

混合排气涡扇发动机外内涵混合面积变化对整机性能的影响

袁继来*, 陈仲光, 薛海波, 孙博

中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015

摘要: 本文通过数值计算方法, 研究了外内涵混合面积变化对混合排气涡扇发动机整机性能参数影响, 总结了性能参数变化特点, 对变化原因进行了分析。指出外内涵混合面积如按照特定规律在一定范围内同时变化, 发动机整机匹配不发生变化。本文研究将有助于提高设计人员对发动机整机匹配的认识, 对发动机性能分析及优化调试具有指导作用。

关键词: 涡扇发动机; 混合排气; 外内涵混合面积; 整机性能

中图分类号: V 235.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 04-0032-05

为了满足亚声速耗油率和超声速飞行推力性能要求, 现代军用战斗机的动力装置均选用混合排气涡扇发动机。在混合排气加力式涡扇发动机中, 通过发动机的空气分成两路: 第一路通过内涵道的压气机和涡轮向后流动, 第二路空气通过燃气发生器后的动力涡轮带动的风扇, 经外涵道向后流动。两股气流经过混合器混合后进入加力燃烧室^[2]。外内涵混合面积如果偏离设计值, 会使高、低压部件工作点发生变化, 导致整机性能参数发生变化。

发动机总体设计一般按照整机匹配的需要确定混合器进口的外涵面积和内涵面积, 而加力燃烧室的部件设计则更多地考虑部件本身的需要。外涵面积和内涵面积对加力燃烧室的设计影响很大, 一方面外内涵面积影响加力燃烧室外、内涵进口的压力比值, 从而影响加力燃烧室的冷却和稳定工作; 另一方面会影响混合器总压恢复系数和加力燃烧室的供油设计, 从而影响加力性能。因此, 混合器进口的外内涵面积设计既要考虑主机匹配的需要, 又要考虑加力燃烧室性能和稳定工作设计的需要, 最终方案为两者折中设计结果。在外内涵面积等于设计值条件下, 主机和加力都工作在设计范围内, 推力、耗油率等指标满足要求, 加力燃烧室工作稳定。而如果外内涵出口面积偏离设计值, 在静压平衡条件下, 整机匹配发生变化, 各部件工作点偏离设计值, 发动机性能也会相应发生变化。加力燃烧室外、内涵进口的压力比值偏高, 将导致外涵

道气流流速偏大, 从而不利于内外涵气流掺混, 影响加力燃烧室的稳定工作, 引起压力脉动增大的问题; 压力比值偏低, 将导致加力燃烧室的冷却效果变差, 引起稳定器和隔热屏烧蚀等问题。因此, 研究外内涵出口面积偏离设计值对整机匹配影响, 对分析发动机整机性能表现、优化发动机整机匹配具有重要意义。

1 外涵面积对整机性能的影响分析

以某型发动机为例进行混合器进口外涵面积变化对整机性能的影响分析。保证混合器进口内涵面积为设计面积, 研究外涵面积偏离设计值对发动机性能影响。外涵气动面积偏离值如表1所示。

表1 混合器进口外涵面积偏离值
Table 1 The deviation of bypass area at the entrance of mixer

参数	A_{16min}	A_{16d}	A_{16max}
数值	-40%	—	160%

在保证设计点各部件主要参数基本不变的情况下, 发动机按照低压转速($n_{lr}=1.0$)进行控制, 仅改变混合器进口外涵面积进行计算, 分析外涵面积变化对热力学循环参数和整机性能参数(推力、耗油率、排气温度、涵道比、外内涵压比 P_{10}/P_0)的影响。图1~图6为外涵面积偏离设计值对风扇和压气机工作点影响。总结出如下特点:

收稿日期: 2016-03-16; 录用日期: 2016-03-27

*通讯作者. Tel.: 024-24281512 E-mail: yuanjilai_hit@163.com

引用格式: YUAN Jilai, CHEN Zhongguang, XUE Haibo, et al. The influence of mixing area changing of bypass/core flow on turbofan engine performance [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(04): 32-36. 袁继来, 陈仲光, 薛海波, 等. 混合排气涡扇发动机外内涵混合面积变化对整机性能的影响 [J]. 航空科学技术, 2016, 27(04): 32-36.

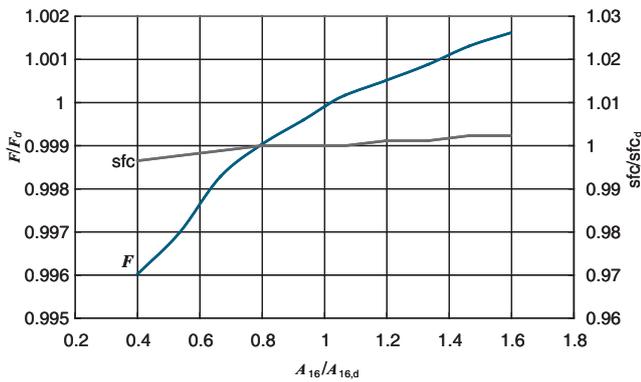


图1 推力、耗油率随外涵面积偏离值变化

Fig.1 The relationship between thrust, oil consumption rate and the bypass area deviation

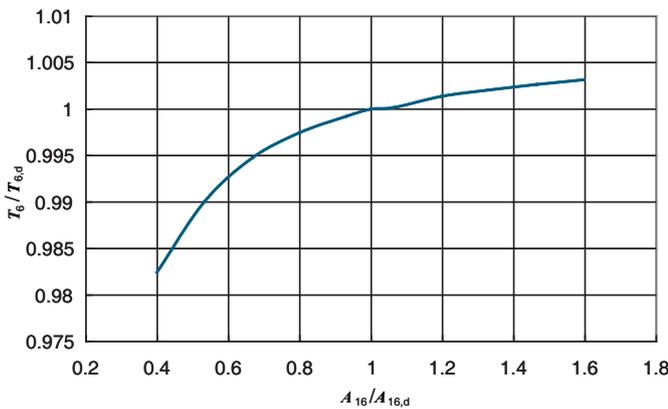


图2 排气温度随外涵面积偏离值变化

Fig.2 The relationship between exhaust temperature and the bypass area deviation

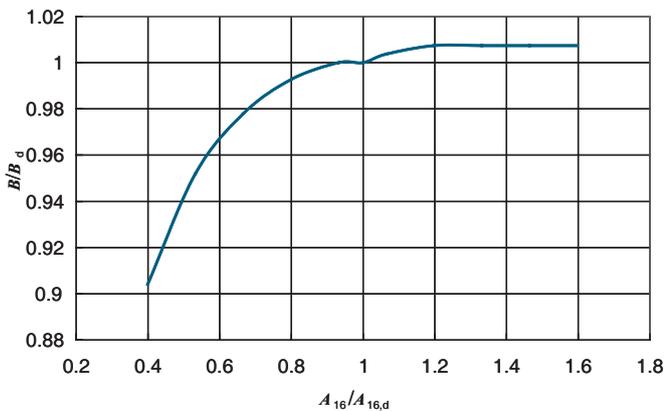


图3 涵道比随外涵面积偏离值变化

Fig.3 The relationship between bypass ratio and the bypass area deviation

(1) 随着外涵面积减小,推力、耗油率减小,涵道比减小,排气温度降低,外内涵压比 P_{16}/P_6 增大。

(2) 随着外涵面积减小,风扇工作点沿 $n_{1R}=1.0$ 等转速线上移,压比升高而效率基本不变,压气机工作点沿共同工作线

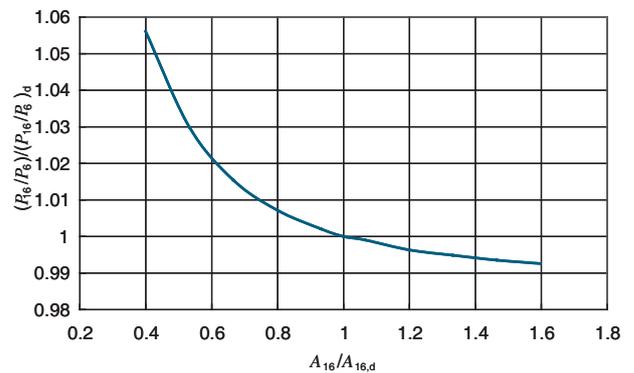


图4 外内涵压比随外涵面积偏离值变化

Fig.4 The relationship between bypass /core flow pressure and the bypass area deviation

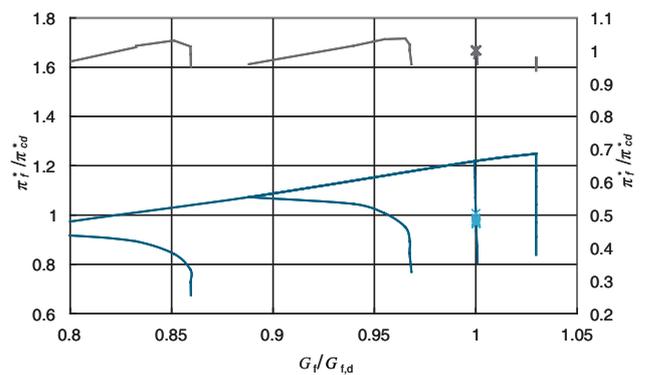


图5 风扇工作点变化

Fig.5 The operation point of a fan

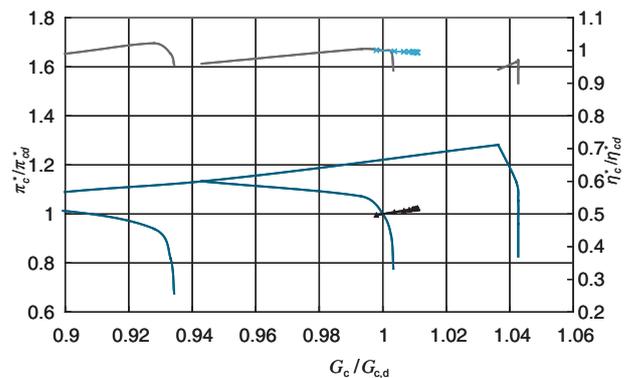


图6 压气机工作点变化

Fig.6 The operation point of a compressor

下移,压比降低而效率略有升高。

(3) 风扇工作点上移,风扇部件喘振裕度降低。外涵出口面积相对设计值减小40%,风扇喘振裕度减小5%左右。

(4) 整机性能参数变化随外涵面积变化存在非线性关系。外涵面积越小,关系曲线越陡峭,性能参数变化量越大;外涵面积越大,关系曲线趋于平缓,性能参数变化量越小。

(5) 外涵面积变化200%条件下,推力与耗油率变化量较小,分别为0.56%和0.6%,而排气温度、涵道比、外内涵压比 P_{16}/P_6 变化量较大,分别为2%,10%,6%。

发动机按低压转速($n_{lr}=1.0$)进行控制,风扇进口流量基本不变。外涵面积减小,涵道比变小,内涵流量增大。整机性能参数随外涵出口面积变化的主要原因分析如下:

(1) 排气温度

高压涡轮导向器喉道临界截面流量公式^[3]:

$$W_4 = K \cdot \frac{P_4}{\sqrt{T_4}} \cdot q(\lambda_4) \cdot A_4$$

忽略燃油质量影响,在高状态高压涡轮导向器处于临界状态, $q(\lambda_4)$ 为1.0, A_4 为定值,而 P_4 变化较小(风扇压比增大,压气机压比减小)。当内涵流量增大时,涡轮前温度 T_4 降低,同时低压涡轮膨胀比增大,排气温度 T_6 降低。

(2) 外内涵压比 P_{16}/P_6

外涵面积减小,风扇压比升高,风扇消耗功增大,低压涡轮做功增加,膨胀比增大,高压涡轮膨胀比变化很小,混合器内涵进口压力 P_6 降低,而外涵压力 P_{16} 随风扇压比升高而增大,外内涵压比 P_{16}/P_6 增大,但内外涵混合后气流压力降低。

(3) 推力和耗油率

在地面台架状态,飞行速度为零,考虑到喷管完全膨胀,推力公式简化为 $F=W_9 \cdot V_9$ 。外内涵气流混合后压力降低,尾喷管出口截面排气速度 V_9 降低,但流量 W_9 不变(忽略燃油流量影响),则推力降低。推力降低速率大于燃油消耗量减小速率,耗油率降低。

2 内涵面积对整机性能的影响分析

以某型发动机为例进行混合器进口内涵面积变化对整机性能的影响分析。保证混合器进口的外涵面积为设计面积,研究内涵面积偏离设计值对发动机性能影响。内涵面积偏离值见表2。

表2 混合器进口内涵面积偏离值

Table 2 The deviation of core area at the entrance of mixer

参数	A_{6min}	A_{6d}	A_{6max}
数值	-14%	—	29%

在保证设计点各部件主要参数基本不变的情况下,发动机按照低压转速进行控制,仅改变混合器进口内涵面积进行计算,分析内涵面积变化对热力点循环参数匹配和整机性能参数(推力、耗油率、排气温度、涵道比、外内涵压比 P_{16}/P_6)的影响。图7~图12为内涵面积偏离设计值对、风扇和压气机工作点影响。总结出如下特点:

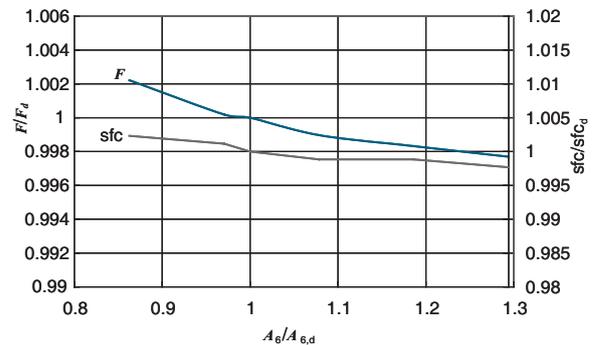


图7 推力、耗油率随内涵面积偏离值变化

Fig.7 The relationship between thrust, oil consumption rate and the core area deviation

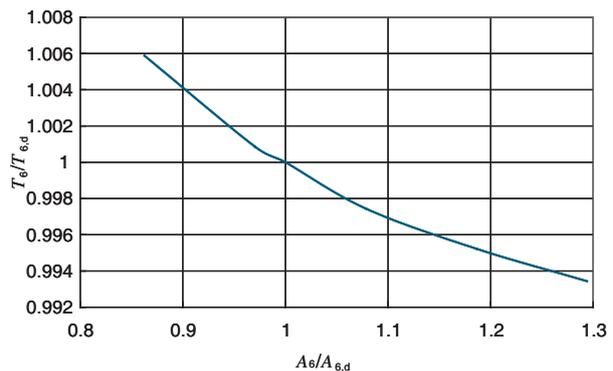


图8 排气温度随内涵面积偏离值变化

Fig.8 The relationship between exhaust temperature and the core area deviation

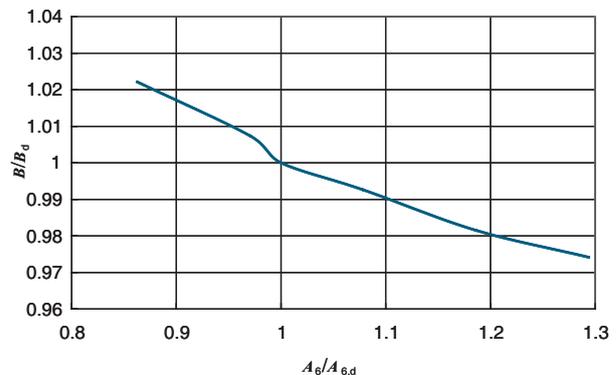


图9 涵道比随内涵面积偏离值变化

Fig.9 The relationship between bypass ratio and the core area deviation

(1) 内涵面积增大,推力、耗油率减小,涵道比减小,排气温度降低,外内涵压比 P_{16}/P_6 增大。

(2) 内涵面积增大,风扇工作点沿 $n_{lr}=1.0$ 等转速线上移,压比升高而效率基本不变;压气机工作点沿共同工作线下移,压比降低而效率升高。

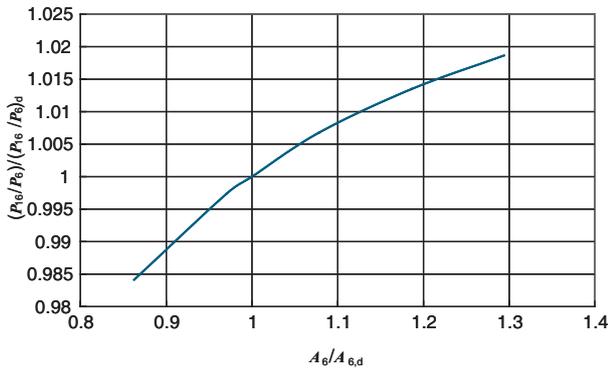


图10 外内涵压比随内涵面积偏离变化

Fig.10 The relationship between bypass /core flow pressure and the core area deviation

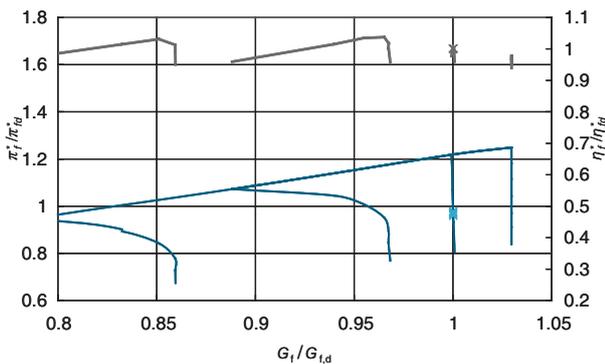


图11 风扇工作点变化

Fig.11 The operation point of a fan

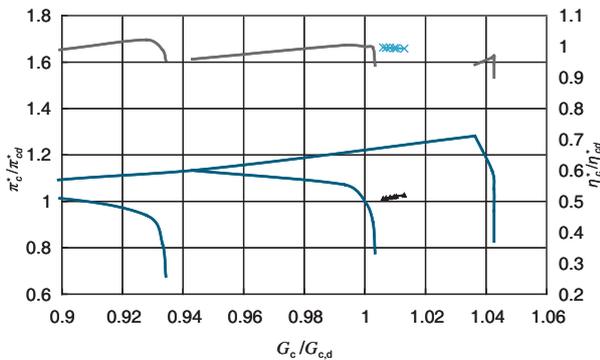


图12 压气机工作点变化

Fig.12 The operation point of a compressor

(3) 风扇工作点上移, 风扇部件喘振裕度降低。内涵面积相对设计值增大29%, 风扇喘振裕度减小1.3%左右。

(4) 整机性能参数变化随内涵面积变化存在非线性关系, 但与外涵面积相比非线性关系较弱, 可以近似位线性关系。

(5) 内涵面积变化条件下, 推力与耗油率变化量较小, 而排气温度、涵道比、外内涵压比 P_{16}/P_6 变化量较大。

整机性能参数随内涵面积变化规律原因: 内涵面积增大, 低压涡轮膨胀比增大, 低压转子转速有上升趋势, 发动机按低压转速($n_{LR}=1.0$)进行控制, 为保证低压转子转速不变, 主燃烧室减油, 涡轮前温度降低, 燃油消耗量减小, 排气温度降低, 高压转子转速降低, 压气机压比减小。

高压转子转速降低, 压气机抽吸能力降低, 导致风扇压比升高。

根据高压涡轮导向器喉道临界截面流量公式可知, 略燃油质量影响, 在高状态高压涡轮导向器处于临界状态, $q(\lambda_4)$ 为1.0, A_4 为定值, 而 P_4 变化较小(风扇压比增大, 压气机压比减小), 计算结果表明有小幅增加。涡轮前温度 T_4 降低, 高压涡轮导向器流量 W_4 增大, 发动机内涵流量增大, 而风扇进口流量基本不变, 发动机涵道比减小。

外内涵压比 P_{16}/P_6 、推力和耗油率变化原因同混合器外涵进口面积变化导致的外内涵压比 P_{16}/P_6 、推力和耗油率变化原因一致。

3 外内涵面积关系分析

对于混排涡扇发动机, 混合器进口外内涵面积单个变化都会带来整机匹配的变化, 偏离设计值会引起整机性能的恶化或风扇稳定裕度的降低。但如果为了满足加力燃烧室设计的需要, 同时调整混合器进口外内涵面积, 是可以做到保证主机匹配不变的。以某型发动机为例, 保证主机匹配不变, 进行混合器进口外内涵面积同时变化的计算分析。分析结果显示, 混合器进口外内涵面积按照特定规律同时变化时, 如图13所示, 主机匹配和总体性能参数都保持不变, 只有混合器进出口马赫数有所变化, 变化规律如图14所示。混合器外内涵进口马赫数的差异太大会增加混合损失, 也会导致整机性能的恶化(耗油率增加)。因此, 混合器的外内涵面积也需要根据混合损失情况控制在一定范围内。

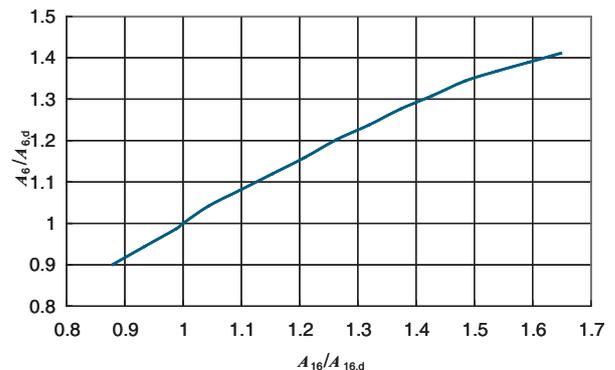


图13 外内涵面积变化规律(整机匹配不变)

Fig.13 The changing of bypass/core flow area

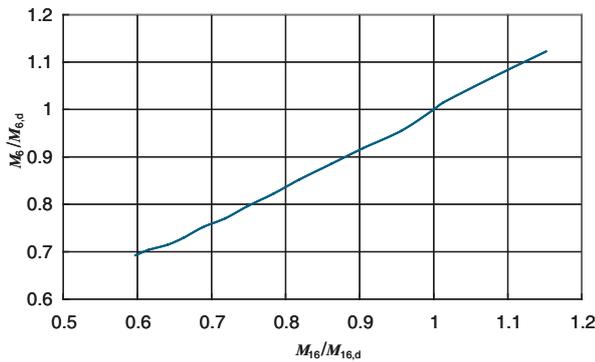


图14 混合器进口外内涵马赫数变化规律

Fig.14 The changing of the Mach number at entrance of bypass /core flow

4 结论

军用混合排气涡轮发动机的混合器外内涵面积设计对于保证整机匹配和加力燃烧室稳定工作都有重要影响,但外涵或内涵面积偏离设计值时,会使整机匹配偏离设计状态,导致发动机性能恶化或风扇稳定裕度降低,甚至影响加力燃烧室的稳定工作。但混合器外内涵面积可以为了满足加力燃烧室的设计需要进行适当调整,只要外内涵面积按照特定规律同时增加或减小,即可保证主机匹配状态不变。

通过分析不同外内涵面积对整机性能的影响规律,加深了总体设计人员对混合器设计的认识,也为整机性能调试提供了一种重要的调试手段。

AST

参考文献

- [1] 肇俊武.国外典型涡轮风扇发动机图册[R].沈阳:中航工业沈阳发动机设计研究所,2004.
ZHAO Junwu. The graphics of typical turbofan engine abroad[R]. Shenyang: AVIC Shenyang Engine Design Institute, 2004. (in Chinese)
- [2] 廉筱纯,吴虎.航空发动机原理[M].西安:西北工业大学出版社,2005.
LIAN Xiaochun, WU Hu. The theory of aero-engine[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 王新月.气体动力学基础[M].西安:西北工业大学出版社,2006.
WANG Xinyue. The fundamentals of gas dynamics [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006. (in Chinese)

作者简介

袁继来(1986—)男,硕士,工程师。主要研究方向:航空发动机总体性能设计。

Tel: 024-24281512

E-mail: yuanjilai_hit@163.com

陈仲光(1986—)男,学士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机总体性能设计。

薛海波(1986—)男,硕士,工程师。主要研究方向:航空发动机总体性能设计。

The Influence of Mixing Area Changing of Bypass/ Core Flow on Turbofan Engine Performance

YUAN Jilai*, CHEN Zhongguang, XUE Haibo, SUN Bo

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

Abstract: By using numerical simulation method, the influence of mixing area changing of bypass/core flow on mixed flow turbofan performance was researched. The features of parameter changing were summarized and the cause of changing was analyzed. Through all the work above, it was found that the performance of an engine didn't change if the mixing area of bypass flow and core flow varied simultaneously in a certain range according to a given rule. The research is helpful for an engine designer to improve the recognizing level of the match of an engine. It can also guide the analyzing and optimizing of the engine performance.

Key Words: turbofan engine; mixed exhaust; mixing area of bypass flow and core flow; engine performance

Received: 2016-03-16; Accepted: 2016-03-27

*Corresponding author. Tel.: 024-24281512 E-mail: yuanjilai_hit@163.com