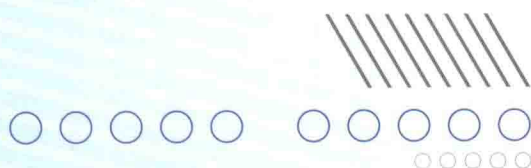


军队院校“2110工程”建设项目

普适同步 控制理论

Universal Synchronous Control Theory



雷军委 晋玉强 刘迪 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

普适同步控制理论

雷军委 晋玉强 刘 迪 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

同步的概念以及同步的思想最早产生于惠更斯的两个钟摆同步,目前采用反馈控制的思想来解决两个不同系统的同步问题已得到了广泛的研究,并且应用于混沌系统的同步与保密通信中。

而本书则首次将同步的思想应用于控制领域中,利用同步的思想构造一般被控系统的同步系统,设计同步控制律而解决不确定控制系统的跟踪控制问题。同时尽管本书所提同步控制思想和模型参考自适应控制、全维观测器方法有所类似,但又完全不同,是一种全新的方法。另一方面,尽管本书大部分章节是以二阶系统为例说明,但其提出的同步控制的结构框架与控制模式可以普遍推广应用于其它高阶系统或非线性系统,从而使同步控制能够成了一种像PID一样普遍适用的控制策略。

在内容上,本书按照从简到繁,由浅入深的原则,首先在第2章与第3章分别介绍了单控制方向的二阶系统的反演控制与滑模控制,为第4章的单控制方向二阶系统普适同步控制打下基础。其次在第5章与第6章研究了双控制方向二阶系统的滑模控制与反演控制。最后在第7章与第8章分别研究了双控制方向二阶系统的反演同步与滑模同步控制研究。值得说明的是在第5章给出了LEI可稳定条件,第7章提出了基于传递函数微分的五种处理方法,对于非最小相位系统控制问题的研究均具有较高的参考价值,望感兴趣的读者能够在此基础上进一步深入研究,并将同步控制的思想广泛应用于各自的工程实践中,勇于尝试与推陈出新。

图书在版编目(CIP)数据

普适同步控制理论/雷军委,晋玉强,刘迪著. —北京:国防工业出版社, 2016.5

ISBN 978-7-118-10856-9

I. ①普… II. ①雷… ②晋… ③刘… III. ①同步控制系统
IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第082417号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12 字数 230千字

2016年5月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 75.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前 言

同步的概念以及同步的思想最早产生于惠更斯的两个钟摆同步，目前，同步控制的研究也主要集中于混沌系统的同步与保密通信的应用中，主要是利用控制的思想来解决同步问题。本书则首次将同步的思想应用于控制领域中，以及利用同步控制的思想构造一般被控系统的同步系统，设计同步控制律而实现一般控制系统的跟踪控制目标，从而使其成为了一种像 PID 一样普遍适用的控制新方法。本书是在研究以下两个问题的过程中形成的：其一是控制律的普适性问题；其二是控制律的增益匹配问题。国内外对控制普适性与普适同步控制的研究才刚刚兴起，远未成体系。鉴于此原因，本书对普适同步控制进行系统化的研究是非常有必要与有意义的。

本书的目的一方面是提出一种像 PID 一样普遍适用的控制律构造方式，为广大控制工程领域研究者提供参考作用；另一方面是激发读者对控制普适性与增益匹配问题的关注。为达到以上目的，本书具有以下一些特点。

(1) 理论易读性。为了增加本书的可读性，本书分章节对内容进行编排，而且对每一节的问题，均按照被控对象模型描述、假设条件、控制律设计、仿真分析与结论的模式进行讲述，因此，每一章节都是完全独立的一个整体。读者如果对前面章节内容不熟悉，也不影响对后续章节的阅读。

(2) 工程实用性。本章的研究对象主要是针对二阶线性系统，即目前大多数实用的工程对象，如导弹、飞机在工程研究过程中均可以简化为二阶系统来研究。因此，一种控制方法有实用价值的基础是能够应用于一般二阶系统，而且二阶系统可以满足绝大多数实际工程系统的被控对象复杂度要求。

(3) 程序指导性。本书附有大量的程序（联系作者邮箱），保障读者能够通过程序来验证每一节所提的理论方法，读者能够通过程序还原书中所有的仿真曲线，尤其是通过程序来了解笔者的研究思想。

(4) 仿真历遍性。本书的一大特点是进行了大量的随机仿真，尽管随机参数被限定于某一给定区间选取，但也表明了本书所提方法的普遍适用性。主要是通过随机历遍的特点验证所提算法对所有二阶系统的稳定性与鲁棒性。

本书从内容上分两个部分：第一部分为第 2 章~第 4 章，主要是针对单控制方向的二阶系统进行研究；第二部分为第 5 章~第 8 章，主要是针对双控制方向

的二阶系统进行研究。每一部分又先研究了一般反演设计与滑模设计方法的控制效果，最后给出普适同步控制的设计方法与控制效果，以便于和前两者进行对比分析。

本书的出版得到了海军航空工程学院控制工程系的大力支持，在此对控制工程系周文松主任、张贵硕政委、胡云安主任、赵国荣主任与周绍磊主任表示诚挚的谢意。感谢飞行器控制教研室吴华丽、王玲玲、梁勇、梁国强与施建洪同志，完成了本书部分内容的编辑与书稿修订工作，使得本书得以顺利出版。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

雷军委

2015-2-2

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 普适同步控制的研究背景	1
1.2 同步的定义与几种同步方法	2
1.3 控制理论在混沌同步控制中的应用	3
1.4 同步思想在控制理论中的应用	4
1.5 本书的内容安排	5
第 2 章 具有单控制方向的二阶线性系统反演控制	6
2.1 引言	6
2.2 具有单控制方向的参数未知二阶系统反演自适应控制	6
2.2.1 问题描述	6
2.2.2 假设条件	7
2.2.3 反演自适应控制律设计	7
2.2.4 四种微分实现的仿真举例	9
2.2.5 算法鲁棒性的随机仿真举例	12
2.2.6 结论	14
2.3 具有不确定单常控制系数幅值的二阶系统反演自适应控制	15
2.3.1 问题描述	15
2.3.2 假设条件	15
2.3.3 控制系数幅值不定情况下的反演自适应控制律设计	15
2.3.4 四种微分实现的仿真举例	17
2.3.5 算法鲁棒性的随机仿真举例	19
2.3.6 结论	20
2.4 具有单时变控制系数的二阶系统反演自适应控制	21
2.4.1 问题描述	21
2.4.2 假设条件	21
2.4.3 单时变控制系数情况下的反演自适应控制律设计	22
2.4.4 仿真验证	24
2.4.5 算法鲁棒性的随机仿真	25

2.4.6 结论	26
2.5 本章小结	26
第 3 章 具有单控制方向的二阶线性系统滑模控制	27
3.1 引言	27
3.2 具有单控制方向的未知二阶系统自适应滑模控制	27
3.2.1 问题描述	27
3.2.2 自适应滑模控制律设计	27
3.2.3 仿真举例	29
3.2.4 结论	30
3.3 具有未知单常控制系数的二阶系统滑模自适应控制	30
3.3.1 问题描述	30
3.3.2 假设条件	31
3.3.3 未知单常控制系数情况下的自适应滑模控制律设计	31
3.3.4 仿真举例	33
3.3.5 结论	33
3.4 具有单时变控制系数的二阶系统滑模自适应控制	34
3.4.1 问题描述	34
3.4.2 假设条件	34
3.4.3 未知单常控制系数情况下的自适应滑模控制律设计	34
3.4.4 仿真举例	36
3.4.5 结论	36
3.5 本章小结	37
第 4 章 具有单控制方向的二阶线性系统普适同步控制	38
4.1 引言	38
4.2 具有单控制方向的未知二阶系统自适应异构同步控制	38
4.2.1 同步问题描述	38
4.2.2 被控系统	39
4.2.3 异构同步系统	39
4.2.4 误差系统	39
4.2.5 反演控制律设计	40
4.2.6 滑模控制律设计	41
4.2.7 反演算法正确性的单次仿真验证	41
4.2.8 滑模算法正确性的单次仿真验证	43
4.2.9 反演控制算法鲁棒性的多次随机仿真验证	44
4.2.10 滑模控制算法鲁棒性的多次随机仿真验证	45

4.2.11	结论	46
4.3	具有未知单常控制系数的二阶系统自适应异构同步控制	46
4.3.1	被控系统	46
4.3.2	假设条件	47
4.3.3	自适应异构同步系统	47
4.3.4	误差系统	47
4.3.5	反演控制律设计	48
4.3.6	滑模控制律设计	48
4.3.7	反演控制算法正确性的单次仿真验证	49
4.3.8	滑模控制算法正确性的单次仿真验证	51
4.3.9	反演控制算法鲁棒性的多次随机仿真验证	52
4.3.10	滑模控制算法鲁棒性的多次随机仿真验证	56
4.3.11	结论	60
4.4	具有未知单常控制系数的二阶系统定常异构同步控制	60
4.4.1	定常异构同步系统	60
4.4.2	误差系统	61
4.4.3	反演控制律设计	62
4.4.4	滑模控制律设计	62
4.4.5	反演控制算法正确性的单次仿真验证	63
4.4.6	滑模控制算法正确性的单次仿真验证	64
4.4.7	反演控制算法鲁棒性的多次随机仿真验证	65
4.4.8	滑模控制算法鲁棒性的多次随机仿真验证	66
4.4.9	结论	67
4.5	具有单时变控制系数的二阶系统普适同步控制	68
4.5.1	问题描述	68
4.5.2	假设条件	68
4.5.3	异构同步系统	68
4.5.4	误差系统	68
4.5.5	反演控制律设计	69
4.5.6	滑模控制律设计	69
4.5.7	反演控制算法正确性的单次仿真验证	69
4.5.8	滑模控制算法正确性的单次仿真验证	70
4.5.9	反演算法鲁棒性的多次随机仿真验证	71
4.5.10	滑模算法鲁棒性的多次随机仿真验证	72
4.5.11	结论	73
4.6	具有未知单控制方向的二阶系统普适同步控制	73
4.6.1	控制方向未知问题简介	73

4.6.2	被控系统描述	74
4.6.3	假设条件	74
4.6.4	增益对比分析	74
4.6.5	控制律改进	75
4.6.6	算法正确性的单次仿真验证	76
4.6.7	结论	78
4.7	本章小结	78
第 5 章	具有双控制方向的二阶线性系统滑模控制	79
5.1	引言	79
5.2	二阶系统的 LEI 可稳条件	79
5.3	基于等效传递函数的确定二阶最小相位系统的滑模控制	80
5.3.1	问题描述	80
5.3.2	假设条件	81
5.3.3	滑模控制律设计	81
5.3.4	仿真分析	82
5.3.5	结论	84
5.4	确定二阶最小相位系统的自适应滑模控制	85
5.4.1	问题描述	85
5.4.2	假设条件	85
5.4.3	自适应滑模控制律设计	85
5.4.4	仿真分析	87
5.4.5	结论	93
5.5	本章小结	93
第 6 章	具有双控制系数的二阶线性系统反演控制	94
6.1	引言	94
6.2	基于传递函数的确定二阶非最小相位系统反演控制	94
6.2.1	问题描述	94
6.2.2	基于传递函数的反演控制律设计	94
6.2.3	确定系统仿真分析	96
6.2.4	系统扰动仿真分析	97
6.2.5	小结	99
6.3	忽略期望状态微分的确定二阶最小相位系统反演控制	99
6.3.1	问题描述	99
6.3.2	假设条件	100
6.3.3	反演控制律设计	100

6.3.4	仿真分析	100
6.3.5	小结	101
6.4	基于导数展开的确定二阶非最小相位系统增维反演控制	101
6.4.1	基于导数展开的增维反演控制律设计	101
6.4.2	确定系统仿真分析	105
6.4.3	系统摄动仿真分析	107
6.4.4	小结	110
6.5	本章小结	111
第 7 章	具有双控制系数的二阶线性系统反演同步控制	112
7.1	引言	112
7.2	具有定常双控制方向的未知二阶系统自适应反演同步控制	112
7.2.1	假设条件	112
7.2.2	异构同步系统	113
7.2.3	误差系统同步律设计	113
7.2.4	异构系统反演控制规律设计	113
7.2.5	确定系统的自适应反演同步控制仿真分析	116
7.2.6	增益自适应同步控制仿真分析	117
7.2.7	结论	118
7.3	具有定常双控制方向的未知二阶系统大增益反演同步控制	118
7.3.1	被控系统描述	118
7.3.2	异构系统反演控制规律设计	118
7.3.3	无摄动情况下的反演同步控制算法随机多次仿真验证	120
7.3.4	摄动情况下的反演同步控制算法随机多次仿真验证	121
7.3.5	结论	125
7.4	忽略状态微分的定常双控制方向未知二阶系统扩维反演同步控制	125
7.4.1	被控系统描述	125
7.4.2	误差系统	126
7.4.3	扩维反演控制律设计	126
7.4.4	不考虑期望值微分的仿真结果	127
7.4.5	采用滤波实现微分的仿真结果	129
7.4.6	结论	129
7.5	基于部分传函微分的定常二阶系统扩维反演同步控制	129
7.5.1	误差系统	129
7.5.2	扩维反演控制律设计	130
7.5.3	仿真分析	132
7.5.4	结论	136

7.6 基于完全传函微分的定常二阶系统扩维反演同步控制	136
7.6.1 扩维反演控制律设计	136
7.6.2 仿真分析(一)	143
7.6.3 仿真分析(二)	145
7.6.4 仿真分析(三)	149
7.6.5 仿真分析(四)	152
7.6.6 仿真分析(五)	153
7.6.7 结论	156
7.7 本章小结	156
第8章 具有双控制系数的二阶线性系统滑模同步控制	158
8.1 引言	158
8.2 具有定常双控制方向的二阶系统滑模同步控制	158
8.2.1 滑模控制律设计	158
8.2.2 仿真分析	160
8.2.3 自适应同步与仿真分析	161
8.2.4 结论	163
8.3 具有未知定常双控制系数的二阶系统自适应异构滑模同步控制	163
8.3.1 被控系统描述	163
8.3.2 误差系统	164
8.3.3 滑模控制律设计	165
8.3.4 仿真分析	166
8.3.5 结论	167
8.4 具有未知定常双控制系数的二阶系统定常异构滑模同步控制	168
8.4.1 异构同步系统	168
8.4.2 误差系统	168
8.4.3 滑模控制律设计	169
8.4.4 仿真分析	170
8.4.5 控制律反解重设计	173
8.4.6 结论	176
8.5 本章小结	176
总结与展望	178
后记	179
致所有读者	180
参考文献	181

第1章 绪 论

1.1 普适同步控制的研究背景

本书同步控制的研究是在控制普适性的问题思考中所提出来的。众所周知，PID 控制由于具有良好的普适性而被工程应用所广泛采纳。那么，首先，第一个问题就是什么是控制普适性以及其研究的必要性；其次，第二个问题就是控制普适性是否是 PID 控制所特有的特性。

第二个问题可以换一种问法，即除了 PID 控制以外，是否还具有其他良好控制普适性的方法？显然，普适性并不是 PID 控制所特有的，如韩京清老师所提出的自抗扰控制也具有很好的普适性，被工业部门所广泛使用。同时，本书所研究的同步控制，也是基于普适控制的思想提出的，其控制与设计思想并不仅仅针对某一类系统有效，而是针对一般结构与形式的控制系统，提出一类通用的控制结构与控制律设计方法。

当然，同步的概念以及同步控制的思想并非本书首次提出。下文中将说明同步的思想最早产生于惠更斯的两个钟摆同步，而目前同步控制的研究也主要集中在混沌系统的同步与保密通信的应用中。

但本书首次将同步控制的思想应用于控制领域中，以及利用同步控制的思想构造一般被控系统的同步系统，设计同步控制律而实现一般控制系统的跟踪控制目标，从而使其成为了一种像 PID 一样普遍适用的控制新方法。鉴于此原因，本书对普适同步控制进行系统化的研究是非常有必要与有意义的。

第一个问题中有关控制普适性的定义及其研究意义，由于比较复杂，将在其他专著中单独阐述，在此仅作简要说明。根据《辞海》的定义，普适性的定义是某一事物（特别是观念、制度和规律）比较普遍地适用于同类对象或事物的性质。那么，控制普适性是指一种控制方法比较普遍地适用于相近的某一类被控对象的能力。控制领域已有稳定性与鲁棒性的定义，为何要研究控制普适性呢？显然，稳定性与鲁棒性的定义均是以某一确定结构的被控模型为基础的。其中稳定性主要是研究控制规律对某一确定系统的控制效果；鲁棒性则在稳定的基础上，研究控制规律对以一类标称系统为参考的不确定系统的控制效果，或者是研究控制规律针对具有某些摄动情况的一族确定系统的控制效果。可以说，稳定性是控制方法数学成立的基本条件，鲁棒性是控制方法工程可用的基本条件。控制普适性的

研究则是研究某一类控制方法或控制思想,对几种或多种不同结构与形势的不确定系统的综合控制效果。当然,更为理想的状态下,控制普适性的研究应当说明某一类控制思想或方法对任意的被控系统的普遍适用能力。因此,可以说,普适性是控制方法有价值、有意义的根本,是算法具有良好鲁棒性的内因。一般来说,普适性较好的方法会具有较好的鲁棒性与稳定性。因此,普适性是对控制算法在稳定性、鲁棒性基础上更高层次的要求。

正是基于以上原因,本书对不同类型的二阶系统同步控制进行了详细而系统化的研究,力求说明同步控制思想在任意的一般控制系统中的控制效果。针对一阶系统的研究过于简单,高阶系统的同步控制原理和二阶系统相同,而且鉴于导弹或飞机等复杂的飞行器运动系统,均可以简化为二阶线性系统来处理,因此,二阶系统可以满足绝大多数实际工程系统的被控对象复杂度要求。就像 PID 控制律可以作用于非线性控制规律一样,本文所提的普适同步控制构建思想也可以简单推广至非线性系统,因此,鉴于笔者时间与本书的页面限制,没有进一步深入研究。

1.2 同步的定义与几种同步方法

同步(Synchronization)一词源于希腊语^[1],意为“共享相同的时刻”。自从惠更斯于 17 世纪实现两个钟摆完全同步振荡后,同步化问题成为在力学、电学、光学等各个物理学科,以及化学、生物等多个领域受到普遍重视的问题,它在自然科学的许多系统中具有重要意义。

常见的同步控制有四种类型:完全同步、滞后同步、广义同步和相位同步。其中,广义同步、相位同步和完全同步研究较多,滞后同步研究还很少,经常会用到的同步类型为完全同步。

判断同步是否实现,过去的办法是计算误差系统的条件李雅普诺夫(Lyapunov)指数,并有同步定理,但最近的研究^[2, 3]表明,所有条件 Lyapunov 指数为负既不是混沌同步的充分条件也不是必要条件。所以现在几乎所有混沌同步的方法都是根据 Lyapunov 稳定性理论来判定误差系统零解的稳定性。从具体方法来看,有 PC 同步法、状态反馈同步法、脉冲控制法、Backstepping 控制法、鲁棒控制法、滑模控制法等^[4-8],现就几种基本的方法加以简单介绍。

(1) PC 同步法。这是由 L. M. Pecora 和 T. L. Carroll^[9]提出的一种完全同步方法,其基本思想是用一个混沌系统的输出信号去驱动另一个混沌系统来实现两个混沌系统的同步。基本方法如下:设 N 维系统 $\dot{U} = F(U)$, 将其分解为两个子系统,即

$$\begin{cases} \dot{V} = f_1(V, W) \\ \dot{W} = f_2(V, W) \end{cases}, \quad V \in R^m, W \in R^n \quad (1-1)$$

式中: $\dot{U} = F(U)$; V 为驱动子系统; W 为响应子系统。现在以 V 为驱动信号, 复制一个与响应子系统完全相同的系统作为响应系统, 即

$$\dot{\bar{W}} = f_2(V, \bar{W}) \quad (1-2)$$

当误差系统的所有条件 Lyapunov 指数都为负时, W 与 $\bar{W}$ 达到完全同步。

(2) 状态反馈同步法。该方法的基本思想是驱动系统给响应系统一个状态反馈, 使误差系统渐近稳定, 从而达到同步, 根据反馈项的形式, 可以分为线性状态反馈和非线性状态反馈两大类。其中, 非线性状态反馈理论上较易实现, 但在工程上应用起来比较复杂。在状态反馈方法的基础上, 人们又设计出了自适应控制法, 此时, 反馈项的控制系数是变化的, 可以根据误差大小自我调节, 这使得控制项的设计更为灵活。

(3) 脉冲控制法。脉冲控制法是一种非常有效的方法, 可用于系统变量可瞬时改变的一类系统的控制。其主要的理论依据是脉冲常微分方程理论或脉冲延迟微分方程理论。脉冲控制法可以看成是状态反馈方法的离散情形, 即驱动系统对响应系统的反馈只出现在某些时刻, 而不是连续的时间段, 这使得控制付出的代价比较小, 更为经济。

(4) 其他控制方法。反演控制法是一种非线性系统的递推设计方法, 通过一步步构建 Lyapunov 函数导出稳定的控制率, 获得需要的控制器, 从而实现混沌系统的同步。鲁棒控制 (Robust Control) 的研究始于 20 世纪 50 年代。在过去的 20 年中, 鲁棒控制一直是国际自控界的研究热点。所谓“鲁棒性”, 是指控制系统在一定参数摄动下, 维持某些性能的特性。目前, 已有大量文献将反演控制与鲁棒控制应用于混沌系统的同步控制中, 在此不再一一列举。

1.3 控制理论在混沌同步控制中的应用

同步控制方法最早是应用于保密通信领域以及混沌系统的同步, 其主要模式有主从系统的接收端与发射端同步, 目的在于从接收端还原出发射端加密信号。

控制理论被广泛应用于混沌同步中, 这是由于混沌同步可以看出是一种特殊的控制方式, 即控制的跟踪信号是混沌系统同步中的驱动系统的状态。

G. P. Jing^[10]等对两个通过单向反馈耦合的混沌系统的全局同步问题, 应用李雅普诺夫函数得到以几个代数不等式表示的一般条件, 通过求解不等式得到系统同步得以实现的条件。Changpin Li^[11]针对三个不同的混沌系统, 通过构造李雅普诺夫函数的方法求解部分或全部状态误差线性反馈的反馈增益条件, 实现不同系统间的同步。Torrealdea^[12]等采用状态反馈同步方法, 提出了在系统参数相同和不相同情况下的参数自适应同步策略。

在单向反馈控制中, 除线性控制外, 也可以采用非线性控制方法。M. TYassen^[13]研究采用主动方式实现混沌系统同步; H. NAgazi^[14]针对 Rossler 与 Chen 系统进行

了主动控制研究, 和 Yao-Chen Hung^[15]研究了混沌系统主动控制实现同步的统一描述, 将控制分成线性和非线性控制两部分, 用控制器的非线性部分消去系统同步误差方程中的非线性项, 使控制器的设计变为线性反馈控制器的设计。

随着新的混沌系统的发现和同步形式的变化, 各种形式的反馈同步方法被提出。南京邮电大学蒋国平教授等^[16]利用误差线性反馈方法实现了一对混沌系统的全局同步。中国科学院王绍青院士等^[17]利用变量反馈算法实现超混沌系统与混沌系统的同步; 西安交通大学马西奎教授等^[18]研究了连续时间混沌系统的非线性反馈控制与同步问题; 东南大学费树岷教授等^[19]实现了 Genesio-Tesi 和 coulet 混沌系统之间的非线性反馈同步; 武汉大学陶朝海教授等^[20]研究了一类统一混沌系统的速度反馈同步; 除了以上反馈控制同步外, 自适应控制、变结构控制、神经网络控制、遗传算法等现代控制理论均可应用于混沌同步中, 在此不再一一列举。

1.4 同步思想在控制理论中的应用

从以上分析可以看出, 几乎所有的控制新方法均能在同步控制中得到应用。本文的研究则是反其道而行之, 是把同步的思想应用于控制领域, 形成普适同步控制方法。本书首次将同步思想应用于控制领域, 提出一种普适的同步控制方法, 目的在于借助同步的思想, 构造与原系统相似的同步系统, 解决原系统控制中的不确定问题。其控制框图结构如图 1.1 所示。

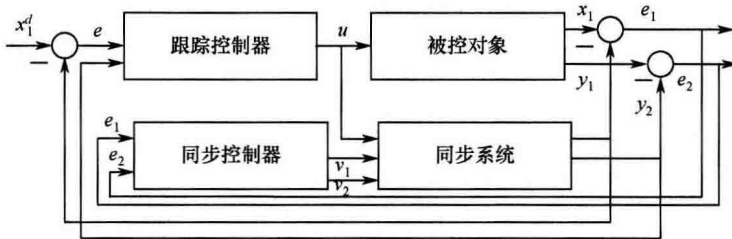


图 1.1 同步系统总体控制框图

图 1.1 中 x_1^d 为被控对象状态 x_1 的期望值, 本书以简化二阶系统模型代表实际被控对象的模型, 当然, 实际被控对象可能是三阶或高阶系统, 本书以二阶系统为例进行说明不影响其原理说明。针对二阶被控对象, 构造结构相同或者不同的二阶同步系统, 通过状态 x_1 、 y_1 以及 x_2 、 y_2 的比较得到以 e_1 、 e_2 为状态的误差系统, 针对误差系统设计同步控制器, 其输出为同步控制律 v_1 、 v_2 , 使得同步系统与被控对象能保持同步。针对同步系统设计同步跟踪控制器, 其误差为 $e = y_1 - x_1^d$, 使得同步系统状态 y_1 能够跟踪状态期望值 x_1^d 。同时把该跟踪控制器形成的控制律 u 输出给简化二阶系统, 使得简化二阶系统在该控制量的作用下, 也能跟踪期

望值。

因此,该方法的控制机理在于通过同步误差来调节同步系统与跟踪控制律,使得被控对象在跟踪控制律的作用下能够跟踪期望状态。该方法和状态观测器以及自适应控制中的期望理想系统方法均有相通之处,但显然三者在本质上又互不相同。

1.5 本书的内容安排

为了深入、系统地说明普适同步控制的基本原理与控制效果,本书在内容上按照从易到难、循序渐进的原则分为以下 8 章。

第 1 章为普适同步控制的研究背景以及同步的相关基础知识与研究现状。

第 2 章与第 3 章分别对单控制方向不确定情况下的反演控制与滑模控制进行了探讨,以便将其与同步控制的控制效果相比较。

第 4 章对单控制方向不确定情况下的被控对象构造了结构不同的同步系统,并分别采用反演与滑模控制方法设计了跟踪控制律,并给出了详细的仿真与对比分析结果。

第 5 章与第 6 章分别针对双控制方向不确定的二阶系统进行了反演与滑模控制方法理论研究与仿真分析,研究结论显示了双方向不确定二阶系统控制问题的复杂性,此时,反演与滑模控制方法均不能完全解决全部双方向不确定二阶系统的控制问题。

第 7 章与第 8 章分别采用了反演控制律与滑模控制律来构造同步控制中的跟踪控制律,并给出了多种设计方案与详细的随机仿真结果,表明了同步控制律对任意复杂的二阶双方向不确定被控对象的稳定性、鲁棒性与普适性。

第2章 具有单控制方向的二阶线性系统反演控制

2.1 引言

针对简单的二阶系统，如果模型参数未知，则难以采用常规 PID 控制器进行设计。值得说明的是，除了同步控制外，完全可以采用自适应控制来对参数进行辨识。但当系统进一步复杂，或者含有非线性项时，同步方法的优点将具有更好的适应性，该优点将在非线性系统的同步控制中深入讨论。本书为了更好地说明与比较，对如上二阶系统首先进行一般控制方法的设计分析，其次进行同步控制方法的设计，最后进行对比总结，给出本章的结论。

2.2 具有单控制方向的参数未知二阶系统反演自适应控制

针对确定的二阶系统，可采用的控制方法很多，如经典的状态反馈法、基于传递函数的极点配置法。针对不确定的二阶系统，则多采用自适应变结构控制或自适应反演控制方法。

由于自适应算法是解决系统参数不确定问题的有力方法，而反演控制算法层层倒推的构造方法，具有理论推断的严密性，且与 Lyapunov 能量函数方法能巧妙地配合使用，目前已有大量文献对反演自适应方法在二阶以及高阶系统进行了充分的讨论。

但几乎所有的反演控制方法都面临一个问题，就是期望状态的微分计算随着系统阶次的增加而越来越复杂，也有文献把该问题称为“微分爆炸”问题。本节在反演自适应设计的理论方法基础上，针对状态微分提出完全忽略、数字微分、一阶滤波微分与二阶滤波微分四种不同处理方法，并进行仿真对比分析。最后得出结论为一阶滤波微分方法的综合效果最好，但如何选取合适的滤波器常数是一阶滤波微分方法的关键。

2.2.1 问题描述

具有单控制方向的二阶系统是所有二阶系统中比较简单的一种特殊情况。所