

开卷系统速度和张力的鲁棒控制

曾强龙, 徐伟民

(武汉工业学院, 武汉 430023)

摘要: 开卷过程中的速度和张力系统具有时变、强耦合的特点, 为了提高系统的控制性能, 采用了多变量 H_∞ 鲁棒控制策略。建立了带结构化扰动的系统模型, 用结构奇异值方法对控制系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能进行了分析。仿真结果表明, 所设计的控制器能满足闭环系统稳定性和抗干扰性能要求。

关键词: 速度与张力控制; 鲁棒控制; 鲁棒稳定性; 鲁棒性能

中图分类号: TB484.1; TB486⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)01-0075-05

Robust Control of Velocity and Tension of Unwinding System

ZENG Qiang-long, XU Wei-min

(Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: The velocity and tension system in unwinding process has the features of time-varying and strong coupling. To improve its control quality, a multivariable H_∞ control strategy was applied. The system model with structured perturbations was established, the structured singular method was used to analyze the robust stability and robust performance of the system. Simulation results showed that the controller satisfies stability and anti-interference requirements of closed loop system.

Key words: velocity and tension control; robust control; robust stability; robust performance

卷绕过程是工业生产中十分常见的工艺过程, 在造纸、钢铁和纺织等行业中有着重要应用。卷绕设备在稳态运行时一般要求带材输送的速度和张力维持恒定, 而带材的速度和张力是一对强耦合的物理量, 难以单独控制; 此外卷绕系统存在模型参数摄动和各种干扰等不确定性, 这些都是控制系统设计中必须考虑的问题^[1]。目前许多工业生产中的带材输送系统采用了分散式的 PI 型控制器, 但学者们已提出了许多更有效的控制策略, 如 LQG (线性二次型最优控制) 或 H_∞ 等^[2]。采用多变量 H_∞ 控制器的鲁棒控制策略已应用于各种规模的卷绕系统中^[3-5]。为了使基于模型设计的控制器更好地应用于实际, 需要完整地分析带有干扰、结构和非结构不确定性的闭环系统的鲁棒性。Knittel^[6]等人提出的 H_∞ 和 2-DOG (二自由度) H_∞ 鲁棒控制器达到了一定的可分析化的鲁棒性能, 但没有系统地给出鲁棒性能的分析。Laroché^[7] 和 Knittel 采用了基于 LFR (线性分式表述)

和 μ (结构奇异值) 理论的鲁棒分析方法, 但没有考虑干扰和不确定性。Xijiang Dou^[8] 等人将参数不确定性纳入 LFT (线性分式变换) 框架中, 并用 μ 方法进行了系统鲁棒性分析。

笔者根据瓦楞纸原纸开卷过程中各变量间的耦合关系, 建立速度和张力系统的动态模型, 针对该多变量系统的参数摄动, 给出相应的结构化不确定性线性分式模型, 以提高速度和张力控制精度为指标, 采用 H_∞ 控制器设计方法, 并用 μ 方法分析参数摄动系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能, 最后对控制系统进行仿真。

1 系统模型

瓦楞纸原纸开卷系统结构见图 1: 原纸由开卷辊放出, 经瓦楞轧辊被轧制成瓦楞形后, 送入下一生产环节。其中电机 2 为主电机, 控制系统卷材输送速

收稿日期: 2011-09-22

基金项目: 武汉工业学院研究生创新计划项目(2010cx019)

作者简介: 曾强龙(1987—), 男, 湖北汉川人, 武汉工业学院硕士生, 主攻包装机械智能控制及仿真研究。

$$\|T_{zw}\|_{\infty} = \sup_{\omega} \sigma_{\max}[T_{zw}(j\omega)] \leq \gamma \quad (7)$$

加权函数旨在调整系统被控制输出 z 的幅频特性。性能加权函数 $W_e(s)$ 在某一特定的频率范围内限制灵敏度函数 S 的幅值。由于开卷系统的参数摄动会产生低频扰动,因此 $W_e(s)$ 应该在低频处有较大的增益以抵抗低频扰动。 $W_e(s)$ 一般采用如下的结构^[8]:

$$W_e(s) = \frac{s + M\omega_b}{M(s + \epsilon\omega_b)} \quad (8)$$

其中: M 是 S 函数峰值; ϵ 为允许稳态输出误差; ω_b 为要求的频带宽。 $W_u(s)$ 用于避免产生过大的控制信号,频率加权函数的最终取值如下:

$$W_e(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.2s+8}{s+0.01} & 0 \\ 0 & \frac{0.2s+10}{s+0.01} \end{bmatrix}$$

$$W_u(s) = 10^{-2} I_{2 \times 2}$$

受控对象参数的选取: $R_a = 0.5 \Omega$, $L = 0.01 H$, $C_e = 0.132$, $i = 20$, 开卷辊初始半径 $R_1 = 0.5 \text{ m}$, 结束半径为 0.1 m , $R_2 = 0.1 \text{ m}$, $J = 0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $f = 0.1$, $\delta_R = 0.8$ 。将初始状态的模型作为受控对象的标称模型。使用 Matlab 鲁棒工具箱迭代计算得到了相应的 H_{∞} 控制器 K_{lin} 和闭环系统 clp 的矩阵,得到闭环系统的 H_{∞} 范数为 $0.375 < 1$,那么同时也应该满足相应的标称性能条件:

$$\|W_e(I + GK)^{-1}\|_{\infty} < 1 \quad (9)$$

这可以通过计算闭环系统灵敏度函数 S 的最大奇异值并将其与性能加权函数 $W_e(s)$ 的逆进行比较而得到验证^[9]。比较的结果见图 3,可以看出低频段

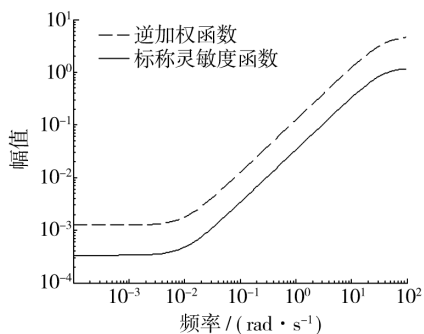


图 3 闭环灵敏度函数

Fig. 3 Sensitivity function of closed-loop system

的灵敏度函数最大奇异值曲线在 $W_e(s)$ 逆曲线的下方。

3 系统鲁棒性分析

采用结构奇异值理论分析系统鲁棒性需要将 LFT 标准框架转化为 Δ - M 结构,见图 4。 M 由 P 和

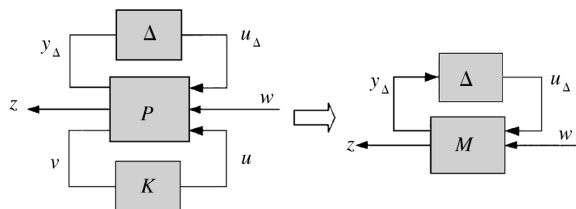


图 4 Δ - M 框架

Fig. 4 The Δ - M framework

K 的下回路线性分式变换获得, Δ 为结构化的不确定摄动块,结构奇异值 μ 的定义: $\mu_{\Delta}(M) = (\min\{\bar{\sigma}(\Delta) : \Delta \in \Delta_S, \det(I - M\Delta) = 0\})^{-1}$ 。 Δ_S 是 Δ - M 结构中所有可能的摄动块。下列定理给出了鲁棒稳定性和鲁棒性能充要条件:

令 RH_{∞} 为所有实有理真的稳定的传递函数集合,相应的块结构的集合:

$$\Theta(\Delta_S) = \{(\Delta_S) \in RH_{\infty} : \text{Res} \geq 0\}$$

定理 1: 设 $\beta > 0$, 对于所有满足 $\Delta(s) \in \Theta(\Delta_S)$ 且 $\|\Delta\|_{\infty} < \beta$, 反馈控制系统是良定的和内部稳定的充分与必要条件是:

$$\sup_{\omega \in \mathbb{R}} \mu_{\Delta_S}[M(j\omega)] < \beta \quad (10)$$

$$\Delta_p = \left\{ \begin{bmatrix} \Delta & 0 \\ 0 & \Delta_f \end{bmatrix} : \Delta \in \Delta_S, \Delta_f \in C^{n_z \times n_d} \right\}, \Delta_f \text{ 的}$$

维数由 M 的右下角块 M_{22} 决定。

定理 2: 设 $\beta > 0$, 对于所有满足 $\Delta(s) \in \Theta(\Delta_S)$ 且 $\|\Delta\|_{\infty} < \beta$, 反馈控制系统是良定的, 而且满足 $\|F_u(M, \Delta)\|_{\infty} \leq \beta$ 的充分与必要条件是:

$$\sup_{\omega \in \mathbb{R}} \mu_{\Delta_p}[M(j\omega)] \leq \beta \quad (11)$$

通过计算定理 1 和 2 的 μ 值频率响应, 得到相应的闭环系统性能曲线, 见图 5 和 6, 从图 5 可以看出 μ 值上界峰值为 0.45, 这意味着对于所有结构化的扰动 $\|\Delta\|_{\infty} < \frac{1}{0.45}$, 系统都是保持稳定的。而图中表征非结构化扰动的最大奇异值曲线超过了 1, 可以看出若不确定性是非结构化的, 得到的鲁棒稳定性分析的结果是保守的。

从图 6 中可以看出标称性能曲线最大值为 0.32,

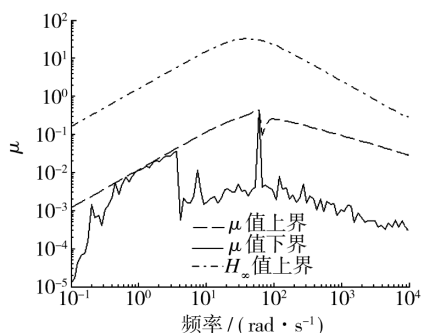


图 5 鲁棒稳定性分析
Fig. 5 Robust stability analysis

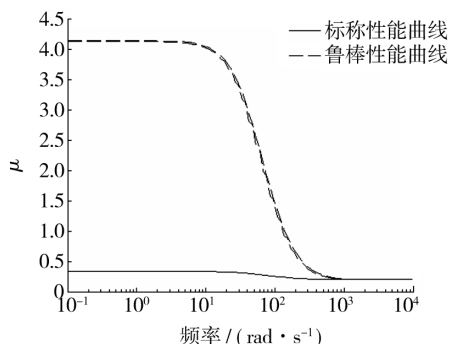


图 6 鲁棒性能分析
Fig. 6 Robust performance analysis

而鲁棒性能的 μ 值曲线最大值为 4.16,这就意味着只有对于 $\|\Delta\|_{\infty} < \frac{1}{4.16}$ 的摄动块才能达到标准鲁棒性能。

对控制系统的瞬态响应进行仿真,得到一组受参数扰动的阶跃响应曲线,见图 7。可以看出系统具有

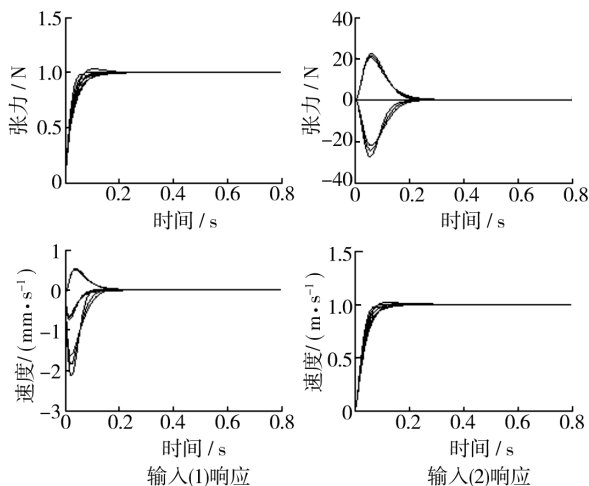


图 7 受扰系统瞬态响应比较

Fig. 7 Transient response comparison of perturbed system

比较好的标称性能,但在最坏情况下,张力会出现一定的波动。不考虑系统参数扰动的影响,对 H_{∞} 和常规 PI 控制器的控制系统的性能进行仿真比较,得到的阶跃响应曲线见图 8;2 种控制方式的性能指标比

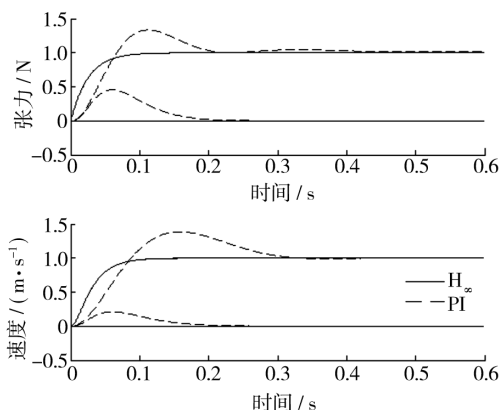


图 8 H_{∞} 和 PI 控制器仿真比较
Fig. 8 Simulation comparison of H_{∞} and PI

较见表 1。可以看出集中控制的 H_{∞} 控制器的性能优于分散式控制的 PI 控制器。

表 1 系统的标称控制性能指标比较

Tab.1 Comparison of nominal control
performance index of the system

控制器	上升时间 t_r/s		峰值时间 t_p/s		超调量 $\sigma/\%$	
	T	v	T	v	T	v
PI	0.070	0.092	0.110	0.157	37	32
H_{∞}	0.101	0.112	0.101	0.112	0	0

4 结语

上述分析表明了 H_{∞} 设计在设计指标和加权函数中虽然考虑了不确定性和鲁棒性,但它在最坏情况下的控制导致了不必要的保守性;而且对鲁棒稳定性的保守性使得 H_{∞} 忽略了鲁棒性能设计。这说明可以进一步尝试用 μ 综合方法设计控制器以获取更好的性能,但 μ 综合方法存在设计出的控制器阶数过高的问题,因此 H_{∞} 设计具有更好的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 雷菊珍,王保升,汪木兰. 基于 CMAC 的恒张力控制系统研究[J]. 包装工程,2009,30(8):12-15.
LEI Ju-zhen, WANG Bao-sheng, WANG Mu-lan. Study of Constant Tension Control System Based on CMAC [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(8): 12-15.

- [2] KNITTEL D, VEDRINES M, HENRION D, et al. Robust H_{∞} Fixed Order Control Strategies for Large Scale Web Winding Systems[C]. Proceedings of IEEE Conference on Control Application, Munich, Germany: IEEE, 2009.
- [3] BENLATRECHE A, KNITTEL D, OSTERTAG E. Robust Decentralized Control Strategies for Large Scale Web Handling Systems[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(6): 736—750.
- [4] BENLATRECHE A, OSTERTAG E, KNITTEL D. H_{∞} -feedback Decentralized Control by BMI Optimization for Large Scale Web Handling Systems[C]. Proceedings of American Control Conference, Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2006: 619—625.
- [5] KOC H, KNITTEL D, MATHELIN M, et al. Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(2): 197—208.
- [6] KNITTEL D, LAROCHE E, GIGAN D, et al. Tension Control for Winding Systems with Two Degrees of Freedom H_{∞} Controller[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2003, 39(1): 113—120.
- [7] LAROCHE E, KNITTEL D. An Improved Linear Fractional Model for Robustness Analysis of a Winding System[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(5): 659—666.
- [8] DOU X, WANG W. Robust Control of Multistage Printing Systems[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(3): 219—229.
- [9] GU D W, PETKOV P H, KONSTANTINOV M M. Robust Control Design with MATLAB[M]. Springer, 2005.

~~~~~  
(上接第 53 页)

- LIU Bing-yue, YAO Shu-wei, LIU Yang. The Making of Antibacterial Paper by Surface Spraying [J]. Shanghai Pulp and Paper Industry, 2006, 37(6): 53—57.
- [8] 刘秉钺, 姚姝妮, 刘阳. 采用浆内添加方法生产抗菌纸的研究[J]. 上海造纸, 2007, 38(1): 54—58.
- LIU Bing-yue, YAO Shu-wei, LIU Yang. The Making of Antibacterial Paper by Internal Adding [J]. Shanghai Pulp and Paper Industry, 2007, 38(1): 54—58.
- [9] 张美云, 郭惠萍. 季铵盐壳聚糖的制备及其在抗菌纸中的应用[M]. 中国造纸, 2008, 27(2): 14—17.
- ZHANG Mei-yun, GUO Hui-pin. Preparation of Quaternary Ammonium Salt of Chitosan and Its Application in Antibacterial Paper[J]. China Pulp and Paper Industry, 2008, 27(2): 14—17.
- [10] 杨平平, 田新娟, 王辉, 等. 火焰原子吸收光谱法测定载银沸石中银[J]. 稀有金属快报, 2008, 27(10): 40—42.
- YANG Pin-pin, TIAN Xin-juan, WANG Hui, et al. Determination of Silver in the Silver—Supporting Zeolite by Flame Atomic Absorption Spectrometry[J]. Rare Metals Letters, 2008, 27(10): 40—42.
- [11] HARRIGAN W F. 食品微生物实验室手册[K]. 北京: 中国轻工业出版社, 2004.
- HARRIGAN W F. Food Microbiology Laboratory Manual[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2004.
- [12] 朱艳静, 李爽, 李宇. 纸和纸制品防霉抗菌效果检测方法[J]. 造纸化学品, 2004(3): 57—59.
- ZHU Yan-jing, LI Shuang, LI Yu. Mould-proof on Paper Products[J]. Paper Chemicals, 2004(3): 57—59.
- [13] GB/T 4768—2008, 防霉包装[S].
- GB/T 4768—2008, Mold Packaging[S].
- [14] 杨飞. 造纸用无机载体抗菌沸石及抗菌纸的研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2007.
- YANG Fei. Study on Inorganic Antibacterial Carrier Zeolite for Paper Substrate and Application in Antibacterial Paper[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2007.
- [15] 高向华. 银沸石复合抗菌剂的制备及性能研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2001.
- GAO Xiang-hua. Preparation and Properties of Silver Zeolite Compound Antibacterial Agent [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2001.
- [16] 沈钟, 赵振国, 王果庭. 胶体与表面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- SHEN Zhong, ZHAO Zhen-guo, WANG Guo-ting. Colloid and Surface Chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [17] 吴璧耀. 有机-无机杂化材料及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- WU Bi-yao. Organic-inorganic Hybrid Materials and Their Applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [18] 张术根, 申少华, 李酩. 廉价矿物原料沸石分子筛合成研究[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003.
- ZHANG Shu-gen, SHEN Shao-hua, LI Yan. Synthesis of Cheap Mineral Raw Materials Zeolite [M]. Changsha: Central South University Press, 2003.