



“飞行器设计与工程”卓越工程师培养专业实践教学系列教材



飞行控制系统

——设计、原型系统及半物理仿真实验

FLIGHT CONTROL SYSTEM

—DESIGN, PROTOTYPE AND SEMI PHYSICAL SIMULATION EXPERIMENT



徐 军◎著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



“飞行器设计与工程 卓越工程师培养专业实践教学系列教材”



飞行控制系统

——设计、原型系统及半物理仿真实验

FLIGHT CONTROL SYSTEM

—DESIGN, PROTOTYPE AND SEMI PHYSICAL SIMULATION EXPERIMENT



徐 军◎著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

飞行控制系统: 设计、原型系统及半物理仿真实验 / 徐军著. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-5682-1128-4

I. ①飞… II. ①徐… III. ①飞行控制系统-高等学校-教材 IV. ①V249

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 198036 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 13.25

字 数 / 293 千字

版 次 / 2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 38.00 元

责任编辑 / 钟 博

文案编辑 / 钟 博

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

本书主要介绍了飞行控制系统分析、设计和数学仿真以及原型系统的建立和半物理仿真实验，原型系统技术实现了飞行控制系统从理论设计快速转换为工程设计结果，并通过半物理仿真对理论及工程设计的结果进行验证和评价。本书可作为飞行控制系统和飞行动力学有关课程的教材以及实验用书，也可供从事飞行控制系统工程研究和理论研究的工程技术人员以及研究人员阅读参考。

最近十年来，随着计算机运算速度的不断提高，控制系统辅助分析和设计软件的功能已从系统的理论设计扩展到工程应用领域。将理论设计结果快速转换为飞行控制计算机的应用程序已经是控制系统辅助设计软件的重要功能要求。而采用通用计算机来运行这个应用程序，以快速实现飞行控制系统的功能，就是原型概念的重要应用。由于飞行控制系统的特点，其设计结果无法立即应用到飞行器的实际飞行中，所以在一般情况下主要是通过半物理仿真来验证其理论设计结果。因此，将半物理仿真系统和理论及工程设计工具组合在一起，并且实现三者间的无缝连接，就组成了原型系统和对原型系统进行半物理仿真的实验系统。很明显，原型系统将大大提高飞行控制系统的设计效率并有利于工程的快速实现。

从上述讨论中，可定义飞行控制系统的原型系统为：功能和实际飞行控制系统完全相同，外部传感器及执行装置（舵机）和系统内的接口标准完全一致，仅仅只有飞行控制计算机的实现方式有差异的系统。所谓“飞行控制计算机的实现方式有差异”主要是指计算机的硬件架构以及操作系统的差异性，而输入、输出性能则完全一致。构建原型系统的目的是，完成飞行控制系统的理论和工程设计（应用程序），并用半物理仿真对设计结果（软件和信号传输）进行验证和性能测试。

本书的内容主要是为北京理工大学 48 学时全校选修实验课“飞行控制系统的原型系统技术”而设计的。这门课程的目的是让高年级本科生掌握飞行控制系统的分析和设计理论、工程实现及半物理仿真的实验方法。这要求学生计算机接口技术、自动控制原理、Matlab/Simulink 和 C 程序设计有基本的了解。本书将不对上述这些内容进行介绍，学生可以参考有关书籍和资料。本书以固定翼飞机的飞行控制系统（自动飞行控制系统和电传操纵系统）作为研究对象，其原型系统完全是按此飞行控制系统构建的，并在此基础上建立半物理仿真系统。而原型系统和半物理仿真系统则组成了实验系统，所有的实验将在该系统上完成。

数年来,我们一直致力于解决飞行控制系统专业领域的学生如何能真正地进行和开展飞行控制系统的分析、设计和工程实现等问题,以增强学生在飞行控制系统和飞行动力学等专业领域的工作能力。计算机技术和有关软件工具的迅猛发展,为上述这些问题的解决提供了可能。本课程将飞行控制系统的理论、工程设计和半物理仿真结合在一个平台上进行,这不仅可以使了解学生了解和掌握飞行控制系统被设计出来的过程和方法,而且也能让学生认识到半物理仿真实验验证和评价其设计结果的重要性以及在研制中的地位。本书的结构和内容简介如下:

第一章“控制原型技术和实验系统”简要介绍了原型系统技术的基本概念和方法,重点描述了一个基于通用飞机自动飞行控制系统构建的飞行控制系统原型系统,并且分别对系统的硬件和软件系统以及接口技术做了详细的阐述,然后介绍了在飞行控制系统原型系统的基础上建立的半物理仿真系统,原型系统和半物理仿真系统则组成了实验系统。实验练习 1 是为掌握飞行控制系统建模的软件 Simulink 进行的练习;实验练习 2 和实验练习 3 是仿真计算机的接口通信练习,其通信程序完全采用 Simulink 软件进行编写,以掌握功能定义模型化的 Simulink 编程方法;实验练习 4、实验练习 5 和实验练习 6 则是实验系统设备之间的功能性测试以及控制练习。

第二章为“飞行器(飞机)动力学模型”。飞行器(飞机)动力学模型主要用于飞行控制系统的设计和半物理仿真中,因此本章对飞机动力学的应用条件进行了阐述。为后面通过实验练习 7 和实验练习 8 了解飞行动力学模型的 Simulink 建模的方法以及通过转台来复现飞行动力学的过程打下基础。

第三章“纵向自动飞行控制系统”详细介绍了纵向飞行控制系统有关功能的设计问题,对俯仰角、垂直速度和高度控制三个主要控制模态的设计进行了阐述,同时也对飞行控制系统接入控制(回零)和纵向配平的设计进行了说明。通过实验练习了系统的理论设计和数学仿真过程,并对三个控制模态分别进行了半物理仿真实验练习。

第四章“横侧向自动飞行控制系统”详细介绍了横侧向飞机控制系统有关功能的设计问题,对滚转角和航向两个主要控制模块的设计进行了阐述。通过实验练习了上述两个控制的理论设计和数学仿真过程,并进行了半物理仿真实验练习。

第五章“电传操纵系统”对飞机的电传操纵系统进行了介绍和说明,以 A320 飞机的电传操纵系统作为例子,对飞机电传操纵系统的三个操纵通道的控制律及保护功能进行了分析和设计,对结果用数学仿真的方法进行了验证并提供了半物理仿真实验练习。

附录中给出了有关飞机的气动导数,以方便读者在使用本书进行理论设计和实验时应用。

本书提供了 32 个实验,在有限的学时下可能难以完成,因此可以根据教学内容有选择地进行有关实验。

在前言结束之前,作者要感谢为实验系统建设和本书编写做出贡献的老师以及同学。感谢刘莉老师和唐胜景老师对本书和实验系统建设的全力支持;感谢杜小菁老师在三轴转台研制中无私提供的宝贵经验和知识;同时也感谢李文光老师和王正平老师所给予的支持及帮助,其使实验系统能高效率地建设完成;感谢高荣华、章视、杜宇和张静等同学对实验系统建设和本书编写以及实验教学所做的贡献。

作者

目 录

CONTENTS

第一章 控制原型技术和实验系统	001
1.1 原型技术和控制原型技术	001
1.2 实验系统的组成及功能	003
1.3 Simbox 仿真计算机	005
1.3.1 Simbox 仿真计算机介绍	005
1.3.2 Simbox 仿真计算机的软件系统	005
1.3.3 Simbox 计算机的硬件系统	006
1.4 姿态传感器	006
1.5 飞机姿态运动模拟装置：三轴转台	006
1.5.1 三轴转台的功能和组成	006
1.5.2 三轴转台与 Simbox 仿真计算机的通信	007
1.5.3 三轴转台的数字接口	007
1.5.4 姿态传感器的安装	007
1.6 执行装置——电动舵机	007
1.6.1 电动舵机的功能和组成	007
1.6.2 电机和机械传动装置	007
1.6.3 运动控制器和接口	008
1.6.4 电动舵机的控制与通信	008
实验练习 1 Simulink 程序设计和数学仿真	008
实验练习 2 仿真计算机采集模拟信号的实验	014
实验练习 3 仿真计算机间的数字通信	021
实验练习 4 仿真计算机对转台的控制	028
实验练习 5 姿态传感器和仿真计算机间的数字通信	030
实验练习 6 仿真计算机对舵机的控制	040
1.7 数字接口标准	043
1.7.1 RS232C	043
1.7.2 RS422	046

1.7.3	RS485	046
1.8	原型系统采样频率以及 MTi 300 的通信速率设置	047
第二章	飞行器(飞机)动力学模型	049
2.1	动力学方程的建立和运动解耦	049
2.2	纵向运动的小扰动线性化数学模型	054
2.3	简化的纵向运动数学模型	058
2.3.1	短周期运动方程	058
2.3.2	长周期运动方程	058
2.3.3	短周期运动方程的传递函数模型	059
2.3.4	长周期运动方程的传递函数	059
2.4	横侧向运动小扰动线性化数学模型	060
2.5	简化的横侧向运动数学模型	063
2.6	协调转弯运动方程	064
2.7	小扰动线性化数学模型的使用说明	065
第三章	纵向自动飞行控制系统	066
3.1	俯仰角控制系统的设计和仿真	066
3.1.1	俯仰角控制系统的意义	066
3.1.2	俯仰角控制系统的结构	067
3.1.3	俯仰角控制系统的设计	067
3.1.4	俯仰角控制系统设计和数学仿真实例	070
实验练习 7	俯仰角控制系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	074
实验练习 8	俯仰角控制系统的半物理仿真	077
3.2	高度控制系统设计和仿真	081
3.2.1	高度控制系统的意义	081
3.2.2	高度控制系统的结构和数学模型	081
3.2.3	高度控制系统设计	081
3.2.4	高度控制系统设计和数学仿真实例	083
实验练习 9	高度保持控制系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	084
实验练习 10	高度保持控制系统的半物理仿真	086
3.3	速度控制系统	089
3.3.1	对速度控制系统的有关讨论	089
3.3.2	速度控制系统的结构和数学模型	089
3.3.3	速度控制系统的设计	090
3.3.4	速度控制系统设计和数学仿真实例	091
实验练习 11	速度控制系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	092
实验练习 12	速度控制系统的半物理仿真	093

3.4 纵向自动飞行控制系统的接通和断开	096
3.4.1 纵向自动飞行控制系统接通和断开的意义	096
3.4.2 回零系统设计和数学仿真	098
3.4.3 自动配平系统设计和数学仿真	099
实验练习 13 回零系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	102
实验练习 14 回零系统的半物理仿真	104
实验练习 15 纵向配平系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	107
实验练习 16 纵向配平系统的半物理仿真	108
第四章 横侧向自动飞行控制系统	112
4.1 横侧向自动飞行控制系统的控制方法	112
4.2 滚转角控制系统设计和仿真	113
4.2.1 滚转角控制系统的结构和数学模型	113
4.2.2 滚转角控制系统设计	114
4.2.3 滚转角控制系统设计和数学仿真实例	114
实验练习 17 滚转角控制系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	117
实验练习 18 滚转角控制系统的半物理仿真	119
实验练习 19 具有侧滑角控制的滚转角控制系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	122
实验练习 20 具有侧滑角控制的滚转角控制系统的半物理仿真	123
4.3 航向(偏航角)控制系统设计和仿真	126
4.3.1 航向控制系统的结构和数学模型	126
4.3.2 航向控制系统设计	127
4.3.3 航向控制系统设计和数学仿真实例	127
实验练习 21 航向控制系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	129
实验练习 22 航向控制系统的半物理仿真实验练习	130
4.4 横侧向轨迹控制系统设计和仿真	133
4.4.1 横侧向轨迹控制系统的结构和数学模型	133
4.4.2 横侧向轨迹控制系统设计	135
4.4.3 横侧向轨迹控制系统设计和数学仿真实例	136
实验练习 23 横侧向轨迹控制系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	137
实验练习 24 横侧向轨迹控制系统的半物理仿真	139
第五章 电传操纵系统	144
5.1 电传操纵系统的有关概念	144
5.2 电传操纵系统设计构型和功能讨论	145
5.3 俯仰轴电传操纵系统设计和数学仿真	148
5.3.1 系统结构和数学模型	148
5.3.2 升降舵操纵控制系统设计	151

5.3.3 设计和数学仿真实例	152
实验练习 25 升降舵操纵控制系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	155
实验练习 26 升降舵操纵控制系统的半物理仿真	157
5.4 滚转轴电传操纵系统设计和数学仿真	160
5.4.1 系统结构和数学模型	160
5.4.2 滚转轴电传操纵系统的分析和设计	161
5.4.3 滚转轴电传操纵系统的设计和数学仿真实例	162
实验练习 27 滚转轴电传操纵系统的 Simulink 程序设计和数学仿真	165
实验练习 28 滚转轴电传操纵系统的半物理仿真	167
5.5 纵向运动的使用边界保护设计	170
5.5.1 俯仰角边界控制设计和仿真	170
实验练习 29 俯仰角边界控制的 Simulink 程序设计和数学仿真	174
实验练习 30 俯仰角边界控制的半物理仿真	179
5.5.2 高速边界控制	182
5.5.3 迎角边界控制	183
实验练习 31 迎角边界控制的 Simulink 程序设计和数学仿真	189
实验练习 32 迎角边界控制的半物理仿真	191
5.5.4 俯仰轴电传操纵系统控制律讨论	194
附录一 符号的定义	197
附录二 几种飞机的几何、质量和空气动力数据	199
参考文献	204

第一章 控制原型技术和实验系统

1.1 原型技术和控制原型技术

原型技术也称为快速原型技术 (Rapid Prototyping, RP), 于 1988 年诞生于美国, 该技术最初应用在快速将产品设计结果转化为三维实体模型中, 通过向客户提供同未来真实产品外观一致的实体模型, 从而达到迅速预测产品的市场反应、占领市场的目的。

这种技术思想对控制系统的研制具有启发性意义。以往在控制系统的研制从技术方案进入到工程实现阶段的过程中, 要经过反复的修改, 有时甚至要对技术方案进行颠覆性地改进, 这样就影响了控制系统的研制进程, 使得研制人员把更多注意力集中在工程实现的具体问题上, 而对系统的总体性能和指标关注得不够。特别是在一个不成熟的控制系统平台上进行系统测试或半物理测试时, 将会出现许多问题, 使得大量的时间用于系统调试中的故障判断和排除。对基于计算机的控制系统来说, 不但有硬件设计和实现过程的复杂性, 还有软件的设计以及与硬件的协调问题, 所以一个控制系统在原理样机的研制中很难达到“即思即实现”的状态。研制人员把主要的时间和工作放在系统的整体性能的调试上, 具体硬件可利用既有的资源方便地实现, 而软件则完全采用基于模型的设计方法, 且可以自动生成, 这样将大大提高原理样机的研制进程, 同时原理样机的成熟性和可靠性可提高系统半物理仿真测试的可信性, 也可直接应用在被控对象上进行测试, 这给工程样机或产品的制造节省了大量的时间。

20 世纪 90 年代初, 美国福特汽车公司为了降低车用嵌入式控制器的研发时间和开发成本, 创造性地将快速原型技术引入控制器开发领域并将这种技术应用在其新产品的开发上, 这种技术被称为快速控制原型技术 (Rapid Control Prototyping, RCP)。快速控制原型技术 (下称“控制原型技术”), 是指在产品开发的初期, 将工程师开发的算法下载到实时仿真计算机硬件平台中, 通过实时仿真计算机中与未来控制器产品完全一样的实际 I/O 与被控对象实物连接, 此时实时仿真计算机用来模拟控制器 (与未来控制器的控制律完全一致) 与实物相连, 进行实时仿真, 检测与实物相连时控制算法的性能, 并在控制算法不理想的情况下进行快速反复设计以找到理想的控制方案。在确定控制方案后, 自动生成代码并将其下载到硬件系统上, 形成最终的控制器产品。

很明显, 控制原型技术可以克服传统研制过程中的缺陷, 加快产品或系统的研制进程以及得到优化后的控制器产品, 特别是代码可以完全由机器自动生成, 节约了大量的软件编写和测试工作和时间, 提高了软件的可靠性。

因此控制原型技术的主要特征是:

- (1) 控制器软件设计完全基于数学模型的方法进行 (采用 Simulink 设计);
- (2) 控制器的设计结果能被自动生成适当的计算机代码 (如 C++代码);
- (3) 高性能实时仿真计算机能兼容自动生成的控制器软件代码。

基于上述特点以及结合现有的条件, 在控制原型技术的操作中一般采用以下步骤:

(1) 在 Matlab/Simulink 中设计控制器, 并进行充分的数学仿真, 得到的 Simulink 文件形式的控制器模型也称为离线模型;

(2) 根据与 Simulink 兼容的仿真计算机所提供的接口函数模块 (也是方框图形式的模型), 在 Simulink 编辑环境下, 在控制器离线模型中加入输入/输出接口函数模块形成实时模型, 同时定义好在控制过程中需要观察的关联变量;

(3) 在实时模型在 Simulink 对应于仿真计算机的条件下生成 C 代码 (可选择标准 C 或 C++代码), 并自动下载到仿真计算机所规定的目录下;

(4) 在仿真计算机和被控对象以及传感器的电气连接无误的条件下, 仿真计算机的任务控制软件 (如并行计算机公司的 Workbench) 加载并运行该实时模型, 即可实现对被控对象的控制或进行半物理仿真, 同时也可通过任务控制软件来观察在实时模型中所定义关联变量的变化过程;

(5) 经过验证或修改后的实时模型, 可以在 Simulink 环境中生成嵌入式 C 代码, 在该代码的基础上增加所用嵌入式计算机的接口函数, 即可得到嵌入式计算机的 C 代码, 经过编译后就得到了可下载到嵌入式计算机中执行的控制软件了。

其中, 步骤 (1) ~ 步骤 (4) 是控制原型技术, 而步骤 (5) 则是控制原型技术的最终应用以及意义所在。

很明显控制原型技术最大的特点就是极大地提高了研制效率, 大量的程序编写可以通过建立数学模型来实现, 并且形成实时模型后可通过仿真计算机进行控制以及测试, 根据测试的结果又能在同一个平台上对控制器进行修改和再测试, 满足性能要求后, 就可以得到嵌入式计算机或其他控制计算机所需要的 C 代码, 该代码经过适当和很少的修改就可以应用。因此采用控制原型技术不但可以快速验证和测试所定义的控制任务和功能, 而且能得到未来产品的软件代码, 这对提高控制系统的研制效率和可靠性以及降低成本有着重要的意义。

采用控制原型技术后, 控制系统工程师的工作重点将主要放在系统的需求分析、建立数学模型和测试程序等关键领域, 而在系统的物理实现方面的工作将减少很多, 这样控制系统工程师就可以更好地关注控制系统设计中的重要问题, 不断地提高系统的性能和可靠性以及完善系统的功能。可以说采用控制原型技术后, 系统设计的重点将转向更全面和深入的系统需求分析, 并将需求分析的结果用数学模型来表达, 因此系统设计者的工作内容也将越来越抽象, 所需要具备的工程基础也将发生改变。

本课程将控制系统原型技术应用到飞行器飞行控制系统的设计和实现中, 详细介绍了飞行控制系统原型技术的原理和方法、构造飞行控制系统的快速原型系统以及测试 (半物理仿真) 系统的技术。在这个通用的实验系统平台上, 设计与飞行控制系统研制有关的实验, 同时还阐述了与实验有关的技术基础和飞行控制系统的设计理论。本课程的目的是, 通过对飞行控制系统快速原型以及在半物理仿真系统实验平台所进行的实验和相关技术、

理论的学习，初步学会飞行控制系统快速原型的构建方法和技术，掌握飞行控制系统的先进研制和实现方法。

1.2 实验系统的组成及功能

实验系统采用快速原型技术提供了一个能构建飞行控制系统快速原型的平台，可对飞行控制系统快速原型进行测试或半物理仿真。

实验系统由两部分组成，一部分是飞行控制系统快速原型，另外一部分是半物理仿真。

飞行控制系统快速原型部分包括：

- (1) Simbox 仿真计算机一台，作为控制计算机；
 - (2) 传感器 MTi 300 陀螺一个；
 - (3) 电动舵机 4 个。
- (如果需要的话，也可以加入大气数据计算机以及导航系统)

半物理仿真或测试部分包括：

- (1) Simbox 仿真计算机一台，用来运行飞行动力学模型；
- (2) 高精度三轴飞行转台一台（带控制系统）。

实验系统的组成如图 1-1 所示。

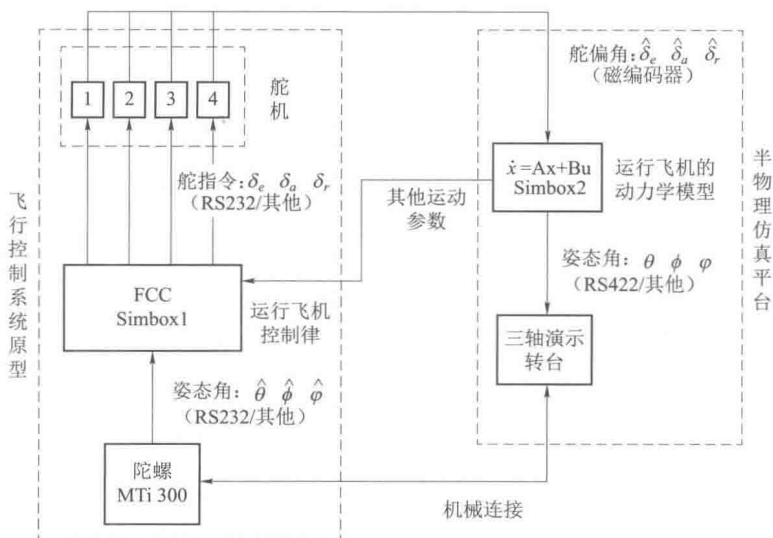


图 1-1 飞行控制系统原型和半物理仿真实验系统的组成

实验系统的电气连接或接口以及其所传输的信息定义见表 1-1，陀螺和转台之间是通过机械连接的，这样陀螺就能测量三轴转台所表示的飞行器的三个姿态角或欧拉角了。

表 1-1 实验系统的电气连接或接口以及其所传输的信息定义

接口连接	通信协议	传输信息
飞动计算机-转台	RS422	姿态角 θ 、 ϕ 、 ψ
陀螺-飞控计算机	RS232	测量姿态角 $\hat{\theta}$ 、 $\hat{\phi}$ 、 ψ
飞控计算机-舵机	RS232	舵指令 δ_e 、 δ_a 、 δ_r
舵机-飞动计算机	霍尔传感器	舵偏角 $\hat{\delta}_e$ 、 $\hat{\delta}_a$ 、 $\hat{\delta}_r$

实验系统的原理简述如下：陀螺对转台所表示的飞行器姿态角的变化进行测量，通过 RS232 总线传送给控制计算机 Simbox，Simbox 按照所设计的控制律以及逻辑进行舵机偏转角度的指令计算，并通过 RS232（或 CAN 总线及模拟信号）将指令传送给对应的电动舵机，电动舵机的偏转角度通过编码盘传感器测量得到，并作为飞行器操作舵面的偏转角度传送给飞行动力学计算机，飞行动力学计算机根据该偏转角度以及飞行器动力学模型，计算出飞行器的运动变量，其所计算出的姿态角变化通过 RS422 总线传送给三轴转台的控制计算机，该计算机将按该姿态角驱动三轴转台运动，以表示飞行器在舵面偏转后所引起的姿态运动，这样就形成了飞行器的闭环控制。

飞行动力学计算机还可以输出其他运动变量，如果需要的话，可以通过 RS232、RS422 或 CAN 总线对外进行输出，也可以通过模拟信号对外输出。

表 1-1 说明了实验系统中设备之间的信号传输形式以及其所表示信息的物理意义。

仿真计算机 Simbox 中安装有 Matlab/Simulink 软件以及 Workbench 任务控制软件，并且包含了大部分常用的数据接口、离散信号和模拟信号接口。计算机的运算能力强，实时性好，可运行于大型实时软件。

电动舵机完全是按照有人或无人飞行器的要求设计的，具有多项功能，既可以适用于有人飞行器，也可以适用于无人飞行器。同时较大的输出力矩具备了较多的用途，可以拓展出更多的实验内容。

因此，实验系统可以完成以下功能：

- (1) 设计和构建飞行控制系统快速原型；
- (2) 对飞行控制系统快速原型进行开环测试和半物理仿真；
- (3) 对实际飞行控制系统进行半物理仿真。

该实验系统不仅可以进行飞行控制系统快速原型的有关实验，还可以更进一步研究、设计和开发有人或无人飞行器的飞行控制系统，并完成地面所有的测试工作。

实验系统的实时性能主要取决于飞行三轴转台和传感器的性能。就 Simbox 仿真计算机的实时性能来说，它对所有 I/O 接口的操作均是微秒级别的，对外部事件的响应时间都被控制在 $15\mu\text{s}$ 以内，因此它完全可以作为控制器应用于具有复杂算法的飞行控制系统中。

1.3 Simbox 仿真计算机

1.3.1 Simbox 仿真计算机介绍

Simbox 是由美国 Concurrent 公司生产的并行计算机,是具有高实时特性的实时仿真计算机,该仿真计算机包含对称的多处理器平台、实时操作系统、实时开发工具以及应用软件。Simbox 以 Matlab/Simulink 软件作为前端建模工具,兼容 C/C++、Ada 和 Fortran 等手工编程建模方式,应用领域覆盖系统架构设计、功能设计、快速原型、半物理仿真测试等阶段。Simbox 仿真计算机可以应用到航空、航天、汽车等的实时仿真及测试领域。

Simbox 仿真计算机的体系结构非常适用于基于模型的设计、并行运算的现代设计思想,便于实现设计、仿真、验证和故障诊断一体化的平台,从而节省时间、费用等。此外,Simbox 仿真计算机可以通过插入不同的板卡来实现不同的功能,可以随时进行组合分布式仿真,也可以马上拆分进行单独仿真,这些不需要硬件进行任何改动。

1.3.2 Simbox 仿真计算机的软件系统

Simbox 仿真计算机采用 Linux 实时操作系统,提供了 4 个重要的应用程序,即 RedHawk Linux 实时操作系统、基于频率的调度程序(FBS)、NightStar 实时 Linux 调试和分析工具包和 Simulation Workbench 仿真工作平台。

(1) RedHawk Linux 实时操作系统

RedHawk Linux 是一个实时多任务和多用户开发环境。可以供多个用户分别调试各自的多任务应用程序,系统可以支持多达 32 个处理器/核。它所提供的实时时钟中断模块选项,提供 8 个高精度实时时钟及 12 个输入输出中断,可供多个用户多任务使用。

实时操作系统包含 I/O 模块实时驱动程序。这个程序主要用于支持仿真计算机的 I/O 及通信板卡,并完成 I/O 及通信板卡信号与操作系统之间的适配连接。简单地说,I/O 模块实时驱动程序提供了硬件到操作系统的一个接口并可协调二者之间的关系。

(2) 基于频率的调度程序(FBS)

基于频率的调度程序是一个高分辨率的调度程序。用户利用该工具可以按照制定好的实时运行框架以多速率模式循环执行多个进程,而无须在应用程序中去考虑各种定时器的建立和管理。FBS 可以利用具有超时判定的主循环和次循环控制多个协同进程的周期性循环执行。同时,利用性能监控器可以观察每个帧在调度执行时 CPU 的使用情况。FBS 根据实时时钟中断模块 RCIM 提供的硬件时钟可实现对进程的调度控制,满足调度和监视可预测性、进程执行周期和实时性等要求。

(3) NightStar 实时 Linux 调试和分析工具包

NightStar 软件包是一个功能强大的集成工具,用于开发实时的 Linux 应用程序。NightStar 工具包以最小内存模式运行,因此保持了应用程序的性能和确定性,用户可以迅速便捷地实时调试、监视、调度、分析和优化应用。同时,NightStar 图形化工具可以帮助用户缩短工作时间、提高生产效率并降低开发费用。

(4) Simulation Workbench 仿真工作平台

Simulation Workbench 仿真工作平台专门为仿真工程师设计, 提供了一个完全集成的、与第三方建模软件兼容的、基于 Linux 系统的仿真开发和执行环境。Simulation Workbench 使运行多个可重复的仿真试验变得非常重要, 并且允许任意改变试验参数。

1.3.3 Simbox 计算机的硬件系统

Simbox 仿真计算机的硬件系统分为两个部分, 一部分是固有的, 即仿真计算机必要的硬件, 包括 CPU 和内存等计算机的基本硬件; 另一部分则是用户可选的 I/O 和通信接口。

本书实验中仿真机配有三块板卡, 分别是 PMC-16AIO A/D 采集卡、NI PXI-6602 定时/计数器板卡、MOXA CP-118EL-A 多串口卡。

(1) PMC-16AIO A/D 采集卡

PMC-16AIO 板卡为 PCI 接口, 传输速率为 300 Kb/s, 16 位-16 通道 A/D 输入, 16 位-4 通道 D/A 输出, 模拟量的输入输出范围为 $\pm 10\text{ V}$ 。

(2) NI PXI-6602 定时/计数器板卡

NI PXI-6602 定时/计数器板卡支持脉冲数和脉冲宽度以及正交编码的测量, 同时支持脉冲信号发生及普通的数字 I/O 功能。具体特性如下: 32 位精度的计数器 8 个, 支持 32 通道的数字 I/O, 最大时激为 80 MHz, 数字去抖动滤波器, 32 条数字 I/O 线 (5 V TTL/CMOS)。

(3) MOXA CP-118EL-A 多串口卡

CP-118EL-A 是一款智能型 PCI Express 多串口卡, 它拥有 8 个 RS232/422/485 串口, 最大通信速率高达 921.6 kb/s。

1.4 姿态传感器

姿态传感器使用的是荷兰 Xsens 公司的 MTi 300 姿态方位参考系统, 它是一款微型 3 自由度飞行姿态及航向参考系统, 具有体积小、重量轻和低电压+5 V 供电等特点。

姿态传感器由三轴加速计、陀螺仪、磁强计以及数字信号处理器等组成, 其低功耗信号处理器通过软件对空间姿态进行实时解算, 提供三轴方向角位移、校准三轴加速度、三轴转弯速度以及三轴地球磁场数据, 并使用通信数据波特率可设置的 RS232 串行通信接口输出。

该产品还提供了一个基于 Windows 操作系统的应用程序, 以完成对 MTi 300 输出数据的格式、通信波特率的设置和标定, 也能对 MTi 300 的输出数据进行记录并以曲线的形式显示。

1.5 飞机姿态运动模拟装置: 三轴转台

1.5.1 三轴转台的功能和组成

在本书实验系统中, 三轴转台主要用于复现飞行器的姿态运动, 同时姿态传感器 MTi 300

被安装在其中，以测量姿态运动并反馈到飞行控制计算机中，因此三轴转台的实时性以及动态和稳态精度必须满足一定的要求。

三轴转台共有 3 个可旋转的框架，3 个框架的旋转轴与姿态传感器的测量轴重合，使得外框的旋转表示飞行器的偏航运动，中框和内框的旋转则分别表示俯仰和滚转运动。

三轴转台也是一个计算机控制系统，它根据来自仿真计算机 Simbox 的姿态角度指令实现转台的角度运动，并且能以一定的精度跟踪指令。

1.5.2 三轴转台与 Simbox 仿真计算机的通信

在本书实验系统中，仿真机控制舵机采用 RS422 通信协议，数据包为 20 个字节。仿真机将各种指令信号通过串口线传输给三轴转台，经过三轴转台控制器转换为角度信号，从而模拟输入指令的信号。

1.5.3 三轴转台的数字接口

仿真平台与转台下位控制计算机之间采用异步全双工工作方式，硬件协议为 RS422；波特率为 921 600 b/s；起始位：1 bit；停止位：1 bit；校验：无校验；数据位：8 bit；优先级：当前后指令存在控制冲突时，以最新收到的指令为准。

1.5.4 姿态传感器的安装

将陀螺仪安装在三轴转台上面，并且确保陀螺仪与三轴转台之间没有相对移动。为了提高陀螺仪的精度并消除陀螺仪本身以及在安装过程中产生的误差，需要对陀螺仪进行标定。

1.6 执行装置——电动舵机

1.6.1 电动舵机的功能和组成

电动位置运动舵机，是控制固定翼飞机舵面的主要执行机构。本舵机通过 RS232/CAN 总线接收飞行控制仿真计算机发出的指令信号，经过运动控制器处理，形成舵机控制电信号，驱动电机转动。电机经过齿轮系的减速后，输出合适的转速及力矩，通过钢索拉动舵面，从而完成对飞机飞行姿态的控制。

本舵机由电机套件、机械传动机构、机械支架、电磁铁等部分组成。其中，电机套件包括电机、磁编码器和运动控制器三部分。

1.6.2 电机和机械传动装置

电机的工作电压为 24 V，最大输出转矩为 28 mNm，最大输出功率 23.2 W，转速常数为 276 rpm/v，转矩常数为 34.6 mNm/V，寿命大于 1 500 h。

机械传动装置包括齿轮减速箱、离合器、减速齿轮系、钢索绞盘等，其中齿轮的减速比为 1 001:1。

1.6.3 运动控制器和接口

运动控制器带有 RS232/CAN 接口, 为电机提供驱动电压以及控制信号, 实现电机的转向、转速及位置控制并对外输出电机转动位置及速度信号。

1.6.4 电动舵机的控制与通信

仿真机采用 232 通信协议发出舵机位置指令信号, 运动控制器将指令信号转换成控制电机的电信号, 从而驱动电机转动。RS232 指令数据格式为 16 个字节组成一帧数据, 即 2 位 (控制电磁铁) + LA + 10 位 (位置数据) + 1 位 (回车) + M + 1 位 (回车)。

实验练习 1 Simulink 程序设计和数学仿真

实验目的

学习使用 Matlab/Simulink 软件进行程序设计和数学仿真的方法。

实验设备及软件

个人计算机 (PC) 及 Matlab/Simulink 软件 (R2012a 版本或以上)。

实验过程

(1) 给出所设计控制系统的方框图。

将设计好的控制系统画出详细方框图。控制器和被控对象环节既可以用传递函数来描述, 也可以用零极点或状态空间表达式的形式来描述, 在方框图中可按实际情况加入非线性环节, 并且要确定在数学仿真时所需要的输入信号形式以及要观察的系统变量。

图 1-2 所示是已经设计完成的控制系统的方框图。在该方框图中, 控制器为比例+积分控制, 控制对象为一含有零点的二阶系统, 并且在控制器输出端加入了非线性饱和环节, 其 $\Delta=2$, 同时在对象的输出反馈端加入了非线性死区环节, 死区宽度 $\delta=0.1$, 输入信号为单位阶跃信号。

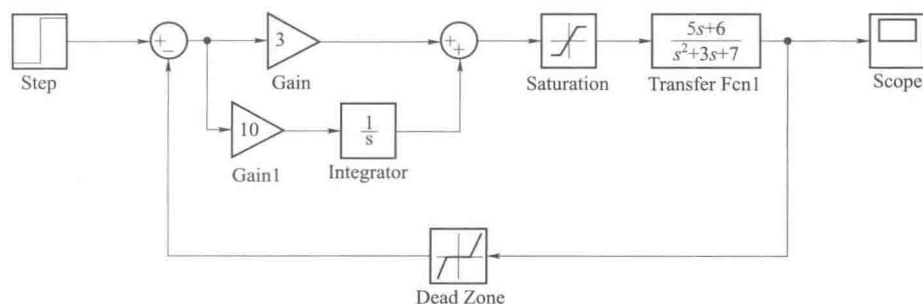


图 1-2 控制系统的方框图