

# 取样密度对燃烧室试验测量结果的影响

马宏宇, 赵传亮, 程 明, 尚守堂

(中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

**摘要:**在航空发动机和燃气轮机燃烧室部件试验中, 取样密度会对燃烧室出口温度测量结果产生影响, 如果取样密度过小, 会造成燃烧室出口温度测量值与“实际值”之间偏离度过大。基于此, 对 3 种燃烧室的试验数据进行了分析。同时将试验采集到的“高取样密度”的原始数据沿圆周方向进行均匀“拆分”, “拆分后”得到不同密度的“低取样密度”数据, 将该数据与原始“高取样密度”试验数据的分析结果进行了对比, 得出了取样密度与测量偏离度之间的关系, 并给出了满足工程研制需要的取样密度。

**关键词:**取样密度; 偏离度; 燃烧室; 温度分布; 温度测量; 均匀度; 航空发动机; 燃气轮机

中图分类号: V231.2 文献标识码: A doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2014.03.004

## Effect of Sampling Density on Measurement Results in Combustor Test

MA Hong-yu, ZHAO Chuan-liang, CHENG Ming, SHANG Shou-tang

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** The sampling density can affect the combustor outlet temperature in aeroengine and gas turbine combustor component test. If the sampling density was not enough, the deviation degree between the measured temperature results and the real temperature would be large. The test data of three kinds of combustors were analyzed. The initial data for high sampling density were detached uniformly in circumferential, then the data for low sampling density with different sampling density were obtained, which compared with the analysis results of initial data for high sampling density. The relationship between sampling density and the deviation degree of measurement was presented, and the sampling density satisfied with the engineering research are given.

**Key words:** sampling density; deviation degree; combustor; temperature distribution; temperature measurement; uniformity; aeroengine; gas turbine

## 0 引言

在航空发动机和燃气轮机燃烧室的研制中, 燃烧效率和出口温度分布的均匀性是比较重要的评价指标。许多研究者一直致力于改善这 2 方面的性能, 并在试验中尽可能准确地测量<sup>[1-5]</sup>。在进行燃烧室部件试验时, 通常采用摆动或者固定式的电偶测量其出口截面上各位置的温度<sup>[6-12]</sup>, 由此计算燃烧效率和出口温度分布的均匀性。试验的取样密度较小时, 会漏掉热点, 从而影响测量结果的真实性。而受结构空间和试验成本等因素的限制, 取样密度又不能无限制地增大。国内外学者对此做了一些对比研究<sup>[13-15]</sup>, 给出了认为合适的取样密度经验值。

本文对 3 种燃烧室的试验数据进行分析, 得到满足工程研制需要的取样密度。

## 1 数据分析方法

考察燃烧室出口温度分布均匀性常采用的指标是总的不均匀度系数  $\Delta$  和径向不均匀度系数  $\Delta_R$ , 定义为

$$\Delta = \frac{T_{4\max} - T_{4\text{ave}}}{T_{4\text{ave}} - T_{3\text{ave}}} \quad (1)$$

$$\Delta_R = \frac{T_{4\text{imax}} - T_{4\text{ave}}}{T_{4\text{ave}} - T_{3\text{ave}}} \quad (2)$$

式中:  $T_{4\max}$  为燃烧室出口温度的最高值, 即热点温度;  $T_{4\text{imax}}$  为燃烧室出口截面各径向位置上平均温度的最

收稿日期: 2012-11-30 基金项目: 国家重大基础研究项目资助

作者简介: 马宏宇(1973), 男, 高级工程师, 从事航空发动机和燃气轮机燃烧室设计工作; E-mail: mahongyu1973@163.com。

引用格式: 马宏宇, 赵传亮, 程明, 等. 取样密度对燃烧室试验测量结果的影响[J]. 航空发动机, 2014, 40(3): 19-23. MA Hongyu, ZHAO Chuanliang, CHENG Ming, et al. Effect of sampling density on measurement results in combustor test[J]. Aeroengine, 2014, 40(3): 19-23.

高值; $T_{4ave}$ 为燃烧室出口温度的平均值; $T_{3ave}$ 为燃烧室进口温度的平均值。

$\Delta$ 和 $\Delta_R$ 值越大,表明燃烧室出口温度分布越不均匀。通常用燃气分析法或热电偶法来测量燃烧室出口截面上各点的温度,进而计算出温度分布系数和燃烧效率。相对于燃气分析法,热电偶测量法具有更便捷、快速的优点,并且能减少试验持续时间,降低能耗。但温度测量结果精度稍低,被广泛用于测量燃烧室出口温度。通常采用在摆动盘上装2~4支电偶耙子,转动摆动盘测量整个燃烧室的出口温度场。摆盘转动的角度间隔和每支电偶耙子上电偶测点的数量决定了总的数据点的数量。

由于各型燃烧室出口腔道高度和面积不同,因此测点数量不能直接反映测点的疏密程度,而以取样密度作为比较和评价的参数更为合理。取样密度的定义为每个测点所代表的燃烧室出口的单元面积,其单位为 $\text{cm}^2/\text{点}$ 。需要注意,数值越大意味着取样密度越小。

取样密度对试验结果的影响是显而易见的,取样点越密,测量到的平均温度越真实,漏采热点的机会也越少,平均温度(燃烧效率)、 $\Delta$ 和 $\Delta_R$ 的测量值也会越接近真实值。但是,增加取样密度会增加电偶及出口测量段的设计难度,并导致试验持续的时间延长,成本增加。因此需要在测试精度和试验的复杂性之间进行平衡,确定合适的取样密度。国内外学者对此做了一些对比研究<sup>[8-11]</sup>,其中文献[8]的结论认为:取样密度达到 $16.7 \text{ cm}^2/\text{点}$ ,即可足够精确地确定燃烧室的温升。但要使 $\Delta$ 的测量偏离度在10%以内,取样密度需达 $5.88 \text{ cm}^2/\text{点}$ ;而文献[11]则认为,要使 $\Delta$ 的测量偏离度在10%以内,取样密度需达 $0.89 \text{ cm}^2/\text{点}$ 。

文献[11]列出了一些燃烧室试验的出口温度取样密度为 $0.35 \sim 4.17 \text{ cm}^2/\text{点}$ ,文献[4、7]中试验的取样密度分别为5和 $5.41 \text{ cm}^2/\text{点}$ 。

本文选择3种环形燃烧室进行分析,取样密度分别为 $1.76$ 、 $1.44$ 和 $1.17 \text{ cm}^2/\text{点}$ 。其出口温度的测量数据均可看作是 $m \times n$ 的矩阵。其中, $m$ 是径向测点数量,即电偶耙子上的测点数量; $n$ 是沿燃烧室出口周向的测点(位置)数量。

数据分析方法:将原始数据沿圆周方向均匀间隔抽取,“拆分”后形成新的点数较少的数据,可以得到2组 $m \times n/2$ 的数据,3组 $m \times n/3$ 的数据,依此类推,其取样密度减小为原始数据的 $1/2$ 、 $1/3$ ……。为避免

破坏取样点的等环面分布原则,所有数据都没有沿径向再拆分。对拆分后的各组数据进行分析,分别计算其平均温度、 $\Delta$ 和 $\Delta_R$ 。

由于取样密度总是有限的,所以并不知道这3种燃烧室绝对对真实的平均温度、 $\Delta$ 和 $\Delta_R$ 。因此,以上述3种燃烧室拆分前的原始数据作为各自“真实的”平均温度、 $\Delta$ 和 $\Delta_R$ ,并以此为基准,与各自拆分后的数据进行对比分析,由此得到取样点减少、取样密度减小对测量结果的影响规律。

在进行数据对比分析时,定义了1个偏离度的指标 $D$ ,其中 $\Delta$ 和 $\Delta_R$ 的偏离度以相对变化量表示

$$D_{\Delta_i} = \left| 1 - \frac{\Delta_i}{\Delta} \right| \times 100\% \quad (3)$$

$$D_{\Delta_{R_i}} = \left| 1 - \frac{\Delta_{R_i}}{\Delta_R} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\Delta_i$ 和 $\Delta_{R_i}$ 为“拆分”后任意1组数据的 $\Delta$ 和 $\Delta_R$ 。

平均温度的偏离度则取“拆分”数据与原始数据的平均温度之差的绝对值

$$D_T = |T_i - T| \quad (5)$$

式中: $T$ 为原始数据的平均温度; $T_i$ 为“拆分”后任意1组数据的平均温度。

上述定义的含义是,无论“拆分”后数据的指标是变好还是变坏,都认为其结果偏离了“真实的”指标。偏离度 $D_{\Delta}$ 、 $D_{\Delta_R}$ 、 $D_T$ 越大,意味着取样密度减小后,测量数据的失真程度越大。

## 2 取样密度对测量结果的影响分析

在试验中,对A、B、C3个环形燃烧室的试验结果进行分析,以尽量大的数据采集密度进行测量,得到原始的“高取样密度”数据,并对数据进行了“拆分”和分析。

### 2.1 3种燃烧室的数据“拆分”结果

从燃烧室A的多组试验数据中随机抽取3组(A-07112、A-09303和A-09205)数据进行“拆分”分析,A的原始取样密度为 $1.76 \text{ cm}^2/\text{点}$ ,拆分后数据的取样密度分别为 $3.52$ 和 $5.28 \text{ cm}^2/\text{点}$ ,见表1。

从燃烧室B的多组试验数据中随机抽取3组(B-01004、B-01006和B-01104)数据进行“拆分”分析,B的原始取样密度为 $1.44 \text{ cm}^2/\text{点}$ ,拆分后数据的取样密度分别为 $2.88$ 、 $4.32$ 和 $5.76 \text{ cm}^2/\text{点}$ ,见表2。

从燃烧室C的多组试验数据中随机抽取3组

(C-224803、C-209105 和 C-219203)数据进行“拆分”分析,C 的原始取样密度为 1.17 cm<sup>2</sup>/点,拆分后数据的取样密度分别为 2.34、4.68、5.85 和 8.19 cm<sup>2</sup>/点,见表3。

表 1 燃烧室 A 的数据拆分结果

取样密度 / (cm <sup>2</sup> /点)	数据量	D <sub>Δ<sub>i</sub>ave</sub> / %	D <sub>Δ<sub>i</sub>max</sub> / %	D <sub>Δ<sub>i</sub>ave</sub> / %
1.76	第 3 组	0		0
3.52	第 6 组	6.2	11.5	3.2
5.28	第 9 组	10.6	27.3	13.4

取样密度 / (cm <sup>2</sup> /点)	数据量	D <sub>Δ<sub>Ri</sub>max</sub> / %	D <sub>T<sub>i</sub>ave</sub> / K	D <sub>T<sub>i</sub>max</sub> / K
1.76	第 3 组		0	
3.52	第 6 组	4.4	2.8	3.3
5.28	第 9 组	23.6	6.6	11.7

表 2 燃烧室 B 的数据拆分结果

取样密度 / (cm <sup>2</sup> /点)	数据量	D <sub>Δ<sub>i</sub>ave</sub> / %	D <sub>Δ<sub>i</sub>max</sub> / %	D <sub>Δ<sub>Ri</sub>ave</sub> / %
1.44	第 3 组	0		0
2.88	第 6 组	3.0	8.2	0.3
4.32	第 9 组	5.5	11.2	1.9

取样密度 / (cm <sup>2</sup> /点)	数据量	D <sub>Δ<sub>Ri</sub>max</sub> / %	D <sub>T<sub>i</sub>ave</sub> / K	D <sub>T<sub>i</sub>max</sub> / K
1.44	第 3 组		0	
2.88	第 6 组	0.5	1.4	3.4
4.32	第 9 组	3.6	3.7	10.9

表 3 燃烧室 C 的数据拆分结果

取样密度 / (cm <sup>2</sup> /点)	数据量	D <sub>Δ<sub>i</sub>ave</sub> / %	D <sub>Δ<sub>i</sub>max</sub> / %	D <sub>Δ<sub>Ri</sub>ave</sub> / %
1.17	第 3 组	0		0
2.34	第 6 组	2.0	7.0	0.5
4.68	第 12 组	7.0	21.7	2.0
5.85	第 15 组	8.8	19.5	4.3
8.19	第 21 组	9.9	26.6	9.7

取样密度 / (cm <sup>2</sup> /点)	数据量	D <sub>Δ<sub>Ri</sub>max</sub> / %	D <sub>Δ<sub>Ti</sub>ave</sub> / %	D <sub>Δ<sub>Ti</sub>max</sub> / %
1.17	第 3 组		0	
2.34	第 6 组	0.8	0.1	0.1
4.68	第 12 组	4.2	2.2	4.3
5.85	第 15 组	36.7	7.4	12.2
8.19	第 21 组	33.9	8.4	17.0

## 2.2 取样密度对测量结果的影响分析

### 2.2.1 取样密度对偏离度 D<sub>Δ</sub>的影响

表 1~3 中有关偏离度 D<sub>Δ</sub> 的数据如图 1 所示。从图中可见,以 A、B、C 3 种燃烧室各自的原始数据为基准,当取样密度减小到 3~4 cm<sup>2</sup>/点时,平均偏离度 D<sub>Δ<sub>ave</sub></sub> 在 5%以内。而当取样密度减小到 5~6 cm<sup>2</sup>/点时,平均偏离度 D<sub>Δ<sub>ave</sub></sub> 接近 10%。这与文献[1]中的结论基本一致。10%的偏离度意味着假如 1 个燃烧室真实的 Δ 是 0.25,而实测得到的 Δ 值只有 0.225,这在实际工程研制中容易得出偏于乐观的结论。因此,10%的偏离度要求偏低,而 5%的偏离度要求则更合理,也就是说,取样密度应不小于 3~4 cm<sup>2</sup>/点,由此造成的偏离度 D<sub>Δ</sub><5%,这样的偏离度在工程上是可以接受的。

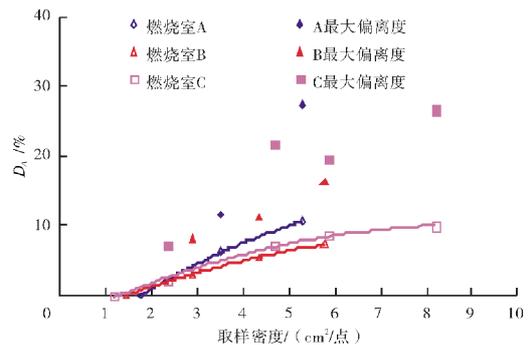


图 1 D<sub>Δ</sub> 随取样密度的变化

如果按“拆分”后数据与原始数据的最大偏离度来考虑,上述标准仍有些偏低。从图 1 中可见,当取样密度为 2~3 cm<sup>2</sup>/点时,最大偏离度 D<sub>Δ<sub>max</sub></sub> 已经超过 5%。意味着若想以较高的标准来要求,从而彻底消除因取样密度不够而造成的测量误差,那么取样密度最好不要小于 2 cm<sup>2</sup>/点。

### 2.2.2 取样密度对偏离度 D<sub>Δ<sub>R</sub></sub>的影响

表 1~3 中有关偏离度 D<sub>Δ<sub>R</sub></sub> 的数据如图 2 所示。从图中可见,以 A、B、C 3 种燃烧室各自的原始数据为基准,当取样密度大于 4 cm<sup>2</sup>/点时,平均偏离度 D<sub>Δ<sub>R</sub></sub> 在 5%以内。在此范围内,最大偏离度 D<sub>Δ<sub>R</sub>max</sub> 与平均偏离度 D<sub>Δ<sub>R</sub>ave</sub> 基本相等。

而当取样密度小于 5 cm<sup>2</sup>/点时,偏离度 D<sub>Δ<sub>R</sub></sub> 超过 10%。在此范围内,最大偏离度 D<sub>Δ<sub>R</sub>max</sub> 远远大于平均偏离度 D<sub>Δ<sub>R</sub>ave</sub>,意味着在这样的取样密度条件下,试验数

据的分散度已经很大了。

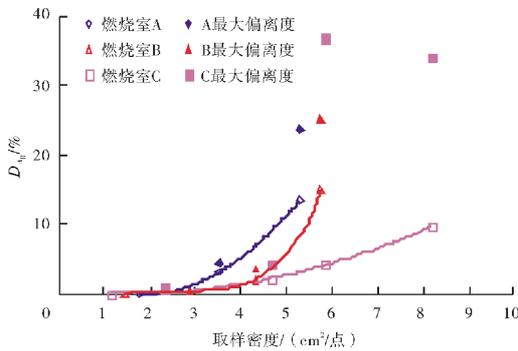


图2  $D_{\Delta R}$  随取样密度减小的变化

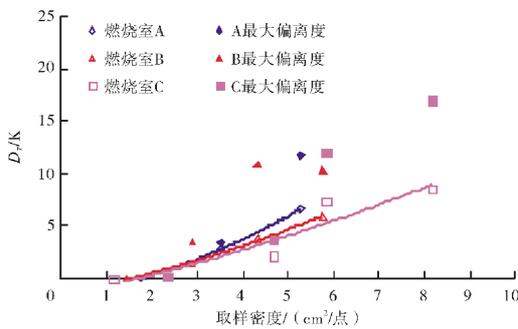


图3  $D_T$  随取样密度减小的变化

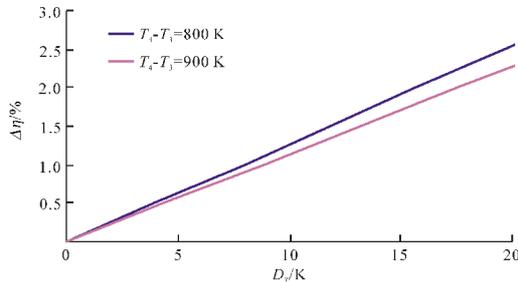


图4 出口平均温度误差与燃烧效率误差的对应关系

### 2.2.3 取样密度对平均温度偏离度 $D_T$ 的影响

在表1~3中有关平均温度偏离度  $D_T$  的数据如图3所示。从图中可见,以A、B、C3种燃烧室各自的原始数据为基准,当取样密度减小到6~8  $\text{cm}^2/\text{点}$ 时,平均偏离度  $D_{T\text{ave}}$  为8 K左右。平均温度偏离度与燃烧效率偏差的对应关系如图4所示。从图中可见,在计算燃烧效率时,如果燃烧室出口平均温度的偏离度达到8 K,就会导致燃烧效率产生1%的误差。因此,若要保证最终计算的燃烧效率的误差小于1%,取样密度不应小于6~8  $\text{cm}^2/\text{点}$ 。

同样,如果考虑“拆分”后数据与原始数据的最大偏离度,则当取样密度在4~5  $\text{cm}^2/\text{点}$ 时,最大偏离度  $D_{T\text{max}}$  已经超过10 K。因此,如果按照较高的标准要

求,取样密度最好大于4  $\text{cm}^2/\text{点}$ ,才能彻底消除因取样密度不够而造成的测量误差。

## 3 结论

(1) 取样密度大于3~4  $\text{cm}^2/\text{点}$ 时, $\Delta$ 的偏离度  $D_{\Delta} < 5\%$ ,若考虑极端情况,取样密度最好大于2  $\text{cm}^2/\text{点}$ 。

(2) 取样密度大于4  $\text{cm}^2/\text{点}$ 时, $\Delta_R$ 的偏离度  $D_{\Delta R} < 5\%$ 。

(3) 取样密度大于6~8  $\text{cm}^2/\text{点}$ 时,平均温度的偏离度  $D_T < 8\text{ K}$ ,由此造成的燃烧效率偏离度产生1%的误差。若考虑极端情况,取样密度最好大于4  $\text{cm}^2/\text{点}$ 。

与上述结论相比,文献[13]的标准偏于宽松,而文献[16]的标准又偏于严格。

## 参考文献:

- [1] Lefevbre A H. Gas turbine combustion [M]. New York:Hemisphere Publishing Corporation, 1983: 141-154.
- [2] 张树林,杨宝兴,王洪斌,等. 航空发动机涡轮前温度场数据分析方法[J]. 航空发动机,2007,33(4): 23-25.  
ZHANG Shulin, YANG Baoxing, WANG Hongbin, et al. Analysis method of aeroengine turbine inlet temperature field data [J]. Aeroengine, 2007, 33(4): 23-25. (in Chinese)
- [3] 张恩和. 大涵道比涡扇发动机的研制与设计特点[J]. 航空发动机,2007,33(3): 1-6.  
ZHANG Enhe. Development and design features of high bypass ratio turbofan engine [J]. Aeroengine, 2007, 33(3): 1-6. (in Chinese)
- [4] 杨志民,黄卫兵,赵煜,等. 国内外同类燃烧试验器试验数据差异分析[J]. 航空发动机,2007,33(2): 27-30.  
YANG Zhimin, HUANG Weibing, ZHAO Yu, et al. Analysis of test data difference for similar domestic and foreign combustor facility[J]. Aeroengine, 2007, 33(2): 27-30. (in Chinese)
- [5] 刘庆国. 燃烧室出口温度场部件试验与发动机试车结果比较[J]. 航空发动机,1999(3): 27-32.  
LIU Qingguo. Comparison of combustor exit temperature between rig test and engine test [J]. Aeroengine, 1999(3): 27-32. (in Chinese)
- [6] 刘立平,薛秀生,孙琪,等. 高精度水冷高温热电偶的研制与应用[J]. 航空发动机,2009,35(4): 48-50.  
LIU Liping, XUE Xiusheng, SUN Qi, et al. Application of high

- accuracy water cooled high temperature thermocouple [J]. Aero engine, 2009, 35(4):48-50. (in Chinese)
- [7] 杨志民,孙咏飞,赵煜,等. 航空发动机燃烧室出口温度场双向测量方法[J]. 航空发动机, 2010, 36(1):42-43.  
YANG Zhimin, SUN Yongfei, ZHAO YU, et al. Bi-directional measurement method of combustor outlet temperature field for aeroengine[J]. Aeroengine, 2010, 36(1):42-43. (in Chinese)
- [8] 张振奎,钟华贵,冯大强,等. 多点喷射扇形燃烧室出口温度场试验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12):2661-2666.  
ZHANG Zhenkui, ZHONG Huagui, FENG Daqiang, et al. Experimental study on outlet temperature field in multipoint injection combustor sector [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12):2661-2666. (in Chinese)
- [9] 刘凯,张宝诚,蔡九菊,等. 某重型燃气轮机燃烧室出口温度场试验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(1):23-27.  
LIU Kai, ZHANG Baocheng, CAI Jiuju, et al. Experimental study on outlet temperature field for combustor of heavy-duty gas turbine [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(1):23-27. (in Chinese)
- [10] 徐纲,俞斌,雷宇,等. 合成气燃气轮机燃烧室的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17):100-105.  
XU Gang, YU Bin, LEI Yu, et al. Experimental research on gas turbine combustor for burning syngas [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17):100-105. (in Chinese)
- [11] 彭建,白庆雪. 航空发动机燃烧室温度测量[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2000, 12(2):50-52.  
PENG Jian, BAI Qingxue. Measurement of aeroengine combustor temperature [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2000, 12(2):50-52. (in Chinese)
- [12] 彭云晖,林宇震,刘高恩. 三旋流器燃烧室出口温度分布的初步试验研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(4):554-558.  
PENG Yunhui, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. A preliminary experimental study of pattern factor for a triple swirler combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(4):554-558. (in Chinese)
- [13] Jones R E. Effect of exit temperature sampling density on measured combustor performance [R]. NASA-TN-D-6352, 1971.
- [14] 李继保. 环形燃烧室出口温度场周向测点布置研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 1992(3):11-15.  
LI Jibao. Investigation of sampling points distribution of an annular combustor [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1992(3):11-15. (in Chinese)
- [15] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室 [M]. 北京: 宇航出版社, 1988:374-416.  
JIN Rushan. Aero gas turbine combustor [M]. Beijing: China Astronautic Press, 1988:374-416. (in Chinese)

## 俄罗斯 MS-21 中短程干线客机通过型号适航性阶段认证

据 2014 年 4 月 23 日俄罗斯彼尔姆航空发动机股份公司官网报道, 配备了 PD-14 发动机的中短程干线旅客飞机 MS-21-300, 已于 2014 年 3 月 24 ~ 25 日顺利通过型号适航性的阶段性认证。型号委员会专家组成员包括独联体航空委员会航空局(AP MAK)、认证中心以及 MS-21 研制方伊尔库特集团的专家。此前, PD-14 发动机在 MS-21 客机适航性认证框架下的型号阶段性认证已于 2013 年通过。

MS-21 客机是在俄罗斯先进民用飞机发展的战略性计划下研制的, 旨在扩大 21 世纪俄罗斯民用航空技术在国内市场上所占份额。MS-21 作为“跨时代产品”, 应用了俄罗斯在飞机和发动机研制领域的所有新技术储备。MS-21 飞机机体结构广泛采用复合材料(约占 30%)、加长的机翼和新一代超临界气动造型, 使 MS-21 的气动性能大幅提高, 从而使耗油率明显降低。预计其综合性能将比现在正在使用的同类客机 Boeing737NG 和 A320 等提高 15% ~ 20%, 比正在研制的先进客机 A320Neo、Boeing737MAX 和 COMAC C919 提高 6% ~ 7%。

MS-21 客机项目研制费用约需 50 亿美元, 主要由俄罗斯政府投资, 计划在 2017 年投入使用。

(中航工业动力所 刘 静)

