

文章编号: 1001- 2486(2010) 03- 0133- 06

# 一种管道机器人电磁离合器的设计\*

乔晋崴, 尚建忠, 陈 循, 罗自荣

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 针对管道检测作业安全性问题, 研制了一种确保管道机器人可安全退出管道的电磁离合器。该离合器直径  $\Phi 42\text{mm}$ , 长  $220\text{mm}$ , 动作行程  $10\text{mm}$ , 结构紧凑, 可传递较大转矩。详细介绍了电磁离合器机构及其工作原理, 分析计算了磁路与线圈发热量, 应用拉格朗日- 麦克斯韦方程推导出了该机构吸引力关于气隙长度的关系式, 并通过有限元仿真软件对理论计算结果进行验证, 对挡铁长度进行优化, 最终依据理论结果研制了试验样机。

**关键词:** 电磁离合器; 管道机器人; 安全性

中图分类号: TH6; TP24 文献标识码: A

## Development of an Electromagnetic Clutch for In-pipe Robots

QIAO Jin-wei, SHANG Jian-zhong, CHEN Xun, LUO Zi-rong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to improve the security in pipes inspection for in-pipe robots, the current study developed an electromagnetic clutch, which was aimed to insure the in-pipe robots quitting from pipes where they worked in any conditions. The specific size that is  $42\text{mm}$  in diameter and  $220\text{mm}$  in length was designed for using in pipes. With this contact structure, it still can transfer a relative large torque and hold a  $10\text{mm}$  effective distance. After the structure and work principle of the electromagnetic clutch were introduced, the magnetic circuit was analyzed, and then the heat of coils was calculated. The relationship between the attraction and the air distance was worked out based on the Lagrange-Maxwell Equations. To testify the correctness of the theory results obtained above, some simulations were made. The data from the simulation also optimized the length of the stopper. Base on the theory result, a prototype was designed and some related experiments were made.

**Key words:** electromagnetic clutch; in-pipe robot; security

管道机器人已广泛应用于生物医学、航空航天、国防、化工业等领域内各种形式管道的检测或维修, 其作业时需具备良好的安全性, 在包括断电在内的任何情况下不得损坏或堵塞管道, 否则将酿成严重事故, 因此急需设计一种针对管道机器人的安全装置。在无流体存在的管道中, 管道机器人为实现运动需与管壁间形成一定形式的正压力来实现力回路的封闭。管道机器人与管壁的接触方式有主动式和自适应式两种, 前者包括轮式<sup>[1]</sup>、气囊式<sup>[2]</sup>、自锁式<sup>[3]</sup>等, 后者则主要有弹性腿式<sup>[4]</sup>、形状记忆合金式<sup>[5]</sup>等。设计安全装置的目的就在于当有紧急状况发生时切断传动回路, 去除这种正压力。使用电磁离合器可实现传动回路联接与断开的主动控制。由于受管道内径与拐弯曲率半径等空间因素的限制, 离合器尺寸必须满足一定的约束关系<sup>[6]</sup>, 同时较长的工作行程也是实现安全可靠性的有效保证, 而现有离合器的工作行程均小于  $1.5\text{mm}$ , 很难满足管道机器人的特殊需求。

目前国内外针对管道机器人的研究工作主要集中于驱动技术领域, 而对其安全性的探讨则较为少见。本文针对主动式接触管道机器人设计了一种直径  $\Phi 42\text{mm}$ , 动作行程  $10\text{mm}$  的吸合式电磁离合器, 采用启动爪与销的啮合实现力与运动传递, 具有工作稳定、行程范围大、吸力特性平缓等特点。

\* 收稿日期: 2009- 11- 05

基金项目: 国家 863 高技术资助项目(2007AA04Z256)

作者简介: 乔晋崴(1983-), 男, 博士生。

## 1 结构与功能需求分析

电磁离合器基本原理为:线圈通电时将衔铁吸引一定的距离后将电机的单向转动传递到输出机构启动爪上,保证管道机器人与管壁间的正压力;保持线圈通电,电机反向旋转时主动将正压力解除;线圈断电后在复位弹簧的作用下衔铁退回原位,电磁离合器断开联接,正压力被动解除。

### 1.1 结构原理

图1(a)所示为电磁离合器结构原理图,花键轴右侧直接与电机减速器输出轴联接,启动爪左侧与负载相连,防护套与启动爪固联,挡铁与外壳及套筒固联,花键轴与滑动块组成滚珠花键副。线圈通电,在电磁力的作用下衔铁沿花键轴移动并通过推动筒压缩缓冲弹簧使滑动块滑动,最终实现销与启动爪的啮合;断电后则由复位弹簧将滑动块、推动筒以及衔铁推回原位,实现销与启动爪的分离。图1(b)所示为启动爪端部放大图,包括对称的两组凹槽(DE段)和斜面(AC段)。

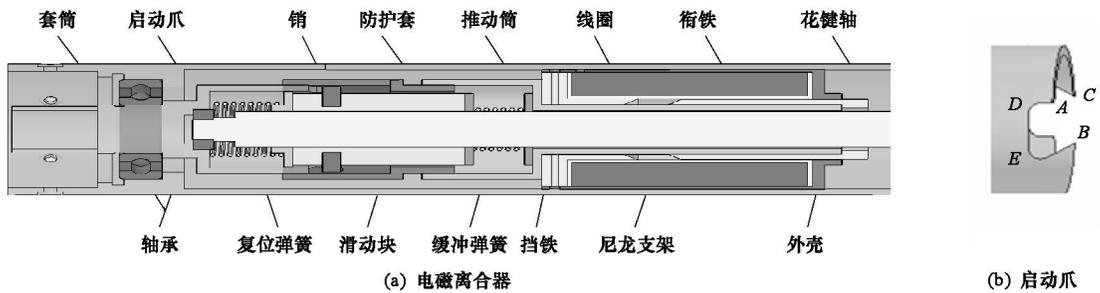


图1 电磁离合器结构

Fig. 1 Structure of electromagnetic clutch

### 1.2 功能分析

假定图1(b)中由A向C的旋转方向为正方向。图1(a)所示为线圈断电状态,滑动块上两销沿轴向位于图1(b)所示点A与点B之间,此时离合器可能出现三种工作状态:(1)电机带动花键轴正向旋转,滑动块带动销沿启动爪两斜面滑动,滑至B点或C点后与启动爪短时脱离接触,但沿轴向始终处于A、B两点之间,其余零部件保持静止;(2)电机反向旋转带动销沿斜面由C向A运动,短暂脱离后与启动爪在BE段接触并最终运动至E点,带动启动爪反转,实现管道机器人与管壁之间正压力的主动解除;(3)有故障发生导致电机停转,在负载作用下,启动爪反转,销保持静止的同时沿斜面由A向C相对滑动,正压力被动解除。

线圈通电,销沿轴向运动至图1(b)所示DE段或压紧于AC斜面上,当花键轴开始旋转时销最终将位于D点或E点,带动启动爪转动,同样会出现如下三种工作状态:(4)如销位于D点,则可实现力离合器力与运动的正向传递,实现正压力的保持;(5)如销位于E点,电机则可带动启动爪反向旋转,与前述状态2相同;(6)电机断电,则切断线圈电源,与状态(3)相同。

综上所述,该离合器可以实现正压力的保持、被动与主动解除,满足管道机器人功能需求。表1为其各项功能状态列表。

表1 电磁离合器功能表

Tab. 1 Electromagnetic clutch function table

电机	线圈	销最终接触位置	启动爪	正压力
正转	通电	D点	正转	保持
	断电	A、B点之间	静止或反转	被动解除
反转	通电	E点	反转	主动解除
停转	断电	A、B点之间	静止或反转	被动解除

### 1.3 设计目标

由上述分析可知,电磁离合器功能的实现较大程度地依赖于电磁铁,根据结构需求,电磁铁采用如图1、图2所示的直流螺管形式,图2中所标注尺寸为电磁铁需满足的位形约束,电磁铁初始气隙长度为10mm。符合负载特性需求电磁力要始终大于复位弹簧作用力,同时保持线圈发热量在允许范围内。

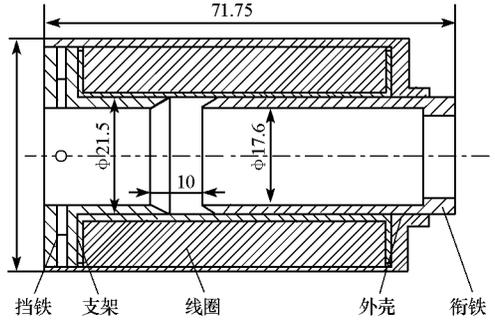


图2 电磁铁尺寸约束图  
Fig. 2 Size constraint of electromagnetic clutch

## 2 磁路与发热量分析计算

### 2.1 磁路分析

如图3所示曲线分别表示衔铁端部为平面状和圆锥状的螺管式电磁铁吸力特性,锥形衔铁头使大行程情况下的电磁吸力提高了很多,其吸力特性比衔铁端面为平面状的要平坦一些<sup>[7]</sup>。本设计要求电磁铁吸引力随着气隙的减小随弹簧弹力呈线性增长,并使弹簧始终保持有一定压紧力,而且对初始吸引力的要求最高,因此选用圆锥状衔铁更为恰当。

图1(a)中所示结构整个磁路包括挡铁、外壳、非工作气隙、衔铁和工作气隙五部分,各部分如图4所

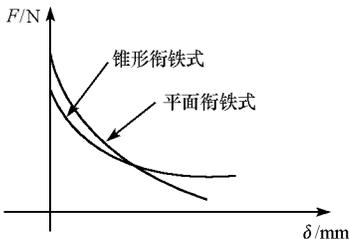


图3 直流螺管式电磁铁吸力特性  
Fig. 3 Attraction characteristic of direct current solenoid

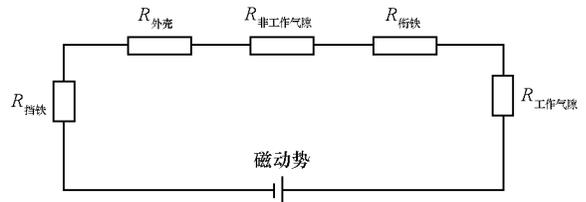


图4 磁路分析图  
Fig. 4 Magnetic circuit analysis

示为串联关系。其中铁质材料磁阻  $R = \frac{l}{\mu_0 \mu_r s}$ , 气隙磁阻  $R = \frac{\delta}{\mu_0 s}$ , 前式中  $R, l, s$  分别表示电阻、漆包线长度与截面积,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/(A}\cdot\text{m)}$ ,  $\mu_r$  为相对磁导率, 导磁部分采用DT4A型电工纯铁,  $\mu_r = 7000$ , 分别计算各部分磁阻结果如表2所示。

表2 磁路各部分磁阻

Tab. 2 Magnetic reluctance of each segment

	挡铁	外壳	非工作气隙	衔铁	工作气隙
磁阻(A/Wb)	$1.05 \times 10^5$	$0.6 \times 10^5$	$2.39 \times 10^3$	$3.1 \times 10^4$	$4.69 \times 10^7$

由表2可看出:整个磁路的磁阻主要集中在工作气隙处,其余部分所构成磁路的磁阻占整个磁路非常小的一部分。从结构上考虑,外壳的设置起到了封闭磁路的作用。可见该结构漏磁较少,电磁力集中于工作气隙处,具有良好的磁路特性。

## 2.2 线圈发热计算

根据牛顿散热公式,处于长期工作制时线圈的稳定温升为

$$t_r = \frac{I^2 R}{K(S_1 + aS_2)} \quad (1)$$

式中  $K$  为外表面散热系数,取初始值为  $12\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $S_1$  为线圈外表面积,  $S_1 = 0.0065\text{m}^2$ ;  $S_2$  为线圈内表面积,  $S_2 = 0.0041\text{m}^2$ ;  $a$  为内外表面散热条件差异系数,针对本设计中将线圈先缠绕在尼龙骨架上再套到铁芯上的情况取  $a = 1.7$ ;按照线圈直径计算方法<sup>[7]</sup>选用直径  $\Phi 0.71\text{mm}$  的 QY-1 型漆包线,耐温指数为  $220^\circ\text{C}$ ,  $120^\circ\text{C}$  时电阻率  $\rho$  为  $2.46 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$ 。由窗口面积可计算得线圈匝数  $N = 763$ ,漆包线总长  $L = 74.4\text{m}$ ,则电阻  $R = \rho L/S = 4.62 \Omega$ ,代入式(1)得

$$t_r = 28.6I^2 (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

## 3 电磁力计算

拉格朗日-麦克斯韦方程用统一的观点描述机电耦合系统,可以获得统一的机电耦合系统动力学方程<sup>[8]</sup>。应用该方程时需首先确定系统的广义坐标,该系统有三个广义坐标,如图5所示,机械部分选复位弹簧与缓冲弹簧的变形量  $x_1, x_2$ ,原点为弹簧原长位置,电部分选电系统的电荷量  $q$ ,另外图5中  $k_1, k_2$  为两弹簧弹性系数,  $m_1, m_2$  则分别为滑动块与推动筒的质量。

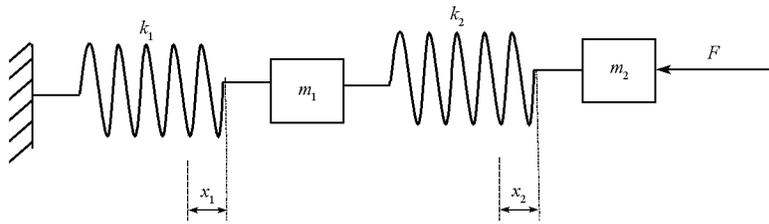


图5 电磁离合器数学模型

Fig. 5 Math model of electromagnetic clutch

经计算推导得系统拉格朗日函数

$$L = T - V + W_m = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 - \frac{1}{2} k_1 x_1^2 - \frac{1}{2} k_2 x_2^2 + \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N^2 I^2}{\delta - x_1 - x_2} S \quad (3)$$

系统耗散函数

$$F = \frac{1}{2} b_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} b_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} RI^2 \quad (4)$$

代入拉格朗日-麦克斯韦方程:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_k} + \frac{\partial F}{\partial \dot{x}_k} = U_k \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}} = Q_j \end{cases} \quad (5)$$

按式(5)计算式(3)、式(4)的各偏分项,代入得系统的状态描述方程为

$$\begin{cases} \frac{\mu_0 N^2 S}{\delta - x_1 - x_2} I^2 - \frac{\mu_0 N^2 I S}{\delta^2} \delta + RI = U \\ m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 \dot{x}_2 + k_1 x_1 + k_2 x_2 - \frac{\mu_0 N^2 I^2}{2(\delta - x_1 - x_2)^2} S = 0 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可看出系统有质动力即电磁牵引力  $F = \frac{\mu_0 N^2 I^2}{2(\delta - x_1 - x_2)^2} S$ , 初始吸引力  $F_0 = \frac{\mu_0 N^2 I^2}{2\delta^2} S$ , 将相应参数代入得  $F_0 = 0.38I^2$ 。

由前述机构原理分析可得电磁铁工作需满足的条件为: 初始力  $F_0$  大于花键与滑动块之间的摩擦

力 $f$ , 啮合过程中吸引力  $F$  大于复位弹簧作用力, 即

$$\begin{cases} F_0 = 0.38I^2 > f \\ F = \frac{\mu_0 N^2 I^2}{2(\delta - x_1 - x_2)^2} S > k_1 x_1 + f \end{cases} \quad (7)$$

### 4 仿真分析与样机研制

#### 4.1 有限元仿真分析

在离合器的设计过程中, 理论计算无法考虑由结构等因素导致的磁力线发散对吸力特性带来的影响, 需利用有限元软件进行分析与仿真<sup>[9]</sup>。

为确保结果的正确性, 在进行二维静态场分析的基础上, 采用三维静态磁场标量法对三维模型进行了仿真计算。二维分析时采用平面单元 PLANE13; 三维建模仿真时线圈建模采用哑元单元 SOURC36, 其余部件采用 SOLID96 实体单元进行网格划分; 空气与尼龙骨架的磁导率为 1, 电工纯铁 DT4 则直接由其 B-H 曲线确定。图 6 为二维仿真磁力线分布图, 图 7 为三维仿真的节点磁流密度等值云图, 图 8 为电磁铁气隙长度为 10mm 时随着磁动势  $NI$  的增长, 二维与三维仿真计算的吸引力值。

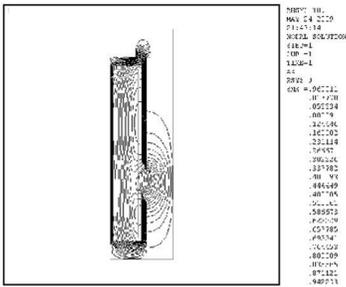


图 6 磁力线分布  
Fig. 6 Magnetic force lines

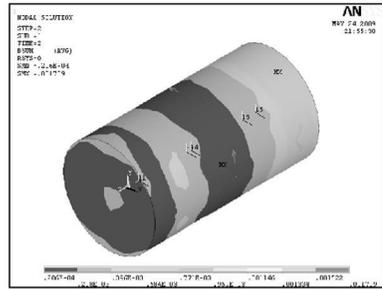


图 7 节点磁流密度等值云图  
Fig. 7 Magnet flux density

当线圈高和气隙等均为一定值时, 增大挡铁长度会使衔铁深入线圈内腔部分的长度变小, 导致此电磁铁的吸力特性变得陡峭, 不利于提高额定长行程下的电磁吸力; 过小的挡铁长度则会使电磁铁吸力值整体下降。为了得到合适的挡铁长度值, 需针对该机构应用仿真软件计算出挡铁长度与吸引力的关系。

保持磁动势  $NI = 3000A$ , 气隙为 10mm 恒定, 不断改变挡铁占线圈绕组长度的比例, 并在每种情况下分别进行二维与三维仿真计算, 取其结果平均值绘出图 9 所示吸引力与挡铁长度的关系图。

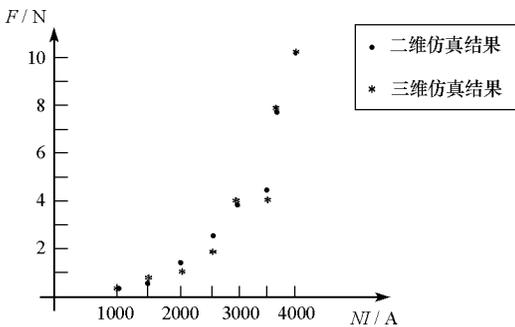


图 8 磁动势与吸引力关系图  
Fig. 8 Relationship between magneto-motive potential and traction

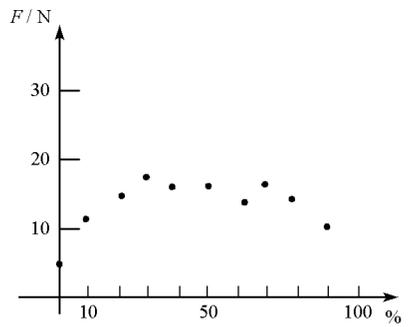


图 9 挡铁长度与吸引力关系图  
Fig. 9 Relationship between stopper length and traction

由图 9 可知, 当挡铁长度占电磁铁总长度 30% 时, 吸引力最大, 因此挡铁深入线圈的长度应取为  $55 \times 30\% = 16.5\text{mm}$ 。

## 4.2 样机研制

鉴于上述理论与仿真分析结果,设计并研制了试验样机,如图10所示为其部分零件。试验分两步进行,第一步先对电磁铁吸力特性进行试验,第二步进行电磁离合器的整体试验。



图10 电磁铁零件实物图

Fig. 10 Photo of electromagnetic clutch parts

进行电磁铁试验时,控制电源采用恒流源,初始间隙为10mm,当电流调整至1.4A时测得吸引力增至1N,将电流值代入式(7)可得理论吸引力为0.7448N,而此时仿真结果为1.041N,仿真值与试验值大于理论值的原因在于理论计算方法是针对平端面的,无法考虑锥形端面的影响,该结果表明采用锥形端面可以较大幅度地提高其电磁吸引力。根据式(2)可得此时线圈温升为56℃,即使在环境恶劣的120℃油田管道中依然符合漆包线使用要求。

整机试验时在花键轴处连接直流电机,按照表1所示功能对电磁离合器进行逐项验证。当电流调整至1.2A时电磁铁克服摩擦力 $f$ 开始运动,并成功实现销与启动爪的完全啮合,正反转运动传动平稳;线圈断电的瞬间,复位弹簧推动销沿轴向移动,直至与启动爪脱离啮合。经试验验证,样机满足最初设计需求。

## 5 结论

(1) 提出一种可作为管道机器人安全装置的电磁离合器,确保管道机器人在任何情况下均可安全退出管道。

(2) 针对电磁离合器的特定结构进行了磁路分析优化与电磁线圈发热计算,并应用拉格朗日-麦克斯韦方程对电磁吸引力进行了理论计算。

(3) 采用仿真软件对理论计算结果进行了验证,并通过一系列试验数据确定了最优挡铁长度。

(4) 依据理论与仿真分析结果研制了试验样机,试验结果满足最初设计需求。

## 参考文献:

- [1] Ron S, Choi H R. Differential-drive In-pipe Robot for Moving Inside Urban Gas Pipelines [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(1): 1-17.
- [2] Lim J, Park H, An J, et al. One-Pneumatic Line Based Inchworm-like Micro Robot for Half-inch Pipe Inspection [J]. Mechatronics, 2008, 18(7): 315-322.
- [3] 尚建忠, 罗自荣, 乔晋斌, 等. 凸轮式管道机器人运动机构[P]. 中国, 200810143903X. 2008-12-10.
- [4] Guo T, Ke Y L, Li J X. Inchworm-like In-pipe Micro-robot Actuated by Piezoelectric Slotted Cymbal [J]. High Technology Letters, 2005, 15(11): 35-38.
- [5] 付宜利, 李显凌, 梁兆光. 基于形状记忆合金的自主导导向机器人设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 76-82.
- [6] 郭瑜. 微小型螺旋推进管道机器人设计与分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [7] 满军, 丁凡, 李其鹏, 等. 圆锥和平面形磁极高速电磁铁动态特性对比[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 213-217.
- [8] 陈贵荣, 常文森. 磁悬浮列车悬浮电磁铁设计研究[J]. 国防科技大学学报, 1993, 15(4): 10-15.
- [9] 刘艳明, 徐宏, 毛宏奎. 直流电磁泵电磁铁磁场 ANSYS 数值模拟[J]. 铸造技术, 2008, 29(11): 1525-1529.