# 第33卷 第4期 **石家庄铁道大学学报(自然科学版**) vol

Vol. 33 No. 4

2020年12月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Dec. 2020

# 磁力爬柱机器人磁吸附力分析与仿真研究

## 赵 童, 王战中, 孙国翔

(石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄 050043)

摘要:为解决磁力吸附爬柱机器人圆柱壁面安全吸附问题,将48块(2 cm×4 cm×1 cm)永磁 铁分为9+10+10+10+9、8+9+14+9+8、4+10+20+10+4 这 3 种布局方式,通过 Ansoft 软件 对这 3 种布局方式每次在相同工作间隙下进行磁力分析,确定最佳布局方式与工作间隙。建立永 磁铁块三维模型并考虑圆柱壁面的真实几何形状,完成磁铁块的弧形布局,磁铁块的布局弧形曲率 与圆柱壁面曲率相等。充分考虑磁吸附力的方向垂直永磁铁的表面,采用对每块永磁铁分别建立 相对坐标系的方法,完成 66 组仿真实验,并最终确定最佳布局方式为 4+10+20+10+4 型横排布 局和理想工作间隙为 2 mm,该结果可用于指导磁力吸附爬柱机器人的制作。

关键词:爬柱机器人;磁吸附装置;Ansoft 软件;磁力仿真

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 2095-0373(2020)04-0069-06

爬柱机器人属于特种机器人的一种,在高空作业领域起着重要的作用,其能在较高建筑物上完成检测并修补表面缺陷、清理表面污垢、表面喷涂等任务。首先具有提高作业效率、降低劳动强度、代替人工完成危险工作等优点;其次可广泛应用于高铁站柱子检测及修复、风力发电柱子表面清洁等领域。基于这些优点国内外专家对于爬柱机器人进行了大量的研究。

在永磁吸附爬柱机器人方面,磁吸附力是至关重要的。而永磁磁铁块的排布方式对磁吸附力有很大 的影响。黄忠等<sup>[1]</sup>采用 Ansoft Maxwell 软件建立三维磁场模型并对 2 块磁铁的厚度、工作间隙与轭铁厚 度进行了仿真。宋伟等<sup>[2]</sup>针对永磁铁的宽度进行了仿真。陈勇等<sup>[3]</sup>设计一种类似 H 型的变磁力吸附单 元并采用 Ansys 对其磁感应强度与磁吸附力进行了仿真。薛珊等<sup>[4]</sup>采用 Ansoft Maxwell 软件建立二维 磁场模型,针对磁吸附单元各结构尺寸对吸附力的影响进行了仿真。袁硕等<sup>[5]</sup>设计了一种基于 Halbach 阵列的永磁吸附单元并采用 Ansoft Maxwell 软件建立二维磁场模型对其进行了仿真。赵剑坤等<sup>[6]</sup>针对 永磁铁的磁路与气隙进行了仿真。

关于爬柱机器人,目前的文献大都只针对于永磁铁的厚度、工作间隙与轭铁厚度进行研究,忽视了永 磁铁的布局方式对于磁吸附力的影响。因此,为了能够满足高铁站柱子表面检测及修复的磁吸附爬柱机 器人能够安全吸附,将磁吸附装置采用的 48 块永磁铁分为 9+10+10+10+9、8+9+14+9+8、4+10+ 20+10+4 这 3 种布局方式进行仿真研究。通过使用 SolidWorks 软件,分别建立 3 种布局方式的三维模 型,并导入到 Ansoft Maxwell 软件进行磁吸附力仿真,得到了在相同间隙下 3 种布局方式的吸力与永磁 铁块的最佳布局方式及工作间隙。

## 1 永磁铁块布局方式与三维建模

磁吸附装置采用 48 块永磁铁,每块永磁铁长宽高为  $2 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ,并将这 48 块永磁铁分为 9+10+10+10+9、8+9+14+9+8、4+10+20+10+4 这 3 种布局方式。在 SolidWorks 中建立每种布 局方式的三维模型并导入到 Ansoft Maxwell 软件中进行磁力仿真分析。

收稿日期:2019-07-07 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20190121 作者简介:赵童(1994—),男,硕士研究生,研究方向为机器人技术与应用。E-mail:1592173636@qq.com 赵童,王战中,孙国翔.磁力爬柱机器人磁吸附力分析与仿真研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(4):69-74. (1)9+10+10+10+9 布局方式。三维模型如图1所示。



(a)永磁铁横排布置

(b)永磁铁竖排布置





(a)永磁铁横排布置

(b)永磁铁竖排布置







## 2 永磁铁布局方式有限元分析

2.1 选择材料

磁吸附装置有限元分析中用到的材料分别为:永磁体、轭铁、吸附圆柱壁面以及工作间隙介质。永磁 铁选为 Ansoft Maxwell 软件材料库中的钕铁硼,其牌号为 35(NdFeBN35)。性能参数如表 1 所示。仿真 过程中永磁材料的相对磁导率  $\mu_r = 1.0997785$ 。

表1 钕铁硼 N35 参数

参数	<b>剩磁</b> <i>B<sub>r</sub></i> /T	矫顽力 $H_{\phi}/(\mathrm{kA} \cdot \mathrm{m}^{-1})$	<b>内禀矫顽力</b> /(kA・m <sup>-1</sup> )	最大磁能积 $BH_{max}/(kJ \cdot m^{-3})$	居里温度/℃
范围	1.1~1.2	860~915	≥1 353	263~279	340

圆柱壁面采用纯铁(Iron)。

工作间隙中的介质选为空气,其导磁率  $\mu_r = 1.0$ 。 爬柱机器人吸附装置如图 4 所示。

#### 2.2 工作间隙对磁吸附力的影响分析

为了研究工作间隙对磁吸附力的影响,在 3 种布局方 式下分别取工作间隙为 0 mm、2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、 10 mm、12 mm、14 mm、16 mm、18 mm、20 mm 进行研究, 柱子直径为 300 mm。

2.2.1 9+10+10+10+9 布局方式下工作间隙对磁吸附 力的影响

2.2.1.1 永磁铁横排布置

取工作间隙为 0~20 mm,等间隔 2 mm。分别将每一 种工作间隙的磁吸附装置的三维模型导入到 Ansoft Maxwell 的三维磁场模型中进行磁吸附力仿真分析,计算出的 每种工作间隙对应的磁吸附力如表 2 所示,将表 2 的数据 在 Origin 软件中绘制出磁吸附力随工作间隙的变化曲线图,如图 5(a)所示。



图 4 磁吸附装置

表 2 每种工作间隙对应的磁吸附力

<b>工作间隙</b> <i>S</i> /mm 0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
<b>吸附力</b> F/N 1000.4	795.96	608.02	492.01	412.35	354.82	310.16	273.33	243.91	219	198.83

由图 5(a)可看出,磁吸附力随着工作间隙的增大而逐渐减小,磁吸附力从 1 000.4 N 减小到 198.83 N。在工作间隙为 0~4 mm 时,磁吸附力下降速度很快,原因是在工作间隙 S=0 mm 时,永 磁铁完全吸附在柱子上,磁力线全部穿过柱子,此时磁力线穿过柱子的面积最大,磁通量最大。当 工作间隙为 2 mm 和 4 mm 时,由于边缘漏磁原因,磁力线穿过柱子的面积急剧减小,导致磁通量减 小较快,因此磁吸附力减小也很快。当工作间隙 S>4 mm 时,磁吸附力下降速度减缓,是由于此时 磁力线穿过柱子的面积趋于稳定,磁通量的变化趋于稳定,导致磁吸附力的下降趋势减缓。当工作 间隙大到一定程度时,磁力线穿过柱子的面积几乎为 0,此时磁吸附力为 0。综合考虑,在磁吸附力 满足要求的前提下,工作间隙不应选过小。从曲线图中可以看出工作间隙 S 在 2~12 mm 之间比较 合适。

2.2.1.2 永磁铁竖排布置

同理,将永磁铁为竖排布置的三维模型导入到 Ansoft Maxwell 的三维磁场模型中,工作间隙为  $0 \sim 20 \text{ mm}$ ,等间隔 2 mm。将吸附力的仿真数据在 Origin 软件中绘制成曲线图,如图 5(b)所示。



图 5 9+10+10+10+9 布局方式下磁吸附力随工作间隙变化曲线图

从图 5(b)可以看出,磁吸附力随着工作间隙的增大而逐渐减小,磁吸附力从 1 005.3 N 减小到 192.36 N。工作间隙为 0~2 mm 时磁吸附力的下降速度比 2~4 mm 时慢,原因是由于在工作间隙 S=0 mm时,永磁铁完全吸附在柱子上,磁力线全部穿过柱子,此时磁力线穿过柱子的面积最大,磁通量最大,磁吸附力最大。当工作间隙为 2 mm 时,该布局方式下水平方向上永磁铁包围柱子的面积少,因此边缘漏磁较少,导致磁吸附力下降较慢。当工作间隙逐渐加大到 4 mm 时,边缘漏磁较多,磁力线穿过柱子的面积急剧减小,导致磁通量快速减小,磁吸附力减小也较快。因此磁吸附力的下降速度比 2 mm 时快。当工作间隙大于 4 mm 时,磁吸附力下降的趋势与横排布置时的趋势基本相同。

2.2.2 8+9+14+9+8 布局方式下工作间隙对磁吸附力的影响

工作间隙仍然取为 0~20 mm,等间隔 2 mm。分别将每一种工作间隙磁吸附装置的三维模型导入到 Ansoft Maxwell 的三维磁场模型中,按照上述方法绘制成曲线图,如图 6 所示。



图 6 8+9+14+9+8 布局方式下磁吸附力随工作间隙变化曲线图

由图 6(a)可看出,磁吸附力随着工作间隙的增大而逐渐减小,横排布置时磁吸附力从 1 150.6 N 下 降到 191.45 N。该曲线的下降趋势与布局方式为 9+10+10+10+9 横排布置时相同,也就是说磁吸附 力的变化与布局方式为 9+10+10+10+9 横排布置时相同。

由图 6(b)可看出,竖排布置时磁吸附力随着工作间隙的增大而逐渐减小,竖排布置时磁吸附力从 1 266.9 N 减小到 187.36 N。在工作间隙为 0~2 mm 时,磁吸附力下降速度最快,原因是在工作间隙 S=0 mm 时,永磁铁完全吸附在柱子上,磁力线全部穿过柱子,此时磁力线穿过柱子的面积最大,磁通量最大。 当工作间隙为 2 mm 时,由于该布局方式下在水平方向上永磁铁包围柱子的面积大,因此导致边缘漏磁较 多,磁力线穿过柱子的面积急剧减小,从而磁通量快速减小,因此磁吸附力减小也最快。这也是竖排布置 时磁吸附力下降速度比横排布置快的原因。当工作间隙>4 mm 时,磁吸附力的下降趋势与横排布置时 基本相同。 2.2.3 4+10+20+10+4 布局方式下工作间隙对磁吸附力的影响

工作间隙仍然取为  $0 \sim 20 \text{ mm}$ ,等间隔 2 mm。分别将每一种工作间隙磁吸附装置的三维模型导入到 Ansoft Maxwell 的三维磁场模型中,按照上述方法绘制出磁吸附力随工作间隙的变化曲线图。如图 7 所示。



图 7 4+10+20+10+4 布局方式下磁吸附力随工作间隙变化曲线图

由图 7(a)可以看出,横排布置时磁吸附力随着工作间隙的增大而逐渐减小,磁吸附力从 1 424.1 N 减小到 190.16 N。该曲线的下降趋势与布局方式为 8+9+14+9+8 横排布置时相同,也就是说磁吸附 力的变化与布局方式为 8+9+14+9+8 横排布置时相同。

由图 7(b)可见,竖排布置时磁吸附力随着工作间隙的增大而逐渐减小,磁吸附力从 1 467.5 N 减小 到 195.1 N。该曲线的下降趋势与布局方式为 8+9+14+9+8 永磁铁竖排布置时相同,也就是说磁吸附

**力的变化与布局方式为** 8+9+14+9+8 竖排布置时 相同。

2.3 布局方式对磁吸附力的影响分析

为了研究在工作间隙一定的条件下,布局方式对磁吸附力的影响,其中永磁铁尺寸不变,永磁铁布局方式 不变,柱子直径不变。分别研究工作间隙为2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、12 mm、14 mm、16 mm、18 mm、20 mm 时,哪种布局方式更合理。

当工作间隙一定时,磁吸附力随布局方式的变化曲 线如图 8 所示。

由图 8 可看出,布局方式对磁吸附力 F 的大小有 明显的影响。当工作间隙 20 mm $\leqslant S \leqslant 10$  mm 时,布局 方式为 4+10+20+10+4 型永磁铁横排布置时磁吸附



图 8 磁吸附力随布局方式变化曲线图

力 F 最大。当工作间隙 S > 10 mm 时磁吸附力基本相同,也就是说当工作间隙越来越大时布局方式已经 不是影响磁吸附力的主要因素,此时工作间隙将成为影响磁吸附力的主要因素。因此布局方式可选为 4+10+20+10+4型永磁铁横排布置,工作间隙 S 为 2 mm 作为参考值。

#### 3 结论

(1)运用 Ansoft Maxwell 中的三维模块进行仿真分析,得到了在永磁铁布局方式一定的条件下,工作 间隙对磁吸附力的影响较大。无论在哪种布局方式下,随着间隙的增大,磁吸附力会逐渐减小,当工作间 隙 S>12 mm 时,磁吸附力将会趋于稳定。为满足吸附力的要求,工作间隙选为 2 mm 比较合适。

(2)研究了当工作间隙一定的条件下,永磁体的布局方式对磁吸附力的影响,对比了 3 种布局方式 的磁吸附力变化曲线图,发现永磁铁的布局方式是影响磁吸附力的重要因素。当工作间隙 S<12 mm 时,4+10+20+10+4 型永磁铁竖排布置为最合适的布局方式。

## 参考文献

- [1]黄忠,刘泉,王茂.基于 Ansoft 的爬壁机器人吸附装置分析及设计[J].机械工程师,2015(12):108-110.
- [2]宋伟,姜红建,王滔,等. 爬壁机器人磁吸附组件优化设计与试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2018,52(10): 1837-1844.
- [3] 陈勇, 王昌明, 包建东. 新型爬壁机器人磁吸附单元优化设计[J]. 兵工学报, 2012, 33(12): 1539-1544.

[4] 薛珊,冯志强,徐龙,等. 基于 ANSYS 的爬壁机器人永磁吸附单元研究[J]. 制造业自动化,2016,38(8):22-25.

[5] 袁硕,刘天羽. 基于 Ansoft 的电力机器人永磁吸附单元有限元分析[J]. 电机与控制应用,2018,45(2);71-74.

[6]赵剑坤,叶家玮.基于有限元分析的永磁吸附单元设计优化[J].机械设计与制造,2009(3):47-49.

## Design and Magnetic Simulation of Magnetic Adsorption Device for Column Climbing Robot

Zhao Tong, Wang Zhanzhong, Sun Guoxiang

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to solve the problem of safe adsorption on the cylindrical wall of a magnetic adsorption cylindrical climbing robot, 48 permanent magnets  $(2 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 1 \text{ cm})$  were divided into three layouts: 9+10+10+10+9, 8+9+14+9+8 and 4+10+20+10+4. The magnetic force of the three layouts was analyzed with Ansoft software under the same working clearance to determine the optimal layout and working clearance. The three-dimensional model of permanent magnet block was established and the real geometrical shape of the cylindrical wall was considered. The arc layout of the magnet block was completed, and the arc curvature of the layout of the magnet block was equal to that of the cylindrical wall. Considering the suction direction of the perpendicular permanent magnet surface, 66 groups of simulation experiments were completed with the relative coordinate systems established for each permanent magnet. At the end, the optimal layout was determined to be 4+10+20+10+4 transverse layout and the ideal working gap was 2 mm. The result could be used to guide the production of the magnetic adsorption wall climbing robot.

Key words: column climbing robot; magnetic adsorption device; Ansoft software; magnetic simulation