

# 基于状态空间的燃气轮机建模与控制优化

陈梅珊 陈金伟 周登极 张会生

(上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200240)

**摘要:** 针对传统PID控制法只能调节单变量且控制效率慢的问题,利用状态空间方法可以调节多个变量的特点,以某电站的燃气轮机为研究对象,考虑实际运行中燃气轮机执行机构和传感器的特性,建立了燃气轮机状态空间控制法的仿真模型,并借鉴极点配置思想对传统控制策略进行优化;运用所建立的燃机控制模型和优化后的控制策略对燃气轮机升负荷过程进行了控制模拟,结果显示:在系统升负荷的过程中,燃料阀门响应的时间从35 s缩短到5 s左右。相应的燃料量、排烟温度和燃机功率的响应时间也由40 s缩短到10 s以内。优化后的燃机相对转速振荡时间也由40 s缩短到20 s。

**关键词:** 现代控制; 状态空间; 燃气轮机; 建模; 控制优化  
中图分类号: TK472 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.02.005

## 引言

燃气轮机控制系统作为燃气轮机的重要核心,是燃气轮机研究的主要内容之一。如何实现燃气轮机控制系统更为有效准确地对燃气轮机进行控制,一直是研究的热点。基于经典控制理论的燃气轮机控制系统的研究主要是通过PI或PID的控制手段对系统的输出进行反馈控制,并没有涉及到对燃机运行过程中的状态量的直接控制,在控制的效率和效果上都有待提高。而现代控制理论提出了更好的控制手段,可以弥补经典控制理论中的不足。基于该情况,本研究通过搭建燃机系统的状态空间模型,运用现代控制理论中极点配置的方法,对燃气轮机控制系统中的状态量进行控制,以实现燃气轮机的优化控制<sup>[1-3]</sup>。

## 1 模型的建立

### 1.1 燃气轮机的数学模型

燃气轮机控制系统主要包括转速、负荷控制系

统、加速度控制系统、温度控制系统以及压气机入口导叶(IGV)控制系统。由于压气机入口导叶控制系统的非线性化程度比较高,本研究在状态空间建模中将IGV开度对排温的影响考虑在排温模块当中而不单独进行建模,特此说明。本研究首先在考虑实际运行过程中传感器和燃机执行机构对燃气轮机的影响<sup>[4,8-10]</sup>,并对燃机进行模块化建模。

#### 1.1.1 燃料供给执行机构

燃料阀是燃气轮机系统的一个重要的组成部分,是由执行机构通过改变燃料阀的开度进行控制的。具体的数学建模如下:

##### (1) 燃料控制阀执行机构

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{u_{1s} \cdot N \cdot KNL + 1 - KNL - \theta}{b} \quad (1)$$

式中:  $u_{1s}$ —控制阀信号;  $b$ —燃料阀时间常数;  $KNL$ —维持火焰的最小燃料量;  $N$ —非线性转速;  $\theta$ —燃料阀开度。

##### (2) 燃料量执行机构

燃料变化率随着燃料阀开度的变化而变化,建立模型如下:

$$\frac{dq_f}{dt} = \frac{\theta - q_f}{T_{FS}} \quad (2)$$

式中:  $T_{FS}$ —燃料系统时间常数;  $q_f$ —燃料量变化率。

#### 1.1.2 IGV 执行机构

压气机入口导叶(IGV)的作用是在保证最佳压缩效率的前提下,引导气流以合适的角度进入压气机的第一级。大部分的入口倒流叶片都是固定的,但一些发动机可以通过改变燃料控制单元进而影响液压执行机构以改变其入口导叶的角度。IGV执行机构正是用于入口导叶的定位以及工业或通用大型

收稿日期: 2015-03-18; 修订日期: 2015-06-24

作者简介: 陈梅珊(1989-),女,福建厦门人,上海交通大学硕士研究生。

燃气轮机的控制。据其动态作用的特点建立微分方程如下:

$$\frac{dL_{IGV}}{dt} = \frac{u_{2s} - L_{IGV}}{T_{IGV}} \quad (3)$$

式中:  $L_{IGV}$  —IGV 开度;  $u_{2s}$  —IGV 控制信号;  $T_{IGV}$  —IGV 执行机构的时间常数。

### 1.1.3 排气温度计算模块

由于测温的热电偶位于辐射罩里面,为了能够更好地描述排气温度的变化情况,辐射罩温度和测量温度都必须加以考虑。

#### (1) 辐射罩

$$\frac{dT_{sh}}{dt} = \frac{T_m(1 - G_{RS}) - T_{sh}k_{IGV} - G_{RS}k_{IGV}}{T_{RS}k_{IGV}(1 - G_{RS})} \quad (4)$$

式中:  $T_m$  —排气温度, K;  $T_{sh}$  —辐射罩内热电偶温度, K;  $G_{RS}$  —辐射参数;  $T_{RS}$  —辐射时间常数;  $k_{IGV}$  —IGV 对出口温度的影响。

#### (2) 测量温度

考虑热电偶的热惯性,排气温度的微分方程设计如下:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{sh} - T}{T_T} \quad (5)$$

式中:  $T$  —测量温度, K;  $T_T$  —热电偶时间常数。

### 1.1.4 燃机轮机模型

利用模块化建模的思想进行燃机的模型建模如下:

#### (1) 空气量执行机构

$$\frac{dq}{dt} = \frac{q_f e^{-T_{CR}s} - q}{T_{CD}} \quad (6)$$

式中:  $q$  —空气量变化率;  $T_{CR}$  —燃烧系统的延迟时间, s;  $T_{CD}$  —压气机排气系统时间常数。

#### (2) 转子模块

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{J}(\tau_m - \tau_{load}) \quad (7)$$

式中:  $J$  —转动惯量,  $kg \cdot m^2$ ;  $\tau_m$  —燃机发动机转矩,  $N \cdot m$ ;  $\tau_{load}$  —发电机转矩,  $N \cdot m$ 。

### 1.2 燃气轮机状态空间建模

根据 1.1 中所列式子,以燃料控制阀信号  $u$  为输入量,转速  $n$ 、排温  $T_m$ 、机械功率  $P_m$  为输出量,燃料阀角度  $\theta$ 、燃料量  $q_f$ 、空气量  $q$ 、转速  $N$ 、热电偶测量温度  $T_{sh}$  和实际测量温度  $T$  为状态量。将燃气轮机的数学模型转化为状态空间的模型,可以写出如下状态空间表达式:

### (1) 状态方程

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ q_f \\ q \\ T_{sh} \\ T \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{b} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{Fs}} & -\frac{1}{T_{Fs}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{CD}} & -\frac{1}{T_{CD}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{RS}(1-G_{RS})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_T} & -\frac{1}{T_T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{KNL}{b} & \frac{1-KNL}{b} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{T_m(1-G_{RS})-G_{RS}k_{IGV}}{T_{RS}k_{IGV}(1-G_{RS})} \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J}(\tau_m - \tau_{load}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

### (2) 输出方程

$$\begin{bmatrix} N \\ T_m \\ P_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & D_1 & 0 & 0 & 0 & -E \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{Gn}\tau_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q_f \\ q \\ T_{sh} \\ T \\ N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

与状态空间描述  $\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$  作比较,可得:

$A, B, C, D$  4 个矩阵。

## 2 燃气轮机控制系统优化

### 2.1 能控性和能观性

系统能控性(以线性定常系统为例),是指存在一个分段连续的输入,能在有限时间区间内,使系统由某一初始状态转移到指定的任一终端状态。系统能观性(以线性定常系统为例),是指对任意给定的

输入,使得在有限观测时间区间内的输出能唯一地确定系统在初始时刻的状态<sup>[5]</sup>。

对本研究所考虑的燃机模型进行能观性和能控性的判断,其中  $M = (B, AB, A^2B, A^3B, A^4B, A^5B)$ ,  $N = (C, CA, CA^2, CA^3, CA^4, CA^5)$ , 由于  $\text{rank}(M) < 6$ , 所以系统是不完全能控的; 由于  $\text{rank}(N) < 6$ , 所以系统是不完全能观的。

因此,我们不能直接将现代控制理论的控制方法诸如极点配置、状态观测等直接应用在整个状态空间模型上。

### 2.2 最小实现

由于系统的不完全能观性和不完全能控性,我们需要对系统进行分解以寻找到一个完全能观能控的最小实现  $\sum_1(a, b, c)$ , 以便能够运用现代控制的手段对系统进行优化控制<sup>[5]</sup>。

由于寻求最小实现的过程是一个计算量大的繁琐工程,这里借助 MATLAB 工具对本研究的燃机模型进行最小实现的求解<sup>[8]</sup>, 并得到该燃机系统的最小实现形式  $\sum_1(A_{11}, B_1, C_1)$ , 其中,  $A_{11} =$

$$\begin{pmatrix} -0.1 & 0 \\ 2.513 & 2.513 \end{pmatrix}, B_1 = \begin{pmatrix} 0.08022 & 0.01978 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, C_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 & 0 \\ 613.7 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

### 2.3 极点配置

极点配置问题,就是通过选择反馈增益矩阵,将闭环系统的极点恰好配置在根平面上所期望的位置,以获得所希望的动态特性。

对原系统的最小实现  $\sum_1(a, b, c)$  进行极点配

置。这里假定系统的性能指标为: 超调量  $\sigma_p \leq 7\%$ , 超调时间  $t_p \leq 0.7 \text{ s}$ , 并根据该性能指标确定系统的主极点,借助于 MATLAB 软件我们很容易得到最小实现系统的主极点  $K = [8.82, 22.2]$ <sup>[7]</sup>, 则原系统变为  $(\bar{A} - \bar{B}K, \bar{B}, \bar{C})$ , 如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

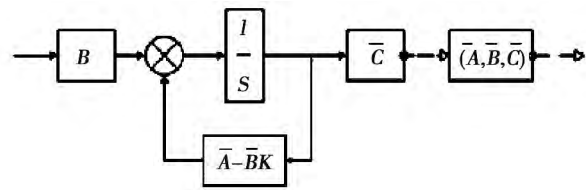


图 1 极点配置之后的系统图

Fig. 1 System diagram after the pole assignment

## 3 系统仿真及结果分析

### 3.1 系统仿真

在上述数学模型的基础上,以某功率为 200 MW 排温为 518.9 °C 转速为 3 000 r/min 的重型燃机为模型,在 MATLAB、SIMULINK 仿真平台上对系统进行相应的仿真,并对结果进行分析。相关变量参数的选取如表 1 所示, SIMULINK 仿真模型如图 2 所示。

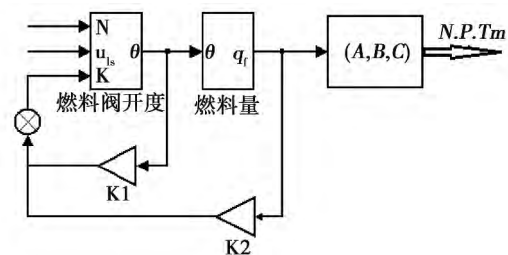


图 2 SIMULINK 系统仿真简图

Fig. 2 Simulink simulation diagram

表 1 相关变量参数

Tab. 1 Relevant variable parameters

参数	KNL	T <sub>CR</sub>	J/kg · m <sup>2</sup>	E	T <sub>RS</sub>	T <sub>r</sub>	T <sub>IGV</sub>	D <sub>1</sub>	k <sub>IGV</sub>	T <sub>FS</sub>	T <sub>CD</sub>	T <sub>R</sub> /°C	b	G <sub>RS</sub>	P <sub>Gn</sub> /MW	T <sub>TD</sub>	D <sub>2</sub>	
数值	0.802	2	0.005	12.3	311.3	12.256	1.7	3.1	613.685	5.023	0.398	0.1	518.9	0.15	0.8533	200	0.04	-355.082

### 3.2 仿真结果分析

搭建如图 2 的系统模型后,给定阶跃响应的输入控制阀信号,其中,阶跃信号由初始值 0.8,在 50

s 的时候阶跃到 1,如图 3 所示。模拟了实际重型燃气轮机由 80% 负荷突变到满负荷的过程中工况的变化情况。

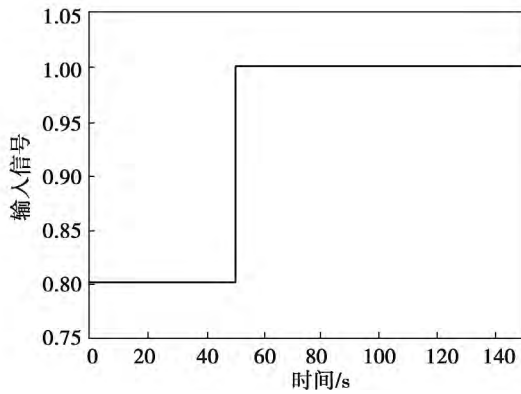


图3 控制阀输入信号

Fig. 3 Input signal of the control valve

本研究分别对极点配置前和极点配置后的机组运行情况进行了模拟,以比较极点配置对系统性能的影响。仿真结果如图4-图8所示。

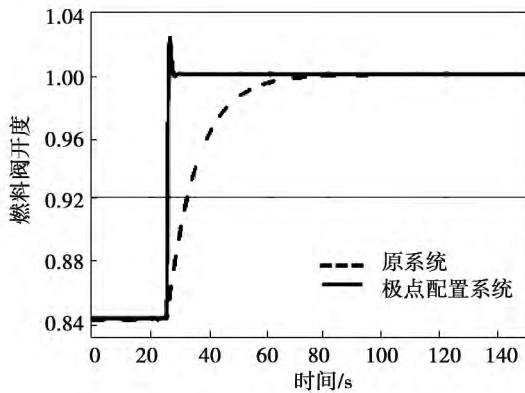


图4 极点配置前后燃油阀开度对比图

Fig. 4 Fuel valve opening before and after pole assignment

图4反映的是燃料阀门的开度的动态响应,从图中可以看到,在燃料阀控制信号变化时,即图3所示,燃料阀门开度相应地做出变化,从图上可以很直观地看出加了极点配置之后阀门的响应相较于没有极点配置时更快。对于没有加极点配置的系统从80%负荷到满负荷的过渡时间大约为35s,而极点配置之后的系统的过渡时间大约为5s,反映了现代控制理论下的状态反馈在控制方面有更好的效果。

图5反应的是阶跃输入下燃料量(标幺值)的动态响应。我们可以看到,对于没有加极点配置的系统从80%负荷到满负荷的响应时间大约为50s,

而极点配置之后的系统的响应时间大约为5s,反映了现代控制理论下的状态反馈在控制方面有更好的效果。

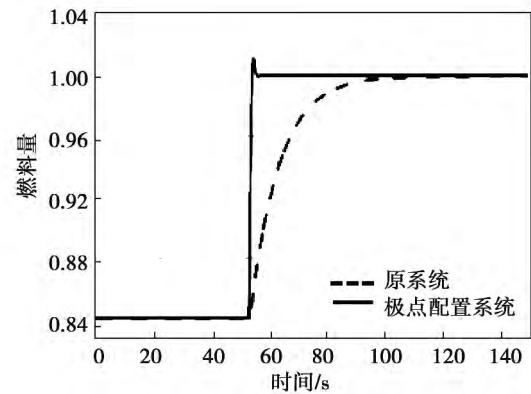


图5 极点配置前后非线性燃料量对比图

Fig. 5 Nonlinear fuel flow before and after pole assignment

图6容易看出优化之后相对转速振荡时间明显变短了,从40s缩短为20s左右,虽然最大的超调增加了,但是仍然在期望的超调范围内。由于燃机具有的惯性的特点,系统的响应主要还是由燃料量的变化引起的,因此排温(图7)和功率(图8)的变化与图5类似,极点配置优化之后响应时间明显缩短,优化效果明显。极点配置导致系统阶次增加必然会出现超调量,但从图中可以看出超调量是满足性能指标的。

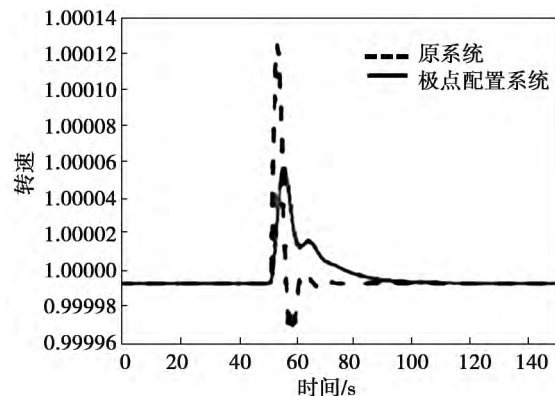


图6 极点配置前后非线性转速对比图

Fig. 6 Nonlinear rotation speed before and after pole assignment

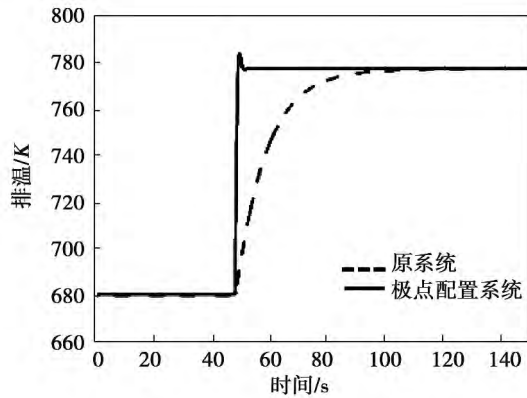


图 7 极点配置前后排烟温度对比图

Fig. 7 Exhaust temperature before and after pole assignment

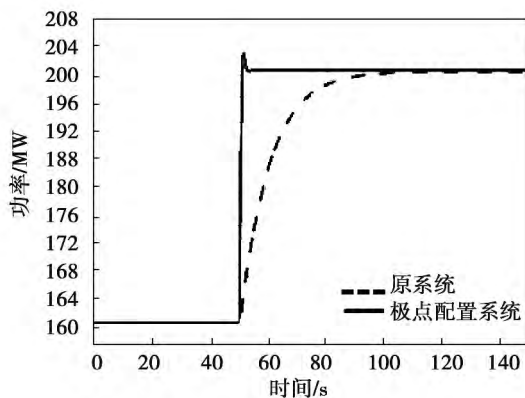


图 8 极点配置前后功率对比图

Fig. 8 Power before and after pole assignment

## 4 结 论

本研究根据实际运行中燃气轮机传感器和执行机构的动态性能建立了重型燃机的状态空间模型。通过极点配置对燃气轮机系统的性能进行了优化,因极点配置前后系统性能参数的变化可以得出:

采用本研究提出的状态反馈的方法比传统输出反馈的方法能更显著地提高燃机的性能,主要表现在:在模拟系统升负荷的过程中,燃料阀门响应时间从 35s 缩短到 5s 左右,相应的燃料量、排烟温度和功率的响应时间也由 40 s 缩短到 10 s 以内。采用本研究方法优化之后相对转速振荡时间也由 40 s 缩短到了 20 s。

因此,采用状态反馈较采用纯输出反馈可提高系统性能 5 倍以上,具有更好的控制意义。

## 参考文献:

- [1] Tavakoli M. R. B., Vahidi, B. and Gawlik, W., "An Educational Guide to Extract the Parameters of Heavy Duty Gas Turbines Model in Dynamic Studies Based on Operational Data" [J]. IEEE Transaction on Power System 2009, vol. 24, no. 3: 1366 - 1374.
- [2] Maria. A. "Introduction to modelling and simulation" [C]. Proceedings of the 29th conference on Winter simulation, 1997: 7 - 13.
- [3] Rowen, W. I. "Simplified mathematical representation of heavy-duty gas turbines" [J] Trans. ASME, J. Eng. Power, vol. 1983, 10 (105): 865 - 869.
- [4] 张建国 魏 静. 燃气-蒸汽联合循环机组模型研究[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2010, 13: 41 - 45.  
ZHANG Jian-guo, WEI Jing. Research on Gas Turbine Combined-cycle Power Plant Models [J]. Journal of Shandong Electric Power College 2010, 13: 41 - 45.
- [5] Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering [M]. Fourth edition. Beijing: Tsinghua University Press 2006. 2.
- [6] 苏 明 陈德来. 一种燃气轮机模块化非线性仿真模型[J]. 热能动力工程, 1998, 06.  
SU Ming, CHEN De-lai. A nonlinear simulation model of gas turbine module [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1998, 06.
- [7] Katsuhiko Ogata. 控制理论 MATLAB 教程 [M]. 电子工业出版社 2008.  
Katsuhiko Ogata. MATLAB for Control Engineers [M]. Electronic Industry Press 2008
- [8] M. R. B. Tavakoli, B. Vahidi and W. Gawlik, "An Educational Guide to Extract the Parameters of Heavy Duty Gas Turbines Model in Dynamic Studies Based on Operational Data" [J]. IEEE Trans. On Power Syst., vol. 24, no. 3, pp. 1366 - 1374, Aug. 2009.
- [9] Jong-Wook Kim, Sang Woo Kim. Design of Incremental Fuzzy PI Controllers for a Gas turbine Plant [J]. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics 2003, 08 (03): 410 - 414.
- [10] Thirunavukarasu, E., "Modeling and Simulation Study of a Dynamic Gas Turbine System in A Virtual Test Bed Environment" [D]. University of South Carolina, SC, 2013.

(刘 瑶 编辑)

an ,China ,Post Code: 710048) ,ZHENG Jiao ( Ningbo Institute of Technology ,Ningbo ,China ,Post Code: 315100) ,CHEN Guang-ming ( Institute of Refrigeration and Cryogenics Zhejiang University ,Hangzhou ,China ,Post Code: 310029) ,XUAN Yong-mei ( Xi'an Polytechnic University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710048) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(2) . -161 -166

A hybrid absorption-ejector heat pump at high temperature is presented in this paper ,which can convert humid hot exhaust gas into 0.3 -0.4 MPa work steam and reuse it in industrial production processes. The corresponding mathematical model was established upon thermodynamic analysis and using Engineering Equation Solver program. Results show under referenced operating conditions 0.4 MPa steam can be generated and coefficient of performance (COP) can reach 1.32. The heat recovery efficiency is greater than 60% ,and the increase in temperature exceeds 70 °C. Furthermore ,system COP increases with the increases in exhaust gas relative humidity and temperature ,absorber inlet solution concentration and entrainment ratio ,and decreases with the increase in liquid-gas ratio and the primary generator ratio. **Key words:** humid hot air ,open cycle absorption heat pump ,ejector ,mathematical modeling

基于状态空间的燃气轮机建模与控制优化 = **Modeling and Optimization of Gas Turbine Control Based on State Space** [刊 汉] CHEN Mei-shan ,CHEN Jin-wei ,ZHOU Deng-ji ,ZHANG Hui-sheng ( School of Mechanical Engineering ,Shanghai Jiao Tong University ,Shanghai ,China ,Post code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(2) . -167 -171

Against the conventional PID regulating system having a single variable control ,the state space method of modern control theory can control multiple variables ,and was used in this paper to establish a control simulation model for a power plant gas turbine with the consideration of actuator and transducer characteristics. This control simulation model along with the control strategy optimized by the method of pole assignment was used to simulate the load process of gas turbine. The simulation results show that in the process of increasing load ,the response time of fuel valves decreases from 35 seconds to approximately 5 seconds ,the corresponding response time for fuel flow ,exhaust temperature and engine power also reduce from 40 seconds to less than 10 seconds ,and the oscillation duration of rotation speed falls from 40 seconds to 20 seconds. **Key words:** modern control ,state space ,gas turbine ,modeling