

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.09.007

# 风电塔筒爬壁机器人吸附结构设计分析\*

侯嘉瑞<sup>1</sup>, 万 熠<sup>1\*</sup>, 孙立新<sup>2</sup>

(1. 山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;  
2. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300132)

**摘要:**针对风电塔筒外壁面检修困难的问题,对当前风电塔筒检修的方式、缺陷、需求进行了分析,对现有爬壁机器人的机械结构、吸附方式、主要功能进行了归纳,提出了一种可适应曲面吸附爬行的新型机器人机构。该机构可辅助或替代人工进行风电塔筒的检修,具备两个旋转自由度,采用了一种新型永磁爬壁吸附结构,可稳定吸附于风电塔筒外壁面并在壁面移动;利用 Solidworks、Maxwell 等软件进行了爬壁机器人的结构建模及吸附机构的吸附力仿真;对爬壁机器人在不同的失稳条件下进行了受力分析,得到了所需吸附力数值;将吸附单元仿真结果与计算所需吸附力进行了比较。研究表明:该爬壁机器人吸附能力符合稳定吸附要求,可以稳定吸附于风电塔筒外壁面。

**关键词:**爬壁机器人;永磁吸附;风电塔筒;检修

中图分类号:TH122;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)09-0939-05

## Analysis of adsorption structure for wall climbing robots in wind power tower

HOU Jia-ru<sup>1</sup>, WAN Yi<sup>1</sup>, SUN Li-xin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem of overhauling the outer wall of wind tower, the ways, defects and demands of the current wind tower inspection were analyzed, the mechanical structure, adsorption method and main functions of the existing climbing robot were summarized, a new type of robotic mechanism that can adapt to crawling on the wind tower surface was proposed to assist or replace the manual overhaul of wind power tower. The structure has two degrees of freedom of rotation, with a new type of permanent magnetic structure for wall adsorption, which can adsorb to the outer wall of the wind tower and move on the wall. Solidworks, Maxwell and other software were used for modeling and simulation, and according to the force analysis of the climbing robot under different instability conditions, the required adsorption force values were obtained, and then the adsorption unit simulation results were compared with the calculated adsorption force. The results indicate that the wall-climbing robot meets the requirement of stable adsorption, indicating that it can be stably adsorbed on the outer wall of the tower.

**Key words:** climbing robot; permanent magnet adsorption; wind power tower; overhaul

## 0 引 言

目前,风力发电已在世界各地广为应用。作为风能收集的载体—风电塔筒而言,由于制造、装配等过程

存在的问题,以及长时间使用后塔筒疲劳,容易出现塔筒裂纹、表面锈蚀等状况,不及时实施对应的检修措施将会引发塔筒坍塌的严重事故<sup>[1-2]</sup>。

目前常见的人工检修法存在诸多弊端:(1)检修人员需要携带大量工具从高度极高的塔筒内攀爬到顶

收稿日期:2017-12-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575320)

作者简介:侯嘉瑞(1995-),男,河北邢台人,硕士研究生,主要从事特种机器人方面的研究。E-mail:sduhjr@163.com

通信联系人:万 熠,男,教授,博士生导师。E-mail:wanyi@sdu.edu.cn

部;(2)检修人员悬吊在塔筒外壁工作时,由于高空风力较大,极易出现晃动,威胁检修人员的安全;(3)由于塔筒外表面面积较大,人工检修的方式容易出现漏检的情况,对于一些裂缝、锈蚀得不到完全检修,存在后续的安全隐患<sup>[3-4]</sup>。

针对上述问题,本文将设计一种能够替代人力进行风电塔筒检修的辅助工具。

## 1 爬壁机器人结构方案设计

### 1.1 整体方案布局

设计风电塔筒爬壁机器人目的是为了能替代人工进行对风电塔筒的检修,因此要求爬壁机器人能够安装不同检修装置,并通过在工作表面进行运动,完成检修任务。

综合现有研究成果及生产需求<sup>[5-6]</sup>,要求爬壁机器人能够达到的基本技术指标如表 1 所示。

表 1 爬壁机器人性能指标

项目名称	技术指标
最大尺寸/mm	≤550 × 550 × 200
机器人总重/kg	≤40
移动速度/(m · min <sup>-1</sup> )	6 ~ 8
爬行高度/m	80 ~ 120
越障能力/mm	≥10
变径能力/(°)	±6

同时,考虑应用场景,该爬壁机器人应由以下功能部分组成,其主要功能分解图如图 1 所示。

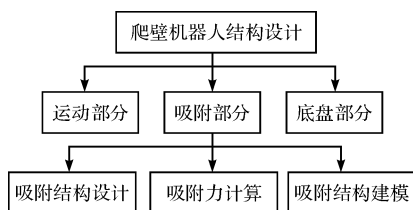


图 1 爬壁机器人主要功能分解图

常见爬壁机器人吸附方式分为:负压吸附、真空吸附、以及磁吸附<sup>[7]</sup>,以上 3 种吸附方式优缺点如表 2 所示<sup>[8]</sup>。

表 2 常见爬壁机器人吸附方式

吸附方式	优势	劣势
负压吸附	无泄漏问题,对壁面形状、材料适应性强。	产生气流负压力的装置状、噪音大、体积大,效率低。
真空吸附	轻量化,密封性好,断电时有一定的冗长性。	壁面有凹凸或裂缝时会产生泄露。
磁吸附	维持吸附力不需要外加能量,可靠性高,保证工作人员安全。	步行时磁体与壁面的分离需施加很大的力。

根据爬壁机器人应用场景,磁吸附结构对于运动表面的材料要求较高,需要为能被吸附的磁性材料;同时这种方式设计简单,相对其他吸附方式而言吸附力明显较大,对运动面形状要求不高。

磁吸附包括永磁体和电磁体两种吸附方式,前者结构简单、可靠性高。使用永磁吸附的设备,不会因断电等意外情况出现吸附力的消失,导致设备从工作面坠落<sup>[9]</sup>,因此设计采用永磁吸附方式。

考虑风电塔筒塔筒曲率半径不断变化的特点,以及需要较大的吸附力等因素,爬壁机器人采用履带式行走方式,通过两台驱动电机驱动状态的不同,实现爬壁机器人直线及转弯运动<sup>[10-11]</sup>。

### 1.2 旋转吸附机构模型的建立

由于风电塔筒外壁面曲率是变化的,不同高度直径不同,常见风电塔筒高约 80 m,塔筒整体呈锥形,最窄端口直径 2 800 mm,最宽端口直径 3 500 mm,若考虑爬壁机器人最大设计尺寸,采用双铰链旋转结构<sup>[12]</sup>,则极端爬行位置沿塔筒切线方向贴合偏移约 7.24°。根据风电塔筒高度、直径等参数计算,可得到爬壁机器人沿塔筒轴线方向贴合偏移约 0.2°,该方向偏移可忽略不计。

因此,沿塔筒切线方向,爬壁机器人需要具备在一定范围内实现吸附半径变化的能力。考虑机器人在塔筒外壁转弯时,存在前端吸附结构翘起,并远离塔筒的情况,应减小吸附机构与塔筒的距离变化,要求机器人吸附结构具备旋转自由度。

根据以上分析结果,爬壁机器人需要具备两个旋转自由度。旋转吸附机构模型如图 2 所示。

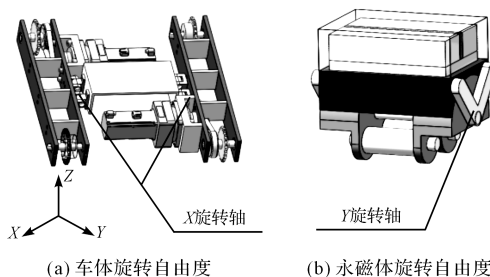


图 2 两自由度旋转吸附机构模型

## 2 爬壁机器人吸附状态受力分析

本文主要设计爬壁机器人吸附机构,因此在进行受力分析时主要进行静力学分析,从吸附结构的稳定吸附方面进行分析。在静止吸附状态下,造成爬壁机器人失稳的方式主要包括滑落下落、纵向翻转以及横向翻转<sup>[13]</sup>。

### 2.1 滑移下落

假设爬壁机器人静止,且吸附力是均匀的,则爬壁机器人静力学受力分析如图 3 所示。

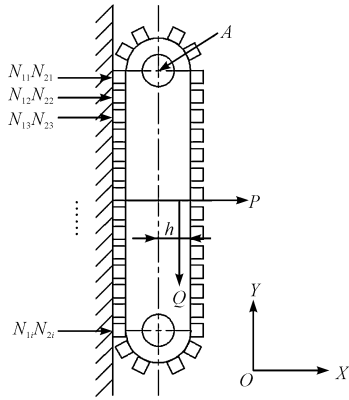


图 3 爬壁机器人纵向吸附受力分析图

$N_{1i}, N_{2i}$  - 两条履带各永磁体与壁面作用力;  $P$  - 永磁吸附装置在墙壁上提供的吸力;  $Q$  - 爬壁机器人总重;  $h$  - 爬壁机器人重力偏移轴线距离;  $A$  - 爬壁机器人纵向翻转极限点

则根据受力分析可得:

$$\sum X = 0, P - \sum_{i=1}^n N_{1i} - \sum_{i=1}^n N_{2i} = 0 \quad (1)$$

$$\sum Y = 0, Q - \sum_{i=1}^n F_{1i} - \sum_{i=1}^n F_{2i} = 0 \quad (2)$$

$$F_{1i} \leq f_{静} \cdot N_{1i} \quad (3)$$

$$F_{2i} \leq f_{静} \cdot N_{2i} \quad (4)$$

式中:  $n$  - 单条履带与壁面同时吸附的永磁体数量;  $f_{静}$  - 静摩擦系数。

假设各永磁体吸附力均相同,则可令:

$$N_{11} = N_{12} = \dots = N_{1i} = N_1 \quad (5)$$

$$N_{21} = N_{22} = \dots = N_{2i} = N_2 \quad (6)$$

由公式(1 ~ 4) 可得出:

$$nN_1 \cdot f_{静} + nN_2 \cdot f_{静} \geq Q \quad (7)$$

且  $N_1 = N_2$ , 则可得:

$$2nN_1 \cdot f_{静} \geq Q_{2i} \quad (8)$$

式中:  $N_1$  - 滑移失稳极限状态下单个永磁体吸附力。

得到结果:

$$N_1 \geq \frac{Q}{2n \cdot f_{静}} \quad (9)$$

### 2.2 纵向倾覆

爬壁机器人本体不发生纵向倾覆(即爬壁机器人在纵向静止吸附状态下不脱离墙壁)的条件为:  $\sum M_A \geq 0$ (各参数如图 3 所示),通过计算可得:

$$2 \times (N \times 0 + N \times p' + N \times 2p' + \dots + N \times n - 1p') - Q \cdot L \geq 0 \quad (10)$$

$$\frac{n(n-1) \cdot N \cdot p'}{4} - Q \cdot L \geq 0 \quad (11)$$

$$N_2 \geq \frac{4QL}{n(n-1)p'} \quad (12)$$

式中:  $N_2$  - 纵向倾覆失稳极限状态下单个永磁体吸附力。

### 2.3 横向倾覆

爬壁机器人本体不发生横向倾覆(即爬壁机器人在横向静止吸附状态下,不会出现脱离墙壁的情况)的条件为:  $\sum M_B \geq 0$ 。

受力分析如图 4 所示。

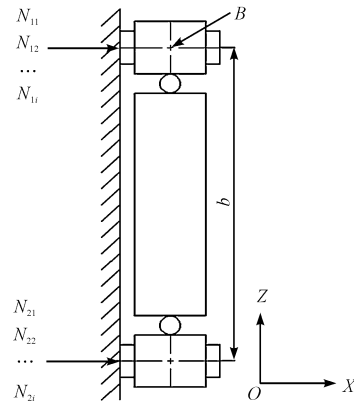


图 4 爬壁机器人横向吸附受力分析图

$N_{1i}, N_{2i}$  - 单条履带各永磁体与壁面作用力;  $b$  - 爬壁机器人两履带吸附中心距离;  $B$  - 爬壁机器人横向翻转极限点

根据图 4 参数可得:

$$n \times N \times 0 + n \times N \times B - Q \cdot L \geq 0 \quad (13)$$

$$n \cdot N \cdot B - Q \cdot L \geq 0 \quad (14)$$

$$N_3 \geq \frac{QL}{nB} \quad (15)$$

式中:  $N_3$  - 横向倾覆失稳极限状态下单个永磁体吸附力。

### 2.4 静止吸附状态失稳极值计算

根据以上爬壁机器人常见失稳状态分析,考虑安全系数,爬壁机器人所需最大吸附力为:

$$N \geq K \cdot \max \left\{ \frac{Q}{2n \cdot f_{静}}, \frac{4QL}{n(n-1)p'}, \frac{QL}{nB} \right\} \quad (16)$$

式中:  $K$  - 安全系数。

根据设计参数可得:  $Q = 400 \text{ N}, L = 60 \text{ mm}, p' = 33 \text{ mm}, n = 11, B = 30, f_{静} = 0.4, K = 1.5$ 。将参数代入式(16) 可得:  $N \geq 68.18 \text{ N}$ 。

可见,要实现爬壁机器人的稳定吸附,其与壁面贴合吸附的每个吸附单元所需提供的吸附力  $N \geq 68.18 \text{ N}$ 。

### 3 永磁吸附结构与仿真分析

#### 3.1 方案设计

根据上述分析计算可知,每个吸附单元应具备至少“68.18 N”的吸附力,同时考虑吸附单元外部需要嵌套防磨橡胶,因此设备吸附单元选用稀土永磁材料钕铁硼(Nd-Fe-B),这种永磁材料磁能积较大,现已在相关领域得到了广泛应用<sup>[14]</sup>。

永磁体单元的布置主要有:“单块永磁体与两块分离永磁体”、“有无扼铁”等方式。本文经过试验仿真得出,选用两块分离永磁体,添加扼铁的方案产生的相对吸附力最大。

吸附方案如图 5 所示。

#### 3.2 磁力仿真

常见风电塔筒的壁厚约为 15 mm,同时本研究根

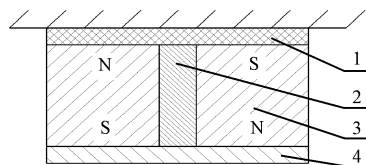


图 5 吸附单元方案

1 - 橡胶隔套;2 - 隔磁体;3 - 永磁体;4 - 扼铁

据传动部分设计结果,及计算得到的永磁体吸附力,初步确定单块永磁体尺寸为 8 mm × 22 mm × 30 mm。由此可通过 Maxwell 软件进行磁铁吸附力的仿真。

令永磁体距壁面的距离、扼铁的厚度为变量,本研究观察不同参数下吸附力的变化情况(仿真采用 2D 模型,数据中对壁面产生吸附力为永磁体厚度为 30 mm 时,不同参数变化产生的吸附力大小)。

综合分析曲线如图 6 所示。

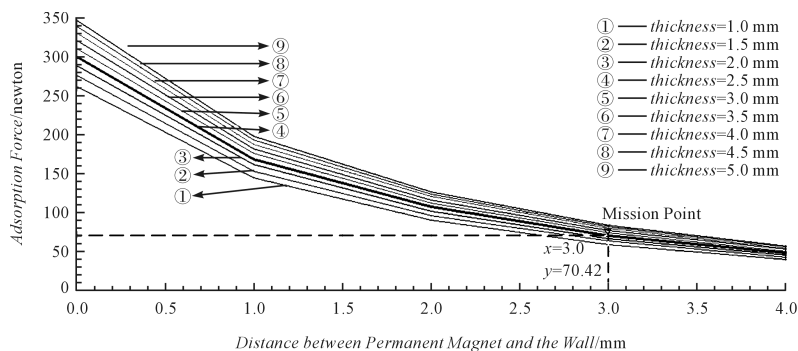


图 6 吸附力综合分析曲线

### 4 实验及结果分析

根据综合分析曲线结果以及制造难易程度,可得到相对最优目标点:即当永磁体距壁面距离为 3 mm,扼铁厚度为 2.5 mm 时,所求永磁体吸附力仿真结果为 70.42 N。此结果最接近计算结果 68.18 N。此时的吸附单元的磁力仿真如图 7 所示。

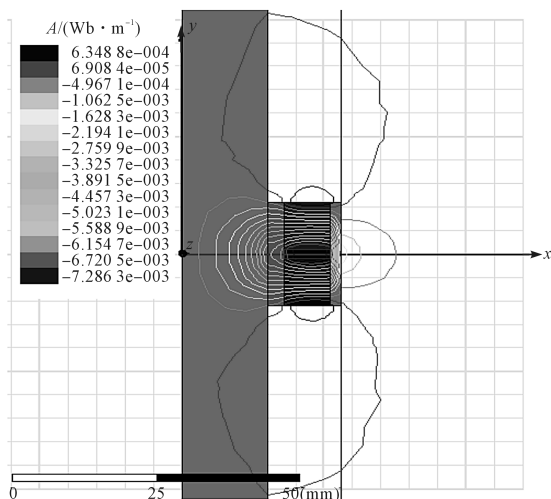


图 7 设计仿真结果分析图

实验结果表明:在该实际应用条件下,爬壁机器人吸附能力符合稳定吸附要求,说明该爬壁机器人结构可以稳定吸附于风电塔筒外壁面。

根据吸附单元仿真结果,结合吸附单元结构设计及整机设计方案,最终可得到一种适用于风电塔筒外壁检修的爬壁机器人三维模型,如图 8 所示。

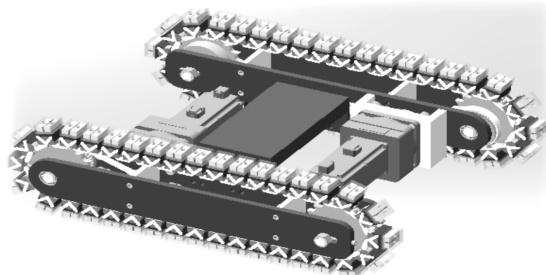


图 8 爬壁机器人结构三维模型

通过在该机器人上安装不同工具,操作人员即可完成对风电塔筒的检测、清理、修复等任务。

### 5 结束语

针对风电塔筒的检修工作,通过对爬壁机器人的



结构设计分析,本文借助 Solidworks、Maxwell 等软件,设计了一种双旋转自由度的爬壁机器人结构:

(1)该结构灵活度高,通过双旋转自由度可使吸附单元自主贴合风电塔筒外壁轮廓,保证机器人吸附爬行的稳定性;

(2)进行了爬壁机器人静止状态下的受力分析,考虑不同情况下的失稳边界条件,根据给定参数计算得到吸附单元相对最优吸附力  $N \geq 68.18 \text{ N}$ ,并在确定吸附单元构型后进行磁力仿真,得到实际情况下吸附力  $N = 70.42 \text{ N}$ ;

(3)仿真结果表明:采用该吸附单元的爬壁机器人结构,可以稳定吸附于风电塔筒外壁面。

### 参考文献 (References):

- [1] 王振东. 我国风能利用现状[J]. 工业,2015(25):164.
- [2] 张明锋,邓凯,陈波,等. 中国风电产业现状与发展[J]. 机电工程,2010,27(1):1-3.
- [3] 沈德昌. 我国大型风电机组技术发展情况[J]. 太阳能,2015(2):11-14.
- [4] 何满. 中国风电产业政策研究[D]. 武汉:华中师范大学经济与工商管理学院,2013.
- [5] DEHGHANI-SANIJ A R, SOLTANI M, RAAHEMIFAR K. A new design of wind tower for passive ventilation in buildings to reduce energy consumption in windy regions[J]. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 2015(42):182-195.
- [6] 熊雕,刘玉良. 履带式爬壁机器人受力分析与稳定性仿真研究[J]. 机电工程,2015,32(7):929-932,937.
- [7] ZHANG Y, DODD T, ATALLAH K, et al. Design and optimization of magnetic wheel for wall and ceiling climbing robot[C]. International Conference on Mechatronics and Automation, New York:IEEE,2015.
- [8] YAN C, SUN Z, ZHANG W, et al. Design of novel multi-directional magnetized permanent magnetic adsorption device for wall-climbing robots[J]. **International Journal of Precision Engineering & Manufacturing**, 2016,17(7):871-878.
- [9] CAI J, HE K, FANG H, et al. The design of permanent-magnetic wheeled wall-climbing robot[C]. IEEE International Conference on Information and Automation, New York:IEEE,2017.
- [10] SHANG J, SATTAR T, CHEN S, et al. Design of a climbing robot for inspecting aircraft wings and fuselage[J]. **Industrial Robot**, 2013,34(6):495-502.
- [11] 王志永. 风力发电机塔身清刷机器人结构设计及其吸附性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学机电工程学院,2016.
- [12] 刘枫. 风力发电机塔身清洗机器人设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院 2013.
- [13] XU Z Y, ZHANG K, ZHU X P, et al. Design and optimization of magnetic wheel for wall climbing robot[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015.
- [14] SASAKI T T, OHKUBO T, HONO K. Structure and chemical compositions of the grain boundary phase in Nd-Fe-B sintered magnets[J]. **Acta Materialia**, 2016(115):269-277.

[编辑:周昱晨]

### 本文引用格式:

侯嘉瑞,万熠,孙立新. 风电塔筒爬壁机器人吸附结构设计分析[J]. 机电工程,2018,35(9):939-943.

HOU Jia-ru, WAN Yi, SUN Li-xin. Analysis of adsorption structure for wall climbing robots in wind power tower[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(9):939-943.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn