

系统仿真可信度评估方法研究



郭聪蕊 王 珺 封一鸣

航空工业信息技术中心 北京 100028

(781545918@qq.com)

摘 要 借鉴国外仿真模型校核与验证(Verification & Validation, V&V)标准和规范,提出了一种系统仿真模型可信度评估通用流程和方法。对模型评估的相关概念进行了阐述,给出了系统仿真可信度评估流程中的主要操作步骤。在评估方法中引入了考虑不确定性的特征选择验证方法进行模型验证。为展示评估验证方法的可行性与有效性,介绍了一个管路水击压力波动仿真模型可信度评估的实例。

关键词 仿真模型;校核与验证;模型可信度评估;不确定度分析;模型成熟度评估

中图分类号 N945.13

Research on Method of Credibility Evaluation of System Simulation

GUO Cong-rui, WANG Jun and FENG Yi-ming

AVIC Information Technology Co., Ltd., Beijing 100028, China

Abstract Based on the simulation model verification and validation standards and guidelines from overseas, this paper proposed a general process and method for system simulation model credibility evaluation. This paper describes the corresponding concepts and lists the main steps in model evaluation. This proposed evaluation method employs the feature selective validation with uncertainty. In order to illustrate the feasibility and validity of the proposed evaluation method, the paper introduces an example of pressure fluctuation simulation model credibility evaluation in waterpipe.

Keywords Simulation model, Verification and validation, Model credibility evaluation, Error analysis, Predictive capability maturity model

1 引言

近几十年间,在降低研制周期和经济成本的驱动下,计算机仿真技术越来越多地被应用于科学研究和工程设计中。仿真结果的可信度直接影响着设计和决策,仿真模型校核与验证的目的就是通过适当的流程与方法来保障模型的可信度。

国外在仿真模型可信度方面的研究可追溯到 20 世纪 60 年代^[1-2],Fishman 等^[3]于 1967 年率先提出将仿真系统的验证过程分为系统校核(system verification)与系统验证(system validation)两部分,简称为 V&V。1994 年和 1996 年,美国国防部分别发布 DoD Directive 5000.59 文件^[4]和 DoD Instruction 5000.61 文件以指导建模仿真及 VV&A^[5]。1999 年,美国海军也发布了针对建模仿真 VV&A 的指导性文件,确立了相关政策和流程^[6]。此外,工业界也对 V&V 产生了很大的兴趣。1997 年国际电气与电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)发布了分布式交互仿真的校核、验证与认证建议指南^[7]。2008 年和 2010 年,IEEE 又相继发布了计算电磁学建模与仿真的验证标准

IEEE Std 1597.1-2008^[8]和 IEEE Std 1597.2-2010^[9],前者推荐基于特征的选择验证方法(Feature Selective Validation, FSV)用于时间相关模型验证,后者描述了 FSV 方法的具体操作步骤。1998 年美国航空航天学会(American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA)发布了针对计算流体力学仿真的 V&V 指南^[10]。1999 年到 2003 年,美国 SANDIA 实验室将 V&V 和不确定度量理论应用于工程实践领域,探讨了 V&V 以及模型不确定度量在多物理场下的应用方法^[11],2015 年又发布了校核与验证框架体系^[12],将现象识别与排序技术(Phenomena Identification Ranking Technique, PIRT)^[13]和预测能力成熟度模型(Predictive Capability Maturity Model, PCMM)引入 V&V 评估流程。2006 年和 2009 年,美国机械工程师学会(American Society of Mechanical Engineers, ASME)分别发布了计算固体力学 V&V 指南^[14]和计算流体力学与传热学的 V&V 标准^[15]。

国内仿真技术近年发展迅速,早期工作多集中在武器、航空航天等领域。与国外相比,国内研究的关注点主要是各种模型验证方法在不同工程领域的应用,而模型评估体系、理论和工具几乎没有突破性的进展,且鲜有将国外先进体系架构

本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:《仿真模型准确度评估技术研究》项目

This work was supported by the Program of the Research on Simulation Model Accuracy Evaluation Technology.

通信作者:王珺(zhong_qiu1234@163.com)

引入国内工程领域的公开报道。

本文借鉴国外标准和规范,梳理主要工作内容,并选取有特点的技术方法,形成了一种适用于系统仿真的模型可信度评估方法。

2 可信度评估流程

2.1 模型评估相关概念梳理

目前国内关于可信度评估的表述尚不统一,本文对一些常用词做出解释。

(1) 准确度

准确度指测量值和真实值之间的接近程度,用误差表示。

准确度是完全客观的度量指标。

(2) 模型成熟度

模型成熟度是对模型预测能力的成熟度评级,可通过 PCMM 表示,分别从多个视角(如重构准确度、参数调用、代码校核、算法校核、模型验证、不确定度分析等)对仿真模型的预测能力进行考察。

(3) 可信度

可信度表示在给定的仿真目的下,模型使用者对仿真系统的信任程度。

2.2 可信度评估方法和步骤

系统仿真可信度评估流程包括整体目的与计划、仿真和验证试验、模型校核、不确定度分析、模型验证和可信度评估 6 个环节,如图 1 所示。

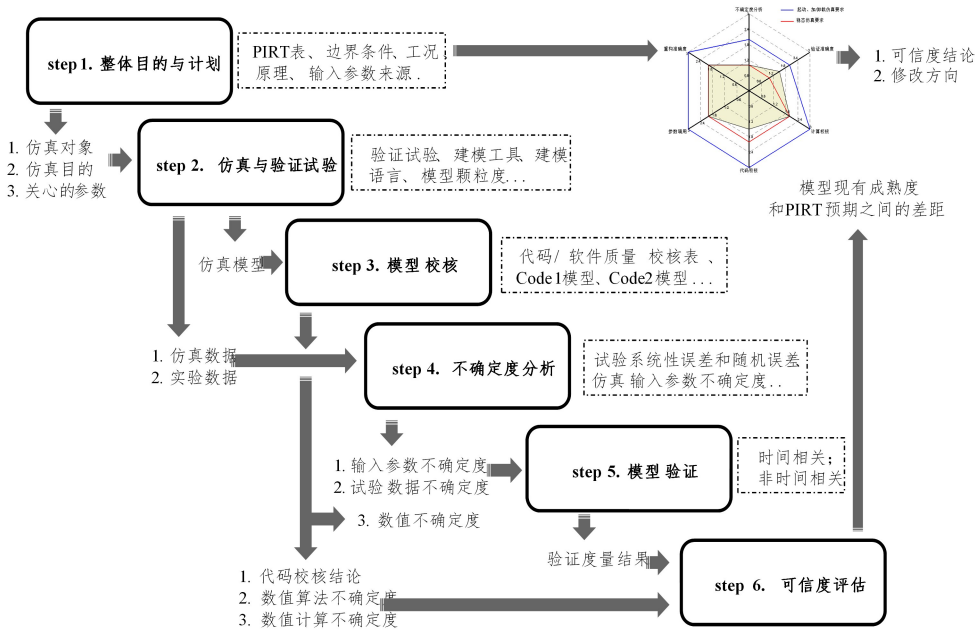


图 1 系统仿真可信度评估流程

Fig. 1 System simulation credibility evaluation process

(1) 整体目的与计划

明确仿真对象和目的,对所关注的物理过程进行 PIRT 评估。

PIRT 评估首先描述所关注的仿真对象静、动态特性,如“液压系统启动过程压力动态特性”或“电源系统加/卸载过程电压波动过程”等;随后分别从“物理”“校核”和“验证”3 个角度对仿真模型的预期进行主观评级。这种评级需要在建模之前进行,根据定性评估指标一般分为 0~1 级(低)、1~2 级(中)和 2~3 级(高)^[12]。

(2) 仿真与验证试验

对上一步所关心的物理过程或变量进行仿真计算,同时开展验证试验。

(3) 模型校核

模型校核分为代码校核和计算校核。其中代码校核又包括软件质量保证和数值算法校核^[16]。

软件质量保证可以通过参考软件质量工程相关内容,构建一个包含众多评价指标的软件质量校核清单,以确认模型可以正常、流畅地运行。对于系统仿真,校核清单一般包括:桌面检查、代码审查和走查、数据引用检查、工作边界检查、模

型接口检查、各条件分支功能检查与测试等。

数值算法校核主要校核模型所采取的数值算法是否合适,可采用 SANDIA 实验室提出的代码比较原则(Code Comparison Principle, CCP)^[12]来判定:

$$\|C1 - T\| \leq \|C1 - C2\| + \|C2 - T\| \quad (1)$$

其中, $C1$ 为研究对象; T 为真实物理现象的正确结果; $C2$ 为基准算法。如果 $C2$ 趋近于 T , 并且 $C1$ 趋近于 $C2$, 那么可以认为 $C1$ 趋近于 T 。

计算校核的目的是确保离散方程数值计算结果的准确性。对系统仿真而言,离散主要指时间步长对计算结果的影响。

(4) 不确定度分析

这一步的目的是定量给出仿真计算和试验的不确定度,并将其引入模型验证。

不确定度分析方法可采用 ASME V&V 20 标准所提出的“ $E=S-D$ ”模型,其中 S 为仿真结果, D 为试验结果, E 为仿真结果与试验结果之间的误差。ASME V&V 20 中关于验证不确定度 u_{val} 给出了明确的计算公式:

$$u_{val} = (u_D^2 + u_{num}^2 + u_{input}^2)^{1/2} \quad (2)$$

其中, u_D 为试验不确定度; u_{num} 为数值不确定度; u_{input} 为输入参数不确定度。

试验不确定度包含随机不确定度和系统不确定度^[17]:

$$u_D = 2 \sqrt{s_{\bar{X}}^2 + b_{\bar{X}}^2} \quad (3)$$

其中, $s_{\bar{X}}$ 为随机不确定度; $b_{\bar{X}}$ 为系统不确定度。

数值不确定度由算法不确定度和计算不确定度组成:

$$u_{num} = [(\delta_{num, Alg})^2 + (\delta_{num, Cal})^2]^{1/2} \quad (4)$$

其中, $\delta_{num, Alg}$ 为算法不确定度; $\delta_{num, Cal}$ 为计算不确定度。

输入参数不确定度的计算方法为:

$$u_{input}^2 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial S}{\partial X_i} \right)^2 (u_{X_i})^2 \quad (5)$$

其中, m 为输入参数个数; X_i 为第 i 个输入参数; S 为仿真结果; u_{X_i} 为第 i 个输入参数不确定度。

(5) 模型验证

模型验证的目的是评估仿真结果与试验结果的一致性^[10,18]。模型验证的度量可分为两类:非时间相关的模型验证和时间相关的模型验证。

系统仿真中主要处理的是时间相关数据的结果验证,属于模型验证中比较困难的领域。鉴于国内缺乏成熟的标准,本文使用了 IEEE 所推荐的 FSV 方法^[8-9],同时考虑了不确定度的影响^[18]。

(6) 可信度评估

仿真可信度表征的是 PCMM 评估结果对 PIRT 仿真预期的满足程度。通过 PCMM 表对模型成熟度进行评估,同时结合 PIRT 中提出的仿真预期进行模型可信度评估。

PCMM 评估分别从 6 个要素对仿真模型进行评估,其中“物理复现/输入参数”“代码/计算校核”和“模型验证/不确定度”分别对应 PIRT 中的“物理”“校核”和“验证”。PCMM 中 6 个要素的评估结果为 0~3 级,根据实际情况可在每一级中细分出 0.5, 1.5 和 2.5 级。

如果模型成熟度较好地覆盖了仿真预期,则认为可信度较高;反之则模型可信度较低。PIRT 和 PCMM 的评级不可避免地会引入主观偏见,因此模型的可信度包含模型准确度(纯客观评价)和模型应用效果对仿真预期的满足情况(包含一定的主观判断)。

3 应用举例

3.1 整体目的与计划

本例仿真的目的是模拟水击压力波动的动态过程,分别从物理、代码、验证 3 个角度对仿真效果提出了预期,如表 1 所列。

表 1 水击压力波动的 PIRT 评估

Table 1 PIRT evaluation form for water hammer pressure fluctuations

现象	要素	评级	
水击压力波动	物理	物理复现	中(1.5)
		输入参数	中(1.5)
	校核	代码校核	中(1.5)
		计算校核	中(1.5)
	验证	模型验证	中(2.0)
		不确定度	中(1.5)

注:表中评级栏一般分为 0~1 级(低)、1~2 级(中)和 2~3 级(高)^[12]

3.2 仿真与验证试验

以某次管道试验水击压力波动^[19]为例,利用自主开发的

modelica 热流体系统模型库^[20]搭建对应的系统仿真模型,仿真和试验结果比较如图 2 所示。

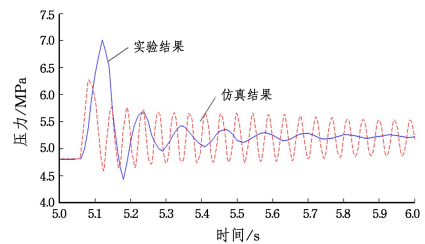


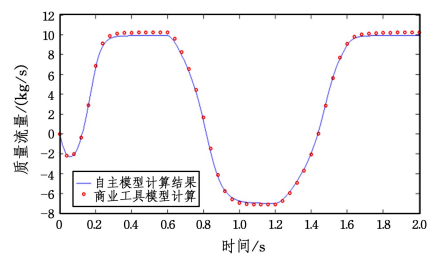
图 2 仿真结果与试验结果对比

Fig. 2 Comparison of simulation results and test results

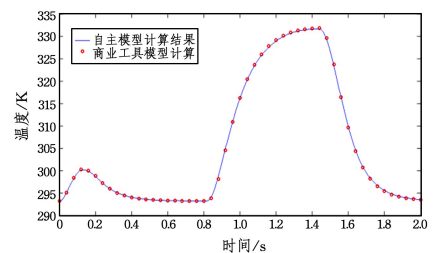
3.3 模型校核

软件质量校核内容和各项指标权重可根据使用情况自行定义,最终需要给出清单中各项目的评分结果和理由描述。

数值算法校核选择 AMESim 模型为基准算法,自主管路模型与 AMESim 管路模型的容腔内流量变化对比如图 3 所示。



(a) 流量对比



(b) 温度对比

图 3 自主热流体模型与 AMESim 模型计算

Fig. 3 Comparison of autonomous thermal fluid model and AMESim model to calculate flow

由计算结果可知,压力波动数值算法不确定度 $\delta_{num, Alg} \approx \pm 0.0002$ MPa;变换自主热流体仿真模型积分步长,得到的结果完全重合,所以忽略校核不确定度 $\delta_{num, Cal}$ 。经模型校核,管路压力波动模型中的数值不确定度 $u_{num} \approx \pm 0.0002$ MPa。

3.4 不确定度分析

对于试验不确定度的计算,假定简单管路的系统性不确定度仅来自于压力传感器的测量精度,假定压力传感器不确定度为 ± 0.01 MPa(量程 10 MPa,精度约 $\pm 0.1\%$);同时假定压力测量值的随机不确定度为 ± 0.1 MPa。综上,得到试验不确定度 u_D 为 ± 0.1005 MPa。

假定模型输入参数不确定度主要来自水的含气率和阀门关闭响应时间,仿真结果表明,水的质量含气率在 0%~5% 范围变化时水击压力波动变化非常小,约 0.01 MPa。阀门关闭响应时间在 50 ms~100 ms 范围变化时,水击压力波动幅值变化为 ± 0.5 MPa。因此输入参数不确定度 u_{input} 为 ± 0.5001 MPa。

代入式(2)得到不确定度 u_{val} 为 ± 0.5101 MPa。

3.5 模型验证

采用考虑不确定度的 FSV 算法对图 2 的数据进行处理, 得到幅值差异量 (Amplitude Difference Measure, ADM)、特征差异量 (Feature Difference Measure, FDM) 随时间的变化 (见图 4), 以及全局差异量 (Global Difference Measure, GDM) 统计直方图 (见图 5)。

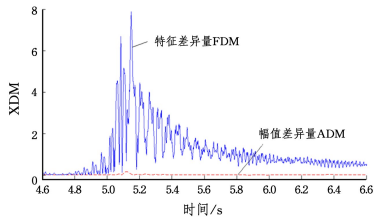


图 4 ADM 和 FDM 随时间变化

Fig. 4 ADM and FDM change over time

FSV 分析中, ADM 表示仿真和试验数据低频分量 (含直流) 的一致程度, FDM 表示中、高频分量的一致程度。从图 4 可以看出, 管路水击压力中频、高频动态过程仿真准确度较差, 稳态、低频动态过程准确度较好。仿真结果全局准确度不高, 在水击压力产生的瞬间仿真准确度最差。

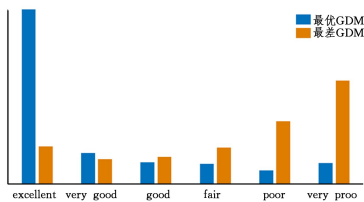


图 5 考虑数值和试验不确定度的 GDM 置信直方图

Fig. 5 GDM confidence histogram considering numerical and experimental uncertainty

从图 5 可以看出, 仿真模型的准确度整体一般, 且不确定度对模型准确度影响较大。

3.6 可信度评估

水击压力波动成熟度评估结果如表 2 所列。

表 2 PCMM 评估表

Table 2 PCMM Evaluation form

主要因子	等级	主要因子	等级
重构准确度	2	算法校准	2
参数调用	2	模型验证	1.5
代码校准	1.5	不确定度分析	2

管道水击压力波动仿真可信度评估结果如图 6 所示。

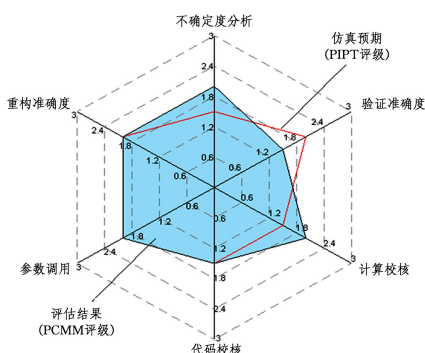


图 6 仿真模型可信度评估结果

Fig. 6 Simulation model credibility evaluation result

由图 6 可知, 除模型验证外, 其余要素都能满足预期, 仿真可信度有待提高。如果要提高仿真可信度, 主要应提高模型中、高频动态特性的准确度。

结束语 本文以某次管道试验水击压力波动仿真模型为例, 给出了仿真模型可信度评估流程和方法适用于实际工程的可能性, 同时评估结果为系统仿真模型的改善提供了详细的指导方向。

本流程方法不是简单地从试验和仿真结果的数值进行比较, 而是综合考虑了建模与试验过程中的误差。

本流程方法不仅适用于系统仿真模型, 对于场仿真模型也有一定的适用性, 但其适用范围需要进一步的验证。

参考文献

- [1] CONWAY R W, JOHNSON B M, MAXWELL W L. Some Problems of Digital Systems Simulation [J]. Management Science, 1959, 6(1): 92-110.
- [2] BIGGS A G, CAWTHOME A R. Bloodhood Missile Evaluation [J]. Journal of the Royal Aeronautical Society, 1962, 66(621): 571-587.
- [3] FISHMAN G S, KIVIAT P J. The Analysis of Simulation-Generated Time Series [J]. Management Science, 1967, 13(7): 525-557.
- [4] DoD Directive 5000. 59, DoD Modeling and Simulation (M&S) Management [S]. Department of Defense, 1994.
- [5] DoD Instruction 5000. 61, DoD Modeling and Simulation (M&S) Verification, Validation, Accreditation (VV&A) [S]. Department of Defense, 2003.
- [6] SECNAVINST 5200. 40, Verification, Validation and Accreditation (VV&A) of Models and Simulations [S]. U. S. Navy, 1999.
- [7] IEEE 1278. 4-2003, IEEE Recommended Practice for Distributed Interactive Simulation—Verification, Validation, and Accreditation [S]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.
- [8] IEEE 1597. 1-2008, IEEE Standard for Validation of Computational Electromagnetics Computer Modeling and Simulations [S]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008.
- [9] IEEE 1597. 2-2010, IEEE Recommended Practice for Validation of Computational Electromagnetics Computer Modeling and Simulations [S]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
- [10] AIAA G077-1998, Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations [S]. Reston: VA. , 1998.
- [11] DAKOTA. A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6. 8 User's Manual [J]. SAND2014-4633, May 8, 2018.
- [12] RICHARD G H, DAVID C M, JONATHAN W N. V&V Framework [J]. SAND 2015-7455, 2015.
- [13] DAVID J D. Experience Using Phenomena Identification and Ranking Technique (PIRT) for Nuclear Analysis [R]. BNL-NUREG-76750-2006-CP, 2006.
- [14] ASME V&V 10-2006, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics [S]. New York: NY. , 2006.
- [15] ASME V V 20-2009, Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer [S]. New York: NY. , 2009.

- [16] WILLIAM L O, TIMOTHY G T, CHARLES H. Verification, Validation, and Predictive Capability in Computational Engineering and Physics[R]. SAND 2003-3769, 2003.
- [17] ASME PTC 19. 1-2005, Test Uncertainty[S]. New York:NY. , 2006.
- [18] LING Y, MAHADEVAN S. Quantitative Model Validation Techniques; New Insights[J]. Reliab. Eng. Syst. Saf. 2013; 217-231.
- [19] DOU W, HU C X. Simulation and Experimental Study on Water Hammer Characteristics of Liquid Rocket Engine[J]. Rocket Propulsion, 2013, 39(2): 4.
- [20] WANG J, LV W J, MEN X S. Development of Thermal Fluid Simulation Model Library Based on Modelica [C]// The 8th China Aviation Society Youth Science and Technology Forum. 2018.



GUO Cong-rui, born in 1991, master, intermediate engineer. Her main research interests include multidisciplinary system modeling and simulation.



WANG Jun, born in 1984, master, senior engineer. His main research interests include multidisciplinary system modeling and simulation.

(上接第 555 页)

持飞行高度航段个数不能超过两个,因此仍有部分障碍物是以转弯方式规避的;随着 c_2 值的增大,算法逐渐倾向于以转弯的方式规避障碍物(见图 7(c),图 7(d))。此外, $c_2=1$ 时的计算耗时约为 $c_2=0$ 时的 0.5 倍,主要原因是当 $c_2=1$ 时,算法更倾向于通过转弯方式规避障碍物,B&B 中含有保持飞行高度的分支比较容易剪除,使得总迭代次数减少。与算例 1 类似,将本算法与文献[9]中应用的 A* 算法进行比较,当步长为 3 海里时,在 70 s 的计算时间内无法找出最优路径,当步长增加为 4 海里时,A* 算法找到最优路径的计算时间约为 7 s,与本算法在 $c_2=1$ 时的计算耗时相比,可见本算法在运算效率上更优。

表 2 算例二数值结果

Table 2 Numerical results of example 2

算例 1	$C_1=1, C_2=0$	$C_1=1, C_2=1$
耗时/s	11.07	5.17
B&B 展开节点数	5522	2587
$\int_0^1 \gamma_H'(s) \parallel ds/n \text{ mile}$	100.34	101.38
$l_{LF}/n \text{ mile}$	44.56	0
$L_T/n \text{ mile}$	100.34	101.38

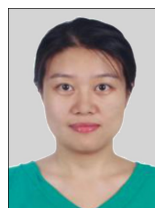
结束语 首先,本文建立了符合 RNP 操作规范的进离场程序三维模型,并考虑了实际运行中的约束条件。其次,给出了 3 种不同的障碍物规避方式,既扩充了最优化问题的解空间,又切合实际空管员及飞行员的操作习惯。随后,应用了 B&B 算法对问题进行解算,其中分支策略是基于不同障碍物规避方式提出的。最后,仿真结果表明,该算法可以在复杂障碍物布局下对最优进离场程序进行高效地解算;通过调整目标函数中权重系数的值可以获得连续爬升或下降的进离场程序,对国家倡导的民航降噪减排有积极意义。本文提出的优化方法可以有效地为实际进离场程序设计人员提供决策支持。在后续的工作中将在现有成果基础上拓展研究多条进离场程序的优化设计方法。

参考文献

- [1] Boeing. Current market outlook 2017-2036[R]. Seattle:Boeing, 2018.
- [2] International Civil Aviation Organization (ICAO). Doc. 9613-AN/937, Performance-based Navigation (PBN) Manual [S].

Montreal:ICAO, 2008.

- [3] DAI F Q, JIE L. Research on Flight Program Optimization of Central and Small Airport Terminal Area Based on PBN[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(34): 9270-9274.
- [4] YANG X S, DING S B, LEI Z, et al. Optimization of the entry and exit procedures of Ningbo Lishe Airport[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2007, 25(3): 8-12.
- [5] International Civil Aviation Organization (ICAO). Doc. 8168-OPS/611, Aircraft Operations [S]. Montreal:ICAO, 2006.
- [6] EELE A, RICHARDS A. Path planning with avoidance using nonlinear branch and bound optimization [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(2): 384-394.
- [7] PIERRE S, DELAHAYE D, CAFIERI S. Aircraft trajectory planning with dynamical obstacles by artificial evolution and convex hull generations [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2017, 420: 49-67.
- [8] LI J J, XU R M, LIU D S, et al. Improved ant colony algorithm for route planning optimization[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(14): 3276-3280.
- [9] MICHALEK D. Optimization of airport terminal-area air traffic operations under uncertain weather conditions[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [10] ZHOU J, CAFIERI S, DELAHAYE D, et al. Optimization of arrival and departure routes in terminal maneuvering area[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Research in Air Transportation. Istanbul, 2014: 1-4.
- [11] Eurocontrol Experimental Center (ECC). User manual for the base of aircraft data (BADA), revision 3. 10, EEC Technical Report No. 12 /04 [R]. France:EEC, 2012.
- [12] KIM D S, YU K, CHO Y, et al. Shortest Paths for Disc Obstacles[C]// Proceedings of the International Conference on Computational Science and Its Applications. 2004: 62-70.



ZHOU Jun, born in 1988, Ph.D, lecturer. Her main research interests include applied mathematics and air traffic management.