

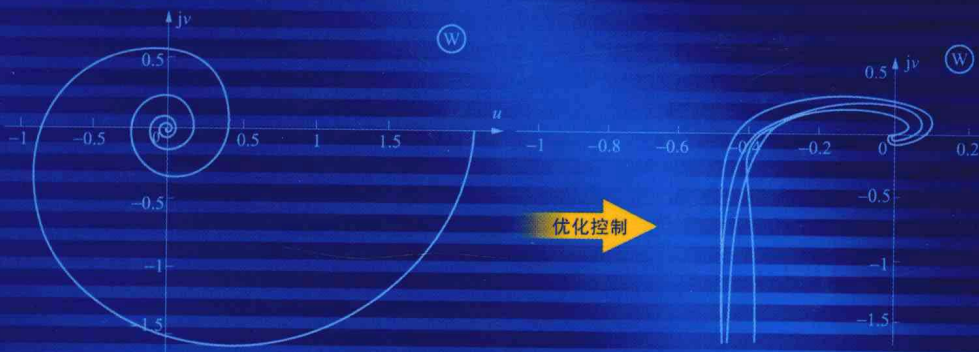


时滞系统优化控制

OPTIMUM CONTROL OF SYSTEM WITH DEADTIME

项国波 著

Xiang Guobo



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

时滞系统优化控制

OPTIMUM CONTROL OF SYSTEM WITH DEADTIME

项国波 著

Xiang Guobo



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

本书是作者和作者的三位学生,从1992年至2007年间共同研究的成果的总结,也是近10年来作者就本课题在各地讲学的系统总结,初创了单变量时滞系统优化控制理论。全书共6章和一个附录,包括预备知识、纯时滞系统二次优化控制原理、背驰定律、总体满意控制、非线性大时滞系统总体满意控制和控制系统的能耗计算。为了让更多的读者看懂,并且乐于应用它去研究实际工程问题,本书主要用经典控制论与 Matlab 相结合的方法展开讨论,书中引用了大量当前国内外人们关注的实例,并作了比较研究,足以证明时滞优化控制系统的优越性。

可供控制工程研究人员、工程技术人员以及高校师生参阅,也可以作为研究生教材和高年级学生选修课本。

图书在版编目(CIP)数据

时滞系统优化控制/项国波著. —北京:中国电力出版社,2009
ISBN 978-7-5083-8583-9

I. 时… II. 项… III. 时滞系统-系统最优化 IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第033990号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

策划编辑:周娟 责任编辑:杨淑玲 吕允英

责任印制:陈焊彬 责任校对:王瑞秋 封面设计:王英磊

北京盛通印刷股份有限公司印刷·各地新华书店经售

2009年4月第1版·第1次印刷

850mm×1168mm 1/32·8.875印张·230千字

定价:48.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

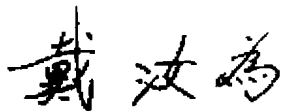
序

化工、冶金、建材、制药和造纸等工业生产过程都存在着时滞现象，因为这类生产过程，物料、能源从一端输入，要经过一些管道，或者传动带传输才能到达另一端，并在输送过程中，逐步被加工成产品。被加工的物料，不仅几何形状要发生变化，而且物理和化学性能也要改变，这就需要对物料进行加热加压，因而这类生产过程常常又是能耗大户。太大的温度、压力和物料的波动，不仅能耗大，而且严重影响产品质量，因此，时滞系统能否实现优化控制，对国民经济发展和减少环境污染有重大意义。但是由于描述此类系统的微分方程为无穷维，要实现它的优化控制，首先，它的观察器和控制器都应该是无穷维的，用物理办法做不到，因此，半个世纪以来，时滞系统的优化控制成为人们长期研究的难点和热点。

项国波教授长期以来从事工业领域的自动控制教学与科研工作，在理论与实际应用方面硕果累累。近年来和他的三位学生，用两次优化控制原理，实现了时滞系统的优化控制，其关键在于他们是用数学方法，而不是用物理方法实现了无穷维的观察器和控制器的设计，这就为实现时滞系统优化控制奠定了基础。这是一个飞跃，也是一个创新。为了提高时滞优化控制系统的抗扰能力，他们又提出《背驰定律》，把单容和双容时滞系统优化控制的鲁棒性提高到一个新的水平，从而实现了时滞系统总体满意控制。这些成果汇总起来，初步形成了单变量时滞系统的优化控制。此外，作者还用他们自己创建的理论，解决了一些实际的时滞系统的优化控制问题。据悉，该书经作者

精心推敲，三易其稿完成的。希望此书的出版能推动工程应用，促进优化控制在国家建设中的作用与贡献！

中国科学院院士、中国自动化学会理事长

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '戴', '汝', and '为'. The characters are written in a cursive, calligraphic style.

2007年11月6日于北京

Preface

With the broad applications of control methodology and solutions in physical, chemical, manufacturing, environmental, biological, and global economic and business systems, how to design a proper time-delayed control system with satisfactory performance has been a critical challenge to academic and industrial societies. Precisely, the dynamic systems with pure time-delays could only be mathematically modeled by a set of infinite-dimensional differential equations, consequently the traditional approaches to model based controls could be hardly applied in practice. The damage of control system stability and robustness generated by delayed feedback signals or phase lags has been one of the major factors in the design of time delayed control systems, particularly when the pure time delays are significant in compared with time constants, i. e. , capacity delays. During past few decades, many efforts in developing effective time-delayed control systems have been made, for example, the solutions to Smith predictor, intelligent PID, fuzzy PID, adaptive PID, and hybrid solutions, etc. However, these solutions either require a precise math-model or lack of solid control fundamentals. As a result, the design of an optimal time-delayed control system is still an open problem in academic research and practical applications.


Professor Xiang has written this book based on the novel solutions for time-delayed control system developed by him and his students. One feature of the book that I appreciate very much is to

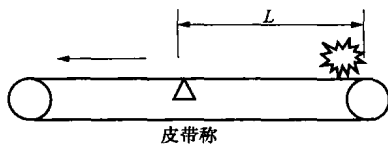
decompose the design of time delayed optimal control systems into two steps, namely, the optimization for the control structure and parameters based on the relevant finite-dimensional being approached from the infinite-dimensional states, and then turn back to the infinite-dimensional states in order to design an infinite-dimensional state estimator and controller. The proposed solutions make it applicable to the design and implementation of an infinite-dimensional state estimator and optimal controller in terms of the selected control criteria through computer algorithms and coding. In this book, he has presented the feasibility and results of the proposed solutions through a number of benchmark problems with computer simulations and successful industrial applications. The key ideas, concepts, fundamentals, methodology and solutions are illustrated very clear. This book should be very useful to researchers, control engineers as well as students who would like to learn the solutions and applications to the design of time-delayed optimal control systems. On the other hand, the use of the proposed solutions may also benefit to the development of advanced control software for control industry and manufacturers.

Yong-Zai Lu 
Past President of IFAC 国际自控联前主席
Hangzhou, China
February 12, 2008

前 言

时滞，顾名思义，事物已经发生变化了，可是人们需要经过一段时延后才能感知它的变化，这段时延，控制理论家们把它叫做“时滞”。时滞现象，在自然界中，是普遍存在的。这是因为自然界中的物质，是以“分布状态”存在的，某一点物质状态发生变化，要传递到另一点，需要时间。物质分布状态的变化，便形成了物质流。物质是能量的载体，因此，它的分布状态的变化，也就形成了能量流的变化。而描述能量流变化的信息，也就形成信息流的变化。控制理论家们的任务，首先要知道信息流的变化机理，然后控制它的运动规律，使它能最好地满足人类需求，这就是最优控制。研究分布状态信息流运动规律的最优控制，也就是研究时滞系统的最优控制。

描述分布状态信息流运动规律的微分方程为无穷维方程，以下图人们常见的皮带秤为例，图中 Δ 为重量传感器，为物



料，箭头为传动带运动方向，传动带是由电动机带动的。在物料变化的瞬间，重量传感器并不知道，只有当物料传输到传感器时，它才能感觉到重量的变化，这时已经滞后了 L 时段。这是一个最简单，也是最典型的时滞系统。但是，就是这样简单的时滞系统，要把物料称重控制在最优状态，却是不容易的事，

就是因为它是时滞系统。这里拖动传动带传动的电动机的传递函数可以近似为一阶惯性环节，而时滞 L 的传递函数就成为无穷维状态方程了，把它们结合起来，皮带称的传递函数为

$$G(p) = \frac{K}{1 + Tp} e^{-Lp}$$

式中， K 为放大系数； T 为惯性时间常数； $p = d/dt$ 。

因为

$$e^{-Lp} = \frac{1}{1 + Lp + \frac{1}{2!}L^2p^2 + \frac{1}{3!}L^3p^3 + \dots}$$

分母中每一个 p 都代表一个储能装置，无穷多个储能装置，用控制论语言来说，就是无穷维状态。

从皮带称中，概括出来的数学模型，代表了相当一大类生产过程：如炉温控制系统，轧机速度控制系统，造纸生产过程，发酵罐控制系统等。这类生产系统，物料从进厂开始，就被传输，并在传输过程中被加热、加压，使它不仅形状发生变化，而且物理和化学性质都发生质的变化，最终形成产品出厂。对这类生产过程的最优控制要求是：期望的状态变化，既快速，又平稳。过大的波动不仅影响产品质量，而且加大能耗，增加成本，也加大了对环境的污染。慢，固然可以平稳，但效益低，同样增加成本。因此，快速平稳也就成自动化工作者终身追求的目标——最优控制。在有限维控制系统中，已经有相当多的最优控制理论成果，可供自动化工程师们选用。但在无限维控制系统中，时滞系统最优控制始终是一个可望而不可即的目标。因为要实现无限维受控对象的优化控制，首先，测量它的运动状态变化的观察器，应该是无穷维的；其次，它的控制器也应该是无穷维的。用物理方法无法实现这两个要求，因此历经半个多世纪，都无法实现时滞系统的最优控制。

半个世纪以来，人们最初用 PID 控制，发现其效果并不理

想。后来相继发展了智能 PID、自适应 PID、模糊控制 + PID 等，都不能实现时滞系统的最优控制。这是因为 PID 控制器只有二维三参数，不管你花样如何变新，都不可能变成无穷维控制器。退一步讲，即使控制器变成无穷维，而观察器只有有限维，仍不可能实现最优控制。刘永清教授曾用二次型优化控制和动态规划等方法，在无穷维空间内寻求优化控制，但得到的控制器方程仍然无法解。这是因为控制器方程中，既有超前项，又有滞后项，用解析法，目前无法解。

1958 年，Smith 用补偿的办法，消除无穷维因子后，无限维控制系统变成有限维控制系统，就可以用有限维优化控制理论，去设计它的控制器参数。全补偿时，效果很好。一旦出现欠补偿，或过补偿，控制系统中就会出现既有超前项，又有滞后项，性能指标必然急剧恶化。尽管后来出现了种种改进型，也没有解决根本问题。

1992 年开始，我和我的学生杨益群、杨启文和钱业青等，开始研究这一问题，相继发表了文献 [28 ~ 35]。同时，我们也开发了三套“大时滞串级系统多重优化控制”应用软件，在稠油热采锅炉蒸汽干度控制系统中应用。这是一个难度更大的问题，但是应用这套软件，不论是快速性、平稳性，还是参数和负荷扰动，都获得极好的效果。综合这些成果，基本上解决了单变量时滞系统的优化控制问题，对控制信号而言，快速平稳，超调 ϵ [0 ~ 5%]；过渡过程时间为 $3L \sim 4L$ ；且有极强的参数扰动和负荷扰动的强壮性。

这些成果得到国内同行的好评，先后应邀到中国矿业大学、航天工业集团二院总体二部、河北科学院、浙江大学、上海爱克斯公司、北京安控公司、清华大学、内蒙古电力学院、广西大学、华东理工大学、广东工业大学、中国科学院自动化研究所三博中自公司、华南理工大学、金川集团自动化所和上海交通大学等高等学府、研究单位讲学。2006 年，中国自动化学会专家咨询委员会，在北京开会，邀请我就此论题作个介绍，我

作了“纯时滞系统优化控制简介”大会报告，受到到会同行的热烈欢迎，并应《自动化博览》等杂志记者的要求，刊登了此报告内容，详见《自动化博览》，2006，06（3）；然后《和利时通讯》分两期转载，2006，7（41），9（42）。但这些内容太简短。希望出版此专著供同行讨论、修正和发展。

全书共6章，另加一个附录。

第1章，预备知识，主要介绍G-L型ITAE最优控制律和X-Y型ITAE最优控制律，它们是读懂后续几章的基础。即使对时滞系统优化控制没有兴趣的读者，如能掌握本章内容，对设计有限维优化控制系统也是十分有益的。特别是对数学水平不是很高的自动化工作者，只要会四则运算，都可以用这里给出的标准化的X-Y型ITAE最优传递函数，去设计他的优化控制系统。本章最后给出一个晶闸管直流传动系统中的ITAE最优控制实例，告诉读者怎样应用ITAE最优控制律去设计一个实际系统。这样本章就成为既有理论又有实例的独立体系——定常系统的ITAE最优控制。

第2章，纯时滞系统二次优化控制原理，我们把时滞系统的优化控制分两步来完成：第一步，把无限维状态用有限维状态来逼近，然后用两种ITAE最优控制律加以优化，称它为第一次优化。其根据是，任何一个物理系统都是耗散系统，随着时间的增长，耗散将消磨掉系统中所有小尺度的收敛较快的维数，因此决定系统长时间行为的维数终将降低，最后仅仅剩下能够支撑起吸引子的少数自由度。实际上，用不变维相空间的办法，反而不能正确描述耗散系统的真实情况了。这也就是只有两维三参数的PID控制器，能够长期在这一领域中，得到广泛应用的主要原因。

第一次优化之后，确定了控制器基本结构和参数，再返回到无穷维状态，便得到无穷维的观察器和控制器。也就是说我们是用数学方法，而不是物理方法，来实现无穷维观察器的。这时，系统中同样出现既有超前项，又有滞后项，用解析法同

样无法解。但是，由于经过一次优化后，系统中基本结构和参数都已确定下来了，只有一个未知量尚待确定。这时，只要选择一个合适的最优性能指标，用计算机仿真，很容易就求出待解未知量的最优值，最终完成了时滞系统的最优控制。

本章给出不少算例，并和常见的几种 PID 控制效果进行比较，足以证明时滞系统最优控制效果，远比各种类型的 PID 好。

第 3 章，背驰定律。“背驰”，顾名思义，向背而驰。意指第一次优化时，我们让它的超调越小越好，第二次优化时，反其道而行之，在平稳性允许范围内，让其超调越大，该系统的鲁棒性就越强。

本定律的发现，提高了时滞优化控制系统的鲁棒性，这是因为过程控制系统，通常都是强扰动系统。本章还给出三组二次优化控制律的不同组合：第一组，我们简称它为 I-Z 法，即第一次优化采用 ITAE 最优控制律，第二次用直接法；第二组，简称 (G-L) D-I 法，即两次优化都采用 G-L 型 ITAE 最优控制律；第三组，简称 (1-5) D-I 法，意指第一次优化采用 X-Y-III 型 ITAE 最优控制律，第二次优化采用 X-Y-I 型 ITAE 最优控制律，并将三组优化组合的控制效果加以比较。可以看到，第三组组合具有最强的鲁棒性。

书中，同样给出一些算例，这些算例，都是国内外学者当前关注的理论问题，并将他们的研究成果，跟用背驰定律设计的效果加以比较，可以看出不同算法的优劣来。

第 4 章，总体满意控制。过程控制系统，不仅有参数扰动，而且负荷扰动也十分频繁，同时许多参数扰动，往往也是由负荷扰动引起的，因此只研究对控制信号而言，具有快速平稳特性，以及强的参数扰动鲁棒性是不够的，必须将三者综合起来，来研究它的性能指标，才能比较全面地衡量时滞控制系统的优劣。但是要把这些因素综合起来，求其极值是十分困难的，因此我们给出一个新的定义——总体满意控制，并讨论了怎样利用背驰定律来实现这一要求，同时也给出相应的算例。

第5章，非线性大时滞系统总体满意控制。时滞系统常常也是非线性系统，要全面研究非线性时滞系统的优化控制十分困难，这里仅研究怎样利用振动线性化方法，把控制器非线性改造成线性，从而实现非线性大时滞系统的总体满意控制。这些研究是结合一个具体算例进行的，考虑到一些读者可能对谐波线性化方法不是很熟悉，因此对谐波线性化方法也作了简介。

第6章，控制系统的能耗计算。尽管控制论发展至今已超过半个世纪，但尚未见到讨论此课题的相关文献，本章算是一种尝试。在能源供应越来越紧缺，对环境指标要求越来越苛刻的年代，计算控制系统能耗大小，必然要提到日程上来。书中给出的算法，仅供同行讨论。如能起到抛砖引玉的作用，就十分满意了。

附录，简要地介绍了性能优越、鲁棒性很强的大时滞串级系统多重优化控制原理，供有兴趣的工程应用人员选用。

上述内容基本上解决了单变量时滞系统的优化控制问题，但工程应用尚不多，作者期望本书的出版能推动工程应用的开展和深入研究。

中国科学院院士、中国自动化学会理事长戴汝为教授，在百忙中看了书稿并作序；国际自控联前主席吕勇哉教授也在百忙中，跟我讨论了书稿中主要内容，并作序。在此，一并致谢！几年来，国内同行不断请我去讲学，实际上是一种关爱和支持，也是一种鼓励和督促。在此一并致谢！

项国波

2009年1月23日于榕城

目 录

序

Preface

前言

第 1 章	预备知识	(1)
1.1	引言	(1)
1.2	微分方程标准化	(2)
1.3	几种优化控制性能指标的简评	(4)
1.4	G-L 型 ITAE 最优控制律	(21)
1.5	X-Y 型 ITAE 最优控制律	(23)
1.6	晶闸管直流传动系统中的 ITAE 最优控制	(30)
第 2 章	纯时滞系统二次优化控制原理	(43)
2.1	引言	(43)
2.2	单容纯时滞系统二次优化控制原理	(44)
2.3	比较研究一	(69)
2.4	双容纯时滞系统二次优化控制原理	(89)
2.5	比较研究二	(98)
第 3 章	背驰定律	(104)
3.1	引言	(104)
3.2	参数扰动强壮性	(104)
3.3	单容纯时滞二次优化控制系统的背驰定律	(111)

3.4	双容纯时滞二次优化控制系统的背驰定律	(125)
第4章	总体满意控制	(138)
4.1	定义	(138)
4.2	单容时滞系统的总体满意控制	(139)
4.3	双容时滞系统的总体满意控制	(166)
第5章	非线性大时滞系统总体满意控制	(187)
5.1	引言	(187)
5.2	非线性特性三种线性化方法	(189)
5.3	谐波线性化方法	(191)
5.4	几种常见非线性特性谐波线性化系数	(199)
5.5	非线性大时滞系统总体满意控制	(207)
第6章	控制系统的能耗计算	(219)
6.1	引言	(219)
6.2	控制系统的能耗计算公式	(220)
6.3	PID 串联控制系统的能耗	(221)
6.4	微分先行 PID 控制系统的能耗	(230)
6.5	中间反馈 PID 控制系统的能耗	(234)
6.6	总体满意控制系统的能耗	(238)
6.7	上述 6 种控制律的能耗损失比较	(248)
附录	大时滞串级系统多重优化控制原理简介	(259)
参考文献	.....	(262)

Contents

Preface(in Chinese)

Preface

Foreword

Chapter 1 A Knowledge in Advance (1)

1.1 Introduction (1)

1.2 Standardization of differential equation (2)

1.3 Brief commentary of performance for several
optimum control laws (4)

1.4 The ITAE optimum control law with G-L type (21)

1.5 The ITAE optimum control law with X-Y type (23)

1.6 The ITAE optimum control in the direct drive
with thyristor (30)

Chapter 2 The Principle of Twice Optimum Control for System with Deadtime (43)

2.1 Introduction (43)

2.2 The principle of twice optimum control for a kind
of first order system with deadtime (44)

2.3 Comparative study 1 (69)

2.4 The principle of twice optimum control for two
capacity system with deadtime (89)

2.5 Comparative study 2 (98)

Chapter 3	A Law of Run in the Oppsite Direction	.....	(104)
3.1	Introduction	.....	(104)
3.2	Robust of the parameter disturbed	.....	(104)
3.3	A Law of run in the oppsite direction for twice optimum control in the first order system with deadtime	.....	(111)
3.4	A Law of run in the oppsite direction for twice optimum control in the two capacity system with deadtime	.....	(125)
Chapter 4	Global Satisfied Control	.....	(138)
4.1	Definition	.....	(138)
4.2	Global satisfied control for the first order system with deadtime	.....	(139)
4.3	Global satisfied control for the two capacity system with deadtime	.....	(166)
Chapter 5	Global Satisfied Control for Nonlinear System with Long Delay	.....	(187)
5.1	Introduction	.....	(187)
5.2	Three kind of linearized methods of the nonlinearity	.....	(189)
5.3	Harmonic linearized method	.....	(191)
5.4	Harmonic linearized coefficients for several nonlinearities	.....	(199)
5.5	Global satisfied control for nonlinear system with long delay	.....	(207)
Chapter 6	Calculate the Energy Loss in the Control System	.....	(219)