

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2022.04.006

民用货机载重平衡控制方法研究

董航* 黄菲

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘要: 主要研究了民用货机的载重平衡控制方法。过去二十年,国内民航客改货机队规模大幅增加。由于货机的结构限制多、装载舱位多等特点,货机的载重平衡控制显得尤为重要。目前国内货机广泛使用基于 EXCEL 单机版电子舱单,为此对宽体货机电子舱单也进行了调查研究。基于航司日常运行实践,并结合民航规章的要求,介绍了货机的载重平衡控制方法。对于飞机重心包线削减需要考虑的因素进行了研究分析,包括货物装载的误差,机组的移动,燃油的重量与重心波动曲线等。给出了典型货机的燃油系统、纸质平衡图、电子舱单样例、操作限制以及发动机对飞机重心的影响等实际案例。文中末尾从装卸顺序,飞机重量文件管理,发动机等方面还研究了对飞机重心影响的其它因素。通过研究调查,增进对民航载重平衡相关领域业务的了解,并给相关专业人员提供一定价值的参考。

关键词: 货机;载重平衡;平衡图;电子舱单;发动机

中图分类号: V353

文献标识码: A



OSID:

0 引言

对于客机的载重平衡控制,国内机场大都使用中航信的离港系统制作舱单,通过飞机通信寻址与报告系统 (aircraft communications addressing and reporting system, 简称 ACARS) 上传,技术上比较成熟。飞机制造商提供的支持服务相对完善。按《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》(简称 CCAR121 部) 运行的大型客机载重平衡工作也一直处于局方的严格监管之下。

货运航空公司使用的货机大部分是由老旧客机改装而来。过去二十年,客改货机队规模大幅增加,如图 1 所示。2005 年上海一家货机航司开始在国内首次使用基于 EXCEL 开发的单机版波音 737-300QC 货机电子舱单^[1]。今天,EXCEL 单机版电子舱单已经在国内货机广泛使用。且电子舱单能够提供比较全面的各种输入告警和错误提示,在提高计算精度和工作效率的同时,减少了安全隐患。

也有专家对公务机的电子舱单工具进行过研

究^[2]。对于宽体大型货机,由于飞机结构限制因素多、装载舱位多,给载重平衡工作带来较大难度。2007 年国内一架 MD11 货机由于飞机重量计算错误造成配平不当,发生了起飞擦机尾的事故症候^[3]。民航出现多起货机由于地面装载和配载平衡差错导致的问题。

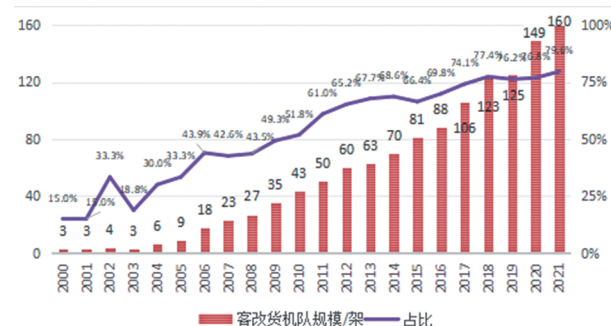


图 1 中国民航货机机队发展趋势

备注:数据来源于 Cirium Fleet 数据库。

对货机载重平衡方面的研究文章不多,本文对此专题开展研究。

* 通信作者。E-mail: 945357441@qq.com

引用格式: 董航,黄菲.民用货机载重平衡控制方法研究[J].民用飞机设计与研究,2022(4):34-40. DONG H, HUANG F. Research on weight and balance control method of civil freighter aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2022(4): 34-40 (in Chinese).

1 主要影响因素

民用货机载重平衡控制方法需要考虑的主要影响因素包括规章要求、航空集装箱以及燃油系统。

1.1 规章要求

中国民用航空局规章《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》CCAR121 R7(2021 年 3 月 15 日第七次修订)第 121.151 条(b)项规定:合格证持有人可以使用经批准的重量与平衡控制系统来符合适用的适航要求和运行限制,该重量与平衡控制系统可以以平均的、假定的或者估算的重量为基础。第 121.697 条规定:装载舱单应当包含飞机在起飞时有关装载情况的信息^[4]。民航局咨询通告 AC-121-68《航空器空重和重心控制》(发文日期:2005 年 8 月 10 日),对航空营运人如何控制航空器的空重和重心位置提出具体要求和指导^[5]。民航局咨询通告 AC-121-FS-135《航空器重量与平衡控制规定》(发文日期:2019 年 10 月 22 日)进一步对航空运营人重量与平衡控制和管理工作提供了具体的指南,并为局方开展日常监管提供了依据^[6]。

1.2 航空集装箱

关于航空集装箱(unit load device,简称 ULD)的具体要求可以参考国际航协航空集装箱技术手册。这里不再展开详细讨论。由于货机大量使用集装箱,在日常运营中需要注意的事项包括:

- 1) 集装箱是否经过适航认证;
- 2) 每个集装箱有规范的尺寸和装载限制;

3) 受到货机舱门大小、货舱空间和结构重量等限制,货机上下货舱可装载的集装箱版型会有差异。另外航司也会有根据各自运营特点来确定可用的装载布局,包括使用单一集装箱或者混合布局。混合布局的集装箱对载重平衡提出了更多要求;

4) 除了各舱位最大重量限制,某些机型还要考虑集装箱左右不平衡限制。

1.3 燃油

燃油是影响载重平衡控制的另一个关键要素。以某宽体货机为例,燃油重心指数对应曲线如图 2 所示。加油步骤 1:将 1 号和 2 号主油箱加至所需的燃油量或者加满油箱;然后在中央油箱加注所需燃油。根据 1 号和 2 号主油箱燃油量不同,其左右燃油的随机不平衡数值绝对不能超过某一限制。

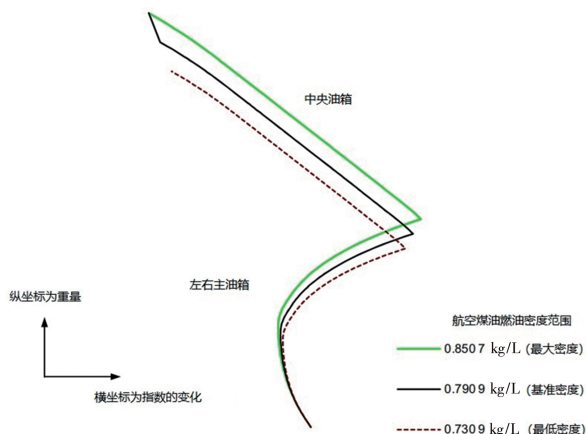


图 2 某型货机燃油重心曲线示例

燃油曲线对于重心包线削减和重心计算都非常关键。大部分飞机加油曲线和燃油使用对应的重量指数曲线是同样的。如果加油和使用燃油曲线不一致,则需要分别进行重心包线的削减计算。

燃油密度:包线削减需要根据常用的燃油密度确定基准密度,例如国内常用 0.790 9 kg/L 作为基准燃油密度;根据运行环境的最大和最小燃油密度来计算燃油密度误差带来的影响以保证运行安全。目前民用航空涡扇发动机一般使用航空煤油,燃油密度根据标号不同、同时受到温度变化,油品质量等波动。密度范围从 0.730 9 kg/L 到 0.850 7 kg/L。

图 3 为某宽体货机飞机燃油指数变动包线限制样例。在进行包线削减的时候,需要考虑飞机重心位置随着燃油消耗重量和指数变化,仍然保持在安全范围之内。确保飞机的无油重量加上燃油之后得到的飞机重心,例如图 3 中红色圆圈所示的几个关键点始终在削减后的包线范围内。

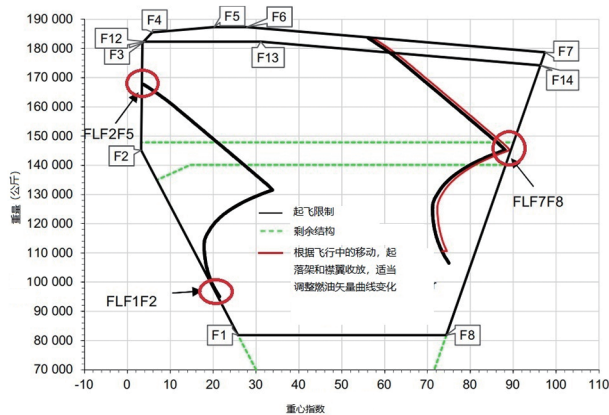


图 3 飞行限制中燃油消耗的关键点

燃油曲线对包线的削减,需要考虑:1)燃油的密度范围;2)燃油的加注曲线;3)燃油的消耗曲线;4)确定起飞前的平均滑行用油。

2 控制方法

2.1 重心包线削减原理

首先,是指数概念,指数用来表示重心位置,制造厂家常用的公式如下^[7-8]:

$$\text{Index} = W * (\text{B. A. Index Datum B. A.}) / C + K$$

式中,Index 为力矩指数值;W 为重物的重量;单位是公斤(kg)或者磅(lb)。B. A. 英文全称 BALANCE ARM, 翻译为力臂,常用单位 in 或者 m。Index Datum B. A. 是基准力臂。常数 C,用于将载荷的力矩缩小一定比例。常数 K,用于设定基准力臂的力矩指数值。

例如某宽体货机的基准力臂等于 972.6 in,在 25% 平均空气动力弦的位置。重量单位为 kg 时,常数 C 等于 120 000 kg · in。常数 K 等于 55。

其次,由于飞行中重心可能的变化,需要对取证的飞机重心包线限制进行削减,以保证实际重心处于安全范围内。对于货机产生重心变动的原因包括:

- 1)起落架和襟翼位置变化;
- 2)货物装载的重心误差;
- 3)机组的移动;
- 4)燃油加注和消耗;
- 5)燃油密度的变化。

2.2 起落架和襟翼位置变化

起落架和襟翼位置变化等数据飞机制造厂家一般都会在《载重平衡手册》里提供给用户。

例如:某宽体货机起落架后移修正力矩为 -11 000 kg · in,前移力矩修正量 156 000 kg · in。襟翼从 30°到 1°力矩修正量为 37 000 kg · in。

2.3 货物装载的重心误差

对于各货舱货物装载的重心误差修正,各制造厂家给出的假设方法不尽相同。主要考虑实际货物重心偏离划分出来的货舱区域的中心线以及各舱位最大可能出现的累计误差。

以某宽体货机为例,前货舱重心力矩误差计算如下。

表 1 货机前货舱重心误差计算表

区域	货舱 参考力臂 /in	货舱 位置	舱位 代码	集装箱重 量/kg	计算力 臂/in	力矩/ kg · in
主货舱						
B	310.5	M1	M	2 747	296	-39 832
C	438.5	M2	M	2 747	424	-39 832
D	566.5	M3	M	2 747	521	-124 989
	566.5	M4	M	2 747	618	141 471
E	692.5	M5	M	2 747	715	61 808
F	818.5	M6	M	2 747	812	-17 856
G	944.5	M7	M	2 747	909	-97 519
下货舱						
B	310.5	11	Q	1 145	267.5	-49 235
	310.5	12	Q	1 145	330.9	23 358
C	438.5	13	Q	1 145	395.3	-49 464
	438.5	14	Q	1 145	465	30 343
D	566.5	21	Q	1 145	526.5	-45 800
	566.5	22	Q	1 145	588	24 618
E	692.5	23	Q	1 145	649.5	-49 235
	692.5	24	Q	1 145	711	21 183
总力矩						-210 981

2.4 机组的移动

考虑到机组人员在飞行过程中的移动,有必要对重心极限进行限制。这将确保飞机的重量和重心不超过结构和审定的限制。在飞行中的移动只发生在飞行过程中,所以只适用于特定的飞行重心极限。用于计算飞行中运动的方法假设如下:机组移动,检查后主货舱装载位置。向前和向后的移动不会相互抵消。误差计算要点在于:机组移动条件假设的合理性。否则由于飞机长度大,一名机组或几名机组从机头移动到机尾,带来的重心力矩变化数值太大。重心削减过于保守,对航司运行效率不利。

以某宽体货机为例,机组移动重心误差计算方法如下。

表 2 机组移动重心误差

人数	重量 /kg	从驾驶舱 力臂/in	到货舱 A17 /in	力矩/kg · in
1	82	73.1	1 682	131 930
总力矩				131 930

2.5 燃油变化

图 4 是燃油消耗关键点用于对着陆限制包线的检查示例。

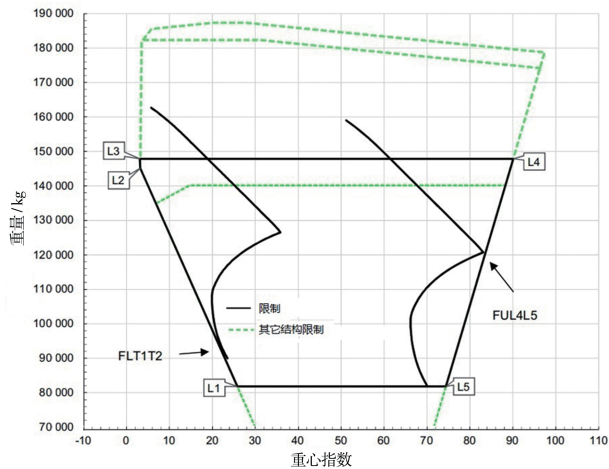


图 4 燃油消耗关键点包线检查样例

对前文提到的几项误差进行最后处理,在前后审定限制的基础上对飞机重心包线进行缩减,得到最终的使用包线。波音和空客使用了不同的原理来计算最终的累计误差,波音使用算数平均值来计算累计误差,而空客使用标准偏差值^[9]来计算累计误差。

3 控制方法的应用

航司通过载重平衡舱单来控制飞机的载重平衡。国际航协在地面操作手册中规定了载重平衡舱单的必备内容。图 5 给出了某单通道货机飞机制造厂家推荐的纸质舱单,原理是通过计算力矩得到最后飞机的起飞重心。

图 5 是一份波音 737 货机的纸质舱单,主要信息包括航班号、日期、飞机号、飞机基本重量、指数。然后需要填入各舱位实际装载重量,重心力臂,分别计算各舱位力矩,等到总力矩后再计算得到飞机的零油重量和总力矩。加上燃油重量和力矩,得到起飞重量和力矩。减去航路耗油的重量和力矩,得到着陆重量和力矩。

对于宽体货机,国内航司基本使用指数型纸质舱单,某宽体货机舱单如图 6 所示。在该舱单中增加了 A、C、E 三种布局构型,更方便航司在不同装载场景下使用。对于某宽体货机,还要考虑左右装载不平衡带来的起飞总重量限制,各舱位同时还要考虑区域装载限制以及累加限制等多种限制因素。

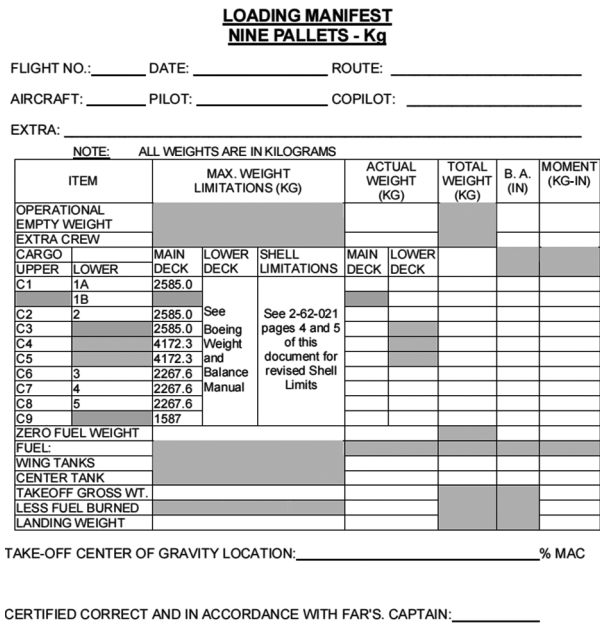


图 5 单通道货机纸质舱单样例

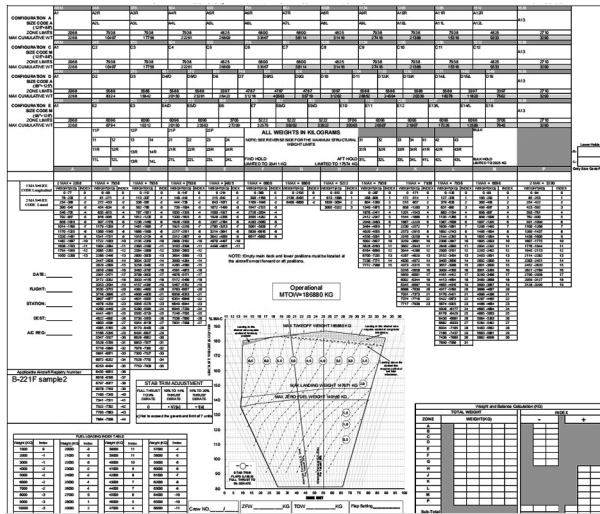


图 6 某宽体货机舱单样例

对于客机,国内航司大部分使用中航信的离港系统配载模块,利用 ACARS 地空数据链上传配载平衡舱单。或者通过无线网络上传到电子飞行包。空客为客机提供 LTS 配载软件^[9]。对于民用货机,使用更多的还是基于 EXCEL 单机版电子舱单或者其它类型自行开发的装载管理系统^[10]等软件。基于微软 EXCEL 办公软件开发的单机版电子舱单具有操作简单方便、使用稳定、平台兼容性好、成本低廉等特点,在国内货运航司和机场货运配载代理得到广泛使用,已经成为一种行业标准。货机电子舱单的发展已经形成标准,但是装载算

法还有很大优化空间^[11],以更好利用飞机的装载能力。

电子舱单的主要工作原理:飞机数据来源于 AHM560^[12]格式原始数据、载重平衡手册或者飞机改装报告。重心包线基于航司现有使用包线,或者重新计算缩减后的包线。利用 EXCEL 的函数计算功能,对飞机重量和重心进行计算。并利用 EXCEL 的图表功能,对重心包线和起飞、无油重心位置进行标注。

图 7 中某宽体货机 EXCEL 单机版电子舱单实现了重复板号检查、多种布局混装、板型校验、各区域限制以及累加限制级检查、左右不平衡限制检查等多种复杂功能。该电子舱单最后能够生成:

- 1) 纸质舱单打印以便提供给机组;
- 2) ACARS 配载报文供上传;
- 3) 配载电报以便发送给前方场站;
- 4) 可打印装机单提供给地面装卸人员;

5) 对于同一机型多架飞机且包线不一致的情况,电子舱单可以自动根据机号分别显示正确的重心包线,并选择正确的各项起飞、无油、着陆重量限制以及各舱位重量限制等。

19/44

1

FLT

DEST1

DEST2

FROM

BOM

WUH

FUEL

TO

FUEL

90000

65000

B747-400F

LOAD CHART

VN 1

V.1.1

CREW

4/4

DEST2

DEL

FUEL

0.70

ACTUAL LOAD (KG)

ZONE

MAX

LOAD

INDEX

MAIN

LEFT

RIGHT

LOWER

LOAD

A1

2613

0.0

B

0

0

0

0

A-11

5189

0.0

C

5001.0

5001.0

11P

0

C-12

11428

10002

D

2000.0

0.0

21P

0

D-21

11428

2000

E

0.0

5001.0

22P

0

E-22

11428

5001

F

0.0

0.0

23P

0

F-23

12591

0.0

G

5001.0

5001.0

0

0

G

16569

10002

H

0.0

0.0

0

0

H

16569

0.0

J

0.0

5001.0

0

0

J

16569

5001

K

0.0

0.0

31

0

K-31

14427

0.0

L

0.0

5001.0

32

0

L-32

11428

5001

M

0.0

0.0

41

0

M-41

11428

0.0

P

0.0

4850.0

42

0

P-42

11428

4850

R

0.0

2130.0

51+52+53

0

R-51+52+53

11428

2130

S

0.0

0.0

54

0

S-54

10553

0.0

T

0

0

0

0

T

2041

0.0

MAIN DECK TITL

43987 KG

LOWER TITL

0 KG

FWD

LOAD

17003 KG

DOW

163991 KG

MAX

276691 KG

ZFW

25W

TTL

PAYLOAD

37485 LB

361535 LB

590000 LB

45.1

MID

LOAD

15003 KG

DOI

70.0

MAX

396993 KG

TOW

25W

TTL

PAYLOAD

33076 LB

TTL R

31985 KG

874990 LB

44.0

AFT

LOAD

11981 KG

TTL L

12002 KG

MAX

295742 KG

LDW

25W

TTL

PAYLOAD

26413 LB

MBAL

19983 KG

630000 LB

44.3

ALLOWED

MBAL

46241 KG

17.6%

MAC% INDEX

MAC% G

STAB SET

48.1

18.2%

49.6

19.6%

44.3

17.6%

6.26

MAC% INDEX

MAC% G

STAB SET

48.1

18.2%

49.6

19.6%

44.3

17.6%

6.26

图 7 宽体货机电子舱单样例

图 7 中红框区域 1 中为航班基本信息,包括日期、航班号、起飞机场三字码、目的地机场三字码、起飞燃油、航路耗油、燃油密度等。蓝框区域 2 中,为主货舱和下货舱各舱位实际装载的货物重量。黄色区域 3,为各区域联合装载的重量以及指数。褐色区域 4 为飞机实际无油重量、起飞重量和落地重量,以及各重量对应的重心指数和平均空气动力弦位置。浅蓝色区域 5 为飞机的安定面配平角度。绿色区域 6 为前舱、中舱位、后舱实际累计装载重量,以及剩余业载。

4 其它需要考虑的因素

对于飞机的载重平衡控制,除了考虑飞行过程中的重心移动,还需要考虑包括地面重心控制和文件管理等其它因素。

4.1 装卸程序

在地面装卸货物过程中,飞机重心的变化处理不善也会引发问题。操作人员需要严格按照规范的卸装程序操作,防止出现飞机沉头或者沉尾。

各舱位地板前后的卡锁失效或丢失情况发生时使用,各舱位的最大限制重量会有变化。飞机制造厂家提供的载重平衡手册一般都有相应说明。

4.2 飞机称重与重量文件管理

飞机重量数据的管理非常重要。咨询通告《航空器空重和重心控制》(AC-121-68)依据 CCAR-121 部第 121.151 条和 121.367 条制定,目的是对航空营运人如何控制航空器的空重和重心位置提出具体要求和指导。实际工作中,航空公司有必要定期对航空器进行称重,并发布飞机重量文件给业务部门和代理单位。航空公司需要检查核实称重时飞机上的项目,并根据飞机的出厂空重,结合航司运行政策计算使用空重。飞机基本重量变更后,需要尽快通知各代理单位使用最新的飞机重量,航司也需要及时更新电子舱单。有的货机机队同一机型,最大起飞重量、最大无油重量、最大陆地重量不一致。避免数据不一致带来安全隐患。

4.3 发动机对重量和重心的影响

发动机本身对飞机重心有很大影响。发动机内部有部分滑油/燃油称重时在飞机上,但是不计入标准的飞机空重项目。不同的推力等级对应不同的水平安定面配平角设定。

空客和波音目前推出的新一代单通道飞机由于发动机质量更大,相比上一代机型,飞机的重心发生前移。特别是波音由于起落架太短,为了安装更大尺寸的发动机,不得不延长发动机吊架,使发动机向飞机前部延伸。带来飞机整体重心前移。波音单通道货机在飞机总重量较小的情况下,飞机重心容易接近或者超出前限。

航司经常不得不采取在飞机后部增加压舱物,或者增加飞机燃油重量来调整飞机重心,这样不但给地面保障带来负担,由于飞机重量增加还会带来额外的燃油消耗等成本。解决此类问题的建议:一

是客改货时考虑飞机的平衡问题,只拆掉后厨房会使飞机重心更靠前。二是重新优化重心包线,而不是继续使用客机的重心包线,旅客移动对包线缩减影响大。放宽包线范围能够在保证安全的前提下提高运行效率,减少压舱物的使用。

5 结论

国内民航货机市场发展较快。客改货机队不断增加,以及客机使用客舱临时装载货物,货机运行规模持续发展对载重平衡工作带来更高要求。

载重平衡控制方法还有改进和发展空间。未来电子舱单软件发展方向将是网络化和更加智能化,运行模式朝集中配载发展。国外也在发展对货物体积和装载进行 3D 虚拟仿真的技术,以提高装载效率和安全。

面对局方安全监管的要求与期望,航司从保证运行安全和提高运行效率等方面,需要增加软硬件建设和相关培训的投入,从各方面提高运营水平,杜绝安全隐患。

参考文献:

- [1] 罗廷芳. 基于 EXCEL 的民用飞机载重平衡舱单设计方法研究[C]//中国航空学会. 中国航空学会总体专业分会重量工程专业第十五次学术交流会论文集. [S.l.:s.n.], 2014.
- [2] 边振霄. CCAR-91 及 CCAR-135 部航空公司多机型飞机载重平衡 APP 系统设计[J]. 中国民用航空, 2016(11):105-106;59.
- [3] 徐刚. 浅谈货机载重平衡安全问题[J]. 空运商务, 2007(12):19-21.
- [4] 中国民用航空局. 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则:CCAR-121-R7[S]. 北京:中国民用航空局, 2021.
- [5] 中国民用航空局. 航空器空重和重心控制:AC-FS-121-68[S]. 北京:中国民用航空局, 2015.
- [6] 中国民用航空局. 航空器重量与平衡控制规定:AC-121-FS-135[S]. 北京:中国民用航空局, 2019.
- [7] 林彦. 民航配载与平衡[M]. 北京:清华大学出版社, 2011.
- [8] 万青. 飞机载重平衡[M]. 北京:中国民航出版社, 2004.
- [9] Airbus. 掌握载重平衡[M]. [S.l.:s.n.], 2004.
- [10] 张旭,王燕. 飞机装载平衡管理系统研究和开发[C]. 中国航空学会. 中国航空学会总体专业分会重量工程专业第十五次学术交流会论文集. [S.l.:s.n.], 2014.
- [11] 谷润平,贾旭颖,赵向领. 民航宽体货机装载优化研究[J]. 航空计算技术, 2018, 48(1):13-16.
- [12] 国际航空运输协会. 国际航空运输协会地面操作手册—IGOM(第 8 版)[S]. [S.l.:s.n.].

作者简介

董 航 男,硕士,工程师。主要研究方向:航空运行效率。
E-mail: 945357441@qq.com

黄 菲 女,硕士,工程师。主要研究方向:航空运行效率。
E-mail: huangfei@acae.com.cn

Research on weight and balance control method of civil freighter aircraft

DONG Hang* HUANG Fei

(AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd, Shanghai 200241, China)

Abstract: This paper mainly studies the weight and balance control method of civil freighter aircraft. In the past two decades, the fleet of domestic civil aviation passenger to freighter aircraft has increased substantially. Due to the structure limitation of freighter aircraft and loading compartments, the weight and balance control of freighter aircraft is particularly important. At present, domestic freighters use the electronic load sheet developed with MS Office Excel software, so the electronic load sheet of wide body freighters has also been investigated. Based on the daily operation practice of airlines and the requirements of civil aviation regulations, this paper introduces the weight and balance control of freighter aircraft. The factors that need to be considered for the aircraft gravity envelope reduction were studied and analyzed, including the loading error of the cargo load, the crew movement, the fuel weight to gravity center fluctuation curve, etc. Practical cases of the typical freighter fuel system, such as fuel system, paper balance diagram, electronic load sheet, operating limit and the influence of engine on the aircraft center of gravity were presented. At the end of the paper, other factors that affect the center of gravity of the aircraft were studied as order of loading and unloading, weight document management and engine. Through research and investigation, readers can have an understanding of the business in the related field of civil aviation freighter weight and balance, and provide a valuable reference role for relevant professionals.

Keywords: freighter; weight and balance; balance diagram; electronic loadsheet; engine

* Corresponding author. E-mail: 945357441@qq.com