

基于镜像映射原理的LNG液舱压力维持系统 H_∞ 优化控制

吴晓雪¹, 张国庆^{2,3†}, 张卫东³

(1. 大连海洋大学 信息工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026;
3. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要: 针对 LNG 液舱压力维持系统的压差控制问题, 提出一种基于镜像映射原理的 H_∞ 优化控制算法. 对该压力维持系统的非线性数学模型进行线性化处理, 得到一类具有积分不稳定时滞形式的线性模型, 采用镜像映射技术将该模型的不稳定极点映射到其关于虚轴对称的复平面左半平面, 构建其镜像稳定模型. 进而采用 H_∞ 最小灵敏度优化算法设计该镜像稳定模型的控制律, 分析可知, 该控制律能够有效镇定原积分不稳定系统且满足 H_∞ 优化性能要求. 所设计的控制律可等效为 PID 控制串联一个二阶滤波器, 仅需对滤波器的“稳定度”单个参数进行整定, 并引入图形稳定理论对闭环系统中该参数的精确稳定域进行定量分析. 仿真结果验证了所提出算法的有效性和优越性.

关键词: LNG 液舱; 压力维持系统; 镜像映射; 最小灵敏度优化; 鲁棒控制; 图形稳定理论
中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

H_∞ optimized control for pressure maintenance system of LNG tank via the mirror-mapping technique

WU Xiao-xue¹, ZHANG Guo-qing^{2,3†}, ZHANG Wei-dong³

(1. College of Information Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 3. College of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the pressure maintenance problem for the insulation space of liquefied natural gas (LNG) tanks, a H_∞ optimized scheme is proposed based on the mirror-mapping technique. Firstly, the nonlinear model of the pressure maintenance system is linearized around its equilibrium, so as to obtain a kind of integral unstable time-delay model. Using the mirror-mapping technique, the unstable poles of the linear model are mapped onto the left-half complex plane, and the corresponding stable mirror-mapping model is derived. Then, the controller is developed based on the H_∞ minimum sensitivity optimization, and the robust performance for the unstable plant and the mirror-mapping one is equivalent. In addition, the proposed control law can be expressed as a PID control in series with a second order filter, and only one “stability degree” related parameter should be tuned to guarantee the closed-loop performance. The graphical stability criterion is adopted to determine the exact stable region for the related parameter. Finally, the simulation results verify the effectiveness and superiority of the proposed algorithm.

Keywords: LNG tank; pressure maintenance systems; mirror-mapping technique; minimum sensitivity optimization; robust control; graphical stability criterion

0 引 言

液化天然气(liquefied natural gas, LNG)作为一种清洁能源,在生产生活中得到了广泛使用, LNG 船舶运输在 LNG 运输中占有相当大的比例. LNG 的运输储存条件较为苛刻,在常压环境下,需保持零下 160°C 的低温才能保证 LNG 以液态储存(其体积为

同量气体体积的 1/625). LNG 船的建造需克服许多的技术难题,液舱压力维持系统压差控制是 LNG 船建造的重要技术环节之一,对保证 LNG 船舶运输的安全性具有重要意义.

在船舶工业过程控制中, LNG 船液舱压力维持系统是一种典型的不稳定过程,较稳定及临界稳定

收稿日期: 2018-05-17; 修回日期: 2018-08-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909018, 51679024); 辽宁省国际教育“十三五”科研规划项目(18LNGJ006); 辽宁省博士科研启动基金项目(20170520189); 辽宁省自然科学基金项目(20180520039); 大连市科技创新基金项目(2019J12GX026).

责任编辑: 张海涛.

†通讯作者. E-mail: zgq_dlmu@163.com.

过程更加难以控制,其难点主要体现在:1) 闭环系统的右半平面极点使控制过程更容易发散;2) 时滞效应同右半平面极点的耦合作用使控制器设计更为复杂^[1]. 针对不稳定时滞过程的控制问题,国内外学者开展了深入广泛的研究,近年来的主流控制思路包括: Smith 预估器方法^[2-4]、双自由度反馈结构^[5-7]、基于状态观测^[8]的控制器设计、内模控制^[9-11]、滑模变结构控制^[12]等. 文献[2]提出了一种具有局部反馈补偿结构的改进型 Smith 预估器,对大时滞和不稳定模态具有较强的鲁棒性;文献[9]采用了两自由度控制结构,在标称情况下,参考输入和负载干扰响应是完全解耦的,可以分别设计控制器和扰动观测器调节闭环系统响应性能;文献[11]针对不稳定时滞过程设计了一种级联结构的控制器,内环采用内模控制器,外环采用 H_2 优化的 PID 控制器串联滤波器的形式,并依据系统灵敏度的 H_∞ 范数调整 PID 参数. 相比于以上控制方案,基于单位反馈结构的控制系统设计形式更为简单、可靠,易于应用于船舶工程实际. 文献[5-6]以单位反馈结构为基础,分别对多种不稳定过程进行了控制器设计,包括:含有零点动态的一阶时滞不稳定过程、全极点不稳定过程等,并给出了相关设计参数调节的充分必要条件;文献[13-14]提出了一种适用于单位反馈控制结构的镜像映射技术,并证明了不稳定过程及其镜像过程与所提出控制器组成的闭环系统具有相同的稳性性能和鲁棒性.

事实上,多数船舶工业过程都可以采用 PID 控制实现预期调节任务. 基于单位反馈结构的 PID 控制具有形式简捷、计算过程简单、易于工程应用的优点,然而采用传统试凑方法获得 PID 控制器通常存在鲁棒性差、控制器参数整定困难的缺陷^[12]. 为此,文献[7]基于递推劳斯判据提出了一种针对二阶不稳定系统的 PID 控制参数稳定域计算方法;文献[15-16]提出了一种图形稳定性理论,适用于确定控制器参数稳定域,给出的结果更为直观.

基于以上分析,本文采用标准单位反馈结构,基于镜像映射技术和 H_∞ 最小灵敏度优化方法提出一种 LNG 液舱压力维持系统 H_∞ 优化控制算法,并从理论上证明了闭环系统具有与稳定镜像过程等效的鲁棒性能,对比实验结果验证了本文控制策略的有效性. 本文的创新点主要有以下两点:1) 利用本文所提出的算法,设计者只需针对其镜像过程(稳定对象)进行控制器设计,最终控制律具有 PID 控制串联二阶滤波器的形式结构;2) 利用图形稳定性理论,本文给出该算法中唯一的设计参数(即“稳定度”参数)相对于

模型参数的稳定域确定方法. 设计者可更直观地进行参数整定以保证闭环系统的鲁棒性能. 本文提出的 H_∞ 优化控制算法具有形式简捷、鲁棒性强、易于工程应用的优点.

1 基础知识

1.1 LNG 液舱控制模型

本文以占有率最高的薄膜型 LNG 液舱的压力维持系统作为控制对象. 为了保证 LNG 液货操作的安全性,液舱两层绝缘层之间必须保持恒定的压力差. 根据文献[17],绝缘层压差 P_e 和泄放阀流量 u_p 具有如下非线性关系:

$$\rho g \ddot{P}_e = F_r - \kappa \frac{u_p^2}{P_e^2}. \quad (1)$$

其中: κ 为常数,取决于气体的成分; F_r 为非理想状态下的阻尼力; ρ 为 LNG 蒸汽的密度; g 为重力加速度. 易知,式(1)为非线性模型. 为方便后续控制器设计,需在平衡点处对其进行线性化处理,可得流量变化量 Δu_p 到压差变化量 ΔP_e 的线性不稳定时滞模型如下:

$$\bar{G}_p = \frac{\Delta P_e(s)}{\Delta u_p(s)} = \frac{\bar{k}}{s(\bar{\tau}s - 1)} e^{-\bar{\tau}as}. \quad (2)$$

其中: \bar{k} 、 $\bar{\tau}$ 为控制对象参数, $\bar{\tau}_d$ 为时滞参数,均与模型(1)的参数有关. 令 $s = \bar{\tau}s$, $\tau_d = \bar{\tau}_d/\bar{\tau}$, $k = \bar{k}/\bar{\tau}$, 对式(2)进行正则化处理,并应用 Padé 逼近对式(2)所示的时滞项进行处理,即令 $e^{-\tau_d s} \approx (1 - \tau_d s/2)/(1 + \tau_d s/2)$, 可得

$$G_p(s) = \frac{k(1 - \tau_d s/2)}{s(s - 1)(1 + \tau_d s/2)}. \quad (3)$$

本文的控制器设计在单位反馈控制结构的基础上进行,图1给出了标准的单位反馈控制结构.

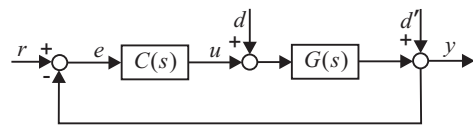


图1 单位反馈控制结构

其中: r 为参考输入; y 为控制输出; e 为误差; u 为控制输入; d 为负载干扰; d' 为输出干扰; $C(s)$ 为控制器; $G(s)$ 为控制对象,即式(3)所示的积分不稳定系统.

1.2 不稳定系统的镜像映射原理

定义1^[13] 对于具有单个或多个位于右半平面极点的系统,将其不稳定极点替换为对应的镜像极点(即,与该不稳定极点关于虚轴对称,且位于复平面左半平面的稳定极点),定义所得的稳定对象为其镜像映射过程. 如式(3)所示的不稳定系统, $s = -1$ 为不稳定极点 $s = 1$ 的镜像极点,下式给

出了其对应的镜像映射过程:

$$G_m(s) = \frac{k(1 - \tau_d s/2)}{s(s+1)(1 + \tau_d s/2)}. \quad (4)$$

引理1 根据定义1, 不稳定系统与其镜像映射过程具有相同的幅频特性曲线. 因此, 如果适当选择设计参数, 以其镜像映射过程为被控对象进行控制器设计仍能够有效镇定原不稳定系统^[13-14], 且闭环系统具有相同的鲁棒稳定性.

1.3 H_∞ 优化基础

对于工业过程的控制器设计, Youla 参数化可以表征所有镇定该过程的控制器^[1]. 对于如图1所示的单位反馈系统, Youla 参数化首先构造能够镇定被控对象 $G(s)$ 的参考输入 r 到控制输入 u 的稳定传递函数 $Q(s)$, 再根据下式构造控制律 $C(s)$:

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - G(s)Q(s)}, \quad (5)$$

$$Q(s) = \frac{C(s)}{1 + G(s)C(s)}. \quad (6)$$

由于非正则传递函数物理上无法实现, 要求 $C(s)$ 具有正则的形式. 已知物理系统 $G(s)$ 通常满足正则条件, 由式(6)可知, $Q(s)$ 应为正则的.

从内模控制角度出发, $Q(s)$ 可视为内模控制器, 其设计应能保证闭环系统所有变量之间的传递函数都是稳定的, 即满足内稳定条件. 下式给出了单位反馈控制结构中从 $r(s)$ 、 $d(s)$ 到 $y(s)$ 、 $u(s)$ 的传递函数关系:

$$\begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \mathbf{H}(s) \begin{bmatrix} r(s) \\ d(s) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

且有

$$\mathbf{H}(s) = \begin{bmatrix} G(s)Q(s) & (1 - G(s)Q(s))G(s) \\ Q(s) & -G(s)Q(s) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

若闭环系统是内稳定的, 则等效为 $\mathbf{H}(s)$ 的所有元素都是稳定的, 即要求 $Q(s)$, $(1 - G(s)Q(s))G(s)$ 稳定.

定义闭环系统的灵敏度函数为 $S(s)$, 本文的控制器设计基于 H_∞ 最小灵敏度优化技术. 为保证 H_∞ 范数的存在性, 并结合上述分析可知, 内模控制器 $Q(s)$ 应当满足如下要求:

- 1) $Q(s)$ 是正则的;
- 2) $Q(s)$ 应满足系统内稳定条件;
- 3) $\lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{S(s)}{s} \right] = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1 - G(s)Q(s)}{s} \right] = 0$.

本文采用系统灵敏度函数 $S(s)$ 与补灵敏度函数

$T(s)$ 的最大奇异值作为鲁棒性能指标, 见下式:

$$M_S = \bar{\sigma}(S(s)) = \max_{\omega} \left| \frac{1}{1 + C(j\omega)G(j\omega)} \right|,$$

$$M_T = \bar{\sigma}(T(s)) = \max_{\omega} \left| \frac{C(j\omega)G(j\omega)}{1 + C(j\omega)G(j\omega)} \right|. \quad (9)$$

为了保证系统的鲁棒稳定性及对参考信号的跟踪能力, $S(s)$ 在低频段应尽可能小, 而为了避免执行机构试图抑制高频噪声而进行有害的抖动, 在高频段 $S(s) \rightarrow 1$. 此外, 补灵敏度函数 $T(s)$ 的成形应尽量保证闭环频谱 $|T(j\omega)|$ 无峰值.

2 控制器设计

按照 H_∞ 最小灵敏度优化设计的要求, 设计控制器满足 $\min \|W(s)S_m(s)\|_\infty$, 其中 $S_m(s)$ 为镜像映射过程的灵敏度函数, $W(s)$ 为权值函数. 本文选取阶跃信号为参考信号, 因此 $W(s) = 1/s$. 由式(4)可得

$$\|W(s)S_m(s)\|_\infty = \|W(s)(1 - G_m(s)Q(s))\|_\infty = \left\| \frac{1}{s} \left[1 - \frac{k(1 - \tau_d s/2)Q(s)}{s(s+1)(1 + \tau_d s/2)} \right] \right\|_\infty. \quad (10)$$

又知 G_m 有唯一右半平面零点 $2/\tau_d$, 且控制器设计要求 $W(s)S_m(s)$ 稳定. 根据最大模态定理可得

$$\|W(s)S_m(s)\|_\infty \geq \|W(s)S_m(s)\|_{s=2/\tau_d} = \frac{\tau_d}{2}. \quad (11)$$

可知 $\min \|W(s)S_m(s)\|_\infty = \tau_d/2$, 由此设计最优化的内模控制器如下:

$$Q_{\text{opt}} = \frac{s(s+1)(1 + \tau_d s/2)}{k}. \quad (12)$$

由式(12)易知, 内模控制器 Q_{opt} 不具备正则的形式, 不符合内稳定条件. 为了保留优化控制器的性能, 同时使控制器满足要求, 引入下式所示的低通滤波器对 Q_{opt} 进行串联, 即 $Q(s) = Q_{\text{opt}}(s)f(s)$.

$$f(s) = \frac{A(s)}{(\lambda s + 1)^n}. \quad (13)$$

其中: $\lambda > 0$ 为滤波器的设计参数, 其值的选取直接影响了系统的稳定性, 故称为稳定度; $A(s)$ 为满足 $A(0) = 1$ 的有理分数式, 滤波器阶数 n 的选取必须保证 $Q(s)$ 的正则性. 由式(11)可知: 当控制输入为低频时, $f(s) \approx 1$, 进而有 $|W(s)S_m(s)| \approx \tau_d/2$, 闭环系统保留了 H_∞ 优化的鲁棒性能; 当控制输入为高频时, 优化性能不满足. 因为最优解不能工程实现, 所以只能得到控制器的次优解, 由式(5)可得

$$C_{\text{act}}(s) = \frac{A(s)s(s+1)(1 + \tau_d s/2)}{k((\lambda s + 1)^n - A(s)(1 - \tau_d s/2))}. \quad (14)$$

式(14)所示的控制器可表达为PID控制串联二阶滤波器的形式, 即

$$C_{\text{act}}(s) = \frac{1}{k} \cdot \frac{\beta_2 s^2 + \beta_1 s + 1}{s} \cdot \frac{s + 1}{\alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}. \quad (15)$$

对于积分不稳定过程 $G_p(s)$, 选择滤波器 $f(s)$ 的参数 $n = 4$, $A(s) = \beta s + 1$, 其中 $\beta = 4\lambda + \tau_d/2$ 可由约束条件 $\lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1 - G_m(s)Q(s)}{s} \right] = 0$ 进行求解, 控制

器参数如下:

$$\begin{cases} \beta_2 = \frac{\beta\tau_d}{2}, \beta_1 = \beta + \frac{\tau_d}{2}; \\ \alpha_2 = \lambda^4, \alpha_1 = 4\lambda^3, \alpha_0 = 6\lambda^2 + \frac{\beta\tau_d}{2}. \end{cases} \quad (16)$$

由式(15)和(16)可知,控制器参数由过程参数和稳定度 λ 计算确定,且过程参数已知,仅需调节单个稳定度参数即可实现对控制器(15)的调整.

3 稳定性分析

定理1 对于LNG液舱压力维持系统压差控制问题, $G_m(s)$ 为不稳定模型 $G_p(s)$ 的镜像映射过程.以标准单位反馈控制结构为基础,当且仅当 $C_{act}(s)$ 能够有效镇定其镜像映射过程(4)且具有最优性能,即 $\min \|W(s)S_m(s)\|_\infty$ 时,由不稳定过程(3)和控制律(15)构成的闭环控制系统满足 H_∞ 优化性能要求,其中 $S_m(s) = 1/(1 + G_m(s)C_{act}(s))$ 表示对应的灵敏度函数.

证明 该算法以图1所示的标准单位反馈控制结构为基础,选取 $\|W(s)S_p(s)\|_\infty$ 为优化性能指标.根据 ∞ -范数的定义,存在如下不等式关系:

$$\|W(s)S_p(s)\|_\infty \geq \frac{\|W(s)S_m(s)\|_\infty}{\left\| \frac{S_m(s)}{S_p(s)} \right\|_\infty}, \quad (17)$$

其中 $S_m(s)$ 、 $S_p(s)$ 分别表示以 $G_m(s)$ 、 $G_p(s)$ 为被控对象闭环系统的灵敏度函数.

进一步,根据灵敏度函数的定义可得

$$\begin{aligned} \left\| \frac{S_m(s)}{S_p(s)} \right\|_\infty &= \left\| \frac{1 + G_p(s)C_{act}(s)}{1 + G_m(s)C_{act}(s)} \right\|_\infty = \\ &= \left\| \frac{(s-1)(\lambda s+1)^n + A(s)(s+1)(1-\tau_d s/2)}{(s-1)(\lambda s+1)^n + (s-1)A(s)(s+1)(1-\tau_d s/2)} \right\|_\infty. \end{aligned} \quad (18)$$

结合上述控制器设计过程,对于镜像映射稳定系统 $G_m(s)$,控制律(15)在右半平面零点 $2/\tau_d$ 处获得最优鲁棒性能 $\min \|W(s)S_m(s)\|_\infty$.由式(18)可知,对于该性能点, $\|S_m(s)/S_p(s)\| = 1$.因此,由不稳定过程(3)和控制律(15)构成的闭环控制系统同样满足 H_∞ 优化性能要求,即 $\min \|W(s)S_p(s)\|_\infty = \tau_d/2$. \square

接下来,对控制器(15)参数的稳定域进行分析.因为被控过程(3)的模型参数 τ 和 τ_d 均为已知,控制器参数 β_1 、 β_2 、 α_0 、 α_1 、 α_2 只取决于 λ ,见式(16).假设 β_1 、 β_2 为两个独立的变量,为便于区分,将其记作 β_{set1} 和 β_{set2} .基于图形稳定性理论对其稳定域进行分析,不稳定系统的开环传递函数可整理为

$$\begin{aligned} O(s) &= G_p(s)C_{act}(s) = \\ &= \frac{(\beta_{set2}s^2 + \beta_{set1}s + 1)(s + 1)}{s^2(s - 1)(\alpha_2s^2 + \alpha_1s + \alpha_0)} e^{-\tau_d s}. \end{aligned} \quad (19)$$

进一步可得闭环系统特征多项式如下:

$$\begin{aligned} \Delta(s) &= s^2(s - 1)(\alpha_2s^2 + \alpha_1s + \alpha_0)e^{\tau_d s} + \\ &= (\beta_{set2}s^2 + \beta_{set1}s + 1)(s + 1). \end{aligned} \quad (20)$$

为求解 $\Delta(s) = 0$ 的复数根,假设该多项式的根具有 $s = x + iy$ 的复数形式.根据文献[15-16],闭环系统处于不稳定状态可等效为多项式(20)在 $y \in [0, +\infty)$ 的空间内有右半平面的根.以下分两种情形对该多项式的根进行讨论.首先,对于 $y = 0, x \geq 0$ 情况, $\Delta(s) = 0$ 可以等效为

$$\beta_{set2} = -\frac{\beta_{set1}}{x} - \frac{1}{x^2} - \frac{(x-1)(\alpha_2x^2 + \alpha_1x + \alpha_0)e^{\tau_d x}}{x+1}. \quad (21)$$

在 $\beta_{set2}-\beta_{set1}$ 的平面内:当 $x > 0$ 时, β_{set2} 和 β_{set1} 具有负梯度的线性关系;当 $x = 0$ 时,特征多项式(21)等效为直线 $\beta_{set1} = 0$.以 $\tau_d = 0.2, \lambda = 0.12$ 为例,在 $\beta_{set2}-\beta_{set1}$ 平面绘制直线(21),具有正实数根的不稳定集合即为图2中左侧实线扫过的区域.

对于特征多项式 $\Delta(s) = 0$ 含有复数不稳定根的情况,只需考虑 $y > 0, x = 0$,即可确定参数稳定集与不稳定集的边界.将 $s = iy$ 代入式(20),整理可得

$$\Delta(iy) = \Delta_r(y) + i\Delta_i(y). \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta_r(y) &= \\ &= C(\lambda, y) \cos\left(\tau_d y + \pi + \arctan(-y) + \arctan\left(\frac{\alpha_1 y}{\alpha_0 - \alpha_2 y^2}\right)\right) + 1 - \beta_{set1} y^2 - \beta_{set2} y^2, \\ \Delta_i(y) &= \\ &= C(\lambda, y) \sin\left(\tau_d y + \pi + \arctan(-y) + \arctan\left(\frac{\alpha_1 y}{\alpha_0 - \alpha_2 y^2}\right)\right) + y + \beta_{set1} y - \beta_{set2} y^3, \\ C(\lambda, y) &= -\sqrt{y^4(1+y^2)[(\alpha_0 - \alpha_2 y^2)^2 + \alpha_1^2 y^2]}. \end{aligned}$$

特征多项式(22)含有虚轴上的根,可等效为 $\Delta_r(y) = 0, \Delta_i(y) = 0$.此时, β_{set1} 与 β_{set2} 可通过下式求解:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \beta_{set1} \\ \beta_{set2} \end{bmatrix} &= \mathbf{J}^{-1} \left[-C(\cdot) \cos\left(\tau_d y + \pi + \arctan(-y) + \arctan\left(\frac{\alpha_1 y}{\alpha_0 - \alpha_2 y^2}\right)\right) - 1, \right. \\ &\quad \left. -C(\cdot) \sin\left(\tau_d y + \pi + \arctan(-y) + \arctan\left(\frac{\alpha_1 y}{\alpha_0 - \alpha_2 y^2}\right)\right) - y \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

其中: \mathbf{J} 为 β_{set1} 和 β_{set2} 对于 $\Delta_r(\cdot)$ 和 $\Delta_i(\cdot)$ 的Jacobian矩阵.当 $y > 0$ 时, $\det[\mathbf{J}] = y^3(1+y^2) > 0$,故 \mathbf{J}^{-1} 存

在. 随着 y 的增长,可以确定唯一一条 $(\beta_{set1}, \beta_{set2})$ 曲线. 根据图形稳定性理论,若 $\det[\mathbf{J}] = y^3(1 + y^2) > 0$,则参数的不稳定集在该曲线上随着 y 的增长而向右侧延伸. 因此,图2中右侧填充区域 Ω_β 为不稳定过程 $G_p(s)$ 的 β_{set1} - β_{set2} 稳定域. 由式(15)和(16)可知, β_1 和 β_2 的位置取决于 λ 、 τ_d 、 τ 三个参数,其中 τ 为已知,当时滞参数 τ_d 给定以后,可以确定稳定度参数 λ 的稳定域. 当且仅当 $\lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ 时,存在 $(\beta_1, \beta_2) \in \Omega_\beta$.

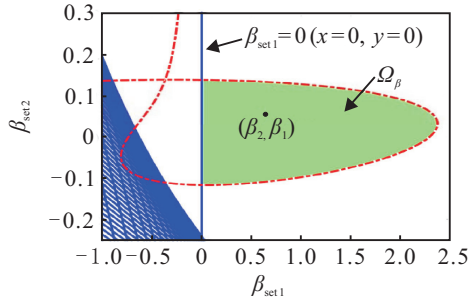


图2 由式(21), (23)确定的 β_{set2} - β_{set1} 曲线

4 仿真实验

本文参考文献[17]中LNG液舱绝缘层压力维持系统模型,在平衡点 $P_{e0} = 5.0 \text{ mbar}$, $u_{p0} = 42 \text{ m}^3/\text{h}$ 处对该系统进行如式(2)所示的线性化处理,可得线性模型如下:

$$\bar{G}_p(s) = \frac{\Delta P_e(s)}{\Delta u_p(s)} = \frac{3.25}{s(s - 0.78)} e^{-0.25s}. \quad (24)$$

对式(24)进行如式(3)所示的正则化处理,可以得到 $G_p(s) = 5.342/s(s - 1)e^{-0.195s}$. 选取压差参考值为 $P_e = 6 \text{ mbar}$,即 $\Delta P_e = 1 \text{ mbar}$,控制流量变化为 Δu_p .

根据以上设计,首先确定 $G_p(s)$ 的 λ 参数稳定域如图3所示.

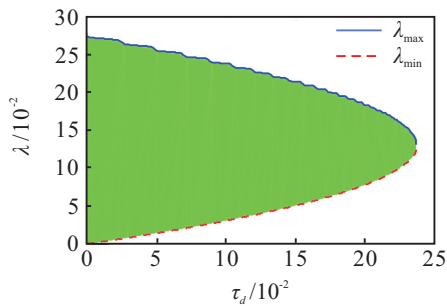


图3 $G_p(s)$ 的 λ 参数稳定域

已知标准化的系统有 $\tau_d = 0.195$,在 λ 的稳定域内选取 $\lambda = 0.1$,根据式(15)和(16)设计控制器,并进行反正则化,可得实际的控制律为

$$C_{act}(s) = \frac{1}{5.342} \cdot \frac{0.1s^2 + 0.8s + 1}{s} \cdot \frac{1.282s + 1}{0.0003s^2 + 0.0084s^2 + 0.16}. \quad (25)$$

将本文控制策略同文献[3]中基于Smith预估器的控制策略进行对比,在 $t = 0 \text{ s}$ 时给定阶跃参考信号 $r(t) = 1 \text{ mbar}$,在 $t = 30 \text{ s}$ 时施加 $d = -1 \text{ m}^3/\text{h}$ 的负载干扰. 为了验证控制策略对模型不确定的鲁棒稳定性,选取该压力维持系统的摄动模型如下:

$$\bar{G}_{p\Delta}(s) = \frac{2.925}{s(s - 1.014)} e^{-0.2s}. \quad (26)$$

考虑到篇幅有限,图4直接给出了模型存在不确定摄动情况下系统响应及控制输入对比结果.

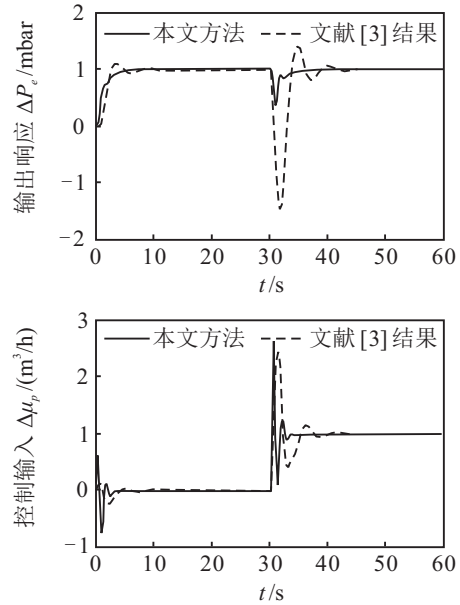


图4 输出响应及控制输入: 摄动模型

由实验结果可知,本文控制策略响应更快,且没有超调. 在30s处,本文控制策略波动更小,抗干扰能力强. 与标称条件下结果相比,本文控制策略对摄动模型同样有效,且控制效果变化不大,优于文献[3]的结果. 为了进一步定量描述本文算法的优越性,图5给出了两种控制策略下灵敏度函数 $S(s)$ 、补灵敏度函数 $T(s)$ 曲线的对比结果.

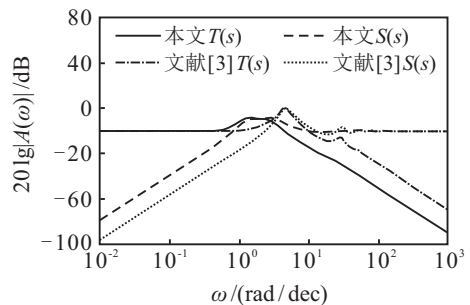


图5 灵敏度函数 $S(s)$ /补灵敏度函数 $T(s)$ 对比

在图5中:采用本文控制策略,灵敏度函数最大奇异值 $M_S = 5.57$,补灵敏度函数最大奇异值 $M_T = 6.05$;对于文献[3]中的控制结果, $M_S = 8.72$, $M_T = 8.41$. 很明显,本文控制策略相比文献[3]中结果提升

了闭环系统鲁棒性能,且控制器结构简捷实用.

5 结论

本文提出了一种基于镜像映射技术的LNG液舱绝缘层压力维持系统的 H_∞ 鲁棒控制算法.该算法中,只需针对该不稳定系统的镜像映射稳定过程进行 H_∞ 最小灵敏度优化设计.相比于其他基于不稳定系统模型本身的控制器设计方案,本文提出的控制律形式简捷,仅需要调节单个“稳定度”参数.最终控制律可表达为PID控制串联二阶滤波器的形式,在保证优化鲁棒性能的同时,易于应用于工程实际.最后,利用图形稳定性理论确定了控制器稳定度参数的合理选取范围.本文提出的控制策略不仅适用于LNG液舱压力维持系统这类积分不稳定系统,对于其他类型的不稳定系统同样可获得具有泛化形式(14)的控制器,具有重要的推广价值.

参考文献(References)

- [1] Zhang W D. Quantitative process control theory[M]. New York: CRC Process, 2011: 217-218.
- [2] Zhang W D, Gu D, Wang W, et al. Quantitative performance design of performance design of a modified Smith predictor for unstable processed with time delay[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43(1): 56-62.
- [3] Mataušek M I, Ribić A I. Control of stable, integrating and unstable processes by the modified smith predictor[J]. Journal of Process Control, 2012, 22(1): 338-343.
- [4] 张国山,刘晓红. 不稳定和积分时滞过程的Smith预估器设计[J]. 天津大学学报, 2007, 40(1): 104-109. (Zhang G S, Liu X H. Smith predictor design for unstable and integrating processes with dead time[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(1): 104-109.)
- [5] Lee S C, Wang Q G, Nguyen L B. Stabilizing control for a class of delay unstable processes[J]. ISA Transactions, 2010, 49(3): 318-325.
- [6] Lee S C, Wang Q G, Xiang C. Stabilization of all-pole unstable delay processes by simple controllers[J]. Journal of Process Control, 2010, 20(2): 235-239.
- [7] Qiu H S, Jobrun N D. Stabilization and PID tuning algorithms for second-order unstable processes with time-delays[J]. ISA Transactions, 2017, 67(3): 233-245.
- [8] Basilio D, Juan F, Martin V, et al. On the control of unstable first order linear systems with large time lag: Observer based approach[J]. European Journal of Control, 2012, 18(5): 439-451.
- [9] 刘涛,张卫东,顾诞英. 化工不稳定时滞过程鲁棒控制的解析设计[J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 575-578. (Liu T, Zhang W D, Gu D Y. Analytical design of robust control for unstable chemical and industrial processes with time delay[J]. Control and Decision, 2005, 20(5): 575-578.)
- [10] 张井岗,秦娜娜. 串级不稳定时滞过程的内模控制器设计[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(1): 38-45. (Zhang J G, Qin N N. Design method of IMC controllers for unstable cascade processes with time delay[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(1): 38-45.)
- [11] Dasari P R, Alladi L, Rao A S, et al. Enhanced design of cascade control systems for unstable processes with time delay[J]. Journal of Process Control, 2016, 45(9): 43-54.
- [12] Ablay G. Variable structure controllers for unstable processes[J]. Journal of Process Control, 2015, 32(8): 10-15.
- [13] Zhang X K, Zhang G Q. Stabilization of pure unstable delay systems by the mirror mapping technique[J]. Journal of Process Control, 2013, 23(10): 1465-1470.
- [14] Zhang G Q, Zhang X K. Stability analysis and design of integrating unstable delay processes using the mirror-mapping technique[J]. Journal of Process Control, 2014, 24(7): 1038-1045.
- [15] Wang D J. A PID controller set of guaranteeing stability and gain and phase margins for time-delay systems[J]. Journal of Process Control, 2012, 22(7): 1298-1306.
- [16] Wang D J, Gao X L. H_∞ design with fractional-order PD ^{μ} controllers[J]. Automatica, 2012, 48(5): 974-977.
- [17] Gómez J R, Gómez M R, Bernal J L, et al. Analysis and efficiency enhancement of a boil-off gas reliquefaction system with cascade cycle on board LNG carriers[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 94(4): 261-274.

作者简介

吴晓雪(1989—),女,实验师,从事鲁棒控制、过程控制的研究, E-mail: xuexidaxue@126.com;

张国庆(1987—),男,副教授,博士,从事船舶运动控制、鲁棒控制、自适应控制的研究, E-mail: zgq_dlmu@163.com;

张卫东(1967—),男,教授,博士生导师,从事定量过程控制、鲁棒控制及其在船舶控制系统中应用等研究, E-mail: wdzhang@sjtu.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)