

民机项目风险量化方法及应用的研究

Risk Quantification Methods and Application of Civil Aircraft Project

徐 凯 / Xu Kai

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

摘 要:

民机项目中大量新技术的应用和众多复杂系统的集成,增加了项目进度、费用和性能的不确定性,在众多环节中风险因子要素层出不穷。为了保障民机项目过程的顺利进行,降低项目的风险水平,必须建立先进的风险管理体系。针对民机项目风险管理体系中的风险量化难题,深入挖掘风险量化手段本身的技术内涵,结合民机项目的特点,引入了模糊层次分析法的风险量化方法,并通过民机项目风险实例进行验证。

关键词: 风险量化;模糊;层次分析法;权重;隶属度

中图分类号: F426.5

文献标识码: A

[Abstract] Civil aircraft projects include application of a large number of new technologies and integration of many complex systems. The uncertainty on project schedule targets, cost targets and performance targets is increased. In many aspects, the risk factors have been increasing. In order to ensure the research process of civil aircraft programs smoothly and reduce the projects risk level, an advanced risk management system must be established. For the risk quantification problem on risk management system of civil aircraft project, this article explores the technical content of risk quantitative measures, combining the characteristics of civil aircraft projects. The risk quantification method of Fuzzy Analytic Hierarchy Process was introduced and verified by risk instance of civil aircraft project.

[Key words] risk quantification; fuzzy; analytic hierarchy process; weight; degree of membership

0 引言

民机项目是一个复杂的系统工程,风险因素很多,风险源相互之间关系错综复杂,难以预料,各风险因素所产生后果的严重程度也不相同。在进行项目决策时,完全不考虑这些风险因素或是忽略了其中主要因素,很可能导致决策失误。但如果对每个风险因素都加以考虑,则会导致成本的增加和进度余量的减少。所以,在识别民机项目中的风险以后,还必须对这些风险进行量化,抓住主要风险,忽略次要风险。

1 风险量化

风险量化是风险评估的重要手段,其主要目的是在风险和风险之间进行量化比较,评估分析项目可能的输出,对民机项目风险进行重要度排序和等

级划分,这样就能决定哪些风险值得反应,需要作进一步分析,并制定应对措施和采取风险管理行动。

风险量化基本过程依次为确定风险层次、选择风险量化方法、建立风险模型、计算风险量、估算应急储备。

2 现有风险量化方法

风险量化是民机项目风险管理的重要内容,风险量化的方法有很多,以某支线客机和大型客机项目风险管理为例,运用较多的是主观评分法。

主观评分法是通过项目管理人员和工程技术人员(专家)的理论知识积累以及项目实践经验,凭借对项目风险的直觉做出判断并进行评分,然后根据项目风险评分与项目风险评价基准进行比较,进而有针对性地进行风险应对计划制定和风险应对控制。通常的做法是采用主观评分法判断风险中

不利事件发生概率等级及其后果等级,再简单利用概率等级和后果等级相乘作为量化手段,以此确定风险指数。

主观评分法的弊端主要有以下几个方面:

(1)参与人员技术能力或管理水平较低,无法做出正确的主观估计;

(2)民机项目研制起步较晚,目前没有庞大的风险数据库作为参与人员主观评分的参考和依据;

(3)根据实验心理学,9个变量是心理学极限,项目风险因素数目多于9个时,简单的主观评分法是不可行的,其分析结果也是不可靠的。

主观评分法的弊端在项目实践中也得到了印证,采用该方法得到的风险指数无法客观反映风险大小,作为风险排序的依据也不可靠,存在一个风险等级涵盖多个风险指数的情况,通常会淡化或掩盖同一等级下相对风险指数较高的风险。

所以,采用主观评分法得到的量化结果是不够准确的。这就需要一套更加行之有效的风险量化方法,这套方法必须是可以不完全依托于风险事件的历史记录和数据;必须能够客观地将参与人员的经验和判断转化成基数并加以修正;必须能够弥补项目风险管理细节的不足。

3 模糊层次分析法

层次分析法是对定性问题进行定量分析的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法。它的特点是把复杂问题中的各种因素通过划分到相互联系的有序层次,使之条理化,再将各层次因素与因素之间进行重要性两两比较并做定量描述,而后,利用数学方法计算反映各层次因素的相对重要性次序的权值,通过所有层次之间的总排序计算所有因素的相对权重并进行排序。

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法。该方法根据模糊数学的隶属度理论把受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。

模糊层次分析法就是将层次分析法和模糊综合评价法结合起来的量化方法。使用这种方法进行风险评估在一定程度上可以不依靠风险事件的历史记录和数据,不依靠庞大的专职风险管理团队,只需参与人员对风险因素两两比较判断信息,

结合相应的计算方法对风险因素进行量化,通过应用模糊数学理论就可以得到项目风险的重要度排序和等级划分,这在很大程度上避免了参与人员能力水平和主观思维不稳定的影响。

由此可见,模糊层次分析法操作简便、适用性强,不仅能够充分利用参与人员的经验和直觉,减少主观性的影响,而且,即使没用充分的历史资料 and 风险事件数据库,也能够简单、客观、清晰的反映项目风险的实际情况。

4 基于模糊层次分析法的应用

通过对模糊层次分析法的介绍,我们大致了解它的原理和优点,但是否能对民机项目风险进行准确的量化评估,满足现阶段民机项目风险管理的需要还必须通过应用实践加以验证。

以某支线客机结构载荷试飞项目风险评估为例,通过采用模糊层次分析法,对结构载荷试飞项目风险做出综合评价,以验证模糊层次分析法在民机项目应用中的可行性和先进性。

模糊层次分析法进行风险量化评估的具体实施步骤如下。

4.1 风险层次分析结构的建模

结合层次分析法,针对民机项目风险特点分层如下:

目标层(A):表示民机项目风险量化的目标。

准则层(B):表示民机项目风险类别。

因素层(C):表示民机项目风险类别中的风险因素。因素层也可以是多层的。

根据上述风险因素层次分析结构模型的层次划分,确定民机项目风险因素集,用 U 表示。

$$U=(U_1, U_2, \dots, U_i) \quad (1)$$

假设风险因素数量为 n ,则 $i=(1, 2, \dots, n)$ 。

针对结构载荷试飞项目风险层次分析结构建模,如图1所示。

4.2 建立评语集并赋值

评语集由各种可能的评语结果(即风险等级)组成。

$$V=(V_1, V_2, \dots, V_j) \quad (2)$$

按照惯例,将民机项目风险分为五个等级,故 $j=(1, 2, \dots, 5)$;由低到高 V_1 对应极低风险、 V_2 对应低等风险、 V_3 对应中等风险、 V_4 对应高等风险、 V_5 对应严重风险。

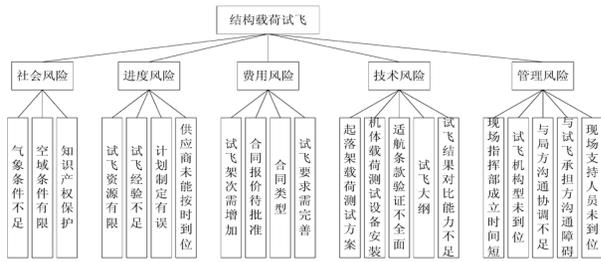


图1 某支线客机结构载荷试飞项目风险层次分析模型

4.3 建立判断矩阵

(1)组织包括项目管理人员和工程技术人员(专家)在内的10名人员采用主观判断法对结构载荷试飞各层次风险因素的重要度进行两两比较,按照表1将比值用1~9表示。

表1 风险因素比较标度方法

标度	定义与说明
1	两个风险因素对某个属性具有同样重要性
3	两个风险因素比较,一风险因素比另一风险因素稍微重要
5	两个风险因素比较,一风险因素比另一风险因素明显重要
7	两个风险因素比较,一风险因素比另一风险因素重要得多
9	两个风险因素比较,一风险因素比另一风险因素极端重要
2,4,6,8	表示需要在上述两个标准之间折衷时的标度

(2)以准则层为例,运用德尔菲技术确定每对风险因素之间的相对重要程度,如社会风险与进度风险比较,进度风险较社会风险的重要程度介于稍微重要和明显重要之间,则矩阵中社会风险对应进度风险元素为 $\frac{1}{4}$,进度风险对应社会风险元素为4。准则层,5类风险确定了该矩阵为5阶矩阵,矩阵行从左到右及矩阵列从上到下分别对应社会风险、进度风险、费用风险、技术风险、管理风险,依次比较,建立准则层风险判断矩阵A如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{4} & 3 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} \\ 4 & 1 & 6 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & 1 & \frac{1}{9} & \frac{1}{8} \\ 7 & 3 & 9 & 1 & 2 \\ 5 & 2 & 8 & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

同理,建立因素层风险判断矩阵如下:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 \\ \frac{1}{4} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{5} & 3 & 6 \\ 5 & 1 & 5 & 8 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & 2 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{8} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 & 2 \\ \frac{1}{4} & 1 & 2 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{2} & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix}, A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{6} & \frac{1}{7} & \frac{1}{9} \\ 4 & 6 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ 5 & 7 & 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 7 & 9 & 4 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} \\ 5 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 \\ 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ 4 & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

A_1 为社会风险因素层判断矩阵, A_2 为进度风险因素层判断矩阵, A_3 为费用风险因素层判断矩阵, A_4 为技术风险因素层判断矩阵, A_5 为管理风险因素层判断矩阵。

4.4 计算风险因素权重

通过运用MATLAB数学软件计算各判断矩阵的特征向量和最大特征根,并对特征向量进行归一化,即可得到风险因素的权重W,然后将最大特征根 λ_{\max} 代入公式 $C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ 计算判断矩阵一致性指标,C.I.

I.的值越大,表明判断矩阵偏离完全一致性的程度越大,C.I.的值越小,表明判断矩阵越接近于完全一致性,由于判断矩阵的阶数n越大,C.I.的值便越大;n越小,C.I.的值便越小,所以还需引入平均随机一致性指标R.I.并根据公式 $C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$ 计算判断矩阵随机一致性比率C.R.,对C.I.进行修正,当C.R. < 0.10时,便认为判断矩阵具有可以接受的一致性。当C.R. ≥ 0.10时,就需要调整和修正判断矩阵,使其满足

$C. R. < 0.10$, 从而具有满意的一致性。

表 2 给出了 1~10 阶正互反矩阵计算 1 000 次得到的平均随机一致性指标 $R. I.$ 。当 $n < 3$ 时, 判断矩阵永远具有完全一致性。

表 2 平均随机一致性指标 $R. I.$ 对照表

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R. I.	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.46	1.49

以准则层风险判断矩阵为例, 运用 MATLAB 软件计算可得矩阵最大特征根为 $\frac{1497}{284} = 5.27$, 特征向量为 $(\frac{862}{11569}, \frac{953}{1224}, \frac{619}{2011}, \frac{487}{947}, \frac{617}{3621})$, 通过归一化得到新向量 $(0.064, 0.179, 0.033, 0.444, 0.28)$ 即为权重 W , $C. I. = \frac{5.27-n}{n-1} = \frac{5.27-5}{5-1} = 0.0675$, $C. R. = \frac{0.0675}{1.12} = 0.06$, $C. R. < 0.1$ 通过一致性检验。

通过权重 W 可以看出, 技术风险在结构载荷试飞总体风险中比重最大, 占 44.4%; 其他风险的重要性排序依次为管理风险 (28%)、进度风险 (17.9%)、社会风险 (6.4%) 和费用风险 (3.3%)。

同理, 因素层具体计算结果如下:

(1) 社会风险权重 W_1 为 $(0.684, 0.199, 0.117)$, $C. R. = 0.021$, 通过一致性检验; 社会风险中, 气象条件不足风险比重最大, 占 68.4%; 其他风险重要性排序依次为空域条件有限 (19.9%)、知识产权保护 (11.7%)。

(2) 进度风险权重 W_2 为 $(0.224, 0.63, 0.095, 0.051)$, $C. R. = 0.072$, 通过一致性检验; 进度风险中, 试飞经验不足风险比重最大, 占 63%; 其他风险重要性排序依次为试飞资源有限 (22.4%)、计划制定有误 (9.5%)、供应商未能按时到位 (5.1%)。

(3) 费用风险权重 W_3 为 $(0.5, 0.14, 0.079, 0.281)$, $C. R. = 0.01$, 通过一致性检验; 费用风险中, 试飞架次需增加风险比重最大, 占 50%; 其他风险重要性排序依次为试飞要求需完善 (28.1%)、合同报价待批准 (14%)、合同类型 (7.9%)。

(4) 技术风险权重 W_4 为 $(0.063, 0.034, 0.168, 0.268, 0.467)$, $C. R. = 0.039$, 通过一致性检验; 技术风险中, 试飞结果对比能力不足风险比重最大, 占 46.7%; 其他风险重要性排序依次为试飞大纲 (26.8%)、适航条款验证不全面 (16.8%)、起落架载荷测试方案

(6.3%)、机体载荷测试设备安装 (3.4%)。

(5) 管理风险权重 W_5 为 $(0.066, 0.412, 0.238, 0.162, 0.122)$, $C. R. = 0.072$, 通过一致性检验。管理风险中, 试飞机构型未到位风险比重最大, 占 41.2%; 其他风险重要性排序依次为与局方沟通协调不足 (23.8%)、与试飞承担方沟通障碍 (16.2%)、现场支持人员未到位 (12.2%)、现场指挥部成立时间短 (6.6%)。

4.5 建立隶属度矩阵

以准则层为例, 采用主观判断法, 由包括项目管理人员和工程技术人员 (专家) 在内的 10 名人员分别对各风险类别 U_i 隶属于 V_j 的情况进行判断, 得到相应的人数 k_{ij} , 运用公式 $r_{ij} = \frac{k_{ij}}{k}$ ($k=10$) 计算隶属度 r_{ij} 。建立准则层五类风险隶属度矩阵, 矩阵行从左到右分别对应由低到高 5 个风险等级, 矩阵列从上到下分别对应社会风险、进度风险、费用风险、技术风险、管理风险, 如认为社会风险为极低风险的人数为 8、低等风险人数为 1、中等风险人数为 1, 则矩阵第一行为 $(\frac{8}{10}, \frac{1}{10}, \frac{1}{10}, 0, 0)$, 依次建立准则层风险隶属度矩阵 R 如下:

$$R = \begin{bmatrix} \frac{8}{10} & \frac{1}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{10} & \frac{7}{10} & \frac{1}{10} & \frac{1}{10} \\ \frac{1}{10} & \frac{3}{10} & \frac{5}{10} & \frac{1}{10} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{5}{10} & \frac{4}{10} & \frac{1}{10} \\ \frac{3}{10} & \frac{3}{10} & \frac{3}{10} & \frac{1}{10} & 0 \end{bmatrix}$$

同理, 建立因素层风险判断矩阵如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{9}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 \\ \frac{7}{10} & \frac{3}{10} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{9}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{10} & \frac{4}{10} & \frac{4}{10} & \frac{1}{10} & 0 \\ 0 & \frac{1}{10} & \frac{6}{10} & \frac{3}{10} & 0 \\ \frac{7}{10} & \frac{3}{10} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{9}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} \frac{3}{10} & \frac{6}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 \\ \frac{9}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{10}{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6}{10} & \frac{4}{10} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} \frac{3}{10} & \frac{6}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 \\ \frac{5}{10} & \frac{4}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{10} & \frac{6}{10} & \frac{2}{10} & 0 \\ 0 & \frac{1}{10} & \frac{5}{10} & \frac{4}{10} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{10} & \frac{5}{10} & \frac{2}{10} \end{bmatrix},$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} \frac{10}{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{10} & \frac{4}{10} & \frac{5}{10} & 0 & 0 \\ \frac{3}{10} & \frac{6}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 \\ \frac{5}{10} & \frac{5}{10} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{7}{10} & \frac{3}{10} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

R_1 为社会风险因素层隶属度矩阵, R_2 为进度风险因素层隶属度矩阵, R_3 为费用风险因素层隶属度矩阵, R_4 为技术风险因素层隶属度矩阵, R_5 为管理风险因素层隶属度矩阵。

4.6 计算风险评价向量

采用模糊综合评价法进行综合模糊关系评价,根据层次分析法得到的权重 W 乘以对应的隶属度矩阵 R ,通过 MATLAB 计算结构载荷试飞各层次风险评价向量。

以准则层为例,运用 MATLAB 软件计算 B 的结果如下:

$$B = W \cdot R = (0.064, 0.179, 0.033, 0.444, 0.28)$$

$$\times \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.7 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

即 $B = (0.139, 0.118, 0.454, 0.227, 0.062)$

同理,因素层具体计算结果如下:

$$B_1 = W_1 \cdot R_1 = (0.245, 0.687, 0.068, 0, 0)$$

$$B_2 = W_2 \cdot R_2 = (0.135, 0.186, 0.468, 0.211, 0)$$

$$B_3 = W_3 \cdot R_3 = (0.524, 0.426, 0.05, 0, 0)$$

$$B_4 = W_4 \cdot R_4 = (0.036, 0.112, 0.385, 0.374, 0.093)$$

$$B_5 = W_5 \cdot R_5 = (0.345, 0.425, 0.23, 0, 0)$$

4.7 风险量化后评价

根据最大隶属度原则,结合民机项目风险 5 个等级的划分,由计算结果可知, B 中元素 0.454 数值最大,对应中等风险等级,所以,通过量化结果确定了结构载荷试飞为中等风险。其中,社会风险为低风险,进度风险为中等风险,费用风险为极低风险,技术风险为中等风险,管理风险为低风险。

由此可知,结构载荷试飞风险从总体角度考虑为中等风险,社会风险对其影响小,管理到位,预算充足,均无明显的风险隐患,但由于试飞结果对比能力和试飞经验的不足,存在一定的技术风险和进度风险。

5 结论

通过模糊层次分析法对结构载荷试飞风险进行量化,得到了结构载荷试飞的风险因素的权重、风险等级以及风险重要度排序,为后续的风险应对指明了方向、提供了依据。值得注意的是,结构载荷试飞技术风险中对应中等风险等级的元素值为 0.385,对应高等风险等级的元素值为 0.374,两元素值相差不大,由此可看出结构载荷试飞的技术风险是介于中等和高等之间的,较进度风险更应该予以积极应对。

根据风险评估结果,某支线客机项目管理团队采用相应的风险应对措施,最终确保了结构载荷试飞在型号取证前顺利完成。由此可见,模糊层次分析法在现阶段民机项目风险管理领域有着非常广阔的应用空间。

参考文献:

[1] 沈建明,关宝昌. 现代国防项目管理(下册)[M]. 北京:军事科学出版社,2011.5.

[2] 沈建明. 项目风险管理(第2版)[M]. 北京:机械工业出

版社,2010.8.

[3]张炳江.层次分析法及其应用案例[M].北京:电子工业出版社,2014.1.

[4]刘合香.模糊数学理论及其应用[M].北京:科学出版社,2012.8.

[5]Project Management Institute.项目管理知识体系指南

(PMBOK 指南)[M].北京:电子工业出版社,2013.5.

[6]张立志.复杂产品系统的风险管理实现研究[J].航空制造技术,2009,9:94-97.

[7]周晶,赵新芬.MATLAB 数学建模与仿真[M].北京:国防工业出版社,2009.5.

(上接第44页)

3.5 不同航速收放完成时间对比

由表3可知,空中工况下,完成收放的仿真时间与实际试验吻合较好。3.2节至3.4节所述的差异在空中工况仿真中累积,但由于空中收放完成时间主要取决于起落架质量惯量参数、液压作动筒特性参数,因此仿真结果仍然可以较好的符合试验结果。

仿真中,由3.2节至3.4节分别证明了收放作动筒模型、机械机构模型、气动载荷模型及简化方案均是可行的;随后以3.4节、3.5节空中工况结果对比,总体验证了模型的准确性。

表3 各工况空中仿真时间与实验时间对比

项目\时间\速度	220节 试验值	220节 仿真值	180节 试验值	180节 仿真值
正常放		9.2s	9.7s	9.7s
应急放	9.7s	9.4s	10.28s、10.3s	10.3s
正常收	5.16s	5.19s	4.96s、4.93s	4.96s

注:180节速度下,应急放和正常放试验各进行两次。

4 结论

本文基于Modelica语言,建立了某型商用飞机前起落架的机械、液压耦合系统模型;单独标定系统的关键组件;通过试验数据与仿真结果对比验证上述组件构成的前起落架系统;为后续分析飞机前起落架机械液压机构的阻尼影响及载荷敏感性提供了依据。

关于关键组件参数标定和系统验证结论如下:

(1)关键组件应急放作动筒仿真曲线与实验数据基本吻合。

(2)系统工况仿真能够准确再现起落架各种实验中观测到的现象;仿真曲线与实验数据吻合度较高。

(3)验证了系统模型的有效性。

参考文献:

[1]姜澄宇.从国外民机重大研究计划看大型民机发展的重大关键技术[C]//中国航空学会2007年学术年会论文集:总体设计综合技术01.深圳,2007.

[2]李航航.我国大飞机发展途径构想及关键技术研究[C]//中国航空学会2007年学术年会论文集:总体设计综合技术02.深圳,2007.

[3]杨春生.1980-1996年世界重大进近着陆事故分析[J].中国民用航空,1999,15(2):16-18.

[4]Sonny T C, William HM. Landing gear integration in aircraft conceptual design [R]. MAD 96-09-01,1996.

[5]Herman S, Yang D. C-5A main landing gear bogie pitching control [J]. Journal of Aircraft, 1971, 8(11): 912-917.

[6]W eiXiaohui, N ieHong. Dynamic analysis of aircraft landing impact using landing-region-based model [J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(6): 1631-1637.

[7]晋萍,聂宏.起落架着陆动态仿真模型及参数优化设计[J].南京航空航天大学学报,2003,35(5),498-502.

[8]史友进,张曾.大柔性飞机着陆撞击多质量块等效模型[J].航空学报,2006,27(4):635-640.

[9]Pritchard J. Overview of landing gear dynamics [J]. Journal of Aircraft, 2001, 38(1): 130-137.

[10]Prashant D K. Simulation of asymmetric landing and typical ground maneuvers for large transport aircraft [J]. Aerospace Science and Technology, 2003, 7(8): 611-619.

[11]Roundhill J, Radloff P. The future of commercial aviation, building on our legacy [R]. AIAA-2003-2552, 2003.

[12]Luxhoj J, Jalil M, Jones S. A risk-based decision support tool for evaluating aviation technology integration in the national airspace system [R]. AIAA-2003-6740, 2003.

[13]Chenoweth H B. An indicator of the reliability of analytical structural design [J]. Journal of Aircraft, 1970, 7(1): 13-17.

[14]Tiller, Michael. Introduction to Physical Modeling with Modelica [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers 2001.

[15]Fritzon Peter. Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1 [M]. Wiley-IEEE Press, 2003.

[16]民机方向舵伺服作动系统频率特性分析研究[J].民用飞机设计与研究.2014,133(2),41-44.