

滑模控制抖振抑制的新方法

陈玉宏*

(四川轻化工学院电子工程系 自贡 643033)

【摘要】 提出一种抑制抖振的新方法。此方法把引起抖振的因素归纳为系统数学模型的不确定性,并采用 H_∞ 优化方法设计滑模变结构控制的切换面。由于它能使滑动模态实现希望的频率整形,故能有效地抑制抖振。计算机仿真实验结果证实文中所提出的方法是有效的。

关键词 滑模控制; 抖振; H_∞ 优化; 频率整形

中图分类号 TP271

滑模变结构控制具有很多吸引人的优点。但在实现时,总会出所谓抖振现象,即在光滑的滑动模态上叠加以有限频率振荡的轨迹,抖振将降低控制的准确性,增加电力电子电路中的热损失和机械运动部件的磨损,严重妨碍了滑模变结构控制获得预期的效果。所以,抑制抖振成了实施滑模变结构控制所必须解决的重要问题。国内外学者对此已进行了很多研究,提出了不少消除和削弱抖振的方法,主要是从两个途径^[1]:一是对理想切换采用连续近似,这种方法虽然消除了高频抖振,然而却丢失了滑模变结构控制抗扰动、抗扰动的宝贵特性;二是调整趋近率。这些方法收到了较好的效果,但是,抖振抑制仍是一个尚需继续研究和解决的重要问题。

本文提出一种通过对切换面采用 H_∞ 优化设计,实现抖振抑制的新方法。计算机仿真结果表明此方法对于抖振抑制能收到良好效果。

1 抖振抑制方法的新考虑

在理想滑模控制设计中被忽略的非理想切换、惯性、纯延迟和低频谐振特性,是滑模控制产生抖振的原因^[1,2]。实质上,引起抖振的这些因素,由于未包含在理想滑模设计使用的数学模型中,将成为系统未建模的动态特性,使系统的数学模型具有不确定性。在滑模控制的本质上不连续的开关控制作用下,这些未建模的动态特性将被激发,导致状态变量以有限频率振荡,产生抖振。^[3]

基于上述对于抖振机理的理解,我们设想:由于抖振是叠加在理想滑模上的有限频率的振荡,如果在按照理想情况设计滑动模态时,能够通过适当的切换面设计,使滑动模态相应的频率响应具有某种希望的形状,即实现所谓频率整形,滤除这种振荡,就可抑制抖振。因此,本文针对滑模变结构控制系统中引起抖振的某种具体未建模动态特性,采用最近 Konno 等人提出的滑模切换面的 H_∞ 优化设计方法^[4],获得滑动模态的频率整形,以抑制抖振。

在进行 H_∞ 优化设计时,通过适当地选择频率加权函数矩阵,构成广义对象,能获得控制系统希望的频率整形。据此,采用 H_∞ 优化方法设计滑动模态,能使其频率响应具有某种希望的形状。为了抑制抖振,则应使这种频率整形能够抑制滑动模态中引起抖振的频率分量。显然,所提出的这种抑制抖振的方法,是在滑模变结构控制的切换面设计中实施的。这样设计的切换面是具有某种“滤

波器”特性的动态切换面

2 滑动模态的 H_∞ 优化设计

在进行滑模变结构控制设计时,假定受控对象的状态方程已变换为正则形式

$$\dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 \tag{1a}$$

$$\dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u \tag{1b}$$

式中 $A_{ij} (i, j = 1, 2)$, B_2 是维数匹配的常数矩阵; $x \in \mathcal{R}^m, x \in \mathcal{R}, \det B \neq 0$

已知滑模变结构控制设计问题,能解耦为两个降维子系统的设计问题。所以,设计一个适当的切换面,以实现滑动模态的 H_∞ 优化,即切换面的 H_∞ 优化设计,将针对式 (1a) 的子系统进行。这是一个 $n - m$ 阶系统的 H_∞ 优化设计问题。对于这样的 H_∞ 优化设计问题,其广义对象 $P(s)$ 如图 1 所示。

广义对象中,加权函数矩阵 $W_1(s)$ 的输入是系统的输出跟踪参考输入 r 的误差 e

$$e = r - y_1 = r - C_1x_1 \tag{2}$$

一般来说,参考输入的主要能量分布在低频范围。所以,希望跟踪误差在低频范围内要小。故选择 $W_1(s)$ 具有低通滤波器的特性,以惩罚低频误差。按照

$$\tilde{E}(s) = W_1(s)E(s) \tag{3}$$

$W_1(s)$ 的状态空间实现可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_{w1} = A_{w1}x_{w1} + B_{w1}e \\ \tilde{e} = C_{w1}x_{w1} + D_{w1}e \end{cases} \tag{4}$$

加权函数矩阵 $W_2(s)$ 以 x_2 作为输入。由式 (1a) 可见, x_2 是式 (1a) 所示子系统的输入变量。一般选择 $W_2(s)$ 具有高通滤波器的特性,以抑制输入信号的高频分量。按照

$$\tilde{u} = W_2(s)X_2(s) \tag{5}$$

$W_2(s)$ 的状态空间实现可表示为

$$\dot{x}_{w2} = A_{w2}x_{w2} + B_{w2}x_2 \tag{6}$$

$$\tilde{u} = C_{w2}x_{w2} + D_{w2}x_2 \tag{7}$$

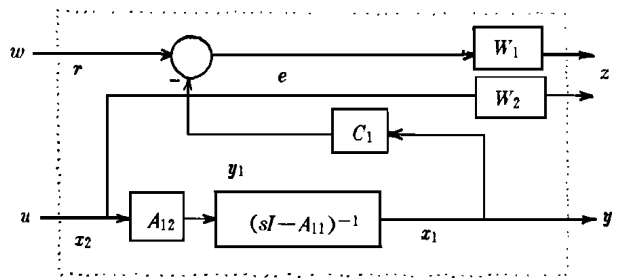


图 1 广义对象

这样,滑动模态的 H_∞ 优化设计中,广义对象 $P(s)$ 的状态空间实现为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{w1} \\ \dot{x}_{w2} \\ \dot{x}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{w1} & 0 & -B_{w1}C_1 \\ 0 & A_{w2} & 0 \\ 0 & 0 & A_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{w1} \\ x_{w2} \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{w1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ B_{w2} \\ A_{12} \end{bmatrix} x_2 \tag{8a}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{e} \\ \tilde{u} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{w1} & 0 & -D_{w1}C_1 \\ 0 & C_{w2} & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{w1} \\ x_{w2} \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{w1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ D_{w2} \\ 0 \end{bmatrix} x_2 \tag{8b}$$

由此可见,这里的频率加权函数矩阵 $W_1(s)$ 是按照保证通常控制系统的标称性能进行选择的。为了使未建模的动态特性受到的激发极小,从而使理想滑动模态上叠加的谐振分量受到抑制,即实现抖振抑制,关键在于频率加权函数矩阵 $W_2(s)$ 的选择。根据 H_∞ 优化理论,若设对象数学模型具有乘法不确定性,则 $W_2(s)$ 应当按照其归一化的相对不确定性的边界进行选择。即选择 $W_2(s)$,使

下面的不等式成立

$$\left| \frac{\tilde{G}(jk)}{G(jk)} - 1 \right| \leq |W_2(jk)| \quad \forall k \quad (9)$$

式中 G 表示对象的标称模型; $\tilde{G} = (1 + \Delta W_2)G$, 表示具有乘法不确定性的对象模型族。一般, 对象数学模型的不确定性随频率增加而增加, 故 $W_2(s)$ 具有高通滤波器的特性。结果, 这样的选择将抑制输入信号的高频分量。所以, 为了抑制抖振, 我们应当针对实际系统中引起抖振的具体因素, 归纳为数学模型的不确定性, 并据以选择 $W_2(s)$ 。应当指出, 为了确定 $W_2(s)$, 无需知道引起抖振的具体因素的精确数学模型, 而只需知道这种不确定性的边界即可。

在选择了频率加权函数 $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$ 并确定广义对象后, 就可以按照现有的 H_∞ 优化控制问题的解法求解。假定包括加权函数在内的全部状态变量都可以检测, 且满足状态反馈解存在的条件, 则可得出 x_2 的 H_∞ 优化状态反馈解

$$x_2 = K_{W_1}x_{W_1} + K_{W_2}x_{W_2} + K_1x_1 \quad (10)$$

式中 K_{W_1} , K_{W_2} 和 K_1 是状态变量反馈增益矩阵。这样, H_∞ 优化的切换面方程为

$$S = x_2 - (K_{W_1}x_{W_1} + K_{W_2}x_{W_2} + K_1x_1) = 0 \quad (11)$$

式 (8a) 和式 (10) 组成了增广系统的滑模运动方程。这个增广系统的状态变量除包含 x_1 外, 还包含加权函数的状态变量 x_{W_1} 和 x_{W_2} 。把式 (10) 代入式 (8a), 以增广状态变量表示的滑模运动方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{W_1} \\ \dot{x}_{W_2} \\ \dot{x}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{W_1} & 0 & -B_{W_1}C_1 \\ B_{W_1}K_{W_1} & A_{W_2} + B_{W_2}K_{W_2} & B_{W_2}K_1 \\ A_{12}K_{W_1} & A_{12}K_{W_2} & A_{11} + A_{12}K_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{W_1} \\ x_{W_2} \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{W_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r \quad (12)$$

这样, 受到 H_∞ 优化切换面式 (11) 的约束, 滑模运动将具有要求的频率整形, 这相当于对滑动模式引入了一个“滤波器”, 使系统中未建模的动态特性的激发在滑动模式中受到抑制, 从而抑制抖振。

在 H_∞ 优化切面设计完成后, 有关切换控制律的设计可按常规方法进行。

3 仿真结果

对文中所提出的抑制抖振的新方法进行了计算机仿真研究, 假定受控对象的状态方程为

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (13a)$$

$$\dot{x}_2 = -a_1x_1 - a_2x_2 + bu \quad (13b)$$

设 $a_1 = 1, a_2 = 1, b = 1$

首先按照理想滑模控制进行设计, 所得单位阶跃响应如图 2 所示

假定切换具有纯延迟, 并设纯延迟时间的最大值为 0.025 s。在系统具有这个最大纯延迟时间的情况下, 实际的滑模变结构控制系统的阶跃响应如图 3 所示。由图可见, 理想滑动模态上叠加了高频谐振分量, 出现了严重的抖振

为了抑制抖振, 现在按本文所提出的方法进行滑动模态的 H_∞ 优化设计。设计将对于式 (13a) 所示的子系统, 关键的步骤是确定适当的频率加权函数 $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$, 使滑动模态具有希望的频率响应特性

设选择

$$W_1(s) = \frac{s + 100}{10s + 1} \quad (14)$$

即在 0.1 rad/s 频率以下的低频范围内, 其增益为 100(40 dB)。这意味着要求在 0.1 rad/s 以下的

频率范围内,跟踪参考输入的稳态误差为 0.01

抖振抑制主要取决于 $W_2(s)$ 的适当选择。本例中,假设抖振是由于理想滑模设计中忽略了实际切换的纯延迟所致,且假定已知纯延迟的最大值为 0.025 s,把它考虑为输入乘法不确定性。由按式 (9),有

$$|e^{-j\omega 0.025} - 1| \leq |W_2(jk)| \quad \forall k \quad (15)$$

作出 $e^{j\omega 0.025} - 1$ 的 Bode 图,由其幅值曲线的边界可得适当的加权函数 $W_2(s)$ 应为

$$W_2(s) = \frac{0.05s}{0.025s + 1} \quad (16)$$

这样,对于子系统式 (13a),按式 (4)、(6)~(8),可以确定广义对象。利用 H_∞ 优化设计的专用软件,求出 H_∞ 优化的状态反馈为

$$x_2 = 110.2695x_{w1} - 21.8009x_{w2} + 67.9588x_1 \quad (17)$$

由此, H_∞ 优化切换面方程为

$$S = x_2 - 110.2695x_{w1} + 21.8009x_{w2} - 67.9588x_1 \quad (18)$$

切换控制律则按常规方法设计。所获得的滑模变结构控制系统的单位阶跃响应如图 4 所示。由图可见,其稳态误差为 0.01,达到了预期的控制效果,而且抖振得到了良好的抑制。

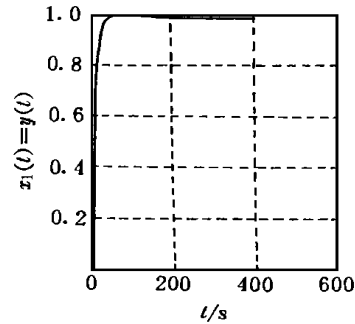


图 2 理想滑动模式

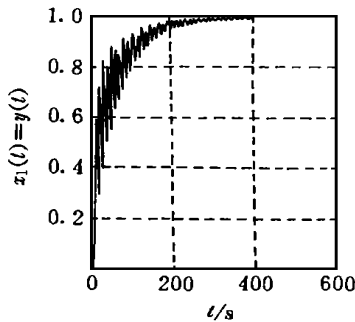


图 3 实际滑动模式

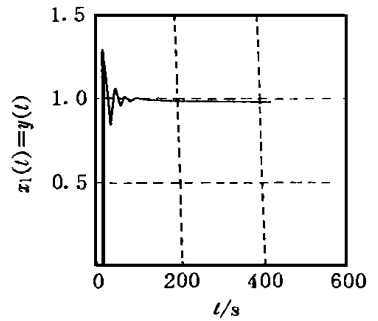


图 4 采用 H_∞ 优化设计的滑动模式

4 结 论

针对引起抖振的具体因素,归纳为数学模型的不确定性,据以选择适当的频率加权函数矩阵构成广义对象,采用 H_∞ 优化方法设计切换面,相当于对滑动模式引入了“滤波器”,使滑动模式获得希望的频率整形,从而能有效地抑制抖振。仿真实验结果表明,所提出的方法是有效的。

参 考 文 献

- 1 Hung J Y, Gao Weibing, Hung J C. Variable structure control: a survey. IEEE Trans on Ind Elec, 1993, 40(1): 2~ 22
- 2 王丰尧. 滑模变结构控制. 北京: 机械工业出版社, 1995: 313~ 316
- 3 Utkin V I. Sliding mode control design principles and application to electric drives. IEEE Trans on Ind Elec, 1993, 40(1): 23~ 36
- 4 Konno Y, Hashimoto H. Design of sliding mode dynamics in the frequency domain. IEEE Workshop on Variable Structure and Lyapunov Control of Uncertain Dynamical Systems, 1992: 120~ 125

A New Method of Chattering Reduction of Sliding Mode Control

Chen Yuhong

(Dept. of Electronic Eng., Schuan Inst. of Light Ind.& Chen Tech Zigong 643033)

Abstract A new method of reducing chattering in sliding mode control is proposed, which considering the chattering as the results of uncertainty in the system mathematic model and using H_∞ optimization design of switching surface. Frequency shaping of sliding mode can be achieved and chattering can be reduced well via the method. The effectiveness of the proposed method is verified by the results of digital simulation.

Key words sliding mode control; chattering; H_∞ optimization; frequency shaping

编辑 徐培红

.....
.....
.....

。科研成果介绍。

并行处理技术在雷达信号处理和数据处理中的应用研究

主研人员: 龚耀寰 龚宇 唐向宏 吕明 张扬

研究了用于雷达信号处理和数据处理的高速专用并行处理技术。提出一种适于并行处理的 GS 和 QR 分解算法的 SYSTOLIC 实现方式; 提出一种新的全自适应阵更新方法和逆 QR 分解算法和一种非均匀间隔部分自适应阵方法; 研究了适于并行处理的 Capon 法及 DPCA 技术。该成果还建立了一个并行处理原理实验系统, 并在该系统上进行了 GS 和 QR 分解算法实验研究, 取得了信号干扰比改善因子优 30 dB 的良好实验结果。

该成果采用的实验系统方案可行, 所用算法性能好, 易于实现, 具有较高的科学价值和很好的工程实用性, 有很好的推广应用前景。

雷达目标电磁散射极化特性研究

主研人员: 林昌禄 李谦 赵吉祥 符果行

在综述电磁极化基本理论基础, 导出了三种基本极化散射矩阵间的相互变换关系及最佳极化的数学模型, 对雷达极化信息的综合应用奠定了良好的理论基础。还成功地分析计算了一些典型雷达目标 (如导电球、介质球、条形平板等) 的后向散射极化特性, 明确指出了利用极化信息对提高雷达的目标检测、识别、分类、抗干扰和反隐身等方面有重要的作用。

该成果富有创新, 有较高的理论学术价值。

。科 卜。