

吴志刚 谭述君 彭海军 著

现代控制系统 设计与仿真

——使用PIMCSD工具箱



科学出版社

现代控制系统设计与仿真

——使用 PIMCSD 工具箱

吴志刚 谭述君 彭海军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容分为上下两篇,结合自主研发的 PIMCSD 工具箱讲述 LQG 与 H_∞ 最优控制系统的基本理论,以及设计与仿真的实现。上篇讲述了基于 PIMCSD 工具箱的无限长时间定常控制器(调节器)/滤波器的设计与仿真,包括基于 MATLAB 最优控制系统设计的传统教材的大部分内容;下篇讲述了有限长时间 LQG 与 H_∞ 最优控制系统设计与仿真在 PIMCSD 工具箱中的功能和实现,包括有限长时间 LQG 控制系统的时变软/硬终端控制、跟踪、滤波、平滑与估计,以及有限长时间 H_∞ 控制系统的临界范数、时变 H_∞ 全状态反馈控制、 H_∞ 滤波和 H_∞ 输出反馈控制等内容。PIMCSD 工具箱为相关领域有限长时间控制问题的分析与求解提供了强有力的支持,是目前 MATLAB 控制工具箱所不具备的,对它的介绍和使用也是本书的主要特色。

本书可作为大专院校力学、自动控制专业的高年级本科生和研究生的教材,也可供相关研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代控制系统设计与仿真:使用 PIMCSD 工具箱 / 吴志刚, 谭述君, 彭海军著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034102-0

I. ①现… II. ①吴… ②谭… ③彭… III. ①控制系统-计算机辅助设计-软件包, PIMCSD ②控制系统-计算机仿真-软件包, PIMCSD IV. ① TP273 ② TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 076545 号

责任编辑: 赵彦超 刘信力/责任校对: 林青梅

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

随 志 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2012 年 5 月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 237 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

航空航天是世界科技的前沿领域。20 世纪 90 年代以来的历次战争都表明美军称霸全球现状。战争主导方是在超视距下进行打击的,对手几乎没有还手之力。信息、控制是导航与精确打击的关键。精确打击的关键不是导弹的当量,而是能否快速精确控制、命中。控制理论与计算是其中的关键问题之一。

中国崛起面对**禁运**,核心高科技无法引进,只有独立自主,自力更生。

在计算技术与航空航天需求的冲击下,20 世纪 60 年代学术界蓬勃开展了现代控制论的研究。现代控制论所奠基的状态空间法的起点至少也应回溯到哈密顿正则方程体系。控制与力学本为一体,但许多大学的工程力学专业并不讲授控制理论。两方面的理论体系与方法各自发展,学科交叉很不够。其实在现代控制论出现前,钱学森先生著《工程控制论》(*Engineering Cybernetics*)作出了榜样,力学家也能深入研究控制理论。状态空间控制理论已经发展成为精确控制不可缺少的工具。当前 PIMCSD(Precise Integration Method-based Control System Design)控制工具箱就是基于现代状态空间控制理论的,其理论特点是基于结构力学与最优控制的模拟理论,其数学基础是辛数学方法,而微分方程求解则有精细积分法。1993 年钱令希先生为拙著《计算结构力学与最优控制》作序时指出“力学工作者应首先虚心地汲取状态空间法成功的经验,重新认识哈密顿体系理论的深刻意义,以及随之而来的辛数学方法对于应用力学的应用”。2007 年我们出版的《状态空间控制理论与计算》,是之前十余年工作的小结。虽然该书所用的数学基本不超出大学微积分的水平,但思路与传统理论差别很大,体系是新的。从学科交叉、辛数学体系与算法的不同,可看到该书区别于其他著作的特色。该书从时变、非线性、系统离散、时间滞后、饱和、自适应滤波到分散控制的理论与计算,都有相应的论述。但学科交叉也可能给读者带来一些困难。从实用与发展的角度看,提供使用方便的控制软件无疑是非常有益处的,因此就有了完全自主的 PIMCSD 工具箱。

我国出版了很多现代控制论的大学教材,其中许多教材只讲到 MATLAB 系统所提供的软件“Control System Toolbox”和“Robust Control Toolbox”的层次。但这些工具箱只能用于无限长时间的时不变系统的定常控制器(也称调节器)的设计层次,用于有限长时间的时不变系统的时变控制器的内容就没有了。然而,有限长时间的时变控制器对于航空、航天、运输、机器人、安全等领域的快速机动控制具有很大的优越性。*Applied Optimal Control: Optimization, Estimation, and Control*

一书的作者、美国控制理论界元老 A. E. Bryson 教授(斯坦福大学)于 1999 年和 2002 年分别出版了著作 *Dynamic Optimization* 和 *Applied Linear Optimal Control*, 强调了时变控制器设计的必要性, Bryson 的工作是有软件支持的。

国内广泛使用的 MATLAB 系统中的“Control System Toolbox”, 只有时不变系统的定常控制器是最基本的层次, 哪怕是 Bryson 指出的时变控制器设计功能也不具备。如果我国的教学仅仅限于最基本层次, 则自主创新就难了。唯有**自力更生、自主创新**, 自主开发更好的软件工具 PIMCSD, 才可体现这些自主体系与算法的作用。

当前这本书就是讲述 PIMCSD 工具箱应用的。该书上篇介绍的功能函数相当于 MATLAB 系统“Control System Toolbox”的全部及“Robust Control Toolbox”的一部分; 这些功能已经全部为 PIMCSD 工具箱的相应函数所实现, 而且可做得更好。书中下篇则全部是新功能, 着重于有限长时间的时变反馈控制器和滤波器。内容比定常反馈控制系统广泛多了, 有限长时间的 Kalman 滤波、量测反馈控制、鲁棒滤波与控制等, 全部有体现。控制的实时(real time)反馈性质要求响应特别快, 用 C++语言编制的程序也已经基本就绪。

PIMCSD 工具箱只能作为实际控制应用的一个平台, 控制模型等依然要由用户自己建立。当前的 PIMCSD 工具箱已具备线性控制系统设计的主要功能, 《状态空间控制理论与计算》中进一步的内容, 例如从时变系统、非线性系统、离散系统、时间滞后、饱和、自适应滤波到分散控制系统设计的软件, 还应继续研制。这超出了本书的范围, 只能留待以后了。

PIMCSD 工具箱已经实现了应用, 并且已经嵌入了软件集成系统 SiPESC (Software Integrated Platform for Engineering and Scientific Computations)。PIMCSD 工具箱以后可以与动力学等学科方面的程序相衔接、融合, 尤其要结合工程需要而发展, 当然还要继续推进。

看到年轻人的成长, 我很高兴, 故代为作序。

钟万勰

2012 年 2 月

前 言

2007 年出版的《状态空间控制理论与计算》一书系统阐述了结构力学与最优控制的模拟理论,详细介绍了精细积分法在线性系统的最优控制和 H_∞ 控制问题中的应用,上述研究工作的数学基础是辛数学方法。

近年来,我们在教学、科研工作及学术交流中发现,由于上述专著的内容涉及力学与控制两大领域的专门知识,从事控制系统设计和应用工作的读者难以方便地将书中的理论和算法转化为计算程序和软件,并应用于自己的教学和科研工作。事实上,计算机辅助控制系统设计(CACSD)的算法研究和软件开发工作在国内外都已得到了相当广泛的重视,并取得了大量的研究成果。例如 MATLAB、SLICOT,以及我国 1982~1991 年期间在国家自然科学基金资助下研发的 CAD/CSC 软件系统等。然而,这些软件都不具备有限长时间时变控制器设计方面的功能。与之相对应地,目前几乎所有控制类教材的重点内容也都放在无限长时间定常控制器设计上,时变控制器设计方面的内容则很少强调。而时变控制器相对于传统定常控制器在控制时间、精度方面却具有非常明显的优势。这一优点在斯坦福大学 Bryson 教授的两本专著, *Dynamic Optimization* (Addison Wesley Longman Inc., 1999)和 *Applied Linear Optimal Control* (Cambridge University Press, 2002)中得到了专门的强调,并指出有限长时间时变控制器对于航空航天领域的快速机动控制问题具有传统定常控制器难以企及的优越性。

有鉴于此,我们从 2006 年开始系统地梳理和总结了多年来在算法与软件开发方面的研究工作,从便于用户学习和使用的角度考虑,开发了基于精细积分算法的控制系统设计与仿真工具箱——PIMCSD (Precise Integration Method-based Control System Design)。该工具箱包括的函数基本上涵盖了 LQG 和 H_∞ 控制系统设计与仿真的所有功能。需要特别指出的是,该工具箱提供了丰富的时变控制器/滤波器设计功能,而这些功能恰恰是 MATLAB 的“Control System Toolbox”和“Robust Control Toolbox”等工具箱所不具备的。

本书分为上下两篇,主要结合 PIMCSD 工具箱讲述 LQG 与 H_∞ 最优控制的基本理论和方法,以及这两类控制系统的设计与仿真。本书的主要特色体现在有限长时间时变控制器设计与仿真等方面,主要介绍标准的基本问题的求解,并提供了大量的算例,至于不同学科所关注的具体问题如何建模分析则没有在书中介绍,因为这将涉及太多的学科专门知识。

上篇包括第 1~3 章,讲述无限长时间的定常控制器(调节器)设计与仿真,即

传统教材中关于 LQG 与 H_∞ 最优控制理论的主要内容。这部分内容也可以结合 MATLAB 控制工具箱讲述(正如传统教材那样),但本书中的算例表明,相同功能的函数,如矩阵指数计算、矩阵代数 Riccati 方程求解等基本问题, PIMCSD 工具箱具有更高的精度和稳定性。

第 1 章讲述线性定常控制系统的时域分析(如零输入响应、阶跃响应、任意输入响应等)、连续系统的精确离散化,以及可控性和可观测性分析等。第 2 章讲述 LQG 最优控制系统设计与仿真,包括 LQ 调节器、Kalman 滤波器,以及 LQG 综合等。第 3 章讲述 H_∞ 最优控制系统设计与仿真,包括定常 H_∞ 全状态反馈控制器、 H_∞ 最优滤波器、 H_∞ 输出反馈控制,以及 H_∞ 控制系统临界范数的计算等。

下篇包括第 4~9 章,讲述有限长时间的时变控制器设计与仿真,这是本书相对于传统教材扩展的部分,也是本书的主要特色。这篇所介绍的有限长时间控制系统设计等内容在 MATLAB 的控制工具箱中并没有相应的函数,而 PIMCSD 工具箱填补了这方面的空白,为有限长时间控制问题的分析与求解提供了强有力的支持。

由于时变控制器的引入,即使对于线性定常系统,反馈控制系统也成为时变的,因此,时变控制系统的仿真是必须的。另外,矩阵微分 Riccati 方程、Lyapunov 方程等是有限长时间时变控制器求解的基本问题,这些问题在第 4 章讲述。第 5 章讲述考虑软/硬终端约束的、利用全状态反馈的时变 LQ 终端控制器设计与仿真,以及时变 LQ 全状态反馈跟踪—控制。第 6 章讲述连续/离散系统的时变滤波器设计与仿真,如 Kalman-Bucy/Kalman 滤波器,这些滤波器可以对含噪声输入和量测误差的线性动态系统进行“在线”递推估计;本章还给出了反向滤波器(例如反向方差滤波、反向信息滤波等),可以完成对初始条件的估计。第 7 章讲述时变滤波—平滑器的设计与仿真。平滑是利用一次测试运行后的所有纪录数据“离线”对状态历程和噪声历程进行估计,可以充分利用 t_i 时刻之前和之后的数据对 t_i 时刻的状态和噪声进行估计,通常包含两个滤波过程。第 8 章讲述时变 LQG 终端控制器和跟踪—控制器的设计与仿真。第 9 章讲述连续/离散系统的时变 H_∞ 控制器设计与仿真,包括有限长时间 H_∞ 控制系统临界范数的计算、时变 H_∞ 全状态反馈控制、时变 H_∞ 滤波,以及时变 H_∞ 输出反馈控制等内容。

本书每章节首先将控制问题描述清楚,然后讲解在 PIMCSD 工具箱中的函数实现,最后示以算例。这样或许可以让读者专注于控制问题的理解和解决方法,而不必纠缠于理论和算法的推导。如果读者对理论和算法感兴趣,可参考钟万镒等著的《状态空间控制理论与计算》。

本书配有 PIMCSD 工具箱,以及本书各章节例题的 MATLAB 程序代码,读者可以自行在 SiPESC 网站免费下载(<http://www.sipesc.org/index.php/download/viewcategory/1-pimcsd>)。使用这些代码可以很容易地完成无限长时间/有限长时间

的定常/时变控制器/滤波器等开—闭环控制系统的设计与仿真,有助于读者对书中所介绍的控制理论和方法的理解和应用。作者欢迎任何与本书相关问题的交流与讨论(pimcsd@gmail.com)。

本书从酝酿到修改的整个写作过程一直得到钟万勰院士的鼓励与支持,并且钟院士为本书提出了许多建设性的宝贵意见。作者的一些同事和朋友也先后给予许多有益的建议,这其中包括上海科学院的陆仲绩工程师,大连理工大学的高强博士、李振虎硕士等。本书作为讲义在试用过程中还得到了西北工业大学、哈尔滨工业大学等许多同行的关注,作者在此一并表示感谢。同时,感谢国家自然科学基金(11072044, 11002032, 11102031)、“973”项目(2011CB711105)、高等学校博士学科点专项基金(20110041130001)、大连理工大学基本科研业务费专项项目(DUT11ZD(G)02),以及工业装备结构分析国家重点实验室和上海科学院 CAE 公共技术服务平台对我们研究工作的支持。

由于作者水平所限,书中不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。

作 者

2012 年 2 月

PIMCSD 工具箱函数说明

MATRIX EQUATION SOLVERS(矩阵方程求解器)

pim_expm—Computation of matrix exponential based on diagonal Padé approximation (计算矩阵指数)

pim_are—Algebraic Riccati equation solution (求解代数 Riccati 方程)

pim_lyap—Continuous-time algebraic Lyapunov equation solution (求解连续时间代数 Layounov 方程)

pim_dlyap—Discrete-time algebraic Lyapunov equation solution (求解离散时间代数 Lyapunov 方程)

pim_asricc—Asymmetric algebraic Riccati equation solution (求解非对称代数 Riccati 方程)

pim_diffricc—Differential Riccati equation solution (求解微分 Riccati 方程)

pim_diffriccs—Solution of a set of differential Riccati equation (求解微分 Riccati 方程组)

pim_diffasricc—Asymmetric differential Riccati equation solution (求解非对称微分 Riccati 方程)

pim_diffasriccs—Solution of a set of asymmetric differential Riccati equations (求解非对称微分 Riccati 方程组)

pim_difflyap—Differential Lyapunov equation solution (求解微分 Lyapunov 方程)

LINEAR-QUADRATIC OPTIMAL CONTROL SYNTHESIS(线性二次最优控制综合)

LQ Controller (LQ 控制器)

pim_c2d—Conversion of continuous-time models to discrete-time ones (连续时间模型转化为离散时间模型)

pim_c2dgm—Converting the CGMPs to DGMPs for LTI systems (线性定常系统的连续 Gauss-Markov 过程转化为离散 Gauss-Markov 过程)

pim_care—Solve continuous-time algebraic Riccati equations (求解连续时间代数 Riccati 方程)

pim_dare—Solve discrete-time algebraic Riccati equations (求解离散时间代数 Riccati 方程)

pim_cgram—Controllability and observability Gramians for continuous LTI system (求解连续的线性定常系统的可控性和可观性 Gram 矩阵)

pim_dgram—Controllability and observability Gramians for discrete LTI system (求解离散的

线性定常系统的可控性和可观性 Gram 矩阵)

pim_lqr—Linear-quadratic regulator design for continuous-time systems (连续时间系统的线性二次调节器设计)

pim_lqrd—Discrete linear-quadratic regulator design from continuous cost function (离散时间系统的离散线性二次调节器设计)

pim_lqry—Linea-quadratic regulator design with output weighting for continuous-time systems (连续时间系统带有输出加权的线性二次调节器设计)

pim_ltru—Continuous LQG/LTR control synthesis (at plant input) (连续时间系统 LQG/LTR 控制综合(基于系统输入))

pim_ltry—Continuous LQG/LTR control synthesis (at plant output) (连续时间系统 LQG/LTR 控制综合(基于系统输出))

pim_dlqr—Linear-quadratic regulator design for discrete-time systems (离散时间系统线性二次调节器设计)

pim_dlqry—Linear-quadratic regulator design with output weighting for discrete-time systems (离散时间系统带有输出加权的线性二次调节器设计)

pim_tlqfl—TV LQ follower/disturbance-rejector for continuous system (连续系统的时变线性二次跟踪/干扰抑制控制器设计)

pim_tdlqfl—TV LQ follower/disturbance-rejector for discrete system (离散系统的时变线性二次跟踪/干扰抑制控制器设计)

pim_tlqhtc—TV LQ hard terminal controller for continuous system (连续系统的时变线性二次硬终端控制器设计)

pim_tlqstc—TV LQ soft terminal controller for continuous system (连续系统的时变线性二次软终端控制器设计)

pim_tlqtc—TV LQ soft-hard terminal controller for continuous system (连续系统的时变线性二次软—硬终端控制器设计)

pim_tdlqhtc—TV LQ hard terminal controller for discrete system (离散系统的时变线性二次硬终端控制器设计)

pim_tdlqstc—TV LQ soft terminal controller for discrete system (离散系统的时变线性二次软终端控制器设计)

pim_tdlqtc—TV LQ soft-hard terminal controller for discrete system (离散系统的时变线性二次软—硬终端控制器设计)

pim_ttlqhtc—TV LQ hard terminal controller for piece-wise constant continuous system (线性分段定常系统的时变线性二次硬终端控制器设计)

pim_ttlqstc—TV LQ soft terminal controller for piece-wise constant continuous system (线性分段定常系统的时变线性二次软终端控制器设计)

Kalman Filter(Kalman 滤波器)

pim_kalman—TI Kalman-Bucy filter for continuous system with different types (连续系统的定常 Kalman-Bucy 滤波器设计)

pim_dkalman—Computation of discrete time-invariant Kalman filter (离散系统的定常 Kalman 滤波器设计)

pim_kalmd—TI discrete Kalman filter for continuous plant (连续系统的定常数字 Kalman 滤波器设计)

pim_tkalm—TV Kalman-Bucy filters with different types (连续系统的时变 Kalman 滤波器设计)

pim_tfiflt—TV forward information filter for continuous system (连续系统的时变正向信息滤波器设计)

pim_tbcflt—TV backward covariance filter for continuous system (连续系统的时变反向方差滤波器设计)

pim_tbiflt—TV backward information filter for continuous system (连续系统的时变反向信息滤波器设计)

pim_tbfifls—TV backward information filter-smoother for continuous system (连续系统的时变反向信息滤波—平滑器设计)

pim_tbfifls—TV forward-backward information filter-smoother for continuous system (连续系统的时变正向—反向信息滤波—平滑器设计)

pim_tdkalm—TV Kalman filter for discrete system (离散系统的时变 Kalman 滤波器设计)

pim_tdbcflt—TV backward covariance filter for discrete system (离散系统的时变反向方差滤波器设计)

pim_tdbiflt—TV backward information filter for discrete system (离散系统的时变反向信息滤波器设计)

pim_tdfiflt—TV forward Information filter for discrete system (离散系统的时变正向信息滤波器设计)

pim_tdbifls—TV backward information filter-smoother for discrete system (离散系统的时变反向信息滤波—平滑器设计)

pim_tdfbifls—TV forward-backward information filter-smoother for discrete system (离散系统的时变正向—反向信息滤波—平滑器设计)

pim_tdfcbifls—TV discrete forward covariance and backward information filters-smoothers (离散系统的时变正向方差和反向信息滤波—平滑器设计)

LQG Controller(LQG 控制器)

pim_lqg—TI linear-quadratic-Gaussian control synthesis for continuous system (连续系统的定

常 LQG 控制综合)

pim_tlgstc—TV LQG soft terminal controller for continuous system (new method) (连续系统的时变 LQG 软终端控制器)

pim_tlghtc—TV LQG hard terminal controller for continuous system (new method) (连续系统的时变 LQG 硬终端控制器)

pim_tdlgstc—TV LQG soft terminal controller for discrete system (离散系统的时变 LQG 软终端控制器)

pim_tdlghtc—TV LQG hard terminal controller for discrete system (离散系统的时变 LQG 硬终端控制器)

pim_tlgfll—TV LQG follower synthesis for continuous system (new method) (连续系统的时变 LQG 跟踪控制器)

pim_tdlgfll—TV LQG follower synthesis for discrete system (离散系统的时变 LQG 跟踪控制器)

ROBUST H_∞ CONTROL SYNTHESIS(鲁棒 H_∞ 控制综合)

Norms/Controller/Filter/Synthesis(范数/控制器/滤波器/综合)

pim_normh2—The continuous LTI system H2-norm (连续线性定常系统的 H2 范数)

pim_normhinf—Hinf norm of continuous LTI system of infinite/finite-time intervals (连续线性定常系统的 Hinf 范数)

pim_normhc—Continuous optimal Hinf-norm of state-feedback control system for infinite/finite-time intervals (无限长时间/有限长时间连续状态反馈控制系统 Hinf 范数)

pim_normhf—Continuous Hinf-norm of optimal filtering system for infinite/finite-time intervals (无限长时间/有限长时间连续最优滤波系统 Hinf 范数)

pim_normhcf—Continuous optimal Hinf-norm of output feedback control system for infinite/finite-time interval (无限长时间/有限长时间连续输出反馈控制系统 Hinf 范数)

pim_normdhc—Discrete optimal Hinf-norm of state-feedback control system for infinite/finite-time intervals (无限长时间/有限长时间离散状态反馈控制系统 Hinf 范数)

pim_normdhf—Discrete Hinf-norm of optimal filtering system for infinite/finite-time intervals (无限长时间/有限长时间离散最优滤波系统 Hinf 范数)

pim_normdhcf—Discrete optimal Hinf-norm of output feedback control system for infinite/finite-time intervals (无限长时间/有限长时间离散输出反馈控制系统 Hinf 范数)

pim_hinfc—TI Hinf state feedback controller for continuous system (连续系统的定常 Hinf 状态反馈控制器设计)

pim_hinff—TI Hinf optimal filter for continuous system (连续系统的定常 Hinf 最优滤波器设计)

pim_dhinfc—TI Hinf state feedback controller for discrete system (离散系统的定常 Hinf 状态

反馈控制器设计)

pim_dhinf—TI Hinf optimal filter for discrete system (离散系统的定常 Hinf 最优滤波器设计)

pim_thinf—TV Hinf state feedback controller for continuous system (连续系统的时变 Hinf 状态反馈控制器设计)

pim_thinf—TV Hinf optimal filter for continuous system (连续系统的时变 Hinf 最优滤波器设计)

pim_tdhinf—TV Hinf state feedback controller for discrete system (离散系统的时变 Hinf 状态反馈控制器设计)

pim_tdhinf—TV Hinf optimal filter for discrete system (离散系统的时变 Hinf 最优滤波器设计)

pim_h2lqg—TI H2 control synthesis for continuous system (连续系统的定常 H2 控制综合)

pim_dh2lqg—TI H2 control synthesis for discrete system (离散系统的定常 H2 控制综合)

pim_hinf1—TI Hinf output feedback controller for continuous system (连续系统的定常 Hinf 输出反馈控制器设计)

pim_hinf2—TI Hinf output feedback controller for continuous system (连续系统的定常 Hinf 输出反馈控制器设计)

pim_dhinf2—TI Hinf output feedback controller for discrete system(new method) (离散系统的定常 Hinf 输出反馈控制器设计)

pim_thinf2—TV Hinf output feedback controller for continuous system (连续系统的时变 Hinf 输出反馈控制器设计)

pim_tdhinf2—TV Hinf output feedback controller for discrete system (离散系统的时变 Hinf 输出反馈控制器设计)

pim_thinfhc—TV Hinf hard terminal controller for continuous system (连续系统的时变 Hinf 硬终端控制器设计)

pim_thinfsc—TV Hinf soft terminal controller for continuous system (连续系统的时变 Hinf 软终端控制器设计)

SIMULATION OF CONTROL SYSTEM(控制系统仿真)

pim_step—Step response of continuous LTI state-space models (连续线性定常系统状态空间模型的阶跃响应)

pim_initial—Initial response of continuous LTI state-space models (连续线性定常系统状态空间模型的初值响应)

pim_impulse—Impulse response of continuous LTI state-space models (连续线性定常系统状态空间模型的脉冲响应)

pim_lsim—Simulate time response of continuous LTI state-space models to arbitrary inputs (连续线性定常系统状态空间模型的任意输入响应)

pim_sinresp—Sine response of continuous LTI state-space models (连续线性定常系统状态空

间模型的三角函数响应)

pim_expresp—Exponential response of continuous LTI state-space models (连续线性定常系统状态空间模型的指数响应)

pim_rampresp—Ramp response of continuous LTI state-space models (连续线性定常系统状态空间模型的随机输入响应)

pim_ltsim—Simulation of the LTI/PWC (piece-wise constant) control system (线性定常/分段定常系统的仿真)

pim_simkalman—Simulation for continuous TI Kalman-Bucy (forward covariance) filter (连续系统定常 Kalman-Bucy 滤波(正向方差)仿真)

pim_simdkalman—Simulation for discrete TI Kalman (forward covariance) filter (离散定常系统 Kalman 滤波(正向方差)仿真)

pim_simtkalm—Simulation for TV Kalman-Bucy filter of continuous system (连续系统时变 Kalman-Bucy 滤波仿真)

pim_simtdkalm—Simulation for TV Kalman filter of discrete system (离散系统时变 Kalman 滤波仿真)

pim_simtlqgsc—Simulation for TV LQG soft terminal controller of continuous system (连续系统时变 LQG 软终端控制器仿真)

pim_simtlqghtc—Simulation for TV LQG hard terminal controller of continuous system (连续系统时变 LQG 硬终端控制器仿真)

pim_simtdlqgsc—Simulation for TV LQG soft terminal controller of discrete system (离散系统时变 LQG 软终端控制器仿真)

pim_simtdlqghtc—Simulation for TV LQG hard terminal controller of discrete system (离散系统时变 LQG 硬终端控制器仿真)

pim_simtlqgfl—Simulation for TV LQG follower of continuous system (连续系统时变 LQG 跟踪控制器仿真)

pim_simtdlqgfl—Simulation for TV LQG follower of discrete system (离散系统时变 LQG 跟踪控制器仿真)

pim_simthinf—Simulation for TV Hinf full information controller of continuous system (连续系统时变 Hinf 全信息控制仿真)

pim_simthinf2—Simulation for TV Hinf output-feedback controller of continuous system (连续系统时变 Hinf 输出反馈控制仿真)

pim_simtdhinf—Simulation for TV Hinf state-feedback controller of discrete system (离散系统时变 Hinf 状态反馈控制仿真)

pim_simtdhinf2—Simulation for TV Hinf output-feedback controller of discrete system (离散系统时变 Hinf 输出反馈控制仿真)

目 录

序

前言

PIMCSD 工具箱函数说明

上篇 定常控制器设计与仿真

第 1 章 定常控制系统分析	3
1.1 线性系统的时域分析	3
1.1.1 零输入响应	3
1.1.2 阶跃响应	5
1.1.3 脉冲响应	7
1.1.4 斜坡响应	9
1.1.5 正弦响应	10
1.1.6 指数响应	12
1.1.7 任意输入响应	14
1.2 连续系统的离散化	15
1.2.1 状态方程和性能指标的精确离散	15
1.2.2 线性随机系统的等效离散	20
1.3 可控性与可观测性	22
第 2 章 LQ 调节器	26
2.1 定常 LQ 控制器	26
2.1.1 状态调节器	26
2.1.2 数字调节器	29
2.1.3 输出调节器	31
2.1.4 矩阵代数 Riccati 方程	33
2.2 定常 Kalman 滤波器	36
2.2.1 Kalman 滤波器	36
2.2.2 数字 Kalman 滤波器	42
2.3 定常 LQG 调节器	45
第 3 章 H_∞ 调节器	48
3.1 无限长时间控制系统的 H_2 和 H_∞ 范数	48

3.2 H_∞ 全状态反馈控制	50
3.3 H_∞ 最优滤波	56
3.4 H_∞ 输出反馈控制	63

下篇 时变控制器设计与仿真

第4章 时变控制系统分析	75
4.1 线性时变系统仿真	75
4.2 矩阵微分方程(组)	77
4.2.1 对称/非对称微分 Riccati 方程(组)	78
4.2.2 对称/非对称微分 Lyapunov 方程	83
第5章 时变 LQ 控制器	85
5.1 LQ 终端控制	85
5.1.1 软终端控制器	85
5.1.2 硬终端控制器	91
5.2 分段线性定常系统的终端控制	95
5.3 时变 LQ 跟踪—控制	98
第6章 时变滤波器	103
6.1 Kalman 滤波(正向方差滤波)	103
6.2 正向信息滤波	109
6.3 反向方差滤波	115
6.4 反向信息滤波	120
第7章 时变滤波—平滑器	125
7.1 反向信息滤波—平滑	125
7.2 正向—反向信息滤波—平滑	131
7.3 小结	135
第8章 时变 LQG 控制器	136
8.1 LQG 终端控制	136
8.1.1 软终端控制器	136
8.1.2 硬终端控制器	144
8.2 时变 LQG 跟踪—控制	151
第9章 时变 H_∞控制器	159
9.1 有限长时间控制系统的 H_2 和 H_∞ 范数	159
9.2 H_∞ 全状态反馈控制	162
9.3 H_∞ 最优滤波	170
9.4 H_∞ 输出反馈控制	178
参考文献	187

上篇 定常控制器设计与仿真