

平行智能风沙防护治理决策支持系统 ——塔克拉玛干沙漠公路及其防沙体系

常方乐^{1,2}, 康孟珍^{1,3}, 王秀娟^{1,3}, 雷加强⁴, 王飞跃^{1,3,5}

- (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. 浙江大学宁波研究院, 浙江 宁波 315100;
3. 中国科学院自动化研究所北京智能技术工程研究中心, 北京 100190;
4. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 5. 中国科学院大学人工智能学院, 北京 100049)

摘要: 针对风沙防护治理系统难以建模、难以解析预测等问题, 以塔克拉玛干沙漠公路及其防沙体系为研究对象, 提出平行智能风沙防护治理决策支持系统。基于防沙专家常年积累的经验知识, 结合实际系统风沙环境信息, 模拟风沙防护治理过程, 构建沙漠公路防沙体系人工系统; 基于计算实验, 评估防沙体系人工系统的防沙效果, 通过与实际系统进行比较与学习, 对系统进行评估与校准; 基于平行智能理论, 分析风沙防护治理决策支持系统, 实现人工系统与实际系统的相互学习、相互借鉴, 为风沙防护治理提供决策支持, 促进风沙环境可持续发展。

关键词: 平行智能; 计算实验; 沙漠公路防护体系; 决策支持

中图分类号: TP18

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202150

Windblown sand control decision-making support system based on parallel intelligence: Taklimakan desert highway and its sand-breaking system

CHANG Fangle^{1,2}, KANG Mengzhen^{1,3}, WANG Xiujuan^{1,3}, LEI Jiaqiang⁴, WANG Fei-Yue^{1,3,5}

1. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Ningbo Research Institute, Zhejiang University, Ningbo 315000, China
3. Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China
5. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Using Taklimakan desert highway and its sand-breaking system as the research object for complex system management and control, the ACP-based parallel intelligence theory to deal with the problems of the difficulty in modeling, analyzing, and predicting of sand-breaking system was applied, to realize the intelligent decision support for sand-breaking system management and control, support the sustainable development of aeolian environment. The expert experience knowledge to construct the artificial desert highway sand-breaking system was extracted by simulating physical process. The sand-control efficiency index of the artificial system was calculated using equations, then evaluated and modified by comparing and learning with the actual system. Using parallel intelligent theory, the artificial system and the actual system can learn from each other to provide decision support for sand control.

Key words: parallel intelligence, computational experiment, desert highway sand-breaking system, decision support

收稿日期: 2021-01-28; 修回日期: 2021-02-04

通信作者: 康孟珍, mengzhen.kang@ia.ac.cn

基金项目: 中国科学院战略性先导科学专项(A类)(No.XDA20030102); 中国科学院与泰国科技发展署合作研究项目(No.GJHZ2076)

Foundation Items: The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No.XDA20030102), Chinese Academy of Sciences-Thailand National Science and Technology Development Agency Joint Research Program (No.GJHZ2076)

1 引言

随风飘流的沙粒以及迁移的沙丘是危害沙漠区基础设施的主要因素^[1],被危害的基础设施包括高速公路^[2-3]、铁路^[4]、通信系统^[5]等,同时它们也严重影响了地表荒漠化程度^[6]。面对风沙危害问题,学者、工程人员和政府部门积极研究风沙防护治理方案^[7]。根据工程原理,可以通过增加地表粗糙度、降低贴地表风速、减少被风吹起的沙颗粒数,以及增加可供植物生长的土壤养分或者水分等方法实现对风沙的有效防护治理。这些方法主要包括物理学方法^[8-9]、生物学方法^[10]以及化学方法^[11]。根据防护功能,防沙体系依据防沙专家常年积累的经验知识,主要从阻沙作用、固沙作用、输沙作用和导沙作用进行防护技术的遴选以及时空布局的动态调整。由于这些经验并没有被系统地总结与分析,当防沙专家不在场时,风沙防护治理无法得到有效开展。

防沙体系方案的构建、优化以及评估需要依据防沙专家常年积累的经验知识。应用弱的知识提取方法,可能无法提取隐性知识,或者造成知识库的不精确性。刻意的知识表达方案会导致知识的提取更趋于生成表达驱动的知识库,而不是知识驱动的知识库^[12]。专家知识提取方法涉及多个研究领域,例如生态学^[13]、认知心理学^[14]和人工智能^[15]等。如何将大量的知识转化为一套精准的事实和规则,是专家知识提取应用的主要“瓶颈”^[16]。人工智能寒冬^[17]的打破也为知识提取带来了新的方法。模糊模型可将测量的信息通过隶属度函数(MFs)语言解释联系起来,成为知识提取的一种有效方法^[18],此种能力使其既可以处理定量信息,也可以处理定性信息^[19]。

风沙防护治理系统是典型的复杂系统^[20],具有自适应性、自组织性和涌现行为的特点。随着系统复杂性的增加,如果缺乏有效的管理与控制,模拟系统往往会逐渐偏离实际系统,直接影响风沙防护治理的效果。首先,以往的系统分析方法往往难以刻画系统各部分之间的相互关系,而基于虚拟系统或者人工系统的研究方法不再以逼近实际系统为研究目标,而是构建人工对象,通过“观察”对象的行为模式生成模型;其次,面对复杂系统不能进行有效的实验的问题,利用人工系统的思想和方法,通过建立计算实验来分析复杂系统^[21]。在计算实验中,计算机不只是仿真的工具,同时也作为一个“实验室”进行与系统行为和决策支持等相关的“实验”^[22-23]。传统的人工智能方法遵循牛顿定律:在给定当前状态与系统控制条件下,下一步的状态便可求解(小数据,大定律)。平行智能方法遵循默顿定律:即使给定当前状态与系统控制条件,下一步的状态也难以求解,因为系统会受到预测的影响而改变(大数据,小定律)。应用平行智能分析复杂系统时,人必须参与到循环中,而对现实的演算是系统中处理某种可能性的一个过程。利用人工系统模型和计算实验方法,通过实际系统和人工系统的交互运行和过程演绎,通过对比、借鉴、实验,施行平行执行(如图1所示)。结合人工系统,计算实验和平行执行构成平行智能,进行复杂系统管理与控制,这就是平行智能风沙防护治理决策支持系统的核心思想。

2 塔克拉玛干沙漠公路防沙体系

塔克拉玛干沙漠公路是目前世界上穿越流动沙漠最长的等级公路,也是世界交通史上的壮举。

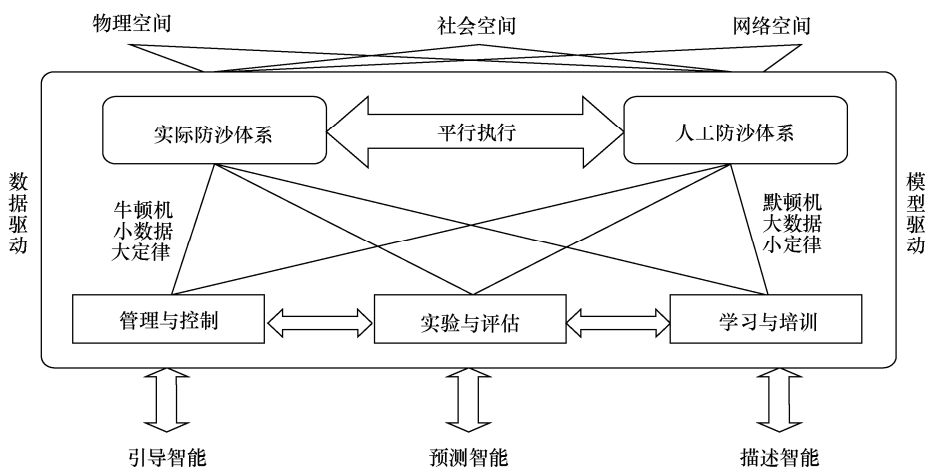


图1 平行智能风沙防护治理决策支持系统框架

塔克拉玛干沙漠公路的建设和养护历时十余年。尽管专家学者已经针对沙漠公路沿线风沙环境特征、风沙活动、沙丘移动规律、风沙危害形成与防治等开展了大量研究,然而,塔克拉玛干沙漠属于世界第二流动沙漠,其自然环境的特殊性、风动力条件的复杂性、沙丘形态的多样性等都因资料缺乏和支撑条件限制而难以进行系统的阐明。沿线风动力条件充足、风沙地貌类型复杂多样、地表组成物质疏松且易于流动等问题对沙漠公路安全运行构成了巨大威胁。针对流动沙漠这一特殊介质和环境,防沙工作人员在建设沙漠公路的同时,建立了公路防沙体系,从而有效地抑制了沙漠公路沿线的风沙危害。由此可见,塔克拉玛干沙漠公路风沙危害形成的环境背景主要有两部分,即以风动力条件、地形地貌状况以及沙物质基础等构成的致灾环境和由沙漠公路及其防沙体系构成的受灾环境。

塔克拉玛干沙漠公路防沙体系是沙漠公路的保护体,同时也与沙漠公路共同构成了沙漠公路风沙危害的受灾体。沙漠公路防沙体系分为机械防沙体系和生物防沙体系,本文主要研究机械防沙体系。机械防沙体系,即物理防沙体系,主要包括阻沙栅栏和固沙草方格的设计和实施。基本的机械防沙体系的布设机构包括:阻沙栅栏-积沙带-固沙草方格-边坡防护草方格。在沙漠公路防沙体系的设计和建设中,遵循“重灾重防、轻灾轻防、因害设防、避繁就简”的原则,根据沙漠公路两侧的风况、地形地貌、沙源以及公路走向等地设计不同宽度和类型的防沙体系。

阻沙栅栏可在风与其周边的沙子之间竖起一道阻沙屏障,其因建造快速、成本低廉和防沙效果见效快而被广泛应用于干旱区以及海岸沙地区^[24]。栅栏的设计需要考虑多种因素,包括材质、栅栏孔隙度、高度、宽度、开口尺寸和集合形状、孔隙分布等。具体设计根据地形和风况已经有了较多的应用,然而这些设计并没有考虑阻沙栅栏和风沙运动系统之间的相互作用^[25]。Dong Z B 等人^[2]在阻沙栅栏的基础上加入草方格防沙体系来增加地表空气动力学粗糙度、固定流沙^[26]和降低地表风速^[27],在国内外引起广泛关注。Bo T L 等人^[28]应用数值模型计算出在给定草方格长度消退速率和年度风况风速情况下的最佳草方格间距和宽度,计算过程遵循了物理过程计算规则和语义。风沙防护治理人员为优化防沙体系进行了一系列改进,例如采用耐久材质^[29-31],改进对防沙体系的管理和控制^[32]等。1999 年王雪芹

和雷加强^[33]提出了根据防沙效益指数评估防沙体系效果的方法。防沙效益指数表达了防沙体系对地表风沙危害的影响,是评估防沙体系效果的重要参数之一。因此,对防沙效益指数的精准预测可以为风沙防护治理提供决策支持。

3 平行智能风沙防护治理 PREA 环

复杂系统的管理与控制可通过筹划(planning)→准备(readiness)→执行(execution)→评估(assessment)→筹划(planning)(PREA 环)来进行^[34]。其核心理念体现在两个方面:一是决策方式以预案为主,强调筹划活动,在筹划阶段建立充分的预案;另一个是行动方式基于布势展开,强调行动之前的准备活动。沙漠公路及其防沙体系的物理环境通过专家经验知识提取以及环境数据采集进行描述,此过程为预测防沙体系防沙效果提供模型输入,模型结果为防沙体系管理与控制提供决策支持,并返回实际物理环境,对防沙体系进行改进,如图 2 所示,整个过程是一个 PREA 环。

4 平行智能风沙防护治理决策支持系统

平行风沙防护系统的主要目的是通过人工风沙防护系统与实际风沙防护系统的相互连接,对二者的行为进行比较和分析,完成对各自未来状况的“借鉴”和“预估”,相应地调节各自的管理和控制方式,达到实施有效的解决方案以及学习和培训的目的。显然,在系统运行中,各种反馈控制使得系统能够自适应于不同的治理方案。

根据风沙危害治理周期长、难预测、难评估的特点,借鉴实际工程与虚拟实验相互学习的平行系统理论,基于自然因素、人为因素对风沙活动模型进行重点工程风沙危害治理方案的场景模拟和指标评估,为工程方案提供实施前、实施期间的理论支持。基于模型的计算结果和实际系统的演变结果可能存在差异。在工程方案实施前和实施期间,对实际系统和人工系统的各种指标进行比较和拟合,选择和应用优化算法,反求和校准影响模型计算的各种参数,从而实现对自然演变效果的模拟和预测。结合专家经验,对不同工程方案实施后的预期演变效果进行可视化表达,结合自然环境下的演变模型,模拟和评估不同工程方案实施后的效果,从而为方案的选择提供决策支持。机械防沙体系人工系统如图 3 所示,风沙活动人工系统的构建与

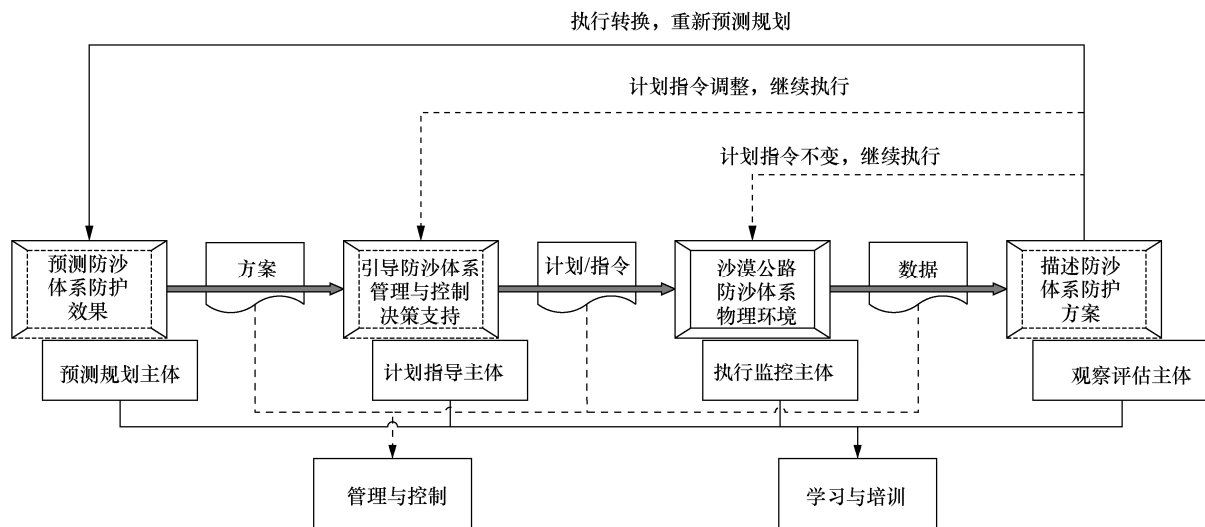


图2 平行智能风沙防护治理 PERA 环

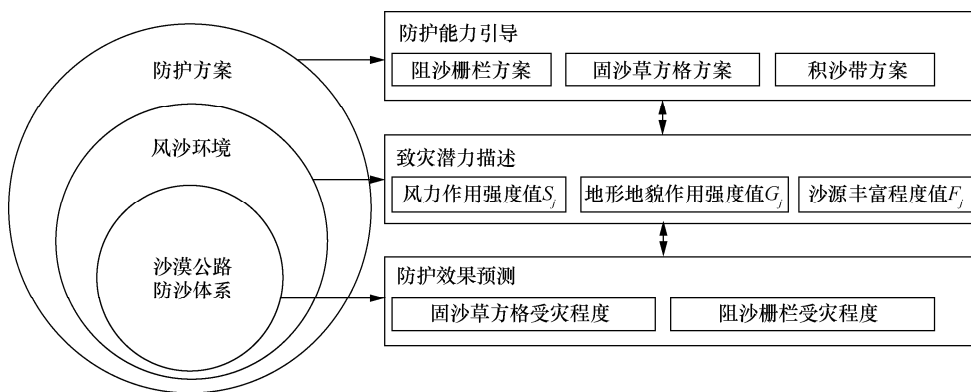


图3 机械防沙体系人工系统

实际系统的平行执行涵盖了描述智能、预测智能和引导智能 3 个层次。描述智能是在虚拟空间构建人工系统、描述实际系统；预测智能是建立在描述智能基础之上的，是对未来发展的预估和优化；引导智能则基于描述智能与预测智能，进而找到有利的或优化的策略。以描述、预测和引导为“三步曲”的平行治沙，为智能风沙防护治理提供了一个总体框架。

4.1 风沙环境致灾潜力描述

风沙环境致灾因子包括风动力强度、地形地貌影响和沙源丰富程度等。致灾因子经分级量化处理后，生成风力作用程度值 S_j ，其是通过特征值计算以及标准化处理而得到的（如式（1）所示），地形地貌作用强度值 G_j 和沙源丰富程度值 F_j 主要通过实地调查和对监测资料进行分级赋值得到。风沙环境致灾能力值 Z_j 通过对各致灾因子进行加权计算得到（如式（2）所示）。

$$S_j = \sum \frac{D_{ij} \cdot |\sin a_{ij}|}{\max(S_j)}, i=1,2,\dots,16, j=1,2,\dots,327 \quad (1)$$

$$Z_j = 0.3 \times S_j + 0.4 \times G_j + 0.3 \times F_j \quad (2)$$

其中， D_{ij} 为方向 i 路段 j 的输沙能力指数，其值为 $\sum (V_{ij} - 6)^3$ ； V_{ij} 为方向 i 路段 j 的风速； a_{ij} 为输沙方向和公路走向的夹角； i 代表北、北北东、东北等方向； j 代表各个路段。

4.2 防沙体系防护效果预测

防沙体系的受灾因子包括阻沙栅栏受灾程度和固沙草方格受灾程度。其中，阻沙栅栏受灾程度取决于掏蚀、断倒、压埋、全埋和半埋危害长度，固沙草方格受灾程度取决于风蚀、压埋、全埋和半埋危害长度。防沙体系受灾因子主要基于实施的防沙体系方案来计算。防沙体系致灾程度值的计算需要考虑各类型危害的程度权重数和所占危害总长

度的百分比。这两类数据主要依赖于防沙专家常年积累的经验知识。对阻沙栅栏受灾程度值 B_j 和固沙草方格受灾程度值 C_j 进行加权计算, 得到防沙体系受灾程度值 P_j (如式 (3) 所示)。此过程为典型的基于物理过程的建模, 具有较好的机理性, 但计算过程复杂、可预测性较差, 无法处理数据或变量的增减问题。

$$P_j = 0.4 \times [B_j / \max(B_j)] + 0.6 \times [C_j / \max(C_j)] \quad (3)$$

反向神经网络利用误差反向传播来修正区间网络权值, 进而对模型输出进行更新。通过刻画风沙作用的正过程预测防沙体系的防护效果, 其中模型输入为防沙体系各类型数据, 模型输出为各防沙体系方案的防护效果 (如图 4 所示, 其中 x 表示防沙体系各类型数据, W 表示权重, $f(\cdot)$ 表示神经网络算法, y 表示模型输出, j 表示路段, n 表示防沙体系类型数据种类)。这类模型能够模拟非线性关系, 拥有较强的预测能力以及较高的灵活性。通过知识提取方法, 提取专家的风沙防护治理知识, 主要包括防沙体系方案以及对防护效果的评估, 并将其嵌入神经网络模型中, 可选出最适合的模型来预测防沙体系的防护效果。

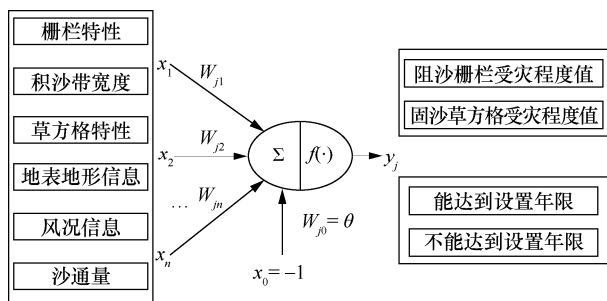


图4 防沙体系防护效果智能预测

4.3 防沙体系防护能力引导

防沙效益指数 Q 是常用的风沙防护治理评估指标, 主要包括防沙体系受灾程度与风沙环境致灾能力两部分, 如式 (4) 所示, 被应用于塔克拉玛干沙漠公路防护体系评估。当 $Q \leq 0.5$ 时, 防沙体系在到达设置年限后还能继续工作; 当 $0.5 < Q \leq 1$ 时, 防沙体系能够工作到设置年限; 当 $Q > 1$ 时, 防沙体系不能工作到设置年限。管理和控制基本变量, 使得防沙效益指数能够落入小于 1 的区间内。

$$Q = [P_j / \max(P_j)] / [Z_j / \max(Z_j)] \quad (4)$$

5 防沙体系平行执行

给定实际系统物理环境, 通过人工系统预测防沙体系能否达到设置年限, 当模型输出显示防沙体系无法达到预期效果时, 通过修正对应的防沙体系结构来提高防护效果。当环境信息不同时, 如风速、地表状况等不同, 防沙体系的防护效果也不同。当防沙体系可以达到规定的设置年限时, 不会对防沙体系做任何调整修改; 当防沙体系不能达到规定的设置年限时, 基于模糊算法, 根据防沙体系受灾程度值给出方案。选取 4 个路段, 结合风沙环境分别设置不同年限, 分别给出各路段的 7 种防沙体系方案 (如图 5 所示, 其中 N 表示不能达到防沙体系设置年限, Y 表示能够达到防沙体系设置年限, Q 表示防沙体系的防沙效益指数, 括号内为阻沙栅栏受灾程度值和固沙草方格受灾程度值)。当特定路段防护体系设置年限为 4 年时, 若采用方案 5, 即使防沙体系受灾程度不高, 当风速大且地表受风速影响大时, 仍需提高防沙体系的维护频率才能达到防护要求。同时, 远程监测实际系统将实际系统信息导入人工系统, 系统自适应调整产生新的防护效益结果, 从而实现虚实结合, 促进风沙防护治理的可持续化。

6 结束语

风沙防护治理会影响人类生活行为方式, 同时, 人类生活行为方式也会影响风沙环境的变化, 进而影响风沙防护治理工程的设计、管理以及维护。风沙防护治理系统是典型的复杂系统, 普遍存在治理周期长、难预测、难评估等问题。本文应用复杂系统管理与控制方法, 针对数据精度低、系统效果难预测, 以及实际系统操作成本高等问题, 从系统分析层面为风沙防护治理系统管理提供有效的管理方法和手段。基于 ACP 的平行理论方法, 通过实际系统与人工系统的相互连接、相互对比和分析, 人工系统可以根据实际系统情况进行实时动态更新, 从而接近实际系统, 该方法是分析风沙防护治理复杂系统的有效方法之一。

本文以风沙防护治理为切入点, 结合平行智能与风沙防护治理研究, 通过构建沙漠公路防沙体系人工系统, 预测防沙体系的防沙效益, 基于平行执行智能调整防沙体系, 为风沙防护提供决策支持。传统的风沙防护治理决策支持, 无法根据实际系统

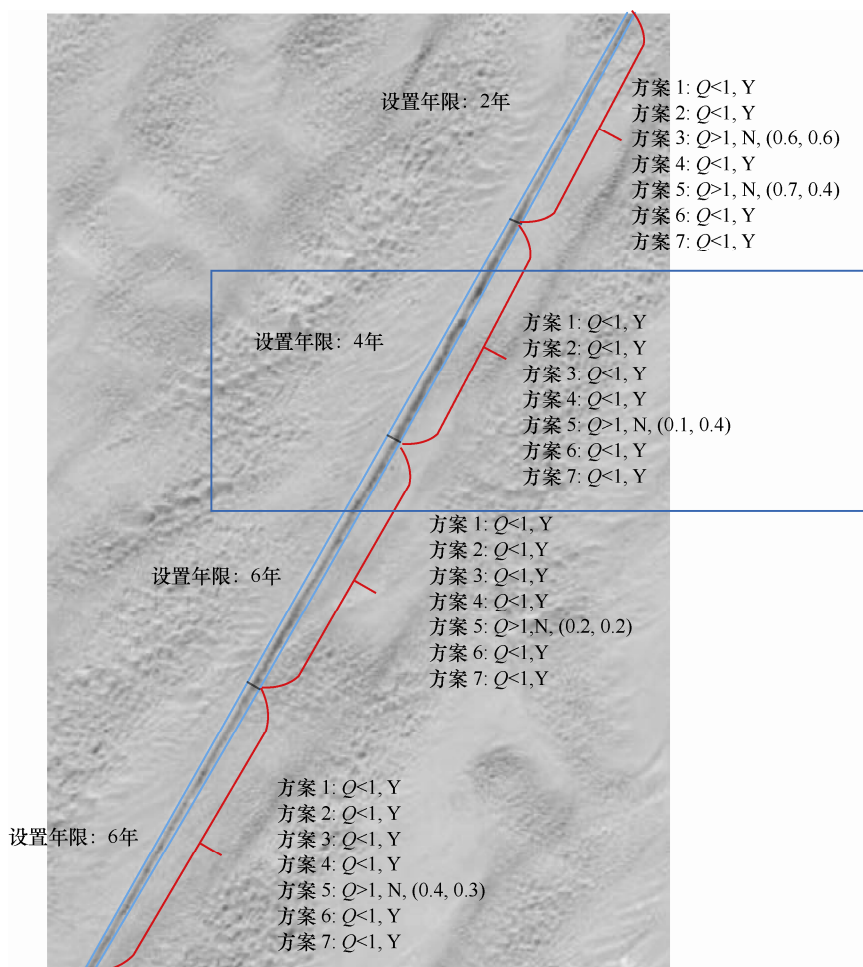


图5 机械防沙体系决策支持系统

实时调整防沙体系方案,而基于平行智能的系统分析方法可以通过虚实相互借鉴,实现闭环的系统管理和控制。本文通过提取分析风沙防护治理专家的经验知识,自动生成防沙体系,使得即使专家不在场,防护工程仍可以有效开展。专家经验知识提取已经被成功应用于医学、心理学等领域。本文将其应用于风沙防护治理,可以大大提高防沙体系的构建以及维护效率。同时,基于物理过程的防沙效益指数计算方法计算过程复杂、时间长、误差大。本文采用知识与数据共同驱动的建模方法^[35]构建防沙效益指数预测模型,在减少计算时间的情况下提高了预测精度。应用人工智能模型模拟风沙活动与防沙效益指数之间的关系,本文将基于过程建模转化为知识和数据共同驱动模型,提高了模型效率以及精准度,同时模型的自适应能力使得模型更灵活,提高了模型的灵活性以及普适性。本文基于计算实验的人工系统评估方法,将计算机作为“实验室”,大大降低了评估的周期以及实际操作难度。

通过风沙防护人工系统与风沙防护实际系统的相互连接,对二者的行为进行比较和分析,完成对各自未来状况的“借鉴”和“预估”,相应地调节各自的管理和控制方式,这是平行治沙理论付诸实践的表现。

参考文献:

- [1] RAFFAELE L, BRUNO L, FRANSOS D, et al. Incoming windblown sand drift to civil infrastructures: a probabilistic evaluation[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 166: 37-47.
- [2] DONG Z B, CHEN G T, HE X D, et al. Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan desert[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(3): 329-344.
- [3] LI C J, LEI J Q, ZHAO Y, et al. Effect of saline water irrigation on soil development and plant growth in the Taklimakan desert highway shelterbelt[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 99-107.
- [4] BRUNO L, HORVAT M, RAFFAELE L. Windblown sand along railway infrastructures: a review of challenges and mitigation measures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 177: 340-365.

- [5] BOULGHOBRA N, MERDAS S, LAKHDARI F. Sand encroachment in the Saharan Algeria; the not declared disaster-case study: in-Salah region in the Tidikelt[J]. *Planet@ Risk*, 2015, 3(1): 72-76.
- [6] GEIST H. The causes and progression of desertification[J]. *Pramana-Journal of Physics*, 2005, 15(15): 515-523.
- [7] SULTAN H. Dust and erosion control in semi-arid climates[C]//*Proceedings of the Symposium on Geotechnical Problems in Saudi Arabia*. [S.l.:s.n.], 1981: 289-328.
- [8] IKAZAKI K, SHINJO H, TANAKA U, et al. "Fallow band system," a land management practice for controlling desertification and improving crop production in the Sahel, West Africa. 1. effectiveness in desertification control and soil fertility improvement[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 57(4): 573-586.
- [9] 屈建军, 刘贤万, 雷加强, 等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(3): 276-280.
- QU J J, LIU X W, LEI J Q. Simulation experiments on sand arresting effect of nylon net fence in wind tunnel[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(3): 276-280.
- [10] 徐先英, 孙保平, 唐进年, 等. 干旱荒漠风沙区沙化土地综合整治技术研究——以古浪县黄花滩治沙示范区为例[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(4): 539-545.
- XU X Y, SUN B P, TANG J N, et al. Techniques of integrated controlling desertified sandy land in arid area: an example in huang-hua-tan desert control demonstration region in Gulang county, Gansu province[J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(4): 539-545.
- [11] DUAN J T, LITWILLER E, CHOI S H, et al. Evaluation of sodium lignin sulfonate as draw solute in forward osmosis for desert restoration[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 453: 463-470.
- [12] COOKE N M, MCDONALD J E. A formal methodology for acquiring and representing expert knowledge[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1986, 74(10): 1422-1430.
- [13] OYAMA S. The ontogeny of information: developmental systems and evolution[J]. *Quarterly Review of Biology*, 2000, 8(4): 597-597.
- [14] HOFFMAN R. The cognitive psychology of expertise and the domain of interpreting[J]. *Interpreting*, 1997, 2(1-2): 189-230.
- [15] GRUBER T R. Nature, nurture, and knowledge acquisition[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2013, 71(2): 191-194.
- [16] GAINES B R. Knowledge acquisition: past, present and future[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2013, 71(2): 135-156.
- [17] MCDERMOTT D, WALDROP M M, CHANDRASEKARAN B, et al. The dark ages of AI: a panel discussion at AAAI-84[J]. *AI Magazine*, 1985, 6(3): 122-134.
- [18] CORNELISSEN A M G, VAN DEN BERG J, KOOPSW J, et al. Elicitation of expert knowledge for fuzzy evaluation of agricultural production systems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 95(1): 1-18.
- [19] CAMPELLOR J, AMARAL W C. Modeling and linguistic knowledge extraction from systems using fuzzy relational models[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 121(1): 113-126.
- [20] BAAS A C. Complex systems in aeolian geomorphology[J]. *Geomorphology*, 2007, 91(3-4): 311-331.
- [21] 王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估[J]. *系统仿真学报*, 2004, 5: 34-38.
- WANG F Y. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 5: 34-38.
- [22] 王飞跃, 汤淑明. 人工交通系统的基本思想与框架体系[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(2): 52-59.
- WANG F Y, TANG S M. Concepts and frameworks of artificial transportation systems[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(2): 52-59.
- [23] 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.
- [24] LIMA I A, ARAÚJO A D, PARTELI E J, et al. Optimal array of sand fences[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45148.
- [25] LI B L, SHERMAN D J. Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: a review[J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 33-48.
- [26] 马全林, 王继和, 詹科杰, 等. 塑料方格沙障的固沙原理及其推广应用前景[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 36-39, 58.
- MA Q L, WANG J H, ZHAN K J, et al. Study on fixing sand principles of plastic checkerboard sand-barrier and its potential application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 36-39, 58.
- [27] LIU L, BO T L. Effects of checkerboard sand barrier belt on sand transport and dune advance[J]. *Aeolian Research*, 2020, 42: 100546.
- [28] BO T L, ZHENG X J. Numerical simulation of the evolution and propagation of aeolian dune fields toward a desert-oasis zone[J]. *Geomorphology*, 2013, 180: 24-32.
- [29] BRUNO L, COSTE N, FRANSOS D, et al. Shield for sand: an innovative barrier for windblown sand mitigation[J]. *Recent Patents on Engineering*, 2018, 12(3): 237-246.
- [30] BRUNO L, FRANSOS D, GIUDICE A L. Solid barriers for windblown sand mitigation: aerodynamic behavior and conceptual design guidelines[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 173: 79-90.
- [31] WANG T, QU J J, NIU Q H. Comparative study of the shelter efficacy of straw checkerboard barriers and rocky checkerboard barriers in a wind tunnel[J]. *Aeolian Research*, 2020, 43: 100575.
- [32] 常方乐, 康孟珍, 王秀娟, 等. 平行智能风沙防治系统构架与功能——以植物措施为例[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(6): 1576-1583.
- CHANG F L, KANG M Z, WANG X J, et al. Aeolian sand parallel prevention and control: application of artificial intelligence technology in sand prevention and control[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(6): 1576-1583.
- [33] 王雪芹, 雷加强. 塔里木沙漠公路风沙危害评估指标体系[J]. *干旱区地理*, 1999, 22(1): 81-87.
- WANG X Q, LEI J Q. Assessment indicators of drifting sand hazard along Tarim desert highway, Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 1999, 22(1): 81-87.
- [34] 阳东升, 姜军, 王飞跃. 从平台到体系: 指挥对抗活动机理的演变及其 PREA 环对策[J]. *指挥与控制学报*, 2018, 4(4): 263-271.
- YANG D S, JIANG J, WANG F Y. From platforms to systems of sys-

tems: on mechanism evolution of command confrontation and its PREA loop[J]. Journal of Command and Control, 2018, 4(4): 263-271.

- [35] FAN X R, KANG M Z, HEUVELINK E, et al. A knowledge-and-data-driven modeling approach for simulating plant growth: a case study on tomato growth[J]. Ecological Modelling, 2015, 312: 363-373.

[作者简介]



常方乐 (1988-), 女, 博士, 浙江大学宁波研究院助理研究员, 主要研究方向为平行智能生态环境系统智能决策、智慧农业、智慧大棚、多传感器数据融合。



康孟珍 (1975-), 女, 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副研究员, 主要研究方向为平行农业和计算植物。



王秀娟 (1982-), 女, 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助理研究员, 主要研究方向为平行农业和植物建模。



雷加强 (1961-), 男, 中国科学院新疆生态与地理研究所研究员、博士生导师, 中国治沙暨沙业学会副会长、“一带一路”国际科学组织联盟荒漠化防治联盟主任、新疆生地所干旱区防沙治沙与沙产业国家创新联盟理事长、新疆地理学会理事长、《干旱区研究》主编, 主要从事风沙环境及防沙治沙研究工作。



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, 主要研究方向为复杂系统、智能控制、社会计算、平行理论。