

民机地面最小操纵速度试飞技术研究

张强*, 程伟豪, 张海妮

中国飞行试验研究院飞机所, 陕西 西安 710089

摘 要: 基于CCAR-25对于民用飞机地面最小操纵速度(V_{MCG})的合格审定试飞要求, 对地面最小操纵速度试飞技术进行了分析, 针对ARJ21-700飞机, 从试飞准备、试飞方法、驾驶技术和试飞程序等方面, 制定了详细的试飞方案, 试飞得到 V_{MCG} 为107kn。由于 V_{MCG} 受机场大气影响, 因此对其进行数据扩展, 得到全包线范围内的 V_{MCG} 。该试飞技术和数据处理方法可为其他民用飞机的型号合格审定试飞提供参考。

关键词: 民机; 地面最小操纵速度; 试飞; 型号合格审定; 数据扩展

中图分类号: V217 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2014) 02-64-5

飞机在起飞滑跑过程中, 一台或多台发动机停车时, 会由于推力不对称产生偏航力矩, 从而使飞机偏离初始滑跑航迹。飞行员为了纠正滑跑轨迹, 必须使用方向舵去修正由于不对称推力产生的偏航。方向舵能否平衡不对称偏航力矩, 关键取决于发动机停车速度及飞机地面最小操纵速度(V_{MCG})的大小。若停车速度高于 V_{MCG} , 飞机在飞行员的操纵下通常能保持原来的飞行方向; 若停车速度低于 V_{MCG} , 飞行员即使蹬满舵也不能保持原来的飞行方向。因此, 确定飞机地面最小操纵速度的试飞工作是飞机加速停止距离等试飞项目的前置性研究科目, 是飞机性能品质试飞的关键科目之一。

本文从民用航空规章的要求入手, 对ARJ21-700飞机地面最小操纵速度试飞过程中的试飞方法、驾驶技术、试验实施、数据处理等试飞技术进行了详细的阐述和总结, 可为其他型号飞机的相关试验提供参考。

1 规章要求和解读

1.1 规章要求

CCAR-25部对 V_{MCG} 的要求为:

当飞机临界发动机突然停车时, 使用横向操纵(仅用于

保持机翼水平)和方向舵操纵来操纵飞机, 不使用前轮转弯, 不需要特殊的驾驶技巧就能继续安全起飞。整个过程中, 方向舵操纵力不能超过667 N(68kg)。在确定 V_{MCG} 时, 假定飞机发动机正常工作, 飞机沿着跑道中心线正常加速。临界发动机突然停车, 从临界发动机停车点到航向恢复至平行于跑道中心线的航迹上, 任何点偏离跑道中心线的横向距离不得大于9m。 V_{MCG} 试飞时需要考虑以下条件:

- 1) 飞机处于每一种起飞形态, 或按申请人的选择, 处于最临界的起飞形态;
- 2) 工作发动机处于最大可用起飞功率(推力)状态;
- 3) 重心在最不利的位置;
- 4) 飞机按起飞状态配平;
- 5) 起飞重量范围内的最不利重量^[1]。

1.2 规章解读

进行该试验的目的是为了演示在起飞地面滑跑期间, 当临界发动机在 V_{MCG} 突然停车时, 如果要继续起飞, 飞机是安全可控的。

V_{MCG} 的最终确定以侧向偏离距离等于9m为依据。驾驶员对临界发动机失效的识别应根据以下两点进行判断: 1) 驾驶员感觉到飞机航向跟踪特性明显变化; 2) 驾驶员根据外界

收稿日期: 2013-11-18; 录用日期: 2013-12-20

*通讯作者. Tel.: 029-86830411 E-mail: xiaoq319@163.com

引用格式: ZHANG Qiang, CHENG Weihao, ZHANG Haini. Flight test technology research on ground minimum control speed of civil airplanes[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(02): 64-68. 张强, 程伟豪, 张海妮. 民机地面最小操纵速度试飞技术研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(02): 64-68.

参照物看到飞机航向偏离。不允许提前蹬舵,因为从发动机停车到试飞员判明发动机失效并开始操纵方向舵会有一定的时间延迟。只用方向舵控制飞机,所有其他的操纵机构,如副翼和扰流板,应仅用于使机翼保持水平状态。不允许使用这些操纵机构来补偿方向舵效率。还应注意在大的方向舵偏度情况下不能无意地使用刹车,否则试验数据将会无效^[2]。

2 试飞技术

2.1 试飞准备

2.1.1 临界发动机确定试飞

在地面最小操纵速度试飞之前进行临界发动机确定试飞,试飞过程为:1) 把一台外侧发动机调定为最大推力,而把相对的那台发动机调定为慢车推力,保持机翼水平减速直到方向舵全偏;2) 变换左右侧发动机功率,把方向舵全偏时需要较大的最小速度来保持飞机恒定航向的那台慢车发动机定为临界发动机。试验结果表明,ARJ21-700飞机两台发动机速度相当,因此,地面最小操纵速度试飞中选择右侧发动机为临界发动机。

2.1.2 绘制跑道标识线

在地面最小操纵速度试验中为了判断飞机的横向偏离距离,需要在跑道上绘制平行于跑道中心线的标识线,要求标识线有一定的防雨性,至少能够保证在两场中雨后清晰可见。根据试验跑道的长度、宽度以及试验机的起飞滑跑特性(由前期的性能试验得到),制定ARJ21-700飞机跑道标识线绘制方案。试验证明,此方案有效可行,具有较好的可参考性。

2.2 试飞方法

试验前将飞机设置为规定的起飞构型,并按起飞程序配平,设置最大起飞推力的油门杆位置,在80kn(速度小于80kn时方向舵效能较低,不足以纠正飞机由于各种原因所造成的航向改变)时将前轮转弯置OFF位,仅利用方向舵控制飞机,其他操纵仅用于保持机翼水平。在预先选定的速度上切断临界发动机燃油。当驾驶员感觉到飞机航向跟踪特性的明显变化或根据外界参照物看到飞机航向偏离确认临界发动机停车后,快速向工作发动机方向蹬满舵,使飞机恢复到平行于跑道中心线方向并继续滑行,整个试验过程中不使用刹车。反航向重复试验以消除侧风影响。试验中不能使用差动刹车,试验停车速度从较高速度开始,视情况逐渐降低速度,直到侧偏距离约为9m为止。使用试飞确定的 V_{MCG} 演示一次继续起飞。

2.3 驾驶技术

针对地面最小操纵速度试飞的特殊性 & 前期的失速速度、失速特性及空中最小操纵速度试飞结果,对ARJ21-700飞机的地面最小操纵速度试飞制定了特殊的驾驶技术。

首先,在临界发动机停车速度的选择上,应该由较大速度开始逐步逼近,直到飞机侧偏距离等于9m为止。为了使试验得到的 V_{MCG} 可以在干跑道和湿跑道上均有效可用,试飞过程中要求试飞员保持前轮轻微离地或触地,以模拟湿跑道条件,尽量减小地面摩擦力对试验值的影响。

其次,从发动机停车到试飞员判明发动机失效并开始操纵方向舵会有一定的时间延迟。对给定形态的飞机,飞机对发动机推力变化的响应延迟时间是一定的,而试飞员感觉到飞机的响应并开始进行操纵之间的反应时间是不同的。驾驶员应该根据飞机航向跟踪特性的明显变化和外界参照物来判别临界发动机失效,切记不要提前蹬舵,这会导致试飞值偏离飞机的真值。

试飞过程中当飞机欲冲出跑道时,立即收油门,采用差动刹车控制飞机航向,减速至停止。如需航向操纵,迅速接通前轮转弯系统,在接通前轮转弯时,确保方向舵脚蹬在中立位置附近,以免起落架损伤及飞机出现危险特性。

如果飞机意外离地,应保持高度,使飞机平飞加速,不要急于修正航向或剧烈操纵飞机。当飞机速度提高到起飞安全速度后,开始适时爬升或启动停车发动机并进入航线。

3 试飞程序

在按照适航条例的要求进行试验之前,首先进行中等重量、前轮转弯系统断开条件下的临界发动机慢车继续起飞试验和中等重量、前轮转弯系统断开条件下的临界发动机慢车继续起飞试验,之后分别进行了最大起飞重量、前轮转弯系统接通条件下的发动机慢车中断起飞试验以及最大起飞重量、前轮转弯系统断开条件下的发动机慢车中断起飞试验来检查方向舵效能。试验结果表明,在上述条件下,方向舵平均最大偏度约 20° (限制值 24°),具有足够的纠偏能力。在进行一系列准备试验之后,在最大起飞重量、前轮转弯系统断开的条件下进行燃油切断的停车试验。右侧发动机停车速度由大到小,按照飞机侧偏的情况确定具体停车速度,直到飞机偏离初始滑跑轨迹的横向偏离距离约9m为止。ARJ21-700飞机从停车速度 $V_i=125kn$ 开始试验,这种条件下的横向偏离距离为2.5m,之后依次进行了停车速度为120kn、116kn、113kn、111kn的中断起飞试验。最终以 $V_i=111kn$ 进行了演示继续起飞试验。

4 数据处理

4.1 计算校准空速

1) 按照总压延迟试验报告修正飞机总压。

2) 利用飞机起飞滑跑前大气机的气压高度 H_{p0} 、GPS高度,以及GPS高度变化量

ΔH_{GPS} ,使用下列公式计算试验过程中的真实气压高度:

$$H_p = H_{p0} + \Delta H_{GPS} \frac{T_{std}}{T_{amb}} \quad (1)$$

3) 利用公式(2)将气压高度换算为静压:

$$P_s = 101.325 \left(1 - \frac{0.3048 H_p}{44330.769} \right)^{5.25588} \quad (2)$$

4) 由公式(3)计算飞机真实动压:

$$\Delta p = P_t - P_s \quad (3)$$

5) 利用公式(4)计算出试验过程中的校准空速:

$$\Delta p = 101.325 \left[(1 + 0.13327 \times 10^{-6} (V_c / 1.852)^2)^{3.5} - 1 \right] \quad (4)$$

式中, ΔH_{GPS} 为GPS高度变化量; H_{p0} 为起飞滑跑前的气压高度; H_p 为气压高度; P_s 为大气静压; P_t 为大气总压; Δp 为大气动压; T_{std} 为标准大气温度; T_{amb} 为实际大气温度。

4.2 计算试验条件下的

绘制校准速度 V_c 与横向偏离距离 Δy 之间的关系曲线,如图1所示。由图可知,从右侧发动机停车到航向完全恢复至平行于跑道中心线的过程中,飞机偏离跑道中心线的横向距离为9m时,所对应的校准速度为107kn,即对于ARJ21-700飞机来说,试验条件下的 V_{MCG} 为107kn。

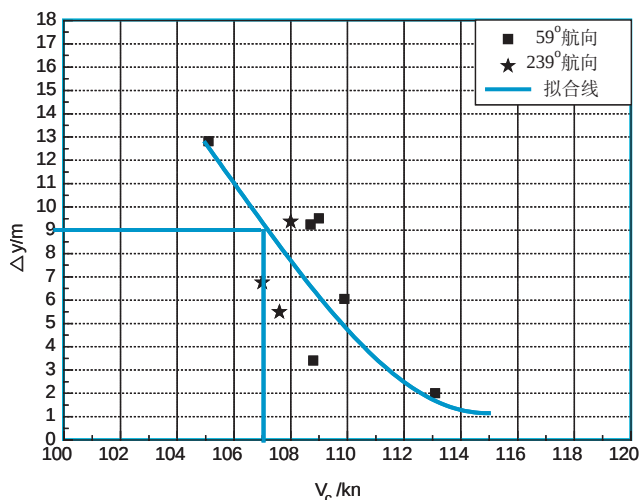


图1 V_{MCG} 试飞结果曲线

Fig. 1 Test results of V_{MCG}

5 数据扩展

由试验得到的 V_{MCG} 是飞机在特定高度、温度和推力条件

下的地面最小操纵速度,机场大气条件(高度和温度)会对发动机推力产生影响,从而影响 V_{MCG} 值。因此必须进行数据扩展,给出全包线范围内的 V_{MCG} ,以便使飞机性能最大化。下面给出 V_{MCG} 的数据扩展方法。

V_{MCG} 的数据扩展是基于“等偏航力矩系数”法展开的,即在不同高度、温度条件下,飞机的偏航力矩系数与发动机所产生的不对称偏航力矩系数相等:

$$C_{nT} = C_{naero} \quad (5)$$

其中: $C_{nT} = \frac{2F_{nT}l_e}{\rho_0 V_e^2 sb}$,为发动机偏航力矩系数;

C_{naero} 为飞机能够提供的气动偏航力矩系数(不随外界条件变化,视为常数);

F_{nT} 为一侧发动机停车时的不对称推力(包括工作发动机推力、不工作发动机的风车阻力和溢流阻力,通过发动机推力模型程序计算得到);

l_e 为从飞机的中心线到发动机推力线的距离;

ρ_0 为海平面大气密度;

V_e 为当量空速;

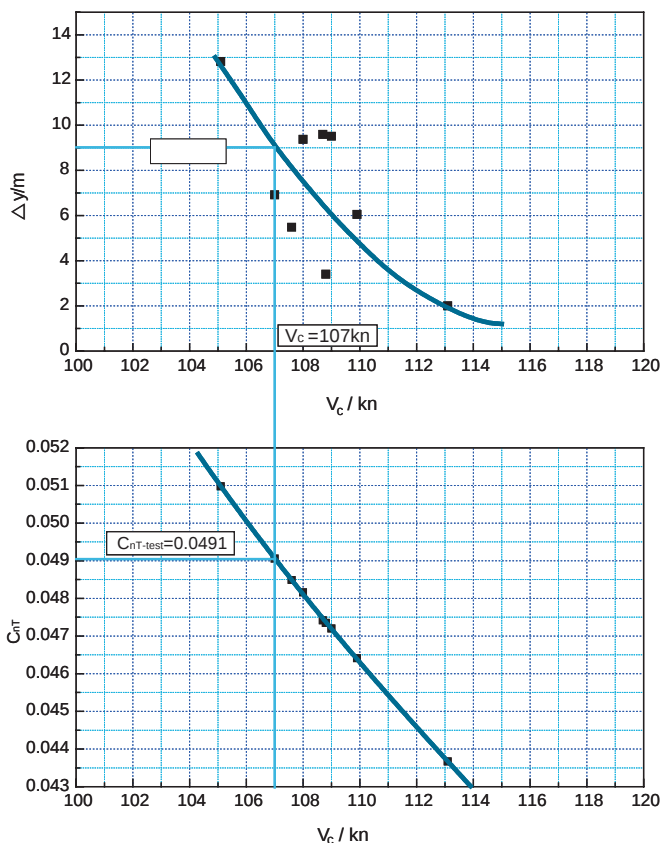


图2 $C_{nT-test}$ 的确定

Fig.2 Defined of $C_{nT-test}$

s 为机翼参考面积;

b 为翼展。

通过试验结果绘制 Δy 随 V_c 的变化曲线,并通过发动机推力模型计算试验条件下 C_{nT} 随 V_c 的变化曲线,如图2所示。由 Δy 随 V_c 的变化曲线得到飞机侧偏9m时对应的发动机停车速度,将该速度对应到 C_{nT} 随 V_c 的变化曲线,最终得到与之对应的 C_{nT} ,此即为对应于试验条件(气压高度300m,温度23.5℃)下的 V_{MCG} 的发动机不对称偏航力矩系数,记为 $C_{nT-test}$ 。由图可知,对于ARJ21-700飞机,根据式(5)得 $C_{nT-test}=0.0491$ 。

飞机起飞包线的其他大气条件(高度和温度)的地面最小操纵速度的计算方法如下:通过发动机推力模型计算得到与之对应的 C_{nT} 随 V_c 的变化曲线,如图3所示,两曲线的交点即为给定条件下的 V_{MCG} 。

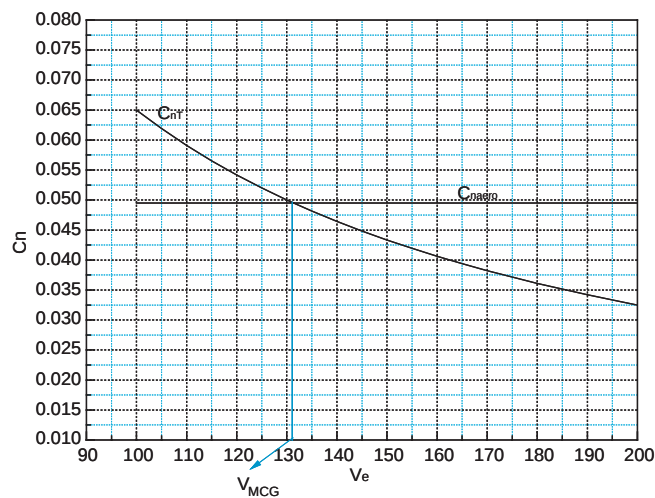


图3 确定给定条件下的 V_{MCG}

Fig.3 Defined of V_{MCG} on given condition

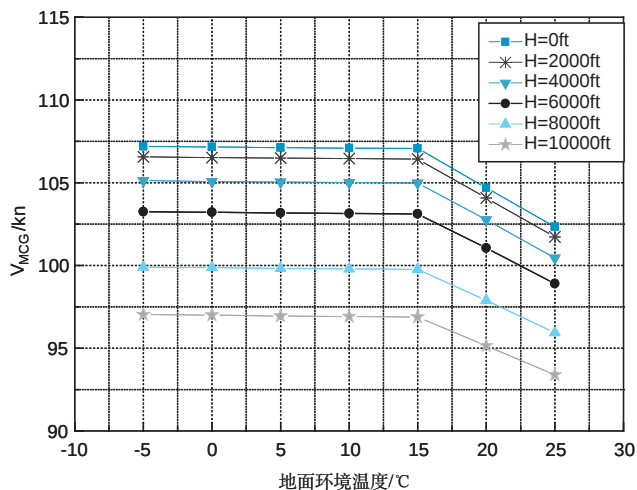


图4 全包线范围内的 V_{MCG}

Fig.4 V_{MCG} over whole envelop

根据ARJ21-700飞机的地面最小操纵试验结果及其发动机推力模型,计算得出全包线范围内的地面最小操纵速度,如图4所示。

6 结论

1) 根据CCAR-25的要求, V_{MCG} 最终确定以侧向偏离距离等于9m为依据;

2) 在最大起飞重量、前轮转弯系统断开的条件下进行燃油切断的停车试验,得到ARJ21-700飞机在试验条件下的为107kn;

3) 基于“等偏航力矩系数”法,根据机场大气条件对 V_{MCG} 做数据扩展,得到全包线范围内的 V_{MCG} ;

4) 本文的试飞技术和数据处理方法可为其他飞机的地面最小操纵速度合格审定试飞提供参考。

AST

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 中国民用航空条例第25部运输类飞机适航标准, CCAR-25[S]. 中国民用航空局, 2009.
Civil Aviation Administration of China, China's civil aviation regulations of 25 transport aircraft airworthiness standards, CCAR-25[S]. CAAC, 2009.
- [2] 美国交通运输部联邦航空管理局. 运输类飞机合格审定飞行试验指南, AC25-7C[S]. 联邦航空管理局, 2012.
U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, Flight Test Guide For Certification Of Transport Category Airplanes, AC25-7C[S]. FAA, 2012.

作者简介:

张强(1977—) 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 飞机飞行试验和飞行力学研究。

Tel: 029-86830411

E-mail: xiaoq319@163.com

程伟豪(1981—) 男, 学士, 工程师, 主要研究方向: 飞机飞行试验和飞行力学研究。

张海妮(1985—) 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 飞机飞行试验和飞行力学研究。

Flight Test Technology Research on Ground Minimum Control Speed of Civil Airplanes

ZHANG Qiang*, CHENG Weihao, ZHANG Haini

Aircraft Flight Test Technology Institute, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: According to the request of CCAR-25 for ground minimum control speed (V_{MCG}), this paper analyzed the test technology of ground minimum control speed, formulated the flight test plan from preparation, methods, driving technology and procedure for ARJ21-700. The result show that ground minimum control speed of ARJ21-700 is 107kn. According to the atmospheric conditions at the airport, a method of test data expansion was introduced, which came out the over whole envelop. The test technology and data processing method can be used for the certification of other civil airplanes.

Key Words: civil airplanes; ground minimum control speed; flight test; model qualification; data expansion

Received: 2013-11-18; Accepted: 2013-12-20

* Corresponding author. Tel: 029-86830411 E-mail: xiaoq319@163.com