

# 基于系统动力学的风力机备件需求预测研究

胡 迪<sup>1</sup>, 高庆水<sup>2</sup>, 张 楚<sup>2</sup>, 杨 涛<sup>1</sup>, 高 伟<sup>1</sup>, 邓小文<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080)

**摘 要:** 考虑到服役时间、备件寿命、维修策略及环境4种因素对备件需求发生的影响,利用系统动力学建立风力机备件需求预测模型。模型主要由服役时间仿真模块、备件可靠度和故障率仿真模块及维修方式仿真模块组成。仿真结果表明:该模型能体现出风力机备件需求的特点,同时在边界条件内预测需求发生时刻,为备件管理者提供备货信息。

**关键词:** 风力机; 备件; 需求预测; 系统动力学

**中图分类号:** TK83

**文献标识码:** A

## 0 引 言

研究表明,风电场风力机组运行可靠性和收益很大程度上受到备件服务水平的影响<sup>[1]</sup>。因风力机备件种类和数量多等特点,使得风电场备件的管理难度较大。如果备件的需求量能够预测,风电场备件管理者便可有目的进行备件储备,在提高备件服务水平的同时减少资金占用量。特别是风力机的某些关键部件,其需求形式常表现为间断需求<sup>[2,3]</sup>,如减速电机、联轴器、齿轮箱等。

目前采用的研究间断需求预测的方法主要有以下2种: Croston法和Bootstrap法。Croston法<sup>[4]</sup>采用指数平滑法对需求量和需求间隔分别进行预测。Johnston等<sup>[5]</sup>提出当需求间隔大于1.25时, Croston法比指数加权移动平均法更准确。Segerstedt等<sup>[6]</sup>提出在对需求量进行平滑时,将需求间隔长短考虑进去。Bootstrap法<sup>[7]</sup>是从历史需求数据中抽样来产生虚拟数据,可预测已在历史数据中出现的需求量。Snyder等<sup>[8]</sup>针对间断需求量在固定水平波动,需求间隔递减的情况,发展了一种同时适用于连续需求和间断需求的预测方法。Willemain等<sup>[9]</sup>将Bootstrap法Markov过程结合具有较好预测效果。国内学者也做了不少研究,如赵建忠等<sup>[10]</sup>在导弹备件间断需求预测的研究中提出基于Logistics回归、Markov过程和改进灰自助法

的组合预测模型,该模型有效降低了预测误差。陈琳等<sup>[11]</sup>运用神经网络对需求时间的0-1序列预测,然后利用时间聚合方法对实际备件需求时间序列预测,解聚合后得到备件需求预测值。

传统预测方法一般均基于时间序列,运用统计技术进行预测。一方面,时间序列只是影响需求发生的因素之一;另一方面,在缺乏历史需求数据情况下,这些方法难以满足实际应用。杨杰等<sup>[12]</sup>提出结合直接影响需求发生的因素来预测。

本文运用系统动力学将影响需求发生的因素结合起来建立因果关系模型。以风力机齿轮箱为例,考虑服役时间、备件寿命、维修策略以及环境4种因素,并以服役时间为状态变量建立模型反馈回路,需求发生通过更换维修来体现,建立风力机备件需求预测模型。

## 1 基本原理

### 1.1 系统动力学原理

系统动力学(system dynamic, SD)是系统科学理论与计算机仿真技术紧密结合、研究系统反馈结构与行为的一门科学,是系统科学和管理科学的一个重要分支<sup>[13]</sup>。系统行为模式与特征主要取决于其内部结构,即整个系统内部各变量之间反馈关系。因果关系图和存量流量图是系统动力学建模

的主要工具,如图1所示。变量之间用带方向的箭头连接表示它们之间的因果关系,存量流量图是在因果关系图的基础上定义了变量之间的数学表达。所以系统动力学方法是一种定性与定量结合,系统综合推理的方法。

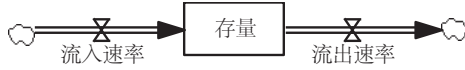


图1 存量流量图

Fig. 1 Stock flow diagram

存量流量图中主要变量有:存量(状态变量)、流量(速率变量)、辅助变量、常量。其中存量和流量是系统动力学流图中不可缺少的变量。存量是累计量,它表示系统状态,并为决策和行为提供信息基础,而存量的变化由且仅由流量引起<sup>[13]</sup>。

$$Stock(t) = \int_{t_0}^t [Inflow(s) - Outflow(s)] ds + Stock(t_0) \quad (1)$$

式中,  $Stock(t)$  ——  $t$  时刻存量的数量;  $Inflow(s)$  —— 流入量;  $Outflow(s)$  —— 流出量。

在系统动力学模型中,状态变量个数表示系统模型阶次。确定系统边界是建模的基础,在建立系统动力学模型的基础上,观察系统动态行为特征,可以预测系统未来时刻的状态。同时系统动力学可以定性分析某种因素对整体系统的影响,通过参数优化、敏感性分析来优化系统结构和功能。

## 1.2 建模基本原理

首先确定系统边界,将影响需求发生的因素分为服役时间、备件寿命、维修策略和环境。服役时间是指备件持续工作时间;备件寿命是指备件在全生命周期内故障率和可靠度情况;维修策略是指风力机全寿命周期内维修过程;环境是指风力机运行环境对备件服役时间的影响,用环境因子表示。

假设风力机备件寿命服从某种分布,其可靠度和故障率表示为备件服役时间的函数。如图2所示,在维修策略下,通过备件可靠度和故障率函数得到备件的维修情况。一方面,备件的更换维修是

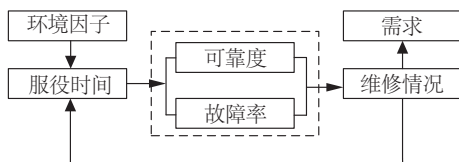


图2 备件需求预测反馈原理

Fig. 2 Feedback principle of forecasting in spare part

需求的来源;另一方面,备件不同维修情况会产生不同的维修效果。维修效果反馈到备件服役时间,表现为服役时间变为零、减小、不变<sup>[14]</sup>。备件服役时间的动态循环过程,具有十分明显的反馈特性。

由于备件需求预测系统具备反馈特征,因此若给定  $t=t_0$  时刻系统的状态,同时已知  $t \geq t_0$  时系统的输入或扰动,那么系统在  $t > t_0$  的任意时刻的状态就确定了。用  $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_i]^T$  表示系统状态向量,  $U = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_m]^T$  表示系统扰动向量,  $Y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_k]^T$  表示系统输出向量。则该特征可用方程组(5)表示:

$$\begin{cases} X = f(Y, U, t), & Y \in R^k, U \in R^m \\ Y = g(X, U, t), & X \in R^i \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $R$  —— 实数系,  $f, g$  —— 函数关系;上标  $k, m, i$  分别表示系统输出、扰动、状态的维度。

将维修结果分为不维修、小限度维修、不完全维修和更换维修4种。备件服役时间在上述4种维修方式影响下的数学描述可表示为:

$$\begin{cases} t_{i+1} = t_i & \text{不维修} \\ t_{i+1} = t_i & \text{小限度维修} \\ t_{i+1} = t_i - t_{\text{-new}} & \text{不完全维修} \\ t_{i+1} = 0 & \text{更换维修} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $t_i$  —— 设备停机时的服役时间;  $t_{i+1}$  —— 设备经过维修后的实际服役时间;  $t_{\text{-new}}$  —— 设备不完全维修后的恢复程度。

对于  $t_{\text{-new}}$  的描述,考虑到备件的服役时间、预防维修成本、更换成本、调整系数( $a, b$ )和学习效应调整系数  $c$  等因素,选择卓明良等<sup>[14]</sup>的改善因子模型。

$$\begin{cases} \xi_i = \left( a \cdot \frac{C_{\text{pm}}}{C_{\text{pr}}} \right)^{b \cdot i \cdot c} \\ t_{\text{-new}} = t_i \cdot \xi_i \quad (0 < \xi_i < 1) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $C_{\text{pr}}$  —— 更换成本;  $C_{\text{pm}}$  —— 预防维护成本,  $0 \leq C_{\text{pm}} \leq C_{\text{pr}}$ ;  $a$  —— 成本调节系数;  $b$  —— 时间调节系数;  $c$  —— 学习效应调节系数,根据经验取值为  $c = \ln 0.9 / \ln 2$ 。

## 2 基于SD的备件需求预测模型

### 2.1 建模流程

以风力机齿轮箱为例,为使模型容易理解和操

作,本文做出以下假设:

- 1) 齿轮箱寿命服从双参数威布尔分布;
- 2) 维修策略采用周期性预防维修;
- 3) 维修为立即维修,不考虑维修时间;
- 4) 环境因子为大于 1 的常数;
- 5) 仿真时长取风力机运行年限 20 a,仿真步长为 1 d。

以备件服役时间为状态变量,整个建模过程分为 3 部分:备件服役时间建模、备件可靠度和故障率建模、备件维修情况建模。其中,备件可靠度建模必须依赖备件服役时间的数学描述,备件维修情况建模必须依托备件可靠度和故障率函数,备件服役时间的数学描述又与备件维修情况相关。它们之间的反馈回路构成了系统动力学建模的基础。建模流程如图 3 所示。

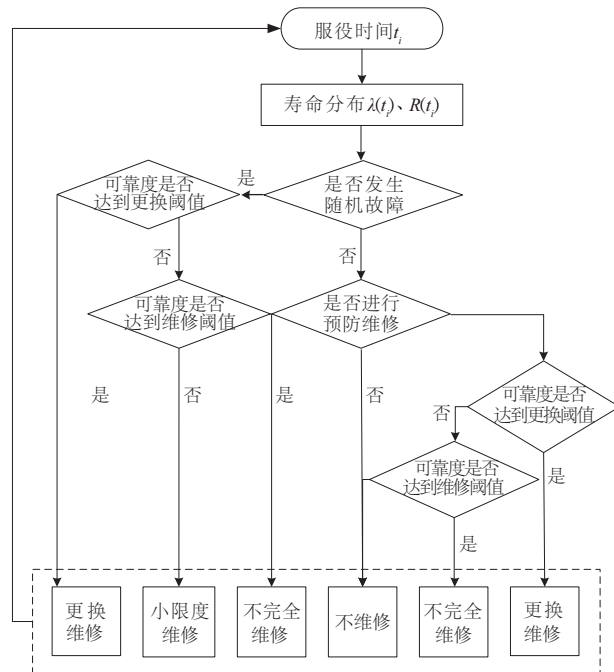


图 3 备件需求预测建模流程

Fig. 3 Modeling process of forecasting in spare part

在可靠度和故障率函数的基础上,通过设定预防维修周期、更换阈值、维修阈值来判断备件的维修情况。利用(0,1)之间均匀分布随机数和故障率函数表示随机故障是否发生;若发生随机故障,判断备件当前可靠度是否达到更换阈值,进行更换维修,否则进一步判断是否达到维修阈值,进行不完全维修,否则进行小限度维修;若不发生随机故障,判断备件是否进行预防维修,判断设备当前可靠度

是否达到更换阈值,进行更换维修,否则进一步判断是否达到维修阈值,进行不完全维修,否则不维修。维修情况一方面通过更换维修来反映备件需求情况,另一方面反馈到备件服役时间。

## 2.2 系统SD仿真模型

在 Vensim 软件中建立风力机备件需求预测 SD 仿真模型如图 4 所示。相关变量说明如表 1 所示。

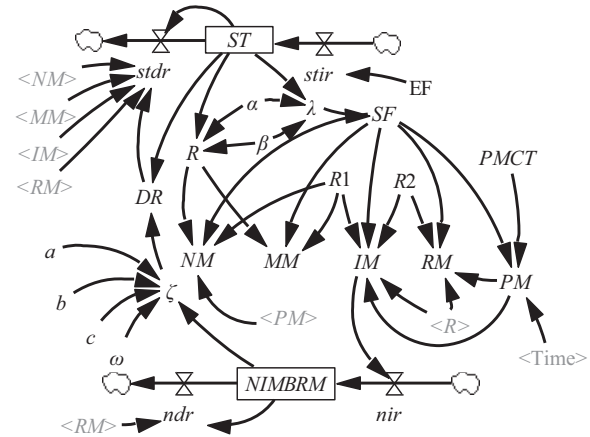


图 4 齿轮箱需求预测 SD 仿真模型

Fig. 4 SD simulation model of gear box demand forecasting

## 2.3 系统SD仿真模型结构分析

### 1) 备件服役时间仿真模块

在系统 SD 仿真模型中,服役时间为状态变量,表现为输入增加量和输出减小量之差随仿真时间的累计。服役时间通过可靠度、故障率函数以及维修策略影响备件维修方式,不同的维修方式对设备改善效果又通过服役时间减小量来反馈给服役时间,所以服役时间减小量是各种维修方式的函数。而服役时间增加量表现为仿真步长(Time step=1)乘以环境因子。主要表达式有:

$$\begin{cases} L & ST = dt(stir - stdr) + \text{random uniform}(0, 1000, 200) \\ R & stir = \text{Time step} \cdot EF \\ R & stdr = \text{IF THEN ELSE}(RM = 1, ST, A) \end{cases}$$

式中,  $A = \text{IF THEN ELSE}(MM = 1 : OR : NM = 1, 0, B)$   
 $B = \text{IF THEN ELSE}(IM = 1, DR, 0)$

### 2) 备件可靠度和故障率仿真模块

根据备件寿命服从双参数威布尔分布的假设,备件可靠度和故障率特征表现为,随备件服役时间动态变化的函数。故障率是判断设备是否发生随机故障的依据,可靠度决定了设备停机时的维修方式。主要表达式有:

表1 风力机需求预测SD仿真模型变量说明

Table 1 Variable description of wind turbine demand forecast SD simulation model

变量代码	变量性质	变量说明
<i>ST</i>	<i>L</i>	备件服役时间
<i>NIMBRM</i>	<i>L</i>	备件更换维修前不完全维修次数
<i>stir</i>	<i>R</i>	备件服役时间随运行时间增加量
<i>stdr</i>	<i>R</i>	备件服役时间随运行时间减小量
<i>nir</i>	<i>R</i>	备件更换维修前不完全维修次数随运行时间增加量
<i>ndr</i>	<i>R</i>	备件更换维修前不完全维修次数随运行时间减小量
<i>R</i>	<i>A</i>	备件可靠度函数
$\lambda$	<i>A</i>	备件故障率函数
<i>SF</i>	<i>A</i>	运行过程中随机故障发生情况
<i>PM</i>	<i>A</i>	运行过程中进行周期性预防维修情况
<i>NM</i>	<i>A</i>	运行过程中不维修情况
<i>MM</i>	<i>A</i>	运行过程中小限度维修情况
<i>IM</i>	<i>A</i>	运行过程中不完全维修情况
<i>RM</i>	<i>A</i>	运行过程中更换维修情况
$\zeta$	<i>A</i>	备件不完全维修改善因子
<i>DR</i>	<i>A</i>	备件不完全维修后的恢复程度 $t_{\text{new}}$
$\alpha$	<i>C</i>	尺度参数,风力机齿轮箱取值为2400
$\beta$	<i>C</i>	形状参数,风力机齿轮箱取值为4
<i>a</i>	<i>C</i>	成本调节系数,取值为1
<i>b</i>	<i>C</i>	时间调节系数,取值为0.1
<i>c</i>	<i>C</i>	学习效应调节系数,取值为 $\ln 0.9/\ln 2$
$\omega$	<i>C</i>	故障调节系数,取值为4
<i>PMCT</i>	<i>C</i>	设定预防维修周期,取值为180 d
<i>R1</i>	<i>C</i>	设定维修阈值,取值为0.95
<i>R2</i>	<i>C</i>	设定更换阈值,取值为0.9
<i>EF</i>	<i>C</i>	环境因子,取值大于1

注：*L*—状态变量；*R*—速率变量；*A*—辅助变量；*C*—常量。

$$\begin{cases} A & \lambda = \beta/\alpha \cdot (ST/\alpha)^{(\beta-1)} \\ A & R = \exp(-(ST/\alpha)^\beta) \end{cases} \quad (6)$$

### 3) 备件维修方式仿真模块

备件维修方式由备件可靠度、故障率和维修策略共同决定。模型中维修方式分为：不维修、小限度维修、不完全维修和更换维修4种。维修结果通过服役时间减小量反馈给服役时间，同时根据更换维修来表示需求情况。主要表达式有：

$$\begin{cases} A & MM = \text{IF THEN ELSE}((SF=1 : \text{AND} : R > R1), 1, 0) \\ A & IM = \text{IF THEN ELSE}(D : \text{ORE} , 1, 0) \\ A & RM = \text{IF THEN ELSE}(F, 1, 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $C=(SF=0:\text{AND}:PM=0):\text{OR}:(PM=1:\text{AND}:R>R1)$

$D=(SF=1:\text{AND}:R2<R:\text{AND}:R<R1)$

$E=(PM=1:\text{AND}:R2<R:\text{AND}:R<R1)$

$F=(SF=1:\text{AND}:R<R2):\text{OR}:(PM=1:\text{AND}:R<R2)$



上述 3 个模块将影响需求发生的环境、服役时间、备件寿命以及维修策略 4 个因素结合起来,构成风力机备件需求预测 SD 仿真模型的基本反馈结构。正是有了这种反馈控制,系统行为在整个仿真时长上呈现出动态特征,可根据仿真目的存取研究需要的目标量。单独的模块可以根据实际研究问题进行参数调节,比如改变备件寿命分布函数和维修策略等,但不改变模型本身的反馈结构,这说明模型具有良好的分解性和集合性。

### 3 仿真分析

模型中影响需求发生的四种因素中,环境是最难准确描述的。为了研究方便,将其简化为常量系数,即在备件理论服役时间增加量的基础上乘以大于 1 的常数来表示实际服役时间增加量。模型中设定了 3 种情景,如表 2 所示。一方面通过仿真结果检验模型可信度,另一方面研究环境因素对需求发生的影响。

表 2 情景设定

Table 2 Scenario settings

情景	情景 1	情景 2	情景 3
环境因子值	1.25	1.5	1.75

在 Vensim 软件中运行模型,利用 Graph 功能可以展示出各个变量在仿真时长上的变化情况,也可以导出运行结果数据文件。备件服役时间作为模型中的状态变量,由备件服役时间仿真模块可知,更换维修和不完全维修会改变备件役龄变化趋势。因此,通过备件服役时间的仿真结果可以得到备件更换维修和不完全维修情况,如图 5 所示。当然,也可以利用 Vensim 软件自行导出更换维修情况。由备件服役时间仿真模块知,备件初始役龄是 0~1000 d 之间的随机数。从图 5 可看出仿真初始时刻备件役龄为 652 d。通过备件服役时间突变点能获取更换维修发生时刻。在 3 种情景下,备件维修情况均表现出发生多次不完全维修后,发生一次完全维修规律;随着环境愈发恶劣,更换维修次数在风力机运行年限内呈增加趋势,而不完全维修情况相反。这种趋势符合风力机在周期性预防维修策略下,运行年限内备件服役时间变化情况。

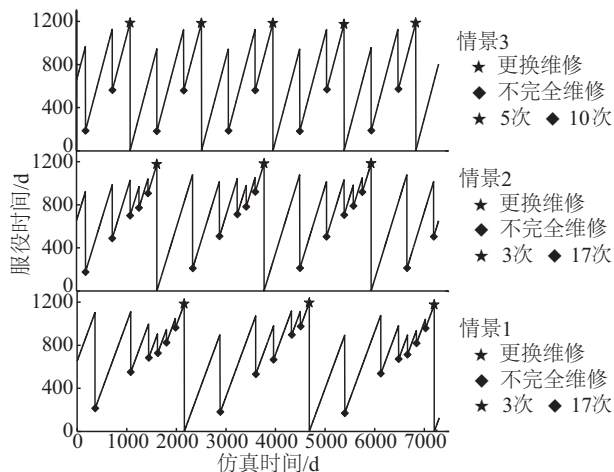


图 5 备件服役时间仿真

Fig. 5 Simulation of service time of spare parts

从图 5 可看出,备件役龄似乎呈现出一种周期性变化,原因主要有 2 点:1)模型中仅考虑了齿轮箱引起的随机故障;对于齿轮箱这种关键部件,维修策略中更换阈值和维修阈值取值较高,所以仿真结果中随机故障发生概率很小。2)模型中未考虑随机故障、维修活动以及周期性检修的停机时间。

### 4 结论与讨论

系统动力学进行需求预测的特点是充分利用了影响需求发生的相关因素,而不仅仅考虑时间序列,理论上讲预测结果更准确。上文提出的基于系统动力学的风力机备件需求预测模型优点主要体现在:

1)影响需求发生的因素可以有不同描述。由仿真模型结构分析知,各模块可以根据研究问题调整参数,达到不同的研究目的。这也说明该仿真模型具有良好的集合性和分解性。

2)已知边界条件内能预测备件需求发生时刻。仿真结果为备件管理者提供需求信息,使其进行有目的地订货、储货。

3)该仿真模型还可以用于研究不同因素对结果影响程度。例如,改变不同的环境因子,研究其对需求发生的影响程度。

系统边界条件对仿真结果准确性有重要意义。上文模型的建立基于某些假设条件下,导致仿真结果存在理论误差。在研究过程中提出以下改进方向:

①加强对环境等不确定因素的量化研究。

利用风电场运行历史数据和气候条件记录分析不同气候对风力机备件的影响程度。

②在仿真模型中考虑风力机停机时间。根据风电场历史维修经验,建立预估计停机时间模型。

③结合风力机其他备件进行需求预测。一种备件需求的发生往往也受到其他部件健康状况影响,例如A部件发生随机故障导致停机,会影响B部件需求的预测。

④建立整个风电场备件需求预测模型。其意义在于:预测风电场备件需求,解决风电场备件管理资金占有量大和管理难度大等问题。这是实现智能化风电场的重要一步。

### [参考文献]

- [1] 黄超群, 向祖晓. 基于蒙特卡洛仿真预测的备件库存管理[A]. 中国农机工业协会风能设备分会[C], 珠海, 2014.
- [1] Huang Chaoqun, Xiang Zuxiao. Spare parts inventory management based on Monte Carlo simulation[A]. China Wind Power Equipment Branch of Agricultural Machinery Industry Association[C], Zhuhai, 2014.
- [2] 于强强. 风力发电机组备品备件编码的设计与实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [2] Yu Qiangqiang. Design and implementation of spare parts coding for wind turbines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [3] 张国辉. 风力发电场备品备件管理分析[A]. 中国农业机械工业协会风能设备分会. 第二届中国风电后市场专题研讨会论文集[C]. 中国农业机械工业协会风能设备分会, 呼和浩特, 2015.
- [3] Zhang Guohui. Analysis of wind power equipment spare parts management of wind farm[A]. China Wind Power Equipment Branch of Agricultural Machinery Industry Association. The second session of China Wind Power Market Seminar Proceedings, China Agricultural Machinery Industry Association of wind energy equipment branch[C], Huhhot, 2015.
- [4] Croston J D. Forecasting and stock control for intermittent demands[J]. Operational Research Quarterly, 1972, 23(3): 289—303.
- [5] Johnston F R, Boylan J E. Forecasting intermittent demand: A comparative evaluation of croton's method. Comment[J]. International Journal of Forecasting, 2004, 12(2): 297—298.
- [6] Levén E, Segerstedt A. Inventory control with a modified Croston procedure and Erlang distribution[J]. International Journal of Production Economics, 2004, 90(3): 361—367.
- [7] Efron B. Bootstrap methods: Another look at the jackknife[J]. Annals of Statistics, 1979, 7(1): 1—26.
- [8] Snyder R. Forecasting sales of slow and fast moving inventories[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 140(3): 684—699.
- [9] Willemain T R, Smart C N, Schwarz H F. A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories[J]. International Journal of Forecasting, 2004, 20(3): 375—387.
- [10] 赵建忠, 徐廷学, 李海军, 等. 基于 Logistic 回归、Markov 过程和改进灰自助法的导弹备件需求预测[J]. 科技导报, 2013, 16: 51—55.
- [10] Zhao Jianzhong, Xu Tingxue, Li Haijun, et al. Prediction of missile spare parts demand based on Logistic regression, Markov process and improved grey self-help method[J]. Technology Guide, 2013, 16: 51—55.
- [11] 林琳, 陈湘芝, 钟诗胜. 一种新的间断型备件需求预测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(1): 40—45.
- [11] LinLin, Chen Xiangzhi, Zhong Shisheng. A new approach of forecasting intermittent demand for spare parts[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(1): 40—45.
- [12] 杨杰, 张斌, 华中生. 间断需求预测方法综述[J]. 预测, 2005, 24(5): 70—75.
- [12] Yang Jie, Zhang Bin, Hua Zhongsheng. Review of intermittent demand forecasting methods[J]. Forecast, 2005, 24(5): 70—75.
- [13] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖, 等. 系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [13] Zhong Yongguang, Jia Xiaojing, Qian Ying, et al. System Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [14] 卓明良, 潘尔顺, 廖雯竹, 等. 基于可靠度限制的周期性预防维护模型研究[J]. 工业工程与管理, 2009, (1): 62—65.
- [14] Zhuo Mingliang, Pan Ershun, Liao Wenzhu, et al. Study on periodic preventive maintenance model based on limitation of reliability[J]. Industrial Engineering and Management, 2009, (1): 62—65.

## RESEARCH ON DEMAND FORECAST OF SPARE PARTS OF WIND TURBINE BASED ON SYSTEM DYNAMICS

Hu Di<sup>1</sup>, Gao Qingshui<sup>2</sup>, Zhang Chu<sup>2</sup>, Yang Tao<sup>1</sup>, Gao Wei<sup>1</sup>, Deng Xiaowen<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Considering the influence of service time, spare parts life, maintenance strategy and environment on the demand of spare parts, the System Dynamic model is used to establish the forecast model of spare parts demand of the wind turbine. The model consists of service time simulation module, spare parts reliability and failure rate simulation module, maintenance mode simulation module. The simulation results showed that the model can reflect the characteristics of the demand of the spare parts of the wind turbine and forecast the time of occurrence of the demand in the boundary condition, and provide the stocking information for the spare parts manager.

**Keywords:** wind turbine; spare parts; demand forecast; system dynamic