

仿生柔性非光滑表面的结构优化设计*

王云鹏 任露泉 杨晓东 李建桥
(吉林工业大学)

摘要 根据土壤动物柔性非光滑的特征规律和仿生类比的结果,采用数值优化和 CAD 几何造型技术,通过计算机模拟,构造了圆柱形、半圆柱形、布型和链型仿生柔性非光滑面,为柔性仿生减粘技术的开发创造了条件。

关键词 仿生 柔性非光滑表面 减粘降阻

通过对典型土壤动物的柔性体表形态及作用分析,对柔性非光滑体表及其防粘降阻特性进行了深入的研究^[1-3]。结果表明,生物体表和躯体的柔性,通过体表结构局部的相对转动和移动形成转动柔性和移动柔性,破坏了土壤对体表的粘附层;体表上的刚毛、鳞片、体节、针毛和绒毛等非光滑结构的局部,存在有利于减粘脱附的各种几何形状,随躯体的膨胀、收缩或局部结构的旋转、位移,利于对土壤的脱附。根据已得到的仿生信息,进行仿生类比,进而优化设计各种形式的仿生柔性非光滑表面是开发具有良好减粘脱附效果的实用仿生技术关键环节。

1 仿生类比

1.1 几何形状类比

典型土壤动物柔性体表正视图为圆形或椭圆形,宏观上是多重曲面的复合,存在凸包形等几何非光滑形态,土壤动物体表的几何形状为仿生类比提供了信息。图 1 为小土块与平面 OA 的粘附情况,图上 B 为粘附区上任一点,图中弧线 I、II、III、IV、V 为一系列曲面。随着平面 OA 逐渐变为曲面,在 B 处,土块的平衡稳定性越来越差,土块的粘附面积越来越小,曲面 I 的半径 R 最小,曲面曲率最大,土块的平衡性最差,粘附面积最小,土体最不易粘附。因此,从几何形状上看,平面最易粘附,圆柱面次之,球面最不易粘附。几何形状类比表明,在润湿情况下为了减粘,应该用曲面代替平面。

1.2 柔性类比

由于生物柔性体表局部在触土时的作用和材料性质的差异,造成体表局部的柔度不同。有些土壤动物,如马陆,其体表局部间(马陆体节)可产生适当的转动或移动,具有转动柔性或移动柔性的特征。对于转动柔性,采用平面与圆柱体集合来类比,如图 2b,其整体和部分间均可发生转动,称为圆柱形减粘面。对于移动柔性,采用平面与半圆柱体的集合来类比,如图 2d 所示,称为半圆柱型减粘面。

对于转动和移动的复合柔性,采用平面和封闭的圆环集合来类比,图 2e 和 f,称为链型、布

收稿日期: 1998-09-14

* 国家自然科学基金资助项目(59675045)

王云鹏,工学博士,副教授,长春市人民大街 142 号 吉林工业大学交通学院,130025

型减粘面。

根据上述仿生柔性类比结果预测,减粘脱附效果最好的应该是链型或布型减粘面,因为它们是转动柔性和移动柔性的多重复合。

2 仿生柔性非光滑表面的数值优化

根据仿生类比的结论,仿生柔性非光滑表面的优化问题就转变为结构最优设计问题。

文献 [4] 分别对半圆柱面、圆柱面和椭圆环组合面进行了优化。这里以椭圆环组合面为例,介绍优化结果。

如图 3 所示,在接触面一定的情况下,用长方体和椭圆环体的集合确定目标函数 $f(x)$ 和约束条件。 $f(x)$ 代表从长方体向椭圆体转化时去除部分的体积。根据仿生脱附的几何形状类比结果,剩余面积越小,去除面积越大,越有利于脱附,则有

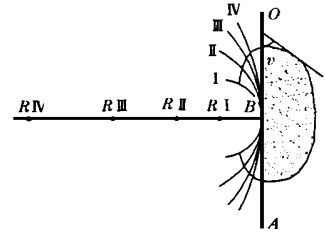


图 1 仿生脱附的几何形状类比

Fig 1 The bionics analogy of geometrical shapes

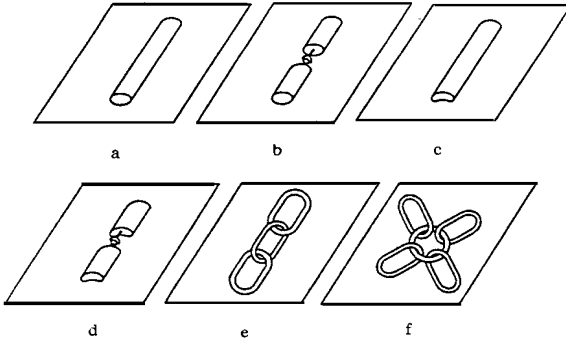


图 2 仿生脱附的柔性类比

Fig 2 The bionics analogy of flexibility

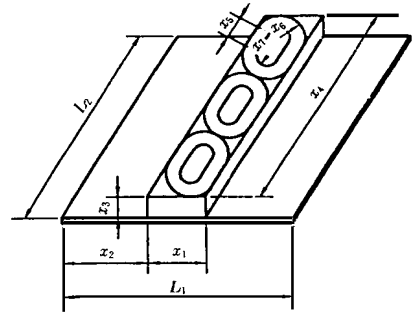


图 3 椭圆环组合面的优化

Fig 3 The digital optimization of ellipse ring

$$\begin{aligned} \max f(x) &= x_1 x_3 x_4 - n [\pi(x_6^2 - x_7^2) + 2(x_6 - x_7)x_5] x_3 \\ \text{s.t.} &\begin{cases} x_1 + 2x_2 + 2x_3 & l_1 \\ x_4 & l_2 \\ n(x_5 + 2x_6) & x_4 \\ 2x_6 & x_1 \\ x_6 - x_7 & x_3 \\ x_j & 0, j = 1, 2, 3, \dots, 7 \end{cases} \end{aligned}$$

通过自编的 FORTRAN 语言的优化程序可以实现数值优化。每给定一组 l_1, l_2 和 n , 就可得到一组较优解, 如当 $l_1 = 28.1 \text{ mm}, l_2 = 50 \text{ mm}, n = 3$ 时, 其较优解为 $X = [14.05 \ 15.00 \ 2.94 \ 50.00 \ 8.15 \ 4.26 \ 1.68]^T$, 这为仿生柔性非光滑面的尺寸设计提供了依据。

3 CAD 几何造型

根据布尔运算理论, 采用体素拼合造型的建模形式, 应用三维实体体素, 根据其定义参数,

构造了仿生图素库^[4]。在此基础上, 结合 CAD 几何造型技术, 对平面加圆柱、椭圆环等分别进行了构形, 图 4 为平面与椭圆环的构形结果。根据图 4b 的数值优化结果, 考虑几何形状类比中圆形最利于脱附和对转动柔性、移动柔性的仿生类比, 构造出链型仿生柔性非光滑表面, 图 4c 为一种优化结果。同样, 可模拟出圆柱型、半圆柱型、布型等多种仿生柔性非光滑表面。

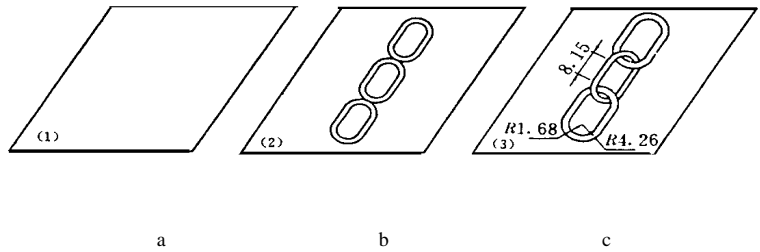


图 4 平面与椭圆环构形

Fig 4 The structure optimization of ellipse rings linked with one another

4 结束语

根据土壤动物柔性非光滑减粘脱附的特征规律, 通过仿生类比, 在数值优化的基础上, 对仿生柔性非光滑表面进行了 CAD 几何造型设计, 模拟出链型、圆柱型、半圆柱型、布型等多种仿生柔性非光滑表面结构。进一步的原理性试验研究表明, 仿生柔性非光滑表面具有良好的减粘降阻作用, 也证实了结构优化的正确性, 容后专文介绍。

参 考 文 献

- 1 Ren Luquan, Wang Yunpeng, Li Jianqiao, et al Flexible unsmoothed cuticles of soil animals and their characteristics of reducing adhesion and resistance Chinese Science Bulletin 1998, 43(2): 166~169
- 2 任露泉, 王云鹏, 李建桥 典型生物柔性非光滑体表的防粘研究 农业工程学报, 1996, 12(4): 31~ 36
- 3 Ren Luquan, Wang Yunpeng, Li Jianqiao, et al A nalysis of effect factors of soil adhesion to dump trucks Proc of the 12th Inter Conf of the ISTVS China Machine Press, 1996 524~ 530
- 4 王云鹏 柔性非光滑减粘脱附的仿生研究: [博士学位论文] 长春: 吉林工业大学, 1997

Structure Optimization Design of Bionics Flexible Unsmoothed Surfaces

Wang Yunpeng Ren Luquan Yang Xiaodong Li Jianqiao
(Jilin University of Technology, Changchun)

Abstract According to the information obtained from the bionics study on soil animals, the aspects of geometrical shapes and flexibility can be applied to the bionics analogy. The objective functions and their constraint equations for digital optimization of bionics flexible unsmoothed surfaces were established on the basis of bionics analogy. The dimensions of various structure units of the bionics flexible unsmoothed surface were obtained. Based on the CAD geometric modelling, the arrangement and link of the structure units were determined and then the bionics flexible unsmoothed surfaces of the shape of cylinder, semicylinder, cloth, chain were obtained. It created a condition to develop the bionics flexible unsmoothed technology of decreasing adhesion and reducing resistance.

Key words bionics analogy, flexible unsmoothed surface, adhesion-decreasing and resistance-reducing