

研究生毕业论文摘要汇编

1981 — 1991



中国空间技术研究院
北京控制工程研究所

《研究生毕业论文摘要汇编》

(1981 ~ 1991)

编委会名单

主 编：邹广瑞

副主编：齐汝先 张翰英

编 委：邹广瑞 齐汝先 张翰英 刘承熙 林来兴

陈义庆 吴宏鑫 朱德懋 廖炯生 吕振铎

成 器 龚德荣 胡玉琛 严拱天 郭宝柱

王国鼎 马芝萍 洪敬尧

责任编辑：李 华 魏敬尧



编 者 的 话

我所早在五十年代就开始了研究生的培养工作,新、老导师付出了大量心血,培育出一批祖国建设中所急需的有用人才。这些研究生在不同的工作岗位上发挥着重要的作用,他们的论文被不同程度地用在航天控制及国民经济建设中。为了便于今后在培养研究生工作和型号任务研制工作中作参考,为了总结和交流,特收集和整理了我所1981年—1991年研究生学位论文详细摘要107篇(其中博士论文摘要6篇,硕士论文摘要101篇),编为《研究生毕业论文摘要汇编》。

《汇编》反映了我所研究生论文的水平 and 特点,是我所导师、研究生和教育工作者辛勤劳动的结晶。希望在航天精神指引下,把我所研究生培养工作提高到一个新的水平,为祖国培养出更多更好的人才,为航天事业做出更大贡献。

由于编者水平有限,《汇编》难免有不足之处,欢迎批评指正。文摘的全文均收藏在本所图书馆,需用的同志可前去查阅。

在本书编辑过程中,得到了所领导、研究生导师、指导教师、研究生及有关人员的支持与协助,在此深表谢意。

编委会

1992.6

目 次

自动控制理论及应用

博 士 生 部 分

基于多处理器分布式结构空间飞行器姿态实时确定系统及实现·····	裘 刚 (1)
广义系统的稳定性及其在挠性空间飞行器在控制系统中的应用·····	郑 兵 (4)
空间应用机器人动力学与控制·····	高 毅 (6)
机动挠性多体空间飞行器的动力学与非线性控制·····	金 梁 (8)
自适应控制的鲁棒性研究·····	李树权 (11)
移动式机器人视觉定性导航·····	黄玉明 (13)

硕 士 生 部 分

液体燃料晃动对自旋卫星运动稳定性的影响·····	卫永华 (15)
适合于低轨道长寿命三轴稳定对地定向卫星的一种姿态控制器·····	宋江东 (16)
斜装反作用飞轮在卫星姿态控制系统中的应用·····	谭兆治 (18)
利用斜装动量轮的加速过程实现卫星姿态捕获·····	孙宝祥 (20)
一类线性最优滤波的多级分块分解算法及在人造卫星姿态确定中的应用 ·····	罗续成 (24)
斜装反作用飞轮三轴姿态稳定·····	徐 凡 (26)
控制力矩陀螺作为执行机构的对地定向卫星姿态控制系统设计·····	陈毅松 (27)
广播卫星两级姿态控制系统的设计·····	郑丽霞 (29)
单元多分布类型单调关联系统可靠性近似置信限·····	朱晓波 (32)
通信卫星天线定向机构的设计计算方法研究·····	陈国栋 (35)
磁控系统在飞轮卸载和姿态捕获中的应用研究·····	李 静 (37)
卫星惯性敏感器数字输出电路的研究·····	陆晓敏 (40)
冗余敏感器的最优安装与敏感器故障的自适应控制·····	徐佳凡 (43)
二值图象编码压缩的若干方法与微机模拟实现·····	赵宏民 (45)
采用星-星跟踪测量实现近地卫星上定轨的方法研究·····	李 果 (47)
挠性卫星横杆姿态稳定系统的设计与分析·····	尹树梅 (49)
单元肼催化分解发动机的解析和试验研究·····	边炳秀 (51)
故障树分析的新算法及程序研究·····	段志刚 (54)
广播卫星在转移轨道远地点机动期间三轴稳定姿态控制·····	罗建三 (56)

新的有限元质量阵和刚度阵概念用于具有不对称挠性附件的飞行器

建模及控制系统的初步设计·····	黄加付 (58)
三轴稳定广播卫星位置保持机动期间滚动/偏航姿态控制系统的设计分析 ·····	于 杉 (60)
基本能观系统及其在卫星姿态测量中的应用·····	于 浩 (62)
一种新型单板/片机开发系统 DESCO 的设计与实现 ·····	宋欣光 (64)
卫星姿态控制飞轮无刷直流电机最佳磁场及性能分析·····	郭 伟 (66)
模型参考自适应控制理论及其在精密转台上的应用·····	王晶文 (68)
具有监督控制器的自适应控制在真空加热炉中的应用·····	毕 松 (70)
卫星太阳帆板展开姿态动力学研究及通用软件设计·····	王奋飞 (71)
ECD 工业控制语言开发系统程序库及单片机工业控制机的应用 ·····	高利军 (73)
用矩阵运算实现 FME (C) A 的计算机算法和程序研制 ·····	朱北国 (75)
一种变权自校正控制器算法·····	潘志忠 (77)
飞轮控制及其抑制内干扰能力的研究·····	唐 峥 (79)
星上动平衡机构的研究·····	赵 宏 (81)
广播卫星在转移轨道机动期间液体晃动对姿态的影响·····	杨葆华 (84)
具有极值控制和人造环节的全系数自适应控制在板纸生产过程中的应用 ·····	胡 军 (86)
远地点点火期间卫星姿态控制及其技术实现·····	李 枫 (88)
以快速预报法为基础的载人飞船返回地球的轨道制控方法研究·····	李善发 (91)
高性能机器人控制器中多主 STD 控制机系统板设计 ·····	周宝星 (95)
北京市公共交通系统线路运营与调度建模·····	林宗利 (97)
星敏传感器测定卫星姿态的若干总体设计问题·····	刘 鑫 (99)
空间接近和对接过程的多自由度半物理仿真方法研究·····	张文生 (102)
用地面微机实现卫星星载计算机控制软件的测试检验·····	唐东良 (105)
水轮机控制系统自适应鲁棒控制研究·····	李 捷 (107)
三轴稳定挠性卫星的反作用喷气姿态控制系统的设计·····	杨 涛 (110)
用现代控制的方法设计带挠性帆板卫星的轮控系统·····	张灵慧 (112)
双自旋卫星摆式被动章动阻尼器的研究与设计·····	王 钊 (114)
细长体双自旋卫星消旋主动章动控制的研究·····	李 坤 (116)
双脉冲控制器参数优选·····	张传军 (118)
反坦克导弹末制导控制器设计及仿真研究·····	周世安 (120)
卡尔曼滤波算法及在自旋卫星动态精确姿态确定中应用的研究·····	魏向东 (122)
交会对接控制和测量的仿真·····	李 灿 (125)
黄金分割在鲁棒自适应控制器设计中的应用·····	解永春 (128)

自动化仪表与装置

晶体管有效体电阻对对数、反对数直有效交流——直流转换器的影响

..... 卢升思 (132)

具有辐射边界和接触界面的自动温控系统温度场的有限元计算在静态

地平仪热设计中的应用..... 俞 宣 (134)

精密宽频带运算放大器结构设计和参数选择的有效方法..... 杜 忠 (136)

逐次逼近式 A/D 转换器的非线性误差自校正..... 解俊霞 (139)

一种新型工业质量控制方法——印刷电路板表面缺陷自动识别..... 左京九 (140)

红外地球敏感器光学系统优化设计..... 谷 岩 (142)

卫星姿态控制发动机复合传热问题的数值计算与试验研究..... 朱庆红 (144)

红外地球敏感器处理电路优化设计..... 张 陶 (146)

太阳帆板驱动机构的研究..... 刘松萝 (148)

太阳电池阵驱动机构摩擦力矩及干扰力矩的测试和分析..... 黄晓海 (150)

飞轮状态反馈控制系统的研究与试验..... 赵洪峰 (153)

表面张力储箱推进剂管理装置瞬变环境描述及其瞬态蓄留能力的研究

..... 张 静 (156)

首都机场机坪输油管网双冗余计算机过程控制系统方案设计与实现..... 刘 甦 (157)

DFH-3 广播卫星表面张力储箱液体结构耦合动力分析..... 魏延明 (159)

电路图读取系统的实验研究..... 李文德 (161)

油库计算机监控系统实用软件开发..... 王英伟 (162)

星上电子产品机箱布线 CAD 系统..... 梁 军 (164)

DFH-3 广播通讯卫星统一推进系统数学仿真..... 陈 全 (166)

计 算 机 应 用

连续系统仿真语言 SBASIC..... 方玉明 (168)

微处理机和数据压缩技术在空间遥测系统中的应用..... 范士明 (173)

负荷分担方式双机系统容错设计..... 王东盛 (175)

图象传输系统信道噪声影响的检测与修复..... 李文新 (177)

CAMAC-GPIB 智能接口的研制..... 钱艳丽 (179)

分布降级容错计算机系统的设计和实现..... 杨孟飞 (181)

多变量系数之和为单位阵 I 的全系数自适应控制方法..... 郑卫强 (183)

一种令牌式布局网络接口控制器的设计与实现..... 苏耀辉 (185)

MUDESRIE——一种新型的交互式直接执行的连续系统仿真语言..... 王志凌 (186)

卫星敏感器系统的故障检测..... 杜和青 (188)

微型机实时操作系统 LBRTOS 的实现和分析	曹小洪 (190)
实时处理软件的通用容错机构设计与实现	邓 双 (192)
令牌总线智能网络适配器 INA796 的设计与实现	季学军 (194)
BICENET 通信协议及高层软件的设计与实现	周 斌 (196)
一种面向总线的现场开发系统	韩春光 (197)
用容异技术实现异型系统之间的资源共享	陈 平 (199)
卫星控制系统半物理仿真的接口方案设计与实现	赵玉清 (201)
一种工业控制用的通信前置处理机 (STDFEP)	原民辉 (203)
STD 总线双单片机容错模块系统的设计与实现	赵 健 (205)
分布式容错计算机系统软件设计与实现	张清华 (207)
卫星电源故障诊断专家系统	韩 巍 (209)
模块级冷备份容错计算机的切换管理设计	刘铁军 (212)
三轴转台分布式计算机控制系统接口设计和后台机监控管理软件实现	余 皓 (214)
图象处理软件包的研制及应用	邱春晓 (217)
工业控制网络 PROFIBBUS 的设计与实现	吴建安 (219)
采用新型高性能 CPU 芯片的 16 位 STD 总线工业控制机的设计与实现	韩 力 (221)
生产线复杂背景实时车型及工件自动识别系统	刘育红 (225)
C 语言反编译器的研究与实现	李 军 (228)
分散控制系统的通用 CRT 操作站软件	朱丹红 (230)
容错式民航自动转报系统的设计与实现	陈志恒 (232)
长周期信号高精度数字锁相环路滤波器的设计与实现	高 屹 (234)
实时数据库管理系统的设计与实现	周传建 (236)

基于多处理器分布式结构空间飞行器 姿态实时确定系统及实现

博 士 生 袁 刚 导 师 屠善澄 (研究员) 指导教师

学习专业 自动控制理论及应用

毕业时间 1986年7月

当代微电子技术与微处理器技术,使传统的测量、控制系统设计、实现发生了巨大的变革。采用大规模集成电路 (LSI)、超大规模集成电路 (VLSI) 设计高度智能化、自动化系统,实现复杂系统过程实时最优估计、最优控制,已成为测控自动化系统的核心,代表了新一代测控系统、技术的发展方向。

空间飞行器姿态实时确定系统 (SARDS-1 Spacecraft Attitude Real-time Determination System) 综合微处理器系统、VLSI 技术、现代控制系统理论及信号处理技术,采用多 CPU 并发处理分布式系统结构,统一实现了遥测信号实时处理、卫星姿态实时确定、飞行遥测数据记录,保存,卫星星一地回路仿真、测试及系统大容量数据、图形、字符实时处理、通讯功能,成为一个微处理器化、智能化、自动化、可编程、可重组织,可支持多种型号卫星姿态实时确定任务的多功能微型化测控系统。SARDS 系统的第一个设计目标是支持试验通讯卫星、实用通讯卫星及其他地球同步卫星转移轨道、准同步轨道、同步轨道卫星姿态实时确定任务。在实用通讯卫星发射中, SARDS 系统成功地完成了转移轨道 (卫星入轨姿态,远地点点火姿态)、准同步轨道、同步轨道实时姿态确定任务。实际执行飞行任务表明,采用微处理器实现的 SARDS 系统实时响应性能、姿态确定精度等各项系统指标都达到或超过通用计算机实现的测控系统。从而为进一步增广实现全微处理器化实时测控系统提供了良好的系统硬件、软件设计方法及实现模式。

系 统 结 构

SARDS 系统本质上是一台 MIMD (多指令流多数据流) 实时姿态处理机系统,整个姿态确定实时进程是经过不断处理、变换,具有不同表示的姿态数据流实时驱动。遥测信号实时处理有限自动机控制逻辑,实时 Kalman 滤波姿态确定多处理器控制模型及系统 I/O 控制器等子系统的控制流设计,都与姿态数据流的展开紧密结合。

SARDS 系统采用多处理器分布式结构。各子系统控制器都采用相容的 16 位 CPU 及各类可编程微处理器芯片实现,系统包括 6 块微处理器板,板上有 8 个处理器/协处理器,其中有 5 块板是根据系统遥测信号实时处理,姿态确定, Kalman 滤波,系统 I/O 控制器和仿真、测试功能的需要专门设计的。包括多处理器环境软件、实时处理软件、系统测试、仿真

和其余支持软件在内,全部系统软件有大约20000条指令。大部分软件固化在 EPROM 中以便系统能在恶劣环境中工作。

系统数学模型

SARDS 系统直接受卫星遥测信号流驱动。系统全部进程都由实时事件驱动,多处理器多道进程的就绪、激活、运行及消亡状态都与卫星遥测信号严格同步。遥测信号处理器不仅要实时完成信号变换、数据编辑、数据剔野等数据预处理工作,还必须在实时接收环境下具有充分强的自动识别、自动恢复、跟踪、同步等抗干扰功能。建立在有限自动机原理和遥测信号流相应的数据结构基础上的实时处理算法简述如下:

地面接收、解调的红外地平仪、太阳敏感器脉冲信号流(叠加上各个环节产生的各种干扰、误码脉冲信号),用数组表示为

$$R(k)=[r_{ij}(k)] \quad (1)$$

定义遥测信号处理器根据星上姿态脉冲发生原理实现的姿态脉冲信号数组为

$$A(k)=[a_{ij}(k)] \quad (2)$$

$R(k)$ 和 $A(k)$ 之间关系可以用一不可逆映射 Φ 表示:

$$\Phi: r_{ij}(k) \rightarrow a_{ij}(k) \quad i \leq p \quad (3)$$

映射 Φ 是满的而不一一对应 (Surjection), 这是由于遥测传输, 接收及解调过程中产生各种误码。设有限自动机 M 为一五元组:

$$|M|=(\bar{R}^*, \Theta, \bar{A}, \Delta, \lambda) \quad (4)$$

其中 $\bar{R}^*$ 为有限输入脉冲信号集, Θ 为有限输出基本量测量集, $\bar{A}$ 为有限姿态脉冲信号状态集, Δ 为状态转移函数, λ 为输出函数, 建立有限自动机模型的关键是确定输入脉冲信号串驱动下的状态转移函数 Δ 的迁移路径。有限自动机 $|M|$ 的控制逻辑是专门设计了一块 CPU 为 8086-2 的遥测信号处理器 (SP) 实现的。

实时 Kalman 滤波器模型和结构

建立在平方根算法基础上的 UDU' 分解算法, 具有数值精度高, 计算稳定等优良的数学特性。试图把适合于通用计算机上采用高级语言实现的 UDU' 算法移植到微处理器实时环境下, 是一件困难的工作, 但是优良的数值性质, 可以在不牺牲系统其他特性条件下通过高质量的软件设计来获得, 为了高精度、高可靠、微处理器化实时 Kalman 滤波器的实现, 专门设计一块 CPU 为 8086-2, 并配有字长 80 位的高速浮点协处理器 8087 的 Kalman 滤波板 (KF)。

SARDS 系统结构是基于多处理器平行处理, 为了增强 SP 和 KF 间实时传递量测量的能力, 除了系统总线控制器之外, 专门建立了一个先入先出 (FIFO) 量测序列存储器组 (MQR) 作为 KF 和 SP 之间的数据通道。多处理器实时 Kalman 滤波姿态确定多道进程结构如图 2 所示。标量序贯处理的非线性 Kalman 滤波算法及 UDU' 算法, 提高了姿态确定的精度、稳定性和速度。

系统 I/O 和仿真的模型、结构

系统 I/O 的基本功能包括:

- (1) 各种系统参数输出编辑、显示;
- (2) 动力学过程 n 条曲线实时绘制;
- (3) 系统实时时钟管理、显示;
- (4) 实时远程通讯输出。

为此专门设计了一块 CPU 为 8086-2 的控制板 (IOP) 和一块 CPU 为 8088 的网络控制板 (NCP)。

为了进行系统测试及实时仿真,提出了遥测信号地面实时插补、调节数学模型,设计了 CPU 为 8088 的信号前置处理器 (SS)。

系统信息分布模型和结构

把系统信息容量、系统估计精度、系统能观度通过 Fisher 信息矩阵联系在一起,给出定性、定量及几何分布性质的描述。

找出量测模型包含信息最少、估计精度最差的方向,改进量测模型信息分布不均匀度,提高估计精度最差的下界值。必要时,删去一些估计不精确的变量或变量的线性组合,对估计参数空间作降低处理。以避免 Kalman 滤波器中形成病态矩阵,避免估计器数值计算不稳定、数值发散。利用 Fisher 信息矩阵分析软件,还对实时姿态滤波收敛性态加以在线监视。

系统飞行试验和应用

SARDS-1 系统对试验通讯卫星、实用通讯卫星进行的实际飞行试验表明,系统实时姿态确定精度,特别是转移轨道点火姿态实时确定精度,已远远超出系统预定的设计精度。飞行试验证明本文建立的系统模型、系统结构及系统设计、实现是成功的。

结 论

本文的主要特征与工程意义是:

从硬件与软件,各类数学模型与计算机系统结构的高度结合上,创建了一个全新的卫星——地面微处理器化实时信息处理环境;为进一步实现微型化卫星地面实时处理系统,最终实现星上自主控制,提供了一个新的实现模式与结构。

广义系统的稳定性及其在挠性空间 飞行器在控制系统中的应用

博 士 生 郑 兵

导 师 杨嘉辉 (研究员)

指导教师 严拱天 (高级工程师)

学习专业 自动控制理论及应用 毕业时间 1986年7月

本文首先引入广义系统的脉冲稳定、指数稳定以及强稳定等概念,进而推导出广义系统的脉冲稳定、指数稳定及强稳定应满足的条件,同时讨论了通过状态反馈使广义系统的闭环结构满足脉冲稳定、指数稳定及强稳定的条件。

由于复杂的工程系统,如大型挠性空间结构控制系统不可避免地存在模型与参数误差。量测与控制不尽完善引起的误差以及在实现数字控制时产生的舍入误差等等原因,在实际工程设计中需要考虑控制系统的鲁棒性问题,本文在讨论广义系统稳定性条件之后,进一步分析了广义系统在某种形式的参数扰动下,仍能保持稳定的条件,亦即给出了广义系统稳定的鲁棒性判据。

奇异摄动理论是研究具有不同时间比例尺的快慢两种运动的一类系统时一种强有力的工具。三十年来该方法得到很大的发展与广泛的应用。但在应用时通常要对系统的模型作某些限制,从而约束其应用效能。本文探索了广义系统和奇异摄动系统理论之间的关系,并把广义系统看成奇异系统的某种极限状况,从而减缓了应用奇异摄动理论时对受控系统所施加限制,拓宽其应用范围。

作为上述理论结果的应用,本文研究了挠性空间飞行器的控制问题,进行快慢子系统分解之后,对控制溢出进行了有效的抑制。为了使挠性位移衰减过程加快,进行了脉冲稳定补偿并增大脉冲反馈幅值。仿真与分析表明上述措施取得满意的结果。

本论文的内容与结构如下:

第一章导言:概述了问题的背景与数学提法,并介绍综述了广义系统理论的发生发展及目前已有的主要成果,并且对本论文的主要工作与贡献给予简要的论述。

第二章:广义系统的一般特性,主要讨论广义系统与一般正则系统的主要区别,从本质上说,广义系统存在一般系统所不存的脉冲模态,因而需要引入广义阶的概念。它与系统特征方程的次数不同。要仔细区分。同时文中还给出广义系统的一般解表达式,进而对广义系统的能控性概念及其意义作了深入探讨。

第三章:广义系统的稳定性分析,主要讨论广义系统的稳定性及其判据,特别是对脉冲稳定给出了四种等价说法,从而根据实际情况选取不同的充要判据。进一步讨论了广义系统的可稳性、定理3-4给出了脉冲能稳的充分条件(即脉冲能控)、定理3-5给出了指数能稳的充分条件(即指数能控)。定理3-6从值空间条件给出指数能稳的充分条件,定理3-7及3-8给出了强能稳的充分条件。

第四章：广义系统的鲁棒性分析和综合，本章讨论系统在模型与参数摄动下保持稳定性的条件。从分析与综合两个方面研究广义系统稳定性的鲁棒问题。

在鲁棒分析方面得到下述结果：定理 4-1 给出了广义系统经摄动后仍保持脉冲稳定的充分条件。定理 4-2 给出了广义系统具有指数稳定的鲁棒性的条件；而定理 4-3 则导出广义系统强稳定具有鲁棒性的条件。

在鲁棒综合方面给出了存在反馈矩阵使得闭环系统的强稳定具有鲁棒性的条件。

第五章：广义奇异摄动系统。介绍奇异摄动方法的基本思想：即忽略系统中的小参数项使系统简化为低阶的子系统，基于此进行分析与设计，然而再通过“边层校正”进一步完善控制系统的分析与设计，而广义奇异摄动系统在满足一定条件下，可化成正则的奇异摄动系统。定理 5-1 给出了广义奇异摄动系统稳定性综合的五个步骤，进一步讨论了广义奇异摄动系统的调节器问题，同时给出了设计广义奇异摄动系统的最佳调节器的五个步骤。

第六章：广义系统理论在挠性空间飞行器控制系统中的应用，本章首先对挠性空间飞行器建立动力学模型及推导其状态方程，进而分析其能控性。定理 6-1、6-2 及 6-3 分别给出了挠性空间结构控制系统的脉冲能控、指数能控及完全能控的条件。在此基础上对控制系统进行设计并分析其性能指标。最后给出实例进行数字仿真。计算分析表明，利用上述理论在抑制控制溢出以及加速挠性运动的衰减过程方面，都能得到较好的结果。

空间应用机器人动力学与控制

博士生 尚毅 导师 屠善澄 (研究员) 指导教师 李庚田 (高级工程师)

学习专业 自动控制理论及应用 毕业时间 1987年7月

大量的工业机器人已被成功地应用于工厂,用以代替人来完成某些危险、繁重和重复性的工作。工业机器人的理论与技术正在日趋成熟,随着航天技术的日益发展,人们期望能用更多的空间应用机器人完成某些空间任务,从而减少人在空间工作的危险性以及昂贵代价。

过去的三十年中,机械装置已被逐渐应用于空间飞行任务中,这些装置包括可折叠的天线、可伸展的太阳帆板以及可以采集样本的自动工具。

中国在机器人技术方面已落后于一些先进国家,为了赶上世界的先进水平,空间机器人可以作为一个主攻方向。在机器人技术蓬勃发展之际,做一些理论上的探讨是非常必要的。本篇论文在空间应用机器人的动力学与控制方面做了大量调查和研究,并根据其特点,对动力学及控制方面的几个具体问题进行了详细的探讨并得到一些有用的结果。

高速运动的机器人的动态分析与控制方案设计需要精确的动力学模型。所以,建立机器人动力学模型是一项重要的工作。

在本篇论文中,我们将用拉格朗日—欧拉方程推导所需要的动力学模型。Uicker[8]开创性地把 4×4 齐次变换矩阵与拉格朗日—欧拉方程结合起来推导某种机构的运动方程。描述关节位置和方位的 4×4 齐次变换矩阵使得方程的形式非常简洁。拉格朗日动力学的应用在机器人动力学研究方面具有极大的吸引力,所以被广泛地采用。Kahn[9]用这种方法建立了单链机构的运动方程,它对机器人的动态分析和控制方案的设计具有很大的帮助。后来,这个结果被称为 Uicker-Kahn 模型。随后,人们对该模型的性质做了大量的研究,对该模型做了改进并建立了大量的计算软件。这个模型在美国斯坦福大学以及 JPL 实验室曾得到过成功的应用。总的来说,用拉格朗日—欧拉方程建立的模型能够很好地描述机器人动力学的结构、性质,从而给动态分析及控制方案设计带来一定好处。但是它不像用牛顿—欧拉方程建立的模型那样具有计算的快速性。为了解决该模型在计算方面的问题,人们做了大量的工作。

在空间机器人动力学方面,还没有看到比较专门、比较完整的叙述。曾有人提出一种方法能用一般的 Uicker-Kahn 模型描述自由飞行机器人的运动。空间应用机器人有自己的特点,例如:基座的旋转性、基座的可动性、结构的多臂性等。本论文在空间应用机器人动力学模型方面做了一些有益的工作。

目前工业机器人多采用对单个关节轴的分离伺服控制,这种方法虽然大大地简化了控制方案的设计,但同时忽略了“机器人动力学模型是一个高度耦合的非线性模型”,鉴于这样一个事实,因此,工业机器人的速度就不容易提高。为了解决这个问题,人们做了各种尝试。从目前的状况看,各种新方法在不断涌现,但几乎每一种方法都有一定的局限性。尽管

如此,一些有潜力的方法正在受到人们的重视,机器人的速度和精度有可能被进一步提高。从某种意义上讲,机器人控制领域正处在蓬勃发展时期。

利用动力学模型的动力学控制是目前人们较关心的一种方法。其中“计算力矩方法”最具有代表性,它提出了一种基本思想:如果我们能够知道系统的动力学模型,我们就有可能在控制过程中补偿各种动力学项,从而达到控制的目的。这种方法在实际应用过程中受到两个问题的挑战,一是计算量太大,难以实时利用,二是难以获得系统的精确模型,影响控制效果。为了解决计算问题,人们提出了一些方法,这些方法在某些场合是适用的。具有鲁棒性的控制方案是一种有潜力的方法,目前所看到的比较成熟的一种方案是“ α -计算力矩”方案,这种方案准许动力学模型存在误差,并有能力在一定范围内抵制模型误差带来的影响。本篇论文将建立一种具有较一般形式的鲁棒动力学控制方案。另一种方法试图将不精确的动力学模型与自适应控制相结合,解决包括负载变化的模型不精确问题,然而这种方法的鲁棒性问题是很难解决的。机器人控制的另一个方向是试图找到人体运动的某些机理来控制机器人的运动。

多数控制方案是在关节轴空间进行设计的,这样给应用带来不方便,因为,期望的轨迹通常是在操作空间里给定的。为了解决这个问题,人们利用一些变换,提出了一些操作空间的控制方案。如上所述的方法可以用在空间应用机器人的控制上,因为控制的目的对于空间和地面机器人基本上是一样的。所不同的是,应考虑到空间机器人的特点,比如基座的旋转性及可动性等。

本文根据实际需要,调查并分析了机器人特别是空间应用机器人的动力学与控制问题,提出了课题并给予了解决。主要结果可归纳如下:在动力学方面,从动力学观点出发,对空间机器人做了简单分类,建立了一般树状机构的动力学模型,建立了空间应用多臂机器人的动力学模型,建立了基于旋转基座上的机器人动力学模型,这种模型适用于分析安装在旋转空间站、旋转卫星以及地面转台上的机器人。对这些模型的性质做了尽可能的分析。在控制方面,建立一个具有加速度反馈的鲁棒动力学控制方案,这种方案对负载变化、环境变化引起的动力学模型的不精确具有鲁棒性。同时,该方案运用了操作空间的控制。为了检验理论上的工作,设计了一个具有一定复杂程度的例子,并做了模拟计算。

本篇论文的章节安排分成两部分,第一部分涉及动力学模型,第二部分涉及控制方案。为了引入新结果并检验新结果的正确性和有效性,又附加了预备知识和计算实例两部分,此外还附加了一些有关章节。具体安排:第二章叙述了机器人动力学与控制方面的有关基础知识,这些知识对于读者理解随后的内容是有帮助的。第三章建立了空间应用机器人的几种动力学模型并分析了这些动力学模型的性质。第四章提出了控制方案并将这种控制方案与其它方案进行了比较。第五章给出了一个计算实例,用以检验新的结果。第六章给出了综合性的结论,对某些问题进行了评述并对今后工作提出了一些设想。其它章节提供了与论文有关的更详细的信息。

机动挠性多体空间飞行器的动力学 与非线性控制

博 士 生 金 梁 导 师 杨嘉墀 (研究员) 指导教师 严拱天 (高级工程师)

学习专业 自动控制理论及应用

毕业时间 1988年7月

本文发展了挠性多体空间飞行器的相对一般动力学建模技术和非线性控制方法,为实际设计挠性多体空间飞行器提供了动力学分析手段,并通过理论研究提供适合于挠性多体飞行器旋转机动采用的新的非线性控制方案。全文共分九章,主要包括三个方面的工作:第一个方面,建立了具有树形拓扑结构多体空间系统的一般力学模型,导出了轨道上挠性多体飞行器的运动方程,然后,从控制系统设计的目的出发,讨论了简化的动力学模型,并发展了用于挠性多体空间飞行器动力学分析的计算机仿真程序。第二方面的工作,是围绕非线性系统的反馈线性化控制和状态观测方法而展开的,分别研究了以下四个方面的非线性控制问题:

1) 非线性系统的反馈线性化控制方法; 2) 非线性系统的变结构控制方法; 3) 非线性奇异摄动系统的线性化方法; 4) 非线性系统的观测器线性化和观测器的构造方法。第三个方面是应用文中提出的非线性控制技术,研究了挠性多体空间飞行器旋转机动的非线性控制问题,提出了三种十分有前途的非线性控制策略:非线性开环程序控制,非线性积分流形反馈控制和主体与附件分别旋转机动时的变结构控制方法,并通过数字仿真验证了控制方案的有效性。最后指出了将进一步深入研究的问题。

本论文的目的是从理论和原理上探索挠性多体飞行器的机动动力学和非线性控制方法,为实际设计挠性多体飞行器提供动力学分析的手段,并通过理论研究提供适合于挠性多体飞行器旋转机动采用的新的非线性控制方案。全文共分为九章,三方面内容:

1) 发展挠性多体空间飞行器的相对一般的动力学建模技术,导出轨道上挠性多体飞行器的姿态动力学方程,并建立相应的计算机仿真软件系统;

2) 采用微分几何手段与新的控制概念(如积分流形方法、变结构控制)相结合的方式,发展非线性系统的反馈线性化控制和现状观测的方法;

3) 应用文中发展的新概念、新方法,研究挠性多体飞行器旋转机动的非线性控制方案。

在第二章中,我们建立了挠性多体空间飞行器的一般动力学模型。假定挠性多体系统由任意数目的挠性体或刚体由铰链连接或树形拓扑结构,并允许铰链点具有三自由度相对转动和平动。选取体坐标系固连在分体铰链点上,考虑重力和各种外力的影响,分别采用Lagrange和Newton-Euler方法建立了系统的最小维数运动方程,并利用所得的分析结果,建立了挠性多体飞行器动力学的计算机仿真程序,利用第二章的结果,我们在第三章中,讨论了轨道上挠性多体飞行器的运动方程。并发展了便于控制系统设计采用的简化运动方程,

作为应用例子,还导出了带转动挠性附件卫星的姿态动力学模型。

非线性系统的精确线性化是目前控制理论发展中的一个令人十分感兴趣的分支,为了设计非线性控制系统,采用微分同胚坐标变换和非奇异反馈变换,将非线性系统变换到一个等价的线性系统,然后,采用人们熟知的线性控制理论设计控制规律,并由逆变换返回到非线性系统。这种非线性系统的线性化控制技术,最近已被成功的用在直升飞机、机器人和化工系统的控制中,并越来越受到人们的重视。在第四章中,我们给出了一些将要用到数学概念和预备知识,研究了时变非线性系统的状态与反馈线性化问题,讨论了线性化的条件和线性化变换的计算过程。然后,介绍了非线性系统相对标称状态和控制的一种高阶近似线性化方法。

在第五章中,我们采用变结构控制技术分别研究了非线性系统的渐近线性化问题和时变非线性系统的输出跟踪问题。首先,我们讨论了多输入情况下,具有一般形式不确定非线性系统渐近线性化为同阶已知线性系统的条件,给出了不连续变结构控制规律的计算过程。然后,讨论了时变仿射非线性系统输出跟踪的变结构控制方法,导出了时变非线性系统 I/O 线性化的条件,并给出了滑动流形以及变结构控制规律的设计方法,为了避免在滑动流形近旁系统状态的抖动(chattering),我们还讨论了具有滑动流形边界层可达性的吸引控制问题。

第六章研究了一类非线性奇异摄动系统的反馈线性化控制问题。首先,积分流形理论被用来描述非线性奇异摄动系统的精确慢系统并利用级数展开的方法,建立了精确慢系统关于摄动参数 ϵ 的 N 阶近似系统,然后讨论了精确慢系统的反馈线性化问题,证明了零阶近似系统可反馈控制的计算过程,其可进行到 ϵ 的任意阶次。

不难知道,由于状态信息对实现非线性反馈控制往往十分重要,但在许多实际系统中又难以直接测量到全部状态信息,因此,与线性控制系统类似,非线性系统的状态估计问题也是十分重要的。第七章研究了非线性系统的观测器线性化和观测器设计问题。首先,结合一个微分同胚坐标变换,给出非线性系统的观测器规范形。然后,研究了观测器线性化问题的可解性,给出了观测器存在的重要条件。考虑到直接由观测器规范形构造非线性观测器,需要求解偏微分方程组和非线性代数方程组,我们讨论了非线性状态观测器的一种简化设计方法,使得观测器的构造并不要求解由坐标变换定义的偏微分方程组,这为工程设计非线性状态观测器提供了方便的途径。

第八章中,目的是研究挠性多体飞行器旋转机动的非线性控制方案。运用文中已发展的非线性控制理论,我们对带挠性附件飞行器的旋转机动提出了以下三种非线性控制策略:

a) 挠性飞行器大角度姿态机动的非线性开环程序控制

对描述挠性飞行器机动力学的非线性混合坐标模型,我们构造全局可拟的非线性坐标变换,使得非线性动力学模型被变换到一个包含有三个双积分器的部分线性化系统,然后,利用逆变换关系和 LQR 理论,设计了精确的非线性姿态控制规律,并提出补偿控制力矩的概念所得到的结果物理意义十分明确,便于工程实现;

b) 挠性飞行器大角度姿态机动的积分流形非线性反馈控制方法

通常相对于刚体运动频率,挠性附件的振动频率较高,因此,若将挠性飞行器刚性主体的姿态运动与附件的弹性运动相比较,可得到以 Euler 四元数和姿态角速度为慢变量,而附件模态坐标为快变量的奇异摄动系统。然后,利用第六章发展的非线性控制方法,引入了刚

体流形的概念,并讨论了刚体控制和附加修正控制的计算过程,所提出的非线性反馈控制规律仅仅需要慢状态信息反馈,即仅需要刚体坐标信息;

c) 挠性飞行器的主体与附件分别旋转机动时的非线性变结构控制

这是一个典型的多体控制问题。我们首先分别以描述主体机动方向和附件机动方向的 Euler 四元数为输出调节量。给出了系统解耦方程和 I/O 线性化关系,解耦设计了滑动流形和相应的变结构控制规律,其使得系统状态进入滑动运动后,主体和附件机动方向的 Euler 四元数跟踪期望机动方向 Euler 四元数的误差将渐近衰减至零,所建议的吸引控制规律易于求解,并对系统的参数变化和外干扰因素具有十分理想的鲁棒性,其是一种十分有前途的非线性控制方案。

对上述三种非线性控制方案,我们通过大量的数字仿真结果验证了它们的有效性,并对各自的优劣进行了分析和比较。

结束语概括地讨论了文中结果,并指出了挠性多体空间飞行器动力学与控制领域需进一步深入研究的课题。