

# 浙 江 大 学

## 本 科 生 毕 业 设 计 (论 文)



题目 基于振动模态分析的直驱柔性臂末端控制系统设计

Design of the tip control of the flexible beam driven by linear  
motor based on vibration modal analysis

姓名与学号 史彬 3120000555

指导教师 朱笑丛

年级与专业 2012 级机械电子工程

所在学院 机械工程学院

2016 年 6 月 8 日

## 浙江大学本科生毕业设计（论文）诚信承诺书

1. 本人郑重地承诺所呈交的毕业设计（论文），是在指导教师的指导下严格按照学校和学院有关规定完成的。
2. 本人在毕业设计（论文）中引用他人的观点和参考资料均加以注释和说明。
3. 本人承诺在毕业设计（论文）选题和研究内容过程中没有抄袭他人研究成果和伪造相关数据等行为。
4. 在毕业设计（论文）中对侵犯任何方面知识产权的行为，由本人承担相应的法律责任。

毕业论文（设计）作者签名：史彬

2016 年 6 月 16 日

# 本科生毕业设计（论文）任务书

一、题目：基于振动模态分析的直驱柔性臂末端控制系统设计

二、指导教师对毕业论文（设计）的进度安排及任务要求：

本课题要求了解柔性臂机械系统建模、系统分析和仿真的基本原理，了解结构振动模态的特点，了解末端运动控制的方法。对相关软件（Matlab, Solidworks, ANSYS）进行查阅并学习。综合对比已有的国内外相关技术，分析柔性臂控制尤其是基于结构振动模态特点进行运动控制的研究现状和关键技术、进展情况和存在问题等，系统地阐述本课题的研究优势以及研究价值。

主要工作任务是针对直线电机驱动的悬臂梁负载系统（柔性臂系统），进行系统机理建模和结构振动模态分析，并结合系统模态特点进行末端稳定运动控制。包括：（1）建立直线电机驱动的悬臂梁负载系统运动/动力学模型；（2）运用 ANSYS 或 Matlab 等软件，基于结构振动分析方法获得系统振动模态等特性；（3）设计直线电机驱动的悬臂梁负载系统状态反馈末端控制器并进行仿真测试。（4）进行系统试验验证和算法改进。

起讫日期 2015年10月 日至 2016年6月 日

指导教师（签名）朱笑之 职称 副教授

三、系或研究所审核意见：

达到毕业设计要求，同意毕业。

负责人（签名）朱笑之

2016年6月6日

毕业设计（论文）的进度安排

毕业设计（论文） 各阶段工作内容	工作进度周次安排																导师签名								
	秋冬学期								春夏学期																
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8		9	10	11	12	13	14	15	16
	检查日期																								
1. 毕业设计选题、布置毕业设计任务	—																								朱笑乙
2. 查阅文献、调研		—																							朱笑乙
3. 外文翻译				—																					朱笑乙
4. 文献综述					—																				朱笑乙
5. 开题报告							—																		朱笑乙
6. 硬件搭建									—																朱笑乙
7. 计算机仿真										—															朱笑乙
8. 实验																		—							朱笑乙
9. 撰写毕业设计（论文）																							—		朱笑乙

注：①本表由指导教师填写，各专科学科毕业设计负责人审核并签名。②各阶段工作内容应包括：查阅文献、文献综述、外文文献翻译、开题报告、调研、计算机仿真、设计绘图、实验、撰写毕业设计（论文）等，其中4-9栏目由指导教师布置、填写。③工作进度周次安排由指导教师相应周次里画横线表示，（毕设24周，周次可以写为3-4周、8-9周等）。④导师应在检查各阶段工作进度完成情况后签名，此计划可根据实际情况作调整。

## 摘要

本课题的内容为基于振动模态分析的直驱柔性臂末端控制系统设计。随着柔性构件越来越大被用于工业、医疗、控制、航空航天等领域，柔性构件是当今很多学科的重点研究方向之一。本课题从带有柔性末端的 HIWIN 直线电机平台出发，研究柔性系统的特性以及控制问题。一方面，本文通过直线电机系统，悬臂梁的建模以及模态分析给出了整个直驱柔性臂系统的近似的二阶动力学方程；另一方面搭建完善了硬件系统，通过辨识得到系统频域特性以及参数。通过以上两个部分，我们得到了系统的模型，在模型的基础上进行仿真和控制器的设计，另外通过实验对比分析，验证控制器的效果，完成了对整个直驱柔性臂系统的建模、分析、辨识、仿真和控制，为柔性系统的控制提供了一个工程实例。

**关键词：直驱柔性臂系统，模态分析，仿真与控制**

## Abstract

This thesis topic is Design of the tip control of the flexible beam driven by linear motor based on vibration modal analysis. With the flexible parts more and more applied in the field of industry, medicine, control and aerospace, the flexible control is one of the most important research directions in many subjects. The thesis based on the HIWIN linear motor with the flexible beam is to research on the characteristics of flexible systems and control problems. On the one hand, the modeling and modal analysis of the cantilever as well as the linear motor system are adopted to get the approximate two order dynamics equations of the system. On the other hand, the hardware platform is established and the frequency domain characteristics and parameters of the system are obtained. Through the aforementioned two parts, we get the model of the system, and subsequently the simulation and controller design based on the model. In addition, the effect of the controller should be verified, and the modeling, analysis, identification, simulation and control of the system are completed, which provides an engineering example for the study of the flexible systems.

**Key words: the flexible beam driven by the linear motor, modal analysis, simulation and control**

## 目录

摘要及目录	1
第一章 绪论	7
1.1. 系统辨识课题的研究背景和意义	7
1.2. 直驱柔性臂系统概况	7
1.3. 研究内容	10
1.3.1. 硬件搭建	10
1.3.2. 模态分析	10
1.3.3. 综合建模	10
1.3.4. 系统辨识	11
1.3.5. 系统仿真与控制	11
1.4. 论文结构	11
第二章 直驱柔性臂系统硬件设计	12
2.1. 直驱柔性臂系统	12
2.1.1. 直驱柔性臂系统组成	13
2.1.2. 直线电机系统组成	14
2.1.3. 柔性臂系统	16
2.2. 测量系统	18
2.2.1. 位置编码器	18
2.2.2. 雷尼绍激光编码器	18
2.2.3. 应变片的选用	19
2.2.4. 信号调理放大器	20
2.3. 本章小结	21
第三章 柔性臂模态分析	22
3.1. 模态分析概论	22
3.2. 基于 Ansys 的模态分析	23
3.2.1. 各阶模态分析	23
3.2.2. 仿真精度影响	31
3.2.3. 悬臂梁尺寸影响	33
3.2.4. 末端负载影响	37

3.2.5. 惯性加速度影响·····	39
3.3. 理论模态分析 ·····	40
3.3.1. 机理建模模态求解 ·····	41
3.3.2. 理论仿真模态对比 ·····	47
3.3.3. 含末端悬臂梁的理论分析 ·····	48
3.3.4. 非惯性状态下悬臂梁的理论模态 ·····	51
3.4. 试验模态 ·····	56
3.5. 本章小结 ·····	57
附件一：B4 实验介绍 ·····	58
附件二：模态叠加法及模态简正 ·····	60
<b>第四章 直驱柔性臂系统综合建模·····</b>	<b>61</b>
4.1. 柔性臂的建模 ·····	62
4.1.1. 挠度时变部分·····	62
4.1.2. 挠度模态部分·····	63
4.2. 直线电机滑块建模 ·····	64
4.2.1. 直线电机柔性臂系统介绍 ·····	64
4.2.2. 滑块建模 ·····	66
4.2.3. 滑块动力学分析 ·····	68
4.3. 测量电路及原理 ·····	71
4.3.1. 电阻应变测量原理 ·····	72
4.3.2. 电阻应变测量电路 ·····	73
4.3.3. 应变和模态的关系 ·····	74
4.3.4. 测量系统方程 ·····	76
4.4. 直线电机柔性臂系统综合建模 ·····	78
4.5. 本章小结 ·····	81
<b>第五章 直驱柔性臂系统辨识·····</b>	<b>82</b>
5.1. 系统辨识 ·····	82
5.1.1. 模型结构选择·····	84
5.1.2. 拟合准则·····	84



5.1.3. 实验设计	85
5.1.4. 模型验证	85
5.2. 系统频域辨识	86
5.2.1. 输入信号	86
5.2.2. 频域辨识工具	87
5.2.3. 电机频域辨识	89
5.2.4. 直驱柔性臂频域辨识	90
5.3. 参数辨识	95
5.3.1. 参数辨识基础	95
5.3.2. 直驱柔性臂系统参数辨识	96
5.3.3. 参数获取	99
5.4. 本章小结	106
<b>第六章 直驱柔性臂系统仿真与控制</b>	<b>107</b>
6.1. 仿真模型的建立	108
6.1.1. 仿真状态空间模型的建立	108
6.1.2. 编写仿真文件	108
6.2. 开环时域特性	111
6.2.1. 仿真结构示意图	111
6.2.2. 参考信号	112
6.2.3. 末端位移信号	114
6.2.4. 其他信号	116
6.3. 开环频率特性	118
6.3.1. 末端位移-输入系统分析	119
6.3.2. 末端速度-输入系统分析	121
6.4. 闭环控制器设计	122
6.4.1. 直线电机 PID 控制	123
6.4.2. 直驱柔性臂 PID 控制	127
6.4.3. 直驱柔性臂的末端整定算法	134
6.5. 实验以及仿真对比分析	137

6. 6. 本章小结.....	140
<b>第七章 总结展望</b> .....	<b>141</b>
7. 1. 总结.....	141
7. 2. 展望.....	141
<b>参考文献</b> .....	<b>143</b>
<b>致谢</b> .....	<b>146</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 系统辨识课题的研究背景和意义

随着工程技术的发展，工程结构的设计越来越复杂。被控对象的研究与控制器的设计也越来越复杂。作为现代工程领域的一项有着重要的工程应用价值和前景的高新技术，振动控制技术成为工程界的研究热点之一。同时广泛地应用于机械工程，土木工程，航空航天，水利海洋，交通运输等领域，主要用于解决结构的动力响应主动控制和结构动稳定性主动控制这两类问题<sup>[1,2]</sup>。

同时，随着现代机械向高速、高精度、高负载自重比的发展，由于运动过程中关节和连杆的柔性效应增加，使结构发生变形并使任务执行的精度降低，因而必须考虑柔性特征，柔性机械是非常复杂的动力学系统，常常具有非线性，强耦合等特点。动力学建模为控制器设计提供依据。至今，柔性臂振动控制的研究并不尽入人意，尤其是复杂的柔性系统<sup>[2]</sup>。因此，我们的课题研究也就有了实际工程意义，在现实工程与生活中存在许多应用。柔性控制是当今很多学科的重点研究方向之一，随着柔性构件越来越多地应用于工业、医疗、控制、航空航天等领域，柔性系统的控制技术就显得举足轻重。当今有许多具有柔性臂负载的机电系统，例如：天线展开机构、太阳翼展开驱动系统、天线驱动系统、航天飞机的机翼、工业机器人柔性末端、工程中的梁板结构等（如图 1-1、图 1-2），因此柔性系统控制技术，尤其是基于振动模态分析的直驱柔性臂末端控制系统设计就具有很高的实际研究价值。

在本课题中，我们的研究平台是直驱柔性臂系统，研究对象为直线电机以及柔性臂末端。直线电机适用于高精度的直线运动，展现出电能到机械能的无接触转换的优良特性。具有响应时间短、定位精度高、运动平稳、维护简单、行程理论上不受限制的优点，可以较真实地模拟出在生产生活中的各种工程实际情况。通过研究直驱柔性臂系统这种实际的柔性系统，可以进一步设计控制系统，从而可以解决工程实际中的部分与柔性系统相关的控制问题。主要研究内容，包括建模、分析（包括模态分析、时域分析、频域分析等）、辨识、仿真、控制等。



图 1-1. 太阳翼展开系统



图 1-2. SCARA 机器人

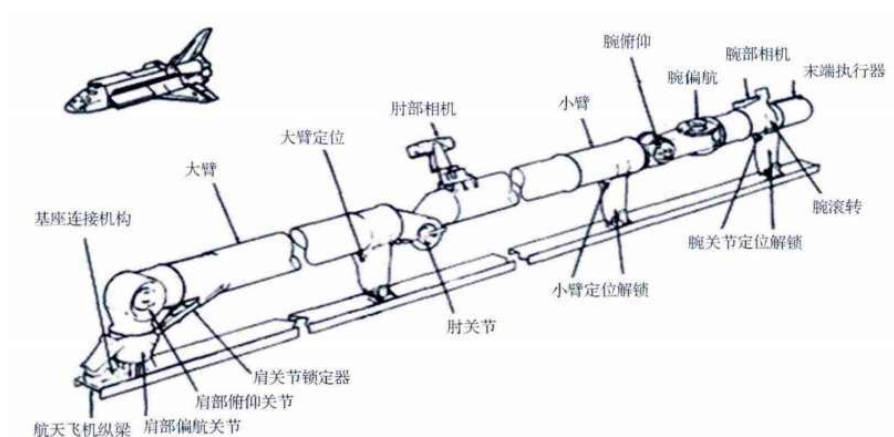


图 1-3. 航天飞机遥操作机械臂系统

## 1.2 直驱柔性臂系统概况

在生产生活中，经常需要高速扫描，高加速度，高精度的直线运动，与传统的旋转马达或者丝杆传动相比，直线电机展现出电能到机械能的无接触转换的优良特性<sup>[3]</sup>（如图 1-4），具有响应时间短、定位精度高、运动平稳、维护简单、行程理论上不受限制的优点。

直驱柔性臂系统是在直线电机垂直运动方向安装柔性末端（悬臂梁），在工程中广泛应用，如天线展开机构、太阳翼展开驱动系统、天线驱动系统、航天飞机机翼、工业机器人柔性末端、微硬盘柔性臂结构等。但是当安装的末端较薄时，悬臂梁刚度不够，存在高频的振动模态使整个系统的高频成分不能忽略，仅控制电机平稳运动会导致末端剧烈振动。悬臂梁的模态分析比较成熟，但是电机和悬臂梁的耦合使完整系统的模态分析比较困难。控制系统的设计不仅需要使直线电机依然保持平稳运动，而且需要末端平稳运动，抑制振动，从而适应生产与工程

的需要。

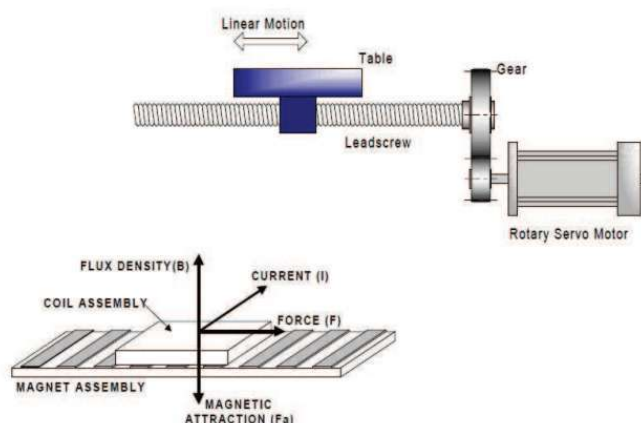


图 1-4. 旋转电机与直线电机对比<sup>[3]</sup>

图 1-5 为实验所用直驱柔性臂系统，左侧为直线电机 HIWIN LMCD8，通过 MicroE Mercury II Model SP 4800 位置编码器来进行实时测量，并提供多重反馈信号的测量传感器，来测量电机的实时位置<sup>[5]</sup>。末端为柔性块，即我们所说的悬臂梁，柔性块末端为雷尼绍激光传感器，用来测量末端的位置。柔性臂中间的部分可以通过增加应变片来获取更多的信息。



图 1-5. 直驱柔性臂系统结构<sup>[5]</sup>

### 1.3 研究内容

本课题主要工作任务是针对直线电机驱动的悬臂梁负载系统，进行系统机理建模和结构振动模态分析，并结合系统模态特点进行末端稳定运动控制。包括：

（1）建立直线电机驱动的悬臂梁负载系统运动/动力学模型；（2）运用 Ansys 及 Matlab 等软件，基于结构振动分析方法获得系统振动模态等特性；（3）实验平台搭建以及直驱柔性臂系统辨识；（4）直驱柔性臂系统状态反馈末端仿真与测试；（5）直驱柔性臂系统控制器选取设计、实验验证以及模型改进。

#### 1.3.1 硬件搭建

硬件系统包括直驱柔性臂系统和测量系统两部分。直线电机系统是 HIWIN 公司生产的商业单轴定位系统。该系统由三部分组成：直线电机平台，直线电机驱动器，及 dSPACE 的工控主机。柔性臂的尺寸为 370.0\*2.60\*40.00（各尺寸单位为 mm）的铝合金。测量系统包括直线电机编码器，应变片，激光编码器等。研究内容为完成硬件环境的搭建和调试。

#### 1.3.2 模态分析

模态分析主要有以下内容（1）比较不同尺寸、是否含末端结构、是否存在惯性加速度的悬臂梁的Ansys模态、机理模态及试验模态，分析原因。（2）Ansys快速模态分析软件平台搭建，能实现悬臂梁参数快速分析出模态。（3）在第四章悬臂梁和直线电机的耦合建模，我们可以通过振动力学模态综合法来分析综合系统的模态，模态分析的主要关注点为模态的频率，以及对应该频率的振型。（4）另外，我们还需要对比前面得到的两种模态，和通过实验以及系统辨识得到的试验模态，观察及分析理论和实验差异。

#### 1.3.3 综合建模

本节内容主要希望完成以下模型的建立（1）柔性臂的建模；（2）直线电机滑块建模；（3）测量电路原理及动力学方程；（4）直驱柔性臂系统综合建模。对整个系统进行综合建模，给出系统的较为精确的数学模型，为下面系统的辨识，仿真，控制提供基础。

#### 1.3.4 系统辨识

本节希望完成两个部分：系统频域辨识，了解系统频域特性从而了解模态等对系统的影响；系统参数辨识，为提高系统模型的准确性以及后面控制器的仿真与设计提供基础。

#### 1.3.5 系统仿真与控制

本部分为直驱柔性臂系统的仿真与控制。仿真与控制主要基于Matlab的软件平台，该平台的作用和预期效果为：（1）通过直驱柔性臂系统建模并化简为传递函数以及状态空间形式，利用Matlab中的Simulink等模拟仿真，可以得到系统在不同的输入下的响应；（2）选取或设计不同的控制器，观察及分析系统在不同控制系统的作用下的响应；（3）将仿真结果与实验的结果对比，分析误差以及产生误差的原因。而为了验证实验正确，已经获得仿真效果较好的控制器希望应用在实验中从而可以进行实验结果的对比分析以及改进。

### 1.4 论文结构

全文共分为八章，文章结构如下：

第一章为绪论，介绍研究的背景、意义以及研究内容；

第二章为硬件搭建，分别从直驱柔性臂系统和测试系统两部分介绍实验硬件环境；

第三章为模态分析，分别从仿真模态和理论模态两方面，分析不同受力以及运动状态下的不同尺寸或形状的悬臂梁的模态；

第四章为系统综合建模，根据直驱柔性臂系统，测量电路的动力学给出了综合系统的状态空间模型；

第五章为系统辨识，介绍系统辨识方法，后两节分别进行了系统频域辨识以及参数辨识两部分内容；给出了系统近似的传递函数。

第六章为系统仿真与控制，通过前面给出的系统模型，加入控制算法进行系统仿真；

第七章为项目总结和展望。