

飞机乘客重量最优布置的一种建模方法

A Model Method of Optimized Passenger Weight Layout

王瑞 何政道 / 中国商飞上海飞机设计研究院

摘要: 飞机重心对飞行安全至关重要,也影响着飞机的性能。本文给出了乘客重量的定义,分析了飞机纵向重心对飞行性能的影响。通过分析确定了以乘客重量为自变量的约束条件和以实现所有乘客的纵向重心坐标靠近重心后极限为目的的目标函数,建立了考察不同重量的乘客在飞机中的座位最优布置的优化模型,并从理论上说明了优化模型具有最优解。算例结果表明,建立的最优化模型存在最优解,用此模型求解目标函数可行。此模型同样适用于行李箱布置与货物装载。

Abstract: The center of gravity of the aircraft is very important to the flight safety, and it also influences the performance of the aircraft considerably. The definition of the passenger weight is proposed, and the influence of the longitudinal center of gravity on the flight performance is analyzed. Through the analysis, the constraints with passenger weight being independent variables and the objective function that the longitudinal center of gravity of all the passengers is close to the aft center of gravity of the aircraft are built up. To study the optimized passenger layout on the cabin, an optimized model is proposed, and it is explained that this model has an optimized solution in theory. A calculation example is designed, and the result shows that the optimized model has an optimized solution and that to solve the objective function by this model is feasible. In addition, this model is also applicable to the layout of overhead stowage modules and the load of cargo.

关键词: 重心; 乘客重量; 飞行性能; 优化模型

Keywords: center of gravity; passenger weight; flight performance; optimization model

0 引言

飞机重心影响着飞机的稳定性和操纵性,对飞行安全非常重要。飞机有三个方向的重心坐标,其中纵向重心坐标对飞机的影响最大。在空机重量确定后,其纵向重心坐标即被确定。交付航空公司运营后,纵向重心坐标主要受使用项目、乘客、货物装载、燃油等影响。重心位置对性能的影响随着飞行阶段的不同而变化。在飞行的不同阶段,飞机纵向重心坐标随着乘客人员的走动、燃油的消耗、副翼等活动面的移动、起落架收放而移动^[1]。通过主动控制重心的技术可以获得飞行性能和经济性等方面的收益^[2]。

本文主要探讨如何布置不同重量

的乘客以使纵向重心坐标最优,并建立一种求解乘客重量布置的数学模型。该模型同样可用于优化货物装载的布置。

1 乘客重量的定义

飞机上的乘客重量与年龄、性别相关,季节不同也会影响登机乘客的重量。美国联邦航空局的咨询通告中将乘客重量以季节、年龄和性别加以区分,给出表1中的定义^[3]:乘客重量是乘客的真实重量或者是由局方批准的乘客平均重量。13岁及以上的个人定义为成年人,2到12岁的个人定义为儿童,未到2岁的婴儿认为是成年人标准平均重量的一部分。

乘客的重量服从正态分布^[4]如图1所示。

表1 标准平均乘客重量

类型	标准平均乘客重量	
	lb	kg
夏天成年人	190	86.2
夏天成年男性	200	90.7
夏天成年女性	179	81.2
夏天儿童	82	37.2
冬天成年人	195	88.5
冬天成年男性	205	93.0
冬天成年女性	184	83.5
冬天儿童	87	39.5

注:重量包括了乘客衣服和随身携带的个人物品。

文献[5]中“ 3σ 法则”认为,乘客重量落在(乘客平均重量-3倍的标准偏差,乘客平均重量+3倍的标准偏差)区间内几乎是肯定的。因而可得乘客重量的约束条件为:

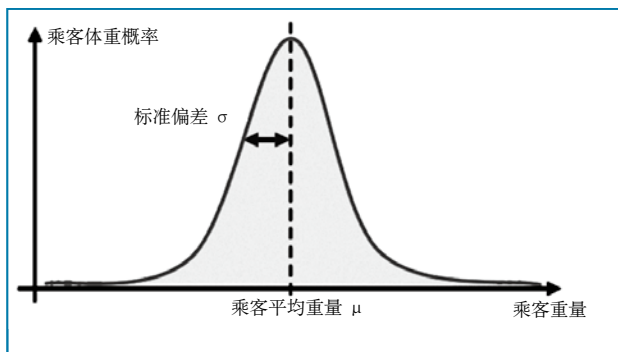


图1 乘客重量分布图

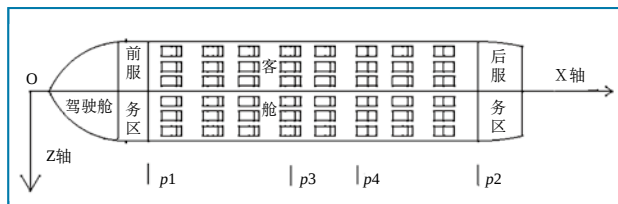


图2 飞机客舱座位布置示意图

$$\mu - 3\sigma \leq w \leq \mu + 3\sigma.$$

2 建立数学模型

2.1 纵向重心坐标靠后分析

飞机重心靠后有诸多好处^[4]。

- 1) 在一定范围内,重心位置越靠后,起飞距离越小(起飞重量越大);
- 2) 重心位置靠后,飞机的抬头姿态有利于飞机滚转,提升起飞滚转性能;
- 3) 重心位置靠后,飞机的抬头姿态有利于飞机爬升,起飞爬升性能就更好;
- 4) 重心位置靠后还能减少燃油的消耗;
- 5) 重心位置靠后还有利于缩短着陆距离或提升最大着陆重量。

但考虑到飞机装载的便捷,制定重心包线时也需要将重心的前极限尽量向前移。纵向重心也会影响飞行的稳定性^[6],现役飞机中采用放宽静稳定性技术获得广泛的应用,放宽对飞机静稳定度的要求,就可以获得可观的经济方面的收益^[7]。采用该技术,飞机的重心后限可相应向后移动^[8]。在保证飞机具有适当的稳定性的前提下,可调整飞机可移动

人员及物品布置使飞机重心尽可能地靠后。

2.2 计算模型

建立飞机的坐标轴,飞机纵向坐标轴为X轴,飞机横向垂直于X轴的坐标轴为Z轴。将飞机机头前某处的坐标设为O,客舱纵向位置坐标为 p_1 到 p_2 ,飞机使用空机纵向重心前、后极限分别为 p_3 和 p_4 ,设客舱乘客座椅有M排、N列,如图2所示。

第 i 排座位的乘客总重为 w_i ,乘客坐在第 i 排座位上的纵向重心坐标为 x_i ($i=1,2,\dots,M$),M为飞机客舱的座位排数。由此可得出,客舱中所有乘客的纵向重心坐标(以下简称乘客重心)为 $x_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^M w_i x_i}{\sum_{i=1}^M w_i}$,改变坐标为 x_i 那一排乘客的总重量 w_i 即可改变乘客重心。乘客重心要求在重心包线内,而重心包线的重心前后极限分别为 p_3 和 p_4 。故乘客重心满足约束条件 $p_3 \leq x_{cg} \leq p_4$ 。

由上述分析可知,将乘客重心尽量靠近重心后极限能获得更好的飞行性能和更大的经济性,即 $|x_{cg} - p_4| \rightarrow 0$,乘客重心随着坐标 x_i 的一排乘客总重变化而变化,故得到以 w_i 为自变量的目标函数 $f(w_i) = (x_{cg} - p_4)^2 \rightarrow 0$ 。此外,飞机起飞降落阶段,所有乘客都被要求坐在座位上,飞机巡航时只在某些时候有少许乘客走动或去盥洗室,忽略乘客走动或前往盥洗室的情况,得到约束条件为 $p_1 \leq x_i \leq p_2$ ($i=1,2,\dots,M$)。

综上所述,得到乘客分布的最优化模型:

$$\begin{aligned} \min f(w_i) &= (x_{cg} - p_4)^2 \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} w_{\min} \leq w_i \leq w_{\max}, i=1,2,\dots,M \\ p_3 \leq x_{cg} \leq p_4 \\ p_1 \leq x_i \leq p_2, i=1,2,\dots,M \end{cases} \end{aligned}$$

该优化模型为不等式约束的二次规划问题,目标函数为凸函数,约束条件为凸集,为凸规划问题,存在最优解。化为二次规划标准型,

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \frac{1}{2} x^T H x + c^T x \\ \text{s.t.} \quad &Ax \geq b \end{aligned}$$

矩阵H的秩为1,非正定矩阵,无法使用起作用集方法^[9]求解。但用罚函数法可解。

解此最优化方程,得到目标函数值最小的乘客位置,即坐标 x_i 的一排乘客总重量为 $w_{\text{isolution}}$ 时,乘客重心在重心包线内且最靠近重心后极限。

3 数值算例

飞机有N列座位,选取其中的一列进行计算分析,以反映出求解优化模型的思路。

设飞机长度35m, $p_1=5$, $p_2=30$, $p_3=10$, $p_4=20$,客舱位置坐标和重心坐标的单位均为m。为简化求解过程,假设客舱有4排座椅,座位坐标(座位坐标表示坐在该处的乘客的纵向重心坐标)见表2。4个乘客的重量分别为20、52、78、100千克,将乘客编号,分别记为1、2、3、4。

表2 乘客座位坐标

	x_1	x_2	x_3	x_4
座位坐标 x_i (m)	11.25	17.5	23.75	30

优化问题的求解是将这4个不同重量的乘客布置在这4个座位上,得到满足约束条件的最优解。由排列组合原理知,共有 $4!=24$ 种排列。编写程序,求出每一种排列的乘客重心,见表3。

以排列种类为横坐标,飞机纵向坐

表3 排列对应的重心坐标

排列种类	对应编号				重心坐标
	x_1	x_2	x_3	x_4	
1	1	2	3	4	23.95
2	1	2	4	3	23.4
3	1	3	2	4	23.3
4	1	3	4	2	22.1
5	1	4	2	3	22.2
6	1	4	3	2	21.55
7	2	1	3	4	23.15
8	2	1	4	3	22.6
9	2	3	1	4	21.7
10	2	3	4	1	19.7
11	2	4	1	3	20.6
12	2	4	3	1	19.15
13	3	1	2	4	21.85
14	3	1	4	2	20.65
15	3	2	1	4	21.05
16	3	2	4	1	19.05
17	3	4	1	2	18.65
18	3	4	2	1	17.85
19	4	1	2	3	20.2
20	4	1	3	2	19.55
21	4	2	1	3	19.4
22	4	2	3	1	17.95
23	4	3	1	2	18.1
24	4	3	2	1	17.3

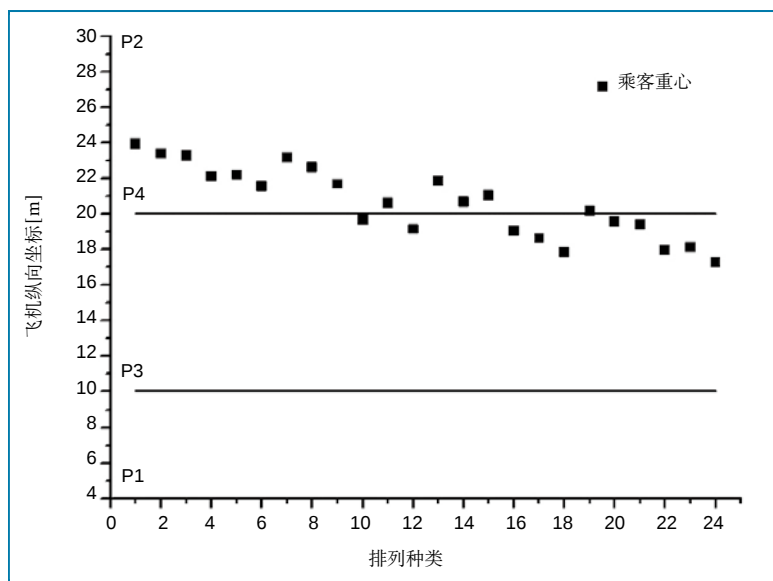


图3 排列对应的纵向坐标结果

标为纵坐标,由结果绘制出图3,

图3可看出,第10种排列为最优解,对应座位坐标 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 的乘客重量分别为52kg、78kg、100kg、20kg。乘客重心坐标为19.7m,非常接近重心后极限。

从建立的模型和算例的结果可看出:

1)建立的数学模型存在着最优解,可以通过改变乘客的座位坐标使乘客重心在满足重心极限的条件下尽可能地靠近重心后极限;

2)当用穷举法计算设计的算例时,乘客排列的种类将随着乘客数量的增加而以阶乘的形式急剧增大。对计算存储空间要求较大。

4 结论

通过对乘客重量的定义,对飞机纵向重心坐标的影响分析,建立了求解问题的最优化模型,并通过设计的算例也可以看出,所建立的数学模型可以得到最优值。

本文建立的计算模型适用于行李以及货物装载,比如可根据行李的重量调整行李的位置,虽然乘客会将行李放

在自己方便取放的位置,但依然可以采取实现行李位置的可调,也可在飞机起飞前,通过对货物装载的配平优化飞机纵向重心坐标,进而实现飞机的更好的飞行性能和达到更大的经济性。

AST

参考文献

- [1] 税清才,王秋萍.飞机重心允许范围设计准则[J].飞行力学,2003,21(3):63-66.
- [2] Heidmann H. Trim tank system for optimizing drag at the center of gravity [R]. Jahrestagung, Stuttgart, West Germany, Germany: Deutsche Gesellschaft fuer Luft-und Raumfahrt, 1982.
- [3] FAA. Advisory Circular, aircraft weight and balance control[Z].
- [4] Airbus. Weight and Balance Manual[Z]. 2004.
- [5] 盛骤,谢士千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2005:60.
- [6] 王小平.民用飞机重心包线研究[J].民用飞机设计与研究,2008,24(1):8-10,55.
- [7] 许维进,刘志敏.重心位置对飞行阻力及其飞行性能的影响[J].飞行力学,1999,17(1):54-58.
- [8] 李乐尧,李俨,王新民.放宽静稳定性大型客机纵向控制增稳系统设计[J].飞行力学,2010,28(4):25-28.
- [9] Stephen J N, Wright J. Numerical Optimization[M]. Beijing: Science Press,2006: 8-9.

作者简介

王瑞,硕士,助理工程师,主要研究方向为飞机重量控制与平衡。