

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.03.010

基于系统动力学的燃气发电企业 安全管理数学模型研究

高崇阳, 邵 辉

(常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:燃气发电是我国近年发展较快的产业,研究从设备设施、人行为、安全投入、管理以及环境 5 个方面探讨了影响燃气发电企业安全的主要因素,构建了燃气发电企业安全管理因果关系图、燃气发电企业的安全管理反馈关系图和流率流量图。将陕西某燃气发电厂的实际情况应用于 Vensim_PLE 软件进行系统动力学模拟,选取关键变量用 Spss 检验后,利用 Origin 拟合,并将拟合后的结果带入 EViews 回归计算,得到燃气发电企业安全管理的数学模型,创新企业安全管理的系统动力学研究思路。

关键词:安全管理; Vensim_PLE; 系统动力学; 回归计算; 数学模型

中图分类号:TK 8

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2018)03-0084-09

Study on Safety Management Mathematical Model of Gas Generation Enterprise Based on System Dynamics

GAO Chongyang, SHAO Hui

(School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Gas power generation is a rapidly growing industry in China. The main factors affecting gas power generation enterprises' safety are discussed from five aspects of equipment, facilities, human behavior, safety input, management and environment. The causality diagram of safety management, the feed back diagram and flow chart are constructed. The actual situation of a gas power plant is applied to Vensim_PLE software for system dynamics simulation. After selecting the key variables for Spss test, the origin fitting is used, and the results after fitting are brought into EViews for regression calculation, and a mathematical model for safety management of gas power plant is obtained, thus the system dynamics research ideas of enterprises' safety management are innovated.

Key words: safety management; vensim_PLE; system dynamic; regression calculation;

收稿日期:2018-03-25。

基金项目:安全工程江苏省品牌专业建设项目资助(PPZY2015B154)。

作者简介:高崇阳(1992—),男,江苏南京人,硕士生。通讯联系人:邵辉(1955—),E-mail:hshao@cczu.edu.cn

引用本文:高崇阳,邵辉. 基于系统动力学的燃气发电企业安全管理数学模型研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2018,30(3):84-92.

mathematical model

近年来燃气发电厂高速发展,安全管理研究滞后,如何进行燃气发电企业有效的安全管理是当前需要解决的重要问题。国内外对燃气发电企业的安全管理已有一定的研究,比如从人行为安全^[1]、安全效益^[2]、企业文化^[3]等。但大都只是基于某一安全管理因素的研究,然而燃气发电企业运行是复杂的串并联系统,需要从整体去考虑,系统动力学是将定性研究和定量分析相结合,对复杂系统进行长期的、动态的、战略性的研究方法。

系统动力学方法已被广泛用于各类问题研究,包括社会发展^[4-5]、能源规划^[6]、交通运输^[7]等领域。研究尝试将系统动力学方法应用于燃气发电企业的安全管理研究,通过系统动力学仿真软件 Vensim_PLE 模拟得出影响燃气发电企业安全管理的多因素动态反馈关系,得到其中各因素随时间的变化曲线,通过 EViews 软件的回归计算,得到计算燃气发电企业安全管理水平的系统动力学数学模型,为量化研究燃气发电企业安全管理提供了数学支撑,能够帮助燃气发电企业实现从事后查处的被动型安全管理转向事前预防的主动型安全管理。

1 影响燃气发电企业安全管理的因素分析

依据国家 2009 年发布的《生产过程危险和有害因素分类与代码》,有害因素分为 4 大类:人的因素、物的因素、管理因素和环境因素,同时考虑生产过程的安全投入^[8],结合燃气发电行业的实际情况,研究将从人行为、设备设施、环境、管理、安全投入 5 个方面应用系统动力学方法展开安全管理的相关因素分析。

实现有效的燃气发电企业安全管理^[9]需要诸多因素互相配合,其中,人行为是安全管理中最大的难点,人在进行安全管理的同时,也在约束着自身行为。人行为受到员工安全素质、工作经验、技术素质和文化素质等方面的影响,共同构筑了企业的安全文化。设备设施系统是燃气发电企业的“骨架”,设备设施的是否正常运作直接影响燃气发电企业的效率与安全。环境系统对燃气发电企业影响是复杂的,包括企业自身环境、自然环境、社会环境等。管理是保证各个因素在限度内发挥最大作用的“融合剂”和“催化剂”,安全投入是燃气发电企业安全的基本保障条件,其对安全的影响具有间接性、潜在性与滞后性。安全投入间接通过人、机、环、管系统影响发电企业的安全。通过对 5 个子系统的分析,应用系统动力学方法确定其相互关联及影响的因果关系,5 个因素之间并不是单向作用,他们相互影响形成一个复杂系统,依此构建了企业安全影响因素关系图,如图 1 所示。

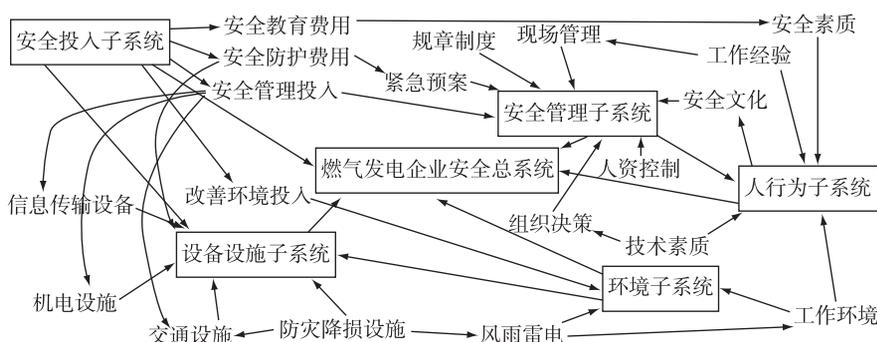


图 1 燃气发电企业安全管理因果关系图

由图 1 可见,5 个子系统共同构建了燃气发电企业安全总系统,这个系统必须满足企业发电量不断

增加的安全需求。在这一前提下,必须要首先确定安全投入,安全投入将对人员行为、设备状态、环境条件与管理水平产生影响,致使在安全生产过程中形成安全投入、人员行为、设备状态、环境条件与管理水平之间协同耦合的关联路径,可以用系统动力学的流率流量图来研究这种关联。在调研企业和咨询专家的基础上,对构建流率流量图提出如下假设:

假设 1:模拟期间,企业的安全管理是以时间为序列,以安全投入不断变化为基础,将企业安全投入、企业发电量、工作人员数量、安全教育投入和员工安全操作设备的适应度作为安全管理的主要因素

假设 2:电力市场需求影响因子、人员防护投入和电力市场经济指数等因素以不变常量的形式进入流率流量图中,其取值大小并不会影响仿真曲线的变化趋势,通过查阅文献[9-12]、企业数据及专家打分来确定比例和影响因子。

2 燃气发电企业安全管理的系统动力学研究

2.1 系统动力学简介

系统动力学^[13]是美国麻省理工大学的福瑞斯特(J. W. Forrester)教授 1956 年提出的分析研究系统动态复杂性的学科,它根据系统内部组成要素互为因果的反馈特点,从系统的内部结构来寻找问题发生的根源。

根据系统动力学的相关原理建立系统动力学模型,Vensim_PLE 是与系统动力学方法相匹配的软件,可以运用它进行系统结构模拟,从定性和定量的角度分析各类系统,定性分析主要是建立反馈关系图,根据反馈关系图建立存量流量图,该图描述了系统结构的数学或逻辑关系,其内置的各种函数可以对该图进行定量分析,系统动力学方法不仅在处理非线性、多重反馈控制等特点的复杂问题有良好的效用,还可以对各种影响因素未来发展的趋势进行预测。

2.2 燃气发电企业安全管理因素反馈关系图

图 1 已经阐述了影响燃气发电企业安全的各种因素,归纳总结了各因素之间相互约束、相互作用的关系,以安全投入为主线,以其他 4 个方面的影响因素为节点,确定人行为事故概率、设备事故概率和环境事故概率,得到企业事故概率值,最终形成了各因素的相互影响的关系,在此基础上构建了燃气发电企业安全管理因素反馈关系图,如图 2 所示。

图中,“+”表示因果关系极性为正,“-”表示因果关系极性为负,“||”表示过程中具有延迟效应,正负反馈环较多且相互联系紧密,系统动力学约定反馈环的极性为各个因果关系极性的乘积,形成 34 个反馈环,其中的主要反馈环有:企业安全投入经过安全效益、企业综合效益和生产效益等再到企业安全投入形成的反馈环;企业安全投入经过设备防护与更新投入、人员防护投入、管理投入、改善环境投入和员工安全教育投入再到企业安全投入形成的反馈环。

2.3 燃气发电企业安全管理因素流率流量图

图 1 和图 2 处于系统动力学仿真的前、中阶段,并不能清晰准确地得出管理控制的效果,应该对变量的种类进行辨别,需要借鉴变量在实际控制中产生的效果,增加辅助变量。研究在咨询专家并查阅文献的基础上,系统选取了企业发电量,工作人员数量,安全教育投入和企业安全投入作为安全管理的状态变量,选取了企业发电增加量,安全投入使用额、员工新增率、安全教育投入使用额等作速率变量,此外还选取了各种投入比例和影响因子作为辅助变量,由此建立燃气发电企业安全管理因素流率流量图。其中状态变量 4 个,速率变量 8 个,辅助变量 22 个,常量 12 个,如图 3 所示。

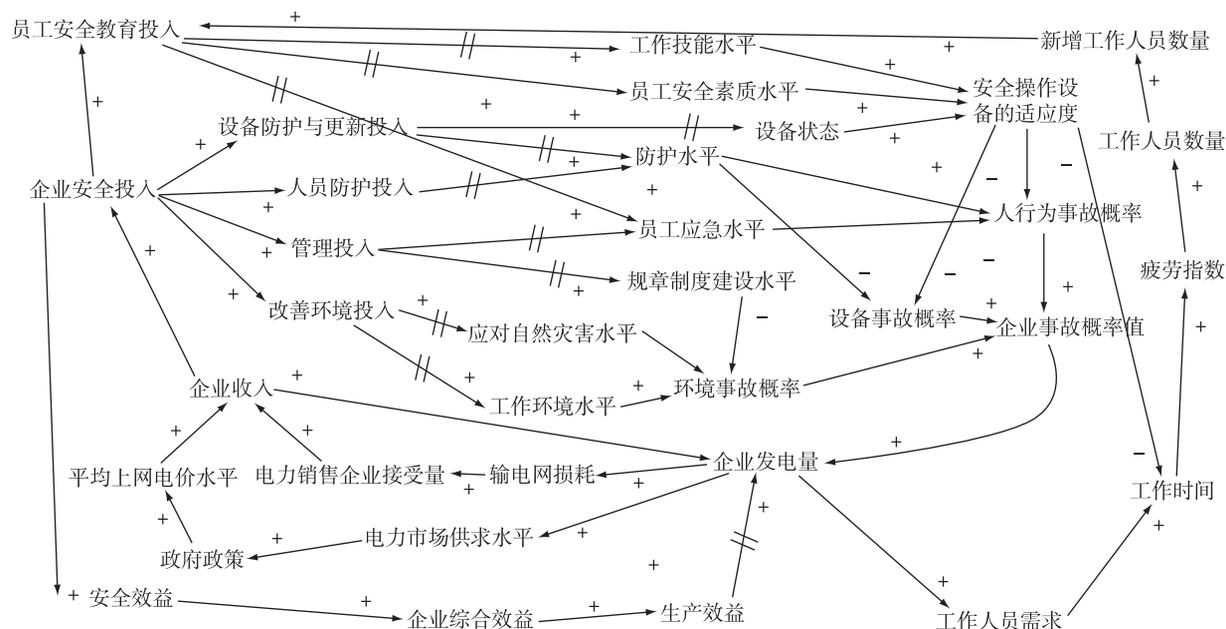


图2 燃气发电企业安全管理因素反馈关系图

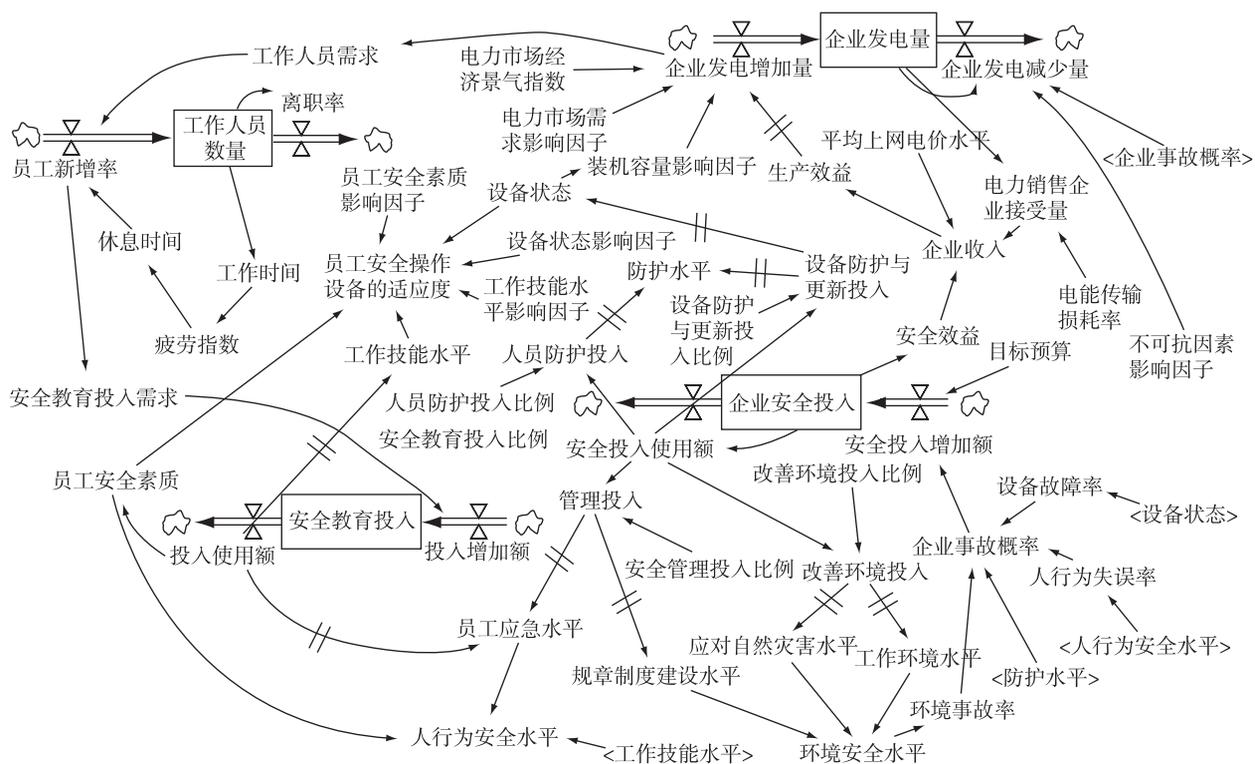


图3 燃气发电企业安全管理因素流率流量图

2.4 变量间函数关系和参数值的确定

各种变量的函数关系主要有两类,分别是线性关系和非线性关系,主要通过文献[8,14]和专家咨询进行确定,也可以根据企业具体实际情况总结出来,用表函数来表示,如人行为事故率随员工行为水平的变化而选取不同的值。延迟作用主要用 DELAY 函数来表示,如规章制度建设水平的提高在管理投入前期并不明显,中后期越来越显著。有一些参数值是固定的,如安全管理投入比例,可通过层次分析法确定。部分参数值由企业的实际情况而定,具体见表 1。

表 1 部分主要变量及函数关系

子系统	变量名	变量表达式
管理和投入子系统	企业安全投入/万元	INTEG(安全投入增加额-安全投入使用额,初始值)
	目标预算/万元	RANDOM NORMAL(最小值,最大值,期望,方差,随机序列数)
	安全投入增加额/万元	目标预算×(企业事故概率+1)
	安全教育投入/万元	企业安全投入×员工安全教育投入比例
	安全效益/万元	$1 - (\ln(8/\text{企业安全投入}))/1$
	规章制度建设水平	DELAY1(待延迟变量,延迟时间)
	企业收入/万元	平均电价水平×电力销售企业接受量×安全效益
	企业事故概率	$(1 - (1 - \text{人行为失误率}) \times (1 - \text{环境事故率}) \times (1 - \text{设备故障率})) \times (1/\text{防护水平})$
人行为子系统	人行为水平	员工安全素质+员工应急水平+工作技能水平
	工作人员数量/人	INTEG(员工新增率-离职率,初始值)
	员工新增率/(人/月)	$(1 + 1/\text{工作人员需求}) \times (1 + 1/\text{EXP}(\text{休息时间}))$
	员工安全操作设备的适应度	员工安全素质×员工安全素质影响因子+工作技能水平×工作技能水平影响因子+设备状态×设备状态影响因子
	工作时间/h	DELAY3I(待延迟变量,延迟时间,初值)×员工安全操作设备的适应度
	疲劳指数	$1.1 \times \text{工作时间}$
	人行为事故概率	WITH LOOKUP(人行为水平,表函数)
设备设施和环境子系统	企业发电量/(万 kW·h)	INTEG(企业发电增加量-企业发电减少量,初始值)
	企业发电减少量/(万 kW·h)	EXP(企业事故概率)×不可抗因素影响因子×企业发电量
	企业发电增加量/(万 kW·h)	DELAY1(待延迟变量,延迟时间)×电力市场需求影响因子×电力市场经济景气指数×装机容量影响因子/1 000
	设备状态	DELAY1(待延迟变量,延迟时间)
	装机容量影响因子	RANDOM NORMAL(最小值,最大值,期望,方差,随机序列数)
	设备故障率	WITH LOOKUP(设备状态,表函数)
	环境安全水平	工作环境水平+应对自然灾害水平+规章制度建设水平
	环境事故概率	WITH LOOKUP(环境安全水平,表函数)
	企业事故概率	$(1 - (1 - \text{人行为失误率}) \times (1 - \text{环境事故率}) \times (1 - \text{设备故障率})) \times (1/\text{防护水平})$

3 构建燃气发电企业安全管理系统动力学数学模型

安全管理系统动力学数学模型主要是根据图 3 对以安全管理水平为因变量进行数学建模,首先选择图 3 中的状态变量或者关键的节点变量作为安全管理水平数学模型的自变量,对它们的变化曲线进行标准化处理,选择的变量之间必须不存在相关性,即回归分析中不存在多重共线性,满足回归分析的要求。利用 Origin 进行非线性拟合,拟合度^[15] R^2 应超过 0.8,对拟合后的曲线用 Spss 软件检验效率和

信度后,带入 EViews 软件进行多元非线性回归计算,最后建立燃气发电企业安全管理水平的数学模型,其中,企业安全管理水平可以由企业安全度(1-企业事故概率)来表示, x 表示时间, $P(x)$ 是人为要素,是工作人员数量、工作时间、员工操作设备的适应度等的综合作用的因素。 $T(x)$ 是设备设施要素,是企业发电量、设备状态、装机容量影响因子等综合作用的要素。 $E(x)$ 是环境要素,是应对自然灾害水平、工作环境、规章制度建设水平等综合作用的要素。 $M(x)$ 是管理要素,是员工应急水平、员工安全素质等综合作用的要素。 $I(x)$ 是安全投入要素,是企业安全教育投入、人员防护投入等综合作用的要素。使用系统动力学数学模型的表达式,确定哪部分对系统安全影响程度高,以此改进,来提高企业的安全管理水平。

4 实证模拟

4.1 模型中主要常量和变量初始值的确定

以陕西某燃气发电厂为研究对象,该厂 $2 \times 50\text{MW}$ 二期发电机组于 2013 年 8 月投入并网销售,经查询,2017 年第 1 个月发电量约为 $1 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,该发电机组普通工作人员人数截至 2016 年底约为 300 人,以该发电厂 2017 年初期数据带入表 1 中,得到数值如表 2 所示,在此情景下对接下来 18 个月发生的情况进行模拟,模型初始参数设置为:Initial Time=0, Final Time=18, Time Step=0.5, Unit: Month。

4.2 系统动力学流率流量图的检验

系统动力学流率流量图检验^[17]主要包括量纲一致性测试、结构评价测试。通过 Vensim 中的“Units check”功能对各表达式的量纲进行检验,本模型已通过检验。结构评价测试包括反馈环所表示的因果关系的合理性,每个变量和方程式是否具有明确的含义,将企业安全投入分别设置为 6,9,12 万元,结果显示企业事故概率出现明显下降情况,如图 4 所示,企业发电量出现明显上升,如图 5 所示,与理论分析相符,故通过检验。

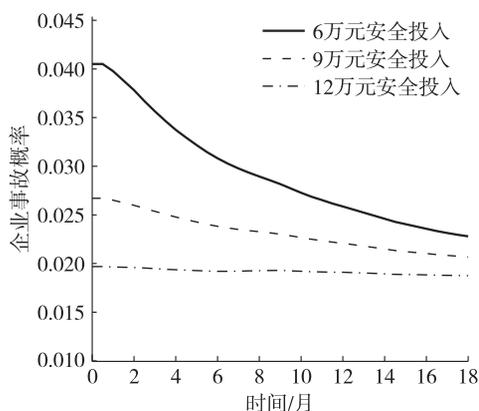


图 4 不同安全投入下的企业事故概率

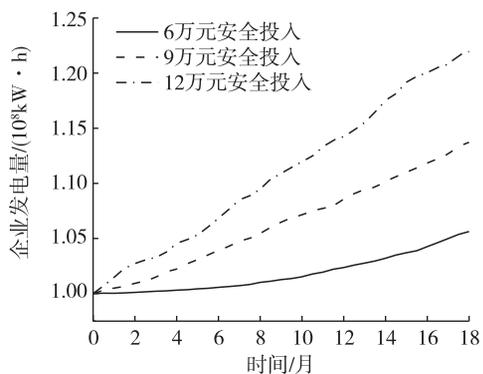


图 5 不同安全投入的企业发电量

4.3 燃气发电企业安全管理数学建模

企业安全度: $Y=F(P(x), T(x), E(x), M(x), I(x))$, x 表示月。 $P(x)$ 由工作人员数量表示, $T(x)$ 由企业发电量表示, $E(x)$ 由环境安全水平表示, $M(x)$ 由员工应急水平($\alpha(x)$)和员工安全素质(β)

(x)表示, $I(x)$ 由企业安全投入表示,先进行标准化处理,如图 6 所示。

表 2 模型中主要常量和变量初始值

名称	性质	数值	来源
企业安全投入初始值/万元	状态变量	9	企业数据
规章制度建设水平	辅助变量	DELAY1(管理投入 $\times 0.5, 18$)	专家意见
目标预算/万元	辅助变量	RANDOM NORMAL(9, 15, 12, 1, 200)	企业数据
工作时间/h	辅助变量	DELAY3I(12, 18, 工作人员数量/50) \times 员工安全操作设备的适应度	企业数据
工作人员数量/人	状态变量	300	企业数据
企业发电量/(10^4 kW·h)	状态变量	10 000	企业数据
人为事故概率	辅助变量	WITH LOOKUP(人为行为水平, [(0,0)-(100,0.0013)], (0,0.05),(30,0.026), (80,0.015),(100,0.013))	企业数据
装机容量影响因子	辅助变量	RANDOM NORMAL (0.23, 设备状态, 0.28, 2, 4)	企业数据
设备故障率	辅助变量	WITH LOOKUP(设备状态, [(0,0)-(40,0.0015)],(0,0.005), (10,0.004),(20,0.0035),(40,0.0015))	企业数据
环境事故概率	辅助变量	WITH LOOKUP(环境安全水平, [(0,0)-(40,0.00086)],(0,0.002), (10,0.0009),(20,0.00089),(40,0.00086))	企业数据
设备防护与更新投入比例	常量	0.15	AHP 分析法
人员防护投入	常量	0.09	AHP 分析法
管理投入	常量	0.45	AHP 分析法
改善环境投入	常量	0.06	AHP 分析法
安全教育投入	常量	0.25	AHP 分析法
设备状态影响因子	常量	0.35	AHP 分析法
员工安全素质影响因子	常量	0.40	AHP 分析法
工作技能水平影响因子	常量	0.25	AHP 分析法
离职率	流率变量	8.2%	前程无忧 2016 年中国国有企业 员工离职率调查报告
电力经济景气指数	常量	98	2016 中国电力年鉴
电力市场需求影响因子	常量	1.2	2016 中国电力年鉴
平均上网电价/(元/(kW·h))	常量	0.67	政府官方数据
传输损耗率	常量	0.05	文献[16]
企业安全投入初值/(万元/月)	常量	9	企业数据
不可抗因素影响因子	常量	0.0005	专家意见

上述是各类影响因素的标准化曲线,以企业安全度为例进行分析,先进行企业安全度的非线性拟合,如图 7 所示。

得到 $Y = 1.595 - 1.666e^{-\frac{x}{16.79}}$, 拟合度 $R^2 = 0.9957$ 。易得企业安全度在安全投入初期阶段会有一些的滞后性,之后会随着安全投入的不断持续,企业安全度会有显著提高,但到了安全投入的后期,企业安全度变化趋势又会变缓,符合一般企业安全度变化规律,同理,其他曲线拟合见表 3。

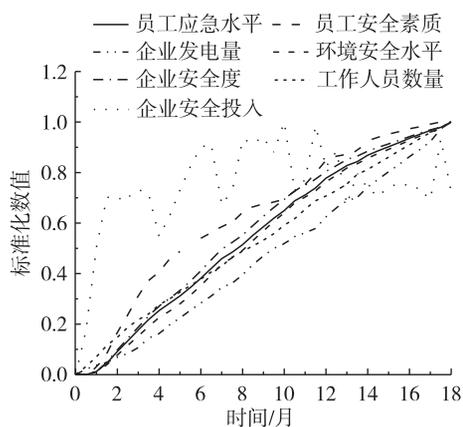


图 6 安全影响因素标准化曲线

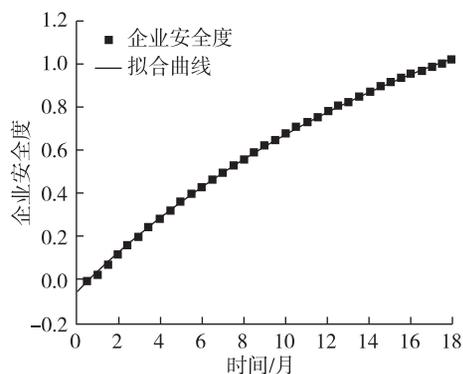


图 7 企业安全投入拟合曲线

利用 Spss 软件进行因子的信度和效度检验, Cronbach 的 Alpha 值是 0.983, 大于 0.8, 表明信度较好, KMO 检验值是 0.700, 大于 0.5, Barlett 显著性是 0.000, 符合要求, 信度和效度检验均有效, 可以用 EViews 软件^[18]进行非线性回归计算, 可得到燃气发电企业安全管理的系统动力学数学模型为 $Y = (0.0935 \times \beta(x) -$

$0.0628 \times \alpha(x)) - 0.0956 \times P(x) + 0.3657 \times T(x) + 0.1766 \times E(x) + 0.5175 \times I(x)$ 。由模型可知, 在不改变实际参数直接输出连续月份可以得到接下来企业安全度的变化趋势, 而员工应急水平和工作人员数量对企业安全度的影响是反向, 应重视这 $P(x)$ 和 $\alpha(x)$ 代表的变量, 比如降低工作人员数量, 提高员工应急水平, 对变量代表的影响因素在合理范围内进行调整, 使对企业安全度影响降至最低。

5 结 论

1) 以安全投入为主线, 改进了研究安全管理的角度, 利用系统动力学方法从人、机、环、管、投入对燃气发电企业安全管理进行了分析, 通过实验验证发现该方法既可以分析影响安全管理的因素, 又可以对企业内许多因素发展趋势进行预测。

2) 将回归分析融入系统动力学研究中, 构建了燃气发电企业安全管理的系统动力学数学模型, 确立了安全投入、人员行为、设备状态、环境条件与管理水平之间协同耦合的关联路径。通过对模型内因素值的调整, 可以有效地提高并预测企业安全管理水平发展趋势, 为安全管理的量化研究拓展思路。但在实际应用时, 由于各因素两两关系互相影响, 如何达到影响效应的杠杆解有待进一步探讨。同时, 变量的调整范围还有待探讨。

参考文献:

[1] 吴声声. 电力企业人因安全的研究与应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
 [2] 卫伟. 供电企业安全投入产出模型与应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.

表 3 变量函数表达式

变量名称	函数名称	函数关系	拟合度 R^2
工作人员数量	$P(x)$	$3.80742 - 3.7909e^{-0.01674x}$	0.9991
企业发电量	$T(x)$	$-3.09828 + 3.07576e^{0.01589x}$	0.9986
环境安全水平	$E(x)$	$2.27409 - 2.34144e^{-0.03499x}$	0.9953
员工应急水平	$\alpha(x)$	$0.01181 + 0.05976x$	0.9857
员工安全素质	$\beta(x)$	$1.22413 - 1.2614e^{-0.09781x}$	0.9912
企业安全投入	$I(x)$	$0.80248 \frac{x^{1.99246}}{0.66523 + x^{1.99246}}$	0.9099

- [3]李巍.建设发电企业本质安全体系[J].中国电力企业管理,2012,5(16):56-57.
- [4]GVANENDRA S S, MRIDULA S, PRAGYA S. System dynamics methodology for the energy demand fulfillment in India: a preliminary study[J]. Energy Procedia, 2016(95):429-434.
- [5]SONDOSS E, SUZANNE A, SERENA H, et al. An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: lessons on good modelling practice from five case studies[J]. Environmental Modelling & Software, 2017(93):127-145.
- [6]LIU X M, ZENG M. Renewable energy investment risk evaluation model based on system dynamics[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017(73):782-788.
- [7]王睿, 雒兴刚, 李延来, 等. 高速铁路车站安全管理的系统动力学仿真研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(3):91-97.
- [8]张杰, 苗金明, 周心权, 等. 安全生产效益的分析评价及其与安全投入的关系[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(3):49-54.
- [9]宋国斌. 燃气发电企业安全性评价管理[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [10]何刚. 煤矿安全影响因子的系统分析及其系统动力学仿真研究[D]. 芜湖: 安徽理工大学, 2009.
- [11]王永刚, 耿浩. 基于系统动力学的民航安全监管能力建设研究[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(1):158-162.
- [12]徐永常. 浅析输配电系统电能损耗分配办法[J]. 科技与企业, 2013(18):151.
- [13]FORRESTER J W. Industrial dynamics: a breakthrough for decision maker[J]. Harvard Business Review, 1958, 36(4):37-66.
- [14]施庆伟, 庞永师, 蒋雨含. 基于系统动力学和 BIM 的建筑施工安全风险预警决策模型仿真[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(2):83-89.
- [15]吴汪友, 孙秋高. 曲线拟合度分析法在公路货运回归预测中的应用[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2011, 29(1):49-52, 58.
- [16]安藤延夫, 蒋纪洪. 降低电力电缆传输损耗的新技术[J]. 电线电缆, 1983(6):16-20.
- [17]钟永光, 贾晓菁, 钱颖, 等. 系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18]何晖, 蔡光宗, 田羽. 全寿命设备管理的回归分析及应用[J]. 电力与能源, 2012, 33(2):124-126, 129.

(责任编辑:殷丽莉)