

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.021

# 基于 AD 与 TRIZ 组合的产品概念 创新设计方法研究

汪年平, 周俊

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

**摘要:**公理设计(Axiomatic Design, AD)和发明问题解决理论(TRIZ)为产品概念创新设计提供方法和理论依据。以概念设计为研究对象,利用TRIZ指导完成AD中的功能—结构映射,得出设计矩阵;若不满足独立公理,又用TRIZ中的技术法则将AD中的耦合问题转换成TRIZ的标准参数,用TRIZ工具消除耦合,使其满足独立公理,建立基于AD与TRIZ组合的产品概念创新设计方法。最后,将其运用于自动切片机的设计和改进。该设计方法可优化产品概念设计流程,缩短设计周期。

**关键词:**产品概念设计;TRIZ理论;公理设计;自动切片机

中图分类号:TH166 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)02-0082-06

## Research of Conceptual Innovation Design Method Based on AD and TRIZ

WANG Nianping, ZHOU Jun

(Mechanical Engineering College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Axiomatic Design (AD) and TRIZ supplies a concept of product innovation design method and theoretical basis. Taken the conceptual design as the research object, using TRIZ to guide the function-structure of the complete AD mapping, the design matrix was gotten. If it didn't satisfy the independence axiom, the technology principle of TRIZ transformed AD coupling problem into the standard parameters of TRIZ, and eliminated the coupling with TRIZ tools to satisfy the independence axiom. The product conceptual innovation design method was established based on the AD and TRIZ. Finally, it was applied to the design of the automatic slicing machine and improvement. The design method of product can optimize conceptual design process, and shorten the design cycle.

**Key words:** product conceptual design; TRIZ; axiomatic design; automatic slicing machine

随着全球化进程的快速推进,企业间的竞争日趋激烈。企业为了抢占市场份额、获得持续利润,缩短产品设计周期及产品创新已经被看作是生死存亡的因素。产品设计水平、设计创新能力直接反映一个国家及企业的经济发展程度,因此,产品设计创新越来越被重视。

产品概念设计是产品设计最初阶段,对产品性能或者产品使用具有决定性意义。研究表明,产品概念设计决定了从设计到生产该产品所有费用的75%,且概念设计的缺陷在后续设计中得不到弥补,所以产品概念设计的好与坏直接决定了该产品的好坏。产品创

新的核心在于概念设计,虽然AD和TRIZ理论在产品概念设计领域已有广泛应用,但依然是国内众多外学者研究的热门对象,并取得了丰硕的成果。Vigain H等人研究了基于AD的产品设计决策系统<sup>[1]</sup>;程贤福,肖人彬等人应用AD理论,对起重机起升机构的设计过程进行分析,揭示了起升机构的FR、DP分解及两者间的映射过程<sup>[2]</sup>;安小凡对TRIZ理论及其在产品创新中的运用进行了研究,为产品设计提供一种新的方法<sup>[3]</sup>。将AD与TRIZ组合的设计方法运用于产品概念设计相继出现,但还都是以两大理论各自的研究为出发点,从设计结构前后顺序进行改进,对产品概念

收稿日期:2013-10-13;修回日期:2013-10-25

基金项目:国家自然科学基金(51205220)

作者简介:汪年平(1989),男,江西九江人,硕士研究生,主要从事机械创新设计方法研究。E-mail:np\_wang2013@163.com

设计存在许多不足。

根据两种理论的内在联系,作者想在产品概念设计开始,将 TRIZ 理论引入 AD 设计中,把两种设计理论融合在一起,达到相互促进、相互制约的效果,使产品概念设计的每一环节尽可能最优,文中以此为研究起点,建立一种基于 AD 和 TRIZ 理论组合的产品概念创新设计模型,为产品概念设计提供了一种有效的方法。

### 1 公理设计理论

1990 年美国麻省理工学院(MIT)的 Nam Pyo Suh 教授在《The Principles of Design》书中第一次完整提出 AD 理论,随即在产品行业产生了重大影响<sup>[4]</sup>。

#### 1.1 域和映射

AD 的重点在于如何将得到的产品信息转化成功能设计要求和如何选择最优的设计参数来满足这些功能要求,域和映射是 AD 中非常重要的概念。AD 设计过程被分成 4 个设计域:用户域、功能域、物理域、过程域。其包含的相关元素分别为用户属性(Consumer Attributes, CA)、功能需求(Functional Requirements, FR)、设计参数(Design Parameters, DP)、过程变量(Process Variables, PV)<sup>[5]</sup>。产品设计过程由相邻两个域的映射组成,如图 1 所示。

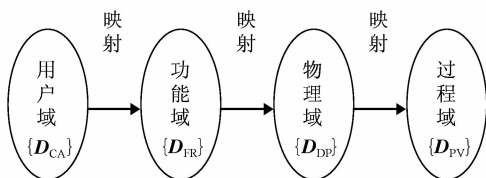


图 1 域映射关系

Figure 1 Domain mapping relationship

相邻的两个域间,左边的域表示“要达到什么样的目标(what)”,而右边的域则表示“选择什么方法来实现左边域的要求(how)”。在不同的设计领域,不同的设计任务都可以由这四个域来描述<sup>[6]</sup>。

1) 用户域  $D_{CA}$ 。产品是为了满足用户的需求。 $D_{CA}$ 是产品整个功能的概要,为确定设计目标,产品设计作铺垫。

2) 功能域  $D_{FR}$ ,是将  $D_{CA}$ 中产品所有的信息转换成产品各设计功能要求,反映产品所具有的特定用途和各种特性。设计约束( $D_{CS}$ )是  $D_{FR}$ 中的元素, $D_{FR}$ 的设计必须满足设计  $D_{CS}$ 的制约。

3) 物理域  $D_{DP}$ ,是对应  $D_{FR}$ 的产品结构总体的描述。是产品结构从抽象到具体整个阶段的反映。设计参数是  $D_{DP}$ 中能够实现  $D_{FR}$ 中功能要求的物理变

量。 $D_{DP}$ 由设计参数的集合组成。

4) 过程域  $D_{PV}$ ,是对产品加工过程的描述,指实现设计参数的加工制造方法。

#### 1.2 设计公理

从功能域  $D_{FR}$ 向物理域  $D_{DP}$ 映射的过程中,当产品设计有两个或两个以上功能要求( $D_{FR}$ )时,设计结果必须是能够满足  $D_{FR}$ 中的每一个  $D_{FR}$ 而不影响到其它的  $D_{FR}$ ,即必须选择一组正确的设计参数( $D_{DP}$ )去满足  $D_{FR}$ 和保持各  $D_{FR}$ 相互独立。

1) 独立公理。是保持功能需求 FR 相互独立判断的依据。域与域之间的映射过程可用设计目标和设计参数的特征向量来表示,其数学表达如式(1)所示

$$\{D_{FR}\} = [A] \{D_{DP}\} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \{D_{DP}\} \quad (1)$$

因各域之间的映射过程雷同且独立公理重点是强调  $D_{FR}$ 与  $D_{DP}$ 的关系,故以  $D_{FR}$ 到  $D_{DP}$ 的设计为代表,讨论独立公理。

把式(1)中的矩阵  $[A]$ 称为设计矩阵。根据  $[A]$ 的形式,利用独立公理即可以判别  $D_{FR}$ 中各个功能间的独立性。 $D_{FR}$ 相互独立的条件是设计矩阵  $[A]$ 属于无耦合设计或解耦设计,即  $[A]$ 必须是对角矩阵或三角型矩阵。

2) 信息公理。当存在多个设计方案时,可以采用信息公理对设计方案进行评价,选出最优的设计方案。

### 2 TRIZ 理论及运用

1946 年俄国学者阿利赫舒列尔(G. S. Altshuller)和他的同事在研究大量专利后,首次提出 TRIZ 理论<sup>[7]</sup>。TRIZ 解决问题的过程如图 2 所示。首先分析实际问题的类型,将问题用 TRIZ 术语表述;其次把问题转化为 TRIZ 的问题,查询相应的 TRIZ 工具,得出解决方案;最后将 TRIZ 解决方案与实际情况相结合,找出问题实际解。

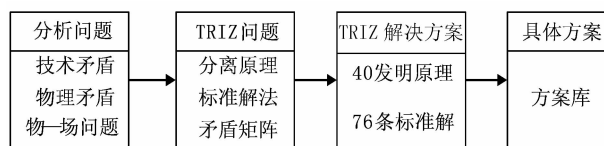


图 2 TRIZ 解决问题的过程

Figure 2 Process of TRIZ solving problems

TRIZ 理论用于分析问题是是否有可遵循的科学方法和法则,帮助快速确认问题的关键,将 TRIZ 中的冲

突和效应引入 AD 作为解决设计问题的工具,在 AD 中的产品概念设计功能到结构映射过程,运用 TRIZ 理论进行结构参数设计,得出设计矩阵 $[A]$ ;若 $[A]$ 不满足独立公理,再利用 TRIZ 理论中的技术法则将 AD 中的耦合问题转换成 TRIZ 理论的标准参数,用 TRIZ 理论解决 AD 中的耦合问题,使其解满足独立公理。

### 3 基于 AD 与 TRIZ 组合的产品概念创新设计

分析 AD 和 TRIZ 得出两大理论在各自应用中有许多特点<sup>[8-11]</sup>:AD 为设计建立了科学基础,给设计者提供了基于逻辑的、推理的思想过程;TRIZ 用于揭示创造发明的内在规律和原理,澄清、强调产品创新设计中存在的矛盾,利用 TRIZ 工具完全解决矛盾,获得最终的理想解,可大大加快人们创造发明的进程而且能得到高质量的创新产品。两者都是从分析问题开始,AD 是从产品功能出发,寻求满足功能要求的解,得到的解理论性很强,与实际可能会有偏差;而 TRIZ 是专家们从大量专利总结出来的,利用 TRIZ 指导完成的产品设计的解更接近实际。

文中将两者组合,来指导产品概念创新设计。在 AD 中 FR 到 DP 的映射过程中引入 TRIZ,使产品概念设计解更接近实际,弥补 AD 设计出来的解的不足,AD 又能为 TRIZ 提供现成的问题分析,两者在功能和结构上能很好的弥补彼此的不足,组合运用,又能将两者的优点最大化,为产品概念创新设计提供方法和理论依据。其具体实施步骤如图 3:该设计模型由 4 个模块组成,将 4 个模块有机结合起来,设计流程清晰,方法明确,基于 AD 与 TRIZ 组合设计的产品概念创新设计中,先对设计解进行定性分析,求解出设计方案,再对设计方案进行定量计算,找出最优设计方案,以便于最后的结果更接近理想值。

### 4 基于 AD 与 TRIZ 组合的自动切片机设计

基于传统设计的切片机,是刀片和平台的组合体,如图 4,其结构简单,操作还是由手工来完成,造成人力和物力的浪费,特别是切片处理多的场合,如:大型酒店、大学食堂等影响更明显。

在总体功能要求不变的条件下,运用 AD、TRIZ 的产品设计方法、机械原理方法设计出一款自动切片机,其主要结构如图 5 所示。

自动切片机的的工作原理为:减速系统 2、3 对电机 1 输出速度进行变速处理,通过轮 11 与皮带传动轮 5 连接,在轮 5 与曲柄滑块连接,切刀 7 安装在装刀滑块 6 上,随着滑块 6 上下往复运动;同时以轮 11 为曲柄摇杆机构原动件,并在摇杆安装棘刺 4,棘刺推动棘轮

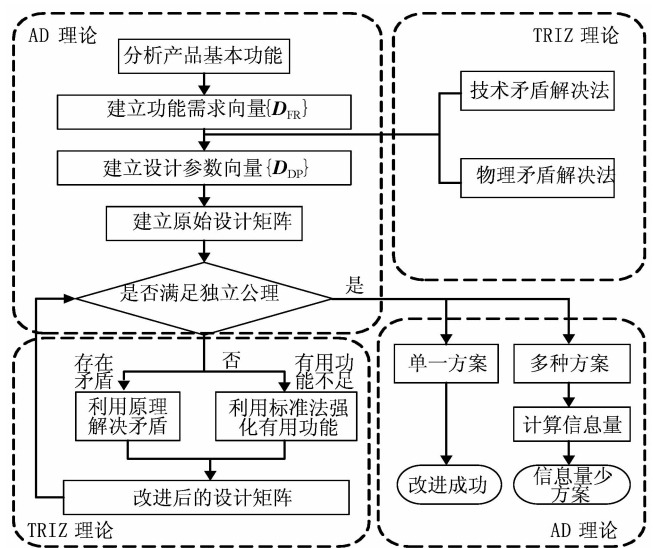


图 3 基于 AD 与 TRIZ 组合的创新设计流程

Figure 3 Innovation design process based on the combination of AD and TRIZ

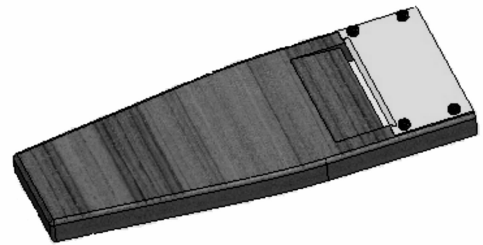
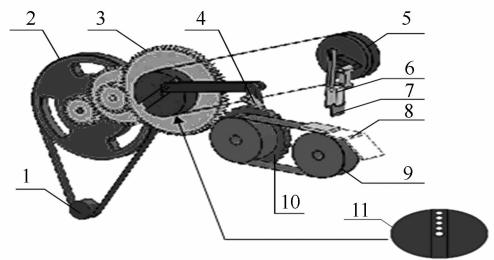


图 4 传统手工切片机

Figure 4 Traditional manual slice



1—电机;2—皮带减速轮;3—齿轮减速系统;4—棘刺;  
5—皮带传动轮;6—装刀滑块;7—切刀;8—工作台板;  
9—物料传送系统;10—棘轮;11—带孔的曲柄轮

图 5 自动切片机主要结构图

Figure 5 Main structure of automatic slicing machine

10 转动,棘轮 10 转动的同时带动物料传送系统 9 运动进行送料操作,当被切物行进到切刀 7 正下方时,会被切除。

考虑到被切物不一,各种物料的硬度、韧度不一致,所以对该机器的要求也不一样,为满足多样化要

求,采用 AD 与 TRIZ 组合的产品概念创新设计方法从结构上对自动切片进行改进。

#### 4.1 基于 AD 的功能设计变量分析

##### 4.1.1 建立功能域的功能需求向量

由自动切片机的工作原理可知,其工作时最基本的功能包括切料和送料。该机构的原动件是高速电机,需对初始速度进行减速处理,所以得有减速系统。因此,可以建立的功能需求向量如式(2)

$$\begin{bmatrix} D_{FR1} \\ D_{FR2} \\ D_{FR3} \end{bmatrix} = \begin{cases} \text{减速系统} \\ \text{自动切片} \\ \text{输送物料} \end{cases} \quad (2)$$

##### 4.1.2 建立物理域的设计参数向量

机器动力源为高速电机,其转速一般在 1 000 ~ 1 500 r/min 之间,但设计终端切片所需要的转速是几十 r/min。因此,需采用减速系统将电动机输出速度转换成所需速度。常用的减速机构有皮带传动、链传动、齿轮传动等。而链传动只能适用于链速  $v \leq 15$  m/s 的场合,所以直接否定链传动。要满足皮带传动能够有效地传递动力,就要保证有足够的正压力。因为皮带与轮能实现传动完全取决于施加的正压力的大小,两者成正比的关系。但是电机输出的转速高,则要求减速从动轮半径大,这样不仅是减速轮尺寸增加,还会导致整个机构的尺寸也相应增加,间接还会增加制造成本。

上述的分析现象在 TRIZ 中属于物理矛盾,表现为电机的输出转速既要大,又要小。应用分离原理中“将系统与反系统结合”的方法可以解决这一矛盾。于是得到  $D_{FR1}$ : 减速系统相应的结构参数  $D_{DP1}$ : 皮带轮齿轮传动。

自动切片的动作是切刀能随着装刀滑块上下往复运动,若采用凸轮机构来实现刀具的往复运动,可以很好的控制刀具的运动,实现最优的运动轨迹,但运动轨迹在得到提高的同时,刀具传递的力不仅得不到提高,反而会有所降低,这会影响到切片时切削力可能不足,影响切片的效果。

从 TRIZ 的角度看,这是一对技术矛盾。矛盾的一方面调节改善了切刀的轨迹因素,可靠性提高;另一方面造成了系统运动部件的能量不足,运动物体的能量损失。查阅 TRIZ 理论中的阿奇舒勒矛盾矩阵,我们得到了 21, 11, 27, 19 发明原理<sup>[12]</sup>,如表 1。再结合实际情况,我们选择 27: 低成本替代作为最终解决方案,在不影响切片效果,制造既方便又经济的情况下,于是得到  $D_{FR2}$ : 自动切片相应的结构参数  $D_{DP2}$ : 曲柄滑块机构。

表 1 发明原理

Table 1 Invention principle

序号	发明原理
21	快速动作
11	预先防范
27	低成本替代
19	周期性作用

对于被切物的传送,既要满足间歇运动的要求,要输送被切物。开始想到用槽轮机构,但若想要改变切片的厚度时,用槽轮机构要改变切片的厚度很难实现,我们想到用飞轮(即许多齿轮)改变速度来实现且加上减速系统已有许多齿轮来,齿轮太多改变速度复杂且不太方便操作,于是否定了这个方案。最终选择了棘轮机构,棘轮机构可以很方便的实现切片的厚度,所以设计参数  $D_{DP3}$ : 棘轮机构。于是设计参数向量为式(3)

$$\begin{bmatrix} D_{DP1} \\ D_{DP2} \\ D_{DP3} \end{bmatrix} = \begin{cases} \text{皮带轮齿轮传动} \\ \text{曲柄滑块机构} \\ \text{棘轮机构} \end{cases} \quad (3)$$

##### 4.1.3 建立原始设计矩阵

由  $D_{FR}$  到  $D_{DP}$  的映射可知,各  $D_{DP}$  与所对应的  $D_{FR}$  是强联系,所以设计矩阵  $[A]$  的对角元素是  $X$ 。设计参数  $D_{DP2}$ : 曲柄滑块机构和  $D_{DP3}$ : 棘轮机构的设计中都与输入转速有联系,而设计参数  $D_{DP1}$ : 皮带轮与齿轮传动的减速机构正是控制输入转速,所以  $D_{DP2}$ 、 $D_{DP3}$  与  $D_{DP1}$  分别相互有联系。虽然设计参数  $D_{DP2}$ : 曲柄滑块机构和  $D_{DP3}$ : 棘轮机构共一个曲柄轴,但两者运动是相互独立。综上所述,功能需求向量与设计参数向量的关系可表示为式(4)

$$\begin{bmatrix} \text{减速系统} \\ \text{自动切片} \\ \text{输送物料} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \text{皮带轮齿轮传动} \\ \text{曲柄滑块机构} \\ \text{棘轮机构} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,原始设计矩阵为式(5)

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & 0 \\ X & 0 & X \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中“ $X$ ”表示功能与结构间存在联系,“ $0$ ”表示无关。 $[A]$  是一个对称阵,所以不需要进行变形。由独立公理可知  $[A]$  是一个耦合设计,不满足独立公理需要对自动切片机进行消除耦合阶段的再设计。

#### 4.2 基于 TRIZ 中功能不足的改进处理

消除  $A_{21}$  上的  $X$ 。 $A_{21}$  上的  $X$  表示减速系统对自动切片机构存在影响。在设计过程当中,为能对尽可能

多的物料进行切片处理,在刀片很难改进的条件下,则只能从刀片的进给速度进行调整,进给速度越大,动能也越大,刀片总的能量就越大,由能量守恒定理可知,刀片用来切片处理的能量越大,即可以切硬度、韧度高一点的物料。 $A_{21}$ 上的 $X$ 是由于原始设计在实际应用中切片的性能和指标没有达到预期效果,造成切片的工作效率不足,即有用功能不足。依据基于AD与TRIZ组合的概念设计过程可知,在设计中,应该利用标准解法消除这个 $X$ 。

对于 $A_{21}$ 上的 $X$ ,它的物-场模型如图6所示。其中, $S_1$ 为切刀, $S_2$ 为物料, $F_1$ 为重力势能, $F_2$ 为动能。图6表示在重力完全作用的前提下,要切既定硬度或韧度的物料只靠切刀的重力势能是不能完成的,即不能达到切硬度、韧度高的物料。

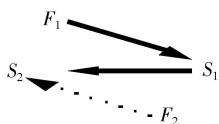


图6  $A_{21}$ 上 $X$ 的物-场模型

Figure 6 Model of physical-field of  $X$  on  $A_{21}$

由标准解法的运用流程可知,对有用功能不足的物-场模型,应该建立原始物-场模型后使用第二级标准解法,同时结合实际情况,可选择采用标准解NO.3:假如系统不改变,但永久的外部添加改变 $S_2$ 是可行的<sup>[13]</sup>。因此,为消除 $A_{21}$ 上的 $X$ 且又尽量少的增加机器的复杂性,通过改变减速系统的传动比使曲柄滑块机构有不同的输入动能 $F_2$ ,即可以满足种类尽可能多的物料的切片处理,如图7所示。

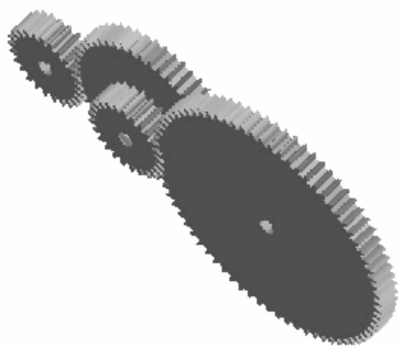


图7 齿轮轮系结构图

Figure 7 Pinion gear train diagram

### 4.3 基于TRIZ中矛盾法的改进

消除 $A_{13}$ 和 $A_{31}$ 上的 $X$ 。 $A_{13}$ 和 $A_{31}$ 上 $X$ 的分别表示物料传送与减速系统之间存在相互影响。对于物料的传送,既要满足间歇运动的同时,又要满足通过改变进

给距离而切出不同厚度的切片。物料传送是通过曲柄摇杆推动棘轮转动,棘轮每转过一个角度,物料带就会行进一段距离,而物料带前进的距离就是切片的厚度。棘轮停止转动的时间为了配合切刀从空行进刀→切片处理→空行回刀所需的时间,这就对减速系统和物料输送机构之间的运动关系提出了严格的要求。

在TRIZ中,这实际上是一个未得到解决的技术矛盾,其关键元素是物料进给距离和切刀运动周期。其表现为:物料进给距离不能太短,以免切刀发生空切;反之,不能太长,太长会造成物料未被完全切断,就开始进行进给动作。查阅TRIZ理论中的阿奇舒勒矛盾矩阵,物料进给的长度是要得到改善,而减速系统引起的切刀运动时间是被恶化,所以我们得到了19发明原理,因只有唯一解,所以选择原理解NO.19:周期性作用。为消除 $A_{13}$ 和 $A_{31}$ 上的 $X$ 且又尽量少的增加机器的制造成本和机构复杂性,我们想到了通过曲柄摇杆机构的曲柄长度和调节切刀的长度来解决这一对矛盾。切刀的长度调节没什么异议,为了简单化,没有单独设计曲柄,而是直接利用联动皮带轮的资源,如图5所示。

把连杆与皮带轮的联接点到轴心的距离称作曲柄,这样不仅结构简单、制造成本低,最重要的是实际效果并不亚于另加曲柄。

### 4.4 基于独立公理的方案评价

在完成上述两个改进, $A_{21}$ , $A_{13}$ 和 $A_{31}$ 上的 $X$ 都被消除,对矩阵 $[A]$ 改进后的矩阵 $[B]$ 为式(6)

$$[B] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \quad (6)$$

由独立公理可知,改进前的设计矩阵是耦合设计,改进后的矩阵是解耦设计,且解耦设计是优于耦合设计的,则可以判断出,设计方案是可行的。

基于AD与TRIZ组合的产品概念设计方法贯穿在自动切片机的设计到改进处理中,提供明确的设计目的和精确的设计方向。对自动切片机的设计能够顺利进行起到至关重要的作用,同时也验证了该设计方法是非常成功,为今后的设计工作提供便利。因只有一个设计方案,也无需进行信息评判,即该设计结果就是最优方案。

## 5 结语

利用AD和TRIZ理论间的互补性,将这两个当今设计领域被公认的设计理论整合,得出一套新的基于

(下转第94页)