第 31 卷 第 6 期 自 动 化 学 报 Vol. 31, No. 6
2005 年 11 月 ACTA AUTOMATICA SINICA November, 2005

词计算和语言动力学系统的基本问题和研究 1)

王飞跃[1, 2]

[1](中国科学院复杂系统与智能科学重点实验室 北京 100080)
[2](亚利桑那大学 美国)
(E-mail: feiyue.wang@mail.ia.ac.cn)

摘 要 语言动力学研究的实质是如何通过词计算在语言层次上动态地有效利用信息，解决复杂系统的建模、分析、控制和评估问题. 语言动力学研究的主要思想是如何借助于一般数值动力学中行之有效的概念、框架、方法等，建立自己的相应体系. 语言动力学将主要应用于数值动力学系统的抽象化分析，基于词描述的经济、社会、管理和生态系统的动态分析、决策综合、政策评估、以及大数据量的知识挖掘和动态表示等. 这方面研究的最终目的是建立连接人类的语言知识表示与计算机的数字知识表示的桥梁，成为下一代智能化人机交互和知件体系的理论基础之一. 本文简要讨论词计算和语言动力学系统的一些基本问题及研究.

关键词 词计算，语言动力学，抽象化，人机交互，复杂系统，人工智能
中图分类号 TP391.4

Fundamental Issues in Research of Computing with Words and Linguistic Dynamic Systems

WANG Fei-Yue[1,2]

[1](*The Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)
[2](*The Systems and Industrial Engineering Department, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA*)
(E-mail: feiyue.wang@mail.ia.ac.cn)

Abstract The objective of linguistic dynamic systems is to use computing with words for effective utilization of information at a linguistic level, and for modeling, analysis, control, and evaluation of complex systems. The main idea in research of linguistic dynamic systems is to establish its own theoretic foundation by adopting useful and well-established concepts, frameworks, and methods in conventional dynamic systems. Major applications of linguistic dynamic systems include abstraction and linguistic analysis of conventional dynamic systems, dynamic analysis, decision synthesis, and policy evaluation of economic, social, political, management, and ecological systems at certain linguistic levels, as well as knowledge mining and dynamic representation of huge data sets in knowledge engineering. Our goal is to develop a bridge between human linguistic knowledge representation and computer digital knowledge representation, and make it as one of the solid theoretic foundations for

1) 国家自然科学基金委主任基金 (60474498), 杰出青年研究基金 (60125310) 和 973 课题 (2004CB318103) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (60474498), the National Science Fund for Distinguished Youth Scholars of P. R. China (60125310), and 973 Program (2004CB318103)
收稿日期 2004-7-19 收修改稿日期 2005-4-10
Received July 19, 2004; in revised form April 10, 2005

next-generation of intelligent human machine interfaces and knowware systems. This paper addresses several fundamental issues in recent research of linguistic dynamic systems.

Key words Computing with words, linguistic dynamic systems, abstraction, human machine interface, complex systems, artificial intelligence

1 引言

关于一个学科的成熟程度，马克思曾经有一段评语：“一门科学只有在成功地运用数学时，才算达到了真正完善的地步”[1]. 如果数学不是主要工具，描述一个学科的知识就只能靠人类自然语言了. 对此，模糊集合的提出者 Zadeh 教授也曾指出：“科学界有一种根深蒂固的传统看法，即在科学理论中使用自然语言是数学不成熟的表现”[2]. 造成这一传统意识的主要原因是由于自然语言缺少精确性，因此不能也不应该用来做精确的科学描述.

然而，随着近年来智能信息处理的不断深入与普及，特别是处理复杂系统分析与评估时的迫切需要，人们越来越发现排除自然语言的代价太大了. 首先，从应用角度来看，人类已习惯于用自然语言描述和分析事物，特别是涉及社会，政治、经济和管理中的复杂过程. 人类可以方便的利用自然语言表示的前提进行推理和计算，并得到用自然语言表达的结果. 其次，从理论角度来看，不利用自然语言，现有的理论很难甚至不能够处理感性信息 (Perception-based information), 而只能处理测度信息 (Measurement-based information). 感性信息或知识通常只能用自然语言来描述，由于人类分辨细节和存储信息的认知能力的内在限制，感性信息在本质上是不精确的. 著名学者库恩甚至在哲学的层次上提出了科学词语的 “不可公度性，不可比较性和不可交流性 (Incommensurability, incomparability, incommunicability)” 理论[3]. 问题是，信息的有效利用不可避免地涉及到大量的感性信息. 复杂系统，特别是涉及人与社会的复杂系统，更是要面对各种各样的感性信息与知识. Zadeh 甚至认为，由于信息正交性 (Information orthogonality), 我们必须利用感性信息来获取更多的信息，人类最终会认识到，利用自然语言的词计算 (Computing with words), 不是可有可无的可选项，而是必需的[4]. 这似乎是一场 “回归 ” 自然语言的运动，但决不是科学上的倒退或马克思所认为的学科不成熟的表现：“周而复始 ”, 但处于不同的层次，是螺旋式发展. 因此，利用自然语言知识和信息，建立以词计算为基础的系统描述，分析，控制和综合的语言动力学系统 (Linguistic dynamic systems, LDS)[5], 是未来系统研究，特别是复杂系统研究的一个重要而有意义的方向. 这一点，在处理社会，经济，生态等人造复杂系统的动态描述和分析时，尤为显著.

2 词计算和语言动力学理论的简单回顾

词计算概念的明确化可能是 Zadeh 1996 年在 “Fuzzy Logic = Computing with Words” 一文中所完成的[6], 尽管许多其他学者在此之前也曾讨论过这一概念. 在相当程度上，模糊逻辑中的语言变量 (linguistic variables) 和语句式的 IF-THEN 规则已经涉及了词计算问题. 在最近发表的有关论文中[2], Zadeh 进一步提出了 “广义约束语言 (generalized constrain language, GCL)” 的概念，其核心思想就是来自自然语言的命题的含义可以表述为 GCL 的一个广义约束，而关于自然语言中感知的推理可以化简成广义约束从前提到结论的传播. 基于此， Zadeh 认为词计算的出现是由于下列四个基本原因：

1) 不知道原则 (The do not know rationale)— 不能够以足够的精度确定变量或参数的值，进而用数来描述.

2) 不需要原则 (The do not need rationale)— 不需要数值，语言值就足够了.

3) 不想要原则 (The do not want rationale)— 太细节的知识反而无效.

4) 不确定原则 (The can not define rationale)— 无法精确定义的概念，例如因果关系等.

继 Zadeh 的重要工作之后，西方许多学者开始了有关词计算的研究工作，但公开发表于学术杂志上的文章很少，主要的工作可见 Wang 主编的《Computing with Words》一书[7]，共 13 篇文章，其中 Rieger 关于粒度词计算和计算符号学 (Computational semiotics), 以及 SCIP(Semiotic cognitive information processing) 系统的工作值得注意，但个别文章粗制滥造. 特别是，尽管这些工作都声称要进行动态计算，实际上还是局限于静态的逻辑推理和静态的知识表述，这一点与语言动力学的思想大不相同.

语言动力学系统的概念是王飞跃于上世纪 90 年代初提出的. 当时的主要目的是以人工智能的逻辑推理为理论基础，为智能控制子系统的任务组织，建立完整的真正有智能的规划方法. 那时受日本第五代计算机项目的影响，认为 Logic programming 是最有希望的可选方法. 但结果表明，除了比较简单和小尺寸的问题，这类逻辑推理方法都具有严重的计算效率问题，一般都是不能实际应用的.

为了解决推理的计算效率问题，我们当时设想：能否将从初时目标到最终目标的一步步逻辑推理过程, 转化成像普通动力学方程那样从初时状态到最终状态的连续计算过程, 这样许多计算方法都可以用来解决计算效率问题. 其实核心思想就是把基于谓词 (Predicate, 实际上是词) 的演算转成基于数值的计算，这就是开展以词计算为基础的语言动力学系统探讨的最初动机.

因此，创立语言动力学的最初目地就是用一种类似于求解微分差分方程的方式解决逻辑推理过程，但之后很快转入以词计算为手段的语言动力学系统的计算问题研究，即其狭义形式 (见图 1), 以及通过语言知识而非数值训练集建立模糊神经元网络的工作[8,9]. 这项工作的总结于 1995 年在美国加州的一次国际会议上作为特邀报告正式提出[5], 许多学者、包括 Zadeh 教授参加了讨论. 由于当时的计算结果与设想的目标有相当差距，这项工作一度被中断. 一直到上世纪 90 年代末，由于感到语言动力学系统的方法在复杂系统的建模、分析、控制和综合上会有应用，我们才重新启动了这方面的工作[10~18].

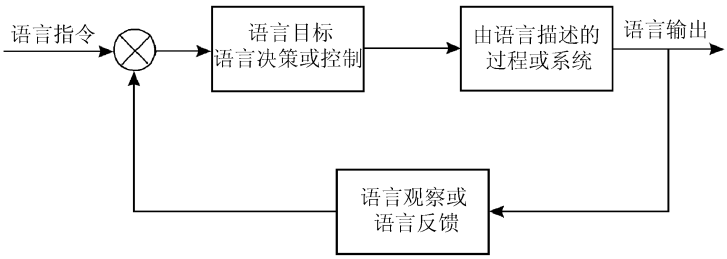

图 1 语言动力学的狭义定义与应用

Fig. 1 Linguistic dynamic system for feedback control of complex systems

与此同时，我们还提出了语言动力学系统的广义应用，即在智能化人机交互领域中的应用[10~12] (见图 2). 在物理系统中的模拟信号与数字计算机中的数字信号之间通讯时，我们要使用模拟 / 数字 (A/D) 和数字 / 模拟 (D/A) 转换器，它们已变成了无所不在的标准硬件，其性能由转换精度而定. 随着对计算机人机界面越来越要求人性化，自然语言信息处理也会变得日益重要. 我国学者已经指出，为了有效地利用信息，我们必须在硬件和软件之后，建立 “知件 ” 体系，而语言动力学可能会发展成为有效开发、综合利用各专门领域 “知件 ” 的一种解析且可计算的通用工具. 可以设想，在将来的人机交互中，特定领域的文字 / 数字 (W/N) 和数字 / 文字 (N/W) 转换器，将同 A/D 与 D/A 转换器一样重要和广泛，不同的是它们是软件而不是硬件，其性能将由其语法和语言处理的智能水平所决定.

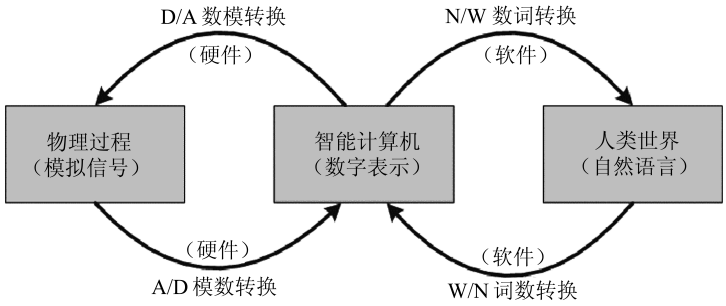

图 2　语言动力学的广义定义与应用

Fig. 2　Linguistic dynamic systems for intelligent human machine interface

3　从数计算到词计算：语言动力学的基本框架

为方便起见，我们采用模糊集合代表语言术语和变量，并利用 Kosko 关于模糊集合的几何表示[19]，将离散论域上的隶属函数转换成超立方体中的点，从而完成从词到点的转换过程 (见图 3).

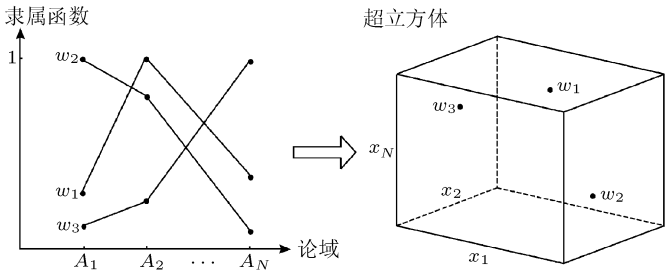

图 3　从词到数的转换 — 模糊集合的几何表示

Fig. 3　From numbers to words: geometric representation of fuzzy sets

一旦词成为超立方体中的点，词计算和语言动力学过程就可以看作超立方体上的映射，就像数计算和数值动力学过程是实空间上的映射一样 (见图 4). 一般而言，相关的超

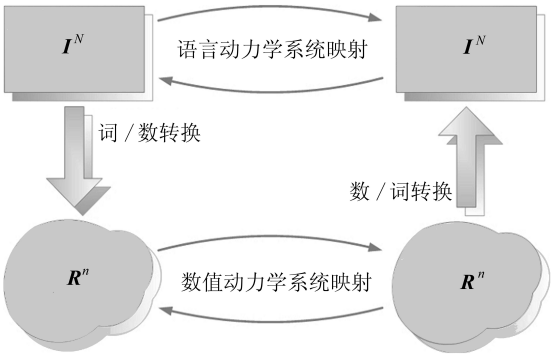

图 4　语言和数值动力学系统的映射表示及相互关系

Fig. 4　Mathematic mapping and relationship between linguistic and conventional dynamic systems

立方体的维数 N 要远大于实空间的维数 n. 如此，实空间中许多概念和方法都可以直接推

广到超立方体中, 而数值动力学系统中的概念和方法也可以推广到语言动力学系统中[5].

语言动力学系统的基本框架如下,

LDS 状态方程:

$$\boldsymbol{X}_{k+1} = F(\boldsymbol{X}_k, \boldsymbol{U}_k, k), \quad F : \boldsymbol{I}^N \times \boldsymbol{I}^M \times \boldsymbol{Z} \to \boldsymbol{I}^N \tag{1}$$

LDS 输出方程:

$$\boldsymbol{Y}_k = H(\boldsymbol{X}_k, k), \quad H : \boldsymbol{I}^N \times \boldsymbol{Z} \to \boldsymbol{I}^P \tag{2}$$

LDS 反馈控制:

$$\boldsymbol{U}_k = R(\boldsymbol{Y}_k, \boldsymbol{V}_k, k), \quad R : \boldsymbol{I}^P \times \boldsymbol{I}_Q \times \boldsymbol{Z} \to I_M \tag{3}$$

这里 $\boldsymbol{I}^N$, $\boldsymbol{I}^M$, $\boldsymbol{I}^P$ 和 $\boldsymbol{I}^Q$ 都是超立方体, $\boldsymbol{Z} = \{0, 1, \cdots, \infty\}$ 是非负整数集合, 而 $\boldsymbol{X}_k \in \boldsymbol{I}^N$, $\boldsymbol{Y}_k \in \boldsymbol{I}^M$, $\boldsymbol{U}_k \in \boldsymbol{I}^P$ 和 $\boldsymbol{V}_k \in \boldsymbol{I}^Q$ 分别是表示系统状态词、输出词、控制词和输入 (指令) 词, 最后 F, H, R 是模糊逻辑算子, 可以是简单的 IF-THEN 规则, 也可以是更为复杂的高阶逻辑运算或混合逻辑计算等, 它们定义了语言动力学系统的系统演化、输出和控制映射或关系. 根据上述的语言动力学模型, 我们几乎可以将常规数值动力学系统中所有的概念与方法直接推广到语言动力学系统中来, 比如词轨迹, 极限词, 平衡词, 稳定性等概念及相应的处理方法[5,10∼13].

语言动力学系统出现在许多复杂系统的分析与控制应用之中. 例如, 在对一个复杂问题制定控制策略或规则的过程中, 通常用语言或词来表达问题, 描述情形, 提出目标, 制定策略, 明确并实施评价程序. 这一过程可以看作是一个语言动力学过程

- 用词描述问题和情形: 语言过程描述;
- 用词提出目标: 语言目标函数;
- 用词制定策略: 语言控制设计;
- 用词确定评价程序: 语言状态反馈.

以前学者对这类问题也多有涉及, 但多数是从静态角度去讨论. 因此, 许多策略制定后, 很难对其事先进行反馈式的动态评估, 最多只能在实施过程中 "事后" 进行评估, 以至反馈变成非实时甚至是 "开环" 的. 语言动力学的引入, 使我们能够动态、实时、闭环地对制定的控制策略进行仿真模拟, 评估给定的策略是否能够达到指定的目标, 是否是在规定的时间完成等, 模拟过程可以是几天、几个月甚至几年. 尽管对许多复杂系统, 特别是经济系统, 有关的模拟评估系统已有许多工作, 但它们多是费时和庞大的数值模拟系统, 成本极高. 至今为止, 还没有见到在完全语言或词的层次上进行模拟的工作.

对于语言动力学模型 (1)∼(3), 以下几点需要进一步说明.

1) 状态、控制、输入、输出等词变量的定义域是离散的, 其中的元素为任意对象, 可以是数值的, 也可以是非数值的 (从屋子到汽车). 连续的数值可以离散化, 因此, 对于复杂系统而言, N, M, P 和 Q 可能是非常大的整数, 因此方程 (1)-(3) 的理论意义大于其计算意义;

2) 方程 (1)∼(3) 是基于模糊逻辑而定义和引入的. 实际上, 模糊逻辑只是一个方便熟知的词表示工具而已, 较为人们接受. 其它的建模方法, 比如粗糙集合等, 也完全可以用来构造语言动力学系统. 特别是在引入胞空间和变换之后, 用什么工具构造语言动力学的模型就不是十分重要了;

3) 为了减少计算量, 我们可以通过分层递阶的结构形式来分析复杂的大系统. 而且, 通过常规数值动力学系统的词化或抽象化, 可以把数值系统提高到词系统的层次上, 形成统一的基于词计算的语言动力学模型. 此时, 同一层各子系统之间, 不同层次的系统之间, 可以方便地用词来描述它们的相互关系. 该用多少词, 定义域是什么, 将受制于人们的语言使用习惯和信息的有效利用方式.

4　基于胞空间和胞映射的 LDS 计算方法

由于信息的颗粒性和数据内在的误差, 超立方体中相近的点实际上可能表示一个词. 为了合理对待这些因素, 我们可引入胞空间概念. 胞空间的基本想法是：不将超立方体看作连续空间, 而是作为一组词胞集合, 这种做法, 体现了信息的颗粒性. 胞空间的结构可以通过各种方式来建立, 图 5 所示的就是一般的胞空间结构, 最简单的方式就是对超立方体进行均匀分割而生成的胞结构.

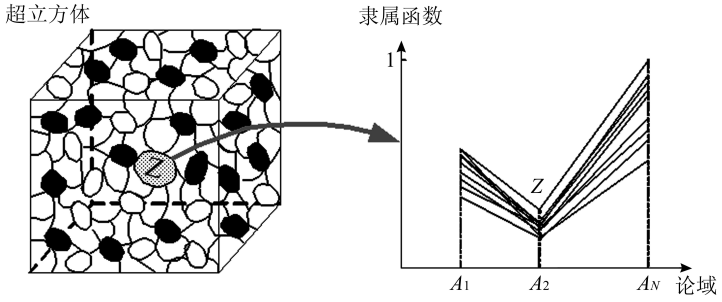

图 5　超立方体上的胞空间结构及对应词的隶属函数族

Fig. 5　Cell representation and membership functions in hypercubes

构造胞空间的一个重要问题是：对于指定用于描述复杂系统的 K 个词, 如何构造一个胞结构使得这 K 个词可以合理地分布在超立方体中？定义合理性的一种方法是将这些词尽可能地均匀分布, 但对于高维超立方体, 简单的均匀分割是无效的. 此时, 可利用数论中高维空间数值积分的最佳或均匀格点集[20] 来实现词的合理地分布. 例如：用

$$Z_i = (\{i/F_N\}, \{iF_N(2)/F_N\}, \cdots, \{iF_N(N)/F_N\}), \quad 1 \leqslant i \leqslant K$$

代表一个词胞的中心. 其中 $\{w\}$ 是 w 的小数部分 $F_s = 0, F_{N-1} = 1, F_k = F_{k-1} + \cdots + F_{k-N}$, $F_k(j) = F_{k+j-1} - F_{k+j-2} - \cdots - F_k$, $1 \leqslant s \leqslant N-2$, $k \geqslant N$, $2 \leqslant j \leqslant N$. 专著[21] 中的许多其它的最佳格点集亦可用来构造胞空间结构.

从词胞到词, 再到数的清晰化 (见图 6), 可有多种方法, 一种是推广模糊集合的面积中心方法, 即：

$$\alpha_i = \int_V x_i \mathrm{d}V/|V|, \quad \mu_z = \sum_{1 \leqslant i \leqslant N} \alpha_i / A_i, \quad Z^* = \sum_{1 \leqslant i \leqslant N} \alpha_i A_i / \sum_{1 \leqslant i \leqslant N} \alpha_i$$

其中 V 和 $|V|$ 是 $\boldsymbol{Z}$ 所占的区域及体积, 而 $\{A_1, A_2, \cdots, A_N\}$ 是状态词的 (数值) 论域.

在超立方体中建立起胞空间后, 我们可以利用 Hsu[22,23] 针对非线性微分动力学系统创立的方法来将由 LDS 模型 (1)∼(3) 转化成胞映射：

$$Z_{k+1} = C_F(Z_k, Q_k, t_k), \quad P_k = C_H(Z_k, t_k), \quad Q_k = C_R(P_k, W_k, t_k)$$

其中 t_k 是胞空间新的时间区间, Z_k, Q_k, P_k 和 W_k 分别是状态、控制、输出和输入词胞, C_F, C_H 和 C_R 是由 F, H 和 R 构造出的胞映射. 此时, LDS 在超立方体上所有的概念可直接用于胞空间. 不过, 在胞空间中, 系统分析已经是计算可行了, 因为当胞映射已知时, 可以采用搜索算法系统地研究 LDS 的各种性质[23,10].

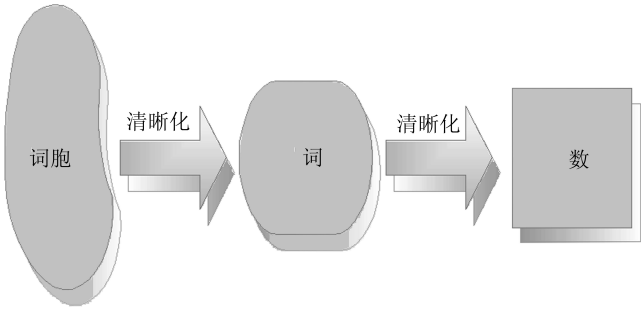

图 6 胞 - 词 - 数的清晰化过程

Fig. 6 Process of cell-word-number defuzzification

5 语言动力学系统的基本问题及其研究方法

在现有工作的基础上, 语言动力学系统的研究重点将围绕以下五个方面展开: 1) 常规数值动力学系统的词化及其相关的动力学特性分析; 2) 词计算和语言动力学系统的动态特性分析; 3) 多映射和马尔可夫过程在语言动力学中的应用; 4) 在数据挖掘中的应用; 5) 在复杂系统的建模、分析控制和综合中的应用.

1) 常规数值动力学系统的词化及相关的动力学特性分析. 在此方面, 我们做了初步但不系统的工作[24,25]. 首先, 需要进一步明确一类、二类和三类词化后的动力学系统类型的定义. 初步设想是把一类定义为基于常规集合运算的动力学系统; 把二类定义为基于词计算, 但状态方程是通过模糊扩展原理根据任意不同的词变量在线计算构造的, 把三类定义为基于词计算, 但状态方程是通过模糊扩展原理根据规定的有限个词常量 (不是变量) 离线计算构造的, 这与常用的 IF-THEN 规则十分类似, 唯一不同的是结论是由计算得到的. 我们还可以定义四类的词化后 LDS, 此时三类中的 IF-THEN 规则的结论词将被进一步近似, 用规定的词常量来代替. 因此, 一类和二类系统中规则数目是无限的, 而三类和四类系统中的规则数目是有限的, 这与我们以前的工作不同.

开展这方面研究的目的是我们认为语言动力学描述与数值动力学描述之间应存在着一种相互验证的关系. 简单地说, 数值动力学描述的现象, 应该可以抽象化并上升到语言动力学的描述; 反过来, 语言动力学描述的现象也应该具体化并下转为某一种或一类的数值动力学描述. 当然, 两者之间不应存在等价或一一对应的关系. 从事常规数值动力学系统的词化和抽象分析的主要原因是: 1) 可以验证语言动力学系统的概念和分析方法是否正确合理, 因为我们对数值动力学的特性已十分了解和清楚; 2) 可以探索一条将低层数值模型抽象总结为高层语言模型的途径, 这在许多领域, 特别是在生态、社会系统中十分有价值; 3) 可以建立一种新型的动态数据挖掘和知识发现的方法, 如果成功, 这将有助于研究海量信息的处理和表示. 我们这方面的主要目标是针对二、三、四类语言动力学系统, 利用不动点理论分析常规数值动力学系统向这些类型语言动力学系统的转换过程, 以及其状态稳定性的变化和对语义变化的敏感性. 特别是, 我们将进一步建立通过常规数值系统词化后的语言系统进行规则控制器设计的数值步骤.

2) 词计算和语言动力学系统的动态特性分析. 这方面的主要工作是将常规数值动力学系统中不动点理论、混沌和分叉分析方法推广到语言动力学系统中去, 讨论对应现象在语言层次上的表现和特性. 工作的重点将围绕着: 1) 常规数值动力学系统词化后, 其原有的混沌和分叉现象在对应的语言动力学系统描述中是否继续存在? 同词化的分辨率、粒度和表达规则有什么关系等; 2) 一般语言动力学系统本身在其超立方体空间中是否存在不动

点、混沌和分叉现象？如何进行判定和分析等；3) 在已有工作的基础上，探讨如何有效地在语言动力学系统中引入胞空间和胞映射，并建立系统的指标体系和数值方法，验证胞空间和胞变换的逼近精度、稳定和敏感特性；4) 计算语言动力学系统在引入胞空间和胞变换后，如何建立有效的搜索和数值分析方法，系统地在胞空间中分析不动点、混沌和分叉等动态现象.

3) 多映射和马尔可夫过程在语言动力学系统的应用. 常规数值动力学系统词化后，当从三类向四类系统转化后，不可避免的会出现结论词可能与几个规定的词相关，因此转化成一个规定词是一种近似. 问题是这种近似有时不见得合理或有意义. 同样，在语言动力学系统中引入胞空间和胞变换后，一个胞被映射之后可能与几个细胞有交合，因此转化成一个胞是一种近似，有时这一近似也不见得合理或有意义. 所以，我们必须研究映射多值性所带来的问题. 研究这一问题的一个非常自然的工具就是马尔可夫过程，最直截了当的方式就是将结论词与规定词的相关程度作为马尔可夫过程中状态转移概率，或者把被映胞在映射后与其它胞的交合部分大小作为转移概率. 如此一来，我们就可以通过马尔可夫过程理论和方法研究“随机”语言动力学系统.

4) 语言动力学系统在数据挖掘中的应用. 这方面的主要思想是通过语言动力学系统动态分析的特性，将数据挖掘中的一些方法，特别是聚类分析的方法 (Clustering) 词化，并进一步挖掘出基于词计算的状态模型、输出模型和反馈模型，从而形成知识的动态表示和分析利用.

5) 语言动力学系统在复杂系统的建模、分析、控制和综合中的应用. 必须针对一些具体的复杂系统应用 LDS. 目前，我们已开展在经济系统、生态系统、人口系统、以及智能交通系统的诱导“软”控制策略的制定中的初步应用.

6 结束语

与国际上其它许多词计算方法不同，本文讨论的基于词计算的语言动力学系统，强调实际的可计算性，突出动态计算，而不是静态推理. 这一特色是由于借用了常规数值动力学系统中的概念，方法和体系而造成的. 而且，语言动力学系统是在词计算概念正式提出之前就提出的概念，具有一定的创新性. 这方面工作的继续和深入，可形成有特色的关于复杂系统建模、分析、控制和综合的理论和方法体系，并应用于解决实际复杂问题、智能人机交互系统和知件的设计与分析.

References

1 Paul Lafargue. Reminiscences of Marx, in Marx and Engels Through the Eyes of Their Contemporaries, Progress Publishers, 1972. Also see, http://www.marxists.org/archive/lafargue/1890/xx/marx.htm

2 Zadeh L A. Foreword, in Computing with Words, Editor P. Wang, John Wiley & Sons, Inc, 2001

3 Wang Fei-Yue, Thomas S. Kuhn and His Commensursbility, Comparability, Communicability, World Philosophy, 2004, (3): 3∼18

4 Zadeh L A. From Computing with Numbers to Computing with Words: From Manipulation of Measurements to Manipulation of Perceptions, *IEEE Transactions on Circuits Systems*, 1999

5 Fei-Yue Wang, Modeling, analysis and synthesis of linguistic dynamic systems: A computational theory, In: Proceedings of IEEE International Workshop on Architecture for Semiotic Modeling and Situation Control in Large Complex Systems, Monterey, CA, 1995, 27∼30: 173∼178

6 Zadeh L A. Fuzzy logic = Computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1996, (4): 103∼111

7 Paul Wang. Computing with Words, John Wiley & Sons, Inc., 2001

8 Wang Fei-Yue , Building Knowledge Structure in Neural Nets Using Fuzzy Logic, in Robotics and Manufacturing: Recent Trends in Research, Education and Applications, edited by M. Jamshidi, New York, NY, ASME Press, 1992

9 Wang Fei-Yue, Kim Hung-man. Implementing adaptive fuzzy logic controllers with neural networks: A design paradigm. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 1995, **3**(2): 165∼180
10 Wang Fei-Yue. Outline of a computational theory for linguistic dynamic systems: Toward computing with words. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 1998, **2**(2): 211∼224
11 Wang Fei-Yue, Lin Yue-Tong. Linguistic dynamic systems and computing with words for complex systems. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Nashville, Tennessee, USA, 2000
12 Wang Fei-Yue, Lin Yue-Tong. Linguistic Dynamic Systems and Computing with Words for Modeling and Simulation of Complex Systems, in Discrete Event Modeling and Simulation Technologies: A Tapestry of Systems and AI-Based Theories and Methodologies, edited by H. S. Sarjoughian, F. E. Cellier, Heidelberg, Germany, Springer Verlag, 1998
13 Wang Fei-Yue. A computational framework for computing with words and linguistic dynamic systems. *Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2001, **14**(5): 377∼384
14 Wang Fei-Yue, Yang T, Mo H. On fixed points of linguistic dynamic systems. *Journal of Systems Simulation*, 2002, **14**(11): 1479∼1485
15 Mo H, Wang Fei-Yue. Linguistic dynamic properties of double-periodic mappings. *Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2003, **16**(3): 263∼270
16 Hong Mo, Wang Fei-Yue. Abstraction and related analysis of conventional dynamic systems, In: Proceedings of CAA/IEEE Intelligent Automation Conference, Hong Kong, 2003
17 Hong Mo, Wang Fei-Yue. The linguistic form of the conventional dynamic system—from stability to chaos, In: Proceedings of CASIA Annual Conference on Automation and Information Technology, 38∼47. 2003
18 Wang Fei-Yue. Computing with Words and Linguistic Dynamic Systems, scheduled for publication by World Scientific Publishing Co., 2004
19 Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992
20 Halton J H. On the Efficiency of Certain Quasi-random Sequences of Points in Evaluating Multi-Dimensional Integrals, Numerical Mathematics, 1960, **2**(1): 84∼90
21 Hua L K, Wang Y. Applications of Number Theory to Numerical Analysis, New York, NY: Springer-Verlag, 1981
22 Hsu C S. Cell-to-Cell Mapping, New York, NY: Springer-Verlag, 1987
23 Hsu C S, Guttalu R S. An Unravelling Algorithm for Global Analysis of Dynamic Systems: An Application of Cell-to-Cell Mapping, ASME J. Appl. Mechanics, 1985, **47**: 940∼948
24 Wang Fei-Yue. On the abstraction of conventional dynamic systems: From numerical analysis to linguistic analysis, *Information Sciences*, 2005, **171**(1-3): 233∼259
25 Wang Fei-Yue. Linguistic Dynamic Systems, Part I: Basic Concepts, Frameworks, and Methods; Part II: From Numerical Equations to Linguistic Modeling and Analysis; Part III: Applications in Hierarchical and Hybrid Control of Dynamic Systems; to be published in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Human and Systems, 2005
26 Yuqian Lu. From hardware to software to knowware: IT′s third liberation? *IEEE Intelligent Systems*, 2005, **20**(2): 82∼85

王飞跃 见本刊 29 卷 6 期.
(**WANG Fei-Yue** Refer to ≪Acta Automatica Sinica≫ Vol. 29, No. 6.)