

仿生学与 TRIZ 相结合方法在绝缘子检测机器人设计中的应用

王文龙, 徐贺

(哈尔滨工程大学机电工程学院, 哈尔滨市 150001)

摘要: 仿生学和 TRIZ (发明问题解决原理) 作为创新设计领域中应用广泛的两种创新设计方法和理论, 已经在多个领域都取得了较为显著的研究成果, 然而, 二者仍然存在一些自身的局限性。首先, 本文分析了二者的优缺点, 在此基础上, 提出了仿生学与 TRIZ 相结合的创新思维, 并构建了基于 TRIZ 仿生原理的创新设计过程模型; 最后, 利用所提出的模型进行了绝缘子检测机器人的创新设计, 基于创新思维, 详细给出了绝缘子检测机器人设计过程, 并验证了该模型的有效性。

关键词: 仿生学; TRIZ; 绝缘子检测机器人

中图分类号: TP242.3

The application of Bionics combined with TRIZ in the insulator detecting robot design

WANG Wenlong, XU He

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin City 150001)

Abstract: As two widespread used methods and theories in innovation design, Bionics and TRIZ have been achieved more significant results in multiple areas. But, they also have their limitations respectively. Firstly, the advantages and disadvantages of Bionics and TRIZ are analyzed separately in this paper. Secondly, the creative thinking that combining Bionics and TRIZ is proposed, and a novel design process model is constructed base on Bio-TRIZ theory. Last, a new kind of insulator inspection robot was designed according to the design process model on basis of creative thinking and verified the effectiveness of the proposed model.

Key words: Bionics; TRIZ ; Insulator Detecting Robot

0 引言

产品创新设计是指充分发挥人类创造力, 利用现有的科技知识水平, 设计出具有新颖性创造性及适用性的产品的一种实践活动^[1]。产品创新设计需要在创新方法的指导下进行, 仿生学和 TRIZ 理论作为自然科学和工程技术领域中的两大创新方法^[2], 在科学研究和创新领域扮演者重要角色。

仿生学 (Bionics) 是运用从生物界发现的机理与规律来解决人类需求的一门综合性交叉学科, 是利用自然生物系统构造和生命活动过程作为技术创新设计的依据, 有意识地记性模仿和复制, 它开启了人类向自然界索取转入向生物界学习的新纪元^[3]。仿生学的研究内容是丰富多彩的, 人们既可以对生物的某一方面或某一个因素进行单元仿生, 也可以同时模拟生物的多个方面或多个因素进行多元耦合 (协同) 仿生。目前, 在国际仿生领域, 单元仿生仍占主导地位, 如形态仿生、结构仿生、材料仿生、柔性仿生和构形仿生等^[4]。

TRIZ 一词源自于俄文 “Teorijz Rezhenija Izobretatelskih Zadach” 的首字母缩写, 英文翻译为 Theory of Inventive Problem Solving, 即发明问题解决原理。它是由前苏联发明专家、发

作者简介: 王文龙 (1987-), 男, 学生, 主要研究方向: 特种机器人

通信联系人: 徐贺 (1964-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向: 特种机器人. E-mail: xuhe@hrbeu.edu.cn

明协会主席 G.S. Altshuller 及其同事在分析研究世界上大量高水平专利的基础上提出的，其核心是回答发明问题解决的过程、支持工具等难题，使设计者或问题解决人员能运用前人在不同领域创新的知识和经验，快速高效地解决自己的问题^[5]。

本文通过对仿生学与 TRIZ 理论进行研究，探索将二者共同应用于产品创新研发过程中，以发挥两种创新方法的各自优势，提出了一种基于仿生学与 TRIZ 相结合的创新思维，并在此基础上建立了基于仿生学与 TRIZ 的产品创新过程模型，利用该模型，针对绝缘子检测机器人的创新设计，详细改进和验证了创新设计过程。

1 仿生学与 TRIZ 结合

1.1 仿生学与 TRIZ 相结合优势分析

仿生学和 TRIZ 理论都是在创新设计领域中应用最为广泛的创新设计方法和理论，并且已在多个领域都取得了较为显著的研究成果。然而，相比较而言，二者在产品创新过程中也都存在着各自的优势和不足。表 1 为仿生学和 TRIZ 在产品创新过程中优劣对比分析。

表 1 仿生学与 TRIZ 优劣对比分析

Tab. 1 The Advantages and Disadvantages between Bionics and TRIZ		
创新方法	优点与不足	
仿生学	优点	(1) 利用仿生学进行创新设计具有直观、具体、多样的特点，为设计人员提供最为直观的创新思路。 (2) 生物体具有的最优化特征可以帮助设计人员更容易实现技术系统布局、结构、功能等的优化。
	不足	(1) 生物系统功能往往是多个因素耦合而成的结果，而生物系统与工程系统的差异导致仿生设计可能无法实现设计目标 (2) 生物模型向仿生设计转化的过程中缺少理论指导，在模型转化过程中有时难以进行准确的工程设计，过于依赖设计人员的经验。
TRIZ	优点	(1) TRIZ 理论具有一套完整的创新设计方法，从最初的问题分析，到针对不同矛盾冲突所采用的不同解决方案，TRIZ 理论中都有完备的分析方法和工具。 (2) TRIZ 理论具有较强的可操作性，对于工程问题的转化以及矛盾冲突的论述很充分，且消除矛盾的方法非常成熟。 (3) TRIZ 理论的核心是技术系统的进化理论，是指所实现的系统功能从低级到高级的变化过程，人们可以利用 TRIZ 理论去认识它，以预测未来技术系统的发展趋势，达到技术创新的目的。
	不足	(1) TRIZ 理论往往具有高度的抽象性和概括性，往往要求设计人员比较熟练地掌握 TRIZ 理论和所研究领域的知识，才能更好地运用该理论。 (2) TRIZ 理论只能给设计者提供创新方向，在具体方案上还无法提供准确方案，需利用专业知识进行细化。

由表 1 可以看出，应用仿生学解决产品创新设计问题时，直观具体的生物实例，可以帮助设计者快速获取创新设计灵感，但由于生物体的功能、结构等特征，往往是通过生物体多因素间的耦合作用而得以实现的，因此在将其引入到产品设计过程中时，往往出现功能变化或无法达到预期目标等情况。TRIZ 理论相对于传统创新方法具有鲜明的特点和优势，在利用 TRIZ 解决问题的过程中，设计者首先将待设计的产品表达成为 TRIZ 问题，然后利用 TRIZ 工具找到 TRIZ 问题的标准解，最后设计者再把该解转化为特定解，但在此过程中往往由于高度的抽象性和概括性，过于依赖于设计者对 TRIZ 理论的理解程度及设计经验，因而，往

往使得设计者无法最终将 TRIZ 的标准解准确地转化为实际工程问题的解。

65 因此，将仿生学和 TRIZ 理论进行集成，作为一种新的创新方法是可行的。应用 TRIZ 理论为仿生学设计提供理论支持，利用生物界的一些原理补充、深化和完善 TRIZ 理论，这样不仅可以弥补各自理论的不足，还可以优势互补，使设计者的创新思路更加清晰，设计更为合理。

1.2 仿生学与 TRIZ 相结合的创新设计思维

70 通过对仿生学和 TRIZ 理论两种创新设计理论方法的详细研究，针对二者在产品创新设计过程中存在的优缺点，将二者进行结合。仿生学与 TRIZ 理论结合后，既可以充分利用 TRIZ 理论在问题转化过程中的优势，又可以借助仿生学的知识为创新设计提供可以借鉴的生物现象，进行详细设计，得到创新问题的解。

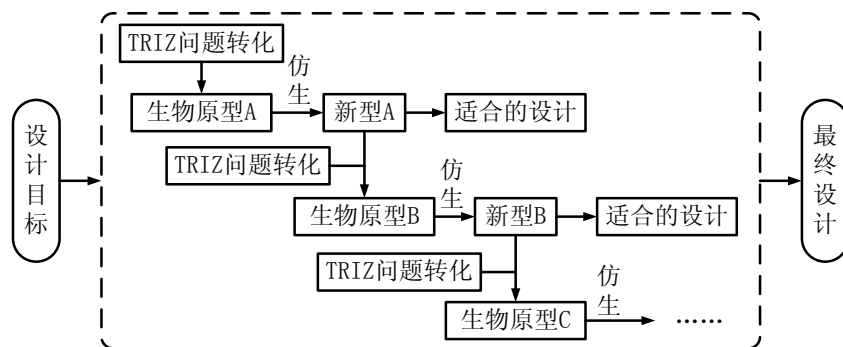


图 1 仿生学与 TRIZ 结合思维示意图

Fig. 1 Schematic diagram for bionics combine with TRIZ

图 1 为仿生学与 TRIZ 结合思维示意图，如图所示，利用仿生学与 TRIZ 理论结合的方法进行创新设计过程时，二者的结合主要体现在以下几方面：

首先，对设计目标进行分析的过程中，可以利用 TRIZ 理论的高度概括性和抽象性，将实际的工程技术问题转化为 TRIZ 标准问题，并通过 TRIZ 工具求得原理解，再通过原理解找到与之匹配的生物现象，利用仿生学研究方法得到符合设计要求的最终设计。

其次，进行仿生设计时，从生物模型到技术模型转化的过程中，可以利用 TRIZ 理论的方法工具对转化过程中存在的矛盾冲突进行求解，消除矛盾，实现产品的创新设计。在消除矛盾过程中，往往可以再次通过其它生物现象获取灵感，拓宽设计思路。

85 最后，在创新设计过程中，仿生学和 TRIZ 理论的应用是重复交替应用的，根据设计需求的分析，往往需要进行多次的 TRIZ 理论分析求解，以及多次的仿生设计，从而形成最能满足设计任务要求的最终设计。

1.3 仿生学与 TRIZ 相结合的创新设计思维

90 基于仿生学与 TRIZ 理论的创新设计，是在产品创新设计过程中，结合仿生学研究方法与 TRIZ 理论，利用二者的优点弥补互相不足，来实现产品的创新设计，其模型如图 2 所示，主要包括四个模块：

模块 1：需求分析模块。通过市场调研等方法，获取用户对于产品的性能、功能、外观等多方面的需求；设计人员通过将客户需求转化为技术语言的技术特征，使客户需求进行具体的产品化，并最终获得创新设计目标。

95 模块 2：功能分析模块。对于待设计目标，进行功能分析、求解，从总功能出发，逐层细化，依次完成对子功能、功能元的分解，进而得到产品或系统的功能结构。

模块 3: TRIZ 创新设计模块。通过对创新问题的深入分析, 确定待解决的冲突矛盾, 并将其转化为 TRIZ 工程参数或构建物-场模型, 将设计问题转化为 TRIZ 的标准模式, 利用 TRIZ 理论中的相关工具对创新问题进行求解, 得到设计方案。

100 模块 4: 仿生设计模块。针对功能分析和 TRIZ 原理解, 确定待选生物模型, 并对其进行仿生设计, 从而得到设计方案。

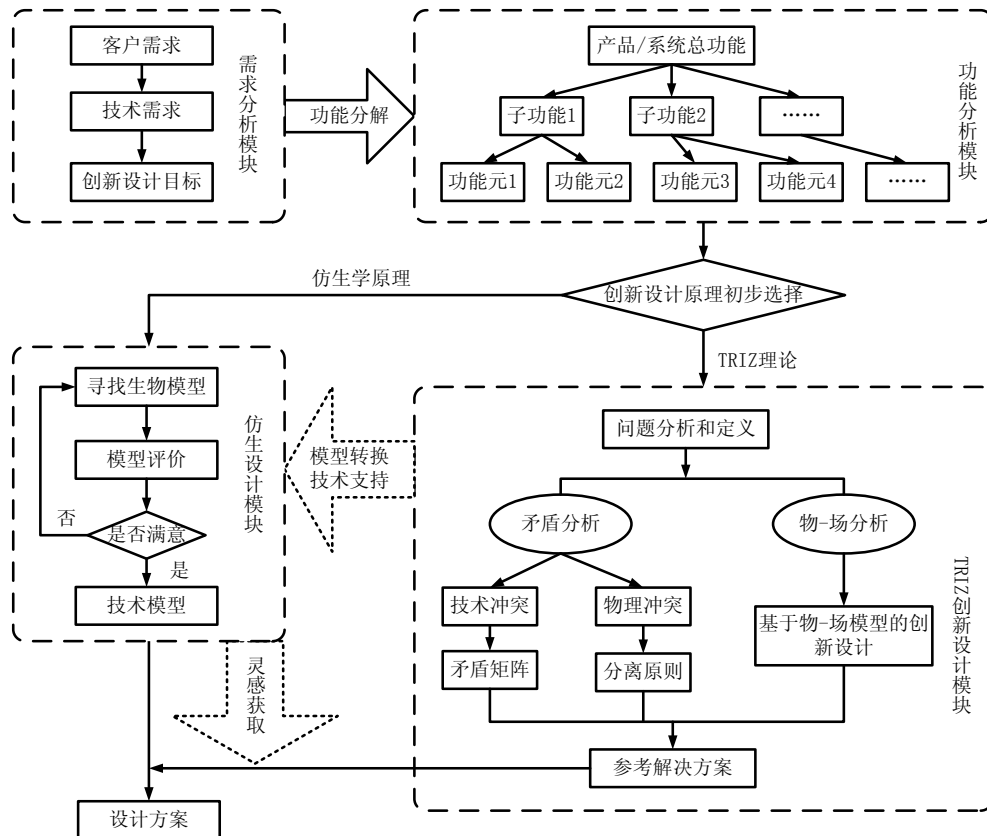


图 2 基于仿生学与 TRIZ 的创新设计过程模型

Fig. 2 The innovation design process model based on bionics and TRIZ

105 在实际运用过程中, 该模型具体应用按照以下步骤进行:

步骤 1: 首先应对设计问题进行描述, 对产品进行功能结构分析, 根据描述寻找与设计目标功能具有相近特征的生物体;

步骤 2: 若直接找到生物体模型, 则将该生物体本身的机理、机构和功能作为具体参照, 为设计人员的创新设计提供灵感, 进行由生物模型向技术模型的转化, 在此过程中应用 TRIZ 理论解决模型转化过程中出现的冲突;

步骤 3: 若不易直接找到生物体模型, 则依照功能需求分析继续应用 TRIZ 理论寻找标准解, 然后从生物实例库中寻找与标准解相对应的生物体, 为标准解的转化提供灵感支持;

步骤 4: 对设计方案进行评价分析, 经过反复设计, 最终得到产品创新设计的最佳方案。

2 基于仿生学与 TRIZ 的绝缘子检测机器人创新设计

115 2.1 产品功能需求分析

绝缘子检测机器人基本功能需求主要包括能实现在绝缘子串上停留以及克服自身重力完成沿绝缘子串稳定爬行的运动。除此以外, 还要具有的其它功能需求包括实现机器人的快速爬升以及负载攀爬的功能。绝缘子检测机器人工作过程中, 最初状态是对绝缘子串实现抱

紧和附着功能；运动过程中，机器人需要克服重力作用，实现对与水平方向成任意角度的绝缘子串的爬行动作。在功能需求关系中还要保证系统具有较小的能耗和较轻的质量，以减少绝缘子机器人向上攀爬过程中克服重力所做的功，有效提升机器人攀爬的工作效率，同时提高自身攀爬过程中的稳定性。

通过以上对机器人行动机构功能需求分析，可以对绝缘子检测机器人行动机构定义为：克服自身重力，可以在不同形式绝缘子串上实现攀爬运动的机械结构。其主要功能需求及定义如表 2 所示。

表 2 绝缘子检测机器人功能需求及定义
Tab. 2 The functional requirements and definition of the insulator detecting robot

功能编号	功能需求	运动分解	主功能定义
1	对绝缘子串实现抱紧	机器人、绝缘子串相对静止状态	抱紧功能
2	实现沿着绝缘子串的相对运动	机器人、绝缘子串相对运动状态	附着、爬行功能

2.2 仿生学在产品中的应用

由绝缘子检测机器人功能需求分析和机器定义描述可知，绝缘子检测机器人行动机构可以定义为一种攀爬机器人，依照绝缘子检测机器人工作条件，对自然界中常见具有攀爬功能的生物实例进行寻找，选择树袋熊作为生物原型作为仿生设计的模本。树袋熊在攀爬过程中，利用身体与四肢的肌肉作用实现对树干的抱紧，然后利用四肢的交替移动实现在树干上的攀爬运动，此时树袋熊身体作为抱紧机构整体，四肢作为爬行机构依附于抱紧机构之上。

图 3 为仿树袋熊机器人结构示意图，机器人上、下肢部分和躯干部分共同作用，通过夹紧相连绝缘子的方式实现附着功能。在爬行过程中，首先上肢部分固定夹紧绝缘子串，下肢部分打开，并沿导杆向上滑动到指定位置后对绝缘子串进行夹紧；然后上肢部分打开，导杆带动躯干和上肢部分产生相对于与下肢部分的滑动，到达指定位置后上肢抱紧，此时机器人完成一个攀爬动作。

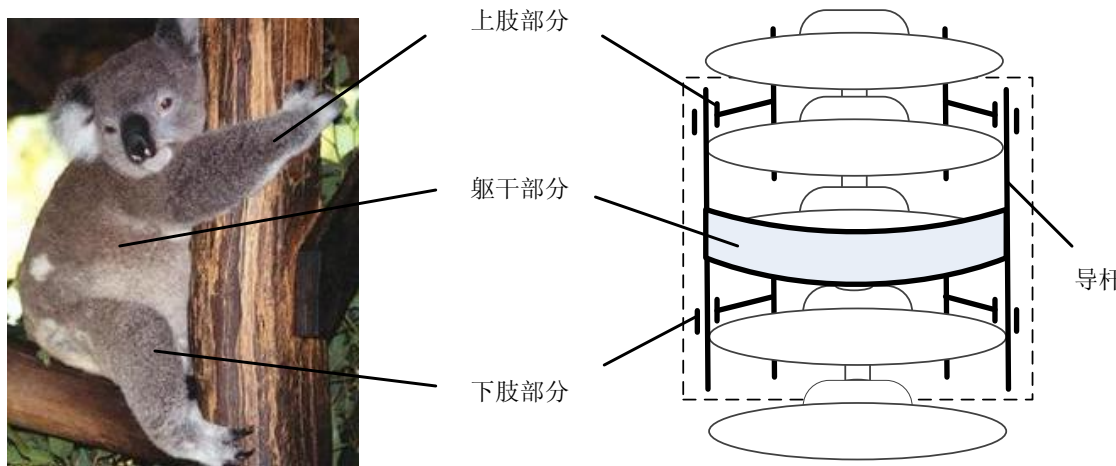


图 3 仿树袋熊机器人结构示意图
Fig. 3 The structure diagram of imitating koala robot

2.3 TRIZ 理论在产品中的应用

2.3.1 理想解描述

根据绝缘子检测机器人设计要求，并结合 TRIZ 理论确定理想解的步骤方法，可以对绝缘子检测机器人的理想解进行如下描述^[6]：

- (1)问题的最终目的：提高绝缘子检测机器人的技术水平；
- (2)理想解：提升机器人的检测效率、适用性、降低机器人的结构复杂性、保证机器人的安全性能；
- (3)达到理想解的障碍：检测效率的提升将会影响到安全性能的保障，适用性能的提升会增大绝缘子检测机器人结构复杂程度。
- (4)出现这种障碍的结果：受机器人结构的影响，检测效率和适用性提升到一定程度后，机器人工作的安全性将会大幅度下降，甚至无法正常工作。
- (5)不出现这种障碍的条件：改进绝缘子检测机器人的本体结构，使其检测速度和适应性能的提高所造成的不利影响降到最低。

2.3.2 问题描述分析

根据绝缘子检测机器人的理想解描述，对仿树袋熊绝缘子检测机器人行动机构进行冲突问题分析，找出绝缘子检测机器人行动机构在改进设计过程中存在的冲突，具体分析过程如下：

首先，根据设计要求，绝缘子检测机器人的使用范围，应该包含有采用不同形式绝缘子组成的不同布置方式绝缘子串，因此这要求机器人具有较好的适应性和可扩充性。

其次，在原始结构中，过大的抱紧力将会对绝缘子串上的涂层造成破坏，这就要求在保证可靠性的前提下，采用一些缓冲装置，防止绝缘涂层的破坏，故增加了整体设计要求，使设备复杂程度提高，制造成本增加。

再次，原始结构中的抱紧、定位和移动是通过上、下肢部分的不断打开、闭合实现的，功能实现过程较为复杂繁琐，提高了控制的难度，应采用更为合理简单的装置实现抱紧功能。最后，原始结构所采用的蠕动式攀爬方式，运动速度慢、结构复杂。

最后，为了提高绝缘子检测机器人工作效率，可以采用其他移动方式以提高其爬动速度，但较快的爬行速度可能引起冲击等问题，将会导致机器人工作稳定性的降低。

结合上述分析，表 3 归纳总结了绝缘子检测机器人行动机构改进过程中引起技术冲突的工程参数，及其对应的工程问题描述^[7]。

表 3 绝缘子检测机器人引起技术冲突的工程参数

Tab. 3 The engineering parameters causing technical conflict matrix of the insulator detecting robot

	工程参数	工程问题描述
改善参数	No. 9 速度	机器人的爬行快速可靠
	No. 25 时间损失	提高机器人攀爬效率
	No. 27 可靠性	机器人能够可靠地完成在绝缘子串上的抱紧和攀爬等动作
	No. 31 物体产生的有害因素	机器人在攀爬的过程中不会破坏绝缘子串上的绝缘涂层
	No. 33 可操作性	减少机器人的工作过程中的步骤，提高其工作效率
	No. 35 适应性及多用性	机器人可以完成对耐张绝缘串、悬垂绝缘子串、V 形绝缘子串等不同布置方式绝缘子串的攀爬工作
恶化参数	No. 1 运动物体的质量	机器人重量的增加
	No. 32 可制造性	机器人的制造难度增加
	No. 36 装置的复杂性	机器人工作性能越好，其结构也将越复杂
	No. 37 监控与测试的困难程度	由于结构的复杂性，增加了监控与测试的困难程度

2.3.3 冲突问题求解

对绝缘子检测机器人设计过程中存在的冲突进行求原理解，TRIZ 解决技术冲突的有效工具是冲突矩阵，利用描述技术冲突的 39 个通用工程参数和 40 条发明原理的对应关系，找到解决设计过程中技术冲突的指导方向。

通过前文分析，利用 TRIZ 理论中的 39 个工程参数对绝缘子检测机器人行动机构技术冲突进行描述，结合 TRIZ 提供的冲突矩阵表，可以构建如表 4 所示的绝缘子检测机器人技术冲突矩阵，该矩阵给出了各对技术冲突所对应的发明原理编号^[7]。

表 4 绝缘子检测机器人的技术冲突矩阵

Tab. 4 The technical conflict matrix of the insulator detecting robot				
恶化参数 改善参数	1	32	63	37
9	2,28,13,38	35,13,8,1	10,28,4,34	3,34,27,16
25	10,20,37,25	35,28,34,4	6,29	18,28,32,10
27	3,8,10,40	-	13,35,1	27,40,28
31	19,22,15,39	-	19,1,31	2,21,27,1
33	25,2,13,15	2,5,12	32,26,12,17	-
35	1,6,15,8	1,13,31	15,29,37,28	1

由绝缘子检测机器人的技术冲突矩阵得到的发明原理指明了技术系统创新的思维探索方向，综合发明原理的含义提出以下改进实施方案：

表 5 绝缘子检测机器人改进实施方案

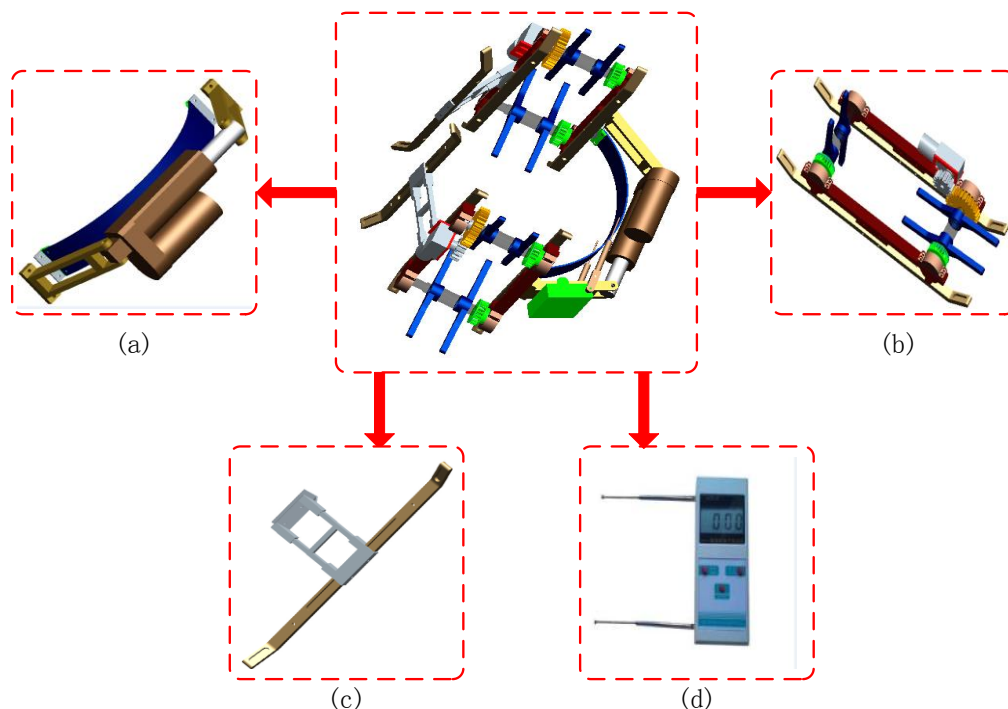
Tab. 5 The improved embodiments of the insulator detecting robot	
发明原理	改进实施方案
分割原理	对机器人抱紧机构、行走机构进行模块化设计，针对不同的绝缘子结构和尺寸，采用不同模块的爬行机构和抱紧机构进行组装，以保证其适用性。
重量补偿原理	利用行走机构提供机器人沿垂直方向攀爬的动力，克服绝缘子检测机器人自身重力做功。
预先作用原理	在机器人开始运动前，先利用抱紧机构实现机器人沿绝缘子串轴向方向上的导向定位。
动态化原理	将原始结构中的抱紧机构，分成沿沿绝缘子串轴向方向和径向方向的两个定位方式，并通过二者的联合作用，实现机器人抱紧定位。
有效作用的连续性原理	采用轮爪式结构，通过轮爪的旋转运动，为机器人提供连续的运动，提高机器人的工作效率，同时轮爪也可以实现机器人抱紧机构的轴向定位。

2.4 绝缘子检测机器人最终设计方案

通过以上分析，绝缘子检测机器人行走机构模块化的设计，对于不同工作条件，采用不同模块的组装，保证其实用性。如图 4 所示，该机器人抱紧机构由驱动装置、行走机构、抱紧机构末端、绝缘子检测仪四部分组成。其中，绝缘子检测机器人对绝缘子串的抱紧功能由以上四部分的共同作用实现。

绝缘子检测机器人设计主要包括抱紧机构和行走机构两部分，其抱紧功能通过抱紧机构和行走机构的联合作用实现机器人抱紧定位。依据绝缘子环形结构的特点，抱紧机构尽可能的呈弧形或者接近弧形，以减少绝缘子机器人的体积；行走机构采用具有连续运动的爪式爬行结构代替原始机构的步进式攀爬动作，既提高了爬行速度，也增加了结构稳定性，还能为

195 机器人的抱紧功能提供沿绝缘子串径向的定位。



a-抱紧驱动装置 b-行走机构 c-抱紧机构末端 d-绝缘子检测仪

图4 绝缘子检测机器人总体模型图

Fig. 4 The whole model figure of insulator detecting robot

200 图5为绝缘子检测机器人整体结构图。该绝缘子检测机器人行走机构的功能实现主要由
加紧、爬行两个动作完成。加紧动作依靠推杆电机实现，在推杆电机处于原长时，抱紧机构
张开一定的角度，用于放置绝缘子串；当推杆电机处于伸长状态时，实现加紧动作。以攀爬
悬垂布置绝缘子串为例，爬行动作是在驱动电机的驱动下，通过齿轮传动，带动主动轴的转
动，实现爪的旋转运动。在运动过程中，爪的端部始终接触绝缘子的上边缘，靠绝缘子对爪
205 的反作用力，使机器人主体向上爬行运动。爪每旋转180度，机器人爬行距离为一个绝缘子
的高度。

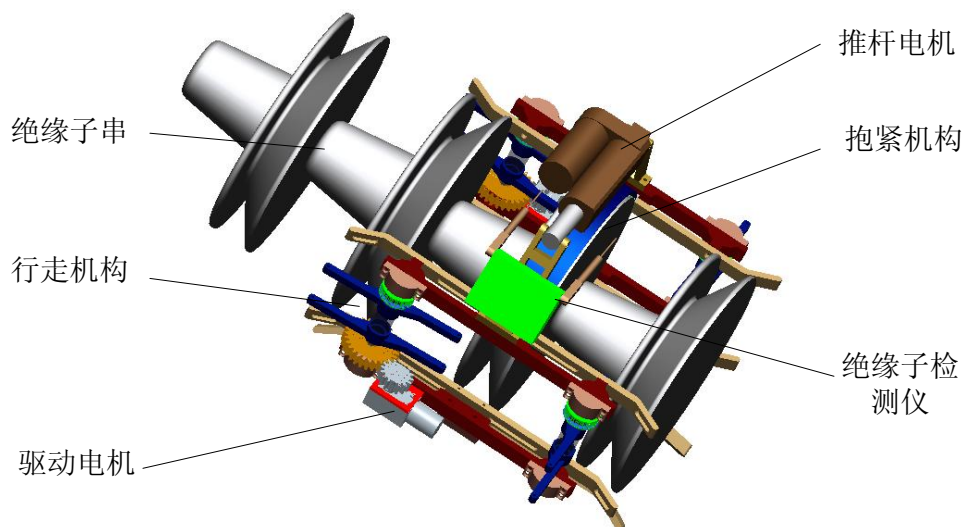


图5 绝缘子检测机器人整体结构图

Fig. 5 The structure of insulator detecting robot

210 至此，利用基于仿生学与TRIZ的设计模型，实现了绝缘子检测机器人的设计，该绝缘
子检测机器人行动机构具有结构简单，工作稳定，攀爬连续性好的优点。

3 结论

本文比较了仿生学与 TRIZ 理论各自的优缺点,提出了把两者结合研究的立足点,对两种方法结合进行了可行性分析。总结了仿生和 TRIZ 在创新设计中的思维模式,并提出了一种基于仿生学与 TRIZ 的创新设计过程模型。利用 TRIZ 理论中的冲突解决原理为仿生学提供了理论基础,同时利用仿生学研究为 TRIZ 理论在产品创新设计领域的实现提供了生物借鉴。利用该模型可以为产品设计提供更明确的思路,提高创新设计效率。针对绝缘子机器人的设计,利用该模型和创新思维,详细给出了设计方法与设计步骤。通过绝缘子检测机器人的设计,本文提出的 TRIZ 仿生相结合的创新方法,验证了在产品创新设计过程中的有效性和实用性,为产品创新设计提供参考价值。

[参考文献] (References)

- [1] 胡树华,汪秀婷. 论产品创新平台[J]. 中国机械工程. 2004, 25(4):61-64
- [2] VINCEN J F V, BOGATYREVA O A. Biomimetics: its practice and theory[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2006, 3(9): 471-482
- [3] VINCEN J F V. Biomimetics - a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 2009, 223(H8):919-939
- [4] 任露泉,梁云虹. 耦合仿生学[M]. 北京: 科学出版社, 2012
- [5] 孙峰华,王亮申,顾九春. TRIZ 研究的历史现状及前瞻[J].鲁东大学学报(自然科学版), 2010, (01): 79-86
- [6] 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.
- [7] 杨清亮. 发明是这样诞生的——TRIZ 理论全接触[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006