

DOI: 10.3901/JME.2023.18.080

基于设计过程复杂性理论的功能自愈设计 过程模型研究^{*}

张 鹏^{1,2} 苏云鹏^{1,2} 刘卫胜^{1,2} 聂子丰^{1,2} 罗 杨^{1,2}

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300130;

2. 河北工业大学国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心 天津 300130)

摘要: 人工自愈理论类比生物体自愈过程, 为降低系统设计过程复杂性提供了新思路。目前人工自愈理论研究多集中在结构和参数层面, 功能层面人工自愈理论的相关研究较少。将人工自愈理论与设计过程复杂性理论结合, 提出基于设计过程复杂性的功能自愈设计过程模型, 功能自愈是对人工自愈理论中结构自愈与参数自愈的有益补充, 旨在功能层面降低系统复杂性, 提高系统自愈能力; 在概念设计阶段, 通过功能元-功能模型的转化方式, 应用 TRIZ 中的功能等级算法, 对系统功能按类型进行划分, 依据功能等级进行排序, 提出功能自愈优先级判别标准; 通过在系统中构建功能周期, 提高系统功能实现概率, 并在功能周期中为目标功能赋予功能自诊断, 功能自恢复的能力扩展功能周期, 进一步提高系统功能实现概率, 与系统结构自愈参数自愈结合, 提高系统人工自愈能力, 最后通过智能光伏除尘系统设计过程验证功能自愈理论的科学性。

关键词: 设计过程复杂性; 人工自愈; 功能自愈; 功能周期

中图分类号: TH122

Research on Functional Self-recovery Design Process Based on Design-centric Complexity Theory

ZHANG Peng^{1,2} SU Yunpeng^{1,2} LIU Weisheng^{1,2} NIE Zifeng^{1,2} LUO Yang^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2. National Technology Innovation Method and Implementation Tool Engineering Technology Research
Center of Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract: Compared with the biological self-recovery process, the artificial self-recovery theory provides a new perspective for reducing the complexity of the system design process. At present, the research on artificial self-recovery theory mostly focuses on the structural and parametric levels, and there are few related researches on the artificial self-recovery theory at the functional level. Combining artificial self-recovery theory with design-centric complexity theory, a functional self-recovery design process model based on design-centric complexity theory is proposed. Functional self-recovery is a beneficial supplement to structural self-recovery and parametric self-recovery in artificial self-recovery theory, aiming at reducing system complexity and improving system self-recovery ability at functional level. In the conceptual design stage, the system functions are classified by types through the transformation method of function unit-function model and the system function rank algorithm in TRIZ. Relying on the sorting of functional rank, a criterion for determining the priority of function self-recovery is proposed. By constructing a function period in the system, the probability of system function realization is improved, and the target function is given function self-diagnosis and function self-recovery ability in the function period to extend the function period and further improve the system function realization probability. Combining functional self-recovery with structural self-recovery and parametric self-recovery, the artificial self-recovery ability of the system is improved. Finally, the scientific nature of the functional self-recovery theory is verified through the design process of the intelligent photovoltaic dust removal system.

Key words: design-centric complexity; artificial self-recovery; functional self-recovery; functional period

^{*} 国家自然科学基金(51975181)和科技部创新方法工作专项(2020IM02050)
资助项目。20221025 收到初稿, 20230520 收到修改稿

0 前言

随着工程领域对复杂系统的研究不断深入, 复杂系统智能化水平进入自维护, 自适应和自进化的高级智能发展阶段。系统自愈化成为高级智能化发展的重要研究方向, 因此高金吉院士提出了人工自愈理论^[1]。

人工自愈理论在故障机理和风险分析的基础上, 将生物体特有的自愈机制赋予复杂系统, 对故障的出现进行预防或消除, 确保系统不产生或在运行过程中自行消除故障。改变依靠故障停机和完全依赖人力修复机器的传统方式, 赋予机器自发作用的、维持稳定状态的能力^[1]。人工自愈理论是研发自主健康装备的理论基础^[2], 在人工自愈理论指导下可创造出具有自愈功能的新概念复杂系统, 减少复杂系统对人的依赖程度, 具有广阔的应用前景^[3]。

目前的人工自愈理论研究主要集中在结构和参数层面, 以参数调节和结构适应能否维持系统安全运行作为衡量系统实现自愈的标准。复杂系统通常经过功能-结构-参数的逐级映射完成产品设计, 在概念设计阶段从功能层次上降低系统复杂性, 会大大降低系统结构域存在的复杂性以及问题存在的可能^[4]。基于设计过程复杂性理论的功能自愈设计是在概念设计阶段从功能层次实现人工自愈, 当系统出现问题时自行实现由无序到有序的变化, 保证系统稳定运行。功能自愈优先从功能的角度出发, 对系统中问题进行分析。经功能自愈设计后, 可根据不同功能在系统中的价值排序, 尽可能利用复杂系统内资源完成自愈过程, 减少结构和参数层次自愈设计的工作量。将功能自愈补充到人工自愈理论中, 可提供更多层次的视角实现系统自愈过程, 进一步提高系统自愈能力。

1 相关理论研究

1.1 人工自愈理论

随着自愈理念的迅速发展, 高金吉院士在德国达姆施塔特大学 ROLF 教授提出的机电系统五块论基础上进行了扩展, 考虑仿生设计将人和动物的自愈功能赋予机器。改变依靠故障停机或者人为修复机械的传统方式, 模仿人体的自愈机制调控机械系统。通过自诊断预测和主动控制在运行中抑制、消除故障, 或者对系统缺陷自行修复。高金吉院士在归纳总结过往研究后, 正式提出了人工自愈理论。

自愈力包含代偿力、清洁力、修复力、自适应调节力、应激力、自保护力和协同力等^[1]。高金吉提出了基于参数适应的自愈系统和基于结构适应的自愈系统两种机械自愈方法^[1]。尹逊和等^[5]对目前的自愈控制系统进行了归纳总结, 提出了自愈系统具有无人干预、检测与诊断故障、预防抑制与消除故障、知识支撑四个特征。人工自愈理论为当前的复杂系统设计提供了新的思路理念和目标导向。

高金吉^[6]对机泵群实时监测网络和故障诊断专家系统进行了研究, 应用现代信息技术与人工智能实施诊断工程, 随后提出了“故障自愈化”的原理^[7], 希望复杂系统自我监测修复愈合来保证系统的稳定运行。黄立权等^[8]提出了一种转子同频振动的在线消除策略, 通过寻优算法来对振动进行补偿。王庆峰等^[9]对炼油厂催化裂化装置中主风机静叶可调执行机构进行了研究, 提出了一种功能代偿的电液控制系统故障自愈调控方法, 实现了主风机静叶可调执行机构阀位故障的自愈调控。

目前, 自愈理论的研究在在参数和结构层面取得了显著成果, 但在概念设计阶段从功能角度出发使系统实现自愈的研究成果相对较少。在概念设计阶段实现功能层次人工自愈, 是结构和参数层次人工自愈的有益补充。

1.2 设计过程复杂性理论(DCC 理论)

设计过程复杂性(Design-centric complexity, DCC)理论是在概念设计阶段, 研究复杂系统的有效方法。DCC 理论侧重于对问题进行分析, 立足功能层面对复杂系统设计过程中出现的问题进行解决。DCC 理论中, 复杂性是实现功能需求的不确定程度, 表达设计范围与系统范围之间关系的函数, 在给定精度或公差范围内, 确定功能需求的参数后, 系统实现功能需求的概率(公用范围的面积)可以表征系统的复杂性。系统复杂性越高, 系统功能需求的实现概率(以下简称功能实现概率)越低。如图 1 所示。

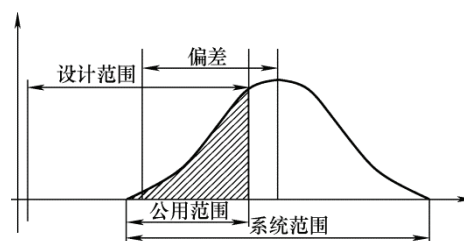


图 1 设计范围与系统范围示意图

DCC 理论中将复杂性按时间分为两大类, 分别为时间相关复杂性和时间无关复杂性, 如图 2 所示。时间无关真实复杂性是指设计时科技水平限制, 引

发功能之间耦合产生的复杂性,时间无关虚构复杂性是指设计者对系统不够了解产生的复杂性。时间相关组合复杂性是指系统范围随着时间推移持续远离设计范围的复杂性,时间相关周期复杂性是指在一个有限周期内,系统范围能够重回设计范围,系统功能实现概率周期性恢复的复杂性^[10]。故障在 DCC 理论中可理解为因时间相关复杂性引起,系统功能实现概率无法满足系统功能需求的现象。

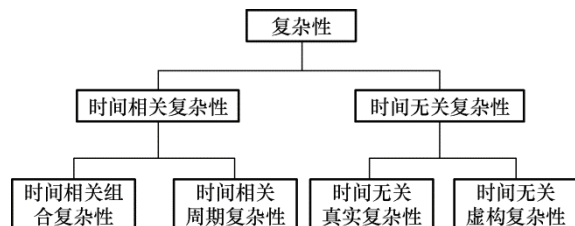


图2 复杂性分类

将 DCC 理论与人工自愈理论结合,扩充人工自愈理论至功能域,可扩展人工自愈理论的应用范围,从更多的层面实现系统的自愈过程。

1.3 复杂系统相关研究

DCC 理论提供了对复杂系统分析的方法,但是缺少解决问题的工具。针对于此,国内外的学者都进行了大量的研究工作。CAVIQUE 等^[11]对时间相关组合复杂性对系统产生的影响进行分析,提出了设计矩阵在模糊环境中计算功能需求的分布,从而计算系统在一定时间内功能实现概率变化的设计框架,以预测系统结构域的变化情况。从功能域出发,对结构域问题进行分析与解决,是研究复杂系统的关键方法。张鹏等^[12]利用 TRIZ 理论在复杂系统中建立功能周期,将系统中存在的组合复杂性转换为周期复杂性,探索出了降低系统复杂性的新途径。通过 TRIZ 理论,在系统中建立功能周期,是降低系统复杂性的有效方法。JIANG 等^[13]提出了将功能分解应用在程序设计当中,以此降低系统整体编程,设计难度。功能分解是研究复杂性科学的重要工具,是确定原理解的有效方法。于菲等^[14]对复杂系统功能模型进行了研究,提出了计算功能模型中不同元件功能等级的方法,以确定不同元件对复杂系统的影响程度。通过功能模型对复杂系统进行分析,可以得出不同元件的作用关系,确定系统中关键元件,提高设计效率。

在人工自愈理论的指导下,通过 DCC 理论对复杂系统问题进行分析,在系统中建立功能周期,借助功能分解,功能模型等方法从功能域出发,对系统问题进行解决,可从更多角度将人工自愈理论应

用到复杂系统中,实现装备自主健康。

2 基于设计过程复杂性理论的功能自愈设计原理

基于 DCC 理论的功能自愈设计在概念设计阶段从功能层次实现人工自愈。功能自愈以降低系统复杂性,提高系统功能实现概率,维持系统功能运行为设计目标,通过建立功能周期的方式,按照功能重要性排序的原则将功能自诊断集合,功能自恢复集合融入到功能周期中,对系统功能周期进行扩展,为系统中功能赋予功能自诊断,功能自恢复的能力。

2.1 功能周期的确定与扩展

建立功能周期是复杂系统实现功能自愈的关键分析环节。在 DCC 理论中,功能周期定义为在基础周期内重复的一组功能需求^[4]。功能周期未必是时间周期,而是一组相同的功能。功能周期是一个稳定系统必备的特质,其普遍存在于自然系统和技术系统之中。DCC 理论提出:求取原理解后,对系统复杂性进行提取,在系统中建立功能周期,可以将组合复杂性转换为周期复杂性。使系统在每个功能周期起点返回初始状态,有效降低系统复杂性,调节系统趋于稳定。

在系统中建立功能周期,一方面可以降低系统复杂性,另一方面可以直观得到系统中全部功能的执行序列,如图 3 所示。

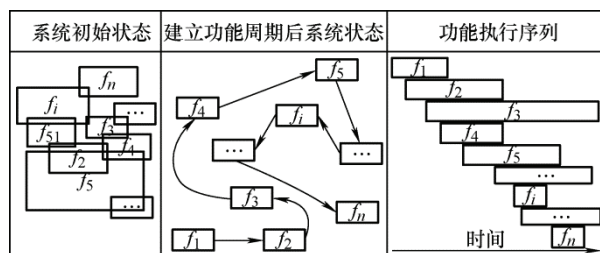


图3 功能周期与功能执行序列

通过系统功能执行序列,分析功能自诊断集合及功能自恢复集合融入功能周期时在序列中的位置,对功能周期进行扩展。若希望复杂系统实现功能自愈,其系统必须建立合理的功能周期。

2.2 自愈优先级的确定

确定系统基本功能并将系统功能按功能等级排序是功能自愈高效实现的必备分析环节。相较于参数和结构,功能有独特的分类标准与价值评价体系。

功能周期所包含的功能中,只有一类是主要功能或称基本功能,基本功能是系统存在的目的。第

二类为辅助功能，辅助功能是支持基本功能并使之实现的功能^[15]。不同类别的功能对系统功能实现概率影响不同，基本功能的故障会使系统当前功能实现概率骤降，直接低于系统需求的最小功能实现概率，辅助功能故障会使得系统功能实现概率发生漂移。对系统中全部功能增加自诊断，自恢复功能，稳定系统功能实现概率，是设计阶段的理想化结果。但复杂系统通常由多个功能组成，对系统中全部功能增加自诊断，自恢复功能会导致设计成本及后期制造阶段难度显著提高。因此，要对目标系统功能进行排序，依据功能类别及功能等级排序分配自愈资源，自愈优先级排序如图 4 所示。

功能分类/ 功能等级排序	自愈优先级 排序	功能故障系统功能实现概率变化
基本功能/1	1	
基本功能/2	2	
.../...	⋮	⋮
辅助功能n-1	n-1	
辅助功能n	n	

图 4 自愈优先级排序

2.3 功能自诊断设计原理

功能自诊断是判断何时进行功能自愈的实施环节。功能自诊断以在概念设计阶段赋予系统感知复杂性变化的能力为设计目标，主要有直接功能自诊断与间接功能自诊断两种形式。功能自诊断负责对系统中目标功能进行监测诊断，感知系统功能实现概率变化。确定系统自愈优先级后，可根据系统功能需求为系统中功能增加自诊断功能，系统增加的全部自诊断功能构成功能自诊断集合，如图 5 所示。

直接功能自诊断对功能自身进行检测，通过功能实现概率的变化情况，判断功能是否正常运行。功能表现为系统具有的转换物质，信号，能量或其他物理量的特性^[15]。因此可以通过检测目标功能属性参数的变化推断系统功能实现概率的改变。

间接功能自诊断是指目标功能不能被直接检测或检测难度较高时采取的方案。由于复杂系统功能之间存在耦合，某一个功能故障时会引发连锁反应，导致一系列功能的设计过程复杂性升高，体现出功能的传递性。因此，间接功能自诊断将功能的传递性加以利用，根据系统中其他功能的功能实现概率变化情况判断目标功能是否出现问题。

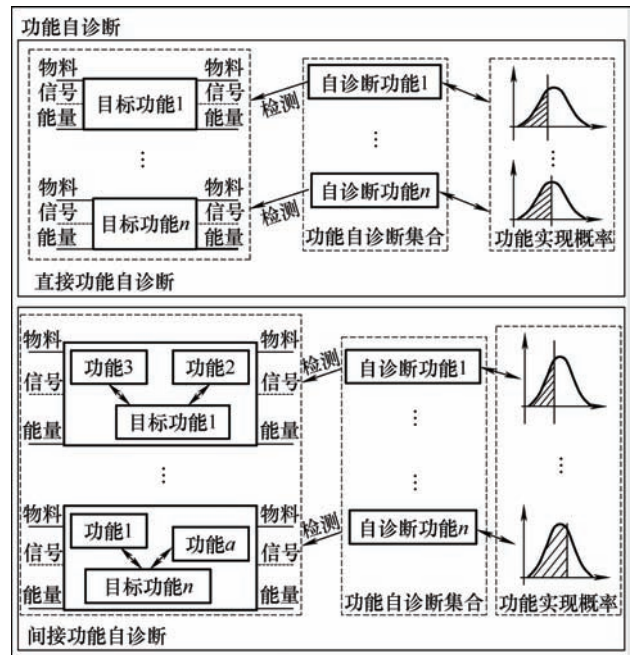


图 5 功能自诊断形式

2.4 功能自恢复设计原理

功能自恢复是实现功能自愈的具体实施环节。功能自恢复以在概念设计阶段赋予系统自行降低复杂性的能力为设计目标。主要有离线功能自恢复与在线功能自恢复两种方案。功能自恢复负责对系统中目标功能调节恢复，提高系统功能实现概率，维持系统稳定运行。确定功能自诊断集合后，可根据集合中的自诊断功能为系统中功能增加自恢复功能，系统增加的全部自恢复功能构成功能自恢复集合。

离线功能自恢复是指系统中资源无法满足系统功能需求，通过暂停系统运行，引入新资源对目标功能进行调节，使系统功能实现概率恢复至正常水平的设计方法。

在线功能自恢复是指在不向系统中引入新资源的情况下，通过系统中已有功能的在线变化，维持系统的正常运行。在线功能自恢复主要有两种形式：① 剖析目标功能发生故障的原因，分析能否利用系统中已有原理解新增功能或改变功能执行的顺序对故障进行预防与消除；② 预测目标功能产生的作用结果，推演其能否通过改变系统内其他功能执行的程度或功能执行的顺序进行代替。

3 基于设计过程复杂性理论的功能自愈设计过程

为了完成在概念设计阶段，从功能角度实现系统自愈的目标，将设计过程复杂性理论与人工自愈

理论结合,提出了基于设计过程复杂性理论的功能自愈设计过程模型。

基于设计过程复杂性理论的功能自愈设计过程模型共有五步。首先,根据用户需求进行系统功能分解并求取功能原理解;其次,判断系统每个功能设计过程复杂性并对复杂性高的功能进行 TRIZ 转换,确定初步功能周期;再次,运用功能元-功能模型转化算法将功能分解结果转化为与其对应的功能

模型;之后,依据功能等级算法确定功能模型不同元件的功能等级,通过元件与功能的对应关系,确定功能自愈的优先级;最后,根据功能自愈优先级与系统功能需求,确定功能自诊断集合和功能自恢复集合,并将功能自诊断集合、功能自恢复集合融入功能周期中,形成具有功能自愈能力的新功能周期,基于设计过程复杂性理论的功能自愈设计过程模型如图 6 所示。

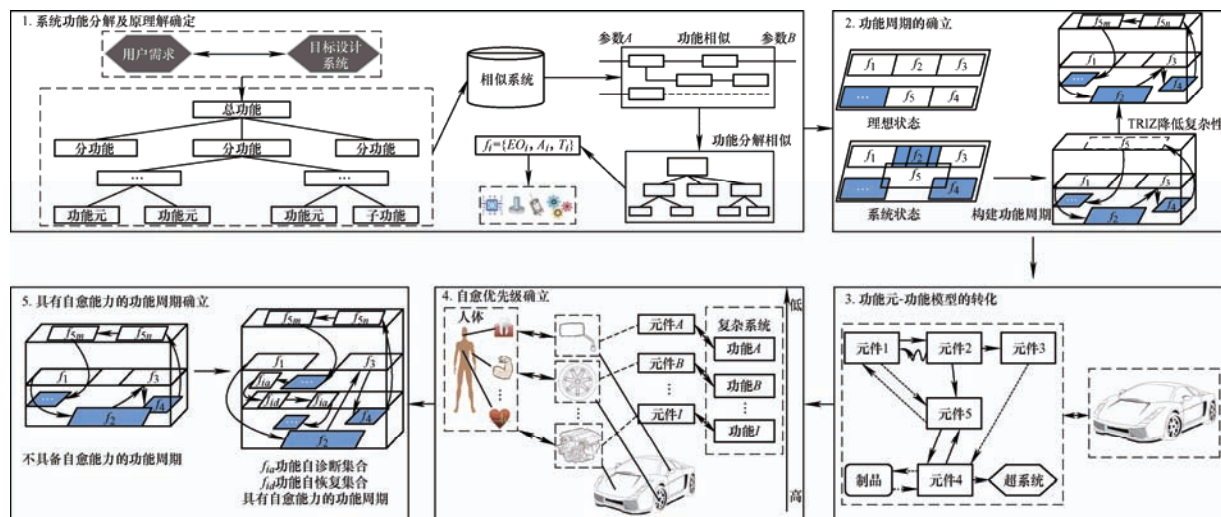


图 6 基于设计过程复杂性理论的功能自愈设计过程模型

3.1 系统功能分解及原理解确定

功能分解指将复杂系统总功能分解直至得到功能元的分解流程。功能元是已有零件、模块、过程的抽象,是确定原理解的最小单位。功能元通过“动词(Verb)+名词(Noun)”的形式表达作用(Act)和被作用对象(Target)。功能元可以表达为

$$V + N \Rightarrow A + T \quad (1)$$

式中, V 为动词, N 为名词, A 为作用, T 为被作用对象。对功能元求原理解可以得到作用 A 的执行对象(Execution object, EO), 因此对功能元求原理解后可将功能元扩展为

$$f = \{EO, A, T\}$$

对功能元求原理解得出的结果通常不唯一, 方案筛选工作量较大。为了提高设计效率可以引入相似系统中对应的功能元原理解作为参考。归纳总结不同系统中的相似性共有以下形式: 几何相似性、结构相似性、功能相似性和过程相似性^[16]。通过不同相似性, 寻找不同类型相似系统, 以确定系统原理解, 如图 7 所示。

通过相似系统寻找目标功能对应的原理解时,

首先考虑目标系统的总功能, 是否能通过总功能找到相似系统。若无法找到, 则将总功能分解, 通过分功能寻找相似系统。若仍未找到, 则再次分解, 直至分解到功能元, 通过功能元寻找相似系统, 分析相似系统的原理解, 如图 8 所示。对相似系统功能信息进行提炼, 通过相似系统中的作用与被作用对象 “ $A_{similar} + T_{similar}$ ” 所对应的执行对象 $EO_{similar}$, 推测目标功能元的执行对象 EO_i 。

依次通过总功能、分功能、直至功能元寻找相似系统求得的 EO_i 基本可以实现目标系统的功能需求, 以加快求取功能元原理解的速度。

对功能元求原理解所得到的 EO 必然是系统内部元件, 对所有功能元求原理解后得出的 EO 组成了复杂系统本身。借鉴相似系统, 依次对所有功能元求原理解, 推导每个功能元对应的 EO_i , 以此得到系统全部功能元对应的原理解, 如式(2)所示

$$\begin{aligned} V_i + N_i &\Rightarrow A_i + T_i \\ f_i &= \{EO_i, A_i, T_i\} \end{aligned} \quad (2)$$

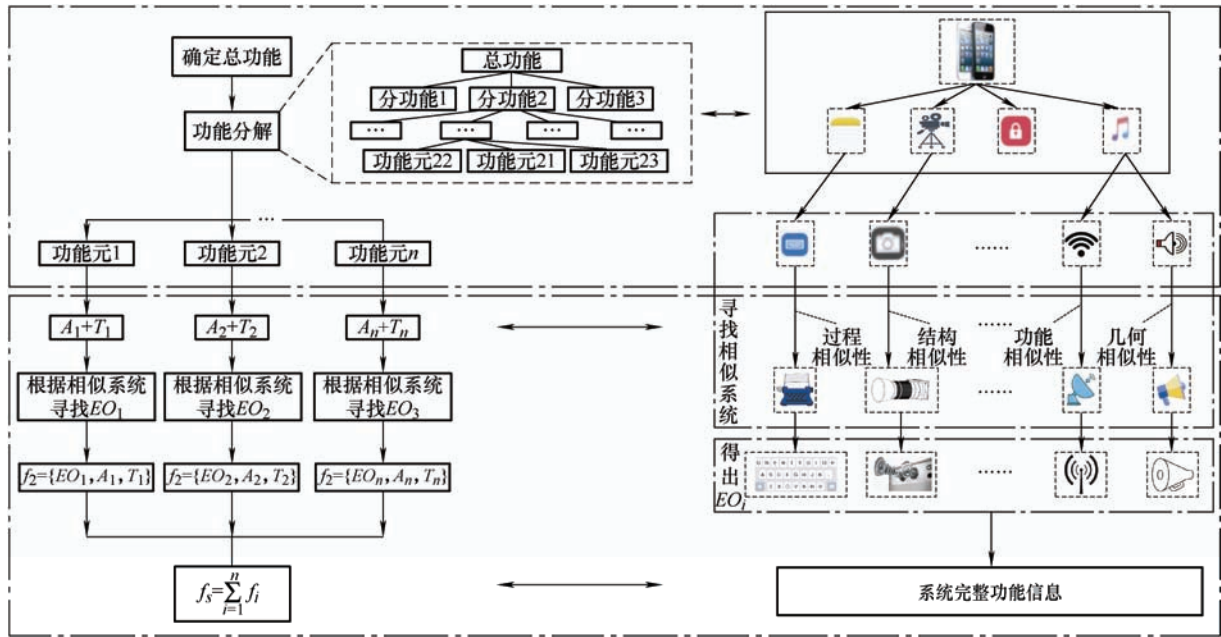


图7 基于相似系统的原理解确定流程

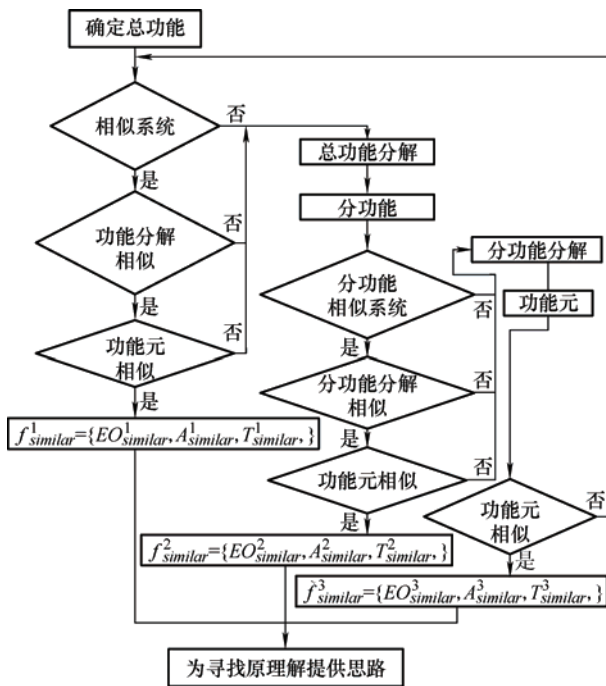


图8 相似系统功能元寻找流程

系统中所有功能元原理解的集合 f_s 可以表达为式(3)。

$$f_s = \sum_{i=1}^n f_i \quad (3)$$

对系统功能分解得到的所有功能元求原理解后，即可分析系统中不同功能元之间的耦合关系，建立功能周期，一方面降低系统复杂性，另一方面表达功能元之间先后作用关系。

3.2 初步功能周期的确立

功能周期建立过程中需要对系统的复杂性特征进行提取，通过复杂性特征寻找对应的功能解。如果系统复杂性较高，则将系统的复杂性特征转换为标准问题，通过 TRIZ 寻找相应的功能解，根据功能解的关系获取系统功能周期。通过经验或通过 TRIZ 辅助确立功能周期共有以下步骤^[12]，如图 9 所示。

(1) 首先对系统复杂性特征提取，将系统中存在的问题 P 转化为系统存在的复杂性 C ，该过程表示为

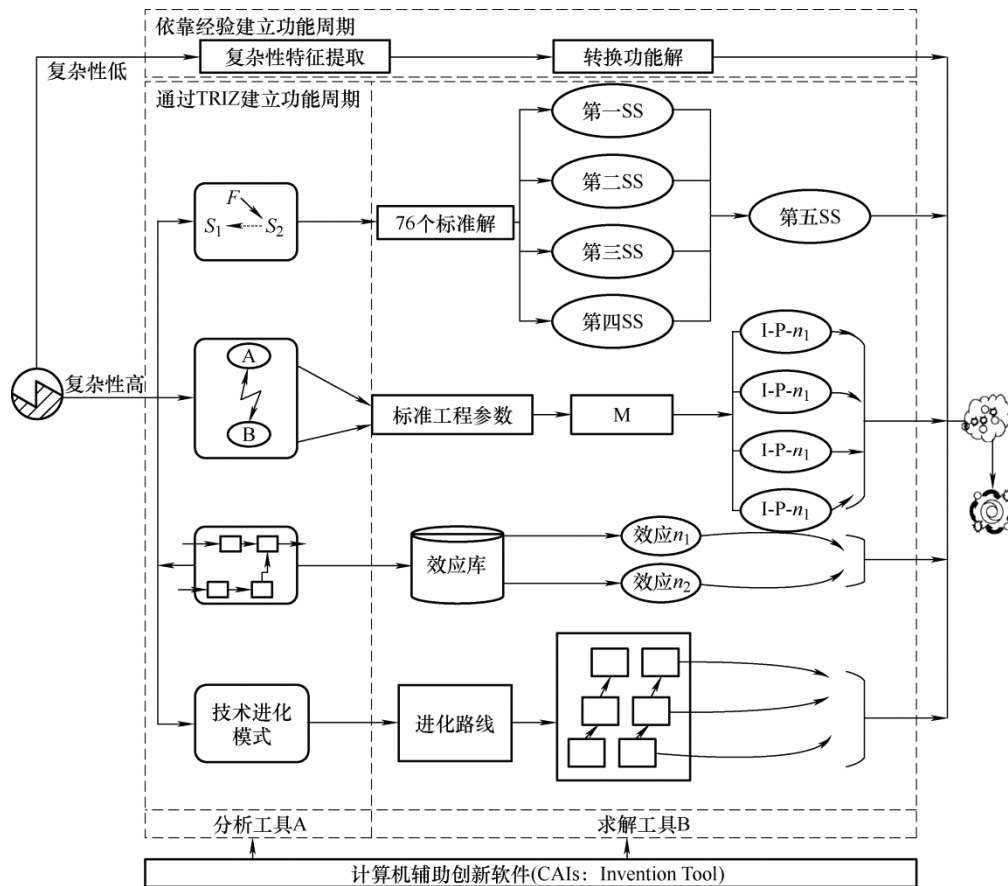
$$P \xrightarrow{\alpha} C$$

式中， P 代表系统中存在的问题； C 表示系统中存在的复杂性， α 为系统复杂性特征提取。

(2) 对系统复杂性 C 进行分析，选用 TRIZ 中复杂性分析工具 A(物质-场、39 个标准工程参数、功能分析、技术进化模式等)中一种或几种来分析系统中存在的复杂性。

(3) 针对系统中的复杂性，根据选择的分析工具 A，选择复杂性求解工具 B(76 个标准解、冲突求解矩阵、效应、技术进化路线)得到功能解 f_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n, m$ 代表系统含有的功能个数， n 代表减小复杂性功能解个数)。

(4) 根据 n 个功能解确定系统复杂性减小的功能周期。当系统功能解满足系统功能需求时，将功能解直接转化为功能周期。如果不能满足系统需求，但系统复杂性已经降低，则对系统中存在的复杂性

图 9 功能周期确立流程^[12]

进行再次提取,寻找其功能解,依次类推,直到系统的功能需求满足为止,功能周期表示为

$$f = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_i, \dots, f_n]$$

通过建立目标系统功能周期,对系统复杂性降低后,需要建立系统功能模型,将功能周期蕴含的功能信息通过功能模型进行表达。

3.3 功能元-功能模型的转化

功能周期中只包含功能元之间抽象的相互作用关系,因此需要将功能元转化为系统整体的功能模型,表达元件(原理解)、超系统和制品之间具体的相互作用关系,以此提高系统分析效率。

通过式(1)得出的被作用对象 T 可能是系统内部元件也可能是系统外部资源,功能元求原理解后得到只是系统内所有元件的作用关系,系统中属于外部资源的制品与超系统对元件的作用关系尚未找到。结合外部资源分析找到系统中缺失的制品与超系统,以建立功能模型。将扩展信息集合用 f'_s 表示

$$f'_s = \sum_{i'=1}^{n'} f'_i \quad (4)$$

$$f'_i = \{EQ'_i, A'_i, T'_i\} \quad i = 1, 2, \dots, n' \quad (5)$$

结合式(2)、(3)得出的系统内元件作用关系集合

f_s , 总结系统功能模型所需的全部功能信息 f

$$f = f_s + f'_s = \sum_{i=1}^n f_i + \sum_{i'=1}^{n'} f'_{i'}$$

在建立功能模型的过程中,可以通过功能元求原理解时借鉴的相似系统的功能模型辅助建立当前系统功能模型。此外,在建立功能模型过程中,若对不同功能元求原理解得到的 EO_i 图形化表达时出现冲突,则对功能元重新求解,选择合适的元件,建立系统功能模型,如图 10 所示。

建立系统功能模型后,可通过功能等级算法,计算系统中不同元件的功能等级,辅助确定系统中功能的自愈优先级。

3.4 功能自愈优先级的确定

功能等级是功能价值评价中常用的标准,等级的高低与功能模型中元件、制品、超系统的连接关系有关,如图 11 所示。

经国内学者^[14, 17]不断发展完善,功能等级定义规则如下。

(1) 若元件直接作用在制品上,则其作用的功能等级为基本功能,用 A_0 表示。

(2) 若元件作用在产生基本功能的元件上,则其功能等级为第一级辅助功能,用 A_1 表示。

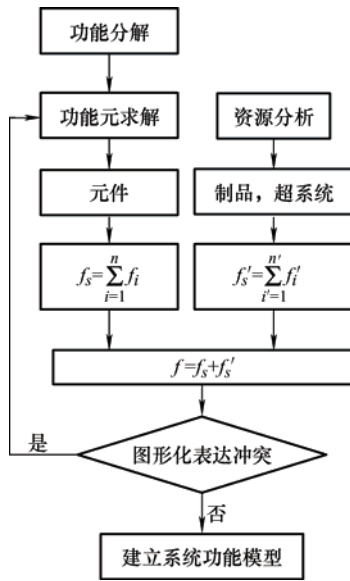


图 10 功能模型的构建流程

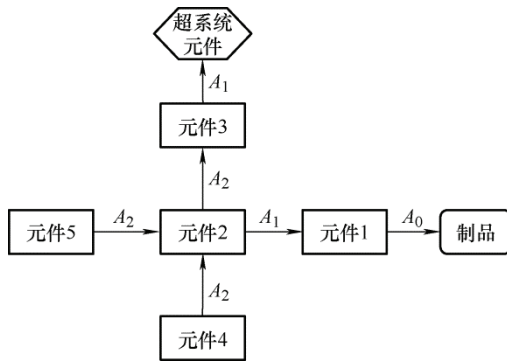


图 11 功能等级数值示意图

(3) 若元件作用在产生 $i-1$ 级别辅助功能的元件上，则其作用的功能等级是第 i 级辅助功能，用 A_i 表示。

(4) 元件与超系统作用时，其功能等级为 A_1 。

(5) 设系统中功能等级最低的功能，其值为 1。

(6) $\text{RANK}(A_{i-1}) = \text{RANK}(A_i) + 1$ 。

(7) $\text{RANK}(A_0) = \text{RANK}(A_1) + 2$ 。

(8) 对于作用多个功能元件的功能，其等级为所有作用之和。

计算功能模型中所有元件的功能等级并按功能等级排序后，可根据功能元求原理解时元件与功能的对应关系，对系统中的功能进行排序，确定系统功能自愈的优先级。

3.5 具有自愈能力新功能周期的确立

计算系统全部功能的功能等级，根据系统功能需求，分析出系统需要进行功能自愈设计的功能后，即可确定功能自诊断与功能自恢复集合。将系统功能自诊断与功能自恢复集合融入功能周期，扩展 f_i 为 f_i'

$$f_i' = (f_{id}, f_{ia}, f_i)$$

式中 f_{id} 为 f_i 的自诊断功能， f_{ia} 为 f_i 的自恢复功能。

目标系统具有自愈能力的新功能周期为

$$f' = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_i', \dots, f_n)$$

功能周期扩展后，再次对系统中复杂性进行提取，如果系统中复杂性过高，则利用 TRIZ 变换寻找其功能解，通过功能解建立其功能周期。在新的功能周期中功能 f_i 被赋予了功能自诊断，功能自恢复能力。

4 工程实例

太阳能发电技术，也称光伏发电技术，其在国内外得到了越来越广泛的应用。截至 2020 年底，我国太阳能并网装机容量达 253 GW，光伏发电总量达 2 605 亿 kWh^[18]。积尘是影响太阳能电池板无法转换电能的重要原因。EL-NASHAR 等^[19]发现积尘会导致光伏板透光率月均下降 10%，一年的输出功率降低 70%。同时积尘会导致太阳能电池板的温度升高，温度每上升 1 °C，其发电量就降低 0.5%^[20]。随着时间推移，灰尘在光伏板表面堆积，系统功能实现概率降低，需要进行功能自愈设计。

4.1 智能光伏除尘系统功能分解及原理解确定

对系统进行功能分解，智能光伏除尘系统的主要功能为产生电能，其功能分解如图 12 所示。

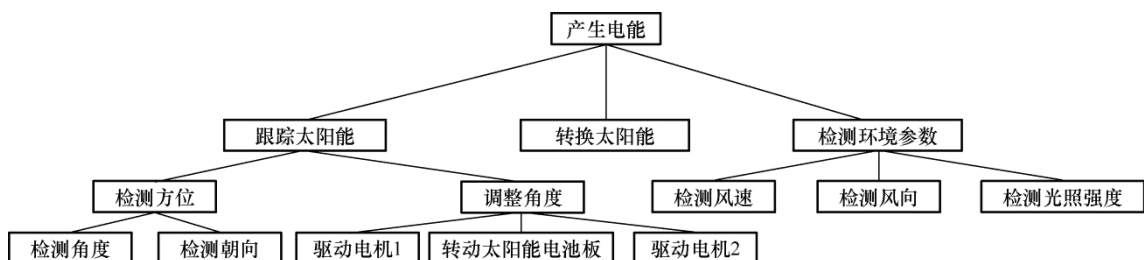


图 12 智能光伏除尘系统功能分解

功能分解后通过式(2),对功能元求原理解,分析每个功能元的作用 A_i 和被作用对象 T_i ,寻找执行对象 EO_i 。为了提高求解效率,寻找与智能光伏除尘系统相似的系统,经过对比寻找发现智能光伏除尘系统与市场上已有的太阳能跟踪系统具有功能相似性与结构相似性,因此参考太阳能跟踪系统中的

功能原理解辅助智能光伏除尘系统原理解确定。

太阳能跟踪系统功能分解如图 13 所示,太阳能跟踪系统中不包含检测风速,检测风向功能元,分别对这两个功能元求原理解,风速传感器、风向传感器可以直接满足该需求。最终智能光伏除尘系统功能分解后,求取的原理解结果如表 1 所示。

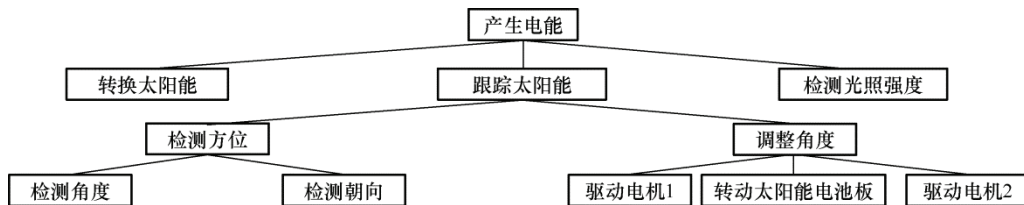


图 13 太阳能跟踪系统功能分解

表 1 智能光伏除尘系统功能集 f_s

功能集	i	V_i	N_i	EO_i 求解来源	EO_i	A_i	T_i
f_s	1	检测	风速	直接求解	风速传感器	检测	风速
	2	检测	风向	直接求解	风向传感器	检测	风向
	3	检测	光照强度	太阳能跟踪系统	光强传感器	检测	光强
	4	驱动	电机 1	太阳能跟踪系统	控制系统	驱动	电机 1
	5	驱动	电机 2	太阳能跟踪系统	控制系统	驱动	电机 2
	6	检测	角度	太阳能跟踪系统	姿态传感器 1	检测	电池板角度
	7	检测	朝向	太阳能跟踪系统	姿态传感器 2	检测	电池板朝向
	8	转换	太阳能	太阳能跟踪系统	太阳能电池板	吸收	太阳能
	9	转动	太阳能电池板	太阳能跟踪系统	电机 1, 2	转动	太阳能电池板

4.2 智能光伏除尘系统初步功能周期的确立

得出系统原理解后,根据系统功能分解结果,分析系统功能重复执行的需求,构建功能周期。该功能周期无自愈能力,复杂性较低,可以通过经验直接建立智能光伏除尘系统的初步功能周期。结合表 1 确定系统当前功能周期为

$$f = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_9, f_7, f_6, f_8)$$

系统工作原理如下。首先智能光伏系统执行检测风速(f_1)、检测风向(f_2)功能,当检测到环境风速不会对装置造成损坏后,执行检测光强(f_3)功能,随后驱动电机 1(f_4)与电机 2(f_5)转动太阳能电池板(f_9)调整系统姿态,使系统对准最大光强点,当系统检测朝向(f_7)与检测角度(f_6)功能检测到系统转动到指定姿态后,停止系统转动,执行转换太阳能功能(f_8)。

4.3 智能光伏除尘系统功能元-功能模型的转化

得到功能周期后,可以得到系统中执行对象 EO_i 的抽象先后作用关系,但缺少制品、超系统对

系统内元件的作用关系。因此对系统进行资源分析,找到缺失的制品与超系统,根据式(4)及式(5)推测系统中 f'_s 的执行对象 EO'_i 及其作用对象 T' ,智能光伏除尘系统所处环境中超系统资源为“风能”“太阳能”,风能与太阳能的主要作用对象为太阳能电池板。系统制品为“电能”,产生电能的元件为太阳能电池板。归纳分析得出的 f'_s 集合如表 2 所示。

得出系统中缺失的制品和超系统后,结合表 1 得出的功能集合 f_s ,功能周期 f ,归纳全部执行对象 EO 与作用对象 T 之间的具体作用关系,建立系统功能模型。由于功能分解后,求取原理解时借鉴了太阳能追踪系统的原理解,因此借鉴太阳能跟踪系统的功能模型构建智能光伏除尘系统的功能模型,太阳能跟踪系统功能模型如图 14 所示。构建智能光伏除尘系统功能模型过程中,两者功能模型图形化表达高度类似,未出现冲突,直接在智能光伏除尘系统中增加风速、风向传感器元件,补充超系统“风”,“灰尘”对系统的影响,最终智能光伏除尘系统的功能模型如图 15 所示。

表 2 智能光伏除尘系统功能集合 f'_s

功能集	i	V_i	N_i	EO_i	A_i	T_i
f'_s	10	辐射	电池板	太阳能	辐射	太阳能电池板
	11	吹拂	电池板	风	吹拂	太阳能电池板
	12	吸附	电池板	灰尘	吸附	太阳能电池板
	13	产生	电能	太阳能电池板	产生	电能

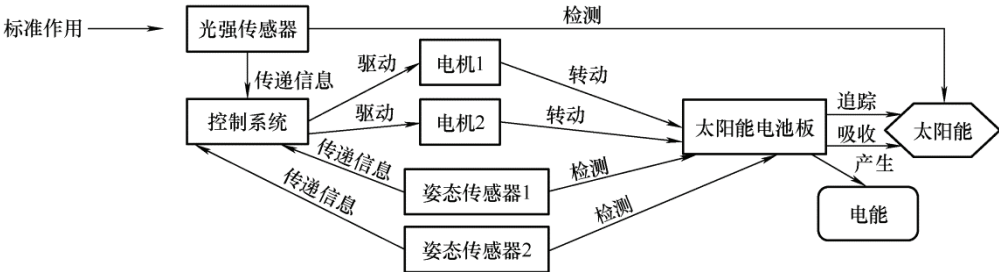


图 14 太阳能跟踪系统功能模型

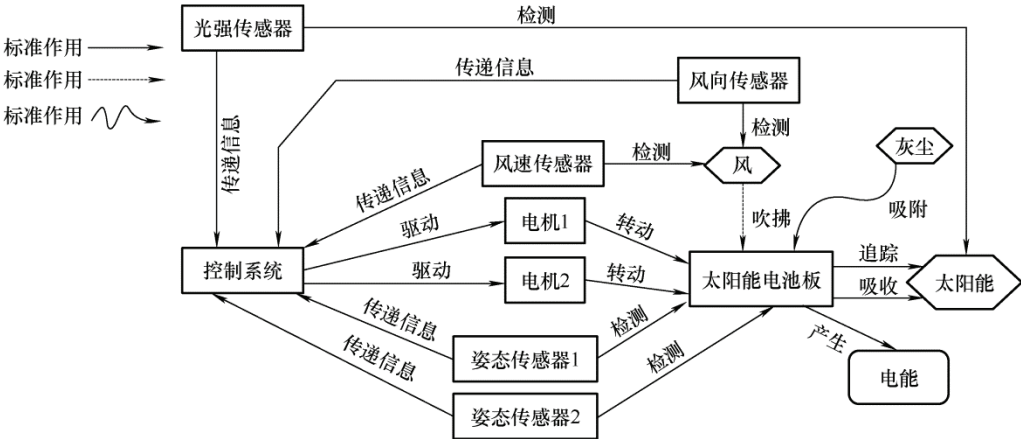


图 15 智能光伏除尘系统功能模型

4.4 智能光伏除尘系统功能自愈优先级的确立

智能光伏除尘系统中元件对应的功能等级排序后如表 3 所示。参考第 3.4 节中的功能等级规则，以太阳能电池板元件为例，太阳能电池板产生制品“电能”，标记功能等级 A_0 ；追踪、吸收超系统资源“太阳能”，标记功能等级为 $A_1 + A_1$ ；所以其功

能等级总和为 $A_0 + A_1 + A_1$ 。因系统中功能等级最低为 A_3 ，所以将 A_3 赋值为 1， A_0 、 A_1 、 A_2 分别赋值为 5、3、2。最终太阳能电池板的功能等级运算结果为 11，因其功能等级计算过程中出现 A_0 ，所以将太阳能电池板元件对应的“转换太阳能”功能列为基本功能，系统中其余功能的功能等级计算过程相同。

表 3 智能光伏除尘系统功能等级排序表

元件	对应功能	功能等级量化值	计算规则
太阳能电池板	转换太阳能	$A_0 + A_1 + A_1 = 11$	
控制系统	驱动电机 1	$A_2 + A_2 = 4$	
控制系统	驱动电机 2	$A_2 + A_2 = 4$	$A_3 = 1$
光强传感器	检测光强	$A_1 + A_3 = 4$	$A_2 = 2$
姿态传感器	检测电池板姿态	$A_1 + A_3 = 4$	$A_1 = 3$
风向传感器	检测风向	$A_1 + A_3 = 4$	$A_0 = 5$
风速传感器	检测风速	$A_1 + A_3 = 4$	
电机 1, 2	转动电池板	$A_1 = 3$	

完成元件的功能等级计算后,将系统中元件对应功能依据功能类别及功能等级的高低进行排序。其中,基本功能的自愈优先级最高,其余辅助功能的自愈优先级按其功能等级的高低依次顺延。

4.5 智能光伏除尘系统具有自愈能力功能周期的确立

根据功能需求,智能光伏除尘系统要保证基本功能“转换太阳能”功能实现。因此确定系统功能自诊断,功能自恢复集合应包括基本功能“转换太阳能”功能的自诊断,自恢复功能。将功能自诊断,功能自恢复集合融入功能周期。智能光伏除尘系统新的功能周期为

$$f' = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_9, f_7, f_6, f_8']$$

$$f_8' = [f_{8d}, f_{8a}, f_8]$$

分析功能 f_8 “转换太阳能”的工作模式。该功能进行的参数转换如下:太阳能转化为电能,检测输出参数复杂性较低。因此可以通过检测电压对转换太阳能功能进行直接功能自诊断,确定功能 f_{8d} 为检测电压,该功能原理解释为电压传感器。

功能 f_8 “转换太阳能”对应的作用结果为产生电能,系统中资源无法对此功能作用结果进行抵消,分析该功能故障原因。通过查阅相关资料导致功能 f_8 “转换太阳能”出现故障的主要原因为灰尘附着,确定功能 f_{8a} 为清除灰尘。对系统所处环境分析,我国西北地区风力资源丰富。同时风向以小角度变化为主^[21]。结合智能光伏除尘系统已有转动太阳能电池板功能,为保证系统安全的检测风速,风向功能。因此选择在线功能自恢复,通过功能 f_1, f_2, f_9 的原理解满足功能 f_{8a} 需求,即通过电机转动太阳能电池板,使其追风除尘。

在建立具有自愈能力的功能周期过程中,功能 f_{8a} 清除灰尘出现了复杂性,自然风无法完全满足功能需求。此时通过图 9 选择 TRIZ 中的物质-场分析作为系统分析工具降低系统复杂性,选择 76 个标准解作为系统求解工具得到功能解,通过功能解建立复杂性降低后的功能周期,求解过程如图 16 所示。

太阳能电池板 S_1 与自然风 S_2 无需变换,对自然风与太阳能电池板之间的作用 F 进行变换,采用标准解串联物质-场模型,增加风力放大功能 f_{8b} 。扩展功能 f_8' 至 f_8'' ,以此构建新的功能周期 f'' 。确定风力放大功能对应原理解时,考虑到吹风机中风力放大装置与该功能总功能高度相似,因此采用吹风机中渐缩喷管结构对风力进行放大,如图 17 所示。

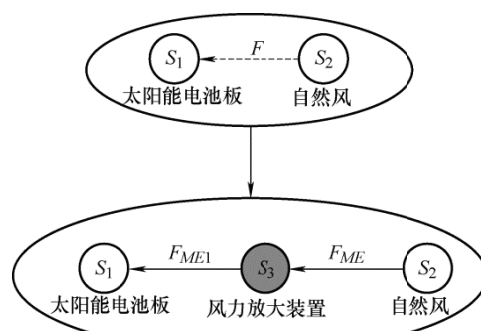


图 16 物质-场分析求取功能解

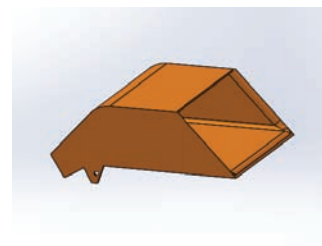


图 17 风力放大装置

系统功能 f_8'' 及复杂性降低后系统具有自愈能力的新功能周期表示为

$$f'' = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_9, f_7, f_6, f_8'']$$

$$f_8'' = [f_{8d}, f_{8b}, f_{8a}, f_8]$$

最终系统装配图如图 18 所示,通过 SOLIDWORKS 软件对系统进行流体仿真,壁面粗糙度设置为 $60 \mu\text{m}$;壁面条件设置为绝热壁面;在一个标准大气压,环境温度为 293.20 K ,流体类型为空气,流动类型设置为层流和湍流的条件下,输入 3 m/s 的风力。仿真结果表明风力放大装置有显著的风力放大效果,如图 19 所示。

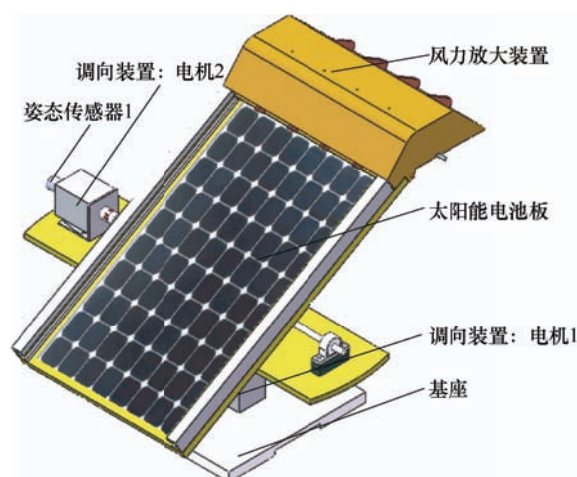


图 18 智能光伏除尘系统模型图

装置工作原理如下:智能光伏除尘系统可以根据检测的电压信号对系统进行诊断,当检测电压低于预测电压范围时。系统中调向装置由追踪太阳光

发电变为追踪自然风除尘，此外当夜间无光照，系统有除尘需求时，执行追风除尘功能，对太阳能电池板表面灰尘板结附着进行预防。当检测到电压信号恢复正常水平或追风除尘至系统输出电压一段时间内无明显变化时，再执行追光发电功能。装置样机如图 20 所示。

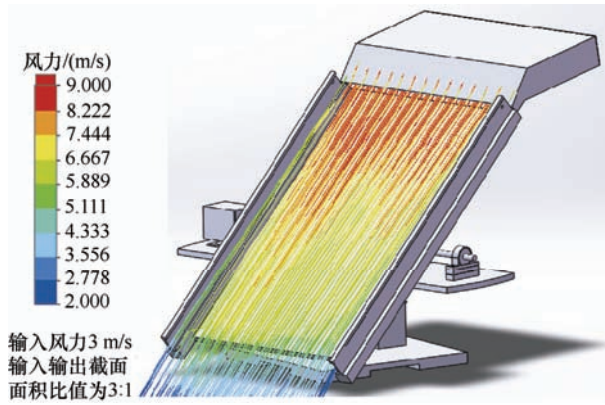


图 19 智能光伏除尘系统仿真图

灰尘附着程度难以直接进行衡量，因此将灰尘在系统上方自然下落，直至其附着在太阳能电池板表面上，通过太阳能电池板输出电压间接对灰尘附着程度进行表示，太阳能电池板输出电压越低，代表灰尘附着程度越高。

试验过程中，通过恒定风源 1 吹向风向传感器，以控制系统朝向。通过恒定风源 2 吹向风力放大装置，利用风速计在风力放大装置入口 3 个位置进行多次风速测量，调整恒定风源 2 与系统距离，控制风力放大装置入口平均风速为 3 m/s。同样光照强度变化条件下将样机表面附着不同程度灰尘进行多次试验，追风除尘 10 min 后记录系统输出电压。为保证试验准确性，对某一程度尘土覆盖情况下进行重

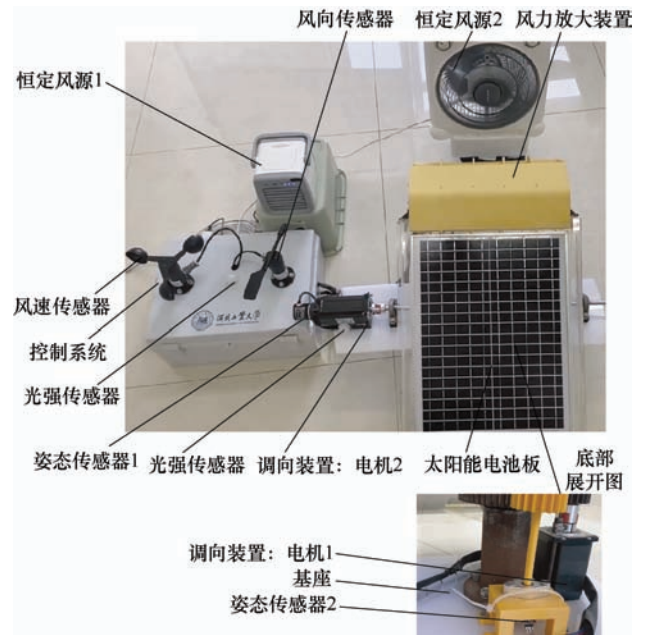


图 20 智能光伏除尘系统实物图

复试验，试验数据如表 4 所示，其中第 21~23 组分别为第 11~13 组的重复试验，第 24 组为第 23 组风力减小到 1.5 m/s 时的对照试验，第 25 组为第 23 组风力增加到 4 m/s 的对照试验。

为直观表达系统自愈能力的提升，引入系统发电效率提升作为指标，将无尘太阳能跟踪系统输出电压记录为 U_1 ，太阳能跟踪系统输出电压记录为 U_2 ，智能光伏除尘系统输出电压记录为 U_3 ，三者作为对比，其中系统发电效率提升 $\Delta\eta$ 计算公式如下

$$\Delta\eta = \frac{U_3 - U_2}{U_1}$$

经样机试验，该系统当前功能周期具备显著的自清洁能力，发电效率明显提升，如图 21 所示。

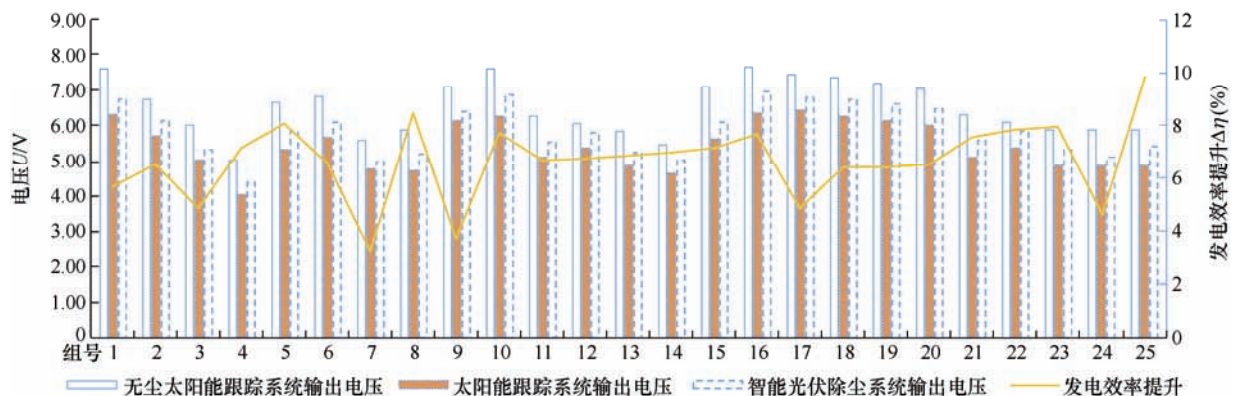


图 21 试验数据图

表 4 试验数据

组号	无尘太阳能跟踪系统输出电压 U_1/V	太阳能跟踪系统输出电压 U_2/V	智能光伏除尘系统输出电压 U_3/V	发电效率提升 $\Delta\eta(\%)$
1	7.61	6.31	6.74	5.65
2	6.76	5.71	6.15	6.51
3	6.00	5.04	5.33	4.83
4	5.04	4.02	4.38	7.14
5	6.67	5.31	5.85	8.10
6	6.83	5.67	6.12	6.59
7	5.60	4.78	4.96	3.21
8	5.90	4.71	5.21	8.47
9	7.08	6.16	6.42	3.67
10	7.64	6.30	6.89	7.72
11	6.26	5.12	5.54	6.71
12	6.06	5.38	5.79	6.77
13	5.83	4.85	5.25	6.86
14	5.44	4.63	5.01	6.99
15	7.11	5.61	6.12	7.17
16	7.67	6.37	6.96	7.69
17	7.43	6.45	6.81	4.84
18	7.35	6.28	6.75	6.39
19	7.20	6.16	6.62	6.39
20	7.04	6.03	6.49	6.53
21	6.33	5.12	5.60	7.58
22	6.12	5.38	5.86	7.84
23	5.88	4.85	5.32	7.99
24	5.88	4.85	5.12	4.59
25	5.88	4.85	5.43	9.86

5 结论

(1) 从功能层面对系统进行分析,可以降低后续结构、参数分析的难度,因此功能自愈是目前人工自愈理论的有益补充,功能自愈可以为设计者提供更多视角分析系统中存在的问题,得到更多的自

愈调控设计方案。

(2) 从系统复杂性入手,结合 DCC 理论中的复杂性转化方法与 TRIZ 理论中的问题分析、问题求解方法,提出了基于设计过程复杂性理论的功能自愈设计过程模型。

(3) 将基于设计过程复杂性理论的功能自愈设计过程模型应用到智能光伏除尘系统的设计过程中。

试验结果表明, 灰尘附着导致系统发电效率降低问题得到缓解, 系统输出电压提高, 系统自清洁能力增强。

参 考 文 献

- [1] 高金吉. 人工自愈与机器自愈调控系统[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 83-94.
GAO Jinji. Artificial self-recovery and machinery self-recovery regulation system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8): 83-94.
- [2] 高金吉. 人工自愈概论[J]. 机械工程学报, 2021, 57(2): 1-10.
GAO Jinji. Overview on artificial self-recovery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(2): 1-10.
- [3] 高金吉. 走向自愈时代[J]. 科技导报, 2019, 37(13): 1.
GAO Jinji. Towards the era of self-recovery[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(13): 1.
- [4] SUH N P. Complexity: Theory and applications[M]. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- [5] 尹逊和, 王忻. 自愈控制系统研究的综述、分析与展望[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(8): 1145-1158.
YIN Xunhe, WANG Xin. Review, analysis and prospect of self-healing control system[J]. Control Theory & Application, 2021, 38(8): 1145-1158.
- [6] 高金吉. 机泵群实时监测网络和故障诊断专家系统[J]. 中国工程科学, 2001(9): 41-47, 85.
GAO Jinji. A real-time monitoring network and fault diagnosis expert system for compressors and pumps[J]. Strategic Study of CAE, 2001(9): 41-47, 85.
- [7] 高金吉. 装备系统故障自愈原理研究[J]. 中国工程科学, 2005(5): 43-48.
GAO Jinji. Research on the fault self-recovery principle of equipment system[J]. Strategic Study of CAE, 2005(5): 43-48.
- [8] 黄立权, 王维民, 苏奕儒, 等. 基于电磁自愈力的转子自动平衡方法与实验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 208-212.
HUANG Liquan, WANG Weimin, SU Yiru, et al. Rotor automatic balancing method and test based on electromagnetic self-recovery force[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 208-212.
- [9] 王庆锋, 高金吉, 袁庆斌, 等. 主风机静叶可调执行机构自愈化智能电液控制系统研究与应用[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 185-192.
WANG Qingfeng, GAO Jinji, YUAN Qingbin, et al. Research and application of self-recovery smart electro-hydraulic control system on axial-blower static blade adjustable actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 185-192.
- [10] SUH N P. The principles of design[M]. Oxford: Oxford University Press, 1990.
- [11] CAVIQUE M, SAMPAIO R P C, FRADINHO J, et al. Total failure of a system due to time-dependent complexity-an identification framework[J]. Procedia CIRP, 2019, 84: 1010-1014.
- [12] 张鹏, 檀润华. TRIZ 辅助功能周期确立方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 78-85.
ZHANG Peng, TAN Runhua. Method of establish functional period assisted by TRIZ[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 78-85.
- [13] JIANG Jianmin, ZHU Huibiao, LI Qin, et al. Event-based functional decomposition[J]. Information and Computation, 2020, 271: 104484.
- [14] 于菲, 檀润华, 曹国忠, 等. 基于系统功能模型的元件裁剪优先权研究[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(2): 338-347.
YU Fei, TAN Runhua, CAO Guozhong, et al. Study on trimming priority based on system functional model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19 (2): 338-347.
- [15] 檀润华. TRIZ 及应用, 技术创新过程与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
TAN Runhua. TRIZ and applications, the process and methods of technological Innovation[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [16] 祁国宁, 顾新建, 杨青海, 等. 大批量定制原理及关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2003(9): 776-783.
QI Guoning, GU Xinjian, YANG Qinghai, et al. Principles and key technologies of mass customization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003(9): 776-783.
- [17] 林云蔓. 基于萃智的电脑辅助之修剪流程与工具[D]. 新竹: 清华大学, 2009.
LIN Yunman, TRIZ-based computer-aided trimming process and tool[D]. Xinzhu: Tsinghua University, 2009.
- [18] 金艳梅, 江华, 强彦政, 等. 中国光伏产业 2020 年回顾与 2021 年展望[J]. 太阳能, 2021(4): 42-50.
JIN Yanmei, JIANG Hua, QIANG Yanzheng, et al. Review of China's PV industry in 2020 and prospect in 2021[J]. Solar Energy, 2021(4): 42-50.
- [19] EL-NASHAR ALI M. The effect of dust accumulation on the performance of evacuated tube collectors[J]. Pergamon, 1994, 53(1): 105-115.
- [20] 赵春江, 崔容强. 太阳能建材技术的研究与开发(I): 光伏屋顶热性能的调查[J]. 太阳能学报, 2003(3): 352-356.
ZHAO Chunjiang, CUI Rongqiang. Technical research

and development of solar energy building materials (I):

Thermal investigation of integrated PV roof[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2003(3): 352-356.

- [21] 陈欣, 宋丽莉, 黄浩辉, 等. 中国典型地区风能资源特性研究[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(3): 331-337.

CHEN Xin, SONG Lili, HUANG Haohui, et al. Study on characteristics of wind energy resources in two typical areas in China[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2011,

32(3): 331-337.

作者简介: 张鹏, 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复杂系统创新设计。

E-mail: zhang_peng_2009@sina.com.cn

刘卫胜(通信作者), 男, 1963 年出生, 副教授。主要研究方向为创新设计。

E-mail: ws.liu@163.com