

飞机安全服役包线的建立

何宇廷

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:针对提高飞机的服役安全性,提出了飞机设计安全性、飞机服役安全性和飞机安全服役包线的概念。分析了飞机安全服役包线的体系结构和内涵,初步建立了飞机安全服役包线,并探讨了飞机安全服役包线在保证飞机服役安全方面的应用。按照安全服役包线对飞机进行使用和管理,能够有效提高飞机的服役安全性。

关键词:飞机设计安全性;飞机服役安全性;飞机安全服役包线

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.02.001

中图分类号: V328.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)02-0001-05

一个多世纪以来,飞行事故一直伴随着人类的航空事业。统计结果显示^[1],飞机失事,由飞行员操纵不当引起的约占48.6%,由维修人员操纵不当引起的约占15%,由飞机本身稳定性、可靠性、安全性不够等质量问题而导致飞机结构或其他机载系统失效所引起的约占26.4%。可见,飞机失事大多是在超出其服役的某种使用限制后发生的,而适航管理^[2]并不能完全解决这一问题。为了保证飞机服役安全,本文提出了飞机设计安全性、飞机服役安全性和飞机安全服役包线等概念,并初步探讨了安全服役包线的建立方法及其在保证安全方面的应用。

1 飞机安全服役包线的相关概念

系统安全性是指系统不发生造成人员伤亡、职业病、设备损坏或财产损失的一个或一系列意外事件的能力^[3]。飞机是一个大型的复杂系统,因此,可以得到如下概念:

服役:指装备从交付用户列装到报废注销的全寿命周期内的储藏、使用、维修保障和报废处置等一切活动过程。飞机的服役过程可分为飞行过程和地面维修保障过程(包括储藏和报废处置过程)。

飞机安全性:指飞机在规定的条件下、规定的时间内服役时,不发生事故的能力,可以分为飞机固有安全性(设计安全性)和飞机服役安全性。

飞机固有安全性(设计安全性)是指飞机在设计标准使用条件下和设计的使用周期内服役时,不发生人员伤亡、职业病、飞机损伤或毁坏等事故的能力,它是通过设计、制造固化到飞机上的,是飞机的一种固有特性。

飞机服役安全性是指飞机在实际服役使用条件下和周期内完成规定的任务和功能时,不发生事故的能力,它是飞机的一种服役使用特性。飞机服役安全性体现了飞机固有安全性在服役过程中的发挥水平。在理想情况下,飞机服役安全性水平可以达到飞机的固有安全性水平。在飞机的服役过程中,可以通过技术改进或提高人员的使用、维护保障水平来实现飞机的服役安全性增长。飞机服役安全性又可以分为飞机使用安全性(简称飞行安全性)与飞机维修保障安全性(简称维修安全性)。

飞机安全服役包线(简称飞机服役包线):指飞机在服役过程中一切可控、可变特性参数的安全变化范

* 收稿日期:2009-11-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975284);国防预研基金资助项目(513270501)

作者简介:何宇廷(1966-),男,四川阆中人,教授,博士生导师,主要从事飞行器可靠性与安全性研究。

E-mail:hyt666@tom.com

围的边界线,主要包括飞行包线与飞机结构寿命包线。飞机服役包线与飞机的设计质量密切相关。飞机在寿命周期内全任务阶段都必须处于其服役包线内,以保证服役安全,即:①论证阶段:据飞机的战术技术指标和任务性能,由用户方提出飞机服役包线要求;②设计阶段:设计方案必须满足飞机安全服役包线的要求;③试飞评估阶段:要验证飞机是否达到规定的安全服役包线;④服役使用阶段:需根据飞机的服役包线,给出安全使用大纲,从而提高飞机的服役安全性水平。因此,飞机安全服役包线是对现行适航条例中飞机使用限制的进一步概括、完善、深化与拓展。

2 飞机安全服役包线体系的建立

根据飞机安全服役包线的概念与内涵,该体系可以分为安全飞行包线体系和结构寿命包线体系,前者主要保证飞机单次任务飞行的安全性,后者主要保证飞机在整个寿命周期内的结构安全性。

2.1 飞机安全飞行包线体系

飞机在单次任务飞行中的安全状态主要由过载 n_y 、当量速度(表速) V_d 、迎角 α 以及高度 H 4 个参数决定,飞机安全飞行包线体系主要由起飞包线、平飞包线、机动飞行包线、任务飞行包线、着陆包线等构成。

2.1.1 起飞包线

在飞机起飞的过程中,起飞速度和机场所处海拔高度对起飞性能、飞机的安全性具有重要影响^[4]。因此选取飞机的离地当量速度 V_d 为横坐标,海拔高度 H 为纵坐标,对于一架型号、重量一定的飞机建立起飞包线,见图 1。

图中直线 FD 为由最大升力系数(考虑护尾包限制)决定的最小当量速度($V_{d \min-T}$);曲线 DCG 为飞机起落装置强度限制(如轮胎不发生爆破等)的最大当量速度, $V_{d \max 1-T}$ 为在海平面高度的机场上起飞滑行时的极限当量速度;直线 AB 为由最小升力系数所决定的最大当量速度($V_{d \max 2-T}$);随着高度的增加,发动机推力下降太多,飞机滑行到跑道尽头的最大滑行速度由跑道长度决定,曲线 ECB 为考虑跑道长度限制的最大当量速度。这些曲线和直线构成了一封闭的包线 $FECG$,限制飞机起飞所允许的状态参数,这条包线就是起飞包线。

2.1.2 平飞包线

在高度-速度平面上用最大平飞速度和最小平飞速度随高度的变化曲线给出飞机作等速直线水平飞行高度-速度范围,即为飞机的平飞包线^[4],见图 2。飞机的平飞最小速度不能小于飞机的失速速度,最大速度受动压、温度、稳定性和操控性等因素的控制。随着高度的增加,飞机的平飞速度范围急剧减小,其左、右边界最终在理论升限上相接于一点,此时飞机只能以与该点对应的唯一速度作平飞、下滑或减速飞行。

2.1.3 机动飞行包线

飞机在机动飞行的过程中,受最大使用过载、最大升力系数和最大飞行速压等参数的限制。以飞机过载 n_y 为纵轴,当量速度 V_d 为横轴,将上述限制绘制成图线,构成了一封闭包线 $ABCDEF$,见图 3,这条包线就是机动飞行包线^[5],它反映了飞机结构强度及临界飞行迎角的限制。

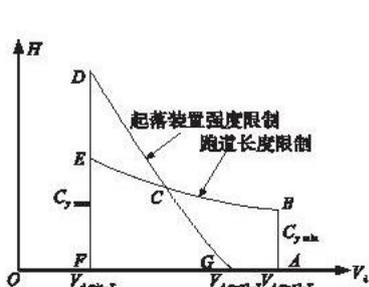


图 1 飞机的起飞包线

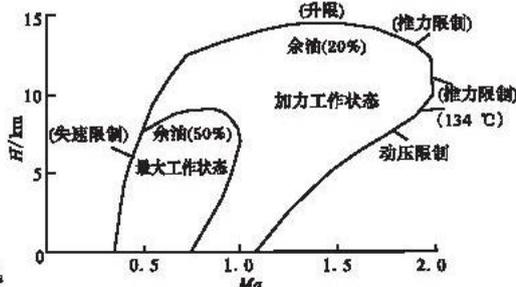


图 2 飞机的平飞包线

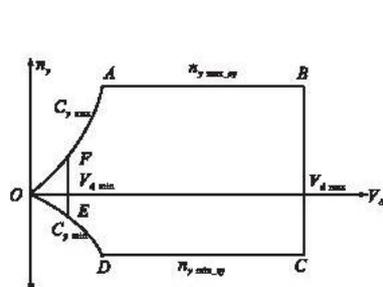


图 3 飞机的机动飞行包线

Fig. 1 Takeoff envelope for aircraft

Fig. 2 Level flight envelope for aircraft

Fig. 3 Maneuvering flight envelope for aircraft

2.1.4 任务飞行包线

机动飞行包线描述了飞机飞行状态参数极限边界。然而在具体的任务飞行中,飞机的使用还要受到其它因素的限制。例如当飞机进行正常盘旋任务飞行时,除受到飞机结构强度、人的生理承受能力和最大升力

系数的限制外,还受到发动机推力的限制^[4],此外为保证飞机在水平面内机动,飞机的过载必须大于 1。

取飞机的当量速度 V_d 为横轴、法向过载 n_y 为纵轴,将上述限制绘制成图 4(a),构成了一封闭的包线 $ABCDEF$,飞机在一定高度所允许的盘旋机动状态参数都在该包线内,这就是盘旋飞行包线。飞机执行不同的任务就可以得到很多类似的任务飞行包线。

任务飞行包线仅分析了飞机在一定高度下的状态参数边界,实际上飞机的机动飞行高度涵盖了从机动最小高度到最大高度之间的区间,因此需要建立一种比任务飞行包线更具有普遍意义的任务飞行包面,直观地表示出飞机在不同高度时过载和当量速度的允许范围。因此,在盘旋飞行包线的基础上,增加一条高度轴形成三维的空间坐标系,在垂直于高度轴的平面内建立飞机在相应高度上的正常盘旋任务飞行包线。盘旋飞行高度从最小高度(H_{min})到升限(H_{max})之间,随着高度的增加,发动机的推力减小,推力限制线不断下移;当高度达到升限时,推力限制线与 $n_y = 1$ 的最小过载限制线相切,切点 G 对应飞机在最大飞行高度时维持水平飞行的当量速度 V_{dHmax} 。在得到不同高度盘旋飞行包线的基础上,在这个三维坐标系中将若干包线合成盘旋飞行包面,见图 4(b)。显然,只要飞机的状态参数在盘旋飞行包面内,飞机就能够安全地完成盘旋机动飞行。

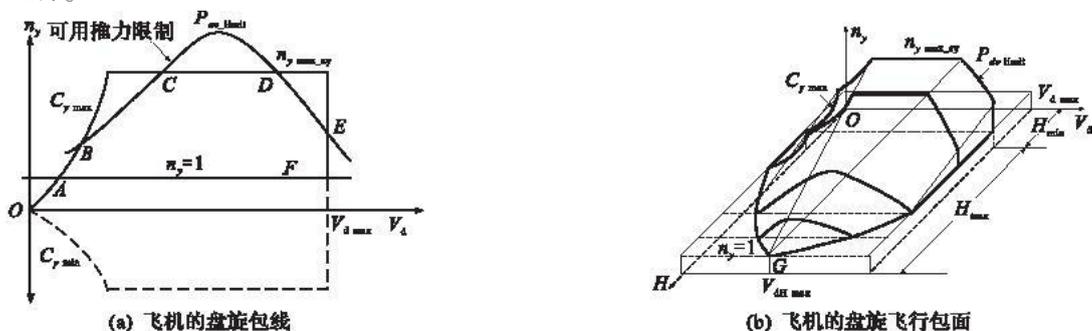


图 4 飞机的任务飞行包线

Fig. 4 Mission flight envelope for aircraft

2.1.5 着陆包线

与起飞一样,飞机的着陆性能也与着陆速度和机场所处海拔高度密切相关。因此选取飞机的接地当量速度 V_d 为横坐标,机场所处的海拔高度 H 为纵坐标,对于一架型号、重量一定的飞机建立着陆包线见图 5。

图中直线 AI 为由飞机能达到的最大升力系数(主起落架处于压缩状态)所决定的最小当量速度 (V_{dmin-L});直线 DG 为由最小升力系数所决定的最大当量速度 ($V_{dmax1-L}$);曲线 BCE 为由跑道长度所决定的最大允许当量速度;曲线 IGF 为起落装置(如轮胎等)所允许的最大当量速度。 $V_{dmax2-L}$ 和 $V_{dmax3-L}$ 分别为飞机在海平面高度的机场上着陆时考虑跑道长度限制和起落装置强度限制的最大允许接地当量速度(本文假设 $V_{dmax2-L} < V_{dmax3-L}$)。这些曲线和直线构成了一封闭的包线 $ABCD$,飞机着陆所允许的状态参数都在该包线内,这条包线就是着陆包线。

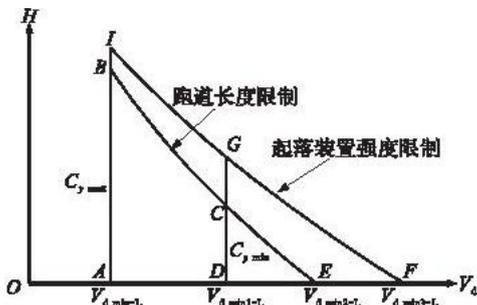


图 5 飞机的着陆包线

Fig. 5 Landing envelope for aircraft

2.2 飞机结构寿命包线体系

飞机结构寿命有一对指标:疲劳寿命(以飞行小时及起落次数表示)和日历寿命(以日历年限表示)。只有这 2 个指标在寿命包线体系以内时,才能保证飞机在整个寿命周期内的结构安全性。飞机结构寿命包线体系主要由结构寿命包线和寿命包面构成。

选取飞机结构的基准疲劳寿命值 N_0 为横坐标,飞机结构的基准日历寿命值 Y_0 为纵坐标,建立金属结构飞机的寿命包线,见图 6(a)^[6-7]。 B 点对应的 N_0 为不考虑环境作用的飞机结构疲劳寿命值; C 点对应的 Y_0 为飞机结构无疲劳载荷作用时的最大日历寿命值;曲线 BC 段表示日历寿命与疲劳寿命的相互影响关系,是飞机结构寿命的边界线。

寿命包线只探讨了基准使用条件下飞机结构寿命包线的概念和建立方法,而实际上飞机大多在非基准

使用条件下服役。对于一种特定的飞机来说,其服役区域相对固定,可以认为在整个寿命期内只经历一种腐蚀环境条件;而在服役过程中经历的飞行任务安排即载荷历程不固定,所以需要全面考虑不同疲劳载荷条件对应的载荷严重程度。为此,在飞机结构寿命包线的基础上,增加一条表示载荷谱强度的坐标轴,形成一个三维的空间坐标系,载荷谱强度反映了单位飞行时间对飞机结构(关键部位)造成的疲劳损伤的严重程度,随飞行任务的不同而不同。在取得对应于不同载荷谱强度下寿命包线的基础上,在这个新的空间坐标系中将得到的若干条寿命包线合成一个曲面,即寿命包面,见图6(b)。

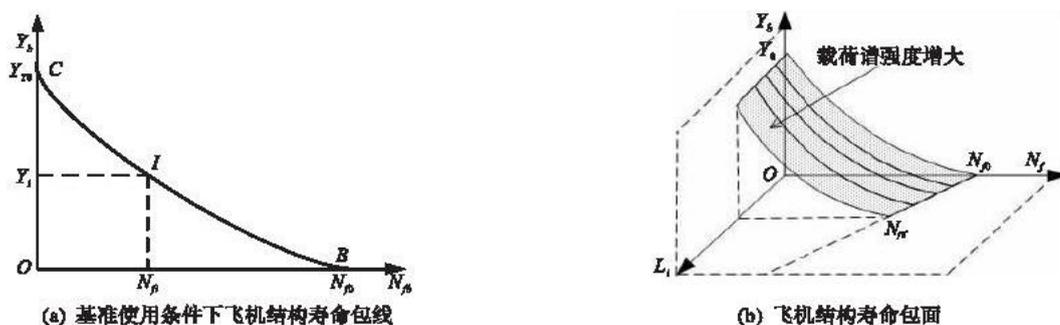


图6 飞机结构寿命包线体系

Fig. 6 Architecture of structural life envelope for aircraft

3 飞机安全服役包线的应用

3.1 飞机安全飞行包线体系的应用

在飞机的单次使用过程中,当过载、当量速度都在飞机安全飞行包线和包面所允许的范围内时,就可以保证飞机的任务飞行安全。例如,在飞机起飞过程中,只要根据图1中的飞机起飞包线,依据机场高度,在对应的离地速度范围内起飞就可以保证起飞安全。如果小于最小起飞速度就猛然拉杆起飞,则可能导致失速坠机;如果当量速度大于最大允许起飞速度,则飞机起落装置会发生破坏(如轮胎会发生爆裂等)或飞机冲出跑道,从而酿成事故。如果海拔高度超出了飞机起飞包线所允许的最大高度,则飞机不能起飞,若确需起飞,则需要通过延长跑道或增加发动机推力等措施来使起飞包线上移,使相应的海拔高度在起飞包线以内。飞机进行其它机动飞行时按照相应的安全服役包线进行使用,就可以保证单次飞行安全,进而保证飞机的使用安全性。

3.2 飞机结构寿命包线体系的应用

在飞机的整个服役使用期内,可以根据寿命包线体系对飞机结构进行单机寿命监控^[8-10]。首先根据飞机的实际飞行任务情况、腐蚀环境情况及飞行强度条件,在飞机结构寿命包面上查出飞机结构的固有疲劳寿命及日历寿命值;然后根据飞机结构在该使用条件下的服役时间计算出该时间段的使用对飞机结构造成的损伤量,并根据飞机在不同使用条件下的使用时间累计求出飞机结构的总损伤量;最后,依据线性累积损伤理论,当飞机结构的总损伤量为1时,飞机结构到寿。由于在建立寿命包面的过程中,综合考虑了疲劳寿命和日历寿命之间的相互影响,寿命边界合理,依据寿命包线体系对飞机结构进行维护管理,可以保证飞机在整个寿命期内的结构安全性。

4 结论

1) 针对提高飞机服役使用安全性的需求,提出了飞机设计安全性、飞机服役安全性和飞机安全服役包线的概念,并分析了飞机安全服役包线的内涵。

2) 探讨了安全服役包线的体系结构,研究了飞机安全服役包线的建立方法,并对安全服役包线的应用进行了初步探索。

3) 实际上随着飞机服役时间的延长,飞机结构及飞机各系统性能将会逐渐退化,飞机安全服役包线也是动态变化的,其有效范围缩小,在实际应用过程中,还需要做进一步研究。

参考文献:

- [1] 李学忠,张凤鸣,姚晓军. 空军安全发展论[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
LI Xuezhong, ZHANG Fengming, YAO Xiaojun. Safely Development Theory for Air Force[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [2] CCAR-25-R2-2005. 运输类飞机适航标准[S].
CCAR-25-R2-2005. Airworthy Standard for Transport Aircraft[S]. (in Chinese)
- [3] GJB 900-90. 系统安全性通用大纲[S].
GJB 900-90. General Program for System Safety[S]. (in Chinese)
- [4] 陈廷楠. 飞机飞行性能与控制[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
CHEN Tingnan. Flight Performance and Control of Aircraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [5] 李曙林. 飞机与发动机强度[M]. 北京:国防工业出版社,2007:16-19.
LI Shulin. Aircraft and Engine Strength[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007:16-19. (in Chinese)
- [6] 何宇廷. 飞机结构寿命包线的建立[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(6):4-6.
He Yuting. Establishment of Aircraft Structural Life Envelope[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2005, 6(6): 4-6. (in Chinese)
- [7] 何宇廷,范超华. 飞机结构寿命包线的确定方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(6):1-3.
HE Yuting, FAN Chaohua. Determination of Aircraft Structural Life Envelope[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2006, 7(6): 1-3. (in Chinese)
- [8] 何宇廷. 基于飞机结构寿命包线的飞机结构单机寿命监控[J]. 中国工程科学,2006,8(6):23-27.
HE Yuting. Service Life Supervision for Individual Aircraft Structural System Based on Aircraft Structural Life Envelope[J]. Engineering Science, 2006, 8(6): 23-27. (in Chinese)
- [9] He Yuting, Fan Chaohua, Zhang Hengxi. Fatigue Life Supervision of Aircraft Structures under Corrosive Conditions[J]. Key Engineering Materials, 2006(324-325): 703-706.
- [10] 何宇廷,范超华,李鸿鹏. 腐蚀环境下机械设备结构寿命的预测[J]. 材料研究学报,2007,21(S):314-318.
HE Yuting, FAN Chaohua, LI Hongpeng. On Prediction of Service Life of Mechanical Equipment Structure under Corrosive Conditions[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2007, 21(S): 314-318. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

Establishment of the Safe - Service - Envelope for Aircraft

HE Yu - ting

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to improve the service safety of aircraft, the concepts of Inherent Safety, Service - safety and Safe - service - envelope for aircraft are put forward. And, the architecture and connotation of the Safe - service - envelope for Aircraft (SSEA) are analyzed. The system of SSEA can be divided into Safe - flight Envelope system and Structural Life Envelope system for aircraft. Then the method to establish those envelopes is investigated, and the SSEA is built up. Besides, the application of the SSEA is discussed. The SSEA is a good development of usage restrictions which are incorporated in airworthy standard for aircraft. Utilizing SSEA in every phase of service, the safety of aircraft in missions and life - span can be greatly improved, and the service - safety for aircraft will also be promoted effectively.

Key words: inherent safety for aircraft; service - safety for aircraft; safe - service - envelope for aircraft