

机动速度对飞行安全影响的研究

Research of Maneuvering Speed on Flight Safety

张彤 / Zhang Tong

(民航上海航空器适航审定中心, 上海 200335)

(Shanghai Aircraft Airworthiness Certification Center of CAAC, Shanghai 200335, China)

摘要:

针对因对机动速度错误理解导致的飞行事故,从澄清设计机动速度和使用机动速度概念入手,分析了两个速度制定的规章要求、需要考虑的因素、两者间的关系,以及导致误解的原因,从设计和使用角度提出了与机动速度相关的飞行安全建议。

关键词: 机动速度;设计机动速度;使用机动速度;最大升力系数;限制载荷

中图分类号: V215.2

文献标识码: A

[Abstract] Based on the flight accident due to misunderstanding maneuvering speed, airworthiness regulation requires, determination conditions, relationship between two speeds, and root causes of misunderstanding were analyzed from clarifying the concepts of the design maneuvering speed and operational maneuvering speed. Flight safety suggestions on maneuvering speed were presented from perspective of design and operation.

[Key words] maneuvering speed; design maneuvering speed; operational maneuvering speed; maximum lift coefficient; limit load

0 引言

机动速度是进行飞机结构强度设计和制定飞机使用限制的一个重要特征速度,对安全飞行有着重大影响。机动速度涉及两个概念:设计机动速度(V_A)和使用机动速度。设计机动速度是进行飞机结构强度设计的一个输入条件,用于确保在该速度条件下,任何单个在俯仰、偏航或横滚轴上突然全行程操纵产生的气动载荷不会对飞机的机体结构和部件产生损害;使用机动速度是提供给驾驶员进行单轴全行程操纵或接近失速迎角机动的最大限制速度,其制定必须不得超过设计机动速度,并在飞行手册(AFM)限制章节给出。由此可见设计机动速度和使用机动速度是两个不同概念,但在实际使用过程中,很多驾驶员对这两个速度还存在误解,从而引发安全事故。2001年11月12日,美国航空公司587航班,一架空客A300-605R型飞机在纽约约翰·肯尼迪国际机场起飞后不久坠毁,机上全部260人和地面5人丧生。美国国家运输安全委员会(NTSB)确定“事故的最可能原因是垂直安定面空中脱落,原因是副驾驶不必要的、过度的方向

舵操纵导致的载荷超过了飞机极限设计载荷”^[1]。

本文主要从民机的设计机动速度和使用机动速度限制确定入手,从适航规章的角度梳理这两个速度确定需要考虑的因素,分析两个速度的差异,以及使用限制,来澄清可能存在的概念误解,为相关设计人员和飞行人员提供参考,以期防止因对机动速度错误理解、制定和使用不当导致的飞行试验和航线运行风险。

1 机动速度确定

1.1 设计机动速度确定

设计机动速度(V_A)是为了满足结构强度要求而确定的一个当量空速。 V_A 不能过小,也不能过大。若 V_A 过小,飞机的机动则被限制在很小的速度范围内,在飞机达到限制载荷前,便进入失速状态,飞机应有的安全机动能力得不到保障;若 V_A 过大,会导致气动载荷增加,使飞机在满足结构和操纵面的结构强度要求方面付出更高的代价,因此 V_A 的确定必须权衡这两方面的因素。

对于运输类飞机,适航规章CCAR/FAR 25部25.335(c)规定:“(1) V_A 不得小于 $V_{SI}\sqrt{n}$ 。式中:

(i) n 为 V_C 时的正限制机动载荷系数; (ii) V_{S1} 为襟翼收起形态的失速速度。(2) V_A 和 V_{S1} 必须按所考虑的设计重量和高度进行计算; (3) V_A 不必大于 V_C , 或不必大于同正 C_{Nmax} 曲线与正机动载荷系数线交点对应的速度, 两者中取小值” [2]。为了更好地理解确定 V_A 需考虑的因素, 利用包含 V_A 的机动 ($V-n$) 包线 (如图 1 所示) 来进行说明。

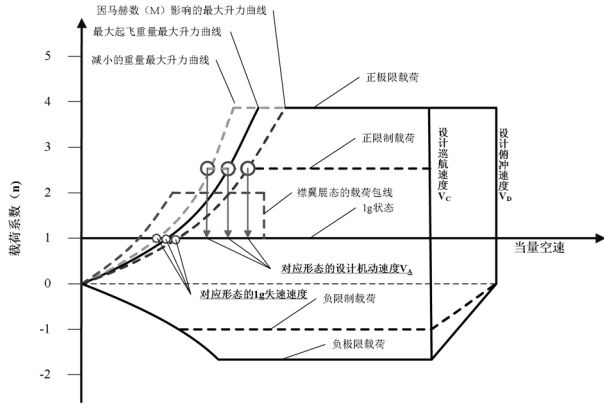


图 1 机动包线 ($V-n$)

$V-n$ 包线的左边界由飞机特定形态的最大升力系数确定, 因升力与速度平方成正比, 在最大升力系数 (C_{Lmax}) 不变的情况下, 不同载荷条件下左边界最大升力曲线是一条二次抛物线, 曲线可以通过 1g 失速速度 (图 1 中 1g 状态线与最大升力曲线的交点) 扩展确定, 在此曲线下方区域飞机不会进入失速。这里需要注意的是机动包线规定的飞行载荷系数是垂直于飞机纵轴的气动力分量与重力之比, 而确定 1g 失速速度时的载荷垂直于航迹。因此, 在确定机动包线左边界时, 需要考虑两者间的差异, 进行气轴到体轴坐标系的转换修正。根据 25.335(c) 的要求, 飞机最大升力曲线与限制载荷线交点处的速度, 通常情况下就是所确定的最小 V_A , 也是飞机能够进行以限制载荷飞行的最大速度, 低于此速度进行机动时, 在超过限制载荷之前飞机便会进入失速状态, 进行气动卸载, 从而保证结构安全。

从 V_A 的确定过程来看, 其是重量和高度的函数。重量不同失速速度 (V_{S1}) 不同, 由确定的 V_A 也不同, 重量增加, 失速速度增大, V_A 也就越大 (见图 1); 高度的影响主要体现在其对马赫数 (Ma) 影响上, 高度增加当量空速不变时, 对应的 Ma 数也相应增加, 当 Ma 数大于 0.3 时, 就需考虑压缩性影响, 压缩性会使最大升力系数 C_{Lmax} 减小, 从而导致 V_{S1} 增大, V_A 也随之增大 (见图 1)。因此, V_A 在不同重

量和高度下并不是唯一的, 而是一系列的值。同时, 25.331(c)(1)、25.349(a)(2)、25.351(a)(2) 分别规定了飞机在速度 V_A 时, 在俯仰、横滚和偏航轴上对升降舵、副翼、方向舵单个突然的、全行程的操纵, 作为操纵输入进行飞机结构和操纵面强度设计的要求。从进行单轴全行程操纵的气动载荷角度来说, 应当确定在不同重量和高度下能够产生最临界气动载荷的 V_A 值进行结构强度设计。通常, 综合权衡当量空速、三轴角速度和角加速度对载荷的影响, 最大 V_A 最可能是临界情况。从重量和高度对 V_A 的影响分析来看, 重量越大和高度越高对应的飞机失速速度 (当量空速) 越大, 由此得到的 V_A 也越大。一般情况下, 最大起飞重量对应最大 V_A ; 最大高度需要通过不同高度的失速速度进行 V_A 值计算, 当 V_A 对应的 Ma 数等于最大使用限制 Ma 时, 此时的高度为最临界高度, 此高度以上不必考虑, 因受最大使用限制 Ma 数限制, 当量空速随高度增加而减小, 从而飞机承受的气动载荷也会减小。

1.2 使用机动速度确定

使用机动速度是提供给驾驶员在飞行中进行单轴全行程操纵或接近失速迎角机动的最大限制速度。25.1507 条规定: “必须制定机动速度, 该速度不得超过按第 § 25.335(c) 条确定的设计机动速度 V_A ” [2]。按此规定 “机动速度” 可以小于 V_A , 因此, “设计机动速度” 和 “机动速度” 是两个不同概念, 设计机动速度是制定使用机动速度限制的基础。

由于 V_A 是重量和高度函数, 因此对于不同重量和高度的 V_A 应是一簇曲线, 按 V_A 制定的使用机动速度也是一簇曲线, 不便于驾驶员查阅和使用。因此从便于驾驶员使用的角度, 型号设计单位通常会综合出一个相应于所有高度、重量使用机动速度, 如 200KIAS; 或者给出在高度限制范围内随高度变化的, 而不考虑重量因素的一条使用机动速度曲线, 如图 2 所示。

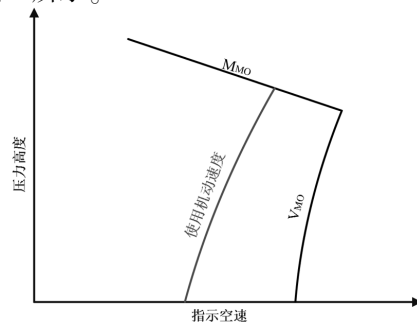


图 2 使用机动速度

使用机动速度需要在飞行手册的限制章节给出,使用限制速度需要以指示空速给出,因此在根据 V_A 制定使用机动速度时需要将当量空速转换成校正空速,再通过大气数据系统修正量修正到指示空速。

2 机动速度与飞行安全

2.1 概念误解导致不安全事件

美国航空公司 587 航班事故表明,即使驾驶员在小于使用机动速度时进行机动,也可能导致事故的发生。究其主要原因是驾驶员对机动速度概念和由来存在误解。美国联邦航空局 (FAA) 的咨询通告 AC 61-23C《驾驶员航空知识手册》P35 中提到:“如果飞机在低于机动速度下飞行,任何飞行操纵的组合使用包括操纵面全偏,或者突风导致的载荷,都不会产生过度载荷”^[3]。美国海军《海军驾驶员空气动力学》阐明:“在飞机速度低于机动速度,任何的组合机动和突风都不会引起因过度载荷而导致的机体破坏”^[4]。这与上述提到的 V_A 确定条件“由单个轴上突然的、全行程操纵作为操纵输入”不一致,但很多驾驶员都已接受了上述观点。组合操纵机动,也就是单个轴上大行程、反复操纵和多轴上的全行程操纵,在设计输入方面并没有考虑,因此在这种组合操纵条件下,尽管速度低于 V_A ,仍存在超出飞机限制载荷甚至极限载荷的可能性,从而使飞机发生损坏,美国航空公司 587 航班事故已证明了这一点。

2.2 滚转拉起机动

飞机的限制载荷是在飞机进行对称机动情况下确定的。在低于或等于机动速度进行滚转拉起机动时,飞机机体仍可能因滚转机动产生的非对称载荷超出限制载荷而发生损坏。如图 3 中所示,当飞机进行滚转拉起机动时,抬起的机翼需产生更大的升力,下沉的机翼需减小升力以产生滚转力矩,即使此时飞机重心处的载荷为限制载荷(运输类飞机限制载荷不小于 2.5g,图中为 2.5g),抬起机翼上的载荷为 3g,超出了飞机的限制载荷,使机翼永久变形或损坏,甚至产生更大的载荷,超出飞机极限载荷而使机翼折断。CCAR/FAR 25.349 规定进行速度为 V_A 的滚转机动时,结构强度设计要考虑三分之二的限制载荷(对应 1.65g)下副翼突然全偏的情况,也就是说,结构强度设计考虑的飞机重心处实际限制载荷会随着滚转产生的非对称载荷叠加而

减小,如果进行滚转拉起机动时飞机重心处载荷限制在 1.65g 以下。然而这种设计情况,驾驶员可能并不知晓,在飞行试验改出(如失速、过载杆力梯度试飞)或运行中某些紧急(如规避)情况下,驾驶员会采用滚转拉起机动来规避风险,若此时驾驶员仍按重心处的限制载荷进行操纵,飞机的机翼结构就可能发生损坏,导致飞行事故。

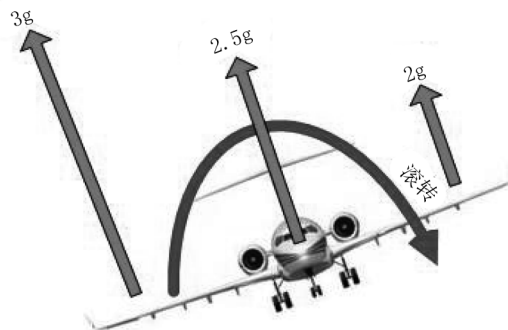


图 3 在滚转拉起时的非对称载荷

2.3 使用机动速度与限制载荷

如上文所述,使用机动速度不同于设计机动速度,它是根据设计机动速度综合给出考虑所有重量和飞行高度的一个限制速度或一条随高度变化的限制速度曲线,通常为了保证在使用重量范围内飞机应具有充足的机动能力,使用限制速度往往按大重量设计机动速度给出,使用时与重量无关。因此,驾驶员在使用这个速度时就要注意,在小重量进行纵向全行程操纵时,仍可能超过飞机的限制载荷,因小重量失速速度小,飞机进行气动卸载的速度 ($V_{S\sqrt{n}}$) 也将减小,而使用限制机动速度大于此速度,在重量不变情况下迎角随速度增加而减小,因而在使用限制速度进行机动限制载荷机动时,飞机的迎角没有达到失速迎角,不能进行气动卸载,因此驾驶员仍可能在失速之前超过限制载荷而损坏飞机。另外,设计机动包线的左边界对应 1g 失速速度,是在飞机无动力条件下确定的,正常进行机动时飞机是有动力的,有动力失速速度会减小,同样的道理,与无动力相比,在相同速度下,气动卸载会延后,使飞机有超出限制载荷的危险。因此,即使规定了使用机动速度限制,飞机并不一定会在此速度下因达到限制载荷而进行自动卸载,驾驶员还应遵守限制载荷的限制。

3 适航规章修订

鉴于 587 航班事故,2010 年 10 月 15 日,FAA

根据 NTSB 的建议颁布了 FAR 25-130 修正案,修订目的是为了明确“机动速度”的具体含义,纠正驾驶员在实际运行中可能因错误理解“机动速度”而进行的危险操纵,从而提高飞机运行的安全水平。修正案增加了 FAR 25.1583(a)(3)(ii)对飞行手册使用限制的要求:“避免快速和大幅度交替操纵输入,尤其是大的俯仰、滚转或偏航改变的组合输入和同一时间在超过一个轴上的全行程操纵”^[1]。

在实践中,“使用机动速度”与 25.335(c)确定的“设计机动速度 V_A ”不同,过去 25 部飞机飞行手册把“使用机动速度”称为“机动速度”,并使用与设计机动速度同样符号 V_A 。对于小型飞机,23 部定义了“使用机动速度 V_0 ”,这样便把运行中的“使用机动速度”与为满足强度设计要求的“设计机动速度 V_A ”区分开来。但对于 25 部运输类飞机,FAA 并不想引入新的速度标记,因为对于运输类飞机, V_A 在历史上一直在设计和运行中使用,若引入新的速度标记反而会产生混淆。但为了强调规章中这两个速度的区别,FAA 将规章使用的“机动速度 V_A ”改为“机动速度”。同时,FAA 将继续允许申请人把“机动速度”在 AFM 中称为“ V_A ”。

4 结论

设计机动速度和使用机动速度是进行飞机结

(上接第 14 页)

(6)试飞时如果发现严重 PIO 现象,飞行员应立即松杆或将杆至于中立位置,待飞机稳定后重新控制飞机,不改变飞机构型并在飞机着陆前进行操纵性检查。

7 结论

PIO 试飞是飞机操纵性和稳定性试飞中的一项重要科目,需通过高增益人机闭环试飞任务向适航当局表明符合性。本文分析介绍了 PIO 试飞的适航条款、试飞方法、试验点选取方法和试飞评定准则,并介绍了 PIO 试飞的注意事项和风险规避方法,可为运输类飞机的 PIO 试飞提供参考。

参考文献:

- [1] 颜世伟,高正红,刘艳,田福礼.模糊聚类方法在 PIO 探测中的应用[J].飞行力学,2011,29(5):5-9.
- [2] National Research Council. Aviation safety and pilot con-

构强度设计和飞行使用的两个重要特征速度,两者概念不同,不能混淆,否则就可能导致飞行事故。设计人员应充分研究重量和高度对设计机动速度的影响,确定能够产生最临界气动载荷的 V_A 值进行结构强度设计,并根据设计机动速度在飞行手册中制定合理的、便于驾驶员使用的机动速度限制和说明。试飞员和驾驶员应通过培训和学习充分了解设计机动速度和使用机动速度制定目的和使用限制,即使在使用机动速度以下,也要避免多轴组合操纵、大幅度快速反复操纵;在滚转拉起机动中和突然的俯仰机动过程中注意控制飞机的纵向载荷,使机体或部件不超过相应的限制载荷,以免飞机因过度载荷而产生损坏。

参考文献:

- [1] FAA. Amendment No. 25-130 Maneuvering Speed Limitation Statement[S]. USA: FAA,2010.
- [2] 中国民用航空总局. CCAR25-R4 中国民用航空规章第 25 部:运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局,2011.
- [3] FAA. AC 61-23C Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge[S]. USA: FAA,1997.
- [4] Hurt H Jr. Aerodynamics for Naval Aviators [M]. USA: Aviation Supplies & Academics Inc., 1965.

trol: understanding and preventing unfavorable pilot-vehicle interaction [M]. Washington, D C: Nation Academy Press, 1997:14-15.

- [3] 田福礼,高正红,俞志刚.用于人机耦合振荡探测的操纵振荡特征确定[J].飞行力学,2005,23(2):73-76.
- [4] AC25-7C. 运输类飞机合格审定飞行试验指南[S].
- [5] David G. Mitchell. Identifying a PIO Signature—New Techniques Applied to an Old Problem [C]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 21-24 August 2006, Keystone, Colorado.
- [6] Duane McRuer. Development of a comprehensive PIO theory [R]. AIAA-96-3433-CP,1996.
- [7] David H. Klyde David G. Mitchell. A critical examination of PIO prediction criteria [C]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, Boston, Massachusetts, 1998.
- [8] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 中国民用航空条例第 25 部运输类飞机适航标准[S]北京:中国民用航空局,2011.
- [9] 刘艳,高正红,赵涛,吕海,李向维.民用飞机适航取证中的 APC/PIO 评估方法[J].飞行力学,2010,28(6):6-10.