

# 测量光路中调焦音圈电机特性的仿真分析

洪盈传, 张建寰

(厦门大学 机电工程系 福建 厦门 361005)

**摘要** 对测量光路中调焦音圈电机的特性进行了分析,通过对音圈电机特性的仿真,定性分析音圈电机设计参数对电机特性的影响情况。从建立音圈电机的数学模型出发,利用仿真软件 Simulink 实现音圈电机的建模、特性仿真。得到仿真结果后,通过适当调整电机的设计参数,分析电机特性的变化。仿真结果表明,音圈电机动子质量、磁钢磁密等参数的变化都对电机的响应时间、平稳性、稳态误差有较大的影响。在原设计的基础上,可适当地增加电机动子的质量以及磁钢磁密来减小响应时间和稳态误差。这些分析结果为音圈电机的加工、测量基础光路中调焦功能的实现奠定了基础。

**关键词** 音圈电机; simulink; 仿真

中图分类号: TP202

文献标识码: A

文章编号: 1002-2333(2009)11-0063-03

## Simulate and Analysis the Performance of the Adjust Focus Voice-coil Actuator in Measuring Optical Path

HONG Ying-chuan, ZHANG Jian-huan

(Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** In order to analyzing the actuator characteristics effected by the motor design parameters, a way of simulating the characteristics of voice coil actuator by simulink was introduced. From the established mathematical model of voice-coil actuator, the model of voltage and displacement, voltage and speed, force and displacement was established. The simulation software simulink was used to realize the modeling and simulation of the voice-coil actuator, to get the result of simulation. Then, changed the design parameters, such as the quality of the actuator, or the flux density and so on, to observe the change of the system performance. Analyzing Results showed that, the changes of actuator quality and flux density and other parameters have great influence on the response time, stability and steady-state error of the actuator. In order to reduce the response time and the steady-state error of the actuator, the quality of actuator and the flux density was increased based on the original design. These analysis results build the basis for the processing of voice-coil actuator and the realization of the function of adjust focus in optical path.

**Key words:** voice coil actuators; simulink; simulation

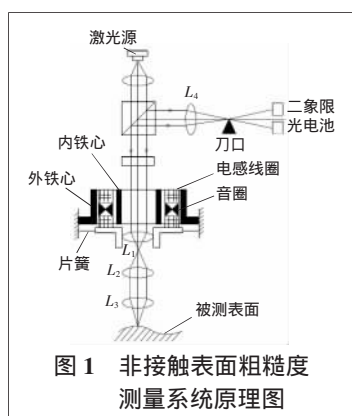


图1 非接触表面粗糙度测量系统原理图

音圈电机是一种特殊形式的直线驱动电机,具有结构简单、体积小、高速、高加速、响应快等特性。近年来,随着对高速、高精度定位系统性能要求的提高和音圈电机技术的迅速发展,音圈电机不仅被广泛用在磁

盘、激光唱片定位等精密定位系统中,在许多不同形式的高加速、高频激励上也得到广泛应用。如光学系统中透镜的定位,在柔性机器人中,使末端执行器快速、精确定位等。图1是音圈电机在非接触表面粗糙度测量中的应用原理图。

Simulink 是一个用来对动态系统进行建模、仿真和分析的软件包,它支持线性和非线性系统,能够在连续时间域、离散时间域或者混合时间域里进行建模,同时它是具有支持多种采样速率的系统。Simulink 为用户提供了用方框图进行建模的图形接口,采用这种结构化模型就像用笔和纸来画一样容易,它与传统的仿真软件用微分方程和差分方程相比,具有更直观、方便、灵活等特点<sup>[1]</sup>。本文从建立音圈电机的数学模型出发,利用 Simulink 对音圈电机进行建模仿真,并分析了电机的设计参数对响应时间特性、稳态特性等电机性能的影响。

基金项目 福建省青年人才基金项目(2006F3125)

福建省科技计划重点项目(2007H0034)

福建省新世纪优秀人才支持计划资助项目

社 2006.

[J].机械设计与制造,2009(5):94-96.

(编辑 立 明)

[5] 沈庆云,沈自林.基于UG的四连杆机构的运动分析仿真[J].轻工机械,2006,24(4):74-75.

[6] 雷逢奇,杨德军.基于Unigraphics的齿轮运动学和动力学分析[J].煤矿机械,2005(2):44-46.

[7] 焦丽丽,张达明.UG在机构运动分析应用中关键技术的研究

作者简介 程永奇(1980-),男,博士,讲师,主要从事塑性成形技术、成形装备等研究。

收稿日期 2009-09-16

1 音圈电机工作原理及其数学模型

1.1 音圈电机工作原理

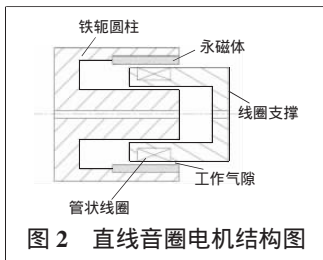


图2 直线音圈电机结构示意图

音圈电机的工作原理是依据安培力原理，即通电线圈(导体)放在磁场内就会产生力，力的大小与施加在线圈上的电流成比例。典型的直线音圈电机结构如图2所示。

在该音圈电机结构中，直线音圈电机就是位于径向电磁场内的一个管状线圈绕组。铁磁圆筒内部是由永久磁铁产生的磁场，这样的布置可使贴在线圈上的磁体具有相同的极性。

铁磁材料的内芯配置在线圈轴向中心线上，与永久磁体的一端相连，用来形成磁回路。

当给线圈通电时，根据安培力原理，它受到磁场作用，在线圈和磁体之间产生沿轴线方向的力。通电线圈两端电压的极性决定力的方向<sup>[2]</sup>。

1.2 音圈电机的数学模型

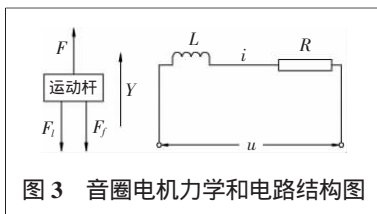


图3 音圈电机力学和电路结构图

音圈电机力学和电路结构<sup>[3]</sup>如图3所示，由该图可以得到两个动态平衡方程：电压平衡方程和动力平衡方程。

电压平衡方程和动力平衡方程分别为

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri + B_g l v \quad (1)$$

$$F - F_f - F_l = ma \quad (2)$$

式中  $i$  是音圈电机的工作电流， $L$  和  $R$  是电流回路的电感和电阻， $v$  是线圈在磁场中的运动速度， $B_g l$  是音圈电机的力常数， $F$  是线圈在磁场中产生的力， $F_f$  是动摩擦力， $F_l$  是负载阻力， $m$  是运动杆和线圈的质量， $a$  是运动件的加速度<sup>[4]</sup>。

通电线圈在磁场中产生的力为

$$F = B_g i l \quad (3)$$

运动位移  $x$ 、速度  $v$ 、加速度  $a$  之间存在关系

$$v = \frac{dx}{dt}, a = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (4)$$

若忽略空气阻力和摩擦力可得

$$L \frac{di}{dt} + Ri + B_g l \frac{dx}{dt} = u, m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = B_g i l \quad (5)$$

其中由于电感  $L$  很小，即数值上  $L \ll R$ ，不计，则音圈电机的电压-位移的数学模型可用下列的二阶系统表示

$$\frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_2 x = a_3 u \quad (6)$$

式中  $a_1 = \frac{kl}{Rm} + \frac{(B_g l)^2}{Rm}$ ， $a_2 = \frac{k}{m}$ ， $a_3 = \frac{B_g l}{Rm}$ ， $k$  为弹簧的弹性系数<sup>[5]</sup>。

同理可以得到音圈电机电压-力的数学模型

$$F + \frac{(B_g l)^2}{R} v = \frac{B_g l}{R} u \quad (7)$$

音圈电机力-位移的数学模型

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = \frac{F}{m} \quad (8)$$

2 Simulink 仿真分析

2.1 Simulink 模型的基本结构

一个典型的 Simulink 模型包括如下 3 种类型的元素：信号源模块、被模拟的系统模块、输出显示模块。Simulink 模型元素关联图如图 4 所示。其中，信号源为系统的输入，它包括常

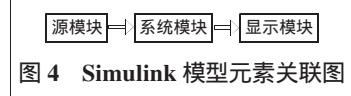


图4 Simulink 模型元素关联图

数信号源、函数信号发生器(如正弦波和阶跃函数波)等。在仿真过程中，采用矩形波作为音圈电机的驱动信号，它可以使音圈电机做周期性的往复运动。系统模块作为中心模块是 Simulink 仿真建模所要解决的主要部分，系统的输出由显示模块接受。输出显示的形式包括图形显示、示波器显示和输出到文件 3 种<sup>[6]</sup>。

2.2 Simulink 仿真模型和仿真结果

根据以上建好的系统数学模型，在 Simulink 环境下进行仿真，得到系统的仿真示意图如图 5 所示。音圈电机在力的作用下，做往复运动。因此在仿真模型中，输入信号采用矩形脉冲信号，符合电机实际运动的情况。但是在后面为了分析电机的设计参数对系统性能的影响，输入信号是采用阶跃信号，从而能直观地看到电机的响应时间、稳态特性等。系统的输出显示用示波器来接受得到的仿真曲线。系统模块是仿真的重点部分，要根据具体的数学模型而得到<sup>[7]</sup>。

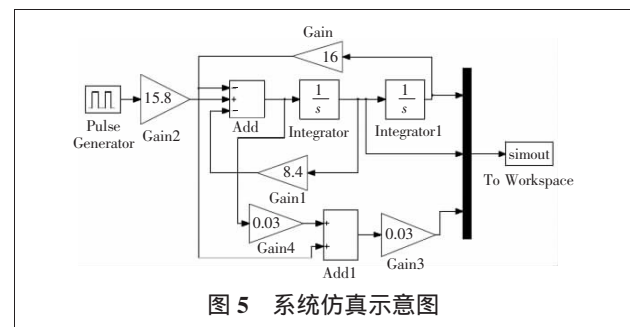


图5 系统仿真示意图

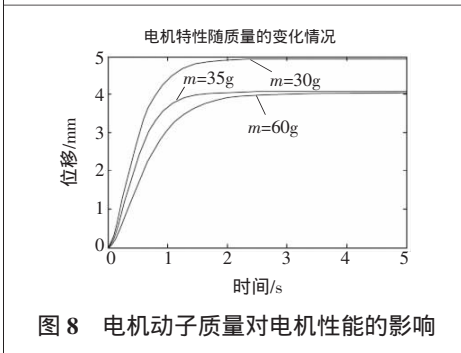
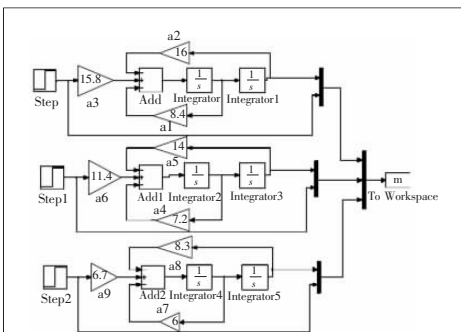
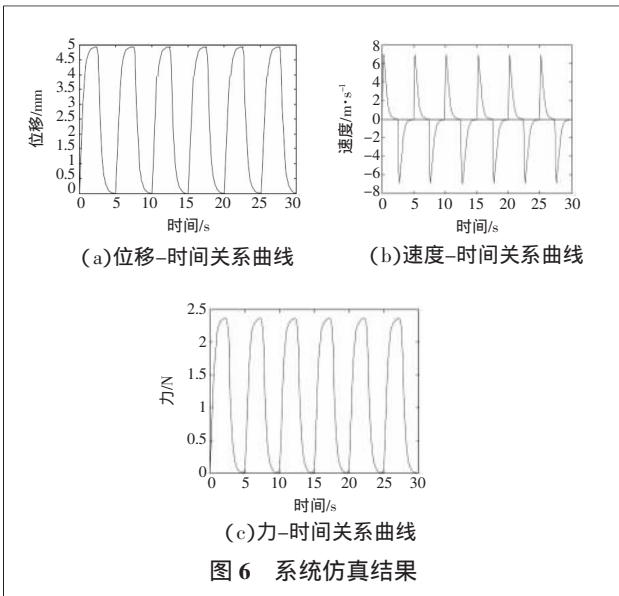
系统仿真模型建好后，就是设置仿真参数。仿真输入参数包括结构参数和参考输入参数两部分。根据设计好的音圈电机的设计参数，得到系统模型中的结构参数。此外，还有一些参考参数的设置，如仿真时间、步长、输入脉冲的幅值等。最后进行仿真，结果如图 6 所示。

仿真得到的 3 条曲线，分别是电压和位移、电压和速度、电压和力之间的关系曲线。从得到这 3 条曲线可以看出，所设计的音圈电机的参数，基本能满足要求，但还是可以通过修改结构参数来提高电机的性能。

2.3 参数的变化对电机性能的影响

(1) 电机定子质量对电机性能的影响

通过改变电机定子的质量，其它设计参数不变，从而

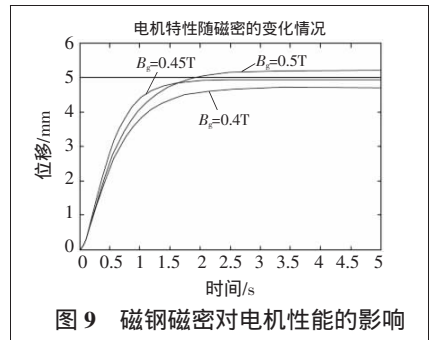


后面逐渐增加电机转子的质量, 所得的曲线有所改变。当转子质量为 30g 时, 电机的响应时间为  $t=2.2s$ , 随着质量的增大, 电机的响应时间分别是 2s 和 2.5s, 电机的稳态误差却是一直增大的趋势。所以, 可以得出结论, 电机的响应时间随着电机转子质量的增大, 先减小后增大, 中间存在一个临界的质量值, 使得响应时间达到最小值。但是, 质量的增大会使稳态误差一直变大。

(2)磁钢磁密对电机性能的影响

磁钢磁密  $B_g$  表示动圈所在处的平均气隙磁通密度, 电机绕组导体的总长度  $L$ , 这两个量是表征电机内部的重要参数, 只取决于所给电机的尺寸和材料, 其乘积  $BL$  是一个特性参数, 称为力常数。通过改变磁钢磁密, 来观察电机性能的变化。仿真结果如图 9 所示。

由图 9 知, 初始的磁钢磁密是 0.4T, 后面逐渐增加电机磁密, 所得的曲线有明显变化。当磁密时  $B_g=0.4T$  时, 响应时间为 2.2s, 稳态误差为 5.6%。



随着磁密的增大, 响应时间逐渐变大, 而稳态误差却是先变大后变小。所以得到结论是, 电机的稳态误差随着磁密的增大先变大后减小, 在  $B_g=0.45\sim 0.5T$  期间存在一个临界的磁密值, 使得稳态误差能达到最小值, 而电机的响应时间却是一直增大的趋势。

综上所述, 可以通过适当的增加  $m$  和  $B_g$  的数值, 来减小电机的响应时间和响应误差。

3 结论

通过对测量光路中调焦用音圈电机的仿真分析, 得到了以下两个结论:

(1)电机转子质量直接影响系统的运动频率, 同时对电机的响应时间、输出的稳态误差以及电机运动的平稳性都有较大的影响。为了减小电机的响应时间, 提高电机的运动平稳性, 都应该适当增加电机转子的质量。

(2)电机内部的重要参数磁钢磁密  $B_g$  对电机输出的稳态误差有很大的影响。本文利用 Simulink 仿真得到了一个最佳的磁钢磁密的范围, 即  $B_g$  在 0.45~0.5T 范围内, 能使电机的稳态误差达到最小值, 使电机的性能得到优化。

这些特性分析结果为音圈电机的加工、实现测量光路中调焦功能的实现奠定了基础。

[参考文献]

[1] 王沫然. Simulink 4 建模及动态仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.  
 [2] 张大卫, 冯晓梅. 音圈电机的技术原理[J]. 中北大学学报, 2006, 27(3): 224-228.  
 [3] 王贵林, 张湘, 段维然, 张武军. 音圈电机驱动的快速定位系统运动建模和参数辨识[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(1): 37-40.  
 [4] 张武军. 基于音圈电机驱动的快速定位系统设计及关键技术研究[D]. 湖南: 国防科学技术大学, 2006.  
 [5] 罗建强, 张伟军. 基于 LabVIEW 软件的音圈电机驱动系统模型辨识方法[J]. 计算机应用技术, 2007, 2(34): 29-32.  
 [6] 周开利, 邓春晖. Matlab 基础及其应用教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.  
 [7] 王哲, 叶晓倩, 邓俊. 基于 Matlab/Simulink 的直线发动机性能仿真研究[J]. 内燃机工程, 2009, 30(1): 69-73.

(编辑 吴天)

作者简介: 洪盈传(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学超精密测量研究工作;

张建寰(1966-), 男, 教授, 博士学位, 主要研究方向为光电检测。

收稿日期: 2009-09-14