

民用飞机重心包线研究

王小平

(上海飞机设计研究院总体气动设计研究部,上海 200235)

Civil aircraft CG envelope Research

Wang Xiaoping

(General Configuration and Aerodynamics Department of SADRI, Shanghai 200235, China)

摘要:民用飞机重心包线是保证飞机使用安全的重要防线,是飞机飞行使用中不可逾越的一道屏障。重心包线设计的好坏不仅影响飞机的飞行性能,更直接影响飞机使用的经济性和安全性,其确定是总体、气动、操稳、性能、强度、重量等多专业分析、权衡的结果。从重心对性能的影响,重心限制边界分析及如何设计好重心包线三个方面进行了较系统的分析研究,为民用飞机重心及重心包线的设计提供借鉴和参考。

关键词:重心包线;性能影响;限制分析;重心设计

【Abstract】 The CG envelope of civil aircraft is the security of safe use of aircraft. It is an insurmountable boundary of plane in flight. The design quality of CG envelope does not only affect the flight performance of aircraft, but also its economy and security. Its determination requires the multi-disciplinary trade-offs of General Configuration, aerodynamics, stability, maneuverability, performance, strength, weight and etc. This article, which gives brief analysis on the influence of CG on the performance, the constraints of CG boundary and how to design a good CG envelope, provides reference on the design of CG and CG envelope of civil aircraft.

【Key words】 CG envelope; influence of performance; limits analyze; CG design

0 引言

民用飞机重心包线是指民用飞机在各飞行使用阶段中,允许使用的所有重心位置包络线,是民用飞机飞行使用中不可逾越的一道屏障。飞机重心位置直接影响飞机的飞行性能和操作使用安全。从飞行性能角度看,不同的飞机使用重心,对飞机各飞行阶段性能均会产生不同程度的影响,其总体趋势是,重心越靠后,飞机性能越好;重心越靠前,飞机性能越差。但飞机使用重心位置受到飞机的飞行操纵要求、装载操作使用和结构强度等条件限制。(1)在安全性方面,飞机重心是保证飞机安全飞行的重要因素,重心包线的所有重心点均要能满足飞机在所有飞行阶段的安全、可靠操纵飞行;(2)在装载操作使用方面,为了尽可能减少装载限制,方便操作使用,希望重心包线尽可能宽;(3)在结构强度方面,由于飞机重心直接影响起飞、着陆过程中前、主起落架系统的载荷分配,重心包线必须要保证起落系统满足结构强度的设计要求等。所以重心包线设计是集飞行性能、飞行操纵稳定性、装载操作使用和结构强度等的综合权衡优化结果,是气动布局、总体布置、性能、操稳、载荷、系统设备、航电电气及结构强度等多专业集体智慧的结晶。下面从重心对飞行性能的影响、重心包线的约束分析及如何设计好重心包线三个方面对民用飞机重心包线作一简要的分析

研究。

1 重心对飞行性能的影响

飞机重心对飞行性能的影响随着起飞、巡航和着陆等不同飞行阶段的变化而变化,但主要还是因为重心位置的变化将使纵向配平特性发生变化,重心越往后,需要的纵向配平力矩越小,由配平引起的升力损失就越少。在相同条件下,飞机保持稳定飞行所需的升力越小,从而使飞机的失速速度降低。

有资料显示:A340飞机采用26%RC(平均气动弦)基准重心的失速速度(V_s)比采用18%RC前重心的失速速度小1.5kts。

1.1 起飞性能的影响

飞机的起飞速度(V_2)与失速速度(V_s)有如下关系:

在起飞阶段: $V_2 \geq 1.2V_s$ 。

失速速度越小,则起飞速度越小,所需的起飞距离(TOD)越短,即:

$V_s \rightarrow V_2 \rightarrow \text{TOD}$

同理,在保持起飞距离不变的条件下,起飞速度越小,则允许的起飞重量越大。所以,在相同条件下,飞机的起飞重心越靠后,飞机所需的起飞距离越短,起飞重量越大。

重心往后,也有利起飞抬前轮和起飞爬升性能

1.2 巡航性能的影响

在巡航阶段,重心往前,则配平导致飞行升力减少,阻力增加,从而增加燃油消耗;反之,重心往后,可降低燃油消耗。表 1 为空客的几个主要型号在 1 000Nm条件下,使用 25% RC 重心比使用 35% RC 重心需多消耗的燃油量数据。

表 1 不同重心位置对燃油消耗的差量

机型	A330	A340	A310	A300-600
燃油消耗差量(Kg)	220	380	250	230

1.3 着陆性能影响

飞机的着陆速度(V_{app})与失速速度(V_s)有如下关系:

在着陆阶段: $V_{app} \geq 1.3V_s$ 。

失速速度越小,则着陆速度越小,所需的着陆距离(LD)越短,即:

$V_{app} \rightarrow V_2 \rightarrow LD$

同理,在保持着陆距离不变的条件下,着陆速度越小,则允许的着陆重量越大。所以,在相同条件下,飞机的着陆重心越靠后,飞机所需的着陆距离越短,着陆重量越大。

有资料显示:对于 A320 系列飞机,当使用前重心(15% RC)进行着陆时,其着陆距离应在基准重心(25% RC)的着陆距离基础上增加 2%。

由此可见,如果单纯考虑飞行性能,重心越往后,飞行性能越好。

2 重心限制边界的确定

重心限制边界是指在不同飞行阶段、不同使用重量条件下,飞机允许使用的前、后重心极限位置,重心包线不能超越重心限制边界。

2.1 重心限制边界的确定原则

飞机重心限制边界的确定主要基于以下几个方面:

- (1) 结构强度的限制;
- (2) 飞机的操作使用要求;
- (3) 飞机性能和飞机装载的权衡;
- (4) 适航条例对重心的要求等。

2.2 重心限制边界的主要约束

重心限制边界主要是保证飞机在边界线以内飞行时的操作使用安全,因此必须通过重心对结构强度、操纵性、稳定性等方面影响进行分析,确定飞机在保证安全条件下允许使用的前、后重心极限位置。表 2 对确定飞机前、后重心限制边界的主要约束条件按起飞、飞行和着陆三个不同飞行使用阶段进行了归纳总结,它们中既有相同约束条件,也有不同限制要求,但都是飞机安全使用必须保证的基本要求。

表 2 前、后使用重心边界约束

	前重心边界约束	后重心边界约束
起飞阶段	前起载荷要求(大起飞重量) 起飞抬前轮的操纵能力 安全操纵要求(升降舵最大偏度+操纵裕度) 最大过载时的升降舵操纵能力	主起载荷要求(大起飞重量) 前起的地面操控性要求 防侧角大于擦地角要求 气动焦点位置 1°/g 重心点位置
飞行阶段	安全操纵要求(升降舵最大偏度+操纵裕度) 最大过载时的升降舵操纵能力 平尾不失速的最大操纵能力	气动焦点位置 1°/g 重心点位置 复飞时的升降舵操纵能力 极限攻角下的升降舵操纵能力
着陆阶段	前起载荷要求(大起飞重量) 安全操纵要求(升降舵最大偏度+操纵裕度) 最大过载时的升降舵操纵能力 平尾不失速的最大操纵能力	主起载荷要求(大起飞重量) 气动焦点位置 1°/g 重心点位置 复飞时的升降舵操纵能力 极限攻角下的升降舵操纵能力

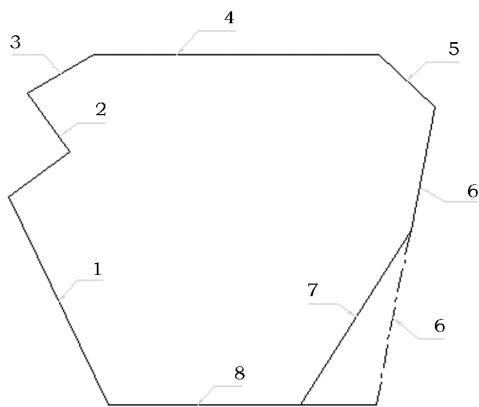
2.3 重心包线的构建

飞机性能要求飞机重心往后,但从飞行使用、装载和乘客乘坐方便性上又希望飞行使用重心范围越大越好,因此飞行使用重心包线是飞行性能与操作

使用的权衡结果。一般情况下,在飞机性能和飞机安全允许条件下,重心包线应尽可能宽,以减少对飞机装载操作的约束和限制。

图 1 为重心包线典型示意图以及各边界线段的

主要权衡确定方法。



线 1:性能和装载权衡确定;线 2:飞机实际重心位置确定 ;线 3:前轮载荷限制;线 4:最大起飞设计重量;线 5:主轮载荷限制;线 6:操纵能力限制(复飞和极限攻角飞行等);线 7:前轮地面操控性;线 8:最小飞行重量

图 1 重心包线示意图

3 如何设计好重心包线

设计好民用飞机的重心包线是提高民机使用经济性和飞机操作安全性的重要环节,必须从飞机概念设计时就开始重视,要设计好重心包线,主要应从下列几个方面着手。

3.1 使用空机重心位置

对于民用飞机来说,飞机有效载荷(商载和燃油)在飞机起飞重量中占比较大(一般在 40% 以上),不同商载量(货物、人员和行李)、不同装载过程和不同燃油加载及消耗将产生不同的飞机重心,而重心包线应尽可能地包容这些重心点,使飞机在使用中受到的装载限制尽可能少,而这些重心变化的基础是使用空机重心,所以要控制好飞机的重心包线,首先要设计好飞机的使用空机重心。

如前所述,飞机性能希望飞机重心越靠后越好,所以在保证飞行安全的情况下,应尽可能把飞机设计的使用空机重心往后,从而也使重心包线整体后移。随着电传飞控技术的发展,这种趋势得到进一步贯彻。较早的波音 737 系列飞机,使用空机重心在 20% RC 左右,而 A320 系列飞机,使用空机重心已后移至 30% RC 左右,对于 A380 这种新一代飞机,据说使用空机重心已后移至 35% RC 左右。

3.2 平尾设计

平尾及升降舵是飞机实现纵向操纵的主要手段。从重心边界约束要求可知,平尾及升降舵的操纵能力、操纵效率及失速特性是飞机重心包线的主要约束限制。若采用大尾容量设计,平尾的配平能

力强,重心包线将变宽,但平尾的结构重量也增大;若采用小尾容量设计,平尾结构重量轻了,但由于配平能力弱,重心包线将变窄,从而限制了飞机装载使用。只有采用平尾优化设计技术,通过提高平尾的气动效率、改善平尾的失速特性等先进设计手段,才是保证设计好重心包线的重要途径。但是通过将使用空机重心往后移,减少飞机操纵裕度,提高平尾和升降舵操纵效率,则更是一举多得的好措施。

从 A320 和波音 737 二个型号就可以看出,虽然两个型号的使用包线范围宽度基本一致,由于 A320 的使用空机重心往后,所以 A320 的平尾面积比波音 737 小约 7%,而尾容量小了约 12%。

3.3 总体气动布局

飞机的使用空机重心位置及装载过程的重心变化范围主要取决于飞机的气动布局和总体布置,当飞机的气动布局和总体布置确定以后,飞机的使用空机重心也基本确定,重心随有效载荷变化的规律和范围也基本确定。要想改变它们的重心位置,只有通过调整耗油次序及规定装载程序。调整耗油次序将受到燃油系统设计条件限制,有很大的局限性;规定装载程序将使飞机在操作使用中受到制约,也会降低飞机的安全性。

在起飞和着陆过程中,飞机轮载能力限制了飞机的前后重心位置,轮载的大小与起落架的布局直接相关。所以在进行飞机的总体气动布局设计时,应把飞机使用重心设计作为飞机设计的一项重要和关键内容进行确定和设计,从而提高飞机在飞行过程中的安全性和效率。

表 3 使用空机重心与重心包线对照表

	使用空机重心位置	飞行重心包线
A320 飞机	~30% RC	13% RC~45% RC
波音 787-800 飞机	~20% RC	5% RC~36% RC

4 结论

本文从重心对性能的影响,重心限制边界分析以及如何设计好重心包线三个方面对重心包线的相关内容进行了简要而较系统的分析研究。研究表明,重心包线不仅仅是重量工作者对重心工作的计算和分析,更是飞行使用安全的重要保护线,同时对飞机性能和使用装载操作均产生不同程度的影响,是飞机设计的一项关键而重要的内容,需要多专业的共同努力。

(下转第 56 页)

下,根据文件的描述执行维修程序以确保程序可靠性的一种方法。持续适航文件验证的目的是确定操作程序能否按文件中所写的内容安全有效地得以执行。虽然部分制造商曾经进行过相关验证工作,但由于验证工作的不系统性,验证人员与勤务人员在自身特点、经验等方面存在较大差异以及验证的环境、工装、设备等与航线实际情况不同等各种原因,并不能表明其验证结果与实际航线情况一致。

但尽管目前验证还存在不少问题,制造商仍应积极开展相关工作,并制定详细完善的验证程序和流程,以确保操作程序的可用性。当然,也并非所有的维修程序都需要进行实际操作验证。出于安全、经济等方面因素的考虑,除与安全相关或经常执行的程序需进行操作验证外,对于一些与安全联系不紧密或极少使用的操作程序,也可采用书面验证或模拟计算等验证方法,并与实际操作验证构成一套完整的验证工具。

3.3 构建问题数据库,跟踪并分析持续适航文件的可靠性

对于一个飞机系统,收集和分析其在飞机运行过程中的数据是判断其可靠性的一个重要方面。而对于持续适航文件,建立一个包括所有用户问题报告、问题处理情况以及其他后续信息的问题数据库,对于跟踪文件的可靠性也至关重要。

大多数制造商都将用户的反馈作为持续适航文件问题的发现机制。而在对用户提出的问题进行评估及文件更改后,删除相关问题报告来表明已完成问题处理。表面上看,文件的更改以用户提出的问题为依据,修订后的文件又重新分发给用户,文件的质量将逐步得到完善。然而,随着时间的推移,由于数据的缺失,将很难对过去的问题进行跟踪,制造

商、运营人乃至整个工业方将不得不付出巨大的代价来一次次处理相似的问题。反之,问题数据库的建立,作为一种有效的质量控制方法,可帮助制造商大幅减少相似问题的识别和验证所占用的资源。而运营人也可通过问题报告解决其实际工作中的困难。

4 结论

持续适航文件作为指导用户使用和维护飞机的重要资料,在运行飞机的维护和维修工作中起着至关重要的作用。本文对影响持续适航文件质量和可用性的主要人为因素进行了阐述和分析,并对如何改进工作流程及验证实施方法等方面给出建议。其中,部分改进只需在现有程序的基础上进行优化,而对于维修程序的验证,则需要制造商、运营人和适航当局进行协作研究,并确定具体的工作程序和流程。但不管是优化和还是改进,对于制造商现有的工作体系都提出了巨大的挑战。然而从长远来看,持续适航文件可用性的改善,无论在提高用户满意度方面,还是在降低维修成本方面,都将取得明显的成效。

参考文献:

- [1] AC-91-11 航空器的持续适航文件.
- [2] DOT/FAA/AR-01/43 Manual Development Procedures.
- [3] DOT/FAA/AR-02/34 User Evaluation of Maintenance Documents.
- [4] Federal Aviation Administration/Office of System Architecture and Investment Analysis.
- [5] DOT/FAA/AR-02/123 Final Report and Recommendations.

(上接第 12 页)

在以往的型号研制中,常常由于在飞机的前期设计时不重视飞机重心及重心包线研究工作,从而导致飞机使用操作性和经济性的降低,甚至导致飞机方案的调整和修改,进而不得不增加研制经费,影响研制进度。

希望本文能为民用飞机重心及重心包线的设计提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 飞机设计手册第 8 册,重量平衡与控制.北京:航空工业出版社,1999.
- [2] 飞机设计手册第 5 册,民用飞机总体设计.北京:航空工业出版社,2002.
- [3] 方宝瑞.飞机气动布局设计[M].北京:航空工业出版社,1997.