

# 主动粘弹性控制抗冲击扰动

李书培, 宋立伟<sup>†</sup>

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 根据粘弹性材料耗能减振性能较好的特点, 针对高频扰动、冲击扰动, 本文提出了主动粘弹性控制的方法, 定义了主动粘弹性控制技术的基本架构. 根据粘弹性材料的耗能计算模型, 提出了粘弹性控制律的选取原则. 结合广义Maxwell模型, 提出了3种粘弹性控制律(viscoelastic control law, VCL). 并将粘弹性比例-微分(proportional derivative, PD)控制、粘弹性比例-积分-微分(proportional integral derivative, PID)控制、粘弹性自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)应用到常见的二阶系统中. 研究表明, 主动粘弹性控制技术抗高频扰动、抗冲击扰动的性能特别优异. 由于主动控制的响应速度快, 主动粘弹性控制的抗扰性能好, 本文提出了主动控制与主动粘弹性控制相切换的控制方法, 并对切换控制策略进行了研究. 研究表明, 切换控制可同时兼顾抗扰性能与响应速度.

**关键词:** 主动粘弹性控制; 粘弹性控制; 粘弹性自抗扰; 粘弹性PID; 冲击扰动

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Viscoelastic active control for pulse disturbance

LI Shu-pei, SONG Li-wei<sup>†</sup>

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** Based on the excellent energy dissipation characteristics of the viscoelastic material, this paper proposes the viscoelastic active control method to suppress the high-frequency or pulse disturbance. Also, the basic structure of viscoelastic active control technology is discussed. Besides, according to the energy model of viscoelastic material, the principle of selecting a viscoelastic control law is put forward. Moreover, combining with the generalized maxwell model, three viscoelastic control laws, the viscoelastic proportional derivative (PD) control, proportional integral derivative control (PID) and active disturbance rejection control (ADRC), are discussed and applied to the common second-order system. The results show that the viscoelastic active controller has excellent performance of suppressing high-frequency and pulse disturbance. Since the active control has fast response characteristic while the viscoelastic active control has excellent disturbance rejection performance, the switching control between these two control methods is designed and studied to combine their advantages. The simulation results show that the switching control method has not only fast response characteristic but also excellent performance of suppressing disturbance.

**Key words:** viscoelastic active control; viscoelastic control; viscoelastic active disturbance rejection control; viscoelastic PID; pulse disturbance

### 1 引言(Introduction)

随着材料技术的发展, 应用于建筑物抗震<sup>[1]</sup>、机械隔振<sup>[2]</sup>等方面的粘弹性耗能减振材料得到很大的发展. 研究人员对粘弹性材料建立了较为完整的模型<sup>[3]</sup>, 并对粘弹性被动控制系统稳定性进行了分析<sup>[4]</sup>, 研究表明, 粘弹性材料的数学模型具备多个弹性阻尼元件时, 其耗能减振效果更佳<sup>[5-6]</sup>. Hun将粘弹性被动控制用于人机交互的机器人<sup>[7]</sup>, Bhasin将自适应主动

控制与粘弹性被动控制相结合的方法用于救援机器人<sup>[8]</sup>, Yunjia将粘弹性爬坡算法应用于位置控制<sup>[9]</sup>, 其研究结果同样展现出优异的控制性能. 鉴于此结论, Dutt等对转子受到单个与多个弹性阻尼元件支撑时的隔振性能进行了研究<sup>[10]</sup>. 研究表明, 多个弹性阻尼元件同时支撑转子时, 转子的隔振性能更佳<sup>[11]</sup>.

然而, 粘弹性被动控制受材料性能的影响非常严重, 灵活性较差, 且粘弹性材料容易受油污、老化等因

收稿日期: 2016-07-06; 录用日期: 2016-12-20.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: song\_lw@hit.edu.cn; Tel.: +86 13936004061.

本文责任编辑: 陈增强.

国家自然科学基金项目(51077021)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (51077021).

素的影响,致使其耗能减振性能下降.该缺点对于材料科学技术是一个挑战,但对于主动控制技术,却是一个相当有利的信息.鉴于上述研究成果,Roy将等效于3个弹性阻尼元件的粘弹性比例-微分(proportional derivative, PD)控制(在本文属于粘弹性比例(proportional, P)控制,详见后文)应用于径向磁轴承<sup>[12]</sup>,实验结果表明,在转子转速较高时,其抗扰性能优于比例-积分-微分控制(proportional integral derivative, PID)控制.理论上,任何一种反馈主动控制技术,均可用于粘弹性材料的主动控制.换言之,任何一种反馈主动控制技术均可改造成主动粘弹性控制,用以提升其抗高频扰动、冲击扰动的性能.这一点在上述文献分析中以及本文后续提到的粘弹性PID、粘弹性自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)中均得到证实.

根据上述研究现状,本文介绍了如何从主动控制技术演变到主动粘弹性控制技术的基本想法和关键技术.并结合二阶系统对其抗扰性能进行了分析.

## 2 主动粘弹性控制(Viscoelastic active control)

### 2.1 主动粘弹性控制的理论基础(Basic theory of viscoelastic active control)

根据材料模型,描述粘弹性材料耗能性能的计算模型可用开尔文模型(如图1(b))和标准固体模型(如图1(c))<sup>[9, 13]</sup>.另外,经过研究人员的努力,得到了广义的粘弹性材料模型,即利用开尔文模型与广义的Maxwell模型相并联(如图1(b)与图1(e)并联),或者利用标准固体模型与广义的Maxwell模型相并联(如图1(c)与图1(e)并联),这样得到的粘弹性模型更具有灵活性<sup>[9, 13-14]</sup>.其数学模型如下:

$$\begin{cases} G_1(S) = K_1 + CS, \\ G_2(S) = K_1 + \frac{K_2CS}{CS + K_2}, \\ G_3(S) = K_1 + CS + \sum_{i=1}^n \frac{K_{2i}C_iS}{C_iS + K_{2i}}, \\ G_4(S) = K_1 + \frac{K_2CS}{CS + K_2} + \sum_{i=1}^n \frac{K_{2i}C_iS}{C_iS + K_{2i}}, \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $K_1, K_2$ 是弹性系数,  $C$ 是阻尼系数.  $G_1(S)$ 是开尔文模型,  $G_2(S)$ 是标准固体模型,  $G_3(S)$ 是广义开尔文模型,  $G_4(S)$ 是广义标准固体模型.由于主动控制器可等效为多个弹性阻尼元件,尤其是现代控制理论更是如此,为区分主动控制技术与主动粘弹性控制技术,给出如下定义(基本构架如图1(h)所示).

**定义 1** 附加独立的粘弹性控制律的主动控制技术,是主动粘弹性控制.

为便于对物理意义的理解,本文以磁轴承支撑转子为例进行描述.磁轴承对转子的支撑作用如图1(a)

所示,当采用PD控制时,其功能相当于一个弹性阻尼器(如图1(b)固定系数),PD控制器可描述为

$$\frac{F_z}{z} = K_1 + CS. \quad (2)$$

粘弹性PD控制可描述为(等效机械结构如图1(d),虚线框所示为粘弹性控制律)

$$\frac{F_z}{z} = (K_1 + CS) + \frac{K_2CS}{CS + K_2}. \quad (3)$$

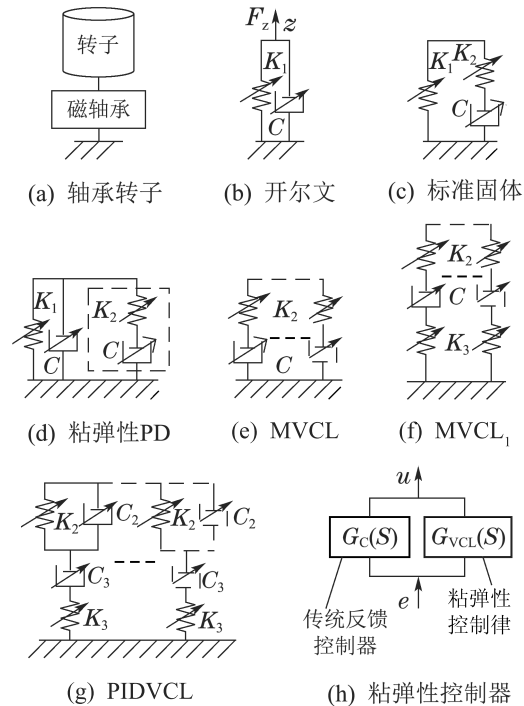


图1 粘弹性控制律

Fig. 1 Viscoelastic control law

### 2.2 粘弹性控制律选取原则(Principle of selecting viscoelastic control law)

以开尔文模型作为粘弹性控制律时,相当于两个并联的PD控制器,可描述为

$$\frac{F_z}{z} = (K_1 + K_2) + 2CS. \quad (4)$$

以标准固体模型作为粘弹性控制律时,可描述为

$$\frac{F_z}{z} = (K_1 + K_2) + CS + \frac{K_2CS}{CS + K_2}. \quad (5)$$

根据式(4)-(5)可以看出,以开尔文模型或者标准固体模型作为粘弹性控制律时,系统原来的稳定性被改变,甚至可能会出现不稳定.式(5)中并联的一个串接的弹簧-阻尼器的数学模型对原系统的稳定性不造成任何影响.并且,原系统的参数对弹簧-阻尼器的数学模型也不造成任何影响.所以,粘弹性控制的核心部分粘弹性控制律是串联的弹簧-阻尼结构,即

$$G_{VCL}(S) = \frac{K_2CS}{CS + K_2}. \quad (6)$$

以下将对其合理性作进一步分析. 根据式(1)可以看出, 主动控制与粘弹性材料一起构成主动粘弹性控制时, 主动控制器只能改变开尔文模型, 而对Maxwell模型却是无能为力. 同样, 只能改变标准固体模型中独立的弹性元件支路, 对其余支路也同样无能为力.

可以这样大胆假设, 将主动控制器的功能等效为添加主动控制的开尔文模型、或者等效为添加主动控制的标准固体模型, 再在主动控制器上面并联一个广义的Maxwell模型, 这就是本文想要的结果: “主动粘弹性控制技术”.

粘弹性控制律不具备唯一性. 比较合理的、通用性较强的粘弹性控制律应具有耗能减振性能, 且其传递函数不影响原系统的稳定性.

最理想的粘弹性控制律是广义的Maxwell模型(如图1(e)所示)<sup>[14-15]</sup>, 将其冠名为Maxwell控制律(maxwell VCL, MVCL), 另一种粘弹性控制律(如图1(f)所示)与Maxwell模型的性能相当, 同样冠名为MVCL1, 最后一种粘弹性控制律与PID控制器的弹性阻尼结构相似(如图1(g)所示), 将其冠名为PID粘弹性控制律(PID VCL, PIDVCL). 上述3种粘弹性控制律的传递函数 $G_{VCL}(S)$ 可描述为

$$\begin{cases} G_{MVCL}(S) = \sum_{i=1}^n \frac{k_i K_{2i} C_i S}{C_i S + K_{2i}}, \\ G_{MVCL1}(S) = \sum_{i=1}^n \frac{k_i K_{2i} K_{3i} C_i S}{(K_{2i} + K_{3i}) C_i S + K_{2i} K_{3i}}, \\ G_{PIDV}(S) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{k_i K_{2i} K_{3i} C_{3i} S}{(K_{2i} + K_{3i}) C_{3i} S + K_{2i} K_{3i}} + \frac{k_i K_{3i} (C_{2i} + C_{3i}) S}{(C_{2i} + C_{3i}) S + K_{3i}} \right], \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k_i$ 是粘弹性抗扰系数,  $K_{2i}, K_{3i}$ 是弹性系数,  $C_{2i}, C_{3i}$ 是阻尼系数.

### 2.3 粘弹性P, PD, PI, PID控制(Viscoelastic P, PD, PI, PID control)

P, PD, PI, PID控制器的原理广为人知, 此处不再详述. 以下直接给出粘弹性P, PD, PI, PID控制器采用MVCL的控制量 $u$ 为

$$\begin{cases} u_P = K_1 e + \sum_{i=1}^n \frac{k_i K_{2i} C_i S}{C_i S + K_{2i}} e, \\ u_{PD} = [K_1 + CS] e + \sum_{i=1}^n \frac{k_i K_{2i} C_i S}{C_i S + K_{2i}} e, \\ u_{PI} = [K_1 + \frac{K_1}{S}] e + \sum_{i=1}^n \frac{k_i K_{2i} C_i S}{C_i S + K_{2i}} e, \\ u_{PID} = [K_1 + CS + \frac{K_1}{S} + \sum_{i=1}^n \frac{k_i K_{2i} C_i S}{C_i S + K_{2i}}] e, \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $K_1$ 是积分系数,  $e$ 是误差,  $e'$ 是误差的一阶微分. 可以看出, 当 $K_{2i}$ 趋于无穷大时, 粘弹性P控制器可等

效为PD控制器, 粘弹性PI控制器可等效为PID控制器. PI控制器比较特别, 需要建立微分信号才能实现粘弹性控制, 粘弹性PI控制器的实现方法如图2(a)所示. 其它不含微分信号的反馈主动控制器, 其粘弹性控制器的实现方法可以此类推.

以往的粘弹性PD的控制量 $u$ 如式(8)中 $u_P$ 所示<sup>[12]</sup>, 对比式(2)可知, 以往的粘弹性PD控制相当于在微分信号中添加了一个低通滤波器, PD控制器的稳定性明显被改变. 从式(8)可以看出, 式(7)所示的3种粘弹性控制律与PD控制器相互独立, 互不影响.

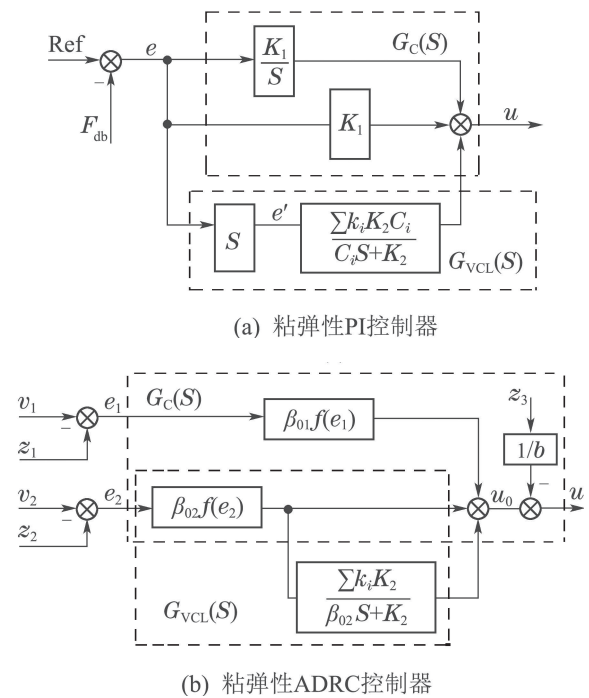


图 2 粘弹性PI、粘弹性ADRC控制器  
Fig. 2 Controller of viscoelastic PI and ADRC

### 2.4 粘弹性线性ADRC控制(Viscoelastic linear ADRC)

自抗扰控制技术最大的优点是无需建立精确的内部扰动、外部扰动模型, 其在扰动较为复杂的磁轴承<sup>[16]</sup>、飞行器<sup>[17-18]</sup>等系统中均得到应用. 自抗扰控制器包括跟踪微分器、扩张状态观测器以及状态误差反馈控制律3个部分, 跟踪微分器与扩张状态观测器(extended state observer, ESO)不是ADRC与粘弹性ADRC的主要区别, 不是粘弹性ADRC的主要研究内容, 此处不再详述. 对于常见的二阶系统, 传统的线性状态误差反馈(linear state error feedback, LSEF)控制律可描述为

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1, \\ e_2 = v_2 - z_2, \\ u_0 = \beta'_{01} e_1 + \beta'_{02} e_2, \\ u = u_0 - z_3/b. \end{cases} \quad (9)$$

从式中可以看出,其已经包含了误差的微分信号.与粘弹性PD控制器的实现方法类似,无需对误差信号进行处理.根据上文粘弹性PD控制器的实现方法,在此取 $K_1 = \beta'_{01}$ , $C = \beta'_{02}$ ,线性ADRC采用MVCL时的控制量 $u$ 可描述为

$$u_L = \beta'_{01}e_1 + \beta'_{02}e_2 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{k_i K_{2i}}{C_i S + K_{2i}} \right) C_i e_2 - \frac{z_3}{b}. \quad (10)$$

ADRC控制器参数较多,参数整定比较困难.为降低参数整定的难度,在粘弹性ADRC中,通常取 $C_i = \beta'_{02}$ .若取 $K_{2i} = K_2$ ,粘弹性ADRC的实现方法如图2(b)所示.当 $f(\cdot)$ 是线性函数时,为线性ADRC; $f(\cdot)$ 是非线性函数时,为非线性ADRC.其它含有微分信号的反馈主动控制器,其粘弹性控制器的实现方法可以此类推.MVCL1, PIDVCL的实现与MVCL类似.

## 2.5 粘弹性非线性ADRC控制(Viscoelastic nonlinear ADRC)

在常见的二阶系统中,传统的非线性状态误差反馈(nonlinear state error feedback, NLSEF)控制律可描述如下:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1, \\ e_2 = v_2 - z_2, \\ e_{11} = \text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta), \\ e_{22} = \text{fal}(e_2, \alpha_2, \delta), \\ u_0 = \beta_{01}e_{11} + \beta_{02}e_{22}, \\ u = u_0 - z_3/b. \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可看出,虽然引入了非线性函数将反馈控制信号 $e_1, e_2$ 转化为了 $e_{11}, e_{22}$ ,但并未增加实现粘弹性控制的难度,根据上文粘弹性线性ADRC的实现方法,取 $K_1 = \beta_{01}$ , $C = \beta_{02}$ ,非线性ADRC采用MVCL的控制量 $u$ 可描述为

$$u_N = \beta_{01}e_{11} + \beta_{02}e_{22} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{k_i K_{2i}}{C_i S + K_{2i}} \right) C_i e_{22} - \frac{z_3}{b}. \quad (12)$$

理论上,任何一种反馈主动控制技术,均可改造成主动粘弹性控制,实现方法如图1(h)所示, $G_c(S)$ 是传统的反馈控制器的开环传递函数, $G_{VCL}(S)$ 是粘弹性控制律的传递函数.由控制量 $u$ 得粘弹性控制器 $G_V(S)$ :

$$G_V(S) = u/e = G_c(S) + G_{VCL}(S). \quad (13)$$

## 3 主动粘弹性控制功能扩展(Extension of viscoelastic active control)

### 3.1 高频粘弹性ADRC(Viscoelastic ADRC for high frequency)

上文中已经提到,当 $K_{2i}$ 趋于无穷大时,粘弹性P控制器可等效为PD控制器,粘弹性PI控制器可等效

为PID控制器.这说明,在一些特定的控制器中,主动粘弹性控制的功能能够得到进一步扩展.

虽然上文中所提到的粘弹性控制律均是抑制高频扰动,为便于与后文扩展的低频粘弹性ADRC作区分,此处给粘弹性ADRC冠名为高频粘弹性ADRC(high frequency viscoelastic ADRC, ADRC<sub>hfv</sub>),并且将粘弹性NLSEF控制律冠名为高频粘弹性NLSEF(high frequency viscoelastic NLSEF, NLSEF<sub>hfv</sub>).根据上文粘弹性控制器的实现方法,取 $K_1 = \beta_{01}$ , $C_i = C = \beta_{02}$ ,ADRC<sub>hfv</sub>的控制量 $u$ 可描述为

$$u_{hfv1} = \beta_{01}e_{11} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{k_{hi} K_2 \beta_{02} e_{22}}{\beta_{02} S + K_2} \right) - \frac{z_3}{b}, \quad (14)$$

式中: $k_{hi}$ 是高频扰动抑制系数,且 $10 > k_{hi} > 1$ ,对于二阶系统,建议取 $2 > k_{hi} > 1$ ,此时对高频扰动的抑制效果较好,且对低频扰动的抑制性能影响较小. $k_{hi}$ 越大,高频扰动抑制性能越好,动态响应速度越慢(与粘弹性材料的性能相同),且低频扰动抑制性能越差.当 $\sum k_{hi} = 1$ 时,对高频扰动的抑制性能并无明显改善.当 $k_{hi} < 1$ 时,系统容易不稳定.当 $K_2$ 趋于无穷大,且 $n = 1$ 时,其等效为传统的NLSEF.

### 3.2 低频粘弹性ADRC(Viscoelastic ADRC for low frequency)

在常见的二阶系统中,高频干扰是比较特殊的,多数情况下的干扰信号频率都比较低.虽然ADRC具有较好的抗扰动性能,其低频扰动抑制性能仍然具有一定的提升空间.得到ADRC<sub>hfv</sub>后,很自然就会联想到低频粘弹性ADRC(low frequency viscoelastic ADRC, ADRC<sub>lfv</sub>).根据式(14),结合惯性滤波器的低通特性,很容易想到将高通滤波器加到传统ADRC控制器中,即可得到ADRC<sub>lfv</sub>,并同样将其粘弹性NLSEF控制律冠名为低频粘弹性NLSEF(low frequency viscoelastic NLSEF, NLSEF<sub>lfv</sub>).ADRC<sub>lfv</sub>的控制量 $u$ 可描述为

$$u_{lfv} = \beta_{01}e_{11} + \frac{k_l \beta_{02} S}{\beta_{02} S + K_2} \beta_{02} e_{22} - \frac{z_3}{b}, \quad (15)$$

式中: $k_l$ 是低频扰动抑制系数,且 $k_l \leq 1$ ,建议取 $k_l = 1$ ,此时对低频扰动的抑制效果较好,对高频扰动的抑制性能影响较小. $k_l$ 越小,高频扰动抑制性能越差,且并未明显改善低频扰动抑制性能,当 $k_l > 1$ 时,系统容易不稳定.当 $K_2$ 趋于零时,等效为传统的NLSEF.

## 4 参数整定(Tuning parameters)

对于常见的二阶系统,所使用的控制器含有微分环节时,参数整定比较简单.如PD, PID, ADRC控制器均含有微分环节.以典型的MVCL为例,直接取MVCL中的阻尼系数为PD, PID控制器中的C,再通过惯性滤波器的性能选取 $K_2$ ,最后设定扰动抑制系数 $k_i$ ,建议取 $10 > k_i > 1$ . $k_i$ 越大,扰动抑制性能越好,但动态性能越差.同样,在ADRC中,取MVCL的阻尼

系数为状态误差反馈控制器中的 $\beta_{02}$ , 再根据惯性滤波器特性选取 $K_2$ (建议取 $50/h > K_2 > 10/h$ ,  $h$ 为步长, 对应电机驱动控制器中的载波周期), 最后调整 $k_i$ 值, 建议取 $10 > k_i > 1$ .

在P, PI控制器中, 参数整定稍微麻烦一些. 首先设计P, PI控制器, 取定P, PI控制器参数后, 在此参数的基础上, 将其改造为PD, PID控制器, 此时得到的微分系数即可设定为MVCL的阻尼系数 $C$ . 设定 $K_2, k_i$ 的方法与上同.

在MVCL1中, 为简化参数整定过程, 此处建议取 $K_3 = K_2$ , 参数整定原则同MVCL. 在PIDVCL中, 同样取 $K_3 = K_2$ , 取 $C_3$ 等于MVCL中的 $C$ , 取 $C_2 = C_3/10$ 或者更小,  $C_2$ 越小, 其性能越接近MVCL. 其余参数设定与MVCL相同. 当然, 上述参数整定方法并不是最优的, 可进一步参考粘弹性材料技术领域对粘弹性系数的参数整定原则, 对其进行优化.

### 5 主动控制/主动粘弹性控制切换控制 (Switching between active control and viscoelastic active control)

切换控制同时兼顾两种控制方法的优点, 呈现出优异的性能<sup>[19]</sup>. 由于粘弹性控制的响应速度慢, 为同时实现抗冲击扰动与快速响应, 本文提出主动控制与主动粘弹性控制相切换的控制方法. 在二阶系统中, 对于最常见的正弦扰动信号, 经过一次积分与二次积分以后, 其可描述为

$$\begin{cases} w = A \sin(\omega t + \phi), \\ w_1 = -(A/\omega) \cos(\omega t + \phi), \\ w_2 = -(A/\omega^2) \sin(\omega t + \phi), \end{cases} \quad (16)$$

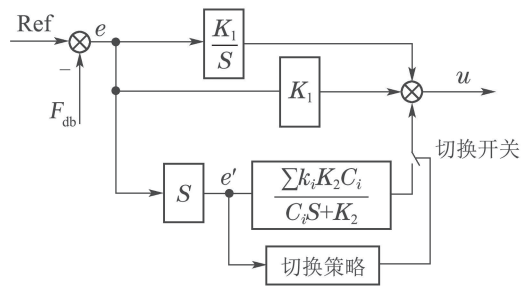
式中:  $w$ 是扰动信号,  $w_1$ 是一次积分结果, 对应误差的一阶微分信号,  $w_2$ 是二次积分结果, 对应误差信号. 从式(16)可以看出, 扰动信号的幅值不含频率. 误差信号与误差的一阶微分信号均包含了扰动的幅值与频率, 但误差信号存在两个缺点: 1) 幅值较小; 2) 相位延迟大. 通过上述分析, 较为理想的切换控制信号是误差一阶微分信号的幅值.

由于PI控制无微分信号, 图3(a)给出了PI控制与粘弹性PI控制相切换的实现方法, 微分信号 $e'$ 经过切换策略对切换开关进行控制, 当需要粘弹性控制时, 将粘弹性控制信号并入控制回路中. 其余不含微分量的反馈控制器, 其切换控制方法可以此类推. ADRC与粘弹性ADRC相切换时, 将 $e_2$ 作为切换控制信号(如图3(b)所示). 对于粘弹性PD, PID等含有微分量的反馈控制器, 其切换控制方法可以此类推.

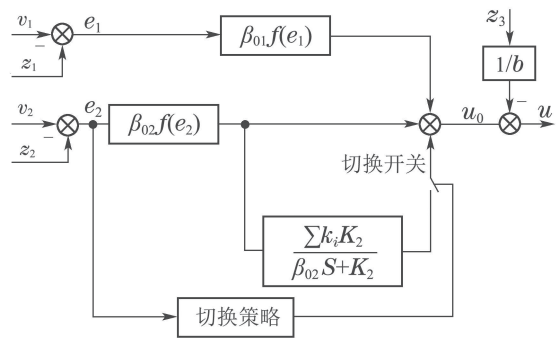
阶跃函数切换控制策略: 1) 当系统启动运行时( $t < T$ ,  $T$ 为系统进入稳态的时间), 切换为主动控制. 2) 当系统进入稳定运行( $t \geq T$ )后, 若 $|e'| \geq A_0/\omega_0$  ( $A_0$ 是预期需要抑制的扰动幅值,  $\omega_0$ 是预期需要抑制

的扰动频率), 则切换到主动粘弹性控制, 若 $|e'| < A_0/\omega_0$ , 则切换到主动控制. 该策略的响应速度较快, 但抗扰性能比下一种策略差.

延迟滞后函数切换控制策略: 1) 当系统启动运行时同阶跃函数切换控制策略. 2) 当系统进入稳定运行( $t \geq T$ )后, 若 $e' \geq A_0/\omega_0$ , 则切换到主动粘弹性控制, 当 $e' < 0$ 时, 则切换到主动控制; 若 $e' \leq -A_0/\omega_0$ , 则切换主动粘弹性控制, 当 $e' > 0$ 时, 则切换到主动控制. 该策略的抗扰性能较好, 但响应速度比上一种策略稍差.



(a) 粘弹性PI切换控制



(b) 粘弹性ADRC切换控制

图3 切换控制

Fig. 3 Switching control

## 6 控制性能分析(Performance analysis)

### 6.1 抗扰性能分析(Performance of disturbance rejection)

为突出反应粘弹性控制器的抗扰性能, 以下将利用频域法与仿真分析法进行对比分析. 目的1: 验证主动粘弹性控制具有较好的抗扰性能; 目的2: 验证任何反馈主动控制技术均可改造为主动粘弹性控制. 考虑如下积分串联型二阶系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = w + u, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (17)$$

式中 $w$ 为扰动. 在式(7)中取 $n = 1$ , 令

$$a = K_2 + K_3, \quad c = K_2K_3, \quad d = C_2 + C_3,$$

采用PD与粘弹性PD控制时, 给定量与输出量之间的

闭环传递函数为

$$\begin{cases} \Phi(s) = (Cs + K_1)/(s^2 + Cs + K_1), \\ \Phi_M(s) = (C^2s^2 + B_5s + K_1K_2)/\Gamma, \\ \Phi_{M1}(s) = (aC^2s^2 + B_4s + cK_1)/\Gamma_1, \\ \Phi_{PID}(s) = [adCC_3s^3 + B_2s^2 + B_1s + \\ cK_1K_3]/\Gamma_2, \end{cases} \quad (18)$$

式中： $\Phi(s)$ 是PD控制器的闭环传递函数， $\Phi_M(s)$ 是以MVCL为粘弹性控制律的传递函数， $\Phi_{M1}(s)$ 是以MVCL1为粘弹性控制律的传递函数， $\Phi_{PID}(s)$ 是以PIDVCL为粘弹性控制律的传递函数。

$$\begin{cases} \Gamma = Cs^3 + (K_2 + C^2)s^2 + B_5s + K_1K_2, \\ \Gamma_1 = aCs^3 + (c + aC^2)s^2 + B_4s + cK_1, \\ \Gamma_2 = adC_3s^4 + B_3s^3 + (cK_3 + B_2)s^2 + \\ B_1s + cK_1K_3, \end{cases} \quad (19)$$

式中各个系数的表达式如下：

$$\begin{cases} B_5 = [K_1 + (1 + k_i)K_2]C, \\ B_4 = [aK_1 + (1 + k_i)c]C, \\ B_3 = aK_3C_3 + cd + adCC_3, \\ B_2 = adK_1C_3 + cdC + aK_3CC_3 + \\ cdk_iC_3 + k_iadK_3C_3, \\ B_1 = cK_3C + aK_1K_3C_3 + cdK_1 + \\ k_icK_3C_3 + k_i cdK_3. \end{cases} \quad (20)$$

扰动量与输出量间的闭环传递函数为

$$\begin{cases} \Phi_w(s) = 1/(s^2 + Cs + K_1), \\ \Phi_{wM}(s) = (Cs + K_2)/\Gamma, \\ \Phi_{wM1}(s) = (aCs + c)/\Gamma_1, \\ \Phi_{wPID}(s) = [adC_3s^2 + (cd + aK_3C_3)s + \\ cK_3]/\Gamma_2. \end{cases} \quad (21)$$

取 $K_1 = 22000, C_2 = C_3 = C = 355, K_2 = K_3 = 35500, k_i = 10$ ，其bode图如图4-5所示。对比本文列举的3种粘弹性控制律的bode图可知，PIDVCL对冲击扰动的抑制性能最好，但其对给定量与输出量之间的动态性能的影响也最大；MVCL1对给定量与输出量之间的动态性能的影响最小，但对冲击扰动的抑制性能也最差。

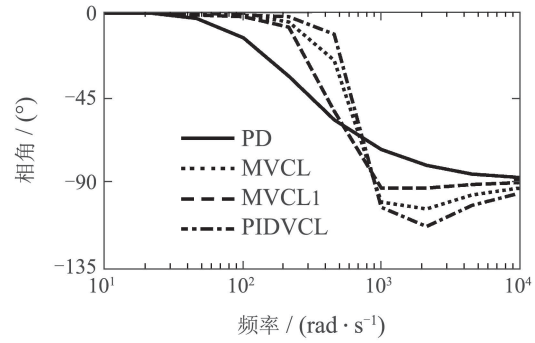
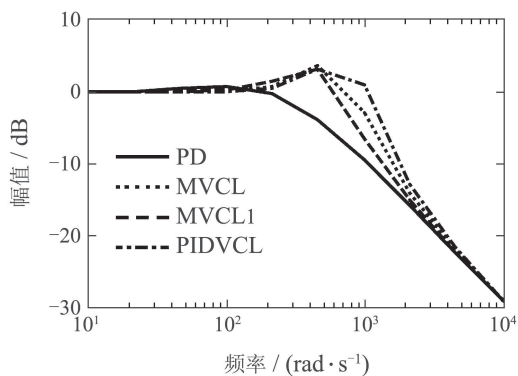


图4 给定量/输出量bode图  
Fig. 4 Bode of input/output

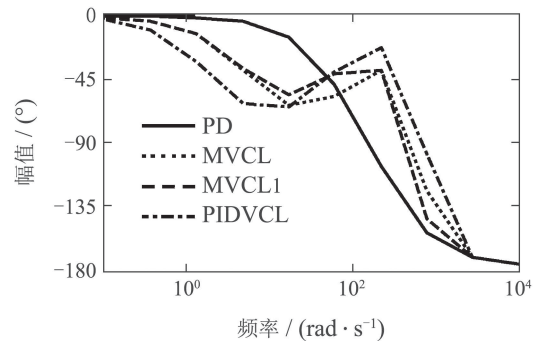
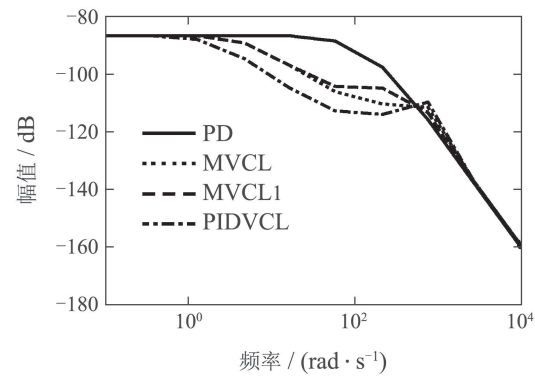


图5 扰动量/输出量bode图  
Fig. 5 Bode of disturbance/output

从图4-5中可以看出，总体看来，采用粘弹性PD控制并未明显改变给定量与输出量之间传递函数的动态性能，扰动量与输出量之间传递函数的动态性能得到明显改善，证明粘弹性主动控制对高频扰动的抑制性能较好。

### 6.2 切换控制性能分析(Performance of switching control)

为更清晰地反应主动粘弹性控制与切换控制的抗扰性能与响应速度，与频域法相对比，考虑二阶系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -a_0x_1 + b_0u - w, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (22)$$

式中： $a_0 = 646960.1, b_0 = 45.1, w$ 为幅值50周期0.03 s 占空比50%的方波。采用非线性ADRC/粘弹性非线性ADRC切换控制。ADRC控制器参数如下：

1) NLSEF控制器参数:

$$\beta_{01} = 200, \beta_{02} = 50, \alpha_1 = 0.3, \alpha_2 = 0.95, \\ \delta = 0.001, b = 45.1, K_{2i} = 3.5e5, \sum k_i = 5;$$

2) ESO观测器参数:

$$\beta_{01} = 1e4, \beta_{02} = 6.25e5, \beta_{03} = 113671330, \\ \alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.25, \delta = 3e-5;$$

3) TD过渡过程参数:

$$r = 200, h_0 = 0.001;$$

步长(仿真步长)为  $h = 1e-4$ .

图6的仿真结果表明,粘弹性控制的抗扰性能较好,但响应速度较慢.采用切换控制时,抗扰性能优于ADRC,响应速度优于粘弹性ADRC.

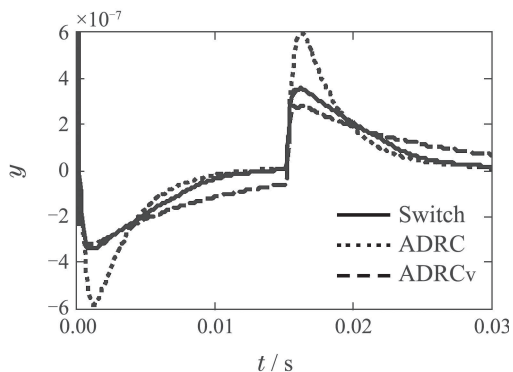


图 6 切换控制性能分析

Fig. 6 Properties of switching control

为了更充分说明粘弹性控制对冲击扰动的抑制性能较好,以下将利用粘弹性PID对比本文列举的3种粘弹性控制律的抗扰性能.对于式(17)所示系统,取PID控制器的积分系数  $K_1 = 1000$ ,其余系数与式(21)中的取值相同.分别利用幅值50脉宽0.05 s的方波(如图7所示)以及幅值20 频率50 Hz的正弦波(如图8所示)作为扰动量  $w$ .可以看出,PIDVCL的性能最好,MVCL1的性能最差,验证了图5中得到的结论.同时,也证实了粘弹性控制适用于PID控制器.

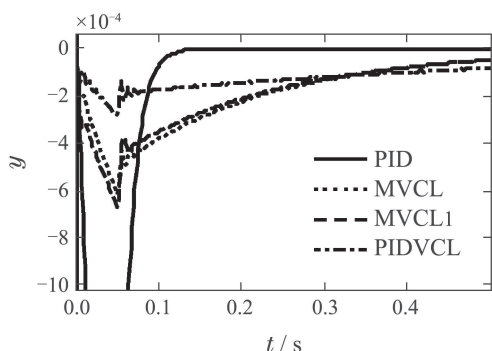


图 7 粘弹性PID的脉冲扰动

Fig. 7 Pulse disturbance of viscoelastic PID controller

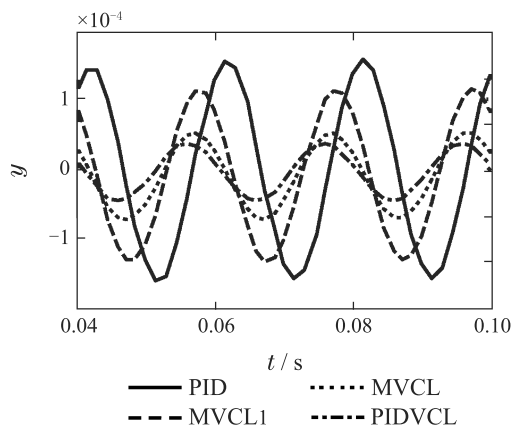


图 8 粘弹性PID的正弦扰动

Fig. 8 Sine disturbance of viscoelastic PID controller

### 7 总结(Conclusions)

任何一种反馈主动控制技术,改造成主动粘弹性控制技术以后,其对高频扰动、冲击扰动的抑制性能均得到明显的改善.

比较合理的、通用性较强的粘弹性控制律应具有耗能减振性能,且其传递函数不影响原系统的稳定性.

利用主动控制与粘弹性主动控制进行切换控制,系统具有响应速度快、抗扰性能好的特点.

下一步将在工程应用方面展开研究.另外,参数整定原则尚需进一步的研究,尤其可以借鉴粘弹性材料模型的参数优化原则,对参数整定的理论进行丰富和完善;切换控制策略有待改进,尤其是基于扰动破坏力、同时兼顾切换过程中被控量振动较小的切换控制策略.

### 参考文献(References):

- [1] WU Congxiao, LAI Weishan, ZHOU Yun, et al. Experimental study on seismic behaviors of new energy-dissipative prefabricated concrete frame structure joints [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(9): 23 - 30.  
(吴丛晓, 赖伟山, 周云, 等. 新型预制装配式消能减震混凝土框架节点抗震性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2015, 48(9): 23 - 30.)
- [2] WANG C S, WANG L H, CAO L Y, et al. The vibration control research of viscoelastic damper for the eccentric structure [C] // *The 7th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Nanchang, China: IEEE, 2015: 1325 - 1328.
- [3] WANG Jun, WANG Jiachun, WU Fenghe, et al. Research of viscoelastic damping anti-vibration grinding wheel spindle with composite structure [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(15): 192 - 197.  
(王军, 王加春, 吴凤和, 等. 复合结构黏弹性阻尼减振砂轮接杆的研究 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(15): 192 - 197.)
- [4] SKAAR S B, MICHEL A N, MILLER R K, et al. Stability of viscoelastic control systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(4): 348 - 357.
- [5] XU Zhaodong, XU Chao, XU Yeshou. Microscopic molecular chain structure model of viscoelastic damper under micro-vibration excitations [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(3): 675 - 683.

- (徐赵东, 徐超, 徐业守. 微振激励下黏弹性阻尼器微观链结构力学模型 [J]. 力学学报, 2016, 48(3): 675 – 683.)
- [6] GAO Yonglin, TAO Zhong, YE Liaoyuan, et al. Shaking table tests of mortise-tenon joints of a traditional Chuan-Dou wood structure attached with viscoelastic dampers [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(2): 59 – 68.  
(高永林, 陶忠, 叶燎原, 等. 传统穿斗木结构榫卯节点附加黏弹性阻尼器振动台试验 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 59 – 68.)
- [7] HUN-OK L, KAZUO T. Collision-tolerant control of human-friendly robot with viscoelastic trunk [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 1999, 4(4): 417 – 427.
- [8] BHASIN S, DUPREE K, WILCOX Z D, et al. Adaptive control of a robotic system undergoing a non-contact to contact transition with a viscoelastic environment [C] // *IEEE American Control Conference*. St. Louis: IEEE, 2009: 3506 – 3511.
- [9] LI Y J, CHRISTOFER H. SU-8 as a torsional spring: viscoelastic creeping and closed loop control [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, 24(3): 608 – 617.
- [10] DUTT J K, TOI T. Rotor vibration reduction with polymeric sectors [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 262(4): 769 – 793.
- [11] DUTT J K, NAKRA B C. Stability of rotor systems with viscoelastic supports [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1992, 153(1): 89 – 96.
- [12] ROY H K, DAS A S, DUTT J K. An efficient rotor suspension with active magnetic bearings having viscoelastic control law [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 98(4): 48 – 63.
- [13] XU Zhaodong, ZHAO Hongtie, GUO Yingqing, et al. Theoretical analysis on modern control over the viscoelastic structure [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2000, 32(2): 108 – 111.  
(徐赵东, 赵鸿铁, 郭迎庆, 等. 粘弹性阻尼结构的现代控制理论分析 [J]. 西安建筑科技大学学报, 2000, 32(2): 108 – 111.)
- [14] LI Chuangdi, GE Xinguang, LU Yunjun. Random response characteristics of dissipation structures with viscous and viscoelastic dampers [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2011, 28(3): 219 – 225.  
(李创第, 葛新广, 陆运军. 粘滞和粘弹性阻尼器减震结构的随机响应特性 [J]. 应用力学学报, 2011, 28(3): 219 – 225.)
- [15] ZHANG Xiaobing, YIN Shaohui, ZHU Kejun, et al. Simulation of compression molding aspherical glass lenses based on generalized maxwell model [J]. *Materials Review*, 2013, 27(10): 148 – 152.  
(张小兵, 尹韶辉, 朱科军, 等. 基于广义Maxwell模型的非球面光学镜片成型模拟 [J]. 材料导报, 2013, 27(10): 148 – 152.)
- [16] ZHOU Zhenxiong, QU Yongyin, YANG Jiandong, et al. Levitation control of a planar magnetic bearing based on improved ADRC [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(6): 31 – 38.  
(周振雄, 曲永印, 杨建东, 等. 采用改进型自抗扰控制器的平面磁轴承悬浮控制 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 31 – 38.)
- [17] LI Yi, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Attitude control for quadrotor helicopter based on discrete-time active disturbance rejection control [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(11): 1470 – 1477.  
(李毅, 陈增强, 孙明玮, 等. 离散型自抗扰控制器在四旋翼飞行姿态控制中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(11): 1470 – 1477.)
- [18] LIU Yisha, YANG Shengxuan, WANG Wei. An active disturbance-rejection flight control method for quad-rotor unmanned aerial vehicles [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(10): 1351 – 1360.  
(刘一莎, 杨晟萱, 王伟. 四旋翼飞行器的自抗扰飞行控制方法 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1351 – 1360.)
- [19] LI Jie, QI Xiaohui, XIA Yuanqing, et al. On linear/nonlinear active disturbance rejection switching control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(2): 202 – 212.  
(李杰, 齐晓慧, 夏元清, 等. 线性/非线性自抗扰切换控制方法研究 [J]. 自动化学报, 2016, 42(2): 202 – 212.)

#### 作者简介:

**李书培** (1981–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为惯性储能技术,

E-mail: lishupei198107@163.com;

**宋立伟** (1970–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为特种电

机设计及驱动控制, E-mail: song\_lw@hit.edu.cn.