

文章编号:1674-8190(2016)02-253-06

民用飞机运行风险评估方法

郭媛媛,李龙彪,胡宇群,孙有朝

(南京航空航天大学 民航学院,南京 210016)

摘要:对民用飞机进行风险评估是十分必要的,为了降低民用飞机的运行风险,通过分析民用飞机运行风险评估现状,对于单机,给出故障模式影响分析方法(FMEA)和故障树分析方法(FTA)相结合的单机风险评估方法;对于机队,首先,通过维修计划,利用民用飞机历史运行数据估算风险暴露次数;然后,在浴盆曲线的偶然失效期和耗损失效期分别建立风险计算模型和未纠正机队风险分析方法,并通过实际算例,获得机队风险变化趋势及面临的风险值。对上述方法进行分析归纳,给出了三种降低运行风险的改进方向,有效降低了民用飞机的运行风险。

关键词:民用飞机;概率风险评估;故障树;威布尔分布;未纠正机队风险

中图分类号:V328.5

文献标识码:A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.02.017

Operation Risk Assessment Method of Civil Aircraft

Guo Yuanyuan, Li Longbiao, Hu Yuqun, Sun Youchao

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: It is very necessary to carry out the risk analysis of civil aircraft in order to reduce the operational risk of civil aircraft. The research status of risk assessment method is analyzed for civil aircraft operating. The method of probabilistic risk assessment in aircraft is presented based on the failure mode effect analysis(FMEA) and fault tree analysis(FTA). Three type methods are given to calculate the fleet risk. Firstly, the exposed time of fleet is developed by maintenance plan and historical data. Secondly, the fleet risk model and uncorrected fleet risk assessment method with one case is established at random failures period and at wear-out period. The fleet risk trends, influencing factors as well as risk value which may occur are given. Through summarization of these methods, the suitable operation risk methods for civil aircraft and fleet are established in variable states over the remaining life of the fleet. Through these methods, the risk of civil aircraft can be reduced effectively during operation.

Key words: civil aircraft; probabilistic risk assessment; fault tree analysis(FTA); Wei-bull distribution; uncorrected fleet risk

0 引言

根据全球安全数据,2014年定期航班事故发生98起,比上年增加9%,死亡人数由173人上升至904人,这主要是由于MH370和MH17空难造成的,但死亡事故数量下降至7起,是近年来的最低记录,然而即便一起事故都是难以承受的^[1]。飞机事故主要由天气、鸟击和机械故障导致的系统失效所引起,发生于进近着陆和起飞初始爬升时^[2],产生不稳定进近、飞机失控、非正常接地、空中停

收稿日期:2016-01-04; 修回日期:2016-04-01

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合
资助项目(U1333119)

国防基础科研计划项目(JCKY2013605B002)

工信部民机专项(MJ-F-2011-33)

国防科工局技术基础科研项目(Z052013B003)

江苏省自然科学基金(BK20140813)

通信作者:孙有朝, sunyc@nuaa.edu.cn

车、偏出跑道、系统失效等事故类型^[3-4]。《全球航空安全计划》为此提出了提高跑道安全性、减少可控飞行撞地事故、减少飞行中失控事故和事故征候^[5]等要求。系统失效涉及起落架、操纵系统、发动机、液压系统和电传操纵系统等故障^[6]。奥凯航空 BK2870 航班曾发生起落架故障,导致飞机抵达机场后无法降落^[7],进一步体现出对民用飞机进行风险分析是十分必要的。王冠茹等^[8]建立了民用飞机持续适航阶段事件风险评估流程,借助概率统计和安全性分析方法评估事件严重性和发生的可能性。葛志浩等^[9]通过非线性回归方法得到了风险概率评估基本模型,实现了有限样本情况下的飞行风险概率的计算。上述方法有效提高了风险的计算效率。

本文给出故障模式影响分析方法(Failure Mode and Effect Analysis,简称 FMEA)和故障树分析方法(Fault Tree Analysis,简称 FTA)相结合的单机风险评估方法,结合算例给出计算流程;建立基于历史数据的机队风险计算方法,在偶然失效期提出机队风险计算模型,在耗损失效期提出未纠正机队风险分析方法,分析机队失效趋势以及影响风险变化的因素;对各种方法适应情况进行分析归纳,预测单机和机队运行期间的风险。

1 单机概率风险评估方法

《系统安全性大纲》定义风险为事件损失程度和发生概率的函数^[10],可分别由故障模式影响分析方法(FMEA)计算事件损失,故障树分析方法(FTA)确定事件发生概率,上述两种方法已获得相当成熟的应用,可将两种方法相结合应用于单机运行风险计算。通过对某民用飞机运行数据的分析,结合精确、完善的故障类型、原因、后果及基本事件概率,使该型号民用飞机的风险值具有普遍适用性和参考借鉴价值。概率风险评估分两步进行,其评价方法流程图如图 1 所示。

第一步,利用 FMEA 分析事故损失 S 。熟悉飞机构造及系统组成,从各部件讨论潜在故障及原因、不安全后果及严重程度;拟定可接受范围,判断是否需要进行第二步。

第二步,利用 FTA 确定事故发生概率 P 。结

合 FMEA,由上而下确定导致顶事件发生的最小割集。通过民用飞机历史运行数据,确定基本事件概率,从而获得顶事件概率。

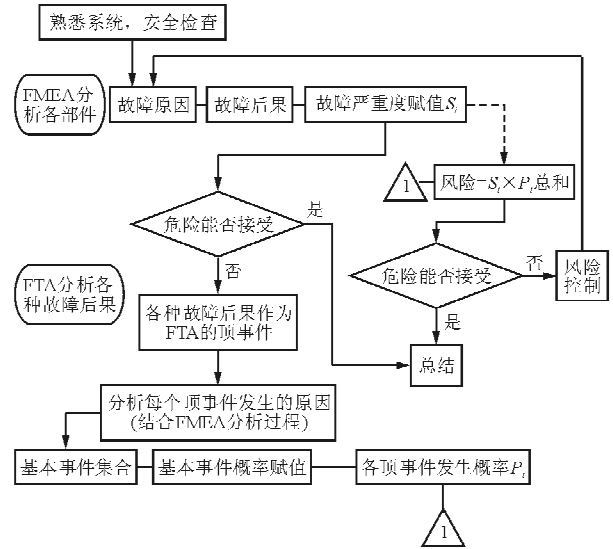


图 1 概率风险评价方法流程图

Fig. 1 Flow chart of probabilistic risk assessment method

风险 R 为

$$R = \sum_{i=1}^n (S_i \times P_i) \quad (1)$$

式中: S_i 为第 i 个故障损失; P_i 为第 i 个故障概率; $i=1,2,\dots,n$ 。

电液舵机是电传操纵系统的执行机构,控制民用飞机的运行方向,其一旦出现严重故障将导致无法控制航向进而可能造成重大安全事故。以民用飞机电液舵机的力矩马达为例,建立 FMEA 表格,如表 1 所示^[11]。

表 1 电液舵机系统 FMEA 分析表

Table 1 FMEA analysis of electro-hydraulic actuator

产品名称	故障模式	故障原因	局部影响	高层次影响	最终影响
力矩马达	线圈断线或短路	加工粗糙,引线位置紧凑	力矩马达不动作	舵机不动作	飞机姿态失控

飞机姿态失控引起的事故损失为 S_1 ,舵机不动作引起的飞机姿态失控概率为 c_1 ,二者可由专家经验和历史运行故障数据来确定(令 $S_1=0.01$, $c_1=0.01$)。选择舵机不动作为顶事件,故障树如图 2 所示^[12]。

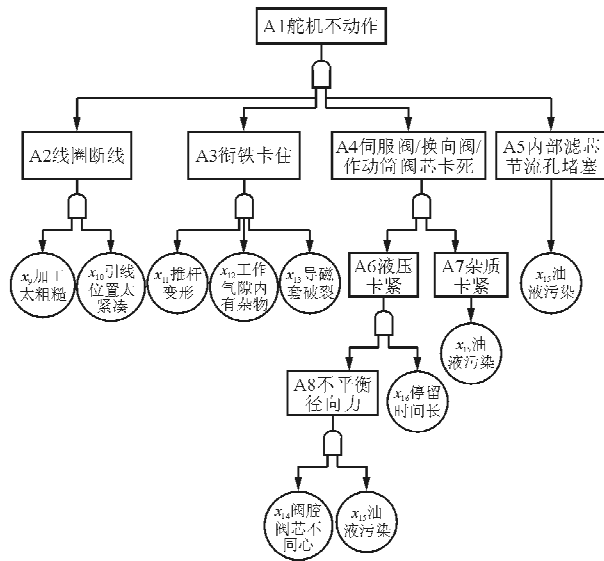


图 2 舵机不动作的故障树

Fig. 2 Fault tree of actuator immovable

基本事件 $x_9 \sim x_{16}$ 的概率 $p_9 \sim p_{16}$ 分别为 1.0×10^{-7} 、 1.5×10^{-7} 、 3.5×10^{-7} 、 2.0×10^{-7} 、 3.0×10^{-7} 、 1.0×10^{-6} 、 6.0×10^{-6} 、 2.5×10^{-7} 。故障树最小割集为 $\{x_9\}$ 、 $\{x_{10}\}$ 、 $\{x_{11}\}$ 、 $\{x_{12}\}$ 、 $\{x_{13}\}$ 、 $\{x_{14}$ 、 $x_{16}\}$ 、 $\{x_{15}\}$ ，得到顶事件发生概率 $p_1 = p_9 + p_{10} + p_{11} + p_{12} + p_{13} + p_{14} \times p_{16} + p_{15} = 1.35 \times 10^{-6}$ ，舵机不动作导致的飞机姿态失控概率为 $P_1 = c_1 \times p_1$ ，相应风险 $R_1 = S_1 \times c_1 \times p_1 = 1.35 \times 10^{-10}$ 。根据 FMEA 分析表，获得各部件故障损失，并建立对应故障树，根据专家经验和历史故障数据获得部件故障概率，得到各部件潜在故障风险之和，即单机运行风险。

2 机队风险计算

针对民用飞机机队运行过程中面临的风险，给出三种适用于不同情况的风险计算方法：基于航空公司机队运行历史数据，预测机队在完成维修计划之前面临的事故风险；基于浴盆曲线，分别对处于偶然失效期和耗损失效期的民用飞机机队建立风险计算模型，并给出运行风险计算方法。

2.1 基于观察的事故风险预测

单机运行风险不受飞机或零件使用时间的影 响。将飞机风险视为常数，机队风险是单机风险和

机队暴露于风险时间的函数。

燃油泵出现问题可能导致发动机停机，设某机队有 500 架双发动机飞机，每台发动机每天工作 8 h，则机队工作时间为 $500 \times 2 \times 8 = 8\,000$ 小时/天。计划每月实施修理 50 架，10 个月完成修理，则暴露于风险中的飞机，第一个月有 450 架，第二个月有 400 架，…，第十个月有 0 架，机队暴露于风险的时间为 $(450 + 400 + \dots + 0) / 500 = 4.5$ 个月。机队有 $4.5 \times 30 \times 8\,000 = 1.08 \times 10^6$ 发动机飞行小时存在燃油泵问题。可接受事故发生概率为 5×10^{-6} 事件/发动机飞行小时，则机队风险为 $5 \times 10^{-6} \times 1.08 \times 10^6 = 5.4$ 个事件。因此，按照已制定的修理计划，在机队修理完成前，预计每月有 6 次发动机停机事件。

2.2 基于偶然失效期的风险计算

机队风险是指飞机寿命期内可能发生的故障所造成的严重后果。机队在暴露于风险的时间，发生一定概率的故障并发展为不安全后果的概率，与后果的严重程度之积为机队风险^[13]。

$$R = \Omega \times F \times \psi \times \theta \quad (2)$$

式中： Ω 为偶然失效期机队暴露于风险的时间； F 为故障发生频率； ψ 为故障发展为不安全后果的条件概率； θ 为致死率。

$$\Omega = (t_R - t') \times b + p \times t_R \quad (3)$$

式中： t_R 为退役机龄； t' 为机队平均机龄； b 为机队当前飞机数量； p 为机队扩增飞机数量。

将式(3)代入式(2)，得机队风险 R 为

$$R = [(t_R - t') \times b + p \times t_R] \times F \times \psi \times \theta \quad (4)$$

R 即从当前规模至最终规模的运行时间中，机队发生故障并产生不安全后果的致死率。

2.3 基于耗损失效期的风险预测

未纠正机队风险是指未采取任何纠正措施预测机队的运行风险。设某机队有 200 架飞机，其退役机龄 $t_R = 5 \times 10^4$ 飞行循环，各飞机当前飞行循环 t_i 如图 3 所示。基于威布尔分布，计算民用飞机寿命期内的失效概率，给出机队由于起动发电机故障导致飞机坠毁的灾难性风险值，找出影响机队运行风险的关键因素。

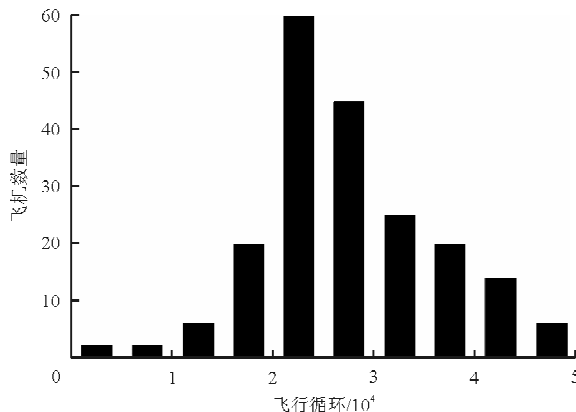


图3 机队飞行循环统计

Fig. 3 The fleet statistics of flight cycle

对图3飞行循环进行平均数统计, 所得结果如表2所示。

表2 机队飞行循环平均数统计

Table 2 Fleet data of flight cycle in average

飞行循环/10 ³	飞机数量	飞行循环/10 ³	飞机数量
2.5	2	27.5	45
7.5	2	32.5	25
12.5	6	37.5	20
17.5	20	42.5	14
22.5	60	47.5	6

机队风险 R 为

$$R = \xi \times \mu \times \psi \times \theta \quad (5)$$

式中: $\xi = \sum_{i=1}^{200} P(t_i \sim t_R)$, 表示机队在寿命期内的预测故障飞机数量, $P(t_i \sim t_R)$ 表示单机寿命期内的失效概率, 服从威布尔分布^[14]; μ 为未检出故障概率, 取 $\mu = 0.2$; ψ 为条件概率, 是起动发电机故障导致空中解体、坠毁、偏离跑道、人员伤亡的概率总和, 取 $\psi = 0.00016$; θ 为致死率, 四种后果的致死率分别为 1.000、0.980、0.030、0.001。

$$P(t_i \sim t_R) = \frac{F(t_R) - F(t_i)}{1 - F(t_i)} \quad (6)$$

累积分布函数 $F(t)$ ^[15] 为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (7)$$

$$\eta = \left[\frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{200} t_i^\beta\right]^{1/\beta} \quad (8)$$

式中: η 为尺度参数; β 为形状参数, 当材料为铝时, $\beta = 4$, 当材料为钛合金时, $\beta = 3$ ^[16-17]; N_f 为已检出故障的飞机数量, 取 $N_f = 1, 5, 10$ 。

将式(7)~式(8)代入式(6), 则

$$P(t_i \sim t_R) = 1 - \exp\left\{\left(\frac{t_R}{\eta}\right)^\beta \left[\left(\frac{t_i}{t_R}\right)^\beta - 1\right]\right\} \quad (9)$$

根据式(5)~式(9), 可得 η 、 ξ 和 R , 如表3所示。

表3 机队风险计算

Table 3 Calculation of fleet risk

β	N_f	η	ξ	R
1	1	175 113	3.62	0.000 114
	5	102 406	17.42	0.000 546
3	10	812 80	33.23	0.001 042
	1	1 169 09	11.89	0.000 373
4	5	781 82	36.91	0.001 158
	10	657 43	49.24	0.001 544

从表3可以看出: 当 N_f 不变时, β 越大, 则 η 越小、 ξ 与 R 越大; 当 β 不变时, N_f 越大, 则 η 越小, ξ 与 R 越大。表明 β 与 N_f 影响着机队风险值, β 由飞机运行时间和材料决定, 新飞机有 β_{\min} , 减少新飞机投入或对材料进行设计可以降低机队风险; 当 N_f 增大使风险超出期望值, 则可降低机队退役寿命至风险在可接受水平。当 η 远大于 t_R 时, 机队运行风险较低。

3 单机和机队风险评估方法分析归纳

单机概率风险评估方法中, FMEA 评估潜在经济损失; FTA 建树过程较为复杂, 但评估结果较精确。两者结合可获得精确的单机运行故障风险, 即故障潜在损失与发生概率乘积之和。

机队风险计算方法中, 基于观察的事故概率预测方法需要长期数据统计, 但计算较简单。通过修理计划计算机队暴露于风险的事件数量, 获得运行风险; 偶然失效期风险模型, 需建立在一定的运行数据基础上, 通过历史数据获得机队暴露于风险的时间、故障发生概率及致死率等, 进而求出运行风险; 利用未纠正机队风险方法计算时, 考虑机队中存在处于早期失效期 ($\beta < 1$) 的新投入飞机, 应适当降低 β 值。通过机队当前飞行循环数据及已检出故障数量预测寿命期内故障飞机数量, 由故障发展趋势获得不安全状态发生的条件概率及致死率, 计算由起动发电机故障发展为飞机坠毁的机队风险。当风险值远高于期望值, 通过缩短退役寿命、减少

新飞机投入和重新设计材料以提高 β 值等手段可降低机队风险。

4 结 论

(1) 本文基于民用飞机运行数据,建立了单机和机队概率风险评估方法,针对计算过程中影响风险水平的重要参数,给出了三种降低运行风险的改进方向,有效降低了民用飞机的运行风险。

(2) 预测飞机概率风险主要向两个方面发展:以飞机运行中引发不安全后果的潜在故障为研究对象,精确预测发生概率,确定民用飞机运行时面临的风险;以航空公司机队为研究对象,建立机队运行风险模型,确定单机运行中的平均风险,预测机队在未来服役时间的故障数量和灾难级的风险值。

参考文献

- [1] 国际民用航空组织. 国际民航组织理事会年度报告: 2014年的航空运输界[EB/OL]. (2014-07-09)[2016-01-04]. <http://www.icao.int/annual-report-2014/Pages/the-world-of-air-transport-in-2014.aspx>. International Civil Aviation Organization. Annual report of the ICAO council; 2014 the world of air transport in 2014 [EB/OL]. (2014-07-09)[2016-01-04]. <http://www.icao.int/annual-report-2014/Pages/the-world-of-air-transport-in-2014.aspx>. (in Chinese)
- [2] 董豆豆, 周经伦, 冯静, 等. 基于概率风险的系统安全性分析[J]. 国防科技大学学报, 2005(1): 98-101. Dong Doudou, Zhou Jinglun, Feng Jing, et al. The analysis of system safety based on probabilistic risk[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005(1): 98-101. (in Chinese)
- [3] 杜红兵, 李珍香. 进近着陆运输飞行事故原因及预防对策研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(6): 118-122. Du Hongbing, Li Zhenxiang. Cause analysis on approach-and-landing loss accidents and their countermeasures[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(6): 118-122. (in Chinese)
- [4] Cranfield University. International general aviation and corporate aviation risk assessment (IGA-CARA) project[R]. Contract No. E3308E, UK; Department of Air Transport Cranfield University, 2005.
- [5] 国际民用航空组织. 国际民航组织理事会年度报告: 2014年战略目标: 安全[EB/OL]. (2014-07-09)[2016-01-04]. http://www.icao.int/annual-report-2014/Pages/CH/progress-on-icaos-strategic-objectives-safety-policy-and-standardization_CII.aspx. International Civil Aviation Organization. Annual report of the ICAO council; 2014 strategic objectives; safety [EB/OL]. (2014-07-09)[2016-01-04]. http://www.icao.int/annual-report-2014/Pages/CH/progress-on-icaos-strategic-objectives-safety-policy-and-standardization_CII.aspx. (in Chinese)
- [6] 中国民用航空局. MII2001-2015 民用航空器飞行事故征候[S]. 北京: 中国民用航空局, 2015. Civil Aviation Administration of China. MII2001-2015 The accident signs of civil aircraft flight [S]. Beijing: CAAC, 2015. (in Chinese)
- [7] DoNews. BK2870 航班安全降落无人人员伤亡, 此前起落架故障[EB/OL]. (2014-01-04)[2016-01-04]. <http://www.donews.com/media/201402/2713100.shtm>. DoNews. The BK2870 flight safe landing with no loss of life under the failure of landing gear [EB/OL]. (2014-01-04)[2016-01-04]. <http://www.donews.com/media/201402/2713100.shtm>. (in Chinese)
- [8] 王冠茹, 孙有朝, 李龙彪, 等. 民机持续适航事件风险评估流程研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2012(3): 29-32, 72. Wang Guanru, Sun Youchao, Li Longbiao, et al. Occurrence risk analysis process and methods during continuing airworthiness of civil aircraft [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2012(3): 29-32, 72. (in Chinese)
- [9] 葛志浩, 徐浩军, 刘琳, 等. 一种复杂系统风险概率评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(9): 1025-1028. Ge Zhihao, Xu Haojun, Liu Lin, et al. Risk probability assessment method for complex system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(9): 1025-1028. (in Chinese)
- [10] 郑恒, 周海京. 概率风险评价[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. Zheng Heng, Zhou Haijing. Probabilistic risk assessment [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [11] 李萍, 袁朝辉, 苏峰. 基于模糊 FMECA 的电液舵机可靠性分析[J]. 机床与液压, 2013, 41(13): 178-182. Li Ping, Yuan Zhaohui, Su Feng. Reliability analysis of electro-hydraulic actuator based on fuzzy FMECA [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2013, 41(13): 178-182. (in Chinese)
- [12] 袁朝辉, 崔华阳, 侯晨光. 民用飞机电液舵机故障树分析[J]. 机床与液压, 2006(11): 221-223. Yuan Zhaohui, Cui Huayang, Hou Chenguang. Fault tree analysis of civil aircraft electro-hydraulic actuator [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2006(11): 221-223. (in Chinese)
- [13] 陈卉. 航空发动机故障风险评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014. Chen Hui. Aero-engine failure risk assessment method research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)

- [14] 凌丹. 威布尔分布模型及其在机械可靠性中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
Ling Dan. Research on Weibull distribution and its applications in mechanical reliability engineering[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [15] Abernethy R B. The new Weibull handbook[M]. 5th ed. USA: 2010.
- [16] Violette M G, Safarian P, Han N, et al. Transport airplane risk analysis[J]. Journal of aircraft, 2015, 52(2): 395-402.
- [17] Whittaker I C. Development of titanium and steel fatigue variability model for application of reliability analysis approach to aircraft structures[R]. D6-60164, USA: The Boeing Company, 1973.

作者简介:

郭媛媛(1992—),女,硕士研究生。主要研究方向:大型飞机可靠性与安全性工程。

李龙彪(1983—),男,博士,讲师。主要研究方向:民用飞机可靠性、安全性与适航技术。

胡宇群(1969—),男,博士,教授。主要研究方向:飞机一体化设计技术、飞机结构设计、微型飞行器技术。

孙有朝(1964—),男,博士,教授。主要研究方向:航空器虚拟设计与验证关键技术、飞行安全与人机工程、交通运输工程(适航技术与管理)、大型飞机可靠性与安全性工程。

(编辑:马文静)

(上接第164页)

- [25] 陈龙, 伍贻兆, 夏健. 基于非定常低速预处理和DES的三角翼数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(2): 159-164.
Chen Long, Wu Yizhao, Xia Jian. Delta wing numerical simulation using unsteady low speed precondition and DES [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(2): 159-164. (in Chinese)
- [26] Bai Junqiang, Wang Bo, Sun Zhiwei. The application of numerical simulation of delta wing with blunt leading edge using RANS/LES hybrid method[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(3): 373-379.
- [27] Raymer D P. Aircraft design: a conceptual approach[M].

4th ed. Reston Virginia: AIAA, 2006: 23-27.

作者简介:

李洋(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机总体设计。

靳宏斌(1966—),男,研究员。主要研究方向:飞机总体设计。

刘毅(1982—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机气动设计。

赵晓霞(1967—),女,研究员。主要研究方向:飞机设计。

(编辑:马文静)