. Fundamentals of aerodynamics [M]. McGraw-Hill Education, 2010.

(责任编辑 王为)

作者简介

秋路(1991—) 女,硕士,工程师。主要研究方向:飞行性能试飞。

Tel:029-86830577

E-mail:lucia_qiu@163.com

Research on the Compliance Method of Barometric Altitude Error to Airworthiness Standards

Qiu Lu*, Zhao Xiang, Qu Feizhou

Chinese Flight Test Establishment, Xi' an 710089, China

Abstract: The airworthiness standard for transport aircraft specifies the acceptable range of barometric altitude error. According to the terms and conditions, it is necessary to convert barometric altitude error at the test height to sea level when demonstrating its compliance to CCAR. Compared with the ERJ and ARJ's isostatic pressure error processing method used in airworthiness certification test flight, this paper establishes a more applicable barometric altitude error conversion method from the perspective of considering the compressibility, and the test flight results of a certain aircraft are analyzed and verified.

Key Words: static system; barometric altitude error; CCAR; compliance method

Received: 2019-01-31; **Revised:** 2019-02-15; **Accepted:** 2019-03-11

***Corresponding author. Tel. :** 029-86830577 **E-mail:** lucia_qiu@163.com