

基于质量功能配置的自动着陆仿真方法研究

刘妹^{*} 许浩楠 柯劼

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 着陆是飞机在运行过程中的一个重要阶段, 着陆分为手动着陆和自动着陆。具备自动着陆能力的飞机可以适应更多的运营场景, 极大地增加了飞机的市场竞争力。经过调研, 与自动着陆性能要求相关的适航标准大多为概率指标。为验证自动着陆系统是否满足适航条款中的性能要求概率指标, 需要进行大数量级蒙特卡罗仿真, 并且需要设置与实际飞行场景概率模型相一致的干扰因素概率模型。根据自动着陆相关适航要求捕获自动着陆需求, 并采用 QFD 工具进行二次转化将需求转化为自动着陆仿真的三点功能要素, 分别为概率分布拟合、仿真次数确定以及蒙特卡罗计算方法, 针对这三点功能要素采用 QFD 亲和图等方法对解决方案进行整理分类, 进而采用交叉验证法、正交试验法等方法确定最终的解决方案。针对最终方案进行自动着陆系统仿真, 确认自动着陆蒙特卡罗仿真方法的可行性。

关键词: 自动着陆; 需求捕获; 二次转化; 质量功能配置(QFD); 蒙特卡罗仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

OSID: 

0 引言

着陆是飞机在运行中的一个重要阶段, 在极端天气情况下, 基于机场能见度降低、飞行条件变恶劣等原因, 飞行员手动着陆工作负担较重, 具备自动着陆能力的飞机可以适应更多的运营场景, 极大地增加了飞机的市场竞争力^[1-4]。

自动飞行控制系统是民用飞机实现飞行控制的关键系统, 具有飞行指引、自动驾驶、自动着陆等功能^[5-8]。国外大型客机波音空客除早期型号, 均具备自动着陆能力, 国内大型客机虽已有两个取证型号, 但仍不具备自动着陆运行能力。为了提高民航的运营效率, 尤其是大客流量城市的运营效率, 越来越多的机场开始支持自动着陆, 如美国的洛杉矶国际机场、英国的伦敦卢顿机场、法国巴黎的戴高乐机场、国内的首都国际机场、北京大兴机场、上海浦东国际机场、香港国际机场等。可见, 无论在国内还是国外, 为提高民航在恶劣天气下的运营水平, 民用客机具备自动着陆能力是必然趋势。因

此, 对自动着陆系统的设计与仿真验证方法进行研究很有必要。

1 难点分析

针对自动着陆的适航标准要求主要参考欧洲航空安全局 EASA 发布的全天候运营的认证规范(CS-AWO)以及美国联邦航空管理局 FAA 制定的 CAT III 适航标准 AC120-28D 中的相关规定。自动着陆控制系统需要满足的性能要求详见表 1。

表 1 自动着陆性能要求

性能指标	平均	限制
纵向触地点距离跑道入口的距离小于 60 m	10^{-6}	10^{-5}
纵向触地点距离跑道入口的距离大于 823 m	10^{-6}	不适用
纵向触地点距离跑道入口的距离大于 914 m	不适用	10^{-5}
假设跑道宽度 45 m (150 ft), 飞机最外侧起落架距离跑道中心线的距离大于 21 m (70 ft)	10^{-6}	10^{-5}

* 通信作者. E-mail: liushu@comac.cc

引用格式: 刘妹, 许浩楠, 柯劼. 基于质量功能配置的自动着陆仿真方法研究 [J]. 民用飞机设计与研究, 2024(2):95-100. LIU S, XU H N, KE J. Automatic landing simulation method based on quality function deployment [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(2):95-100(in Chinese).

表1(续)

性能指标	平均	限制
飞机下降速率超过结构限制	10^{-6}	10^{-5}
滚转角过大使得机翼先触地	10^{-8}	10^{-7}
横向速度或侧滑角超过结构限制	10^{-6}	10^{-5}

根据适航条款规定:1)在试验场景设置时需要将所有扰动输入变量设为随机变量,计算着陆失效概率;2)适航标准大多为 $1\times10^{-8}\sim1\times10^{-6}$ 的概率指标。

可见,自动着陆仿真技术的难点在于:1)自动着陆系统仿真需要进行不确定性量化,使得仿真场景概率分布可以与运营时期的场景分布保持一致^[9-10];2)要验证 $1\times10^{-8}\sim1\times10^{-6}$ 量级的着陆性能指标需执行大量自动着陆仿真,耗时较长。

2 仿真需求捕获与分析

上述难点需要确定对应的解决方案,针对自动着陆蒙特卡罗仿真收集了6项需求,详见表2。

表2 自动着陆仿真需求

序号	顾客需求
1	干扰因素模型准确
2	蒙特卡罗仿真覆盖运营飞行场景
3	提高仿真效率
4	验证适航条款
5	缩短试验与验证周期
6	减少成本投入

采用QFD工具,对6项需求进行二次转换,可以得到满足这些需求必须具备的4项功能要素,具

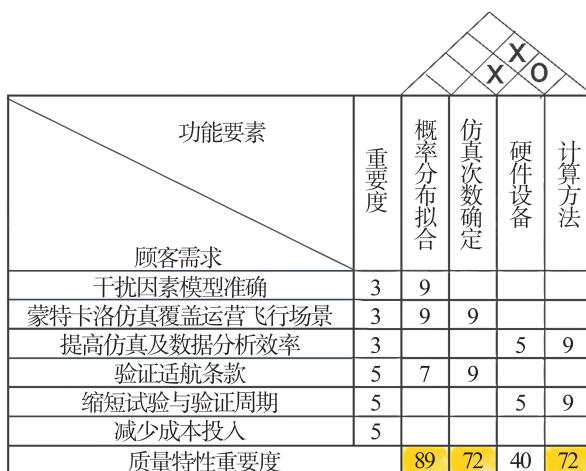


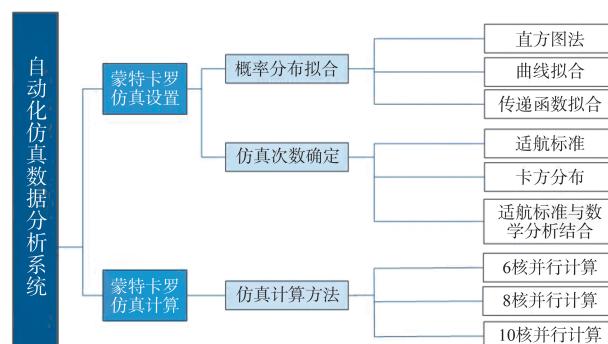
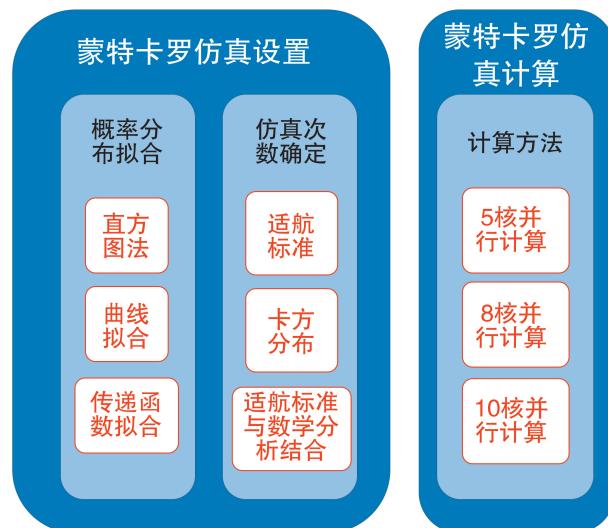
图1 顾客需求转化为功能要素

体分析方法如图1所示。图中,“o”表示以o为顶点的三角形两角对应的两条功能要素存在一定的正相关性,“x”表示负相关,空格表示两条要素没有相关性。

根据QFD需求二次转化,分别对提出的4项功能要素根据顾客需求进行打分,进而根据顾客需求的重要度进行加权,经过综合评估,分值较高的3项功能要素分别为概率分布拟合、仿真次数确定以及仿真计算方法,确定自动着陆蒙特卡罗仿真需要考虑的功能要素。

3 采用QFD方法确定方案

针对上述功能要素,采用QFD亲和图对方案进行分类,详见图2。经过分类,可以得到设计方案系统图,详见图3。



接下来,可结合质量工具对不同的方案进行分析比较,针对每个功能要素确定最佳解决方案。

3.1 概率分布拟合方案确定

大部分干扰因素已经具有成熟的拟合模型,而对于自动着陆的蒙特卡罗仿真,风干扰为影响自动着陆性能的关键因素之一^[11],且没有成熟的拟合方法,因此需要针对风模型确定拟合方法。本节采用适航条款 AC120-28D 附录 4 图 A4-1 和图 A4-2 数据进行风模型拟合。这里采用交叉验证法对三种拟合方法进行对比,进而确定解决方案。

首先将适航条款中提供的风模型数据均分为 5 组(分别编号为 A、B、C、D、E),保证每组数据都可以均匀覆盖整个阵风时间以保证模型拟合的准确性,选取任意 4 组数据进行模型拟合,并采用拟合的模型对第 5 组数据进行预测,将预测结果与第 5 组数据进行比较,针对上一节中提出的三种拟合方法,采用 5 轮交叉验证,进而计算不同拟合方法的拟合精度情况,如表 3 所示。误差计算公式为:

$$\text{误差} = \sum (\text{预测值} - \text{实际值})/n \quad (1)$$

表 3 交叉验证法-模型拟合

方案选择	直方图法	曲线拟合	传递函数拟合
ABCD 拟合 E 测试	0.07	0.01	0.05
ABDE 拟合 C 测试	0.06	0.02	0.04
ACDE 拟合 B 测试	0.07	0.02	0.03
BCDE 拟合 A 测试	0.08	0.01	0.06
ABCE 拟合 D 测试	0.08	0.01	0.04
误差均值	0.072	0.014	0.044

经过交叉验证可以得到曲线拟合的拟合精度最高,拟合误差最小。

3.2 仿真次数方案确定

关于仿真次数有以下三种方案。1)按照适航标准中对仿真次数要求的规定条款进行;2)卡方分布:卡方分布可以描述仿真次数与概率拟合误差之间的数学关系;3)适航标准与数学分析结合:取方案 1 与方案 2 中得到的仿真次数的最大值。采用表 4 评价矩阵法进行仿真次数确定的方案选择。

表 4 评价矩阵-仿真次数确定

方案	可信度	直观性	总分
适航标准	3	1	4
卡方分布	1	3	4
适航标准与数学分析结合	5	5	6

运用评价矩阵,从直观性和可信度两方面进行打分后可得,适航标准与数学分析结合方案的得分最高,因此选用该方式进行仿真次数确定。

3.3 仿真计算方法方案确定

仿真计算选择并行计算方法,如图 4 所示,使用 MATLAB 采用多仿真节点并行计算,可极大地提高仿真计算效率。实际过程中采用若干台性能相同的 14 核计算机作为计算硬件载体。并行计算需要考虑两点:并行计算的主机数、每台主机调用核数。并行计算平台的主机数量过多会造成任务分配计算机资源不足,过少则会失去并行计算优势。每台主机调用核数过少会造成计算效率不足,过多则会占用过多计算内存,导致计算机卡顿甚至死机。

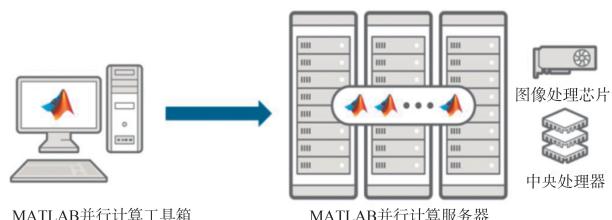


图 4 并行计算架构图

采用正交试验法来进行要素确定。每种要素分为 3 个位级,详见表 5。电脑主机数分别选用 3 台、4 台及 5 台进行试验;每台主机调用核数分别是 6 核、8 核和 10 核。考虑因素为仿真速度和内存占用率。考核指标为仿真总时间,用时最短最佳。

表 5 正交试验因素位级划分表

因素	位级			考虑因素
	1	2	3	
电脑主机数	3	4	5	仿真速度 内存占用率
调用主机核数	6	8	10	仿真速度 内存占用率

采用 $L_9(3^2)$ 正交试验法,根据表 6 正交试验表开展试验。

表 6 正交试验表

试验号	电脑主机数	调用每台 主机核数	20 组自动着陆 仿真总时长
1	1	1	20
2	1	2	18
3	1	3	100
4	2	1	16
5	2	2	15
6	2	3	80
7	3	1	12
8	3	2	11
9	3	3	50
K1	138	48	
K2	111	44	K=322
K3	73	230	
R	65	186	

根据表 5 定义的位级基于表 6 进行 9 组试验, 根据试验结果进行正交计算, 计算公式为:

$$\text{电脑主机数 } K_i = \sum \langle \text{仿真时长} | \text{电脑主机数} = i \rangle \quad (2)$$

$$\text{调用核数 } K_i = \sum \langle \text{仿真时长} | \text{调用核数} = i \rangle \quad (3)$$

计算得到主机数 K_3 , 每台主机调用核数 K_2 对应的仿真时间最短。目前的配置下, 5 机 8 核并行计算的方式进行自动着陆蒙特卡罗仿真运算, 运算速度最佳。

4 仿真结果

4.1 概率分布拟合

选取风模型进行拟合, 根据适航条款中 AC120-28D 附录 4 中第 3 页图 A4-1 和图 A4-2 数据进行顺风和侧风概率分布曲线拟合^[12], 拟合结果如图 5 所示。

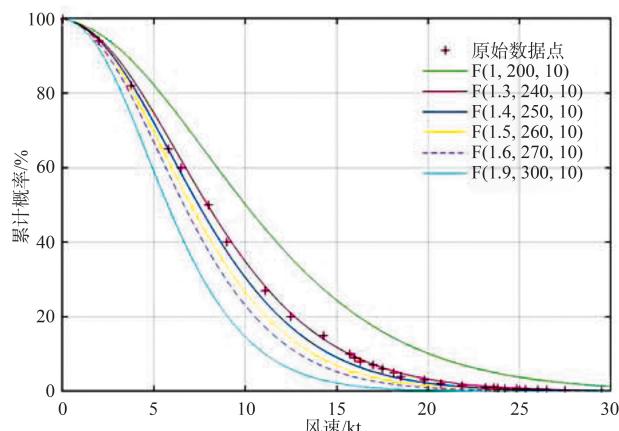


图 5 顺风和侧风数据曲线拟合

拟合数据为非正态分布, 不能通过均值方差等参数确认拟合效果, 因此需要采用非参数检验法、选择交叉验证法进行风模型拟合效果检验。

根据经验假设拟合容差为 0.05, 数据拟合差值小于 0.05 的部分认为数据与拟合结果相同, 差值大于 0.05 的部分认为数据拟合有误差。如果数据拟合有误差的数据小于总体数据的 5%, 则认为数据拟合准确。

表 7 交叉验证表

交叉验证	顺风	侧风
ABCD 拟合 E 测试	96.73%	95.42%
ABDE 拟合 C 测试	97.23%	96.18%
ACDE 拟合 B 测试	96.14%	96.97%
BCDE 拟合 A 测试	98.42%	95.35%
ABCE 拟合 D 测试	97.18%	97.16%

将风模型数据均分为 5 组 (A、B、C、D、E), 保证每组数据都可以均匀覆盖整个阵风时间以确保拟合的准确性, 选取任意 4 组数据进行模型拟合, 并采用拟合的模型对第 5 组数据进行预测, 将预测结果与第 5 组数据相减得到模型拟合误差值, 将误差值与容差进行比较, 误差百分比公式为:

$$\sum (\text{预测值} - \text{实际值}) < \text{容差} / n \quad (4)$$

计算风模型预测误差小于容差的数据占测试集总量的百分比。通过表 7 的 5 组交叉验证, 顺风与侧风的拟合误差均小于 5%。风模型的拟合精度满足要求。

4.2 仿真次数方案确定

适航标准中对自动着陆仿真系数的相关要求如表 8 所示, 适航条款要求自动着陆系统验证需要至少 1 000 次着陆仿真试验。

采用卡方分布方法进行仿真次数确定。卡方分布经常用于数据分析工作, 卡方分布可以描述实际数据、拟合数据与样本数量三者之间的关系, 样本数量与参数拟合误差之间的关系如图 6 所示。根据卡方分布曲线可以得到, 当样本数量为 1 000 时, 真实均方根与样本均方根介于 (0.958 03, 1.045 8)

之间,在区间内真实均方根与样本均方根的比例在 $1\pm5\%$ 以内,均方根误差小于5%,选择开展1 000组蒙特卡罗仿真试验已可较好地拟合样本。

表 8 自动着陆性能适航标准

美国联邦航空局标准	欧洲航空安全局标准
批准III类天气飞机起飞、着陆和滑跑的标准(AC120-28D)规定对于在新型飞机或新型平视仪装置中通过引导(例如,平视仪引导系统)进行手动控制的着陆和滑跑系统的初始认证,通常需要至少1 000次模拟着陆试验和至少100次实际飞机着陆试飞试验 ^[12]	全天候运营的认证规范(CS-AWO)适航标准规定至少100次飞行试验验证着陆系统的性能

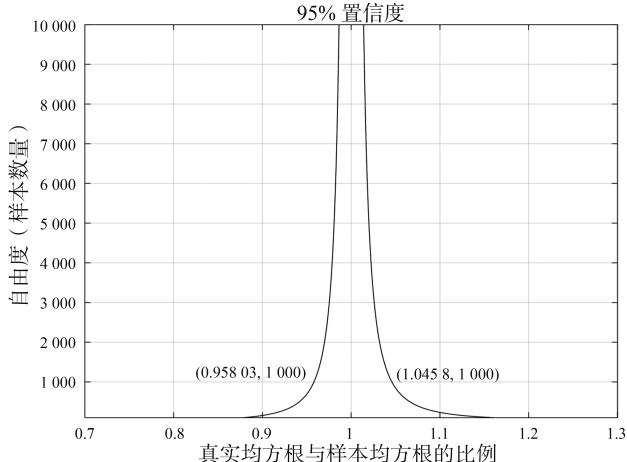


图6 卡方分布曲线

综上所述,取适航条款与卡方分布确定的仿真次数的最大值1 000次,作为自动着陆蒙特卡罗仿真次数。

4.3 仿真计算方法

搭建并行计算硬件平台,编写并行计算脚本,调用仿真程序,自动着陆蒙特卡罗仿真结果如图7和图8所示,完成1 000组自动着陆蒙特卡罗仿真用时约为10 h。单机仿真100组自动着陆数据用时约20 h,可以推断得出单机仿真1 000组自动着陆数据需要用时200 h。即并行计算的方针方法相较于单机仿真,大幅缩短了仿真时间。

5 结论

1) 与自动着陆性能要求相关的适航标准大多为概率指标,需要进行大量级蒙特卡罗仿真进行系统验证。将自动着陆系统仿真相关需求采用QFD

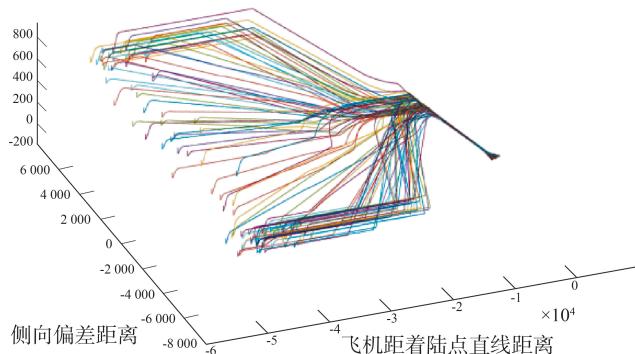


图7 自动着陆蒙特卡罗仿真结果

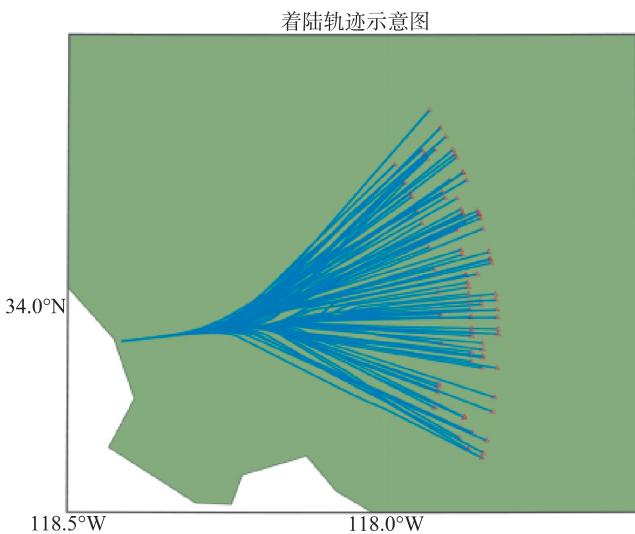


图8 自动着陆蒙特卡罗仿真俯视图

方法二次转化得到三项功能要素,分别针对三项功能要素提出不同的解决方案,通过QFD工具对方案进行归纳整理,采用评价矩阵、正交试验法以及交叉验证法等方法对提出的方案进行分析比较,确定了自动着陆蒙特卡罗仿真的最佳实施方案。

2) 对自动着陆蒙特卡罗仿真方案进行仿真试验,仿真得到:结果概率分布拟合满足精度要求;进行1 000组蒙特卡罗仿真后得到的样本数据与期望数据的样本均方根误差小于0.05,满足样本拟合要求;采用多主机多核并行计算的方法进行蒙特卡罗仿真,相对于单机仿真极大地缩短了自动着陆仿真时间。因此,自动着陆蒙特卡罗仿真设计方案可行。

参考文献:

- [1] 王申江,李中.民用飞机自动着陆系统研究[J].科技视界,2017(4):332,331.
- [2] 栾志博,郑淑涛,李洪人.飞行模拟器自动着陆系统的建模与仿真[J].计算机仿真,2011,28(5):47-51.

- [3] 郝晓红. 基于逆系统理论的飞机自动着陆控制系统仿真分析 [J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(12): 22-26.
- [4] 孙晓意, 王敏文. 飞机自动着陆鲁棒控制系统的设计与仿真 [J]. 飞行力学, 2005, 23(4): 33-36.
- [5] 赵宏业, 杨开智, 王佳. 自动着陆过程中跑道对准控制律设计与仿真 [J]. 航空计算技术, 2022, 52(6): 68-71.
- [6] 申安玉, 申学仁, 李云保. 自动飞行控制系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 6-7. <https://doi.org/10.13645/j.cnki.f.d.2005.04.009>.
- [7] 柯劭, 王兴波, 魏强. 民用飞机高度综合化自动飞行控制系统研究 [J]. 软件导刊, 2015, 14(7): 90-92. <https://doi.org/10.11907/rjdk.151589>.
- [8] 方俊伟, 汤超, 张翔, 等. 基于模型的民机自动飞行功能分析与设计 [J]. 民用飞机设计与研究, 2016(1): 68-71, 92. <https://doi.org/10.19416/j.cnki>.
- [9] 1674-9804. 2016. 01. 020.
- [10] 张超, 陈磊, 陈宗基. 基于视觉的 UCAV 自主着陆蒙特卡罗仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(9): 2235-2240.
- [11] 徐钟济. 蒙特卡罗方法 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [12] 邹新生, 李春文. 在复杂大气条件下的飞机自动着陆控制器设计与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1286-1288.

作者简介

- 刘姝 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 自动飞行系统。
E-mail: liushu@comac.cc
- 许浩楠 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 自动飞行, 自动着陆, 大数据综合。
E-mail: xuhaonan@comac.cc
- 柯劭 男, 硕士, 研究员。主要研究方向: 自动飞行, 飞管综合。
E-mail: kejie1@comac.cc

Automatic landing simulation method based on quality function deployment

LIU Shu^{*} XU Haonan KE Jie

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

Abstract: Landing is a crucial phase during an aircraft's operation, which is divided into manual and automatic landing. Aircraft equipped with automatic landing capabilities can adapt to a wider range of operational scenarios, significantly enhancing their market competitiveness of the aircraft. Through research, it has been found that airworthiness standards related to automatic landing performance are mostly probabilistic indicators. To verify whether an automatic landing system meets the performance requirements of the airworthiness criteria's probabilistic indicators, extensive Monte Carlo simulations need to be conducted, and the probability model of interference factors needs to be set to be consistent with the actual flight scenario probability model. Capturing the requirements for automatic landing based on relevant airworthiness criteria, and using quality function deployment (QFD) tools, these requirements were transformed into three key functional elements for automatic landing simulation: probability distribution fitting, simulation iteration determination, and Monte Carlo calculation method. These three functional elements were organized and categorized using tools like QFD affinity diagrams. Further methods such as cross-validation and orthogonal experiments were employed to determine the final solution. The chosen solution was then applied in the simulation of an automatic landing system to confirm the feasibility of the Monte Carlo simulation method for automatic landings.

Keywords: automatic landing; requirement capture; secondary transformation; quality function deployment (QFD); Monte Carlo simulation

* Corresponding author. E-mail: liushu@comac.cc