

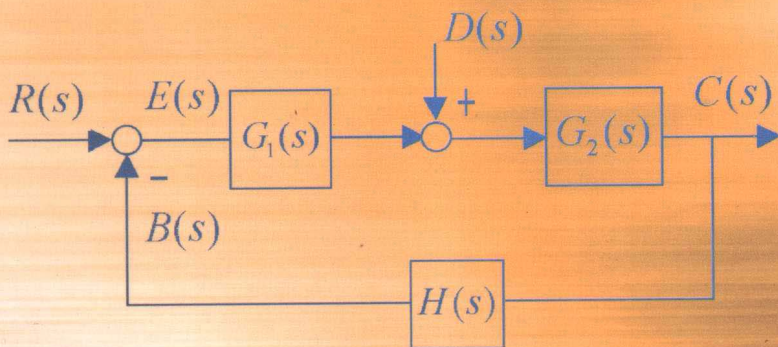


高等院校电子信息与电气学科特色教材

自动控制原理

杨智 范正平 主编

张雨浓 李晓东 主审



清华大学出版社



高等院校电子信息与电气学科特色教材

自动控制原理

杨 智 范正平 主编
张雨濛 李晓东 主审

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

自动控制原理是高等院校理工科学生的核心课程之一,本书主要讲述自动控制系统理论及其应用,包括自动控制的基本概念、基本理论、分析与设计方法。全书共9章,分别讲述自动控制系统的基本概念;控制系统的数学模型,包括状态变量模型;控制系统的时域分析方法;线性系统的根轨迹分析方法;线性系统的频域响应分析方法;控制系统的校正设计方法;状态变量分析与设计;非线性系统,主要是相平面和描述函数法;数字控制系统。

本书以培养应用研究和创新型人才为主线,通过贯穿全书的一系列新颖且充满挑战性的问题,并在问题答案的寻找过程中,使学生充分体会到发现的乐趣。每章首页介绍一位与电子信息与电气学科有关的国际知名学者,每章最后一页简单介绍电子信息与电气学科某一个专业的概况、研究内容及职业方向,正确引导学生了解学科各专业的培养目标及相互联系。

本书可作为高等学校电子信息与电气学科各专业,机械、化工、航空航天等非电类相关专业的本科生教材,亦可供有关工程技术人员参考。

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

自动控制原理/杨智,范正平主编. —北京:清华大学出版社,2010.7

(高等院校电子信息与电气学科特色教材)

ISBN 978-7-302-21412-0

I. 自… II. ①杨… ②范… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第201428号

责任编辑:王一玲

责任校对:李建庄

责任印制:王秀菊

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:010-62795954, jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

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

印 刷 者:北京市人民文学印刷厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:31.25 字 数:774千字

版 次:2010年7月第1版 印 次:2010年7月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:45.00元

产品编号:032111-01

出版说明

随着我国高等教育逐步实现大众化以及产业结构的进一步调整,社会对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这反映到高等学校的定位与教学要求中,必然带来教学内容的差异化和教学方式的多样性。而电子信息与电气学科作为当今发展最快的学科之一,突出办学特色,培养有竞争力、有适应性的人才,是很多高等院校的迫切任务。高等教育如何不断适应现代电子信息与电气技术的发展,培养合格的电子信息与电气学科人才,已成为教育改革中的热点问题之一。

目前我国电类学科高等教育的教学中仍然存在很多问题,例如在课程设置和教学实践中,学科分立,缺乏和谐与连通;局部知识过深、过细、过难,缺乏整体性、前沿性和发展性;教学内容与学生的背景知识相比显得过于陈旧;教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息与电气学科人才还不能很好地满足社会的需求,等等。为了适应 21 世纪人才培养的需要,很多高校在电子信息与电气学科专业建设和课程建设方面都做了大量工作,包括国家级、省级、校级精品课的建设等,充分体现了各个高校重点专业的特色,也同时体现了地域差异对人才培养所产生的影响,从而形成各校自身的特色。许多一线教师在多年教学与科研方面已经积累了大量的经验,将他们的成果转化为教材的形式,向全国其他院校推广,对于深化我国高等学校的教学改革是一件非常有意义的事。

为了配合全国高校培育有特色的精品课程和教材,清华大学出版社在大量调查研究的基础之上,在教育部相关教学指导委员会的指导下,决定规划、出版一套“高等院校电子信息与电气学科特色教材”,系列教材将涵盖通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、自动化、电气工程、光电信息工程、微电子学、信息安全等电子信息与电气学科,包括基础课程、专业主干课程、专业课程、实验实践类课程等多个方面。本套教材注重立体化配套,除主教材之外,还将配套教师用 CAI 课件、习题及习题解答、实验指导等辅助教学资源。

由于各地区、各学校的办学特色、培养目标和教学要求均有不同,所以对特色教材的理解也不尽一致,我们恳切希望大家在使用本套教材的过程中,及时给我们提出批评和改进意见,以便我们做好教材的修订改版工作,使其日趋完善。相信经过大家的共同努力,这套教材一定能成



为特色鲜明、质量上乘的优秀教材,同时,我们也欢迎有丰富教学和创新实践经验的优秀教师能够加入到本丛书的编写工作中来!

清华大学出版社

高等院校电子信息与电气学科特色教材编委会

联系人: 王一玲 wangyl@tup.tsinghua.edu.cn

前言

“电子信息与电气”科学与工程是饶有兴趣、充满新奇且具有挑战性的学科。从本质上说,控制科学与工程是一门跨学科综合性的工程学科,“自动控制原理”是它的核心课程。由于自动控制技术在各个行业的广泛渗透,其控制理论已逐渐成为高等院校许多学科共同的专业基础,且越来越占有主要的位置。国内外已经出版了许多优秀的《自动控制原理》教科书,尽管如此,学生们仍常常感到学习和应用“自动控制原理”都是比较困难的。我们的学生从电力、石油化工、冶金、机械加工、水自处理、地铁、啤酒厂、汽车制造企业参观实习回来后都惊奇地发现,他们在课堂上学到的知识如今确实应用到了各个行业,我们建议学生在学习这门课程期间去工厂参观实习,这对学习、认识和应用自动控制系统大有好处。我们可以采用不同的途径来学习和掌握控制科学与工程的基础知识和技能。一方面,该学科是建立在坚实的数学基础之上的,我们可以将定理及其证明作为重点从严格的理论角度来学习它;另一方面,由于其最终目标是实现对实际系统的自动控制,我们也可以在设计控制系统的实践中,主要凭直觉和实践经验来学习,不过这只是权宜之计。本书是在介绍电子信息与电气学科的数学工具和方法论的基础上,着重以工程实例为背景,以物理模型为主线,实现对自动控制系统的分析和对实际控制系统的设计。

一种重要而有效的学习方法是对前人已得到的答案和方法重新发现和创新。传统的教学方法不重视学生创新与实践能力的培养,不重视向学生提问题,而是只给出问题的研究方法、理论证明和完整的答案,使学生有可能知难而退,感受不到刺激和兴奋,与创造冲动无缘。因此,理想的教学方法是向学生提出一系列问题,并给出一些过去已经得到的答案。向学生提出一些我们将继续面临的、重要而尚无答案的问题,由学生自己去寻求答案。这样他们可以自豪地说,他们所学到的知识都是自己所发现的。一本好的教科书和一位好的教授讲解是学好课程的有利条件,但是,只有学生自己才是学好课程的关键因素,大家都知道兴趣是最好的老师,相信本书的出版能给学生带来更大的学习和研究兴趣。

本书注重教学研究要更新观念、强调工程背景,理论紧密结合实际,从基本概念和分析方法入手,结合实例,以时域分析方法为主线,时域分析和频域分析并进,图文并茂,利用直观的物理概念以及一系列MATLAB仿真结果使学生充分理解控制系统参数与性能指标之间的内在联系,由浅入深地引导学生全面理解和掌握自动控制系统的分析与设计方法。

本书第1~6章内容可以作为电子信息与电气学科各专业的基础内容,建议学时在60学时左右。其他内容可根据各院校各专业的教学计划自行组合或取舍。

本书由杨智、范正平主编,张雨浓、李晓东主审。全书共分9章:第1~2章、第5~7章和第9章由杨智执笔,第3~4章和第8章由范正平执笔。本书部分内容受国家自然科学基金项目(60704045)和(60874115)资助。研究生王明甲、卢燕红、张飞、王波涛、许清媛、刘擷捷等参与了本书的打字、MATLAB编程与绘图工作。在此,谨向对我们的编写工作给予积极支持和大力帮助的人们表示诚挚的感谢!

由于本书涉及的专业领域广泛,书中错误难免,殷切希望广大师生、专家学者、控制工程师提出批评和宝贵意见。

杨 智

2010年5月于广州中山大学

联系邮箱: issyz@mail.sysu.edu.cn

目 录

电子信息与电气学科世界著名学者——瓦特 1

第 1 章 绪论 2

1.1 引言 2

1.2 自动控制的定义和历史回顾 2

1.3 自动控制系统举例及术语定义 4

1.3.1 液位控制系统 4

1.3.2 温度控制系统 5

1.3.3 自动控制系统术语定义 6

1.4 自动控制系统的基本控制方式 7

1.4.1 开环控制 7

1.4.2 闭环控制 7

1.4.3 复合控制 8

1.5 自动控制系统分类 8

1.5.1 按系统特性方程分 8

1.5.2 按参考输入信号的变化规律分 9

1.5.3 按控制系统输入量和输出量类型及数量分 10

1.5.4 按控制原理分 10

1.6 自动控制系统的基本要求 11

1.7 自动控制原理课程性质和内容 11

1.8 小结 12

关键术语和概念 12

拓展您的事业——电子学 13

习题 13

电子信息与电气学科世界著名学者——麦克斯韦 16

第 2 章 控制系统的数学模型 17

2.1 引言 17

2.2 控制系统的时域数学模型 17

2.2.1 微分方程与状态变量数学模型 17

2.2.2 线性定常微分方程的解 24

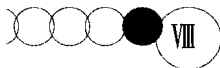
2.2.3 非线性系统的线性化 24

2.2.4 运动的模态 27



2.3	控制系统的复数域数学模型	28
2.3.1	传递函数的定义与性质	28
2.3.2	传递函数的零点与极点	29
2.3.3	传递函数用于分析控制系统性能	29
2.3.4	传递函数数学模型建立举例	31
2.4	控制系统的方框图与信号流程图	33
2.4.1	控制系统的方框图	33
2.4.2	方框图的等效变换和简化	36
2.4.3	信号流程图	39
2.4.4	多输入系统的传递函数	42
2.5	输入输出模型与状态变量模型之间的关系	43
2.5.1	由输入输出模型转换为状态变量模型	43
2.5.2	由状态变量模型转换为输入输出模型	47
2.5.3	线性定常系统在坐标变换下的特性	48
2.6	数学模型的实验测定法	51
2.6.1	数学模型实验测定的主要方法	51
2.6.2	数学模型的工程辨识	51
2.7	MATLAB 用于控制系统模型建立与仿真	52
2.8	小结	57
	关键术语和概念	58
	拓展您的事业——电气工程	59
	习题	59
	电子信息与电气学科世界著名学者——维纳	62
第3章	控制系统时域分析	63
3.1	引言	63
3.1.1	典型输入信号	63
3.1.2	时域性能指标	64
3.2	控制系统时域分析	65
3.2.1	一阶系统的时域分析	65
3.2.2	典型二阶系统的时域分析	67
3.2.3	高阶系统的时域分析	75
3.2.4	MATLAB 分析控制系统时域响应	77
3.3	线性定常系统的稳定性分析	82
3.3.1	稳定性定义及线性定常系统稳定的充分必要条件	82
3.3.2	劳斯稳定判据	84
3.3.3	赫尔维茨稳定判据	88
3.3.4	劳斯稳定判据的应用	89

3.4 控制系统的稳态误差分析	89
3.4.1 误差定义及稳态误差	90
3.4.2 稳态误差的计算	90
3.4.3 稳动态误差系数	95
3.4.4 扰动作用下的稳态误差	96
3.4.5 减小或消除稳态误差的措施	98
3.5 小结	100
关键术语和概念	101
拓展您的事业——自动化	102
习题	102
电子信息与电气学科世界著名学者——伊文思	108
第4章 根轨迹技术	109
4.1 引言	109
4.1.1 根轨迹的基本概念	109
4.1.2 根轨迹方程	110
4.2 根轨迹绘制的基本法则	111
4.3 广义根轨迹	124
4.3.1 参数根轨迹	124
4.3.2 正反馈或非最小相位系统的根轨迹	128
4.4 时滞系统的根轨迹	130
4.5 根轨迹法在控制系统中的应用	133
4.6 小结	136
关键术语和概念	137
拓展您的事业——计算机科学	137
习题	138
电子信息与电气学科世界著名学者——奈奎斯特	142
第5章 线性定常系统的频域分析法	143
5.1 引言	143
5.1.1 频率特性的基本概念与定义	143
5.1.2 频率特性的几何表示法	145
5.2 典型环节频率特性曲线的绘制	147
5.3 系统开环频率特性	153
5.3.1 开环幅相频率特性曲线的绘制	153
5.3.2 开环对数频率特性曲线	157
5.3.3 传递函数的频域实验确定	160
5.4 线性定常系统的频域稳定判据	162



5.4.1	奈奎斯特稳定判据的数学基础	162
5.4.2	奈奎斯特稳定判据	164
5.4.3	对数频率特性稳定判据	171
5.5	相对稳定性——稳定裕度	174
5.6	闭环系统的频域响应	179
5.6.1	闭环系统的频域性能指标	179
5.6.2	典型二阶系统的 M_r 、 ω_r 和带宽 BW	180
5.6.3	确定闭环频率特性的图解法——尼科尔斯图	181
5.6.4	频域指标和时域指标的转换	186
5.7	MATLAB 在系统频域分析中的应用	189
5.8	小结	192
	关键术语和概念	192
	拓展您的事业——通信系统	193
	习题	194
	电子信息与电气学科世界著名学者——伯德	197
	第 6 章 控制系统的校正设计	198
6.1	引言	198
6.1.1	控制系统的分析与设计问题	198
6.1.2	不同校正方法的性能指标	199
6.1.3	基本校正方式	200
6.2	控制(校正)器的基本控制规律	201
6.2.1	比例(P)控制规律	201
6.2.2	积分(I)控制规律	202
6.2.3	比例积分(PI)控制规律	203
6.2.4	比例微分(PD)控制规律	204
6.2.5	比例积分微分(PID)控制规律	206
6.2.6	局部速度反馈控制规律	206
6.3	常用校正装置及特性	208
6.3.1	无源校正电路	208
6.3.2	有源校正电路	211
6.3.3	自动化仪表中的 PID 控制器	212
6.4	根轨迹法在控制系统校正设计中的应用	213
6.4.1	串联超前校正	213
6.4.2	串联滞后校正	218
6.4.3	串联 PID 校正	219
6.4.4	局部反馈校正	221
6.5	伯德图频域法在控制系统校正设计中的应用	228

6.5.1	串联超前校正	228
6.5.2	串联滞后校正	232
6.5.3	滞后超前校正	236
6.5.4	预期开环频率特性校正设计	238
6.6	工业过程控制中 PID 调节器参数的工程整定	243
6.6.1	飞升曲线法	243
6.6.2	临界比例度法	245
6.7	复合校正控制系统设计	246
6.7.1	按扰动补偿的复合控制	246
6.7.2	按输入补偿的复合控制	247
6.8	实用的 PID 控制器结构与鲁棒控制问题	249
6.8.1	理想的 PID 控制器	249
6.8.2	一类实用的 PID 控制器	250
6.8.3	二自由度 PID 控制问题	251
6.8.4	鲁棒控制系统的设计	253
6.9	MATLAB 在控制系统设计中的应用	263
6.9.1	MATLAB 与根轨迹法用于控制系统设计	263
6.9.2	MATLAB 与频域法用于控制系统设计	268
6.10	小结	270
	关键术语和概念	271
	拓展您的事业——电子测量仪器	271
	习题	271
	电子信息与电气学科世界著名学者——卡尔曼	276
第 7 章	状态变量系统分析与设计	277
7.1	引言	277
7.2	线性定常连续系统的时域响应	278
7.2.1	线性定常系统齐次状态微分方程的解与状态转移矩阵	278
7.2.2	状态转移矩阵的性质和意义	279
7.2.3	线性定常连续系统非齐次状态方程的解	280
7.3	连续系统的李雅普诺夫稳定性分析	284
7.3.1	李雅普诺夫稳定性概念	284
7.3.2	李雅普诺夫稳定性理论	286
7.3.3	线性定常系统的李雅普诺夫稳定性分析	292
7.3.4	非线性系统的李雅普诺夫稳定性分析——克拉索夫斯基法	294
7.3.5	李雅普诺夫第二法的其他应用	297
7.4	控制系统的能控性和能观性	300
7.4.1	能控性和能观性的定义	301



7.4.2	线性定常连续系统的能控性判据	302
7.4.3	线性定常连续系统的能观性判据	307
7.4.4	线性系统能控性与能观性的对偶关系	309
7.4.5	控制系统的结构分解	310
7.5	线性定常系统的极点配置设计	316
7.5.1	状态反馈和输出反馈的概念	316
7.5.2	状态变量闭环控制系统的极点配置设计	319
7.5.3	基于状态观测器的控制系统设计	334
7.6	最优控制系统	340
7.6.1	最优控制的数学描述与性能指标	340
7.6.2	基于线性二次型性能指标最优控制设计	343
7.7	小结	355
	关键术语和概念	355
	拓展您的事业——科学研究与教育事业	356
	习题	357
	电子信息与电气学科世界著名学者——李雅普诺夫	361
第 8 章	非线性系统	362
8.1	引言	362
8.1.1	非线性系统的特征	362
8.1.2	非线性系统的研究方法	366
8.2	典型非线性特征及对系统运动的影响	367
8.2.1	继电特性	368
8.2.2	死区特性	370
8.2.3	饱和特性	371
8.2.4	间隙特性	371
8.2.5	摩擦特性	372
8.3	相平面法	372
8.3.1	相平面和相轨迹的基本概念	372
8.3.2	相轨迹的性质	373
8.3.3	相轨迹图解法	374
8.3.4	线性系统的相轨迹	376
8.3.5	非线性系统的相轨迹	379
8.3.6	典型非线性控制系统相平面分析	383
8.4	描述函数法	392
8.4.1	描述函数法的基本概念	392
8.4.2	典型非线性特性的描述函数计算	394
8.4.3	非线性系统的简化	398

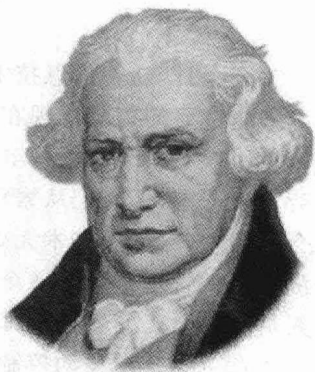
8.4.4 利用描述函数分析系统的稳定性	398
8.5 利用非线性特性进行控制系统设计	402
8.5.1 非线性阻尼校正	402
8.5.2 非线性滞后校正	403
8.5.3 基于继电器特性的 PID 参数自整定控制系统设计	405
8.6 MATLAB 在非线性系统分析中的应用	407
8.7 小结	412
关键术语和概念	412
拓展您的事业——电磁学	413
习题	413
电子信息与电气学科世界著名学者——香农	417
第 9 章 数字控制系统	418
9.1 引言	418
9.1.1 采样控制过程	418
9.1.2 数字控制系统组成	420
9.2 信号的采样与保持	421
9.2.1 采样过程	421
9.2.2 采样过程的数学描述	422
9.2.3 香农定理	423
9.2.4 采样周期的选取	424
9.2.5 信号保持	424
9.3 z 变换	426
9.3.1 z 变换的定义	426
9.3.2 z 变换方法	426
9.3.3 z 变换的基本定理	429
9.3.4 z 反变换	431
9.4 离散系统的数学模型	433
9.4.1 线性定常离散系统差分方程及其解法	433
9.4.2 脉冲传递函数	435
9.4.3 开环系统脉冲传递函数	436
9.4.4 闭环系统脉冲传递函数	438
9.5 线性定常离散控制系统的稳定性	440
9.5.1 线性定常离散控制系统稳定的充要条件	440
9.5.2 离散系统的稳定判据	441
9.6 离散系统的稳态误差	443
9.7 离散系统的动态性能分析	444
9.8 数字控制器的设计	447

9.8.1 模拟化设计方法	447
9.8.2 数字化直接设计方法	448
9.9 MATLAB 在数字控制系统中的应用	450
9.9.1 z 变换和 z 反变换的 MATLAB 实现	450
9.9.2 连续系统模型与离散系统模型的转换	453
9.9.3 线性定常数字控制系统的 MATLAB 稳定性分析	454
9.9.4 数字控制系统的 MATLAB 时域分析	457
9.10 小结	463
关键术语和概念	464
拓展您的事业——软件工程	464
习题	465
附录 A 拉普拉斯变换	468
附录 B 李雅普诺夫主稳定性定理的证明	477
附录 C 常用 z 变换表	480
参考文献	481

电子信息与电气学科世界著名学者——瓦特

詹姆斯·瓦特(James Watt,1736—1819)

瓦特是英国著名的发明家,工业革命时期的重要人物,英国皇家学会会员和法兰西科学院外籍院士。1760年—1800年,詹姆斯·瓦特对蒸汽机进行了彻底的改造,终于使其得到广泛的应用。在瓦特的改良工作中,1788年,他给蒸汽机添加了一个“节流”控制器,即节流阀,它由一个离心“调节器”操纵,类似于磨房机工早已用来控制风力面粉机磨石松紧的装置。“调节器”或“飞球调节器”用于调节蒸汽流,以便确保引擎工作时速度大致均匀,这是当时反馈调节器最成功的应用。后人为了纪念他,将功率的单位称为瓦特,瓦特是国际单位制中功率和辐射通量的计量单位,常用符号“W”表示。



瓦特1736年1月19日生于英国格拉斯哥。童年时代的瓦特曾在文法学校念过书,然而没有受过系统教育。瓦特在父亲做工的工厂里学到许多机械制造知识,后来他到伦敦的一家钟表店当学徒。1763年瓦特到格拉斯哥大学工作,修理教学仪器,在大学里他经常和教授讨论理论和技术问题。1781年瓦特制造了从两边推动活塞的双动蒸汽机,1785年,他也因蒸汽机改进的重大贡献,被选为英国皇家学会会员。1819年8月25日瓦特在靠近伯明翰的希斯菲德逝世。

在瓦特的讣告中,对他发明的蒸汽机有这样的赞颂:“它武装了人类,使虚弱无力的双手变得力大无穷,健全了人类的大脑以处理一切难题。它为机械动力在未来创造奇迹打下了坚实的基础,将有助并报偿后代的劳动”。

第1章

绪论

1.1 引言

时至今日,随着信息技术的飞速发展,自动控制在现代文明和技术的发展与进步中扮演着越来越重要的角色。现在自动控制技术已广泛应用于石油化工、冶金、机械制造、汽车制造、造纸、航空航天、军事、电力系统、交通、市政(供水调度、污水处理)等领域,它极大地提高了劳动生产率,使人们从繁重的体力劳动和大量重复性的手工操作中解放出来。在今天的社会生活中,自动化技术无处不在。自动控制除在各工程领域广泛应用外,还被用于社会、经济和人文管理系统等各个领域,它为人类文明进步做出了重要贡献。因此,大多数工程技术人员和科学工作者现在都必须具备一定的自动控制知识。

本章主要介绍自动控制的基本概念及发展历史,随后举例讲述自动控制系统的几种典型控制方式及其分类,对控制系统设计的基本要求和自动控制原理课程性质、学习内容等方面进行了说明。最后,对信息自动化专业的学生在学习本学科专业知识时应注意的问题给予了阐述。

1.2 自动控制的定义和历史回顾

1. 自动控制的定义

所谓的自动控制技术是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称控制器 controller),使机器、设备或生产过程(统称被控对象 plant 或被控过程 process)的某个工作状态或参数(即被控量)自动地按照预定的规律运行。

2. 自动控制的发展历史

(1) 1788年瓦特(James Watt)的蒸汽机及他的离心式飞锤调速器(fly-ball governor)的发明建立了蒸汽机转速自动控制系统,出现了反馈的概念,“调节器”或“飞球调节器”用于调节蒸汽流,以便确保引擎工作时速度大致均匀,这是当时反馈调节器最成功的应用,它的出现标志着英国工业革命的开始,但也发现了闭环系统可能出现振荡的现象。瓦特是一位实干家,他没有对调节器进行理论分析。

(2) 1868年著名物理学家、电磁场理论发明人麦克斯韦(Maxwell J C)建立了蒸汽机飞球控制的微分方程数学模型,从微分方程角度讨论了调节器系统可能产生的不稳定现象,从而开始了对反馈控制动力学问题的理论研究,提出了稳定的概念。他是第一个对反馈控制