

# 发动机动态特性数模与计算

## 结题答辩

李超白

北京航空航天大学 能源与动力工程学院

2013年6月17日

- 航空发动机数值模拟仿真的意义
  - 研究已有发动机
    - 减轻实际试车的时间、成本和危险
    - 提供实际试车中难以测量的参数，如  $T_4^*$
  - 研究新型号发动机
    - 在研制初期评估发动机的性能
    - 为进一步的研究和优化提供指导
    - 降低研制经费和风险
    - 缩短研制周期

- 航空发动机数值模拟仿真的发展
  - 20世纪40年代：
    - 手工进行平衡计算
    - 需使用简化条件
  - 20世纪60年代：
    - 参数循环法进行平衡计算(SSPOOL, DSPOOL)
    - 涡喷和涡扇发动机稳态设计/非设计共同工作点
  - 20世纪70-80年代：
    - 牛顿-拉普逊(Newton-Raphson)迭代法进行稳态平衡计算(SMOTE)
    - 可研究多种结构形式的发动机(GENENG, GENENG II)
    - 可研究发动机稳态和动态特性(DYNGEN)

# 本课题的工作

- 对SEnPer的修改和补充
  - 目标
    - 使SEnPer具有计算发动机动态特性的能力
  - 实施
    - 修改牛顿-拉普逊方法所用不平衡残差向量
    - 在动态过程计算中替换稳态调节规律
    - 补充动态调节计划
- 算例计算
  - 调节涡轮前总温 $T_4^*$ 模拟单一减速过程
  - 调节涡轮前总温 $T_4^*$ 模拟地面试车
  - 比较考虑容腔效应的影响

# SEnPer程序原理

- SEnPer程序
  - 北京航空航天大学能源与动力工程学院开发
  - 原理：涡轮类发动机部件法数学模型的平衡技术
  - 功能：
    - 研究三轴三涵道以下，多种常规形式的涡轮类发动机
    - 进行稳态设计点或非设计点的总体气动计算
    - 连续求解50个逻辑上独立的待求工作点
  - 与GENENG II的异同：
    - 都采用部件法数学模型
    - 都使用牛顿-拉普逊迭代法
    - 残差向量的选取各自不同

# SEnPer程序原理

- 部件法数学模型
- 平衡技术
- 牛顿-拉普逊迭代法

# SEnPer程序原理：部件法数学模型

- 使用者以数组形式输入各部件特性图，例如：
  - 压气机特性图：压气机相似流量  $\dot{m}_{K,similar}$ 、相似增压比  $\pi_{K,similar}^*$  和绝热效率  $\eta_K$  关于换算转速  $n_{K,cor}$  的数表
  - 涡轮特性图：涡轮相似流量  $\dot{m}_{T,similar}$ ，相似落压比  $\pi_{T,similar}^*$  和绝热效率  $\eta_T$  关于换算转速  $n_{T,cor}$  的数表
  - .....
- SEnPer通过对实际工况的折合，查图求解各部件参数
  - 特性图所反映的部件尺寸和待仿真部件尺寸不同
  - 特性图所反映的部件工况和待求部件所处工况不同

# SEnPer程序原理：平衡技术

- 发动机处于稳态共同工作点的平衡条件
  - 转速平衡：压气机转速等于涡轮转速
  - 功率平衡：涡轮产生的功率等于压气机消耗的功率
  - 流量平衡：通过涡轮的流量等于通过压气机的流量
- 发动机沿流程进行计算，事先缺乏对  $\pi_K^*$ 、 $\pi_T^*$ 、 $T_4^*$  的了解，需要选取试取值
- 使用试取值的计算结果不一定满足平衡条件
- 平衡技术可用来寻找试取值，使得沿流程进行计算结果符合平衡条件



# SenPer程序原理：牛顿-拉普逊迭代法

- SEnPer中对与发动机相关的22个控制量的分类
  - **主调节变量**：使用者希望其值在迭代求解过程中保持不变的量
  - **试取变量**：程序在迭代过程中试取其值，使得平衡条件得以满足的量
  - **非自由变量**：其值依赖主调节变量和试取变量而变化
- 单轴几何不可调发动机： $n_H \quad \pi_K^* \quad f_{\text{Burner}} \quad T_4^* \quad \pi_T^* \quad A_8$ 
  - 主调节变量： $n_H \quad A_8$
  - 试取变量： $\pi_K^* \quad \pi_T^* \quad f_{\text{Burner}}$
  - 非自由变量： $T_4^*$

# SEnPer程序原理：牛顿-拉普逊迭代法

- 不平衡残差向量

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \left( \frac{\dot{m}_4 \sqrt{T_4^*}}{p_4^*} \right)_{\text{Simulated}} - \left( \frac{\dot{m}_4 \sqrt{T_4^*}}{p_4^*} \right)_{\text{Map}} \\ \left[ \frac{1}{1+\eta} \left( \frac{L_{\text{KT}}}{T_2^*} \right)_{\text{Simulated}} \right] - \left( \frac{L_{\text{KK}}}{T_2^*} \right)_{\text{Map}} \\ \left( \frac{\dot{m}_8 \sqrt{T_5^*}}{p_8^*} \right)_{\text{Map}} - \left( \frac{\dot{m}_8 \sqrt{T_5^*}}{p_8^*} \right)_{\text{Simulated}} \end{bmatrix}$$

- 目的：寻找合适的试取值

$$\mathbf{X} = \left( f_{\text{Burner}} \quad \pi_K^* \quad \pi_T^* \right)^T$$

使得  $\mathbf{Z} = 0$

# SEnPer程序原理：牛顿-拉普逊迭代法

- $\mathbf{Z} = F(\mathbf{X})$ ，则需求解方程组  $F(\mathbf{X}) = \mathbf{0}$

- 若第 $k$ 次以试取值  $\mathbf{X}^{(k)} = \begin{pmatrix} x_1^{(k)} & x_2^{(k)} & x_3^{(k)} \end{pmatrix}^T$

求得残差  $\mathbf{Z}^{(k)} = \begin{pmatrix} z_1^{(k)} & z_2^{(k)} & z_3^{(k)} \end{pmatrix}^T$

- 则

$$\mathbf{0} - \mathbf{Z}^{(k)} = \mathbf{Z}^{(k+1)} - \mathbf{Z}^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial x_1} & \frac{\partial z_1}{\partial x_2} & \frac{\partial z_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial z_2}{\partial x_1} & \frac{\partial z_2}{\partial x_2} & \frac{\partial z_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial z_3}{\partial x_1} & \frac{\partial z_3}{\partial x_2} & \frac{\partial z_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} (\mathbf{X}^{(k+1)} - \mathbf{X}^{(k)})$$

或写作

$$-\mathbf{Z}^{(k)} = A \Delta \mathbf{X}^{(k)}$$

# SEnPer程序原理：牛顿-拉普逊迭代法

- 矩阵  $A$  的求法： $A$  右乘试探增量

$$\Delta \mathbf{X}_{T1}^{(k)} = (\Delta h_1 \quad 0 \quad 0)^T$$

则得到

$$\begin{bmatrix} \Delta z_{1.T1}^{(k)} \\ \Delta z_{2.T1}^{(k)} \\ \Delta z_{3.T1}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial x_1} & \frac{\partial z_1}{\partial x_2} & \frac{\partial z_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial z_2}{\partial x_1} & \frac{\partial z_2}{\partial x_2} & \frac{\partial z_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial z_3}{\partial x_1} & \frac{\partial z_3}{\partial x_2} & \frac{\partial z_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial x_1} \Delta h_1 \\ \frac{\partial z_2}{\partial x_1} \Delta h_1 \\ \frac{\partial z_3}{\partial x_1} \Delta h_1 \end{bmatrix}$$

$$\left( \frac{\partial z_1}{\partial x_1} \quad \frac{\partial z_2}{\partial x_1} \quad \frac{\partial z_3}{\partial x_1} \right)^T = \left( \frac{\Delta z_{1.T1}^{(k)}}{\Delta h_1} \quad \frac{\Delta z_{2.T1}^{(k)}}{\Delta h_1} \quad \frac{\Delta z_{3.T1}^{(k)}}{\Delta h_1} \right)^T$$

- 同理可得到  $A$  的其他项

# SEnPer程序原理：牛顿-拉普逊迭代法

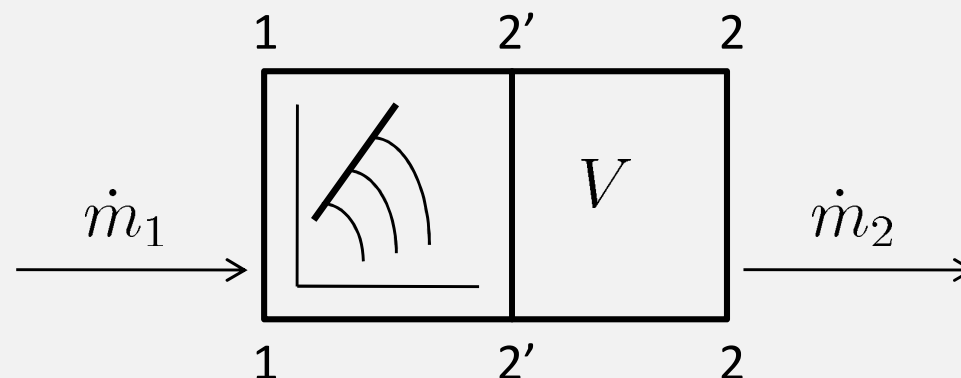
- 得到  $A$  之后，求  $A^{-1}$
- 新试取值  $\mathbf{X}^{(k+1)}$  在原有试取值  $\mathbf{X}^{(k)}$  的增量：
$$\Delta \mathbf{X}^{(k)} = A^{-1}(-\mathbf{Z}^{(k)})$$
- 最后得到下一次试取值
$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + \Delta \mathbf{X}^{(k)}$$
- 多次迭代后，对于选定的足够小的  $\varepsilon > 0$ ，若  $\mathbf{Z}^{(k+1)}$  的各分量有：
$$|z_i| < \varepsilon \quad (i = 1, 2, 3)$$

则认为已经求得了稳态共同工作点

# SEnPer基础上增加动态特性计算功能

- 动态特性计算和稳态特性计算的异同
  - 部件法数学模型两种情况均适用
    - 发动机气流参数轴向传播的非定常性可以忽略
  - 应当考虑容积效应
    - 有体积的部件，内部气流的密度增加
    - 出口和入口质量不守恒

$$\dot{m}_2 - \dot{m}_1 = -\frac{V}{kRT_2^*} \frac{dp_2^*}{dt}$$



# SEnPer基础上增加动态特性计算功能

- 对不平衡残差向量的修改

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \left[ \left( \frac{\dot{m}_4 \sqrt{T_4^*}}{p_4^*} \right)_{\text{Simulated}} + \frac{\Delta \dot{m}_4 \sqrt{T_4^*}}{p_4^*} \right] - \left( \frac{\dot{m}_4 \sqrt{T_4^*}}{p_4^*} \right)_{\text{Map}} \\ \left[ \frac{1}{1+\eta} \left( \frac{L_{\text{KT}}}{T_2^*} \right)_{\text{Simulated}} \right] - \left( \frac{L_{\text{KK}}}{T_2^*} \right)_{\text{Map}} - \left( \frac{2\pi}{60} \right)^2 \frac{1}{\dot{m}_2 T_2^*} J n_H \frac{dn_H}{dt} \\ \left( \frac{\dot{m}_8 \sqrt{T_5^*}}{p_8^*} \right)_{\text{Map}} - \left( \frac{\dot{m}_8 \sqrt{T_5^*}}{p_8^*} \right)_{\text{Simulated}} \end{bmatrix}$$

(折合的) 容积效应流量

(折合的) 转动惯性力功率项

其中  $\Delta \dot{m}_4 = -\frac{V_K}{kRT_3^*} \frac{dp_3^*}{dt} - \frac{V_{\text{Comb.}}}{k_g R_g T_4^*} \frac{dp_4^*}{dt}$

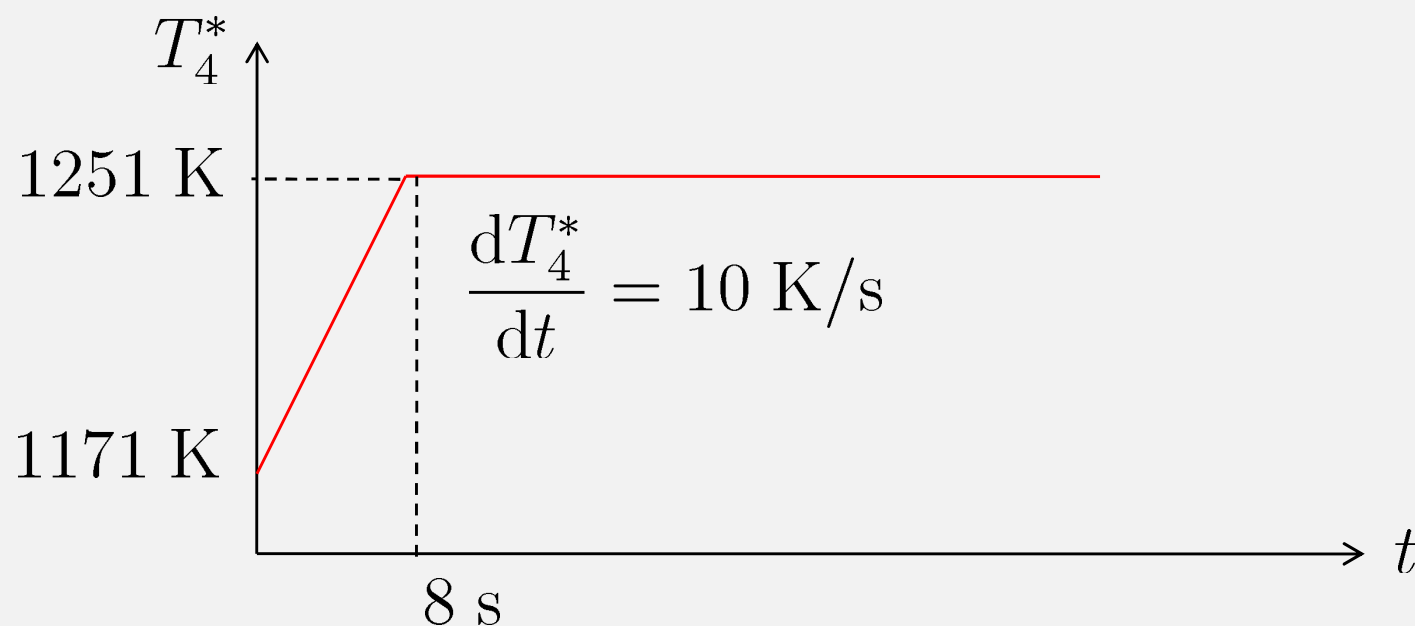
# SEnPer基础上增加动态特性计算功能

- 替换发动机稳态调节规律
  - 稳态和动态特性计算中需要不同的调节规律
    - 在稳态特性计算中， $n_H$  可以指定为主调节变量，在动态特性中则不可以；
    - 在动态特性计算中，需要一些调节变量根据调节计划随时间发生变化，反映外在控制。



# SEnPer基础上增加动态特性计算功能

- 补充发动机动态调节计划
  - 动态特性计算介于SEnPer所计算的相邻两个稳态共同工作点
  - 对于动态特性计算中由动态调节规律指定的主调节变量，认为其值从第一个稳态共同工作点上对应值以固定速率增加或减小到第二个稳态共同工作点上对应值
  - 程序输入中补充调节速率



# 算例

- 推力50 kgN级的微型几何不可调单转子涡喷发动机
- 100%转速为103678 RPM
- 喷管喉道面积:  $A_8 = 0.0011184 \text{ m}^2$
- 容积效应: 只考虑燃烧室,  $V_{\text{Comb.}} = 2.90 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
- 转动惯量:  $J = 3.48 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

# 算例（一）

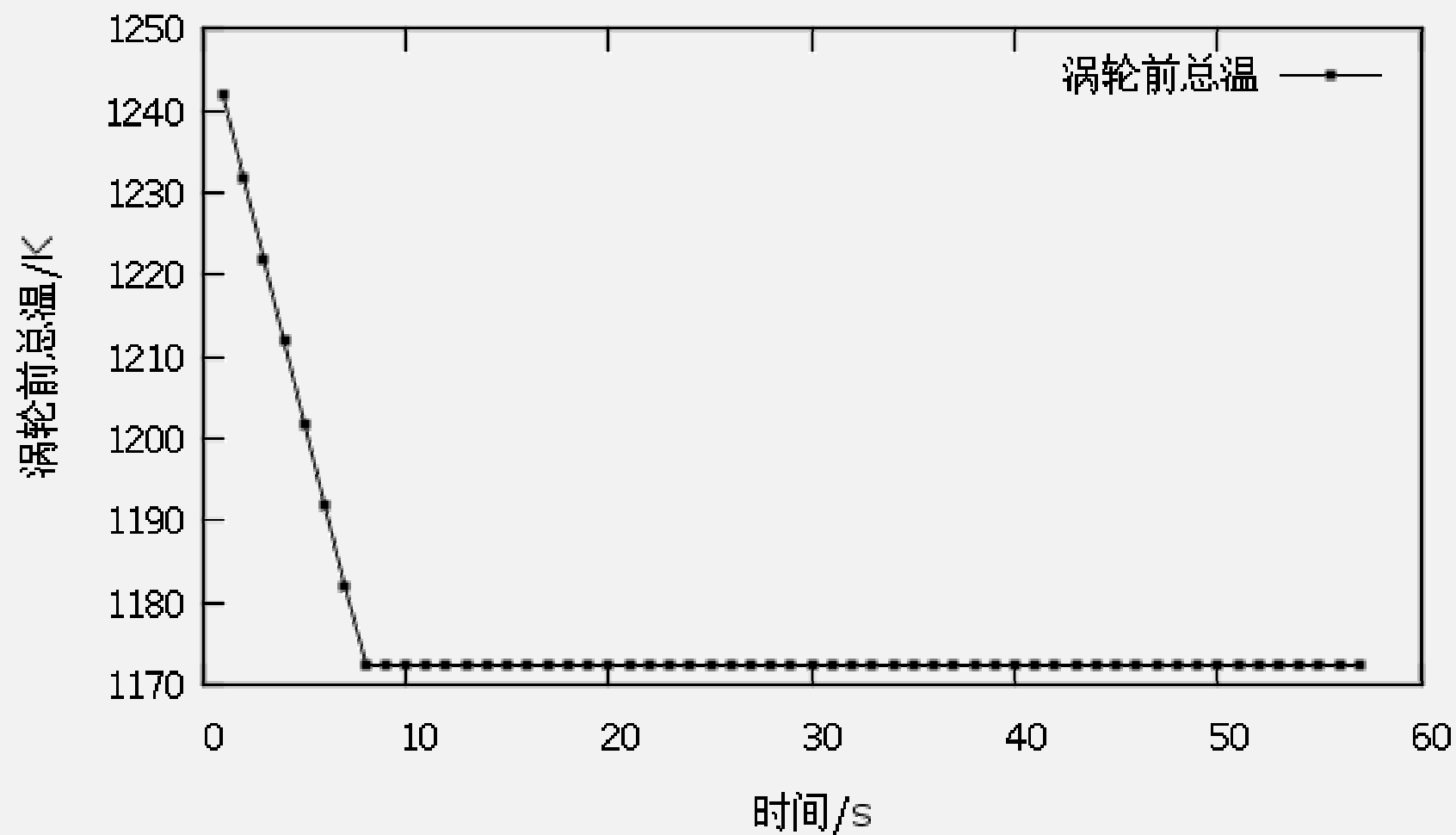
- 调节涡轮前总温 $T_4^*$ 模拟单一减速过程
- 进口气流参数  $H = 1000 \text{ m}$       $Ma = 0.4$
- $T_4^*$  调节速率  $10 \text{ K/s}$

调节规律选择

	$n_H$	$\pi_{KH}^*$	$f_{\text{Burner}}$	$T_4^*$	$\pi_T^*$	$A_8$
稳态调节规律	主调节	试取	非自由	试取	试取	主调节
动态调节规律	试取	试取	非自由	主调节	试取	主调节

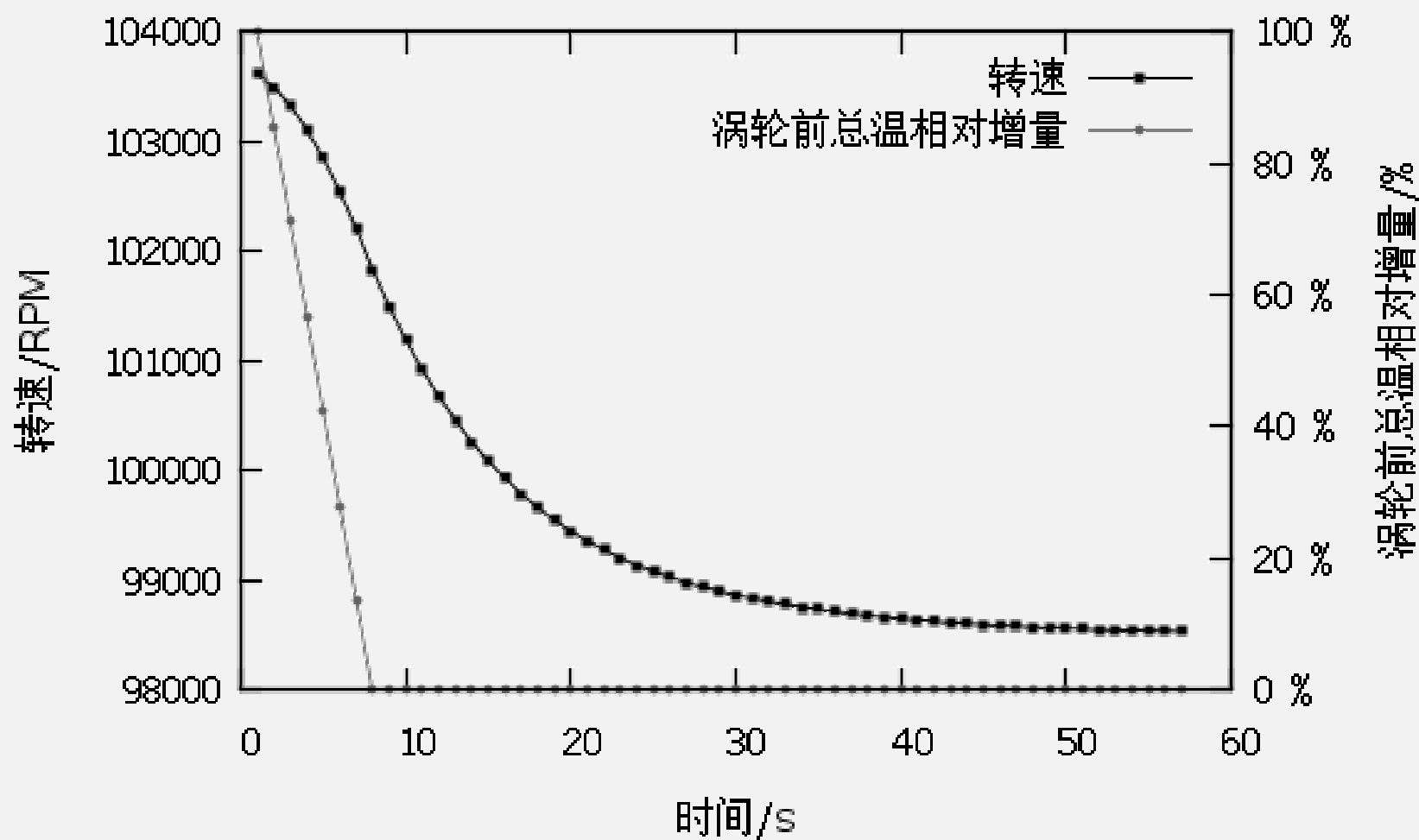
# 算例（一）

- $T_4^*$  调节计划



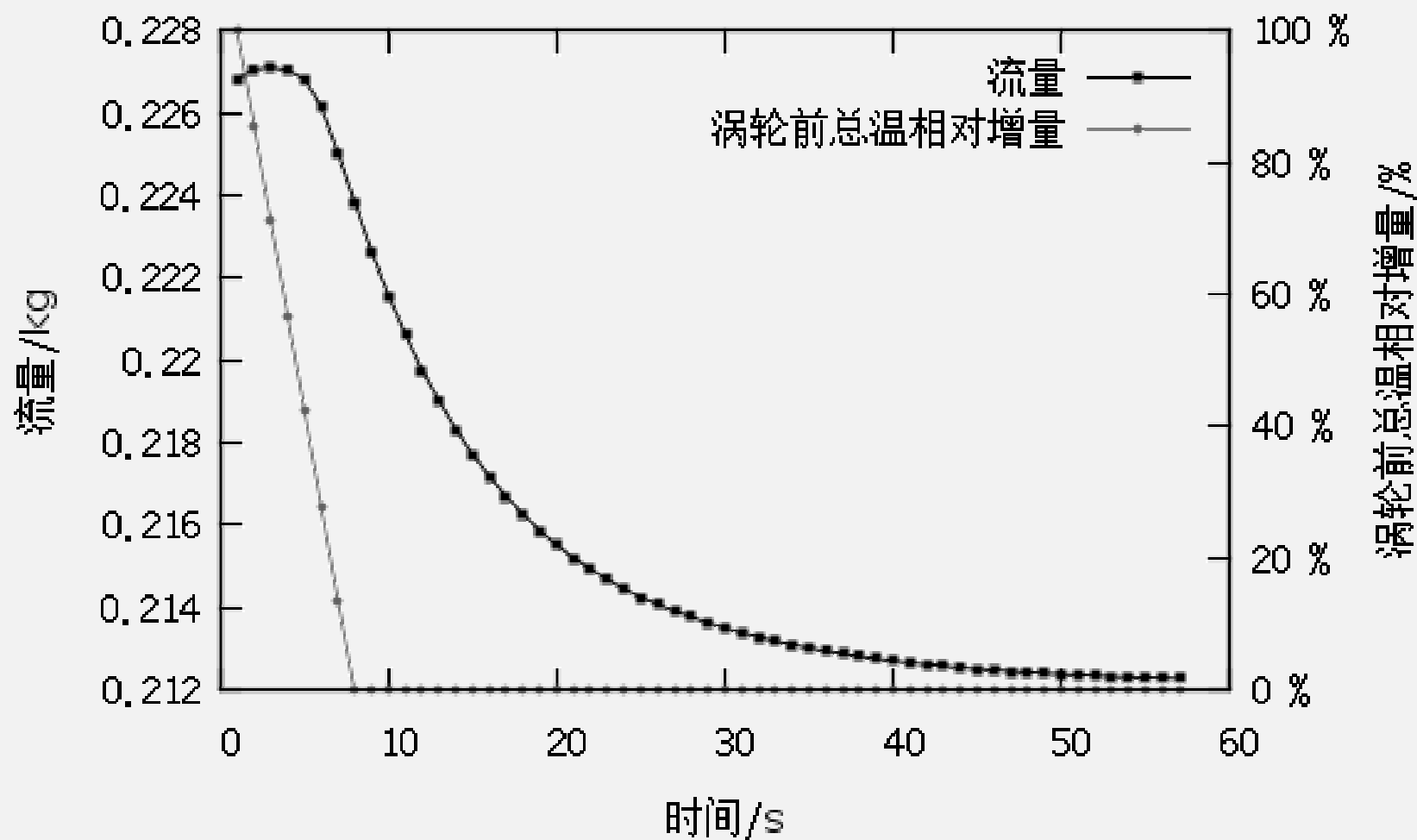
# 算例（一）结果

- 转速  $n_H$  的时间响应



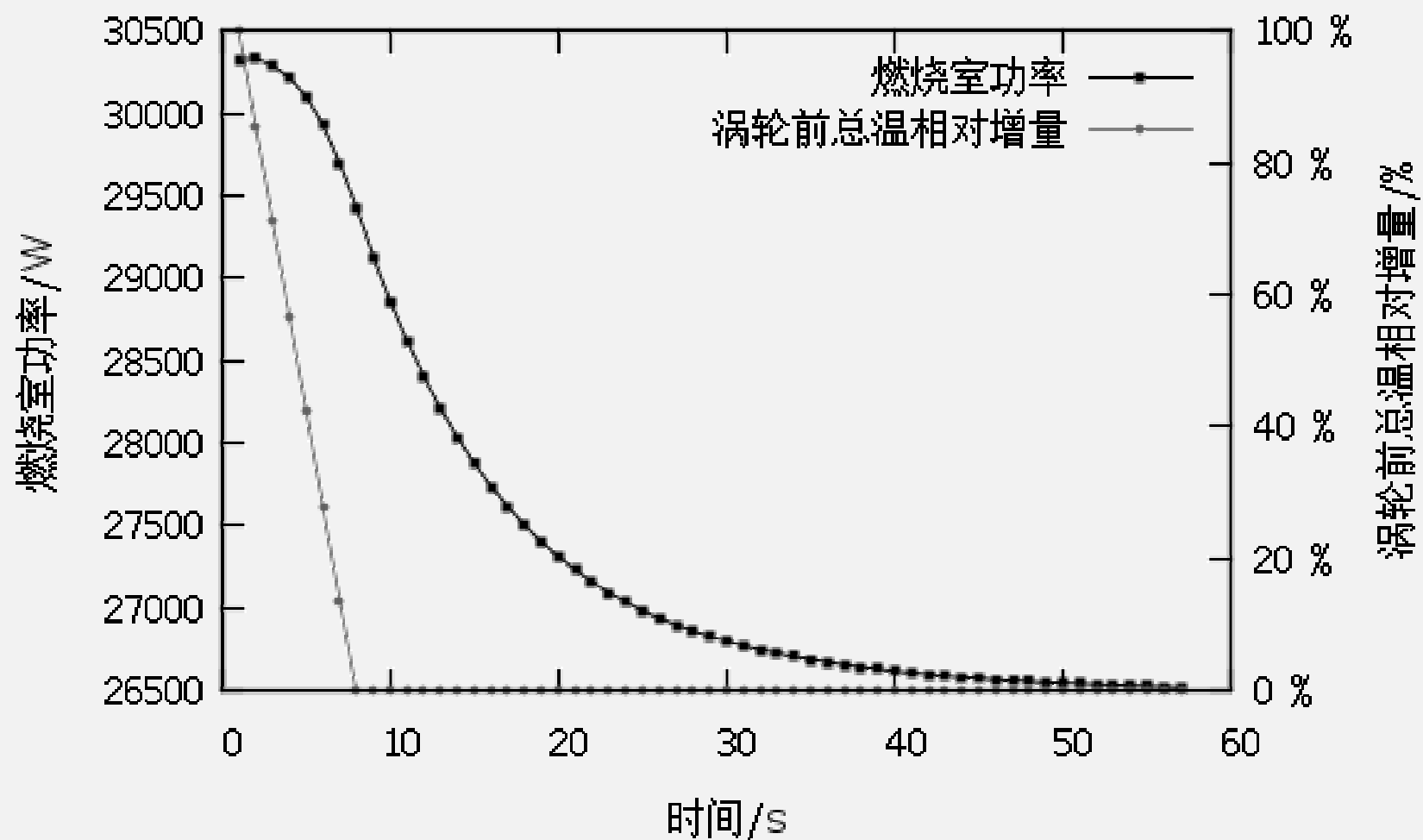
# 算例（一）结果

- 压气机进口流量  $\dot{m}_K$  的时间响应



# 算例（一）结果

- 燃烧室功率  $P_{\text{Burner}}$  的时间响应



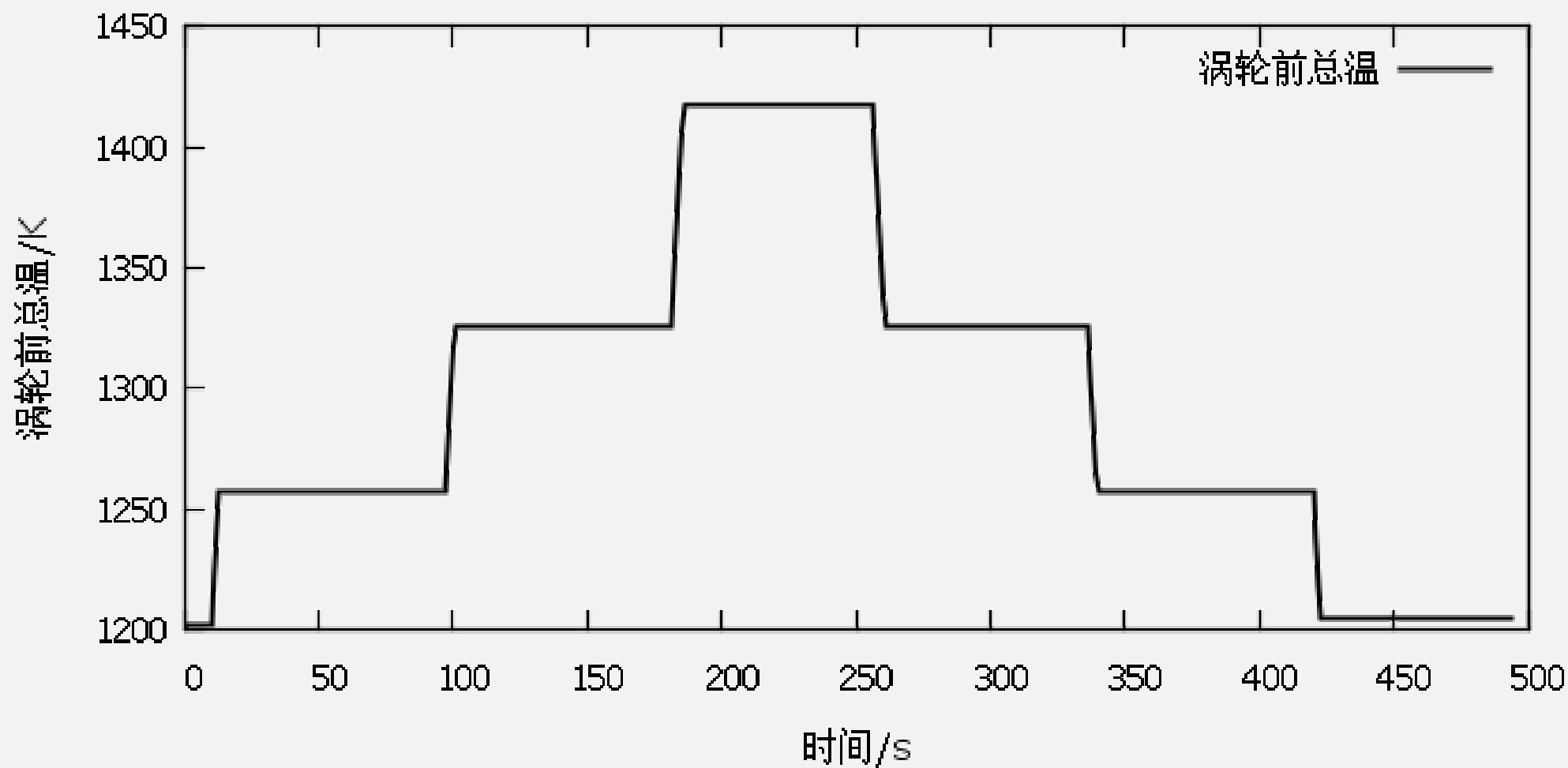
## 算例（二）

- 调节涡轮前温度  $T_4^*$  模拟地面试车
- 进口气流参数  $H = 0 \text{ m}$      $Ma = 0.05$
- 稳态和动态调节规律如算例（一）
- $T_4^*$  调节速率  $20 \text{ K/s}$



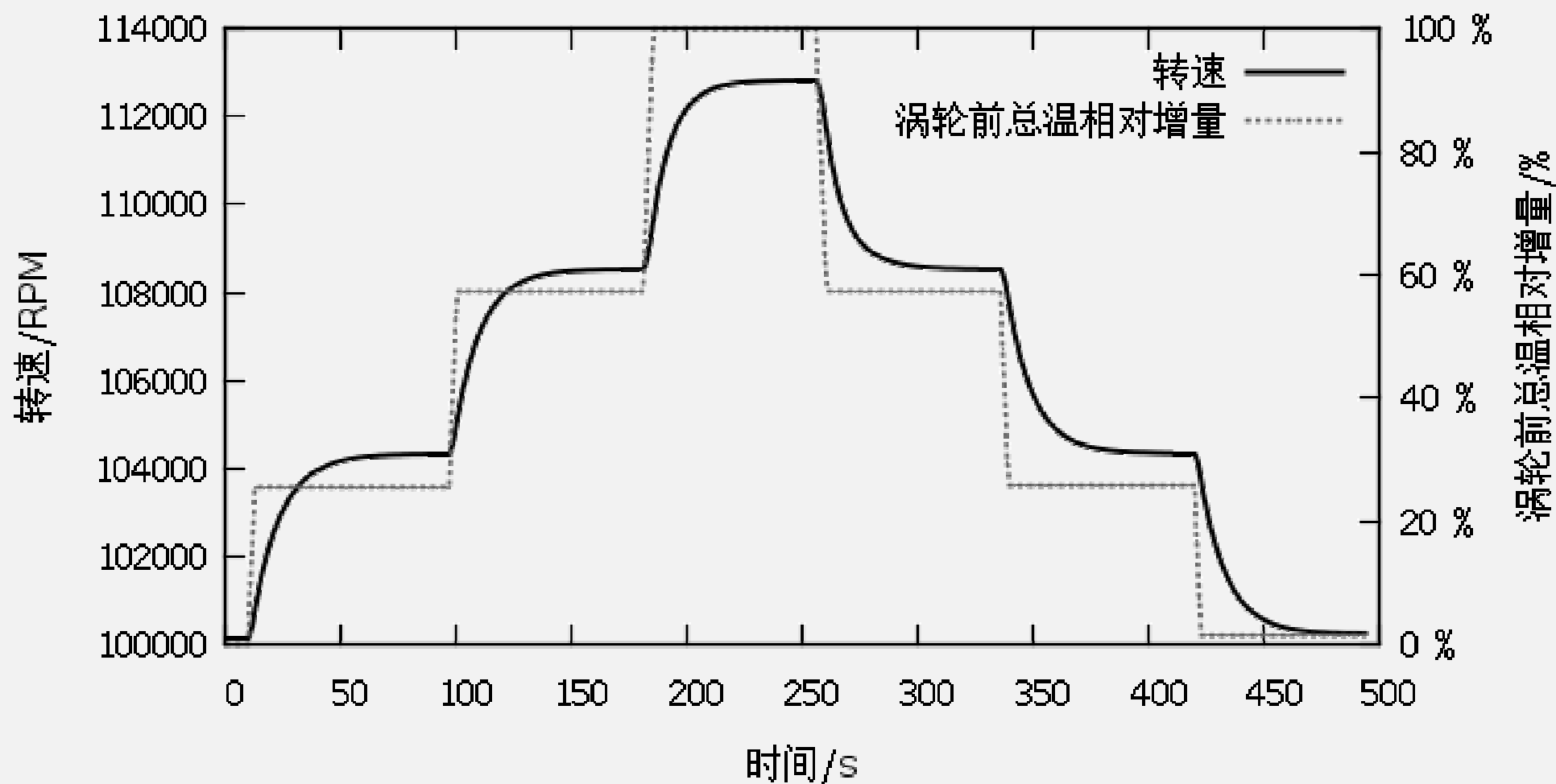
## 算例（二）

- $T_4^*$  调节计划



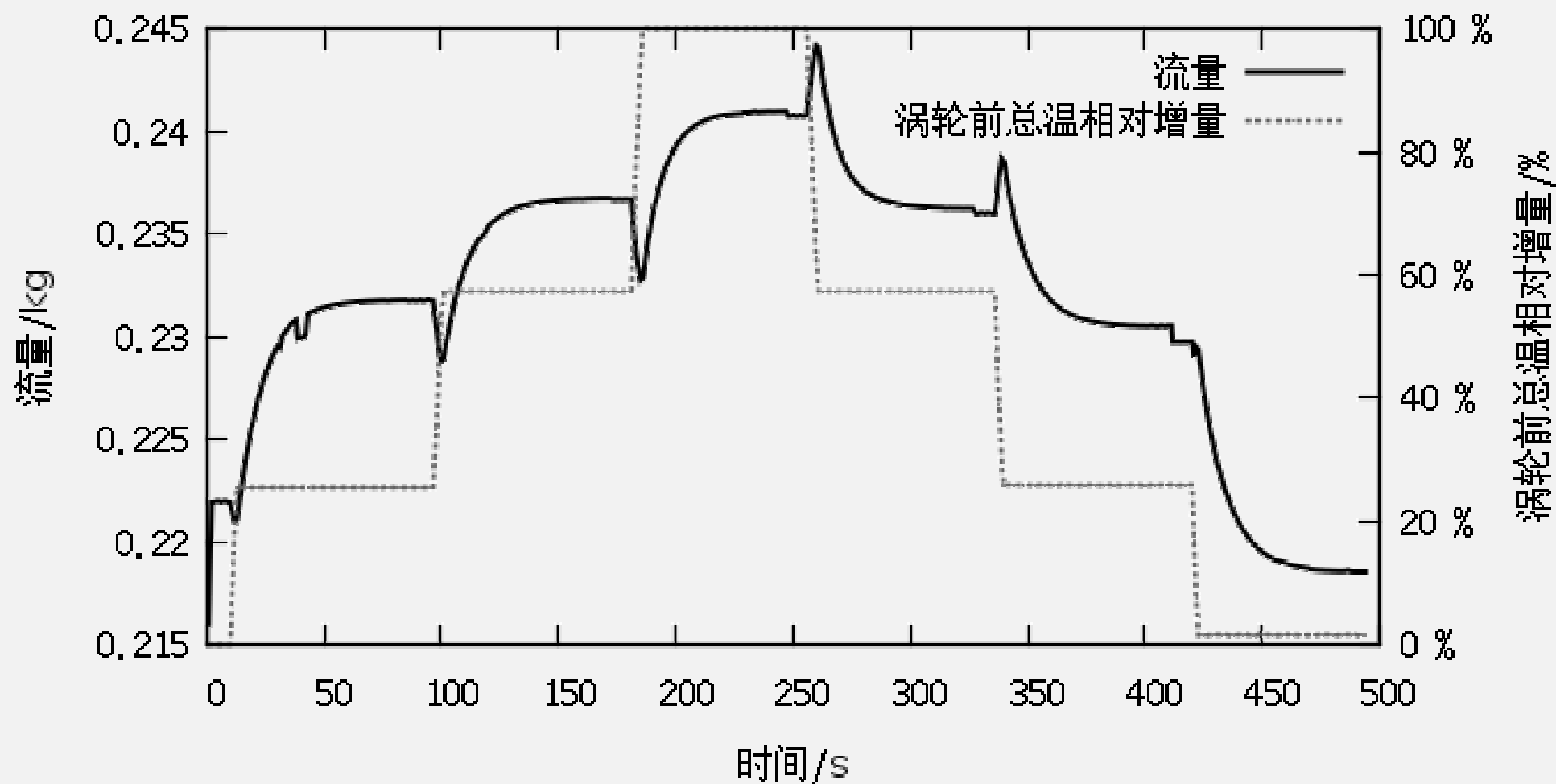
## 算例（二）结果

- 转速  $n_H$  的时间响应



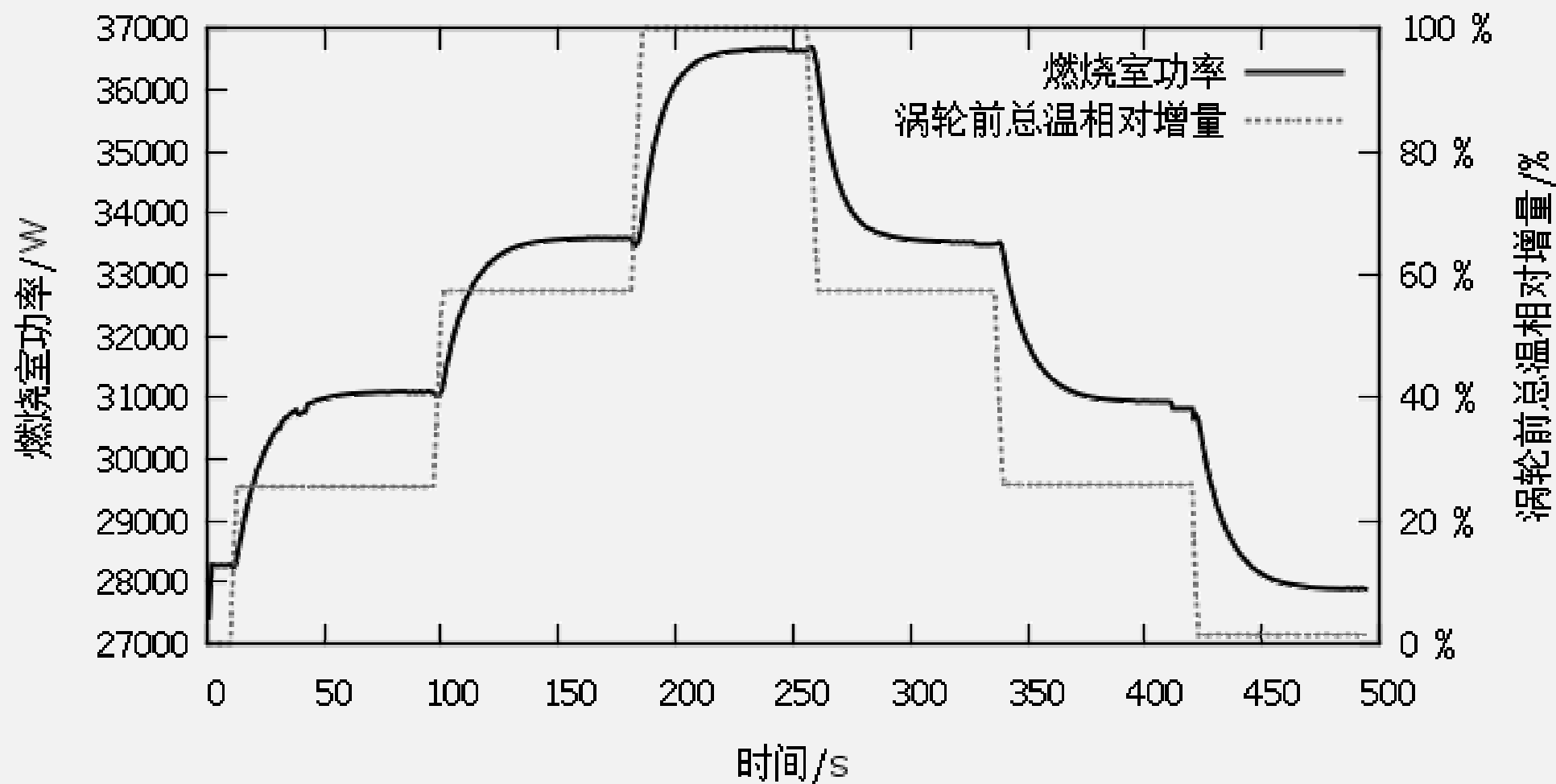
## 算例（二）结果

- 压气机进口流量  $\dot{m}_K$  的时间响应



## 算例（二）结果

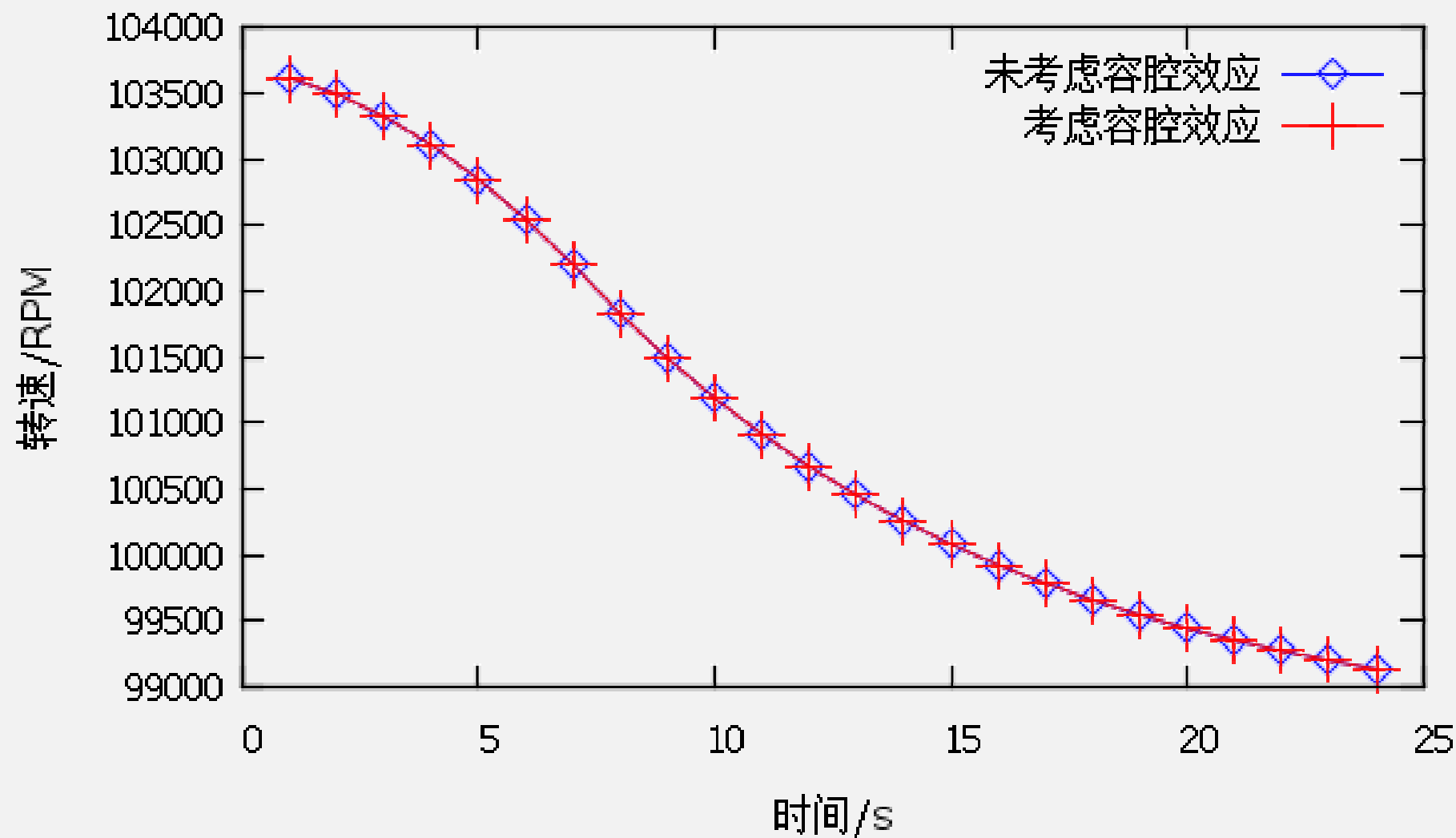
- 燃烧室功率  $P_{\text{Burner}}$  的时间响应



## 算例（三）

- 比较考虑和不考虑容积效应在发动机动态过程模拟中的影响
- 输入同算例（一），但第二次运行程序之前删去程序中的压气机和燃烧室容积效应动态项
- 比较前24秒

## 算例（三）结果



## 算例（三）结果

- 对于此型号微型涡喷，容腔效应极为不明显（论文第34页）
- 对于更大尺寸和复杂结构的发动机，不排除容腔效应具有更显著作用