航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Feb. 25 2021 Vol. 32 No.02 32-37

航空发动机非挥发性颗粒物排放适航标准与审定

杨晓军*，柳笑寒，常嘉文
中国民航大学，天津 300300

摘　要：现行的烟雾排放标准在过去的几十年中很好地限制了民航的航空发动机尾气排放，但其并没有对颗粒物排放进行直接的限制。国际民航公约附件16第2卷“航空发动机排出物”中第4章对颗粒物制定了排放标准。2016年，颁布了由发烟指数转化而来的非挥发性颗粒物（nvPM）质量浓度标准作为过渡，并在后续研究众多方面因素影响并修正后颁布了起降循环nvPM质量与数量标准。采取使用特征系数计算特征水平的方法表明发动机排放符合监管水平。研究国际民航组织对颗粒物排放的正式标准与符合性审定程序，对我国CCAR-34部的修订与未来自主研发发动机的适航审定工作有着积极意义。

关键词：航空发动机；颗粒物排放；排放标准；起降循环；适航审定

中图分类号：X513　　**文献标识码：**A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2021.02.004

民航业的快速发展，伴随而来的是对于环境的影响。尾气颗粒物主要包括非挥发性颗粒物、挥发性硫酸盐颗粒物与挥发性有机颗粒物三种，是航空发动机的主要污染物排放之一，对环境与人体健康有着较大危害[1]。非挥发性颗粒物（non-volatile particulate matter, nvPM）定义为当加热到350℃的温度时不挥发的排放颗粒。这些颗粒物也称为“超细粉尘”或“炭黑”颗粒。非挥发性颗粒物在发动机尾喷口处是高温的，当其在飞机后方进行掺混时其数量并不发生改变，并提供了低沸点气态排出物的冷凝表面，因此非挥发性颗粒物也在挥发性颗粒物的形成中扮演了很重要的角色。

国际民航组织（ICAO）于20世纪60年代在国际民航公约附件16第2卷《航空发动机排出物》中制定了涡轮发动机烟雾排放要求。发烟指数的标准很好地限制了大尺寸颗粒物的排放，但是现在已经无法适用于目前的航空发动机，用来控制细小颗粒物的排放。所以ICAO制定了nvPM的质量浓度标准作为过渡，并正制定和完善着陆与起飞循环（LTO）内nvPM质量和数量排放标准。本文介绍了nvPM标准制定的背景，具体分析了nvPM质量与数量标准的各方面修正以及审定的符合性程序，为我国民航局推进CCAR-34部的修订工作提供一定的参考[2]。

1 nvPM排放标准制定背景

为了限制早期商业飞机排放的“黑色烟雾”，控制机场附近的空气质量，ICAO制定了烟雾排放标准，并于20世纪70年代开始，要求在航空涡轮发动机的适航审定中测试发烟指数。该标准和审定要求使得现代发动机尾气排放几乎透明，实质是大大降低了大尺寸颗粒物的排放。事实证明，发烟指数的测试要求已经起到很好的效果，也很有可能降低了颗粒物质量排放[3]。但是发烟指数的测量并不是绝对意义上的质量测量，对小尺寸的颗粒物排放无法限制，该要求并不能很好地评估现代发动机的颗粒物排放，更不能用来降低未来发动机的颗粒物排放。所以开发一种定量化发动机nvPM排放方法势在必行。

为有效控制发动机排放的细颗粒物，2010年，ICAO下属的技术支持机构航空环境保护委员会（CAEP）会议决定，

收稿日期：2020-09-27；退修日期：2020-10-15；录用日期：2020-11-25
基金项目：中国民航大学省部级科研机构开放基金项目（CESCA2019Y05）
*通信作者：Tel.：022-24092415　　E-mail：xiaojunyoung@hotmail.com
引用格式：Yang Xiaojun，Liu Xiaohan，Chang Jiawen.Airworthiness standards and certification procedures for non-volatile particulate matter emissions from aircraft engines[J].Aeronautical Science & Technology，2021，32(02)：32-37. 杨晓军，柳笑寒，常嘉文. 航空发动机非挥发性颗粒物排放适航标准与审定[J]. 航空科学技术，2021，32(02)：32-37.

开始研究制定发动机颗粒物排放标准。现有的烟雾排放要求是在LTO循环的4个推力级别下选最大的发烟指数，将其与标准值进行对比；而nvPM标准会综合考虑4个功率级别，从技术性、经济性、环保性等方面研究制定，并且要考虑颗粒物的数量和质量浓度，比烟雾标准的可视化要求更为深入。

2013年，CAEP启动了面向涡轮发动机的nvPM排放适航审定标准的制定工作，该标准也是对烟雾排放要求的扩展和延伸。但是完成一个严密的标准制定需要时间以及庞大的工作量，所以在2013年CAEP会议决定在CAEP/10期间内完成nvPM的过渡性标准制定，用于取代过去的烟雾排放标准，于2016年颁布。其实质是在建立nvPM与烟雾之间关系的基础上，将nvPM排放标准转化为传统的烟雾排放标准，并允许收集nvPM质量浓度数据以创建法规框架，为后续颁布正式标准打下基础。因此，满足之前的烟雾排放标准的发动机都满足该过渡标准。该标准适用范围是额定推力>26.7kN的发动机，适用日期是2020年1月1日。发烟指数标准的适用终止日期为2023年1月1日[4]。

2014年决定在CAEP/11期间完成对涡轮发动机完整nvPM标准的制定工作。标准与修正内容在下一节详细介绍。

2 nvPM排放标准与修正

2.1 过渡性标准

过渡性标准是在新的nvPM标准制定完成之前，在烟雾与nvPM标准关系的基础上，建立的发动机的最大粒子质量浓度与发烟指数之间的关系。将各发动机制造商上报的颗粒物质量浓度和发烟指数的数据拟合转化，得到nvPM质量浓度的监管要求：

$$\text{limit nvPM} = 10^{\left(3 + 2.9F_{00}^{-0.274}\right)} \tag{1}$$

式中：limit nvPM是质量浓度的规定限值；F_{00}是额定推力。

2.2 LTO循环

以往的排放标准制定主要考虑污染物对当地空气质量的影响，nvPM排放标准的制定却是基于着陆与起飞循环（LTO）的。设定LTO循环的依据是机场周围的航空排放高度通常低于916m，该循环由4个阶段组成，分别为滑行、进近、爬升和起飞。发动机在测试nvPM排放量时对于不同阶段按特定的推力和运行时间进行，从而确定nvPM质量排放指数（EI_{mass}）和nvPM数量排放指数（EI_{num}）[5-6]。各阶段额定推力百分比与运行时间见表1。

表1 LTO循环下推力设定值与运行时间

Table 1 Thrust setting and time in each following operating mode under LTO cycle

着陆和起飞运行模式	推力设定值/%F_{00}	该模式下运行时间/min
起飞	100	0.7
爬升	85	2.2
进近	30	4.0
滑行/地面慢车	7	26.0

2.3 度量体系

nvPM的排放量由LTO阶段的运行时间、燃油流量以及排放指数三者乘积得到。对于额定推力>26.7kN的发动机的LTO循环标准的nvPM质量和数量排放，通过给定发动机的额定推力进行标准化，测量发动机的LTO的nvPM质量和数量排放，并相对于额定推力对比。度量值如下所示。

nvPM质量度量值：

$$\frac{\text{LTO}_{\text{nvPM_mass}}}{F_{\infty}} = \frac{\sum_{\text{LTO}} t_{\text{m}} \times W_{\text{f}} \times \text{EI}_{\text{nvPM_mass}}}{F_{\infty}} \tag{2}$$

nvPM数量度量值：

$$\frac{\text{LTO}_{\text{nvPM_num}}}{F_{\infty}} = \frac{\sum_{\text{LTO}} t_{\text{m}} \times W_{\text{f}} \times \text{EI}_{\text{nvPM_num}}}{F_{\infty}} \tag{3}$$

式中：t_{m}为模式下的时间；W_{f}为燃油流量；$\text{EI}_{\text{nvPM_mass}}$为nvPM质量排放指数；$\text{EI}_{\text{nvPM_num}}$为nvPM数量排放指数；$F_{00}$为额定推力[7]。

2.4 系统损失修正和环境修正

nvPM采样和测量系统的整体颗粒损失（收集部分的热泳损失除外）被称为系统损失。与在密闭系统中的废气排放相比，任何颗粒测量系统都会在采样系统中产生误差，从而导致仪器测定的nvPM度量值始终低于发动机出口平面的nvPM的度量值。主流的颗粒损失机理认为与颗粒大小有关，并且nvPM数量的损失高于nvPM质量。与较小的粒子相比，较大的粒子穿透性更好。但是，较大的颗粒对nvPM质量的影响更大[8]。例如，一台发动机比另一台发动机排放普遍较大的颗粒，这台发动机在仪表上会报告更高的nvPM数值，尽管它在发动机出口平面的nvPM值数量级相似。

目前根据数据分析得到的情况，当前的采样测量系统无法对系统损失进行有把握的修正。同时指出，不修正系统损失可能会导致发动机度量值之间的某些偏差，特别是对排放量的偏差。但由于以下两种原因，在严酷度选项的

开发中未考虑这种潜在的偏差。(1) 发动机的审定度量值取决于其自身性能,而不取决于另一个发动机的相对性能;(2) 不解决这种潜在偏差可能对制造商生产出排放更小颗粒的发动机是一种鼓励。

因此,拟议的 CAEP/11 LTO nvPM 标准的度量系统不包括系统损失修正,同时考虑了环境修正。对于测试中环境因素的影响,CAEP 评估了两种对环境因素修正的方法,结果表明修正方法还不完善,需要进一步的分析。并且发现采用 GE 燃烧室数据制定的修正不足以使在不同环境条件下测量的数据重合。因此,目前暂未对源自环境条件的变化带来的误差做出修正。但考虑到未修正引起的误差,CAEP 给 nvPM 质量和数量值设立了一条误差带,对于 nvPM 质量的量级为±10%,nvPM 数量的量级为±30%[9]。

2.5 燃油成分修正

nvPM 的排放量随着燃油成分的变化而变化,而燃油中的氢含量是影响 nvPM 排放的重要参数。为了制定能消除燃料特性影响的统一的 nvPM 质量和数量标准,第三工作组/颗粒物质任务组就使用修正系数来区别不同性质的燃料,其中使用燃料氢含量作为参数。2018 年 CAEP 指导小组会议同意了方法的制定和最终修正公式,使用以下方程将测量的 nvPM 质量和数量排放指数修正为 13.8% 质量的燃料氢含量参考值,从而将 nvPM 排放值标准化为严酷度选项开发的参考燃料的排放值[10]。

$$k_{\mathrm{FUEL_M}} = \mathrm{e}^{\left\{\left(1.08\frac{F}{F_{00}} - 1.31\right)(13.8 - H)\right\}} \tag{4}$$

$$k_{\mathrm{FUEL_N}} = \mathrm{e}^{\left\{\left(0.99\frac{F}{F_{00}} - 1.05\right)(13.8 - H)\right\}} \tag{5}$$

式中:$k_{\mathrm{FUEL_M}}$ 为 nvPM 质量排放指数的燃油修正系数;$k_{\mathrm{FUEL_N}}$ 为 nvPM 数量排放指数的燃油修正系数;F 为推力;F_{00} 为额定推力;H 为燃料氢含量(以质量百分比计)。

2.6 严酷度选项

航空环境保护委员会第三工作组/颗粒物质任务组(WG3/PMTG)为 nvPM 质量和数量制定了严酷度选项,并经 2017 年 CAEP 指导小组会议同意。对于在产发动机(在 2023 年 1 月 1 日前申请型号合格证的发动机),WG3 为 nvPM 质量和数量各开发了一个严酷度选项,建议从 2023 年 1 月 1 日开始适用。在产发动机严酷度选项是防倒退的,即需要让所有在产发动机满足此严酷度选项[9]。

设计上为了让严酷度选项高于发动机在推力范围内排放值误差带之上,选择 89kN 和 200kN 作为 nvPM 质量严酷度选项曲线的转折点,使全部推力范围内的点与严酷度选项具有一定的裕度。考虑到一些小型发动机较高的排放值,严酷度选项的限制值随着推力的增加而减小,直到 200kN 时,限制值为恒定值。而在 CAEP/11–WP77 中加入了俄罗斯的 nvPM 质量排放数据后发现高于拟定的严酷度选项,所以在 CAEP/11 进行了修订,放宽了 nvPM 质量严酷度选项的标准。WG3 根据同样的设计方法确定 200kN 作为 nvPM 数量严酷度选项曲线的转折点,加入俄罗斯的 nvPM 数量排放数据后发现其满足拟定的严酷度选项,因此无须调整。

对于新机型发动机(在 2025 年 1 月 1 日后申请型号合格证的发动机),为 nvPM 质量开发了 5 个严酷度选项,为 nvPM 数量开发了三个严酷度选项,建议从 2025 年 1 月 1 日开始适用。在对不同技术的发动机排放数据集进行数据拟合并降低了额定推力小于 89kN 的发动机排放限值的严酷度后,选择 150kN 作为 nvPM 质量和数量严酷度选项曲线的转折点,使严酷度适中。5 条质量严酷度选项曲线,额定推力大于 150kN 的发动机,排放限制值从 NT–1(250mg/kN)按 0%、16%、44%、72% 和 82% 的百分比降低;额定推力小于 150kN 的发动机,严酷度选项为其提供了更大的裕度。分析表明,nvPM 质量的减小不会导致数量类似的减少,所以数量严酷度选项曲线仅为影响 NT–1 至 NT–3 的质量严酷度选项曲线开发三条,两条额外的质量严酷度选项是因为目前对质量排放的理解更深。额定推力大于 150kN 的发动机,数量排放限制值从 NT–1(3×10^5#/kN)按 0%、33% 和 66% 的百分比降低。同样对额定推力小于 150kN 的发动机其严酷度放宽。图 1 为在产与新机型发动机 nvPM 质量排放严酷度选项,图 2 为 nvPM 数量排放严酷度选项。

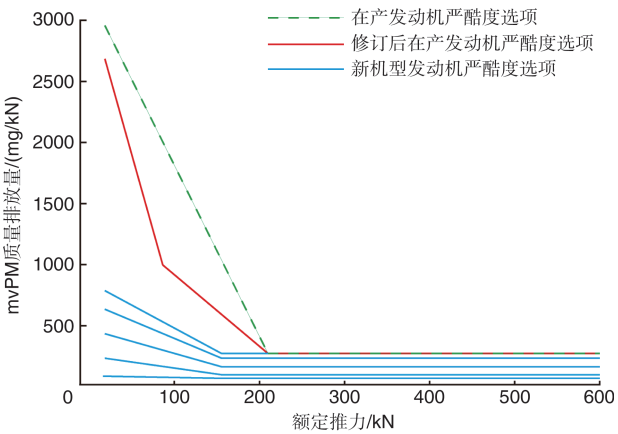

图 1 在产与新机型发动机 nvPM 质量排放严酷度选项

Fig.1 In production and new type engines nvPM mass stringency option

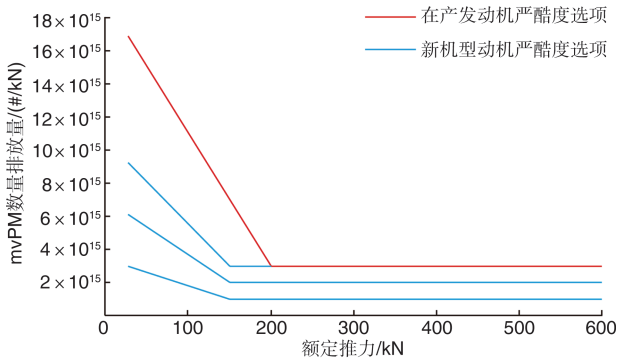

图2 在产与新机型发动机nvPM数量排放严酷度选项

Fig.2 In production and new type engines nvPM number stringency option

2.7 发动机个体差异

在对发动机排放进行适航审定测试时，制定污染物排放的特征值需要来自大量的发动机的测试数据。而制造商出于成本考虑，提供的发动机样本容量很小，而发动机个体之间的差异会影响审定测试的结果。

在1977—1979年期间，国际民航组织制定了航空发动机气态排出物的特征系数，使用特征系数将采样与测量得到的排放值转换为特征水平，来验证气态排出物的符合性。特征系数的制定实际上是一项统计分析，取决于测试的发动机的数量，以高置信度证明发动机样本排放能代表总体排放的平均值，并且平均值低于监管限制即可表明符合性。制定特征系数需要变异系数。

变异系数定义为标准差除以排放测量值的平均值，如式(6)所示：

$$CV = \frac{\sigma}{m} \tag{6}$$

式中：CV为变异系数；σ为测量排放值的标准差；m为平均值。

2017年霍尼韦尔测试了25台同类型发动机，采集了排放数据，并参考烟雾排放标准中特征系数的制定方法，将nvPM质量与数量变异系数制定为20%，得出特征系数(见表2)[11]。

2.8 监管水平

CAEP/10会议决定，将nvPM标准的严酷度制定在较低水平，但将适用日期提前到2023年1月1日，这样就可以基于审定当局获得的nvPM排放数据更早地对nvPM排放标准进行审查和更新。CAEP/11通过了正式的nvPM排放标准，并强调将在2022年的CAEP/12会议上审查该标准，即是否启动nvPM标准的严格化工作。标准见表3、表4。

表2 确定特征水平的特征系数

Table 2 Characteristic factors to determine characteristic levels

测试发动机数量(i)	LTO循环nvPM质量	LTO循环nvPM数量
1	0.7194	0.7194
2	0.8148	0.8148
3	0.8858	0.8858
4	0.9011	0.9011
5	0.9116	0.9116
6	0.9193	0.9193
7	0.9252	0.9252
8	0.9301	0.9301
9	0.9341	0.9341
10	0.9375	0.9375
>10	$1-\frac{0.19778}{\sqrt{i}}$	$1-\frac{0.19778}{\sqrt{i}}$

表3 nvPM质量排放监管水平

Table 3 nvPM mass emission regulatory levels

	LTO循环nvPM质量排放	
在2023年1月1日(含)后新生产的某型号发动机	最大额定推力大于200kN的发动机	$\frac{LTO_{mass}}{F_{00}} = 347.5$
	最大额定推力大于26.7kN但不超过200kN	$\frac{LTO_{mass}}{F_{00}} = 4646.9 - 21.497F_{00}$
在2023年1月1日(含)后新提交型号合格证申请的某型号发动机	最大额定推力大于150kN	$\frac{LTO_{mass}}{F_{00}} = 214$
	最大额定推力大于26.7kN但不超过150kN	$\frac{LTO_{mass}}{F_{00}} = 1251.1 - 6.914F_{00}$

表4 nvPM数量排放监管水平

Table 4 nvPM number emission regulatory levels

	LTO循环nvPM数量排放	
在2023年1月1日(含)后新生产的某型号发动机	最大额定推力大于200kN的发动机	$\frac{LTO_{number}}{F_{00}} = 4.170 \times 10^{15}$
	最大额定推力大于26.7kN但不超过200kN	$\frac{LTO_{number}}{F_{00}} = 2.669 \times 10^{16} - 1.126 \times 10^{14}F_{00}$
在2023年1月1日(含)后新提交型号合格证申请的某型号发动机	最大额定推力大于150kN	$\frac{LTO_{number}}{F_{00}} = 2.780 \times 10^{15}$
	最大额定推力大于26.7kN但不超过150kN	$\frac{LTO_{number}}{F_{00}} = 1.490 \times 10^{16} - 8.080 \times 10^{13}F_{00}$

3 nvPM排放符合性的适航审定程序

nvPM排放适航审定的符合性程序采取与气态排出物相同的方法，采取将测量和计算得到的排放值转换为特征

水平的方法，将得到的特征水平与监管限制进行比较。各个推力设定下的nvPM监管限制必须能以高置信度表明，所测试型别的任何一台发动机不超出标准。如果特征水平低于监管限制，那么适航当局应颁发合格证书[11]。特征水平是对测量得到的nvPM质量和数量排放值的平均值[12]，经过采样系统采集部分的热泳损失修正和各自的燃油成分修正，再除以与测试发动机数量相对应的特征系数，得到的值即为特征水平。在测量和计算nvPM质量和数量的排放值时，受到度量体系中三方面因素的影响，即时间、燃油流量以及排放指数。nvPM质量和数量排放指数代表的是经过各自的稀释因子、收集部分热泳损失和各自的燃料成分修正系数修正后的每千克燃油燃烧的发动机排气颗粒物的质量和数量。采集部分的热泳损失修正公式如下：

$$k_{\text{thermo}} = \left(\frac{T_1 + 273.15}{T_{\text{EGT}} + 273.15} \right)^{-0.38} \tag{7}$$

式中：k_{thermo}为热泳损失修正系数，如果发动机的排气温度小于进气温度，则k_{thermo}=1。燃油成分修正按2.5节中的公式进行修正。

将经过上述修正过的同型别发动机的nvPM质量和数量排放测试数据取平均值，除以特征系数后得到的特征水平，不超过监管限制，则表明了该型别发动机的符合性。

4 结束语

本文对民用航空发动机nvPM排放标准制定的背景、质量和数量标准的影响因素及监管限制、适航审定的符合性程序进行了总结。由于航空发动机颗粒物的排放对于机场附近环境与人体健康有着比较大的危害。因此，尽快完善nvPM质量与数量标准，尽早适用，可以很大程度上督促各航空公司加快机队建设，鼓励各航空发动机制造商生产在环境保护方面更有竞争力的产品。我国CCAR-34部中尚无对nvPM的限制。适时启动对CCAR-34部规章的修订工作，这对未来指导民用航空发动机适航审定工作有着重大意义。 AST

参考文献

[1] International Civil Aviation Organization. Airport air quality manual[S]. Montreal：International Civil Aviation Organization，2011.

[2] 郑海飞，陆军.民用飞机持续适航工程数据的大数据视角[J].航空科学技术,2017,28(5):53-58.
Zheng Haifei, Lu Jun. The big data perspective on continued airworthiness engineering data of civil aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017,28(5):53-58. (in Chinese)

[3] 曹惠玲，马永锋，梁大敏，等.航空发动机烟雾排放的符合性验证方法研究[J].中国民航大学学报,2011,29(5):5-7.
Cao Huiling, Ma Yongfeng, Liang Damin, et al. Substantiation study of aircraft engine smoke emission[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011,29(5):5-7. (in Chinese)

[4] International Civil Aviation Organization. Annex 16，Volume 2，new nvPM emission standard[S]. Montreal：International Civil Aviation Organization，2016.

[5] 曹惠玲，李玉铭，汤鑫豪.机场LTO循环颗粒物排放量评估方法研究[J].环境科学与技术,2019,42(8):231-236.
Cao Huiling, Li Yuming, Tang Xinhao. Study on evaluation method of LTO stage particulate emissions in airport[J]. Environmental Science & Technology, 2019,42(8):231-236. (in Chinese)

[6] 赵运生，顾卫群，阙建锋，等.民用涡扇发动机起飞推力控制偏差分析[J].航空科学技术,2017,28(8):34-38.
Zhao Yunsheng, Gu Weiqun, Que Jianfeng, et al. Analysis of take-off thrust control deviation for civil turbofan engine[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(8): 34-38. (in Chinese)

[7] 雷明洁.航空器排放对机场大气环境影响的研究[D].天津：中国民航大学,2017.
Lei Mingjie. Research on the impact of aircraft emissions on the atmospheric environment of aerodrome[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)

[8] Lobo P，Durdina L，Benjamin B T，et al. Comparison of standardized sampling and measurement reference systems for aircraft engine non-volatile particulate matter emissions[J]. Journal of Aerosol Science，2020，145：105557.

[9] Jacob S D，Rindlisbacher T. The landing and take-off particulate matter standards for aircraft gas turbine engines[R]. Montreal：International Civil Aviation Organization，2019.

[10] Benjamin B T，Durdina L，Siegerist F，et al. Effects of fuel aromatic content on nonvolatile particulate emissions of an in-production aircraft gas turbine[J]. Environmental Science & Technology，2015，49(22)：13149-13157.

[11] International Civil Aviation Organization. Environmental technical manual，Volume 2，procedures for the emissions

certification of aircraft engines[S]. Montreal：International Civil Aviation Organization，2016.

[12] Lobo P，Durdina L，Smallwood G J，et al. Measurement of aircraft engine non-volatile pm emissions：results of the aviation-particle regulatory instrumentation demonstration experiment（A-PRIDE）4 campaign[J]. Aerosol Science and Technology，2015，49(7)：472-484. （责任编辑 余培红）

作者简介

杨晓军(1980–)男，博士，教授。主要研究方向：发动机内部复杂流动与换热、发动机排放。

Tel：022-24092415

E-mail：xiaojunyoung@hotmail.com

柳笑寒(1997–)男，硕士研究生。主要研究方向：航空发动机颗粒物排放

E-mail：2019012096@cauc.edu.cn

常嘉文(1991–)男，硕士研究生。主要研究方向：航空发动机颗粒物排放。

E-mail：924253094@qq.com

Airworthiness Standards and Certification Procedures for Non-volatile Particulate Matter Emissions from Aircraft Engines

Yang Xiaojun*，Liu Xiaohan，Chang Jiawen

Civil Aviation University of China，Tianjin 300300，China

Abstract: In the past decades, the current smoke number emission standard has well restricted the exhaust emissions of civil aviation aircraft engines, but it does not directly limit the particulate matter emissions. Chapter 4 of Annex 16, Volume 2 "aircraft engine emissions" to the Convention on International Civil Aviation, sets emission standards for particulate matter. In 2016, the non-volatile particulate matter mass concentration standard transformed from smoke number was issued as a transition, and the mass and number emission standard of non-volatile particulate matter in landing and take-off cycle was issued after many factors were affected and revised in the follow-up study. Using the characteristic factor to calculate the characteristic level shows that the engine emission meets the regulatory level. The study of ICAO's formal standards and compliance certification procedures for particulate matter emissions is of positive significance to the revision of CCAR-34 and airworthiness certification of self-developed engines in the future.

Key Words: aircraft engine; particulate matter emissions; emission standard; landing and take-off cycle; airworthiness certification

Received: 2020-09-27； **Revised:** 2020-10-15； **Accepted:** 2020-11-25

Foundation item: The Foundation of Provincial and Ministerial Scientific Research Institutions of Civil Aviation University of China (CESCA2019Y05)

***Corresponding author.Tel.**：022-24092415 **E-mail**：xiaojunyoung@hotmail.com