

可拓自适应混杂控制

何 斌^{1,2}, 朱学锋¹

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广东工业大学 经济管理学院 信息管理工程系, 广东 广州 510090)

摘要: 针对自适应控制只能处理渐变问题和量变问题的局限性, 探讨运用可拓控制对自适应控制进行补充的问题, 建立一种新型的控制方法——可拓自适应混杂控制方法. 该控制方法的体系结构由自适应控制器和可拓控制器两个部分组成, 中间通过基于可拓集合的智能开关来转换连接. 自适应控制器的输出计算是基于可拓集合的测度模式的, 它只依赖于控制特征量的先验经典域和节域, 无需预先提供数学模型或控制结构信息. 可拓控制器由可拓模型、关联度计算、可拓分析、可拓变换和优度评价 5 个模块组成, 它善于处理非渐变和质变的控制问题.

关键词: 自适应控制; 可拓控制; 可拓集合; 智能控制开关; 可拓变换

中图分类号: TP273, TP18

文献标识码: A

Hybrid extension and adaptive control

HE Bin^{1,2}, ZHU Xue-feng¹

(1. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Department of Information Management Engineering, School of Economics and Management,
Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510090, China)

Abstract: Considering the fact that the adaptive control can deal only with the cases of gradual and quantitative changes, the paper discusses the possibility that the extension control can form a supplement to adaptive control, and proposes a novel control method called hybrid extension and adaptive control. The system structure of the control method is composed of adaptive controller and extension controller, which are connected by an intelligent control switch based on extension set. The output calculation of the adaptive controller is based on the measure partition of extension set. It is built only upon the known classic field and limitation field and does not need provided mathematical models and provided control structure information. The extension controller, good at dealing with big change and qualitative change, is composed of such five modules as extension model, dependent degree calculation, extension analysis, extension transformation and excellent degree evaluation modules.

Key words: adaptive control; extension control; extension set; intelligent control switch; extension transformation

1 引言(Introduction)

半个世纪来, 自适应控制技术突飞猛进, 取得了喜人的成果. 自适应控制能处理一些具有不确定性的系统, 这些不确定性包括未知和时变的结构、参数或扰动^[1~4]. 在系统和环境的信息不完备的情况下, 在外部环境条件发生变化时, 自适应控制能够适应新情况, 通过自动调整系统的结构、参数或控制策略来保持一定的功能, 达到改善系统控制品质的目标.

但自适应控制不能应付控制过程中出现的未预见性的、非渐变的或质变的问题, 以及突发事件和紧急情况. 例如, 在一定的海浪、海涌情况下, 船舶自适应驾驶仪能自动调整航向和航速, 保证船舶的稳定航行. 但当海上风力达到一定程度, 船舶横向倾角超

过一定角度进入危险范围时, 自适应驾驶仪就无能为力了. 自适应控制只能在整个流程都很清楚, 完全可预见的条件下工作, 一般适用于模型参数缓变化、外界干扰不强的系统^[2]. 未预见性的、非渐变的或质变的问题, 以及突发事件和紧急情况的处理仍然由人垄断. 只有人才能很快意识到哪些方面出了问题, 问题有多严重, 迅速判断整个系统的情况, 随机应变, 运用自己的创造力“在线”地设计出新的控制策略, 度过难关. 大量实践表明: 在得到必要的操作训练后, 由人实现的控制方法是接近最优的^[5]. 总的来说, 自动装置能以极高的速度处理信息, 工作有条不紊, 但很死板; 人类操作员比较机敏, 却缺乏条理和速度. 所有复杂系统, 几乎都是由人和自动控制设备

一起来实施控制的:人主管全局决策,处理未预见性的、非渐变的或质变的问题,以及突发事件和紧急情况;自控装置则负责常规、繁琐的具体工作。

换句话说,控制系统要控制未预见性的、非渐变的和质变的问题,要控制带突发事件或紧急情况的复杂系统,必须引入一个开放性的环节,在这个环节里,人脑的创造力和聪明才智可以发挥作用。可拓控制正好可以提供这样一个环节,因此,尝试把二者相结合,建立可拓自适应混杂控制具有理论意义和实用价值。

2 可拓控制的基本思想(Basic thought of extension control)

可拓控制的思想源于以蔡文为首的我国学者创立的新学科“可拓学”^[6~9]。20世纪90年代初,华东理工大学的王行愚教授及其学生开始了“可拓控制”的研究工作,首先提出了“可拓控制”的概念,并在特征模式和测度模式识别的基础上建立了“可拓控制器”^[10,11]的体系结构。后来,清华大学的金以慧教授及其学生对可拓控制的体系结构进行了改进^[12],提出了双层可拓控制结构。近年来,国内外学者把可拓控制应用到滑模控制、非线性系统控制以及控制系统的信息检测^[13~16]等方面,在数值优化、数值分析和形式建模方面取得了一定成果。

从控制对象上看,可拓控制能很好地模仿人类概括、学习和解决不相容问题的能力,善于处理矛盾问题、未预见性的问题和不可预料事件。它面向矛盾问题,研究处理矛盾问题转化为相容问题的变通性和创造性。可拓控制比现有各种控制方法能更好地模拟人类运用变通性和创造性处理矛盾问题的过程。

从模型上看,可拓控制最突出的特点是它不依赖于控制系统的结构信息,不需要任何预先提供的数学模型^[5]。因此,它没有由于预定模型或结构隐含错误而导致的问题,能很好地应用于那些了解尚不充分甚至完全未知的领域,此特性使它在无法预料的紧急、灾难性情况的处理方面,能发挥实时处理的作用。

从方法上看,可拓控制是一种定性和定量相结合的控制方法,它的定性分析工具是以基元为基础的可拓分析和可拓变换方法,它的定量分析工具是以可拓集合为基础的关联函数和优度评价方法。它不仅考虑控制对象的数量关系,还考虑控制对象及其特征的变化。这种定性和定量相结合的特点使它既能用定性分析把握控制过程中各对象质的规定性,也能用定量分析来补充说明事物的质变中量与

度的概念,这就为处理控制过程中的各种矛盾问题提供了恰当的模型。

3 可拓自适应混杂控制(Hybrid extension and adaptive control)

3.1 可拓自适应混杂控制的控制结构(Structure of hybrid extension and adaptive control)

自适应控制善于处理控制中量变和渐变的情形,可拓控制善于处理质变和非渐变的情形,将二者结合起来,发挥各自的优势,这就产生了可拓自适应混杂控制。图1是可拓自适应混杂控制的一种方案,它分为自适应控制器(Adaptive Controller,简记为AC)和可拓控制器(Extension Controller,简记为EC)两部分,它们构成一个简单的可拓自适应混杂控制单元。每当运行条件变化使自适应控制器的性能下降到某一限度时,运行监控器(Executive Monitor,简记为EM)将调整系统工作状态,使自适应控制处于学习状态,此时EC将保证系统的正常运行。该系统共有3种运行状态:EC单独运行,EC和AC同时运行,AC单独运行。监控器EM负责它们之间运行的切换。在EC和AC同时运行的情形,EC的控制作用往往会影响AC的控制作用。

复杂的混杂自适应控制系统则是若干个可拓自适应混杂控制单元串联和并联的结果。

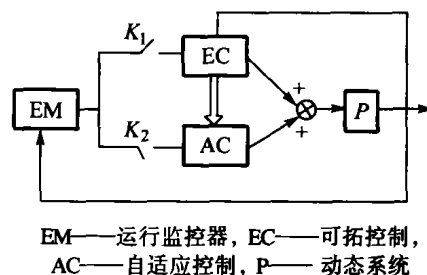


图1 可拓自适应混杂控制系统

Fig. 1 System of hybrid extension and adaptive control

3.2 可拓控制系统的设计(System design of extension control)

可拓控制系统的结构如图2,其中广义对象是包括执行机构、被控对象及检测装置在内的等效模型,其余5个模块是可拓控制器的主要环节。这里主要介绍可拓控制器的5个主要环节。

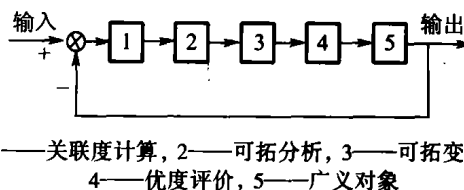


图2 可拓控制系统的结构

Fig. 2 System structure of extension control

1) 确立控制问题的可拓模型.关键是确立控制问题的核问题,包括控制目标和控制条件,并用基元(包括物元、事元和关系元)表示控制目标和控制条件.

例如,在船舶控制问题中,假设控制目标和控制条件分别为

$$R = \begin{bmatrix} \text{船舶 } A & \text{船速} & v_1 \\ & \text{航向} & v_2 \\ & \text{期望横向倾角} & v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & c_3 & v_3 \end{bmatrix},$$

$$r = r_1 \wedge r_2.$$

其中

$$r_1 = \begin{bmatrix} \text{船舶 } A & \text{负载} & v_4 \\ & \text{吃水量} & v_5 \\ & \text{实际横向倾角} & v_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & c_4 & v_4 \\ & c_5 & v_5 \\ & c_6 & v_6 \end{bmatrix},$$

$$r_2 = \begin{bmatrix} \text{航海条件 } B & \text{天气情况} & v_7 \\ & \text{海风级别} & v_8 \\ & \text{海水温度} & v_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & c_7 & v_7 \\ & c_8 & v_8 \\ & c_9 & v_9 \end{bmatrix}.$$

也就是说,控制问题 P 就是要在条件 r 下,实现目标 R , 记为

$$P = R * r.$$

从基于特征模式的控制方法看,这时特征状态的集合为

$$S = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9).$$

2) 关联度计算.根据控制问题的可拓模型建立可拓集合^[8,9],计算问题的关联度 $K(P)$ (即关联函数值),分3种情形:

i) $K(P) \geq 0$, 说明控制问题为相容问题,这时通过常规的自适应控制方法可使控制问题达到期望的控制目标,这个阶段是自适应控制阶段;

ii) $-1 \leq K(P) \leq 0$, 说明控制问题为不相容问题,如果只采用常规的自适应控制方法无法使不相容的控制问题转化为相容的控制问题.但通过增加一定的可拓控制辅助手段,可使不相容的控制问题转化为相容的控制问题,然后再采用常规的自适应控制就能达到理想的控制,这个阶段是“自适应控制+可拓控制”的阶段;

iii) $K(P) \leq -1$, 说明控制问题为不相容问题,而且自适应控制方法完全失效,这个阶段又分两种情况:一是采用可拓控制手段(包括一些人工手段)可使不相容的控制问题转化为相容控制问题的情形;另一是完全不可控的情形,采用可拓控制手段(包括人工手段)都无法使不相容的控制问题转化为相容的控制问题.

3) 可拓分析.根据问题关联度的分类情况,利用可拓方法中的拓展规则、共轭规则和传导规则^[6,7],对控制问题的目标基元和条件基元进行可拓分析,为可拓变换的选择建立依据.

4) 可拓变换.根据步骤3)的可拓分析,确立基本变换的类型及其组合方式,通过对目标基元和条件基元的变换,制定把不相容的控制问题转化为相容控制问题的控制策略.

5) 优度评价.每一个控制策略的优劣是不同的,体现在控制效果方面也有差异,在具体实施控制策略之前,需要根据一定的衡量条件对其优劣的程度进行评价,以确保实际实施的每一个控制策略都能发挥实效.优度评价的基本算法如下(详细算法见文献^[6,7]):

i) 确定待评价的策略集;

ii) 确定衡量条件集;

iii) 确定不同衡量条件的权系数;

iv) 首次评价.利用非满足不可的条件去评价策略集中的每一个控制策略,舍去不满足此条件的策略;

v) 建立关联函数,计算每一个控制策略的合格度;

vi) 计算规范合格度;

vii) 计算每一个控制策略的优度.

3.3 自适应控制系统的设计(System design of adaptive control)

基于可拓集合的自适应控制系统的结构如图3所示.为简单起见,考虑单变量系统,设 x 为系统的给定值, y 为广义对象的输出.于是系统的误差为 $e = x - y$, 误差变化率为 $\dot{e} = de/dt$.根据先验数据,确定输出变量关于 e 和 $\dot{e}$ 的经典域元和节域元,分别为

$$R_{0y} = \begin{bmatrix} y & e & [-e_{0m}, e_{0m}] \\ & \dot{e} & [-\dot{e}_{0m}, \dot{e}_{0m}] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} y & e & [-e_m, e_m] \\ & \dot{e} & [-\dot{e}_m, \dot{e}_m] \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据式(1)和(2),建立输出变量关于 e 和 $\dot{e}$ 的可拓集合,确定测度模式的划分:

$$M_1 = \{S \mid K_{\bar{x}}(S) \geq 0\} =$$

$$\{S \mid e \in [-e_{0m}, e_{0m}], \dot{e} \in [-\dot{e}_{0m}, \dot{e}_{0m}]\},$$

$$M_2 = \{S \mid -1 \leq K_{\bar{x}}(S) \leq 0\} =$$

$$\{S \mid e \notin [-e_{0m}, e_{0m}],$$

$$\dot{e} \notin [-\dot{e}_{0m}, \dot{e}_{0m}], e \in [-e_m, e_m],$$

$$\begin{aligned}
 & e \in [-e_m, e_m], \\
 M_{2i} = \{S \mid a_{i-1} \leq K_{\bar{x}}(S) \leq a_i\}, i = 1, \dots, m, \\
 & \text{且 } -1 = a_0 < \dots < a_{i-1} \leq a_i \leq \dots \leq a_m = 0, \\
 M_3 = \{S \mid K_{\bar{x}}(S) \leq -1\} = \\
 & \{S \mid e \notin [-e_m, e_m], e \notin [-e_{0m}, e_{0m}]\},
 \end{aligned}$$

则 $M_1 \cup M_2$ 为自适应控制的特征状态 S 的可控范围, 相应的控制器输出计算的算法如下^[5]:

$$u(t) = \begin{cases} u(t-1), & K_{\bar{x}}(S) \geq 0, \\ -K_{\bar{x}}(S)u_M \operatorname{sgn}(e) + \epsilon, & -1 \leq K_{\bar{x}}(S) \leq 0, \end{cases}$$

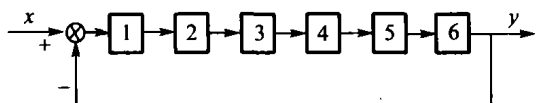
$$\epsilon = \begin{cases} K_I \int_0^t e dt, & |e| \leq \delta, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

其中: $u_M > 0$ 为控制器输出的幅值, ϵ 为小范围的修正量, K_I 为常数, δ 为小正数.

这里要注意的是, 特征区域 $M_1 \cup M_2$ 对应控制问题为相容问题的情形, 即

$$M_1 \cup M_2 = \{S \mid K(P) \geq 0\}.$$

基于可拓集合的测度模式只依赖于控制特征量的先验经典域和节域, 不需要任何预先提供的数学模型, 无需知道控制系统的结构信息, 因此, 它没有由于预定模型或结构隐含错误而导致的问题, 能很好地应用于那些了解尚不充分的控制系统. 关于基于可拓集合的自适应控制系统的详细内容, 参见文献^[5, 12, 13].



1——特征量抽取, 2——特征模式识别, 3——关联度计算, 4——测度模式识别, 5——控制器输出, 6——广义对象

图3 基于可拓集合的自适应控制系统的结构

Fig. 3 System structure of adaptive control based on extension set

3.4 智能控制开关设计 (Design of intelligent switch control)

如何设计监控器中的智能控制开关, 确定合理的控制开关函数是建立混杂自适应控制系统的关键问题, 本节利用基于可拓集合的关联函数建立控制开关函数. 为简单起见, 仍考虑控制问题可由单变量划分的情形, 假设 f 是控制问题划分所考虑的控制特征, $[a, b]$ 是自适应控制关于控制特征 f 的控制范围, $[c, a]$ 和 $[b, d]$ 是自适应控制关于控制特征 f 的预警范围或危险范围 ($[a, b] \subset [c, d]$), 即“自适应控制 + 可拓控制”的控制范围, 建立关联函数 $k(v)$ ^[8,9], 使

$$k(v) =$$

$$\begin{cases} -\rho(v, [a, b]), & v \in [a, b], \\ \rho(v, [a, b]) / [\rho(v, [c, d]) - \rho(v, [a, b])], & v \notin [a, b]. \end{cases}$$

其中

$$\rho(v, [a, b]) = |v - 0.5(a + b)| - 0.5(b - a),$$

$$\rho(v, [c, d]) = |v - 0.5(c + d)| - 0.5(d - c).$$

关联函数 $k(v)$ 的取值具有如下性质^[6,7]: $k(v) \geq 0$ 当且仅当 $v \in [a, b]$; $k(v) \in [-1, 0]$ 当且仅当 $v \in [a, c] \cup [b, d]$; $k(v) \leq -1$ 当且仅当 $v \notin [c, d]$; $k(v) = 0$ 当且仅当 $v = a$ 或 $v = b$; $k(v) = -1$ 当且仅当 $v = c$ 或 $v = d$.

$k(v)$ 的取值表明: 控制策略的转换在区间套

$$[a, b] \subset [c, d]$$

的端点进行.

对任意 $v \in (-\infty, +\infty)$, 本文的控制开关函数定义为

$$K = \begin{cases} \text{自适应控制}, & K(P) \geq 0, \\ \text{可拓自适应混杂控制}, & K(P) \in (-1, 0), \\ \text{可拓控制}, & K(P) \leq -1. \end{cases}$$

其中 $K(P) = k(v)$.

基于先验数据所确定的一个区间套

$$[a, b] \subset [c, d],$$

很容易建立以上控制开关函数. 利用这种方法所建立的控制开关函数, 比起模糊数学和灰色数学相应的控制形式要简单很多, 无需复杂的转换计算, 也无需大量采样样本的统计计算, 而且涵义也比较直观.

例如, 若 θ 是海上船舶的横向倾角 (单位为度), $[a, b] = [-4, +4]$, $[c, d] = [-8, +8]$, 则以上控制开关函数表明

1) 当船舶的横向倾角不超过 4° 时 ($k(v) \geq 0$), 是常规自适应控制范围, 可用自适应控制实现船舶航行的稳定性;

2) 当船舶的横向倾角在 $4^\circ \sim 8^\circ$ 时 ($k(v) \in [-1, 0]$), 是可拓自适应混杂控制预警范围, 说明海浪海风比较大, 可用可拓自适应混杂控制实现船舶航行的稳定性, 在采用自适应控制 (即使用自适应驾驶仪自动调整船舶航向、航速和横向倾角) 的同时, 需要启动可拓控制器, 增加一定的可拓控制手段.

这里, 目标是提高船舶航行的稳定性, 即

$$G = \begin{bmatrix} \text{提高} & \text{支配对象} & \text{航行的稳定性} \\ & \text{接受对象} & \text{船舶} \end{bmatrix}.$$

根据可拓分析方法, 进行发散性思维, 考虑 G 的下位蕴含策略, 可采用 3 种不同的可拓变换:

① 当船舶的横向倾角在 $4^\circ \sim 6^\circ$ 时.

如果船舶上有备用发动机, 可启动备用发动机

增大船舶行驶的航行速度(记为 T_1),即

$$T_1 = (\text{启用} \quad \text{支配对象} \quad \text{备用发动机}) \wedge \left[\begin{array}{cc} \text{增大} & \text{支配对象} & \text{航行速度} \\ & \text{接受对象} & \text{航船} \end{array} \right].$$

根据快而稳的原理,当船舶航行的速度加快时,容许的横向倾角可放大到 $4^\circ \sim 6^\circ$.

② 当船舶的横向倾角在 $6^\circ \sim 7^\circ$ 时.

通过起重设备将甲板上一定的货物搬进船舱(记为 T_2),并固定船舱里的货物,避免货物朝一侧大幅度倾斜(记为 T_3),即

$$T_2 = \left[\begin{array}{cc} \text{搬} & \text{支配对象} \\ & \text{工具} \\ & \text{施动对象} \end{array} \left[\begin{array}{ccc} \text{货物} & \text{原位置} & \text{甲板上} \\ & \text{目标位置} & \text{航舱} \\ \text{起重机等设备} & & \end{array} \right] \right],$$

$$T_3 = \left[\begin{array}{cc} \text{搬} & \text{支配对象} \\ & \text{工具} \\ & \text{施动对象} \end{array} \left[\begin{array}{ccc} \text{货物} & \text{原位置} & \text{甲板上} \\ & \text{目标位置} & \text{航舱} \\ \text{起重机等设备} & & \end{array} \right] \right],$$

这样可使船舶容许的横向倾角可放大到 $6^\circ \sim 7^\circ$.

③ 当船舶的横向倾角在 $7^\circ \sim 8^\circ$ 时.

将一节或若干节密封船舱注水(记为 T_4),即

$$T_4 = (\text{注水} \quad \text{支配对象} \quad \left[\begin{array}{ccc} \text{船舱} & \text{密封性} & \text{良好} \\ & \text{数量} & \text{一节或多节} \end{array} \right]),$$

这样可使船舶容许的横向倾角可放大到 $7^\circ \sim 8^\circ$.

这些可拓变换中任一个都可使船舶的重心下移或避免船舶朝一向倾斜,从而达到提高船舶航行的稳定性的目的.这些变换总体上使得船舶容许的横向倾角放大了一倍,这对于应对突发的海风海浪,对于挽救船舶上船员和旅客的生命,对于挽救船舶具有重要意义.

3) 当船舶的横向倾角超过 8° 时($k(v) \leq -1$),自适应控制完全失效,只能采用一些补救性的措施,比如发送求救信号或弃船逃生等.

在线实时控制时,自适应可拓控制发挥得比较好的,主要的还是 $k(v) \in [-1, 0]$ 这一阶段.当 $k(v) \leq -1$ 时,一般只能采用离线控制甚至人工控制的方法.

当然,引入可拓变换后,要进行精细的自适应可拓控制,自适应控制器的结构必须重新调整,重新确定测度模式的划分,重新确定控制器输出计算的算法,通过一定的仿真模拟学习过程,这种处理是可以实现的,限于篇幅,本文不再赘述.

4 结论(Conclusion)

自适应控制能处理一些具有不确定性的系统,这些不确定性包括未知和时变的结构、参数或扰动.但自适应控制所处理的不确定性主要是量变和渐变的情形,对于未预见性的、非渐变的或质变的问题,以及各种突发事件和紧急情况,自适应控制就力不从心了.可拓控制不擅长于处理量变和渐变的情形,但适合于处理控制过程中出现的未预见性的、非渐变的和质变的问题,以及需人工参与的各种突发事件和紧急情况(包括故障处理).可拓自适应混杂控制能够集成二者的特点.它的实质是用成熟的自适应控制处理控制过程中量变和渐变的环节,而用可拓控制处理控制过程中质变的、突发的和未预见性的环节.这种控制实践在过程控制中大量存在,因此具有推广应用价值.在定量处理方面,本文两次运用了基于可拓集合的关联函数,但它们是运用在控制问题的两个不同的层面上的:一次用于开关函数的设计;一次用于测度模式的细分,体现了“类内(即 $K(P) \geq 0$)也可划分为不同模式”的分类控制思想.

文献[10,11]创造性地提出了“把不符合控制要求的动态系统”转化为“符合控制要求的动态系统”的可拓控制思想,并建立了基于特征模式和测度模式识别的控制模式,但从其所采用的可拓方法来看,仍未跳出量变和渐变控制的情形,本文把它看作广义自适应控制的一种情况.文献[12,16]探讨了上层可拓控制器,提出了选用新控制变量的思路,但对如何运用可拓方法进行操作未做论述.比较而言,本文所提出的可拓控制的新思路,能更好地处理和控制非渐变或质变的动态系统以及未预见性的各种突发事件和紧急情况,它是自适应控制的一个有益的补充.

参考文献(References):

- [1] 韩曾晋. 自适应控制[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
(HAN Zengjin. *Adaptive Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.)
- [2] 吴捷,杨金明,薛锋. 现代控制理论在交流传动中的应用[J]. 控制理论与应用,1999,16(增刊):73-81.
(WU Jie, YANG Jinming, XUE Feng. The application of modern control technique in AC drives [J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(Suppl.): 73-81.)
- [3] 威德罗 B,瓦莱斯 E,著. 刘树棠,韩学昭,译. 自适应控制[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.
(WIDROW B, WALACH E. Translated by LIU Shutang, HAN Xuezhaoh. *Adaptive Inverse Control* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong Uni-

- versity Press, 2000.)
- [4] 周东华. 非线性系统的自适应控制导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 施普林格出版社, 2002.
(ZHOU Donghua. *Introduction to Adaptive Control of Nonlinear Systems* [M]. Beijing: Tsinghua University Press & Springer Publisher, 2002.)
- [5] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996: 447 - 467.
(LI Shiyong. *Fuzzy Control, Neural Control and Intelligent Cybernetics* [M]. Haerbin: Publisher of Haerbin University of Technology, 1996: 447 - 467.)
- [6] 蔡文. 可拓集合和不相容问题[J]. 科学探索学报, 1983, 3(1): 83 - 97.
(CAI Wen. Extension set and incompatible problems [J]. *Science Exploration*, 1983, 3(1): 83 - 97.)
- [7] CAI Wen. Extension theory and its application. Chinese [J]. *Science Bulletin*, 1999, 44(17): 673 - 682.
- [8] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
(CAI Wen. *Matter-Element Model and Its Application* [M]. Beijing: Scientific and Technologic Documentation Publisher, 1994.)
- [9] 蔡文, 杨春燕, 林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
(CAI Wen, YANG Chunyan, LIN Weichu. *Extension Engineering Methods* [M]. Beijing: Science Press, 1994.)
- [10] 李健, 王行愚. 一种新型的专家系统——可拓专家系统[J]. 华东化工学院学报, 1993, 19(5): 617 - 621.
(LI Jian, WANG Xingyu. A new breed of expert systems—extension expert systems [J]. *J of East China Institution of Chemistry*, 1993, 19(5): 617 - 621.)
- [11] 王行愚, 李健. 论可拓控制[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(1): 125 - 128.
(WANG Xingyu, LI Jian. Extension control [J]. *Control Theory & Applications*, 1994, 11(1): 125 - 128.)
- [12] 潘东, 金以慧. 可拓控制的探索与研究[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(3): 305 - 311.
(PAN Dong, JIN Yihui. Exploration and study of extension control [J]. *Control Theory & Applications*, 1996, 13(3): 305 - 311.)
- [13] 陈珍源, 翁庆昌. 基于滑模控制的可拓控制器设计[J]. 中国工程科学, 2001, 3(9): 48 - 51.
(CHEN Zhenyuan, WONG Qingchang. Extension control design via sliding control [J]. *China Engineering Science*, 2001, 3(9): 48 - 51.)
- [14] 余永权, 张吉文. 可拓检测的方案生成[J]. 中国工程科学, 2001, 4(1): 64 - 68.
(YU Yongquan, ZHANG Jiwen. Generating available scheme for extension detecting technology [J]. *China Engineering Science*, 2001, 4(1): 64 - 68.)
- [15] 翁庆昌, 陈珍源. 非线性系统的自适应可拓控制器设计[J]. 中国工程科学, 2001, 3(7): 54 - 58.
(WONG Qingchang, CHEN Zhenyuan. Adaptive extension controller design for nonlinear systems [J]. *China Engineering Science*, 2001, 3(7): 54 - 58.)
- [16] 张永, 吴晓蓓, 许志良, 等. 一类多变量自校正系统的可拓控制[J]. 南京理工大学学报, 2002, 26(5): 486 - 489, 498.
(ZHANG Yong, WU Xiaobei, XU Zhiliang, et al. Extension control method in a kind of multivariable self-correcting system [J]. *J of Nanjing University of Science and Technology*, 2002, 26(5): 486 - 489, 498.)

作者简介:

何 斌 (1967—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 华南理工大学自动化科学与工程学院 2002 级博士生, 主要研究领域为可拓控制、人工智能和工业建模, E-mail: riverscut@163.com;

朱学峰 (1940—), 男, 华南理工大学自动化科学与工程学院教授, 博士生导师, 研究领域包括工业建模、优化控制和智能控制等。