

爬壁机器人履带多体磁化结构吸盘的设计及优化*

徐泽亮 马培荪

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

摘要: 介绍了基于稀土永磁均匀磁化特性而研究设计的有别于传统普通吸盘结构的爬壁机器人履带多体磁化结构吸盘。根据履带吸盘工作状态特点和稀土永磁均匀磁化的特性, 首先建立了履带吸盘与金属壁面间隙工作空间的镜像简化模型, 推导出间隙工作空间 y 方向的磁场强度的计算表达式。通过仿真结果和对比试验都证明, 该履带吸盘的平均磁场强度和吸力比普通结构吸盘大很多。为得到间隙工作空间磁场强度的分布规律, 在忽略永磁体末端效应的假设条件下, 建立其多次谐波方程, 由此提出了该结构的履带吸盘的优化设计原则。并通过实际应用证明, 该结构吸盘完全满足爬壁机器人爬行性能的要求。

关键词: 履带吸盘 多体磁化结构 磁场强度 镜像模型

中图分类号: TM144

0 前言

随着机器人技术的不断发展, 机器人已经大量应用于社会生产的各个行业。而爬壁机器人作为高空作业的一种自动装置, 已在高强度、高危险环境中得到应用^[1~3], 这种方法替代了人的高空作业, 降低其操作的危险性, 大大提高了检测效率。因此爬壁机器人的研究和应用受到各国学者的广泛重视, 并有着极其重要的工程应用背景和非常广泛的应用前景。

在各类爬壁机器人中, 实际应用比较广泛的是永磁吸附履带式爬壁机器人。其爬行机构采用履带式结构, 其特点是爬行速度快, 控制方便; 吸附方式采用永磁吸附, 永磁吸附具有吸引力大, 结构简单, 无需外部供电的特点。而爬壁机器人永磁吸盘的设计是保证爬壁机器人爬行的安全性、稳定性、提高爬壁机器人对凹凸不平壁面的适应性的关键。

根据稀土永磁铁的性能特点, 设计了基于多体磁化结构的新型吸盘。根据履带吸盘的工作状况, 提出了该新型吸盘的镜像简化模型, 从理论仿真结果和试验结果都证明新型吸盘所产生的磁场强度和吸力都比传统结构的吸盘大很多。通过进一步的假设模型, 建立了间隙工作空间中磁场强度分布的多次谐波方程, 进而提出了新型吸盘的优化设计原则。

1 履带吸盘结构的理论分析

1.1 永磁吸附履带式爬壁机器人及吸盘结构

图 1 为用于大型油罐容积检测的永磁吸附履带式爬壁机器人。该爬壁机器人能在金属壁面上沿着规定路径爬行, 并借助其携带的相应检测设备对油罐进行容积检测和安全检查。



图 1 永磁吸附履带式爬壁机器人

为图 1 中所示的爬壁机器人而提出的多体结构履带吸盘如图 2a 所示, 同时在图 2b 中, 给出了传统吸盘的结构。其中永磁材料设计采用高性能的稀土永磁材料(NbFeB, 牌号 NTS/210)。该稀土永磁材料的各向异性场很强, 内禀矫顽力极大, 一旦被磁化, 其磁场强度将保持不变^[5]。衔铁材料选用纯铁或 Q235 钢。

1.2 履带吸盘结构的简化模型

由于爬壁机器人爬行于金属油罐壁面, 其履带吸盘与金属壁面形成的工作磁场, 相当于吸盘吸附于无限大金属平面形成的磁场。在以上吸盘结构中, 其静态磁路分析如图 3a 所示。磁力线由稀土

* 上海市科学发展基金资助项目(941111035)。20030115 收到初稿, 20030607 收到修改稿

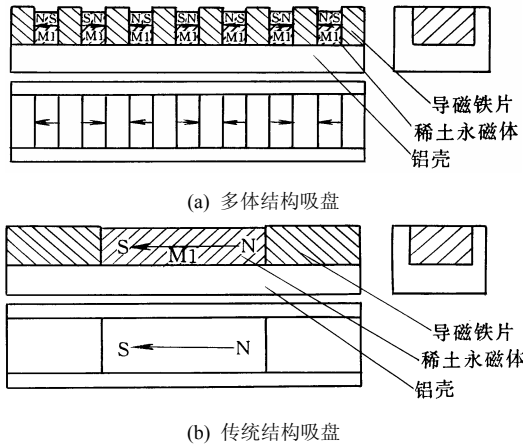


图2 爬壁机器人履带吸盘结构及其简易磁路

永磁体N极发出,经相邻的一块软磁体和空气间隙,进入钢板,再通过空气间隙和另外一块相邻的软磁铁回到稀土永磁的S极,构成完整回路。在该磁路中,软磁体可认为是近似磁短路的,其磁阻为0。根据镜像法的基本理论^[6],在此可以建立基于镜像法的吸盘与金属平面工作间隙空间磁场镜像模型,即用与吸盘相似的模拟吸盘结构代替在实际金属平面上的感应磁场,以便计算吸盘与金属平面在其间隙空间内共同产生的合成磁场。其原理可由图3表示,即用图3b中镜像模拟吸盘与实际履带吸盘之间的工作空间磁场代替图3a中履带吸盘与实际金属平面间隙的工作空间的磁场。通过图3b可知,该镜像简化模型是以 d 为周期规律排布, d 为两块永磁体间的相互距离,在此 $d=8a$,其中 a 为永磁体宽度的1/2。

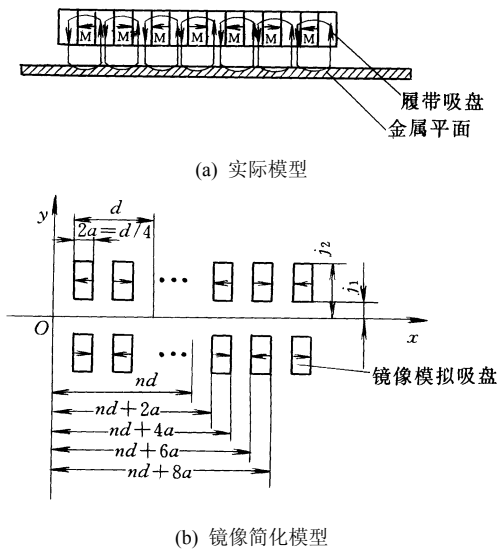


图3 履带吸盘的工作空间磁场镜像简化模型

1.3 吸盘工作空间磁场方程的建立

根据稀土永磁的退磁曲线可知其磁化强度 M 不受内磁场强度 H 的变化的影响,并且磁体一旦被均匀磁化,将始终保持均匀磁化,因此在以后的推

导中,便可采用“均匀磁化法”计算履带吸盘间隙工作空间的磁场强度分布。在笛卡尔坐标中,如图4所示的方块稀土永磁体源区 V ,其长度为 $2b$,宽度为 $2a$,厚度 $\delta = j_2 - j_1$ 。在空间任一点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 产生的磁标量势 $\varphi_m(x_0, y_0, z_0)$ 可表达为^[5]

$$\varphi_m(x_0, y_0, z_0) = \frac{1}{4V} \iiint_V \left[M_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{d} \right) + M_y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{d_0} \right) + M_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{d_0} \right) \right] dx dy dz \quad (1)$$

式中 d_0 ——磁场源点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 到点 $P(x, y, z)$ 的距离

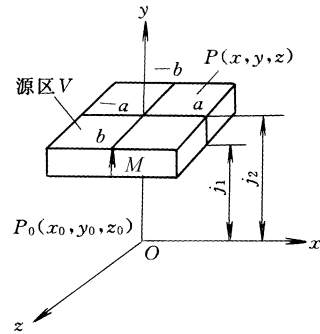


图4 方块永磁体

方块磁体内部磁化强度处处相等,其方向均沿 y 轴(均匀磁化),即其他分量为 $M_z = M_x = 0$ 及 $M_y = M$,且 M_y, M 均为常数。上式便可表示为

$$\varphi_m(x_0, y_0, z_0) = \frac{M}{4\pi} \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \int_{j_1}^{j_2} \frac{\partial d_0^{-1}}{\partial y} dy dz dx = \frac{M}{4\pi} \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \left[d_0^{-1} \right]_{j_1}^{j_2} dz dx \quad (2)$$

式中 $d_0 = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2}$

由此可得该方块磁体 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 在 y 方向的磁场强度 $H_y(x_0, y_0, z_0)$ 为

$$H_y(x_0, y_0, z_0) = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial y_0} = -\frac{M}{4\pi} \int_{-b}^b \int_{-a}^a \left[\frac{\partial d_0^{-1}}{\partial y_0} \right]_{j_1}^{j_2} dx dz \quad (3)$$

同理对 $\varphi_m(x_0, y_0, z_0)$ 分别在 x 和 z 方向的一次偏导,就可得到相应方向的磁场强度 H_x 和 H_z 。

在如图3所示履带吸盘镜像简化模型工作间隙空间中,对履带吸盘产生吸力影响最大的是磁场在 y 方向分布,因此以下只讨论该方向的磁场强度 H_y 的分布规律。对式(3)通过简单的参量变换,在此直接给出图3中磁场强度的表达式

$$H_y(x_0, y_0, z_0) = -\frac{M}{4\pi} \int_{j_1}^{j_2} \left(\int_{2a}^{4a} \frac{\partial f}{\partial x} dx \int_{6a}^{8a} \frac{\partial f}{\partial x} dx \right) dy \quad (4)$$

式中

$$f = \sum_{n=0}^3 \int_{-b}^b \frac{\partial}{\partial y_0} \left[\frac{1}{\sqrt{(x_0 - x - nd)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x_0 - x - nd)^2 + (y_0 + y)^2 + (z_0 - z)^2}} \right] dz$$

根据图3可知, n 表示以 y 轴为基准的第 n 个磁块分布周期, 根据实际吸盘结构, 共4个周期, 其取值范围为0~3。

如表列出该履带吸盘结构和工作参数。在图5a和图5b中分别给出新型吸盘与传统吸盘(相同稀土永磁体用量, 相同结构尺寸, 其结构如图2b所示), 在 $y_0=0$ 与 $z_0=0$ 平面相交的直线上, 磁场强度 H_y 在间隙工作空间中沿 x 方向变化的仿真和试验结果。从以上仿真结果可得, 新型履带吸盘的平均磁场强度比传统结构吸盘大, 且新型履带吸盘产生的磁场强度呈规律性的振荡波形分布, 新型吸盘间隙空间磁场强度 H_y 绝对值的平均值 $|\bar{H}_y|$ 为126.7 kA/m, 而传统吸盘 $|\bar{H}_y|$ 只有45.72 kA/m。图5c给出两种吸盘在不同空气间隙长度下吸力大小的比较。可以看出新型吸盘在相同间隙长度下, 比传统吸盘产生的吸力大很多。

表 吸盘结构及工作参数

参数	数值
稀土永磁体尺寸长(2b)×宽(2a)×厚δ/mm	9×4×5
饱和磁化强度 $M(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	8.75×10^5
空气间隙δ/mm	3

2 设计多体磁化结构新型吸盘优化原则

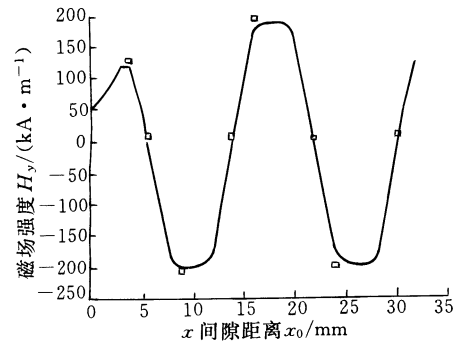
2.1 工作间隙空间磁场强度的谐波分布

为进一步研究多体新型吸盘工作间隙空间磁场性能和分布规律, 特别是磁场强度 y 方向的分布规律, 减小永磁体末端效应对磁场的影响, 在以下假设稀土永磁体在 z 方向的宽度 $b \rightarrow \infty$ 以及 $n \rightarrow \infty$ (假设吸盘在 z 和 x 方向无限延伸), 则式(4)可写成

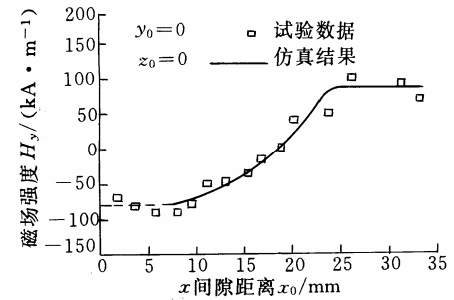
$$H_y(x_0, y_0, z_0) = -\frac{M}{4\pi} \int_{j_1}^{j_2} \left(\int_{2a}^{4a} \frac{\partial f}{\partial x} dx \int_{6a}^{8a} \frac{\partial f}{\partial x} dx \right) dy \quad (5)$$

式中 f 经整理后可写为

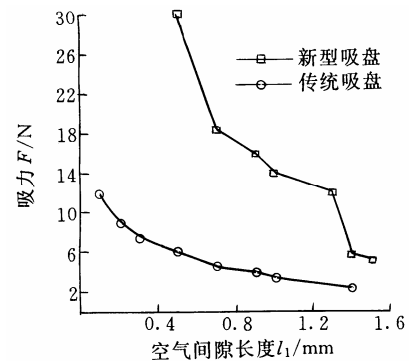
$$f = -2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{y_0 - y}{\sqrt{(x_0 - x - nd)^2 + (y_0 - y)^2}} - \frac{y_0 + y}{\sqrt{(x_0 - x - nd)^2 + (y_0 + y)^2}} \right] \quad (6)$$



(a) 新型吸盘



(b) 传统吸盘



(c) 吸力比较

图5 仿真及试验结果

根据留数定理, 对于式(6)可得以下非常有用的代数等式^[7]

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{y_0 - y}{(nd + x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} = \frac{y_0 - y}{|y_0 - y|} \times \frac{\pi}{d} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-nv|y_0 - y|) \cos nv(x_0 - x) \right] \quad (7)$$

式中 $v = 2\pi / d$

n —— $-\infty \sim \infty$ 的整数

根据图3b的镜像模型可知, 研究实际间隙空间磁场强度 H_y 的分布, 可只考察 $y_0 > 0$ 的情况, 因此, 比较式(6)与式(7), 式(6)可表示为

$$f = 2v \left[1 - \sum_{m=1}^{\infty} f_r \cos mv(x_0 - x) \right] \quad (8)$$

式中 $f_r = -[\exp(-mv(y - y_0)) + \exp(-mv(y + y_0))]$

将式(8)代入到(5)可得

$$H_y(x_0, y_0) = -\frac{2M}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{m} \exp(-mvj_1) \times [1 - \exp(-mv\delta)] \times \cosh(mvy_0) \times (\cos mvx_0 + \sin mvx_0) \quad (9)$$

式中 $m = 2n + 1$ $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$
 $v = 2\pi / d$

在同样的参数条件下，可得 H_y 在间隙空间沿 x 方向分布，式(9)表明了 H_y 沿 x 、 y 方向成典型的各次谐波振荡分布，其谐波振幅随谐波阶数的增高而减小，振幅随振荡周期的增大而增大，振幅随永磁体厚度的增大而增大，其仿真结果如图 6 所示。

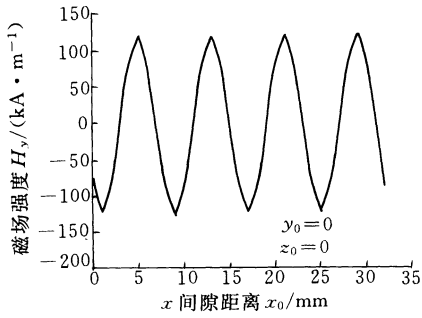


图 6 多体结构吸盘间隙空间的多次谐波分布

2.2 多体结构吸盘的优化设计原则

根据式(9)，可以通过增加稀土永磁体的厚度 δ 来增大磁场强度 H_y ，但盲目地增大厚度，将会增大稀土永磁的用量，这有可能导致材料的浪费，同时也会增加吸盘的重量，使机器人变得非常笨重，降低机器人的运动性能。

在此定义履带吸盘的相对厚度比 P 为

$$P = \delta / d \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)后，可以得到相对厚度比 P 与磁场强度 H_y 之间的关系，其仿真结果如图 7 所示。

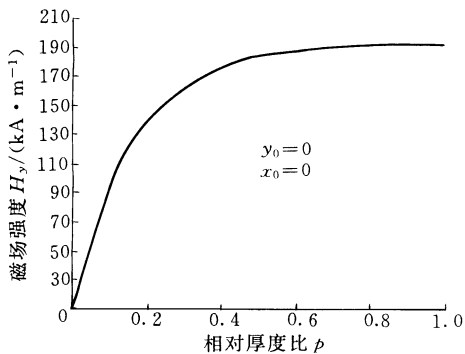


图 7 相对厚度比 P 与磁场强度 H_y 的关系

由图 7 可看出，磁场强度随相对厚度比 P 的增大而增大，但当 P 大于 0.5 以后，增加厚度比 P 对磁场强度增加的贡献将会很小。根据以上结论，可以得到该结构吸盘的优化设计原则：在设计该结构

的履带吸盘时，主要通过增大永磁体的宽度 a 来提高吸盘产生的吸力，在吸力满足爬壁机器人爬行稳定性的前提下，履带吸盘的相对厚度比 P 应小于 0.5。根据以上结论，可以对前面设计的履带吸盘进行优化，在 $d = 8 \text{ mm}$ 的情况下，可得该履带吸盘的厚度 δ 应不大于 4 mm。

表中所给出的履带吸盘结构参数就是根据机器人能越过的最大台阶高度为 10 mm，机器人总载质量为 20 kg 的条件下，根据以上原则设计的履带吸盘，通过试验验证该结构吸盘完全满足机器人爬行安全稳定性的要求。

3 结论

(1) 根据稀土永磁体的均匀磁化的特性，设计了用于爬壁机器人履带的基于多体结构的新型吸盘。根据履带吸盘的工作磁路特点，提出了履带吸盘和金属油罐壁面的镜像简化模型，并推导出计算履带吸盘与壁面间隙空间 y 方向磁场强度 H_y 的表达式。通过试验和仿真结果都证明：新型吸盘的场强 H_y 和产生的吸力都比普通吸盘大很多。

(2) 忽略磁体的末端效应，建立多体结构吸盘与壁面间隙工作空间磁场强度 H_y 的多次谐波方程，比较透彻地分析了磁场强度在 y 方向的变化规律，为该结构的吸盘的优化设计提供了理论基础。

(3) 基于以上的磁场强度 H_y 的多次谐波方程，提出了相对厚度比 P 不能大于 0.5 的优化设计原则。

(4) 该结构吸盘已实际应用于研制的爬壁机器人，完全满足爬壁机器人爬行时对吸附可靠性的要求。

参 考 文 献

- 1 Paul G B, Yoseph B C, Benjamin J. The multifunction automated crawling system (MACS). In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, 1997: 335~340
- 2 Schempf H. Neptune: above-ground storage tank inspection robot system. In: IEEE International Conf. on Robotic and Automation, San Diego, California, 1994: 2 014~2 022
- 3 Tomoaki Y, Tomohiro S, Masato M, et al. Development of a semi self-contained wall climbing robot with scanning type suction cups. In: Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1997: 900~905
- 4 马培荪, 陈佳品, 俞翔. 油罐容积检测用爬壁机器人的研制. 上海交通大学学报, 1996, 30(11): 159~164

- 5 易敬曾. 磁场计算与磁路设计. 成都: 成都电子科技大学出版社, 1987
- 6 王以真. 实用磁路设计. 天津: 天津科学技术出版社, 1992
- 7 沈永欢, 梁在中, 许履瑚, 等. 实用数学手册. 北京: 科学出版社, 2001

DESIGN OF THE WALL-CLIMBING ROBOT'S TRACKED SUCKER BASED ON MULTI-BODY MAGNETIC GRADUAL ALTERNATIVE SYSTEM

Xu Zeliang Ma Peisun
(Shanghai Jiaotong University)

Abstract: A new structure of the wall-climbing robot's tracked sucker, which is different from the normal, is designed based on

multi-body magnetic structure. According to the tracked sucker's working condition and the magnetization character of the rare earth magnet, a mirror model is obtained about the working air gap between the tracked sucker and the wall surface, a formula for calculating the magnetization in the y direction is established, it is proved that the magnetic force and the magnetization of the new tracked sucker is much larger than that of the normal. In order to reveal the distribution rule of the magnetization in the air gap, the permanent magnet's tip-effect is neglected, and a multi-harmonic formula is established, upon which the optimization principle of the design of the tracked sucker is presented. It fulfils the requirement of the wall-climbing robot moving safely on the wall surface.

Key words: Tracked sucker Multi-body magnetic structure
Magnetization Mirror model

作者简介: 徐泽亮, 男, 1974 年出生, 博士研究生。主要从事机器人学方面的研究工作。