

平行控制与数字孪生：经典控制理论的回顾与重铸

王飞跃^{1,2,3}

(1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 青岛智能产业技术研究院, 山东 青岛 266109)

摘要: 简要回顾经典控制、智能控制、平行控制的起源与发展, 针对具有高精度数字孪生模型的情况, 给出相应的平行控制数学形式, 并讨论其意义和应用。中心思想是对控制向量的时间导数进行建模, 而不是对控制向量本身进行建模, 由基于代数关系的控制变为基于微分方程的控制, 从而使控制系统与被控系统在数学形式和内容上完全等价, 为控制器的拟人化和智能化奠定基础。同时, 采用同样思想得出的主动感知的平行传感方程, 为智能平行传感器的设计提供了可能的方向。初步分析表明, 这一变革具有重要意义, 十分适合云边计算范式, 值得进行深入探索和研究。

关键词: 平行控制; 平行传感; 数字孪生; 平行智能; 平行系统; 智能控制

中图分类号: TP13

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202032

Parallel control and digital twins: control theory revisited and reshaped

WANG Fei-Yue^{1,2,3}

1. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109, China

Abstract: After a brief discussion of the origin and development of classic control, intelligent control, and parallel control, the mathematical equations for a class of parallel control systems was presented for problems with high precision digital twin models. The key idea was modeling the time derivative of system control instead of system control itself, which leads to differential equation based control rather than algebraic relationship based control, made the system and its control symmetrical in both form and content mathematically, thus provided the foundation for implementing human-like control and intelligent control. Same idea was also applied to system output equations, and proposed a new way for active sensing and design of parallel sensors. Preliminary results along those lines are illustrated and discussed.

Key words: parallel control, parallel sensing, digital twins, parallel intelligence, parallel system, intelligent control

1 引言

对平行智能及其支撑平行系统的原始思考源自20世纪80年代初, 计算力学中从材料疲劳断裂实

验的蒙特卡洛计算机模拟到计算实验的设想^[1], 后曾根据美国国家航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)空间站和月球/火星无人系统及其无人工厂的任务要求和实践, 于20世纪

收稿日期: 2020-09-01; 修回日期: 2020-09-10

通信作者: 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61533019, No.U1811463)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61533019, No.U1811463)

90年代初被称为“影子系统(shadow systems)”^[2]。21世纪初,针对复杂系统的管理与控制,上述系统正式被命名为“平行系统”^[3],该系统的核心是基于ACP方法,利用人工系统进行计算实验、生产数据、提炼智能;通过虚实互动、平行驱动和平行执行,构造虚实空间之间的双反馈和大闭环,完成“小数据、大数据、深智能”的智能系统“三步曲”。

平行系统的基本框架如图1所示,平行系统包括主要为物理形态的实际系统和软件形态的人工系统,并以学习与培训、实验与评估、管理与控制3种基础模式运行。其中实际系统与人工系统的对应关系可以是一对一、一对多、多对一及多对多。与传统并行计算的“分而治之”不同,平行计算的理念是“扩而治之”,利用虚实互动的过程提出复杂问题的解决方案。某些意义下,平行的理念就是智能的“虚数”,引入平行可使智能从简单空间进入复杂空间,进一步使其从简单智能走向复杂智能,从而克服单凭人类智能难以克服的“认知鸿沟”或“建模鸿沟”的基本问题^[4]。为此,笔者还引入社会物理信息系统(cyber-physical-social systems, CPSS)(或CSP(cyber-social-physical))的概念^[5-6],来明确人及社会因素等“软科学”知识在平行系统中的核心作用,针对社会复杂性和工程复杂性同时呈现的情况,构建知识自动化的基础设施,实现面向工程的新AI,即智能自动化(automation of intelligence)和相应的智能组织及智慧社会。

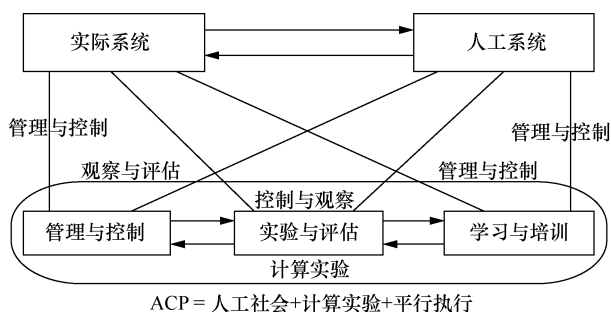


图1 平行系统的基本框架^[3]

社会计算、计算社会系统、平行管理与平行控制、平行交通、平行社会及经济系统等是比较早应用平行理论进行研究的领域^[7-15]。图2给出了平行控制的基本框架^[9],图3按系统的复杂性的程度给出平行控制与其他控制方法的不同与联系^[16]。一般而言,当相对复杂性高但精确度低时,人们只能利用人工系统进行平行控制;当相对复杂性、精确度为

中等时,可以采用软件定义的过程落实平行控制;当相对复杂性低而精确度高时,能够借助精准模型和数字孪生实施平行控制,并大量引用传统控制的方法和经验。参考文献[17-18]详细说明了数字孪生与平行系统的关系,本文将针对复杂性低、精确度高的情况讨论平行控制的具体方法,探索由平行控制方法将人工智能与智能控制深入融合的途径。

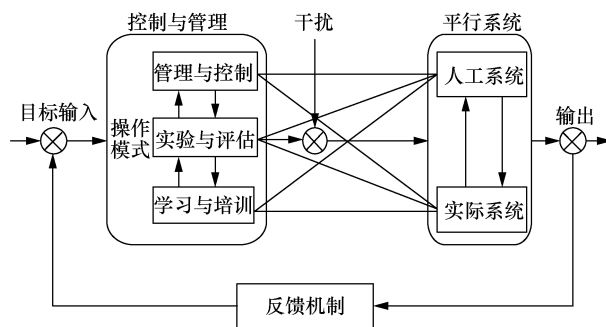


图2 平行控制的基本框架^[9]

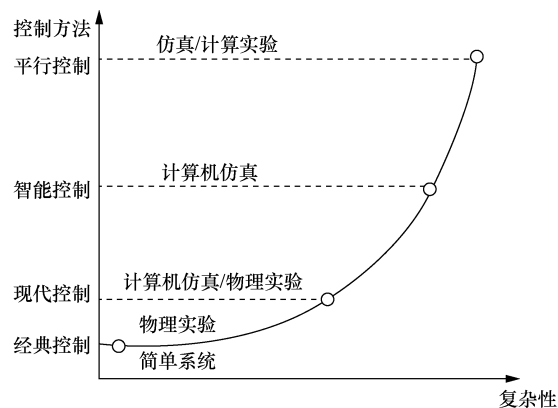


图3 控制方法与系统复杂性的不同与联系^[16]

2 控制回顾：智能控制与平行控制

关于控制的原始思想与实践可以被追溯到人类发展历史的初期,因为利用自然工具和人类认知改变环境来达到目的是人之天性。从科技文献角度来说,业界公认的控制理论文献始于著名的物理学家麦克斯韦(Maxwell J C)^[19]的论文“On governors”,发于著名的数学家罗斯(Routh E J)和数学家赫尔维茨(Adolf Hurwitz)分别于1874年与1895年独立提出的控制稳定性判据(事实上,数学家Charles Sturm较早建立了相关的定理),起于20世纪20年代的PID控制,从此走上了从基于传递函数的框图表示方法到基于微分方程的状态分析方法的发展道路,以物理自动化或工业自动化为核心任务,并一直发展到今天^[20-21],这就是经典控制理论的简要

发展历程。

图灵 (Turing A) 引入图灵机之后, 引发了对利用自动机 (automata) 进行拟人思维的智能控制的研究, 如早期关于有限状态自动机 (finite state machines)、智能自动机 (intelligent automata) 和移动自动机 (mobile automata) 的工作^[22-23]。美国华人学者傅京孙 (Fu K S) 是较早以科技文献形式提出“智能控制”的研究者^[24]。后来其同事 Saridis G N^[25]在人工智能和控制系统之外, 将信息论、分层递阶、运筹决策和系统工程等方法引入智能控制, 使之成为一个独立的研究与应用领域。今天, 从模糊逻辑、遗传演化到蚁群生物等各种智能控制算法层出不穷, 并针对工业自动化和信息自动化形成一个崭新的控制及自动化分支^[22-23]。

网络化和人工智能的普及与深入, 推动了智能产业的兴起, 导致了工程系统社会化、社会系统工程化、简单系统复杂化的新趋势。继续按照传统的思维发展控制理论与方法, 已呈现出基于大数据而几乎无数据可依、面向复杂问题而简单的测试都无法实现、声称智能系统却对使用人员提出了非分的智力要求等一系列的新问题。平行智能、平行系统、平行控制正是为解决这些问题与矛盾而提出的, 其核心是通过知识自动化, 实现智能的自动化, 使复杂系统简单化, 最终实现人机融合的真正智能控制^[7-16]。

3 经典控制的重铸：由孪生到智能

假如人们有被控系统的高精度模型, 即数字孪生, 在经典控制中, 其控制方法如下:

状态方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (1)$$

控制方程:

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}$ 是状态向量, $\mathbf{u}$ 是控制向量, $\mathbf{f}(\cdot)$ 和 $\mathbf{h}(\cdot)$ 分别是状态函数和控制函数。为简化讨论, 笔者忽略了时变、噪声和滞后等因素。

一般而言, 式 (1) 和式 (2) 是由物理或逻辑建模而来的, 反映了相应的物理定律或逻辑关系。关键的是, 控制函数不可对时间求导, 一个原因是物理规则不允许, 另一个原因是系统实现不允许, 因为这将导致噪声被放大和硬件变复杂等一系列的复杂工程问题。

平行控制的控制方法如下:

状态方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (3)$$

控制方程:

$$\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (4)$$

即将控制方程的左端改为控制向量对时间的导数。其中状态函数和控制函数与式 (1) 和式 (2) 的相应函数可以不完全一致。式 (3) 和式 (4) 的形式早在2005年关于平行控制的学术讨论中出现, 但讨论者皆认为对控制向量求导既无物理意义, 又无分析上的明显作用, 因此没有进行进一步的研究工作。

2009年, 笔者再次将这一形式的平行控制以框图 (如图4所示) 的形式呈现在中国科学院复杂系

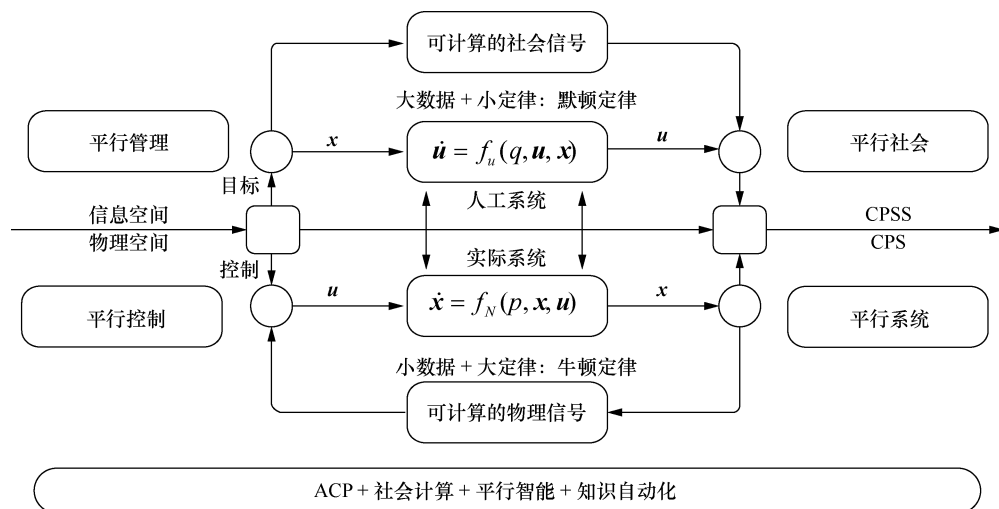


图4 基于 CPSS 的平行控制与管理的架构

统与智能科学重点实验室的年度学术报告中,并于2016年以英文发表^[26]。2019年,笔者与魏庆来等人在北京怀德海学院正式讨论基于式(3)和式(4)的平行控制问题(如图5所示),并将框图简化为如图6所示。初步分析结果令人振奋,平行控制可为控制理论的发展提供一个新的方向。

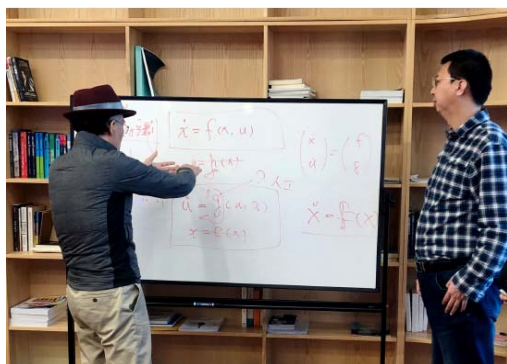


图5 王飞跃等人研讨基于式(3)~(4)的平行控制问题
(2019年12月拍摄于北京怀德海学院)

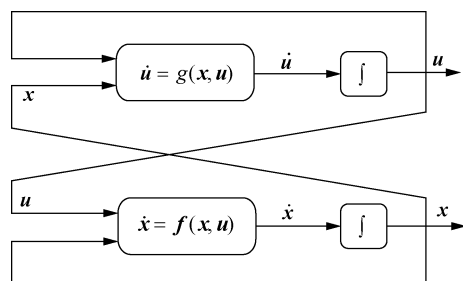


图6 基于ACP的平行感知的系统实现

平行控制式(3)和式(4)的意义如下。

- 使控制系统与被控系统在形式上对称,它们不再是一个代数方程、一个微分方程,而是两个对等的微分方程,从而使二者从形式到内容在数学上完全一致。这是实现拟人控制和傅京孙的以机器人实现智能控制设想的基础。

- 控制器不再是根据状态即时地决定控制量,而是根据状态决定控制的变化量,进而决定控制量本身。这为控制回溯历史、预测未来提供了数学基础,扩展了决定控制的信息空间。同时,这为以新的方式引入控制与被控角色的博弈对抗打下了基础,机器学习、人工智能等方法也更加有效地融入控制理论。

- 经典控制的式(1)和式(2)可被视为平行控制的特殊情况,对式(2)进行时间求导,并利用式(1),可以得到:

$$\dot{u} = \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \dot{x} = \frac{\partial h}{\partial x} \cdot f(x, u) = h'(x, u) \quad (5)$$

因此,经典控制可被视为控制的变化率与状态的变化率成比例的一种特殊的平行控制。经典控制的各种问题及相应的研究结果,都可以在平行控制的新视角下重新进行分析。

- 平行控制的式(3)和式(4)可被重新写成一个方程:

$$\dot{z} = G(z) \quad (6)$$

其中, $z = [x^T, u^T]^T$, $G(\cdot) = [f(\cdot)^T, h(\cdot)^T]^T$ 。这是一个简单的自治的微分方程,可惜函数 $G(\cdot)$ 未知待求,否则许多关于自治方程的分析结果可被直接利用。对于实验来说,这也为求解平行控制问题,特别是非线性平行控制问题提供了新的途径,是一个十分值得关注的方向。此外,这也为平行控制与基于核函数的神经网络方法建立了一种天然联系,人们可以利用最佳格点集和最小二乘方法,直接用神经网络求解非线性平行控制方程^[27-28]。

- 平行控制为“边缘简单,云端复杂”的云控制提供了一条新的途径。简言之,式(3)和式(4)可以在云端实施,式(1)和式(2)可以在边缘设备上实现,而且式(1)和式(3)可以不完全一致,式(1)一般应为式(3)的简洁式或简化版,而式(4)的控制向量 u 可以作为式(2)的控制向量 u 的指令式或设定目标(set points)。这在一定程度上解除了对 u 之时间导数的物理意义与负面作用的顾虑,因为云计算可以是物理模型之外的计算,其本身并非必须具有物理规则的基础。

总之,在有数字孪生模型的情况下,通过引入控制向量的时间导数,平行控制能够使被控系统与控制引导在数学上对称,并能够更方便地引入对抗博弈、机器学习、人工智能等方法,构造一个由孪生而智能的新途径。

4 理论与应用案例

参考文献[29-33]给出了建立线性平行控制的基本理论构架和一些非线性平行控制的初步结果。对于线性问题来说,平行控制的基本方程为:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \dot{u} &= Cx + Du \end{aligned} \quad (7)$$

其中, A 、 B 、 C 、 D 是相应维数的系统矩阵。定义广义状态变量 $z = [x^T, u^T]^T$, 可获得广义自治闭环系统:

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} z \triangleq Gz \quad (8)$$

并设其特征的方程为：

$$p(\lambda) = |\lambda I - G| \quad (9)$$

参考文献[29]给出了在可控与不可控情况下，根据希望的广义自治闭环系统的极点配置决定**C**和**D**的算法，该算法可被称为“平行极点配置定理”。参考文献[30]给出了离散后的相应结果，参考文献[31]建立了输出调节的线性平行控制结果。

线性平行控制极点配置：可控情况。算法如下^[29]。

算法1 系统可控时的平行控制器设计算法。

初始化：

给定系统矩阵**A**、**B**以及期望特征多项式，*m*和*n*分别是矩阵**B**的行数和列数。

执行：

1: 若*m*=1, 则

① 寻找**P**, 使得(**A**, **B**)可被转化为可控标准型；

② 定义矩阵**F**=[$\alpha_n \ \alpha_{n-1} \ \cdots \ \alpha_1$], 其中 α 是矩阵**A**特征多项式的系数；

③ 进行非奇异变换, 令 $\hat{C} = [-\beta_{n+m} \ -\beta_{n+m-1} \ \cdots \ -\beta_2]$, $\hat{D} = -\beta_1$, 其中 β 是期望特征多项式的系数；

取 $T_3 = I$, 则矩阵 **C**、**D** 可以由 $G = T_1 T_2 T_3 \hat{G} (T_3)^{-1} (T_2)^{-1} (T_1)^{-1}$ 获得, 其中 $T_1 \sim T_3$ 是坐标变换矩阵, 使得矩阵**G**变换成参考文献[29]中所需的形式。

2: 若*m*>1, 则

① 寻找**F**₁和**v**₁, 使(**A**+**B****F**₁, **B****v**₁)可控；

② 寻找**P**, 使(**A**+**B****F**₁, **B****v**₁)可被转化为可控标准型；

③ 定义向量 $\zeta = [\alpha_n \ \alpha_{n-1} \ \alpha_{n-2} \ \cdots \ \alpha_1]$ 、矩阵**F**=**F**₁**P**+**v**₁ ζ 、矩阵**V**=[$v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_m$];

④ 变换矩阵 $\hat{C}$ 和 $\hat{D}$, 重新分割矩阵 $\hat{G}$ ；

⑤ 重复步骤①至④*m*-2次, 获得矩阵 $\hat{G}_{m-2}$ ；

⑥ 对于矩阵 $\hat{G}_{m-2}$, 执行步骤①至③, 进行非奇异变换, 获得矩阵 $\hat{G}_{m-1}$ ；

⑦ 给出矩阵 $\hat{C}_{m-1}$ 和 $\hat{D}_{m-1}$, 可得矩阵**C**、**D**。

3: 返回：**C**、**D**。

线性平行控制极点配置：不可控情况。算法如下^[29]。

算法2 系统不完全可控时的平行控制器设计算法。

初始化：

给定矩阵**A**、**B**, 给定期望特征多项式。

执行：

1: 进行非奇异变换。

2: 若期望特征多项式不能被 $|\lambda I - A_1^*|$ 整除, 则无解, 进行步骤8; 否则, 进行下一步。其中, A_1^* 是系统(**A**, **B**)不完全可控情况下, 通过可控分解得到的。此时(**A**, **B**)不可控子系统为(A_1^* , 0)。

3: 定义新系统、平行控制器、闭环系统和特征多项式, 对于新系统, *M*和*N*分别是矩阵**B**的行数和列数。

4: 若*M*=1, 则

① 寻找**P**, 使得(**A**, **B**)可被转化为可控标准型, 其中(**A**, **B**)可控子系统为(**A**, **B**)；

② 定义矩阵 $\tilde{F} = [\tilde{\alpha}_N \ \tilde{\alpha}_{N-1} \ \cdots \ \tilde{\alpha}_1]$, 其中 $\tilde{\alpha}$ 是矩阵**A**特征多项式的系数；

③ 进行非奇异变换, 令 $\hat{C} = [-\tilde{\beta}_{N+M} \ -\tilde{\beta}_{N+M+1} \ \cdots \ -\tilde{\beta}_2]$, $\hat{D} = -\tilde{\beta}_1$, 其中 $\tilde{\beta}$ 是期望特征多项式的系数；

定义 $T_3 = I$, 则矩阵 **C**、**D** 可由 $G = T_1 T_2 T_3 \hat{G} (T_3)^{-1} (T_2)^{-1} (T_1)^{-1}$ 获得, 其中 $T_1 \sim T_3$ 是坐标变换矩阵, 使得矩阵**G**变换成参考文献[29]中想要的形式。

5: 若*M*>1, 则

① 寻找**F**₁和**v**₁, 使(**A**+**B****F**₁, **B****v**₁)可控；

② 寻找**P**, 使(**A**+**B****F**₁, **B****v**₁)可以被转变为可控标准型；

③ 定义向量 $\tilde{\zeta} = [\tilde{\alpha}_N \ \tilde{\alpha}_{N-1} \ \tilde{\alpha}_{N-2} \ \cdots \ \tilde{\alpha}_1]$ 、 $\tilde{F} = F_1 P + v_1 \tilde{\zeta}$ 和矩阵**V**=[$v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_m$], 其中, $\tilde{\alpha}$ 是**A**+**B****F**₁特征多项式的系数, $v_2 \sim v_m$ 是使得**V**非奇异的任意向量；

④ 变换矩阵 $\hat{C}$ 、 $\hat{D}$, 重新分割矩阵 $\hat{G}$ ；

⑤ 重复步骤①至④*M*-2次, 获得矩阵 $\hat{G}_{M-2}$ ；

⑥ 对于矩阵 $\hat{G}_{M-2}$, 执行步骤①至③, 进行非奇异变换, 获得矩阵 $\hat{G}_{M-1}$ ；

⑦ 给出矩阵 $\hat{C}_{M-1}$ 和 $\hat{D}_{M-1}$, 可得矩阵**C**、**D**。

6: 令**C**₁^{*}为合适维度矩阵, 可获得矩阵**C**、**D**。

$$G = \begin{bmatrix} Q \\ I \end{bmatrix}$$

$$G^* = \begin{bmatrix} Q^{-1} \\ I \end{bmatrix}$$

7: 返回：**C**、**D**。

8: 返回：“不存在平行控制器”。

举例如下。

例1: 可控线性系统。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (10)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} -0.0665 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & -3.663 & 3.663 & 0 \\ -0.686 & 0 & -13.736 & -13.736 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ 0 \ 13.736 \ 0]^T$$

如果希望的极点为 $[-1 \ -1 \ -2 \ -2 \ -3 \ -3]$,
算法1对应的 C 与 D 为:

$$C = [-3.752 \ 3 \ 3.830 \ 0 \ -9.273 \ 6 \ -8.515 \ 2]$$

$$D = 8.465 \ 5$$

即平行控制为:

$$\dot{u} = [-3.752 \ 3 \ 3.830 \ 0 \ -9.273 \ 6 \ -8.515 \ 2]x + 8.465 \ 5u$$

设初时状态 $x_0 = [0 \ 0.1 \ 0 \ 0]^T$, $u_0 = 0.1$,
图7和图8分别给出了相应的系统状态和控制变量的轨迹。

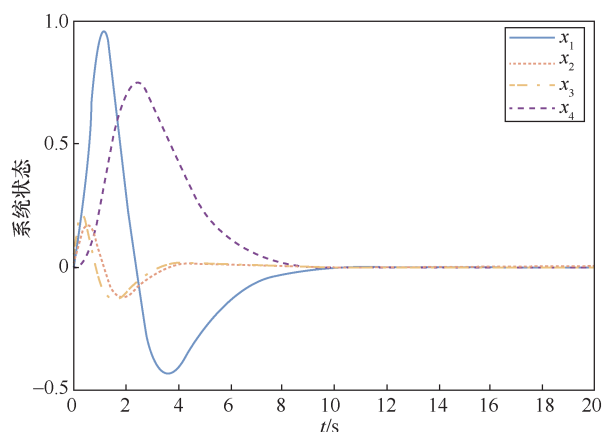


图7 例1的系统状态的轨迹

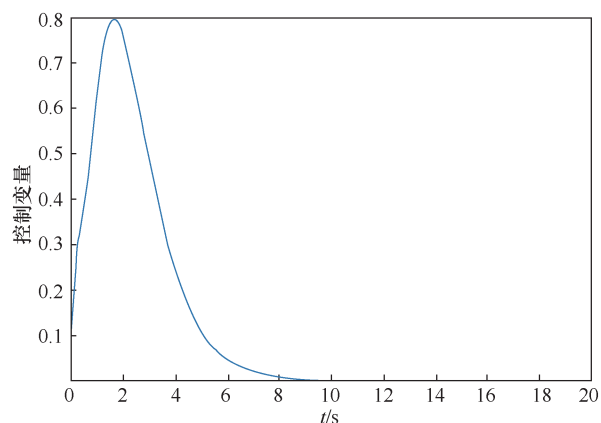


图8 例1的控制变量的轨迹

例2: 不可控线性系统。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (11)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

其不可控极点为 -1 , 如果希望的极点为 $[-1 \ -1 \ -2 \ -2]$, 则算法2对应的 C 与 D 为:

$$C = [c \ -30 \ -c \ -48], D = -8$$

其中 c 为常数。设初时状态 $x_0 = [0.5 \ 1 \ 1]^T$, $u_0 = 0.1$, $c = -3$, 图9和图10分别给出了相应的系统状态和控制变量的轨迹。

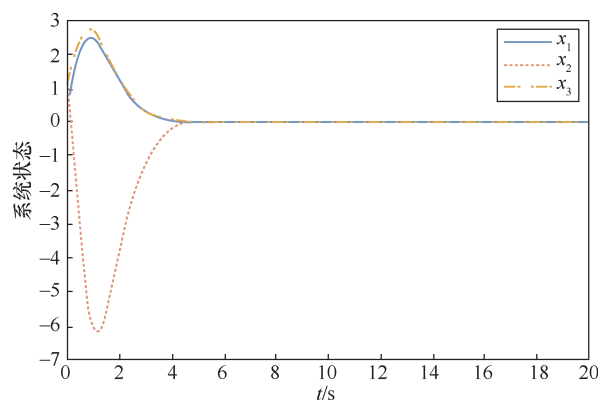


图9 例2的系统状态的轨迹

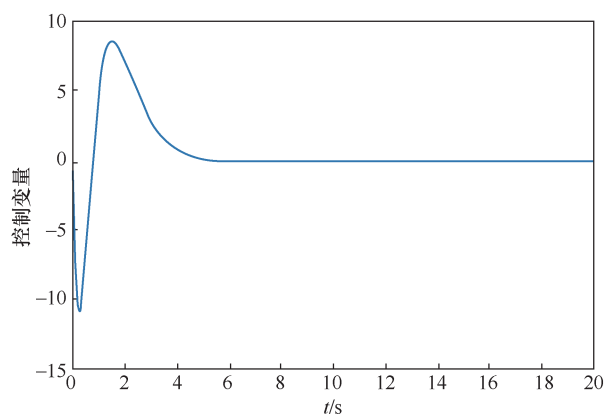


图10 例2的控制变量的轨迹

有关非线性系统的一些结果可阅读参考文献[32-33]。

5 平行传感: 由被动到主动

式(1)~(4)仅考虑了全部状态向量直接可观的情况。许多时候, 人们必须处理一些状态不能被直接测度的问题。此时, 人们必须考虑输出的传感器方程, 而式(1)和式(2)相应地变成如下形式。

(1) 经典控制

状态方程：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (12)$$

传感器方程：

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (13)$$

控制方程：

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{y}) \quad (14)$$

(2) 平行控制

状态方程：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}) \quad (15)$$

传感器方程：

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}) \quad (16)$$

控制方程：

$$\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{h}(\mathbf{u}, \mathbf{y}) \quad (17)$$

其中， $\mathbf{y}$ 是输出向量或者传感向量。

由于关于输出向量的时间导数的式(16)的引入，传感器也从被动的传感变为主动的传感，就像平行控制的式(3)和式(4)赋予控制器以主动地位一样。因此，在数字孪生可能的情况下，式(15)~(17)不但是平行控制的方程，也是平行传感的方程。笔者在第2节关于平行控制的讨论同样也适用于平行传感。平行传感的其他方法可阅读参考文献[34-35]。

6 结束语

图6给出了基于数字孪生平行控制的最简化的形式，而平行控制的式(3)和式(4)表面上仅在经典控制的式(1)和式(2)上加了控制向量对时间求导的一个小点，但为控制方法的新发展开拓了一个与传统控制方法十分不同的方向，特别适用于目前边缘执行与云端计算的控制架构。因此，平行控制有广泛的研究和应用前景，本文所述的结果只是一些初步的总结。

平行控制的方法与云计算、边缘设备、工业互联网、物联网、数字孪生等技术密切相关，可成为推动这些智能新技术发展与应用的一条新路径，值得进一步深入研究与普及。

参考文献：

- [1] 王飞跃. 用计算机模拟疲劳实验的设想[R]. 1983.
WANG F Y. A proposal for computational fatigue experiments based on computer simulation[R]. 1983.
- [2] WANG F Y. Shadow systems: a new concept for nested and embedded co-simulation for intelligent systems[R]. 1994.
- [3] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489.
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489.
- [4] 王飞跃. 复杂智能与 Lighthill 报告的再分析: 关于平行智能与智能虚数的讨论[R]. 2004.
WANG F Y. Complex intelligence and revaluation of Lighthill report: an investigation of parallel intelligence and imaginary number for intelligence[R]. 2004.
- [5] 王飞跃. 社会计算与情报和安全信息学原型系统的研发[R]. 2004.
WANG F Y. Research and development of social computing and prototype systems of intelligence and security informatics[R]. 2004.
- [6] WANG F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS[J]. IEEE Intelligent Systems, 2010, 25(4): 85-88.
- [7] 王飞跃. 从一无所有到万象所归: 人工社会与复杂系统研究[N]. 中国科学报, 2004-03-17.
WANG F Y. From nothing to everything: research on artificial societies and complex systems[N]. China Science Daily, 2004-03-17.
- [8] WANG F Y. On the philosophical and sociological foundations of computational methods for social complex systems[J]. International of Intelligent Control and Systems, 2005, 10(4): 763-771.
- [9] 王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(2): 26-34.
WANG F Y. On the modeling, analysis, control and management of complex systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2006, 3(2): 26-34.
- [10] 王飞跃. 未来的管理[J]. 财经界·管理学家, 2007(3).
WANG F Y. Future management[J]. Financial and Economic Management Experts, 2007(3).
- [11] WANG F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 630-638.
- [12] 王飞跃. 从零星工程到微博技术: 迈向计算社会[J]. 中国计算机学会通讯, 2012, 8(12): 45-46.
WANG F Y. From piecemeal engineering to twitter technology: towards a computational society[J]. Communications of the CCF, 2012, 8(12): 45-46.
- [13] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统--关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(4): 25-35.
- [14] WEN D, YUAN Y, LI X R. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: an investigation on a computational theory for complex socioeconomic systems[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2013, 6(2): 177-185.
- [15] WANG F Y. Parallel economics: a new supply-demand philosophy via parallel organizations and parallel management[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2020, 7(4): 840-848.
- [16] 王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法[J]. 自动化学报,

- 2013, 39(4): 293-302.
- WANG F Y. Parallel control: a method for data-driven and computational control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 293-302.
- [17] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. *自动化学报*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- YANG L Y, CHEN S Y, WANG X, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [18] 王飞跃. 如何从数字孪生到平行智能: 关于数字孪生与平行系统[R]. 2020.
- WANG F Y. How to go from digital twin to parallel intelligence: on digital twin and parallel system[R]. 2020.
- [19] MAXWELL J C. On governors[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1868, 16: 270-283.
- [20] BENNETT S. A history of control engineering 1930-1955[J]. *Institution of Engineering and Technology*, 1992: 48.
- [21] FEMANDEZ-CAR E, ZUAZUA E. Control theory: history, mathematical achievements and perspectives[J]. *Boletín de la Sociedad Española de Matemática Aplicada*, 2003, 13(26): 79-140.
- [22] 王飞跃, 魏庆来. 智能控制: 从学习控制到平行控制[J]. *控制理论与应用*, 2018, 35(7): 939-948.
- WANG F Y, WEI Q L. Intelligent control: from learning control to parallel control[J]. *Control Theory and Applications*, 2018, 35(7): 939-948.
- [23] 王飞跃, 陈俊龙. 智能控制方法与应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2020.
- WANG F Y, CHEN J L. Intelligent control method and application[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2020.
- [24] FU K S. Learning control systems and intelligent control systems: an intersection of artificial intelligence and automatic control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, 16(1): 70-72.
- [25] SARIDIS G N. Toward the realization of intelligent controls[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1979, 67(8): 1115-1133.
- [26] WANG F Y, ZHANG JASON J, ZHENG X H, et al. Where does AlphaGo go: from Church-Turing thesis to AlphaGo thesis and beyond[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, 3(2): 113-120.
- [27] 王飞跃, 王景美, 谢贻权. 最佳格点集在最小二乘法中的应用[J]. *新江大学学报*, 1988, 22(3): 33-43.
- WANG F Y, WANG J M, XIE Y Q. Application of good lattice points set in least square method[J]. *Journal of Xinjiang University*, 1988, 22(3): 33-43.
- [28] 王飞跃, 谢贻权. 最小二乘加权残值方法的速进算法[C]// 第三届全国加权残值法会议论文集. 出版地不详: 出版责任者不详, 2003: 312-316.
- WANG F Y, XIE Y Q. Sequential algorithms for least square weighted residual methods[C]// *Proceedings of the 3rd National Conference on Weighted Residual Methods*. [S.l.:s.n.], 2003: 312-316.
- [29] WEI Q L, LI H Y, WANG F Y. Parallel control for continuous-time linear systems: a case study[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(4): 919-928.
- [30] WEI Q L, LI H Y, WANG F Y. A novel parallel control method for discrete-time linear systems[J]. *Science China Information Sciences*, 2020: submitted.
- [31] WEI Q L, LI H Y, WANG F Y. A novel parallel control method for continuous-time linear output regulation with disturbances[J]. *IFAC Automatica*, 2020: submitted.
- [32] LU J W, LIU S L, WEI Q L, et al. Back-stepping-based parallel control for a class of cascaded nonlinear systems[J]. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2020: submitted.
- [33] LU J W, WEI Q L, WANG F Y. Parallel control for optimal tracking via adaptive dynamic programming[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(6).
- [34] 王飞跃. 平行传感与平行感知: 平行传感器的原理、框架与设计[R]. 2015.
- WANG F Y. Parallel sensing and parallel cognition: the design principle and framework of parallel sensors[R]. 2015.
- [35] 孟祥冰, 王蓉, 张梅, 等. 平行感知: ACP 理论在视觉 SLAM 技术中的应用[J]. *指挥与控制学报*, 2017, 3(4): 350-358.
- MENG X B, WANG R, ZHANG M, et al. Parallel perception: an ACP-based approach to visual SLAM[J]. *Journal of Command and Control*, 2017, 3(4): 350-358.

[作者简介]



王飞跃 (1961—), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任, 青岛智能产业技术研究院院长, 主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能以及知识自动化。

Chinese Journal of Intelligent Science and Technology

Vol.2 No.3 September 2020

Contents

Review Intelligence

AI in game intelligence—from multi-role game to parallel game *SHEN Yu, HAN Jinpeng, LI Lingxi, WANG Fei-Yue* (205)

Surveys and Prospectives

Intelligent innovative regulatory tools on financial technology: concept, platform framework, and prospects.....

..... *CHAI Hongfeng, WANG Shuai, TU Xiaojun, SUN Quan, MA Xiaofeng,*

WU Jie, CAI Hua, ZHENG Xiaolong, WANG Fei-Yue (214)

A survey of UAV-based edge intelligent computing *DONG Chao, SHEN Yun, QU Yuben* (227)

Papers and Reports

Classification of motor imagery signals using noise-assisted fast multivariate empirical mode decomposition

..... *ZHENG Qian, QIAO Dan, LANG Xun, XIE Lei, Li Dongliu, Wang Qibing, SU Hongye* (240)

Research on stochastic game and optimization in complex microgrid control

..... *ZHOU Hong, YAO Ruotian, YU Chang, LEI Zhongcheng* (251)

CFNN-based online control for dissolved oxygen concentration of wastewater treatment processes

..... *QUAN Limin, YANG Cuili, QIAO Junfei* (261)

A robot sorting method based on deep learning..... *TIAN Sijia, GU Qiang, HU Rong, LI Ruige, HE Dingxin* (268)

Cloud native robot system based on edge computing

..... *WANG Dawei, WANG Zhuo, WANG Peng, WANG Zhigang, WANG Haitao* (275)

Research on capsule network-based for aspect-level sentiment classification.....

..... *XU Zhidong, CHEN Bingyang, WANG Xiao, ZHANG Weishan* (284)

Parallel control and digital twins: control theory revisited and reshaped..... *WANG Fei-Yue* (293)

《智能科学与技术学报》专刊征文：深度强化学习

人工智能在全球掀起了新一轮技术革命的热潮，深度强化学习是人工智能技术的研究热点。深度强化学习自被提出以来，在游戏博弈、机器人控制、计算机视觉、工业制造等领域中都得到了广泛的应用，被认为是迈向通用人工智能的重要手段。为了更好地把握国内外深度强化学习的发展趋势，探讨深度强化学习在各领域的突破性和创新性的研究成果，以及目前遇到的挑战及相应的解决方法，《智能科学与技术学报》拟推出“深度强化学习”专刊，现面向国内外公开征稿，欢迎相关研究领域的专家学者、科研人员踊跃投稿。

专刊主编：孙长银（东南大学）、宋士吉（清华大学）

专刊编委：李智勇（湖南大学）、王占山（东北大学）、魏庆来（中国科学院自动化研究所）、陈春林（南京大学）、王乐（西安交通大学）、董璐（同济大学）

一、征稿范围

包括但不限于以下方面：

- 基于值函数的深度强化学习；
- 基于策略梯度的深度强化学习；
- 基于搜索与监督的深度强化学习；
- 分层深度强化学习；
- 多任务迁移深度强化学习；
- 多智能体深度强化学习；
- 基于记忆与推理的深度强化学习；
- 深度强化学习在机器人领域的应用；
- 深度强化学习在计算机视觉领域的应用；
- 深度强化学习在自然语言处理领域的应用；
- 深度强化学习在无人驾驶领域的应用。

二、文稿要求

1. 文稿应属于作者的原创性科研成果，数据真实可靠，具有重要的学术价值与推广应用价值；应未在国内公开发行的刊物或会议上发表或宣读过，也不在其他刊物或会议的审稿过程中，不存在一稿多投问题。

2. 文稿应包括题名、作者信息、摘要、关键词、基金项目名、参考文献、正文和作者简介，文稿一律采用 word 文档提交，建议字数为 8 000~15 000。有特殊学术价值的论文不限字数。

3. 文稿通过《智能科学与技术学报》官方网站 <http://www.cjst.com.cn/> 中“作者投稿”通道进行投稿，暂不支持其他投稿方式，投稿须知及文稿模板请参见网站说明。

4. 投稿时，请在论文标题前备注“深度强化学习专刊”。

三、重要日期

征稿截止日期：2020 年 10 月 15 日

计划刊出日期：2020 年 12 月 15 日

四、联系方式

电话：010-81055534

邮箱：cjst@bjxintong.com.cn

《智能科学与技术学报》专刊征文：情感脑机接口

情感脑机接口是一种对人的情绪进行识别或调控的脑机接口。随着神经科学对情绪机理的深入了解、情感智能的兴起以及脑机接口的快速发展，近年来关于情感脑机接口的研究受到了学术界和产业界的广泛关注，新的算法和系统不断涌现。为了更好地把握国内外情感脑机接口发展趋势，推动情感脑机接口的基础研究、应用研究和技术创新，促进情感脑机接口的学术交流，《智能科学与技术学报》拟推出“情感脑机接口”专刊，现面向国内外公开征稿，欢迎相关研究领域的专家学者、科研人员踊跃投稿。

专刊主编：吕宝粮（上海交通大学）、林进灯（悉尼科技大学）

专刊编委：关存太（南洋理工大学）、胡斌（兰州大学）、郑文明（东南大学）、伍冬睿（华中科技大学）、张丹（清华大学）

一、征稿范围

包括但不限于以下方面：

- 情感脑机接口的神经与认知机理；
- 情感脑机接口的系统架构与器件；
- 多模态情感脑机接口；
- 面向情感脑机接口的深度学习；
- 情感脑机接口在情感障碍疾病诊疗中的应用；
- 情感脑机接口的实验范式、数据标注与公开数据集；
- 情感脑机接口的伦理；
- 情感脑机接口与情感智能；
- 情感脑机接口与情感机器人。

二、文稿要求

1. 文稿应属于作者的原创性科研成果，数据真实可靠，具有重要的学术价值与推广应用价值；应未在国内公开发行的刊物或会议上发表或宣读过，也不在其他刊物或会议的审稿过程中，不存在一稿多投问题。

2. 文稿应包括题名、作者信息、摘要、关键词、基金项目名、参考文献、正文和作者简介，文稿一律采用 word 文档提交，建议字数为 8 000~15 000。有特殊学术价值的论文不限字数。

3. 文稿通过《智能科学与技术学报》官方网站 <http://www.cjst.com.cn/> 中“作者投稿”通道进行投稿，暂不支持其他投稿方式，投稿须知及文稿模板请参见网站说明。

4. 投稿时，请在论文标题前备注“情感脑机接口专刊”。

三、重要日期

征稿截止日期：2020 年 11 月 30 日

计划刊出日期：2021 年 3 月 15 日

四、联系方式

电话：010-81055534

邮箱：cjst@bjxintong.com.cn

收录声明

本刊对发表的文章, 拥有出版电子版、网络版版权, 并拥有和其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬中已经包含上述费用。

Chinese Journal of Intelligent Science and Technology has the copyright to publish electronic edition, online edition of the published articles, and has the right to exchange information with other sites. The expenses have been included in the fee paid by editorial department.

道德声明

本刊发表的论文是作者独立取得的原创性研究成果, 无一稿多投; 论文内容不涉及国家机密; 未曾以任何形式用任何文种在国内外公开发表过; 论文内容不侵犯他人著作权和其他权利。若发生一稿多投、侵权、泄密等问题, 论文作者将承担全部责任。

The authors of *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology* guarantee that their submitted articles are original and contain nothing confidential. The said article is only submitted to *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*. The said article has not been published before and has not been submitted elsewhere for print or electronic publication consideration. The said article is no way whatever a violation or an infringement of any existing copyright or license from the third party. Otherwise, the authors of the said article shall take the blame for the violation or infringement of the related copyright and the leakage of secrets.

智能科学与技术

学报

CHINESE JOURNAL OF INTELLIGENT SCIENCE AND TECHNOLOGY



2020年9月15日出版 定价：60.00元

ISSN 2096-6652



9 772096 665203