

汽轮机启动工况的数学模型 及自动升速的控制方法

于达仁 徐基豫 苏荣培

(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕介绍了汽轮机启动工况的数学模型及自动升速的控制方法,设计中考虑了调速器的非线性及对蒸汽参数变化的鲁棒性,实际运行表明,所介绍的控制方法是可行的。

关键词 汽轮机 自动升速 数学模型 控制方法

1 前言

哈尔滨工业大学与哈尔滨汽轮机厂合作研制了200 MW汽轮机的微机控制系统,其中含有自动升速功能。自动升速装置已投入运行,在该装置控制下的启动过程很平稳,升速率准确均匀,电厂反映良好。

汽轮机的启动工况与正常运行工况有很大差别,一方面蒸汽焓值、压力比额定值小很多(滑压启动),模型参数变化较大;另一方面转速变化范围大,模型中含有非线性因素,这些因素给自动升速控制系统的设计造成很多困难。文献〔1〕为了克服控制对象的非线性和参数不确定性,探讨了自适应控制方法,从仿真结果来看效果很好,但自适应方法实现起来对计算机有比较高的要

求,实际中未能应用。本文在仔细研究了汽轮机启动工况的数学模型后,根据模型的特点,设计了非线性的PI调节器。实践表明,这种方法简单,能达到满意的控制效果。

2 启动工况下汽轮机的数学模型

哈尔滨汽轮机厂的200 MW中间再热式汽轮机采用的是机械—液压调节系统,微机通过步进电机与液调系统的同步器接口(见图1)。计算机发出一定频率的脉冲信号驱动步进电机转动,控制同步器完成自动升速,脉冲频率根据所测得的转速和转速给定值来确定。液调系统的弹性调速器在0~3600 r/min的转速范围内均可正常工作,在启动过程中能起到稳定转速的作用。

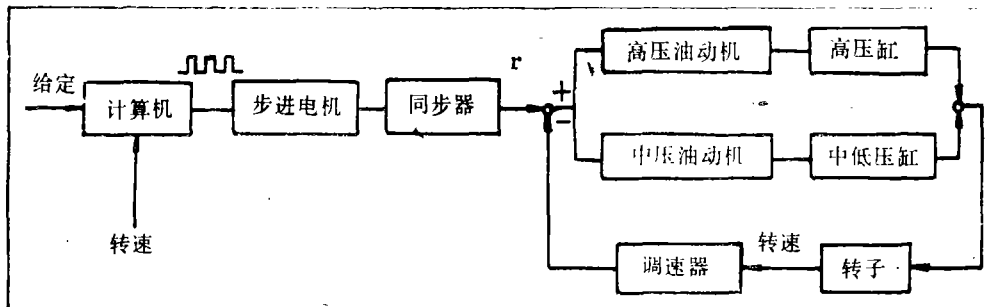


图1 自动升速控制系统

以下逐项给出各部分的模型。

2.1 步进电机 设脉冲频率为 f ，同步器位移为 r ，则有： $r(s) = \frac{1}{s} f(s)$ ，其中 f 、 r 为标么值。

2.2 调速器 设调速器位移 x_φ (标么值)，相对转速 $\varphi = \omega/\omega_0$ ，则在全程范围内相当准确地成立： $x_\varphi = \frac{1}{\delta} \cdot \varphi^2$ ， δ 为不等率。

2.3 油动机 设高压油动机位移 x_{SH} ，中压油动机位移 x_{SL} ，则有：

$$x_{SH}(s) = \frac{1}{T_s S + 1} [r(s) - x_\varphi(s)]$$

$$x_{SL}(s) = \frac{3}{1 + ST_s} [r(s) - x_\varphi(s)]$$

2.4 高、中压缸 设高、中压缸产生的功率分别为 ρ_H ， ρ_L ，则有：

$$\rho_H(s) = \alpha_H \frac{q}{1 + T_{OH} S} \cdot x_{SH}(s)$$

$$\rho_L(s) = \alpha_L \cdot \frac{q}{1 + T_{OLS}} x_{SL}(s)$$

其中 q 为与蒸汽初温初压有关的量， $q = (h \cdot p) / (h_0 \cdot p_0)$ ， h 为蒸汽初焓， p 为蒸汽初压。 $\alpha_H + \alpha_L = 1$ 。 T_{OH} 、 T_{OL} 为高中压容积时间常数，约 0.1~0.2 秒。

2.5 转子 设 $\rho = \rho_H - \rho_L = N_T / N_{T0}$ ； N_T 为汽机功率，油泵、风扇、鼓风机损失等 s 的功耗与转速三次方成正比，有：

$$J\omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = N_T - B' \cdot \omega^3$$

采用相对变量写成：

$$\varphi(s) = \frac{1}{T_a S + B} \cdot \rho(s),$$

其中 $T_a = \frac{J\omega_0^2}{N_{T0}} \varphi = T_{a0} \cdot \varphi$ ，

$B = \frac{B' \cdot \omega_0^3}{N_{T0}} \cdot \varphi^2 = B_0 \varphi^2$ ，可见 T_a 和 B 都随转速变化。

综合以上各项得模型如下：

$$K = q(\alpha_H + 3\alpha_L)$$

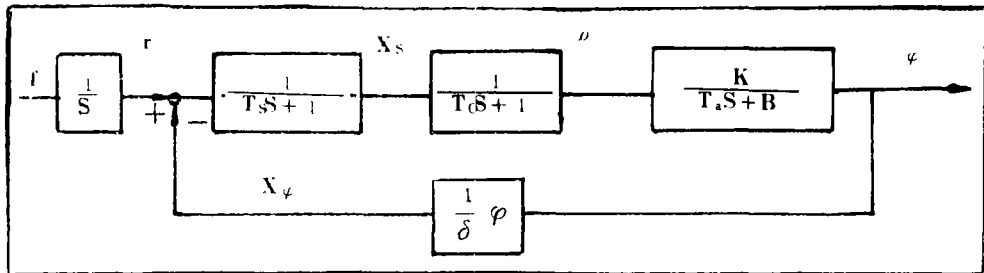


图 2 升速工况模型

图 2 中， $K/(T_a S + B)$ 一项既有非线性特性 (T_a 、 B 随 φ 而变)，又有不确定性 (q 随蒸汽参数变化， α_H 、 α_L 很难估计准确)，初步估计， $\alpha_H + 3\alpha_L$ 在 1.5~2.5 之间， q 与升速的初态有关，冷态启动时 q 约 0.14；热态启动时 q 约 0.6，这样， K 的变化范围大约 0.2~1。调速器特性表现了明显的非线性，

但其特性比较精确。

3 控制系统的设计

3.1 对象模型的特点

在某一工作点，系统近似于线性系统，有：

$$\frac{\varphi(s)}{f(s)} = \frac{1}{s} \frac{1}{\varphi/\delta + \frac{1}{K} (1 + ST_0)(1 + ST_s)(B + ST_a)}$$

在高转速范围内，调速器的反馈作用很强，对象的实际特性很大程度上由调速器特性决定，不确定因素的影响被减小了，由于反馈强，机组有很强的自平衡能力，易于控制；在转速低时，调速器反馈作用不强，机组自平衡能力差，特性变化较大，不易控制。

经过研究发现，如果用一个随转速变化的非线性增益“(1/δ)φ”去校正对象，将基本上消除对象的非线性特性。这样的校正可方便地在微机实现。图3给出了非线性校正后Sφ(S)/f(S)的对数频率特性图，φ从0.03变化到1，特性线基本上重合，线性很好。

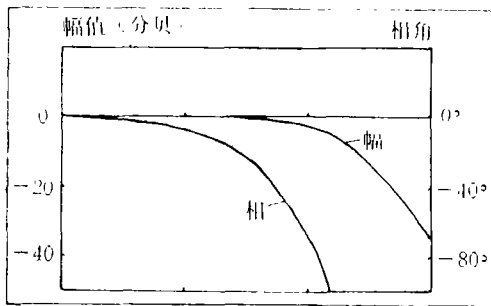


图3 非线性校正后Bode图 (K=0.2)
转速从100~3000 r/min

3.2 自动升速过程的技术要求

汽轮机的升速曲线是根据热应力、胀差和振动等多种因素确定的，图4是冷态启动的典型过程。

从生产过程来看，并不要求非常精确地跟踪给定的升速曲线，而主要是要求保证升速率。例如，图5的升速过程曲线a比曲线b更合乎技术要求。这一点很重要，这决定系统的设计思想是按转速的随动系统设计，还是按升速率的定值系统设计。按随动系统

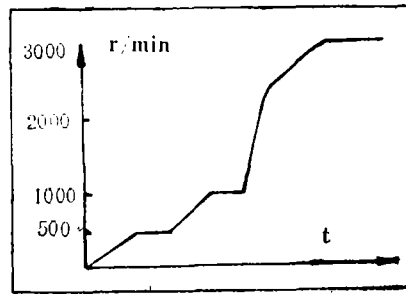


图4 冷态启动曲线

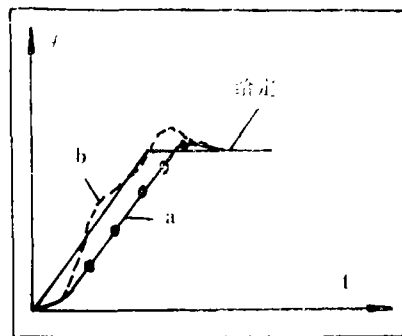


图5

设计的控制系统将有太宽的频带，稳定范围小，参数变化易造成不稳定。所以，应采取后者。

启动过程除了按一定升速率升速的阶段外，还有在一定转速下暖机的阶段，暖机时要求转速稳定在某一特定值，这时应采用对转速的定值控制。

3.3 自动升速控制方案

从前面论述知道，在升速阶段和暖机阶段应采取不同的控制方式，以下分别论述。

升速阶段：此时的被控制量是升速率，设升速率 $D = d\varphi/dt$ ，则对象部分的传递函数为：

$$\frac{D(S)}{f'(S)} = \frac{1}{\frac{1}{\delta} + \frac{1}{K}(T_0S + 1)(T_sS + 1)(T_aS + B)}$$

设 $f = f'(1/\delta)\varphi$ ，则经过非线性校正后的对象传递函数为：

$$\frac{D(S)}{f'(S)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K}(T_0S + 1)(T_s + 1)(\delta \cdot T_{a0}S + \delta B_0\varphi)}$$

从图3可见 $D(s)/f'(s)$ 基本上不随 φ 变化了, 接近于线性, 但不确定性仍然存在, K 随各种条件的不同在 $0.2 \sim 1$ 间变化, 将造成对象特性的变化, 图6是 $D(S)/f'(S)$ 在 $K = 0.2, 0.6$ 情况下的Bode图。可见对象的频带是不确定的, 控制系统的设计应充分考虑 K 变化时的鲁棒稳定性。

为了兼顾系统的稳定性与快速性, 升速段我们采用反馈、前馈相结合的复合控制。

为了保证鲁棒稳定性, 希望采用不激发

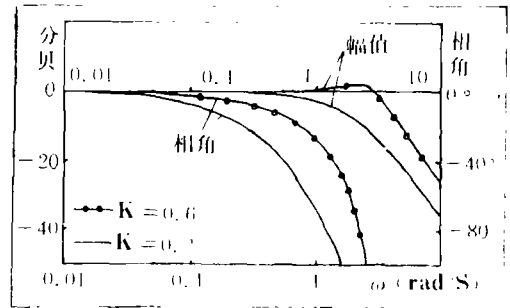


图6 对象特性随K的变化

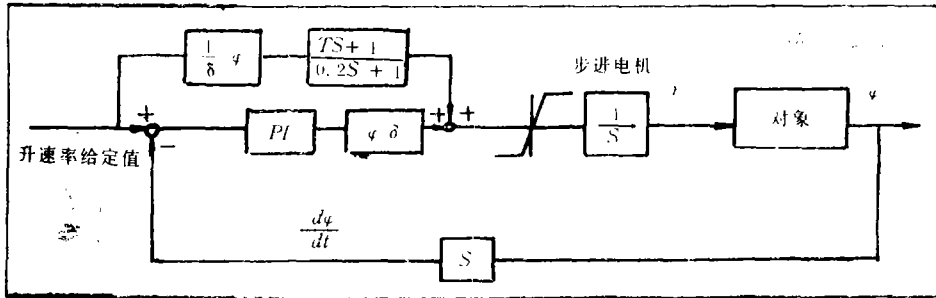


图7 复合控制方案

对象高频模态的控制规律, 有两种可选择, 一种采用放大倍数小于1的PI调节器; 一种采用纯积分调节器。经过比较, 我们选用后者, 纯积分调节器在保证鲁棒性的前提下可得到较宽的频带 (约 1 rad/s), 积分调节器参数为 $TI = 1$ 。图8是 $K = 0.2, 0.6$ 时反馈系统的Bode图。

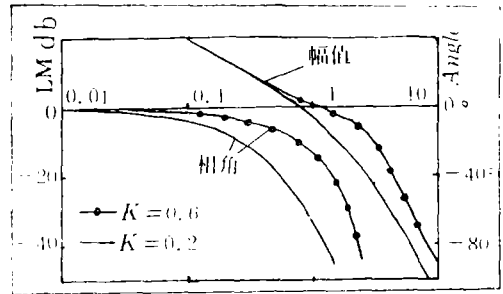


图8

在暖机时采用比例调节就可实现定速控制, 且比例控制较PI, PD控制的鲁棒稳定

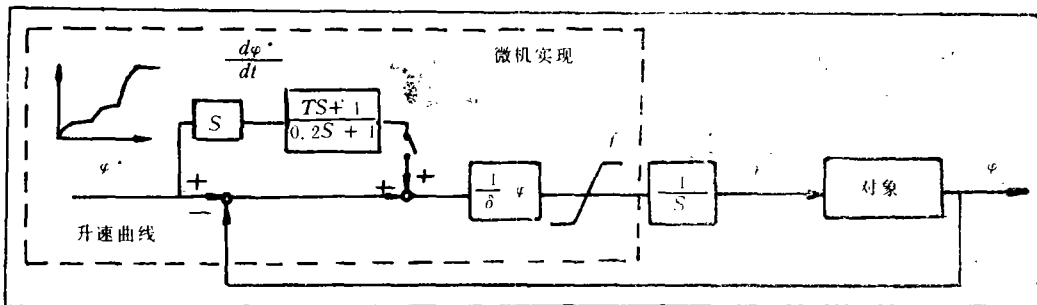


图9 自动升速控制方案 (暖机时切除前馈)

性高，放大倍数取 1。实际上，这时系统的 Bode图与图8是相同的。

稍加分析可以看出，升速时的控制仅比暖机时的控制多了一项升速率前馈，最后得到统一的实现方案如图9。由于系统频带为 1rad/s，取计算机采样周期 1 秒，每个信号周期能采样 6 次，所以模拟设计的控制器可直接离散化得到数字控制器，从略。

4 试验结果及结论

1989年 8 月 16 日，在辽宁电厂首次投运了自动升速装置，图 10 在冷态启动记录曲线，可见系统的稳定性和响应速度都是满意的，达到了设计目标。

微机通过同步器控制汽轮机的方案实现简单，非常适合老机组的技术改造，以提高其自动化水平。本文在系统设计中考虑了调速器的固有非线性，考虑了蒸汽参数变化对动态特性的影响，有一定特色和参考价值。

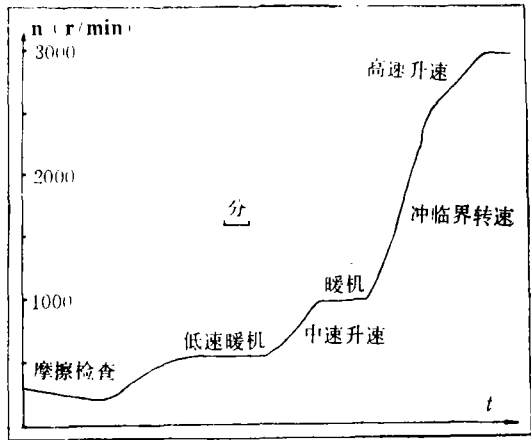


图 10 冷态启动过程

参 考 文 献

- 1 徐基豫等. 汽轮机微程序控制的自动升速系统. 热能动力工程, 1986(3)
- 2 徐基豫, 金永祥. 汽轮机的自升速过程自适应控制. 自动化技术与应用, 1990 (2)

A Mathematical Model of Steam Turbine Start-up Conditions and a Control Method for Its Automatic Speeding-up

Yu Daren, Xu Jiyu, Shu Rongpei
(Harbin Institute of Technology)

Abstract

This paper presents a mathematical model of steam turbine start-up conditions and a control method for its automatic speeding-up. The system design has taken into account the nonlinearity of speed governors and the robustness to changes of steam parameters. The present control method has been proved to be suitable for use on a turboset.

Key words: steam turbine, starting, mathematical model, automatic control.