

最小离地速度试飞数据分析方法研究

张大伟*

(中国商飞试飞中心,上海 201323)

摘要:

最小离地速度试飞是适航条款要求必须完成的科目,具有风险高、机组操纵难度大的特点,对飞行试验团队提出了很高的要求。从受力分析出发,对最小离地速度试飞的数据分析方法进行了推导,并与咨询通告建议等传统的方法进行了对比。基于受力分析推导的方法,理论基础更清晰,数据分析更简单,可供后续民机试飞参考。

关键词: 最小离地速度试飞;数据分析;飞行试验;民用飞机

中图分类号: V217

文献标识码: A

OSID:



0 引言

顾名思义,最小离地速度(velocity minimum unstick,简称VMU)就是飞机可以安全离地起飞的最小速度^[1]。飞机以 V_{MU} 速度起飞时俯仰姿态很大,迎角非常接近带地效的失速迎角,可能会出现轻微的失速抖振或者触发人工失速告警(比如失速音响告警或者抖杆等),此时飞机阻力很大,性能和操纵性都非常临界。最小离地速度试飞就是要演示飞机在这种极端情况下的起飞能力,是CCAR25部规定必须完成的试飞科目,该科目风险高,机组操纵难度大,对飞行试验团队提出了很高的挑战,ERJ135^[2]、G650^[3-4]等飞机在最小离地试飞时均发生过事故。

因此,最小离地速度试飞得到了试飞工作者的普遍重视和关注。试飞工作者们针对其试飞方法、风险控制措施、数据分析方法以及数据扩展方法等开展了深入的研究。R. Lingerland从带地效的升力系数、起落架模型入手对设计阶段的最小离地速度估算方法进行了优化^[5]。张妙婵等从航迹坐标系下的动力学方程入手,推导出了最小离地速度试飞的数据处理方法^[6]。屈飞舟等对试飞中可能会出现飞机尾部擦地、低空失速等风险进行了分析,剖

析了尾部擦地造成飞机尾部损伤的原因及其缓解措施^[7]。屈展文等人分析了最小离地速度在起飞速度制定中的作用,提出了基于起飞速度制定原则的最小离地速度合格审定试飞优化方法^[8]。

本文采用两种方法对最小离地速度试飞的数据分析方法进行了推导。其中,基于地球坐标系受力分析推导的方法相比AC25-7D推荐的方法(也就是安博威公司使用的方法)数据分析更简单,计算量更小。

1 适航条款要求

1952-1953年,彗星飞机(Comet)半年内连续发生了两起空难。在这两起空难中,飞机在离地前后均进入了不加速也不离地的高阻力状态,飞机在跑道尽头也未能完成起飞最终发生灾难^[9]。最小离地速度试飞相关要求和条款就是在上述事故之后发展起来。

CCAR25部R4版要求(美国联邦航空局的相关条款类似),申请人必须在申请审定的整个推重比范围内确定相应的最小离地速度 V_{MU} ,并且要求飞机全发工作、以切实可行的最大抬头率抬前轮,得到的离地速度 $V_{LOF, MPPR}$ 不得小于全发工作 V_{MU} 的1.1倍;飞机模拟临界发动机失效情况下起飞、以切实可

* 通信作者. E-mail: zhangdawei@comac.cc

引用格式: 张大伟. 最小离地速度试飞数据分析方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(2): 22-25. ZHANG D W. Data analysis method of minimum unstick speed test[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(2): 22-25 (in Chinese).

行的最大抬头率抬前轮,得到的离地速度 $V_{LOF, MPPR}$ 不得小于单发失效时 V_{MU} 的 1.05 倍^[1]。

美国联邦航空局的 AC25-7D 文件对适航条款的要求进行细化,并对几何结构受限飞机^[注1]进行了专门的补充说明。对于几何结构受限的飞机,咨询通告允许将上文提及的 $V_{LOF, MPPR}$ 与 V_{MU} 之间的裕度要求适当放宽,双发时允许放宽到 1.08 倍,单发失效时允许放宽到 1.04 倍^[10]。这是考虑到对于几何结构受限飞机,如果起飞姿态过大,飞机首先会发生擦机尾,然后才可能进入不加速也不离地的高阻力状态,擦机尾的首先发生降低了飞机进入不可离地状态的可能性。

注 1:几何结构受限飞机是指可以在机尾持续擦地状态下安全起飞的飞机,现代的大型民用客机例如空客公司的 A380、A350,波音公司的 787、777 飞机,我国自主研发的 ARJ21、C919 飞机均属于几何结构受限飞机。

2 AC25-7D 的推荐方法

在飞机航迹坐标系开展受力,易得到下述近似的无量纲关系式:

$$(T - D)/W = \frac{1}{V} \cdot \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

式中:

T 为发动机推力; D 为飞机阻力; W 为飞机重量; V 为飞机速度; $\frac{dH}{dt}$ 为飞机爬升率,也叫垂直速度; g 为重力加速度; $\frac{dV}{dt}$ 为飞机水平加速度。

$T-D$ 通常被称为剩余推力, $(T-D)/W$ 是一个无量纲数,就是通常所说的推重比, $\frac{1}{V} \cdot \frac{dH}{dt}$ 是爬升梯度项, $\frac{1}{g} \cdot \frac{dV}{dt}$ 代表了飞机的爬升能力,是飞机加速度与重力加速度的比值,代表了飞机加速能力,式(1)通常被用作爬升性能试飞时的加速度修正。根据式(1)可知,推重比就意味着飞机的爬升和加速能力,正好描述了飞机在起飞离地瞬间继续加速起飞能力,因此经常被用作起飞相关科目的数据分析。AC25-7D、巴西的安博威公司最小离地速度试飞数据分析方法主要就是基于以上分析。

安博威公司将 $(T-D)/W$ 作为横坐标,将最小离地速度与失速速度的比值作为纵坐标,画出相应的

图表,拟合出相应的曲线,最终用于计算各种情况下飞机的最小离地速度 V_{MU} ,如图 1 所示。^[2]

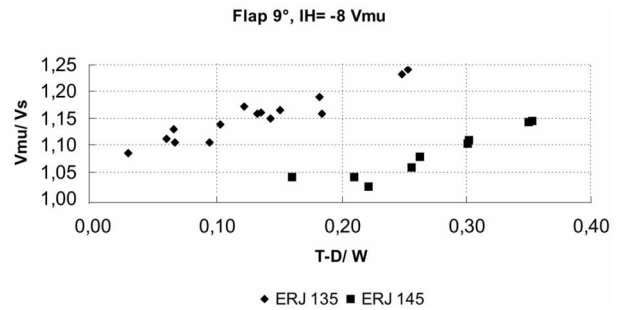


图 1 ERJ135/145VMU 试飞结果^[2]

该数据分析方法的难点在于准确计算阻力 D ,特别是单发情况下的阻力。为了提高 V_{MU} 试飞的安全性,适航条款允许申请人使用双发对称减推力的方法来开展模拟的单发 V_{MU} 试飞,这也是所有型号试飞统一采用的方法。AC25-7D 明确要求,使用双发对称减推力的方法来开展模拟的单发 V_{MU} 试飞时除了要保证双发推力之和要等于模拟的单发推力外,还要对单发时的操纵和配平阻力(主要是方向舵、副翼、扰流板使用带来的额外阻力)进行修正。张妙婵等人推导的方法^[6]同样需要在计算推重比时对单发操纵和配平阻力进行修正。

3 基于受力分析推导的方法

飞机离地时刻,气流相对于飞机的方向平行于跑道道面,飞机的受力如图 2 所示。

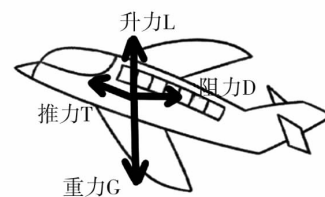


图 2 飞机离地时刻受力分析示意图

飞机的离地速度就是飞机重量完全被升力和推力分量所平衡的速度。因此,在垂直方向(重力方向)存在下列关系式:

$$W = \frac{1}{2} \rho_0 V_{MU}^2 S C_{LVMU} + T \sin(\theta + \eta_T) \quad (2)$$

式中:

W 为飞机重量; ρ_0 为标准海平面大气密度;

S 为机翼参考面积; C_{LVMU} 为飞机以 V_{MU} 离地时

的升力系数; T 为发动机推力; θ 为俯仰角; η_T 为发动机安装角。

其中, $\frac{1}{2}\rho_0 V_{MU}^2 SC_{LVMU}$ 为升力项, $T\sin(\theta + \eta_T)$ 为推力分量项。将推力分量移动到等式右边, 并且提出 W , 可得:

$$W\left[1 - \frac{T}{W}\sin(\theta + \eta_T)\right] = \frac{1}{2}\rho_0 V_{MU}^2 SC_{LVMU} \quad (3)$$

根据基准失速速度定义, 存在下式:

$$W = \frac{1}{2}\rho_0 V_{SR}^2 SC_{Lmax} \quad (4)$$

式中:

V_{SR} 为基准失速速度; C_{Lmax} 为最大升力系数。

将式(3)中最左边项里的 W 用式(4)代替, 可得:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}\rho_0 V_{SR}^2 SC_{Lmax} \left[1 - \frac{T}{W}\sin(\theta + \eta_T)\right] \\ &= \frac{1}{2}\rho_0 V_{MU}^2 SC_{LVMU} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\frac{T}{W}$ 为推重比。

式(5)两边同除以 $\frac{1}{2}\rho_0 V_{SR}^2 SC_{Lmax}$, 可得:

$$1 - \frac{T}{W}\sin(\theta + \eta_T) = \left(\frac{V_{MU}}{V_{SR}}\right)^2 \left(\frac{C_{LVMU}}{C_{LMAX}}\right) \quad (6)$$

假定:

(1) 对于几何结构受限飞机, 任意推重比下飞机离地时的俯仰角是相同的。由于离地时刻飞机的垂直方向速度很小, 因此, 对于任意推重比, 可以假定飞机以 V_{MU} 离地时的迎角也是相同的, 从而, 飞机离地时的升力系数 C_{LVMU} 可以看做是常数。

(2) 对于操纵权限受限飞机, 如果飞机离地时的俯仰角存在一定差异, 可考虑采用保守的方法将不同推重比的离地速度修正到最小离地俯仰角(即所有推重比离地俯仰角的最小值)。这样计算得到的 V_{MU} 更大, 更保守, 可以确保飞机满足条款要求的安全裕度。

从而, 式(6)的 $\left(\frac{C_{LVMU}}{C_{LMAX}}\right)$ 为常数项。又由于飞机离地时的俯仰角和发动机安装角本身为常数, 因此 $\sin(\theta + \eta_T)$ 也为常数。

易知, $\frac{T}{W}$ 和 $\left(\frac{V_{MU}}{V_{SR}}\right)^2$ 之间为线性关系。由于上述

推导只涉及 Z_w 轴(升力轴), 不涉及 X_w 轴(阻力轴)。因此, 对于双发模拟单发和真实单发 VMU, 上述公式都是适用的, 而且是完全一样的, 不需要进行不对称阻力修正。

因此, 与图 1 类似, $\frac{T}{W}$ 将作为横坐标, 将最小离地速度与失速速度比值 $\left(\frac{V_{MU}}{V_{SR}}\right)^2$ 的平方作为纵坐标, 画出相应的图表, 拟合出相应的曲线, 就可以计算各种情况下飞机的最小离地速度 V_{MU} 。由于 $\frac{T}{W}$ 和 $\left(\frac{V_{MU}}{V_{SR}}\right)^2$ 理论上为线性关系, 因此只需要进行最简单的线性拟合。

4 结论

第 3 部分基于地球坐标系受力分析推导得到的 VMU 试飞数据分析方法更简单, 理论更严谨, 可为 C919、CRJ929 等我国民机项目最小离地速度试飞数据分析方法提供参考。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标注: CCAR-25R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011:7
- [2] LUIZ F T. VMU Testing[C]. 30th Annual International Symposium of SFTE, 1999: V2. 1-V2. 9.
- [3] O' CALLAGHAN J J. The Gulfstream G650 Flight Test Accident: Lessons Learned[S]. [S. l.]: AIAA Atmospheric Flight Mechanics (AFM) Conference, 2013: 2-4.
- [4] NTSB Accident Report: Crash During Experimental Test Flight Gulfstream Aerospace Corporation GVI (G650) [R], April, 2011: 1-10
- [5] SLINGERLAND R. Minimum Unstick Speed Calculation for High-speed Jet Transport Aircraft[J]. [S. l.]: 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2004: 1-10.
- [6] 张妙婵, 张建, 吴密翠. 运输类飞机最小离地速度试飞数据处理方法[J]. 飞行力学, 2011, 29(5): 90-94.
- [7] QU F Z, LIU J. Flight test design and risk control of transport airplanes' minimum unstick speed[J]. Aero-

- nautical Science & Technology, 2019, 30(01): 44-50.
- [8] 屈展文,张彤,揭裕文. 最小离地速度合格审定飞行试验优化方法研究[J]. 飞行力学,2016,34(6):81-83.
- [9] Database of Aviation Safety Network[EB/OL]. (2020-06-01) [2020-05-31]. <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=19521026-0>, <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=19530303-1>.
- [10] U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Flight Test Guide for Certification of Transport Category Airplanes: AC25-7D[S]. U. S. : Federal Aviation Administration, 2018: 4-10.

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

Data analysis method of minimum unstick speed test

ZHANG Dawei *

(COMAC Flight Test Center, Shanghai 201323, China)

Abstract: VMU(velocity minimum unstick) test, which is specified by CCAR/FAA airworthiness requirements is a high risk test. Specific pilot skill and considerate preparation are required. Based on the force analysis, this paper derives data reduction method of the minimum unstick speed test flight. Compared to traditional method, which is recommended by AC 25-7D, the new method is more rigorous and the data reduction is less time-consuming.

Keywords: VMU test; data analysis; flight test; civil aircraft

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