

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.03.025

湾流 G650 飞机试飞事故研究

Research on Gulfstream G650 Flight Test Accident

王海刚 / WANG Haigang

(中国商飞民用飞机试飞中心, 上海 200232)

(Flight Test Center of COMAC, Shanghai 200232, China)

摘要:

依据湾流 G650 试飞事故调查报告,以试飞工程师的角度从管理、技术两方面对事故进行细节解读和分析。首先梳理关键事件的主要原因和逻辑关系,分析事故链演化过程,将事故原因归纳为管理和技术两类。针对湾流项目管理层面的问题,从流程管理、计划管理和风险管理三方面进行剖析。基于地效模型和测试数据,深层分析了失速告警迎角值设置过高的原因,从起飞速度试飞程序出发,揭示目标起飞安全速度过小的原因。最后总结事故经验,对试飞安全提出建议。

关键词:湾流 G650;试飞;事故链;地面效应;起飞安全速度

中图分类号:V328

文献标识码:A

OSID:



[**Abstract**] This paper analyzes in detail Gulfstream G650 flight test accident from the management and technical problems based on the investigation report by flight test engineers. Firstly, the key events and their logic connection about the accident were presented, and then the causes were separated by management and technical categories. For management issues, the test procedure, test plan, risk management were reviewed. The faulty stall warning Sangle of attack setting was analyzed based on ground effect model and test data. The low takeoff safety speed was illustrated by comparing the takeoff speed flight test procedures. At last, some suggestions on flight safety were presented.

[**Keywords**] Gulfstream G650; flight test; accident chain; ground effect; takeoff safety speed

0 引言

2011 年 4 月 2 日,美国新墨西哥州罗斯威尔湾流宇航公司 G650/N652GD 飞机起飞过程中失速坠毁造成两名试飞员和两名试飞工程师遇难。事故发生时在进行一发失效继续起飞试飞科目,飞机右机翼失速造成飞机滚转,进而导致右侧翼尖擦跑道,飞机从右侧偏出跑道。偏出跑道后,飞机撞到混凝土建筑和机场气象站,导致严重的结构损坏并起火,机身和客舱内部结构被烧毁,如图 1 所示。

美国国家运输安全委员会(National Transportation Safety Board,简称 NTSB)对这起事故进行了调查,并于 2012 年发布了事故调查报告^[1],给出了事故主要原因。事故发生后,湾流公司开展了相应的



图 1 G650 事故现场

分析仿真^[2],进一步确认了事故的原因,本文依据 NTSB 调查报告和湾流的分析结果,进行事故链分析,并针对事故原因中的重点管理问题、技术问题深入分析。

1 事故链分析

NTSB 在事故调查中发现,G650 飞机在离开地面时发生失速。在试飞准备时,湾流公司高估了地面效应作用下的失速迎角。飞机抖杆器触发(失速警告)以及主飞行显示器上相应的俯仰限制指示的阈值都设置过高,使得试飞机组在发生真正失速之前没有收到任何触觉、听觉或视觉警告。这起飞行事故发生前,事实上至少已经存在两方面比较显著的安全隐患。一方面,在事故发生前,G650 试飞中已经发生两次右外侧机翼失速事件。如果湾流公司能够在前两次事件发生后开展深入的空气动力学分析,就有可能发现地面效应下的失速迎角低于预期值的问题从而避免事故发生。另一方面,在事故发生前的性能试飞中,G650 飞机持续超过目标起飞安全速度(V_2)。湾流公司在性能试飞之前、期间都没有采用模拟器或者动力学分析方法验证 V_2 速度。为了实现飞机起飞性能的许诺,湾流公司并未确定 V_2 超标的根本原因,而是尝试通过更改飞机起飞抬前轮的试飞技术来减小 V_2 速度和起飞距离。

为能够在 2011 年第三季度获得美国联邦航空局(Federal Aviation Administration,简称 FAA)颁发的型号合格证,湾流公司 G650 试飞项目计划过于激进。进度的压力以及在技术监督和安全管理方面程序不健全,导致过于关注如何让项目推进,不愿挑战关键的假设,不愿重视在测试时出现的飞机异常响应。节点的压力导致一系列盲目决策和失误,安全管理人员没有对此前两次试飞中出现的非指令滚转事件进行调查,机组决定通过更改试飞员操作技术继续进行试飞,未仔细分析 V_2 超限原因。为了赶项目节点试飞工程师(flight test engineer,试飞工程师,简称 FTE,节点试飞工程师记为 FTE1,登机试飞工程师记为 FTE2)未能及时完成关键试飞数据的分析。

在风险管理方面湾流具有 FAA 所接受的试飞风险评估程序,但没有考虑继续起飞科目存在的失速相关潜在风险。湾流的相关安全保障工作存在欠缺,高风险试飞科目并没有通知机场、急救和消防人员,调查发现机上人员并非由于撞击致死,而是因起火未能及时成功逃离。

基于以上的分析及事故调查报告,可以梳理得

到湾流 G650 试飞事故链演化过程,如图 2 所示。

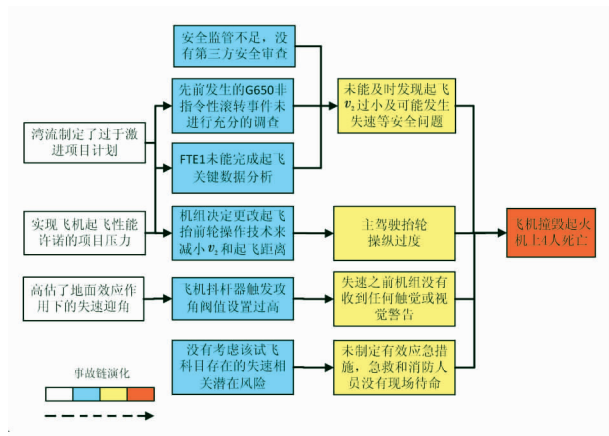


图 2 湾流 G650 试飞事故链演化分析

根据事故调查报告的结论以及事故链分析,可以整理出导致事故发生的 8 个主要的原因,如表 1 所示。为了有侧重地分析其中关键的因素,将事故原因分为管理类和技术类,文章将简要归纳湾流项目管理上存在的诸多问题,深度分析主要的两个技术问题即起飞安全速度过小和失速告警迎角设置过大。

表 1 事故主要原因及分类

序号	问题描述	类别
1	没有建立合适的试飞运行程序	管理
2	没有因为项目延期而调整试飞进度	管理
3	没能建立有效的试飞安全监管体系	管理
4	没有彻查之前发生的非指令性滚转事件	管理
5	持续试图靠改进飞行技术来达到错误过低的 V_2	技术
6	使用错误的估算方法确定起飞速度	技术
7	过高地估计地面效应下的失速迎角,抖杆器激活迎角设置过高	技术
8	高风险试飞风险评估和安全保障不到位	管理和 技术

2 项目管理问题分析

湾流 G650 项目管理存在诸多问题,总结起来包括技术规划与监管不力、计划管理过于激进、风险管理不到位三个方面。

第一个方面技术规划与监管问题,其主要表现在试飞人员职责分工不明。为了加快任务完成效率

湾流人为将试飞计划、任务执行和分析报告分开,而在 G650 试飞时各项职责又交叉在一起,为了赶项目节点试飞工程师(FTE1)未能及时完成最终的起飞关键数据分析。事故发生时现场人员分工不明确,事故架次时登机试飞工程师(FTE2)责任不明确,没有工程师负责监控关键参数。

计划管理方面,湾流制定了过于激进项目计划导致出现多次计划推迟。节点的压力导致一系列盲目决策和失误:1)决定通过更改试飞员操作技术继续进行试飞,未仔细分析 V_2 超限原因;2)直接更改起飞目标俯仰角忽略了此更改对起飞速度的影响;3)建立了俯仰角限制却没有把它写到试飞任务单;4)安全管理人员没有对此前两次试飞中出现的非指令滚转事件进行调查。

在风险管理方面湾流具有 FAA 所接受的试飞风险评估程序,但没有考虑继续起飞科目存在的失速相关潜在风险。此外湾流的安全保障工作存在欠缺,高风险试飞科目并没有通知机场、急救和消防人员。

3 技术问题分析

3.1 失速告警迎角设置过高

研究发现地效影响下升力线斜率增加,且地效影响随着高度增加非线性地迅速减弱,在贴近地面时最显著,高度大于翼展长后基本可忽略,以下依据仿真及测试记录数据^[2]分析地效的影响,地效模型如下:

$$C_{L,IGE} = k_h C_{L,OGE} = k_h \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right) (\alpha - \alpha_0) \quad (1)$$

$$k_h = f(h_{CFD})$$

式中: $C_{L,IGE}$ 为地效影响下的升力系数; k_h 为地效修正系数,是关于高度的非线性函数; $C_{L,OGE}$ 为无地效的升力系数; α 为攻角; α_0 为零升攻角,假定其不受地效影响。

在发生事故的试飞架次前湾流的试飞工程师根据 V_{MU} 试验结果将 $\Delta\alpha_{stall,IGE}$ 从 -2° 调整为 -1.6° 过程中引入假设 $C_{L_{max,IGE}} = C_{L_{max,OGE}}$ 。湾流试飞工程师估计方法存在两个错误,一是采用 V_{MU} 升力系数,而所有 V_{MU} 试飞数据点升力系数均小于最大升力系数;二是假设最大升力系数地效影响不变,如图 3 所示。以下对这两个问题造成的误差进行分析计算以确定正确的失速攻角修正量 $\Delta\alpha_{stall,IGE}$ 。

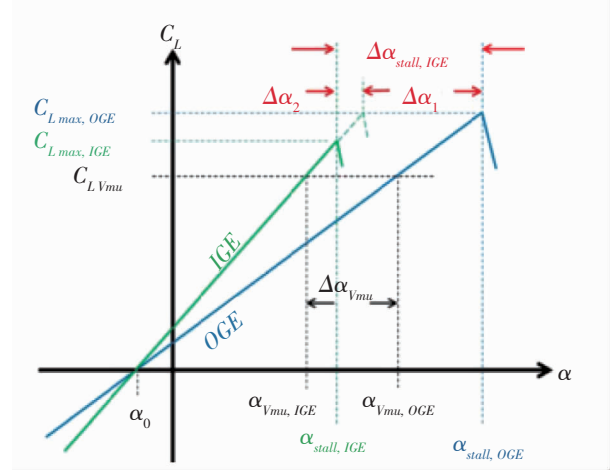


图 3 地效对失速攻角影响^[2]

首先假定最大升力系数相等,失速攻角修正量等于:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_1 &= (\alpha_{stall,IGE} - \alpha_{stall,OGE}) \\ &= (\alpha_{stall,OGE} - \alpha_0) \left(\frac{1}{k_h} - 1 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

根据 G650 起飞数据,当起落架接触地面时 k_h 约等于 1.18,对于襟翼 10° 构型, $\alpha_0 = -1.25^\circ$, $\alpha_{stall,OGE} = 14.7^\circ$ 以上数据代入式(2)得到 $\Delta\alpha_1 = -2.5^\circ$ 。

然后考虑最大升力系数减小的影响:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_2 &= \frac{C_{L_{max,IGE}} - C_{L_{max,OGE}}}{\left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_{IGE}} \\ &= \frac{C_{L_{max,IGE}} - C_{L_{max,OGE}}}{k_h \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_{OGE}} \end{aligned} \quad (3)$$

设 $C_{L_{max,IGE}} = k_{CL} C_{L_{max,OGE}}$,对 G650 飞机 CFD 分析表明 $k_{CL} = 0.95$,代入式(3)得到 $\Delta\alpha_2 = -0.7^\circ$,因此总的失速攻角变化量为:

$$\Delta\alpha_{stall,IGE} = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 = -3.1^\circ \quad (4)$$

远大于事故发生时设定的 -1.6° ,这也是为什么机组在发生失速时没能获得任何提示或警告的原因。

3.2 目标起飞安全速度过小

FAA 在 2002 年发布了最终修正案 25-108^[3] 定义了失速参考速度 V_{SR} 即 1-g 失速速度,修正案指出如果使用 V_{SR} 定义有关速度,对应比例系数会缩小,最小容许 V_2 要不小于 $1.13V_{SR}$ ($1.2V_s$)。湾流公司在 2007 年做出技术决定,G650 的 V_2 取法规所允许最

小值即 $1.13V_{SR}$,这是导致 V_2 速度过低的主要原因。

起飞决断速度 V_1 、抬前轮速度 V_R 、起飞离地速度 V_{LOF} 和 V_2 的确定需要依据最小离地速度 V_{MU} 的试飞结果,然而湾流公司依据 GIV 飞机项目的经验,即基于 V_{MU} 得到的 V_2 会小于 $1.2V_S$,进而导致起飞速度的重新定义。最后湾流在 GIV 的做法是先选择满足符合法规要求 ($V_2 \leq 1.2V_S$) 的最小值,即 V_2 取 $1.2V_S$,然后减去对应速度差得到 V_{LOF} 及 V_R 。G650 项目也采用这种从后往前的倒推法,不同点是 $V_2 = 1.13V_{SR}$ 。湾流公司做了关键性的错误假设,即 G650 以 V_{MU} 出发来确定 V_2 将会小于法规允许值 (GIV 的经验),并且在完成 V_{MU} 测试后湾流也没对该假设进行确认,调查人员分析发现,如果湾流分析 V_{MU} 数据很可能会发现目标 V_2 过小的问题。此外,在计算起飞速度时使用的 $V_2 - V_{LOF}$ 与 $V_2 - V_R$ 速度差量值并不是基于 G650 试飞数据,而是采用 G550 的数据,事后研究发现 G650 速度差量值要大于 G550^[1]。由此可见湾流 G650 起飞速度试飞没有遵循试飞程序,而是盲目采取了 G550 上的做法。

另一方面,事故架次试飞人员将目标俯仰角由 10° 降为 9° ,而速度却维持不变,这导致实现目标 V_2 的任务更加困难。湾流飞机性能主管工程师和 FTE1 以及整个 G650 项目有关人员都没能意识到降低目标俯仰角必须重新调整目标速度,如果意识到这个问题进行有关分析很可能会发现 V_2 过小的问题。事后分析发现目标俯仰角从 10° 调整到 9° ,离地速度会增加 4 knot。事故之后湾流重新修改试飞程序和方法,新的 V_2 比事故时大 15 knot,见表 2。

表 2 起飞速度调整前后对比

起飞速度	事故值/knot	调整后/knot
V_R	127	137
V_{LOF}	132	140
V_2	135	150

4 事故启示与思考

G650 试飞事故对湾流公司影响深远,湾流公司根据 NTSB 的要求,采取了一系列措施。首先对试飞机进行了诸多安全性改装,增加了座舱防火系统、应急出口、机上应急设备、飞机外部切口标示等。改进管理流程,包括在运行部门设置安全主管、组建独立的安全审查团队、建立更完善的试飞事件调查程序等。开发了新的起飞速度计算、评估及验证方法。

湾流 G650 试飞事故是由管理和技术共同导致的典型案例,至少有以下几个方面值得试飞管理者和技术人员吸取经验、思考总结:

1) 正确处理项目进度和试飞安全之间的关系。湾流公司试飞团队在进度的压力下,过于关注如何让项目推进,没有重视在试飞时出现的飞机异常响应,一系列盲目决策和失误,最终导致事故发生。试飞计划应科学合理不能过于偏离实际,当进度和安全发生矛盾应以保安全为首要目标。

2) 第三方独立安全审查有助于提高试飞安全水平,预防事故发生。聘请安全专家开展独立审查和评估,查找安全管理方面的缺陷,完善和改进安全管理体系。

3) 试飞员和试飞工程师应严格按照标准操作程序执行试飞任务,不能试图通过改变本来正确的试飞操作程序得到满意的“数据”,应客观评价飞机性能。飞行后对任何试飞中出现的异常现象都应仔细分析。

4) 加强高风险试飞科目安全保障。湾流 G650 事故也暴露出湾流试飞安全保障工作的不足,调查发现机上人员并非由于撞击致死,而是因起火未能成功逃离。在进行高风险试飞时应加强与地面消防支援的协调,确保有足够的飞机救援和灭火资源,做好应急预案。

5) 型号之间的经验借鉴不能取代必要试飞流程。湾流 G650 起飞速度研发没有遵循本来的试飞流程,而是直接借鉴了 G550 的经验。随着公司新型号的发展,型号之间的经验传承固然重要,但不可盲目直接采取其他型号某些做法而不进行严密论证和及时确认,试飞方案应考虑每个型号的特点并遵循科学的试飞流程。

参考文献:

- [1] National Transportation Safety Board. Crash during experimental test flight, gulfstream aerospace corporation GVI (G650): N652GD[R]. [S.l.: s. n], 2011.
- [2] O'CALLAGHAN JJ. The Gulfstream G650 flight test accident: lessons learned [J]. AIAA Journal, 2013.
- [3] Federal Aviation Administration. 1-g stall speed as the basis for compliance with part 25 of the federal aviation regulations [S]. [S.l.: s. n.], 2002.

作者简介

王海刚 男,硕士,工程师。主要研究方向:试飞技术。
E-mail: wanghaigang1@comac.cc