

涡轮效率改变对发动机加速特性的影响^{*}

黄家骅¹, 冯国泰¹, 牛 军², 于达仁²

(1. 哈尔滨工业大学 发动机气动研究中心, 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 动力工程控制与仿真研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用零维闭环数值仿真平台, 对某型单轴涡轮喷气发动机进行启动加速过程的零维闭环仿真, 通过选择三种不同的调节方式, 研究了涡轮效率的改变对发动机的转速、推力和耗油率等发动机特性的影响, 其中某些结果与实验数据进行了比较。

关键词: 涡轮喷气发动机; 数值仿真; 涡轮效率; 闭环控制

中图分类号: V235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2003) 04-0368-05

Effect of turbine efficiency changing on turbo engine's accelerating characteristic under closed-loop control mode

HUANG Jia-hua¹, FENG Guo-tai¹, NIU Jun², YU Da-ren²

(1. Turbo Aerodynamics Research Center, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China;
2. Inst. of Engineer Control and Simulation, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Zero-dimensional closed-loop simulation is implemented to one single-shaft jet engine through simulation test-bed. The effect of turbine efficiency changing on turbo engine's characteristic, such as thrust, rotating speed and SFC, is discussed in three different control mode, and some results are compared with test data.

Key words: Turbojet engine; Numerical simulation; Turbine effectiveness; Closed loop control

1 引 言

在加速、减速过程中, 燃气涡轮发动机都处在不稳定状态工作, 发动机的全部参数(转子转速、燃油消耗率、涡轮前燃气温度、压气机增压比等)都随时间而变化, 正确的计算发动机的不稳定工作状态和满足良好的加速性的要求是发动机设计过程及其控制系统设计和调试中的重要课题。

由于对发动机的试验要耗费大量的时间和资金, 所以数值模拟技术以其低成本、无试验风险和所得的参数完整等优点而在航空发动机的研制尤其是初始阶段的研制中得到广泛应用^[1~3]。

本文应用零维闭环仿真, 重点研究涡轮效率改变对单轴涡轮喷气发动机特性的影响, 由于是闭环仿真, 为了达到发动机的期望值, 不仅可以调节发动机本体部

件(例如: 尾喷管面积), 而且可以通过调节系统部件的调整来达到发动机的某种期望值。所以, 本文同时研究了发动机本体部件与调节系统共同调节的可能性。

2 零维仿真平台

本文对某型单轴涡轮喷气发动机进行零维闭环仿真(图1)。该闭环数值仿真平台由哈工大的发动机气动中心和动力工程控制与仿真研究所联合研制, 功能类似于NPSS的NCP(国家循环计划)^[4~6]。与NCP相比, 我们的仿真平台的特点是: 适用范围比较窄, 是一种弹用涡轮喷气发动机的专用平台。由于弹用型发动机的体积很小, 所以就没有考虑容积惯性和热惯性。另外, 目前还没有能够考虑湿蒸汽的影响。

这个仿真平台的主要组成是: 发动机特性计算模

* 收稿日期: 2002-07-19; 修订日期: 2002-12-25。基金项目: 国家自然科学基金资助(59976007)。

作者简介: 黄家骅(1965—), 男, 博士生, 研究领域为航空发动机仿真。

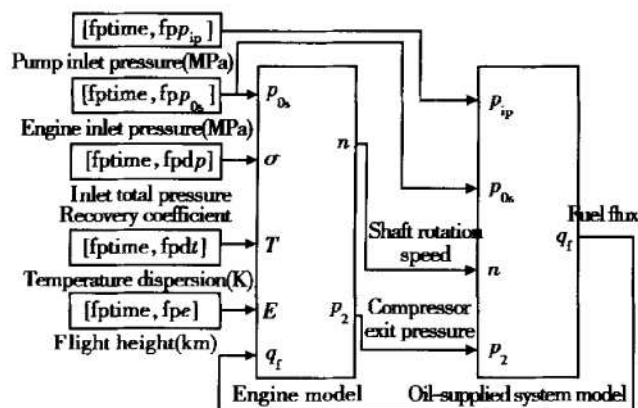


Fig. 1 Model chart of turbo engine and control system

型^[7,8]、供油调节系统模型^[9]和软件使用界面。涡喷发动机闭环数值仿真平台有以下几个基本功能:发动机闭环仿真;供油调节系统开环仿真;发动机本体开环仿真;加速特性仿真;高度特性、速度特性与节流特性仿真等。

当转速低于 20kr/min 时,采用实验数据,以神经网络算法进行计算;当转速达到 20kr/min 时,开始调用发动机特性计算模型和供油调节系统模型进行发动机调节系统的闭环仿真。

平台界面主要分三个部分:模型设置与仿真、图形处理和参数处理。其中:“模型设置与仿真”用来选择仿真模型种类和设置模型的外界输入文件,设置发动机模型切换点的转速和仿真时间。“图形处理”用来仿真结束后的图形处理:图形输出、图形保存、图形打印和输出数据显示。“参数处理”用来在指定目录下保存仿真输出参数。

供油调节系统为气动液压式(如图2)。在发动机启动加速段的工作过程为:在来流推动下,风车效应使涡喷发动机的转子旋转加速,带动油泵工作,通过 G_3 孔向燃烧室供油,当油泵转速增加到一定值后,稳压阀开始溢流,将油压稳定在给定值上,随着来流速度进一步上升,压气机出口压力 p_2 增大,通过阻尼孔 G_2 和缓冲器作用后的 p_2' 也随之升高,作用在膜片上的气压力大于弹簧力后,燃油调节阀逐渐开大,增加燃烧室供油,发动机的转速迅速增加,直至达到稳定工作状态。供油调节系统的数学模型由机理分析与参数识别相结合的方法建立。

发动机采用开环控制,根据 $G_t = f(p_2)$ (这个关系由供油系统结构特性保证),在加速过程中, f 所代表的曲线斜率比较大,供油量提供了较大剩余功,发动机加速。当 f 的曲线斜率小于某个给定值时,此时

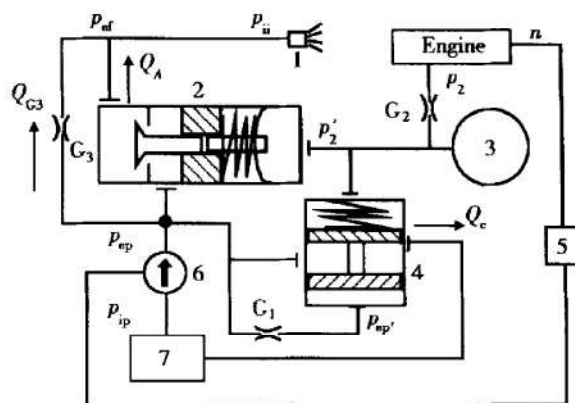


Fig. 2 Oil-supplied regulating system physical model

1-Oil nozzle; 2-Oil regulating valve; 3-Air storer

4-Pressure keeping valve; 5-Reducer; 6-Oil pump; 7-Oil box

表明发动机达到了稳定状态。达到稳态后,由于 f 的曲线趋于平稳,发动机剩余功很小,发动机供油量和转速都基本保持不变。

3 仿真方案的选定及与实验数据的比较

仿真研究的背景:某型发动机原型的推力较小,经过对涡轮导叶的改型设计,改型后的涡轮在与原型同样的进出口条件下,三维粘性数值模拟的结果显示:折合流量下降约 0.5%,效率提高约 1.5%,涡轮功提高约 1.0%。改型后的发动机面临着重新匹配的问题。现在要了解涡轮效率的变化对发动机总体性能的影响,为此首先在闭环数值仿真平台上进行。

在数值仿真计算中,从 20kr/min 至 29.5kr/min 的压气机特性数据是通过试验给定的,而从 5kr/min 到 20kr/min 是通过应用压气机变工况计算程序计算出来的,没有通过实验标定,有一定误差。在不同环境温度条件下压气机的特性与雷诺数有关,在计算中都经过了雷诺数修正。

涡轮特性的给定比较特殊。本来,涡轮效率是涡轮 η 扩压比 π 和折合转速 $\frac{n}{\sqrt{T_3^*}}$ 的函数,但由于这一表达式还未通过实验确定,在 20kr/min 至 29.5kr/min 范围内,涡轮效率由含折合转速 $\frac{n}{\sqrt{T_3^*}}$ 和压气机效率 η_c 的经验关系式表示,在 5kr/min 到 20kr/min 区间,应用涡轮特性计算程序计算给出。而针对改型后的效率变化,只能采取用原型的涡轮效率乘以一个系数的办法。当然,这么做会引起一些误差,但也能提供有一定参考价值的结果。

由飞行马赫数随时间变化的关系确定(图3),飞

行高度为 0, 标准状态温度为 15℃, 发动机喷管的几何面积不可调的条件下, 以发动机性能计算程序求得的平衡点作为动态仿真的起始点, 进行零维闭环仿真。需要补充说明的是:

(1) 在发动机稳态特性计算中有稳定工作边界条件的限制, 而在动态特性的计算中所得的各点不是平衡点, 因而不存在稳定工作边界条件的限制。

(2) 闭环条件下, 发动机的供油量是由数值仿真平台提供的。

以原始的涡轮效率(特性图上稳态工作点的值)为基准, 通过增加和降低涡轮的效率, 来研究涡轮效率的改变对发动机性能的影响。计算时分为 5 种涡轮效率, 方案 3 为涡轮效率不变的方案, 方案 1, 2 分别为涡轮效率减少 1%, 2% 的方案, 方案 4, 5 分别为涡轮效率增加 1%, 2% 的方案。

选取原始的的涡轮效率(方案 3)进行仿真计算并与实验结果进行比较(如图 4 所示)。作图时由于选取的数据点比实际的仿真计算点稀许多(仿真计算的时间间隔是 0.0005s), 图 4 显示的计算曲线同实际

仿真计算的曲线之间存在少许偏差。但是由图 4 还是可以看出: 在动态响应上实验值与计算值相比较存在一定的滞后, 而进入巡航状态时计算值比实验值高出约 1%。

下面将分三种方案进行仿真计算:

(1) 只改变涡轮效率, 研究涡轮效率改变对转速、推力和耗油率等发动机特性的影响。

(2) 在改变涡轮效率的同时调节尾喷管的喉部面积, 研究稳态转速相同的条件下, 涡轮效率改变对发动机特性的影响。

(3) 在改变涡轮效率的同时调节控制活门的初开压力(原始值为 2.32MPa), 研究稳态转速相同的条件下, 涡轮效率改变对发动机特性的影响。

4 结果分析

4.1 只改变涡轮效率时的仿真

在这一方案中, 调节系统的参数和尾喷管的面积没有变化。由图 5~7 可见, 随着涡轮效率的上升, 加速过程并没有明显加快, 但是发动机在平衡工况的转

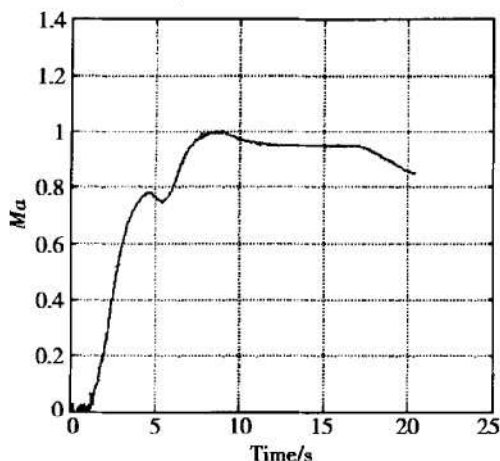


Fig. 3 Variation of flying Mach number with time

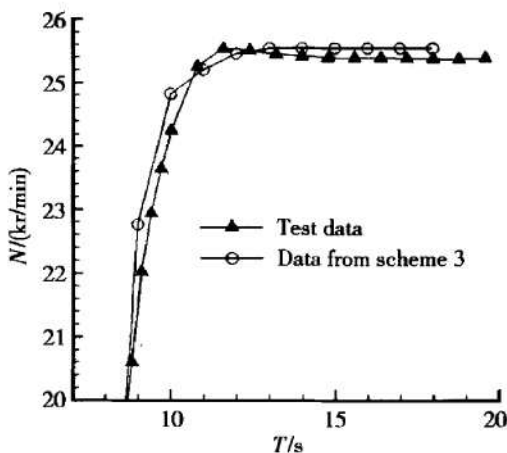
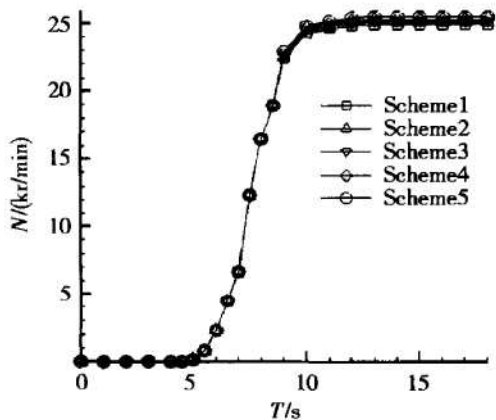
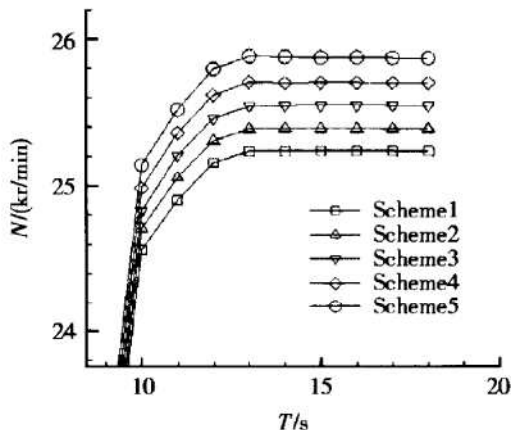


Fig. 4 Rotating speed comparison with test data in acceleration



(a) Full figure



(b) Zooming

Fig. 5 Variation of rotating speed with time

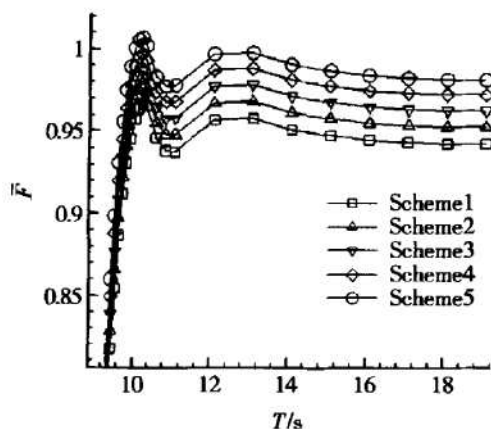


Fig. 6 Variation of relative thrust with time

速、推力、燃烧室燃油流量、压气机的压比和喘振裕度等都有所上升,而发动机耗油率和涡轮入口前温度等都有所下降。这一方案表明,在一定的调节状态下,由于涡轮效率的提高,涡轮输出的有效功加大,转速加大,压气机压比加大,流量也加大,这样使推力加大,油耗下降。这一方案的缺点是使转速加大,只有在转速有裕度的条件下才能采用这一方案。

4.2 在改变涡轮效率的同时调节尾喷管的喉部面积的仿真

采用表1中的方案3(原始方案)和方案5(涡轮效

率提高2%),对方案5中发动机喷管的几何面积进行调节,当面积变为原始面积的0.983倍时,可以保证两种方案的转速变化十分接近(图8)。根据燃气轮机原理,当涡轮效率提高而涡轮前滞止温度不变时,要保证涡轮功不变,就要降低涡轮的膨胀比。这就要求提高涡轮的出口背压,相应地提高尾喷管的膨胀比。由于发动机采用的是渐缩型喷管,所以就要相应地减小尾喷管的出口面积。

从图9~11可以看出,在同样的工况下,涡轮效率的提高对发动机的性能的提高十分有益。在保证转速不变的条件下,提高了发动机推力的同时降低了耗油率,而此时燃烧室内燃油耗量仅比原来增加了约0.1g/s,相当于增加了0.07%,涡轮入口前温度比原来增加的很少,约2K~3K,压气机的喘振裕度的下降也不明显。

4.3 在改变涡轮效率的同时调节控制活门的初开压力的仿真

采用表1中的方案3和方案5,对方案5中发动机供油的控制活门初开压力进行调节,当压力值变为原始压力值的0.866倍时,可以保证两种方案的转速变化十分接近(图12)。由图13和图14可见,此时推力 F 和涡轮入口前温度 T_3^* 的下降比较明显,这是由于燃烧室内的燃油流量 Q_f 的下降引起的(见图15)。

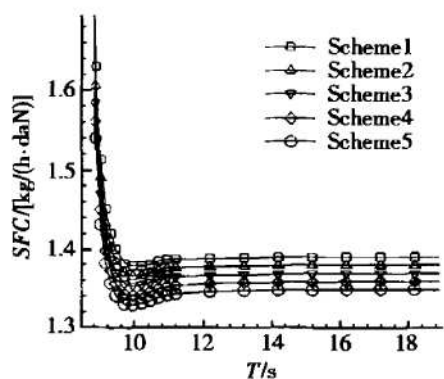


Fig. 7 Variation of SFC with time

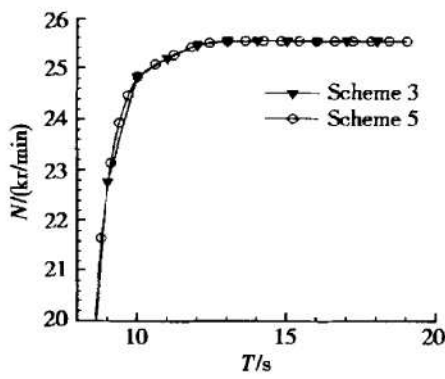


Fig. 8 Variation of rotating speed with time

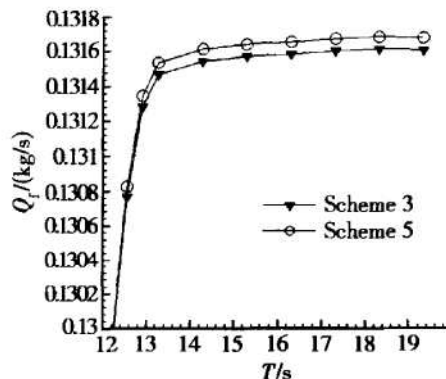


Fig. 9 Variation of fuel flow rate in combustion chamber with time

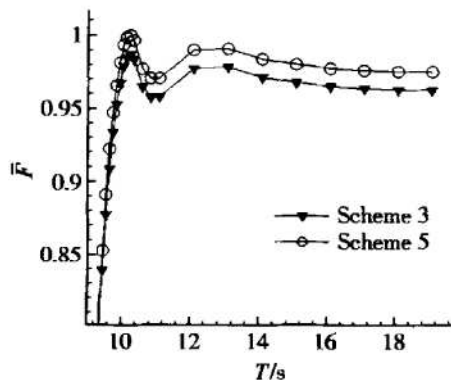


Fig. 10 Variation of relative thrust with time

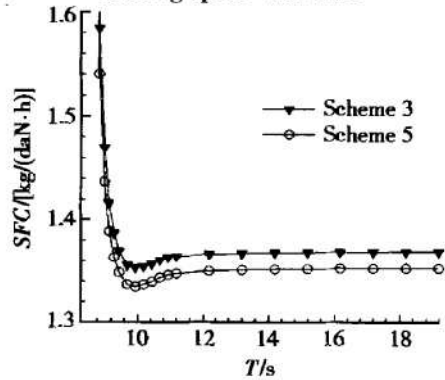


Fig. 11 Variation of SFC with time

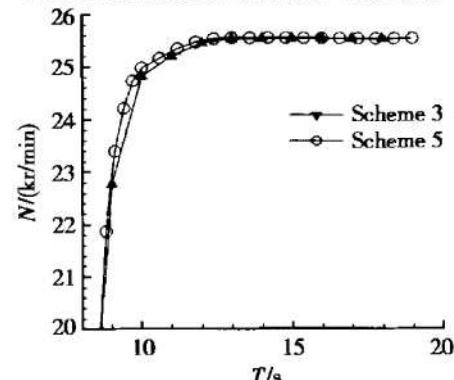


Fig. 12 Variation of shaft rotating speed with time

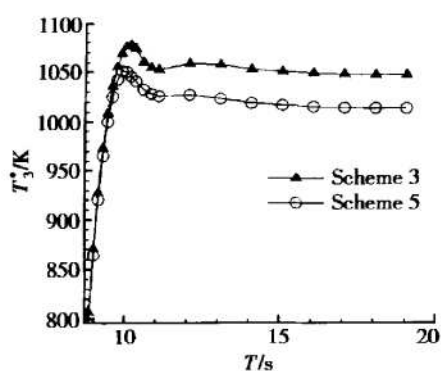


Fig. 13 Variation of turbine inlet stagnation temperature with time

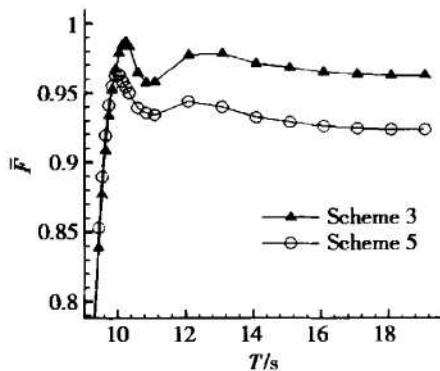


Fig. 14 Variation of relative thrust with time

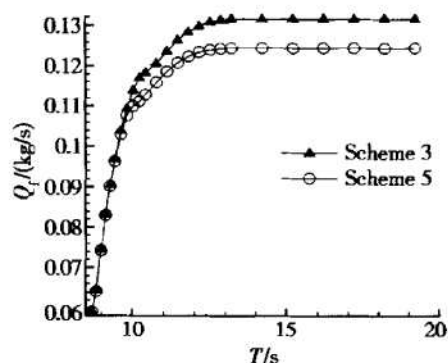


Fig. 15 Variation of fuel flow rate in combustion chamber with time

5 结 论

(1) 本文以涡轮发动机动态的数学模型为基础, 对某型涡喷发动机建立了启动加速计算的性能仿真程序, 并增加了调节数值模拟系统, 进行了发动机本体与调节数值模拟系统的闭环仿真, 得到了闭环加速过程中发动机的性能参数随时间的变化。将闭环仿真得到的转速随时间的变化曲线, 与实验结果进行了比较, 两者比较吻合。

(2) 在闭环条件下, 涡轮效率的提高可引起发动机稳态转速的上升, 并引起推力提高和耗油率下降, 但是加速过程并没有明显地加快。

(3) 在转速受限的条件下, 涡轮效率提高时可采取缩小尾喷管的几何面积和降低控制活门的初开压力两种方法来调整发动机性能。前者可保证转速变化不大的条件下改变发动机推力, 降低耗油率, 对发动机的性能的提高十分有利; 后者可改变供油量的大小, 是改变发动机工作点的一个重要方法。这两种方法构成发动机调节的重要手段。

从上面分析可知, 没有闭环仿真, 提高部件效率后, 优化发动机性能采用什么措施比较难以分析确定, 而利用闭环仿真则很容易做到这一点。

参考文献:

- [1] Fishbach L H. Computer simulation of engine systems[R]. AIAA 80-0051.
- [2] Schobeiri M T, Attia M, Lippke C. GETRAN: a generic,

modularly structured computer code for simulation of dynamic behavior of aero and power generation gas turbine engines[J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1994, 116: 483~ 494.

- [3] Schobeiri M T, Attia M, Lippke C. Nonlinear dynamic simulation of single and multispool core engine, part I: computational method[J]. *AIAA Journal of Propulsion and Power*, 1994, 10 (6): 855~ 862.
- [4] 陈大光, 张 津, 朱之丽. 推重比 15 一级发动机有关总体性能的关键技术和难点分析[J]. *航空动力学报*, 2001, 16(1): 8~ 12.
- [5] Evans A, Follen G, Nalman C, et al. Numerical propulsion system simulations-national cycle program [R]. AIAA 98-3113.
- [6] Ashleman R, Lavelle T, Parsons F. The national cycle program: a flexible systems modeling architecture[R]. AIAA 98-3114.
- [7] 冯国泰, 黄家骅, 顾中华, 等. 发动机热流场数值仿真体系建立的研究——发动机数值仿真实验台建立研究之一[A]. 中国工程热物理学会, 热机气动热力学学术会议论文集[C]. 1998, 杭州.
- [8] 施发树, 刘兴洲, 冯国泰. 应用统一数学模型的发动机数值仿真实验台建立与初步仿真计算——发动机数值仿真实验台建立研究之二[A]. 中国工程热物理学会, 热机气动热力学学术会议论文集[C]. 1998, 杭州.
- [9] 阎志刚. 弹用涡喷发动机故障仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 1999.

(编辑: 王居信)