

飞机座舱臭氧浓度分析研究

简夕忠

(上海飞机设计研究院环控氧气系统设计研究部,上海 200235)

Research on the Analysis of Cabin Ozone Concentration for Aircraft

Jian Xizhong

(Environmental Control and Oxygen Systems Department, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200235)

摘要:飞机座舱内臭氧浓度会影响舱内空气质量,进而影响到人员身体健康。为此,适航当局在适航条例及其修正案中对座舱内臭氧浓度进行了规定。根据臭氧浓度相关适航条例要求,选取国内航线上两个地方臭氧浓度的测量数据,进行了臭氧浓度的计算分析。

关键词:适航;臭氧浓度;臭氧转换器

[Abstract] The cabin ozone concentration would affect the air quality of internal cabin, and would affect the passenger health. So the airworthiness authority has stipulated the ozone concentration requirement of the cabin air in the airworthiness regulation and amendment. According to the ozone concentration requirement in the related regulation, the measure data of the ozone concentration in the two domestic places was selected and the calculation analysis of ozone concentration was done.

[Keywords] Airworthiness; Ozone Concentration; Ozone Converter

0 引言

随着民用航空事业的发展,民机座舱内空气质量问题愈受到人们关注。民机座舱内空气质量直接关系到机组人员和乘客的健康、舒适度和安全性,座舱内空气污染程度轻则降低机组人员的工作效率,影响身体健康,重则可能会导致事故的发生^[1]。因此,开展民机座舱内空气质量的研究并提出切实可行的解决方案,对提升民机竞争力具有重要的现实意义。影响座舱空气质量的因素很多,如二氧化碳、一氧化碳、臭氧、合成杀虫剂以及发动机润滑油等。本文着重对座舱臭氧浓度进行分析研究。

1 研究现状

从上世纪 60 年代中期,国外相关研究机构开始对商务飞机中的臭氧进行测量。很显然,飞机在高空飞行时会遇到臭氧平流层起始处,这会导致客舱内的臭氧含量升高。此外,随着飞行高度和纬度的增加,宇宙射线的强度也在增加。直到上世纪 80 年代中期,人们才真正理解和意识到经常有飞行任务的乘务员和飞行员受到的宇宙辐射要比受到的其它大多数污染物的影响严重得多。

当飞机在美国西海岸和亚洲之间的近极地航线飞行时,舱内臭氧(O_3)水平在冬季和春季会比较高,Waters 等人^[2]最近报告的 37 个航段的臭氧平均水平为 200ppb。如果飞机上的臭氧转换器工作正常,那么高空大气环境中臭氧水平为 500ppb 的大气

进入客舱后会迅速降至 5ppb 或者更低。大多数的波音 757 和 737 机队都没有安装臭氧转换器,而且波音 747 飞机中居高不下的臭氧浓度也说明它的臭氧转换器没有有效地工作。

ACER^[3]研究机构也对飞机舱内臭氧开展了相关研究,对 45 个航段的舱内臭氧浓度进行了测量。研究结果发现几乎所有飞行航段中的舱内平均臭氧浓度都低于目前要求的 100ppb。安装了臭氧转换器的飞机,其舱内臭氧浓度水平明显低于那些没有安装臭氧转换器的飞机。然而必须注意到一点,不仅臭氧本身对人体健康的影响是重要的,而且由臭氧引起的化学反应产生的副作用也对乘客和机组人员的健康有影响。对于绝大多数座舱内材料,与臭氧发生相互反应而产生的副作用对人体来说是有毒的或者会引起过敏。有关舱内人体的试验室研究表明,臭氧会降低人员对可感知的客舱空气质量水平,同时也加剧一些类似于建筑病态综合症的产生。

美国环保署(EPA)制定了对身体健康有害的空气污染标准,对臭氧浓度进行了规定^[4]。臭氧会引起急性呼吸系统疾病,加剧哮喘,损害免疫系统,并且以后还会增加患者对呼吸疾病(例如支气管炎和肺炎)的易感性。暴露在上述测得的臭氧浓度居高的机舱环境中会导致人体器官发炎、肺功能下降和呼吸系统症状加剧。目前还没有针对呼吸系统症状或肺功能与飞机上臭氧水平浓度直接关系的有效研究。

目前只有波音 777 机型百分百地装备了臭氧催

化剂转换器,仍有数以千计的飞机,特别是波音737、757和767系列,以及大约10%的MD80系列飞机装备了臭氧转换器。

2 飞机座舱内臭氧浓度适航要求

2.1 适航要求提出的背景

臭氧是无色无味的不稳定气体,其浓度与海拔高度、经纬度、季节和天气条件等有关,当其达到一定浓度的时候会对呼吸道和眼睛产生刺激。由臭氧引起的不适等级与人员的活动量成正比。因此,客舱乘务员比乘客更容易受到臭氧的影响。

鉴于这种情况,25-50修正案(1980年1月1日)和121-154(1980年1月1日)增加了对运输类飞机最大臭氧浓度标准的相关规定。

2.2 条款要求

FAR/CS/CCAR 25.832 针对臭氧浓度提出了以下要求:

(1)必须表明飞机在飞行时座舱中的臭氧浓度符合下列要求:

①在320飞行高度层(高度相当于9750m)以上的任何时刻,不超过0.25/1 000 000体积含量(海平面当量)。

②在270飞行高度层(高度相当于8230m)以上任何三小时期间,不超过0.1/1 000 000体积含量(海平面当量时间加权平均值)。

(2)在本条中“海平面当量”是指25℃温度和760mmHg压力的状态。

(3)必须根据飞机的使用程序和性能限制进行分析或试验,当证实符合下列情况之一时,则表明满足本条要求:

①飞机不能在座舱臭氧浓度超过本条(a)规定限度的高度上运行。

②含有臭氧控制设备的飞机通风系统,能使座舱臭氧浓度保持在不高于本条(a)规定的限度。

FAR121.578和CCAR121.585对客舱臭氧浓度也进行了规定:

(1)本条采用下述定义:

①“飞行阶段”是指在两个机场之间预定不着陆飞行时间。

②“海平面当量”是指25℃温度和760mmHg压力的状态。

(2)除本条(d)款和(e)款规定外,合格证持有人不得在下述飞行高度层之上运行飞机,除非已成功地向局方证明,客舱内臭氧的浓度不超过下述规定:

①对于飞行高度超过9600m(32000ft)的飞行,在超过该飞行高度的任何时间里,按照容积计为海平面当量的0.25/1 000 000。

②对于飞行高度超过8400m(27000ft)的飞行,飞行时间超过4h并含有高于该飞行高度飞行的每个飞行阶段的加权平均值,按照容积计为海平面当量的0.1/1 000 000。此时飞行高度在6000m(18000ft)以下的臭氧量视为零。

(3)为符合本条要求,应当根据飞机运行程序和性能限制,或者根据合格证持有人的运行,通过分析或者试验提供证明。分析或者试验应当证明下述两种情况:

①在统计可靠度至少为84%时,大气臭氧的统计值表明,在飞机所运行的高度和位置,座舱臭氧的浓度不会超过本条(b)款规定的限度。

②飞机通风系统包括任何臭氧控制设备,可以维持客舱臭氧浓度不高于本条(b)款所规定的限度。

(4)在下述情况下,合格证持有人可以通过修订运行规范的方式,获得偏离本条(b)款的批准,其前提条件是:

①该合格证持有人证明,由于情况超出其控制能力或者由于不合理的经济负担,在一段具体的时间内不能满足要求。

②已经提交了一份被局方接受的计划,尽最大能力符合要求。

(5)对于具有下述情形之一的飞机,合格证持有人不必符合本条(b)款的要求:

①飞机载运的人员仅为飞行机组成员和第121.591条规定的人员。

②已有更换发动机计划的飞机。

3 臭氧浓度分析方法

3.1 臭氧浓度数据分析

中国气象科学研究院在国内以下的站点利用了臭氧探空仪,于春季(3月~5月)在以下几个地点进行过臭氧浓度垂直分布的探测,这几个地点是:北京、浙江临安、云南昆明、腾冲、青海西宁、新疆阿勒泰(北疆地区)、黑龙江龙凤山、海南三亚。每一个地点的臭氧探空观测次数均在5~10次左右。此外,在北京和青海西宁还进行了夏季的观测。

中国气象科学研究院提供的数据均是在春季测量的,春季有平流层臭氧(平流层臭氧层),在特定的气象条件下,可向对流层输送,因此大气中的臭氧

(下转第39页)

(上接第 34 页)

浓度在春季最高,此测量数据作为工程计算是切实可行的。

此外,臭氧浓度随纬度的增加也在增高。但整体而言,春季大气臭氧浓度在我国的东北地区(以黑龙江龙凤山站为代表,华北地区(北京)是最高的,而在西南地区(如西藏、云南)和华南地区(如香港、三亚)是最低的。

所以本文的计算分析是基于中国气象科学院提供的黑龙江龙凤山站和北京两个地方的测量数据。

3.2 航线分析

AC120-38^[5]提供了三种类型案例下满足规定的臭氧浓度要求的方法。

(1) 类型 1—直接确定某次飞行是否满足 FAR121 中规定的客舱最大臭氧浓度要求。

(2) 类型 2—对于特定的飞行,确定需要的过滤效率(E)值来满足 FAR121 中规定的客舱最大臭氧浓度要求。

(3) 类型 3—对于在特定地理区域、高度和时间的飞行,确定飞机最大飞行高度以满足 FAR121 中规定的客舱最大臭氧浓度要求。

下面采用三种类型方法分别对黑龙江龙凤山站和北京的测量数据进行臭氧浓度的分析。

3.2.1 系数的确定

R 为舱外臭氧装换系数,如果没有座舱空气再循环, R 为 0.75 ~ 1.00;若有座舱空气再循环, R 为 0.4 ~ 0.6。FAA 可接受的默认值 $R = 0.7$ (参见 AC25-22^[6]),如果 R 低于 0.7,则须进行试验验证,因此 $R = 0.7$ 。

P/P_0 为座舱压力和海平面压力的比值,某型飞机座舱压力为 $P = 8\ 000\text{ft}$,因此 $P/P_0 = 0.74$ 。

3.2.2 座舱内最大臭氧浓度计算

根据 AC 120-38 公式 1:

$$OZMAX = (1 - E)(OZ16)(R)(P/P_0)$$

$$OZMAX = 0.518(1 - E)(OZ16)$$

$$E = 1 - \left[\frac{0.48}{(OZ16)} \right]$$

其中: E 为臭氧转换器的转换系数。

(1) 类型 1

① 黑龙江龙凤山站

表 1 是黑龙江龙凤山站地区臭氧浓度数据(由中国气象科学研究院提供并经过处理)。

从表 1 给出 $OZ16 = 0.669$ (飞行高度 12 000km) 取 $E = 0$,即不装臭氧转换器。计算得出:

$$OZMAX = 0.3465$$

此点不满足 FAR121 规定的最大臭氧浓度要求。

表 1 黑龙江龙凤山站地区臭氧浓度数据(44.44°N 127.36°E)

高度 (km)	平均臭氧浓度 (ppm)	84% 可信度平均臭氧浓度 (ppm)	98% 可信度平均臭氧浓度 (ppm)	99% 可信度平均臭氧浓度 (ppm)	统计样本中最大臭氧浓度 (ppm)	统计样本中最小臭氧浓度 (ppm)	统计样本数
5.0	0.066	0.070	0.071	0.072	0.079	0.051	22
5.6	0.068	0.071	0.073	0.074	0.087	0.052	22
6.0	0.072	0.077	0.079	0.080	0.102	0.053	22
6.6	0.078	0.089	0.095	0.098	0.197	0.054	22
7.0	0.081	0.094	0.101	0.105	0.226	0.052	22
7.6	0.094	0.117	0.129	0.136	0.319	0.051	22
8.0	0.102	0.130	0.144	0.152	0.302	0.051	22
8.6	0.134	0.176	0.198	0.209	0.432	0.056	22
9.0	0.163	0.215	0.241	0.255	0.489	0.055	22
9.4	0.196	0.258	0.291	0.307	0.550	0.054	22
9.6	0.212	0.275	0.308	0.325	0.549	0.054	22
10.0	0.274	0.345	0.381	0.400	0.571	0.056	22
10.6	0.364	0.446	0.488	0.510	0.688	0.053	22
10.8	0.397	0.480	0.523	0.545	0.693	0.055	22
11.0	0.429	0.516	0.561	0.584	0.725	0.050	22
11.6	0.523	0.605	0.648	0.670	0.791	0.086	22
12.0	0.612	0.669	0.699	0.715	0.866	0.239	22

注:1. 高度是从海平面高度开始计算;2. ppm 是指 10^{-6} 体积混合比。

②北京

表 2 是北京地区臭氧浓度数据(由中国气象科学研究院提供并经过处理)。

从表 2 给出 OZ16=0.428(飞行高度 12 000km)

表 2 北京地区臭氧浓度数据(39.81°N 116.47°E)

高度 (km)	平均臭氧浓度 (ppm)	84% 可信度平均臭氧浓度 (ppm)	98% 可信度平均臭氧浓度 (ppm)	99% 可信度平均臭氧浓度 (ppm)	统计样本中最大臭氧浓度 (ppm)	统计样本中最小臭氧浓度 (ppm)	统计样本数
5.0	0.064	0.067	0.069	0.070	0.074	0.045	16
5.6	0.068	0.073	0.076	0.078	0.088	0.045	16
6.0	0.068	0.073	0.075	0.077	0.088	0.044	16
6.6	0.066	0.071	0.074	0.075	0.088	0.046	16
7.0	0.069	0.074	0.077	0.079	0.090	0.048	16
7.6	0.080	0.093	0.100	0.104	0.166	0.059	16
8.0	0.082	0.094	0.101	0.104	0.146	0.059	16
8.6	0.093	0.117	0.130	0.137	0.264	0.060	16
9.0	0.099	0.130	0.146	0.155	0.337	0.054	17
9.6	0.116	0.164	0.189	0.203	0.494	0.059	17
10.0	0.133	0.188	0.219	0.235	0.557	0.055	17
10.8	0.199	0.279	0.322	0.345	0.651	0.056	17
11.0	0.216	0.300	0.345	0.369	0.661	0.056	17
11.6	0.271	0.367	0.419	0.447	0.669	0.054	17
12.0	0.325	0.428	0.483	0.513	0.662	0.052	1722

注:1. 高度是从海平面高度开始计算;2. ppm 是指 10⁻⁶ 体积混合比。

(2) 类型 2

根据 AC 120-38 公式 3:

$$E = 1 - \left[\frac{OZMAX}{0.518(OZ16)} \right]$$

取 OZMAX=0.25, 上式变为:

$$E = 1 - \left[\frac{0.48}{(OZ16)} \right]$$

①黑龙江龙凤山站

从表 1 中给出 OZ16 = 0.669 (飞行高度 12 000km)

计算得出:

$$E = 28\%$$

此点安装的臭氧转换器效率大于 28% 就可以满足 FAR121 规定的最大臭氧浓度要求。

②北京

从类型 1 中北京地区计算结果可知, 此点不需要安装臭氧转换器就可以满足适航要求。

如果考虑到最严重的情况, 此点 R = 1.0 (外界空气臭氧全部进入客舱), 计算得出:

$$E = 1 - \left[\frac{0.25}{(OZ16)(1.0)(0.74)} \right] = 1 - \left[\frac{0.25}{(0.428)(1.0)(0.74)} \right] = 21\%$$

考虑到最严重的情况, 此点安装臭氧转换器效率大于 21% 就可以满足 FAR121 规定的最大臭氧浓

度要求。取 E = 0, 即不装臭氧转换器。计算得出:

$$OZMAX = 0.222$$

此点满足 FAR121 规定的最大臭氧浓度的

要求。

度要求。

(3) 类型 3

$$E = 1 - \left[\frac{OZMAX}{0.518(OZ16)} \right]$$

根据 FAR25.832 a.1 中的规定, 取 OZMAX=0.25 且 E=0, 即不装臭氧转换器, 计算得出:

$$OZ16 = 0.483$$

①黑龙江龙凤山站

根据表 1 中的数据插值可以得出 OZ16=0.483 对应的飞行高度为 10 817km)。

此点航线上只要飞行高度低于 11 300km 就能满足 FAR121 规定的最大臭氧浓度要求。

②北京

根据表 2 中数据可以看出, 对应的飞行高度在 12 000km 以下, OZ16 均小于 0.483, 所以在此点航线上只要飞行高度低于 12 000km 就能满足 FAR121 规定的最大臭氧浓度要求。

3.2.3 臭氧浓度时间加权平均值计算

根据 AC120-38 公式 6:

$$OZTWA = (1 - E)(R)(P/P_0) \left[\sum_{i=1}^N (OZ16)_i T/T_{FS} \right]$$

$$OZTWA = 0.518(1 - E) \left[\sum_{i=1}^N (OZ16)_i T/T_{FS} \right]$$

(下转第 71 页)

