

# 液体样品预处理装置中黏稠液体定量转移结构创新

曹国忠<sup>1</sup>, 檀润华<sup>1</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>, 杨志岩<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学创新设计研究所, 天津 300130; 2. 天津科技大学现代分析技术研究中心, 天津 300457)

[摘要] 为解决液体样品预处理装置中罐体之间黏稠液体定量转移无法准确实现的问题, 综合应用发明问题解决理论(TRIZ)和约束理论(TOC)进行问题分析与求解。从系统的角度分析了样品预处理装置的组成及要素间的相互关系, 基于 TRIZ 进化模式和 TOC 必备树确定了样品预处理装置的核心问题, 应用基于 TRIZ 的计算机辅助创新软件 InventionTool 3.0 中的冲突模块、标准解模块和效应模块进行了设计方案的选择、评价和修正, 提出了实现液体样品预处理装置中黏稠液体定量转移的原理解。

[关键词] TRIZ; TOC; 样品预处理装置; 改进设计

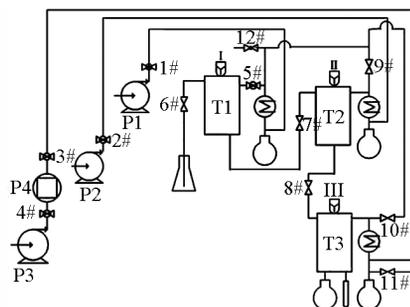
[中图分类号] TH122 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)01-0030-06

## 1 前言

农药残留问题一直困扰着食品和中药药品的安全。文献[1]提出了一种基于组合蒸馏的样品前处理技术, 并研制成液体样品预处理装置, 如图 1 所示。该装置运用载体、携带体和组合蒸馏技术实现待测样品中微量成分的提取、分离和富集, 适用于大量样品中沸程为 120 ~ 600 °C 的痕量组分的半制备级富集。装置的分子蒸馏系统中的冷端接收器设计为可更换的结构, 能够完全避免样品的交叉污染问题。全部处理过程可自动完成, 大大提高了处理结果的重复性。只要选择合适的分子蒸馏温度、分离载体、分离携带体以及进样速度、各级蒸馏的温度和真空度, 就可以分离富集到不同物理性质的组分, 是气相色谱分析和样品半制备分离中较好的样品前处理方法。

按照工作原理要求, 液体样品预处理装置一方面要实现黏稠液体在 3 个不同真空度罐体之间的定量转移, 另一方面要能够自动调节真空度与进样量

的关系保持真空系统的稳定。装置中一级蒸馏



T1—降膜蒸馏器; T2—刮膜蒸馏器; T3—分子蒸馏器;  
P1~P3—真空泵; P4—扩散泵; 1~4—真空切断阀;  
5, 9, 10—清洗阀; 6~8—进样阀; 11, 12—排气阀  
其余为导管、烧瓶(冷凝接收器)

图1 样品预处理装置原理图<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of sample pretreatment device

(T1) 的温度为 70 °C, 真空度为 0.08 MPa, 流速为 5 ~ 15 mL/min; 二级蒸馏(T2) 的温度为 60 °C, 真空度为 80 Pa, 流速为 1 ~ 10 mL/min; 三级蒸馏(T3) 的温度为 105 °C, 真空度为 5 Pa, 流速为 1 ~

[收稿日期] 2009-05-25

[基金项目] 国家自然科学基金项目(70972050); 科技基础性工作专项(2008IM030100); 河北省自然科学基金项目(E2008000101)

[作者简介] 曹国忠(1974-), 男, 河北唐山市人, 河北工业大学创新设计研究所副教授, 博士, 主要从事产品创新设计理论及应用、软件工程等方面的研究; E-mail: caoguozhong@hebut.edu.cn

10 mL/min。待测液体在蒸馏器 T1, T2, T3 之间的流动主要依靠三者间的真空梯度实现, 取样阀 6, 7, 8 的关闭依靠阀内的复位弹簧实现。现有装置工作时, 由于液体黏度大, 进样阀的动作具有滞后性, 不能保证液体的定量转移和真空系统的稳定, 直接影响取样的一致性和取样工作周期, 需要对样品预处理装置进行改进设计。

发明问题解决理论 (theory of inventive problem solving, TRIZ) 是专门研究创新的理论, 为产品创新设计提供了一套系统化方法、步骤与工具, 如发明原理、分离原理、标准解、效应库等<sup>[2]</sup>。约束理论 (theory of constraints, TOC) 是一种管理理念和思维工具的集合<sup>[3]</sup>, 可用于工程设计分析系统中的相关元素以及它们之间的相互关系, 确定系统组成元素中最薄弱的环节。将 TRIZ 和 TOC 集成, TOC 用于确定系统改进设计中真正要解决的问题, 然后用 TRIZ 中的工具解决问题, 产生样品预处理装置的改进方案。

## 2 系统分析

问题总是要存在于一个技术系统中, 系统处于环境之中, 与环境存在能量、物质及信息的交换。因此, 在解决问题之前设计者必须熟悉系统的构成; 问题所在的系统、超系统、相关系统和子系统, 此外还要了解系统构成元素之间的相互作用以及设计者对系统元素的可控制性等。

### 2.1 系统的构成

问题所在的系统为: 液体输送系统 (实现原理、改进问题)。

子系统为: 进样阀、导管、烧瓶 (冷凝接收器)。

其超系统为: 样品预处理装置。

超系统中的其他系统为: 降膜蒸馏器、刮膜蒸馏器、分子蒸馏器、真空泵、扩散泵、真空切断阀、排气阀和清洗阀。

处理对象为: 待测液体。

处理结果为: 农残组分。

### 2.2 系统元素间的相互作用

功能是 TRIZ 的基本概念之一, 功能由相互作用的三个基本元件组成, 如图 2 所示。图中  $S_2$  是主动元件,  $S_1$  是被动元件, 通过作用将  $S_1, S_2$  连接形成功能。其意义为:  $S_2$  作用于  $S_1$ , 改变或保持  $S_1$  的参数值或性质<sup>[4]</sup>。图 2 中作用的类型如图 3 所示。

依据系统组成分析及样品预处理装置的基本流

程, 确定各元素间的作用、类型并绘制系统功能模型, 如图 4 所示。图 4 中标记出存在问题的功能, 完善这些问题功能的实现是后续改进设计的出发点。



图 2 功能符号

Fig. 2 Function symbol



图 3 作用符号

Fig. 3 Action symbol

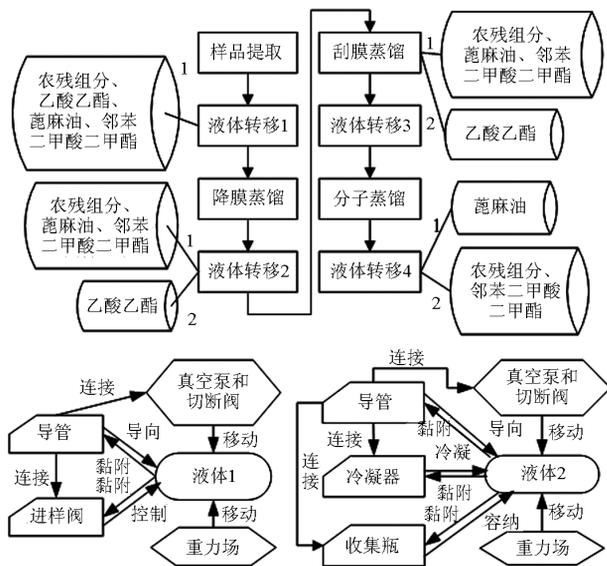


图 4 样品预处理装置中各元素间的相互作用

Fig. 4 The interaction between elements in sample pretreatment device

### 2.3 系统元素的可控性

直接改变: 进样阀、导管、烧瓶。

间接改变: 降膜蒸馏器、刮膜蒸馏器、分子蒸馏器。

不能改变: 真空泵、扩散泵、真空切断阀、排气阀、清洗阀、待测液体。

## 3 核心问题的确定

产品设计是一个不断解决冲突, 并推动其向理想状态趋近的过程, 在这个过程中发现并确定设计冲突尤为重要, 它是实施创新的关键步骤。

在产品的进化过程中, 产品的一些部件、功能或参数的改善可以使系统的性能得以改善, 但同时也

会使产品的其他部件性能、功能或参数发生恶化,从而导致设计冲突产生。TRIZ 中的进化理论 (directed evolution, DE)<sup>[2]</sup> 可指导设计者确定产品的理想目标;TOC(约束理论)中的必备树(prerequisite tree, PRT)用来系列化地确定实现目标的过程中所遇到的各种障碍以及克服这些障碍所采取的中间步骤、措施和必要条件。DE 与 PRT 符合相似学的三个基本定律,即序结构相似、信息相似和支配原理相似,具有高度的相似性,如图 5 所示。因此,两者具备集成的结合点,可以相互之间取长补短。

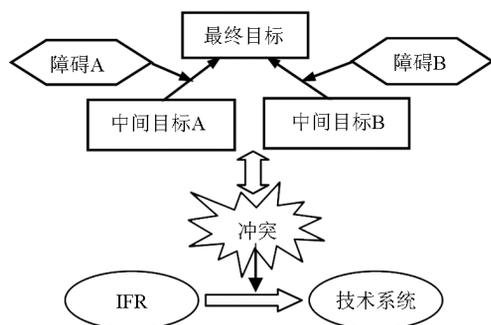


图 5 进化理论与 PRT 的相似性

Fig. 5 Similarity of evolutionary and PRT

基于 DE 与 PRT 确定样品预处理装置核心问题的过程如下:

第一步:确定设计目标

选择 DE 的模式 5 作为样品预处理装置的进化方向,即增加系统的动态性与可控性,确定装置的最终目标液体定量转移。

第二步:建立必备树 PRT 并确定冲突区域

确定中间目标及其相应的障碍,如图 6 所示。

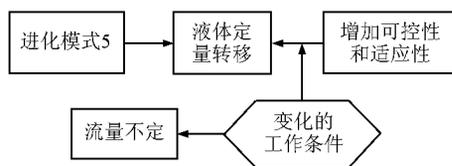


图 6 样品预处理装置故障的确定

Fig. 6 Identification of sample pretreatment device failure

第三步:根据障碍树确定核心问题

根据 DE 和 PRT 确定障碍树,如图 7 所示。障碍树是对设计障碍进一步细分,将障碍树的基本事

件作为设计冲突中需要改善的因素,区分设计冲突的主次地位。

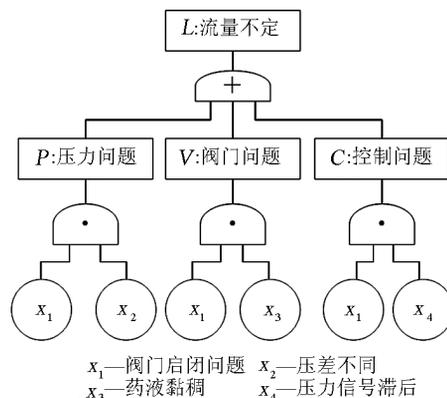


图 7 样品预处理装置障碍树

Fig. 7 Obstacles tree of sample pretreatment device

图 7 所示障碍树的结构函数为:

$$T = P + V + C = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_4$$

障碍树中有  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  五个底事件,它的最小割集分别是:

$$\{x_1, x_2\}, \{x_1, x_3\}, \{x_1, x_4\}$$

图 7 所示的障碍树基本事件的结构重要度顺序为:

$$I(1) > I(2) = I(3) = I(4)$$

它表明最小割集  $\{x_1, x_2\}, \{x_1, x_3\}, \{x_1, x_4\}$  中  $x_1$  冲突的重要程度以及  $x_1$  与  $x_2, x_3, x_4$  间关联关系,首选  $x_1$  组成的冲突,同时兼顾其他冲突进行求解转化。

#### 4 领域解的产生

将图 7 中障碍树基本事件进行冲突标准化并通过 InventionTool 3.0<sup>[5]</sup> 求解,结果见表 1。

浏览 InventionTool 3.0 中发明原理及实例,如表 2 和图 8 所示。经分析,选择 29 和 35 两条发明原理。依据发明原理 29,将阀内的复位弹簧用气动或液压零部件代替,采用快速直线气动阀。依据发明原理 35,在系统中增加振动源,使液体产生雾化效果,当液体雾化后,则改变了黏度,用阀门控制进入蒸馏器的液体体积成为可能。

表 1 冲突的标准化与 TRIZ 解

Table 1 Standardization of contradiction and TRIZ solution

冲突名称	改善的因素	恶化的因素	TRIZ 解(发明原理)
$x_1$ 组成的冲突	27 可靠性	36 装置复杂性	13 反向、35 参数变化、1 分割
$x_2$ 组成的冲突	35 适应性及多用性	36 装置复杂性	15 动态化、29 气动和液压结构、37 热膨胀、28 机械系统的替代
$x_3$ 组成的冲突	25 时间损失	31 问题产生的有害因素	35 参数变化、22 变害为益、18 振动、39 惰性环境
$x_4$ 组成的冲突	39 自动化程度	38 监控与测试的困难程度	34 抛弃与修复、27 低成本不耐用的物体代替、25 自服务

表 2  $x_1$  冲突对应的发明原理

Table 2 Inventive principles for  $x_1$  contradiction

发明原理	描述
13 反向	将一个问题说明中所规定的操作改为相反的操作;使物体中的运动部分静止,静止部分运动;使一个物体的位置颠倒
35 参数变化	改变物体的物理状态,既使物体在气态、液态、固态之间变化;改变物体的浓度或黏度;改变物体的柔性;改变温度;改变压力
1 分割	将一个物体分成相互独立的部分;使物体分成容易组装及拆卸的部分;增加物体相互独立部分的程度
18 振动	使物体处于振动状态;如果振动存在,增加其频率,甚至可以增加到超声;使用共振频率;使压电振动代替机械振动;使超声振动与电磁场耦合
29 气动与液压结构	物体的固体零部件可用气动或液压零部件代替
25 自服务	使一物体通过附加功能产生自己服务于自己的功能;利用废弃的材料、能量与物质
.....	.....

改善特性: 可靠性 恶化特性: 装置的复杂性

第35号: 参数变化

描述:

改变物体的物理状态(如变为气态、液态或固态); 改变浓度或密度、弹性、温度

动画:



使用不同状态的物体



温度



灵活性

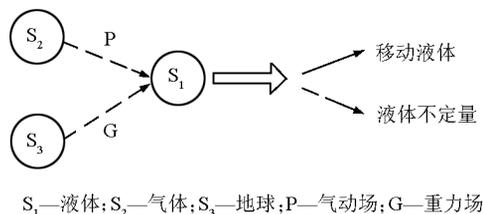
图 8  $x_1$  冲突对应的发明原理及实例

Fig. 8 Inventive principle and example for  $x_1$  contradiction

通过方案分析可知,采用改变结构参数或改变液体黏度能在一定程度上改善液体定量转移问题,但无法彻底地解决现有冲突,需要进行问题转化。

标准解是对问题综合与转换的规则,目的是克服或避开技术冲突和物理冲突。运用标准解解决问题时,没有必要阐明冲突。标准解有益于解决第三级发明问题,对于改进现有系统作用明显。一个问

题包含两个或多个子系统之间不期望的相互作用时,可以使用标准解。在现有系统内解决一个发明级别的问题,经常需要引入一些全新的元素。应用标准解需要先构建物质-场模型,如图 9 所示。



$S_1$ —液体;  $S_2$ —气体;  $S_3$ —地球; P—气动场; G—重力场

图 9 液体输送系统物质-场模型

Fig. 9 Substance-field model of liquid delivery system

样品预处理装置液体输送系统为非有效完整系统,压差和重力不能保证液体定量转移,需要改进以得到期望效果。应用 InventionTool 3.0 软件中标准解模块,浏览标准解范围条目确定原理解,如图 10 所示。图 10 中第 16 号标准解表明要实现液体定量转移需采用其他易控场。利用 InventionTool 3.0 软件中效应模块确定实现液体定量转移的效应和实例。

效应(Effect)是 TRIZ 中基于知识的工具<sup>[6]</sup>,有利于高级别创新解的产生<sup>[7]</sup>。浏览功能树视图中

移动液体功能,可得到多个可行效应解,如毛细管效应、重力效应、电动力学效应、容积置换效应、库伦效应、动量效应、压电效应、电渗效应、热力学效应等,如图 11 所示。效应对应的实现结构有叶轮泵(动量效应)、活塞泵(容积置换效应)、齿轮泵(容积置换效应)、磁流泵(库伦效应)、超声泵(驻波效应)、氦泵(热力学效应)、电渗泵(电渗效应)、气泵(容积置换效应)、蠕动泵(容积置换效应)、压电泵(压电效应)等。

第2类 第2组 第01号标准解  
No.16增加场的可控性

解释:

对于可控性差的场,用一易控场代替,或增加一易控场。如由重力场变为机械场,由机械变为电或电磁场。其核心是由物体的物理接触到场的作用

动画:

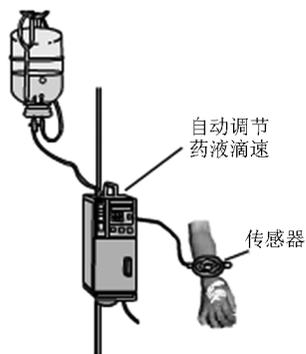


图 10 标准解

Fig. 10 Standard solutions



图 11 “移动液体”功能对应的效应

Fig. 11 Effect for function of move liquid

试样在各级蒸馏器间转移速度为 1 ~ 15 mL/min,属微流控制技术领域。作为流体驱动元件的微流量泵是实现微流体控制系统的基础。上述各类泵中可实现微流体控制的有压电微泵、静电微泵、电磁

微泵、热气动微泵、双金属记忆合金微泵、电渗微泵、电液致动微泵、微泵、磁流体致动微泵、表面张力微泵等。

TRIZ 中增加能量可控性定律指出:能量控制的难易顺序为万有引力形成的势能、机械能、热能、电磁能,将可控性较差的能量形式变为可控性较好的形式是技术进化的趋势,如图 12 所示。另外,技术系统向着减少能量流经系统路径长度的方向发展,即减少能量形式的转换次数。

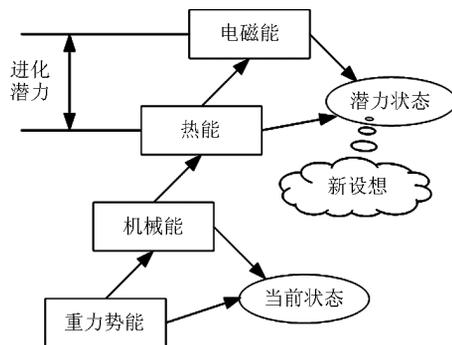


图 12 进化路线:增加能量的可控性

Fig. 12 Evolution line: increase energy controllability

综合样品预处理装置中液体特性、能量可控性和能量最短转换路径,将图 1 中 6 ~ 8 进样阀改为压电微泵,实现液体样品预处理装置中黏稠液体定量转移。压电微泵以压电陶瓷为核心器件、以时序控制技术与多腔体系统谐振技术构造小型与微型流体泵,可实现 0 ~ 1 000 mL/min 流量与 0 ~ 50 kPa 输出压的流体驱动,并可进行流量精确控制,具有体积小、重量轻、工作稳定、操作性好且易于集成制造的优点,广泛应用于生物医学、精细化工、航空航天、仪器仪表等领域。

## 5 结语

应用 TRIZ 进化模式和 TOC 必备树确定了样品预处理装置的核心问题,利用计算机辅助创新软件 InventionTool 3.0 进行了设计方案的选择、评价和修正,提出了实现黏稠液体定量转移的原理解。实验证明设计方案是可行的,有效的。

## 参考文献

[1] 杨志岩,同仲丽,王建清.组合蒸馏技术用于气相色谱分析的样品前处理[J].色谱,2007,25(5):654-656  
[2] Altshuller G. The Innovation Algorithm, TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity [M]. Technical Innovation Cen-

ter, INC., Worcester, 1999

- [3] Willian H, Dettmer. Goldratt's theory of constraints: A system approach to continuous improvement [M]. Milwaukee, Wisconsin . USA: ASQC Quality Press,1997
- [4] 檀润华. 发明问题解决理论[M]. 北京:科学出版社,2004
- [5] 檀润华,马建红,曹国忠. 计算机辅助产品创新软件 Invention-

Tool3.0[P]. 中国,软件登记号:2006SR13729,2006-04-20

- [6] Savransky S D. Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving [M]. Boca Raton, Florida; CRC Press, 2000;144-150
- [7] 曹国忠,檀润华,张瑞红,等. 基于效应的概念设计过程模型研究[J]. 中国机械工程,2005,16(9):823-827

## Structrue innovation for quantitative transfer of viscous liquid in sample pretreatment device

Cao Guozhong<sup>1</sup>, Tan Runhua<sup>1</sup>, Zhang Peng<sup>1</sup>, Yang Zhiyan<sup>2</sup>

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

2. Institute of Packaging and Printing, Technical University of Tianjin, Tianjin 300457, China)

[ **Abstract** ] To solve the problem that quantitative transfer of viscous liquid between tanks in the sample pretreatment devices couldn't be realized precisely, TRIZ and TOC are integrated for problem analysis and solving. The composition of sample pretreatment device and their relationship are analyzed from the system point of view, and then the core issues of the device is determined under the basis of evolution mode of TRIZ and prerequisite tree of TOC. Based on the modules of the conflict, standard solution and effect in computer-aided innovation software-InventionTool3.0, the choice, evaluation and amendment of design solutions is carried out. Finally, the principle solution to realize quantitative transfer of viscous liquid in sample pretreatment devices is put forward.

[ **Key words** ] TRIZ; TOC; pretreatment device; improvement design