

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.04.011

## 绿色节能抗斜式起重永磁铁的设计与研究

丁宁, 刘超, 段景淞, 姜淑娜, 崔善福

(长春大学机械与车辆工程学院, 长春, 130022)

**摘要:** 为了克服起重电磁铁耗电量大的缺点, 绿色节能的起重永磁铁成了近些年研究的热点。本文通过分析和对比起重永磁铁与起重电磁铁之间的性能差异, 设计出一种兼顾倾斜吊装和水平吊装的抗斜式起重永磁铁。完成了起重永磁铁的磁路设计, 计算出固定磁系与旋转磁系所需磁体以及导磁体的尺寸, 并分析了所设计磁路在卸物状态下的残余磁场强度; 根据旋转磁系的动作特点, 设计出抗斜驱动机构, 该机构包含两组旋向相反的棘轮转臂机构以及锥齿换向机构, 用以保证倾斜状态下至少有一组可以正常驱动旋转磁系旋转, 实现吸、卸物。本文解决了倾斜状态下单转臂起重永磁铁无法正常工作的难题。

**关键词:** 绿色节能; 起重永磁铁; 磁路设计与计算; 抗斜驱动机构

**中图分类号:** TH212      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)04-0606-05

### Design of Green Energy Saving Anti-inclined Lifting Permanent Magnet

DING Ning, LIU Chao, DUAN Jingsong, JIANG Shuna, CUI Shanfu

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Changchun University, Changchun, 130022, China)

**Abstract:** To overcome the shortcomings of large power consumption of lifting electromagnet, green energy saving lifting permanent magnet has become a hotspot in recent years. Based on the analysis and comparison of the performance difference between the lifting permanent magnet and the lifting electromagnet, we design a kind of anti-inclined lifting permanent magnet which has the ability to lifting the workpiece placed level or inclined. First, the structure design of permanent magnet ferromagnetic circuit is completed, and the size of permanent magnet and magnetizer of fixed magnetic system and rotating magnetic system is calculated, and the residual magnetic field strength under the unloading state of the design is analyzed. Then, according to the characteristics of the rotating magnetic system, the anti-inclined drive mechanism is designed, consisting of two sets of ratchet rotating arm mechanism with opposite rotation direction and bevel gear reversing mechanism, so as to ensure that at least one set can drive the rotating magnetic system to hold and release workpiece. The problem that single rotating arm lifting permanent magnet cannot lift the inclined workpiece is solved.

**Key words:** green energy saving; lifting permanent magnet; design and calculation of magnetic circuit; anti-inclined drive mechanism

起重电磁铁是一种通过控制电流的通断来实现吸、卸物的磁力搬运设备, 已被广泛应用于冶炼钢铁、金属矿山、船舶制造、港口运输、铁路物流等

行业。由于其磁场来自通电线圈对软磁体的磁化作用, 因此, 在其工作时需要持续、稳定的电能供应。据统计, 一台 20 kW 的起重电磁铁一年的耗电

**基金项目:** 吉林省科技发展计划(20200401111GX)资助项目; 吉林省产业技术与开发(2018C043-2)资助项目。

**收稿日期:** 2019-07-12; **修订日期:** 2020-03-07

**通信作者:** 丁宁, 女, 教授, 博士生导师, E-mail: dn33cn@163.com。

**引用格式:** 丁宁, 刘超, 段景淞, 等. 绿色节能抗斜式起重永磁铁的设计与研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(4): 606-610. DING Ning, LIU Chao, DUAN Jingsong, et al. Design of green energy saving anti-inclined lifting permanent magnet[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(4): 606-610.

量便可达到5万度以上,而一家大型的钢铁生产企业每天则至少有300台起重电磁铁在同时工作。如果从全国来看,每年由起重电磁铁消耗的电能是十分巨大的。因此,如果能用“零耗电”的起重永磁磁铁将其取代,将极大地减少电力的消耗。

作为一种新型的磁力搬运设备,起重永磁磁铁的磁场来自磁体本身,其利用磁场叠加原理,通过固定磁系与活动磁系的磁场叠加或抵消即可实现吸、卸物。由于采用机械结构作为驱动机构,其全工作周期无须供电<sup>[1]</sup>,相较于起重电磁铁每年上万度的耗电量,永磁起重技术可以说是一种颠覆性的技术。

自20世纪60年代,法国开普勒大学的学者提出发展起重永磁磁铁的构想以来,国内外学者在该领域进行了大量的研究。60年代末期,意大利米兰的一家公司率先推出了可逆磁铁起重吊(以铁氧体为磁源)。1987年,英国的Josef和Jan采用分离式卸重原理,利用液压连杆装置增大被吸物与永磁磁铁之间的气隙,以弱化磁吸力,达到卸物的目的<sup>[2]</sup>。但是,该类型的起重永磁磁铁在完成卸物后其底部仍有较强的磁场存在,在移动吊头的过程中仍有可能吸附其他铁磁性物体,实际使用效果远不如起重电磁铁。1990年,丁立功、杨树清利用磁场叠加原理,将磁系统设计为上、下两部分磁系,其中,上磁系可在电机和减速器的带动下左右平移,使两磁系的磁场叠加或抵消,从而实现吸、卸物<sup>[3]</sup>。1994年,为实现零耗电的设计目标,汪宪敏、丁宁、高长城等设计出一种圆柱型的复合永磁磁铁(旋转磁系)的结构,该复合永磁磁铁可在由左、右磁轭组成的圆形腔内90°旋转,在棘轮、棘爪和摆杆组成的驱动机构作用下,由吸物状态旋转90°,使其磁力线被内外磁轭短路实现卸物<sup>[4]</sup>。同一年,高长城、丁宁、汪宪敏等在原有复合永磁磁铁基础上,设计出一种单转臂的旋转式起重永磁磁铁,该起重永磁磁铁在底部添加了一组固定磁系以增强吸力,以圆柱齿轮机构,棘轮、棘爪机构作为驱动机构,驱动复合永磁磁铁旋转180°,使其与固定磁系的磁场叠加或抵消,实现吸、卸物<sup>[5]</sup>。

在以上所论述磁路结构中,“旋转磁系+固定磁系”磁路结构的技术指标优异,加工精度易于实现。后期所出现的起重永磁磁铁也多是以此为蓝本,针对一些特殊使用情况改进而来的。笔者设计出一种吊运废旧钢铁的起重永磁磁铁<sup>[6-8]</sup>;2010年,吕汝德将多组旋转磁系并列使用,磁系间用齿轮相互连接,位于端部的两组旋转磁系还安装有链轮作为磁极翻转装置<sup>[9]</sup>;2014年,杨国锋、陈铁光将液压连杆以及齿轮、齿条机构作为活动磁系的驱动装置<sup>[10]</sup>。

经过几十年的发展,起重永磁磁铁最基本的原理性问题已得到解决,除了保证设计吸力外,还可使卸物状态下工作磁极面的残余磁场强度保持在非常低的水平。但在实际应用上,起重永磁磁铁还存在吊、卸倾斜放置工件时无法正常工作的问题,因此,对其进行更进一步的研究,提高其适用性及性能,具有非常高的工程应用价值。

## 1 磁路的设计计算

起重永磁磁铁的设计可分为磁路设计和驱动机构设计两大部分。磁路的设计是实现起重永磁磁铁吸、卸物的关键,是设计工作中的重点。合理的磁路设计能够使起重永磁磁铁在卸物状态下的磁场强度维持在很低的水平,且使用最少的磁体便可达到目标吸力。

通过对具体工况的分析,结合以往的设计经验,综合对比研发成本,抗斜式起重永磁磁铁的磁路采用NdFeB与铁氧体混合使用的磁体布置方式。其中,旋转磁系采用NdFeB,固定磁系采用铁氧体,导磁体则采用导磁率适中的Q235A,所设计的永磁磁路结构如图1所示。

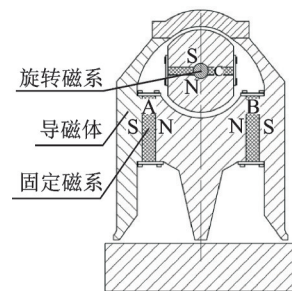


图1 永磁磁路结构

Fig.1 Permanent magnetic circuit structure

### 1.1 磁路的尺寸计算

在起重永磁磁铁工作时,工作磁极面与工件之间并非完全接触,两者之间存在一定的间隙 $L_g$ <sup>[11]</sup>,如图2所示。则吸物状态下该间隙的磁场强度 $H_g$ 可表示为

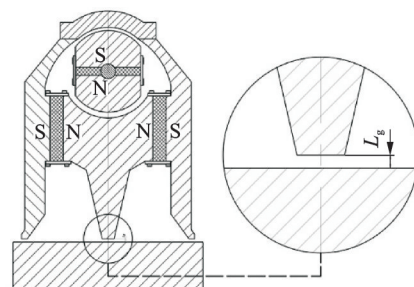


图2 工作磁极面与工件的间隙示意图

Fig.2 Gap between workpiece and working poles

$$H_g = \sqrt{\frac{4\pi F}{S_g}} \quad (1)$$

式中:  $F$  为设定的磁吸力;  $S_g$  为工作气隙的截面积。

由于磁路包含多块磁体, 因此所求得的  $H_g$  为旋转磁系和固定磁系叠加后的磁场强度。所以, 需要依照一定的比例关系(一般设置为  $H_g$  的一半) 设定旋转磁系在气隙中所产生的磁场强度  $H_{gr}$ 。根据平衡方程计算 NdFeB 磁体的尺寸, 即

$$S_{mr} = \frac{\sigma H_{gr} S_g}{B_{mr}} \quad (2)$$

式中:  $S_{mr}$  为 NdFeB 磁体的中性面面积;  $B_{mr}$  为磁体在最大磁能积点处的磁感应强度;  $H_{gr}$  为工作点  $K$  对应的磁场强度;  $\sigma$  是漏磁系数。

根据磁体工作点坐标比  $K$  可知

$$K = \frac{H_{gr}}{B_{gr}} = \frac{L_1 S_{mr} \epsilon}{S_g L_{mr}} \quad (3)$$

式中:  $L_{mr}$  为 NdFeB 磁体的长度;  $L_1$  为工作气隙的长度;  $B_{gr}$  为工作点  $K$  对应的磁感应强度;  $\epsilon$  为  $\sigma$  的倒数。

故 NdFeB 磁体的长度  $L_{mr}$  便可表示为

$$L_{mr} = \frac{S_{mr} L_1 \epsilon}{K S_g} \quad (4)$$

同理, 固定磁系的铁氧体磁体尺寸也可根据上述方法确定, 这里不再赘述。

确定磁体的尺寸后, 还需确定导磁体的尺寸。对于铁磁性物质而言, 其本身并无任何磁性, 但当其处于外部磁场时, 其磁感应强度  $B$  会随着外部磁场  $H$  的增加而增加(图3)。但这种磁化并不是无限的, 整个增加过程大致可以分为3段: 在  $oa$  段, 磁感应强度  $B$  急剧增加; 在  $ab$  段, 磁场的增加减缓; 超过  $b$  点后, 其磁化过程逐渐趋于平缓。由此,  $a$  点也被称为膝点(在该点时, 材料的导磁率最大)。根据所选永磁材料的磁能积点和导磁体的膝点, 导磁体的面积  $S_e$  可表示为

$$S_e = \frac{B_{mr} S_{mr}}{B_e} \quad (5)$$

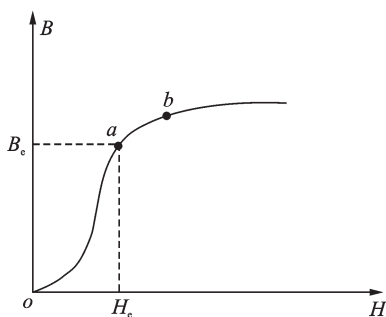


图3 铁磁性物质磁化曲线

Fig.3 Ferromagnetic magnetization curve

式中  $B_e$  为  $a$  点对应的磁感应强度。

## 1.2 卸物状态下残余磁场强度的分析

判断起重永磁铁的磁路设计是否合格的指标有两个: 一是磁吸力, 二是卸物状态下工作磁极面的残余磁场强度要足够小(通常残余磁场强度不高于 60 Oe)。因此, 在完成磁路的尺寸计算后, 仍需分析确定其残余磁场强度的大小。

设固定磁系的两块磁铁分别为磁铁 A 和 B, 旋转磁系的磁铁为 C。根据公式  $\varphi/\varphi_g = P/P_g$  可知, 磁铁 A、B、C 在工作磁极面所产生的磁通量为  $\varphi_{Ag}$ 、 $\varphi_{Bg}$ 、 $\varphi_{Cg}$ 。已知磁体 A、B 的工作磁极面积为  $S_{Ag}$ 、 $S_{Bg}$ , 则磁体 A、B 在工作磁极面的强度  $H_{Ag}$ 、 $H_{Bg}$  为

$$H_{Ag} = \frac{\varphi_{Ag}}{S_{Ag}} = H_{Bg} = \frac{\varphi_{Bg}}{S_{Bg}} \quad (6)$$

已知磁体 C 的工作磁极面积  $S_{Cg}$ , 则磁体 C 在工作磁极面的磁场强度  $H_{Cg}$  为

$$H_{Cg} = \frac{\varphi_{Cg}}{S_{Cg}} \quad (7)$$

当起重永磁铁位于卸物状态时, 工作磁极面的残余磁场强度  $H_{gy}$  为

$$H_{gy} = H_{Cg} - 2H_{Ag} = H_{Cg} - 2H_{Bg} \quad (8)$$

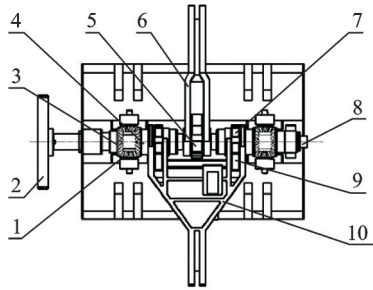
## 2 抗斜驱动机构的设计

作为起重永磁铁的重要组成部分, 驱动机构的设计是起重永磁铁正常工作的重要保证, 其必须具备能够在复杂工况下正常工作的能力。

在单转臂起重永磁铁的实际使用过程中, 当工件有较大倾角时, 起重永磁铁出现无法吸附工件的情况。通过分析, 笔者认为其主要原因在于, 当转臂位于倾斜方向的上方时, 由于倾斜角的存在, 使转臂获得了提前的转动量, 从而达不到原有的设计旋转角度; 同样, 由转臂驱动的旋转磁系也达不到预定的旋转角度, 这就会导致工作磁极面的磁吸力不足, 而无法完成吸附。这时, 需要将整个起重永磁铁旋转  $180^\circ$ , 使转臂位于倾斜方向的下方才可使其正常工作, 但该措施大大地降低了工作效率。

针对这一问题, 笔者设计出抗斜驱动机构, 该机构拥有两组棘轮转臂机构, 并通过锥齿换向机构将两组棘轮转臂机构连接, 使其既可同时动作, 又可单独动作<sup>[12-14]</sup>。驱动机构如图4所示。

在该驱动机构中, 长轴套锥齿轮、短轴套锥齿轮和换向锥齿轮组成一组锥齿轮换向机构; 大棘轮通过键与长轴套锥齿轮固定连接, 小棘轮通过键与轴固定连接, 短轴套锥齿轮通过键与轴固定连接,



1—换向锥齿轮, 2—大圆柱齿轮, 3—短轴套锥齿轮,  
4—长轴套锥齿轮, 5—小棘轮, 6—小转臂,  
7—大棘轮, 8—轴, 9—棘爪, 10—大转臂

图 4 驱动机构示意图

Fig.4 Driving mechanism

与棘轮配合的棘爪分别安装在大、小转臂内;小转臂空套在轴上,大转臂空套在长轴套锥齿轮上;轴的一端安装有大圆柱齿轮,分别与两个小圆柱齿轮啮合,小圆柱齿轮则通过键与旋转磁系的磁极半轴固定连接。

以工件向右倾斜为例,如图 5 所示,当起重永磁铁放置在工件上时,起重永磁铁的大、小吊链均处于放松状态。起吊时,随着吊钩的抬起,右侧的小吊链率先被拉紧,与之相连的大转臂随之抬起,左侧小吊链与小转臂仍处于松弛的状态。此时,位于大转臂内的棘爪推动大棘轮旋转,与之同轴的长轴套锥齿轮同步旋转,并带动换向锥齿轮和短轴套锥齿轮旋转,与短轴套锥齿轮同轴的大圆柱齿轮旋转 60°,与大圆柱齿轮啮合的两个小圆柱齿轮则带动旋转磁系旋转 180°实现吸物。当工件到达指定工位、起重永磁铁需卸物时,将吊钩下放到最低点,使大、小吊链放松,在重力的作用下,大、小转臂降至最低点,棘爪在棘轮表面滑动至下一个齿,当吊钩再次抬起时,重复上述动作,即可实现卸物。

在抗斜驱动机构的带动下,无论工件水平放置,抑或向左、右、前、后倾斜,起重永磁铁至少有一组棘轮转臂机构可正常工作,解决了单转臂起重永

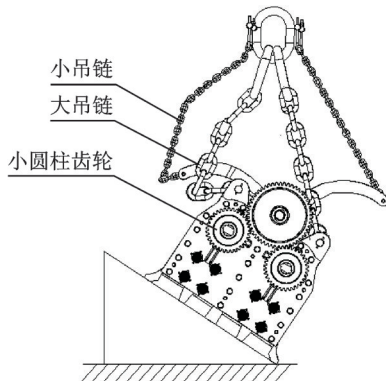


图 5 倾斜状态下起重永磁铁工作示意图

Fig.5 Lifting permanent magnet working at inclined state

磁铁无法在倾斜状态下吊装的问题。

### 3 实 验

为验证设计方案的可行性,笔者设计并制造了实验样机进行实验。样机长度为 0.9 m,宽度 0.8 m,被吸物与工件之间的间隙为 0.002 m。卸物状态下,工作磁极面的残余磁场强度最大值为 43.3 Oe。实验条件为一块质量为 6 t、放置倾角为 20°的钢板,经测试,在该实验条件下,起重永磁铁能够很好地完成吊装工作。整个吸、卸物过程如图 6—8 所示。



图 6 倾斜状态下吊装

Fig.6 Lifting at inclined state



图 7 吊装工件完成

Fig.7 Completion of lifting workpiece



图 8 倾斜状态下卸载

Fig.8 Unloading at inclined state

## 4 结 论

经样机的实验验证,所设计的抗斜式起重永磁铁解决了传统起重电磁铁耗电量大的问题,并克服了单转臂起重永磁铁倾斜状态下难以正常工作的问题,进一步拓宽了起重永磁铁的适用范围,并为起重永磁铁的下一步发展奠定了良好的基础。

### 参考文献:

- [1] 齐凤春. 永磁起重技术的发展概况[J]. 磁性材料及器件, 1999(4): 3-5.  
QI Fengchun. Advance in lifting technique of permanent magnet[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 1999(4): 3-5.
- [2] JOSEF M, JAN H. Magnetic load-shifting device: UK8531752-A[P].1987-06-24.
- [3] 丁立功, 杨树清. 平移式稀土永磁起重永磁铁: CN89209146.0[P].1990-06-27.
- [4] 汪敏宪, 丁宁, 高长城, 等. 实现转动式起重永磁铁自动吸卸吸物的装置: CN92240596.4[P].1994-04-27
- [5] 高长城, 丁宁, 汪敏宪, 等. 实现转动式起重永磁铁自动吸卸吸物的装置: CN92245257.1[P]. 1994-04-27.
- [6] 丁宁. 可用于吊运废旧钢铁的起重永磁铁: CN02126633.6[P]. 2004-01-28.
- [7] DING Ning, ZHANG Dingtong, SONG Yumei. Driving system design of lifting permanent magnet[J]. Advanced Materials Research, 2013, 765/766/767: 125-128.
- [8] DING Ning, ZHANG Dingtong, WANG Zuozhen. ANN based rare earth lifting permanent magnetic chuck design[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 670/671: 950-954.
- [9] 吕汝德. 齿轮式自动永磁吸盘: CN200920154053.3 [P]. 2010-02-17.
- [10] 杨国锋, 陈铁光. 一种既可用于起重永磁铁又可用于永磁除铁器的磁力设备: CN201320718334.3 [P]. 2014-05-21.
- [11] 林其壬, 赵佑民. 磁路设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.  
LIN Qiren, ZHAO Youmin. Principle of magnetic circuit design [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987.
- [12] 丁宁. 双臂驱动式起重永磁铁: CN201710378493.6 [P]. 2017-05-25.
- [13] DING Ning, LIU Chao, DUAN Jingsong, et al. Design of double-drive mechanism for energy saving lifting permanent magnet[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Energy and Environment Research. Shanghai, China: E3S Web of Conferences, 2019.
- [14] 李发家, 朱如鹏, 鲍和云, 等. 行星齿轮系动力学特性分析及试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(4): 511-519.  
LI Fajia, ZHU Rupeng, BAO Heyun, et al. Dynamics characteristics and experiment research on planetary gear system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(4): 511-519.

(编辑: 胥橙庭)