

涡轮喷气发动机抗畸变流场模拟试验研究^{*}

陆传华, 陈宝延, 赵 英, 雷 鸣, 郭 昆

(航天机电集团公司 31 所, 北京 100074)

摘 要: 详细介绍了用于涡轮喷气(风扇)发动机抗畸变流场试验用畸变模拟器的组成、工作原理和标定方法, 并给出了畸变流场的计算方法。模型与实物两种方法标定结果有较大差别: 畸变模拟器出口总压恢复系数 σ 模型比实物高 1%~2%、流场畸变度低 4.6%~6.4%; 某型涡扇发动机在进口畸变流场畸变度 $W=9.6\%$ 下, 发动机启动可靠、工作稳定, 但进口流场畸变度将使压气机的喘振裕度减小, 而导致发动机产生不稳定工作。

关键词: 涡轮喷气发动机; 进气道; 流场畸变试验; 仿真器; 流场仿真

中图分类号: V235.113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2001)06-0464-05

Experimental research on the simulation of distortion flow field for turbojet engine distortion test

LU Chuang-hua, CHEN Baoyan, ZHAO Ying, LEI Ming, GUO Kun

(The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: The configuration, working principle and calibrating means of the distortion simulator using for distortion test of turbojet and turbofan engine were described. The calibrating results of the simulator and its model indicate that, comparing with the model, the distortion simulator has lower pressure recovery(1%~2%) and higher distortion density(4.6%~6.4%). Test results show that the tested turbofan engine starts and run steadily in a inlet distortion flow field as long as the distortion density less than a limit $W=9.6\%$.

Key words: Turbojet engine; Inlet; Flow distortion test; Simulator; Flow field simulation

1 引 言

20 世纪 70 年代至 80 年代初, 对发动机抗畸变流场研究仅停留在抗稳态压力不均匀度上, 但随着对飞行器机动性能要求的提高, 即使发动机可在承受稳态压力不均匀度的范围内飞行, 发动机仍可能出现喘振失速而熄火。因此, 国外于 20 世纪 80 年代末 90 年代初对进气道出口流场畸变问题开始进行稳态压力不均匀度和总压脉动畸变的研究^[1]。对总压脉动畸变度, 用脉动强度或紊流度来衡量。国外通常采用在发动机进口截面前安装一堵板造成低压区和采用气流喷流法模拟流场不均匀度的方法。国内采用的模拟畸变流场方法有: 紊流发生器^[2]、模拟板^[3]、插杆式

模拟器^[4]和网格^[5]等, 其中网格法存在一定缺陷, 很少被采用。由于管道内流动的复杂性, 目前还没有较好的理论计算方法来确定气流通过畸变流场模拟器所形成的畸变流场的畸变度。因此, 通过试验确定流场畸变度的方法最为有效。

发动机抗畸变流场模拟试验研究一般分两部分: 先研制畸变流场模拟器, 即根据发动机要求或进气道试验出口流场测量的畸变流场畸变度, 制订畸变流场模拟器结构方案, 并进行模拟器出口畸变流场标定和编制畸变流场数据处理程序; 然后, 根据标定结果进行发动机抗畸变流场的试验, 确定发动机抗畸变流场能力和对发动机性能的影响。本文采用研制的模拟板结构模拟器进行了抗畸变流场的试验研究。

* 收稿日期: 2001-04-18; 修订日期: 2001-06-08。

作者简介: 陆传华(1942—), 男, 研究员, 研究领域为高、亚声速进气道和涡喷、涡扇发动机试验。

2 畸变流场模拟器研制

畸变流场模拟器由可调畸变模拟板、紊流发生器、网状格栅组成。气流流经模拟器后,在畸变模拟器出口截面(即测量截面)将产生一定的畸变流场。为减少出口截面处的二次流,使出口截面处畸变流场更加切合实际,并且尽量减少管道沿程的掺混整流对模拟大畸变流场的影响,在畸变模拟板后安装一网状格栅。紊流发生器位于畸变模拟板与网状格栅之间。畸变流场模拟器见图1。畸变流场畸变度 W 由两部分组成:稳态压力畸变度 $\Delta\sigma$ 和流场的脉动强度 ε (动态畸变度或紊流度),即 $W = \Delta\sigma + \varepsilon$ 。

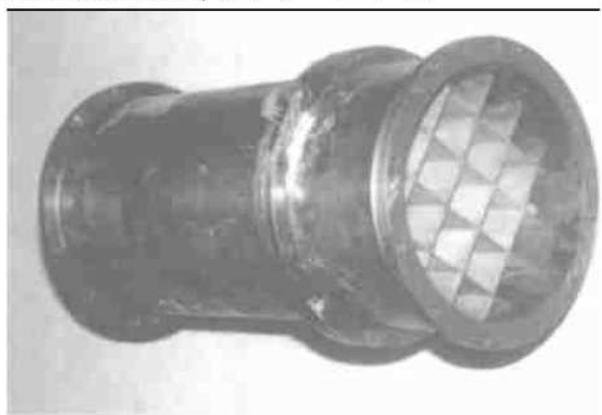


Fig. 1 Distortion simulator

2.1 可调畸变模拟板

可调畸变模拟板主要模拟出口流场的稳态畸变度 $\Delta\sigma$,不模拟流场的稳态畸变图谱。模拟板结构具有连续可调性,气流流经可调畸变模拟板调整的不同角度后,因出口流场不同的低压区而形成不同的稳态流场畸变度。

可调畸变模拟板(见图2)由动板和静板组成。动板和静板均为圆心角 30° 的扇形,扇形的圆心与模拟器轴线重合。静板固定在模拟器上,动板可以模拟器轴线为轴沿周向转动。所谓可调畸变模拟板,是指动板以相对于模拟器轴线为轴沿周向转动形成与静板的交错位置,改变了动、静两板构成的扇形区域的大小,即改变了管道流动截面的堵塞比,从而达到调节流场畸变度的目的。本文用动板和静板组成的扇形区圆心角的角度 $\Delta\theta$ 来定义模拟器的状态。 $\Delta\theta$ 的含义为:动板和静板沿流向组成重叠扇形区域的总的圆心角角度,规定动、静两板完全叠合在一起时为 $\Delta\theta = 30^\circ$ 。按现有研制的畸变流场模拟器,可调畸变模拟板可调节 $\Delta\theta$ 分别为 $30^\circ, 32^\circ, 34^\circ$ 三种状态。

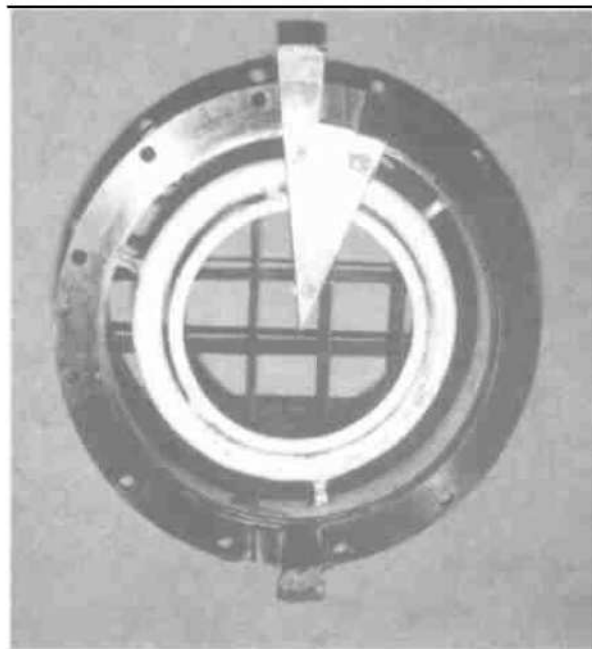


Fig. 2 Distortion simulation plate and turbulence generator

2.2 紊流发生器

紊流发生器由两个不同直径的圆环组成,并由呈 120° 分布的三根细杆支承固定,用来模拟流场的脉动强度 ε 。采用截止频率为 1 kHz 的脉动压力传感器测量流场脉动强度,传感器安装在测量截面的 $0.85R$ 处。

2.3 网状格栅

网状格栅是由厚度为 0.5 mm 的 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 钢板制成,网状格栅宽度 125 mm ,格栅大小为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。网状格栅位于畸变流场模拟器的可调畸变模拟板和紊流发生器后,距畸变模拟板 15 mm 。网状格栅的作用是在模拟大畸变流场时消除气流通过畸变模拟板和紊流发生器后产生的二次流,使获得的畸变流场仅为稳态压力畸变度和紊流度。

3 畸变流场模拟器出口流场标定

3.1 标定方法

首先,采用 $1:2.8$ 的模型,按畸变流场要求的指标在试验室进行标定,以确定所研制的畸变流场模拟器畸变度能否满足工程要求。标定时,在畸变模拟器出口用一转靶测量出口的总、静压,通过数据处理确定稳态压力畸变度。采用动态压力传感器测量流场的动态压力畸变度(紊流度),最后获得流场总畸变度。模型标定了可调畸变模拟板状态为 $\Delta\theta$ 为 $32^\circ, 34^\circ$ 两种流场。畸变流场模拟器在模型标定的基础上,根据实际应用情况对畸变流场模拟器进行了实物

标定。实物标定时,在畸变流场模拟器后安装一测量段,测量段测量截面上安装一米字型测量靶,每个测量靶上有 5 个总压探头和一个动态压力传感器,总压探头位置在等环面面心上。然后应用同样数据处理方法获得流场的畸变度。

3.2 流场计算方法

根据试验获得的工艺进气道进口、静压测量截面的总、静压数据和畸变流场模拟器出口测量截面测得的总、静压数据,按下面数据处理方法可得到畸变流场模拟器出口流场的总压恢复系数和流场畸变度。

(1) 工艺进气道进口气流平均总压 p_{t0}

$$p_{t0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_{t0i} + p_{amb} \quad (1)$$

式中: Δp_{t0i} 为工艺进气道进口测量圆环气流总压测量值, kPa; p_{amb} 为试验间大气压, kPa; n 为测量圆环上总压测点数, $n=5$ 。

(2) 工艺进气道静压测量截面气流平均静压 p_m

$$p_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_{mi} + p_{amb} \quad (2)$$

式中 Δp_{mi} 为静压测量值(表压), kPa; n 为测点数, $n=6$ 。

(3) 工艺进气道测量截面气流平均马赫数 Ma_m

$$Ma_m = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left| \frac{p_{t0}}{p_m} \right|^{\frac{k-1}{k}} - 1} \quad (3)$$

(4) 畸变流场模拟器出口测量截面气流平均静压

$$p_{se} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_{si} + p_{amb} \quad (4)$$

(5) 畸变流场模拟器出口测量截面平均气流总压 p_{te} 采用流量平均法进行计算。首先,用第三种边界条件的三次样条函数,根据出口测量截面测得的 8 个靶每个靶上 5 个总压测量值,按 15° 间隔对畸变流场模拟器出口测量截面气流总压沿周向进行插值,得到 5×24 个总压值。然后,根据插得的总压值按下面公式计算测量截面气流平均总压

$$p_{te} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{ij}^2 \cdot q(\lambda)}{\sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot q(\lambda)} \quad (5)$$

式中 $p_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_{tij} + p_{amb}$ 为畸变流场模拟器出口测量截面第 j 个环面的平均总压, j 为测量截面环面数, $j=5$; Δp_{tij} 为畸变流场模拟器出口测量截面第 j 个环

面第 i 个插值点的总压值(表压), $i=24$ 。

$$q(\lambda) = \left| \frac{k+1}{2} \right|^{\frac{1}{k-1}} \cdot \left| \frac{p_{se}}{p_{ij}} \right|^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \left| 1 - \left| \frac{p_{se}}{p_{ij}} \right|^{\frac{k-1}{k}} \right|} \quad (6)$$

为畸变流场模拟器出口测量截面第 j 个环面的流量函数, $j=5$ 。

(6) 畸变流场模拟器总压恢复系数 σ

$$\sigma = p_{te} / p_{tm} \quad (7)$$

(7) 畸变流场模拟器出口测量截面 60° 扇形区气流平均总压 p_{te60° , 由 5 个环面上插值得到的总压值,采用流量平均法计算。如按 15° 间隔沿周向插值,则测量截面 60° 扇形区气流平均总压 p_{te60° 有 24 个,每个 p_{te60° 将有 5 个总压值,按下面公式计算 60° 扇形区的平均总压 p_{te60° 。

$$p_{te60^\circ} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{te60^\circ,j}^2 \cdot q(\lambda_{60^\circ,j})}{\sum_{j=1}^n p_{te60^\circ,j} \cdot q(\lambda_{60^\circ,j})} \quad (8)$$

$$p_{te60^\circ,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_{tij} + p_{amb} \quad (9)$$

$$q(\lambda_{60^\circ,j}) = \left| \frac{k+1}{2} \right|^{\frac{1}{k-1}} \cdot \left| \frac{p_{se}}{p_{te60^\circ,j}} \right|^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \left| 1 - \left| \frac{p_{se}}{p_{te60^\circ,j}} \right|^{\frac{k-1}{k}} \right|} \quad (10)$$

(8) 畸变流场模拟器出口测量截面气流不均匀度

$$DC_{60} = \frac{(p_{te \cdot \min 60^\circ} - p_{te})}{Q_e}$$

式中 $p_{te \cdot \min 60^\circ}$ 为 60° 扇形区最低平均总压; Q_e 为模拟器出口测量截面气流平均动压头, $Q_e = p_{te} - p_{se}$ 。

(9) 畸变流场模拟器出口测量截面气流稳态压力

$$\text{畸变度 } \Delta \sigma = \left| 1 - \frac{p_{te \cdot \min 60^\circ}}{p_{te}} \right| \times 100\%$$

(10) 畸变流场模拟器出口测量截面气流动态压

$$\text{力畸变度(紊流度)} \varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \times 100\%$$

式中 n 为畸变流场模拟器出口测量截面动态压力测点数; ε_i 为畸变流场模拟器出口测量截面第 i 个动态

$$\text{压力畸变度。} \varepsilon_i = \sqrt{p_{\text{ort}}'^2} / p_{\text{ort}}$$

式中 p_{ort} 为时间 T 内,畸变流场模拟器出口测量截面

$$\text{动态压力气流时均压力, } p_{\text{ort}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{\text{orti}}$$

式中 n 为畸变流场模拟器出口测量截面动态压力测点数; p_{iDT} 为畸变流场模拟器出口测量截面第 i 个动态压力测点气流时均压力。

$$p_{iDT} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p_{iDT} dt + p_{amb} \quad (11)$$

式中 T 为时间间隔, 其相对于整个运动时间来说很短, 但相对于脉动运动来讲足够长, 本文中取 $T = 0.3$ s; Δp_{iDT} 为畸变流场模拟器出口测量截面第 i 个动态压力传感器动态压力测量值; $\sqrt{p'^2_{iDT}}$ 为畸变流场模拟器出口测量截面气流脉动压力均方根值, kPa。

$$\sqrt{p'^2_{iDT}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p'^2_{iDT} dt} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\Delta p_{iDT} + p_{amb} - p_{iDT})^2 dt} \quad (12)$$

式中: p'_{iDT} 为畸变流场模拟器出口测量截面第 i 个动态压力测点气流脉动压力。

(11) 畸变流场模拟器出口测量截面流场不均匀度 $W = \Delta\sigma + \varepsilon$ 。

3.3 畸变流场模拟器出口流场标定结果

图 3、4 给出了畸变流场模拟器 1:2.8 模型和实物标定结果曲线, 图 5 给出了在不同畸变模拟板角度下畸变模拟器标定结果曲线。由标定曲线可以得出以下结论:

(1) 模型和实物两种标定方法, 畸变流场模拟器出口流场的畸变度、总压恢复系数均有较大差别。在畸变模拟器进口相同气流速度下, 畸变模拟器出口总压恢复系数 σ 模型比实物高 1% ~ 2%、流场畸变度低 4.6% ~ 6.4%。这是由于模型与实物之间的尺寸效应及在实物标定时发动机压气机旋转影响到模拟

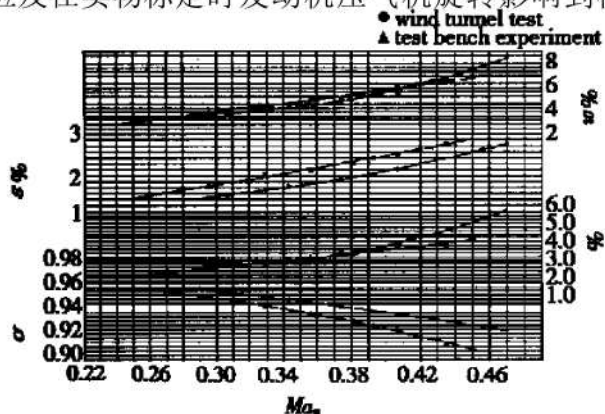


Fig. 3 $\Delta\theta = 32^\circ$, Comparative dynamic characteristics of distortion flow field

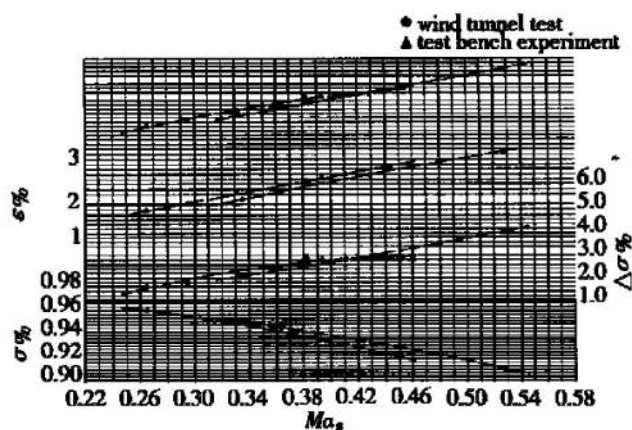


Fig. 4 $\Delta\theta = 34^\circ$, Comparative dynamic characteristics of distortion flow field

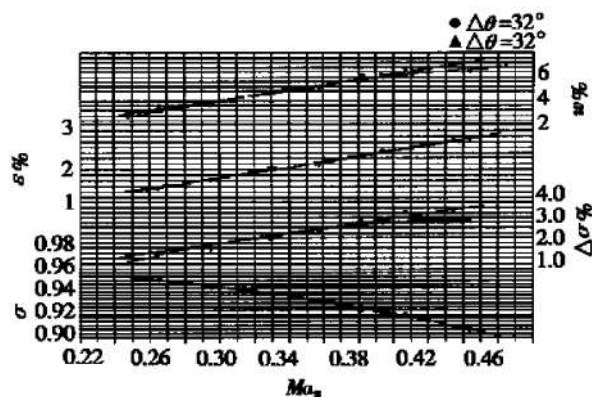


Fig. 5 Comparative dynamic characteristics of distortion flow field $\Delta\theta = 32^\circ$, $\Delta\theta = 34^\circ$

器出口流场而造成。因此, 模型标定结果仅可用于畸变模拟器出口流场原理性研究, 不能用于发动机抗畸变流场的工程研究。工程上应用必须进行实物流场标定, 且畸变模拟器出口畸变流场测量位置应位于发动机进口截面, 如此, 发动机抗畸变流场试验才具有真实性。

(2) 对于同一紊流发生器, 在改变畸变模拟板角度下, 仅影响流场稳态畸变度, 对总压恢复系数和紊流度影响不明显。

(3) 畸变流场模拟器出口流场标定试验, 采用米字测量耙测量出口流场的畸变度和总压恢复系数。因此, 测量耙的安装位置对测量流场的精确度有一定影响, 其影响程度还需作进一步的研究。

4 发动机抗畸变流场试验

根据畸变模拟器出口流场标定结果, 对涡轮喷

(下转第 472 页)

限制这类问题的发生,同时提供相应的控制手段,以免因流场达不到收敛准则而使设计过程陷入无休止的迭代当中。

5 结 论

运用优化设计方法对三楔角外压和二楔角内压的混压式进气道进行了一维优化设计,通过与理论分析的对比以及数值计算结果的验算,证明了优化设计模型及设计方法的正确性。将计算流体力学方法应用于超燃冲压发动机进气道的优化设计过程中,所得到的进气道性能优于一维优化设计的结果,也优于采用附面层修正的设计结果。本文所使用的 CFD 优化方法,其求解速度和精度主要取决于所使用 CFD 模型的复杂程度,而该模型与优化过程是相对独立的,使用者可根据设计要求选择合适的计算模型,可以在条件允许的情况下将三维、真实气体效应纳入到优化设计过程中,可以得到更接近实际情况的超声速进气道设计。进一步的工作包括: (1) 选择更多的参数作为优化目标,如进气道的静压畸变等; (2) 建立带侧压、带支板的

三维进气道优化模型并对之进行优化设计。

参考文献:

- [1] Van Wie D M, White M E, Waltrup P J. Application of computational design techniques in the development of scramjet engines[R]. AIAA Paper 87-1420.
- [2] Auneau I, Gamero P, Duvau P. Design and optimization methods for scramjet inlets[R]. AIAA Paper 95-6017.
- [3] Shukla V, et al. Automated redesign of the NASA P8 hypersonic inlet using numerical optimization[R]. AIAA Paper 96-2549.
- [4] 张堃元, 萧旭东, 徐辉. 非均匀超声速来流二维压缩面的优化设计[J]. 推进技术, 1999, 20(4).
- [5] Shuen J S, Yoon S. Numerical study of chemically reacting flows using a lower-upper symmetric successive overrelaxation scheme[J]. AIAA Journal, 1989, 29(12).
- [6] Oswatich K. Pressure recovery for missiles with reaction propulsion at high supersonic speeds[R]. NACA TM-1140, 1947.

(编辑: 王居信)

(上接第 467 页)

气、涡轮风扇发动机进行了抗畸变流场试验研究。试验研究内容包括发动机启动特性、加减速特性和节流特性。通过对某型涡扇发动机试验得到,在进口流场畸变度 $W \leq 6.4\%$ 下,发动机启动可靠、工作稳定、加减速性能可靠。但随着发动机进口流场畸变度增大,压气机的喘振裕度减少,使压气机的共同工作线接近喘振边界,发动机出现不稳定工作状态,如在流场畸变度 $W = 9.6\%$ 下,发动机在最大工况工作时,出现了不稳定工作状态;在 $W \geq 9.6\%$ 时,出现喘振。这是由于,发动机进口在畸变流场下工作,导致压气机效率降低,同时使压气机所需功增加。另外,由于气流通过畸变模拟器后,气流总压损失使发动机进口气流总压下降,导致涡轮的落压比下降(涡轮功下降),同时使压气机的压比下降,使发动机的共同工作线靠近喘振边界,喘振裕度减少而发生喘振。

5 结 论

(1) 采用畸变模拟板、紊流发生器和网状格栅组成的畸变流场模拟器是可行的,但其出口流场畸变度的标定方法,采用 1:2.8 模型标定畸变度仅供参考,

在工程应用上还需按实际情况重新进行标定。

(2) 发动机进口在流场畸变度为 $W \leq 6.4\%$ 下,发动机启动可靠、工作稳定、加减速性能可靠。在流场畸变度 $W = 9.6\%$ 下,发动机能正常启动、加速并能稳定工作。在最大工况工作时,出现不稳定工作状态,在 $W \geq 9.6\%$ 时,出现喘振。

参考文献:

- [1] Bion J R. Steady and unsteady distorted inlet flow simulation for engine ground tests[R]. AIAA 84-1490.
- [2] Kutschenreuter P H Jr, Collins T P, Vier W F. A new dynamic distortion generator[J]. J. Aircraft, 1974, 11(6).
- [3] 施网兴. 扩压器流场畸变实验研究[J]. 推进技术, 1992, 13(2).
- [4] 梁德旺, 张世英. 进气道口大畸变流场的模拟[J]. 推进技术, 1993, 14(1).
- [5] 彭成一, 马家驹, 尹军飞. 新型畸变流场模拟装置[J]. 推进技术, 1994, 15(6).
- [6] 施网兴, 张 戊, 刘西鹏, 等. 发动机进口畸变模拟网机理研究[J]. 推进技术, 1994, 15(4).

(编辑: 王居信)