



# 基于comsol仿真 优化设计直线电机

陈晓宁

解放军理工大学

[cxnbox@163.com](mailto:cxnbox@163.com)



1

应用背景及研究意义

2

基本原理及计算方法

3

仿真结果及分析

4

成果及实验



1

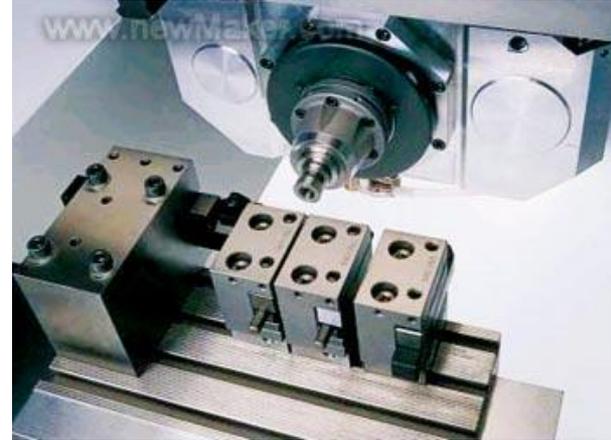
## 应用背景及研究意义



# 应用背景及研究意义

## ►应用列举

产品加工业



车床制造业

医学仪器



印刷业



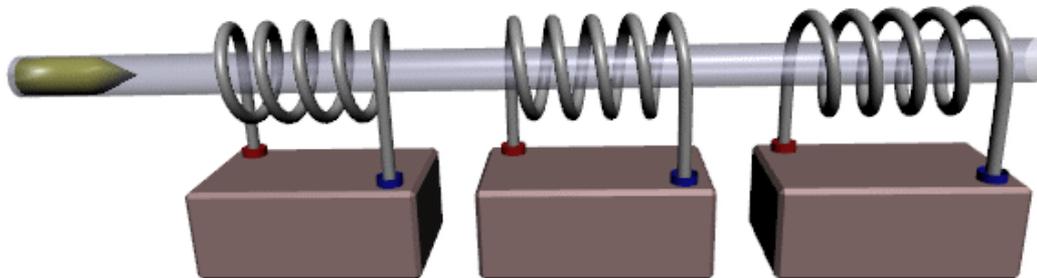
# ➤ 磁悬浮列车



## ➤空中拦截

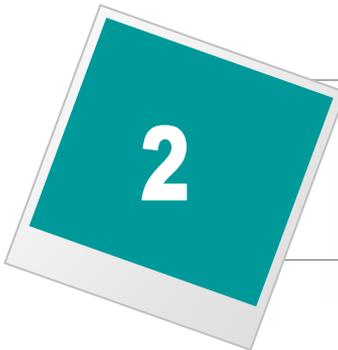


## ➤ 线圈炮



## ► 美军电磁武器



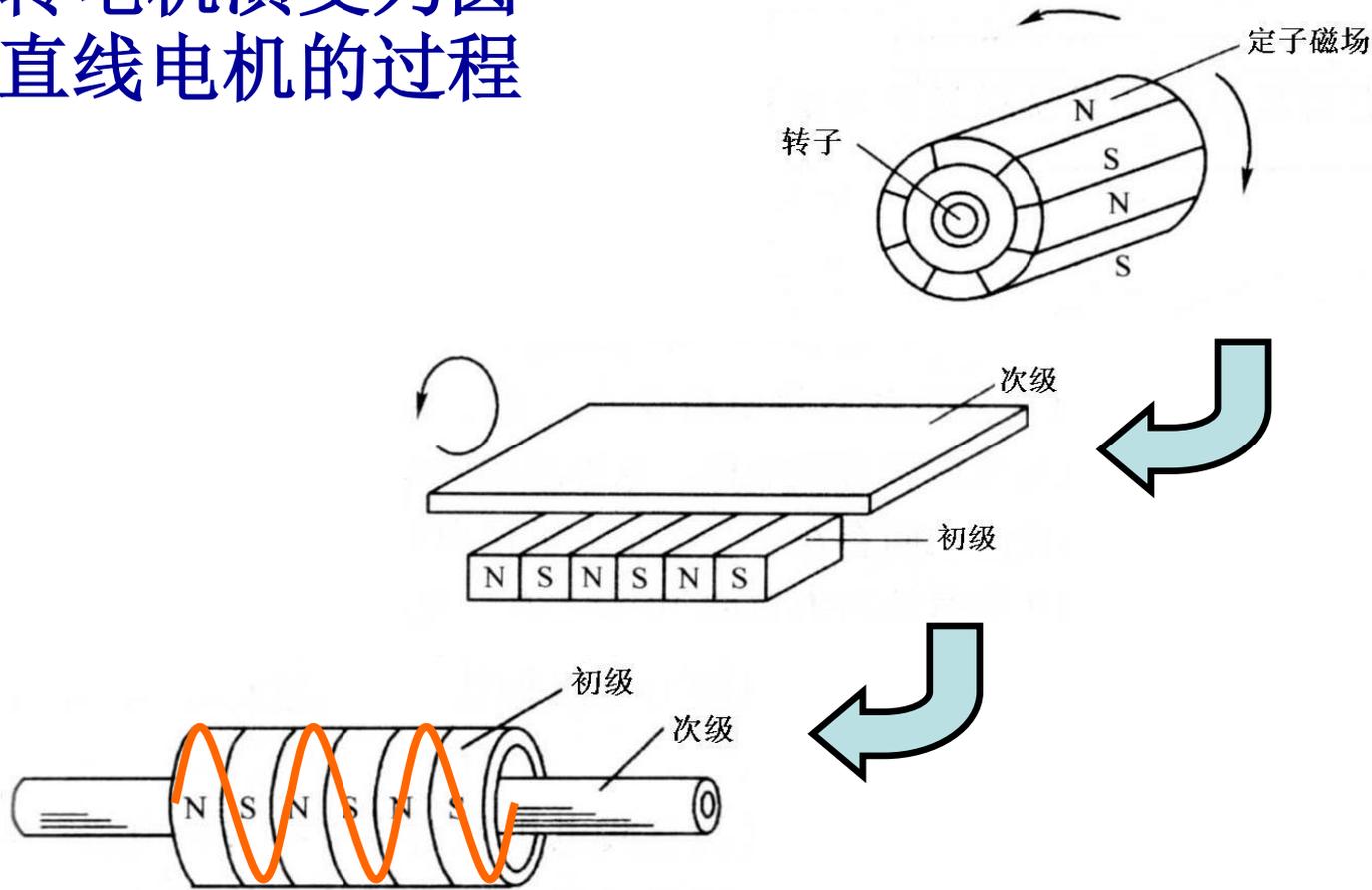


2

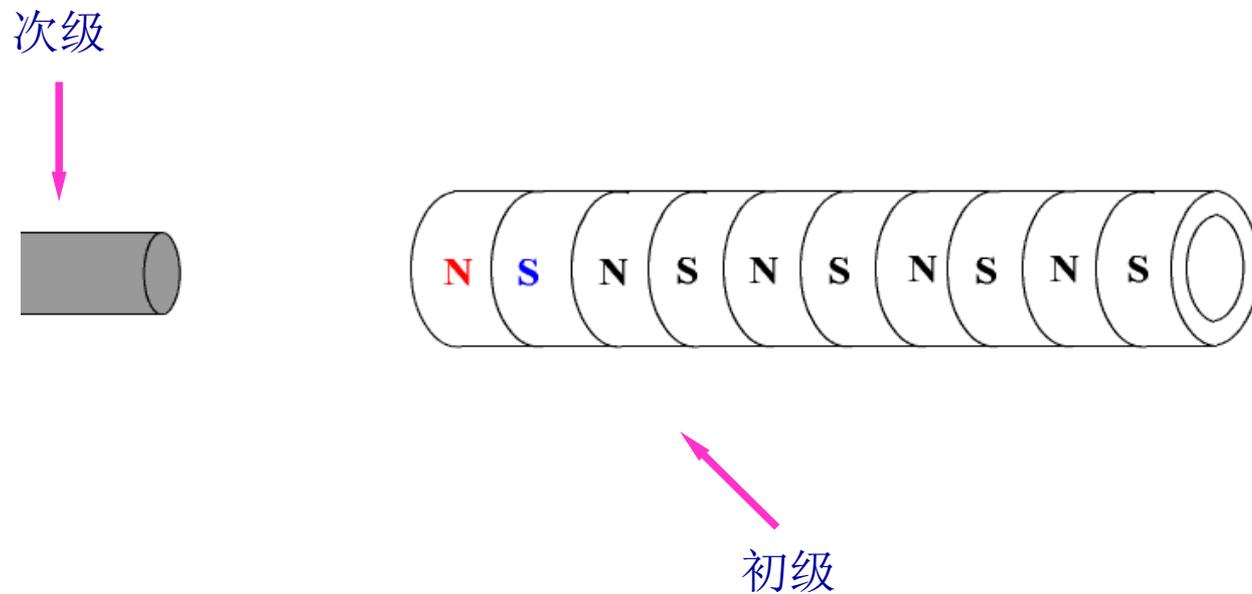
# 基本原理及计算方法



## 旋转电机演变为圆筒直线电机的过程



## 圆筒型直线电机的工作过程图示



麦克斯韦方程组微分形式：

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B = 0 \end{array} \right.$$

在频率不高时，位移电流与传导电流相比可忽略不计；而且，电机内部无自由电荷积集，故有

$$\frac{\partial D}{\partial t} = 0$$

成分方程为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times H = J \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B = 0 \end{array} \right.$$

$$B = \mu H$$

$$J = \sigma E$$



进一步推导：

$$J = J_c + \sigma(E + v \times B)$$

$$\nabla \times (\mu^{-1} B) = \sigma(E + v \times B) + J_c$$

引入矢量磁位A：

$$B = \nabla \times A$$

得到偏微分方程：

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A) - \sigma v \times (\nabla \times A) + \sigma \nabla V = J_c$$



## 电磁力的产生及分类：

从电磁力产生的原因和性质上看，可以分为两类：

- (1) 载流导体在磁场内所受到的力；
- (2) 磁质（在电机中主要是铁磁物质）在磁场内受到的力。

根据产生原因的不同，常用电磁力的计算方法有虚位移法和麦克斯韦应力法。



虚位移法：

$$f_g = -\frac{\partial W_m}{\partial g}$$

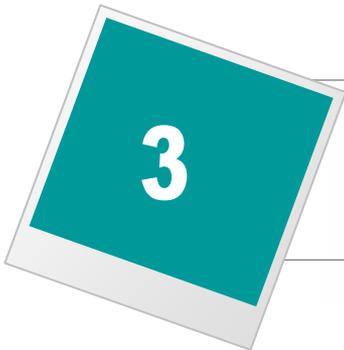
式中  $W_m$  为所研究系统的磁场能量； $g$  表示广义坐标

麦克斯韦应力法：

$$F = \int J \times B dV = \oint_S T \cdot dS$$

式中  $T$  为麦克斯韦张力张量





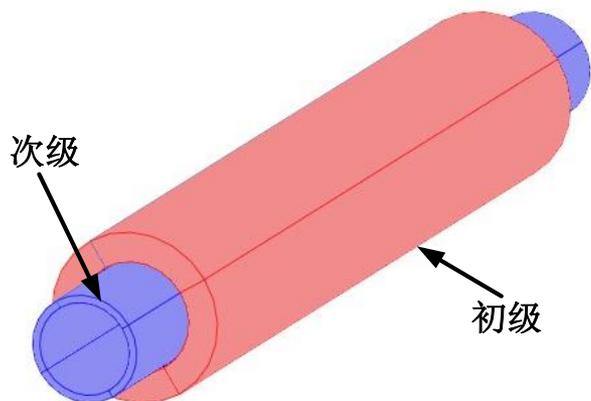
3

## 仿真结果及分析

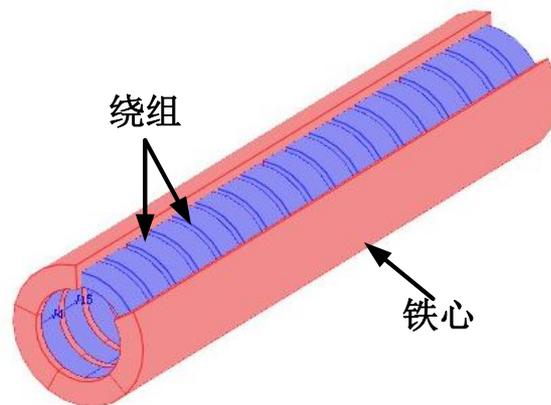


# 圆筒型感应电机模型

圆筒型感应直线电机结构示意图：



总体结构图

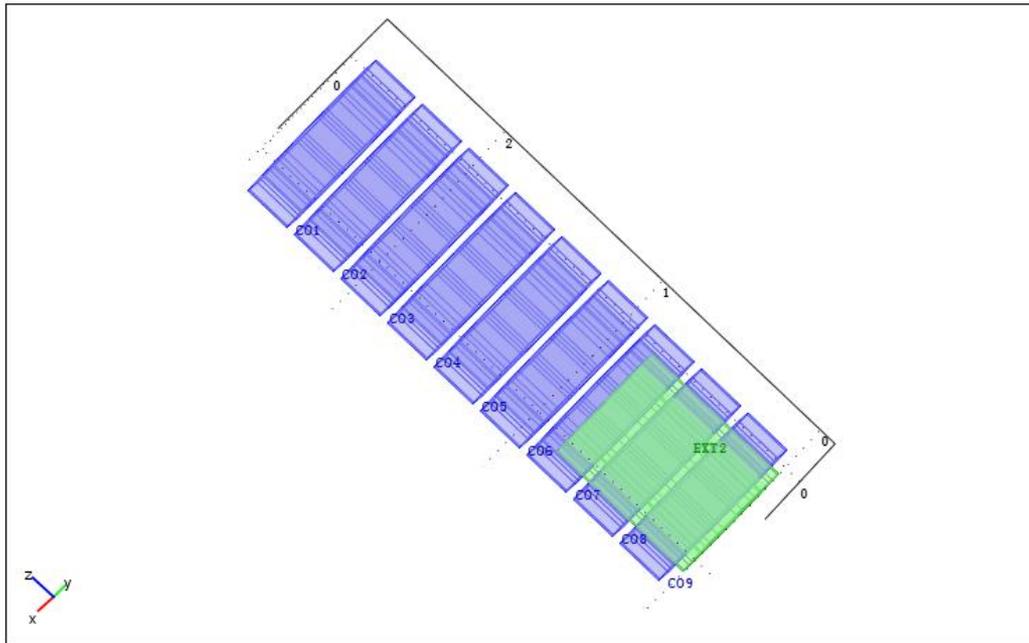


初级结构图

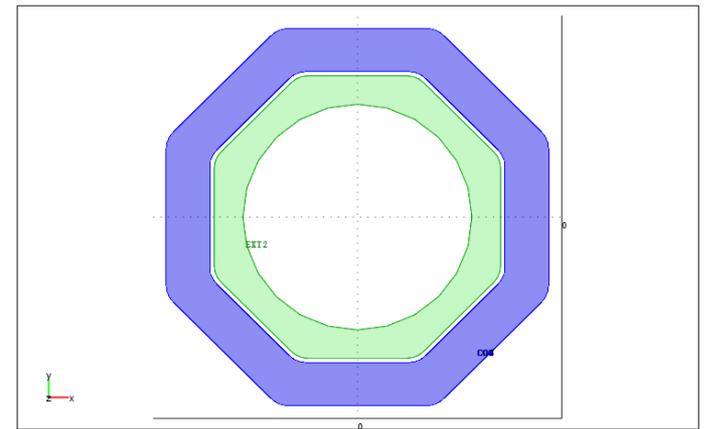
原理：初级绕组中通入交变电流，次级在电磁力作用下产生直线运动



## 八边形感应线圈炮3维模型



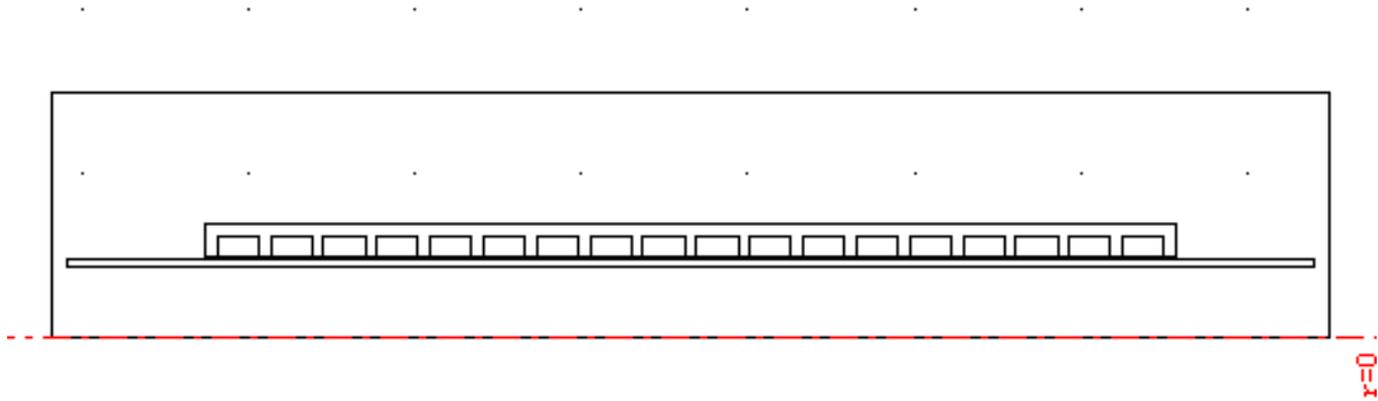
3d视角模型



在xy平面上的投影



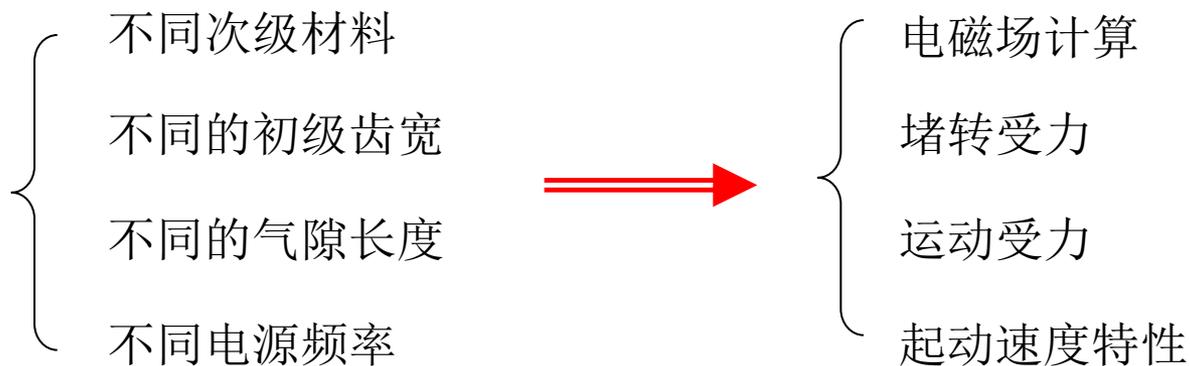
## ➤ 仿真模型：



采用2维的轴对称模型，和磁位瞬态分析模式



## 分析条件：

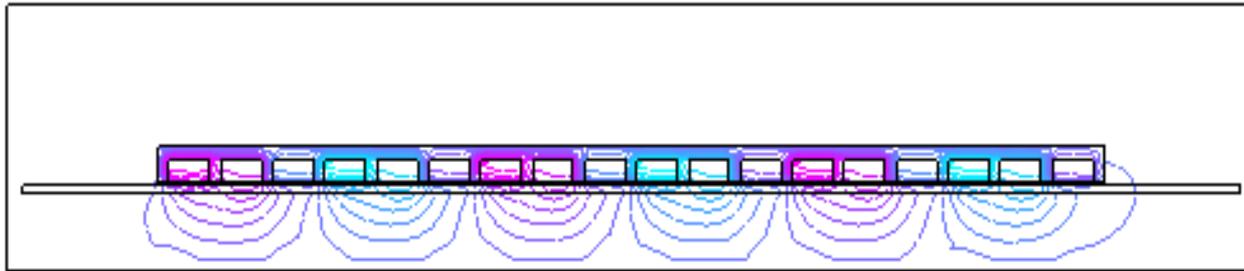


## 仿真与实验

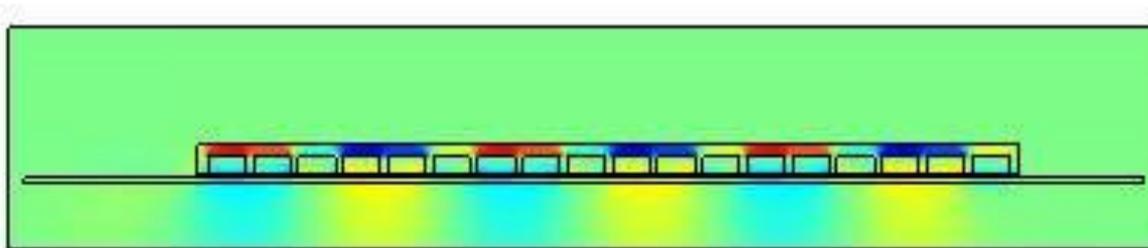
将不同频率下的推力仿真与实验值进行了比较



电磁场计算结果：



磁力线分布

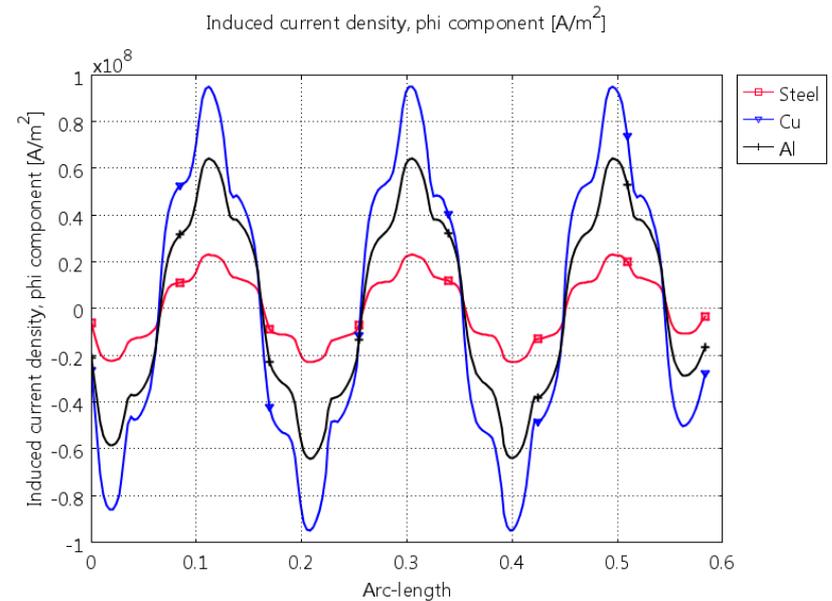
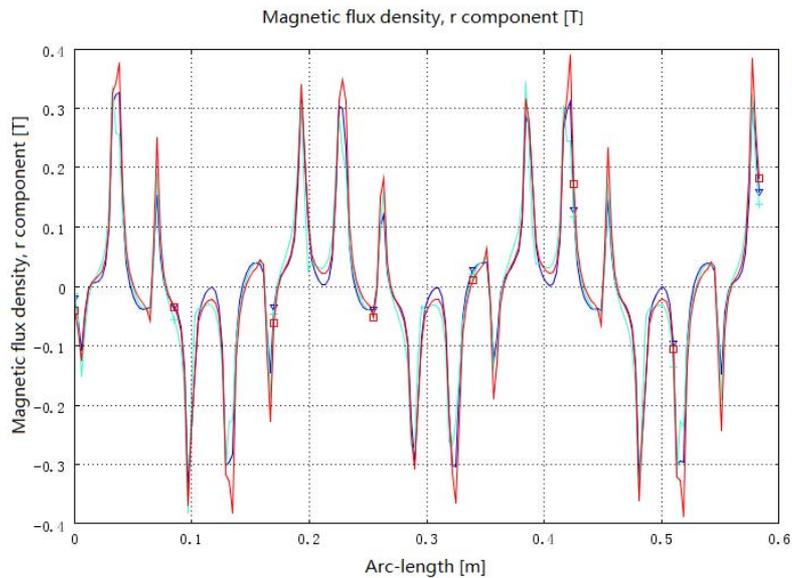


磁通密度分布



# 仿真结果及分析

## 对铝、铜、铁三种材料次级的推力仿真



R方向磁通密度

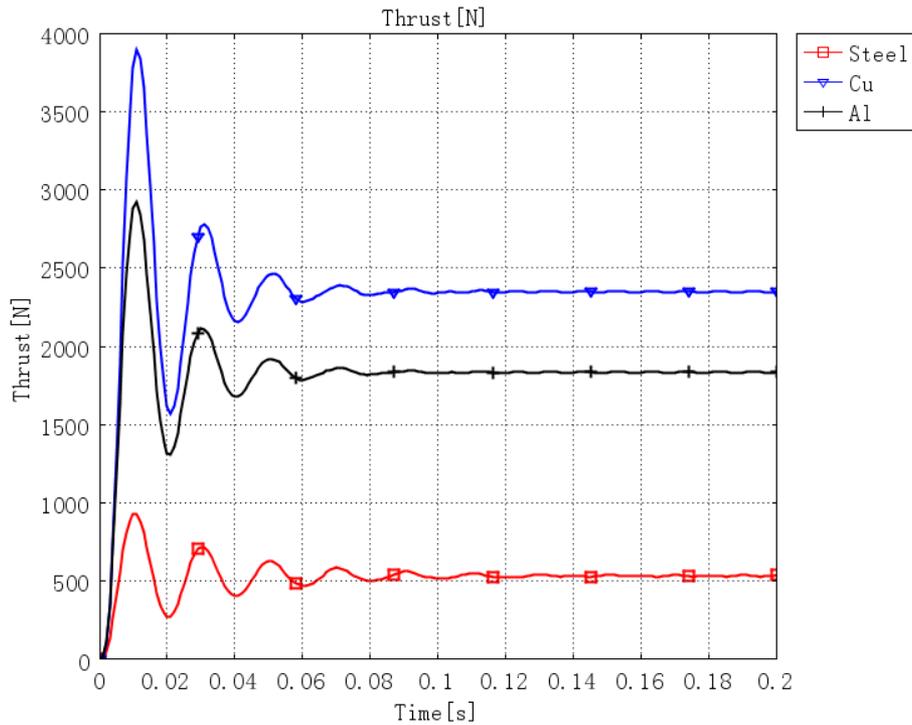
$\mu$

次级表面的感应电流密度

$\sigma$



# 仿真结果及分析



结论：铜最大，铝次之，铁最小

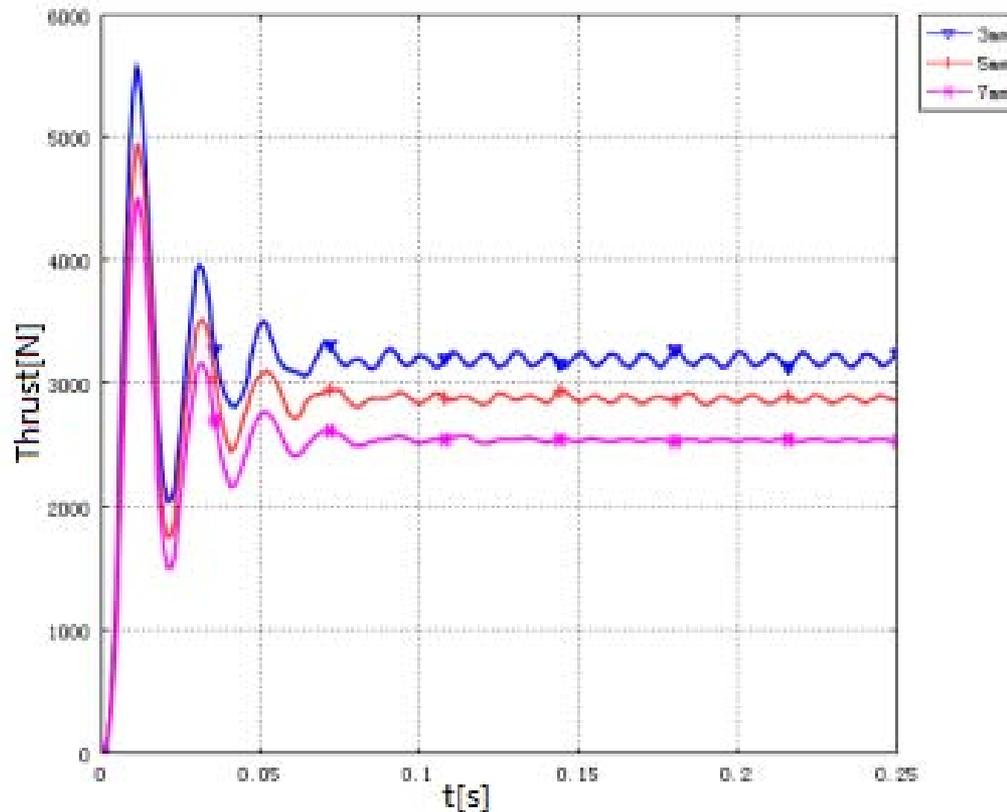
原因：主要因为导电率的差异，  
导致感应电流上的差异


$$F = \int J \times B dV = \oint_S T \cdot dS$$

堵住状态下的铝、铜、铁次级推力曲线



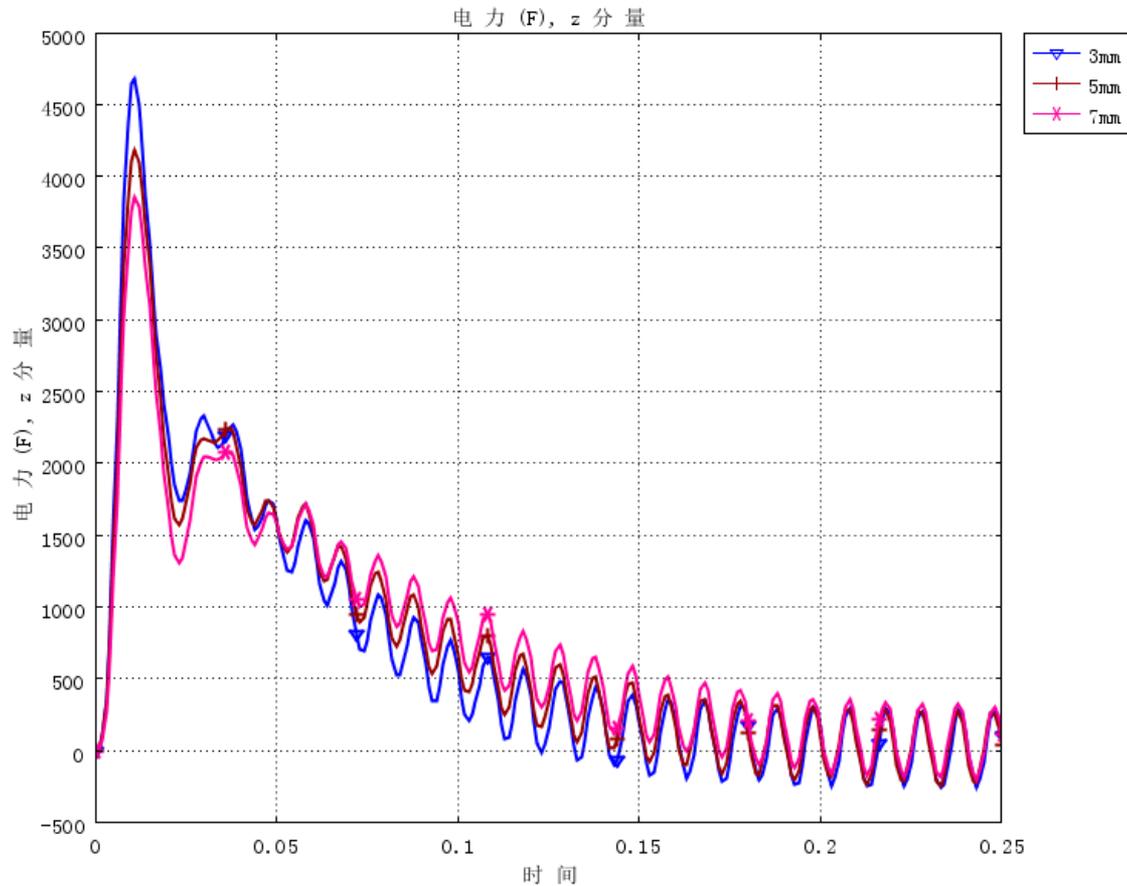
## 对不同齿槽宽度（3、5、7mm）的推力仿真



堵住状态下的推力曲线



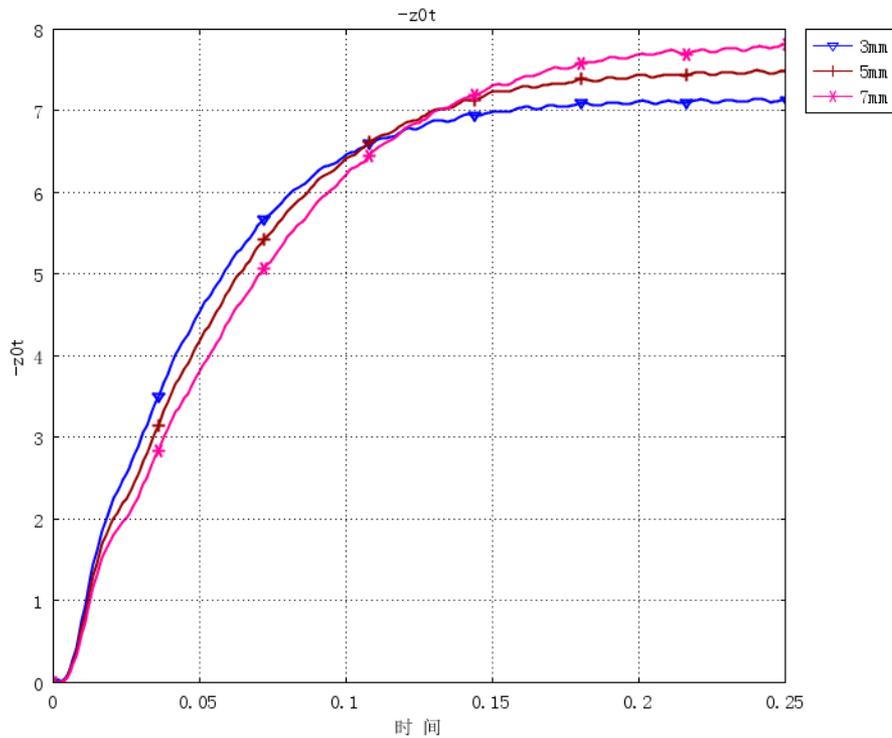
## 对不同齿槽宽度（3、5、7mm）的推力仿真



运动状态下的推力曲线



# 仿真结果及分析



结论：齿槽减小，启动推力增大，但稳态时达到的同步速度减小

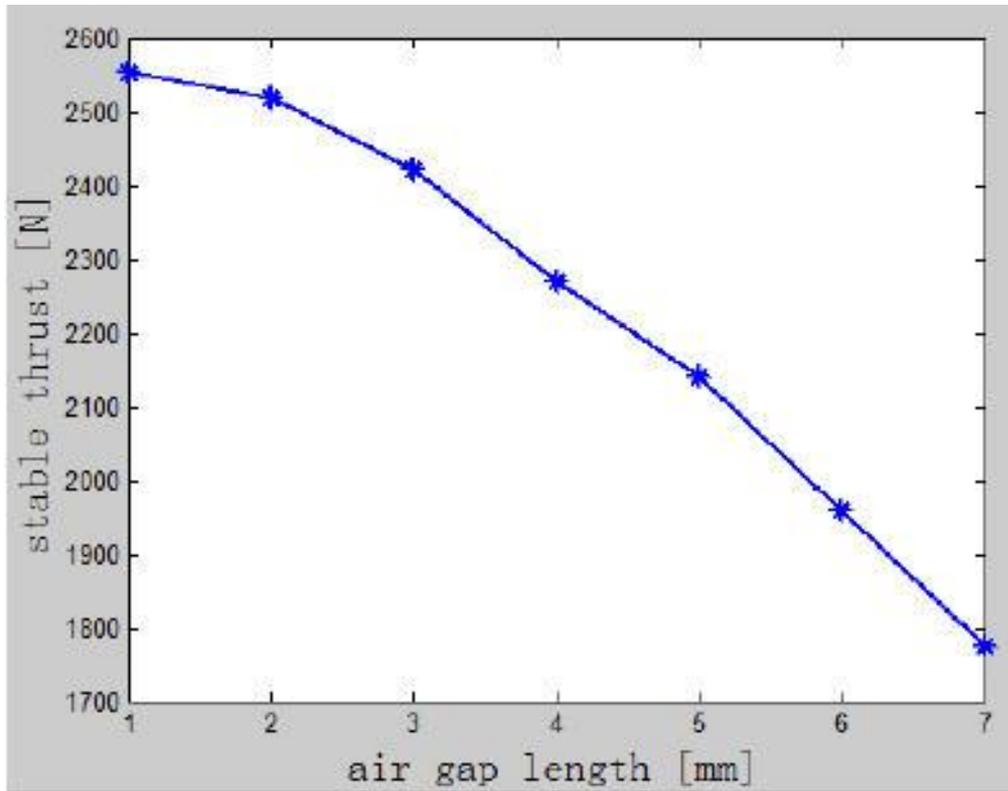
原因：槽宽不变时，齿宽减小，导致极距减小，所以同步速度减小

$$V_s = 2f\tau$$

运动状态下的速度变化曲线



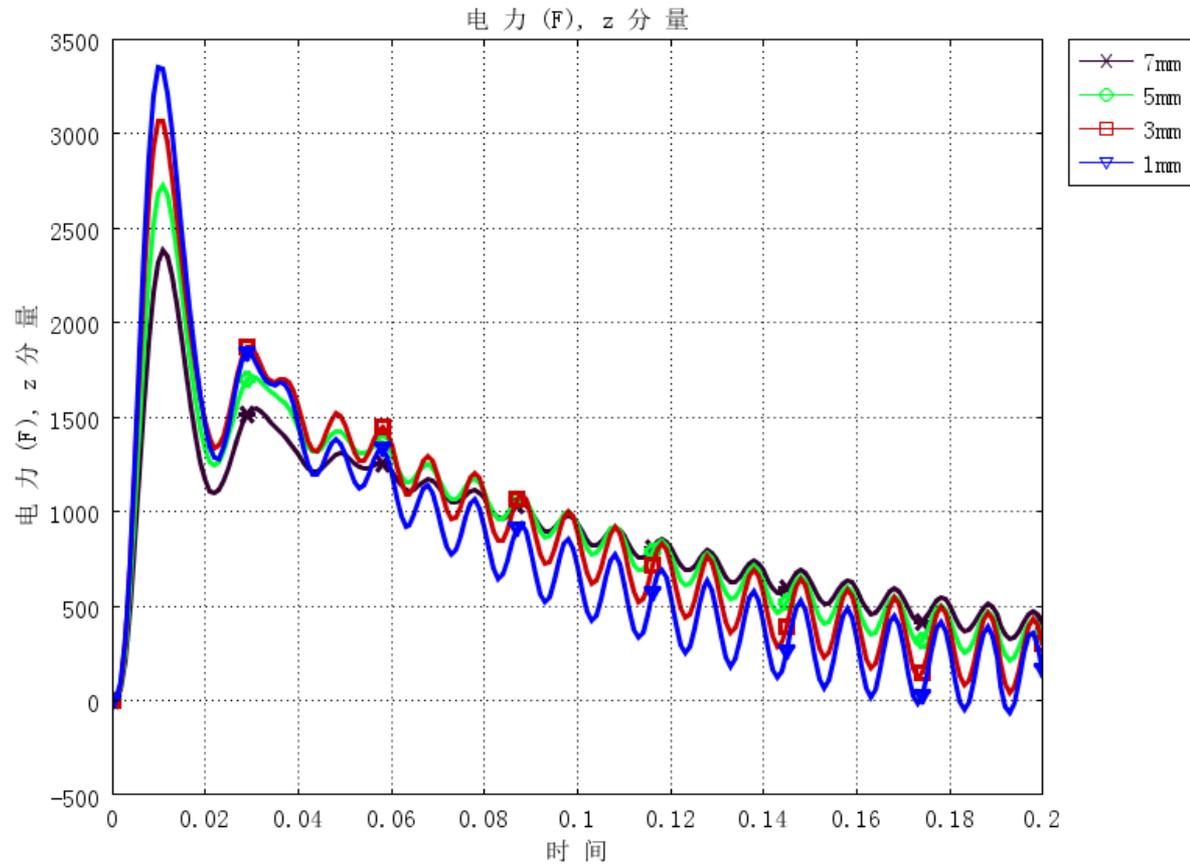
## 对不同气隙长度的推力仿真



堵住时推力与气隙大小的关系



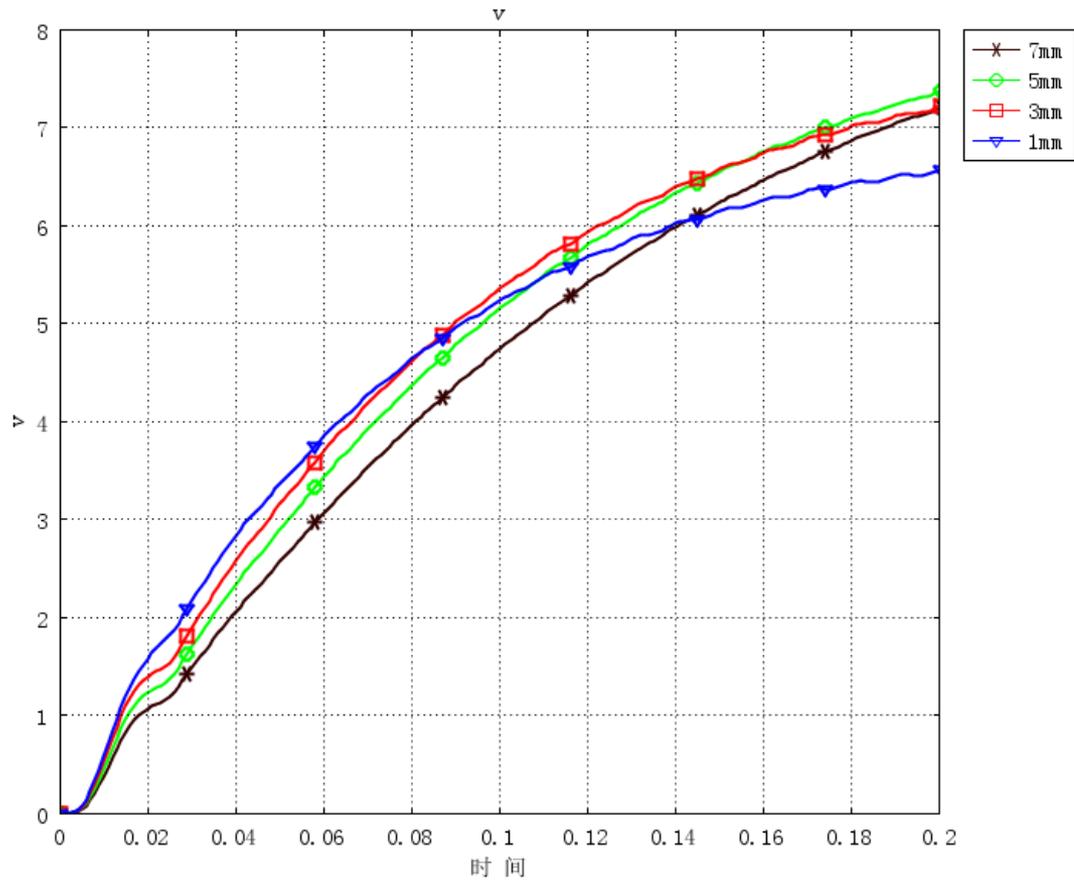
## 对不同气隙长度的推力仿真



运动状态下的推力曲线



## 对不同气隙长度的速度的仿真



运动状态下的速度变化曲线

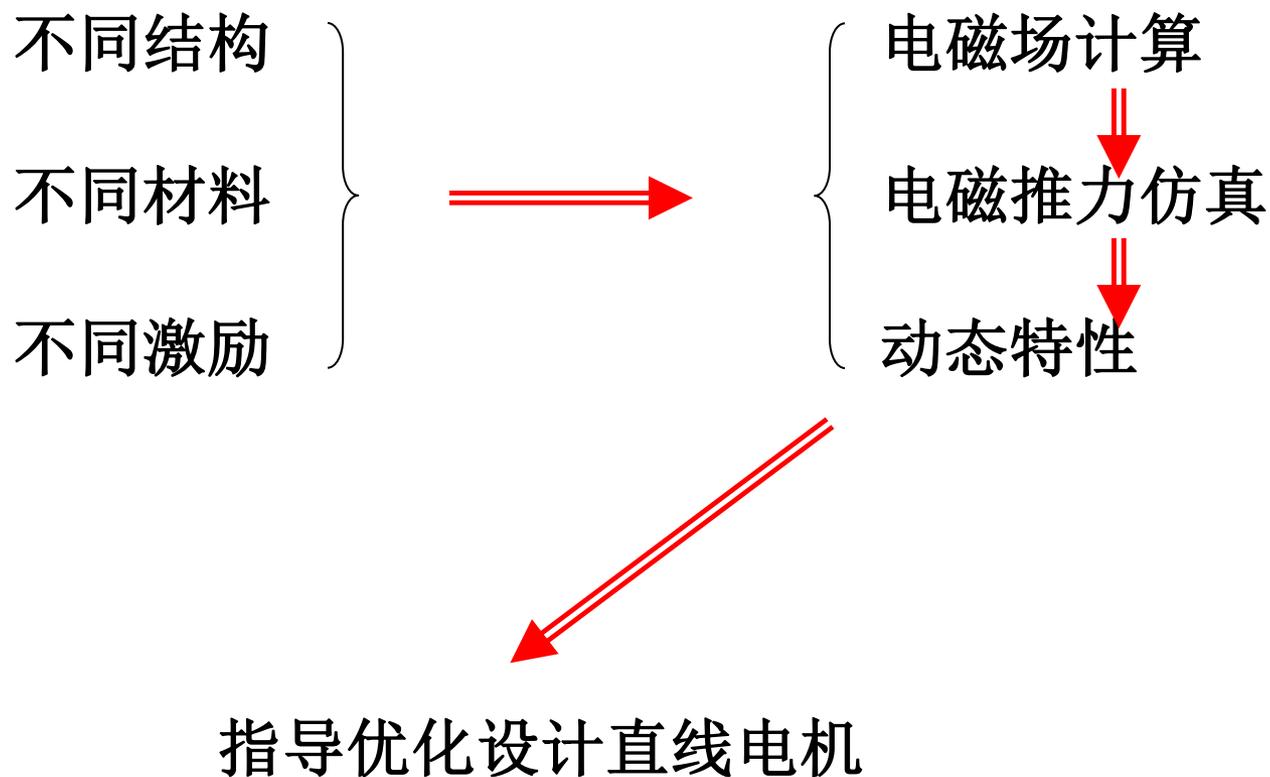




4

## 成果及实验

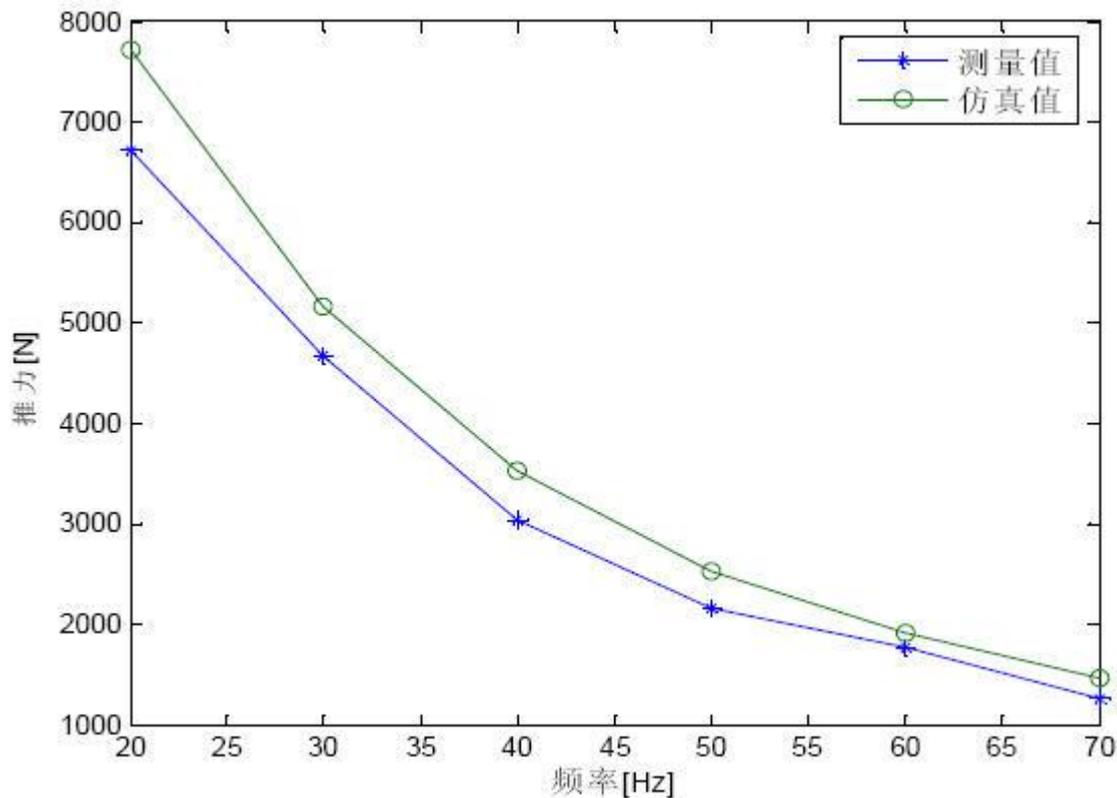




## 试验样机



## 不同频率下的推力仿真与实验值相比较



起动推力随电源的频率增加而减小

但电源频率的增加能够提高同步速度



进行取舍





谢谢!

