

无模型控制方法的抗干扰能力分析

罗秋滨^{1,2}, 李秀英³, 韩志刚³

(1. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨学院 数学与计算机学院, 黑龙江 哈尔滨 150080, 3. 黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)



摘要: 无模型控制方法在实际应用中收到了良好的效果, 这是因为无模型控制方法有一系列优秀的性能。实践表明在这些性能中, 克服强干扰的能力是最重要的。分析了无模型控制方法的抗干扰能力, 并通过与 PID 调节器抗干扰能力的仿真比较, 进一步说明了无模型控制方法具有很强的抗干扰能力。

关键词: 无模型控制方法; 抗干扰; PID; 收敛速度

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2008) 13-3472-05

Analysis of Disturbance-resistant Ability of Model Free Control Method

LUO Qiu-bin^{1,2}, LI Xiu-ying³, HAN Zhi-gang³

(1. Department of Control Science and Engineering Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Mathematics and Computer, Harbin University, Harbin 150080, China; 3. Faculty of Electron-Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: The model free control method has obtained better effect in the practical application. This is because that the model free control method has a series of excellent properties. In the practice, it has been indicated that the ability of disturbance-resistant is the most important. The convergence of the model free control algorithm was analyzed, which shows that model free control method has the strong anti-interference capability because of the fast convergence. The simulation compared with the PID's anti-interference capability further verifies that the model free control method has greater ability of resisted disturbance.

Key words: model free control method; disturbance-resistant; PID; convergence speed

引言

无模型控制方法的提出, 在理论上和实际应用中, 都有着重大的意义。其中, 在理论方面的研究的目的在于, 一是打破线性的框架, 冲破 PID 半个世纪以来的统治地位; 二是避免在运用现代控制方法设计控制律时, 对模型的过分依赖。而在实践方面的目的在于对工业过程控制中的那些难控环节, 可以实现稳定闭环控制。从上世纪 90 年代开始, 在上述两个方面都进行了大量的探索, 并收到了令人满意的效果。十余年的研究过程中所发表的成果, 应该说是“应用上”比“理论上”更丰富。无模型控制方法, 现已应用到石油、开采、化工、炼油、轻工、电力等行业, 其广泛的适用性已被大量的实践所证明。

目前, 无模型控制方法主要的应用场合是工业过程控制中的“难控环节”。这些所谓的“难控环节”都是用 PID 调节器或是由 PID 改善的调节器, 控制效果尚不能达到生产工艺的要求的控制环节。当用无模型控制方法代替 DCS (集散型控制系统) 中的 PID 算法或是盘装的 PID 调节器时, 这些“难控环节”几乎都能够实现闭环稳定控制。

无模型控制方法为什么会具有令人满意的功能? 这个问题一直为应用者所关心。本文的目的, 就是从无模型控制方法的各个优秀性能之间的相互关系出发, 来分析无模型控制方法具有抗干扰这个核心性能的原因。

事实上, 文献[1]给出了无模型控制方法设计的总体框架。在文献[2]中说明了这个总体框架的核心部分之一是“建模与反馈控制的一体化”。在文献[3]中对无模型控制方法对复杂系统单元环节的控制问题进行了分析。在文献[4]中, 对无模型方法能够对大时滞系统实现闭环稳定控制的原因进行了分析。文献[5]指出无模型控制方法对多变量系统进行非解耦控制, 也收到了良好的效果。文献[6]给出了无模型的大量应用实例, 文[7-8]给出了无模型控制方法和其它控制方法比较的仿真研究。本文是以上一系列工作的继续, 重点是对无模型控制方法的抗干扰能力进行分析, 并指出在无模型控制方法的一系列优良的控制功能中, 抗干扰功能是它的核心的功能。

1 无模型控制方法的各种控制功能在实践中的表现

实践表明, 无模型控制方法的控制功能比一般的控制方法优越得多。而无模型控制方法的大部分功能是通过相应的算法来实现的。其中最重要的功能包括: 克服大时滞功能;

收稿日期: 2007-03-21

修回日期: 2007-09-27

基金项目: 黑龙江省教育厅科技项目 (10543073)

作者简介: 罗秋滨(1970-), 女, 黑龙江省讷河人, 博士生, 研究方向为非线性系统建模与控制。

控制强耦合系统的功能; 强干扰抑制功能; 对时变系统的控制功能; 对非线性现象的控制功能。这些功能在无模型控制方法的实际应用中都有所表现, 下面给出一些具体的实例:

1.1 克服大时滞的实例

加热炉的温度控制系统是典型的大时滞系统。例如独山子炼油厂 II 糠醛炉-1 的温度控制, 一直在 FOXBRO 的 DCS 控制之下, 基本工艺流程是介质由萃取塔顶部经换热器去炉-1(精液炉)加热到 205-210 度, 去精液闪蒸塔(塔-2/A)后, 顶部醛气去塔-5, 油品介质去精液汽提塔(塔-2/B)。炉-1(加热)的温度控制是该装置的一个重要控制回路, 实践表明该控制回路具有很大的时滞。

在这一系统上没有把无模型控制律加入到 FOXBRO 的 DCS 之前, 炉出口温度控制非常不平稳, 波动幅度大。无模型控制方法的应用彻底改变了原来的控制形势, 对该系统实现了闭环稳定控制, 控制精度得到了很大提高。

1.2 控制强耦合系统的实例

克拉玛依炼油厂三十万吨焦化装置是用 Honeywell 公司的 DCS 进行控制的, 该装置的焦化加热炉出口的温度自开工以来, 一直处于人工手动状态。该加热炉左右各有八个喷嘴, 中间设有一米高的挡墙, 但炉高十几米, 所以左方和右方喷嘴燃烧所生成的热量严重耦合。而且左方炉出口温度设定值是 498^oC, 右方炉出口温度的设定值是 502^oC, 用 PID 控制无法实现闭环稳定控制。

采用了无模型控制器对这个加热炉的出口温度进行控制。左右两组喷火口与相应的炉膛, 炉出口温度各形成一个串级闭环系统, 完全实现了闭环稳定控制。左右两个炉出口控制误差, 在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 之内。

1.3 克服强干扰的实例

锦西石化分公司南蒸馏装置在 Foxboro 公司的 DCS 控制之下, 运行一直不稳, 其根源来自三个加热炉的炉温不稳。采用无模型控制系统后, 使南蒸馏装置三个加热炉长期处于闭环稳定运行状态, 正常情况下, 炉出口温度变化不超出 1°C 。

在南蒸馏装置中, 炉 1 炉 2 炉 3 三个加热炉的控制方案相同, 即都采取带有四路前馈的炉出口温度与炉膛温度串级控制。炉出口是主回路, 炉膛是副回路。燃料直接对炉膛加热, 用以控制炉膛温度从而达到控制炉出口温度的目的。阀的开度信号取的是炉膛温度调节块的输出。我们把四路可测量的强干扰作为前馈引入到无模型控制律之中, 它们分别是: 瓦斯压力、燃料油压力、处理量、进料温度。

无模型控制方法在南蒸馏装置三个加热炉炉温控制成功的应用, 可以看出该控制方法具有很强的抗干扰能力。

1.4 控制非线性现象实例

大庆石化炼油厂硝酸氨生产中和过程是一个非线性的、大时滞系统, pH 值是该系统的一个重要工艺参数, 工艺要

求 pH 值控制在 3.5 左右。按操作人员的描述: 用手动操作改变处理量, 即提量或降量以后, 酸的流量也随之增加或减少, 但 pH 值经过很长时间才产生明显的变化, 这一过程大约须十分钟左右。变化一旦出现, pH 值就变化得很快。当发现 pH 值发生这样的变化时, 再来改变酸的流量, 使 pH 值稳定已经来不及了。所以这是一个非线性、大时滞、具有未知干扰的很难控制的过程。

对这类强非线性和大时滞系统, 用 PID 调节器根本无能为力。采用无模型控制方法对中和过程 pH 值进行控制, 使控制过程实现闭环稳定, 收到了预期的效果, pH 值在 3.5 ± 0.3 之间变化。

2 无模型控制方法的控制功能之间的联系

无模型控制方法的各种功能之间并不是相互独立的, 而是存在着一定的联系。

2.1 克服大时滞能力

控制方法的克服大时滞能力的强弱是目前控制工程人员十分关心的问题。一般大时滞系统控制存在的主要问题表现为控制速度和系统稳定性之间的矛盾, 控制速度快, 系统则产生振荡; 控制速度慢, 无干扰时控制结果还可以, 一旦有大的干扰发生, 系统的测量值远离设定值, 长时间不能返回到原来的状态。为达到克服大时滞的目的, 必须找到快速克服大干扰所导致的大偏差的方法。所以克服大干扰能力的强弱对克服大时滞是至关重要的。

2.2 强耦合环节的控制

关于强耦合环节的控制, 我们可以对强耦合的各环节的控制所经历的过程进行分析。例如有三个环节 A_1, A_2, A_3 , 互相存在着强耦合, 即它们的输出和输入都互相关联。事实上, 这种耦合关系是不多见的, 常见的耦合是输出之间存在着耦合或输入之间存在着耦合。无论是哪一种耦合, 我们都可以进行如下的处理, 以环节(系统) A_1 为例, 来自于环节(系统) A_2 和 A_3 的输出耦合和输入耦合, 可以看成为外界对它的干扰, 一般的说它们是可测量的干扰。如果控制律有足够的克服这种干扰的能力, 那么所谓的耦合就被消除了。所以对于存在耦合的各环节, 如果每个控制律都具有对这种互相干扰的抑制能力, 则解耦问题就变成了克服相互干扰的问题了。只要控制算法有足够强的抗干扰能力, 那么就可以对复杂系统进行非解耦控制了。

2.3 克服强干扰的能力

克服强干扰的能力是任何控制律都应该具备的能力(功能), 但不同的控制律具有这项功能的程度是不同的。系统存在的干扰可分为两类: 第一类是可测量的干扰, 例如在加热炉的炉温控制系统中, 瓦斯压力变化对温度的干扰就属于这一类; 第二类是不可测量的干扰, 例如在加热炉的炉温控制系统中, 瓦斯成分变化对温度的干扰就属于这一类。这类

干扰对系统的稳定性危害最大。

克服强干扰的能力是由收敛性速度能所决定。

2.4 对时变特性的适应控制能力

关于时变系统的控制,自然要考虑应用自适应方法。已有的结果往往只考虑参数自适应,而没有考虑结构的自适应性,而复杂时变系统的控制,只考虑参数自适应是不够的,必须考虑结构的自适应性。另一方面,系统的剧烈时变也可看成是一种干扰。可见克服时变的适应控制能力与抗干扰能力,有着密切的联系。

总之,上述一系列功能起决定因素的是克服强干扰的能力,因为无模型控制器具有克服强干扰的能力,所以可以在实践中,在那些具有大时滞、强耦合、强干扰,具有时变特性等其他控制算法无能为力难控环节上表现出非凡的控制效果。

3 无模型控制律收敛性的重要结果以及收敛快速性分析

控制方法的抗干扰能力由其(稳定)收敛能力所决定,在本节中,我们给出无模型控制方法的收敛性的重要结果,以及收敛快速性的分析。

3.1 无模型控制律一般形式收敛性的重要结果

把无模型控制律写成便于分析的形式:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k}{a + \|\hat{\varphi}(k)\|^2} \hat{\varphi}(k) \\ \{A + D(Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k)\} (y_0 - y(k)) \quad (1)$$

其中 $D(\dots)$ 是一个适当的函数,它表示控制律的功能组合部分,而:

$$Y_{k-1}^{k-n} = \{y_0, y(k-1), \dots, y(k-n)\}$$

$$U_{k-1}^{k-m} = \{u(k-1), \dots, u(k-m)\}$$

a 是一大于 0 的很小的常数, A 和 θ 是无模型控制律的组态参量, $A > 0$, θ 是非负的向量,即其所有的分量都是非负的。 m 和 n 是正整数。

假设函数 $D[Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k]$ 满足下述条件:

- 1) 当 $\theta = 0$ 时,有 $D[Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, 0, k] = 0$
- 2) $D[Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k]$ 是 θ 的连续函数,其连续性对其余变量是一致的。

引理 对于 $B > 0$, 存在常值向量 $\theta_0 > 0$, 使得当组态参量 θ 满足 $0 \leq \theta < \theta_0$ 时,其功能组合部分恒满足:

$$B > D(Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k) \quad (2)$$

事实上,从函数 $D[Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k]$ 满足的条件 1) 和 2), 可以得出,对 $Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}$ 和 k 一致的有

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} D[Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k] = 0 \quad (3)$$

所以对于 $B > 0$, 必存在 $\eta > 0$, 使得当 $\|\theta\| < \eta$ 时,恒有

$$B > D(Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k)$$

于是只要取 θ_0 满足 $\|\theta_0\| < \eta$ 就可以了。

我们称满足引理条件的组态参量 θ 为可用的。

定理 1 假定对于控制律(1), 存在 $N > 0$, 使得当 $k > N$ 时, $\varphi(k)$ 与它的估值 $\hat{\varphi}(k)$ 之间恒满足关系:

$$\varphi(k) - \hat{\varphi}(k) = \varepsilon(k); \quad -\frac{\alpha}{2} \leq \varepsilon(k) \cdot \hat{\varphi}(k) \leq \frac{\alpha}{2}$$

$$\text{以及 } \alpha \leq \|\hat{\varphi}(k)\|^2 \leq \beta$$

其中 α 和 β 都是正常数。则在控制律(1)中有这样的常数 λ_k , 使得对于 $A > 0$, 当组态参量 θ 为可用的时,在该控制律作用下,被控系统的输出恒满足:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} y(k+h) = y_0$$

定理 2 假定对于控制律(1), 存在常数 $\delta > 0$, $\beta > 0$ 和 $N > 0$, 使得当 $k > N$ 时, $\varphi(k)$ 与它的估值 $\hat{\varphi}(k)$ 恒满足:

$$\delta \leq \varphi(k) \leq \beta; \quad \delta \leq \hat{\varphi}(k) \leq \beta$$

则在控制律(1)中有这样的常数 λ_k , 使得对于 $A > 0$, 当组态参量 θ 为可用的时,在该控制律作用下,被控系统的输出恒满足:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} y(k+h) = y_0$$

3.2 无模型控制方法收敛的快速性分析

无模型控制器,对线性系统和非线性系统,都具有非常好的控制功能。这里仍只考虑单输入单输出系统。

对线性或非线性对象(系统),如果它能用泛模型

$$y(k+1) - y(k) = \varphi(k)(u(k) - u(k-1)) \quad (4)$$

来描述,在一定条件下,应用无模型控制律进行控制就有着良好的收敛性质。这里我们仍假设系统是工程上可实现的。在这里,我们给出无模型控制律的收敛速度分析。

前面,已经给出一般的无模型控制律(1),假定收敛定理的条件已满足,由于组态参量 θ 为可用的,故对于给定的 $B > 0$ ($A > B$), 存在常值向量 $\theta_0 > 0$ 使得当功能组合参量 θ 满足 $0 \leq \theta < \theta_0$ 时,有 $B > D(Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k)$ 即有

$$B > D(Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k) > -B \quad (5)$$

适当的选取 $B > 0$ 和组态参数 A 满足 $A - B = \rho > 0$, (5) 式两端分别加上 A 有

$$A + B > A + D(Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k) > A - B$$

$$\text{令 } F(k) = A + D(Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \theta, k),$$

于是有

$$A + B > F(k) > \rho > 0 \quad (6)$$

现在控制律(1)可写成了

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k F(k)}{a + \|\hat{\varphi}(k)\|^2} \hat{\varphi}(k) \{y_0 - y(k)\} \quad (7)$$

置 $\lambda_k^* = \lambda_k F(k)$

对于线性系统,可以认为 $\varphi(k)$ 是常数 φ , 不妨假定 $\varphi > 0$, 在这种情形下可以认为 φ 的最小二乘估值 $\hat{\varphi}$ 当观测数据足够多时有 $\hat{\varphi} \doteq \varphi$ 。即 $\varphi(k) = \varphi \approx \hat{\varphi}(k)$, 上述控制律(7)就可近似的写成了:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k^*}{a + \varphi^2} \varphi(y_0 - y(k)) \quad (8)$$

并且“泛模型”(4)可写成

$$y(k+1) - y(k) = \varphi(u(k) - u(k-1)) \quad (9)$$

所以有

$$y(k+1) - y(k) = \frac{\lambda_k^* \varphi^2}{a + \varphi^2} (y_0 - y(k)) \quad (10)$$

于是只要取

$$\lambda_k^* = \frac{a + \varphi^2}{\varphi^2} \quad \text{即} \quad \lambda_k = \frac{a + \varphi^2}{\varphi^2 F(k)}$$

就有

$$y(k+1) - y(k) = y_0 - y(k) \quad (11)$$

也就是 $y(k+1) = y_0$

由此可以看出, 当被控对象是线性系统时, 在控制律(1)的作用下, 几乎仅需一拍(即经过一次调节), 就可使被控对象的测量值达到设定值。

而当系统是非线性时, 由于 $\hat{\varphi}(k)$ 是 $\varphi(k)$ 的最佳估值, 于是可以假定 $\varepsilon(k) = \varphi(k) - \hat{\varphi}(k)$ 足够小, 即存在小的 $\varepsilon > 0$ 使 $|\varepsilon(k)| < \varepsilon$ 。在这一假定下, 可以取 $\hat{\varphi}(k) \approx \varphi(k)$ 。

把(7)代入(4)可有:

$$y(k+1) - y(k) = \frac{\lambda_k^* \varphi(k) \hat{\varphi}(k)}{a + \hat{\varphi}(k)^2} \{y_0 - y(k)\} \quad (12)$$

$$\text{置 } \lambda_k^* = \frac{a + \hat{\varphi}(k)^2}{\varphi(k) \hat{\varphi}(k)}$$

就有 $y(k+1) - y(k) \approx y_0 - y(k)$

即 $y(k+1) = y_0$

这也说明了, 对于非线性参量 $\varphi(k)$ 随时间变化, 但其变化幅度不太大的非线性系统, 在无模型控制方法作用下, 也几乎仅需一步调节, 测量值就能接近于设定值。

通过上述分析, 我们看到, 对于线性系统和变化幅度不太大的非线性系统, 无模型控制方法的收敛速度, 都是非常快的, 几乎仅需要一步调节, 测量值就可以接近于设定值。正是因为无模型控制方法的收敛速度快, 在系统遇到干扰时, 测量值在还没远离设定值时, 就被调整到接近于设定值, 从而表现出优良的控制性能。正是由于无模型控制算法, 具有快速的收敛能力, 才使无模型控制器具有较强的抗干扰能力。

4 仿真例子

在仿真中, 我们试图通过对比无模型控制器和 PID 的收敛速度, 来说明无模型控制器具有较强的抗干扰能力。首先让我们来看一个例子:

$$\begin{aligned} y(k+1) &= 1.5y(k) - 0.56y(k-1) + 0.5u(k) \\ y_1(k+1) &= 1.5y_1(k) - 0.56y_1(k-1) + 0.5u_1(k) \\ y_2(k+1) &= 1.5y_2(k) - 0.56y_2(k-1) + 0.5u_2(k) \end{aligned} \quad (S1)$$

为了比较的公平性, 我们把无模型控制器与 PID 调节器的参数都整定到最佳态。对上述系统 S1 进行控制, 控制结

果如图 1, 图 2 所示。其中图 1 为无控制模型器的控制结果, 图 2 为 PID 控制结果。

结果说明了无模型控制器与 PID 调节器对此例的控制, 都收到了很好的效果。同时也看出了无模型控制器的收敛速度要快于 PID 调节器的收敛速度。

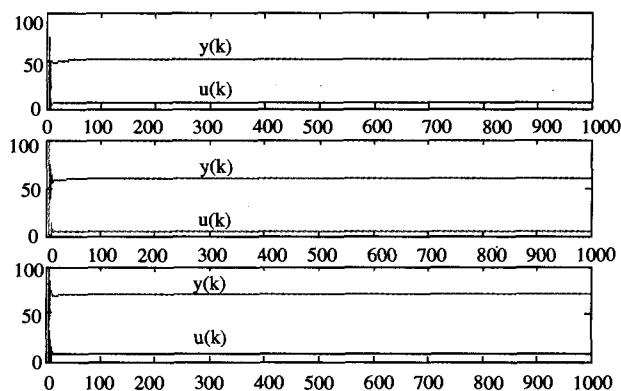


图 1 系统 S1 的无模型控制器控制结果

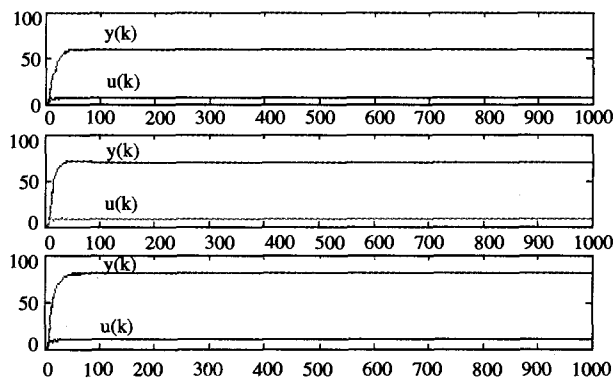


图 2 系统 S1 的 PID 调节器控制结果

下面再来考虑系统之间存在耦合情况, 所考虑的系统是在系统 S1 的基础上增加了耦合项:

$$\begin{aligned} y(k+1) &= 1.5y(k) - 0.56y(k-1) + 0.5u(k) + \sin(y_1(k)) \\ y_1(k+1) &= 1.5y_1(k) - 0.56y_1(k-1) + 0.5u_1(k) \cos(y_2(k)) \\ y_2(k+1) &= 1.5y_2(k) - 0.56y_2(k-1) + 0.5u_2(k) + \cos(y(k-1)) \end{aligned} \quad (S2)$$

分别用无模型控制器和 PID 调节器对它们进行控制, 其结果如图 3, 图 4 所示。可以清楚的看出无模型控制方法的解耦能力比 PID 调节器的解耦能力强的很多。

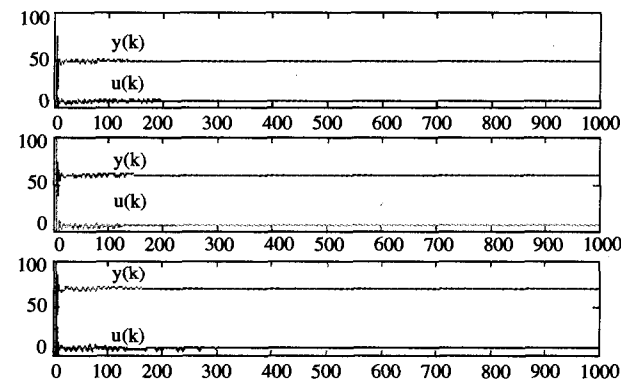


图 3 系统 S2 的无模型控制器控制结果

仿真结果进一步说明由于无模型控制方法的收敛速度快, 从而抗干扰能力强, 所以它具备很好的解耦能力。我们在前面的论述中已经指出, 各系统之间存在的相互耦合, 可以看成是各系统之间存在的相互干扰。如果这类相互干扰能被很快克服, 则相互存在的耦合也就被克服了。可见解耦问题可以看成是克服相互干扰的问题。而克服干扰的能力直接与控制器的收敛速度有关, 收敛速度快则抗干扰能力强。

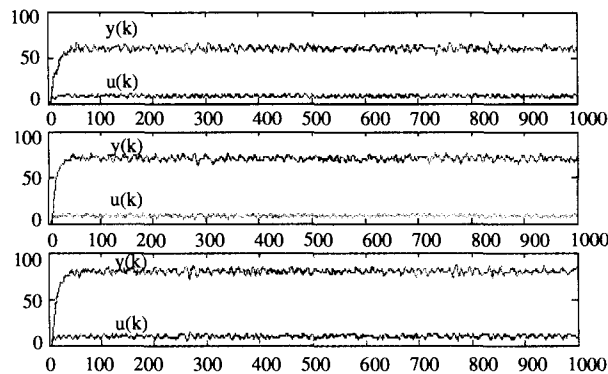


图 4 系统 S2 的 PID 调节器的控制结果

5 结论

本文通过对无模型控制方法的功能分析, 总结出无模型控制方法的各种功能之间并不是相互独立的, 而是存在着一定的联系, 并且在所有优秀的性能中, 抗干扰能力是最重要的。而抗干扰能力的强弱又是直接由控制律的收敛速度所决

定的。通过对无模型控制算法的一般形式的收敛性, 以及收敛的快速性的分析, 得出了无模型控制方法的抗干扰能力强的结论。通过仿真实例, 和 PID 对比, 也能得出不论在一般系统, 还是在存在耦合的系统中, 无模型控制器收敛速度都高于 PID 的控制收敛速度的结论, 从而也证实了无模型控制方法的抗干扰能力较强的这一结论。

参考文献:

- [1] 韩志刚. 无模型控制器理论与应用的进展[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(2): 13-16.
- [2] 韩志刚. 关于建模与自适应控制的一体化途径[J]. 自动化学报, 2004, 30(3): 380-389.
- [3] 韩志刚, 大型复杂系统控制器设计的功能组合途径[J]. 控制工程, 2004, 11(2): 103-107.
- [4] 韩志刚. 一类复杂系统非建模控制方法的研究[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 398-402.
- [5] 韩志刚, 蒋爱平, 汪国强. 无模型控制方法对多变量耦合系统控制的应用研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(7): 1155-1158.
- [6] 韩志刚, 无模型控制的应用[J]. 控制工程, 2002, 9(4): 22-25.
- [7] 蒋爱平, 李秀英, 韩志刚, 关于自适应控制应用效果的分析和仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 1090-1094. (JIANG Ai-ping, LI Xiu-ying, HAN Zhi-gang, Analysis and Simulation for Effect of Adaptive Control Applications [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(5): 1090-1094.)
- [8] 曹荣敏, 侯忠生, 无模型控制方法在直线电机控制中的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(10): 2874-2877. (CAO Rong-min, HOU Zhong-sheng, Simulation Study on Model-free Control Method in Linear Motor Control System [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(10): 2874-2877.)

(上接第 3467 页)

动态增加文档属性、文档类型定义、文档对象权限定义、文档查询、文档批量上传与下载、系统集成以及文档的检入、检出、审批、发放、废弃、创建、删除和修改等。

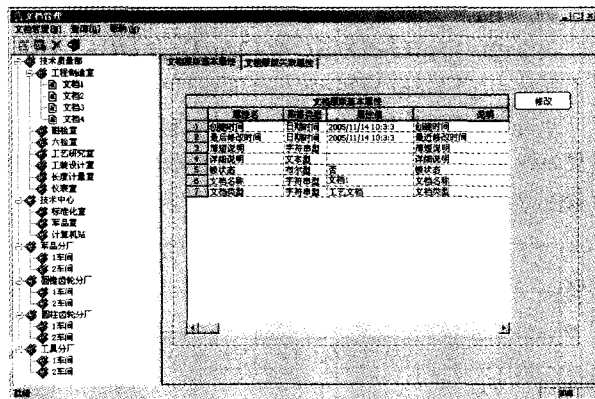


图 9 JDPDM 按部门划分的文档分类导航界面

4 结论

本文以 PDM 国际规范“PDM Enablers”为依据, 就支持飞行器并行设计的文档管理模型展开研究。在深入研究 PDM Enablers 的基础上, 提出了一种基于 PDM Enablers 并

支持飞行器并行设计的文档管理扩展模型。应用表明, 此模型可行、有效, 能很好地支持飞行器的协同设计。

参考文献:

- [1] 来可伟, 殷国富. 并行设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] Object Management Group. Product Data Management Enablers Specification, version 1.3 [S]. OMG document: formal. <http://www.omg.org/2000-11-11>
- [3] 杜湘瑜, 尹全军, 黄柯棣. 基于 Multi-Agent 的武器系统虚拟样机开发环境研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 104-107.
- [4] 梅珊, 赵雯, 朱一凡, 王维平. 插件式可重配导弹总体设计集成优化框架研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(12): 3564-3569.
- [5] 鲍福廷, 徐东来, 曹军伟. 固体火箭冲压发动机一体化 CAD 系统设计[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(3): 19-24.
- [6] 梁国柱, 张卫华, 郭红杰, 等. 固体火箭发动机集成方案设计系统 SRMCAD [J]. 固体火箭技术, 2003, 26(3): 18-20.
- [7] 刘霞. 基于 Avidm 框架的卫星设计集成技术研究[J]. 航天器工程, 2001, 10(4): 22-28.
- [8] 解红雨. 固体火箭发动机分布式集成设计平台及其关键技术研究 [D]. 国防科学技术大学, 2006.
- [9] 钟诗胜, 李涛, 汤新民, 林琳, 王艳秋. PDM 中基于工作流的电子仓库和文档管理[J]. 计算机集成制造系统—CIMS, 2004, 10(3): 336-341.
- [10] 戴金海. 并行工程中的产品数据管理[R]. 长沙: 国防科技大学航天与材料工程学院, 2006.