

圆筒型永磁直线电机的磁场解析研究

付开源

(武汉地铁桥隧管理有限公司,湖北 武汉 430000)

摘要 圆筒型永磁直线电机具有体积小、结构简单、动态性能好等优点,且由于圆柱形的整体外型结构,其运行速度较快且行程相对较长,非常适合钻进系统。现从圆筒型永磁直线电机技术指标入手,运用磁场解析法来求解复杂区域的电磁场分布问题,根据磁场分析和数学推导,完成重要电磁参数及磁场分布的计算,构建出电机的磁场解析计算模型,并用有限元法仿真验证该解析模型的正确性。

关键词 圆筒型永磁直线电机;磁场解析;有限元

DOI:10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2021.17.009

0 引言

电磁场分析是电机理论研究工作的重要前提,电机性能分析及优化设计的准确性取决于能否获得正确的磁场分布。直线电机由于其结构具有一定的特殊性,不再完全适用一般用于分析旋转电机的相关理论,因此针对直线电机建立相匹配的分析理论和研究方法是十分必要的^[1]。圆筒型永磁直线电机的磁场存在强耦合非线性,且电机的系统结构具有多样性,目前尚无完善的系统理论和有效的研究方法来解决该类型电机磁场解析模型的建模问题。本文将针对磁场解析模型的建立过程开展研究,用数学理论推导出电磁场重要参数及磁场分布的计算公式,并通过有限元法进行验证。

1 磁场解析模型

根据设计要求和设计规范,本文采用12槽8极结构的圆筒型永磁直线电机结构模型,初级铁芯和次级铁芯采用冷轧硅钢片,如图1所示。综合参数设计,圆筒型永磁直线电机电磁设计的主要尺寸参数和绕组及槽形参数如表1所示。

1.1 磁场分布计算

由于圆筒型永磁直线电机独有的特性,传统的电磁场理论在这类电机中的应用受到一定限制,要获得电机内电磁场的解析解非常困难。为了简化磁场解析法的分析过程,对电机的实际模型做出以下假设:

- (1)初级绕组中的电流向一个方向流动;
- (2)电机所有组成部分的电导率设为0,铁芯损耗忽略

表1 电机主要尺寸、绕组及槽型参数

主要尺寸参数	值	绕组及槽型参数	值
定子永磁体内半径 R_1 /mm	16	绕组每相串联匝数 N	269
定子永磁体外半径 R_2 /mm	20	每槽导体数 N_s	200
动子线圈内半径 R_3 /mm	21	并联支路对数 a_1	1
动子线圈外半径 R_4 /mm	35	槽满率 S_f %	76.9
气隙长度 δ /mm	1	每级每相槽数 q_1	1
极距 τ /mm	23	槽口宽 b_0 /mm	3
定子总长度 L_s /cm	400	槽宽 b_f /mm	11
动子总长度 L_m /cm	180	齿宽 b_f /mm	4
总外径 D /mm	84	齿距高 h_0 /mm	3
总质量 m /kg	8	齿高 h_f /mm	17
额定推力 F /N	420	槽深 h_z /mm	12

不计;

- (3)初级绕组中无感应涡流;
- (4)次级只有 z 方向的运动速度;
- (5)永磁体的物理常数是均质的,且未达到饱和。

在实际电机运行过程中,圆筒型永磁直线电机的磁场分布是时刻变化的,其气隙磁场是一个具有大小和方向的变化矢量。通常为了分析的简单方便,而将其按照电机结构划分为径向分量和轴向分量,其中径向分量的气隙磁密是电机推力的主要来源,因此主要讨论径向磁密的分布和计算^[2]。在磁场解析计算中,将电机的内铁芯表面($r=R_3$)的磁位分布近似处理为呈梯形形状的磁位,一个极距的磁位 $\varphi(z)$ 的分布如图2所示。

根据磁位分布图,可以得到动子在 z 轴的不同运动位

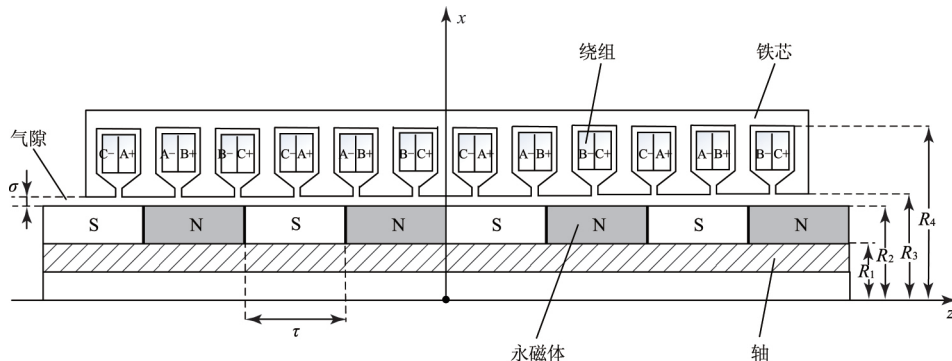


图1 圆筒型永磁直线电机结构模型图

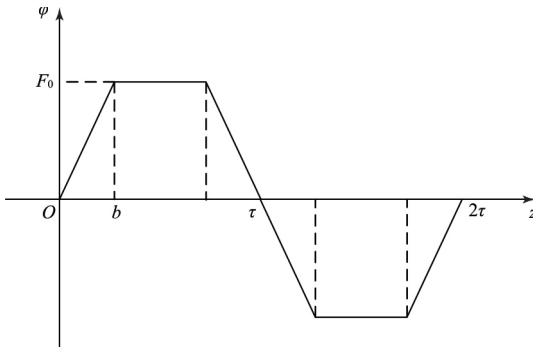


图2 内铁芯表面的磁位分布

置时磁动势的函数表达式,即 $\varphi(z)$ 可以表示为:

$$\varphi(z) = \begin{cases} -\frac{\varphi_0}{b}z, & 0 \leq z \leq b, \\ \varphi_0, & b \leq z \leq \tau-b, \\ -\frac{\varphi_0}{b}(\tau-z), & \tau-b \leq z \leq \tau \end{cases}$$

式中 φ_0 为磁动势的最大值,即 $\varphi_0=2|H_{\text{pm}}|b$ 。

为了方便分析和求解,通过傅里叶变换将此函数的表达式转换为傅里叶级数。考虑到磁动势函数关于原点对称而属于奇函数,所以该函数的傅里叶级数分解系数只含有正弦分量,可以表示为:

$$\varphi_0 = \sum_{n=1}^{\infty} b_k \sin k\omega t$$

其中,傅里叶正弦分量的系数 b_k 可以表示为:

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t$$

将 $\omega = \frac{\pi}{\tau} k \times \omega = m(2n-1) \frac{\pi}{\omega}$ 这两个参数代入到上式

中,可以得到 b_k 的表达式为:

$$b_k = |H_{\text{pm}}| \times \frac{4}{m^2\tau} [\sin mb - \sin m\tau + \sin m(\tau-b)]$$

由于磁场的气隙中不存在电流,所以有 $\text{divgrad } \varphi = \nabla^2 \varphi = 0$,气隙磁场中的标量磁位满足Laplace方程:

$$\frac{\partial^2 \varphi(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi(r, z)}{\partial z^2} = 0$$

该微分方程的定解边界条件为:

$$r=R_2, R(r)=\varphi_2;$$

$$r=R_4, R(r)=0$$

采用分离变量法对磁位进行求解,所得结果为:

$$\varphi(r, z) = \frac{\varphi_m}{\Delta_1} \Delta_2(r) \sin(mz)$$

式中 Δ_1 与 Δ_2 可以表示为 $\Delta_1 = I_0(mR_4)K_0(mR_2) - I_0(mR_2)K_0(mR_4)$, $\Delta_2 = I_0(mR_4)K_0(mr) - I_0(mr)K_0(mR_4)$,其中 I_0 和 K_0 为第一类零阶变形贝塞尔函数。

1.2 气隙磁场计算

在径向充磁的直线电机中,径向磁密 B_r 可以表示为:

$$B_r(r, z) = -\mu_0 \frac{d\varphi(r, z)}{dr}$$

将求得的磁位分布解析式代入到上式中,得到其谐波幅值为:

$$B_{\text{rm}}(r) = \sum \frac{\mu_0 H_{\text{pm}} F_m \Delta_2}{\Delta_1}$$

再将各次谐波依次叠加后,计算求得气隙磁场中的径向磁密分布,用公式表示为:

$$B_r(r, z) = \sum \sin(mz) B_{\text{rm}}(r)$$

在这里需要说明的是,由于上式收敛很快, m 从1取到10即可。

1.3 推力计算

圆筒型永磁直线电机的推力由行波磁场与永磁体磁场之间相互作用而产生,其计算表达式为:

$$dF(r, z) = 2\pi B_r(r, z) J_m dr dz$$

对上式的微分进行积分,便可以得到推力的表达式:

$$F(x) = 2\pi p J \int_{z_1(x)}^{z_1(x)+c} \int_{R_1}^{R_4} r B_r(r, z) dr dz$$

式中 $z_1(x)$ 为轴向运动的距离,其取值为 $z_1(x) = \frac{\tau-c}{2} - x$; J 为线圈的平均电流密度。

2 有限元建模和验证

由于圆筒型永磁直线电机选用的材料多为非线性,同时电机结构各组成部分的几何形状大小不一,难以通过简单的公式获得电机性能参数,为了验证所设计电机参数的合理性,需要建立较为精确的模型加以校验。有限元法(Finite Element Method)将电机建模过程中的各项因素考虑在内,能够比较准确地反映电机的静态特性和动态特性,目前在工程实践中被广泛应用^[3]。

2.1 电机有限元模型

按照表1中电机结构尺寸完成电机各部分几何模型的绘制,在有限元软件Ansoft Maxwell中建立电机的二维有限元模型,如图3所示^[4]。

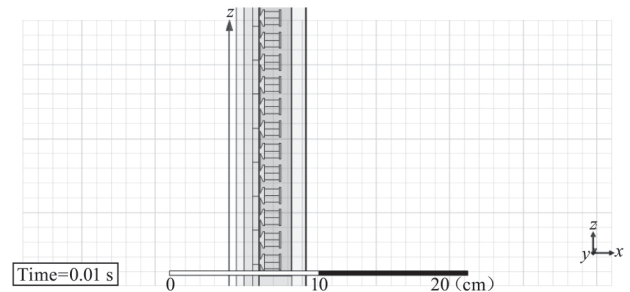


图3 电机二维模型图

在有限元后处理功能中选择对电机运行过程中的磁场变化进行分析,可以得到该电机模型的气隙磁密分布和推力曲线。

2.2 电机解析模型和有限元模型对比

将气隙磁场的解析公式 B_r 在Matlab软件环境下编程,并代入电机的电磁设计参数,即可得到在不同次级轴向

(z)位置时,磁通密度的径向分量 B_r 沿轴向位置运动的解析值,如图4所示。利用有限元模型求得的气隙磁密分布图如图5所示。

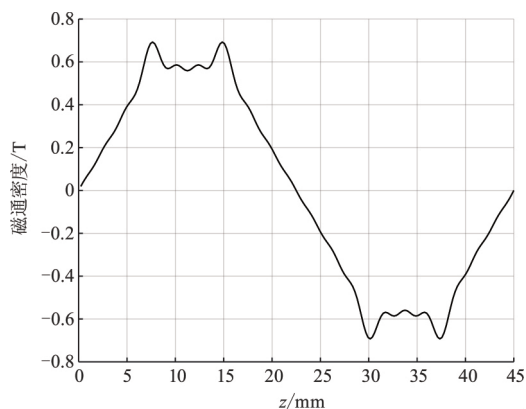


图4 磁通密度的径向分量 B_r 曲线(解析模型)

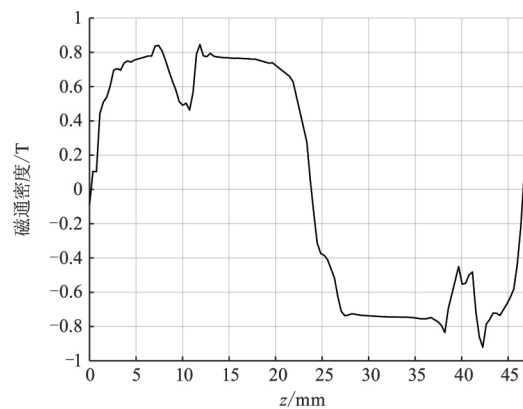


图5 气隙磁密分布图(有限元模型)

由磁场解析法得到的磁通密度变化曲线反映了电机的磁场分布,可以看出磁密峰值近似是一个正弦波的曲线,同时,从整体来看电机的磁密分布良好,并且平均磁密值在0.6 T左右,与平均磁密值基本吻合。通过对比发现,所建立的气隙磁场解析模型较好地体现了径向磁密随着位移的变化过程和取值范围,与有限元模型得到的气隙磁密分布图基本一致,说明了所研究磁场解析计算方法中磁通密度计算的可靠性。

同理,在Matlab程序中也完成了对推力 F 的解析方程的编程,得到的推力曲线如图6所示。有限元模型求解得到的推力曲线如图7所示。

推力曲线图可以表明,采用磁场解析法得到的电机推力曲线也能够较好地体现推力取值和变化范围及变化趋势,说明磁场解析法用于构建电机解析模型是较为准确的。当然磁场解析法也存在一定的误差,主要原因是分析中做出了大量的假定,忽略了部分因素的影响^[5]。

3 结语

本文提出采用磁场解析法来求解电机复杂区域中的电磁场分布问题,在简化圆筒型永磁直线电机实际模型的

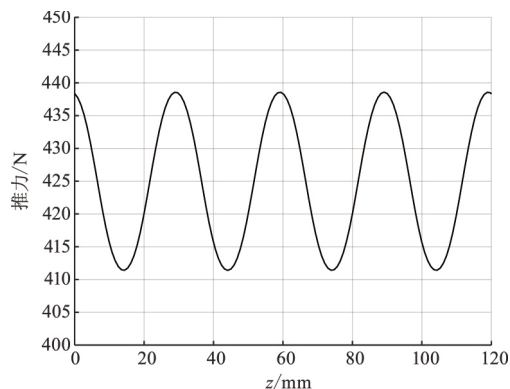


图6 电机推力曲线图(解析模型)

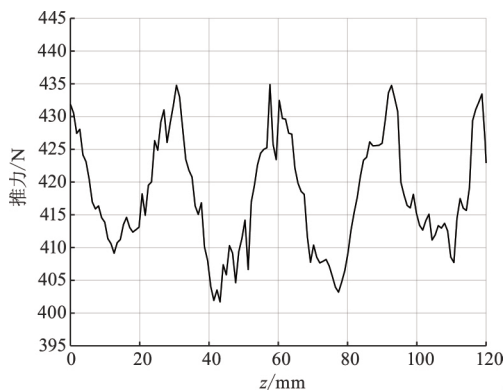


图7 推力曲线(有限元模型)

基础上,通过磁场分析和数学推理得到了其电磁场重要参数及磁场分布的解析计算模型,并通过电磁场仿真软件Ansoft Maxwell建立了有限元模型,仿真结果验证了解析模型的正确性,解析模型与有限元模型存在一定误差,但误差均在可以接受的范围内。

[参考文献]

- [1] 沈建新,王灿飞,费伟中,等.永磁开关磁链直线电机若干优化设计方法[J].电工技术学报,2013,28(11):1-8.
- [2] 郭丹.圆筒型直线电机推力计算及其设计方法的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2008.
- [3] ZOU W,ZHU Y D,ZHANG G,et al.Optimization of Cogging Torque for Disc-Type Permanent Magnet Motor Based on Ansoft Maxwell [J].Small & Special Electrical Machines, 2015,43(12):10-13.
- [4] 吴苏敏.基于Ansoft的永磁同步电机结构参数优化研究[D].成都:电子科技大学,2014.
- [5] 黄允凯,周涛.基于等效磁路法的轴向永磁电机效率优化设计[J].电工技术学报,2015,30(2):73-79.

收稿日期 2021-04-09

作者简介:付开源(1994—),男,湖北十堰人,硕士研究生,研究方向:轨道交通机电工程。