

基于自感知和自表达架构的自行镇定系统的构造性方法

文钧屹¹, 余祥¹, 毛碧飞¹, 李静辉¹, 姚新²

(1. 华为技术有限公司, 广东 深圳 518129; 2. 南方科技大学计算机科学与工程系, 广东 深圳 518055)

摘要: 自行镇定系统是指在面对复杂环境改变时可以自适应回到稳定状态的系统。罗斯·艾什比曾制作出内稳定器证明了自行镇定系统的存在性,但在工程实践上缺乏方法论指导构造自行镇定系统。基于此,提出一种实现系统自行镇定的构造性方法。基于自感知和自表达的原理,给出了自行镇定系统的构造性框架,为设计自行镇定系统建立了一套在工程上可行的理论架构与方法学,而且该架构也使自行镇定系统更易于理解优化。对自行镇定的系统实例——内稳定器进行仿真,实验结果显示了提出架构的有效性。

关键词: 自行镇定系统; 自感知; 自表达; 内稳定器

中图分类号: TB114.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202245

A constructive approach to ultrastable systems based on the self-awareness and self-expression architecture

WEN Junyi¹, YU Xiang¹, MAO Bifei¹, LI Jinghui¹, YAO Xin²

1. Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518129, China

2. Department of Computer Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

Abstract: An ultrastable system can adaptively return to the stable state when the complex environment changes. W. Ross. Ashby has made the homeostat to prove the existence of the ultrastable system. However, there is no methodological guidance on how to construct an ultrastable system in engineering practice. A constructive approach to ultrastable systems was presented. Based on the principles of self-awareness and self-expression, a constructive framework of the ultrastable system was proposed, and a feasible theoretical framework and methodology for designing the ultrastable system were established. The framework makes the ultrastable system easier to understand and optimize. The simulation results on the homeostat, an ultrastable system, show the effectiveness of the proposed framework.

Key words: ultrastable system, self-awareness, self-expression, homeostat

0 引言

自行镇定的概念最早由罗斯·艾什比(W. Ross. Ashby)在他的著作《设计大脑》(design for a brain)^[1]中提出,钱学森先生在其著作《工程控制论:新世纪版》^[2]中,以罗斯·艾什比的研究为基础,继续讨论自行镇定原理:“在系统里建立可靠的和能适应环境的性能的这种可能性,使得系统在没有人帮助的情况下,本身能够自动地改正那些设计中偶然的或不能预料到的误差。控制系统本身就能‘理解’

如何正确地行动的这种性质(自然这里的理解二字需要加引号),很像生物的适应性机能,这种机能保证生物在周围环境变化的情况下能够生存。”也就是说,自行镇定系统有非常优良的性质,能够面对复杂环境的变化,可以主动地改变以适应变化,保证系统仍然稳定地运行。

尽管自行镇定系统是个较早被提出的概念,但是其核心理念——面对复杂的环境,能感知变化、能主动改变、能自适应变化以保持稳态,对于研究当前的智能系统和自适应智能控制系统仍具有借

收稿日期: 2022-04-01; 修回日期: 2022-05-25

通信作者: 文钧屹, wenjunyi@huawei.com

鉴意义。如参考文献[3]指出,未来人工智能需要迈向“知行合一”的复杂自适应智能机制与算法体系;参考文献[4]指出,从脑认知和神经科学领域寻找发展新一代人工智能的灵感,推动人工智能的学科交叉研究已成为必然的趋势。这些问题的研究路径都可以参考与借鉴自行镇定原理,这也促使人们对自行镇定系统继续深入研究。

自行镇定系统有优良的性质,罗斯·艾什比和钱学森用一个实例——内稳定器(homeostat)^[1]给出了自行镇定系统的存在性。内稳定器作为一个自适应系统^[5],在面对复杂和不确定的环境时,具有自行镇定和适应环境的性能,面对干扰,能够回到稳定状态。然而,纵观目前的研究,仍然缺乏在工程上指导自行镇定系统构造和实现的方法论。

为了解决上述问题,本文对自行镇定原理做了进一步的研究。在自感知和自表达系统的架构^[6-7]的指导下,本文给出了自行镇定系统的构造性框架,建立了设计具有自行镇定性质的系统的理论基础,同时发现该构造性框架使自行镇定系统更易于理解和优化。基于所提出的框架,本文对内稳定器进行了仿真实验,检验了构造性框架的有效性。

本文第1节介绍自行镇定系统的原理、内稳定器以及相应的数学理论;第2节介绍自感知和自表达系统;第3节给出自行镇定系统的构造性框架;第4节展示仿真实验结果;第5节总结全文并展望未来。

1 自行镇定系统

本节介绍自行镇定系统。需要指出的是,自行镇定系统有多种翻译,《工程控制论:新世纪版》^[2]将其译为自行镇定的系统,《大脑设计》^[8]将其译为超稳定系统。本文采用自行镇定系统的翻译。

1.1 自行镇定系统的原理

假定一个 n 变量系统,它的运动状态由一组微分方程(运动方程)表述:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = f_1(y_1, \dots, y_n; \xi) \\ \frac{dy_2}{dt} = f_2(y_1, \dots, y_n; \xi) \\ \vdots \\ \frac{dy_n}{dt} = f_n(y_1, \dots, y_n; \xi) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $y_1, \dots, y_n$ 是变量, ξ 为参数,点 $(y_1, \dots, y_n)$ 的取值空间 $D \subset \mathbb{R}^n$,称其为相空间。当参数 ξ 为某个

固定值时,系统的运动方程式(1)就确定了,此时从相空间的不同初始点出发,随着时间 t 的增加,点的运动会形成不同的轨迹曲线,所有的轨迹曲线确定了系统运动状态的形式,本文把该运动形式称作系统的运动场。参数 ξ 每取一个值,就会对应系统的一个运动场,参数 ξ 能取多少个值,系统就会有多少个运动场。

对于一个确定的运动形式来说,如果相空间里所有的轨迹曲线都趋向于某一点,那么该运动场是稳定的,该点被称作平衡点;否则,该运动场是不稳定的。所谓自行镇定,就是人们期望系统能够自动地摒弃那些不稳定的运动形式,而保留稳定的运动形式。

给系统设置一个开关装置和一个开关边界,开关边界是一个封闭的边界,它把系统的平衡点包含在内,对于 n 维相空间,开关边界就是 $n-1$ 维的超曲面。当系统运动达到边界上时,开关装置发生作用,参数 ξ 从一个值调整到另一个值,系统的运动形式发生变化。开关装置对参数的改变可以是完全随机的。这样经过一次或多次的改变,系统最终会达到稳定的运动场,此时,系统不再与边界相碰,开关装置也就不再发生作用,这个稳定的运动形式被保留下来,系统也自动地达到了稳定状态。当然,需要特别指出的是,如果每个参数都对应不稳定的运动场,那么这种方法显然不可能获得成功。正是因为有这种高超的稳定性质,这种系统被称为自行镇定的系统^[2]。

1.2 自行镇定系统的实例

本节将以一个实例,即内稳定器,进一步阐释自行镇定原理,该实例对应的系统为线性系统,但自行镇定原理对于一般系统(如非线性系统等)也是适用的。对于一般的系统,只要其满足存在至少一组参数,使得系统的运动状态是稳定的,那么根据自行镇定原理,当系统的运动越过开关边界后,其开关装置总会按照某个概率调整到稳态参数组,从而在理论上保证该系统能自行镇定,回到稳定状态。

罗斯·艾什比做的内稳定器如图1所示。

内稳定器共包含4个单元,每个单元顶端有一个可转动的磁铁,磁铁的转角即这个系统的变量,分别用 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 表示。4个单元两两连接,每个单元的输出为电流,磁铁的运动受自己单元与另外3个单元输出电流的控制,同时磁铁的转角也改

变着自己单元输出电流的大小, 系统的运动方程^[8]如下:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = a_{11}y_1 + a_{12}y_2 + a_{13}y_3 + a_{14}y_4 \\ \frac{dy_2}{dt} = a_{21}y_1 + a_{22}y_2 + a_{23}y_3 + a_{24}y_4 \\ \frac{dy_3}{dt} = a_{31}y_1 + a_{32}y_2 + a_{33}y_3 + a_{34}y_4 \\ \frac{dy_4}{dt} = a_{41}y_1 + a_{42}y_2 + a_{43}y_3 + a_{44}y_4 \end{cases} \quad (2)$$

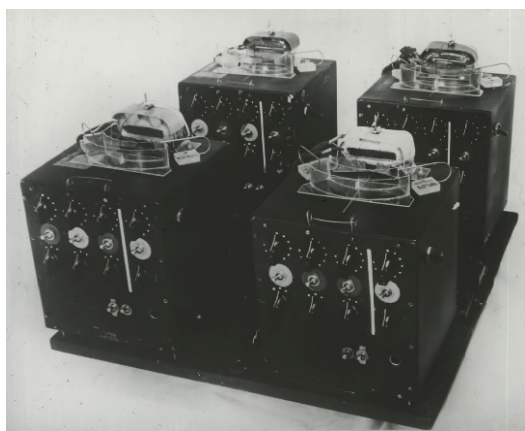


图1 内稳定器^[8]

其中, $a_{ij}(i, j=1, 2, 3, 4)$ 是该系统的参数, 这些参数的大小和符号可由实验者用可变电位计和换向器改变。对于线性方程, 原点是它的稳定点, 也就是说, 内稳定器系统的稳定状态是 4 个磁铁转角位置均位于正中心 (即 0°), 每个磁铁的开关边界是磁铁的转角达到正方向或负方向的 45° , 整个系统的开关边界是以原点为中心、边长是 -45° 到 45° 的“四维正方体”。

对于每一根磁铁, 4 个单元的输出电流经过 4 个线圈以控制磁铁的转角位置, 其中一个线圈的电流经过一个转换开关, 转换开关共有 25 个位置, 当磁铁碰到转换开关边界, 转换开关会随机调到另一个位置。也就是说, 对于每个 $i(i=1, 2, 3, 4)$, 当磁铁转角 $|y_i| \geq 45^\circ$ 时, 其相应 4 个参数 $a_{ij}(i, j=1, 2, 3, 4)$ 中的某一个会由转换开关随机变换到 25 个值中的一个, 从而对于整个系统来说, 总共有 $25^4=390\,625$ 种参数组合, 也就是该系统共有 390 625 种运动场, 这些运动场有稳定的, 也有不稳定的, 内稳定器将会自动寻找稳定的运动场。单元模拟图如图 2 所示。这里 a_{13} 由开关装置控制, 当 $|y_1| = 45^\circ$ 时, a_{13} 随机取 25 个值中的一个^[2]。

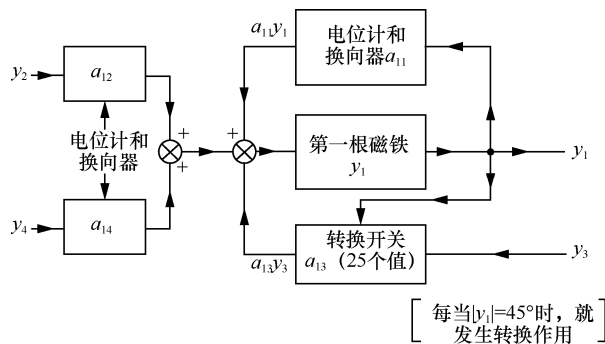


图2 单元模拟图

用内稳定器对自行镇定原理做一个形象的说明, 方便起见, 考虑一个磁铁, 它的输出经过转换开关回到它自身。内稳定器的运动图 (单个变量情形) 如图 3 所示, 图 3 展示了该磁铁的运动形式。首先, 系统是稳定的状态, 磁铁位于中心 0° 位置, 在 t_1 时刻用手轻微拨动磁铁 (不越过开关边界), 由于处于稳定的运动场, 磁铁很快回到稳定点。在 t_2 时刻, 将反馈线路倒转, 参数发生变化, 系统变为不稳定的状态, 磁铁的转角运动到 -45° , 越过开关边界, 于是转换开关发生作用, 改变参数, 系统再次变成稳定的。在 t_3 时刻, 对磁铁再次做一个小扰动, 发现系统很快回到稳定点, 说明系统再次处于稳定状态。

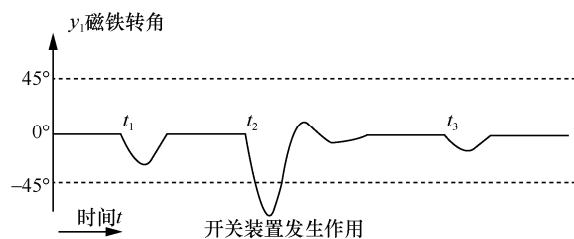


图3 内稳定器的运动图 (单个变量情形)

1.3 线性微分方程的稳定性理论

本节简单介绍线性微分方程的稳定性理论, 给出系统稳定时, 参数需要满足的条件。

考虑一般的常微分线性方程组:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = a_{11}y_1 + a_{12}y_2 + \cdots + a_{1n}y_n \\ \frac{dy_2}{dt} = a_{21}y_1 + a_{22}y_2 + \cdots + a_{2n}y_n \\ \vdots \\ \frac{dy_n}{dt} = a_{n1}y_1 + a_{n2}y_2 + \cdots + a_{nn}y_n \end{cases} \quad (3)$$

为了表示简便, 将上述方程写成矩阵形式:

$$\frac{dy}{dt} = Ay \quad (4)$$

$$\frac{dy}{dt} = \left(\frac{dy_1}{dt}, \dots, \frac{dy_n}{dt} \right)^T \quad (5)$$

$$y = (y_1, \dots, y_n) \quad (6)$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

下面讨论线性方程解的稳定性。

定义 1: 给定线性方程式 (3) 和初值条件 $y|_{t=\tau} = \zeta$, 设初值问题的解为 $y = \phi(t; \tau, \zeta)$ 。假设存在特解 $y = \phi(t; \tau, \zeta_0)$ 在 $t \geq \tau$ 上有定义 (对任何 $\varepsilon > 0$, 都有 $\delta > 0$), 使得只要初值 $|\zeta - \zeta_0| < \delta$, 解 $y = \phi(t; \tau, \zeta)$ 在 $t \geq \tau$ 上有定义, 且有 $|\phi(t; \tau, \zeta) - \phi(t; \tau, \zeta_0)| < \varepsilon, t \geq \tau$, 则称特解 $y = \phi(t; \tau, \zeta_0)$ 是稳定的, 否则, 称特解 $y = \phi(t; \tau, \zeta_0)$ 是不稳定的。如果特解 $y = \phi(t; \tau, \zeta_0)$ 是稳定的, 而且存在 $\delta_0 > 0$, 只要 $|\zeta - \zeta_0| < \delta_0$, 就有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\phi(t; \tau, \zeta) - \phi(t; \tau, \zeta_0)| = 0$, 则称该解是渐近稳定的。如果系统的相空间是 $\mathbb{R}^n$, 且 δ_0 可取 $+\infty$, 则称该解是全局渐近稳定的。

对于线性方程式 (3), 显然零解 $y(t) = 0$ 是方程的一个特解, 由定义 1 可以看到, 如果线性方程的零解是渐近稳定的, 那么意味着系统的所有轨迹曲线都趋向原点, 也就是说系统的运动场是稳定的, 原点是系统的平衡点。根据常微分方程的定性理论, 线性方程的稳定性与它的系数矩阵 A 的特征根紧密相关, 有如下结论。

定理 1^[9]: 给定线性方程式 (3), 其系数矩阵为 A , 那么当且仅当 A 的全部特征根都有负的实部时, 零解是渐近稳定的 (也是全局渐近稳定的); 当且仅当 A 的全部特征根的实部是非正的, 且实部为 0 的特征根对应的若尔当小块 (Jordan block) 都是一阶的时, 零解是稳定的; 当且仅当 A 的特征根中至少有一个实部为正, 或者至少有一个实部为 0, 且它对应的若尔当小块是高于二阶的时, 零解是不稳定的。

例如, 给定两个双变量线性系统 Sys_1 :

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -y_1 - 2y_2 \\ \frac{dy_2}{dt} = y_1 - y_2 \end{cases} \text{ 和 } \text{Sys}_2: \begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = y_1 \\ \frac{dy_2}{dt} = y_1 + y_2 \end{cases}, \text{ 它们的系数}$$

矩阵分别为 $A_1 = \begin{pmatrix} -1 & -2 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ 和 $A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$, 易知, A_1

的特征根为 $-1 + \sqrt{2}i$ 和 $-1 - \sqrt{2}i$ (i 为虚数单位), A_2 的两个特征根均为 1, 因此 Sys_1 有稳定的运动场, Sys_2 有不稳定的运动场, 如图 4 和图 5 所示。

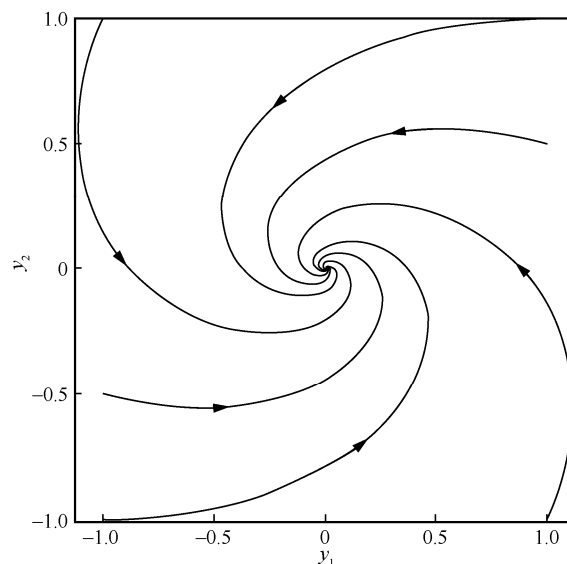


图4 稳定的运动场

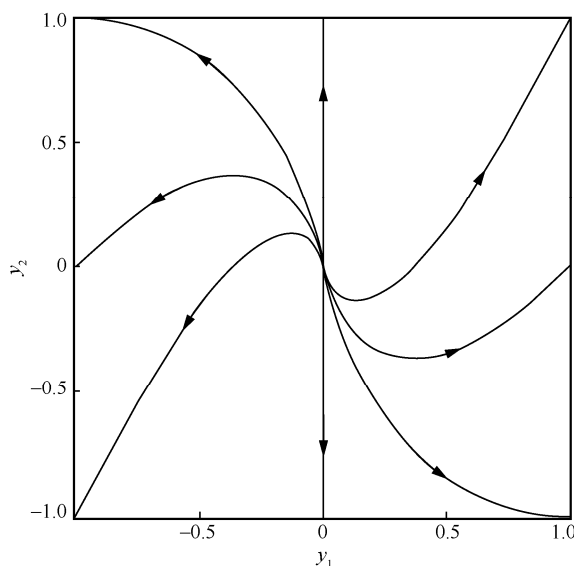


图5 不稳定的运动场

根据定理 1, 只需要知道 A 的特征值, 就能知道线性系统的运动场是不是稳定的。那么在内稳定器系统中, 只需要保证开关装置中至少有一组参数形成的矩阵, 满足全部特征根的实部均为负数, 那么内稳定器的所有可能运动场中总有一个是稳定的运动场, 这样就能在理论上保证具有自行镇定的性质。

然而, 由于开关装置是随机跳动的, 虽然理论

上自行镇定的性质能够成功，但可能需要花费非常长的时间。对此，罗斯·艾什比和钱学森也初步考虑了系统获得稳定的概率以及如何提高概率等问题^[8]。

2 自感知和自表达系统的架构

本节介绍自感知和自表达系统的原理与架构^[6-7]，为第 3 节中基于该架构构造自行镇定系统做准备。

自感知和自表达系统的架构^[7]如图 6 所示，主要由自感知模块、自表达模块、内外传感器和执行器组成。

自感知模块由学习模型、公共自感知节点和私有自感知节点组成。公共自感知节点通过外部传感器掌握外界环境等信息，私有自感知节点通过内部传感器掌握系统内部的状态和信息。自感知共有 5 个级别^[6,10]，不同级别的自感知实现的功能不一样。

自表达模块基于自感知传递的信息和系统的目标、约束、限制等，控制内外执行器对系统内部环境和外部环境产生执行动作。

元-自感知是自感知的一种形式，在整个系统中

扮演了重要的角色。它可以掌握自身的自感知水平，并可以根据当前系统的性能和运行目标，控制自感知模块和自表达模块，调整自感知水平和执行动作。

基于以上框架，已经实现了一些实例，如智能摄像头网络^[11]和自适应软件^[12]等。受该框架的启发，本文提出了自行镇定系统的构造性框架。

3 自行镇定系统的构造性框架

自行镇定系统的构造性框架参考了自感知和自表达系统的架构，自感知和自表达系统不仅为自行镇定系统的工程实现带来了方法论，而且使得构造的自行镇定系统更易于理解，同时也让自行镇定系统更容易优化和改进。自行镇定系统单个节点构造性框架如图 7 所示，其包含如下模块。

(1) 自感知引擎

自感知引擎用于获得节点的内部状态和知识，并将其传递给自表达引擎，同样分为私有自感知和公共自感知，私有自感知掌握节点内部的信息，公共自感知接收来自外部环境和其他节点的信息，根

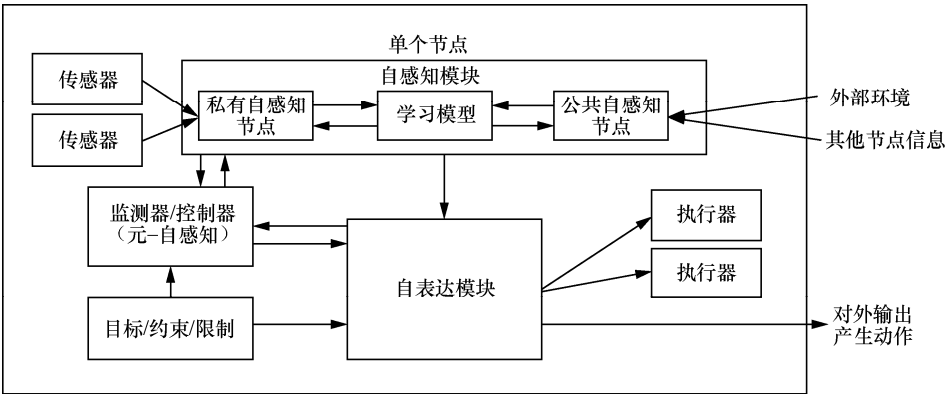


图 6 自感知和自表达系统的架构

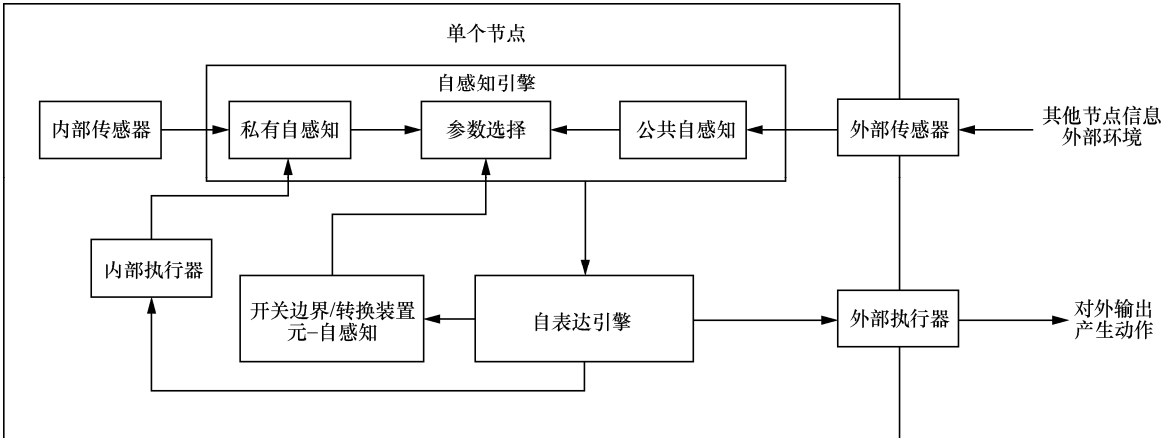


图 7 自行镇定系统单个节点构造性框架

据当前系统的参数进行输出。

(2) 自表达引擎

自表达引擎产生系统的动作,一方面对外部环境或其他节点产生影响,另一方面作用于节点内部。

(3) 元-自感知模块

元-自感知模块用于感知和检测系统的状态,并对系统的参数进行调整。

系统能实现自行镇定的机理在于,当元-自感知模块检测到自表达引擎输出的系统动作越过开关边界后,转换装置会对系统的参数做随机调整。当经过多次的参数调整,系统回到边界内的稳定状态后,元-自感知模块意识到系统行为处于边界内,就不再对参数进行调整,从而使系统保留稳定的运动形式。

基于该构造性框架,可以构造内稳定器系统的架构。内稳定器由4个节点组成,节点两两相连,如图8所示(变量 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 代表4个节点)。每个节点都有自行镇定的架构,如图9所示(以 y_1 节点为例,并省去传感器和执行器),自感知系统接收自己和其余3个节点的电流信息,经过参数的组合,由自表达引擎输出新的电流(y_1^*),一方面输出到外部的另外3个节点,另一方面也回输到自己内部,影响磁铁的运动。元-自感知模块检测 y_1 节点的磁铁转角是否越过开关边界 $\pm 45^\circ$,当越过边界时,转换装置改变该节点的参数,直到寻求到稳定的状态。

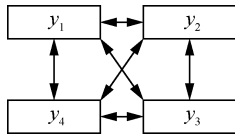


图8 内稳定器的节点连接

4 仿真实验结果

基于自行镇定系统的构造性框架,本节实现了对内稳定器的仿真,仿真程序基于Java语言。

内稳定器的运动方程为线性方程式(2),给定初始的方程系数为:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

根据定理1,该系数矩阵对应不稳定的运动场。设置开关装置的25个参数集为 $S = \{-12, \dots, -1, 0, 1, \dots, 12\}$,这里的调整规则与内稳定器略有不同,本文的调整规则为:当某个变量 $|y_i| \geq 45^\circ$ 时,那么其对应的4个参数 a_{i1} 、 a_{i2} 、 a_{i3} 、 a_{i4} 均随机跳转到集合 S 中的一个值,因此共有 25^4 种参数组合。此外,本文设置了一个外边界,即 $y_i \geq 180^\circ$ 时,令 $y_i = 180^\circ$,或 $y_i \leq -180^\circ$ 时,令 $y_i = -180^\circ$,也就是限制磁铁的运动不会超过 $\pm 180^\circ$ 。

给定 $t=0$ 时,系统的初值 $(y_1^{(0)}, y_2^{(0)}, y_3^{(0)}, y_4^{(0)}) = (100, -100, 100, -100)$,设置时间间隔 $\Delta_t = 0.01s$,利用经典的微分方程数值解法——Runge-Kutta法^[13],基于上一时间点的变量值,求解下一时间点 $t = t_0 + \Delta_t$ 的变量值,重复迭代,以此模拟系统的运动。每过 $5\Delta_t$ 时间间隔,检测变量是否超过边界,并按上述调整规则进行参数变换,某次运行结果如图10所示,图10中从上到下依次是 y_1 到 y_4 的运动状态,横轴为时间,纵轴为磁铁转角,每一段中间

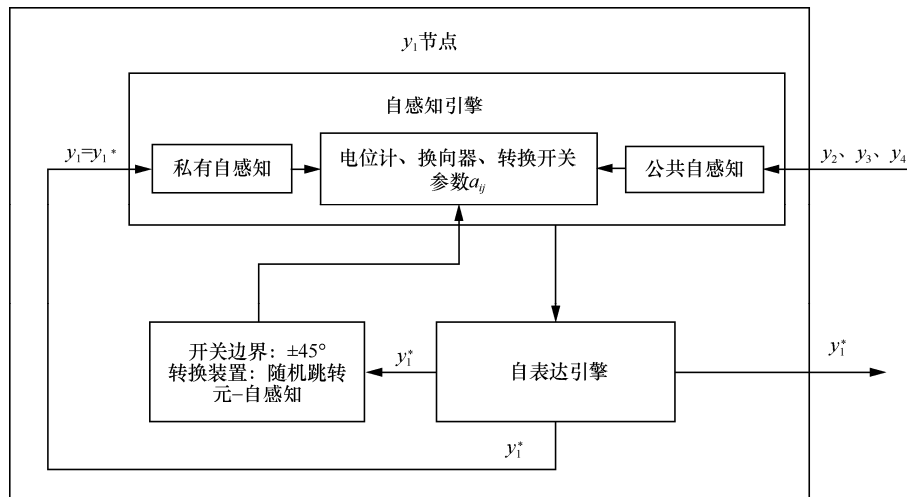


图9 内稳定器单个节点的构造

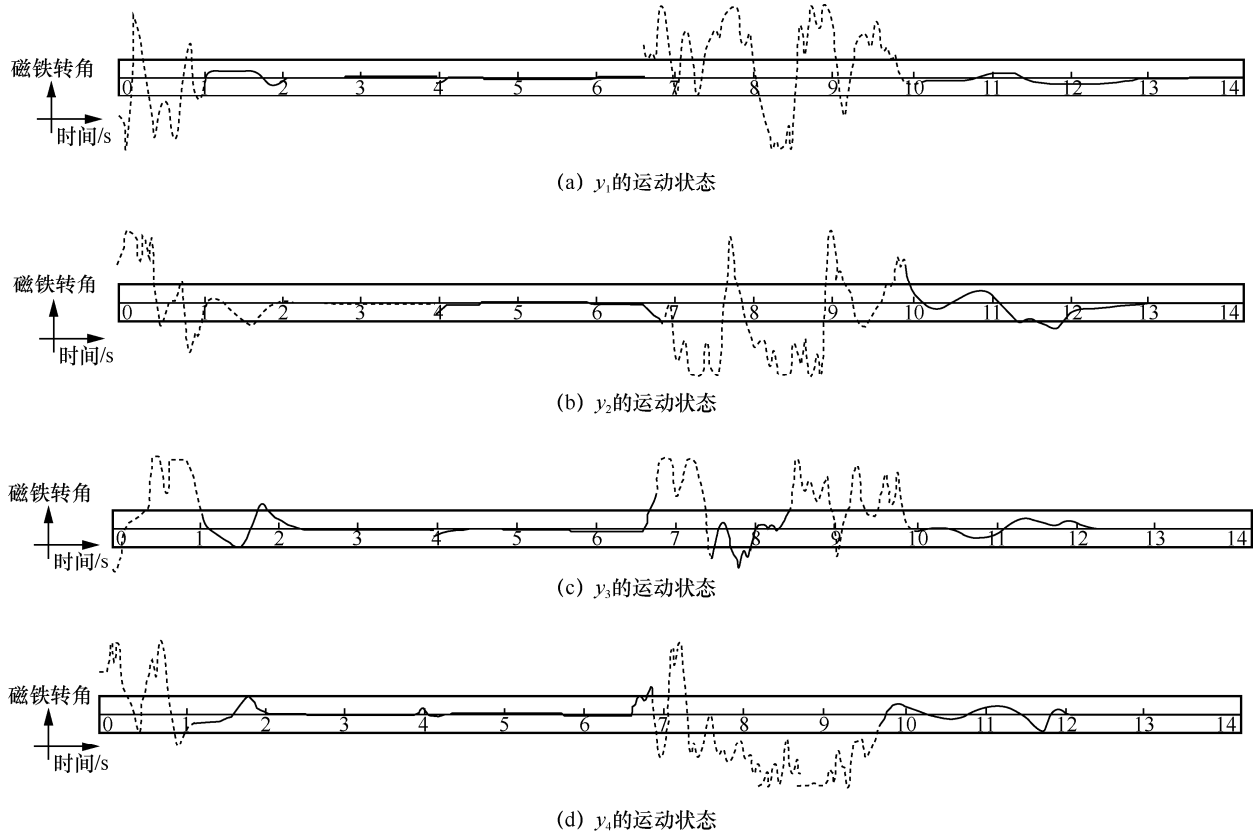


图10 内稳定器仿真运行示意图

的轴为各个变量的稳定状态（即 0° ），上下两条轴表示各个变量的边界（即 $\pm 45^\circ$ ）。

可以看到，一开始系统处于不稳定的运动场，经过多次参数转换，大约在 $t=2$ 时，系统趋于稳定；在 $t=4$ 时，对系统施加一个小扰动，发现系统很快回到稳定状态。随后再次对系统施加一个大的扰动，令某些变量处于边界之外，此时系统会再次自动地寻找稳定运动场，经过开关的多次作用，大约在 $t=13$ 时，系统最终回到稳态。这表明自行镇定的系统在面对环境的变化和干扰时，确实能自行调整，回到稳态。

需要说明的是，本文只是以内稳定器为例说明了提出的架构的可行性和有效性，但自行镇定原理对于一般的线性系统仍然是适用的。根据第1.3节对线性微分方程的稳定性理论的讨论，只要一般线性系统的系数矩阵的所有特征根都是负的，那么该系统就有稳定的运动场。因此只要保证设计线性系统时的一组系数矩阵满足所有特征根都是负的条件，那么自行镇定原理在理论上就可以成功。

在自行镇定原理中，系统参数的改变是完全随机的，这可能导致回到稳态的时间较长，为此本文

对自行镇定架构做了一些改进和优化。由于各模块的功能都很清楚，笔者很快考虑到可以在元-自感知模块中改变随机选择的机制，引入学习机制。在这里，本文参考了多臂老虎机（multiarmed bandit）问题^[14]，用上界置信（upper confidence bound, UCB）方法代替随机选择，本文对两个变量的系统进行了简单实验，初步试验发现，确实提高了回到稳态的概率，缩短了回到稳态的时间。

对于UCB方法，实验设置如下，将4组参数当作4个老虎机，设置初始收益为0。对于当次选择的参数，令选择该组参数的时间间隔 $5\Delta_t$ 内的5个磁铁转角为 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 ，如果 $\left| \frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5}{5} \right| < |p_1|$ ，即与 p_1 相比，平均位置距离稳定位置（ 0° ）更近，那么认为磁铁在向稳定位置运动，该组参数获得收益奖励+1，进而提高其下一次被选择的概率。

本文对随机选择和UCB方法分别进行模拟实验，两个方法设置初始点的位置均为边界外 $(y_1^{(0)}, y_2^{(0)}) = (90, 90)$ ，时间间隔也是 $\Delta_t = 0.01\text{s}$ ，实验结果见表1，发现使用UCB方法，系统能很快感知到

表1 元-自感知模块中两种机制回到稳态时间（5次实验取平均）

机制	变量数	参数组合数	稳定状态参数组合数	回到稳态时间/s
随机选择	2	4	1	59.59
UCB方法	2	4	1	7.65

稳态的参数组合，大大缩短回到稳态的时间。对于某次结果，记录选择到稳态参数组合占总选择的比例，如图11所示，发现UCB方法能提高选择到稳态参数组合的概率，连续选择稳态参数组合，并很快以稳定参数组合回到边界内，进而回到稳态（0°）。

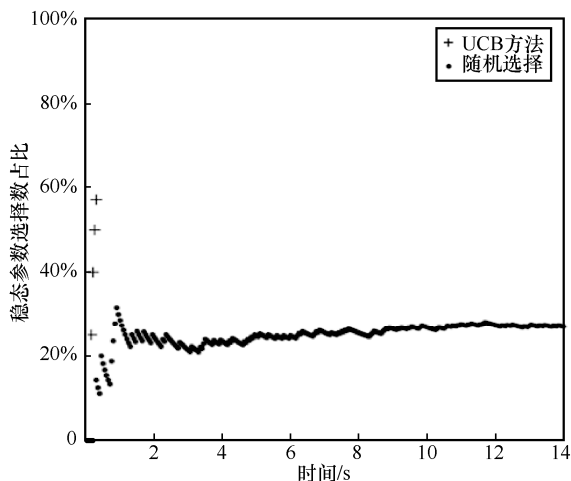


图11 UCB方法与随机选择关于稳态参数选择数占比

5 结束语

自行镇定系统具有理论证明的自行镇定特性，是众多自动控制系统和自适应系统必不可少的特性之一。然而，如何设计和构造一个自行镇定系统尚缺乏一个行之有效的方法。本文基于自感知和自表达系统，给出了自行镇定系统的构造性框架，帮助设计自行镇定的系统，使其在面对复杂不确定的工作环境时，仍然能自行恢复到稳定的状态。本文提出的框架提供了一个工程上可行的自行镇定系统构造方法，而且使自行镇定系统的构造更便捷且更易于理解。构造性框架由自感知引擎、自表达引擎和元-自感知模块组成，自感知负责掌握内部信息和接收外部信息，自表达负责对内和对外产生动作，元-自感知则可以知道系统行为是否超过边界，并控制调整参数，进而实现自行镇定。本文还基于提出的框架，对内稳定器进行了仿真，进行了计算机模拟实验，结果证明了框架的有效性以及易于优化性。

接下来，笔者将继续研究对于一般非线性系统和更复杂的、动力学特征不清楚的系统，如何利用提出的自行镇定框架，实现“适应干扰”的性能。此外，本文尝试了在元-自感知模块中引入学习机制，初步实验表明学习机制极大地提高系统回到稳态的概率，缩短回到稳态的时间。在未来的工作中，笔者将在元-自感知模块中引入不同的学习策略，进一步优化自行镇定系统，提高系统的实用性。为了将自感知和自表达系统推广到产业界，笔者将参照平行哲学与智能技术^[15]，着重研究系统的可信性、可靠性、安全性、隐私性和可用性。

参考文献：

- [1] ASHBY W R. Design for a brain[M]. New York: John Wiley & Sons, 1952.
- [2] 钱学森. 工程控制论：新世纪版[M]. 戴汝为，何善培，译. 上海：上海交通大学出版社，2007.
QIAN X S. Engineering cybernetics: new century edition[M]. Translated by DAI R W, HE S Y. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.
- [3] 王飞跃，曹东璞，魏庆来. 强化学习：迈向知行合一的智能机制与算法[J]. 智能科学与技术学报，2020，2(2): 101-106.
WANG F Y, CAO D P, WEI Q L. Reinforcement learning: toward action-knowledge merged intelligent mechanisms and algorithms[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(2): 101-106.
- [4] 郑南宁. 人工智能新时代[J]. 智能科学与技术学报，2019，1(1): 1-3.
ZHENG N N. The new era of artificial intelligence[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 1-3.
- [5] CARIANI P A. The homeostat as embodiment of adaptive control[J]. International Journal of General Systems, 2009, 38(2): 139-154.
- [6] LEWIS P R, CHANDRA A, FANIYI F, et al. Architectural aspects of self-aware and self-expressive computing systems: from psychology to engineering[J]. Computer, 2015, 48(8): 62-70.
- [7] BECKER T, AGNE A, LEWIS P R, et al. EPiCS: engineering proprioception in computing systems[C]//Proceedings of 2012 IEEE 15th International Conference on Computational Science and Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2012: 353-360.
- [8] 罗斯·艾什比. 大脑设计[M]. 乐秀成，朱熹豪，译. 北京：商务印书馆，1991.
ASHBY W R. Design for a brain[M]. Translated by LE X C, ZHU X H. Beijing: The Commercial Press, 1991.
- [9] 伍卓群，李勇. 常微分方程[M]. 北京：高等教育出版社，2004.
WU Z Q, LI Y. Ordinary differential equation[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.

- [10] LEWIS P R, CHANDRA A, PARSONS S, et al. A survey of self-awareness and its application in computing systems[C]//Proceedings of 2011 5th IEEE Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2011: 102-107.
- [11] ESTERLE L, LEWIS P R, YAO X, et al. Socio-economic vision graph generation and handover in distributed smart camera networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2014, 10(2): 1-24.
- [12] CHEN T, BAHSOON R, YAO X. Synergizing domain expertise with self-awareness in software systems: a patternized architecture guideline[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(7): 1094-1126.
- [13] 黄明游, 冯果忱. 数值分析(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- HUANG M Y, ZHEN G C. Numerical analysis (volume2) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [14] AUER P, CESA-BIANCHI N, FISCHER P. Finite-time analysis of the multiarmed bandit problem[J]. Machine Learning, 2002, 47(2): 235-256.
- [15] 王飞跃. 平行哲学与智能技术: 平行产业与智慧社会的对偶方程与测试基础[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(3): 245-255.
- WANG F Y. Parallel philosophy and intelligent technology: dual equations and testing systems for parallel industries and smart societies[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(3): 245-255.

[作者简介]



文钧屹(1993-), 男, 博士, 华为技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为系统学、可信理论、控制论、AI 治理、符号计算等。



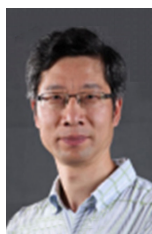
余祥(1970-), 男, 华为技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为云计算、人工智能、分布式控制等。



毛碧飞(1970-), 女, 华为技术有限公司可信理论资深研究员, 主要研究方向为可信理论基础、技术伦理、AI 治理等。



李静辉(1984-), 男, 博士, 华为技术有限公司技术专家, 主要研究方向为 AI 治理、可信理论、可靠性、AI Ops。



姚新(1962-), 男, 博士, 南方科技大学计算机科学与工程系主任、讲席教授, 主要研究方向为演化计算、智能优化、机器学习等。