



ISSN 0577-6686
CODEN CHHKA2

机械工程学报[®]

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING



CMES 中国机械工程学会主办

半月刊 | **11** / 2012
第 48 卷

ISSN 0577-6686



9 770577 668125

11 >

本刊荣获

- ★ 首届“国家期刊奖”(1999年)
- ★ 第二届“国家期刊奖”(2003年)
- ★ 第三届“国家期刊奖”(2005年)
- ★ “中国期刊方阵”双高期刊
- ★ 中国科协精品科技期刊工程项目资助期刊
- ★ 国家自然科学基金委员会资助
- ★ 第二届中国出版政府奖期刊奖

机械工程学报

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

2012年第48卷第11期 6月5日出版

Vol.48 No.11 Published on June 5, 2012

(半月刊, 1953年创刊)

(Semimonthly, started in 1953)

版权所有: ©2012 Journal of Mechanical Engineering

主管: 中国科学技术协会

主办: 中国机械工程学会

编辑出版: 《机械工程学报》编辑部

编辑部地址: 北京百万庄大街22号(100037)

主编: 宋天虎

常务副主编: 王淑芹

编辑部主任:

副主编: 郑小光

责任编辑: 岑伟

电话: (010)88379907

传真: (010)88379504

DOI: 10.3901/JME

http://www.cjmenet.com.cn

E-mail: jme@cmes.org

cjme@263.net

印刷: 北京机工印刷厂

国内发行: 北京报刊发行局

订购处: 全国各地邮局

Responsible Department:

China Association for Science and Technology

Sponsored by:

Chinese Mechanical Engineering Society

Edited and Published by:

Editorial Office of JOURNAL OF
MECHANICAL ENGINEERING

Address:

22 Baiwanzhuang Dajie, Beijing 100037, China

Chief Editor: Song Tianhu

Executive Chief Editor: Wang Shuqin

Deputy Chief Editor: Zheng Xiaoguang

Tel: 0086-10-88379907

Fax: 0086-10-88379504

DOI: 10.3901/JME

http://www.cjmenet.com.cn

E-mail: jme@cmes.org

cjme@263.net

Distributed Abroad by:

China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing, China)

Code: M201

《机械工程学报》董事会

董事长:

宋天虎(中国机械工程学会)

副董事长:

王文斌(机械工业信息研究院)

董事:

王田苗

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院)

王庆丰

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室)

王时龙(重庆大学机械传动国家重点实验室)

王祖温(大连海事大学)

王润孝(西北工业大学)

邓宗全(哈尔滨工业大学)

仪垂杰(青岛理工大学)

刘宏民(燕山大学)

吕明(太原理工大学)

孙汉旭(北京邮电大学自动化学院)

闫献国(太原科技大学)

严新平(武汉理工大学)

何存富(北京工业大学)

张义民(东北大学机械工程与自动化学院)

张宪民(华南理工大学机械工程学院)

李大勇(哈尔滨理工大学)

李圣怡

(国防科技大学机电工程与自动化学院)

李杨民(澳门大学)

李剑峰(山东大学)

李荣彬(香港理工大学)

李荣德(沈阳工业大学)

杨兆军(吉林大学)

邵新宇(华中科技大学机械科学与工程学院)

季林红(清华大学精密仪器与机械学系)

姚振强(上海交通大学机械与动力工程学院)

胡燕平(湖南科技大学)

赵韩(合肥工业大学)

项昌乐(北京理工大学)

徐西鹏(华侨大学)

徐金梧(北京科技大学)

袁寿其(江苏大学)

贾振元(大连理工大学机械工程学院)

郭隐彪(厦门大学)

高健(广东工业大学)

梅雪松(西安交通大学机械工程学院)

黄田(天津大学机械工程学院)

黄明辉(中南大学机电工程学院)

黄洪钟(电子科技大学机械电子工程学院)

葛世荣(中国矿业大学)

韩旭(湖南大学机械与运载工程学院)

谭援强(湘潭大学机械工程学院)

檀润华(河北工业大学)

ISSN 0577-6686

CN11-2187/TH

国内邮发代号: 2-362 国外发行代号: M201

国内定价: 35元/期, 840元/年

机械工程学报

JIXIE GONGCHENG XUEBAO

2012年第48卷第11期 6月5日出版

目次

*** 创新设计专栏 ***

- 机械功能对称的概念体系及其应用 冯培恩 曾令斌 邱清盈等 (1)
- 基于技术进化理论的破坏性创新预测与实现模型 孙建广 檀润华 江屏 (11)
- 异构模块组合耦合分析的完全关联矩阵 陈羽 滕弘飞 (21)
- 面向功能创新的功能进化、组合与失效研究 曹国忠 郭海霞 檀润华等 (29)
- 专利设计知识的创新性评估方法及其在创新设计中的应用 邱清盈 薛驰 冯培恩等 (39)
- 基于功能裁剪的专利规避设计 江屏 罗平亚 孙建广等 (46)
- 模块化产品族演进创新方法研究 侯亮 王浩伦 穆瑞等 (55)
- 基于 TRIZ 的可拆卸联接改进设计 刘志峰 胡迪 高洋等 (65)
- 集成 TRIZ 的产品生态设计方法研究 刘征 潘凯 顾新建 (72)
- TRIZ 辅助功能周期确立方法 张鹏 檀润华 (78)
- 基于复杂网络与公理设计的产品平台设计方法 刘曦泽 祁国宁 纪杨建等 (86)
- 基于公理设计和设计关联矩阵的产品平台设计新方法 肖人彬 程贤福 陈诚等 (94)
- 基于相似性与结构敏感性分析的产品平台设计过程模型 张换高 赵文燕 江屏等 (104)

机械学

机构学及机器人

- 虚拟轴机床并联机构的自适应动态滑模运动控制 高国琴 郑海滨 (119)
- 基于蛇形魔方机构分析的模块化可重构机构理论 丁希仑 吕胜男 (126)
- 基于非瞬时支链位形设计的并联机构内部奇异消除方法 刘延斌 李志松 韩建海 (136)

机械动力学

- 高速主轴系统静止及运转状态下动力学特性对比分析 孙伟 汪博 闻邦椿 (146)
- 调制式永磁齿轮气隙磁场及转矩分析计算 葛研军 聂重阳 辛强 (153)
- 二维声学数值计算的径向插值有限元法 夏百战 于德介 姚凌云 (159)
- 甚低频拖曳天线的稳态动力学研究 郑小洪 侯志强 韩维等 (166)

制造科学与技术

制造工艺与装备

- 基于数值仿真技术的单颗磨粒切削机理 言兰 姜峰 融亦鸣 (172)
- 大口径轴对称非球面气囊抛光进动运动建模及控制 潘日 王振忠 郭隐彪等 (183)
- 基于 Hermite 插值的复杂光学曲面车削加工路径规划 王兴盛 康敏 (191)

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

Vol.48 No.11 June 2012

CONTENTS

- Research on Mechanical Function Symmetry Architecture and Its Application
..... FENG Peien ZENG Lingbin QIU Qingying et al (1)
- Model for Roadmapping Disruptive Innovation Based on Technology Evolution Theory
..... SUN Jianguang TAN Runhua JIANG Ping (11)
- Comprehensive Dependency Matrix for Heterogeneous Modular Combination
Coupling Analysis..... CHEN Yu TENG Hongfei (21)
- Research on Function Evolution, Combination and Failure Mode for Product Function Innovation
..... CAO Guozhong GUO Haixia TAN Runhua et al (29)
- Novelty Evaluation Method of Patent Design Knowledge and Its Application in Creative Design
..... QIU Qingying XUE Chi FENG Peien et al (39)
- Method about Patent Design Around Based on Function Trimming
..... JIANG Ping LUO Pingya SUN Jianguang et al (46)
- Research on the Evolution & Innovation for Modular Product Family
..... HOU Liang WANG Haolun MU Rui et al (55)
- TRIZ Based Revised Design for Disassembly of Joint Structure
..... LIU Zhifeng HU Di GAO Yang et al (65)
- Research on Product Ecological Design Method Integrating TRIZ
..... LIU Zheng PAN Kai GU Xinjian (72)
- Method of Establish Functional Period Assisted by TRIZ
..... ZHANG Peng TAN Runhua (78)
- Product Platform Design Method Based on Complex Network and Axiomatic Design
..... LIU Xize QI Guoning JI Yangjian et al (86)
- New Approach to Product Platform Design Based on Axiomatic Design
and Design Relationship Matrix..... XIAO Renbin CHENG Xianfu CHEN Cheng et al (94)
- Product Platform Design Process Model Based on Similarity
and Structural Sensitivity Analysis.....ZHANG Huangao ZHAO Wenyan JIANG Ping et al (104)
- Adaptive Dynamic Sliding Mode Motion Control for the Parallel Mechanism of
Virtual Axis Machine Tool.....GAO Guoqin ZHENG Haibin (119)
- Reconfiguration Theory of Modular Reconfigurable Mechanism Based on
Analysis of Snake Cube.....DING Xilun LÜ Shengnan (126)
- (下转封三)

DOI : 10.3901/JME.2012.11.078

TRIZ 辅助功能周期确立方法*

张 鹏 檀润华

(河北工业大学河北省制造业创新方法工程技术研究中心 天津 300130)

摘要：在系统中建立功能周期是减小系统时间相关复杂性的重要方法，然而，复杂性理论中并没有指出如何确立功能周期。引入 TRIZ 工具，分析建立功能周期的过程，提出一类确立系统功能周期的方法，其中包括四个路径：物质—场分析与 76 个标准解辅助确立功能周期，冲突解决原理辅助确立功能周期，效应辅助确立功能周期和技术进化辅助确立功能周期。用工程实例“液体超声波系统”加以验证。

关键词：时间相关复杂性 组合复杂性 周期复杂性 功能周期 TRIZ

中图分类号：TH122

Method of Establish Functional Period Assisted by TRIZ

ZHANG Peng TAN Runhua

(Manufacturing Innovation Methods Engineering Technology Research Center of Hebei Province,
Hebei University of technology, Tianjin 300130)

Abstract :Establishing functional period is the key to eliminate the time-dependent combinatorial complexity of the system. However, how to obtain functional periodicity is not mentioned in the complexity theory. TRIZ tools are imported and the process of establishing functional period is analyzed. A species of method involve four paths of establishing functional period is put forward. The four paths are establishing functional period assisted by Su-field & 76 standard solutions, contradiction solving, effects, technological Systems Evolution. A case study “liquid ultrasonic system” shows the application of the method.

Key words : Time-dependent complexity Combinatorial complexity Periodic complexity Functional period TRIZ

0 前言

SUH^[1-3]提出的基于公理设计的复杂性理论是复杂性科学研究领域的最新理论成果。基于公理设计复杂性理论的一个重要研究成果——将组合复杂性转化为周期复杂性(c/p 过程)是减小系统时间相关复杂性的重要方法^[4-5]。文献[6-8]中通过实例验证了应用 c/p 过程解决系统中的组合复杂性是行之有效的。确立系统的功能周期是 c/p 过程的一个重要的环节，然而，SUH 在基于公理设计的复杂性理论中却未提出具体的确定方法，这给设计人员应用 c/p 过程解决系统中的组合复杂性增加了难度，只能根据自身对于系统存在复杂性的理解以及功能周期的

定义来完成。文中基于公理设计的复杂性理论与 TRIZ 工具集成，提出了一类确立功能周期的方法，为应用 c/p 过程减小系统的时间相关复杂性奠定了基础，也为解决其他类型的复杂性提供了借鉴。

1 时间相关复杂性及功能周期

复杂性是实现功能需求不确定性的程度^[1]。由于系统的不良设计或是对系统不了解，都可能造成系统不确定性的增加。复杂性是设计范围与系统范围之间关系的函数。复杂性可能是时间的函数，也可能与时间不相关，这取决于系统范围是否随时间发生变化。因此，复杂性可以分为两种类型：时间相关复杂性和时间无关复杂性^[2]。时间无关复杂性包括真实复杂性和虚构复杂性，时间相关复杂性包括组合复杂性和周期复杂性^[2]。

* 国家自然科学基金(70972050, 51105128, 51145014)、科技部创新专项(2010IM020100, 2011IM010200)和河北省科技支撑计划(10240116D)资助项目。20110626 收到初稿，20111120 收到修改稿

1.1 时间相关复杂性

如果系统范围随时间变化，则系统中可能存在时间相关复杂性。由于未来事件以一种不可预知的方式发生，时间相关复杂性就有可能出现。通常它会导致系统范围随时间发生变化，逐渐远离设计范围。

组合是指导致系统复杂性增加的一组事物，这组事物可能是设计参数、物理过程，也可能是噪声。随着时间的推移，导致系统出现复杂性的组合数目持续增加，使系统范围持续远离设计范围，这种时间相关的复杂性称为组合复杂性^[1]。组合复杂性最终导致一种混乱的状态或使系统出现故障，随着时间的推移系统的功能实现概率越来越小，最终趋近于零。周期复杂性是在一个有限周期内有限组合产生的时间相关复杂性，在这个有限周期内，系统范围能够重新回到设计范围内，系统的功能实现概率周期性的恢复。周期复杂性和组合复杂性分别如图1、2所示^[2]。

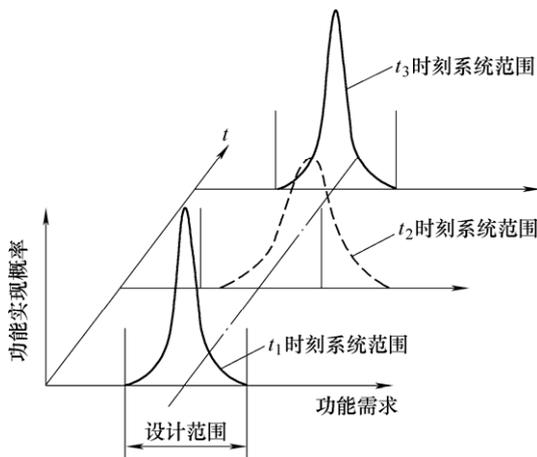


图1 周期复杂性示意图

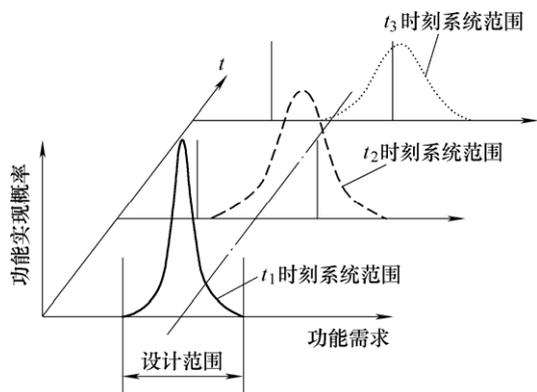


图2 组合复杂性示意图

组合复杂性和周期复杂性共同点为其功能实现概率随时间变化，且在 t_1 到 t_2 时刻，系统的功能实现概率均在减小。组合复杂性和周期复杂性最大

的区别就在于组合复杂性在 t_2 到 t_3 时刻系统的功能实现概率持续减小，而周期复杂性在 t_3 时刻能够恢复到初始状态。与组合复杂性相比，周期复杂性是一种比较容易减小的时间相关复杂性，所以，通过一定技术手段，确立系统功能需求能够重复实现的周期，将组合复杂性转化为周期复杂性，是解决组合复杂性的有效方法。

1.2 功能周期

在基于公理设计的复杂性理论中，功能周期定义为在基础周期内重复的一组功能需求^[1]。所谓周期是功能周期，未必是时间周期，而是重复一组相同功能，也就是说不一定具有固定的时间周期。基于公理设计的复杂性理论中功能周期的类型包括：时间周期、几何周期、生物周期、制造过程周期、化学周期、热周期、信息处理周期、电周期、生理周期和材料周期等^[1]。下面介绍几种类型的功能周期。

时间周期：在工程系统中最普遍的周期是时间周期。以一定的时间间隔重复循环一组功能，例如在平衡位置摆动的钟摆和火车按规定的时间表运行。时间周期的特性为相同功能需求集合在相同时间内重复循环。

几何周期：为一组重复的几何图形。例如在两个滑行表面之间阻止磨损颗粒形成和聚集。自然系统中金属的结晶也是几何功能周期的例子，它可以保持长期稳定性。

生物周期：生物系统是长期进化获得生物功能周期的自然系统。例如，细胞以一个基础周期分裂。

制造过程周期：在制造过程中，零部件必须经历一组工艺流程。每一步需要一定时间，但是由于刀具磨损等原因造成时间发生变化，功能周期可以看成完成所有加工步骤。基于制造过程周期可以安排加工车间中运输机器人的工作流程，可以将制造系统的生产率最大化。

化学周期：在自然界，元素周期表是最重要的化学功能周期。一些化学过程依赖于某种化学制品的浓度，在给定过程中它可能发生变化。这些化学过程的功能周期可以看作是浓度变化率或给定化学成分浓度。

热周期：当系统温度在最高和最低温度之间循环时，温度循环可以确定功能周期。由于时间周期的存在，地球的温度具有热功能周期。在工程系统中，热力发动机的热循环是热功能周期的例子。在这些热力系统中，一旦丧失热循环，系统将不再按预期目的运行。

信息处理周期：在很多数字设备中，信息处理需要功能周期。在一些软件程序中，随着使用软件的时间不断增加，错误不断积累，最终导致系统崩溃。这时需要重新启动计算机，通过重新初始化软件来解决这个问题。

电周期：交流电是最重要的电功能周期。用于液晶显示器的交变电场也是一个重要的电周期例子。当使用液晶显示时，它们必须受到周期性的反向电压，以保证长时间运转，否则，电荷在界面聚集，导致系统失效。在自然界，天气也表现出电功能周期，当云中的电荷不断增加，并超过一定极限值时，在雷雨中它们被释放到地球。

生理周期：很多事物受到白天和夜晚交替变化的影响，所有生命都服从于这个生理循环。

材料周期：在工程系统中，一些合成材料，具有功能周期，例如纤维和织物，它们具有较高的强度、柔韧性和刚性。另一个例子是金属拉丝中的周期退火，它消除了塑性变形过程中的错位。

总之，功能周期普遍存在于自然系统和技术系统中，功能周期是稳定系统的一种必备特质。

2 功能周期的确立

通过以上介绍可知，存在功能周期的系统能够保持稳定的运行。基于公理设计的复杂性理论一个重要的结论就是在系统中建立功能周期，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，以减小系统中的复杂性，不致导致混乱状态。所以为了减小存在组合复杂性系统的复杂性，使系统趋于稳定，必须为系统引入功能周期。

2.1 经验方法确立功能周期

基于公理设计的复杂性理论没有为设计者提供确立功能周期的方法。目前，设计者大多是依靠自身的经验为系统建立功能周期。由于设计者自身经验的局限，确定系统的功能周期会浪费大量的时间和精力，即便如此，也还是很难建立合适的功能周期。依靠经验确立功能周期的方法主要有以下两种。

(1) 根据系统中存在的复杂性直接确立功能周期。这种方法需要设计者面对系统复杂性直接得到减小系统复杂性的功能解及功能解之间的相互关系，即功能周期。这就要求设计者对基于公理设计的复杂性理论和相关领域知识都比较精通，而且还必须具有丰富的工作经验。对于普通设计者来说，

直接确立功能周期是非常困难的。

(2) 根据复杂性特征确立系统的功能周期。为了降低获取功能周期的难度，这种确立功能周期方法中增加了复杂性特征提取的步骤，根据复杂性特征得到相应功能解，但是功能解之间的关系依然要求设计者依赖经验自行建立，最后针对功能解获取功能周期。这种方法对系统的复杂性特征进行了提取，但直接建立功能解之间联系还是比较困难，确立系统的功能周期依然存在障碍。

2.2 TRIZ 辅助确立功能周期

为了摆脱设计者经验的束缚，提出了一类集成 TRIZ^[9-11]功能周期确立方法。TRIZ 作为一种重要的发明问题解决理论，提供了丰富的分析问题和解决问题的方法，可以辅助设计者分析系统中存在的复杂性并获取相应的功能周期。

通过分析，文中将功能周期的确立分为三个层次，如图 3 所示。

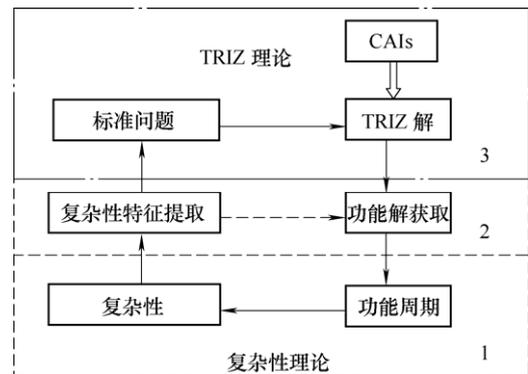


图 3 功能周期确立层次分解

依靠经验确立功能周期的方法属于第 1 层和第 2 层，而 TRIZ 辅助确立功能周期的方法属于第 3 层。TRIZ 辅助功能周期确立方法中根据系统复杂性特征选择分析系统复杂性的工具；再将系统复杂性转换为标准问题并得到相应的 TRIZ 解；然后将 TRIZ 解转化为特定的功能解，最后根据功能解之间的关系获取功能周期。整个功能周期获取过程中以 TRIZ 作为指导，可以辅助设计者高效获取减小系统复杂性的功能周期。

2.2.1 TRIZ 辅助确立功能周期过程

(1) 经过复杂性特征提取 α 将系统中存在的问题 P 转化为系统存在的复杂性，该过程表示为

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

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

(2) 分析系统中存在的复杂性 C ，选用系统复杂性分析工具 A （包括物质—场、39 标准工程参数、

功能分析和技术进化模式等)中的某一种或某几种工具来分析系统中存在的复杂性。

(3) 针对系统存在的复杂性,根据系统复杂性分析工具 A,选择系统复杂性求解工具 B(包括76个标准解、冲突求解矩阵、效应和进化路线等),得到功能解 f_{ij} ($i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n, m$ 表示系统中含有的功能个数, n 表示减小复杂性的功能解个数)。

(4) 根据 n 个功能解组成减小系统复杂性的功能周期

$$P_{er} = \sum_{j=1}^n f_{ij}$$

式中, P_{er} 表示减小系统复杂性的功能周期。

2.2.2 TRIZ 辅助功能周期确立路径

根据系统中复杂性的特征,选取不同的分析工具 A 和求解工具 B,有四条辅助功能周期确立路径(图4)。

(1) 路径 :物质—场分析和76个标准解辅助确立功能周期。

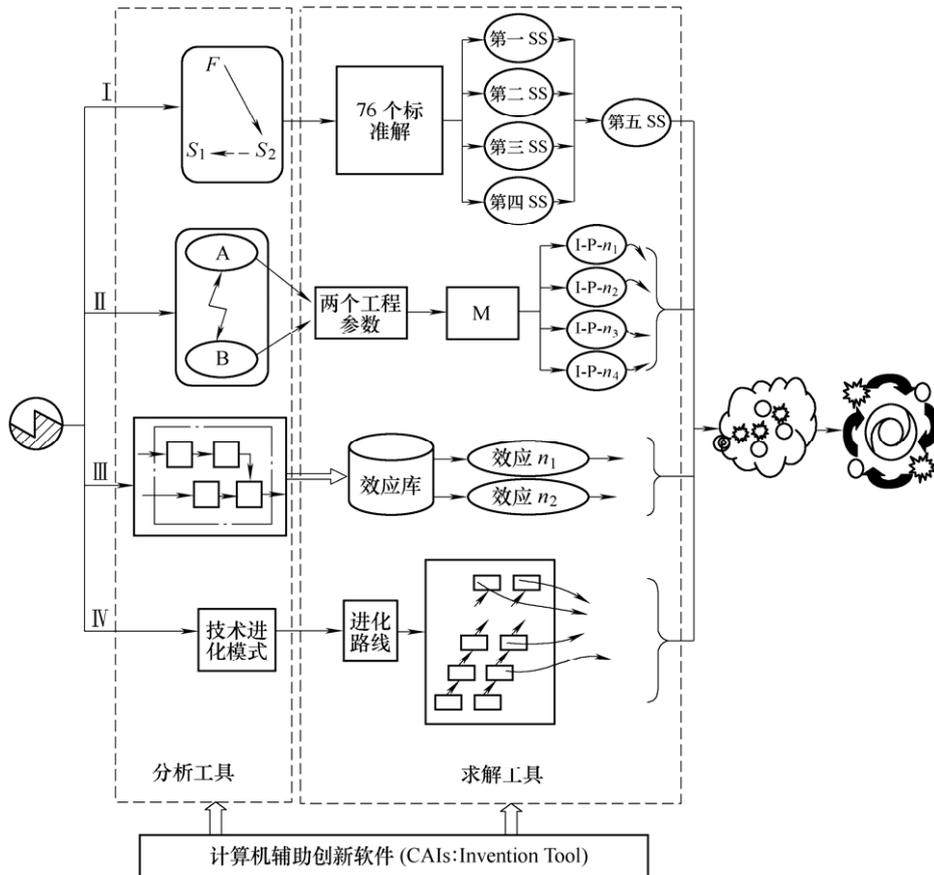


图4 TRIZ 辅助功能周期确立过程

当系统中复杂性特征可以用物质和场之间的关系来表示时,对系统中复杂性进行物质—场分析,然后应用76个标准解进行求解,选取相应的解组成功能周期。对系统复杂性建立物质—场模型,减小系统的复杂性分别从物质—场模型的工具和对象入手,将工具和对象进行适当的变化直至满足功能需求为止。当工具和对象变换到满足功能需求,功能周期也就随之确定了。若功能 f_i 存在时间相关复杂性,其物质场模型如图5a所示,经过对模型中的工具和对象进行相应的变化得到 S_2, S_1 。 S_2, S_1 之间的相互作用可以满足 f_i 的功能需求, (S_1, S_3, F_2) 、 (S_4, S_2, F_3) 和 (S_1, S_2, F_1) 分别组成功能 f_{i1}, f_{i2}, f_{i3} , 如图5b所示。在 f_{i1}, f_{i2}, f_{i3} 三个功能的共同作用下实现了 f_i 的功能需求,但是三个功能的执行存在一定的顺

序。首先执行改变原功能对象的功能,然后执行改变原功能工具的功能,最后执行新对象和新工具组成的功能,所以该功能周期表示为 (f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}) 。依此类推,直至功能需求被满足为止,功能周期可以表示为 (f_{i1}, f_{i2}, \dots) 。

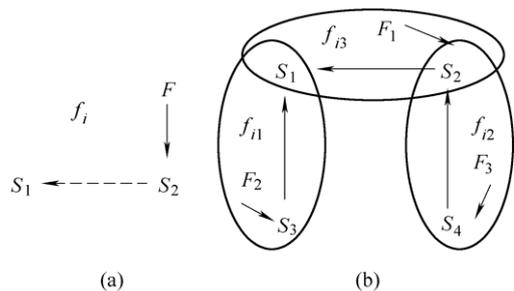


图5 物质—场分析辅助功能周期获取过程

(2) 路径 : 冲突解决原理辅助确立功能周期。当系统中复杂性特征可以用两个标准工程参数表示时,应用冲突矩阵根据发明原理获得相应的功能解,如果系统的功能需求能够得到满足,将功能解转化为功能周期。若功能需求仍不能被满足,再次将系统仍存在的复杂性重新转化为两个标准工程参数表示获得相应的功能解,直至系统的功能需求得到满足,将得到的功能解转化为系统的功能周期。

若 f_i 为导致系统存在复杂性的功能,将系统存在的复杂性转化为两个标准的工程参数($NO.x_0, NO.y_0$),并得到功能解 f_{i1} 。若在 f_{i1} 作用下能够实现 f_i 的功能需求,则可以直接将其转化为功能周期。若依然不能满足系统的功能需求,但是系统的复杂性已经被减小,则将系统存在的复杂性转化为两个标准的工程参数($NO.x_1, NO.y_1$)并得到功能解 f_{i2} ,在 f_{i1} 和 f_{i2} 作用下能够实现 f_i 的功能需求,则可以将 f_{i1} 和 f_{i2} 转化为功能周期(f_{i1}, f_{i2})。依此类推,直至功能需求被满足为止,功能周期可以表示为(f_{i1}, f_{i2}, \dots)。

(3) 路径 : 效应辅助确立功能周期。当系统中复杂性特征可以转化为对困难功能元求解问题时,应用物理的、化学的、几何的效应减小系统中存在的复杂性。一个效应可以实现一个功能,该功能的实现可以减小系统中的复杂性。应用效应辅助确立功能周期的第一步是建立系统的功能结构,确定该结构中导致系统出现复杂性的功能,可以通过 CAIs 系统中的效应知识库查找相应的效应或效应链,从而确定这些功能元可能的解。由这些功能解组成的功能周期随之产生。

建立系统的功能结构,确定导致系统出现复杂性的功能 f_i ,通过 CAIs 系统中的效应知识库查找相应的效应并得到功能解 f_{i1} 。若在 f_{i1} 作用下能够实现 f_i 的功能需求,则可以直接将其转化为功能周期。若依然不能满足系统的功能需求,但是系统的复杂性已经被减小,则对系统存在的复杂性再次通过 CAIs 系统中的效应知识库查找相应的效应并得到功能解 f_{i2} ,在 f_{i1} 和 f_{i2} 作用下能够实现 f_i 的功能需求,则可以将 f_{i1} 和 f_{i2} 转化为功能周期(f_{i1}, f_{i2})。依此类推,直至功能需求被满足为止,功能周期可以表示为(f_{i1}, f_{i2}, \dots)。

(4) 路径 : 技术进化辅助确立功能周期。当系统中复杂性特征可以用技术进化路线描述是,将系统中存在的复杂性由某条技术进化路线的某个进化状态表示,沿着这条技术进化路线的技术进化方

向,根据其潜力状态,获得相应的功能解,将功能解转化为功能周期。

确定导致系统出现复杂性的功能 f_i ,在 CAIs 系统中选择适当技术进化模式和技术进化路线,得到其某潜力状态下的功能解 f_{i1} 。若在 f_{i1} 作用下能够实现 f_i 的功能需求,则可以直接将其转化为功能周期。若依然不能满足系统的功能需求,但是系统的复杂性已经被减小,则对系统存在的复杂性再次通过 CAIs 系统中的技术进化模式和技术进化路线查找相应的效应并得到功能解 f_{i2} ,在 f_{i1} 和 f_{i2} 作用下能够实现 f_i 的功能需求,则可以将 f_{i1} 和 f_{i2} 转化为功能周期(f_{i1}, f_{i2})。依此类推,直至功能需求被满足为止,功能周期可以表示为(f_{i1}, f_{i2}, \dots)。

综上所述,可以应用 TRIZ 工具分析系统中存在的复杂性,得到相应的原理解,并根据原理解之间的关系确立减小系统复杂性的功能周期。应用 TRIZ 辅助确立功能周期的过程中,四条路径的选取取决于系统中复杂性的特征,既可以使用单一路径,又可以根据系统复杂性具体情况多条路径配合使用。整个 TRIZ 辅助功能周期确立过程可以在计算机辅助创新软件(Computer-aided innovation, CAI) InventionTool 3.0 中完成,大幅提升了确立系统功能周期的效率。

3 工程实例

液体超声波测量系统如图 6 所示,系统测量超声波返回传感器的时间,超声波回波传播的时间就可以代表待测距离。理想情况下,相同条件测量值应该相同,但是系统的测量值却存在一定的差异,这种差异是随时间变化的,可知系统中可能存在组合复杂性,可以通过引入功能周期来减小系统的复杂性。液体超声波信号接收功能可以描述如下:将超声波信号转化为相应的电信号,然后用参考电压与之比较,从而获取超声波接收时间。理想状况下同一测量点获取的超声波接收时间是相等的,但是由于环境变量的影响系统中出现了组合复杂性。

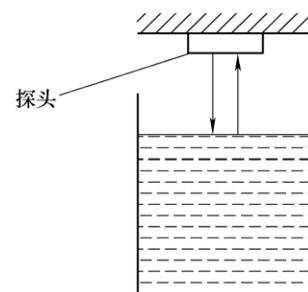


图 6 液体超声波测量系统

根据系统复杂性，选用物质—场分析辅助确立系统功能周期方法，如图7所示。通过图7a物质—场分析可以看出系统的复杂性是由于E影响S₂导致的。由于接收信号差异比较大，导致了接收时间t之间差异比较大(图7b)

$$\max(\Delta t) > \Delta t_0$$

式中， $\max(\Delta t) = \max\{t_2 - t_1, t_3 - t_2\}$ ， Δt_0 为系统功能需求允许的接收时间t之间最大差异。

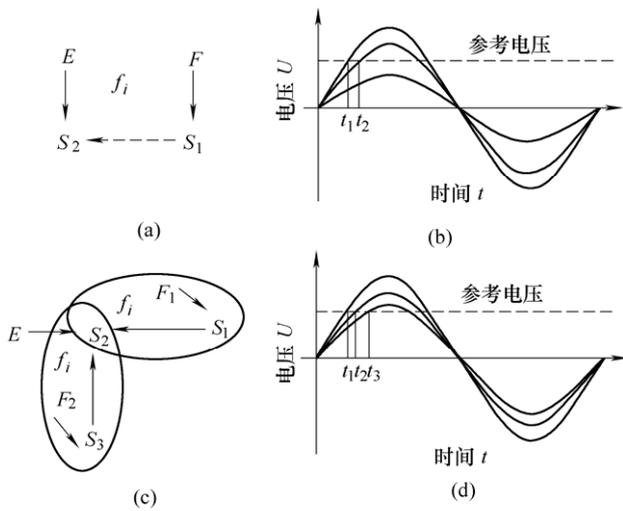


图7 物质—场辅助超声波系统功能周期确立过程

为了减小接收时间t之间差异，应该减小接收信号差异。如图7c所示，在系统中增加S₃(增益放大)作用于S₂将接收信号改变为图7d所示，减小了 $\max(\Delta t)$ 。若 $\max(\Delta t) < \Delta t_0$ ，则系统的功能需求得到满足，系统复杂性被减小，这时的功能周期可以表示为(f_{i1}, f_{i2})。试验表明，在系统中增加S₃作用于S₂后系统复杂性被减小，但是 $\max(\Delta t) > \Delta t_0$ ，系统中仍存在复杂性。

针对系统中依然存在的复杂性，对TRIZ辅助功能周期四个路径进行重新选择，选用冲突解决原理进一步辅助设计者确立减小系统复杂性的功能周期。当前系统的复杂性描述为一个优化工程参数和一个恶化工程参数。优化工程参数为“测量精度”，恶化工程参数为“可靠性”。可以得到四条发明原理：No.1(分割)，No.5(合并)，No.11(预补偿)，No.23(反馈)。

系统的复杂性可以描述为，同一测量点的接收信号之间的差异导致了系统出现复杂性，如果接收信号相同则系统的复杂性被减小。当前系统中根据发明原理11和发明原理23，对系统进行预补偿，消除同一测量点超声波接收信号之间的差异。为了达到预补偿的目的，应该对系统的超声波接收信号进行反馈，在系统中增加一个自动调整超声波接收信号放大倍数的功能。当超声波接收信号较小时，

加大放大倍数；当超声波接收信号较大时，则减小放大倍数。这样，系统中相同测量点之间接收信号之间的差异就减小了，系统的复杂性随之减小。系统的功能周期可以表示为($f_{i1}, f_{i3}, f_{i4}, f_{i2}$)，其中 f_{i3} 为发明原理23的功能解， f_{i4} 为发明原理11的功能解。试验表明，系统复杂性进一步减小，但仍无法完全实现系统的功能需求。

由于液体超声波测量系统的功能需求依然无法得到完全满足，那么重新对TRIZ辅助功能周期4个路径进行选择，并选中效应辅助功能周期确立方法减小系统的复杂性。由于实例中已进行了相应的功能分解，所以此处略去功能结构分析步骤。实例中超声波接收信号是同频的正弦波，可以应用效应中的几何效应来减小系统的复杂性。系统中获取超声波接收时间信号来代表相应的距离信息，同一测量点接收信号幅值的差异导致了超声波接收时间的差异，所以必须用一个非幅值信号来代表。正弦波的相位是时间的函数。如果可以获取一个固定的相位来代表接收信号就可以达到减小系统复杂性的目的。根据正弦波的几何特性，用固定的相位对应的时间代替接收信号与固定参考电压比较所得的时间。

同一测量点接收信号与固定比较电压比较得到 t_1 、 t_2 和 t_3 ，但是三者之间存在一些差异。正是由于存在此类的差异导致系统存在复杂性，为了减小此类复杂性，对于同一测量点除 t_1 、 t_2 、 t_3 外，还得到 t'_1 、 t'_2 、 t'_3 ，如图8所示，根据正弦波的几何特性，接收时间可以表示为

$$\Delta t_1 = \frac{t_1 + t'_1}{2} \quad \Delta t_2 = \frac{t_2 + t'_2}{2} \quad \Delta t_3 = \frac{t_3 + t'_3}{2}$$

$$\text{且 } \Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = 2k\pi + \frac{\pi}{2}$$

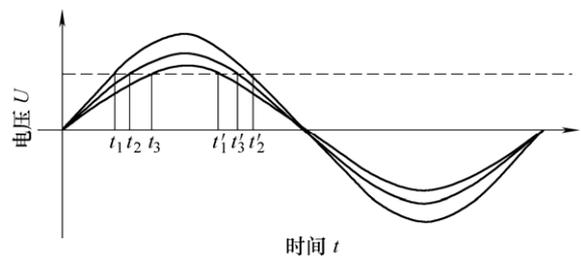


图8 效应辅助功能周期确立

在液体超声波测量系统中要获取超声波接收时间，与 t_1 、 t_2 、 t_3 一样， Δt_1 、 Δt_2 和 Δt_3 也可以表示相对应的距离信息，对于同一测量点 Δt_1 、 Δt_2 和 Δt_3 却可以消除 t_1 、 t_2 和 t_3 之间差异，进而减小系统的复杂性。系统的功能周期可以表示为(f_{i1}, f_{i3}, f_{i4} ，

f_{i2}, f_{i5}), 其中 f_{i5} 为几何效应转化的原理解。

如果依然不能满足系统的功能需求, 可能是系统中一些随机变量引起的。根据系统中存在的复杂性, 选用技术进化辅助确立减小系统复杂性的功能周期。分析导致系统出现复杂性的功能 f_i , 在 CAIs 系统中选择技术进化模式“集成化”中技术进化路线“向复合系统发展”, 如图 9 所示。当前的液体超声波测量系统中, 是采用的单次测量的办法, 即每个测量点只测量一次。系统当前状态位于技术进化路线“向复合系统发展”的“单系统状态”。



图 9 技术进化路线“向复合系统发展”

系统当前的复杂性可表示为

$$\Delta t_1 = \frac{t_1 + t_1'}{2} \quad \Delta t_2 = \frac{t_2 + t_2'}{2}$$

$$\Delta t_3 = \frac{t_3 + t_3'}{2} \quad \dots \quad \Delta t_k = \frac{t_k + t_k'}{2}$$

但是由于一些随机因素的影响: $\Delta t_1 \neq \Delta t_2 \neq \Delta t_3 \neq \dots \neq \Delta t_k$, 且 $\max\{\Delta t_p - \Delta t_q\} > \Delta t_0$, $p, q=1, 2, \dots, k$, $p \neq q$ 。

为了减小同一测量点测量值差异所引起的复杂性, 所引入的功能周期应该沿着技术进化路线“向复合系统发展”向其潜力状态发展, 出现“多系统”或“复合系统”。可以得到减小系统复杂性的功能解 f_{i6} , 功能解 f_{i6} 将原系统中“单系统状态”进化为“多系统”。功能解 f_{i6} 是对每一测量点进行 k 次测量, 测量的平均数作为该测量点的测量值。这种测量方法可以在一定程度上减小系统测量点测量值之间的差异。如果此时满足 $\max\{\Delta t_p - \Delta t_q\} > \Delta t_0$, 系统的功能需求得以实现, 结合前面的功能解, 此时系统的功能周期可以表示为 $(f_{i1}, f_{i3}, f_{i4}, f_{i2}, f_{i5}, f_{i6})$ 。

如果此时系统的功能需求依然无法得到满足, 那么仍需要继续用技术进化的方法分析系统, 为系统引入功能周期。这里再次选用了技术进化模式“集成化”中技术进化路线“向复合系统发展”。与功能解 f_{i6} 不同, 功能解 f_{i6} 是从原来的单个测量传感器单次测量, 根据该进化路线变为了单个测量传感器多

次测量求平均的方法。功能解 f_{i7} 是在原来单个测量传感器多次测量的基础上, 变为多组传感器多次测量, 可以进一步减小同一测量点之间的差异, 从而满足系统的功能需求。这时系统的功能周期可以表示为 $(f_{i1}, f_{i3}, f_{i4}, f_{i2}, f_{i5}, f_{i6}, f_{i7})$ 。这七个功能解共同组成了减小系统复杂性的功能周期。

4 结论

(1) 提出了 TRIZ 工具辅助功能周期确立的四条路径, 这四条路径既可以单独使用也可以配合使用。

(2) 通过确立减小“液体超声波系统”复杂性的功能周期过程, 说明应用 TRIZ 工具辅助设计者获取功能周期是行之有效的。

(3) 应用 TRIZ 辅助确立功能周期, 提高了功能周期获取效率, 为减小系统复杂性奠定了良好的基础。

参 考 文 献

- [1] SUH N P. Complexity :Theory and applications[M]. New York : Oxford University Press , 2005.
- [2] LEE T. Complexity theory in axiomatic design[D]. Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology , 2003.
- [3] LU STEPHEN C Y , SUH N P. Complexity in design of technical systems [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology , 2009 , 58(1) : 157-160.
- [4] MATT D T. Achieving operational excellence through systematic complexity reduction in manufacturing system design[J]. Key Engineering Materials , 2007 , 344 : 865-872.
- [5] SUH N P. Complexity in engineering[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology , 2005 , 54(2) : 581-598.
- [6] SUH N P. On functional periodicity as the basis for long-term stability of engineered and natural systems and its relationship to physical laws[J]. Research in Engineering Design , 2004 , 15 (1) : 72-75.
- [7] 滕弘飞, 王奕首, 史彦军. 人机结合的关键支持技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11) : 1-9.
TENG Hongfei , WANG Yishou , SHI Yanjun. Key supporting techniques of human-computer cooperation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2006 , 42(11) : 1-9.
- [8] 张鹏, 檀润华. 组合复杂性消除过程模型研究[J]. 农业

- 机械学报, 2010, 41(3): 182-188.
- ZHANG Peng, TAN Runhua. Design model for the combinatorial complexity elimination process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 182-188.
- [9] 张鹏, 檀润华. 系统复杂性理想解快速获取方法研究[J]. 计算机集成制造, 2010, 16(4): 746-754.
- ZHANG Peng, TAN Runhua. Rapid acquirement method for ideal result of system complexity[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(4): 746-754.
- [10] ALTSHULLER G. The innovation algorithm, TRIZ, systematic innovation and technical creativity[M]. Worcester: Technical Innovation Center INC, 1999.
- [11] 檀润华. 创新设计—TRIZ: 发明问题解决理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- TAN Runhua. Innovation design-TRIZ: Theory of innovation problem solving[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
-
- 作者简介: 张鹏(通信作者), 男, 1979年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为创新设计理论和快速响应设计。
E-mail: zhang_peng_2009@sina.com.cn
- 檀润华, 男, 1958年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为产品设计理论和创新设计方法。
E-mail: rhtan@hebut.edu.cn