

DOI: 10.3901/JME.2019.18.215

考虑性能参数变化的混流制造系统脆弱性评估方法*

高贵兵 岳文辉 王 峰

(湖南科技大学机电工程学院 湘潭 411201)

摘要: 针对现有混流制造系统脆弱性评估方法的不足,在考虑系统性能参数实时变化的情况下,提出了一种基于 L_Z 变换的脆弱性评估方法。利用离散时间马尔科夫原理求得制造单元各状态的瞬时概率,基于系统的结构特征和 L_Z 变换原理、通用生成函数的串并联构造算子等得到制造单元和系统的 L_Z 变换函数;根据混流制造系统脆弱性定义和系统的 L_Z 变换函数,以其可用度、平均输出期望值和瞬时缺陷率等为脆弱性评价指标,建立混流制造系统的脆弱性评价模型;以一个包含 7 个制造单元的混流制造系统为例,通过求解系统的 L_Z 变换函数,建立基于可用度、输出性能期望值、瞬时性能缺陷等评估指标的脆弱性评价模型,得到系统的脆弱性实时变化曲线,验证了该方法的可行性,扩展了脆弱性评价的应用范围。

关键词: 混流制造系统; L_Z 变换; 脆弱性; 评价

中图分类号: TG156

Vulnerability Assessment Method for Mixed-flow Manufacturing System with Time-varying Performance Parameters

GAO Guibing YUE Wenhui WANG Feng

(College of Mechanical and Electrical Engineering,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract: For the disadvantages of the conventional vulnerability assessment methods for the mixed flow manufacturing system, by considering the real-time changes performance parameters of this type of system, a quantitative evaluation method for the vulnerability of mixed-flow manufacturing system (MMS) by using the L_Z -transform is proposed. Firstly, using the discrete-time Markov principle, the instantaneous probability of each state of the manufacturing unit is obtained. According to the structural characteristics of the MMS, the L_Z -transform of manufacturing unit and the series-parallel construction operator of the general generation function, the L_Z -transform function of the MMS is obtained. Secondly, by following the system's vulnerability definition and L_Z -transform function of MMS, the vulnerability assessment method is established by regarding the availability, expectation of average output, and instantaneous performance defect as the evaluation index. Finally, taking a simple MMS as an example, a vulnerability assessment method which is based on the corresponding L_Z -transform function is proposed to evaluate the vulnerability. Compared to the traditional state entropy-based method, the results verify the applicability for the actual situation and the application of vulnerability assessment is also expanded.

Key words: mixed-flow manufacturing system; L_Z -transform; vulnerability; assessment

0 前言

脆弱性评估是系统安全分析、设计领域的一个有用的工具。脆弱性指系统的组成要素受到各种内外干扰、破坏后系统的性能损失程度^[1]。制造系统的脆弱性是其设备、程序等在受到内外攻击和威胁

时,系统整体性能的下降或损失^[2]。制造系统的脆弱性来源于软硬件两方面,系统软件的编码错误、流程缺陷或者不合理的交互设计等,系统硬件的设计缺陷,故障等都是其脆弱性产生的根源^[3]。脆弱性犹如一颗炸弹,随时均有可能导致系统产生巨大的损失。因此,准确地评估系统脆弱性,及时地找出潜在的风险和故障,及早进行有效的预防或者升级改造,提升系统的稳健性,对制造系统的安全运行具有重要意义。

脆弱性评估是脆弱性研究的重点,评估方法因

* 国家自然科学基金(51705149)、湖南省自然科学基金(2018JJ2124)和湖南省教育厅科研(18A193)资助项目。20181206 收到初稿,20190509 收到修改稿

领域与学科不同而存在差异,主要的评估方法有经验分析法^[4]、基于 agent 的方法^[5]、基于网络的方法^[6]和基于系统动态特性^[7]的方法等。经验分析法利用系统已发生过的事报告和数据其脆弱性,识别高频故障和失效模式,为系统提供风险防范策略,降低风险的危害^[8];基于 agent 的方法用 agent 表示复杂系统的组成部分,建立相关规则描述 agent 的行为和相互关系,进而获取干扰、故障行为下系统的性能反应,仿真分析其脆弱性和脆弱性消减策略的效果^[9];基于网络的方法利用网络模型描述复杂系统的拓扑结构,通过分析网络的拓扑特性以识别系统的脆弱部分,从拓扑层次上提供系统脆弱性消减策略^[10];基于系统动态特性的方法利用系统支路、主线的反馈和流程建立系统的动态演化规则,以此分析各种脆弱性影响因素对系统脆弱性的影响^[11]。这些脆弱性的评估方法都是针对电力、交通、工业链网络、生态、金融系统等,它们的运行机理与制造系统存在本质区别,因此制造系统的脆弱性分析评价不能照搬这些已有的方法。

最早对制造系统脆弱进行研究的是 ALBINO 等^[12],他们以生产系统敏感性为度量目标,建立了生产系统未完成任务的脆弱性评估方法,这种方法没有考虑风险、故障的影响,评估不全面;BALASUNDARAM^[13]指出生产系统脆弱性来自于外界的不确定性,但没有提供脆弱性的量化评价方法;KHAKZAD 等^[14]指出生产网络脆弱性受到各种内外因素的影响,但他们没有考虑系统结构对于脆弱性的影响,没有给出效能损失的量化评价标准;此外,KÓCZA 等^[15]建立了 IRAS(Integrated reliability analysis system)平台,但这平台只用于分析系统的可靠性,将脆弱性作为可靠性的一个影响因素,没有分析脆弱性的具体成因和构成因素;柳剑等^[16]分析了系统脆弱性的产生机理和激发因素,用以评估系统的可靠性,但对系统的脆弱性没有量化评估;近年来,DESMIT 等^[2-3]采用交叉映射原理识别智能制造系统的物理漏洞,用决策树模型分析漏洞的影响大小,设立红绿灯刻度为生产者提供直观的脆弱性评估结果,为企业提供安全监控,但他们主要关注点在于制造企业的信息安全;高贵兵等^[17-18]基于状态熵的原理和复杂网络原理等提出了两种不同的脆弱性评估方法,但基于状态熵的原理在遇到状态的组合爆炸问题时求解困难,而基于复杂网络的方法也无法考虑系统性能参数变化的情况,与实际情况有较大的差距。总之,现有各种脆弱性评估模型仅局限于参数、状态可以精确计算的情况,并未探究系统性能参数变化对脆弱性的影响,采用的信息熵理论、Markov 模型和复杂网络模型等难

以描述清楚系统内部参数的变化所导致的脆弱性变化。相比较状态熵模型的状态空间爆炸问题^[19]和 UGF(Universal generating function)^[20]方法参数固定不变问题, L_Z 变换的建模过程虽然相对状态熵方法要稍微复杂,但能在很大程度上缓解状态空间爆炸问题,也能通过对其建模方法的扩充和改进,准确地反映系统参数的实时变化情况^[21]。

本文利用 L_Z 变换方法对混流制造系统的脆弱性进行评估。首先建立制造单元的微分方程组,求解单元在各种状态下的瞬时概率分布,得到单元的 L_Z 变换;其次,基于系统的结构特征、制造单元的 L_Z 变换和通用生成函数的串并联算子,得到混流制造系统的 L_Z 变换;然后基于脆弱性的定义,以可用度、期望输出量和瞬时性能缺陷等为评估指标,建立系统的脆弱性评估模型;最后以一个典型算例验证了该方法的可行性,扩展了脆弱性评估的实际用途。

1 多状态系统的 L_Z 变换

L_Z 变换在 UGF 方法的基础上融合随机过程,可以有效评估多状态系统的瞬时可用度、敏感度等。

1.1 时变多状态单元的 L_Z 变换

对于一个包含 K 个离散状态的连续时间马尔科夫过程(DSCT), $G(t) \in \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$, $t > 0$, 用状态集 $g = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ 、转移概率矩阵 $B = |b_{ij}|$, $i, j = 1, 2, \dots, K$ 和对应的初始概率分布 $P_0 = \{p_i(t)\}$ 即可完整的定义该马尔科夫过程。其中 g_k 表示任意状态 k 的性能, $k=1, 2, \dots, K$ 。

$$P_0 = [P_{10} = P_t \{G(0) = g_1\}, \dots, P_{k0} = P_t \{G(0) = g_k\}] \quad (1)$$

因此,对于任意时变多状态单元,设其在 $t(t>0)$ 时刻处于状态 g_i 的概率为 $p_i(t)$, 则基于单元的转移概率矩阵 B 和马尔科夫状态转移理论,可以建立如下的状态转移方程^[22]

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = b_{11}(t)p_1(t) + \dots + b_{1k}(t)p_k(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = b_{21}(t)p_1(t) + \dots + b_{2k}(t)p_k(t) \\ \vdots \\ \frac{dp_k(t)}{dt} = b_{k1}(t)p_1(t) + \dots + b_{kk}(t)p_k(t) \end{cases} \quad (2)$$

根据初始条件 $P_0 = \{p_{10}, \dots, p_{k0}\}$, 通过拉普拉斯变换,解此方程组得到单元在任意 t 时刻处于状态 g_i 的概率 $p_i(t)$ 。

则对于上述离散状态的连续时间马尔科夫过程 $G(t) = \langle g, B, P_0 \rangle$, 时变多状态单元的 L_Z 变换函数

$\mu(z, t, p_i)$ 定义如下。

$$L_Z \{G(t)\} = \mu(z, t, p_i) = \sum_{i=1}^K p_i(t) Z^{g_i} \quad (3)$$

1.2 时变多状态系统的 L_Z 变换

对于时变多状态系统, 它一般有多个不同的单元混联而成, 不同的单元包含有各种不同的工作状态。设多状态系统包含 n 个单元, 令任意单元 $m_j (j=1, 2, \dots, n)$ 含有 k_j 种状态, 各状态的取值用集合 $g_{jk} = \{g_{j1}, g_{j2}, \dots, g_{jk}\}$ 表示。

基于马尔科夫离散过程, 建立单元 m_j 的状态转移方程, 可求得任意单元 m_j 在初始条件下任意状态 k 的概率

$$P_{jk}(t) = \Pr\{G_j(t) = g_{jk}\}, k=1, 2, \dots, k_j \quad (4)$$

基于前述单元的 L_Z 变换模型, 则系统中任意单元 m_j 的 L_Z 变换为

$$L_Z \{G_j(t)\} = \sum_{i=1}^{K_j} p_{ji}(t) Z^{g_{ji}}, j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

则对于混联有 n 个单元的多状态系统, 其 L_Z 变换为

$$L_Z \{G_S(t)\} = \Omega_f \{L_Z \{G_1(t)\}, \dots, L_Z \{G_n(t)\}\} \quad (6)$$

式中, Ω_f 为基于系统结构相依关系和性能关系所定义的运算符, 具体如下。

对于两个串联的单元 M_i 、 M_j , 其 L_Z 变换函数的运算符为

$$\begin{aligned} \Omega_{jser} = L_Z \{ \{G_i(t)\}, \{G_j(t)\} \} = \\ \sum_{i=1}^{m_i} \sum_{j=1}^{m_j} p_{m_i}(t) p_{m_j}(t) z^{\min(g_{m_i}, g_{m_j})} \end{aligned} \quad (7)$$

对于两个并联的单元 M_i 、 M_j , 其通用生成函数的运算符为

$$\begin{aligned} \Omega_{jpar} = L_Z \{ \{G_i(t)\}, \{G_j(t)\} \} = \\ \sum_{i=1}^{m_i} \sum_{j=1}^{m_j} p_{m_i}(t) p_{m_j}(t) z^{g_{m_i} + g_{m_j}} \end{aligned} \quad (8)$$

2 基于 L_Z 变换的脆弱性建模与分析

2.1 脆弱性的定义

脆弱性指系统遭受外界干扰和破坏后的系统性能损失程度, 可以用公式表示^[23]

$$V[S, F] = 1 - \frac{\Phi(F)}{\Phi(S)} \quad (9)$$

式中, $\Phi(S)$ 表示系统正常情况下的性能, 而 $\Phi(F)$ 表示系统遭受干扰和破坏后系统性能的损失。

因此, 混流制造系统脆弱性的定义为

$$V_{MS}[S, F] = 1 - \frac{\Phi_{MS}(F)}{\Phi_{MS}(S)} \quad (10)$$

式中, $\Phi_{MS}(S)$ 表示系统正常时评价指标的理论值, $\Phi_{MS}(F)$ 表示系统受到干扰和破坏后的期望值。

要评估混流制造系统的脆弱性, 选择合适的性能指标非常关键。混流制造系统的性能指标主要包括生产率、生产能力、生产均衡性, 可靠性, 设备利用率等, 考虑到系统的生产率包括静态生产率、动态生产率等指标, 影响生产率的因素也包括企业内部的软硬件和外部的技术和管理等诸多因素, 因此在评估混流制造系统的脆弱性时, 暂时没有考虑生产率指标。同样, 对于设备利用率、生产能力、生产均衡性等其他指标均暂且没有考虑。本文以系统可靠性指标中的可用度、输出量期望值和瞬时性能缺陷等指标来衡量系统的脆弱性。

2.2 制造单元的 L_Z 变换

假设制造单元 M_i 存在正常工作状态、完全故障和降级运行等 m 种状态, 设状态 1 为正常状态, 状态 2, \dots , $m-1$ 为降级运行状态, m 为崩溃状态。正常工作的概率服从指数分布 $1 - \exp(-\lambda_{mi}(t))$, 故障后修复的时间指数分布 $1 - \exp(-\mu_{mi}(t))$, 其中 $\lambda_{mi}(t)$ 和 $\mu_{mi}(t)$ 分别表示制造单元的状态转移密度函数, $\lambda_{mi}(t), \mu_{mi}(t) > 0, i=1, 2, \dots, n$ 。所有随机变量相互独立, 则制造单元的状态转移图如图 1 所示。

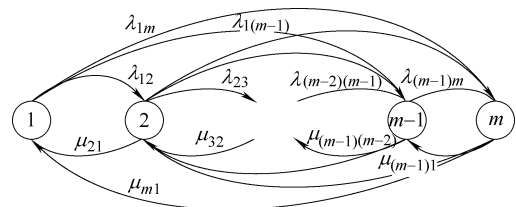


图 1 制造单元状态转移图

对于该状态转移过程, 建立微分方程式(11)。

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = \sum_{i=2}^{m-1} p_i(t) \mu_{i1}(t) - p_1(t) \sum_{j=2}^{m-1} \lambda_{1j}(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \sum_{j=3}^{m-1} p_j(t) \mu_{j2}(t) - p_2(t) \sum_{j=3}^{m-1} \lambda_{2j}(t) - \\ p_2(t) \mu_{21}(t) + p_1(t) \lambda_{12}(t) \\ \vdots \\ \frac{dp_l(t)}{dt} = \sum_{j=l}^{m-1} p_j(t) \mu_{jl}(t) - p_l(t) \left(\sum_{j=1}^{m-1} \lambda_{lj}(t) + \right. \\ \left. \sum_{j=1}^{l-1} p_j(t) \mu_{lj}(t) \right) + \sum_{j=1}^{l-1} p_j(t) \lambda_{jl}(t) \\ \vdots \\ \frac{dp_m(t)}{dt} = \sum_{j=2}^{m-1} p_j(t) \lambda_{mj}(t) - p_m(t) \sum_{j=2}^{m-1} \mu_{jm}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $j=2,3,\dots,m, l=2,3,\dots,m-1$, 且 $\sum_{j=1}^m p_j(t)=1$ 。

根据微分方程组的初始条件求解方程式(11)得到制造单元任意状态的概率值 $p_j(t)$ 。根据前述 L_Z 变换的定义, 可得如式(12)所示的制造单元的 L_Z 变换。

$$L_Z \{G_i(t)\} = \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij}(t) Z^{g_{ij}}, i=1,2,\dots,n \quad (12)$$

2.3 混流制造系统的 L_Z 变换

对于图 2 所示由多个不同的制造单元混联构成的混流制造系统, 对系统进行 L_Z 变换的关键是理清其系统结构。基本步骤如下。首先基于 L_Z 变换的原理与制造单元状态分析结果, 根据式(12)求出制造单元的 L_Z 变换函数 $L_Z \{G_i(t)\}$, 然后利用通用生成函数算子求解得到系统的 L_Z 变换函数。

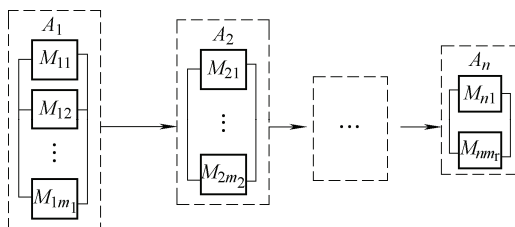


图 2 混流制造系统示意图

$$L_Z \{G_M(t)\} = \Omega_f \left\{ \Omega_{f_1} \left\{ L_Z \{G_{M_1}(t)\} \right\}, L_Z \{G_{B_1}(t)\} \right\}, \Omega_{f_2} \left\{ L_Z \{G_{M_2}(t)\} \right\}, \dots, L_Z \{G_{B_b}(t)\} \right\}, \Omega_{f_n} \left\{ L_Z \{G_{M_n}(t)\} \right\} \quad (13)$$

式中, f 是混流制造系统的结构函数, 对于图 2 所示的混流制造系统

$$f = \min \left\{ \left(G_{M_{11}}(t) + \dots + G_{M_{1m_1}}(t) \right), G_{B_1}(t), \left(G_{M_{21}}(t) + \dots + G_{M_{2m_2}}(t) \right), \dots, G_{B_b}(t), \left(G_{M_{n1}}(t) + \dots + G_{M_{nm_n}}(t) \right) \right\} \quad (14)$$

因为制造单元混联在一起, 根据前述单元的 L_Z 变换和系统的结构函数, 即可得到系统的 L_Z 变换函数。

$$L_Z \{G_M(t)\} = \Omega_{f_{ser}} \left\{ \Omega_{f_{par}} \left\{ L_Z \{G_{M_{11}}(t)\} \right\}, \dots, L_Z \{G_{M_{1m_1}}(t)\} \right\}, L_Z \{G_{B_1}(t)\}, \Omega_{f_{par}} \left\{ L_Z \{G_{M_{21}}(t)\} \right\}, \dots, L_Z \{G_{M_{2m_2}}(t)\} \right\}, \dots, L_Z \{G_{B_b}(t)\}, \Omega_{f_{par}} \left\{ L_Z \{G_{M_{n1}}(t)\} \right\}, \dots, L_Z \{G_{M_{nm_n}}(t)\} \right\} \quad (15)$$

式中, $\Omega_{f_{ser}}$ 和 $\Omega_{f_{par}}$ 分别为串联算子和并联算子

对于两个串联的制造单元 M_i 和 M_j , 其 L_Z 变换的运算算子

$$\Omega_{f_{ser}} \left\{ L_Z \{G_{M_i}(t)\}, L_Z \{G_{M_j}(t)\} \right\} = \Omega_{f_{ser}} \left\{ \sum_{i=1}^{m_i} p_i(t) Z^{g_i}, \sum_{j=1}^{m_j} p_j(t) Z^{g_j} \right\} = \sum_{i=1}^{m_i} \sum_{j=1}^{m_j} p_i(t) p_j(t) Z^{\min(g_i, g_j)} \quad (16)$$

对于两个并联的制造单元 M_i 和 M_j , 其 L_Z 变换的运算算子为

$$\Omega_{f_{par}} \left\{ L_Z \{G_{M_i}(t)\}, L_Z \{G_{M_j}(t)\} \right\} = \Omega_{f_{par}} \left\{ \sum_{i=1}^{m_i} p_i(t) Z^{g_i}, \sum_{j=1}^{m_j} p_j(t) Z^{g_j} \right\} = \sum_{i=1}^{m_i} \sum_{j=1}^{m_j} p_i(t) p_j(t) Z^{g_i + g_j} \quad (17)$$

利用并联算子和串联算子计算, 最终得到如下所示的混流制造系统的 L_Z 变换

$$L_Z \{G_M(t)\} = \sum_{M_s=1}^{m_s} p_{M_s}(t) Z^{g_{M_s}} \quad (18)$$

式中, g_{M_s} 为混流制造系统可能的输出状态。

2.4 基于 L_Z 变换的混流制造系统脆弱性分析

制造系统的可靠性反映了系统在规定时间、条件下完成预定功能的能力, 是系统的主要性能参数, 在本文中用可靠性指标的变化以衡量系统的脆弱性。在进行脆弱性分析时, 我们重点关注单元在指定性能水平 ω 时的可用度 $A_\omega(t)$ 、性能输出期望平均值 $\bar{G}(t)$ 和瞬时性能缺陷均值 $D_\omega(t)$ 。

则基于系统的 L_Z 变换函数和可靠性理论, 任意时刻 t 时给定性能水平 ω 时混流制造系统 M_s 的可用度

$$A_\omega(t) = \sum_{g_{M_s} > \omega} p_{M_s}(t) \quad (19)$$

假设制造系统在受到干扰破坏前为正常工作状态, 受到干扰或破坏后降级运行, 则系统的可用度下降, 此时单元的可用度

$$A_{\omega'}(t) = \sum_{g_{M_s} > \omega'} p_{ij}(t) \quad (20)$$

根据前述脆弱性的定义, 则基于可用度的制造系统脆弱性可定义为

$$V_M^A[S, F] = 1 - \frac{A_{\omega'}(t)}{A_\omega(t)} \quad (21)$$

性能输出期望平均值 $\bar{G}_{M_s}(t)$ 是决定混流制造系统生命周期的一个重要参数, 表示输出阈值 ω 满足要求时系统输出的均值

$$\bar{G}_{M_s}(t) = E \{G(t)\} = \sum_{M_s=1}^{m_s} g_{M_s} p_{M_s}(t) \quad (22)$$

假设混流制造系统在受到干扰破坏前为正常工作状态, 受到干扰或破坏后降级到 ω' 水平, 则系统的输出余量的均值下降, 性能输出期望平均值

$$\bar{G}_{M_s'}(t) = E \{G(t)\} = \sum_{g_{M_s} > \omega'} g_{M_s} p_{M_s}(t) \quad (23)$$

则基于性能输出期望平均值的混流制造系统脆弱性可定义为

$$V_M^G[S, F] = 1 - \frac{\bar{G}_{M_s'}(t)}{\bar{G}_{M_s}(t)} \quad (24)$$

同理, 系统任意时刻的性能缺陷 $D_\omega(t)$ 反映系统偏离正常生产的状况

$$D_\omega^{M_s}(t) = \sum_{M_s=\omega'}^{m_s} p_{M_s}(t) \max\{\omega - g_{M_s}, 0\} \quad (25)$$

混流制造系统受到干扰或破坏后降级到 ω' 水平, 则系统的瞬时性能缺陷上升到

$$D_{\omega'}^{M_s}(t) = \sum_{M_s=\omega'}^{m_s} p_{M_s}(t) \max\{\omega' - g_{M_s}, 0\} \quad (26)$$

基于瞬时性能缺陷 $D_\omega(t)$ 的制造系统脆弱性可定义为

$$V_M^D[S, F] = 1 - \frac{\omega - \bar{D}_{\omega'}^{M_s'}(t)}{\omega - \bar{D}_{\omega'}^{M_s'}(t)} \quad (27)$$

3 算例分析

如图3所示, 某混流制造系统由7个制造单元构成, 其中, 制造单元 M_1, M_2, M_3 并联, D_1, D_2 并联, 每个制造单元均存在正常工作、降级运行和完全故障等不同的状态, 各制造单元的状态转移图如图4所示, 各制造单元在不同状态下的生产率如表1所示。其中 M_1, M_2, M_3 单元的失效率和修复率为 $\lambda^{M_1} = 4$ / 年, $\lambda^{M_1}(t) = (0.1 + 0.36t^2)$ / 年, $\mu^{M_1} = 100$ / 年。 M_2 单元的失效率和修复率为 $\lambda^{M_2} = 0.6$ / 年, $\lambda^{M_2}(t) = (0.15 + 0.15t^2)$ / 年, $\mu^{M_2} = 180$ / 年。 D_1, D_2 单元的失效率和修复率为 $\lambda^{AD_3} = 2$ / 年, $\lambda^{AD_3}(t) = (0.2 + 0.26t^2)$ / 年, $\mu^{AD_3} = 120$ / 年, M_4 单元的失效率和修复率为 $\lambda^{M_4} = 0.3$ / 年, $\lambda^{M_4}(t) = (0.16 + 0.24t^2)$ / 年, $\mu^{M_4} = 200$ / 年。

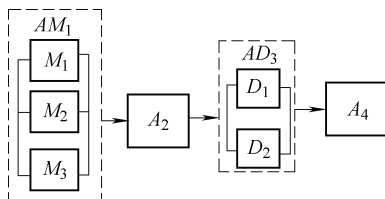
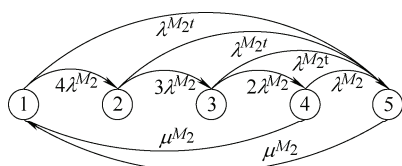
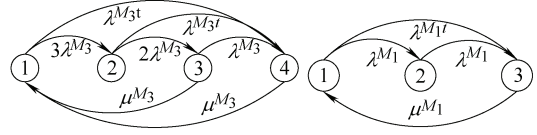


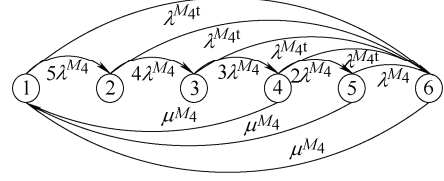
图3 混流制造系统示例



(a) 制造单元 A_2 状态转移图



(b) 制造单元 D_1, D_2 状态转移图 (c) 制造单元 M_1, M_2, M_3 状态转移图



(d) 制造单元 A_4 状态转移图

图4 各制造单元的状态转移图

表1 各单元各状态下的生产率 件/h

单元	状态					
	1	2	3	4	5	6
M_1	30	10	0			
M_2	30	10	0			
M_3	30	10	0			
A_2	90	70	40	20	0	
D_1	45	30	15	0		
D_2	45	30	15	0		
A_4	90	70	50	30	15	0

3.1 AM_1 和 AD_3 的 L_z 变换

AM_1 由3个单元并联而成, 每一个单元有三种状态, $g^{M_i} = \{g_1^{M_i}, g_2^{M_i}, g_3^{M_i}\} = \{30, 20, 10\}$, 因此整个 AM_1 有9种状态, 即 $g^{AM_1} = \{g_1^{AM_1}, g_2^{AM_1}, \dots, g_9^{AM_1}\} = \{90, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 0\}$, 基于图4c所示 M_i 的状态转移图和马尔科夫模型, 对于 AM_1 中的任意 M_i , 可以建立如下的微分方程。

$$\frac{dp_i^{AM_1}(t)}{dt} = p_i^{AM_1}(t) \cdot A^{AM_1} \quad (28)$$

式中, $p_i^{AM_1}(t) = \{p_{i1}^{AM_1}(t), p_{i2}^{AM_1}(t), p_{i3}^{AM_1}(t)\}$,

$$A^{AM_1} = \begin{pmatrix} -(2\lambda^{M_1} + \lambda^{M_1}(t)) & 2\lambda^{M_1} & \lambda^{M_1}(t) \\ 0 & -\lambda^{M_1} & \lambda^{M_1} \\ \mu^{M_1} & 0 & -\mu^{M_1} \end{pmatrix}, \text{ 其初始}$$

条件为 $p_i^{AM_1}(0) = \{1, 0, 0\}$ 。

利用 Matlab 求解微分方程组, 即可得到给定初始条件下的 AM_1 子系统中不同制造单元在不同状态下的概率值 $p_{li}^{AM_1}(t)$ ($i=1, 2, 3$)。因此, 对于 AM_1 中的三个单元 M_1, M_2, M_3 , 可以得到如下集合。

$$\begin{cases} g_i^{AM_1} = \{30, 10, 0\} \\ p_i^{AM_1}(t) = \{p_{i1}^{AM_1}, p_{i2}^{AM_1}, p_{i3}^{AM_1}\} \end{cases}$$

根据 $g_i^{AM_1}$ 和 $p_i^{AM_1}(t)$, 则任意单元 M_i 的 L_z 变换函数

$$L_Z \{G_i^{AM_1}(t)\} = \sum_{j=1}^3 p_{ij}^{AM_1}(t) z^{g_{ij}^{AM_1}} \quad (29)$$

利用并联算子, 可以得到 M_1 、 M_2 、 M_3 并联后的 AM_1 部分的 L_Z 变换函数为

$$L_Z \{G^{AM_1}(t)\} = \Omega_{f_{par}} \{L_Z \{G_{M_1}(t)\}, L_Z \{G_{M_2}(t)\}, L_Z \{G_{M_3}(t)\}\} = \sum_{i=1}^9 p_i^{AM_1}(t) z^{g_i^{AM_1}} \quad (30)$$

式中 $g^{AM_1} = \{90, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 0\}$

$$\begin{aligned} p_1^{AM_1}(t) &= p_{11}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) \\ p_2^{AM_1}(t) &= p_{11}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) + p_{11}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) \\ p_3^{AM_1}(t) &= p_{11}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{33}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) + p_{11}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) \\ p_4^{AM_1}(t) &= p_{11}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) + p_{11}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) \\ p_5^{AM_1}(t) &= p_{11}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) + p_{11}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{33}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) + p_{13}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) + p_{11}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{33}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) + p_{13}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) \\ p_6^{AM_1}(t) &= p_{11}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{33}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) + p_{11}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{33}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) + p_{13}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) + p_{11}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{33}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) + p_{13}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) \\ p_7^{AM_1}(t) &= p_{12}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) + p_{13}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) + p_{11}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) p_{33}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) + p_{13}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) \\ p_8^{AM_1}(t) &= p_{13}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{33}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) + p_{11}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) + p_{13}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{33}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{32}^{AM_1}(t) + p_{11}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) p_{31}^{AM_1}(t) \\ p_9^{AM_1}(t) &= p_{13}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) p_{33}^{AM_1}(t) \end{aligned}$$

与 AM_1 部分类似, AD_3 部分由 D_1 、 D_2 两个单元并联而成, 首先建立 D_1 、 D_2 的微分方程

$$\frac{dp_i^{D_j}(t)}{dt} = p_i^{D_j}(t) \cdot A^{AD_j} \quad (31)$$

根据初始条件利用 Matlab 求得 D_1 、 D_2 两个单元的不同状态和概率的集合

$$\begin{cases} g_i^{AD_1} = \{45, 30, 15, 0\} \\ p_i^{AD_1}(t) = \{p_{i1}^{AD_1}, p_{i2}^{AD_1}, p_{i3}^{AD_1}, p_{i4}^{AD_1}\} \end{cases}$$

得到单元 D_1 、 D_2 的 L_Z 变换函数为

$$L_Z \{G_i^{AD_1}(t)\} = \sum_{j=1}^4 p_{ij}^{AD_1}(t) z^{g_{ij}^{AD_1}} \quad (32)$$

然后利用并联算子, 得到 D_1 、 D_2 并联后的 AD_1 部分的 L_Z 变换函数

$$L_Z \{G^{AD_1}(t)\} = \Omega_{f_{par}} \{L_Z \{G_{D_1}(t)\}, L_Z \{G_{D_2}(t)\}\} =$$

$$\sum_{i=1}^7 p_i^{AD_1}(t) z^{g_i^{AD_1}} \quad (33)$$

式中 $g^{AD_1} = \{90, 75, 60, 45, 30, 15, 0\}$

$$\begin{aligned} p_1^{AD_1}(t) &= p_{11}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) \\ p_2^{AD_1}(t) &= p_{11}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) \\ p_3^{AD_1}(t) &= p_{11}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) + p_{13}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) \\ p_4^{AD_1}(t) &= p_{11}^{AM_1}(t) p_{24}^{AM_1}(t) + p_{14}^{AM_1}(t) p_{21}^{AM_1}(t) + p_{12}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) + p_{13}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) \\ p_5^{AD_1}(t) &= p_{12}^{AM_1}(t) p_{24}^{AM_1}(t) + p_{14}^{AM_1}(t) p_{22}^{AM_1}(t) + p_{13}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) \\ p_6^{AD_1}(t) &= p_{13}^{AM_1}(t) p_{24}^{AM_1}(t) + p_{14}^{AM_1}(t) p_{23}^{AM_1}(t) \\ p_7^{AD_1}(t) &= p_{14}^{AM_1}(t) p_{24}^{AM_1}(t) \end{aligned}$$

3.2 A_2 和 A_4 的 L_Z 变换

A_2 有 5 种状态, 即 $g^{A_2} = \{g_1^{A_2}, g_2^{A_2}, \dots, g_5^{A_2}\} = \{90, 70, 40, 20, 0\}$, 基于图 3 所示 A_2 的状态转移图和马尔科夫模型, 对于 A_2 可以建立如下的微分方程

$$\frac{dp_i^{A_2}(t)}{dt} = p_i^{A_2}(t) \cdot A^{A_2} \quad (34)$$

式中 $p_i^{A_2}(t) = \{p_1^{A_2}(t), p_2^{A_2}(t), \dots, p_5^{A_2}(t)\}$

$$A^{A_2} = \begin{pmatrix} -(4\lambda^{A_2} + \lambda^{A_2}(t)) & 4\lambda^{A_2} & & & \\ 0 & -(3\lambda^{A_2} + \lambda^{A_2}(t)) & & & \\ 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \lambda^{A_2}(t) \\ 3\lambda^{A_2} & 0 & \lambda^{A_2}(t) \\ -(2\lambda^{A_2} + \lambda^{A_2}(t)) & 2\lambda^{A_2} & \lambda^{A_2}(t) \\ 0 & -(\lambda^{A_2} + \lambda^{A_2}(t)) & \lambda^{A_2} + \lambda^{A_2}(t) \\ 0 & 0 & -\mu^{A_2} \end{pmatrix}$$

其初始条件为 $p_i^{A_2}(0) = \{1, 0, 0, 0, 0\}$ 。

利用 Matlab 求解微分方程组, 可得到 $p_i^{A_2}(t)$, $i=1, 2, \dots, 5$ 的数值解, 因此, 根据下列概率与状态的集合, 可以得到 A_2 的 L_Z 变换

$$\begin{cases} g^{A_2} = \{g_1^{A_2}, \dots, g_5^{A_2}\} = \{90, 70, 40, 20, 0\} \\ p_i^{A_2}(t) = \{p_1^{A_2}(t), p_2^{A_2}(t), p_3^{A_2}(t), p_4^{A_2}(t), p_5^{A_2}(t)\} \end{cases}$$

$$L_Z \{G^{A_2}(t)\} = \sum_{i=1}^5 p_i^{A_2}(t) z^{g_i^{A_2}} \quad (35)$$

同理可以得到 A_4 的列概率与状态的集合以及 A_4 的 L_Z 变换

$$\begin{cases} g^{A_4} = \{g_1^{A_4}, \dots, g_6^{A_4}\} = \{90, 70, 50, 30, 15, 0\} \\ p_i^{A_4}(t) = \{p_1^{A_4}(t), p_2^{A_4}(t), \dots, p_6^{A_4}(t)\} \end{cases}$$

$$L_Z \{G^{A_4}(t)\} = \sum_{i=1}^6 p_i^{A_4}(t) z^{g_i^{A_4}} \quad (36)$$

3.3 混流制造系统的 L_Z 变换

AM_1, A_2 等各部分的 L_Z 变换求出来之后, 利用串联算子, 即可以得到整个系统的 L_Z 变换

$$\begin{aligned} L_Z \{G_S(t)\} &= \Omega_{f_{ser}} \{L_Z \{G^{AM_1}(t)\}, L_Z \{G^{A_2}(t)\}, \\ L_Z \{G^{AD_1}(t)\}, L_Z \{G^{A_4}(t)\}\} &= \Omega_{f_{ser}} \left\{ \sum_{i=1}^9 p_i^{AM_1}(t) z^{g_i^{AM_1}} \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^5 p_i^{A_2}(t) z^{g_i^{A_2}}, \sum_{i=1}^7 p_{ij}^{AD_1}(t) z^{g_{ij}^{AD_1}}, \sum_{i=1}^6 p_{ij}^{A_4}(t) z^{g_{ij}^{A_4}} \right\} \end{aligned} \quad (37)$$

计算得到

$$L_Z \{G_S(t)\} = \sum_{i=1}^{11} p_{si}^S(t) z^{g_{si}^S} \quad (38)$$

式中 $g_{si}^S = \{90, 75, 70, 60, 50, 45, 30, 20, 15, 10, 0\}$

$$\begin{aligned} p_{s1}^S(t) &= p_1^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_1^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) \\ p_{s2}^S(t) &= p_1^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_2^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) \\ p_{s3}^S(t) &= p_2^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_1^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + p_1^{AM_1}(t) p_2^{A_2}(t) \\ &\quad p_1^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + p_1^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_1^{AD_1}(t) p_2^{A_4}(t) + \\ &\quad p_2^{AM_1}(t) p_2^{A_2}(t) p_2^{AD_1}(t) p_2^{A_4}(t) + p_2^{AM_1}(t) p_2^{A_2}(t) \\ &\quad p_1^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + p_2^{AM_1}(t) p_2^{A_2}(t) p_2^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + \\ &\quad p_1^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_1^{AD_1}(t) p_2^{A_4}(t) + \dots \\ p_{s4}^S(t) &= p_3^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_1^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + p_3^{AM_1}(t) p_2^{A_2}(t) \\ &\quad p_1^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + p_3^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_1^{AD_1}(t) p_2^{A_4}(t) + \\ &\quad p_3^{AM_1}(t) p_3^{A_2}(t) p_2^{AD_1}(t) p_2^{A_4}(t) + p_3^{AM_1}(t) p_2^{A_2}(t) \\ &\quad p_1^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + p_3^{AM_1}(t) p_2^{A_2}(t) p_2^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + \\ &\quad p_3^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_1^{AD_1}(t) p_2^{A_4}(t) + \dots \\ p_{s5}^S(t) &= p_4^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_1^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + p_4^{AM_1}(t) p_2^{A_2}(t) \\ &\quad p_1^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + p_4^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_1^{AD_1}(t) p_2^{A_4}(t) + \\ &\quad p_4^{AM_1}(t) p_3^{A_2}(t) p_2^{AD_1}(t) p_2^{A_4}(t) + p_4^{AM_1}(t) p_2^{A_2}(t) \\ &\quad p_1^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + p_4^{AM_1}(t) p_2^{A_2}(t) p_2^{AD_1}(t) p_1^{A_4}(t) + \\ &\quad p_4^{AM_1}(t) p_1^{A_2}(t) p_1^{AD_1}(t) p_2^{A_4}(t) + \dots \end{aligned}$$

3.4 混流制造脆弱性分析

3.4.1 基于系统可用度的脆弱性

基于前述的式(18)系统可用度的脆弱性计算公式, 首先计算系统的可用度, 系统正常工作的可用度

$$A_0(t) = \sum_{g_{Ms} \geq 0} p_{Ms}(t) = \sum_{i=1}^{11} p_{si}^S(t) z^{g_{si}^S} \quad (39)$$

当系统受到风险扰动状态下降后, 系统可能的输出状态有多种, 为此, 采用各种状态下可用度的

期望平均值作为系统下降后的可用度值, 则有

$$\overline{A_{\omega'}(t)} = \sum_{i=1}^{11} p_{si}^S(t) A_{g_{si}^S}(t) \quad (40)$$

则基于系统可用度的脆弱性为

$$V_M^A[S, F] = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{11} p_{si}^S(t) A_{g_{si}^S}(t)}{\sum_{i=1}^{11} p_{si}^S(t) z^{g_{si}^S}} \quad (41)$$

图 5 所示为该系统的可用度曲线和脆弱性曲线, 从图中可以看出, 系统正常情况下的可用度曲线随着时间逐渐下降, 从正常情况下 A_0 下降到 0.98 需要经过 4.16 年的时间, 而当系统受到故意干扰或破坏, 可用度下降, 系统的可用度下降明显, 脆弱性逐渐加大。

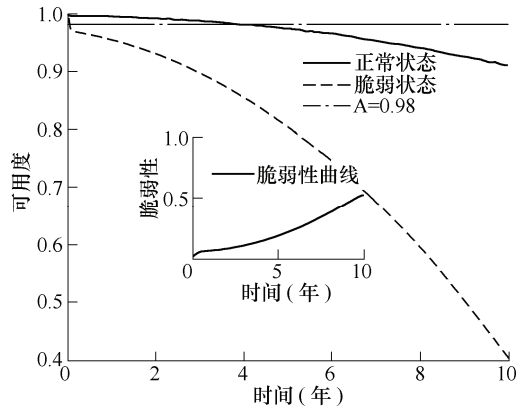


图 5 混流制造系统的可用度曲线和脆弱性曲线

3.4.2 基于性能输出期望值的脆弱性

首先计算系统正常状态下的性能输出期望平均值

$$\begin{aligned} \overline{G_{Ms}}(t) &= \sum_{M_s=1}^{11} g_{Ms} p_{Ms}(t) = 90 \cdot p_{s1}^S(t) + \\ &\quad 75 \cdot p_{s2}^S(t) + 70 \cdot p_{s3}^S(t) + \dots + 10 \cdot p_{s10}^S(t) \end{aligned} \quad (42)$$

系统受到扰动处于脆弱状态时, 其性能输出期望值下降到

$$\begin{aligned} \overline{G_{Ms'}}(t) &= \sum_{M_s=2}^{11} g_{Ms} p_{Ms'}(t) = 75 \cdot p_{s2}'(t) + \\ &\quad 70 \cdot p_{s3}'(t) + 60 \cdot p_{s4}'(t) + \dots + 10 \cdot p_{s10}'(t) \end{aligned} \quad (43)$$

式中, p_{si}' 为系统性能下降后处于各状态的概率。则基于性能输出期望值的脆弱性为

$$V_M^G[S, F] = 1 - \frac{\sum_{M_s=2}^{11} g_{Ms} p_{Ms'}(t)}{\sum_{M_s=1}^{11} g_{Ms} p_{Ms}(t)} \quad (44)$$

图 6 所示为该系统的输出量变化曲线和脆弱性曲线图, 从图中可以看出, 如果不考虑维护情况,

系统的输出量随着时间逐渐下降,但下降的幅度很小,是一个比较平缓的逐步下降过程。而当系统受到故意干扰或破坏,系统的输出量下降明显,同样,系统的脆弱性也随着时间推移而逐渐加大。

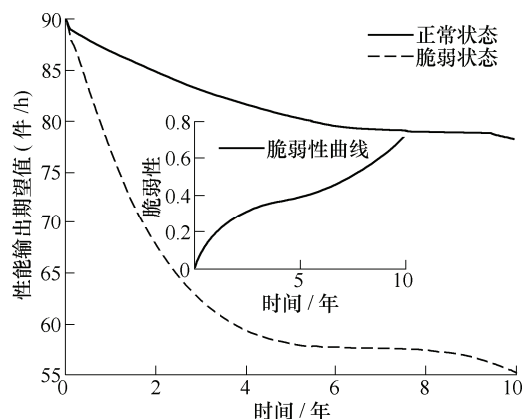


图 6 系统性能输出期望平均值变化曲线和脆弱性曲线图

3.4.3 基于系统性能缺陷的脆弱性

系统正常状态下的性能缺陷 $D_{\omega}^{M_s}(t)$

$$D_{90}^{M_s}(t) = \sum_{M_s=1}^{m_s} p_{M_s}(t) \max\{\omega - g_{M_s}, 0\} = 15 \cdot p_{s2}^S(t) + 20 \cdot p_{s3}^S(t) + 30 \cdot p_{s4}^S(t) + 40 \cdot p_{s5}^S(t) + 45 \cdot p_{s6}^S(t) + 60 \cdot p_{s7}^S(t) + 70 \cdot p_{s8}^S(t) + 75 \cdot p_{s9}^S(t) + 80 \cdot p_{s10}^S(t) + 90 \cdot p_{s11}^S(t) \quad (45)$$

系统受到扰动后,其状态有多种可能,因此以性能缺陷的期望值作为扰动后的性能缺陷,即

$$\begin{aligned} \overline{D_{\omega}^{M_s}}(t) &= \sum_{k=1}^{11} p_{s_{sk}}(t) D_{\omega=g_{sk}}^{M_s}(t) = \frac{15}{11} \cdot p_{s2}^S(t) + \\ &\frac{2}{11} \cdot 20 \cdot p_{s3}^S(t) + \frac{3}{11} \cdot 30 \cdot p_{s4}^S(t) + \frac{4}{11} \cdot 40 \cdot p_{s5}^S(t) + \\ &\frac{5}{11} \cdot 45 \cdot p_{s6}^S(t) + \frac{6}{11} \cdot 60 \cdot p_{s7}^S(t) + \frac{7}{11} \cdot 70 \cdot p_{s8}^S(t) + \\ &\frac{8}{11} \cdot 75 \cdot p_{s9}^S(t) + \frac{9}{11} \cdot 80 \cdot p_{s10}^S(t) + \frac{10}{11} \cdot 90 \cdot p_{s11}^S(t) \quad (46) \end{aligned}$$

则基于性能缺陷的脆弱性为

$$V_M^D[S, F] = 1 - \frac{\overline{\omega} - \overline{D_{\omega}^{M_s}}(t)}{\omega_0 - D_{90}^{M_s}(t)} \quad (47)$$

图 7 所示为该系统的瞬时性能缺陷变化曲线和脆弱性曲线图,瞬时性能缺陷 $D_{\omega}^{M_s}(t)$ 越大则系统偏离正常运行的可能性越高,从图中可以看出,理论上,如果不考虑维护情况,系统的瞬时性能缺陷 $D_{\omega}^{M_s}(t)$ 随着时间逐渐上升,但上升的幅度较小,是一个比较平缓的逐步增加过程。而当系统受到故意干扰或破坏,系统的瞬时性能缺陷上升明显,同样,系统的脆弱性也随着时间推移而逐渐加大。

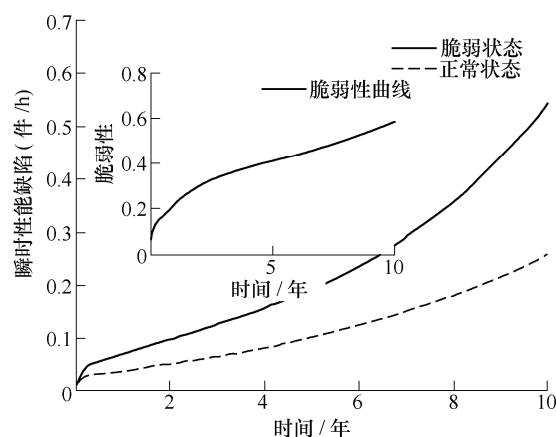


图 7 系统瞬时性能缺陷和脆弱性曲线图

4 分析讨论

(1) 本文通过建立系统的 L_Z 变换模型,以系统的可用度、输出期望值和瞬时性能缺陷等指标的变化为脆弱性评估指标,建立系统的脆弱性评价模型,扩展了系统脆弱性评估的实际应用范围。相比于其他脆弱性评价方法,本文方法可以解决系统性能参数实时变化的情况,这也是本文方法的优势所在。各种脆弱性评价方法的优缺点对比如表 2 所示。但本文方法受到脆弱性评价指标的影响较大,各种指标对脆弱性曲线的影响机制是我们下一步需要深入研究的问题。同时本文中仅考虑了可靠性指标,对于系统的生产率、设备利用率等性能指标没有考虑,如果能够获取这些指标的变化趋势,则基于脆弱性的定义,同样也可以用来衡量系统的脆弱性,因而,这些指标在系统扰动下的变化趋势同样是我们下一步需要深入研究的问题。

表 2 本文方法与其他制造系统脆弱性评价方法优缺点对比

方法	优点	缺点
脆弱性评价法	操作简单,适用于系统状态数不多且状态已知情况	计算量大,当单元状态多,系统存在状态组合爆炸问题无法求解
复杂网络法	利用成熟的复杂网络技术原理求解结构复杂的制造系统脆弱性	制造系统的复杂网络模型构造困难,且复杂网络并不能准确描述系统的行为
通用生成函数法	可以解决系统的状态组合爆炸问题,提高脆弱性求解效率	只能求解系统状态已知的情况,对于系统性能参数变化的情况无法求解
L_Z 变换法	可以解决系统性能参数实时变化情况下的系统脆弱性问题	不同的性能评价指标影响脆弱性评价结果的精度

(2) 脆弱性研究的目的在于找出系统的薄弱环节,预防系统故障,加强系统的稳健性,提高系统效率。因此,利用系统脆弱性进行故障预防

和健康维护是未来研究的重点。基于脆弱性的健康维护拟通过建立基于脆弱性动态优化生成系数的VFRGM (Vulnerability-variable forecasted state rolling grey model) 模型, 预测系统内各种设备的健康状态, 对设备进行预防性维护, 提高设备维护的效率, 节约维修资源。其中 VFRGM 模型的建立过程如下。

利用各种实时监测设备监测混流制造系统的各种设备状态, 得到制造单元和设备的样本数据序列 $x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)$, 以此作为样本测试数据, 基于灰色健康预测模型 FRGM(Forecasted-state rolling grey model)建立灰色微分方程式(48)

$$z^{(1)}(k) = Wx^{(1)}(k) + (1-W)x^{(1)}(k-1) \quad k=2,3,\dots,n \quad (48)$$

对于制造设备在样本数据内各个监测间隔时点 k 上($k=1,2,\dots,n$)的最优 W 值, 可通过遗传迭代算法, 求出系数 $W \in \{0,1\}$ 的最优预测值 $\hat{x}^{(0)}(k)$, 得到最优生成系数 W 值, 动态拟合脆弱性 V 与 W 值, 得到混流装配系统的脆弱性单元值 (V_1, V_2, \dots, V_n) , 计算它们的相关系数 CR(Correlation coefficient), 分析线性相关性, 拟合分析生成系数 W 与脆弱性 V 之间的关系, 将样本外监测间隔时点的制造单元脆弱性值 $(V_{n+1}, V_{n+2}, \dots, V_{n+m})$ 代入式(50)拟合出灰色模型的动态生成系数 W 值 $(W_{n+1}, W_{n+2}, \dots, W_{n+m})$ 。其中 n 为样本内测试数据的序号, m 为样本外有待预测数据的序号。

$$CR_{wv} = \frac{\sum_{k=1}^n (W_k - \bar{W})(V_k - \bar{V})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (W_k - \bar{W})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (V_k - \bar{V})^2}} \quad (49)$$

$$W = f(V) = \alpha V + \beta \quad (50)$$

利用拟合得到的 W 值, 代入 FRGM 模型, 得到基于脆弱性的 VFRGM 预测模型, 用来动态循环地预测混流装配系统的内各制造单元和设备的健康状态的样本预测值 $(\hat{x}^{(0)}(n+1), \dots, \hat{x}^{(0)}(n+m))$ 。将制造单元的健康状态预测值作为混流装配系统预知维护规划的信息输入, 为制造系统的预知性维护提供科学有效的决策依据。

(3) 脆弱性是复杂系统的固有属性, 与系统的结构特性有关, 由于混流制造系统内各设备、单元之间存在各种复杂关系, 某个单元发生故障时可能导致其他单元发生故障甚至导致整个系统崩溃, 如何衡量各种设备、单元之间脆弱性联系的强弱, 量化他们之间的脆弱性波动是作者们需要继续深入研究的内容。

参 考 文 献

- [1] DENG Y, MAHADEVAN S, ZHOU D. Vulnerability assessment of physical protection systems: A bio-inspired approach[J]. International Journal of Unconventional Computing, 2015, 11: 227-243.
- [2] DESMIT Z, ELHABASHY A E, WELLS L J, et al. Cyber-Physical vulnerability assessment in manufacturing systems[C]// The , North American Manufacturing Research Conference. 2016.
- [3] DESMIT Z, ELHABASHY A E, WELLS L J, et al. An approach to cyber-physical vulnerability assessment for intelligent manufacturing systems[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43: 339-351.
- [4] YIN H, LI B, ZHU J, et al. Measurement method and empirical research on systemic vulnerability of environmental sustainable development capability[J]. Sustainability, 2014, 6(12): 8485-8509.
- [5] KIZHAKKEDATH A, TAI K, SIM M S, et al. An agent-Based modeling and evolutionary optimization approach for vulnerability analysis of critical infrastructure networks[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [6] CAVDAROGLU B, HAMMEL E, MITCHELL J E, et al. Integrating restoration and scheduling decisions for disrupted interdependent infrastructure systems[J]. Annals of Operations Research, 2013, 203(1): 279-294.
- [7] AGUDELO C A R, URIBE O D B, PÁEZ C A. The vulnerability of agricultural and livestock systems to climate variability: using dynamic system models in the Rancheria upper basin (Sierra Nevada de Santa Marta) [J]. Eco Mont-journal on Protected Mountain Areas Research, 2015, 7(2): 50-60.
- [8] KJØLLE G H, UTNE I B, GJERDE O. Risk analysis of critical infrastructures emphasizing electricity supply and interdependencies[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 105(3): 80-89.
- [9] DAWSON R J, WANG M. An agent-based model for risk-based flood incident management[J]. Natural Hazards, 2011, 59(1): 167-189.
- [10] ZIO E, FERRARIO E. A framework for the system-of-systems analysis of the risk for a safety-critical plant exposed to external events[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 114(1): 114-125.
- [11] WANG S L, YUE X. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems[J]. Application Research of Computers, 2014, 51(1): 328-337.
- [12] ALBINO V, GARAVELLI A C. A methodology for the vulnerability analysis of just-in-time production systems[J]. International Journal of Production Economics.

- 1995, 41: 71-80.
- [13] BALASUNDARAM N. The value relevance of accounting information and its impact on market vulnerability: a study of listed manufacturing companies in sri lanka[J]. Social Science Electronic Publishing, 2014, 4(18): 102-112.
- [14] KHAKZAD N, GELDER P V. Vulnerability of industrial plants to flood-induced natechs: a bayesian network approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 169: 403-411.
- [15] KÓCZA G, BOSSCHE A. Application of the integrated reliability analysis system[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1999, 64: 99-107.
- [16] 柳剑, 张根保, 李冬英, 等. 基于脆性理论的多状态制造系统可靠性分析[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(1): 155-164.
- LIU Jian, ZHANG Genbao, LI Dongying, et al. Reliability analysis for multi-state manufacturing system based on brittleness theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(1): 155-164.
- [17] 高贵兵, 岳文辉, 张人龙. 基于状态熵的制造系统结构脆弱性评估方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(10): 2211-2220.
- GAO Guibing, YUE Wenhui, ZHANG Renlong. Structural vulnerability assessment method of manufacturing systems based on state entropy[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2017, 23(10): 2211-2220.
- [18] GAO G B, YUE W H, OU W C. A vulnerability evaluating method applied to manufacturing systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 180, 255-265.
- [19] SCHÖN T, GUSTAFSSON F, NORDLUND P J. Marginalized particle filters for mixed linear/nonlinear state-space models[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2005, 53(7): 2279-2289.
- [20] LEVITIN G. The universal generating function in reliability analysis and optimization[M]// The universal generating function in reliability analysis and optimization. Springer, 2005.
- [21] LISNIAŃSKI A. L z-transform for a discrete-state continuous-time Markov process and its applications to multi-state system reliability[M]// Applied Reliability Engineering and Risk Analysis: Probabilistic Models and Statistical Inference. John Wiley & Sons, Ltd, 2012: 79-95.
- [22] CHIUCHIÙ D, PIGOLOTTI S. Mapping of uncertainty relations between continuous and discrete time[J]. Physical Review E, 2018, 97(3): 032109.
- [23] TEN C W, LIU C C, MANIMARAN G. Vulnerability assessment of cybersecurity for SCADA systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1836-1846.
-
- 作者简介: 高贵兵, 男, 1974 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为制造系统建模、仿真, 生产物流仿真、优化。
E-mail: gaoguibing@163.com