图书在版编目—建议数据

自耦 PID 控制理论及其应用 / 曾喆昭 主编 . —澳门：

澳门科学出版社，2026.7

ISBN 978-99996-49-66-7

Ⅰ. ①自… Ⅱ . ①曾…Ⅲ. ①动化技术、计算机技术 - 自动化装置与设备

Ⅳ . ① Q-49

依据《中国图书馆分类法》提供分类参考数据。

自耦 PID 控制理论及其应用

曾喆昭 著 ISBN 978-99996-49-66-7

责任编辑：彭 俊

责任校对：黄日成

装帧设计：陈斯若

出版发行：澳门科学出版社

地　　址：澳门南湾大马路恒昌大厦 11 楼 F 座

网　　址：https://www.mospbs.com，https://moaj.mospbs.com

总　　机：+853-62961666

印装公司：澳门翰林出版集团有限公司

开　　本：787mm×1092mm 1/16　　**印　　张**：35.75

字　　数：652 千字　　**印　　数**：1~3000

版　　次：2026 年 07 月第 1 版

印　　次：2026 年 07 月第 1 次印刷

如有缺损质量问题，请联系本社销售中心。

版权所有，违者必究

作者介紹



曾喆昭(1963.9)，湖南蓝山人，博士、二级教授，自耦PID控制理论创始人，中国精品科技期刊F5000顶尖学术论文作者。

主要研究方向：超级PID控制技术与应用

Email: 508984293@qq.com；zengzhzh@csust.edu.cn。

1987.6、1989.12、2008.12先后毕业于湘潭大学、清华大学、湖南大学，分别获物理学理学学士、固体物理学理学硕士、电路与系统学科工学博士。

作者从2008年开始从事PID优化控制，2012年开始先后从事滑模优化控制与自抗扰优化控制。2017年初使用三类优化控制方法对同一系统进行优化控制，根据控制结果的比较分析，发现了传统PID控制方法存在参数鲁棒性差的突出问题：在外部扰动期间，PID控制器参数一直在实时变化，而滑模控制器与自抗扰控制器的参数都具有良好的鲁棒性。该发现让好奇的我开始对传统PID控制理论萌发了质疑的动机，同时也激励自己要深入探索传统PID控制理论存在的缺陷问题，并梦想发明一类控制系统结构简单且参数鲁棒性良好的先进PID控制器。

经过近一年的日夜研究，于2017底年发现了引起PID参数鲁棒性差的根本原因：一是视比例增益为无量纲参数；二是视比例、积分、微分增益为相互独立参数。发现问题的目的在于科学解决问题：一是科学定义比例增益的量纲；二是建立比例、积分、

微分增益之间的内在关系。根据这两个思想观点，2018年首次提出了基于速度因子的PID参数镇定方法，发明了原创性的PID参数镇定模型，初步建立了基于速度因子的自耦PID (SCPID或ACPID)控制理论体系。研究成果先后发表在自动化学报、控制理论与应用等权威与重要期刊，并获中国发明专利授权。

近5年来，带领研究生团队使用自耦PID控制理论获得了不少应用研究成果，在CSCD期刊发表学术论文40余篇，被引400余次。通过应用研究，发现了系统快速性与系统超调之间的矛盾。为了解决该矛盾，专著第3章与第4章分别提出了增量式自耦PID控制方法，基于指令滤波的超级PID控制方法，完善了自耦PID控制理论体系，开创了基于系统时间常数(牛鼻子)的控制科学发展方向，颠覆了各类复杂抽象控制理论在黑暗中摸索的艰难局面。

内容提要

通过分析PID控制器与系统的物理属性，作者发现了传统PID控制理论使用“无量纲比例参数与相互独立参数”这两个概念存在理论缺陷。为了纠正这两个理论缺陷，作者引入了控制器的速度因子、系统速度因子与系统加速度因子等新概念，创造性提出了基于一个速度因子的PID镇定理论，并称之为“自耦PID控制理论”。该控制理论科学定义了比例参数的量纲，建立了PID各参数之间的内在关系。自耦PID控制理论只涉及一个最小速度因子的镇定，显著降低了PID参数的镇定难度。由于自耦PID控制器的最小速度因子由系统时间常数来唯一镇定，而时间常数又是任何线性与非线性系统的唯一关键参数，堪称系统的“牛鼻子”，因此，基于速度因子的自耦PID控制理论是一类直接面向系统时间常数而不是系统模型的科学控制方法。自耦PID控制理论统一了线性系统与非线性系统的控制理论思想，建立了大道至简的PID参数镇定算法，科学揭示了控制器的最小速度因子与系统速度因子(或时间常数)之间的物理关系与物理作用，使抽象的PID控制技术冲破了黑暗中的摸索，成为了透明的超级PID控制科学，充分肯定了PID控制技术无所不能的超级控制能力，全面消除了控制理论界对PID控制不能很好控制非线性系统的一切误会和负面影响。

本专著共分12章：第1章分析了PID控制器与系统的物理属性，详细阐述了传统PID控制理论存在的理论缺陷及其改进思想；第2章详细阐述了基于速度因子的PID参数镇定算法，建立了完善的自耦PID控制理论体系；第3章阐述了因积分饱和引起的系统超调问题，并将位置式自耦PID控制力转换为增量式自耦PID控制力；第4章阐述了消除系统超调与系统输入饱和问题，设计了期望输出指令的最优滤波器，建立了无超调、无输入饱和的临界阻尼控制系统，堪称超级PID控制控制系统；第5章

至第12章分别涉及自耦PID控制理论的具体应用，包括PMSM的转速与位置控制、双向DC/DC母线电压控制、大时滞系统控制、TORA与倒立摆零动态不稳定系统控制、无人机、无人船、末制导系统控制等代表性内容。

全书内容丰富、方法新颖、论证严谨，应用案例涵盖范围广，对运动控制与过程控制广泛领域的教学、科研、PID控制器调试等都具有独特的科学指导作用，可以实现控制理论与控制工程的零距离接轨。

本专著涉及作者近18年来的研究成果，包括大量未公开发表的成果，取材新颖，内容丰富，注重理论与应用相结合，论述深入浅出，力求使读者较快掌握和应用这门开创性、颠覆性与实用性的科学控制理论方法。本书可作为电气信息类各专业、能源动力、机械、石油、化工、冶金、航空航天等专业研究生、高年级本科生的选修教材和参考书，也可作为广大控制工程领域的工程师和科研人员的指路明灯。

本专著预备基础知识：高等数学、信号与系统、MATLAB仿真

本专著由《长沙理工大学学术专著出版基金》资助。

前 言

比例-积分-微分(Proportional-Integral-Differential，PID)控制理论问世近百年来，已在电力、交通、机械、石油、化工、冶金、航空航天、武器装备等广泛工业控制领域发挥了巨大作用。迄今为止，约95%的工业控制器都是PID控制器。然而，PID参数鲁棒性差导致PID参数镇定困难的突出问题，一直困扰着从事控制理论与控制工程领域的专家学者和工程技术人员。近30余年来，随着微电子技术与计算机技术的高速发展，国内外学者在PID参数优化方面做了大量研究工作，并获得了有效的研究成果。

作者于2008年开始由智能计算改行从事PID优化控制，先后提出了基于PID神经元和非线性PID神经元的优化镇定控制策略，并先后获得国家自然科学基金主任基金项目、湖南省自然科学基金项目、长沙市科技计划重点项目的资助。2012年开始先后从事自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control，ADRC)与滑模控制(Sliding Mode Control，SMC)的参数优化镇定研究，先后获湖南省科技计划项目与湖南省教育厅重点项目资助，系列研究成果发表在控制理论与应用、控制与决策、控制工程等期刊上。

上述三类控制方法都属于控制论范畴，都是基于误差来消除误差的控制论方法。其中，传统PID控制属于线性PID控制，ADRC与SMC都属于非线性PD控制，都有各自突出的优点与明显的缺点，具体如下：

1. 传统PID控制的优缺点

1、突出优点

结构最简单，PID控制只涉及三个参数，PI与PD控制只涉及两个参数。

2、明显缺点

传统PID包括PI与PD控制器的参数鲁棒性很差、参数镇定困难。

2. ADRC的优缺点

1、突出优点

参数鲁棒性好、抗扰动能力较强、适合二阶或以上系统的控制。

2、明显缺点

结构复杂、参数过多、计算量大、不便于理论分析、非线性组合函数缺乏理论依据、不适合一阶系统控制、非零动态系统的控制精度不高。

3. SMC的优缺点

1、突出优点

参数鲁棒性好、抗扰动能力强、适合二阶或以上系统的控制。

2、明显缺点

控制信号存在高频抖振，不利于执行机构，不适合一阶系统控制，非零动态系统的控制精度不高。为了抑制高频抖振幅度，引入了幂次趋近率、双幂次与三幂次趋近率等，系统结构变得很复杂、人为增大了计算量。

4. 传统PID的理论缺陷

2017年初，针对同一个系统，作者使用PID、SMC和ADRC分别进行参数在线优化控制。三种控制方法的参数优化结果表明，在外部扰动过程期间，SMC与ADRC都

具有良好的参数鲁棒性，而PID却存在参数鲁棒性差的突出问题：在外部扰动期间，PID参数一直在实时变化。

通过比较三种控制方法的参数优化结果，作者对PID参数鲁棒性差的问题引起了高度关注，同时也开始质疑PID控制理论存在如下两个缺陷：

1、将误差的比例、积分、微分等功能各异的物理环节进行无量纲加权求和获得的PID控制力，违背了代数运算规则。

作者认为：PID参数之间应该存在量纲换算规则。

2、将误差的比例、积分、微分等功能各异的物理环节相互独立对待，违背了辩证思想。

作者认为：尽管跟踪误差及其积分与微分是功能各异的物理环节，然而却都与误差有关，因而功能各异的比例、积分、微分等物理环节之间一定存在内在必然关系，而非相互独立的关系。

为了阐明上述两个思想观点的正确性，并梦想发明一类系统结构简单、参数鲁棒性好的先进PID控制器，作者做了如下深入系统的探索研究：

其一：考虑到系统输入来自PID控制器形成的输出控制力，作者对PID控制器的物理属性与系统的物理属性分别做了定性分析。根据物理属性分析，作者发现了无量纲比例参数只能形成“广义位移”的PID(包括PI与PD)控制力，而一阶系统输入要求PI控制器提供“广义速度”的控制力，二阶系统输入要求PID或PD控制器提供“广义加速度”的控制力。以此类推，三阶系统输入要求任何控制器都要提供“广义加加速度”的控制力。

显然，无量纲比例参数形成的PID(包括PI与PD)控制力无法满足任何系统输入的量纲要求，或者说，无量纲比例参数形成的PID控制力与任何系统的输入之间存在量纲冲突的理论问题。

其二，作者推断：使用相互独立的比例参数、积分参数与微分参数分别形成的比例控制力、积分控制力与微分控制力也是相互独立的。在控制过程中，这些相互独立的控制力会表现出各自为阵的不协调控制行为；由这些相互独立的控制力组合形成的PID控制合力，会表现出不协调的控制机理。

其三，作者断言：无量纲比例参数与相互独立的PID参数是导致PID控制系统存在参数鲁棒性差的根本原因。纠正这两个近百年的历史概念定义是消除PID参数鲁

棒性差的理论基础。

根据上述思想观点与推断，作者提出了如下科学设想，并创造性发明了基于一个速度因子的PID参数镇定模型，实现了一类控制器结构简单、参数鲁棒性好的先进PID控制器的美好梦想。

5. 自耦PID控制理论的问世

1、科学定义比例参数的量纲

只要科学定义比例参数的量纲属性，即可解决PID(包括PI与PD)控制力与系统输入之间的量纲冲突问题。

2、科学建立PID各参数之间的内在关系

只有科学建立PID各增益参数之间的内在关系，才能科学解决比例控制力、积分控制力、微分控制力之间的不协调控制问题。

3、先进PID控制器的问世

根据上述科学设想，并借鉴临界阻尼系统特征方程模型，通过引入一个“速度因子”新概念，作者创造性建立了基于速度因子的先进PID参数镇定模型，不仅科学定义了比例参数的量纲属性，解决了PID控制力与系统输入之间的量纲冲突问题，而且还科学建立了PID各参数之间的内在定量关系，解决了比例控制力、积分控制力、微分控制力在控制过程中的不协调控制行为的问题，科学保证了由功能各异的比例控制力、积分控制力、微分控制力组合形成的PID控制力，能够实现目标一致的协调控制力。

为了区别于传统PID控制，基于速度因子的PID控制曾先后称之为扰动感知控　制(Disturbance Perception Control, DPC)、 准PID(Quasi Proportional-Integral-Differential, QPID)控制。根据同行专家的建议，作者最终称之为自耦PID (Self- or Auto-Coupling Proportional-Integral-Differential, SCPID或ACPID)控制。研究成果分别在自动化学报、控制理论与应用等期刊发表。

4、ACPID控制理论的主要特色与创新点

（1）创造性提出了基于速度因子的PID镇定模型，具有颠覆性理论创新

主要特色：只要镇定一个速度因子就可以镇定PID的各个参数，是一类大道至简

的PID镇定方法。

（2）基于系统时间常数的最小速度因子镇定模型，具有颠覆性技术创新

主要特色：系统时间常数是任何简单或复杂系统的唯一特征参数，堪称系统的“牛鼻子”。无论动态模型简单的线性系统，还是动态模型复杂的非线性系统，都有唯一的特征时间常数，其数值大小客观反映了系统动态速度或动态加速度变化慢与快的物理特性。只要ACPID控制器的最小速度因子不小于系统的速度因子(与时间常数成反比)，ACPID控制器就有足够大的控制力驾驭系统的动态变化行为。如果要提高控制系统的响应速度和抗扰动能力，只要增大ACPID的速度因子即可。

（3）首次提出了基于指令滤波的超级PID控制技术，具有颠覆性技术创新

主要特色：为了使ACPID控制系统成为无超调、无输入饱和的理想控制系统，设计了基于速度因子的指令滤波器模型。根据指令滤波器的极点与ACPID控制系统传输函数的零点对消思想，科学实现了基于指令滤波的ACPID控制系统是一类理想的临界阻尼系统，无超调、无输入饱和，堪称超级PID控制系统。

（4）高度统一了线性与非线性系统的控制理论思想，具有颠覆性的思想创新

主要特色：将已知或未知系统的内部动态及其不确定性以及外部有界扰动等一切复杂因素定义为一个“总扰动”，可以将任何线性或非线性复杂系统等效映射为统一形式的扰动系统，并根据ACPID控制理论设计控制力，完全淡化了线性与非线性系统的分类概念，高度统一了线性与非线性系统的控制理论思想。

（5）自耦PID控制系统内置隐含的抗扰动滤波器，具有显著的特色

自耦PI与自耦PID控制系统隐含内置的抗扰动滤波器都是带通滤波器，对直流扰动具有屏蔽作用；对低频扰动与高频扰动都具有显著的幅值衰减作用；对通带内的中频扰动，幅值衰减幅度分别与速度因子或速度因子平方成反比；自耦PD控制系统隐含内置的抗扰动滤波器是低通滤波器，对高频扰动具有显著的幅值衰减作用；对于低频扰动，幅值衰减幅度与速度因子平方成反比。增大速度因子的数值有利于增强控制系统的抗扰动能力。

SCPID或ACPID控制理论问世近5年来，作者带领研究生团队从事控制工程领域的应用研究，获得了不少应用成果，已在CSCD期刊发表学术论文40余篇，被引400余次，已受到国内务实学者的高度关注。

鉴于现有应用研究成果都涉及对积分控制力进行单独限幅处理，并结合自适应

速度因子来共同抑制系统超调，难以充分体现自耦PID控制理论巨大的潜在学术价值与应用价值。为了消除系统超调，第3章介绍了增量式自耦PID控制技术；为了同时消除系统超调与系统输入饱和，第4章论述了超级PID控制理论与控制技术。

6. 专著的主体结构与主要内容

为了验证ACPID控制理论的有效性和实用性，专著安排了8章内容分别介绍控制工程领域的8大类常见系统的具体控制方法。

第1章　详细分析了PID控制器的物理属性与系统的物理属性，发现了传统PID控制系统存在量纲冲突与不协调控制机理的两个理论缺陷，发现了引起这两个理论缺陷的根本原因，提出了纠正这两个理论缺陷的科学设想。

第2章　详细论述了纠正传统PID控制理论缺陷的科学方法，提出了基于速度因子的PID参数镇定模型，初步形成了自耦PID控制理论体系。通过系列仿真实验，分别验证了自耦PI、自耦PD与自耦PID控制理论的有效性。

第3章　详细论述了系统超调的根源在于积分饱和问题，为了消除积分饱和现象，有效方法之一是消除误差的积分运算环节，介绍了增量式自耦PI与增量式自耦PID控制技术。通过系列仿真实验，分别验证了增量式自耦PI与增量式自耦PID在消除系统超调方面的有效性。

第4章　详细论述了消除积分饱和现象的另一种有效方法是：对状态突变的期望输出指令安排合理的过渡过程，使之匹配无状态突变的实际输出过程，避免启动控制初期因跟踪误差较大而引起积分饱和现象与系统输入饱和现象。为了实现该目的，根据ACPID控制系统传输函数模型和零极点对消原则，设计了基于速度因子的指令滤波器模型，科学实现了超级PID控制理论与控制技术。系列仿真实验全面验证了超级PID控制理论与控制技术的有效性，不仅消除了系统超调问题，也显著抑制了系统输入饱和问题。

第5章　详细介绍了永磁同步电机(PMSM)的转速控制方法与位置控制方法。PMSM属于MIMO欠驱动系统，涉及内环电流控制器与外环转速控制器或位置控制器的多控制器设计。使用自耦PID控制方法，只需要镇定外环控制器的速度因子就可以镇定内环控制器的速度因子。因此，对于MIMO系统的多控制器设计，也只要镇定

一个速度因子就可以实现整个系统的控制。其中，外环控制器的最小速度因子由黏滞系数与转动惯量共同确定的时间常数来镇定，仿真实验验证了自耦PID控制理论方法的有效性。

第6章　详细介绍了永磁同步直线电机(PMSLM)的位置控制方法。与PMSM的位置控制方法类似，此处不再赘述。

第7章　详细介绍了双向DC/DC变换器的母线电压控制方法。双向DC/DC变换器也是MIMO欠驱动系统，而且是负载大扰动系统，其控制具有较大挑战性。使用ACPID控制方法显著降低了系统的控制难度，且外环控制器的最小速度因子由负载电阻与母线电容共同确定的时间常数来镇定，系列仿真实验验证了ACPID控制的有效性和强抗扰动能力。

第8章　详细介绍了大时滞系统的ACPID控制方法，其最小速度因子由系统时间常数与时滞来共同镇定。系列仿真实验验证了ACPID控制的有效性。与其它控制方法相比，ACPID控制方法没有超调，在控制系统结构、系统响应速度、控制精度等方面都具有显著优势。

第9章　详细介绍了TORA与倒立摆系统的ACPID控制方法。TORA与倒立摆都属于MIMO欠驱动零动态不稳定系统，其控制难度很大。使用ACPD控制方法，显著降低了系统的控制难度。系列仿真实验验证了ACPD控制的有效性。与其它控制方法相比，在控制系统结构、响应速度、控制精度、抗扰动能力等方面都具有显著优势。

第10章　分别详细介绍了固定翼无人机、垂直起降无人机与四旋翼无人机的ACPID控制方法。固定翼无人机是状态与输入强耦合的MIMO非线性复杂系统，垂直起降无人机与四旋翼无人机都是MIMO欠驱动非线性复杂系统。使用ACPD控制方法，显著降低了三类无人机系统的控制难度。系列仿真实验验证了ACPD控制的有效性。与其它控制方法相比，在控制系统结构、响应速度、控制精度、抗扰动能力等方面都具有显著优势。

第11章　详细介绍了无人船的ACPD控制方法。无人船是状态与输入强耦合的MIMO非线性欠驱动复杂系统。使用ACPD控制方法，显著降低了无人船系统的控制难度，系列仿真实验验证了ACPD控制的有效性。与其它控制方法相比，在控制系统结构、响应速度、控制精度、抗扰动能力等方面都具有显著优势。

第12章　详细介绍目标导弹存在机动性的二维末制导的ACPID控制方法。二

维末制导系统是超大时变参数的非线性随机系统，根据五类末制导律，分别使用ACPID(包括ACPI)控制方法，显著降低了末制导系统的控制难度，系列仿真实验验证了ACPID控制的有效性。与其它末制导控制方法相比，在制导系统结构、拦截时间、拦截精度等方面都具有显著优势。

7. 专著的主要写作特色

与国内外已出版的PID控制、滑模控制、自抗扰控制等专著比较，本专著写作特色独特，兼顾了前瞻性的科学控制理论与复杂系统控制的应用舞台，其中涉及不少独特的学术思想、学术观点、科学方法以及新的概念，力求理论与应用实现零距离接轨。主要写作特色如下：

1、第1章详细分析了PID控制器的物理属性与系统的物理属性，概述了PID控制存在的理论问题以及改进思想，内容新颖、学术思想与学术观点独特，以发现问题、分析问题、解决问题为主线的写作方法，层次清晰、逻辑严谨、原理清楚、概念准确、方法科学；

2、根据第一章的分析结果与科学设想，第2章首次提出了基于速度因子的PID参数镇定模型，创造性建立了包括ACPID、ACPI和ACPD等控制器及其最小速度因子与速度因子在内的控制理论体系。内容新颖、思想活跃，方法科学、严谨。重点抓住了系统时间常数这个牛鼻子，根据逻辑推理，科学建立了控制器的最小速度因子与系统速度因子与系统时间常数的直接物理关系，使抽象的PID控制理论突破了近百年来一直在黑暗中摸索的困境，迎来了直接面向系统特征时间常数而不是系统模型的透明控制理论方法。

3、为了消除积分饱和引起系统超调的问题，第3章介绍了增量式自耦PI与增量式自耦PID控制技术；为了同时消除系统超调与系统输入饱和问题，第4章详细论述了基于指令滤波的自耦PID控制理论，实现了无超调、无输入饱和、随心所欲驾驭系统响应速度、控制精度、抗扰动能力的超级PID控制技术，完善了自耦PID控制理论体系，开创了从PID控制技术到超级PID控制科学的科学发展方向。

4、专著安排了8章内容分别介绍了控制工程领域中常见的控制对象，其中绝大部分都是MIMO欠驱动非线性复杂系统。针对MIMO系统的多控制器设计问题，使用自耦PID控制方法都只需要镇定外环控制器的一个最小速度因子，就可以镇定全部控制器的速度因子。与现有其它抽象控制理论方法相比，自耦PID控制理论方法呈现出降维打击的绝对优势。

自耦PID控制理论的问世，有利于突破科学技术发展遇到的各类瓶颈，推动人类社会快速迈入人工智能新时代。

目录

第 1 章　PID 控制理论及其局限性分析

1.1　被控系统的物理属性分析 …… 3

1.2　PID 控制器的物理属性分析 …… 5

1.3　传统 PID 控制系统存在量纲冲突问题 …… 6

1.4　PID 控制系统存在不协调控制机理 …… 7

1.5　纠错 PID 控制理论概念的科学设想 …… 7

第 2 章　自耦 PID 控制理论

2.0　几个新的物理概念 …… 10

2.1　自耦 PI 控制系统 …… 16

2.2　自耦 PD 控制系统 …… 36

2.3　自耦 PID 控制系统 …… 49

2.4　本章总结 …… 73

第 3 章　增量式自耦 PID 控制原理

3.1　自耦 PID 控制理论及其应用概况 …… 74

3.2　IACPI 控制原理与仿真实验 …… 76

3.3 IACPID 控制原理与仿真实验……91
3.4 本章总结 …… 103

第 4 章 超级 PID 控制原理

4.1 控制系统的性能指标…… 104
4.2 ACPID 控制理论的局限性分析…… 106
4.3 超级 PID 控制理论的设想与实现…… 107
4.4 超级 PI 控制理论 …… 110
4.5 超级 PD 控制理论 …… 125
4.6 超级 PID 控制理论 …… 137
4.7 本章总结 …… 149

第 5 章 永磁同步电机控制方法

5.1 国内外研究现状…… 150
5.2 PMSM 模型及其等效映射 …… 151
5.3 PMSM 转速控制系统设计与分析 …… 153
5.4 PMSM 位置控制系统设计与分析 …… 173
5.5 直线电机控制系统设计与分析…… 193
5.6 本章总结与展望…… 205

第 6 章 永磁同步直线电机控制方法

6.1 国内外研究现状…… 207
6.2 PMSLM 模型及其等效映射…… 209

6.3 PMSLM 位置控制系统设计与分析 …… 211
6.4 本章总结 …… 237
第 7 章 双向 DC/DC 变换器控制方法
7.1 国内外研究现状 …… 238
7.2 直流微电网系统 …… 239
7.3 IACPI 双环控制系统设计 …… 243
7.4 超级 PI 双环控制系统设计 …… 244
7.5 单环控制系统设计 …… 257
7.6 本章总结 …… 279
第 8 章 大时滞系统控制方法
8.1 国内外研究现状 …… 281
8.2 一阶时滞系统的 ACPI 控制方法 …… 283
8.3 一阶时滞系统仿真实验与分析 …… 286
8.4 一阶时滞系统的 SPID 控制方法 …… 306
8.5 二阶时滞系统的 ACPID 控制方法 …… 311
8.6 本章总结 …… 319
第 9 章 TORA 与倒立摆的 ACPID 控制
9.1 国内外研究现状 …… 320
9.2 TORA 系统控制原理 …… 321
9.3 TORA 系统控制的进一步讨论 …… 335

9.4 倒立摆控制原理 …… 341
9.5 本章总结 …… 354
第 10 章 三类无人机的 ACPID 控制方法
10.1 国内外研究现状 …… 355
10.2 固定翼无人机控制原理 …… 356
10.3 垂直起降 (VTOL) 无人机控制原理 …… 374
10.4 四旋翼无人机控制原理 …… 390
10.5 本章总结 …… 402
第 11 章 无人船的 ACPID 控制方法
11.1 国内外研究现状 …… 404
11.2 问题描述 …… 405
11.3 欠驱动船舶的 ACPD 控制系统 …… 409
11.4 仿真实验与分析 …… 411
11.5 本章总结 …… 418
第 12 章 五类二维自耦 PID 末制导方法
12.1 国内外研究现状 …… 419
12.2 问题描述 …… 420
12.3 强追踪打击的增量式 ACPI 末制导方法 …… 424
12.4 超前追踪打击的增量式 ACPI 末制导方法 …… 436
12.5 跟踪期望 LOS 角的超级 PID 末制导方法 …… 439

12.6 准平行接近法的增量式 ACPI 末制导方法 …… 445
12.7 平行接近法的增量式 ACPI 末制导方法 …… 450
12.8 本章总结 …… 455
参考文献 …… 456

第1章　PID控制理论及其局限性分析

比例–积分–微分(Proportional–Integral–Differential, PID)控制的精髓就是根据被控对象的实际值与期望值(控制目标)之间的偏差来形成控制策略，只要合理镇定PID参数使闭环控制系统稳定就能够实现控制目标，这正是经典PID控制方法获得广泛应用的根本原因[1–8]，在控制工程领域一直处于主导地位(90%以上的控制器都是PID控制器)。然而，PID问世100年来，国内外几代专家与学者几乎只专注于参数的镇定方法研究，而忽视了PID控制系统关键的物理属性研究。由于PID控制器形成的控制信号直接作用于被控系统的控制输入，而任何实际系统的各个状态和控制输入都具有明确的物理属性，因而客观要求PID控制器形成的控制信号也应该具有相应的量纲匹配属性，否则，无论使用经典控制理论方法还是现代控制理论方法设计的控制器都无异于纸上谈兵。

事实上，国内外关于PID镇定方法的论文多达十余万篇，主要分为线性系统的经典镇定方法[5–7]和非线性系统的现代镇定方法[8–27]两大类。现有镇定方法都集中表明：尽管PID控制律不依赖于被控对象模型，然而，PID参数却与被控对象模型、或工况状态、或外部扰动等因素密切相关，因此，PID参数鲁棒性差与抗扰动鲁棒性差的两个突出问题已成为不容争辩的客观事实。确切而言，针对不同的被控对象，PID参数镇定值千差万别；针对同一个被控对象，即便是已镇定好的PID控制器，一旦工况状态发生变化、或模型参数存在时变、或期望输出存在突变、或外部扰动突然出现等情况下，都需要重新镇定PID参数。正因为PID参数鲁棒性差与抗扰动鲁棒性差的突出问题，使得PID参数的镇定问题一直都是困扰控制工程领域的难题，客观上限制了PID控制理论在控制工程领域的潜在应用能力，并引发了以模型论为基础的现代控制理

2019 历史机遇 · 打造交流合作基地

Historic Opportunity · Build Communication And Cooperation Bases



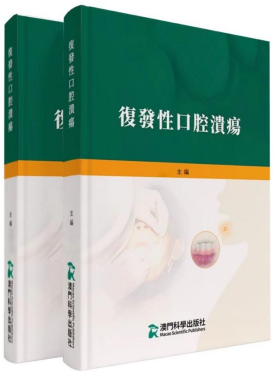
大湾区规划 · Introduction

《粤港澳大湾区发展规划纲要》明确了澳门“一个中心、一个平台、一个基地”的三个定位，即：建设世界旅游休闲中心、中国与葡语国家商贸合作服务平台，**打造以中华文化为主流、多元文化共存的交流合作基地**。



It further clarified the three orientations of "one center, one platform and one base" of Macao, namely, to build a world tourism and leisure center, a business and trade cooperation service platform between China and Portuguese-speaking countries, and to build an exchange and cooperation base with Chinese culture as the mainstream and multicultural coexistence.

MACAU TECHNOLOGY GENERAL ASSOCIATION 澳門科技總會
澳門科學出版社 Macao Scientific Publishers
澳门科学出版社（MOSP）
网址：moaj.mospbs.com 电话：+853-62961666
邮箱：book@mospbs.com 邮编：999078
经营场所：中国澳门南湾大马路恒昌大夏F座11楼
禁忌内容或注意事项本资料未能详尽 © 版权所有，翻版必究。



全球发行 · Publishing worldwide

由于国内自费书没有实际销售，出版社不会实际发行，属于非正式出版物，因此国内自费书绝大部分是属于非正式出版物。国际出版即便在没有销售市场的情况下也可以在海外发行上架。世界上其他地方（包括中国）的读者可以通过海外电商平台进行订购和销售。

Since there is no market for self-funded books in mainland China, mainland publishing houses will not actually issue them, so most of self-funded books in the Mainland are informal publications.





- 呼吸系统基本基础与临床 Fundamentals and clinic of respiratory diseases
- 临床肿瘤护理学 Clinical oncology nursing
- 感染性皮肤病学 Infectious dermatology
- 内分泌系统疾病 Endocrine system disease





- 实用小儿内科学 Practical pediatric internal medicine
- 消化系统疾病诊疗学 Diagnosis and treatment of digestive system diseases
- 现代中医诊断学 Modern diagnostics of traditional chinese medicine
- 皮肤修复与再生 Skin repair and regeneration

MACAU TECHNOLOGY GENERAL ASSOCIATION 澳門科技總會
澳門科學出版社 Macao Scientific Publishers

澳门科学出版社（MOSP）
网址：moaj.mospbs.com
邮箱：book@mospbs.com
电话：+853-62961666
邮编：999078
经营场所：中国澳门南湾大马路恒昌大夏F座11楼
禁忌内容或注意事项本资料未能详尽 © 版权所有，翻版必究。

出版流程 · Publishing Process

出版流程快速简便，在填写基本信息、签订合同并支付费用后，IBPC将原始内容进行校对、排版及封面设计；在经过多次校对后，提交申请国际书号；可根据实际需求进行印刷和馆藏存档，最后上架发行。全程专人沟通指导，以极高性价比的方式出版属于自己的作品。

The publishing process is simple and convenient, after filling in the basic information, signing the contract and paying the fee, IBPC will conduct proofreading, typesetting and cover design. After multiple proofreading, submit the ISBN application. According to the actual needs, we will arrange printing and collection archiving, and finally put on the shelves and issued.

检索服务 · Retrieval Service

IBPC的检索服务可提供出版物国际注册文件及出版物所在地的图书馆检索证明，为作者提供证明文件支撑。同时，优秀图书将推荐至国际数据库中收录，提升出版物的认可度。

IBPC can provide retrieval service including the registration documents and the library search certificate. Meanwhile, excellent books will be recommended for inclusion in authoritative databases to enhance the recognition of publications.

销售协议 · Sales Agreement

作者签订销售合作协议后，IBPC可提供多种上架渠道，包括官网、京东、天猫、亚马逊、当当网等平台，可销售字纸印本与电子图书等形式，并按照合作协议进行利润分成。

After the author signs the sales agreement, IBPC can provide a variety of sales channels, such as the official website, JD & T-mall overseas Purchase, Amazon and other platforms, printed paper and electronic books are available, and the authors share the profits according to the sales agreement.

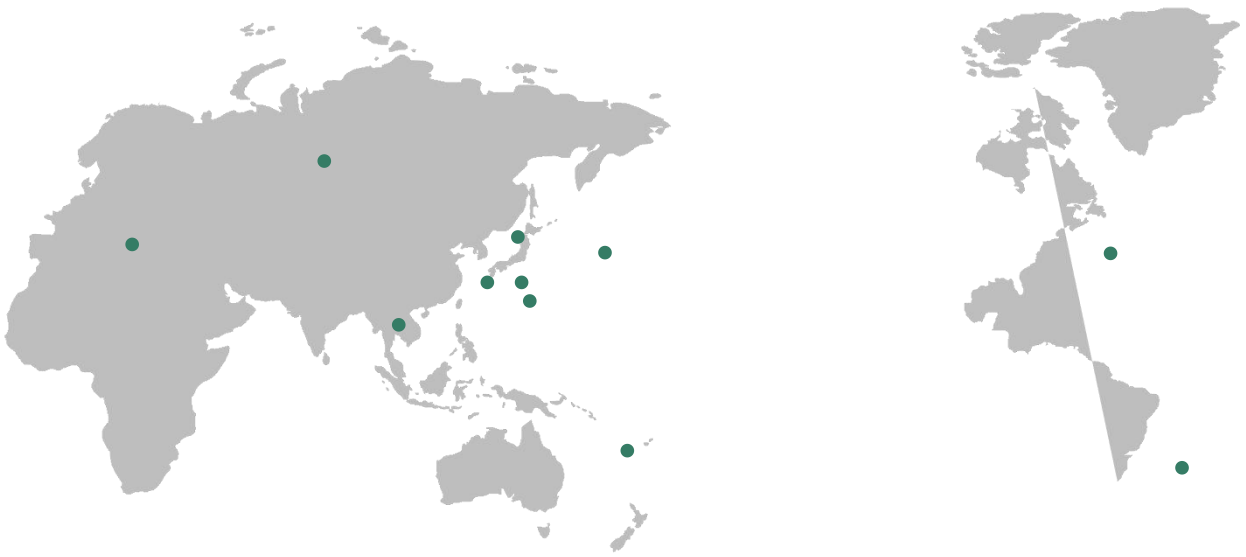


MACAU TECHNOLOGY GENERAL ASSOCIATION 澳門科技總會
澳門科學出版社 Macao Scientific Publishers

澳门科学出版社（MOSP）
网址：moaj.mospbs.com
邮箱：bookt@mospbs.com
电话：+853-62961666
邮编：999078
经营场所：中国澳门南湾大马路恒昌大夏F座11楼
禁忌内容或注意事项本资料未能详尽 © 版权所有，翻版必究。

澳门科学出版社
MOSP

“以服务青少年及青年科学才俊为己任，
打造国际性的科学技术交流平台”



正规国际出版，首选澳科出版

- **学术著作/个人作品 – 优质**
- **中华“强国文化”输出战略 – 翻译后国际出版**
- **数字教材 – 教材出书 & 数字化媒体上线**

所有优质内容，均可申请出版减免资助。

所有澳门本土内容，均可申请出版减免资助；

澳门总部
电话：0853-62961666（澳门）
邮件：book@mospbs.com
地址：中国澳门南湾大马路恒昌大夏F座11楼
网址：www.mospbs.com（英文）| moaj.mospbs.com（中文）

特别提醒：MOSP所有业务均有出版社的正规盖章合同，若有任何疑问，可联系出版社编辑确认。