

民机首飞空速校准问题研究

张大伟*

(中国商飞试飞中心,上海 201323)

摘要: 民机首飞空速校准问题直接影响首飞安全,得到了相关从业者的普遍重视,然而系统性的研究多局限于各公司内部。通过对首飞空速校准的意义进行总结,对拖锥法、伴飞法和 GPS 四边法等常见的首飞空速校准的方法进行系统性介绍,并基于实际工作经验给出了针对空速校准,在首飞准备、首飞任务设计、首飞安全保障以及首飞机组训练等方面的建议。此外,针对国内民机首飞的实际特点,提出了一种改进的 GPS 空速校准方法,给出了改进的 GPS 空速校准法的具体试飞方法、数据处理方法,对该方法的误差来源进行了分析,并将该方法与其他传统方法进行了对比。结果表明,该方法不需要专门的试飞动作和测试改装,可以节省宝贵的首飞时间,同时大大降低实施的难度,可供其它民机型号首飞工作参考。

关键词: 首飞;空速校准;试飞方法;民用飞机

中图分类号: V217

文献标识码: A

OSID:



0 引言

空速和高度是飞行员操纵飞机最为主要的参考数据,这两个参数是否准确会直接影响飞机的飞行安全。空速系统故障直接或间接导致的空难不胜枚举,例如 2009 年的法航 A330 空难^[1]、1996 年 2 月伯根航空的波音 757 空难^[2]等。

首飞是一个飞机型号的第一次升空飞行,飞机的空速系统尚未得到最终的飞行校准(通常情况下所说的空速校准是指空速校准和高度校准的统称),其可靠性和准确性对首飞安全至关重要,受到国内外各大主机厂商的普遍重视。例如波音 787 飞机、空客 A350 飞机和庞巴迪 C 系列飞机首飞时飞机都加装了拖锥系统,同时使用了伴飞飞机。众所周知,加装拖锥和伴飞都可以对飞机空速系统的精度和可靠性进行初步的检查和验证。

国产 ARJ21-700 新支线飞机在首飞时未加装拖锥或其他基准空速系统,也未使用伴飞飞机;C919 大型客机和 AG600 蛟龙飞机在首飞时均未加装拖锥系统,但均使用了伴飞飞机。本文结合我国民机研制特点,对首飞时空速校准的意义进行探讨,对首

飞时空速校准方法的选择进行研究,提出了一种可用于首飞的改进的 GPS 校准方法,并结合实际工作经验给出了首飞准备和首飞机组训练方面的建议,供后续民机型号首飞工作参考。

1 首飞空速校准的意义

国外主流民机制造商在型号首次飞行时往往都加装了拖锥系统,因此,加装拖锥与首飞安全很自然地就被联系在了一起。实际上,这是一个理解误区。国外主流民机制造商基本上都进入了相对成熟的民机研制阶段,型号首次飞行时测试改装和飞机构型都考虑了首飞之后一个阶段的试飞任务,已经具备了连续开展空速校准、包线扩展等试飞科目的条件,拖锥的加装更多的是为了后续的空速校准和包线扩展等试飞科目。在开展技术交流时,多位资深专家认为,应在首飞准备时重点考虑首飞后前十几个架次的试飞内容及确保试飞的连续性等内容。

相对准确的空速和高度对首飞安全至关重要,但首飞对空速和高度精度的要求并不高。经过精心的准备和训练,10 节的空速精度就可以基本满足首飞安全的需要。很多措施可以用来降低首飞对空速

* 通信作者。E-mail: zhangdawei@comac.cc

引用格式: 张大伟. 民机首飞空速校准问题研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2022(2):111-114. ZHANG D W. Study on airspeed calibration of civil aircraft first flight[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2022(2):111-114 (in Chinese).

和高度精度的要求,比如,采用比理论抬轮速度大 10 节的速度抬轮起飞、采用比理论着陆速度大的 15 节左右的速度着陆、将飞行速度限制到襟缝翼标牌速度 10 节或者 V_{M0}/M_{M0} 10 节以下等等。另外,首次飞行往往对天气提出了较高的要求,对侧风、紊流、能见度、云底高等关键要素都提出了超出正常运行的要求,这些因素也都降低了首飞对空速系统精度的要求。

2 首飞空速校准常规方法

2.1 拖锥法

拖锥法是波音、空客和庞巴迪等成熟公司普遍采用的通行做法。一方面,拖锥是现代民机空速校准试飞的标配,首飞前加装的拖锥系统在首飞后可以用来继续开展空速校准试飞;另一方面,使用拖锥校准空速,不需要安排专门的试飞动作,只需要在飞机稳定平飞时比较机载空速系统和拖锥系统的差值即可,方便高效。

首飞时,一方面可以在驾驶舱加装综合显示器显示通过拖锥静压计算出来的空速和高度数据(经验表明,在正常的飞行工况下,总压的误差可以忽略不计,因此计算空速时可以使用原始的机载总压数据或者加装的高精度总压数据)作为空速和高度的基准;另一方面,机组在了解飞空速误差之后,可以通过调整飞机实际进场速度来进一步保障首次着陆的安全性。

2.2 伴飞法

伴飞主要有三方面的作用:第一,可以在伴飞飞机上对首飞飞机进行拍摄,用于宣传记录;第二,必要时,伴飞飞机抵近观察首飞飞机,通过外观确认首飞飞机是否存在故障,例如确认起落架是否放到位、油箱通气口是否漏油,是否有异常变形或裂纹等;第三,通过目视保持相同高度和相同速度飞行,根据两架飞机上高度表和速度表的读数,确认空速系统的误差和精度。通过伴飞确认飞机的空速系统误差,需要两架飞机近距离目视保持相同的高度和速度,并且需要伴飞机通过无线电将自己的高度和速度告知首飞飞机,因此有一定的时间代价。此外,伴飞飞机的空速系统也存在一定的残差,影响该方法的精度。

2.3 GPS 四边法

GPS 四边飞行的方法假定较小的空域和时间段

内,风场保持稳定(风速和风向保持不变),通过求解任意三边飞行数据,可以计算得到飞机真实的空速、风速和风向。对四条边的数据排列组合,可以求解得到四组风速和风向数据,对比四组风速风向数据,可以了解四边飞行期间风场是否稳定^[3]。在有些文献中,该方法也被称为三边法^[4-5],其实是同一种方法。唯一的区别是三边法无法了解风场的稳定性,无法对结果的可靠性进行判读。

该方法的优点是只需要 GPS 数据和基本的机载飞行参数就可以对飞机的空速系统进行初步的校准,改装的工作量相对较少。该方法的缺点是至少需要三个航向的稳定飞行,需要花费较多的飞行时间。需要说明的是,常见的差分 GPS 并不能有效提升 GPS 四边飞行方法的精度,详见 3.3 节误差分析。

3 改进的 GPS 校准法

国产 C919 大型客机首飞时采用巴航的 EMB145 飞机进行伴飞,正常飞行情况下两架飞机距离较远,汇合后水平间隔约 900 m,垂直间隔约 600 m^[6]。考虑到国内首飞组织的实际情况,这种以摄影摄像为主、兼顾安全监控的较远距离伴飞,在未来较长的时期内会是国内型号首飞的普遍做法。

针对这种较远距离的首飞伴飞,提出了一种针对性的空速校准方法——改进的 GPS 校准法。改进的 GPS 校准法仅需要两架飞机在较远的距离稳定平飞,不需要特殊的试飞改装,不需要像伴飞法一样抵近编队飞行,也不需要像 GPS 四边法一样完成较长时间的特殊飞行动作,具有实施难度低、效率高的优点。

3.1 试飞方法

首飞飞机和伴飞飞机保持恒定速度稳定平飞 30 s(两架飞机保持各自速度、各自高度,不需要等速、等高度)。为了提高校准精度,建议两架飞机的距离不超过 50 km;两架飞机高度差不超过 1 000 m。

3.2 数据处理方法

给定首飞飞机的 GPS 高度、空速、气压高度分别为: GPS_1 、 IAS_1 、 H_{p1} , 伴飞飞机的 GPS 高度、空速、气压高度、大气静温分别为 GPS_2 、 IAS_2 、 H_{p2} 、 T_a 。

两架飞机之间的物理高度差为:

$$\Delta H = GPS_1 - GPS_2 \quad (1)$$

将物理高度转换为气压高度为:

$$\Delta H_p = (GPS_1 - GPS_2) \times T_{std}/T_a^{[6]} \quad (2)$$

式中, T_{std} 为该高度的标准大气温度, 可以查表或计算得到。

考虑到伴飞飞机是取得了适航证和 RVSM 运行许可的成熟飞机, 其空速和高度误差相对较小, 可以作为基准高度。因此, C919 飞机的实际飞行气压高度为:

$$H_{p1r} = H_{p2} + (GPS_1 - GPS_2) \times T_{std}/T_a \quad (3)$$

因此, C919 飞机的高度误差为 H_{p1} 和 H_{p1r} 两者之差 $H_{p,ERROR}$:

$$\begin{aligned} H_{p,ERROR} &= H_{p1} - H_{p1r} \\ &= (H_{p1} - H_{p2}) \\ &\quad - (GPS_1 - GPS_2) \times T_{std}/T_a \quad (4) \end{aligned}$$

根据标准大气经验关系式^[7], 在 36 089 ft 以下:

$$P_a = P_{SSL} (1 - 6.875\,585\,6 \times 10^{-6} H_p)^{5.255\,863} \quad (5)$$

其中, P_{SSL} 代表标准海平面大气压, 可知:

$$\begin{aligned} \Delta P_a &= P_{SSL} (1 - 6.875\,585\,6 \times 10^{-6} H_p)^{5.255\,863} \\ &\quad - P_{SSL} (1 - 6.875\,585\,6 \times 10^{-6} H_{pr})^{5.255\,863} \quad (6) \end{aligned}$$

根据校准空速定义^[7], 存在下式:

$$V_c = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_{SSL}}{\rho_{SSL}} \left[\left(\frac{P_T - P_a}{P_{SSL}} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (7)$$

式中, ρ_{SSL} 代表标准海平面大气密度。

因此, C919 飞机的速度误差为:

$$V_{c,ERROR} = IAS_1 - V_c \quad (8)$$

3.3 误差分析

改进的 GPS 校准方法的误差来源有伴飞飞机的气压高度残差和 GPS 定位精度。

1) 伴飞飞机的气压高度残差。伴飞飞机完成了 RVSM 验证, 其气压高度误差相对较小, 根据 AC91-85 要求, 其高度残差不超过 200 ft^[8]。

2) GPS 定位精度。安装在已知位置的 GPS 接收机与其附近的目标 GPS 接收机(接收相同的 GPS 卫星信号)具有相同的主要误差(大气误差、星历误差和时钟误差)。差分 GPS 采用已知位置的 GPS 接收机计算误差修正量, 使用该修正量修正目标 GPS, 从而可以大大提高 GPS 系统的定位精度, 高度方向上的定位精度量级在 0.15 m 左右^[9]。本方法(改进的 GPS 校准法)中的两架飞机相当于差分 GPS 系统中的已知位置接收机和目标接收机, 两者具有相同的主要误差。由于 3.2 节数据处理中只使用了

GPS 高度差, 本方法的 GPS 误差为 0.15 m 左右。GPS 定位精度产生的误差远小于伴飞飞机的高度残差, 因此可忽略不计。

由此可得, 改进的 GPS 校准法具有和传统伴飞法一样的校准精度。

3.4 不同方法优缺点对比

综上所述, 改进的 GPS 校准方法具有和传统的伴飞法一致的精度。该方法不需要两架飞机保持等高度等速编队飞行, 大大降低了首飞空速校准的工作量和难度。另外, 改进的 GPS 校准方法只需要首飞飞机稳定平飞就可以完成空速系统的校准, 而 GPS 四边法需要 15 min 左右专门的试飞时间, 两者相比, 改进的 GPS 校准方法大大节省了宝贵的首飞时间。

4 首飞准备和机组训练

除了在首次飞行考虑进行空速校准之外, 在首飞准备、首飞任务设计、首飞安全保障以及首飞机组训练等都需要考虑空速校准问题, 相关经验介绍如下。

1) 首飞前加装基于 CFD 数据的 SSEC(静压源误差)曲线。静压源位置误差是空速系统最主要的误差, 首飞时加装基于风洞数据的 SSEC 曲线可以有效减小指示空速的位置误差, 提高空速和高度的准确性;

2) 驾驶舱加装综合显示器, 向机组提供未投票的空速和高度信息(主要针对 PFD 上显示投票空速和高度的飞机)。A320、C919 等飞机 PFD 上显示的空速和高度信息都是经过计算机投票后的数据, 机组无法通过左、右 PFD 以及备用仪表来了解三套空速系统的一致性。首飞时可以在驾驶舱加装综合显示器, 向机组提供未投票的空速和高度信息。机组在飞行过程中对比三套独立的空速和高度信息, 可以通过三套数据的一致性对空速系统的准确性进行初步的判断, 从而大大提升机组对空速和高度数据的信心。如果空速和高度指示确实存在较大的误差, 机组也可以尽早了解和处置;

3) 适当增加首飞时起飞抬轮速度和进场速度。适当增加首飞架次起飞抬轮和进场速度可以通过增大速度有效降低空速不准确带来的失速风险。然而过大的起飞抬轮速度可能会导致飞机在滑跑过程中有明显的自动抬头趋势, 因此, 建议采用 VR + 10 节抬轮起飞。过大的进场速度也可能导致飞机接地姿态较小, 因此, 建议采用 VREF + 15 节进场着陆;

4) 首飞时对飞行包线进行限制。最大飞行速度建议在襟缝翼放下时限制在 VFE - 10 节以下; 在光洁构型时限制在 VMO - 10 节以下;

5) 机组完成针对性的模拟器训练。精心设计的机组训练可以有效降低空速系统误差对机组操作的影响, 更好地保障首飞安全。建议的训练内容有: 增加起飞抬轮速度起飞、减小起飞抬轮速度起飞、误配平起飞、增大进近速度着陆、减小进近速度着陆、空速不可靠情况下着陆以及仅参考俯仰姿态和无线电高度着陆等;

6) 编制空速不可靠和空速误差过大相关的处置程序, 并完成模拟验证。

采用了上述措施之后, 空速和高度指示的精度对首飞安全的影响相对有限, 可以承受不超过正负 10 节的空速精度。

参考文献:

- [1] BEA. Final report on 1st Jun 2009 to the Airbus A330-203 registered F-GZCP operated by Air France flight AF 447 Rio de Janeiro-Paris, F-GZCP-1st-june 2009 [R], [S.l. : s. n.], 2012. 7: 197-201.
- [2] Database of aviation safety network [EB/OL]. (2021. 6. 6) [2021. 6. 7]. <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=19960206-0>.

- [3] GREGORY L. Using GPS to determine pitot-static errors: national test pilot school [EB/OL]. (2021. 5. 3) [2021. 6. 7]. <https://www.ntps.edu/information/downloads.html>.
- [4] 杨欢. GPS 法空速校准试飞数据处理与分析 [C]. 北京: 2017 年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(上册), 2017.
- [5] 成婷婷, 屈飞舟, 郗超. GPS 三边法在空速校准中的应用研究 [J], 工程与试验, 2018, 58(3): 82-84.
- [6] 何颖晗, 伴飞 C919 飞机全揭秘, 在 C919 首飞空域盘旋 20 多圈 [EB/OL]. (2017. 5. 7) [2021. 6. 7]. https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_1679509.
- [7] 屈方舟, 基于 DGPS 的非稳态条件下空速校准方法 [J], 全球定位系统 2017, 42(5): 60-63.
- [8] GERALD L G, LARRY B H, LEROY A K, et al. USNTPS-FTM-108 [M]. [S.l. : s. n.], 1992.
- [9] FAA. AC91-85, authorization of aircraft and operators for flight in reduced vertical separation minimum airspace [S]. USA: FAF, 2009. 8.
- [10] 梁远东, 马菲, 乐娅菲, 等. DGPS 在空速校准中的应用 [J]. 科技创新导报, 2012, 30: 1.

作者简介

张大伟 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 试飞工程。
E-mail: zhangdawei@comac.cc

Study on airspeed calibration of civil aircraft first flight

ZHANG Dawei *

(COMAC Flight Test Center, Shanghai 201323, China)

Abstract: Airspeed calibration is directly related to the safety of civil aircraft first flight. Papers on first flight airspeed calibration were rare. This paper summarizes the significance of first flight airspeed calibration, systematically introduces the common first flight airspeed calibration methods such as trailing cone method, Pace-chase method and 4-leg GPS method and gives some suggestions on first flight preparation, first flight mission design, first flight safety guarantee and first aircraft group training based on my practical work experience. In addition, according to the actual characteristics of the first flight of domestic civil aircraft, recommendation on airspeed calibration during first flight preparation, test plan, test safety and crew training was introduced. A new airspeed calibration test method focused on civil aircraft first flight was presented. The results show that this method does not need special flight test action and special test modification. It can save valuable first flight time and greatly reduce the difficulty of implementation. It can be used as a reference for the first flight of other civil aircraft models.

Keywords: first flight; airspeed calibration; test method; civil aircraft

* Corresponding author. E-mail: zhangdawei@comac.cc