

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.02.020

驾驶舱人机界面演变与发展趋势

An Analysis Method of Range Capability for Civil Aircraft with En-Route Wind

张伟¹ 张洁²/ZHANG Wei¹ ZHANG Jie²

(1. 中国商用飞机有限责任公司; 2. 上海飞机设计研究院)

(1. Commercial Aircraft Corporation of China Ltd., Shanghai 200126, China;

2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

提出一种考虑统计风的民机航程能力图绘制方法。该方法构建了适用于航空公司运行的机型航程计算简化模型,提出统计风和地面距离迭代算法,同时考虑往返程,兼顾不同统计概率、不同季节,更符合航空公司运营实际需求。最后以 A320-215 飞机浦东机场 2 000 n mile 航程为例验证了该方法的效用。

关键词: 航程圈; 统计风; 当量静止空气距离; 莫卡托投影

中图分类号: V223+.1

文献标识码: A

[Abstract] The article presents a range capability calculation method for civil aircraft. The method builds a simplified aircraft range calculation model which applies to airlines operation, and presents an iterative algorithm of en-route winds and ground distance. This method considers the different statistical probability, seasons, and the round trip difference. Taking A320-215 aircraft taking off from Shanghai Pudong International Airport with 2000 n mile range as an example, it shows that the method is validated.

[Keywords] range capability; en-route wind; equivalent static air distance; Mercator Projection

0 引言

民用飞机销售工程主要回答客户需要多少飞机、能不能飞和赚不赚钱等 3 个核心问题^[1]。其中机场和航线适应性用于阐述飞机“能不能飞”的问题,同时解决在不能飞的时候怎样才能飞的问题^[1-2]。能不能飞的问题中客户最关注的就是满客航程能力,满客航程能力一般通过商载航程图和航程能力图(或航程圈图)来表示,而后者则更为直观。以航程能力图为研究对象,提供一种可供程序快速计算且能更准确获得航程能力的方法,从而提高航程能力图的准确性和可信度,也可用于开航性能初步判断。

1 现状及问题

运输类飞机常用从某地出发的航程能力图来表示飞机的航程能力。航程能力图是应用商载-

航程曲线的当量静止空气中的距离建立的。当量静止空气中的距离是指,飞机在给定风的航路上飞行所需的时间内在静止空气中所能飞行的距离。风的惯性标记是逆风为负号,顺风用正号。航程能力图通常不是圆形,更多的是类似圆形的图形。^[3]

$$\text{当量静止空气距离} = \text{航线距离} \times \frac{\text{飞行速度}}{\text{飞行速度} + \text{风}} \quad (1)$$

目前对航程能力的研究都主要集中在静风状态,其中向小军、高升的研究给出了静风的最大商载航程、最大燃油航程、空载航程的计算方法^[4];张陈力子、祝雯生、余雄庆的研究给出了基于 MATLAB SIMULINK 的商载航程程序开发方法,实际商载航程与性能分析程序计算值对比,平均误差为 5.4%^[5];张帅、余雄庆给出简化的静风航程计算方法,误差在 4% 以内^[6],而其他的研究也大多是为了解决民用飞机航程设计的问题^[7-9]。

航程能力图计算系统主要有两种,分别是静风航程圈图和统计风航程圈图。

1) 静风航程圈图主要代表系统有 GCMAP、OAG Mapper,如图 1 所示。该方法的缺点是无法考虑风的影响,主要原因在于统计风的算法较为复杂,同时还需要气象数据和机型性能模型。



图 1 GCMAP 静风航程能力图示意

2) 统计风航程圈图主要代表系统有波音、空客、庞巴迪等飞机制造商,如图 2 所示。该方法的缺点为详细算法和系统未公布,不确定因素较多,且

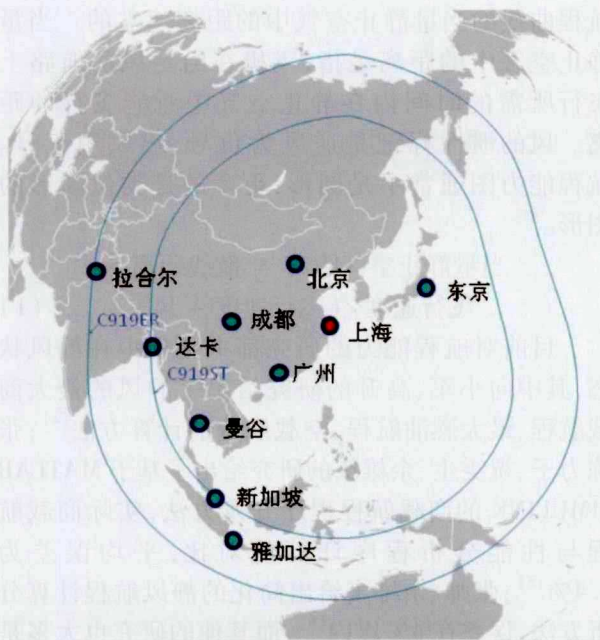


图 2 庞巴迪统计风航程能力图示意

未考虑往返程的影响。算法和系统未公布的主要原因在于机型性能数据的保密性。未考虑往返程的主要原因在于航线网络结构的差异。欧美等航空市场以轮辐枢纽式网络为主,一般开航时不一定需要考虑往返程,尤其是中短航线;而国内航空市场以城市对为主,开航时需要考虑往返程。中国位于中纬西风带,风对航程能力影响显著,因此必须考虑其影响。

可见,目前的系统存在的不足之处在于:

- 1) 缺少适用于航空公司运行的机型航程快速计算模型;
- 2) 统计风和地面距离的公布算法难以满足工程实践需求;
- 3) 未考虑往返程。

2 航程计算简化模型

2.1 模型

基于飞行计划计算方法,构建机型航程计算简化模型,用于统计风航程能力计算。机型航程计算简化模型,将主航段即航程分为爬升、巡航和下降三段,分别计算地面距离。

1) 下降

下降段提取各机型下降时间、下降空中距离数据,当飞行高度确定后,下降时间和下降空中距离变化也不大。一般认为每下降 1 000 ft (1 ft \approx 0.3 m) 下降时间需要 0.5 min、下降空中距离需要 3 n mile^[10],但支线机、单通道和双通道飞机略有差异。下降段风按主航段 2/3 或 70% 计算^[11],计算获得下降段地面距离,见式(2)。

$$\begin{aligned} \text{下降(爬升) 地面距离} = & \text{下降(爬升) 空中距离} + \\ & \text{下降(爬升) 风} \times \text{下降(爬升) 时间} \end{aligned} \quad (2)$$

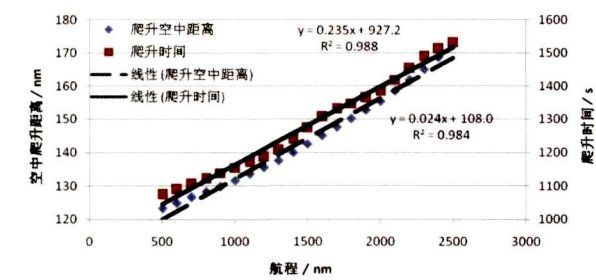
2) 爬升

爬升段提取机型爬升时间、爬升空中距离数据,建立爬升时间与航程的线性拟合关系,爬升空中距离与航程的线性拟合关系(各机型决定系数 $R^2 > 0.95$,其中 A320-215 飞机如图 3 所示)。爬升段风按主航段 2/3 或 70% 考虑^[11]。计算获得爬升段地面距离,见式(2)。

3) 巡航

巡航段根据静风航程、爬升和下降段地面距离,计算巡航段空中距离,再根据巡航真空速(考虑统计温度对真空速的影响)、主航段统计风,计算巡

A320-215 飞机爬升空中距离、时间与航程关系



注:数据来源于 PIANO

图 3 A320-215 飞机爬升空中距离、爬升时间与航程的关系

航段地面距离,参考式(1)的计算方法。

最后,累加下降段、爬升段和巡航段地面距离获

得主航段地面距离,即当量静风空气距离。

2.2 验证

使用与航空公司运营相近的性能分析方法,即与飞行计划计算模型接近、符合航空公司运营分析需求的方法。基于飞行计划的机型航程计算简化模型,在保证计算准确性的同时,降低了对性能数据的要求,而且开放化程度很高。航程计算简化模型与飞行计划计算模型的航程计算误差在 0.1% 以内,A320-215 飞机误差分析如表 1 所示。而飞行计划所需性能数据是完整的各剖面数据;航程计算简化模型仅需若干数据,模型高开放化,可根据实际需求进行更准确的航程计算,例如阶梯巡航、起飞重量受限、成本指数运营、二次放行、不同备降条件等。

表 1 A320-215 飞机飞行计划模型与简化航程模型航程误差对比

飞行计划模型地面航程/n mile								航程简化模型地面航程/n mile								误差					
静风航程 / n mile		风 / kn						风 / kn						风 / kn							
		-150	-100	-50	0	50	100	150	-150	-100	-50	0	50	100	150	-150	-100	-50	0	50	100
500	349.3	399.5	449.7	500	550.1	600.3	650.5	349.1	399.4	449.7	500	550.3	600.6	650.9	-0.05%	-0.02%	0.01%	0	0.04%	0.05%	0.06%
1 000	683	788.6	894.2	1000	1105.5	1211.1	1316.7	683	788.7	894.3	1000	1105.7	1211.3	1317.0	0.01%	0.01%	0.01%	0	0.02%	0.02%	0.02%
1 500	1016.5	1177.6	1338.7	1500	1660.9	1822.0	1983.1	1017.0	1178.0	1339.0	1500	1661.0	1822.0	1983.0	0.05%	0.03%	0.02%	0	0.01%	0.00%	-0.01%
2 000	1350.9	1567.2	1783.5	2000	2216.0	2432.3	2648.6	1350.9	1567.3	1783.6	2000	2216.4	2432.7	2649.1	0.00%	0.01%	0.01%	0	0.02%	0.02%	0.02%
2 500	1685.7	1957.0	2228.4	2500	2771.0	3042.4	3313.7	1684.9	1956.6	2228.3	2500	2771.7	3043.4	3315.1	-0.05%	-0.02%	0.00%	0	0.02%	0.04%	0.04%

3 统计风航程能力计算模型

3.1 方法流程

本模型在具体操作前应获得气象信息、飞行条件和飞机性能相关数据。飞机性能相关数据用于构建适用于航空公司运行的飞机航程计算简化模型。往返程航程能力计算是利用两个单程航程能力计算获得往返航程能力,如图 4 所示,具体方法流程如下:

- 1) 首先,判断计算单程(去程或回程)还是往返航程能力;
- 2) 其次,调用单程航程能力计算方法流程(如图 5 所示),计算去程、回程航程能力;
- 3) 最后,根据第一步的判断选择航程能力图位置。

单程航程能力计算是利用机型航程计算简化模型迭代计算地面距离,如图 5 所示,具体方法流程

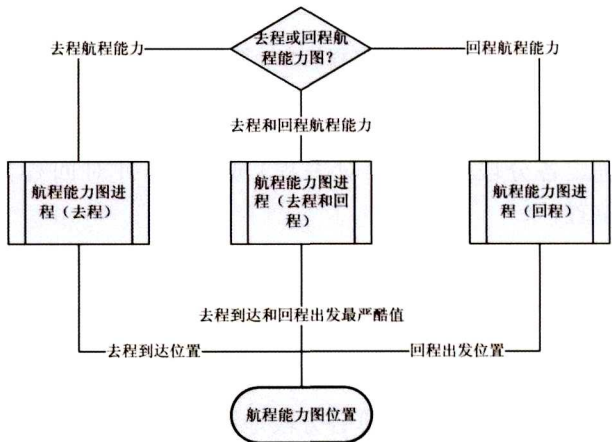


图 4 往返航程能力计算方法流程

如下:

- 1) 确定航程能力起始位置、静风航程和飞行高度信息,并将航程圈分段(一般选择 1 度一段,即 360 度);

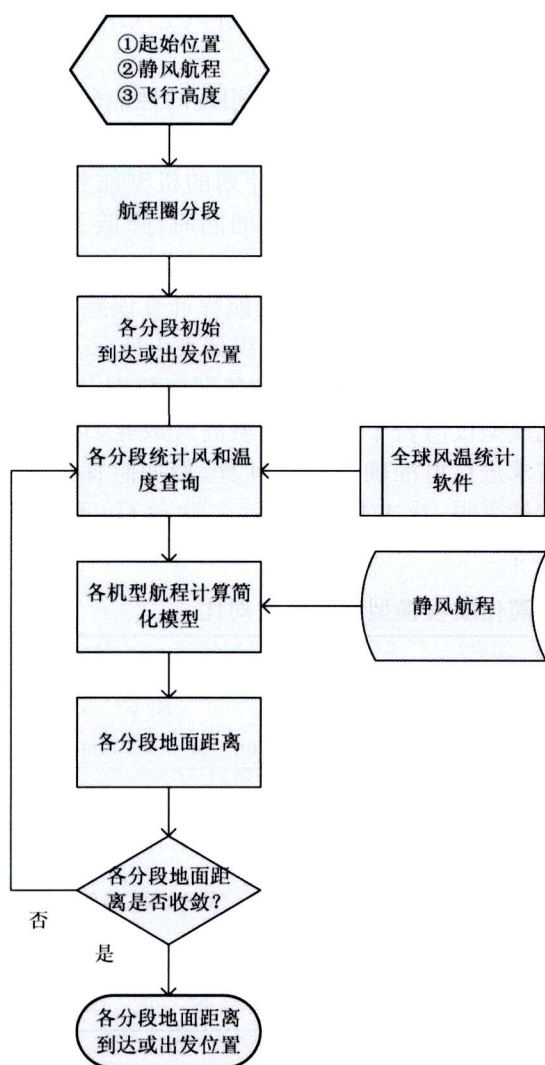


图5 单程航程能力计算方法流程

2) 根据起始位置、静风航程和航程圈分段方向确定各分段到达(针对去程)或出发(针对回程)位置;

3) 根据起始点位置、飞行高度,利用全球风温统计软件(如 Windtemp 等)查询各分段不同季节、不同统计概率的统计风和温度;

4) 根据静风航程、统计风和温度,利用机型航程计算简化模型,计算各分段地面距离;

5) 根据获得的地面距离,重复步骤3)~4),直至各分段地面距离收敛(一般地面距离收敛为差值小于 1km),确定各分段地面距离,并根据起始位置计算最终到达(针对去程)或出发(针对回程)位置。

与现有技术相比,该计算方法采用机型航程计

算简化模型依据迭代法获得考虑统计风的航程位置,在保证计算效率的前提下,达到提高航程能力图的准确性和可信度的效果。

3.2 莫卡托投影

航程能力计算完成后一般采用投影的方法展示在地图上,常用莫卡托投影和 WGS84 椭球体坐标系。《中华人民共和国国家标准海底地形图编绘规范 GB/T 17834 - 1999》中 5.1.3.1 款规定 1:250 000 及更小比例尺图采用莫卡托投影,基本比例尺(即 1:50 000, 1:250 000, 1:1 000 000)采用统一基准纬线 30°,非基本比例尺图以制图区域中纬为基准纬线。基准纬线取至整数或整分。

莫卡托投影正解公式: $(B, L) \rightarrow (X, Y)$, 标准纬度 B_0 , 原点纬度 0, 原点经度 L_0

$$X_N = K \ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{B}{2} \right) \times \left(\frac{1 - e \sin B}{1 + e \sin B} \right)^{\frac{e}{2}} \right] \quad (3)$$

$$Y_E = K(L - L_0) \quad (4)$$

$$K = N_{B_0} \times \cos B_0 = \frac{a^2/b}{\sqrt{1 + e^2 \times \cos^2 B_0}} \times \cos B_0 \quad (5)$$

莫卡托投影反解公式: $(X, Y) \rightarrow (B, L)$, 标准纬度 B_0 , 原点纬度 0, 原点经度 L_0

$$B = \frac{\pi}{2} - 2 \arctan \left(\exp^{-\frac{X_N}{K}} \times \exp^{\left(\frac{e}{2}\right) \ln \left(\frac{1 - e \sin B}{1 + e \sin B} \right)} \right) \quad (6)$$

$$L = \frac{Y_E}{K} + L_0 \quad (7)$$

式中, EXP 为自然对数底, 纬度 B 通过迭代计算很快就收敛了。

式中:

a 为椭球体长半轴;

b 为椭球体短半轴;

$f = \frac{a-b}{a}$ 为扁率;

$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$ 为第一偏心率;

$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1}$ 为第二偏心率;

$N = \frac{a^2/b}{\sqrt{1 + e^2 \cos^2 B}}$ 为卯酉圈曲率半径;

$R = \frac{a(1-e)^2}{(1 - e^2 \times \sin^2 B)^{\frac{3}{2}}}$ 为子午圈曲率半径;

B 为纬度, 单位 rad;

L 为经度, 单位 rad;

X_N 为纵直角坐标,单位 m;

Y_E 为横直角坐标,单位 m。

我国常用的 3 个椭球体参数见表 2。

表 2 我国常用的 3 个椭球体参数

椭球体	长半轴 a/m	短半轴 b/m
Krassovsky(北京 54 采用)	6 378 245	6 356 863.018 8
IAG 75(西安 80 采用)	6 378 140	6 356 755.288 2
WGS 84	6 378 137	6 356 752.314 2

注:数据来源于《中华人民共和国国家标准全球定位系统(GPS)测量规范 GB/T18314-2001》

3.3 案例应用

本案例以 A320-215 飞机上海浦东机场航程能力图为例进行说明。

飞行条件:爬升速度为 250 kn(低于 10 000 ft), 300 kn(高于 10 000 ft), M0.78(高于转换高度);巡航速度为 0.78 Ma;巡航高度 35 000 ft;下降速度为 M0.78,300 kn(高于 10 000 ft),250 kn(低于 10 000 ft)。

气象条件:年度概率 85% 统计风,温度为 ISA。

航程计算简化模型为:

爬升时间(s) = 0.235 × 静风航程(n mile) + 927.2;

爬升空中距离(n mile) = 0.024 × 静风航程(n mile) + 108.0;

下降时间 = 15.3(min);

下降空中距离 = 91.1(n mile)。

本论文构建的机型航程计算简化模型的参数可根据不同机型进行调整。对于不同爬升速度、下降速度和巡航高度,可调整爬升时间、爬升空中距离、下降时间和下降空中距离。对于新研机型,则选用与其爬升速度、下降速度和巡航高度接近的机型为替代。

如图 6 和图 7(标准纬度 30°,以上海浦东机场所在经度为原点经度,原点纬度为 0°,采用 WGS 坐标的莫卡托投影)以及表 3 所示,统计风和地面距离迭代计算可提高计算精度。以本例为说明,在静风航程 2 000 n mile 时,270°风向的无迭代去程地面距离为 1 567.3 n mile,迭代后为 1 545.7 n mile,各个方向地面距离最大误差超过 2%,航程差距

10 n mile ~ 50 n mile。

当风变化更大和航程更大时,影响将更显著,极大地提高了航程能力的精准度和可信度。同时,迭代次数可控,即通过 3 ~ 4 次迭代即可完成计算。

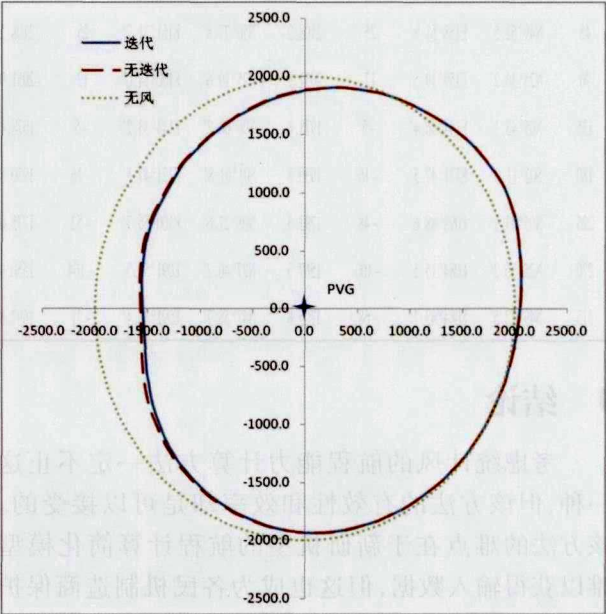


图 6 A320-215 飞机浦东机场考虑统计风时去程 2 000 n mile 迭代计算航程能力图

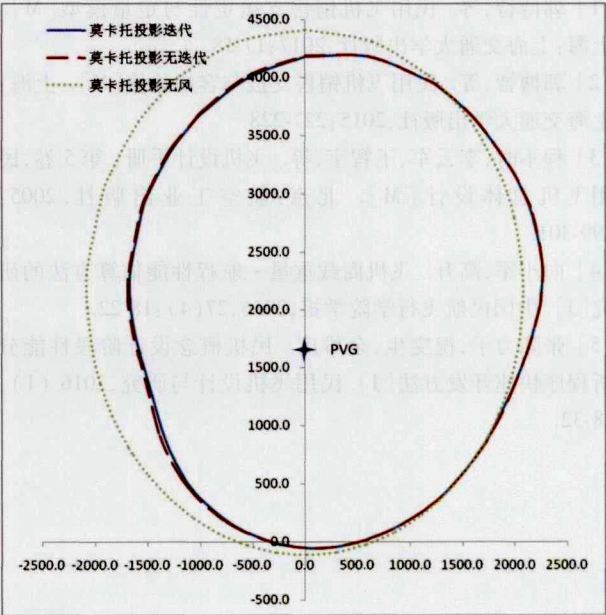


图 7 A320-215 飞机浦东机场考虑统计风时去程 2 000 n mile 迭代计算航程能力图 (莫卡托投影)

表3 A320-215 飞机浦东机场考虑统计风时去程 2000 n mile 地面距离计算实例

风向 / °	第一次迭代				第二次迭代				第三次迭代				第四次迭代				误差
	纬度	经度	风/kn	等效航程/n mile	纬度	经度	风/kn	等效航程/n mile	纬度	经度	风/kn	等效航程/n mile	纬度	经度	风/kn	等效航程/n mile	
0	N64°28.2'	E121°47.5'	-27	1883.2	N62°31.4'	E121°47.5'	-28	1878.8	N62°27.1'	E121°47.5'	-28	1878.8					0.20%
45	N49°52.5'	E158°51.8'	25	2108.2	N50°27.8'	E161°31.7'	25	2108.2									0.00%
90	N25°36.2'	E159°19.5'	12	2051.9	N25°19.6'	E160°14.0'	12	2051.9									0.00%
135	N05°43.1'	E144°46.4'	-5	1978.4	N06°00.2'	E144°33.2'	-5	1978.4									0.00%
180	S02°11.0'	E121°47.5'	-16	1930.8	S01°01.8'	E121°47.5'	-16	1930.8									0.00%
225	N05°43.1'	E098°48.6'	-48	1792.3	N08°27.6'	E100°56.3'	-52	1775.0	N08°41.3'	E101°07.0'	-53	1770.7	N08°44.7'	E101°09.6'	-53	1770.7	1.20%
270	N25°36.2'	E084°15.5'	-100	1567.3	N27°40.2'	E091°59.3'	-104	1550.0	N27°44.6'	E092°18.2'	-105	1545.7	N27°45.7'	E092°22.9'	-105	1545.7	1.40%
315	N49°52.5'	E084°43.2'	-68	1705.8	N47°58.7'	E091°36.4'	-71	1692.8	N47°53.2'	E091°53.9'	-71	1692.8					0.80%

4 结论

考虑统计风的航程能力计算方法一定不止这一种,但该方法的有效性和效率却是可以接受的。该方法的难点在于新研机型的航程计算简化模型难以获得输入数据,但这也成为各民机制造商保护数据的有效途径。

参考文献:

- [1] 郭博智,等. 民用飞机销售支援定性与定量模型[M]. 上海:上海交通大学出版社,2017:17-18.
- [2] 郭博智,等. 民用飞机销售支援与客户价值[M]. 上海:上海交通大学出版社,2015:227-228.
- [3] 程不时,李云军,王智宇,等. 飞机设计手册:第5卷,民用飞机总体设计[M]. 北京:航空工业出版社,2005:299-301.
- [4] 向小军,高升. 飞机商载重量—航程性能估算方法的研究[J]. 中国民航飞行学院学报,2016,27(4):18-22.
- [5] 张陈力子,祝雯生,余雄庆. 民机概念设计阶段性能分析程序快速开发方法[J]. 民用飞机设计与研究,2016(1):28-32.
- [6] 张帅,余雄庆. 客机航线性能分析的分段解析方法[J]. 飞行力学,2012,30(6):502-506.
- [7] 蒙文巩,马东立,崔飞. 民用飞机系列商载航程匹配设计[J]. 北京航空航天大学学报,2013,39(02):210-214.
- [8] 马超,吴大卫,俞金海,等. 基于参数化模型的大型民用飞机设计航程研究[J]. 航空学报,2016,37(1):112-121.
- [9] 张洁. 一种基于 O&D 市场的宽体客机衍生机型座级航程确定的方法研究[J]. 民用飞机设计与研究,2017(4):25-30.
- [10] 彼得·贝罗巴巴,阿梅迪奥·奥多尼,辛西娅·巴恩哈特. 全球航空业[M]. 赵维善,译. 上海:上海交通大学出版社,2010.
- [11] 傅职忠,谢春生,王玉. 飞行计划[M]. 北京:中国民航出版社,2012:80.

作者简介

张 伟 男,博士在读,高级工程师。主要研究方向:市场研究、产品策划、客户需求;E-mail: zhangweil@comac.cc

张 洁 女,硕士,小高工。主要研究方向:销售工程、市场研究;E-mail: zhangjie10@comac.cc