

## 基于理想解-冲突法六足机器人的创新设计

孙群<sup>1,2</sup>, 杨伯军<sup>1,2</sup>, 张建辉<sup>1,2</sup>, 冯雁霞<sup>1,2</sup>

(1.河北工业大学, 天津 300130; 2.国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心, 天津 300130)

**摘要:** **目的** 在保持产品原有优点的同时, 进一步改善其功能集成度和适应性等要求, **方法** 提出一种基于理想解-冲突法的产品创新设计策略, 首先对产品系统进行全面分析, 并且确定出系统的理想解, 将理想解与当前产品系统进行比较, 找出当前产品系统存在的问题, 进而分析并确定产品系统存在的冲突, 然后应用冲突解决原理解决, **结果** 最终确定了产品系统进一步的改进方案。 **结论** 通过该策略对六足仿生机器人的前肢进行了创新设计, 显著提高了机器人的工作效率和环境适应性, 并应用运动学仿真软件对改进的六足机器人进行了行走和排爆仿真, 仿真结果表明该机器人具有良好的移动性能和执行性能, 从而验证了所提创新设计策略的可行性。

**关键词:** 创新设计; 理想解-冲突法; 冲突解决原理; 六足仿生机器人

**中图分类号:** TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0023-07

## Innovative Design of the Hexapod Robot Based on the Ideal Solution-conflict Method

SUN Qun<sup>1,2</sup>, YANG Bo-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-hui<sup>1,2</sup>, FENG Yan-xia<sup>1,2</sup>

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

2. National Engineering Research Center for Technological Innovation Method and Tool, Tianjin 300130, China)

**ABSTRACT:** The work aims to further improve such requirements as functional integration and adaptability of the product while maintaining its existing advantages. An innovative design strategy based on ideal solution-conflict method was proposed. The strategy started with the comprehensive analysis of the product system, and then determined the ideal solution to the system. By comparing the ideal solution with current product system, the problems that existed in the system were found out, then the conflicts existing in the system were analyzed, determined and then solved with the conflict resolution principle. Finally, the product system plan for further improvement was determined. The strategy is applied in the innovative design of fore limb structure of hexapod bionic robots, which significantly improves their work efficiency and environmental adaptability. The simulation on walking and explosive handling of the improved hexapod robot is carried out with the kinematics simulation software. The simulation results show that the robot has good mobility performance and execution performance, through which the feasibility of the proposed innovative design strategy can be verified.

**KEY WORDS:** innovative design; ideal solution-conflict method; conflict resolution principle; hexapod bionic robot

六足仿生机器人作为足类机器人中最具代表性的一类, 通过模仿昆虫以及其它节肢动物们的肢体结构和运动控制策略, 实现了“六足纲”类昆虫行走能耗低、重心稳定等特点。与轮式机器人或履带式机器人相比, 六足仿生机器人的离散式落足点可使在足尖点可达域范

围内合理选择支撑点, 灵活调整行走姿态, 对凹凸不平的非结构化地形的适应能力更强, 从而具有较强的灵活性、适应性以及更高的避障和越障能力<sup>[1-5]</sup>。

随着社会的快速发展, 应用六足仿生机器人的场合环境越加复杂, 突发情况也愈发增多, 而传统六足

收稿日期: 2016-12-10

基金项目: 国家创新方法工作专项 (2015IM040200); 河北省自然科学基金 (E2014202277); 天津市科技发展战略研究计划 (14ZLZLZLF00038)

作者简介: 孙群 (1990—), 男, 河北工业大学硕士生, 主攻机器人本体结构设计和创新设计。

通讯作者: 张建辉 (1974—), 男, 河北工业大学副教授、硕导, 主要研究方向为创新设计、计算机辅助设计/制造等。

仿生机器人主要为“探测”所用,其功能集成度和环境适应性仍然有待提高,所以社会各界迫切希望出现功能集成度更高、复杂环境适应能力更强的六足仿生机器人,来帮助人类更好地完成军事侦察、核电厂的危险泄露物检测、外星球探测、深井搜救、输油管道微裂缝检测、产品包装现场的火源隐患自动巡航监控以及大型包装机械设备关键部件的探伤等任务<sup>[6-8]</sup>。

鉴于此,文中在基于 TRIZ 理论应用实践的基础上<sup>[9]</sup>,提出了基于理想解-冲突法的产品创新设计策略模型。利用该模型对现有的六足仿生机器人进行了分析、改进、检验,并依据其技术发展方向确定了六足仿生机器人的理想解,接着通过比较理想解与现行产品的差距发现六足仿生机器人存在的问题,并确定问题所在的冲突区域,然后利用冲突法进行解决。在基于理想解-冲突法的产品创新设计策略模型的指引下,决定改进其前肢的结构形状、提高其前肢结构关节的自由度,使其具有“腿臂两用”的模式功能。基于这种策略设计的机器人可在特殊情况下张开前肢双臂,形成具有操作能力的灵活机械手,在不增加结构复杂性的基础上,充分利用机器人的本体结构,从而使本体功能达到更高集成,更有利于在未知的复杂环境中完成特殊任务,为六足仿生机器人的未来发展指明了一个可行的方向。

## 2 基于理想解-冲突法的产品创新设计策略模型

### 2.1 理想解与最终理想解

理想解是 TRIZ 体系中分析问题的重要工具,其内核是随着时间的推移,一项产品或者技术都会随着社会的发展、人类的需求、行业内不断的变化等因素而导致其无时无刻不在进化。如果将所有产品或技术作为一个整体,从历史曲线和进化方向来说,任何产品或技术最终都朝向低成本、高功能、高可靠性、无污染等的理想状态发展演化<sup>[10]</sup>,当产品处于消除了原系统的缺陷,保留了原系统的优点,不会使系统变得更复杂,不会产生新的缺陷等 4 个特点的理想状态时,便称之为理想解<sup>[11]</sup>。当理想化水平趋于无穷大状态时,最终产品或技术处于理想状态的解决方案可称之为最终理想解。

### 2.2 理想化水平公式

对于理想化水平公式<sup>[12]</sup>,任何系统在完成功能时都具有正负两面的作用。为了对正负两面进行评价采用公式:理想化水平=有用功能之和/有害功之和。可以看出,技术系统的理想化水平与有用功能之和成正比,与有害功能之和成反比。当公式中分子增加,分母减少,那么意味着系统中的理想化水平程度得到提

高,产品的竞争能力增强。在产品设计和发明创新中,必然以提高理想度的方向作为设计的目标。

### 2.3 冲突解决原理

TRIZ 理论将工程中的冲突分为技术冲突和物理冲突等 2 类,根据阿奇舒勒的定义,技术冲突是指一个作用同时导致有用和有害等 2 种结果,常表现为 2 个子系统 A 与 B 之间的冲突。当 A 改善时, B 随之恶化。该理论将导致技术冲突的各种因素总结成了 39 个通用工程参数,并且提供了解决技术冲突的行之有效的 40 个发明原理。从 39 个通用工程参数中挑选需要的参数后带入冲突矩阵,得到对应的发明原理,然后再根据发明原理提出一系列解决问题的方案<sup>[13]</sup>。

与技术冲突涉及 2 个子系统不同,物理冲突仅涉及到一个系统中的一个子系统,即在实现某个功能时,一个子系统具有某一特性,但同时出现与该子系统相反的特性<sup>[14]</sup>。从产品设计的角度来说,某产品的一部分同时出现 2 种相反状态称为物理冲突。物理冲突是 TRIZ 理论要研究解决的关键问题之一,在总结物理冲突的各种研究方法的基础上,TRIZ 提出采用空间分离、时间分离、基于条件的分离和整体与部分分离原理等四大分离原理对物理冲突问题进行解决,也可通过挑选不同分离原理对应不同的发明原理(分离原理和发明原理对应关系见表 1),再结合工程实例的具体情况,形成解决物理冲突的创新性方案。

表 1 分离原理和发明原理对应关系

Tab.1 Correspondence between the separation principle and the inventive principles

| 分离原理    | 发明原理 |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
|---------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| 空间分离    | 1    | 2  | 3  | 4  | 7  | 13 | 17 | 24 | 26 |   |
| 时间分离    | 9    | 10 | 11 | 15 | 16 | 18 | 19 | 20 | 21 |   |
|         |      |    |    | 29 | 34 | 37 |    |    |    |   |
| 整体与部分分离 | 12   | 28 | 31 | 32 | 35 | 36 | 38 | 39 | 40 |   |
| 条件分离    | 1    | 7  | 25 | 27 | 5  | 22 | 23 | 33 | 6  | 8 |
|         |      |    |    |    | 14 | 35 | 13 |    |    |   |

通过冲突的思想去确定解决冲突问题的解决原理,然后将原理转化为解决问题的领域解。这种方式极大地提高了创新的效率,与传统采用折衷法解决问题中冲突的方法相比,冲突解决原理可以更有效地帮助设计人员进行产品创新设计,有效解决了工程技术中的疑难杂症,极大地提高了创新的效率。

### 2.4 理想解-冲突法策略模型建立

考虑到系统会按照提高其理想化的水平方向发展,进一步进化为理想解,所以通过分析得出需要改进的产品与处于理想解状态的产品之间存在的冲突,并应用资源的冲突消除,使产品向着理想解的方向去进化,就成为获得理想解的一种有效方式(见图

1)。产品向着理想解进化的过程也是不断发现和解决冲突的过程,随着冲突的不断被解决,产品的理想化程度会越来越高,最终达到理想解。

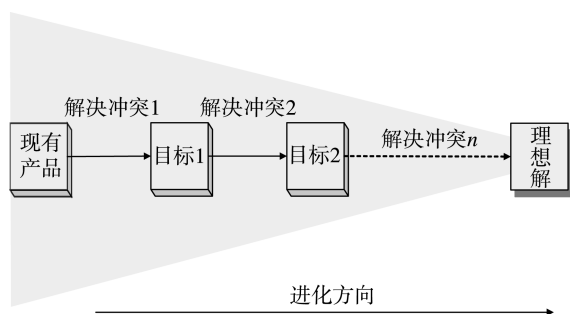


图1 理想解驱动的冲突发现和解决过程

Fig.1 Conflict finding and solving process driven by ideal solution

综上所述,提出了基于 TRIZ 理想解-冲突法的产品创新策略模型,见图2。该模型分为以下几个步骤。

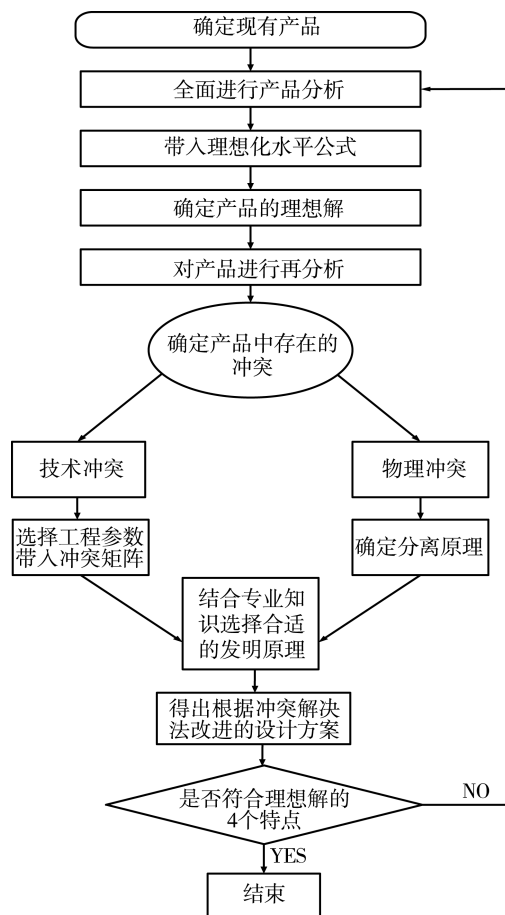


图2 基于理想解-冲突法的产品创新策略模型

Fig.2 An innovation design strategy based on ideal Solution-conflicts solving method

1) 对选定的现有产品进行全面的产品分析。首先对选定的现有产品进行全面分析,需要确定出产品的需求、现行产品缺点以及不足,产品设计实现的过程规划等,并进行汇总综合分析。

2) 确定目标产品的理想解。确定该产品希望实现的诸多有用功能和实现有用功能过程中产生的诸多有害功能,将产品相关需求带入理想化水平公式,从而确定出该产品系统的一个或者若干个理想解。

3) 确定产品中存在的冲突。对产品进行再分析,确定导致理想解与现实产品之间差距的冲突区域。并分析该冲突是物理冲突,还是技术冲突。

4) 解决冲突并提出创新方案。对于技术冲突问题,找出其若干需要改善的工程参数和导致恶化的工程参数,带入冲突矩阵中得到若干发明原理<sup>[15]</sup>。对于物理冲突问题,找到导致子系统矛盾的参数,确定解决物理冲突的分离原理,然后设计人员选择最合适的发明原理或分离原理,通过类比思维结合该领域的相关知识和设计经验确定领域解,并在领域解的引导下完成对产品的改进。

5) 方案评价。对改进后的产品设计方案,如果改进后的产品设计方案符合理想解的4个特点,说明该产品是一个理想的设计方案。若不符合理想解的4个特点,则重新对问题进行分析。确定产品需求,再次带入策略模型中进行问题解决,直到得到符合理想解特点的最佳设计方案为止。

其中,创新策略模型中第1、第2步骤为问题的发现部分,即借助理想解找到系统中的存在问题和进一步改进的方向。第3、第4步骤为问题的解决部分,可以根据情况合并为基于冲突法对现有产品进行改进。也就是说,如果现实产品与其理想解之间差距的冲突区域只涉及到一个系统或者系统中的一个子系统,则直接按照5步流程依次带入即可。如果现实产品与其理想解之间差距的冲突区域涉及多个系统或者一个系统中的多个子系统,可把第3、第4步骤合并为基于冲突法对现有产品进行改进将会使解决问题的过程更加简洁。

### 3 实际案例解决

基于理想解-冲突法的产品创新策略模型的方案步骤,对六足仿生机器人进行改进。

#### 3.1 对现有六足仿生机器人进行全面的产品分析

六足仿生机器人的每个肢节都由转节、股节、胫节等三部分组成,见图3。六足仿生机器人常用的设计方案是每一个关节都由1个舵机或者电机+减速器来驱动,而1个关节就代表1个自由度,所以通常六足仿生机器人全身一共具有6条肢节,每个肢节上有2到3个自由度,一般全身总共最多有18个自由度。

具有18个自由度的六足仿生机器人模仿了爬虫的精巧的肢体结构和灵巧的运动控制策略,在一定程度上补偿了地面的不规则性,使之可轻易穿越各种崎

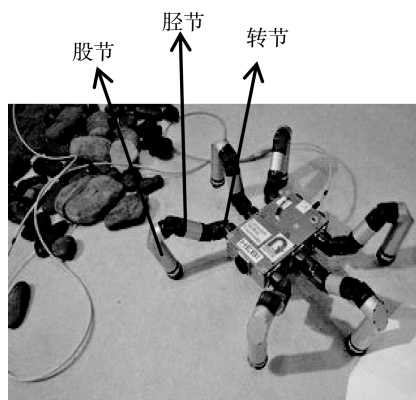


图 3 现有的六足仿生机器人实物

Fig.3 The physical picture of common hexapod bionic robot

岖不平的、复杂的自然地形。与履带机器人和轮子机器人相比,六足仿生机器人在松软地面或严重崎岖不平的地形上运动更加平稳迅速,其背负的相关传感器可以更好地在未知环境中完成“探测”任务。在实际应用中,希望它的功能集成度更高,在完成“探测”任务的同时,还可“执行”其它相关任务,比如排爆、搬运等。为了解决此类问题,先对整体方案进行分析,六足仿生机器人与摄像头安装方向相同的前端部分更容易执行操作任务,对其采用在保持后 4 个肢节设计方案不变的基础上,将 2 个前肢节进行改进,进而得到更好的产品。

### 3.2 确定现有六足仿生机器人的理想解

从理想化水平公式入手,可以从增加六足仿生机器人的有用功能总和,降低六足仿生机器人的有害功之和,降低六足仿生机器人有用功能成本,带入理想化水平公式,确定出六足机器人理想化程度公式:实现功能的理想度=增加六足仿生机器人的有用功能总和/(降低六足仿生机器人的有害功之和+降低六足仿生机器人有用功能成本),依据该公式进行以下工作。

1) 降低成本、充分利用内部或外部已存在,可利用的资源。

2) 减少有害功能数量,尽量剔除那些无效、低效、产生副作用的功能。

3) 降低有害功能的级别,预防和抑制有害功能的产生,或将有害功能转化为中性功能。

4) 增加有用功的数量,尽量在同一产品中集成更多的有用功能。

根据确定出来的理想化水平公式,得出六足仿生机器人的理想解为:改进后的六足仿生机器人应工作效率高、工作安全性好、自身质量小且连接构件设计紧凑,具有柔性更高、经济性更好、功能集成化程度高、便于后期机器人维护维修、工作环境适应性强等特点。

### 3.3 确定现有六足仿生机器人的冲突区域

对产品进行再分析,分析出导致理想解与现实产品之间差距的冲突区域,确定出冲突区域中的物理冲突和技术冲突。

#### 3.3.1 确定前肢结构中的物理冲突

六足仿生机器人多应用于在地形地势险峻多变的场合,即需要机器人的肢节之间摆动更大的摆角来翻越更高的障碍,又需要一定的负载背负相关的监测模块来应对多种危险品泄露物的检测。这就要求机器人前肢部分的结构需要具有足够的强度和可靠性。在实际的制作生产中,由于股节和胫节的材料选择有限,提高股胫节的强度往往通过加厚加重的方式来完成,但重量的提高导致电池电量的过度消耗,必然限制了其工作时间,所以结构设计应尽可能轻量化,以减轻对电池电量消耗。即需要重量参数为“大”,又需要重量参数为“小”,重量参数的“大”和“小”就是一个亟待解决的物理冲突。

#### 3.3.2 确定前肢结构中的技术冲突

理想解中还要求六足仿生机器人具有自身质量小、连接构件设计紧凑、柔性更高、功能集成化等特点,考虑到现在应用于危险特殊场合的不确定性,以及突发环境场合下对“抢险”的需求紧急,所以希望其视觉系统和组合传感器在完成数据采集任务的同时,还能一定程度上对必要的目标物进行抓取。现行六足仿生机器人每个肢节三自由度串联刚性结构,限制使得其完成抓取执行类的任务,所以就需设计出自身质量小且连接构件设计紧凑的构件来改善其肢节的自由度。将上述问题用通用工程参数描述冲突抽象成一般问题的描述。

希望改善的参数与导致恶化的参数:对于机器人来说,提高了自由度,它所能完成的任务也就越复杂,所以“生产率”就是希望改善的参数。随着功能的增加,其结构势必越来越复杂,占用空间也就越来越多,前肢上的空间占用得过多,会导致整体的不协调,“运动物体的体积”“装置的复杂性”就变成了导致恶化的工程参数。

此外,在理想解中还需要机器人工作环境适应性强等特点,所以在设计六足仿生机器人时,还要考虑“适应性以及多样性”这一工程参数的改善。为了满足其“适应性以及多样性”的要求,势必导致前肢“物质或事物的数量”和“运动物体的重量”等参数的恶化。

### 3.4 基于冲突法对现有产品进行改进

#### 3.4.1 物理冲突法

考虑到该参数在不同条件下具有不同的特性,因此该物理冲突可以运用条件分离原理进行解决。在条

件分离原理中找到与其对应的 2 条最合适的发明原理：No.31 多孔材料，使物体多空或增加多空元素；No.14 曲面化，将平面部分用曲面部分代替。在 2 个发明原理的启示下，结合仿生学的有关知识，将六足仿生机器人的股节和胫节结构进行创新性设计，最终设计成了具有一定弧度的拱形结构。分离原理解决问题过程见图 4，当受到一定压力时能够产生向下和向外的力传递给相邻部分，使之承受更大的作用力，见图 5。同时，在不影响强度的情况下，在表面合适位置上镂空一些孔，减轻了整体的重量，延长了机器人的有效工作时间。

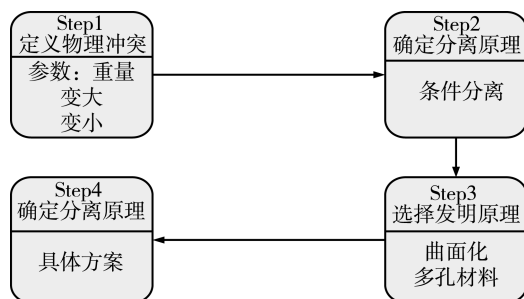


图 4 分离原理解决问题过程  
Fig.4 Separation principle to solve the problem

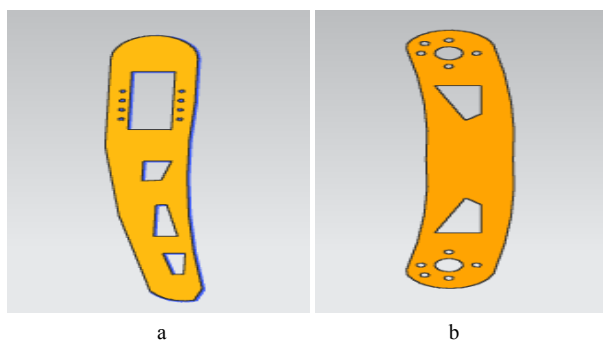


图 5 改进后的胫节和股节  
Fig.5 The improved tibia and femur

基于上述思想设计出的胫节和股节总体上具有了减振性好、承受变动载荷范围大、运行可靠、结构简单、装拆方便等优点。

### 3.4.2 技术冲突法

将 3.3.2 中提到的相关参数带入冲突矩阵，得到发明原理 No.1 分割、No.7 嵌套、No.24 中介物、No.32 改变颜色等若干发明原理，这些发明原理都有可能解决现有的技术冲突，经过实际的对比和分析研究，拟采用 No.1 分割和 No.24 中介物这 2 个发明原理。

采用分割原理，可将机械肢节的股节和转节分离，同时将舵机“分割”成 3 个。随着舵机的数量增加，占据空间也就相应增加，这就需要通过一个“中介物”将 2 个舵机按不同的 2 个方向紧紧连在一起，再结合设计的具体实际情况，设计了如下的“S”型换向机构，

见图 6。

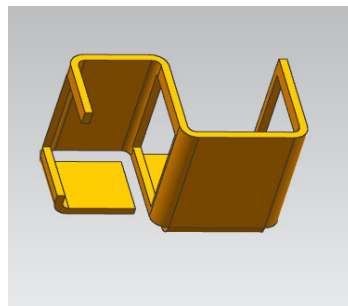


图 6 “S”型换向结构  
Fig.6 "S" switch structure

该换向结构体积与质量小，结构紧凑，占据合理空间，可同时安装 2 个舵机实现换向功能，从而达到了在原自由度的基础上多拓宽 1 个自由度的目的。前肢结构具有了模拟肢节类生物运动过程中开链、闭链结构的相互转换、复合的能力，该种设计创新的非连续变约束复合仿生新机构，可满足理想解中对机器人提出的要求。

此外，为满足在复杂环境下工作环境适应性强等特点，“适应性以及多样性”就是一个需要改善的参数。为了使机器人在复杂多变的环境下更好地执行工作，应用于复杂环境下执行任务的机械结构相比在“温和”环境下执行任务的机器人势必要更加复杂，所以“物质或事物的数量”，“运动物体的重量”和“装置的复杂性”就是导致恶化的参数。将上述参数带入冲突矩阵，得到 No.1 分割、No.3 局部质量、No.6 多用性、No.15 动态化、No.35 参数变化等若干个发明原理。其中 No.6 为多用性，一个物体能完成多种功能，可以减少原设计中完成这些功能物体的数量；No.15 为动态化，使一个物体在某一阶段自动调整，以达到优化的性能。这 2 个发明原理提供了较好的创新思路。

由于前肢的作用不仅是要辅助完成行走越障，而且还要能完成“排爆”、“搬移”等任务，可以将机械手的功能合并过来，进而使系统中某一部分实现了多种功能。由于并不希望增加完成这些功能的事物数量和装置的复杂程度，因此结合“动态化”原理和之前的“S”型换向结构，将腿部结构设计成可以灵活伸展的“类机械手”的执行装置，具有在舵机可承担的扭矩范围内抓取规则物体，甚至不规则物体的可能，完成了在动态变化的过程中完成从“行走臂”到“搬运臂”的转变。

最终改进的前肢结构见图 7。具有此前肢结构的六足仿生机器人不仅能更好地发挥其在崎岖险峻地形上的行走越障能力，而且还可在需要的情况下，使其双臂展开，形成机械手（机械臂）结构，能够顺利完成“抓”、“握”、“举”等动作。这种腿臂融合、模块化设计方案，可支持可重构和容错功能。不仅使机器



人具有全方位的移动能力,而且还可进行“抓取”、“搬运”、“操作”等作业,从而可在“测险”的同时,完成一些诸如排爆、转运之类的执行类任务,大大提高了机器人的功能集成度和环境适应性。

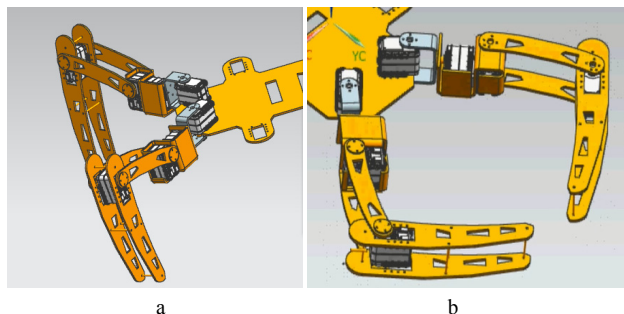


图 7 前肢的改进设计方案

Fig.7 The plans of forelimb improved design

### 3.5 方案评价

根据理想解的 4 个特点,对六足仿生机器人的创新设计方案进行检验,从而可以确定该机器人的理想化水平。即在一个设计方案确定了后,如果产品设计方案复合理想解的 4 个特点,说明设计方案是正确的,理想的设计方案。反之,如果产品的设计方案与理想解的 4 条特点不符合,说明设计方案还需进一步改进。

基于 TRIZ 理论,对六足仿生机器人的结构(前肢部分)进行了创新性设计,丰富了机器人的自由度和灵活性。不仅充分发挥了原系统的优点,还集成了其他系统的功能,从而消除了原系统功能集成度较低等缺点。使机器人在复杂地域上可进行多腿行走、越障的同时也可执行抓取等任务。虽然该方案不是最终理想解,但却是满足理想解的一个合理方案。

机器人进行直行和定点转弯以及排爆任务的过程进行运动仿真,见图 8。仿真结果表明,机器人在运动周期内速度曲线基本光滑,运动比较平稳,说明所设计的机器人结构合理,满足设计要求。值得一提的是,在仿真视频中,机械前肢夹起炸药的过程仅是个例,该方案设计的六足仿生机器人所能实现的功能还有很多,需要在实践中进一步利用和开发。比如在排爆实际应用中,某些特殊情况下,可以将前肢的内侧镶嵌上刀刃,利用双臂的合夹将相关导线剪断,代替人去执行危险任务,尽可能降低相关工作人员的从业危险。

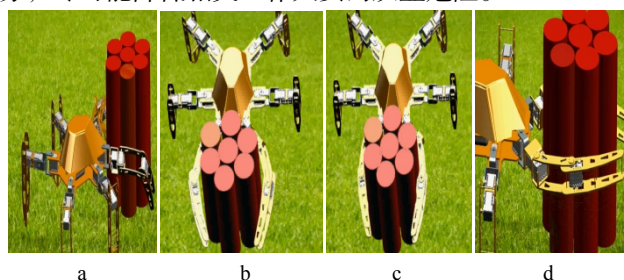


图 8 改进后的机器人排爆过程仿真

Fig.8 The robot EOD improved process simulation

改进后的六足仿生机器人进行动力学仿真,从重心位移规律的变化情况来看,六足仿生机器人在运动过程中重心起伏较小,运动曲线光滑且连续,没有过陡的起伏和尖点。说明改进后的六足仿生机器人的行走运动的过程流畅稳定,没有出现失稳,过度抖动情况。侧面验证了应用理想解-冲突法应用改进后的前肢结构具有较为良好的可靠性。在排爆仿真中可看出,采用新结构的六足仿生机器人在环境参数发生变化时能够很好跟随预期期,而且在躯体高度波动的情况下依然能够保证较小的接触冲击力和较高的稳态精度。

## 4 结语

在“发明问题解决理论”的基础之上,提出了一种基于理想解-冲突法的产品创新设计策略。应用该策略对现有六足仿生机器人进行了全面的分析其中包括需求分析,各部件优缺点分析后,再进行汇总,确定出处于理想解状态的六足仿生机器人与现行产品之间差距的冲突区域,并利用冲突解决原理对原设计方案进行了优化改进,成功地弥补了理想解与现行六足仿生机器人之间的差距,提升了六足仿生机器人的理想化水平。此外,对六足机器人的本体结构(前肢)进行了创新设计。使其整体结构更加紧凑,实现的功能更加集成,机构柔性与灵活性显著提升,具备了复杂环境条件下全地形运行的能力的基础,从而可以更加高效地处理“探测”、“排爆”等任务,执行效率大为提高。

## 参考文献:

- [1] 徐小云,颜国正. 六足移动式微型仿生机器人的研究[J]. 机器人, 2002, 24(5): 427—431.  
XU Xiao-yun, YAN Guo-zheng. Research On Miniaturc Hexapod Bio-robot[J]. Robot, 2002, 24(5): 427—431.
- [2] CIRILLO A, CIRILLO P, MARIA G D, et al. Optimal Custom Design of Both Symmetric and Unsymmetrical Hexapod Robots for Aeronautics Applications[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 44: 1—16.
- [3] ZHONG G, DENG H, XIN G, et al. Dynamic Hybrid Control of a Hexapod Walking Robot: Experimental Verification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 1.
- [4] 叶献伟,陈樊,高建华. 六足仿生机器人越障步态方法研究[J]. 浙江理工大学学报, 2008(5): 611—614.  
YE Xian-wei, CHEN Fan, GAO Jian-hua. Obstacle Crossing Gait Research on Hexapod Bionic Robot[J]. Journal of Zhejiang Sci-tech University, 2008(5): 611—614.
- [5] TUNC L T, SHAW J. Experimental Study on Investi-

- gation of Dynamics of Hexapod Robot for Mobile Machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5): 1—14.
- [6] ZHONG G, DENG H, XIN G, et al. Dynamic Hybrid Control of a Hexapod Walking Robot: Experimental Verification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 1.
- [7] SANTOS J, FERNÁNDEZ P. Evolved Synaptic Delay Based Neural Controllers for Walking Patterns in Hexapod Robotic Structures[J]. Natural Computing, 2016: 1—11.
- [8] BARNFATHER J D, GOODFELLOW M J, ABRAM T. Positional Capability of a Hexapod Robot for Machining Applications[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016: 1—9.
- [9] 王伟, 李文强, 李彦, 等. 基于理想解-裁剪法的水面油污清洁剂设计[J]. 工程设计学报, 2014(4): 355—361.  
WANG Wei, LI Wen-qiang, LI Yan, et al. Design of Water Oil Cleaner Based on the Ideal Result -trimming Method[J]. Journal of Engineering Design, 2014(4): 355—361.
- [10] 李彦. 创新设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
LI Yan. Innovative Design Method[M]. Science Publishing House, 2013.
- [11] 冷崇杰, 项辉宇, 张媛. 基于 TRIZ 理想解的全自动洗衣机自清洁结构创新设计优化[J]. 机械设计与研究, 2015(4): 159—164.  
LENG Chong-jie, XIANG Hui-yu, ZHANG Yuan. Innovative Design Optimization of Self-cleaning Mechanism for Automatic Washing Machine Based on TRIZ Ideal Solution[J]. Machine Design & Research, 2015(4): 159—164.
- [12] 姜杰, 李彦, 熊艳, 等. 基于 TRIZ 理想解和功能激励的产品服务系统创新设计[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(2): 225—234.  
JIANG Jie, LI Yan, XIONG Yan, et al. Product Service Systems Innovation Design Based on TRIZ Final Ideal Solutions and Function Excitation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(2): 225—234.
- [13] 夏盛来, 何景武. TRIZ 理论在飞机结构设计中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2009(12): 57—59.  
XIA Sheng-lai, HE Jing-wu. Applying Research of TRIZ Theory in Airplane Structural Design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(12): 57—59.
- [14] 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.  
TAN Run-hua. TRIZ and Applications: the Process and Methods of Technological Innovation[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [15] 韩立芳, 张明勤, 李海青, 等. 基于 TRIZ 的新型立体车库创新设计[J]. 工程设计学报, 2008, 15(2): 86—89.  
HAN Li-fang, ZHANG Ming-qin, LI Hai-qing, et al. Innovative Design of New-style Stereo Garage Based on TRIZ[J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(2): 86—89.