

带监督项的模糊前馈反馈控制在船用锅炉水位控制中应用

肖 航¹, 田 广², 陈 兵¹, 倪 宁¹

(1. 海军工程大学 动力学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军驻第七〇三研究所军事代表室, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要:船用蒸汽动力装置锅炉锅筒水位控制对象由于存在“虚假水位”,以及精确数学模型难以建立,采用常规的控制策略无法保证控制质量,特别是在工况频繁变化的情况下易导致“满水”或“干锅”的故障。为此,提出了带模糊监督控制的模糊前馈反馈控制方案,该控制方案利用模糊前馈补偿可测干扰对系统输出的影响;利用模糊监督控制抑制系统中非最小相位环节的影响,将所提的控制规律在某实验机组上验证,表明该方法的控制结果令人满意。

关 键 词:船用锅炉;模糊前馈反馈控制;锅炉水位控制

中图分类号:TK223.6 文献标识码:B

1 引 言

锅炉锅筒的水位是反映锅炉汽水平衡的主要参数,也是锅炉安全运行的重要参数。在对锅炉水位进行控制时,由于精确的被控对象理论模型难于建立,同时含有非最小相位环节,在船用条件下(工况频繁变化的情况),单纯利用反馈控制,可能无法及时纠正外部扰动(一般为锅炉负荷)对系统输出的影响,导致系统产生较大的超调,出现“满水”或“干锅”的故障。在手动调节中,运行人员的经验显得十分的重要,所以在此情形下比较适于采用能够模拟人的智能的模糊控制,这样可以在形成控制规则时将运行人员的经验结合进去。

自 1965 年 Zedah 教授创立模糊集合论以来,模糊控制在理论上得到了深入的研究,在实际工程上得到了广泛的应用。

本文针对类似锅炉水位具有可测锅炉外部扰动为对象,提出了带有模糊前馈控制的思想,将可测扰动引入控制系统,进行模糊处理后作为前馈控制信号,通过引入监督控制环节,从而自动调整前馈控制作用和反馈控制作用的权重,以抑制控制对象的非

最小相位特性对控制系统的影响。

2 锅炉锅筒水位控制对象

锅炉给水调节对象如图 1 所示。锅筒的流入量 D_w 由给水调节机构控制,而流出量为汽轮机的耗汽量 D_g ,锅筒水位 H 不仅反映其流入量和流出量间的平衡关系,而且还受液面下汽泡体积的影响。因为在水循环系统中充满着带有大量蒸汽汽泡的水,由于某种原因使蒸汽汽泡的体积发生变化,即使锅筒的流入量和流出量均未变化,水位也会改变。汽泡的体积受锅筒压力和炉膛热负荷的影响。因此,水位作为调节对象,其扰动主要有两个方面:(1)给水流量 D_w ,它是调节量,即基本扰动;(2)蒸汽量 D_g ,主要的外部扰动。

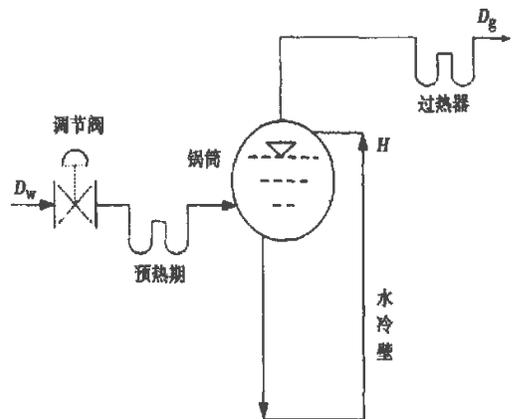


图 1 给水调节对象

2.1 给水流量扰动

假设给水流量 D_w 作阶跃变化,如果仅考虑流

入量和流出量的不平衡关系, 则它近似相当于一个积分环节, 但由于给水温度低于锅筒内的饱和水温度, 当“冷”水进入锅筒后, 吸收了原有的饱和水中的一部分热量, 使锅炉的蒸汽产量下降, 液面下的汽泡体积减小, 使水位下降。综合起来, 可以用传递函数来近似表示:

$$G_{ow}(S) = \frac{H(S)}{D_w(S)} = \frac{\epsilon}{s(1 + T_w s)^n} \quad (1)$$

或简化为:

$$G_{ow}(S) = \frac{\epsilon}{s} e^{-\tau_w s} \quad (2)$$

2.2 蒸汽流量扰动

蒸汽流量 D_g 扰动主要来自汽轮机负荷的变化, 它是调节系统的外扰。在蒸汽流量 D_g 的阶跃扰动下, 单从锅筒流入量和流出量的平衡关系考虑, D_g 的阶跃增加将使水位 H 直线下降, 但 D_g 的增加, 使锅筒压力下降, 液面下汽泡膨胀, 其体积的增加导致水位升高, 这种升高称为“虚假水位”。综合考虑, 在蒸汽流量 D_g 扰动下锅筒水位 H 的传递函数为:

$$G_{og}(S) = \frac{H(S)}{D_g(S)} = \frac{K_D}{s(1 + T_D s)} - \frac{\epsilon}{s} \quad (3)$$

2.3 锅筒水位控制对象

图 2 为锅筒水位控制对象模型

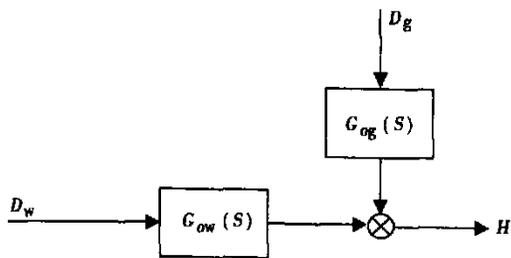


图 2 锅筒水位控制对象简化模型

3 模糊前馈—反馈控制系统

由上节中可以看出, 当锅炉负荷急剧变化时, 由于流入量和流出量的严重失衡, 导致锅筒水位急剧变化, 同时产生的“虚假水位”会使常规的反馈控制出现误动作, 进一步加剧了水位的波动。为此, 仿效传统的控制方法中的二冲量控制, 建立模糊前馈—反馈控制系统, 如图 3 所示。

由图 3 可以看出该控制系统包括 3 个控制器: 模糊反馈控制器 C_1 、模糊前馈控制器 C_2 和监督控

制器 C_3 。其中, 模糊控制器 C_1 和 C_2 组成了前馈反馈控制, 而 C_3 的引入目的是抑制“虚假水位”的影响。

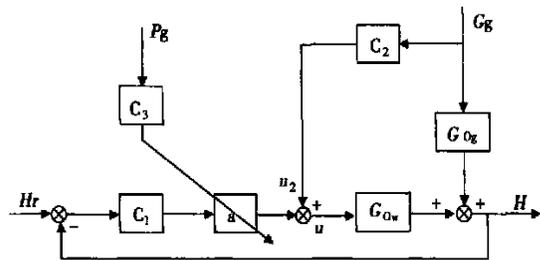


图 3 带监督环节的锅筒水位模糊前馈—反馈控制系统

3.1 模糊反馈控制器 C_1 的设计

模糊反馈控制器 C_1 采用常规的模糊控制器, 其结构如图 4 所示。

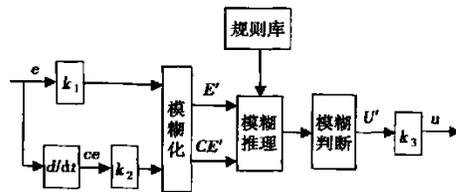


图 4 常规模糊控制系统

在图 4 中, k_1 、 k_2 和 k_3 分别是偏差 e 、偏差的变化 ce 和控制作用 u 的归一化系数。

3.1.1 规则库

模糊控制规则的一般形式为:

R_i : if e_i is E_i and ce_j is CE_i then u is U_i

这里, $i=1, \dots, 7$, 取 e, ce 为控制器 C_1 的输入语言变量, 语言值集合为:

$V = \{NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL\}$

其意义如下:

L—大; M—中; S—小; N—负; P—正

同样可以定义, 输出语言变量 u 的集合。

3.1.2 模糊推理

在模糊控制中, 推理是用来模拟人的思维, 在多条控制规则基础上进行推理决策, 实现模糊控制。通常采用广义肯定式推理 (GMP)。

设 $E \in A \subset R, EC \in A \subset R, U \in B \in R$, 则一条“if—then”规则, 可以理解为一个在 $A \times B$ 空间上的模糊蕴涵: $E \times CE \rightarrow U$ 。

3.1.3 模糊化

通常,模糊化器执行一个从清晰点 $X=(e, \alpha)^T \in A$ 到模糊集合 $A' \subset R$ 的映射,这里采用单点模糊化,以偏差 e 为例,该方法将 k 时刻测得的 e_k 模糊化成一个特殊的模糊集 E ,其隶属度函数为:

$$\mu_E(e_k) = \begin{cases} 1.0 & e=e_k \\ 0 & e \neq e_k \end{cases} \quad e \in \text{论域 } E \quad (4)$$

由于对数据进行了归一化,因此 e 的论域通常为 $[-1, 1]$ 闭区间,其它变量亦是如此。

3.1.4 模糊决策

是将模糊形式的输出转化为精确量输出的过程,在这一过程中,采用中心平均法,即将论域 U' 上各离散点 $u_i (i=1, \dots, n)$ 处的隶属度作为权系数进行判决,表达式为:

$$u' = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{U'}(u_i) \circ u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{U'}(u_i)} \quad (5)$$

综合上述步骤,可以得到模糊反馈控制器 C_1 。值得注意的是,按上述步骤建立的模糊控制器其输出形式有两种形式,即 PD 型和 PI 型,若输出变量采用增量形式输出为 PI 型,即其控制的变量是无差的。

3.2 模糊前馈控制器 C_2 的设计

在利用前馈控制来补偿可测干扰的影响中,如果能够精确建立控制对象前向通道与干扰通道的数学模型,并假设系统是线性的,则可以通过传递函数来设计动态前馈补偿器,消除可测干扰对系统输出的影响。然而对于大多数情况,特别是像具有工况变化的高热负荷的锅炉水位对象来说,要建立精确的数学模型非常难,所以采用可利用实际经验的模糊控制理论和技术是解决这一问题的有效途径。

根据 D_g 对 H 的影响规律(见图2),总结出前馈控制规则,对于静态前馈补偿,前馈控制规则的形式可描述为:

$$R_{C_2}^i: \text{if } D_g \text{ is } F^i, \text{ then } u_{c_2} \text{ is } G^i;$$

其中: $R_{C_2}^i, i=1, 2, \dots, m$ 表示用来描述控制规律的第 i 条模糊推理规则, m 为规则的个数, $F^i \in V, i=1, 2, \dots, m, G^i \in V, i=1, 2, \dots, m$ 。

与反馈控制器 C_1 的设计类似,利用模糊前馈控制规则,通过清晰化处理,可以得到前馈补偿 u_{c_2} 和增量型补偿 Δu_{c_2} 。

3.3 监督控制器 C_3 的设计

在反馈控制和前馈控制共同作用下,对于可测的负荷变化 ΔD_g 扰动的影响起到抑制作用,但是对

于锅筒水位这类对象,由蒸汽耗量到锅筒水位通道中存在非最小相位环节,其动态过程表现为当耗量产生变化时,引起锅筒压力的变化,即 $\Delta D_g > 0$ 时,锅筒压力的变化为 $\Delta p < 0$,正如在 2.2 节中论述的,必将导致“虚假水位”的产生,此时反馈控制器会朝着错误的方向调节,导致锅筒水位的振荡。

为此设计一监督控制器 C_3 ,通过锅炉汽压 p 的监测并在汽压变化时产生一监督控制作用,用以抑制“虚假水位”的影响,因为尽管“虚假水位”是由于蒸汽耗量的变化引起,但其变化的剧烈程度却直接与锅筒压力变化有关。

监督控制的基本思想是当锅筒压力的变化为零或较小时,监督控制不起作用,这时反馈与前馈控制正常调节;当锅筒压力变化较大时,由于有“虚假水位”的存在,反馈控制给出的控制作用 u_{c_1} 是错误的,此时应削弱 u_{c_1} ,而主要利用前馈控制作用 u_{c_2} 来调节。

设 $p_e(k) = p(k) - p(k-1)$,即锅筒压力的变化,它作为监督控制器 C_3 的输出变量, u_{c_3} 为监督控制器的输出,假定 u_{c_3} 的论域为 $[0, 1]$ 的闭区间;则若 $u_{c_3} = 1$ 时,相当于监督控制对模糊反馈控制无削弱作用;而当 $u_{c_3} = 0$ 时,相当于将模糊反馈控制切除。根据上述思想,可以建立如下的模糊监督控制规则:

$$R_{C_3}^1: \text{if } |p_e| \text{ is } Z, \text{ then } u_{c_3} = 1;$$

$$R_{C_3}^2: \text{if } |p_e| \text{ is } PL, \text{ then } u_{c_3} = PS;$$

$$R_{C_3}^3: \text{if } |p_e| \text{ is } PM, \text{ then } u_{c_3} = PM;$$

$$R_{C_3}^4: \text{if } |p_e| \text{ is } PS, \text{ then } u_{c_3} = PL.$$

利用上述模糊监督控制规则经清晰化运算,便得到 u_{c_3} 。当锅炉锅筒压力发生变化时, u_{c_3} 的取值应为 $0 < u_{c_3} < 1$,即通过判别压力变化的剧烈程度来决定对反馈控制的修正,有效地抑制了由于“虚假水位”造成控制器误动作而导致控制系统输出的振荡。

4 实验分析

将上述带模糊监督控制的模糊控制律置入由工控机构成的锅炉锅筒水位计算机控制系统,在实验机组上进行了验证研究,该实验机组为 1 341 kW,锅

炉过热蒸汽压力 1.8 MPa, 水位表的可见范围是: ±100 mm, 在主机负荷变化的情况下考察了模糊控制器作用的锅筒水位的变化, 数据见表 1。

表 1 实验数据

主机负荷 扰动	水位正向峰值 /mm	水位负向峰值 /mm	调整时间 /s
增负荷 (+20%)	27.5	-14	120
减负荷 (-20%)	16.5	-17.5	130

研究表明, 在给定工况下, 采用本文的控制方案, 系统超调量较小, 在主机负荷扰动下, 水位的波动在水位表的可见范围内。与机组原有的控制系统相比, 新方案在抑制“虚假水位”对控制系统的影响方面优越性较为突出, 变工况时的动态偏差较小。

5 结 语

本文针对某型船用蒸汽锅炉锅筒水位控制对象, 提出了模糊前馈反馈的方案, 其控制律由模糊前馈控制、模糊反馈控制和模糊监督控制 3 部分组成, 该方案既可以实现锅炉水位的模糊双冲量控制, 又可以抑制最小相位环节的影响。该方案应用于某实验锅炉锅筒水位控制实验, 验证结果表明该控制方案是可行的, 控制品质满足对船用蒸汽锅炉锅筒水位控制的技术要求。

参考文献:

[1] PASSION KEVIN M, STEPHEN YURKOWICH. 模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
 [2] 金以慧, 方崇智. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.

(上接第 416 页)

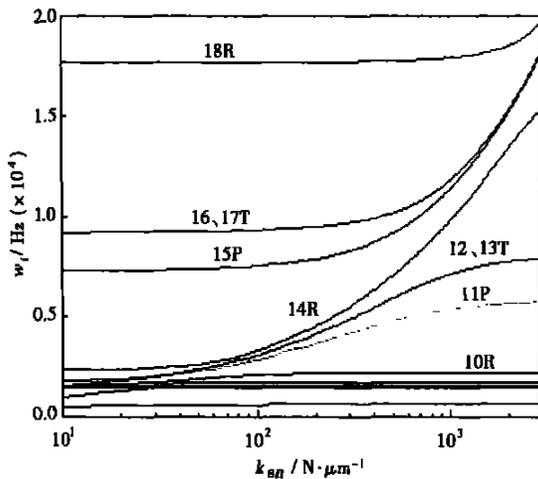


图 6 固有频率与 k_m 关系曲线

图 6 是各阶振动模式固有频率与啮合刚度 k_m 关系曲线, 从图中可以看出 k_m 的变化对 14 阶和 18 阶旋转模式, 12 阶、13 阶、16 阶和 17 阶位移模式, 11 阶和 15 阶行星模式的影响比对其它振动模式的影响大。

5 结 论

- (1) 推导出位移模式 and 行星模式特征值对于太阳轮—行星轮啮合刚度和内齿圈—行星轮啮合刚度的特征值敏感度公式及其与啮合应变能的关系式。
- (2) 计算分析结果表明啮合刚度对高阶振动模式比低阶振动模式的影响大, 这些高阶振动模式包括两个旋转模式、两组位移模式和两个行星模式。

参考文献:

[1] 杨建明. 行星齿轮机构弹性动力学建模[J]. 桂林电子工业学院学报, 2000, 20(2): 48—52.
 [2] 李润方, 王建军. 齿轮系统动力学—振动·冲击·噪声[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
 [3] LIN J, PARKER R G. Analytical characterization of the unique properties of planetary gear free vibration[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1999, 121: 316—321.
 [4] FRISWELL M L. The derivatives of repeated eigenvalues and their associated eigenvector[J]. *Journal of Vibration and Acoustic*, 1996, 118: 390—397.
 [5] FOX R L, KAPOORM P. Rates of change of eigenvalues and eigenvectors[J]. *AIAA Journal*, 1968, 6: 2426—2429.
 [6] MARK, VALCO J. Planetary gear train ring gear and support structure investigation[D]. New York: Cleveland State University, 1992.

network was adopted for network division. The turbulent flow model is of a SST $k-\omega$ one. A wall function method has been adopted for the near-wall location. The coupling of speed and pressure was solved by using a SIMPLEC algorithm. Through calculations obtained were for the gas film-cooled flat plate without ribs and with 45° ribs a flow field distribution and the average temperature and average heat exchange factor at the flat plate inner and outer surface. The calculation results indicate that the channel flow-field structure of the gas film-cooled flat plate with 45° ribs is relatively complicated. The surface average temperature of the flat plate is lower than that of the gas film-cooled flat plate without ribs. However, the cold and hot surface average heat exchange factor near the gas-film pore zone is higher than in the case when no ribs are provided. Furthermore, the presence of ribs is favorable for enhancing cold-air outward flow ratio. **Key words:** rib, gas film cooling, temperature, heat exchange factor, numerical simulation, outward flow ratio

行星齿轮啮合刚度对其振动特性的影响 = **Impact of Planetary-gear Meshing Rigidity on Its Vibration Characteristics** [刊, 汉] / WANG Chun-guang, CHANG Shan, LI Ying-sheng (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 414 ~ 416, 420

A multi-freedom mathematical model was set up for a single-stage straight-tooth planetary gear transmission. Within this system, on the basis of the special features of planetary gear natural frequency and vibration mode, deduced were a formula showing the sensibility of an eigenvalue to meshing rigidity and the relationship between this eigenvalue and meshing strain energy. The results of an analysis indicate that the meshing rigidity has a relatively great influence on the intrinsic characteristics of two rotating modes, two groups of displacement mode and two planetary modes. Through the distribution of meshing strain energy one can clearly detect the influence of meshing rigidity changes on the system intrinsic characteristics. **Key words:** planetary gear, meshing rigidity, vibration characteristics

带监督项的模糊前馈反馈控制在船用锅炉水位控制中应用 = **Fuzzy Feedforward and Feedback Control with a Supervision Item and Its Applications** [刊, 汉] / XIAO Hang, CHEN Bing, NI Ning (Teaching & Research Section of Steam Power, Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033), TIAN Guang (Military Representative Office Resident at Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 417 ~ 420

Because of a "false water level" for the boiler drum, a controlled object in a marine steam power plant and of the difficulty of establishing a precise mathematical model the use of an onventional control strategy often fails to ensure the control quality of the drum water level. In case of high frequency of operating regime changes there often occur such failures as "water overflow" or "boiler dry". To cope with the problem, the authors have proposed a fuzzy feedforward and feedback control scheme with a fuzzy supervision item. Under this control scheme the use of fuzzy feedforward compensation makes it possible to measure the influence of interference to the system output and a fuzzy supervisor is utilized to attenuate the impact caused by a non-minimal relative link. The application of the proposed control scheme on an experimental machine unit has demonstrated its satisfactory results.

电站锅炉安装过程干涉现象的评判方法 = **A Method for Appraising Interference Phenomena during the Hoisting of a Utility Boiler** [刊, 汉] / RUI Xiao-ming, CUI Yan-bin, MA Zhi-yong, (School of Energy & Power Engineering, Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 421 ~ 424

On the basis of a self-developed practical boiler hoisting construction work involving a rapid model building and data structuring a study was undertaken of the computer appraisal technique with regard to the interference phenomena in the hoisting of a utility boiler, making it possible to accurately judge the interference situation of the structural items to be hoisted and already installed items. The utilization of the above technique can be conducive to effectively enhancing the design quality of boiler hoisting scheme, accelerate installation speed and increase construction work cost-effectiveness. **Key words:** boiler erection, interference analysis, CAD