



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

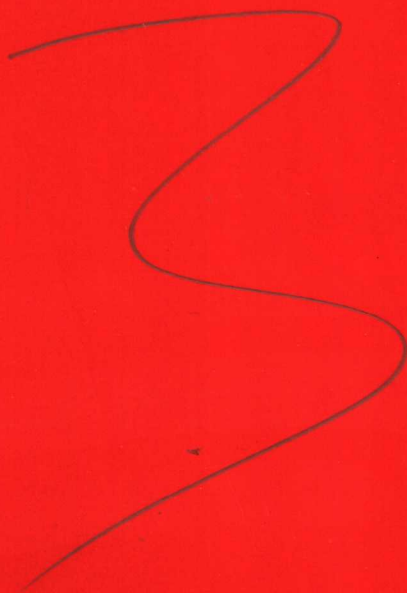
Vehicle Control Systems 运动体控制系统

史 震 姚绪梁 于秀萍 编著

Shi Zhen Yao Xuliang Yu Xiuping

谈振藩 主审

Tan Zhenfan



清华大学出版社



TP271/82

2008



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Vehicle Control Systems

运动体控制系统

哈尔滨工程大学

史 震 姚绪梁 于秀萍 编著

Shi Zhen Yao Xuliang Yu Xiuping

谈振藩 主审

Tan Zhenfan

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

运动体控制系统研究人造运动体,如飞机、船舶、汽车等的一般运动规律以及操纵其运动的控制系统的组成、工作原理和控制方法,是自动控制原理在人造运动体装置及系统中的具体应用。

本教材简要地介绍了描述运动体运动规律所需的理论力学、流体力学基础知识,描述运动体运动的坐标系、常用变量及作用于运动体的常见干扰,操纵运动体运动的控制装置及运动状态的测量,空中运动体的纵向控制系统和水面运动体的航向控制系统,以及几类航天器的控制系统。全书共分10章,每章后配有一定数量的习题及思考题。

本教材可供自动化专业高年级本科生学习相关专业课或专业选修课使用,也可供控制理论与控制工程学科的研究生作为学习参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

运动体控制系统/史震,姚绪梁,于秀萍编著. —北京:清华大学出版社,2008.5
(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-16481-4

I. 运… II. ①史… ②姚… ③于… III. 控制系统—高等学校—教材
IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 176868 号

责任编辑:王一玲

责任校对:李建庄

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:17.75 字 数:350 千字

版 次:2008 年 5 月第 1 版 印 次:2008 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:020840-01

出版说明

《全国高等学校自动化专业系列教材》

为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版了一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指导书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层面、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本系列教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的参考资料。感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

顾问 (按姓氏笔画):

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

主任委员: 吴澄(清华大学)

副主任委员: 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

委员 (按姓氏笔画):

王雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

工作小组(组长): 萧德云(清华大学)

(成员): 陈伯时(上海大学) 郑大钟(清华大学)
田作华(上海交通大学) 赵光宙(浙江大学)
韩九强(西安交通大学) 陈兴林(哈尔滨工业大学)
陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

责任编辑: 王一玲(清华大学出版社)

自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20 世纪 50 年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,“两弹一星”的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等。另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下,中国要完成工业化的任务还很重,或者说我们正处在后工业化的阶段。因此,国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化,工业化促进信息化”的科学发展观,这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得,人才更难得。要发展自动化学科,人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地,或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说,要时刻想着为国家关键行业和战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多,涉及教学改革方方面面,包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等,其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系,编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求,充分吸取国外自动化教材的优势与特点,在全国范围内,以招标方式,组织编写了这套自动化专业系列教材,这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创

建精品教材,重视实践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

吴恪迪 教授

2005 年 10 月于教育部

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指导书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教育,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入的研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所,参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血,为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的、既考虑研究型大学又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设

基础知识与最新知识有机融合的教材? 如何充分利用现代技术, 适应现代大学生的接受习惯, 改变教材单一形态, 建设数字化、电子化、网络化等多元形态、开放性的“广义教材”? 等等, 这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版, 对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境, 一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限, 本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在许多不当甚至谬误之处, 还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴炯 院士

2005 年 10 月于清华大学

前言

PREFACE

“运动体控制系统”是《全国高等学校自动化专业系列教材》出版计划中的一部教材。国内自动化专业现行的教学计划中没有“运动体控制系统”这样一门课。全国不同高校自动化专业的教学计划不尽相同,有的自动化专业侧重生产过程控制,有的侧重船舶运动控制,有的侧重飞行器运动控制。按照教育部“宽口径,厚基础,倡个性,重创新”的要求,需要开设一门不针对专一具体领域的通用的运动体控制方面的课程。

本书正是在这样一个背景下列入《全国高等学校自动化专业系列教材》中的。由于1999年以前飞行器控制、船舶运动控制分属于不同专业领域教学内容,教材也都是独立的,现在要写一本统一的教材,以适应调整合并后的自动化专业使用。

全书共分10章,其中第2章2.3~2.6节,第3章3.4节,第4章4.1~4.2节,第5章5.1~5.3节,第6章6.2节及第8章由姚绪梁编写;第4章4.3节,第5章5.4~5.5节,第6章6.3~6.7节,第7章为于秀萍编写;硕士研究生陈国玖参与编写了第2章2.1~2.2节,第3章3.1~3.3节、3.5节,第6章6.1节及第10章;第1章,第4章4.4节,第9章由史震编写,全书由史震统稿。本书由哈尔滨工程大学博士生导师谈振藩教授主审。

本书的编写工作得到《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会的大力支持;得到了清华大学出版社的支持和帮助;得到了哈尔滨工程大学许多同事的支持和鼓励;作者的学生纪辞禹、姜萍、张宁薇、乔海岩、可伟、李辉、张京津、宋家科等也为本书做了许多工作。在此,一并向他们表示衷心的感谢。

限于作者的水平和经验,本书中缺点和不足之处在所难免,欢迎读者提出宝贵意见和建议。

作者于哈尔滨

2008年3月

主要符号表

第 2 章主要符号表:

$O_E - x_E, y_E, z_E$	固连于地球的坐标系,地面参考坐标系
$O_b - x_b, y_b, z_b$	固连于运动体的坐标系,载体坐标系
a	质点的加速度
m	质点的质量
$\sum F$	作用于质点上所有力的合力
K	质点系动量
V_c	质点系质心速度
m	质点系质量
a_c	质点系质心加速度
H_O	质点系的动量矩
h_{Ok}	质点 k 的动量矩
M_O	质点系所受外力对 O 点的矩的矢量和
M_x, M_y, M_z	M_O 在坐标系 $Oxyz$ 各轴上的投影
p, q, r	角速度 Ω 在坐标系 $Oxyz$ 各轴上的投影
g	重力加速度
T	热力学温度, K
R	气体常数
p	压力, Pa
ρ	密度, kg/m^3
α_T	等温压缩系数
β	等压热膨胀系数
Ma	马赫数
v	气流速度
a	当地音速
c_0	海平面上的音速
γ	运动黏性系数
μ	动力黏性系数
p_0	总压

ζ	波面偏离静水面的高度
ζ_a	波面的幅值
k	波数
λ	波长
ω	波浪的角频率
t	时间
P_0	大气压
Re	雷诺数

第 3 章主要符号表:

$O_g - x_g y_g z_g$	固连于地球的坐标系,地面参考坐标系
$O_b - x_b y_b z_b$	固连于运动体的坐标系,载体坐标系
Ψ	偏航角
θ	俯仰角
Φ	滚转角
$\Omega_1 = [p_1 \quad q_1 \quad r_1]^T$	运动体相对于惯性空间的转动角速度,rad/s
$\Omega_A = [p_A \quad q_A \quad r_A]^T$	运动体相对于空气场的转动角速度,rad/s
$\Omega_w = [p_w \quad q_w \quad r_w]^T$	空气介质相对于地面的转动角速度,rad/s
M_x, M_y, M_z	力矩 M 在某一直角坐标系上的投影, $N \cdot m$
L, M, N	力矩 M 在某一直角坐标系上的投影, $N \cdot m$
m	运动体质量,kg
I_x, I_y, I_z	运动体转动惯量在载体坐标系上的投影, $kg \cdot m^2$
R^A	总的空气动力, N
V_K	航迹速度,运动体相对于地面的速度, m/s
V_A	飞行速度(空速),相对于空气的移动速度, m/s
V_w	风速,空气相对于地面的移动速度, m/s
χ	航迹方位角
γ	航迹倾角
Y_n^A	升力
X_n^A	阻力
Z_n^A	侧力
α	迎角
β	侧滑角
L_b^A	空气动力滚转力矩
M_b^A	空气动力俯仰力矩

N_b^A	空气动力偏航力矩
χ_A	气流方位角
γ_A	气流俯仰角
μ_A	气流倾斜角
α_w	风迎角
β_w	风侧滑角
μ_w	风倾侧角
R	斜距, 飞行器到目标点的方位矢量或径向矢量长度
ε	俯仰测向角
ρ	水平测向角

第 4 章、第 5 章主要符号表:

U	垂直阵风速度
W	水平阵风速度
U_0	地面上垂直阵风的风速
W_0	地面上水平阵风的风速
ρ_0	地面上空气密度
ρ	导弹飞行高度处的空气密度
x_g	重心至弹头顶点的距离
x_j	焦点至弹头顶点的距离
m	车辆质量
l	车辆前后车轮间的距离
δ_0	车辆前轮转角
V	车辆速度
K_f, K_r	分别为车辆前后轮轮胎的侧偏刚度
l_f, l_r	分别为车辆质心与前后车轮间的距离
Y_w	侧向力
N_w	横摆力矩
C_y	侧向力系数
C_n	横摆力矩系数, 取逆时针方向为正
ρ	空气密度
S	车辆的前面面积
l	车辆的代表尺寸, 一般取轴距
AC	Y_w 的作用点为车辆相对于侧风的空气动力学中心 (aerodynamic center, AC)

l_w	AC 和车辆质心间的距离
M_j	作用在舵面上的气动力相对于舵面铰链轴的力矩
M_j^δ	单位舵偏角产生的铰链力矩
C_{hj}^δ	铰链力矩导数
S_δ	舵参考面积
c_δ	舵平均几何弦长
δ_j	舵偏角

第 6 章、第 7 章主要符号表：

V_0	船体坐标系原点 O 相对于地面坐标系的运动速度
i, j, k	单位矢量
F_s, G_s	分别表示海洋运动体受到的恢复力和恢复力矩
F_H, G_H	分别表示海洋运动体受到的水动力和水动力矩
F_P, G_P	分别表示海洋运动体受到的螺旋桨推力和推力矩
F_C, G_C	分别表示由海洋运动体控制系统提供的控制力和控制力矩
F_D, G_D	分别表示由于海洋环境的扰动所产生的力和力矩, 例如由海浪、海流等环境扰动作用产生的力和力矩
M_T	稳心
G	重心
$M_S(\theta)$	海洋运动体纵倾恢复力矩
H	纵倾初稳性高
p_H, ρ_H	分别表示飞机在某高度时的大气静压与密度
ρ_0, p_0	分别表示标准大气下海平面的空气密度与压力
V	空速
V_{bs}	表速
V_{zs}	真空速
T_0	标准大气下海平面处热力学温度
p_h, T_h	分别表示高度为 h 处的大气压力与热力学温度
c_0	标准海平面处的声速

第 8 章主要符号表：

Y_d	海浪、海风和海流对船舶的横荡扰动力
N_d	海浪、海风和海流对船舶的首摇扰动力矩
δ	舵角

D_s	稳定性衡准数
I_z	船舶的回转惯性力矩系数
N	船舶回转中所受阻尼力矩系数
C	舵产生的回转力矩系数
K	回转性参数
T	稳定性参数
$\dot{\psi}$	首摇角速度
V_c	海底的航速
ϕ	罗经航向
ϕ_c	海流方向
K_c	ϕ_c 和 δ 之间的稳态增益
K_v	系统开环增益
x	盘位系统变量油缸位移
Q	变量泵排量
M_f	扰动力矩
K_{qB}	变量泵流量系统的结构常数
v_0	高压油路或低压油路液压油总体积
K_{v1}	盘位系统开环增益
K_{H1}	盘位系统反馈系数
ψ_r	航向
L	船长
u	航速
K^*	一阶野本模型中 K 的无因次量
T^*	一阶野本模型中 T 的无因次量
ω_n	自动舵作用下的船舶首摇运动的自然频率
ζ	自动舵作用下的船舶首摇运动的阻尼系数
$r_{\max}$	设计自动舵的船舶最大的首摇角速度

第 9 章主要符号表:

m	车辆的惯性质量
I	车辆的横摆转动惯量
l_f, l_r	车辆质心和前后车轴间的距离
d_f, d_r	车辆的前后轮距
K_f, K_r	前后轮轮胎的侧偏刚度
$O_R - x_R y_R$	固定于地上水平面内的坐标系

$O_b-x_b y_b$

固定于车辆的坐标系

 i, j 分别为 x_b 、 y_b 轴向上的单位矢量 u, v O_b 点沿 x_b 、 y_b 轴向的速度分量 Y_f, Y_r

前后单轮的侧偏力

 δ

前轮转角

 θ

车辆的横摆角

目录

CONTENTS

第1章 概述	1
1.1 运动体的概念	1
1.2 研究运动体运动与控制的实际意义	2
1.3 运动体控制问题的发展历史与现状	2
1.3.1 飞行器操纵控制的发展历史与现状	2
1.3.2 船舶操纵控制的发展历史与现状	4
1.3.3 车辆操纵控制的发展历史和现状	9
习题与思考题	11
第2章 物理基础	12
2.1 相关理论力学基础	12
2.2 相关流体力学基础	17
2.3 平面进行波	23
2.4 随机海浪	25
2.4.1 随机海浪概述	25
2.4.2 随机海浪的统计特性和谱分析	29
2.5 海流	37
2.6 海风和海风的谱分析	38
习题与思考题	40
第3章 运动及其描述	41
3.1 常用坐标系	41
3.2 飞行力学变量	43
3.2.1 飞行器相对地面姿态的确定	43
3.2.2 航迹速度矢量的确定	46
3.2.3 空气动力学变量的确定	47
3.2.4 描述风影响的角度	49
3.2.5 速度方程	51
3.2.6 转动角速度方程	51
3.2.7 操纵偏角	52