

# 粮食作物生产机械化系统动力学建模与仿真\*

李纪岳 陈 志 杨敏丽

(中国农业大学中国农业机械化发展研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 分析了我国粮食作物机械化生产系统结构组成, 构建了因果分析图和系统动力学流程图。在此基础上, 进行了系统动力学模型构建与仿真分析。结果表明: 经济发展水平、土地经营规模、农业劳动力转移是影响粮食作物机械化生产系统的主要因素。只有通过提高粮食作物生产规模化程度和专业化程度并配合产业发展规律, 才能从根本上提高机械化生产的效率和生产能力。

**关键词:** 粮食作物 农业机械化 系统动力学模型 仿真

**中图分类号:** S23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0030-04

## SD Model and Simulation of Grain Crop Mechanization Production

Li Jiyue Chen Zhi Yang Minli

(China Research Center for Agricultural Mechanization Development, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The Chinese grain crop mechanization production system structure was analyzed. A causal analysis diagram and flow chart of system dynamics were constructed. The results show that, the proportion of capital investment, land management scale and equipment level were the main factors effect of grain crop mechanization production system. Only by improving grain crop production scale of the degree of specialization and the law of industrial development, the mechanization production efficiency and production capacity would improve.

**Key words:** Grain crop Agricultural machinery System dynamics model Simulation

## 引言

粮食作物生产机械化可以减轻农民劳动强度, 确保农艺措施到位, 提高产量, 对实现生产节本增效具有重要作用<sup>[1~2]</sup>。我国实施农机购置补贴政策以来, 农业机械化呈现快速发展。在此良好发展环境下, 粮食作物生产机械化也有了长足的发展。国内对粮食作物生产机械化问题的研究主要集中于从劳动生产率、土地产出率、单位台数机械生产量来测算效率<sup>[3~7]</sup>。粮食机械化生产不仅受粮食生产和机械化本身特点的影响, 同时也受劳动力和经济系统的影响, 是一个复杂系统, 因此有必要采用合适的方法综合考虑多方面因素来分析粮食机械化生产的效率。

系统动力学(System dynamics, SD)理论和方法集系统论、控制论和信息论于一身, 融汇了组织管理理论精髓, 并采用计算机模拟技术, 是认识和处理高阶、非线性、多重反馈复杂时变系统极为有效的工具<sup>[8~10]</sup>。本文采用该方法对我国粮食作物机械化生产系统建模并进行仿真分析, 探讨系统的影响因素, 分析促进粮食作物生产机械化发展的途径。

## 1 系统动力学建模

### 1.1 建模原则

粮食作物生产机械化系统动力学建模的构建要遵循以下原则:

拆分与集成相结合。农业机械化是一个复杂的

收稿日期: 2011-11-10 修回日期: 2011-11-15

\* 公益性行业(农业)科研专项资助项目(200903009)

作者简介: 李纪岳, 博士生, 主要从事农村发展与农业机械化研究, E-mail: lijyue@cau.edu.cn

通讯作者: 杨敏丽, 教授, 博士生导师, 主要从事农村发展与农业机械化和现代农业装备发展战略研究, E-mail: qyang@cau.edu.cn

具有非线性、多层次关系的巨系统,模型的建立应充分考虑子系统间以及子系统与总系统的反馈关系。从整体的视角全面描述系统的内部结构与反馈机制<sup>[11]</sup>。

连续性与相对稳定性原则。系统动力学主要在于说明系统演变趋势与结构原因,采用连续的系统模型有助于明确系统框架与系统的动态特征。

系统结构决定行为。系统行为模式由系统的结

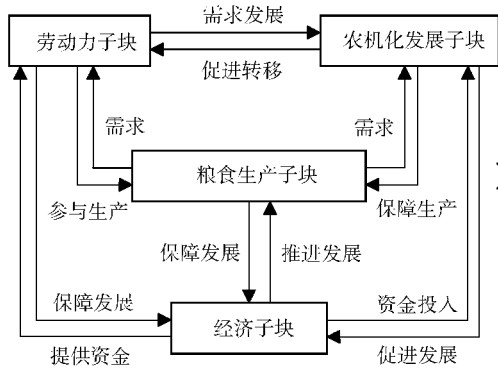


图1 粮食作物生产机械化系统结构与因果关系简化图

Fig.1 Grain crop mechanization production system structure and causal relationship between simplified graph

粮食生子子块主要研究在机械化生产条件下,耕整地、播种、收获及产后加工各个环节生产情况和单位面积产量、总产量以及成本收益等。粮食生子子块将单位面积产量作为水平变量,播种面积、劳均播种面积等作为辅助变量。将农业机械化对单位面积粮食产量的影响、粮食机械化生产需要的劳动力数量作为该系统与其他子系统的接口。

农机化发展子块主要研究农机化发展的水平、装备、农机服务及管理各方面的变化和联系。把农机化水平作为水平变量,将农业机械总动力和单位面积农机总动力作为辅助变量。将农机化总投入、农业机械化对单位面积粮食产量的影响作为农机化子系统与其他子系统之间衔接的接口。

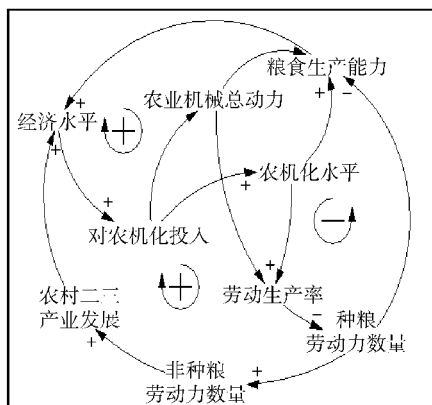
劳动力子块主要研究从事农业生产的劳动力增减的影响因素和机制。将农业劳动力数量作为水平变量,农业劳动力年增加量和农业劳动力年减少量作为速率变量,劳动力转移速度作为辅助变量。将农业劳动力转移速度受机械化影响因子作为与其他子系统的接口,用来表现农业机械化发展对农业劳动力转移的影响情况。

经济子块主要研究机械化生产过程中投入与产出的关系,探讨在工业化、城镇化、农业现代化同步推进环境下,农业经济发展速度及产业结构的比重。该子块将农民人均纯收入作为水平变量,将当地经济发展水平和政府对农机化财政投入作为辅助变量。将经济发展水平受粮食生产能力影响程度、农

构决定,环境对系统行为模式的影响通过内部结构起作用,而系统的基本结构根植于系统内部的反馈结构与机制,以及信息反馈回路<sup>[12~13]</sup>。

1.2 粮食作物机械化生产系统结构分析

粮食作物生产机械化系统可以划分为粮食生子子块、农机化发展子块、劳动力子块和经济子块4部分。这4个子系统是相互联系、相互影响的,其耦合关系如图1所示。



业机械总投入对农业机械化的带动因子和农业机械化总投入作为与其他子系统进行结对接的接口。

1.3 动态模型流图建立

由于因果关系只能定性描述复杂系统的反馈机制,因此运用系统动力学建模软件建立粮食生产机械化系统动态仿真模型,如图2所示。显然农业机械化流程图所反映的状况可以为粮食生产机械化发展提供基础依据。

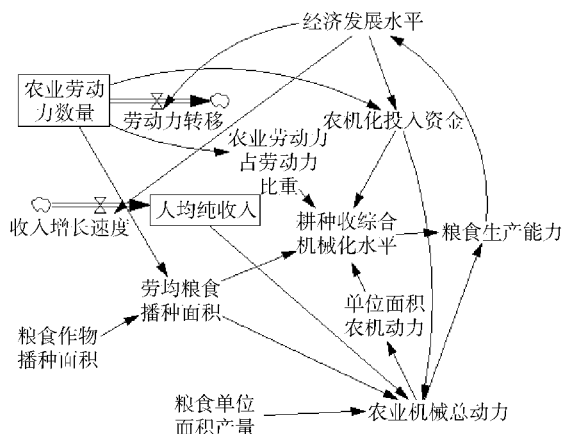


图2 粮食作物生产机械化系统动态仿真模型

Fig.2 Simulation model of grain crop mechanization production

2 模型仿真与分析

以山东省为例对主要粮食作物机械化生产进行仿真,使用系统动力学专用软件 Vensim-PLE,所需基本数据来自《中国统计年鉴》、《全国农业机械化

统计年报》、《中国农村统计年鉴》、《山东省统计年鉴》等,另有部分数据取自有关权威网站和实地调查。系统的运行方案较多,当参数调整到合适时,各种变量呈现比较合理的变化趋势。

## 2.1 动态仿真模型有效性检验

粮食作物机械化生产系统十分复杂,模型也仅仅是对客观事物本质或某些重要特征的概括与抽象。因此,对模型进行有效性检验显得十分必要。

模型的有效性检验一般分两种:理论检验与历史仿真检验。其中,理论检验主要是研究模型边界是否合理、模型变量间的关系是否具有现实意义、参

数取值是否有实际意义及方程量纲是否一致等;历史仿真检验主要是选定过去某一时刻,对仿真结果与实际结果作比较,考察两者吻合度,以检验模型能否有效地代表现实系统<sup>[8]</sup>。

就建立的粮食作物机械化生产系统模型而言,首先它应建立在全面分析的基础上,同时针对具体情况进行了必要调整,并认为界定的系统边界、参数设定等均应合理;其次利用 Vensim 软件所提供的模型检验进行有效性检验;最后选取 2001~2010 年,对模型仿真后得到的变量数据与真实数据进行对比,得到结果如表 1 所示。

表 1 历史仿真检验结果

Tab.1 Test results of historical simulation

参数	历史值			仿真值			相对误差/%	
	2001	2005	2010	2001	2005	2010	2005	2010
农业劳动力数量/万人	2 887.7	2 056.5	2 004.4	2 887.7	2 103.5	2 024.7	2.29	1.01
单位面积农机总动力/ $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$	$1.07 \times 10^5$	$1.37 \times 10^5$	$1.64 \times 10^5$	$1.07 \times 10^5$	$1.29 \times 10^5$	$1.65 \times 10^5$	-5.84	0.61
劳动生产率/ $\text{kg}\cdot\text{人}^{-1}$	1 522.2	1 904.9	2 163.1	1 522.2	1 923.1	2 138.3	0.96	-1.15
资金利用率/ $\text{kg}\cdot\text{元}^{-1}$	128.9	107.9	83.9	128.9	109.5	87.6	1.48	4.41

由表 1 可知,模型仿真值与历史值之间的相对误差最高为 5.84%。因此在通过以上有效性检验后,可以认为所建立的动态模型能够较好地模拟粮食生产机械化系统,并对未来的发展状况进行合理预测。

## 2.2 仿真结果分析

对有重要影响的政策性参数进行调整与组合后,对系统进行仿真。模型运行时间为 2010~2020 年,仿真步长为 1 年,主要考察农业机械化投入资金、土地规模经营和农业机械总动力等指标。

### (1) 农业机械化投入资金

由模型可以看出,农业机械化资金投入量主要受到当地经济发展水平、农业劳动力数量和农村人均纯收入等因素的影响,同时它也是影响耕、种、收综合机械化水平和农业机械总动力的重要因素之一。它的变化趋势如图 3 所示。

由模拟结果可以看出,2015 年农业机械购置总投入将达到 56.23 亿元,2020 年将达到 73.65 亿

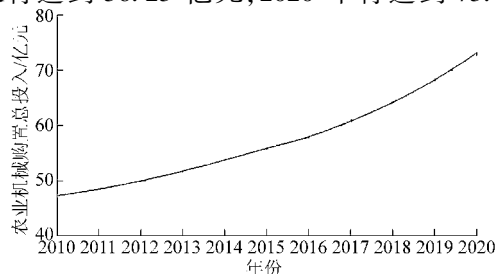


图 3 农业机械购置总投入变化趋势

Fig.3 Purchase of agricultural machinery total investment

元。随着农民人均纯收入的提高和当地经济的发展,农机化投入的能力不断增强,另外随着农业劳动力的减少,对农业机械投入的需求不断增加。增加农机资金投入,有利于农机化水平的提高,但若没有其他配套措施,发展到一定程度后,会导致资金利用率下降。所以单纯增加农机资金投入,无助于机械化农业生产系统的持续发展,更需要各项有效配套措施到位。

### (2) 土地规模经营

采用劳均粮食播种面积反映土地经营规模。设定粮食作物播种面积稳定不变,随着农业劳动力数量的不断减少,劳均粮食播种面积将不断增加。劳均粮食播种面积也是造成农机总动力和机械化水平变化的主要动力。该指标变化如图 4 所示。

模拟数据显示,2015 年山东省劳均粮食播种面积达到  $0.59 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,2020 年将达到  $0.67 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。同一劳均播种面积也会对机械化水平和农机动力有不同的影响效果,这是由于农业经营组织形式不同,土地分散经营、集中经营的程度各不相同,在一定程度上影响了农业机械作用的发挥。山东省粮食生产地区生产规模过小,规模效益较差,是限制投资的重要因素,但通过强制合并会产生不良效果。所以在规范土地流转制度前提下,稳定土地使用权,才能保证经营者在粮食生产中投资的稳定性。采用合理的农业生产经营形式,扩大劳均规模,提高农机利用率,是提高粮食生产经济效益、降低生产成本,保证

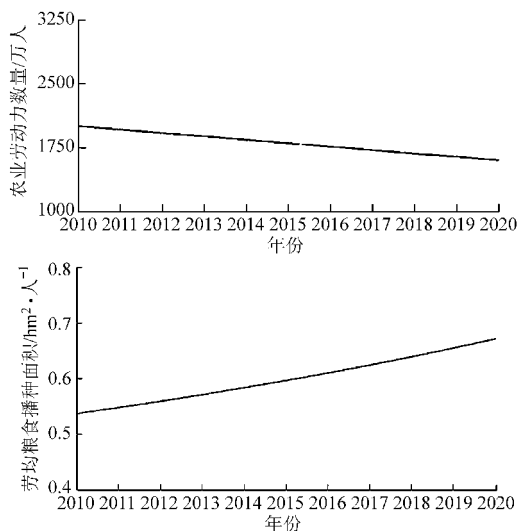


图4 土地规模经营变化趋势

Fig. 4 Purchase of land scale manage

规模会扩大,动力利用效率势必提高,农业机械总动力增长速度将会逐渐放缓。采取将农业机械由中小型为主改为大中型为主和土地适度规模化经营<sup>[1]</sup>,是提高粮食机械化生产效率的有效措施,符合中国特色农业机械化发展道路的特点。

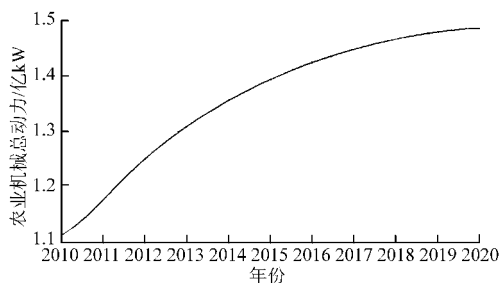


图5 农业机械总动力变化趋势

Fig. 5 Total power of agricultural machinery

机械化农业生产系统持续发展的又一重要措施。

### (3) 农业机械总动力

农业机械总动力的变化直接反映了农业机械在农业生产中物质投入的程度。它受到农机化投入资金、农村人均纯收入、劳均粮食播种面积和粮食单位面积产量的影响。农机总动力变化趋势如图5所示。

如果按照山东省2000~2010年农业机械总动力的增长速度为5.01%推算,2015年农机总动力将达到1.48亿kW,2020年达到2.57亿kW。然而模型预测结果为2015年达到1.39亿kW,2020年达到1.49亿kW,与按目前增长速度推算结果相比减少了6.08%和42.02%。这是由于随着燃油资源逐渐紧缺和农业劳动力数量的减少,结构将调整,经营

## 3 结论

(1) 粮食作物生产机械化系统是一个复杂的技术经济系统,它的运行是复杂的动力学过程。通过分析粮食作物生产机械化系统的结构层次,提出了该系统的动力学模型。

(2) 以山东省为例进行了系统动力学仿真研究。主要考察农业机械化投入资金、土地规模经营和农业机械总动力等指标,通过模型的运行,获得了各项指标2011~2020年的预测结果。经济发展水平、土地经营规模和农业劳动力转移是影响粮食作物机械化生产系统的主要因素。只有通过提高粮食作物生产规模化程度和专业化程度,并配合产业发展规律,才能从根本上提高机械化生产的效率和生产能力。

## 参 考 文 献

- 杨敏丽. “十二五”农业机械化发展趋势与对策建议[J]. 农机质量与监督, 2011(1): 14~15.  
Yang Minli. Trend and suggestion of agricultural mechanization development[J]. Agricultural Machinery Quality & Supervision, 2011(1): 14~15. (in Chinese)
- 杨敏丽, 白人朴. 中国农业机械化财政投入分析[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 94~97.  
Yang Minli, Bai Renpu. Analysis on financial investment for agricultural mechanization in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 94~97. (in Chinese)
- Fanigliulo R, Vassalini G, Fornaciari L, et al. New instrumentation and reference methodologies for Isma test center [J]. Machinery World, 2007(6): 56~61.
- 白人朴. 中国农业与机械化现代化——白人朴教授论文集[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
- 农业部农业机械化管理局. 中国农业机械化科技发展报告[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009.
- 白人朴. 粮食八连增与农业机械化[J]. 农机科技推广, 2011(11): 7~10.
- 耿端阳, 张铁中, 罗辉, 等. 我国农业机械发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 208~210.  
Geng Duanyang, Zhang Tiezhong, Luo Hui, et al. Analysis China's agricultural machinery development trend[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 208~210. (in Chinese)
- 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 95~117.
- 王其藩. 系统动力学理论与方法的新进展[J]. 系统工程理论方法应用, 1995, 4(2): 6~12.  
Wang Qifan. New progress in theory and methodology of system dynamics [J]. Systems Engineering—Theory Methodology Application, 1995, 4(2): 6~12. (in Chinese)

## 4 结论

(1) 通过拉格朗日法建立了斗杆、铲斗二自由度动力学模型,并将模型简化为未知参数的线性表示。在推导出驱动力矩与液压缸驱动力关系的基础上,获得了系统参数辨识的最小二乘格式。

(2) 分别采用递推最小二乘法和递推随机牛顿法辨识未知参数,所得模型与实机系统对比分析表

明,递推随机牛顿法比递推最小二乘法预测力矩误差在斗杆、铲斗关节分别减少约 65%、63%,其对系统噪声有更好的鲁棒性。

(3) 通过本文的辨识方法得到了系统中未知的组合参数值,能有效进行驱动力矩的预测和系统仿真,并无需获得系统单个未知参数的精确值。本研究为挖掘臂的控制器设计提供了动力学模型参考。

## 参 考 文 献

- 1 Yan Jun, Li Bo, Tu Qunzhang, et al. Automatization of excavator and study of its autocontrol [C] // 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), Shanghai, China, 2011, 1: 604 ~ 609.
- 2 Shahram T. Identification of frictional effects and structural dynamics for improved control of hydraulic manipulators [D]. Vancouver: University of British Columbia, 1997.
- 3 黎波, 严骏, 刘安心, 等. 挖掘臂电液伺服系统非线性辨识[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 20 ~ 25.  
Li Bo, Yan Jun, Liu Anxin, et al. Nonlinear identification of excavator arm's electro-hydraulic servo system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 20 ~ 25. (in Chinese)
- 4 Gautier M, Poignet P. Extended Kalman filtering and weighted least squares dynamic identification of robots [J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(12): 1361 ~ 1372.
- 5 Swevers J, Verdonck W, Schutter J D. Dynamic model identification for industrial robots [J]. Control Systems, IEEE, 2007, 27(5): 58 ~ 71.
- 6 龚文, 王庆丰. 液压挖掘机上车结构参数与液压缸摩擦力参数辨识[J]. 中国机械工程, 2010, 21(9): 1098 ~ 1100.  
Gong Wen, Wang Qingfeng. Parameter identification of arm structure and cylinder friction on a hydraulic excavator [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(9): 1098 ~ 1100. (in Chinese)
- 7 Tafazolli S, Lawrence P D, Salcudean S E. Identification of inertial and friction parameters for excavator arms [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(5): 966 ~ 971.
- 8 Zweiri Y H, Seneviratne L D, Althoefer K. Parameter estimation for excavator arm using generalized Newton method [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2004, 20(4): 762 ~ 767.
- 9 Zweiri Y H. Identification schemes for unmanned excavator arm parameters [J]. International Journal of Automation and Computing, 2008, 5(2): 185 ~ 192.
- 10 Koivo A J, Thoma M, Kocaoglan E, et al. Modeling and control of excavator dynamics during digging operation [J]. Journal of Aerospace Engineering, 1996, 9(1): 10 ~ 18.
- 11 Craig J J. Introduction to robotics: mechanics and control [M]. 3rd. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2005.
- 12 黎波, 严骏, 曾拥华, 等. 挖掘机工作装置运动学建模与分析[J]. 机械设计, 2011, 28(10): 7 ~ 10.  
Li Bo, Yan Jun, Zeng Yonghua, et al. Kinematics modeling and analysis of excavator working device [J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(10): 7 ~ 10. (in Chinese)
- 13 Ljung L. System identification, theory for the user [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.
- 14 杨承志, 孙隼华, 张长胜. 系统辨识与自适应控制 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.

(上接第 33 页)

- 10 何春岁, 张德骏, 刘新力, 等. 大功率拖拉机机组系统动态经济效益的仿真研究[J]. 农业机械学报, 1990, 21(3): 17 ~ 22.  
He Chunsui, Zhang Dejun, Liu Xinli, et al. Simulation research on the dynamic-economic benefits for big-power tractor system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1990, 21(3): 17 ~ 22. (in Chinese)
- 11 顾基发, 汪浣尘, 唐锡晋, 等. 综合集成方法体系与系统学研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- 12 程叶青, 李同升, 张平宇. SD 模型在区域可持续发展规划中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(12): 13 ~ 18.  
Cheng Yeqing, Li Tongsheng, Zhang Pingyu. Application of system dynamic model in regional sustainable development planning [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2004, 24(12): 13 ~ 18. (in Chinese)
- 13 刘爱民, 陈济勤, 万鹤群. 机械化农业系统的动力学分析及实例研究 [J]. 农业工程学报, 1994, 10(3): 10 ~ 15.  
Liu Aimin, Chen Jiqin, Wan Hequn. Dynamic analysis for mechanized agricultural system and example study [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1994, 10(3): 10 ~ 15. (in Chinese)
- 14 李纪岳, 陈志, 杨敏丽, 等. 基于农机农艺结合的玉米生产机械化系统研究 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 83 ~ 88.  
Li Jiyue, Chen Zhi, Yang Minli, et al. Mechanized corn production systems based on combination of machinery and agronomy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 83 ~ 88. (in Chinese)