

# 组合复杂性消除过程模型\*

张鹏 檀润华

(河北工业大学机械工程学院,天津 300130)

**【摘要】** 分析了组合复杂性转换为周期复杂性的 c/p 过程,并将 c/p 过程与 TRIZ 理论集成,提出了一种组合复杂性消除过程模型。首先,判断系统中是否存在组合复杂性,绘制系统功能结构图,并确定导致系统出现时间相关组合复杂性的组合。其次,应用 TRIZ 理论分析系统功能,引入一个合理的功能周期消除系统的组合复杂性。最后,将抽象的功能周期描述转化为改进后的设计方案,并以工程实例加以验证。

**关键词:** TRIZ 复杂性 c/p 过程 过程模型

**中图分类号:** TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0182-07

## Design Model for the Combinatorial Complexity Elimination Process

Zhang Peng Tan Runhua

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

### Abstract

The process of transforming the combinatorial complexity in the system to the periodic one which contained in the complexity theory based on axiomatic design put forward by Suh was analyzed. Meanwhile, through the integration of c/p transformation and TRIZ theory, a design model for the combinatorial complexity elimination process was proposed. Firstly, the combinatorial complexity exists in the system was judged, and the functional structure to determine the functions that led to the time-dependent combinatorial complexity of the system was drawn. Then, the functions were analyzed with TRIZ tools, and a reasonable combinatorial complexity of the functional period was put forward. Finally, the virtual functional period description was transformed to an improved design plan. It was verified by the engineering practice of "capacitive online thickness measurement system".

**Key words** TRIZ, Complexity, c/p transformation, Design model

### 引言

以往分析系统复杂性的方法多作用于结构域,如故障树分析(FTA)<sup>[1]</sup>、Petri 网分析<sup>[2]</sup>和因果分析法等。故障树分析方法是针对结构域中的工作状态分析系统的复杂性。与故障树分析类似,因果分析法和 Petri 网是在不同的技术领域针对系统结果,由表及里确定产生复杂性的原因。

美国麻省理工学院 Suh 提出的基于公理设计的复杂性理论<sup>[3]</sup>是复杂性科学研究领域的最新成果。根据公理设计“之”字型映射理论<sup>[4]</sup>,如果可以在功

能域解决系统的复杂性,会大大减少结构域出现复杂性的可能。而基于公理设计的复杂性理论主要作用于功能域<sup>[3]</sup>,是站在更高的层次看待实际系统中存在的复杂性。

组合复杂性转化为周期复杂性(c/p 过程,c 代表组合复杂性,p 代表周期复杂性)是复杂性理论的一个重要研究成果,为深入研究组合复杂性消除方法奠定了理论基础。文献[3]中 Suh 应用 c/p 过程解决了一些系统中的组合复杂性。但是在重复功能集的确定、功能周期的获取等几个重要的步骤中,Suh 未提出具体的确定方法。目前应用 Suh 的 c/p

过程时,只能根据重复功能集和功能周期的定义由复杂性理论专家完成。本文将基于公理设计的复杂性理论与 TRIZ 工具集成,提出“组合复杂性消除过程模型”,将系统中存在的时间相关组合复杂性消除。该模型不仅可以解决时间相关组合复杂性,也为其他类似问题的解决提供参考。

## 1 基于公理设计的复杂性理论

### 1.1 复杂性理论的基本概念

复杂性是实现功能需求不确定性的程度<sup>[3]</sup>。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,设计范围与系统范围如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

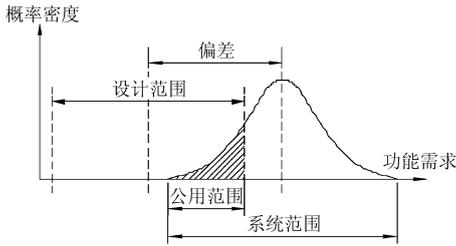


图 1 设计范围与系统范围示意图

Fig. 1 Sketch map of design range and system range

在给定精度或公差范围内,满足功能需求的设计参数确定后,系统实现功能需求的概率能够表征系统的复杂性:系统功能需求实现的概率越高,则系统的复杂性越低;系统功能需求实现的概率越低,则系统的复杂性越高。

复杂性可能是时间函数,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<sup>[4]</sup>。时间无关复杂性包括时间无关真实复杂性和时间无关虚构复杂性,简称真实复杂性和虚构复杂性。时间相关复杂性包括时间相关组合复杂性和时间相关周期复杂性,简称为组合复杂性和周期复杂性。复杂性的分类如图 2 所示。

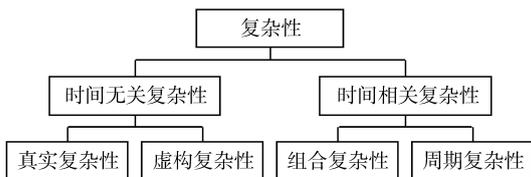


图 2 复杂性的分类

Fig. 2 Sorts of complexity

### 1.2 时间相关复杂性

时间相关复杂性包括时间相关组合复杂性和时间相关周期复杂性。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被称为时间相关组合复杂性<sup>[5]</sup>。组合复杂性最终导致一种混乱的状态或使系统出现故障。组合复杂性如图 3 所示,其  $t_1$  时刻的功能实现概率高于  $t_2$  时刻,  $t_2$  时刻的功能实现概率高于  $t_3$  时刻( $t_1 < t_2 < t_3$ ),即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。

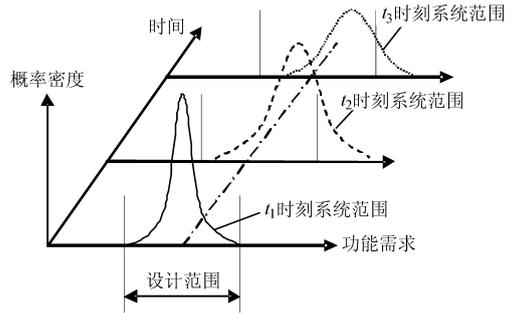


图 3 时间相关组合复杂性示意图<sup>[5]</sup>

Fig. 3 Sketch map of time-dependent combinatorial complexity

与时间相关组合复杂性不同,时间相关周期复杂性为在一个有限周期内,有限组合产生的时间相关复杂性<sup>[6]</sup>,是一种比组合复杂性更容易消除的时间相关复杂性。时间相关周期复杂性如图 4 所示,其  $t_1$  时刻的功能实现概率高于  $t_2$  时刻,  $t_3$  时刻的功能实现概率高于  $t_2$  时刻( $t_1 < t_2 < t_3$ )。在  $t_1$  到  $t_2$  时刻,系统的功能实现概率在减小,而在  $t_2$  到  $t_3$  时刻系统的功能实现概率在增加,且在  $t_3$  时刻系统的功能实现概率又恢复到初始状态( $t_1$  时刻的状态)。

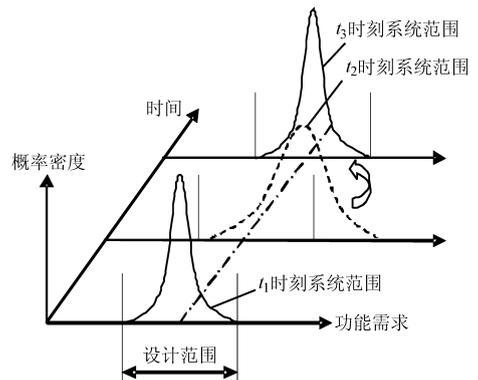


图 4 时间相关周期复杂性示意图<sup>[5]</sup>

Fig. 4 Sketch map of time-dependent periodic complexity

时间相关组合复杂性和时间相关周期复杂性的共同点是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。而时间相关组合复杂性和时间相关周期复杂性最大的区别在于组合复杂性在  $t_2$  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。所以,与组合复杂性相比周期复杂性是一种更

易消除的时间相关复杂性。基于此,研究时间相关复杂性的重点在时间相关组合复杂性。本文以时间相关组合复杂性为研究对象。

### 1.3 时间相关复杂性的转化

自然系统能够保持长期稳定是由于自然系统存在功能周期,功能周期是一个稳定系统的基础需求。系统功能需求是由一组功能实现的,这组功能在一定的周期内不断地重复,使得系统的功能需求总能实现。这组不断循环的功能被称为重复功能<sup>[3]</sup>。控制重复功能不断循环的周期,被称为功能周期<sup>[6]</sup>,引入功能周期是消除系统的时间相关组合复杂性的主要方法。系统引入功能周期必须满足两个条件:存在一组重复循环的功能集合;能够确定导致系统出现组合复杂性的有害工程参数。

在文献[3]中,Suh 总结如下8个步骤用于将系统中的组合复杂性转换成周期复杂性,这里将其简称为“c/p 过程”:

- (1) 确定一组重复功能(功能需求)集合。
- (2) 确定使系统出现组合复杂性的有害工程参数。
- (3) 通过引入功能周期转化组合复杂性为周期复杂性,即

$$T\{C_{\text{com}}(FR_a) | F_p\} = \{C_{\text{per}}(FR_a)\}$$

式中  $T\{\}$  ——转化符号

$C_{\text{com}}、C_{\text{per}}$  ——组合复杂性,周期复杂性

$F_p$  ——确定功能周期的关键功能

- (4) 根据系统重复功能集建立功能周期,并将其开始的时间设定为  $t=0$ 。
- (5) 停止系统功能需求。
- (6) 通过建立每个功能的初始状态,初始化整个系统。
- (7) 根据新周期确定满足功能需求的最佳方式。
- (8) 允许开始下一个周期。

### 1.4 c/p 过程存在的一些问题

文献[3]中 Suh 应用 c/p 过程解决了一些系统中的组合复杂性。但是在重复功能集的确定、功能周期的获取等几个重要的步骤中,Suh 未提出具体的确定方法。目前应用 Suh 的 c/p 过程时,只能根据重复功能集和功能周期的定义由复杂性理论专家完成,如图5所示。本文在 Suh 的 c/p 过程的基础上对其几个重要的步骤的实现方法进行了研究。

- (1) 在 c/p 过程中,首先是确定重复功能集合,然而 c/p 过程并未给出确定重复功能的具体方法。重复功能集合是指能够实现系统功能的功能集合。确定系统中重复功能是系统中的组合复杂性能够转

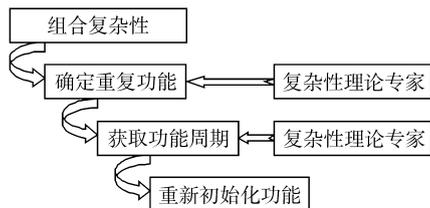


图5 c/p过程的实现步骤

Fig.5 Step of achieving c/p process

化为周期复杂性的先决条件,如何科学准确地确定系统的重复功能集,成为了c/p过程能否被广泛应用的一个重要的条件。设计者可以凭借设计经验获取重复功能集,但是设计者个人的设计经验毕竟有限,所以提出系统化的方法帮助设计者获取重复功能集显得尤为必要。

(2) 按照c/p过程,确定了系统的重复功能集和组合后就引入一个功能周期,将系统中的组合复杂性转化为周期复杂性。然而c/p过程中未给出确定功能周期的方法。因此明确一种能够科学确定功能周期的方法是十分必要的。

引入何种理论工具及如何完善上述两点是研究的重点。TRIZ理论为设计者提供了大量的理论工具和丰富的实例,可以作为弥补这两点不足的首选。

## 2 TRIZ理论与复杂性理论集成

### 2.1 TRIZ理论概述

TRIZ创始人Altshuller依据世界上著名的发明,研究了解决冲突(或矛盾)的方法,他提出了解决冲突的发明原理(inventive principle)、发明问题解决算法(algorithm for inventive problem solving)及标准解(standard technique)<sup>[5,7-8]</sup>。

在问题转化阶段和问题解决阶段,TRIZ理论为设计者提供了多种使用工具。在问题转化阶段,TRIZ理论为设计者提供了“TRIZ标准功能”、“技术进化模式”、“技术成熟度预测”、“物质-场分析”、“冲突解决矩阵”及“39个标准工程参数”等工具。同样,在解决问题阶段设计者可以应用“分离原理及实例”、“效应及实例”、“76个标准解及实例”、“40条发明原理及实例”和“多条进化路线及实例”等工具。

### 2.2 对c/p过程的改进与发展

为了消除系统中的组合复杂性,需要将c/p过程与TRIZ理论工具集成,对c/p过程进行补充,在一些关键步骤添加TRIZ工具,解决确定重复功能集和确定功能周期比较困难的问题。

#### 2.2.1 确定重复功能集

确定重复功能集是c/p过程的一个重要的步

骤,直接关系到功能周期的确定。在 c/p 过程中并未提供确定系统重复功能集的方法。只能依靠设计者对系统的了解确定重复功能集,有可能造成重复功能集不准确,也会影响到功能周期的确定。文中对确定系统重复功能集进行了深入分析,并提出容易为设计者掌握的方法。确定系统重复功能集要对系统的功能进行全面地分析并对系统的总功能进行分解,绘制出系统的功能结构图<sup>[9]</sup>。通过系统的功能结构,可以全面地了解系统中的各个子功能,为确定重复功能提供理论依据,并为确定导致系统出现组合复杂性的组合奠定基础。为此从复杂性理论和 TRIZ 理论对系统功能的定义及其之间的关系入手,应用 TRIZ 理论辅助设计者获取重复功能集。

TRIZ 理论将系统中的功能分为:有效完整功能和非有效完整功能。其中有效完整功能就是指该功能的要件都存在且有效,是设计者追求的功能。非有效完整功能是指功能中要件不完整,不能实现设计者追求的结果,或者功能要件存在但与设计者所追求的结果相冲突。在复杂性理论中,系统的功能需求是依靠重复功能集实现的,而组合是造成系统出现复杂性的原因,系统功能集可以看作由重复功能集和组合集组成。

显然,TRIZ 理论中的有效完整功能集和非有效完整功能集与复杂性理论中重复功能集和组合集之间存在一定的联系。对一个存在复杂性的系统,按照 TRIZ 理论的观点,系统内一定存在有效完整功能和非有效完整功能。存在复杂性的系统中导致系统出现复杂性的功能并不是唯一的,但不是所有的非有效完整功能都会导致系统出现组合复杂性,也就是说组合集是非有效完整功能集的一个子集。

对系统进行功能分解,根据其功能结构确定系统的总功能集  $F_{total}$ 。根据 TRIZ 理论,总功能集  $F_{total}$  包含有效完整功能集  $F_e$  和非有效完整功能集  $F_i$ ; 按照复杂性理论,系统的总功能集  $F_{total}$  包括重复功能集  $F_{re}$  和组合集  $F_c$ 。根据绘制的功能结构,设计者通过系统各个功能的实现情况可以确定有效完整功能集  $F_e$  和非有效完整功能集  $F_i$ ,但是由于系统中未实现相应功能需求的功能并不一定属于组合集,所以直接确定重复功能集  $F_{re}$  和组合集  $F_c$  比较困难。可以首先确定有效完整功能集  $F_e$  和非有效完整功能集  $F_i$ ,并根据其与重复功能集  $F_{re}$  和组合集  $F_c$  之间的关系确定  $F_{re}$  和  $F_c$ 。它们之间存在两种比较明显的关系:由于有效完整功能集  $F_e$  中的功能均可以完成相应的功能需求,所以有效完整功能集  $F_e$  是重复功能集  $F_{re}$  的子集,即  $F_e \subset F_{re}$ ;另外,组合集  $F_c$  是非有效完整功能集  $F_i$  的子集,即  $F_c \subset F_i$ 。

TRIZ 理论中的有效完整功能集  $F_e$  和非有效完整功能集  $F_i$  表征了系统各个功能的实现情况。确定系统的重复功能集需要在明确系统功能实现情况的基础上,根据系统功能实现情况与时间的关系确定系统的重复功能集  $F_{re}$  和组合集  $F_c$ 。

## 2.2.2 确定功能周期

由于导致系统出现组合复杂性的组合是与时间相关的,在引入功能周期前,其在一段时间内能够满足系统的功能需求,根据重复功能集内各个功能建立功能周期的初始化时刻。将导致系统出现组合复杂性的功能其系统范围移出设计范围的时刻定义为功能周期终止时刻。据此,为系统引入一个合理的功能周期。

## 2.3 组合复杂性消除过程模型的建立

将 Suh 提出的“c/p 过程”和 TRIZ 理论相结合,提出一种组合复杂性消除过程模型,该模型在明确了重复功能集的确定方法以及引入功能周期方法的同时还增加了判断复杂性种类的步骤。组合复杂性消除过程模型有如下几个步骤:

(1) 判断系统是否含有组合复杂性。

在应用 c/p 过程进行组合复杂性消除的过程中,组合复杂性的判断是不可或缺的一步。在复杂性理论中,设计者根据不同时刻系统的设计范围与系统范围之间的关系变化来判断系统中是否存在时间相关复杂性。若随着时间的变化系统范围持续远离设计范围,那么系统中含有组合复杂性。而设计范围与系统范围的关系由功能域的“概率密度-功能需求”曲线表示。对于设计者来说,“概率密度-功能需求”曲线难以准确获得,所以在功能域判断是否存在组合复杂性是比较困难的。

根据公理设计“之”字型映射理论可知,系统的功能域与其结构域存在映射关系。这样可以将需要在功能域判断系统是否含有组合复杂性的问题映射至结构域。在功能域判断系统组合复杂性主要依据设计范围、系统范围及时间之间的关系。在功能域中判断系统中是否含有组合复杂性的问题,在结构域转化为判断实际功能输出是否超出其允许范围。在不同时刻实际系统功能输出与功能输出允许范围之间的关系表征功能域中系统范围与设计范围的关系。

当功能域的“概率密度-功能需求”曲线无法获取时,设计者可以将功能域的复杂性映射至结构域,用“实际功能输出-功能允许范围”曲线代替功能域的“概率密度-功能需求”曲线判定系统中是否存在组合复杂性。在结构域判定系统中组合复杂性的方法,方便设计者使用,同时其判断结果又可映射回功能域,不影响复杂性在功能域的消除。系统组合复

杂性功能域映射至结构域判定过程如图6所示。

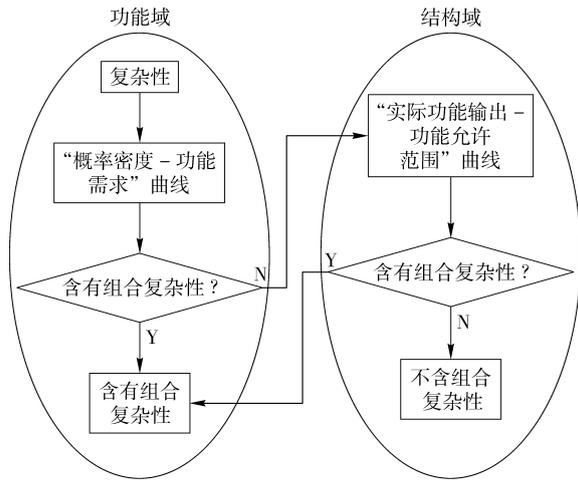


图6 组合复杂性判定过程

Fig.6 Process of judging combinatorial complexity

(2)确定系统中含有时间相关组合复杂性后,对系统进行功能分解,并绘制系统的功能结构图。

(3)应用 TRIZ 理论工具,如物质-场、发明原理、标准解及分离原理等理论工具分析系统各个功能,根据系统的特点确定系统的重复功能集  $F_{re}$  和组合集  $F_c$ 。根据  $F_{re}$  为系统引入一个合理的功能周期。

(4)应用 TRIZ 理论工具,将抽象的功能周期描述转化为改进后的设计方案。

(5)判断系统中是否还存在组合复杂性,若还存在则需重复上述步骤。

组合复杂性消除过程模型如图7所示。

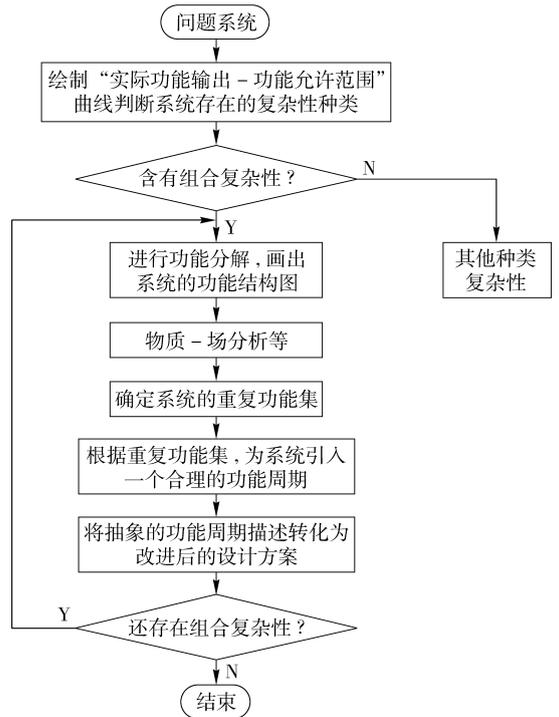


图7 组合复杂性消除过程模型

Fig.7 Design model of the combinatorial complexity elimination process

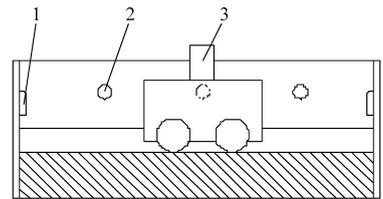


图8 电容式在线测厚系统结构示意图

Fig.8 Sketch map of capacitive online thickness measurement system

1. 限位开关 2. 霍尔开关 3. 电容传感器

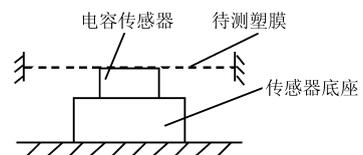


图9 静态实验示意图

Fig.9 Sketch map of static experiment

### 3 工程实例

电容式在线测厚系统结构示意图,如图8所示。

该系统应用载有电容传感器的检测车在导轨上行驶实现待测材料厚度的在线测量。其测厚分辨力为  $1\ \mu\text{m}$ , 不确定度为 3%。实验表明,测厚读数存在漂移并且最终移出误差允许范围。由于该系统示值漂移与时间相关,并且逐渐移出误差允许范围,该系统中可能存在组合复杂性,所以可以应用“组合复杂性消除过程模型”对该系统加以分析。

(1)判断系统是否含有组合复杂性。进行电容式传感器静态空载和负载示值漂移实验,静态实验示意如图9所示。

在本实例中“实际功能输出-功能允许范围”曲线即为系统的“误差-时间”曲线。该系统测量厚度的误差允许范围为  $\pm 3\ \mu\text{m}$ 。电容式传感器在开机预热后的一段时间内的测量值是在误差允许范围内的,但是随着测量的继续,示值逐渐移出误差允许范围,即系统范围随着时间的推移逐渐远离设计范围,

此问题属于时间相关组合复杂性。

(2)对系统进行功能分解,并绘制系统的功能结构图。由于该系统要求在线进行塑膜测厚,所以系统中主要功能有:电容传感器测量功能、位置检测功能和检测车驱动功能。整个系统的功能结构图如图10所示。

(3)应用 TRIZ 理论工具分析系统中的功能并确定系统的重复功能集  $F_{re}$ 。

在实例中功能实现概率最高时刻  $t_H$  和功能实现概率最低时刻  $t_L$  ( $t_H < t_L$ ) 比较明显,  $t_H$  时刻电容

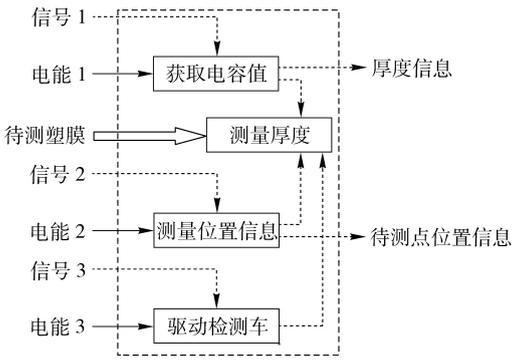


图 10 “电容式在线测厚系统”功能结构图  
Fig. 10 Functional structure diagram of capacitive online thickness measurement system

传感器测量功能、位置检测功能和检测车驱动功能均可实现；在  $t_L$  时刻位置检测功能和检测车驱动功能依然可以实现，但电容传感器测量功能无法被满足。位置检测功能和检测车驱动功能实现概率不随时间变化，且其功能需求均可实现，所以这两个功能属于重复功能集。

理想的电容式传感器测量原理如图 11 所示。

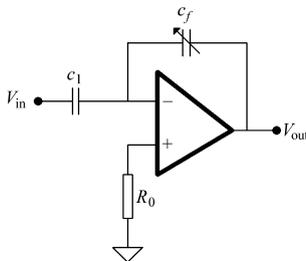


图 11 电容传感器测量原理图  
Fig. 11 Measure principle of capacitance sensor

其表达式为

$$V_{out} = -\frac{c_1}{c_f} V_{in}$$

式中  $V_{out}$ ——电容传感器输出  
 $V_{in}$ ——载波输入  $c_1$ ——标准电容  
 $c_f$ ——电容传感器电容量  
实际电路中的等效电路图，如图 12 所示。

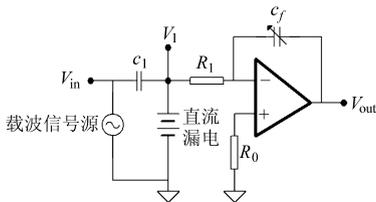


图 12 电容传感器实际等效电路图  
Fig. 12 Actually equivalent circuit diagram of capacitance sensor

其表达式为

$$V_{out} = -\left(\frac{c_1}{c_f} V_{in} + \frac{1}{R_1 c_f} \int V_1 dt\right)$$

式中  $V_1$ ——等效直流漏电电压

$R_1$ ——等效电阻

比较理想状况和实际状况可以看出，在实际电路中，出现了电容传感器等效直流漏电，导致二者表达式相差一个积分分量，正是由于这种积分现象导致了系统示值漂移。可见该系统中的组合复杂性是由于电容式传感器的等效直流漏电造成的。

对电容传感器测量功能进行物质-场分析，如图 13 所示。



图 13 系统主要功能的物质-场分析  
Fig. 13 Su-field analysis of system key function

工具(测量电路)对对象(传感器)既有有用功能又有有害功能。

(4)在确定了系统的有害功能后，利用 TRIZ 工具解决上述冲突，为系统引入合理功能周期。

系统中存在图 13 所示的冲突，TRIZ 理论有 3 种理想化解策略<sup>[10]</sup>与之对应，如图 14 所示。

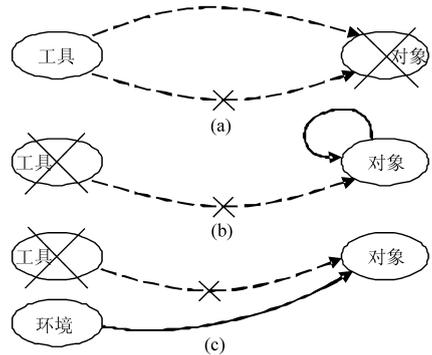


图 14 解决冲突的 3 个理想策略<sup>[10]</sup>  
Fig. 14 Three ideal strategies in solving contradiction  
(a) 理想化策略 1 (b) 理想化策略 2 (c) 理想化策略 3

理想化策略 1 如图 14a，去掉对象，这将导致工具、有用作用及有害作用同时消除。理想化策略 2 如图 14b，去掉工具，对象本身或其部分行使有用作用。理想化策略 3 如图 14c，去掉工具，其有用作用指定给环境或另一工具产生。

在当前系统中，测量电路作为工具，电容式传感器是对象。根据理想化策略 2 和理想化策略 3 将工具去除，也就是去除测量电路，无论是对象还是环境都无法完成测量工作。因此，理想化策略 2 和理想化策略 3 不适用于这个问题。理想化策略 1 去除对象(传感器)，可以消除系统的有害功能，但同时有用功能也消失了。单独使用这 3 种理想策略中任意一种均不能解决目前系统中的组合复杂性，需要再引入一种 TRIZ 工具与之配合。实验表明，测量初

期的实验数据是满足系统误差允许范围的,而后随着时间的推移渐渐移出了误差允许范围。根据这一特点可以应用 TRIZ 理论的时间分离原理,将连续测量改为间歇测量,在系统自动校零后进行测量,测量一段时间后停止测量,系统再次自动校零。

根据系统中的重复功能集,功能周期可以规划为:首先初始化检测车巡检功能、位置测量功能和电容传感器测量功能。测量一段时间后终止功能周期。重新初始化系统各个功能,准备开始下一个周期。

在这个步骤中应用 TRIZ 理论中的物质-场分析系统中存在的复杂性,并且确定了系统的重复功能集,据此确定了系统的功能周期。

(5)确定系统功能周期后应用 TRIZ 理论工具将抽象的功能周期描述,转化为改进后的设计方案。根据上述理论分析,可以应用 TRIZ 理论的空间分离原理,传感器在测量一段时间后,自动离开待测量塑膜,实现传感器的自动校准并初始化。引入这样一个功能周期,消除了系统中存在的组合复杂性。最终的解决方案是在导轨的一端增加一段向下斜面,检测车正常运行时,进行正常的测量。当检测车运行到斜面位置时,传感器自动离开测量的塑膜,进行空载自动校零。

(6)为了验证改进后的系统是否还存在组合复杂性,对改进后的系统进行了检测车巡检实验,测量厚度额定值为 112  $\mu\text{m}$  标准塑膜,每 30 min 进行零点自动校准,其他实验条件与静态实验相同,巡检实验数据如表 1 所示。

表 1 巡检实验数据

Tab. 1 Dynamic experimental date

 $\mu\text{m}$ 

| 定点位置 | 显示值 |     |     |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1    | 112 | 113 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 |
| 2    | 113 | 113 | 113 | 112 | 112 | 112 | 112 |
| 3    | 112 | 111 | 112 | 111 | 111 | 111 | 112 |
| 4    | 113 | 113 | 112 | 112 | 112 | 113 | 112 |
| 5    | 113 | 112 | 111 | 112 | 112 | 112 | 113 |

通过表 1 的巡检数据可以看出电容式在线测厚系统经过改进后,测量值均在误差允许范围内,改进后系统的组合复杂性被消除,满足误差要求,实现了系统的功能需求。

通过上述实例可以看出,应用基于公理设计的复杂性理论并结合 TRIZ 理论,可以在功能域消除系统的复杂性。基于公理设计的复杂性理论是站在功能域审视系统存在的复杂性,将系统结构域中体现出的复杂性提升至功能域,在求解过程中摆脱了结构域中领域知识对求解过程的束缚,有利于获取消除系统复杂性的解。

#### 4 结束语

通过对“电容式在线测厚系统”组合复杂性的确定和消除,可以看出“组合复杂性消除过程模型”对于消除系统中所含的组合复杂性是行之有效的。在设计者基本掌握了 TRIZ 理论和基于公理设计的复杂性理论后,“组合复杂性消除过程模型”可以帮助设计者消除工程设计中所含的时间相关组合复杂性。

#### 参 考 文 献

- Waldrop M M. Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos[M]. New York: Simon & Schuster, 1992.
- Naedele M, Janneck J W. Design patterns in Petri net system modeling[C] // Proceedings of 4th IEEE Int. Conf. on Engineering of Complex Computer Systems, 1998:47 ~ 54.
- Suh N P. Complexity: theory and applications[M]. New York: Oxford University Press, 2005.
- Suh N P. A theory of complexity, periodicity and the design axioms[J]. Research in Engineering Design, 1999, 11(2): 116 ~ 131.
- 张付英,张林静,王平. 基于 TRIZ 进化理论的产品设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 116 ~ 119.  
Zhang Fuying, Zhang Linjing, Wang Ping. Study on product innovative design based on TRIZ evolution theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 116 ~ 119. (in Chinese)
- Lee T. Complexity theory in axiomatic design[D]. Cambridge MA: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- 徐起贺. 现代机械产品创新设计集成化方法研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 102 ~ 105.  
Xu Qihe. Research on integrated design method for creative design of modern mechanical product[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 102 ~ 105. (in Chinese)
- Altshuller G. The innovation algorithm, TRIZ, systematic innovation and technical creativity[M]. Worcester: Technical Innovation Center, INC, 1999.
- 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.
- Fey V, Rivin E. Innovation on demand: new product development using TRIZ[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.