航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Apr. 15 2018 Vol. 29 No.04 67-72

运输类飞机适航标准中的速度研究及应用

邱朝群 *

航空工业第一飞机设计研究院，陕西 西安 710089

摘　要：飞机的各种速度与飞行安全密切相关，关系到飞机的飞行性能、飞行品质、强度和飞行导航等方面。CCAR-25-R4 中规定了一系列以不同类型表示的、在飞机的设计过程中必须制定的飞机设计和使用速度。速度类型和名称不同，含义和用途不同。如安全起飞速度 V_2 和基准失速速度 V_{SR} 用于保证飞机安全起飞和稳定飞行；飞机设计巡航速度 V_C 和设计机动速度 V_A 用于保证规定飞行条件下飞机的强度。本文对 CCAR-25-R4 中的主要速度进行了系统研究，给出了基本速度类型、各失速速度、起降速度、设计空速和限制速度的含义和相互关系，还给出了两个型号中 V_C 和 V_D 余量设计和使用速度舱内显示实例。

关键词：运输类飞机；速度；适航；速度类型；设计空速

中图分类号：V328.3　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.04.067

飞机飞行速度的合理与否直接影响飞机安全。如飞机飞行速度小于飞机失速速度 V_S 时，飞机会面临失速坠毁的风险；飞行速度超过最大操作限制速度 V_{MO}，飞机会面临结构损伤的风险。《中国民用航空规章》CCAR-25-R4[1] 规定了一系列涵盖设计和使用过程中与飞行安全密切相关的速度要求。不能准确掌握不同速度的含义会导致设计和使用出错，诱发飞行事故。例如，1996 年 2 月 6 日，当地时间 23：47，一架波音 757 飞机于普拉塔港国际机场起飞后约 5min 坠落于多米尼加共和国南海岸海域中，机上 189 人全部罹难。调查报告显示在失速警告触发前，机长的空速表错误显示空速不断增加并有连续的超速警告发出，机组对此表示困惑因而未能及时识别失速并给出正确的处理程序。

CCAR-25-R4 中给出的速度类型和名称不同，含义和用途不同。目前，公开发表的文献显示，针对速度的基础研究较少，国内仅钟近曦[2] 和张琛[3] 等对指示空速、当量空速等基本速度类型进行了一定研究。本文按照速度用途，将各种速度分为基准速度、起降速度、设计空速和限制速度 4 类，对各类速度和主要速度的含义和相互关系进行研究。

1 CCAR-25 中速度主要条款

CCAR-25 中与速度相关的主要条款为 25.103 失速速度、25.107 起飞速度、25.125 着陆速度、25.149 最小操纵速度、25.335 设计空速、25.1511-25.1517 各种限制速度。这些条款中的速度有的只面向设计，如设计空速；有的同时面向设计和使用，如起降速度和限制速度。CCAR-25 中速度相关的条款见表 1。

2 基本速度类型

在 CCAR-25 中，不同名称的速度采用不同的速度类型表示。例如，限制速度均为指示空速 IAS，起降性能相关速度均为校正空速 CAS，几个设计空速均为当量空速 EAS。不同类型速度之间可以进行换算。

2.1 指示空速 IAS

指示空速又称表速，指已修正过仪表误差显示在航空器速度指示器上的速度。IAS 通过测量总压 p_t 和静压 p_s 的差值动压 q 而获得，IAS 可表示为 q 的函数：

$$IAS=p_t-p_s=f(q) \tag{1}$$

CCAR-25 规定飞行手册中的各类限制速度和驾驶舱内的标牌速度均为 IAS，可供飞行员直接使用。

2.2 校正空速 CAS

校正空速指进行过静压源位置误差和仪表误差修正的航空器表速[4]，即指示空速经过静压源位置误差修正 ΔV_p 后为校正空速。在海平面标准大气条件下，校正空速等于航空器的真实空速。

收稿日期：2018-01-25；　退修日期：2018-03-02；　录用日期：2018-04-02

* 通信作者 .Tel.：029-86832107　E-mail：qiuchaoqun91@163.com

引用格式：Qiu Chaoqun. Analysis and application of transport aircraft airspeeds in CCAR-25-R4 [J].Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (04): 67-72. 邱朝群 . 运输类飞机适航标准中的速度研究及应用 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (04): 67-72.

表 1 CCAR-25 中主要速度及条款

Table 1 The airspeeds and related articles in CCAR-25

类别	速度名称和符号	主要条款
基准速度	失速速度 V_{SR}/ V_{S1g} /V_{S0}/V_{S1}	25.103
起降速度	发动机失效速度 V_{EF}	25.107 (a) (1)
	起飞决断速度 V_1	25.107 (a) (2)
	最小离地速度 V_{MU}	25.107 (d)
	抬前轮速度 V_R	25.107 (e)
	腾空速度 V_{LOF}	25.107 (f)
	安全起飞速度 V_2	25.107 (b) (c)
	最终起飞速度 V_{FTO}	25.107 (g)
	最小操纵速度（地面 / 空中 / 着陆进场（进近）期间） V_{MCG}/V_{MC} /V_{MCL}/ V_{MCL-2}	25.149/25.1513
	参考着陆速度 V_{REF}	25.125 (b) (2)
设计空速	设计巡航速度 V_C	25.335 (a)
	设计俯冲速度 V_D	25.335 (b)
	设计机动速度 V_A	25.335 (c)
	对应最大突风（阵风）强度设计速度 V_B	25.335 (d)
	设计襟翼速度 V_F	25.335 (e)
	设计阻力装置速度 V_{DD}	25.335 (f)
限制速度	起落架操作速度 V_{LO}	25.729/1515 (a)
	起落架伸态速度 V_{LE}	25.729/1515 (b)
	最大限制速度 V_{MO}	25.253/25.1583
	襟翼展态速度 V_{FE}	25.1511
	颠簸气流速度 V_{RA}	25.1517

$$CAS=IAS+\Delta V_p \tag{2}$$

2.3 当量空速 EAS

当量空速指对校正空速进行绝热压缩流修正后的速度[4]，即以海平面大气为标准换算后的速度。在海平面标准大气条件下，当量空速等于校正空速。

$$EAS=k\cdot CAS \tag{3}$$

式中：k 为压缩性修正值。

2.4 真实空速 TAS

真实空速指飞机相对于未受扰空气的速度。它可以利用空气密度和压缩性修正值从校正空速中获得[4]。

$$TAS=\sqrt{\rho_0/\rho}\cdot k\cdot CAS \tag{4}$$

式中：ρ 为测量高度的空气密度，ρ_0 为海平面空气密度。

2.5 地速 GS

地速 GS 是飞机沿飞行航迹相对于地面固定物的飞行速度。GS 等于修正了风分量 $\boldsymbol{V}_{wind}$ 的真实空速，如图 1 所示[5]。

$$GS=TAS+\boldsymbol{V}_{wind} \tag{5}$$

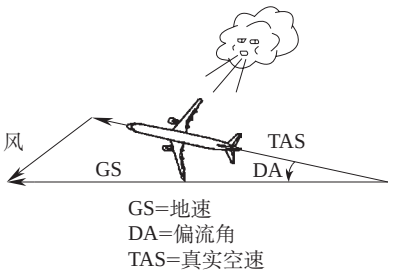

图 1 地速和真实空速关系

Fig.1 Relationship between GS and TAS

2.6 各类基本速度关系

由以上可知，5 类速度具有换算关系。IAS 为通过仪表测量直接得到的速度，对 IAS 进行位置误差修正后得到 CAS，对 CAS 进行大气压压力修正（压缩性修正）后得到 EAS，对 EAS 进行大气密度修正后得到 TAS，对 TAS 进行风速修正后得到 GS。5 类速度关系如图 2 所示。

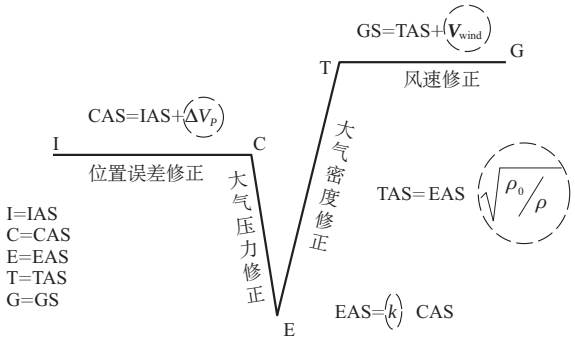

图 2 5 类速度关系图

Fig.2 Relationship between IAS/CAS/EAS/TAS/GS

3 基准速度

失速速度为飞机开始出现失速特征时的飞行速度，是相关速度的基准。涉及失速速度的常用概念有基准失速速度（有时也叫参考失速速度）V_{SR}、失速速度 V_S 和 1g 失速速度 V_{S1g}。V_{SR} 是 FAR-25[6] 第 108 号修正案引入的基准速度，CCAR-25 第四次修订引入。V_S 为 FAR-25 第 108 号修正案之前的基准速度。此外，CCAR-25 中还有着陆构型下的失速速度 V_{S0} 和规定构型下的失速速度 V_{S1} 等概念。

3.1 基准失速速度 V_{SR}

V_{SR} 是 JAR25 第 15 次修订（FAR–25 第 108 次修订，CCAR–25 第 4 次修订）引入的基准失速速度。25.103 规定：V_{SR} 是申请人按飞机的一定状态确定的一个校正空速，作为确定飞机相关性能速度的基准。V_{SR} 不能小于 1g 失速速度。V_{SR} 表达式为：

$$V_{SR} \geqslant \frac{V_{C_{LMAX}}}{\sqrt{n_{ZW}}} \tag{6}$$

式中：$V_{C_{LMAX}}$ 按 25.103（b）条方法确定，在 25.103（c）条的机动过程中当载荷－修正升力系数第一次最大时获得的校正空速；n_{ZW} 为在 $V_{C_{LMAX}}$ 处垂直于飞行航迹的载荷因数（过载）。

3.2 失速速度 V_S

V_S 是 FAR–25 第 108 号修正案之前的基准速度。V_S 是飞机可以操纵的定常飞行的最小速度[7]，也是升力快速减小时飞机的速度。在这个时刻，过载 n 总是小于 1。

3.3 1g 失速速度 V_{Slg}

V_{Slg} 是载荷因数为 1、对应最大升力系数时飞机的速度。根据升力方程得出：

$$V_{Slg} = \sqrt{\frac{2W}{\rho C_{LMAX} S}} \tag{7}$$

3.4 V_{SR}/V_S/ V_{Slg} 的关系

25.103 规定 V_{SR} 不小于 V_{Slg}，通常取 V_{SR}=V_{Slg}。引入 V_{SR} 时约定 V_S 等于 0.94V_{Slg}。V_{Slg} 和 V_S 在升力系数与迎角 / 速度图上的关系如图 3[5] 所示。

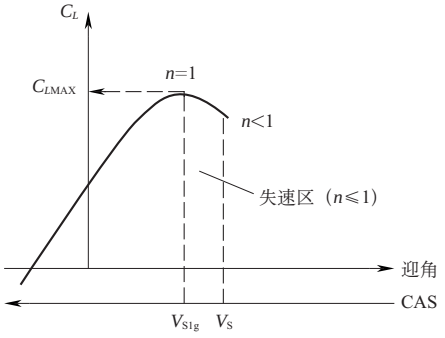

图 3　V_{Slg} 和 V_S 关系图

Fig.3　Relationship between V_{Slg} and V_S

4 飞机起降速度

飞机的起降阶段是飞机的事故高发阶段之一，飞机的起降特征速度（V_1，V_R，V_2 等）是飞机起降过程中的重要参数，飞机设计过程中必须确定相关起降速度，确保飞机具有安全起降的最小能力。

4.1 主要起飞速度及关系

与飞机起飞相关的特征速度 V_{EF}，V_1，V_2，V_R，V_{LOF}，V_{MU}，V_{MCA}，V_{MCG} 等，均为校正空速。其中 V_1，V_R，V_2 也是使用过程中的重要操作速度，但这些速度在用户手册中为指示空速，与设计值有一定余量，确保使用安全。

25.107 规定的起飞特征速度包括：

（1）发动机失效速度 V_{EF} 是飞机在起飞过程中临界发动机突然失效时的速度。

（2）起飞决断速度 V_1 是在起飞中，在加速－停止距离内，当临界发动机突然失效后，飞行员必须第一时间采取行动（如使用刹车、减小推力、展开减速板）停止飞机的最大速度。

（3）安全起飞速度 V_2 是单发故障时，在高出跑道表面 10.7m 处必须达到 25.121（d）爬升梯度的速度。

（4）抬轮速度 V_R 是飞行员开始抬前轮的速度。

（5）腾空速度 V_{LOF} 为飞机刚离地升空时的速度。

（6）最小离地速度 V_{MU} 是飞机能安全离地的最小速度。

（7）最终起飞速度 V_{FTO} 是在航路构型状态、单发失效情况下，在起飞航迹终点飞机的速度。

25.149 规定空中最小操纵速度 V_{MC}/V_{MCA} 是当临界发动机突然停车时，能在该发动机继续停车情况下保持对飞机的操纵，并维持坡度不大于 5° 的直线飞行的速度。地面最小操纵速度 V_{MCG} 是起飞滑跑期间，临界发动机突然停车时，能仅用气动操纵装置将飞机航迹恢复并保持航迹上任一点偏离跑道中心线距离不大于 9m 范围内的速度。

经分析，各起飞特征速度之间的关系如图 4 所示。

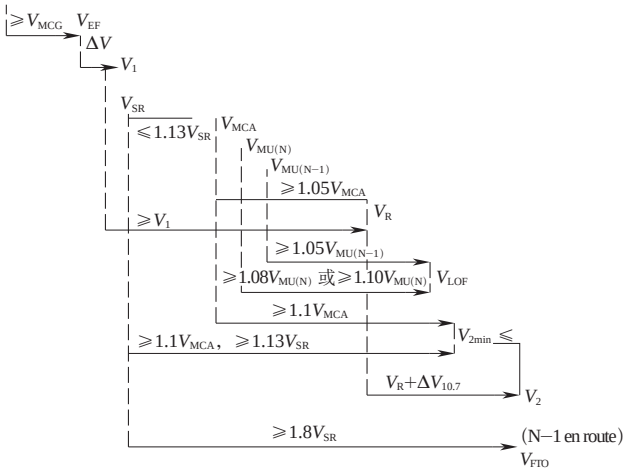

图 4　起飞速度大小关系

Fig.4　Relationship between takeoff airspeeds

4.2 主要着陆速度及关系

与飞机降落相关的特征速度主要有 V_{REF}，V_{MCL} 和 V_{MCL-2}，均为校正空速。

25.125（b）（2）规定基准着陆速度 V_{REF} 指规定着陆形态下，在 15m 高度的稳定进场速度。在非结冰条件下，V_{REF} 不得小于 $1.23V_{SR0}$ 或 V_{MCL} 或提供第 25.143（h）条规定的机动能力的速度。

25.149（f）规定 V_{MCL} 为全发工作着陆进场期间的最小操纵速度。在此速度，临界发动机突然停车时，能在该发动机继续停车的情况下保持对飞机的操纵，并维持坡度不大于 5° 的直线飞行。25.149（g）规定 V_{MCL-2} 为三发或三发以上飞机，一台临界发动机停车时进场和着陆进场期间的最小操纵速度。在此速度，当第二台临界发动机突然停车时，能在这两台发动机继续停车的情况下保持对飞机的操纵，并维持坡度不大于 5° 的直线飞行。V_{REF} 与 V_{MCL} 的关系为 V_{REF} 不小于 V_{MCL}。

5 设计空速

设计空速是飞机强度设计条件，在各设计空速上，强度都应满足要求。25.335 规定了 6 个设计空速，V_C，V_D，V_A，V_B，V_F 和 V_{DD}，均为当量空速。

5.1 设计巡航速度 V_C

25.335（a）规定 V_C 为从强度上考虑为应付大气湍流，特别是迎面突风造成的意外速度增加而规定的在正常使用中（包括下滑）不能超过的速度。一般情况下，V_C 不得小于 V_B 加上 $1.32U_{ref}$（参考突风速度）。

5.2 设计俯冲速度 V_D

25.335（b）规定 V_D 为保证飞机在机动中突然俯冲但能维持飞机安全而规定的一个限制速度。必须满足 V_C 不大于 $0.8V_D$ 或 Ma_C 不大于 $0.8Ma_D$，或者 V_C/Ma_C 和 V_D/Ma_D 之间的最小速度余量 ΔV 为 V_C/Ma_C 从定常飞行开始加上以 7.5° 俯冲角飞行 20s 后以 1.5 载荷因数拉起后所达到的速度增量与应付大气条件变动引起的速度增量中的大者。在设计巡航马赫数 Ma_C 受压缩性效应限制的高度上，设计俯冲马赫数 Ma_D 与 Ma_C 的最小余量 ΔMa 不得小于 $Ma0.07$，任何情况下，ΔMa 不得小于 $Ma0.05$。

5.3 设计机动速度 V_A

25.335（c）规定 V_A 是飞机急剧俯仰机动（急偏升降舵）时的规定速度。V_A 需不小于 $V_{S1}\sqrt{n}$，其中，n 为 V_C 时的正限制机动载荷系数；V_{S1} 为襟翼收起形态的失速速度。V_A 不必大于 V_C 或同正 C_{Nmax} 曲线与正机动载荷因数线交点相对应的速度二者中的最小值。

5.4 对应最大突风强度的设计速度 V_B

25.335（d）规定 V_B 是为了保证飞机的安全而确定的当飞机遭遇最强突风时飞机仍能安全飞行的速度。采用法定计量单位，V_B 为：

$$V_B \geq V_{S1}\left(\frac{K_g U_{ref} V_C a}{16W}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

式中：V_{S1} 为襟翼收起形态的 1g 失速速度；U_{ref} 为 25.341（a）（5）（i）规定的参考突风速度；W 为平均机翼载荷；K_g 按 25.335（d）中的规定。

5.5 设计襟翼速度 V_F

25.335（e）规定 V_F 为飞机在起飞、进场或着陆各阶段，为了考虑突风等因素或襟翼位置的变化所引起的飞行速度增加而在设计中规定对应每一襟翼位置的飞行速度。V_F 必须充分大于各对应飞行阶段所推荐的飞行速度。襟翼在最大起飞重量（质量）起飞时的位置，V_F 不小于 $1.6V_{S1}$；襟翼在最大着陆重量进场和着陆时的位置，V_F 分别不小于 $1.8V_{S1}$ 和 $1.8V_{S0}$。

5.6 设计阻力装置速度 V_{DD}

25.335（f）规定 V_{DD} 为对每一阻力装置所选定的设计速度。V_{DD} 须充分大于使用该装置时所推荐的速度，以计及速度控制的预期变化。对于供高速下降时使用的阻力装置，V_{DD} 不得小于 V_D。

5.7 各设计空速的关系

根据 25.333 条中的飞行机动包线图和 25.335 中的规定，可得出各设计空速的大小关系为：

$$V_F < V_A < V_C < V_D < V_{DD} \tag{10}$$

可见，除 V_B 外，V_A，V_C，V_D，V_F 和 V_{DD} 间有明确的大小关系，V_C 最小值充分大于 V_B。

6 飞机使用限制速度

从飞机结构完整性和操纵性等方面考虑，需要制定飞机在使用过程中进行飞行操作必须遵守的各种限制速度，体现在飞行手册中，由 IAS 表示。

6.1 最大操作限制速度 V_{MO} 或 Ma_{MO}

25.1505 条规定 V_{MO} 或 Ma_{MO} 是在任何飞行阶段（爬升、巡航或下降）都不能故意超过的速度，但在试飞或驾驶员训练飞行中，经批准可以使用更大的速度。V_{MO}/Ma_{MO} 必须制定成不高于 V_C，并充分低于 V_D/Ma_D 或演示飞行俯冲速度 V_{DF}/Ma_{DF}，使得飞行中极不可能无意中超过 V_D/Ma_D 或

V_{DF}/Ma_{DF}。

6.2 襟翼展态速度 V_{FE}

25.1511 条规定 V_{FE} 为襟翼处于各种规定的放下位置、各种飞行阶段（起飞 / 进场 / 着陆等）所允许使用的最大飞行速度。V_{FE} 不得超过按 25.335（e）条和 25.345 条选定的设计襟翼速度 V_F。

6.3 起落架收放速度 V_{LO} 和起落架伸态速度 V_{LE}

25.1515 条规定 V_{LO} 为进行起落架收起或放下操纵时的飞行速度。V_{LO} 不能超过按 25.729 条和由飞行性能所确定的安全收放起落架的速度。若收放轮速度不同，则分别记为 $V_{LO\,(EXT)}$ 和 $V_{LO\,(RET)}$。V_{LE} 为起落架在放下状态时的飞行速度。V_{LE} 不能超过起落架锁定在完全放下位置时能安全飞行的速度和按 25.729 条确定的速度。如超过 V_{LO} 进行起落架收放操作或超过 V_{LE} 带起落架飞行（起落架锁定在全伸状态），将有可能导致起落架收放机构、起落架定位锁定或舱门结构因超载而破坏。

6.4 颠簸气流速度 V_{RA}

25.1517 规定 V_{RA} 为 25.1585（a）（8）所要求的穿越湍流的空速。V_{RA} 不大于 V_B，并且不小于 V_B 最小值，并且充分小于 V_{MO}，以确保在遭遇湍流时很可能发生的空速改变不会导致过速警告的频繁发生。如果选取其他值缺少合理依据，V_{RA} 必须小于 V_{MO} 减 35kn（TAS）。

7 CCAR-25-R4 中速度关系

根据上文的描述，CCAR-25-R4 中的每个速度并不是孤立的，有的速度间有着直接的倍数关系，有的速度有着间接的联系。经总结分析，各速度在一般飞行航迹中的关系和各速度关系网络图，如图 5 和图 6 所示。

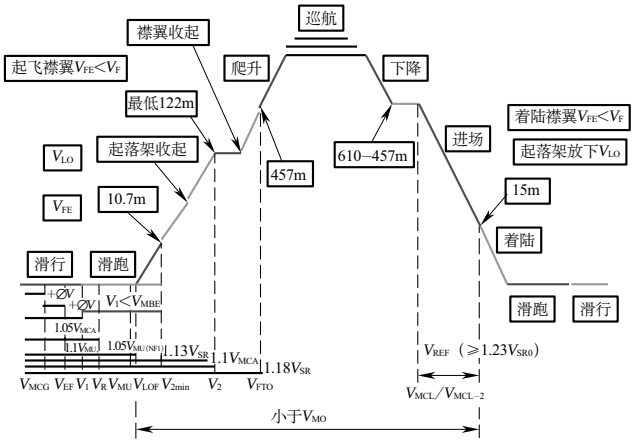

图 5　飞行航迹中的速度

Fig.5　Airspeeds in the flight path

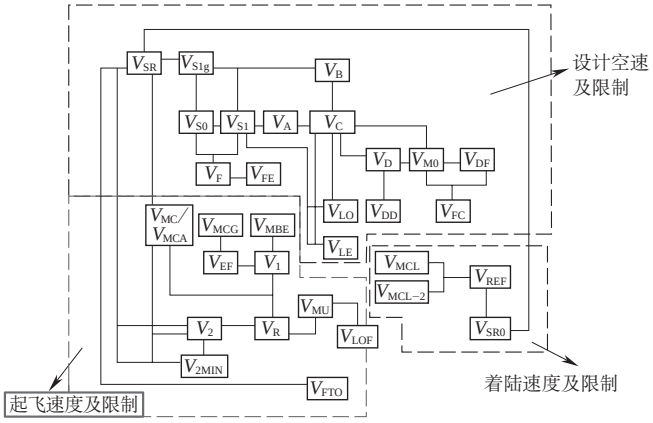

图 6　25 部中的速度关系图

Fig.6　Relationship between airspeeds in Part25

8 型号应用实例

V_D 与 V_C 之间的最小速度余量（$\Delta V/\Delta Ma$）是考虑飞机紧急情况下沿着较陡的航迹下滑时能维持飞机结构安全的速度增量。V_D 与 V_C 之间应设定合理的余量，若余量定的太小，不能满足应急情况的飞行要求，超速会导致飞机有超载解体的危险。若余量定的过大，实际下滑时达不到，则会使相应的强度设计太保守。某型飞机设计过程中，为降低飞行载荷，减轻结构重量，初期根据经验将 ΔV 确定为 60km/h，经计算不满足 25.335（b）要求。后将 ΔV 改为 90km/h，经再次计算检查，可满足飞机紧急下滑所需速度增量。在 Ma_C 受限制的高度上，ΔMa 确定为 Ma0.06，经计算分析能够满足超速改出要求。另外，飞机飞行控制系统还具有超速自动防护功能（系统失效概率小于 10^{-5}/ 飞行小时），能在飞机超过 V_{MO} 后阻止飞机俯冲，防止超过确定的 $\Delta V/\Delta Ma$。此外，飞机驾驶舱有 V_{MO} 显示，飞行手册中有 V_{MO} 说明。如果高速保护系统失效，驾驶舱有告警。因此，设计能确保飞行安全。

9 结束语

本文按照各种速度的用途，将 CCAR-25-R4 中的速度分为飞机失速速度、设计空速、起降速度和限制速度，而这些速度用考虑了不同修正因素的不同速度类型表示。其中失速速度和起降速度为 CAS，设计空速为 EAS，手册中的限制速度为 IAS。本文集中给出了这些速度的含义、关系和型号应用实例，可以辅助对速度相关条款内涵的深入理解。另外，制定各个速度和速度余量关系的深层原因以及如何验证速度条款的符合性是需进一步研究的问题。

参考文献

[1] 中国民用航空局 . CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准 [S]. 北京：中国民用航空局，2016.
CAAC. CCAR-25-R4 Airworthiness standards of transport aircraft[S].Beijing：CAAC，2016.（in Chinese）

[2] 钟近曦 . 飞行力学中的几个速度 [J]. 民用飞机设计与研究，1988（4）：15-18.
Zhong Jinxi. Several speeds in flight mechanics[J].Civil Aircraft Design & Research，1988（4）：15-18.（in Chinese）

[3] 张琛 . 民用运输类飞机指示空速和当量空速对飞机系统影响分析 [J]. 科技资讯，2015（18）：112-113.
Zhang Chen. Influence of IAS and EAS of civil aircraft on aircraft system[J].Science & Technology Information，2015（18）：112-113.（in Chinese）

[4] European Aviation Safety Agency. Certification specification-definition[S]. Cologne：European Aviation Safety Agency，2017.

[5] 空中客车公司 . 掌握飞机的性能 [Z]. 空中客车公司，2002.
Airbus. Getting to grips with aircraft performance[Z].Airbus，2002.（in Chinese）

[6] Federal Aviation Administration. Federal Aviation Regulations Part25 Airworthiness standards：Transport category airplanes[S]. Washington：Federal Aviation Administration，2017.

[7] 中国民用航空局 . CCAR-25-R3 运输类飞机适航标准 [S]. 北京：中国民用航空局，2011.
CAAC. CCAR-25-R3 Airworthiness standards of transport aircraft[S].Beijing：CAAC，2011.（in Chinese）

作者简介

邱朝群（1986- ） 女，硕士，工程师。主要研究方向：飞机总体气动和动力系统适航设计和验证。

Tel：029-86832107

E-mail：qiuchaoqun91@163.com

Analysis and Application of Transport Aircraft Airspeeds in CCAR-25-R4

Qiu Chaoqun*

The First Aircraft Institute of AVIC，Xi'an 710089，China

Abstract: A variety of airspeeds have tight relationship with flight safety，which are closely related to flight performance，flying quality，strength and flight navigation of aircraft. CCAR-25-R4 defines a series of design and operation airspeeds which should be established during aircraft development phase，in terms of different airspeed types. The meaning and usage of airspeed vary with airspeed type and name. For instance，takeoff safety speed V_2 and the reference stall speed V_{SR} are to ensure the aircraft to take off safely and fly stably. The design cruising speed V_C and design maneuvering speed V_A are to ensure the strength of aircraft in defined flight conditions. The airspeeds defined in CCAR-25-R4 were systematically analyzed，the meaning of general airspeed types，stall speed，taking off and landing speeds，design speeds and limit speeds and correlation between them were illustrated and explored respectively. Besides，the examples of V_C 和 V_D design and operation speeds display in the cockpit were illustrated.

Key Words: transport aircraft; airspeed; airworthiness; airspeed types; design airspeed

Received: 2018-01-25； **Revised:** 2018-03-02； **Accepted:** 2018-04-02

***Corresponding author. Tel.:** 029-86832107 **E-mail:** qiuchaoqun91@163.com