

飞机配载平衡及装载过程优化的力学逻辑

杨德林*, 张铮, 刘曦

北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191

摘要: 航空货运以其装载量大、送达快捷的特点成为现代物流的重要组成部分, 而飞机配载平衡是关系到空运安全的重要一环。为保证货机合理装载、安全飞行, 建立了货机装载模型与平衡判据, 通过几种典型配载方案的比较, 明确装载过程的优化逻辑, 并结合实例验证了其合理性。

关键词: 航空货运; 配载平衡; 配载方案; 飞行安全

中图分类号: V212.12+1, V271.4+93

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453(2016)01-0011-04

航空货运是一种快速高效的物流方式。波音公司在韩国举行的2014年国际航空货运论坛上发表预测:今后20年全球航空货运市场的年均增幅将达4.7%。由此可见,进一步实现高效率的航空货运业具有很大的市场发展前景。在加强开发航空货运潜力的同时,航空运输的安全不容忽视,一次配重不合理的飞行会危及飞机结构整体的安全,对飞机的性能产生有害的影响。荷兰国家航空航天实验室(NLR)对1970~2005年全球和飞机载重平衡有关的不安全事件进行了研究,发现35年里共有82起有完整记录的飞行事故和配载平衡有关^[1],世界范围内和载重平衡有关的事故率呈缓慢上升的趋势。

飞机装载不合理会导致重心偏出允许的限制范围,飞行过程中也会引起控制困难,甚至出现飞行事故。例如,中西航空5481号航班就是因为重心过后、计算配平时使用平均重量不当导致失速坠毁^[2];欧洲某家航空公司曾经有一架货机,因为配载员在分配货物时将过多的货物堆放到飞机的头部和尾部,飞机在落地过程中遇到气流发生颠簸,最终导致整个飞机从中间折断。综上所述,如何确保飞机在安全运输的前提下,实现合理、高效的航空配载已成为一个具有重要意义的问题。

如何处理航空物资本身的多样性和特殊性(包含外形尺寸、重心等),如何进行装载布局的合理设计,并进行有效调整,在满足飞机装载安全条件下,如何实现最大限度的货物装载,提高物资的航空运输效率是当前运输机的货物装载

设计面临的主要问题。本文针对上述进行了分析讨论,旨在提出一套较为完善的优化装载逻辑,分析飞机货物重量、排序、重心范围、弯矩/扭矩等因素对配载的影响,以保证货物合理装载和安全运输,实现航空货物的高效配载。

1 装载模型

运输机货物装载的特点主要有:装载货物种类杂多,形状、重量差别较大;其装载空间不规则。因此,对装货机舱和货物作以下假设:

(1) 货舱装载空间为规则长方体容器,如图1所示,货舱尺寸为 $L \times W \times H$;

(2) 为了方便搬运,航空物资多以矩形货盘承载(见图2),假设货物 i 的重量为 m_i ,长宽高尺寸为 $l_i \times w_i \times h_i$,其几何中心即为其重心;

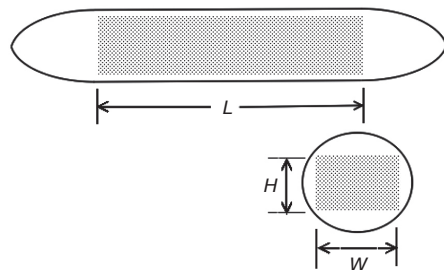


图1 货仓简化图

Fig.1 Simplified aircraft cargo

收稿日期: 2015-06-29; 退修日期: 2015-07-28; 录用日期: 2015-08-15

*通讯作者. Tel.: 15600605976 E-mail: amonde@163.com

引用格式: YANG Delin, ZHANG Zheng, LIU Xi. The mechanical logic of the optimization on loading balance and process of aeronautical transportation [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(01): 11-14. 杨德林, 张铮, 刘曦. 飞机配载平衡及装载过程优化的力学逻辑[J]. 航空科学技术, 2016, 27(01): 11-14.

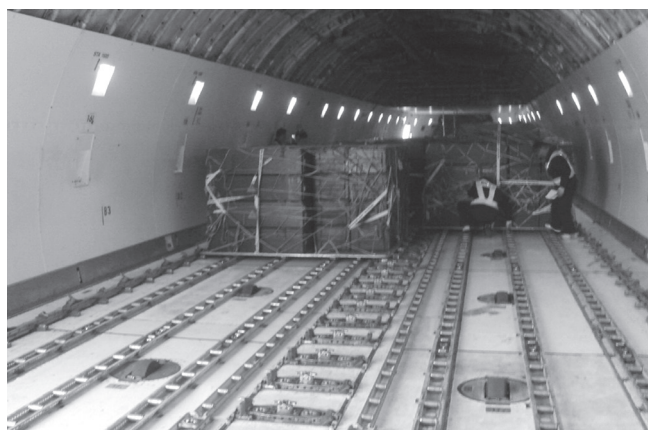


图2 货机机舱
Fig.2 Aircraft cargo

(3) 相邻货物之间必须留有相同的空隙 d ,以便于货物侧向固定及航空运输过程中人员通行检查;

(4) 建立直角坐标系,以飞机纵向中轴线为 x 轴,设定飞机升力点 O 为原点。

2 配载平衡判据

飞机的平衡直接受到各种作用力的影响,如空气对飞机的作用力、机上装载重量等。作用于飞机各部位的力,如果不是通过飞机的重心,就会相对飞机的重心构成力矩,促使飞机发生转动。引起飞机上仰或下俯的力矩叫俯仰力矩;引起飞机向左侧或右侧倾斜的力矩叫滚转力矩;由于航空运输的特殊性,货物装载不仅需要考虑装载方式、重量限制,还需要考虑弯矩、扭矩作用及重心位置等因素对装载过程及最终状态的影响。

2.1 重心位置

由于货物装载位置不同和飞行中燃料消耗、物资投放、弹药发射、空气动力外形的变化等原因,重心位置会有变化。在全部可能遇到的飞行情况下,飞机的重心位置应在设计允许的范围之内。重心前后限是飞行时飞机重心允许的最前和最后位置。

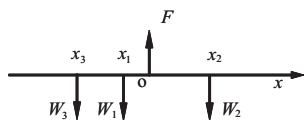


图3 飞机纵向平衡
Fig.3 The longitudinal balance of aircraft

如图3所示, F 为飞机升力, W_3 为空机重, W_2 为油重, W_1 为货重, x_1 为重心位置, x_2, x_3 为已知。为使机体重心在前后限 (a, b) 之内,货物重心位置 x_1 应满足:

$$b \sum_{k=1}^3 w_k \leq \sum_{k=1}^3 w_k x_k \leq a \sum_{k=1}^3 w_k \quad (1)$$

由式(1)可得 x_1 的取值范围,称为设计重心位置。若货物重心位于 x_1 处,则飞机整体重心在重心前后限之内,满足飞行要求。满足飞机装载重心位置要求,是飞机装载平衡的首要原则和力学判据(简称“力I”)。

2.2 飞机俯仰(弯矩)平衡

影响飞机俯仰平衡的因素主要有旅客的座位安排方式、货物的装载位置、机上人员的走动、燃料的消耗、不稳定气流、起落架或副翼的伸展和收缩等。对于散装货物要固牢靠,防止货物在货舱内滚动。为飞机结构及飞行安全考虑,应尽量减少机体的弯矩,应遵循重量较大的货物置于靠近升力点,重量较小的货物置于远离升力点的原则。这是装载优化过程中最重要的原则和力学判据(简称“力II”)。

2.3 飞机滚转(扭矩)平衡

货物对飞机中轴线的力矩(扭矩)决定了飞行过程中滚转平衡及在地面上起落架的受力平衡状态,较小的力矩可以减少机体所受的扭矩,在装载过程中,应尽量使这个力矩取最小值。这是装载平衡的另一原则和力学判据(简称“力III”)。

3 配载过程及优化方案

为便于说明比较,假设现有一批货物需要分两列装载运输,货物之间距离 $d=0.2\text{m}$, $l \times w=2\text{m} \times 2\text{m}$,6号、8号货物尺寸 $l \times w=2\text{m} \times 4\text{m}$,各货物重量见表1。

表1 货物编号及重量
Table 1 Cargo's number and weight

货物	1	2	3	4	5	6	7
重量/kg	800	600	590	550	540	1000	440
货物	8	9	10	11	12	13	14
重量/kg	860	400	300	200	100	90	10

3.1 货物的筛选、排序、分组

所有货物应满足: $h_i < H, m_i < m$ (m 为载货托盘所允许的最大承载重量), $m_i < M$ (M 为飞机货舱最大装载重量);若货物体积或重量超过托盘承载要求,可以理解为货物重量和体积平均分配在若干个托盘上,在分组时必须分到同组或邻组;

综合飞机货舱尺寸及运输货物的体积等因素确定装载列数,将货物按照重量从大到小排列,再根据装载列数确定每 N 个货物分为一组, N 为货物装载列数,如, $N=2$ 时:第1组(1/2)、第2组(3/4)、第3组(5/6)……, $N=3$ 时:第1组(1/2/3)、第2组(4/5/6)、第3组(7/8/9)……装载时按货重从重到轻依次排布。对货物进行排序、编号、分组如表2所示。

3.2 纵向配载的优化方案

考虑到飞机飞行操作性和稳定性,在装载布局规划时,

表2 货物分组情况
Table 2 Cargo grouping

组序号	1	2	3	4	5	6	7	8
货物编号	1/2	3/4	6	5/7	8	9/10	11/12	13/14
重量/kg	1400	1140	1000	980	860	700	300	100

一般遵循力II原则。实际上,整个机翼都会提供升力,所求得货物重心位置位于平均气动弦内,如此排列组合所得货物装载方法满足弯矩最小化的要求,因此可假设货物重心与升力点重合。

图4、图5所示为两种不同的装载方案,原点为升力点,横轴x表示货物位置坐标,方框高度表示货物重量,二者重心都满足要求,但第一方案(图4)最大弯矩为9200N·m,第二种方案(图5)最大弯矩为12400N·m,前者货物对机体的最大弯矩仅为后者的1/4,可见实现上述装载原则的重要性。

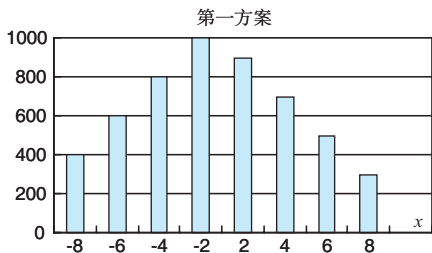


图4 第一种装载分布状态示意图
Fig.4 The first distribution situation of load

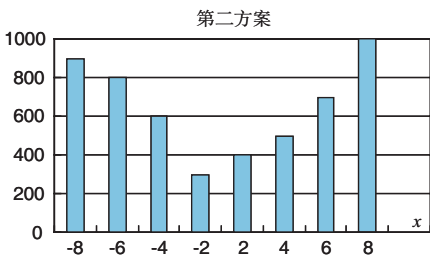


图5 第二种装载分布状态示意图
Fig.5 The second distribution situation of load

3.3 装载重心计算

为了保证最终装载重心位于重心前后限之内,按组序号由小到大的顺序从 d_0 (即第1组货物重心距O点的距离)处开始装配,装载顺序见图6。记 m_i 为第 i 组货物重量之和。

$$\sum_{i=1}^n m_i g d_i = x_1 \sum_{i=1}^n m_i g \quad (2)$$

其中

$$d_i = \begin{cases} d_0 + \frac{i-1}{2}(d+l_i), & i \text{ 为奇数} \\ d_0 - \frac{i}{2}(d+l_i), & i \text{ 为偶数} \end{cases}$$

x_1 可由式(1)求得, d_0 及货物的横坐标可由式(2)求得。



图6 纵向装载布局
Fig.6 Longitudinal loading plan

3.4 横向配载的优化方案

在翼展方向(横向),如果机舱内施行多列装载,考虑到货重对机身局部和整体的扭矩作用,装载逻辑将较为复杂。实际中双列装载最为常见,本文以此为例,分析装载布局的优化,但该分析方式同样适用于多列装载的情况。下面就横向配载提供了3种不同的布局,并进行优劣对比分析。

第一种布局:假设货物按照两列由序号从小到大(即重量从大到小)的顺序装载,将1号货物放在A侧,2号货物放在B侧,3号货物放在A侧,4号货物放在B侧……如图7所示,由于序号小的货物总分布在A侧,所以该分布荷重偏向A侧。



图7 纵向装载布局一
Fig.7 The first lateral loading plan

第二种布局:类似的,假设货物按照两列由序号从小到大的顺序装载,将1号货物放在A侧,2号货物放在B侧,3号货物放在B侧,4号货物放在A侧,如此交叉装载,如图8所示。明显这种装载方式使横向货物装载更接近平衡,优于第一种装载方式。



图8 纵向装载布局二
Fig.8 The second lateral loading plan

优化布局:按照序号由小到大的顺序从距重心位置 d_0 处开始装载,每装载一件货物计算一次两侧货物重量对纵轴的力矩 M_A/M_B 之和,若 $M_A \geq M_B$,则在进行了下组货物的装载时,将重量较大(即序号较小)的放在B侧,重量较小的放在A侧,如此循环进行直至装载结束,如图9所示。



图9 优化布局
Fig.9 The optimization loading plan

三种横向配载布局优劣对比:第一种布局: A侧货物重量总是大于或等于B侧货物重量,这种重量差的累积会造成飞机严重的不平衡,机翼需要提供的力矩为12056N·m。第二

种布局:在A,B两侧交替装载重量大的货物会使重量差引起的力矩相互抵消,机翼需要提供的力矩为5544N·m,优于第一种布局,但可能由于某一组或某几组货物重量差较大,无法有效减小力矩。第三种布局:较前两种布局优势明显,机翼需要提供的力矩为1144 N·m。

4 结论

建立货机装载模型及配载平衡判据,并对几种典型配载方案进行对比,得到以下结论:

(1) 通过对不同装载方案的对比,发现在重心位置满足要求的前提下,不同的货物布局方式对机体所造成的弯矩、扭矩有很大的差异。因此,仅仅考察货物重心是否满足要求是有潜在危险的,应根据货物对机体所造成的弯矩、扭矩对装载布局进行优化。

(2) 通过货机配载平衡分析建立了装载平衡的力学判据,结合分析飞机货物重量、排序、重心范围等因素,介绍了装载平衡布局优化的一般方法,并得出了一套切实可行的装配逻辑和规程。

(3) 通过对若干典型装载布局的对比分析,证明本文提出的装载逻辑和装载平衡判据是严谨有效的,由此而得到的装载优化方案相比于一般的装载方案,弯矩扭矩明显减小,

具有明显的力学优越性。

AST

参考文献

- [1] 张恒铭,张靖. 航空货物装载布局验证方法研究[J].航空科学技术,2014(02):42-44.
ZHANG Hengming, ZHANG Jing. Research on validating method of cargo layout during aeronautical transportation[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014(02): 42-44. (in Chinese)
- [2] 张丽霞. 航空货运飞机装载问题研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
ZHANG Lixia. Research on aircraft loading problem of air cargo[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)

作者简介

杨德林(1991—)男,在读硕士。主要研究方向:损伤力学。

Tel: 15600605976

E-mail: amonde@163.com

张铮(1966—)男,博士,副教授。主要研究方向:复合材料、损伤力学。

刘曦(1992—)女,在读硕士。主要研究方向:计算力学。

The Mechanical Logic of the Optimization on Loading Balance and Process of Aeronautical Transportation

YANG Delin*, ZHANG Zheng, LIU Xi

School of Aviation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: Air cargo transportation is an important part of modern logistics, which is characterized by its high loading capacity and service fast. While the aircraft loading balance is related to an important part of the air traffic safety. In order to ensure the reasonable loading cargo and flight safety, this paper established cargo loading model and the criterion of loading balance. Then got the logic optimization of the loading process by comparing several typical loading plans, and the rationality was verified.

Key Words: air cargo; loading balance; cargo layout; air traffic safety

Received: 2015-06-29; Revised: 2015-07-28; Accepted: 2015-08-15

*Corresponding author. Tel.: 15600605976 E-mail: amonde@163.com