

民用飞机采用不同油箱分离面 对重量重心的影响

Influence of Different Arrangement of Tank for Civil Aircraft on the Weight and the Center of Gravity

赵俊辉 / Zhao Junhui

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

介绍了民用飞机整体油箱的布局形式和耗油顺序对飞机重量重心的影响,并对燃油箱设计时需要考虑的转子爆破、油箱惰化及结构疲劳等问题进行说明;提出了三种采用不同油箱分离面但采用相同耗油顺序的燃油箱,重点分析了燃油保持在外侧油箱对机翼根部弯矩的卸载作用和飞机重心在燃油消耗过程中的变化过程,并举例分析了三种油箱布局对典型装载的限制情况,为选择油箱分离面和选择耗油顺序提供相应的参考。

关键词: 油箱分离面;重量;重心;装载限制

[**Abstract**] The influence of the fuel tank arrangement and the refueling sequence on the weight and the center of gravity of civil aircraft are introduced, and the factors of rotor failure, inert fuel tank and structural fatigue which must be considered are illuminated when the fuel tank is designed; Three kinds of fuel tanks with different arrangement and same sequence are put forward. The balance effect of the outer tank fuel to the lift and the changes of center of gravity during refueling are analyzed. This paper gives examples to analyze the loading limit in the condition of three kinds of fuel tanks and offers some references to select the arrangement of fuel tank and the refueling sequence.

[**Key words**] Fuel Tank Interface; Weight; Center of Gravity; Loading Limit

0 引言

民用飞机作为客货运输的重要交通工具,其装载能力直接影响航空公司的运营效率和盈利能力,因此,在飞机设计之初,如何最大限度地提高飞机的装载能力是一项重要的考虑因素。

在飞机设计时,不同的油箱布置将对民用飞机的重量和重心产生较大的影响,尤其是对重心的影响,关系到重心包线中的装载限制。由于采用不同的油箱分离面会产生不同的燃油分布,在燃油消耗的过程中就会形成不同的耗油曲线,同时,油箱分离面不同也会影响到燃油系统和惰化系统的设计以及相关结构的布置。

本文主要分析在选择油箱分离面时需要考虑的因素,并针对同一种机型,着重分析采用不同的油箱分离面对飞机重量和重心的影响。

1 民用飞机整体油箱简介

民用飞机的油箱通常布置在机翼前后梁之间,采用整体油箱的形式,完整的油箱通常还包括隔舱和通气油箱。随着民用飞机航程的不断增大,燃油箱的体积越来越大,其布置形式也多种多样,目前民用飞机的整体油箱有两油箱布局、三油箱布局 and 五油箱布局,更大型的飞机油箱数目更多,有些还采用了辅助油箱的形式,油箱数量越多,耗油顺序就越复杂,重心也就复杂多变。因此,选择合理的

油箱布局和合理的燃油消耗顺序至关重要。

油箱不仅可以作为飞行用油的储存设备,同时在飞机设计过程中也可以作为调整重心的一种手段,比如飞机满油和无油状态的重心均在规定的界限内,但由于燃油消耗顺序设计不当,使用过程中随着燃油消耗,飞机的重心就可能超出重心前限或后限,此时即可调整耗油顺序使飞机重心随燃油消耗不致超出重心限制范围^[1]。另外,对于有些飞机,还可以通过加装配平油箱来调整飞机的重心位置。

整体油箱的设计是项复杂的工作,不仅受到防火防爆等因素的约束,同时也会影响到飞机的重量重心,油箱布置的合理与否将对燃油系统乃至整个飞机的可靠性和安全性产生较大的影响。

2 选取油箱分离面的考虑因素

2.1 转子爆破因素

适航规章中与转子爆破相关的规定如下^[2]:

CCAR25.901(c)规定:对于动力装置和辅助动力装置的安装,必须确认任何单个失效或故障或可能的失效组合都不会危及飞机的安全运行,但如果结构元件的破损概率极小,则这种破损不必考虑。

CCAR25.903(d)对于涡轮发动机的安装有如下规定:

必须采取设计预防措施,能在一旦发动机转子损坏或发动机内起火烧穿发动机机匣时,对飞机的危害减至最小。

为了满足适航要求,需保证在转子爆破发生之后有一个独立的油箱可以正常使用,那么就应采取隔出合理的干舱区域或者调整油箱分离面的措施避免转子碎片损伤所有油箱。

图1显示了转子爆破时转子碎片的影响区域。大碎片的影响角度为 $\pm 3^\circ$,中等碎片的影响角度为 $\pm 5^\circ$,小碎片的影响角度为 $\pm 15^\circ$ 。其中,大碎片和中等碎片被认为具有无限能量,油箱受到他们的撞击会发生破坏。经分析可知,以某型飞机左右机翼1#肋作为油箱分离面需要隔出的干舱区域较大,以外侧翼肋作为分离面需要隔出的干舱区域较小,甚至可以不必隔出干舱。

2.2 油箱惰化因素

CCAR25.981条规定^[2]:

(1)一架飞机上每一燃油箱的机队平均可燃性暴露时间均不得超过规定的可燃性暴露评估时间的

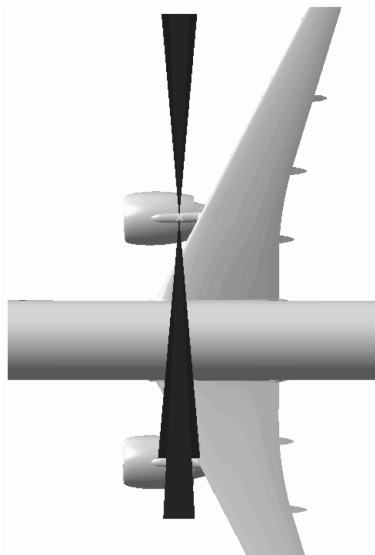


图1 发动机转子爆破影响区域示意图

3%,或所评估机型机翼燃油箱的可燃性暴露时间,取较大者。如果机翼不是传统的非加热铝质机翼,则必须在假定的、与传统的非加热铝质机翼油箱等效的基础上进行分析。

(2)飞机上的任何燃油箱,只要有部分位于机身轮廓线以内,就必须满足CCAR25部附录规定的可燃性暴露标准。

为了满足适航要求,就必须采取措施来进行燃油箱点燃防护。如果燃油箱位于机身轮廓线以内,热量散发会比较慢,可能导致温度过高而形成点火源,所以对位于机身轮廓线以内的所有油箱采取防护措施。现代民用飞机常用的防护措施是燃油箱安装惰化系统,给燃油箱冲入富氮气体,以降低燃油箱液面上方的氧气浓度,以防止任何点火源发生引发燃油箱爆炸^[3]。

由于某型飞机1#肋伸入机身轮廓线以内,如果采用1#肋作为油箱分离面就必须对中央翼油箱和左右外翼油箱全部进行惰化。惰化系统的增加会降低系统的可靠度,还会增加飞机的重量。如果油箱分离面采用机身轮廓线外的翼肋,就只需要对中央翼油箱进行惰化。

2.3 结构设计因素

民用飞机采用不同的油箱分离面对机翼结构的影响主要是在长桁上开蹿油孔。如果以4#肋或者6#肋作为油箱分离面,就需要在长桁腹板上开蹿油孔以利于燃油相互连通,但这样就破坏了长桁的传力路线,影响其疲劳性能,因此需要进行相应的补强,付出不小的重量代价。如果以1#肋作为油箱

分离面,因为长桁端头进行斜削,在此就不需要单独开蹼油孔,避免了重量代价和疲劳问题。

3 采用不同油箱分离面对重量重心的影响

3.1 对重量的影响

民用飞机使用空机重量的大部分以及商载都位于机身部位,而飞行过程中的升力主要靠机翼产生,这样就会在机翼根部产生较大的弯矩,对飞机结构产生较大的影响,如图 2 所示。在飞机设计过程中,通常采用制定最大零油重量限制的方法来避免在机翼根部产生过大的弯矩。

储存在外翼油箱中的燃油可以平衡部分升力影响,从而减小机翼根部弯矩,所以燃油应尽可能长时间储存在外翼油箱中,如图 3 所示。

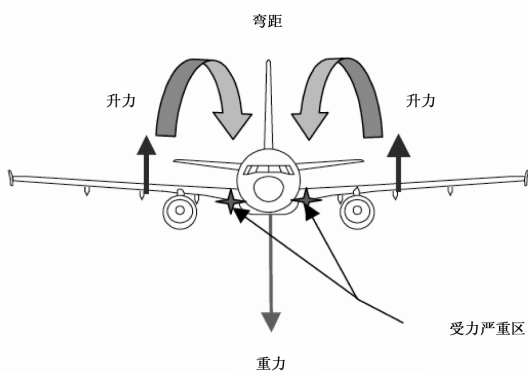


图 2 机翼根部弯矩示意图

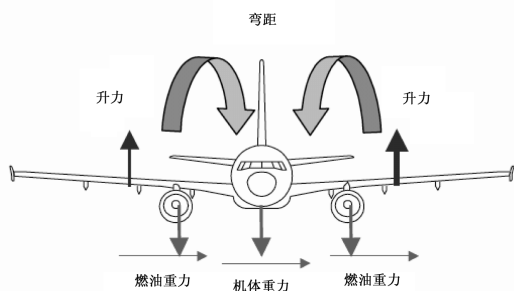


图 3 燃油卸载作用示意图

根据上述分析,民用飞机通常在加油过程中先加满外翼油箱再加中央翼油箱,在耗油过程中先消耗中央翼油箱燃油再消耗外翼油箱燃油。需要注意的是,在地面情况下,由于燃油重力没有升力与其平衡,如果外翼油箱的燃油量过大,也会对飞机结构产生不利影响。因此,在划分油箱时需要权衡考虑,使各个油箱的油量维持在一个合理的范围。

3.2 对重心的影响

飞机的重心是其重力的作用点,在飞机设计中

它同飞机的气动力焦点有密切的关系。无论是静稳定的飞机还是静不稳定的飞机,其重心与焦点的匹配关系,直接影响到飞机的安全性、飞行品质、飞机的性能和经济性以及飞机几何参数的选取。所以,在飞机的方案阶段,关于重心设计与控制的研究是必不可少的项目。

飞机的燃油重心,是由燃油箱的分布决定的,但可进行合理的设计和控制。在满油状态下,飞机燃油的重心应在飞机重心后极限之前,并使其在燃油消耗过程中,燃油重心变化的最后点不超过重心后极限。另外,尽量使强度设计状态下的燃油重心接近重心后极限,以便尽量减少气动力载荷^[1]。

民用飞机的起飞重量由使用空机重量、燃油重量和商载构成,油箱布置和耗油顺序一旦确定,燃油在消耗过程中的重心变化范围就是确定的影响因素,那么在装载过程中就需要进行合理的装载使飞机的重心不至于超出重心包线的限制。为了获得较好的商载能力,尽可能减少对装载的限制,在进行飞机设计时就应考虑燃油消耗对飞机重心的影响,尽量减少燃油消耗过程的重心变化范围,从而为飞机提供更灵活的装载空间。

图 4 显示了某型飞机的三种不同的油箱布局,均采用三油箱的布局形式,分别为中央翼油箱和两侧外翼油箱。其中 A 型油箱以 1#肋作为中央翼油箱和外翼油箱的分离面, B 型油箱以 4#肋作为分离面, C 型油箱以 6#肋作为分离面。

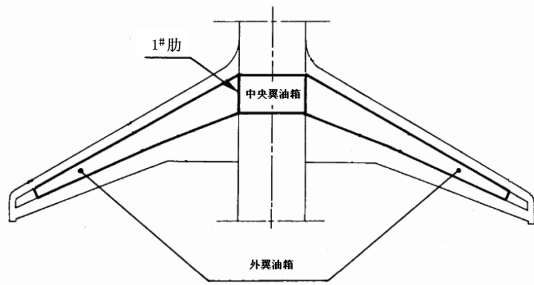
通过对三种油箱模型的测量,得出各个油箱的容积和最大油量,如表 1 所示。

表 1 各个油箱的容积和最大油量

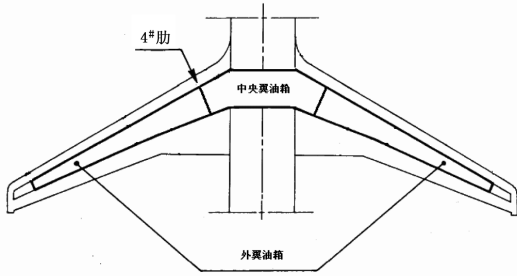
位置	A 型油箱		B 型油箱		C 型油箱	
	体积/L	重量/kg	体积/L	重量/kg	体积/L	重量/kg
中央翼油箱	9 342	6 380	15 205	10 384	18 198	12 428
左外翼油箱	9 679	6 610	6 747	4 608	5 251	3 586
右外翼油箱	9 679	6 610	6 747	4 608	5 251	3 586
合计	28 699	19 600	28 699	19 600	28 699	19 600

注:燃油密度 0.785 kg/L
取 0.87 的体积修正系数以扣除油箱内结构和系统所占体积及燃油的膨胀空间

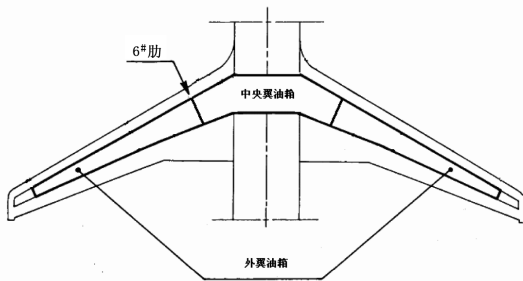
因为外翼油箱中的燃油可以对机翼起到卸载作用,因此选择先耗中央翼油箱燃油再耗外翼油箱燃油的耗油顺序。通过切片计算^[4]从零油到满油的不同油量状态下的燃油质量分布,并将其与使用



(a) A型油箱



(b) B型油箱



(c) C型油箱

图4 三种不同的油箱布局形式

空机重量进行叠加,可以得出三种油箱的耗油曲线,如图5所示。

从图5的耗油曲线可知:A型油箱的燃油重心变化范围为20.61%~24.41%MAC,B型油箱的燃油重心变化范围为20.61%~26.92%MAC,C型油箱的燃油重心变化范围为20.61%~27.75%MAC。C型油箱的燃油重心变化范围最大,B型油箱次之,A型油箱最小。

在得知耗油曲线的基础上,将使用空机、商载和燃油进行叠加,即进行装载分析。本文对两种典型装载情况进行举例说明。

装载一:油箱油量19 600 kg(满油),货物装在后货舱和散货舱,装载曲线如图6所示。

此种装载情况下,当满油时飞机重心在重心包线范围内,但是随着燃油消耗,当飞机总重量出现在图中灰色区域,且在此重量状态下进行着陆时,可

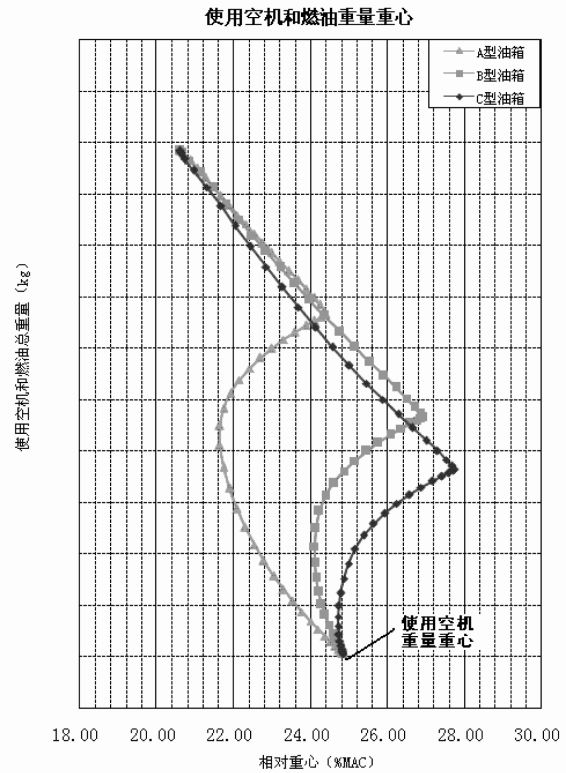


图5 三种油箱布局的耗油曲线

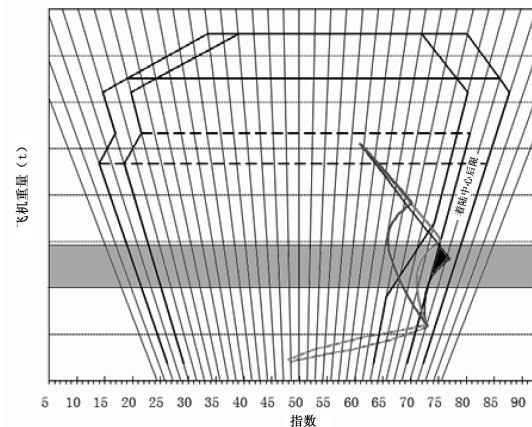


图6 超出重心后限的典型装载示意图

以看出采用C型油箱的飞机重心超出了重心包线中着陆后重心限制(如图中黑色区域所示),而采用A型和B型油箱的飞机重心在后重心限制线以内。那么对采用C型油箱的飞机在装载时就要对这种装载情况进行限制,而采用A型和B型油箱的飞机则不需要此种限制。

装载二:油箱油量15 600 kg,运载82名乘客,依次从前排向后排就座(满座时为150人),装载曲线如图7所示。

此种装载情况下,整个飞机的重心在重心包线范围内,但是随着燃油消耗,当飞机总重量出现在图

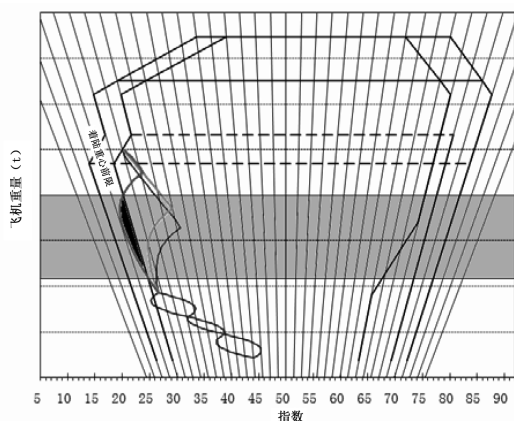


图7 超出重心前限的典型装载示意图

中灰色区域,且在此重量状态下进行着陆时,可以看出采用A型油箱的飞机重心超出了重心包线中着陆前重心限制(如图中黑色区域所示),而采用B型和C型油箱的飞机重心没有超出着陆前重心限制。那么就需要对采用A型油箱的飞机在装载时进行限制,避免此种装载情况的出现。

从以上两种典型装载的分析可以看出:

采用C型油箱的飞机在装载一的情况下,着陆重心超出了后重心包线限制,采用A型油箱的飞机在装载二的情况下,着陆重心超出了前重心包线限制,而采用B型油箱的飞机在两种装载情况下重心均没有超出重心包线限制,这主要是由于C型油箱的燃油重心向后的变化范围较大,而A型油箱的燃油重心向前的变化范围较大导致的。由此可见,采用燃油重心向前向后变化范围小的油箱时,飞机在装载过程中受到重心包线的限制会比较少。

本文只列举了两种典型装载情况进行分析,而飞机在实际运营过程中各种装载情况均有可能出

(上接第30页)

4 结论

有限元模型是结构强度分析中应力、稳定性、振动、颤振等工程数值计算的基础,模型质量检查流程可以保证有限元模型在数值上的正确性,并避免设计者粗心造成的错误^[4]。介绍了民用飞机有限元模型质量检查内容,提出了网格质量检查项目及方法,给出了有限元单元几何检查建议值,介绍了刚度检查、静平衡检查、自由振动检查、热膨胀检查、接地检查等模型质量检查方法。

现,因此在制定重心限制时就需要将装载限制作为一个因素进行分析,合理确定起飞、着陆和巡航状态的重心前后限制,制定完重心包线后还需要对各种可能出现的典型装载情况进行分析,对超出重心包线的情况进行限制,只有这样才能保证飞机的运营安全。

4 结论

本文分析了民用飞机选取不同油箱分离面的主要考虑因素,并着重分析了采用不同的油箱分离面对飞机重量重心的影响。从本文的分析可以得出,民用飞机采用不同的油箱分离面对飞机的重量重心会产生较大影响,但是对重量和重心的影响只是一方面因素。燃油箱的布置和设计需要综合考虑多重因素,并针对型号飞机的特点、适航规章的要求等进行必要的权衡,只有综合好各种影响因素才能做出最好的油箱设计。

参考文献:

- [1] 陈俊章,等. 重量平衡与控制[M]. 第1版. 北京:航空工业出版社,1999:92-98.
- [2] 中国民用航空局. CCAR-25-R3 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,2001.
- [3] 张欲晓,樊尚春. 民用飞机燃油油箱的防爆方法[C]. 中国航空学会2007年学术年会,1997.
- [4] 杨朋涛,牛量,蒋军昌. 基于飞机油箱模型形状特征的油量测量切片步长选择方法研究[J]. 航空学报,2008,29(3):657-663.

参考文献:

- [1] 刘国方,等. 大型飞机机身结构的特点与选材[C]. 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会,2007.
- [2] 中国民用航空总局. CCAR-25-R3 中国民用航空规章第25部运输类飞机适航标准[S]. 中国:中国民用航空局,2001.
- [3] 吴存利. 浅谈民机强度有限元分析适航认证技术[J]. 航空科学技术,2011,2:36-39.
- [4] MSC. Nastran 2010 Quick Reference Guide.
- [5] Alan E. Stockwell, A Verification Procedure for MSC/NASTRAN Finite Element Models [R]. NASA CR - 4675, May 1995.