

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.05.023

大型承压设备爬壁机器人 磁桥设计和试验研究*

郭伟灿^{1,2}, 郑慕林^{1,2}, 凌张伟^{1,2}, 陈永贵^{1,2}

(1. 浙江省特种设备科学研究院, 浙江 杭州 310020;
2. 浙江省特种设备安全检测技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310020)

摘要:针对大型承压设备轮式爬壁机器人磁轮吸附力不足的问题,对爬壁机器人磁吸附结构进行了优化设计与实验研究。通过爬壁机器人受力状态及吸附力要求的物理分析,提出了磁轮与磁桥结构相结合的磁吸附方式;利用建立的有限元仿真模型,确定了最佳永磁体长度、高度、宽度等规格参数,并研究了磁桥与容器壁面空气间隙对爬壁机器人吸附力的影响;设计磁吸附力测试装置进行了实验,然后与有限元仿真结果进行了对比。研究表明:该磁桥结构能够为轮式爬壁机器人提供充足的吸附力,能避免机器人爬行过程中出现的向上爬行打滑和横向爬行侧滑问题。

关键词:爬壁机器人;磁桥;吸附力;结构设计

中图分类号:TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)05-0588-05

Design and experimental research of magnetic bridge on large pressure equipment wall-climbing robot

GUO Wei-can^{1,2}, ZHENG Mu-lin^{1,2}, LING Zhang-wei^{1,2}, CHEN Yong-gui^{1,2}

(1. Zhejiang Academy of Special Equipment Science, Hangzhou 310020, China;

2. Key Laboratory of Special Equipment Safety Testing Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient adsorption forces on magnetic wheels of the wheeled wall-climbing robot used in large-scale pressure vessels, the magnetic adsorption structure of the wall-climbing robot was optimized and experimentally studied. Through the physical analysis of the force state and the adsorption force requirements for the wall-climbing robot, a magnetic adsorption method combined magnetic wheels and magnetic bridge was proposed. The established finite element simulation model was used to determine appropriate length, thickness, width of permanent magnets, and study the effect of the air gap between the magnetic bridge and the vessel wall on the adsorption forces of the wall-climbing robot. Moreover, the experimental test device of magnetic adsorption forces was designed and conducted to experimentally study the variation of magnetic adsorption forces, with which the finite element analysis results were compared. The results indicate that the designed magnetic bridge provided sufficient adsorption forces for the wheeled wall-climbing robot, which effectively avoided the wheel sliding during the robot climbing process.

Key words: wall-climbing robot; magnetic bridge; adsorption force; structure design

收稿日期:2019-08-13

基金项目:浙江省质量技术基础建设项目(20190111);浙江省质量技术监督局科技计划项目(20160123)

作者简介:郭伟灿(1968-),男,浙江绍兴人,博士,教授级高工,主要从事特种设备检验检测、本质安全、剩余寿命、风险评价及事故预警技术等方面的研究。E-mail:gwcndt@126.com

0 引言

通常,球罐、储罐等大型承压设备的定期检验中,打磨、检测等作业需要在罐体内外搭建脚手架,依靠人工借助磨光机、无损检测设备完成。登高作业安全风险大,作业环境恶劣;同时,搭建脚手架耗时长、成本高。

采用爬壁机器人可以克服以上检测工作的缺点。由于永磁吸附方法安全可靠,对壁面光洁度的要求不高,大型承压设备爬壁机器人通常采用永磁吸附的方式。其运动方式主要有轮式、履带式、框架式、多足步行式和仿生式5种^[1-3]。其中,轮式爬壁机器人转向容易、控制灵活、移动速度快,但由于车轮与壁面接触面积过小,保持一定的吸附力比较困难,且负载能力弱^[4]。

永磁吸附通常采用磁轮和磁铁块两种吸附方法。磁轮的优点是壁面距离近,缺点是磁体重量较大,且磁轮在行走过程中会粘附铁锈,磁轮表面的橡胶薄膜容易破损;磁铁块吸附方式的吸附力减弱,但可通过磁桥方式增加磁场强度。

笔者在前期的爬壁机器人研制中曾采用磁轮吸附方式,但未能解决橡胶薄膜破损和铁锈粘附问题;本研究在原结构上进行改进,采用磁轮加磁桥组合方式,并对吸附力性能进行数值与实验研究。

1 爬壁机器人吸附要求分析

球罐、储罐等大型承压设备检验作业用的轮式爬壁机器人,应满足转弯、越障等通过性能力要求,具备抗滑移、抗倾覆能力^[5]。针对大型球罐,爬壁检测机器人行走时,其与地面的倾角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化,为防止机器人下滑,与壁面接触的轮子必须提供足够的静摩擦力。因此,必须提供合适的磁吸附力^[6]。

前期研制的一款爬壁机器人,前轮为驱动轮,后轮为从动轮,从动轮阻力忽略不计,其单侧磁轮受力状态如图1所示。

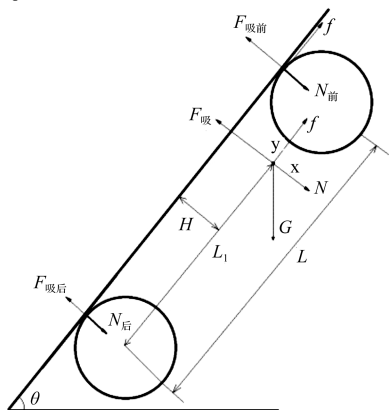


图1 爬壁机器人单侧磁轮受力状态

在图1中,要使机器人不沿壁面下滑,需满足条件如下:

$$f \geq G \sin \theta \quad (1)$$

$$f = \mu N \quad (2)$$

式中: f —摩擦力,N; G —机器人自重,N; μ —摩擦系数; N —正压力,N; θ —机器人的水平倾角。

机器人在球罐表面法线方向上(X 、 Y 轴方向)的力平衡条件为:

$$N + G \cos \theta - F_{\text{吸}} = 0 \quad (3)$$

其中: $F_{\text{吸}} = F_{\text{吸前}} + F_{\text{吸后}}$, $N = N_{\text{前}} + N_{\text{后}}$ 。

由上述公式可导出:

$$F_{\text{吸}} \geq \frac{G \sin \theta}{\mu} + G \cos \theta \quad (4)$$

因大型球罐壁面状况复杂,机器人行走过程中要跨越焊缝及受到局部碰撞。因此,实际设计吸附力值为理论设计吸附力值的2倍,即:

$$F_{\text{吸}} \geq 2 \left(\frac{G \sin \theta}{\mu} + G \cos \theta \right) \quad (5)$$

在垂直于球罐壁面的方向上,机器人受重力产生转矩力,若吸附力不足将导致机器人绕后轮或前轮向后翻转。机器人在前轮朝上和后轮朝上时的力矩平衡方程为:

$$(F_{\text{吸前}} - N_{\text{前}})L - GH \sin \theta - GL_1 \cos \theta = 0 \quad (6)$$

$$(F_{\text{吸后}} - N_{\text{后}})L - GH \sin \theta - G(L - L_1) \cos \theta = 0 \quad (7)$$

式中: L —机器人前后轮轮距,mm; H —机器人重心到罐壁壁面的高度,mm。

要使机器人不倾翻,其前轮和后轮的吸附力应满足以下条件:

$$F_{\text{吸前}} \geq \frac{(GH \sin \theta + GL_1 \cos \theta)}{L} \quad (8)$$

$$F_{\text{吸后}} \geq \frac{GH \sin \theta + G(L - L_1) \cos \theta}{L} \quad (9)$$

针对爬壁打磨作业的工况要求,确定下述基本参数:带轮半径50 mm,前后轮轴距 $L = 400$ mm,其他各种负载的总质量为20 kg,重心高度 $H = 70$ mm,重心离后轮距离为 $L_1 = 300$ mm,前轮与球罐壁面的摩擦系数 $\mu = 0.5$,取安全系数2。

爬壁机器人满足抗滑移、抗倾翻要求所需的前后轮的吸附力可根据式(6,7)计算得到。将式(6,7)代入式(5,8,9),可得到吸附力与倾斜角度之间的变化关系曲线,如图2所示。

从图2中可以看出:机器人在变角度爬壁时,机器人与地面成 63.64° ,机器人所需的吸附力达到最大

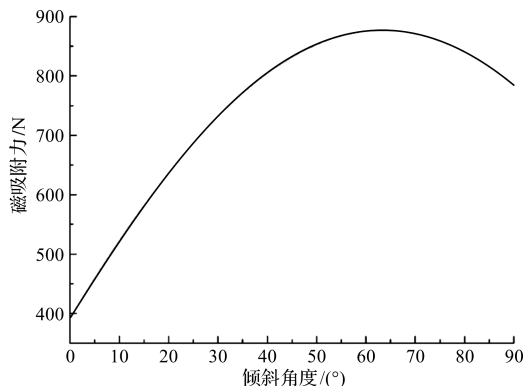


图 2 吸附力随角度变化的曲线

值;所设计的爬壁机器人单个前轮吸附力为 360 N, 单个后轮吸附力为 120 N。上述设计可满足机器人在作业过程中不会发生下滑和前后倾覆。

将研制的轮式爬壁机器人应用于球形储罐焊缝打磨的现场作业,在实际作业过程中发现机器人存在向上爬行打滑和横向爬行后轮侧滑的状况。原因一是后轮的磁吸附力和摩擦系数均较小;二是若一对磁轮的极性相同,则在转向产生相互的斥力。由于磁轮与球罐壁面为线接触,在磁轮吸附力和摩擦力都较小时两磁轮在行进时不能够保持完全的同向性,加剧了打滑现象;两磁轮极性相反时亦然,两磁轮在转向时会产生相互干扰。

改造方案有两种:一种是加大后轮宽度;另一种是用高摩擦系数、质量较轻的橡胶轮替代磁轮,并在橡胶轮附近加装磁铁块。由于两个后轮相对转动时空余的空间已不多,且加大后轮宽度后相互干扰更加严重,本研究采用第二种改造方案,采用磁轮加磁桥组合吸附方式,通过两种磁体位置布置来调节机器人的吸附力。

2 爬壁机器人的磁桥设计

笔者采用 N50 铁钕硼稀土永磁磁轭式磁桥结构,其磁特性如表 1 所示。

表 1 N50 铁钕硼稀土永磁体磁特性参数表

性能参数	数值
剩磁 B_r/T	1.39 ~ 1.46
矫顽力 $H_{cj}/(kA \cdot m^{-1})$	≥ 836
最大磁能积 $(BH)_{max}/(kJ \cdot m^{-3})$	374 ~ 406
密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	7 500
居里温度 T/K	580 ~ 600

磁桥优化设计目的在于既能够提供足够吸附力,又能保证越障性能,其结构主要由 N50 铁钕硼稀土永磁体磁极、空气间隙、被测壁面、衔铁组成。其吸附力与气隙高度、体积参数、衔铁的磁导率和厚度,以及壁

面材料的磁特性和厚度等相关^[7-8],其示意图如图 3 所示。

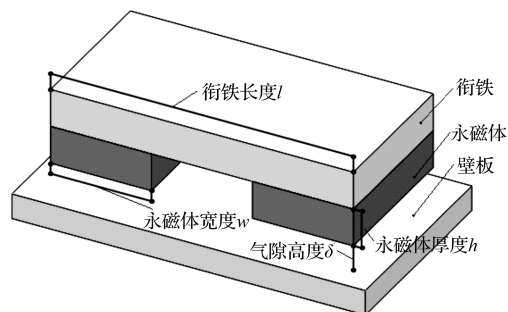


图 3 磁桥结构示意图

在图 3 中,假设磁场在磁桥结构两个磁极、衔铁、壁面及空气间隙形成闭合的磁回路,且磁场在各回路中均匀分布。设磁极高度为 h ,磁极面积为 S ,气隙高度为 δ ,衔铁和壁面的磁场通过长度分别为 L_1 和 L_2 ,通过截面积为 S_1 和 S_2 ,磁体、衔铁和壁面的相对磁导率分别为 μ_r 、 μ_{r1} 和 μ_{r2} ,则磁桥的总磁阻 R_m 为:

$$R_m = \frac{2h}{\mu_r \mu_0 S} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} + \frac{L_1}{\mu_{r1} \mu_0 S_1} + \frac{L_2}{\mu_{r2} \mu_0 S_2} \quad (10)$$

永久磁铁磁极和钢板之间的磁吸力 F 为:

$$F = \frac{B^2}{\mu_0} \cdot S \quad (11)$$

式中: B —磁感应强度,T。

在空气中磁场没有外泄的条件下, B 可近似表示为:

$$B = \frac{\mu_0 F_{\text{势}}}{\delta + \delta_{\text{当}}} \quad (12)$$

式中: $F_{\text{势}}$ —永磁体磁势; $\delta_{\text{当}}$ —磁回路中的磁阻折合成空气间隙时的相当间隙。

由式(10)可得:

$$\delta_{\text{当}} = \left(\frac{h}{\mu_r} + \frac{L_1 S}{2\mu_{r1} S_1} + \frac{L_2 S}{2\mu_{r2} S_2} \right) \delta \quad (13)$$

因此,结合公式(11,12),永磁体磁极和钢板之间的磁吸力可近似表达为:

$$F = \mu_0 \left(\frac{F_{\text{势}}}{\delta + \delta_{\text{当}}} \right)^2 \cdot S \quad (14)$$

对磁桥结构进行优化设计时,需要考虑磁桥安装空间和自身重量等参数。笔者采用 ANSYS 对磁桥结构进行建模,求解不同结构参数下,磁桥与壁板间的磁感应强度,进而求得磁桥结构与壁板间的吸附力。

ANSYS 分析模型由磁桥结构和被检壁板构成。其中,磁桥由衔铁和永磁体粘结成桥式结构,且永磁体磁极的极性相对。衔铁材质为电工纯铁,衔铁厚度的主要考虑保证磁桥中的磁场不泄漏。最终磁桥结构的衔铁的长、宽、高确定为 120 mm × 60 mm × 15 mm。

由式(11,14)可知:永磁体尺寸及磁桥与壁板间的气隙高度直接影响磁桥吸附力的大小。笔者利用永磁体厚度 h 、永磁体宽度 w 及磁桥与壁板之间的气隙高度 δ 等参数,对磁桥吸附力的影响进行了有限元仿真。

当永磁体长度与宽度不变,磁桥与壁板之间的间隙为 $\delta = 10 \text{ mm}$ 时,得到不同厚度永磁体所对应的磁感应强度 B ,将 B 代入式(11)求得不同厚度永磁体磁桥吸附力。

吸附力-磁桥结构参数关系如图4所示。

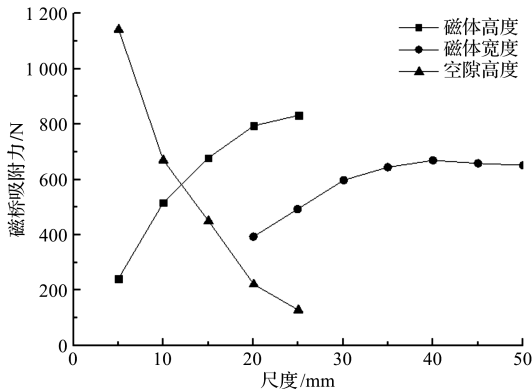


图4 吸附力-磁桥结构参数关系曲线

由图4可以看出:在 $5 \text{ mm} \sim 25 \text{ mm}$ 范围内,磁体厚度与吸附力呈递增趋势;但随着磁体厚度的增加,磁体的自重也随之增大。由于工程实践中,要求磁吸附力与磁体自重比值尽可能大,且在磁体吸附面积恒定的条件下,磁体的厚度不宜过大,笔者选择磁体的厚度 $h = 15 \text{ mm}$ 。

同理,在永磁体厚度 $h = 15 \text{ mm}$ 、永磁体长度为 60 mm 时,改变磁体的宽度即改变磁极的面积,笔者分析了磁体宽度为 $20 \text{ mm} \sim 60 \text{ mm}$ 时磁桥的磁感应强度,并代入式(11)得到了磁体宽度和磁桥吸附力之间的关系。

由图4可以看出:在磁体高度和磁体长度恒定的情况下,磁桥的吸附力随磁体宽度先增大后减小,当永磁体宽度 $w = 40 \text{ mm}$ 时,磁桥的吸附力取得最大值;当永磁体的宽度 $w > 40 \text{ mm}$ 时,磁桥的吸附力随着永磁体宽的增大而减小;当永磁体宽度 $w = 60 \text{ mm}$ 时,两块永磁体将互相连接,永磁体之间无空隙存在。若两块永磁体相对于壁面的极性是相对的,则此时的两块永磁体与衔铁组成磁桥;若两块永磁体相对于壁面的极性是相同的,则此时的两块永磁体则连接成为一块面积是原来2倍的永磁体,此时永磁体与衔铁则不能组成磁桥。

这两种情况下磁桥结构的磁感应强度 B 和磁桥吸附力 F 如表2所示。

表2 永磁体宽度 $w = 60 \text{ mm}$ 时磁感应强度及磁桥吸附力

	磁感应强度 B/T	磁桥吸附力 F/N
极性相对	0.574 58	630.525 111 5
极性相同	0.345 04	227.373 720 4

由表2可知:当 $w = 60 \text{ mm}$ 时,两块永磁体极性相同时,其吸附力为两块永磁极性相对组成磁桥吸附力的 36.06% ;当 $w = 40 \text{ mm}$ 时,其吸附力为磁桥吸附力的 33.99% 。

综合上述分析,并考虑到磁桥所处的空间尺寸约束,笔者确定磁体长度、磁体宽度、磁体厚度分别为 60 mm 、 40 mm 和 15 mm 。

本研究仿真分析得到了磁桥吸附力与气隙高度 δ 之间的关系。从图4可以看出磁桥吸附力随着气隙高度的增加而降低。根据机器人作业实际情况,笔者选择气隙高度为 10 mm 。

3 实验及结果分析

为了对磁桥空气间隙与吸附力的关系进行实验研究,笔者设计了磁吸附力测试实验装置,如图5所示。

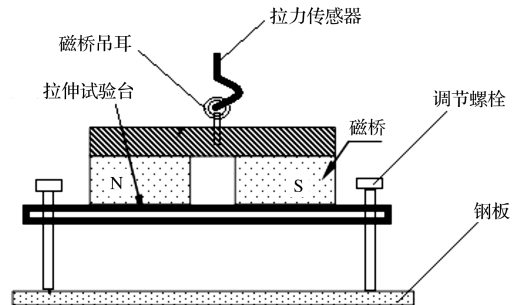


图5 磁吸附力测试实验装置

图5中,把吸附单元固定到拉伸试验台,置于水平放置的钢板之上,通过螺栓调整磁桥的空气间隙,用可记录峰值拉力的测力计沿垂直方向将磁桥提起,测量垂直方向的作用力,减去磁桥的自重就是磁桥的吸附力。

笔者针对 40 mm 的磁铁间距,对空气间隙与吸附力的关系进行了试验,得到了吸附力-气隙高度关系实验对比结果,如图6所示。

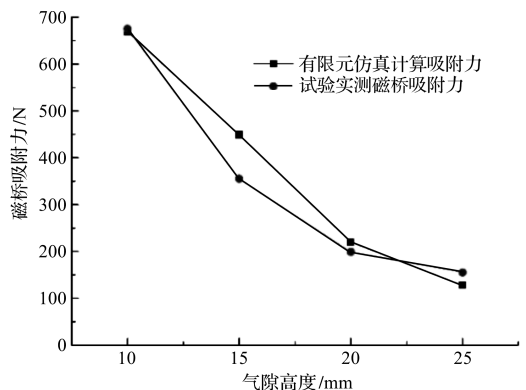


图6 吸附力-气隙高度关系实验对比

由图 6 可知:(1) 试验结果与有限元分析结果基本吻合;(2) 气隙高度减小,磁桥吸附力会迅速增大,同时也增大了爬壁机器人行进阻力,爬壁机器人需要更大的驱动力,难以满足越障要求;(3) 气隙高度增大,磁桥吸附力减弱,难以满足机器人防滑移或倾覆的要求。

由于大型承压设备内外表面分布着大量焊缝,焊缝余高一般控制在 3 mm 以内,磁桥磁极与壁面的间隙应大于 3 mm;同时,由于磁桥磁极会吸附铁锈,磁极与壁面的间隙应在焊缝余高的基础上再加一定裕量,但间隙不宜过大。因此,爬壁机器人磁桥的设计必须在保证机器人能顺利跨越焊缝的同时,依然能提供足够大的吸附力,以保证机器人不发生滑移或倾覆。

综上所述,笔者在设计磁桥时取气隙高度为 10 mm,此时磁桥可提供 675 N 左右的吸附力。原爬壁机器人后轮为磁轮,试验测得单个磁轮的磁吸附力为 140 N,磁轮自重 20 N,两磁轮提供的吸附力的综合为 280 N,自重为 40 N;而磁桥结构的自重为 25 N,提供的磁吸附力大于原先的 2 个后轮吸附力之和;同时 10 mm 的气隙高度可以保证机器人顺利跨越焊缝。为保持力的平衡,磁桥应布置在前后两组轮之间并靠近后轮的位置,且不妨碍后轮转动。为此,笔者选择在机器人中轴线离后轮连线 100 mm 处布置磁桥;通过计算,后轮具有 353 N 的吸附力。

根据上述试验结果,对前期磁轮吸附方式的爬壁打磨机器人进行改进,采用了磁轮的吸附方式,并加装了所设计的磁桥结构。

4 结束语

为了解决大型承压设备轮式爬壁机器人磁轮吸附力不足的问题,笔者对爬壁机器人磁吸附结构进行了优化设计与实验研究,结果表明:

(1) 采用磁轮加磁桥组合吸附方式,通过两种磁

体位置布置来调节机器人的吸附力,可以既减轻重量,又提高整体的吸附力;

(2) 磁桥的吸附力与空气间隙、永磁体的磁化能力、衔铁的磁导率和厚度、容器壁的材料和厚度、磁极间距等因素相关;

(3) 试验结果表明:空气间隙对磁桥的吸附力影响大,气隙高度减小,磁吸力会迅速增大;为保证爬壁机器人吸附力的同时兼顾其越障性能,应选择合适的空气间隙;

(4) 根据理论分析和试验结果对磁桥进行优化设计,继而将改进后的爬壁打磨机器人应用于某石化公司大型球罐内表面焊缝打磨的现场作业,有效解决了向上爬行时的打滑和横向爬行时后轮侧滑的问题,且机器人的驱动力更强。

参考文献 (References):

- [1] 潘佩霖,韩秀琴,赵言正,等. 日本磁吸附爬壁机器人的研究现状[J]. 机器人,1994,16(6):379-382.
- [2] FISCHER W, TACHE F, SIEGWART R. Magnetic Wall Climbing Robot for Thin Surfaces with Specific Obstacles [C]. Proceedings of FSR 2007, Chamonix; IEEE, 2007.
- [3] 刘淑霞,王 炎,徐殿国,等. 爬壁机器人技术的应用[J]. 机器人,1999,21(2):148-155.
- [4] 李 航,孙厚芳,林青松,等. 两轮移动机器人控制系统研究[J]. 机床与液压,2006(7):179-180.
- [5] 闻 靖,顿向明,缪松华,等. 变磁力吸附爬壁机器人的结构设计与爬越焊缝特性[J]. 机器人,2011,33(4):405-410.
- [6] 沈青青. 磁粉探伤爬壁检测机器人的设计与研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2014.
- [7] 任吉林. 电磁检测[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [8] 林锡忠,邹俊芬,林 育. 论电磁轭提升力[J]. 无损检测,2000,22(10):439-441.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

郭伟灿,郑慕林,凌张伟,等. 大型承压设备爬壁机器人磁桥设计和试验研究[J]. 机电工程,2020,37(5):588-592.

GUO Wei-can, ZHENG Mu-lin, LING Zhang-wei, et al. Design and experimental research of magnetic bridge on large pressure equipment wall-climbing robot [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(5):588-592.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>