

航机舰用燃气轮机推进系统的最优控制

清华大学 倪维斗 路四清

摘 要

本文利用舰用燃气轮机推进系统的简化模型及部分状态反馈进行最优控制器的设计。文中提出一种线性二次型PI控制,和一般二次型控制不同之处在于,它既能消除静态偏差,又能使系统整体最优。

一、引 言

舰用燃气轮机推进系统是一个多变量系统,控制量为燃烧室喷油量 G_f 和螺桨节距 P_D ,控制简图如图1。本文提出一种二次型PI控制,用来设计上述系统,与文献〔2〕相比:

1. 通过采用适当型式的输出反馈控制,即PI控制,可实现无静差控制;
2. 从设计方法上保证部分状态反馈和加入反馈通道后控制系统的最优性。

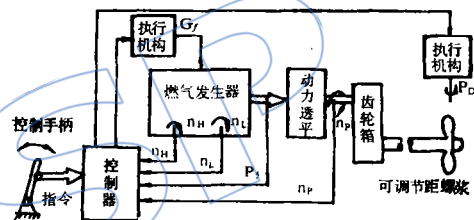


图1 舰用燃气轮机推进系统控制简图

二、设计准则与型式

推进系统控制器的主要目的是合理地调节燃油量和螺桨节距,使推进器产生的推力变化过程最短,但其除受压气机喘振和透平前燃气的超温限制之外,对舰船推进系统还有扭矩限制,要求在过渡过程中透平-螺桨轴不超过给定值。透平-螺桨轴系比燃气发生器部分转动惯量大得多,如果燃气发生器功率增加很快,而动力透平轴系来不及响应,就可能出现超扭。轴的扭矩限制也影响桨轴的加速过程。

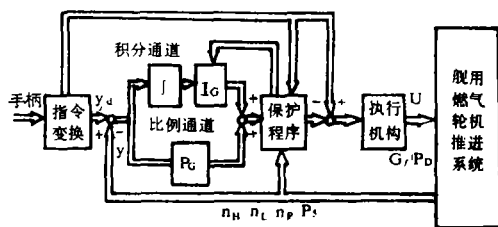


图2 控制器结构型式图

我们采用PI型控制,其结构型式如图2。 P_G 和 I_G 为相应的比例通道和积分通道的增益。通过对系统的模态分析和灵敏度分析〔4〕选高压压气机轴转速 n_H 、低压压气机轴转速 n_L 、动力透平转速 n_P 和动力透平前燃气压力 P_5 作为燃油量的反馈变量。而对螺桨来说,由于节距 P_D 对燃气发生器影响较小,故我们仅取 n_P 作为反馈信号。对积分通道亦作同样考虑。

三、线性二次型PI控制器

对于给定输出指令的控制,用一般二次型控制设计出的比例反馈有静态偏差,而且,由于系统的非线性,在非设计工况时偏差更大。但若简单地加上积分通道来消除静差就会改变系统的整体最优性。因而,我们提出一种二次型PI控制的设计方法,它既具有古典控制中PI控制的部分优点,又具有现代控制理论中充分利用状态反馈作用的特点,算法上又能任意选用反馈变量,可使控制器尽可能简单、易于实现。

1. 线性二次型PI控制的描述 设系统具有状态方程和输出方程

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \quad \mathbf{X}(\infty) = 0$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}$$

要求控制器是PI型的,即

$$\mathbf{U} = \mathbf{P}_G \mathbf{Y} + \mathbf{I}_G \int \mathbf{Y} dt, \quad \text{或写作,}$$

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\omega} + \mathbf{P}_G \mathbf{Y}, \quad \dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{I}_G \mathbf{Y}, \quad \boldsymbol{\omega}(0) = 0$$

欲使性能指标J为最小

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{E} \int_0^{\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U} + \dot{\boldsymbol{\omega}}^T \mathbf{S} \dot{\boldsymbol{\omega}}) dt$$

其中R、S为正定对称阵, Q为半正定阵。

性能指标的前两项积分表示整个过程中状态变量的积分和所用的控制能量,第三项积分表示积分通道的控制功率,它决定了积分通道控制量和比例通道的比例。

2. 设计计算方法 先进行变量扩展,令

$$\mathbf{X}_e = \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \boldsymbol{\omega} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{U}_e = \begin{pmatrix} \mathbf{U} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Y}_e = \begin{pmatrix} \mathbf{Y} \\ \boldsymbol{\omega} \end{pmatrix}$$

则可把对象和控制系统描述为:

$$\dot{\mathbf{X}}_e = \mathbf{A}_e \mathbf{X}_e + \mathbf{B}_e \mathbf{U}_e, \quad \mathbf{Y}_e = \mathbf{C}_e \mathbf{X}_e, \quad \mathbf{U}_e = \mathbf{F}_e \mathbf{Y}_e$$

性能指标 J 变为:

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{E} \int_0^{\infty} (\mathbf{X}_e^T \mathbf{Q}_e \mathbf{X}_e + \mathbf{U}_e^T \mathbf{R}_e \mathbf{U}_e) dt$$

相应的矩阵为:

$$\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 \\ 0 & \mathbf{S} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_G & \mathbf{I} \\ \mathbf{I}_G & 0 \end{bmatrix}$$

可以证明,如果系统 $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}$ 可控,则系统 $\dot{\mathbf{X}}_e = \mathbf{A}_e \mathbf{X}_e + \mathbf{B}_e \mathbf{U}_e$ 亦可控。

这样,我们就把线性二次型PI控制问题化为一般线性二次型输出控制问题求解,输出控制的求解是利用优化方法进行的^[3]。

3. 加权阵Q、R与S的选择 从线性二次型控制的计算公式中可知,反馈增益的解除了取决于系统的状态方程外,还和初始状态 $\mathbf{X}_{e0}$ 和加权阵Q、R与S有关。其中 $\mathbf{X}_{e0} = \mathbf{E}[\mathbf{X}_e(0) \mathbf{X}_e^T(0)]$ ($\mathbf{E}(\cdot)$ 表示数学期望)。我们知道,控制器开始工作的状态是不确定的,而且上述方

法要求 $X(\infty) = 0$, 为此我们必须先把原始状态方程规范化, 即

$$\dot{X} = (X_{nL}, X_{nH}, X_{nP}, X_{p5})^T, U = (X_{Gf}, X_{pD})^T$$

式中 X_v 表示变量 V 与稳态终值的相对量, 如 $X_{nL} = (n_L - n_L(\infty))/n_L$, $n_L(\infty)$ 表示 n_L 的稳态终值。在规范化方程的条件下可取 $X(0) = I$, 这是不同初始点下的折衷。有了上述假定后, 加权阵的选择就成了决定系统性能的唯一因素。

R 的选择是以使输入能饱和, 但饱和时间很短为原则。我们知道, 快速控制是邦-邦控制, 但当输入量在饱和状态下工作时, 就没有二次型控制的优良性质。因此, R 的选择应在两者之间折衷。

S 的选择是以调整积分通道的输入量在控制器中的比例为原则。可以在 R 确定后, 选择 S 使积分通道调节量在总调节量中的适当比例。变换 S 中的不同元素, 可以实现对不同输入量的加权。

Q 的选择则以保证闭环系统有优良的动态性能为原则。本文在状态变量规范化后, 先选择 Q 为单位阵, 不断改变 Q 阵的各元素, 直到得到理论闭环性能的试验方法。

四、推进系统控制器的设计与仿真

1. 机组设计工况的原始数据

$$G_f = 0.673 \text{ kg/s}, P_D = 1.2;$$

$$n_H = 192.00 \text{ rps}, n_L = 119.50 \text{ rps}, n_P = 83.29 \text{ rps};$$

$$P_5 = 2.71 \times 10^5 \text{ Pa}, V_s = 14.42 \text{ m/s}$$

其它参数, 功率 $N = 7820 \text{ kW}$, 螺旋轴扭矩 $M_R = 1.49 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$, 推进系统推力 $T_{PP} = 1.61 \times 10^6 \text{ N}$, 透平前燃气温度 $T_3 = 1214.6 \text{ K}$ 。

2. 加权阵和反馈增益的确定 根据上叙 Q , R 与 S 阵的选择方法, 最终选择的加权阵的结果为:

$$Q = \text{diag}(0.15, 0.9, 0.5, 0.1), R = \text{diag}(5, 2.5), S = \text{diag}(0.75, 0.25)。$$

得到的反馈系数为

$$I_G = \begin{bmatrix} 0.135 & 0.512 & -0.0205 & 2.433 \\ 0 & 0 & -0.478 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_G = \begin{bmatrix} 0.192 & 0.986 & -0.053 & 1.147 \\ 0 & 0 & -1.047 & 0 \end{bmatrix}$$

通过转换, 可以得到相对于物理量的加权阵和反馈系数。

3. 仿真结果 图 3 和图 4 给出了闭环系统的仿真曲线, 结合图 2 知, 输入是手柄指令的阶跃, 由指令变换求得稳态终值, 再由过渡过程输出变量与稳态值之差利用上述控制器对推进系统进行动态控制。从图 3 和图 4 可以看出

(1) 加油过程在 $0.4 \sim 0.5$ 秒内就达到最大值, 几乎是一个阶跃过程;

(2) 三个转子中 n_L 和 n_H 均具有一阶惯性环节的特性, n_P 有约 2% 的超调量, 具有二阶过阻尼的特性, P_5 调节时间约 2.5 秒, 大致分两段, 前段是气容充排的快过程, 只有 0.7 秒, 后一段是由于转速引起的慢过程;

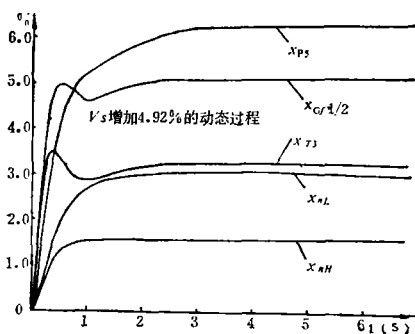


图 3 推进系统闭环响应之一

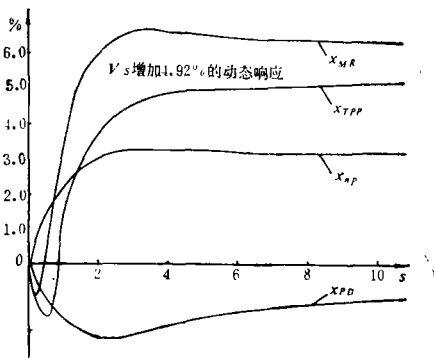


图 4 推进系统环响应之二

(3) 高压透平前燃气温度 T_3 有 4 % 的超调量, 但只经历 0.3 秒, 不会引起透平叶片的损伤;

(4) 燃油量的迅速增加引起燃气发生器功率的迅速增加, 显然在过渡过程初期应尽可能减小螺桨节距, 使螺桨轴迅速加速, 节距在 2 秒内减至最小, 而后缓慢上升。

(5) 节距变小时, 由于负荷变小、桨轴的扭矩和推力会有所下降, 而后上升。扭矩在 2 秒左右就达到稳态值, 有 5 % 的超调, 没有振荡。推力也在约 4 秒时就达到新的稳态值。

上述仿真结果表明, 用线性二次型 PI 控制设计的控制器在舰船机动时能得到令人满意的结果, 能用于该机装舰时的控制器设计。

参 考 文 献

- [1] Kidd, P.J. et al, "Multivariable Control of a Ship propulsion System", Proc. of 6th Ship Control System Symposium, Ottawa, Oct. 1981.
- [2] Levine, M.S., Athans, M., "On the Determination of the Optimal Constant Output Feedback Gains for Linear Multivariable Systems", IEEE Trans., Automatic Control, Vol. AC-15, No. 1, 1970.
- [3] 刘长樵, "多变量线性系统输出反馈控制计算机辅助设计", 机械工程学会工业自动化学术年会论文, 1983.
- [4] 倪维斗, 路四清, "舰用燃气轮机推进系统的模态分析、灵敏度分析和模型简化", 清华大学第 6 届自动化年会论文, 1987.

(责任编辑 王庆康)

OPTIMAL CONTROL OF A MARINE GAS TURBINE PROPULSION SYSTEM

Ni Weidou and Lu Siqing

(Tsinghua University)

Abstract

A design method of "Linear Quadratic Output PI Feedback Control" is proposed in this paper. A marine gas turbine propulsion system controller has been designed by use of this method. The controller not only has the advantages of the PI controller in classical control theory, but also those of the state-variable feedback in modern control theory. The simulation of this controller gives satisfactory results.

TECHNICAL NOTES

A CONTOUR LINE PLOTTING SYSTEM WITH POLAR COORDINATES FOR AEROENGINE INLET FLOW FIELD

Wang Zhanxian

(Flight Test Research Center)

Abstract

Three interpolating surface algorithms, i.e. bilinear, biquadratic and circular spline function radial parabolic algorithms, are provided in this programming system. The last of them is considered to be the most ideal one for interpolating surface because it has high accuracy, truly expresses the distorted flow field, and overcomes the unsmoothed joints of the biquadratic algorithm. In order to determine the intersection points between contour and network, rectangular grids of polar coordinates instead of rectangular coordinates are used. In result, many advantages for engine inlet flow field plotting can thus be achieved. This programming system can save computer time and reduce costs.

IDENTIFICATION OF HIGH FREQUENCY SIGNAL UNDER LOW SAMPLING RATIO

Zhang Yisong and Yi Liyan

(Nanjing Aeronautical Institute)

Abstract

Considering that the highest resolving frequency in dynamic data is restricted by sampling ratio, a new method is proposed to identify the high frequency signal from three low-ratio sampling spectra. The complicated case of vibration measurement of