

# 电磁学小论文——电磁弹射器

报告人：郭佳诚  
指导教师：陶小平  
2017-06-21

创霖宇学府  
育天下英才  
厚文化底蕴

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 1/50

## 目录

- (一)、引言
- (二)、电磁弹射器系统、结构方案与原理
- (三)、模型制作
- (四)、理论计算与仿真模拟
- (五)、改进实验方法与理论分析
- (六)、总结

创霖宇学府  
育天下英才  
厚文化底蕴

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 2/50

## 引言

### 引言

2017年4月26日，注定将被中国远洋海军发展史所铭记。我国首艘001A型国产航母，在中船重工大连造船厂隆重下水，中国远洋海军建设再下一城。



创霖宇学府  
育天下英才  
厚文化底蕴

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 3/50

## 引言

### 引言

航母的威慑力量在于其搭载的舰载机，所以舰载机能否迅速、可靠地起飞是保证航母战斗力的最重要的技术条件。



创霖宇学府  
育天下英才  
厚文化底蕴

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 4/50

## 引言

### 引言

电磁弹射是目前最先进的舰载机起飞方式，具有诸多优点。各国都在大力研制电磁弹射系统。美国更是已经研制成功了EMALS电磁弹射系统。




航母电磁弹射概念图      全尺寸路基电磁弹射实验设备

创霖宇学府  
育天下英才  
厚文化底蕴

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 5/50

## 电磁弹射器系统

### 电磁弹射器系统



电磁弹射系统主要由电源、直线电机、控制系统、强迫储能装置、脉冲发生器和辅助系统等构成。

在整个电磁弹射系统中，直线电机即是系统动力的提供者，同时又是整个电磁弹射系统所要控制的对象，直线电机性能的好坏对整个电磁弹射系统有着直接的影响。

因此本文围绕电磁弹射器的核心部件——直线电机进行了相关研究与探讨。

创霖宇学府  
育天下英才  
厚文化底蕴

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 6/50

### 直线电机原理

#### 直线电机原理

在初级上嵌有三相绕组，当通入三相对称交流电时，在初级和次级之间的气隙中会产生一个移动磁场，磁场沿着直线方向按正弦规律分布，又称为行波磁场；次级就会随着行波磁场的移动而移动。

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器
2017-06-21
7/50

### 直线电机结构探究

因素	类型A	类型B
整体结构	永磁型✓ 效率高、行程长	感应型 推力体积比大、结构稳定
电枢绕组选择	定子电枢✓ 结 构 T字型动子	转子电枢 绕组 i线、电缆拖动
初级有无铁芯	有 永磁体列	推 较大、气隙密
气隙层数	单 造	互抵消，减轻 大推力
动子结构	T型 次 绕组铁芯	滑动会产生很大的热量
绕组设计	集中式绕组✓ 模块化设计、方便更换	分布式绕组 绕制复杂

创霖宇学府

电磁学小论文——电磁弹射器
2017-06-21
8/50

### 设计实验

#### 设计实验

实验材料：C型变压器铁芯\*12对、0.5mm漆包线2kg、50\*20\*1.5钕铁硼磁铁\*4、定制铜板次级\*1、6mm\*500mm光轴\*2、轴承\*4、木板若干、定制木块\*24、M5双头螺丝50mm\*2、M5螺母若干、自攻螺丝若干、直角连接件a\*24、直角连接件b\*4、手钻\*1、等等

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器
2017-06-21
9/50

### 模型制作——铁芯连接、绕线

创霖宇学府

电磁学小论文——电磁弹射器
2017-06-21
10/50

### 模型制作——绕组单元

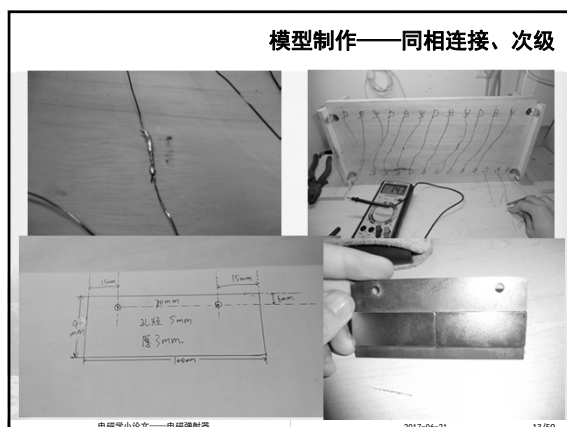
创霖宇学府

电磁学小论文——电磁弹射器
2017-06-21
11/50

### 模型制作——打孔、定位

创霖宇学府

电磁学小论文——电磁弹射器
2017-06-21
12/50



### 理论分析——单边磁铁受力分析

#### 理论分析——单边永磁体受力

假设：

- 1>永磁体内磁化均匀，其为线性各向同性磁介质；
- 2>忽略端部效应与边缘效应；
- 3>气隙宽度远小于永磁体与铁芯的尺寸；
- 4>铁芯横截面积与永磁体横截面积相等。

运用磁荷法思想，可以得到，永磁体对铁芯横截面上的极化面磁荷密度为：

$$\sigma_m = J = \mu_0 M$$

利用先前的假设条件：气隙宽度远小于永磁体与铁芯的尺寸，所以认为铁芯与磁极靠的很近，在永磁体所对的铁芯表面会感应出等量反号面磁荷，其吸力可由电容器两板间的吸力表达式求出：

$$F_y = -\frac{\sigma_e^2 S}{2\epsilon_0}$$

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 15/50

### 理论分析——单边磁铁受力分析

#### 理论分析

利用静磁量与静电量的替换关系，即：

静电量	E	D	P	$\sigma_e$	$\epsilon_0$
静磁量	H	B	J	$\sigma_m$	$\mu_0$

替换可得永磁体与铁芯的法向吸引力：

$$F_y = -\frac{\sigma_m^2 S}{2\mu_0} = -\frac{\mu_0 M^2 S}{2} = -\frac{\mu_0}{2} \left(\frac{B_0}{\mu_0}\right)^2 S = -\frac{B_0^2 S}{2\mu_0}$$

代入  $B_0=0.3T$ ,  $S=0.03*0.015m^2$ ;

$$F_y=16.11N$$

即单个铁芯与所对永磁体间的单边吸引力为16N

为了验证前述的理论计算，采用ANSYS Maxwell软件进行仿真模拟，并通过仿真模拟，研究电机推力等与相关参量的关系。

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 16/50

### 仿真模拟

#### 直线永磁电机的有限元模型的建立

直线永磁电动机的电磁场问题是一个三维场问题，对此三维场问题如果采用有限元法求解，势必使计算量庞大，因此，为简化分析计算，作如下的假设：

- 1>初级铁芯是叠片压装的，铁芯的电导率可以忽略，视为 $\sigma=0$ ，即不考虑初级铁芯中的涡流效应，并忽略其磁阻效应；
- 2>忽略初级铁芯的磁滞效应，铁磁材料的非线性由其磁化曲线来考虑；
- 3>各层介质的物理常数是均匀的、各项同性的，并且是线性的；
- 4>各场量随时间做正弦变化，初级绕组电流仅在z轴方向流动；
- 5>次级仅在x轴方向移动。

上述的假定允许我们将三维场问题转化为二维场问题。因此在Ansys Maxwell 16.0建立单边永磁直线电机的有限元模型，如图所示。

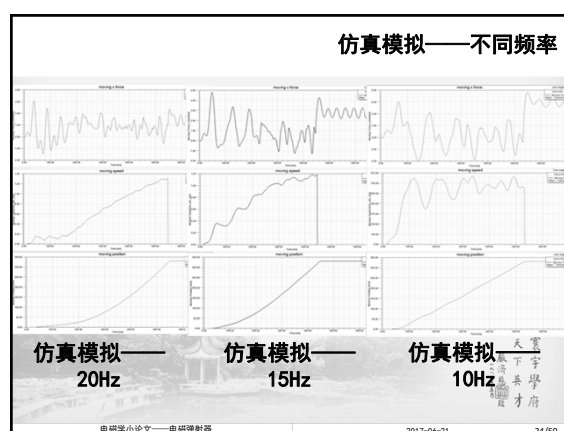
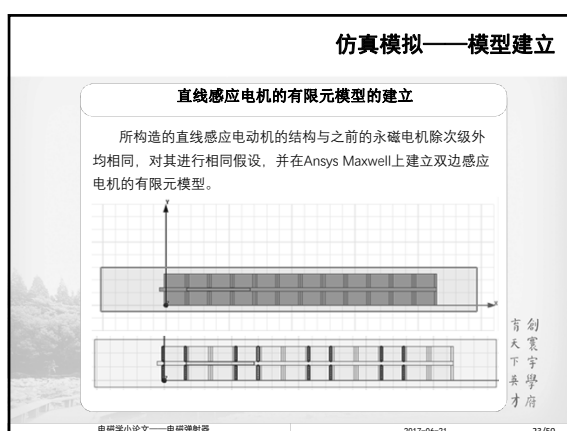
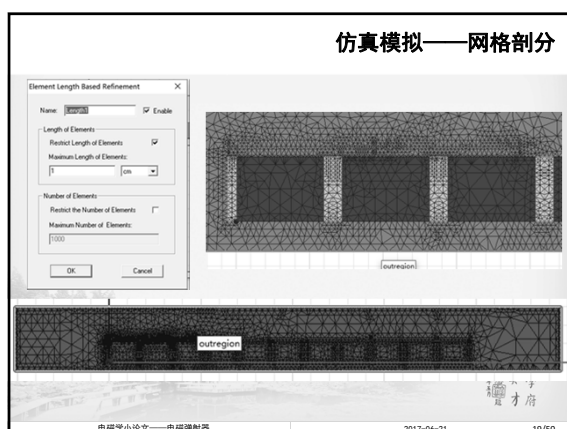
创霖宇学府  
育天下英才

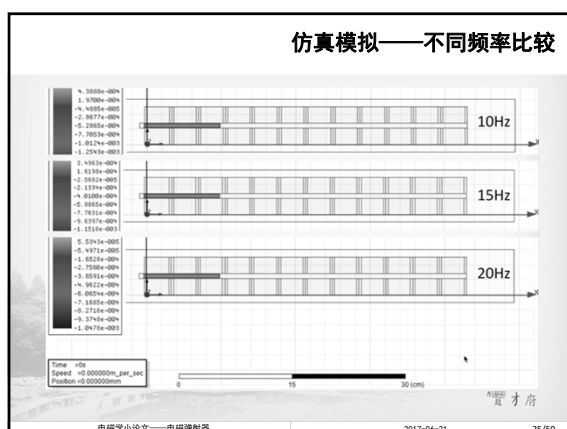
电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 17/50

### 仿真模拟——模型建立

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 18/50





### 仿真模拟——结果分析

#### 仿真模拟——结果分析

由10Hz, 15Hz, 20Hz受力图像, 可以看出: 加速度随频率减小而增大, 频率越低, 次级越早地与行波磁场达到了共速。

同时, 当次级在初级长度内与行波磁场达到共速时, 剩余的初级长度便无法产生加速效果, 加速距离随着频率的减小而减小。

因此需要综合考虑加速度与加速距离, 寻找相应的最佳频率, 使得在初级长度固定的情况下, 次级的出速度达到最大。

创霖宇学府  
育天下英才  
聚天下智慧

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 26/50

### 仿真模拟

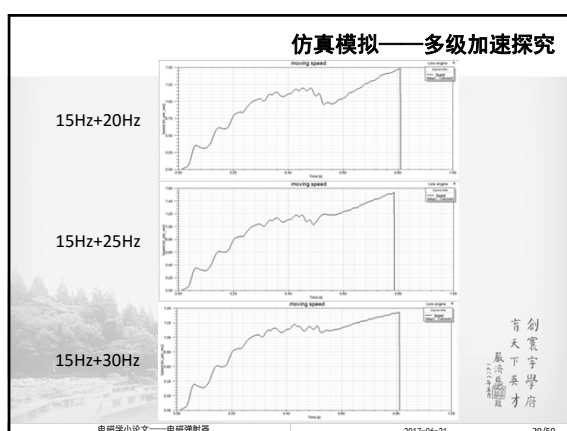
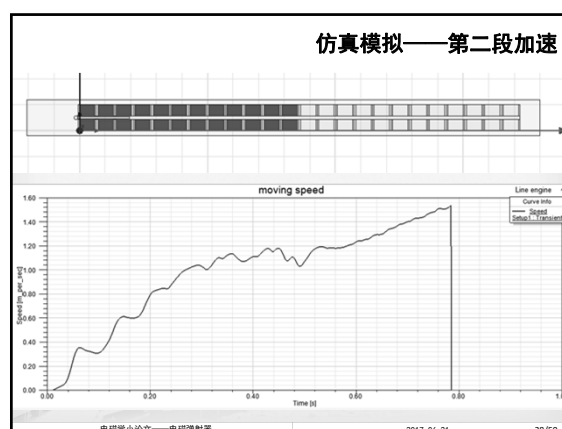
#### 仿真模拟

美国研制成功的EMALS系统的初级设计为分段式结构。初级一共分为14段, 每段长14.32m, 第一段的频率仅有20Hz左右, 而最后一段的频率达到625Hz。也就是随着动子进入各初级分段速度的不断提高, 来不断增加初级交流电的频率, 来使加速效果达到最优。

为了说明分段加速的效果, 建立仿真模型, 如图。

创霖宇学府  
育天下英才  
聚天下智慧

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 27/50



### 进行试验

#### 进行试验

在将次级改为铜板后, 再次进行试验。

由于实验室三相电为380V, 同时每相绕组电阻只有13Ω左右, 电压过大。在网上搜索得到了一种将三相电机改为单相电机的接线方法, 采用220V市电接变压器的方法进行试验。



实验器材: 470uF电容\*1、万用表\*2、导线若干、自耦变压器\*1、自制直线电机等

三相电机改单相电路图

创霖宇学府  
育天下英才  
聚天下智慧

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 30/50

### 进行试验

电磁学小论文——电磁继电器

2017-06-21

31/50

### 试验结果与分析

#### 实验结果与分析

实验结果：在将次级改为铜板，并按三相电机改单相进行接线后。次级并没有运动。

结果分析：实验时，电压已经加到了50V左右，因此猜测行波磁场的强度可以达到要求，电机无法运动的问题应该就出在了行波磁场的波形方面，即此电路在气隙中产生的磁场没有产生有效的定向移动，因而次级也就无法随着气隙磁场一同移动。

下面就此初级铁芯间的气隙磁场进行分析。

电磁学小论文——电磁继电器

2017-06-21

32/50

### 理论分析——气隙磁场强度

#### 理论分析

各相的磁场是由各绕组的电流激发的，并且如论文中所推导，气隙磁场强度与电流成正比关系

$$B = \frac{\mu_0 NI}{d + l_g}$$

因此，研究各相的磁场强度也就是研究各相电流随时间的变化情况。建立等效电路，并标明同名端。

电磁学小论文——电磁继电器

2017-06-21

33/50

### 理论分析

#### 理论分析

计算绕组自感系数L

$$B = \frac{\mu NI}{l}$$

绕组总磁通量为

$$\psi = NBS = \frac{\mu N^2 S}{l} I$$

则绕组自感系数为

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{\mu N^2 S}{l}$$

代入数据

$$\mu = 7000 \mu_0 \quad N = 400$$

$$S = 0.025 * 0.015 m^2 \quad l = 0.17 m$$

可得

$$L = 3.1 H$$

电磁学小论文——电磁继电器

2017-06-21

34/50

### 理论分析

#### 理论分析

三相复阻抗表达式为

$$\dot{Z}_A = R + j\omega L$$

$$\dot{Z}_B = R + j\omega L$$

$$\dot{Z}_C = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

回路总复阻抗为

$$\dot{Z} = \dot{Z}_A + \dot{Z}_{BC}$$

其中

$$\dot{Z}_{BC} = \frac{\dot{Z}_B \dot{Z}_C}{\dot{Z}_B + \dot{Z}_C}$$

电磁学小论文——电磁继电器

2017-06-21

35/50

### 理论分析

#### 理论分析

由交流电路基本方程可知

$$\dot{V} = RI + \frac{1}{j\omega C} \dot{I} + j\omega LI + j\omega MI'$$

由于先前假设：铁芯磁导率很大，无漏磁发生

$$M = 0$$

A相绕组回路复电流为

$$\dot{i} = \dot{i}_A = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_A + \dot{Z}_{BC}} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_A + \frac{\dot{Z}_B \dot{Z}_C}{\dot{Z}_B + \dot{Z}_C}}$$

整理可得

$$\dot{i} = \dot{i}_A = \frac{\dot{V}(\dot{Z}_B + \dot{Z}_C)}{\dot{Z}_A \dot{Z}_B + \dot{Z}_A \dot{Z}_C + \dot{Z}_B \dot{Z}_C}$$

电磁学小论文——电磁继电器

2017-06-21

36/50

### 理论分析

理论分析

同理可得

$$i_B = \frac{\dot{V}}{Z_A + Z_{BC}} \cdot \frac{Z_{BC}}{Z_A Z_B + Z_A Z_C + Z_B Z_C}$$

$$i_C = \frac{\dot{V}}{Z_A + Z_{BC}} \cdot \frac{Z_{BC}}{Z_A Z_B + Z_A Z_C + Z_B Z_C}$$

代入A.B.C三相复阻抗表达式可得

$$i_A = \frac{V(2R + (2\omega L - 1/\omega C)j)}{(3R^2 - 3\omega^2 L^2 + \frac{2L}{C}) + (6R\omega L - \frac{2R}{\omega C})j}$$

$$i_B = \frac{V(R + (\omega L - 1/\omega C)j)}{(3R^2 - 3\omega^2 L^2 + \frac{2L}{C}) + (6R\omega L - \frac{2R}{\omega C})j}$$

$$i_C = \frac{V(R + \omega L j)}{(3R^2 - 3\omega^2 L^2 + \frac{2L}{C}) + (6R\omega L - \frac{2R}{\omega C})j}$$

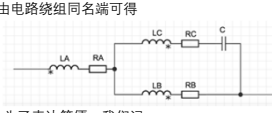
创  
震  
宇  
学  
府  
育  
天  
下  
英  
才

电磁学小论文——电磁继电器 2017-06-21 37/50

### 理论分析

理论分析

由电路绕组同名端可得



$$i_{A^*} = i_A$$

$$i_{B^*} = -i_B$$

$$i_{C^*} = -i_C$$

为了表达简便, 我们记

$$Ue^{j\varphi} = \left(3R^2 - 3\omega^2 L^2 + \frac{2L}{C}\right) + \left(6R\omega L - \frac{2R}{\omega C}\right)j$$

则B相绕组同名端流入电流表达式为

$$i_{B^*} = -\frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot Z_C \cdot e^{j\varphi_C} = \frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot Z_C \cdot e^{j(\varphi_C - \pi)}$$

令

$$\varphi_{B^*} = \varphi_C - \pi \quad i_{B^*} = \frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot Z_C \cdot e^{j\varphi_{B^*}}$$

创  
震  
宇  
学  
府  
育  
天  
下  
英  
才

电磁学小论文——电磁继电器 2017-06-21 38/50

### 理论分析

理论分析

同理可写出C相同名端流入电流

$$i_{C^*} = -\frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot Z_B \cdot e^{j\varphi_B} = \frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot Z_B \cdot e^{j(\varphi_B - \pi)}$$

令

$$\varphi_{C^*} = \varphi_B - \pi$$

可得C相同名端流入电流为

$$i_{C^*} = \frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot Z_B \cdot e^{j\varphi_{C^*}}$$

对于A相绕组, 则有

$$i_{A^*} = \frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot (Z_B e^{j\varphi_B} + Z_C e^{j\varphi_C})$$

创  
震  
宇  
学  
府  
育  
天  
下  
英  
才

电磁学小论文——电磁继电器 2017-06-21 39/50

### 理论分析

理论分析

为了与A相绕组的复阻抗  $Z_A$  相区别, 令

$$Z_{A^*} e^{j\varphi_{A^*}} = Z_B e^{j\varphi_B} + Z_C e^{j\varphi_C}$$

则可得, A相同名端流入电流为

$$i_{A^*} = \frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot Z_{A^*} \cdot e^{j\varphi_{A^*}}$$

则, A.B.C三相绕组同名端流入电流为

$$i_{A^*} = \frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot Z_{A^*} \cdot e^{j\varphi_{A^*}}$$

$$i_{B^*} = \frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot Z_C \cdot e^{j\varphi_{B^*}}$$

$$i_{C^*} = \frac{\dot{V}}{Ue^{j\varphi}} \cdot Z_B \cdot e^{j\varphi_{C^*}}$$

创  
震  
宇  
学  
府  
育  
天  
下  
英  
才

电磁学小论文——电磁继电器 2017-06-21 40/50

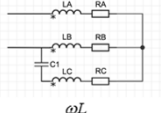
### 理论分析

理论分析

首先考虑B.C两相的相位差

$$\varphi_{B^*} - \varphi_{C^*} = \varphi_C - \varphi_B$$

由B.C两相复阻抗可知



$$Z_B = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad \varphi_B = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

$$Z_C = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \varphi_C = \arctan \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}$$

代入实验数据

$$\omega_0 = 2\pi * 50 \text{ rad/s} \quad C = 470 \mu\text{F}$$

$$L = 3.1\text{H} \quad R = 13\Omega$$

创  
震  
宇  
学  
府  
育  
天  
下  
英  
才

电磁学小论文——电磁继电器 2017-06-21 41/50

### 理论分析

理论分析

可得

$$Z_B = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = 973.98\Omega, \varphi_B = \arctan \frac{\omega L}{R} = 89.24^\circ$$

$$Z_C = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = 967.21\Omega, \varphi_C = \arctan \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} = 89.20^\circ$$

B.C相差为

$$\varphi_{B^*} - \varphi_{C^*} = \varphi_C - \varphi_B = -0.04^\circ$$

$$\varphi_{B^*} = \varphi_C - \pi = -90.80^\circ$$

$$\varphi_{C^*} = \varphi_B - \pi = -90.76^\circ$$

代入可得, A相相位为

$$Z_{A^*} = Z_B e^{j\varphi_B} + Z_C e^{j\varphi_C} = 973.98 e^{89.24^\circ j} + 967.21 e^{89.20^\circ j}$$

创  
震  
宇  
学  
府  
育  
天  
下  
英  
才

电磁学小论文——电磁继电器 2017-06-21 42/50

### 理论分析——重新赋值

#### 理论分析——重新赋值

代入一级最佳频率 $\omega_0=15*2\pi\text{rad/s}$ ,  $C=35\mu\text{F}$

$$Z_B = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = 292.46\Omega \quad \varphi_B = \arctan \frac{\omega L}{R} = 82.14^\circ$$

$$Z_C = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = 209.31\Omega \quad \varphi_C = \arctan \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} = -40.18^\circ$$

B,C同名端相差

$$\varphi_{B^*} - \varphi_{C^*} = \varphi_C - \varphi_B = -122.32^\circ$$

$$\varphi_{B^*} = \varphi_C - \pi = -220.18^\circ$$

$$\varphi_{C^*} = \varphi_B - \pi = -97.86^\circ$$

代入A相绕组

$$Z_{A^*} = Z_B e^{j90^\circ} + Z_C e^{j0^\circ} = 292.46e^{j82.14^\circ} + 209.31e^{-j40.18^\circ}$$

$$Z_{A^*} = 252.76e^{j37.72^\circ} \quad \varphi_{A^*} = 37.72^\circ \quad \text{相位、电流大小}$$

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 43/50

### 总结

#### 总结

本文就电磁弹射器中的核心部件——直线电机进行了相关研究：

- 1>对直线电机各部件的选择进行了比较选择；
- 2>对永磁直线电机与感应直线电机的气隙磁场进行了理论计算(论文)；
- 3>对单边永磁直线电机的法向吸引力进行了计算；
- 4>制作了直线电机的原理模型；
- 5>在ANSYS Maxwell中建立了永磁、感应直线电机模型，并进行了仿真模拟；验证了相关理论计算的正确性；并就感应直线电机的初级最佳频率进行了探究，说明了现实中电磁弹射系统采用多段初级的必要性及原因；
- 6>就三相电机改单相电机实验失败的原因，与此方法的原理及可行性进行了理论推导。

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 44/50

### 不足&展望

#### 不足&展望

直线电机由于动力源的问题没有能够运动起来，今后就将相关的三相降压与变频技术进行相关研究，通过电路获得电压在50V，频率在15Hz左右的三相对称交流电。

另外，电磁弹射系统中的另一个重要部件便是控制系统。航母的舰载机机型种类多，直线电机负载情况繁多，因此直线电机的激励电流会随着负载的情况而变化；同时由于负载不同，次级通过各初级分段的速度也不尽相同，因此需要实时监控次级的速度，并通过控制系统改变下一级的通电频率，来使加速效果与效率达到最大。因此电磁弹射器的控制系统也是其极为重要的组成部分。今后将对电磁弹射器的控制系统进行相关研究，研究弹射器的控制部分的速度监测设计与频率调整程序。

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 45/50

### 致谢

#### 致谢

感谢陶老师在实验中的指导，提供试验设备与场地并提供技术方面的支持。

感谢CUPT领队钱学长的帮助，协助完成了相关的实验。

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 46/50

### 参考文献

#### 参考文献

- [1]刘吉柱. 面向电磁弹射器的永磁直线同步电机驱动系统研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [2]段建平. 平板式电磁弹射器电流磁场分析[D]. 南京理工大学, 2006.
- [3]宋益明. 面向电磁弹射器的无铁心永磁直线电机及其控制方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [4]王斌. 舰载机电磁弹射器的设计与动力学分析[D]. 北京工业大学, 2013.
- [5]陈中显, 余海涛, 胡敏强. 一种改进的永磁直线电机气隙磁场解析计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, (06): 1181-1186.
- [6]陈磊磊, 陆华才, 梁碧云. 基于Ansoft Maxwell 3D的永磁直线电机三维动态仿真[J]. 南阳理工学院学报, 2015, (06): 27-29.
- [7]王福金, 姚智慧. 舰载机的电磁弹射器设计探讨[J]. 电子工业专用设备, 2009, (09): 59-64.
- [8]孙玉瑜. 三级电磁发射器的建模及仿真优化[D]. 哈尔滨理工大学, 2006.
- [9]陈永强, 刘泉, 孙清. 双边型直线电机结构研究[J]. 科技风, 2008, (11): 45.
- [10]龙瑞政. 面向电磁弹射的直线电机设计及其控制[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 47/50

### 参考文献

#### 参考文献

- [11]卢琴芬, 程传堂, 叶云岳, 方攸同. 每极分数槽永磁直线电机的槽极数配合研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, (36): 68-74+12.
- [12]卢琴芬, 程传堂, 叶云岳, 方攸同. 每极分数槽永磁直线电机的槽极数配合研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, (36): 68-74+12.
- [13]王睿. 横向磁场永磁直线电机及其驱动的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2006.
- [14]丁国良. 舰载机磁悬浮电磁弹射技术的研究[D]. 武汉理工大学, 2008.
- [15]唐勇斌. 精密运动平台用永磁直线同步电机的磁场分析与电磁力研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2014.
- [16]刘希军, 张昆仑, 刘国清. 面向舰载机电磁弹射器的双边直线感应电机研究[J]. 系统仿真学报, 2016, (04): 951-955+965.
- [17]杜卫民. 永磁直线电机的电磁设计及磁阻力研究[D]. 河南理工大学, 2009.
- [18]赵博, 张洪亮. Ansoft 12在工程电磁场中的应用. 中国水利水电出版社, 2013.4.
- [19]刘慧娟. 上官明珠, 张颖超. Ansoft Maxwell电机电磁场实例分析. 国防工业出版社, 2014.5.
- [20]谢龙汉, 李杰鸿. ANSYS电磁场分析(第2版). 电子工业出版社, 2015.10.

创霖宇学府  
育天下英才

电磁学小论文——电磁弹射器 2017-06-21 48/50



**参考文献**

**参考文献**

[21] 焦留成,程志平. 永磁直线同步电动机特性及控制. 科学出版社,2014.2.  
[22] 浙江大学电机系电机教研组. 直线感应电动机. 科学出版社,1978.9.  
[23] 山田一著,胡德元译. 直线电机及其应用技术. 湖南科学技术出版社,1979.9.  
[24] 金建勋. 高温超导直线电机. 北京:科学出版社,2011.

创  
震  
宇  
学  
府  
育  
天  
下  
英  
才

电驱学小论文——电驱弹射器 2017-06-21 49/50

**谢谢!**

**谢谢!**

**谢谢大家!**

创  
震  
宇  
学  
府  
育  
天  
下  
英  
才

电驱学小论文——电驱弹射器 2017-06-21 50/50