

# 民机大气扰动适航符合性评估方法研究

余艺萌\* 陈致名

(中国飞行试验研究院,西安 710089)

**摘要:** 大气扰动是影响航空安全的重要因素,在适航条例中多有涉及,对民用飞机进行大气扰动适航符合性评估是民机适航取证的重要一环。基于我国《运输类飞机适航标准》,筛选归纳大气扰动适航条例,深入分析、细化其中与飞机操稳特性相关的大气扰动适航条款要求,依据美国军用飞行品质规范 MIL-STD-1797A 提炼并量化条款指标,使用操纵品质等级评定方法(HQRM),以严重程度与发生概率相关联的形式考虑大气扰动影响,通过算例验证量化指标与 HQRM 方法在进行相关适航条款符合性评估中的适用性和有效性,提出一种将大气扰动定义为使飞行品质降级的因素,结合量化指标对飞机相应飞行品质要求做出规定的评估形式,为飞机研制阶段的大气扰动适航符合性分析验证和相关条款的适航审定工作提供参考。

**关键词:** 大气扰动;适航条例;符合性评估;指标量化;HQRM 方法

中图分类号: V328

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

航空事业发展至今,飞行安全始终是航空领域重要的研究课题。对于民用飞机而言,大气扰动不仅会造成颠簸,影响乘客的乘坐舒适性,严重的大气扰动还会导致飞机失控,引发飞行事故,是威胁飞行安全的首要因素之一。

考虑到大气扰动对飞行安全的影响,世界各国制定的适航条例中都规定了大气扰动相关内容,并积极开展对应的适航研究工作。

我国对于大气扰动类适航条例的研究较为分散:以大气扰动对飞行的影响为出发点,研究多集中在大气扰动建模<sup>[1-3]</sup>和突风/紊流载荷计算等<sup>[4-5]</sup>方向;以具体条款内容为出发点,研究则偏向飞行载荷类条款中“离散突风准则”和“连续突风设计准则”的应用<sup>[6-7]</sup>,未开展大气扰动适航条款的系统性研究,也缺少对涉及飞机操稳特性和飞行品质的大气扰动适航条款及其对应适航符合性评估方法的深入探索。

选用合理的评估方法,采取合适的验证方式,在

飞机的设计阶段就考虑其适航性并进行初步评估,对于保障飞行安全,提高适航审定效率,使飞机尽快投入运营具有重要意义。同时电传操纵技术的应用使飞机表现出了新的特点,原先的适航性评估方法是基于机械操纵飞机而设计的,适用于电传操纵飞机的评估方法研究也更加具有必要性。

本文通过归纳操稳特性和飞行品质相关的大气扰动适航条款,分析细化其条款要求,开展基于指标量化和操纵品质等级评定方法(HQRM)的民机大气扰动适航性评估方法研究,研究结果可以为飞机研制阶段的大气扰动适航符合性评估工作提供参考。

## 1 大气扰动适航条款

本文以四种大气扰动风场作为筛选依据,以《运输类飞机适航标准》(CCAR-25-R4)<sup>[8]</sup>为主,并结合其他各类可参考的适航标准文件,归纳总结出相对全面的大气扰动类适航条款,详见表 1。

大气扰动相关的适航条款共 15 条,涉及飞机操稳特性和飞行品质的适航条款共 6 条,其中 25.21、25.105、25.125 条未对飞机性能做出具体要求,仅

\* 通信作者. E-mail: 332744306@qq.com

引用格式: 余艺萌,陈致名. 民机大气扰动适航符合性评估方法研究[J]. 民用飞机设计与研究,2022(1):151-156. YU Y M, CHEN Z M. Research on airworthiness evaluation method of civil aircraft with atmospheric disturbance[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(1):151-156(in Chinese).

规定了相关问题的注意事项,或提出对符合性验证的补充要求。

表 1 大气扰动适航条款归纳

| 大气扰动<br>基本风场 | 适航条款                 | 风场模型                 |
|--------------|----------------------|----------------------|
| 常值风场         | 25.21 证明符合性的若干规定     | 地面边界<br>层风切变<br>指数模型 |
|              | 25.105 起飞            |                      |
|              | 25.125 着陆            |                      |
|              | 25.237 风速            |                      |
| 紊流           | 25.233 航向稳定性和操纵性     | Von Karman<br>模型     |
|              | 25.341 突风和紊流载荷(b)    |                      |
| 风切变          | 121.358 低空风切变系统的设备要求 | \                    |
|              | 25.147(f) 航向和横向操纵    |                      |
|              | 25.341(a) 突风和紊流载荷    |                      |
|              | 25.349(b) 滚转情况       |                      |
| 突风           | 25.373 速度控制装置        | (1-cos)              |
|              | 25.391 操纵面载荷:总则      | 突风模型                 |
|              | 25.415 地面突风情况        |                      |
|              | 25.427(b) 非对称载荷      |                      |
|              | 25.679(a) 操纵系统突风锁    |                      |

25.147(f)、25.233(a)和25.237条款针对飞机的横航向操稳特性提出了定性要求,条款具体内容见表2,详细分析如下:

1)25.147(f)条款对全发工作条件下受到大气扰动时飞机的横向操纵提出了要求,主要涉及飞机受到扰动时的恢复能力及操纵效率和非对称飞行时飞机的操纵余量两个方面。

2)25.233(a)和25.237条款的研究重点为飞机起飞和着陆阶段可保证飞行安全的最大90°侧风分量,要求飞机在可预期运行的任何地面速度下,必须在90°侧风中表现出令人满意的可控性和操纵特性,这一要求是对飞机横航向操纵性能的一个综合性的要求,本质是以飞行安全为前提,对飞机进行扰动下飞行的极限条件确定。

## 2 符合性评估方法分析

### 2.1 条款的指标提取与量化

由于25.147(f)、25.233(a)和25.237条款均为对飞机相关性能的定性要求,在进行符合性验证时,可以采用飞行试验等方法,通过飞机实际响应特性进行符合性评估。但是飞行试验在整个飞机研制

周期中开始时间晚、试验成本高,如果能够以性能参数计算和飞行仿真的方法在早期进行适航条款的初步符合性评估,则可以提前发现问题,减少试飞迭代,节约成本。

本节首先进行条款的指标提取与量化研究,详见表2。

表 2 飞机操稳特性和飞行品质大气扰动适航条款内容<sup>[8]</sup>

| 适航条款                   | 主要内容  |
|------------------------|---|
| 25.147(f)<br>航向和横向操纵   | 1)应当在整个飞行包线内验证滚转性能,以确保在已知飞行条件下不产生多余控制力或操纵行程飞机可提供安全所需的足够的滚转率峰值<br>2)预期使用侧滑条件下的滚转响应应具有从意外情况下恢复的操纵能力<br>3)应仔细评估飞机进近和着陆构型,以确保在接近地面时进行适当控制以补偿阵风 and 尾流湍流                       |
| 25.233(a)<br>航向稳定性和操纵性 | 可在制定第25.237条款要求的90°侧风分量时予以表明  |
| 25.237<br>风速           | 1)要求必须制定在干跑道/水面条件下对起飞和着陆是安全的90°侧风分量<br>2)飞机在预期运行的任何地面速度下,必须在90°侧风中表现出令人满意的可控性和操纵特性<br>3)侧风速度要求<br>根据第25.21(f)条的规定,至少20节或0.2T <sub>SRO</sub> ,以较大者为准,但不必超过25节,必须在型式认证试验中证明 |

由于条款涉及到飞机的横航向稳定性和操纵性,可以看作飞行品质的研究范畴。美国国防部颁布的军用飞行品质规范 MIL-STD-1797A<sup>[9]</sup>中,已经建立了较为完善的飞行品质的评价体系,其中与飞机横航向相关的飞行品质规范也已经有了经过验证的成熟的定量指标,这些指标具有较为明确的物理意义,与适航条款的要求也有一定对应关系。对于民用飞机而言,由于在飞行中较少涉及大机动动作,在参考军用飞行品质规范时,可视为Ⅲ类飞机在C种飞行阶段,从而选取量化指标。

#### ◆ Ⅲ类飞机:

大型、中型、低至中机动性飞机。

#### ◆ C种飞行阶段:

通常采用缓慢的机动动作来完成,常常需要精

准地控制飞机轨迹的飞行阶段。

1) 模态特性

条款中要求了飞机的横向操纵性能,涉及飞机滚转轴的指标有滚转模态时间常数  $T_r$  和发散螺旋模态的倍幅时间  $T_{double}$ ,军用品质规范中还对滚转螺旋耦合振荡的情况提出了要求,具体指标量化见表 3~表 5。

表 3 滚转模态时间常数的要求

| 飞行品质级别 | $T_r/s$ |
|--------|---------|
| 1 级    | < 1.4   |
| 2 级    | < 3.0   |
| 3 级    | < 10    |

表 4 螺旋模态倍幅时间的要求

| 飞行品质级别 | $T_{double}/s$ |
|--------|----------------|
| 1 级    | > 12           |
| 2 级    | > 8            |
| 3 级    | > 4            |

表 5 滚转螺旋模态耦合限制的要求

| 飞行品质级别 | $\xi_{RS} \cdot \omega_{RS}$ |
|--------|------------------------------|
| 1 级    | > 0.5                        |
| 2 级    | > 0.3                        |
| 3 级    | > 0.15                       |

2) 操纵响应

在军用飞行品质规范中,飞机的滚转性能可以通过飞机在最大滚转输入条件下到达  $30^\circ$  滚转角所需的时间来表示,品质规范规定了响应时间的最大值,如表 6 所示。

表 6 飞机滚转操纵响应要求

| 飞行品质级别 | $T_{30roll}/s$ |
|--------|----------------|
| 1 级    | < 2.5          |
| 2 级    | < 4.0          |
| 3 级    | < 6.0          |

3) 维持非对称飞行状态的能力及操纵余度

可以通过飞机在最大侧风值所带来的最大侧滑角中平稳飞行时的操纵余度来对这一要求进行量化处理。

军用品质规范给出了 1 级飞行品质的要求:在  $10^\circ$  侧滑角时,飞机的滚转控制仍旧具有 25% 的操纵余度,即在最大侧风情况下,副翼的使用范围应小

于  $0.75\delta_{a-max}$ 。

$$\delta_a = - (C_{n\delta_r} C_{l\beta} - C_{l\delta_r} C_{n\beta}) / (C_{n\delta_r} C_{l\delta_a} - C_{l\delta_r} C_{n\delta_a}) \beta_{max} \quad (1)$$

$$\delta_a \leq 0.75\delta_{a-max} \quad (2)$$

式中,  $C_{n\delta_r}$ 、 $C_{l\beta}$ 、 $C_{l\delta_r}$ 、 $C_{n\beta}$ 、 $C_{n\delta_r}$ 、 $C_{l\delta_a}$ 、 $C_{l\delta_r}$ 、 $C_{n\delta_a}$  为飞机横航向气动倒数,  $\beta_{max}$  为所要求的最大侧滑角值,  $\delta_a$  为侧风条件下维持非对称飞行状态的副翼偏度,  $\delta_{a-max}$  为满偏副翼偏度。

2.2 HQRM 方法的适用性分析

2.1 节中的指标量化结果仅说明了不同等级飞行品质的参数要求,并无体现大气扰动的影响作用。美国适航规范咨询通告 AC-25 7C<sup>[10]</sup> 中提到了一种通过驾驶员评价对飞机的飞行品质进行评估的操纵品质等级评定方法(HQRM),这一方法基于 Cooper-Harper 方法<sup>[11]</sup> 和美国军用飞行品质规范<sup>[9]</sup>,由电传操纵技术在飞行控制系统中的应用发展而来。它将飞控系统的不同失效状态从发生概率的角度进行考虑,并加入飞行包线和大气扰动的概率分析,将以上三者作为三个并行的概率条件,将不同飞行任务中保证飞机安全飞行可接受的最低操纵品质与这三个影响因素的组合概率相关联,得到较完整的驾驶员评价标准体系。图 1 为 HQRM 方法的评估过程示意图。

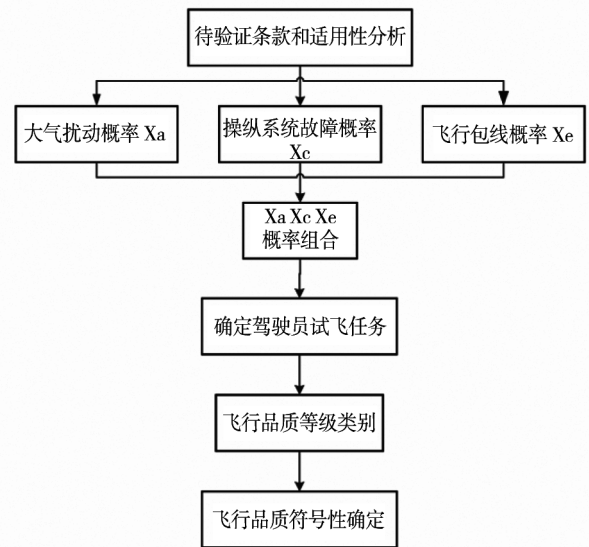


图 1 操纵品质等级评定方法的评估过程

虽然 HQRM 方法主要针对电传操纵系统及其失效情况,但它将大气扰动的影响以概率的形式考虑其中,表 7 为 HQRM 方法中具体的大气扰动分级及其发生概率情况。这一做法十分符合大气扰动对

飞行品质的影响特点:轻微大气扰动发生概率较大,但不会对飞机操纵产生较大影响,重度大气扰动发生的概率小,但可能会严重影响飞机操纵,使得飞行品质骤降。因此,飞机受到不同强度大气扰动的概率是不同的,相应的飞行品质要求也应当有所区别。

HQRM 方法将大气扰动以概率的形式加入到飞行品质等级评价过程中,既直观反映了大气扰动的作用特点,又明确了不同大气扰动强度中的飞行品质评价标准,具备较好的适用性。

表 7 HQRM 方法中的大气扰动分级

| 大气扰动等级 | 描述                                       | 在飞行包线内<br>的发生概率 |
|--------|--|-----------------|
| 轻度     | 1)引起暂时性轻微高度、姿态角变化的湍流                     | $10^0$          |
|        | 2)小于 10 节(5.14 m/s)的侧风                   |                 |
| 中度     | 1)强度相较于轻度更大的湍流,会导致高度和姿态角的变化,通常导致指示空速的变化。 | $10^{-3}$       |
|        | 2)小于侧风 25 节(12.86 m/s)的侧风                |                 |
| 重度     | 1)引起突然的大程度高度和姿态角变化的湍流,通常导致指示空速有很大变化      | $10^{-5}$       |
|        | 2)侧风大小明显超过可以被证明和安全起降的最小侧风                |                 |

在使用 HQRM 方法时,可以认为故障概率为 0,仅考虑大气扰动对飞行品质的影响,表 8 为仅考虑大气扰动影响的 HQRM 方法评价示例,其中,评价结果 S 对应“满意的”,A 对应“足够的”,C 对应“可控的”,具体的评价结果与对应的飞机响应定义见文献[10]。

表 8 大气扰动 HQRM 评价示例

| 大气扰动等级           | 飞行包线及概率        | 评价结果 |
|------------------|----------------|------|
| 轻微大气扰动 $10^0$    | 正常包线 $10^0$    | S    |
|                  | 使用包线 $10^{-3}$ | S    |
|                  | 限制包线 $10^{-5}$ | A    |
| 中度大气扰动 $10^{-3}$ | 正常包线 $10^0$    | S    |
|                  | 使用包线 $10^{-3}$ | A    |
|                  | 限制包线 $10^{-5}$ | C    |
| 重度大气扰动 $10^{-5}$ | 正常包线 $10^0$    | A    |
|                  | 使用包线 $10^{-3}$ | C    |
|                  | 限制包线 $10^{-5}$ | —    |

### 3 算例验证

本节选取算例飞机对上述评估方法的适用性和有效性进行验证。由于算例分析中主要考虑大气扰动的影响情况,而模态特性为飞机的固有特性,故从操纵响应和操纵余度两点进行验证。

#### 3.1 操纵响应指标

选择某型民用飞机在 3 个不同构型下的小扰动模型,分别无扰动情况和 HQRM 中规定的三种大气扰动强度风场中,对副翼满偏时的滚转角速率和滚转角响应进行仿真,仿真结果如图 2 ~ 图 4 所示。

图 5 为 3 种飞机构型在不同风场强度下的飞行品质变化情况,可以看出,高强度风场,即重度大气扰动情况下,飞机滚转角偏转至  $30^\circ$  的时间均有所增加,飞机在构型 1 和构型 2 时出现了明显的飞行品质降级情况。

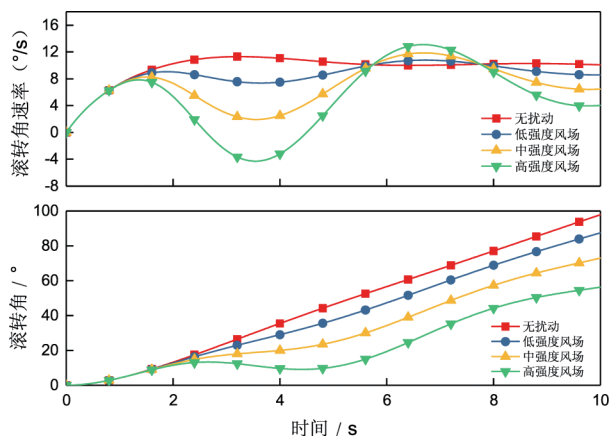


图 2 飞机构型 1 滚转角速率和滚转角响应曲线

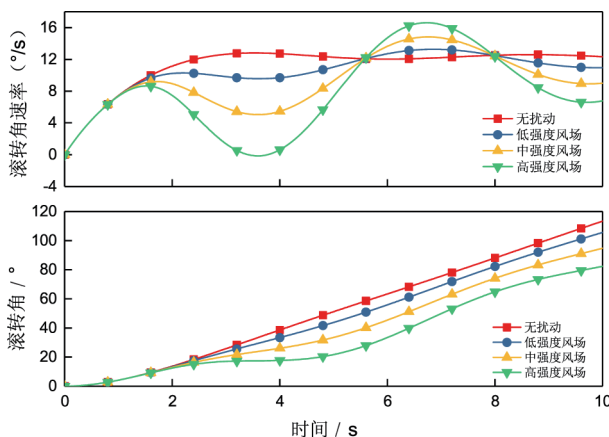


图 3 飞机构型 2 滚转角速率和滚转角响应曲线

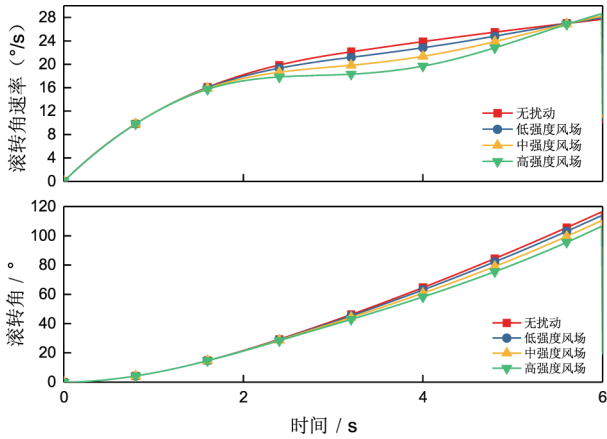


图 4 飞机构型 3 滚转角速率和滚转角响应曲线

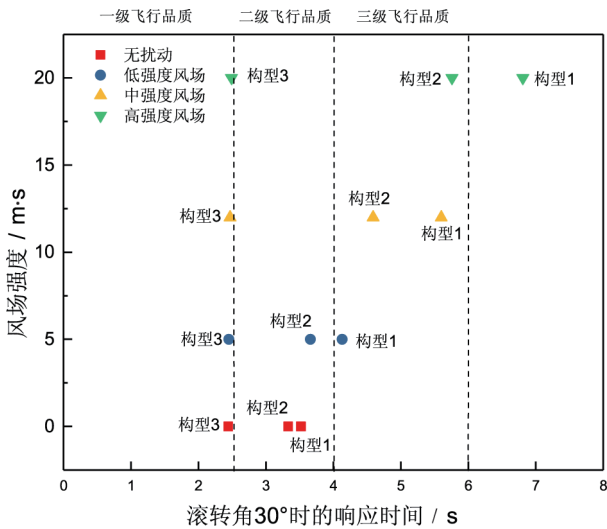


图 5 3 种飞机构型不同风场强度下的飞行品质变化图

### 3.2 维持非对称飞行状态的操纵余度计算

根据公式(1)和(2),分别计算算例飞机在 10 节(5.14 m/s)、25 节(12.86 m/s)侧风强度时的操纵余度,结果见表 9。

表 9 算例飞机操纵余度计算结果

| 风场强度/节 | 副翼偏度/° | 操纵余度/% |
|--------|--------|--------|
| 10     | 7.95   | 60.23  |
| 25     | 19.68  | 1.59   |

可以看出在侧风值为 25 节时,未能达到 1 级飞行品质要求,出现飞行品质降级现象。

结合适航条款的具体要求,算例飞机在低、中强度风场中横向操纵响应飞行品质均为一级或二级,基本满足条款 25.237 第 2 条的要求。当计算非对称飞行时飞机的操纵余量时,风场强度的影响较大,

在对飞机进行条款 25.147(f)的适航性评估时,可以通过改变风场强度,得到更为全面的计算结果,用以评估飞机在预期使用侧滑条件下是否具有从意外情况下恢复的滚转操纵能力。

仿真计算结果表明,以军用飞行品质规范进行指标量化,同时使用 HQRM 方法,在评估过程中结合大气扰动严重程度规定飞行品质等级,可以实现飞机针对条款 25.147(f)、25.233(a)和 25.237 的大气扰动适航符合性评估,结果符合预期。

## 4 结论

1)操稳特性类大气扰动适航条款对民机的模态特性、操纵响应和维持非对称飞行状态的能力及操纵余度做出了要求,可参考军用飞行品质规范对其进行符合性评估指标的提取与量化,便于在设计阶段评估飞机针对相关条款的适航符合性。

2)可以通过 HRQM 方法处理大气扰动对飞行品质的影响,依据扰动强度和发生概率规定飞机飞行品质,在严重扰动时适当放宽飞行品质要求。

3)文中提出的指标量化结果和大气扰动处理方法可用于飞机设计阶段提前开展相关条款的适航符合性评估工作,使飞机性能品质尽可能符合相关适航要求,从而减少试飞迭代,提高适航取证效率。

### 参考文献:

- [1] 乔文峰. 大气扰动建模及在民机工程应用中的研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2018, 1:104-108.
- [2] 王云, 张志强, 孙双双, 等. 飞行实时仿真中的微下击暴流建模研究[J]. 教练机, 2017, 3:62-65.
- [3] 王化东. 大气紊流建模与仿真[J]. 飞行力学, 2014, 32(1):84-87.
- [4] 赵玲, 季辰, 刘子强. 太阳能飞机阵风载荷响应分析[C]// 第十一届全国空气弹性学术交流会论文集. 北京: 中国空气动力学学会, 2010: 585-591.
- [5] 詹光, 孙颖. 某高空长航时飞机垂直阵风过载计算分析[J]. 飞机设计, 2007(6):7-9.
- [6] 徐焱. 飞机离散阵风响应分析[J]. 飞机设计, 2004, 2:11-18.
- [7] 杨秋艳. 飞机连续紊流阵风载荷计算方法研究[C]// 第十届全国空气弹性学术交流会论文集. 北京: 中国空气动力学学会, 2007: 56-61.
- [8] 中国民航局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2016.

- [ 9 ] Department of Defense. Handbook flying qualities of piloted aircraft; MIL-HDBK-1797 [ S]. USA; Department of Defense, 1997.
- [10] JOHN P. Proposed Revisions to Advisory Circular 25-7C, Flight Test Guide for Certification of Transport Category Airplanes[ R]. USA; Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2012.
- [11] COOPER G E, HARPER R P. The use of pilot rating in the evaluation of aircraft handling qualities[ R]. USA: National Aeronautics and Space Administration, 1969.

#### 作者简介

余艺萌 女, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 飞行力学与飞行安全、飞行仿真。E-mail: 332744306@qq.com

陈致名 男, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 飞行载荷。E-mail: 532575474@qq.com

## Research on airworthiness evaluation method of civil aircraft with atmospheric disturbance

YU Yimeng\* CHEN Zhiming

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Atmospheric disturbance is an important factor that affects aviation safety, which is mostly involved in airworthiness regulations. The airworthiness compliance assessment of atmospheric disturbance for civil aircraft has become an important part of civil aircraft airworthiness certification. Based on CCAR-25-R4, the airworthiness clauses of atmospheric disturbances were screened and summarized, the requirements of the airworthiness clauses of atmospheric disturbances related to handling stability characteristics were deeply analyzed and refined. Then the clause requirements were refined and quantified according to the military flight quality specification MIL-STD-1797B, and the control quality rating method (HQRМ) was used dealing with the influence of atmospheric disturbance, which means the impact of atmospheric disturbance was considered in the form of correlation between the severity and the probability of occurrence. The applicability and effectiveness of the quantitative index and the HQRМ method for the compliance assessment of the relevant airworthiness clauses were verified through calculation examples, and a method was proposed that defining the atmospheric disturbance as a factor that degrades the flight quality, combined with the quantitative index to make the corresponding flight quality requirements. Research result provides reference for the airworthiness compliance analysis and verification of atmospheric disturbance and the airworthiness certification work of relevant provisions during the aircraft design phase.

**Keywords:** atmospheric disturbances; airworthiness clauses; airworthiness compliance evaluation; requirements' quantification; HQRМ method

---

\* Corresponding author. E-mail: 332744306@qq.com