

**Proceedings of
the 19th Chinese Process Control Conference**

过程控制科学技术与应用

——第19届中国过程控制会议论文集

孙优贤 朱群雄 主编



化学工业出版社

TP273-53/2

2008

**Proceedings of
the 19th Chinese Process Control Conference**

过程控制科学技术与应用
——第19届中国过程控制会议论文集

孙优贤 朱群雄 主编



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

过程控制科学技术与应用：第19届中国过程控制会议论文集/孙优贤，朱群雄主编. —北京：化学工业出版社，2008.7

ISBN 978-7-122-03201-0

I. 过… II. ①孙…②朱… III. 过程控制-学术会议-中国-文集 IV. TP273-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第093087号

责任编辑：刘哲
责任校对：洪雅妹

装帧设计：关飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）
印 装：北京彩云龙印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张33¼ 字数859千字 2008年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：88.00元

版权所有 违者必究

前 言

中国自动化学会过程控制专业委员会主办的中国过程控制会议 (CPCC), 始于 1987 年, 至今已经举办了 18 届。CPCC 的宗旨是为过程控制领域的专家、学者、工程技术人员及研究生提供一个学术交流的机会, 以便推动我国过程控制科学与工程技术的发展。由北京化工大学承办、北京自动化学会和《控制工程》编辑部及化学工业出版社协办的第 19 届中国过程控制会议 (CPCC2008) 又是一次中国控制界的学术盛会。本次会议共收到投稿论文 653 篇, 经第 19 届中国过程控制会议程序委员会组织全国 55 名专家评审, 论文集共收录论文 107 篇。

本次会议紧密结合过程工业领域重大发展战略, 瞄准过程控制科学与技术发展前沿, 以推进过程工业信息化、自动化, 发展节能、降耗、环保、高效制造业, 整体提升我国先进制造技术的研发水平和自主创新能力为主要目标, 征集了以工业过程建模、仿真和辨识技术、鲁棒控制与应用、自适应控制与应用、预测控制与应用、推断控制与应用、智能控制与应用、模糊控制与应用、神经网络控制与应用、工业过程优化控制、复杂系统控制、汽车电子控制、软测量技术、模式识别与图像处理、节能减排技术、动态系统故障诊断与容错技术、过程检测仪表、自动化装置、生产安全与控制、非线性、大纯滞后、分布参数系统、运动控制、工业过程监控系统、现场总线控制系统、流程工业 CIMS、企业资源计划 ERP、生产执行系统 MES、嵌入式系统技术、DCS 及 PLC 等为主题的学术论文。会议录用的论文在很大程度上反映了我国过程控制的最新研究成果与发展趋势。本论文集汇集了控制理论与应用、建模与优化、先进控制、故障诊断及其他五大类内容, 可供从事过程控制理论及应用、生产过程综合自动化研究与应用的高等院校、科研院所以及工业部门的专家、学者、工程技术与管理人员及研究生参考。

在本届年会的论文征集、审稿以及本论文集的整理过程中, 得到了全国同行无私的大力支持, 北京化工大学信息科学与技术学院的部分老师和研究生做了大量细致的工作, 化学工业出版社也给予了大力的帮助, 在此表示衷心的感谢。

编 者
2008 年 7 月

目 录

控制理论与应用

- 一种求解控制理论问题的工具：SOS 凸优化方法 陈向勇，李春吉，李 宁 (2)
- 微小线段加减速控制算法的研究与实现 李明珠，刘少君，黄道平 (7)
- 基于特征模型的非线性预测函数控制研究 吴建国，张培建 (12)
- 基于矩阵斜度的预测控制系统鲁棒性分析 彭 春，夏伯锴 (17)
- 一类基于 MFA 的间歇式反应釜温度控制方法 杨泽明，赵晓东，薛安克 (21)
- 火电厂主汽温度的 MFAC-PID 串级控制研究 马 平，张晨晖 (25)
- 基于 BP 神经网络优化的铅锌烧结配料过程迭代学习控制策略
..... 王春生，吴 敏，曹卫华，陈 鑫 (29)
- 循环流化床控制分析 刘向莉 (33)
- 基于量化器的系统稳定性分析 卢星海，谢林柏 (36)
- 电梯楼层控制器的设计与实现 严 惠，赖永波 (40)
- 循环流化床锅炉的自动控制 魏剑萍 (45)
- 参数未知的永磁同步电机混沌运动的一种控制方法 李钟慎，魏剑林，王永初 (49)
- 基于 Hammerstein 模型的确定控制量研究 徐湘元 (54)
- 一种新型仿生机器马的控制系统设计 赵立兴，赵静波，王洪瑞，安素珍 (60)
- 智能双室真空镀膜机研制 李敬兆，潘地林 (65)
- WebField JX-300XP 控制系统在粗苯精制的应用 张 堃 (70)
- 间歇式反应釜计算机控制系统的设计与实现 马栋萍，王 暄，耿瑞芳 (75)
- 基于 DCS 的加热炉控制系统设计 魏文渊 袁洪芳 (80)

建模与优化

- 多率系统的连续状态模型辨识及其在过程数据压缩中的应用 倪博溢，萧德云 (86)
- 渐变缺陷漏磁特征的仿真研究 魏咏梅，张国光 (91)
- 废水生物处理过程软测量机理模型的研究 齐 杰，刘载文，王小艺，崔莉凤，连晓峰 (95)
- 重型板坯电渣重熔过程仿真及其优化 曹 强，王京春 (100)
- 油田联合站加热炉建模及仿真 徐宝昌，罗雄麟，王笑千 (105)
- 一种新的系统建模方法—能量传递函数法 杨锡运，刘 玮 (111)
- 基于有色赋时 Petri 网的半导体生产线建模与仿真实现 余红霞，乔 非，曹政才 (117)
- 基于 OpenGL 的化工设备三维仿真系统 夏 涛，崔 璟 (123)
- 单元机组机炉协调受控对象的平衡点 李 丹，韩忠旭 (128)
- 汽车发动机怠速的建模与 BACKSTEPPING 控制 朴明姬，刘志远 (133)
- 一种基于 T-S 模型的 PID 控制器在电阻加热炉系统中的设计与仿真研究
..... 孙志成，李大字 (138)

糖厂澄清工段 pH 值控制系统的神经网络预测模型	林小峰, 雷声勇, 刘唐波 (144)
基于 CGBP 神经网络热轧带钢卷取温度预估模型的研究	李彦荣, 彭力 (149)
基于 BP 神经网络的风电机组风轮建模及运行特性研究	常太华, 唐宁宁, 杨锡运 (155)
一种优化控制方案工程化软件的设计与实现	刘载文, 程志强, 王小艺, 连晓峰 (160)
运行优化决策支持系统在电力系统中的应用	李建强, 谷俊杰, 王松岭, 牛成林 (165)
基于支持向量机的醋酸乙烯聚合率软测量建模	刘林, 杨辉 (169)
倾斜油水两相流水为连续相的逆塞流及过渡流型非线性特性	宗艳波, 金宁德, 王振亚, 王淳 (174)
TTCAN 现场总线网络的仿真研究与实现	冯晓东, 李岩, 张争明 (181)
一种 RTBAC 扩展模型的研究	胡乃平, 王红 (187)
一种动态约束优化调度的软件模型	吕萌, 姜大光, 易军凯 (191)
流程企业生产优化建模研究与应用	李朋辉, 张国光 (195)
基于 IEC61850 的继电器保护设备的建模	罗颖, 胥布工 (198)
无人控制系统的边缘失控研究与建模	刘利钊, 张天华, 刘英超, 李茂春 (204)
基于罚函数-粒子群法的聚丙烯生产的优化	雷海军, 曹柳林 (209)
基于支持向量机和 B 样条的分子量分布建模	黄颖华, 王晶 (214)

先进控制

基于改进的模糊 PID 控制的经纬仪直流伺服系统	王轶, 樊立萍, 范红岩 (220)
医疗用腹腔循环热灌注温度控制过程的建模与模糊预测控制	姜慧敏, 张兴会, 王繁珍, 陈增强, 袁著社 (224)
改进预测控制在化工间歇反应中的应用	李超, 彭力 (228)
基于能量恒定和作用平衡的仿人智能过程控制	代方远, 卢胜利, 张兴会 (232)
一种混沌遗传算法在机器人路径规划中的应用	雷亮, 陈莹, 纪志成 (239)
基于粗糙集的集装箱起重机防摇系统控制	肖健梅, 芦晓明, 王锡淮 (244)
DC/DC 变换器的自整定模糊 PID 控制研究	范红岩, 樊立萍, 王轶 (248)
基于模糊自适应 PID 控制的换热站温度控制系统	张健, 刘国利, 黄明生, 刘艺 (253)
基于参数自调整的模糊预估控制及其应用	张立位, 彭力 (258)
基于模糊控制算法的移动机器人局部路径规划	付梦印, 曲辉, 王美玲, 杨毅 (262)
基于 FCMA 算法的粗糙-模糊控制器	杨平, 王晶, 潘立登 (268)
基于 BP 神经网络的 PID 控制器在 VAC 合成中温控制中的应用	鲁伟栋, 杨辉 (272)
基于遗传算法的竖炉温度模糊 PID 控制	吴宏彬, 姜国焯 (276)

故障诊断

神经网络在模拟电路故障诊断中的应用研究	赵娟平, 温雪洁 (282)
300MW 火电机组实时能损监测及优化系统	李建强, 谷俊杰, 牛成林, 王勇 (286)
基于粗糙集和径向基网络的风机故障诊断研究	孙守凯, 姜国焯 (290)
小波多分辨率分析信号时频特征的故障检测方法	周小勇, 叶银忠 (294)
一种基于特征性能的多变量 MPC 控制器性能监控方法	陈功泉, 田学民 (299)
基于神经网络的故障诊断与容错控制及在加热炉控制系统的应用	王增会, 陈尔奎, 孙艳霞, 钟军伟, 陈增强 (304)
基于 SDG 自动生成故障树软件的研究	王琪, 张贝克 (309)

基于案例研究的蒸馏装置智能监控与事故预报系统	邵建丰, 黄道平 (313)
染纱生产过程集成监控系统的研究	郝平, 张聚, 应时彦 (317)
炼焦生产过程综合生产目标优化与实时集中监视系统设计	蹇钊, 赖旭芝, 吴敏, 雷琪 (323)
MC39i 在无线远程监控系统中的应用	罗超, 李力争 (328)

其 他

磁轨机器人的预见式模糊导航技术及实现	杨名利, 谢玮, 徐继文, 周凤永, 马家辰 (334)
丙烯聚合装置牌号切换的在线操作指导	何德峰, 俞立, 薛美盛 (339)
300MW 单元机组再热汽温控制系统设计新方法及其工程应用	周传心, 王海宁, 杨培宏, 薛翔宇, 王永健, 史西银, 韩忠旭 (343)
基于生活支援机器人的图像识别研究	姜廷楷, 前泰志, 见浪 护, 曹柳林, 祝海江 (348)
图像边缘检测过程中基于统计学方法的多层模糊逻辑算法	李 峤, 张百海 (352)
驾驶员疲劳驾驶监测系统中眼睛定位和眼睛状态识别的方法	刘 芳, 姚明海 (356)
基于颜色特征的运动目标检测跟踪研究	奚 林, 刘 东 (361)
综合形状和纹理特征描述的目标识别研究	齐英剑 赵宝永 李 樱 (365)
基于 B/S 模式的火电厂节能管理系统	李涛永, 刘长良, 贾延臣, 湛 琳 (369)
面向化工安全领域的无线传感器网络设计	张建青, 林 春, 程 杰, 刘淑敏, 马 静 (374)
基于 nRF905 的无线门禁系统设计	郑小芹, 洪 健, 李钟慎 (378)
数字锁相环设计方法及改进	周 群, 崔玉龙 (383)
化工事故案例库的研究与设计	张贝克, 李 潇, 马 昕 (388)
微分几何理论在不同种混沌系统同步中的应用研究	陈明杰, 王常虹 (393)
虚拟现实技术在无刷直流电机设计中的应用	韩 凤, 周治平 (398)
电厂热经济性在线分析与负荷分配系统框架设计	刘如九, 王爽心, 王绍民 (403)
基于现场总线的报警联动系统设计与实现	王 昭, 朱群雄 (409)
基于 LXI 总线的网络化虚拟仪器实验室	姚晓丽, 李淑芬 (414)
基于供应链的化工企业 ERP 采购系统管理研究	陈丽丽, 高淑芝 (418)
可视化技术在生产计划与调度过程中的应用	张旭堂, 刘新华, 王共东, 刘文剑 (423)
基于实例推理的大批量定制产品非结构成本估算	孙卫红, 孙远志, 冯毅雄 (428)
基于指纹传感器 FPS200 的自动指纹识别系统	李景萃, 王 晶 (434)
线阵 CCD 技术在卫生巾包装机上的应用	吕素英, 洪 健, 李钟慎 (440)
基于指纹识别的 JAVA 卡在银行系统中的应用	李 媛, 李 辉 (444)
基于 S3C240 的 U-Boot 移植	李 丛, 赵恒永 (449)
PCS7 BOX 在间歇反应控制中的应用	马 昕, 刘 艳, 张贝克 (454)
基于 JADE 的网络教学平台的研究与设计	李 元, 侯光亮 (460)
一类生物种群动力系统模型解的整体存在性和有限时刻爆破性	郭从洲, 崔国忠, 时文俊 (464)
基于快速 K 均值分类的宽带网络流量分析
.....	张建青, 程 春, 程 琰, 林 春, 刘淑敏 (467)
基于多目标决策的企业技术创新能力评价	崔卫华, 张之光 (472)
基于模糊综合评价的资源型城市可持续发展能力评价	牛国平, 张之光 (477)
一种基于 WS-Security 的 SOA 安全方案设计	段华玮, 李 辉 (481)

基于支持向量机的 DNA 序列分类系统的研究	侯国莲, 刘佩伟 (485)
基于 S3C2440 的 Windows CE. NET 下触摸屏驱动分析与实现	李海青, 李树广 (490)
基于数据库的带通行限制 A* 算法实现	陈 易, 王 晶 (494)
基于无线网络的远程控制实验室设计与实现	曲亦直, 戴亚平, 田德振 (500)
二维条形码图像轮廓的一种快速提取算法	陈 成, 王永骥 (507)
轮胎制造 MES 系统架构设计与软件平台实现	高彦臣, 杨殿才, 王海清, 焦清国 (513)
以机理模型为核心的先进控制及过程优化体系	潘 东, 陶兴文, 袁 璞 (519)

一种求解控制理论问题的工具 2025 凸优化方法

作者：张三, 李四

单位：中国科学院数学研究所

控制理论与应用

摘要：本文介绍了一种求解控制理论问题的工具，该方法基于凸优化理论，能够有效解决线性规划、二次规划、非线性规划等问题。该方法具有计算效率高、求解精度高等优点，广泛应用于工程控制、经济管理、交通运输等领域。

关键词：控制理论、凸优化、线性规划、二次规划、非线性规划

1. 引言

控制理论是研究系统行为的一门学科，其核心问题是寻找合适的控制策略，使系统按照期望的方式运行。在控制理论的研究中，优化方法起着至关重要的作用。凸优化方法作为优化理论的一个重要分支，具有坚实的数学基础和广泛的应用前景。

2. 凸优化的基本概念

凸优化的基本概念包括凸集、凸函数、凸优化问题等。凸集是指任意两点之间的连线都在集合内部的集合。凸函数是指其定义域为凸集，且函数值在任意两点之间的连线上的值不大于函数在这两点的值的最大值的函数。凸优化问题是指寻找凸函数在凸集上的最小值问题。

3. 凸优化的求解方法

凸优化的求解方法包括梯度法、牛顿法、内点法等。梯度法是一种基于梯度信息的求解方法，适用于求解无约束的凸优化问题。牛顿法是一种基于二阶导数信息的求解方法，适用于求解有约束的凸优化问题。内点法是一种基于对偶理论的求解方法，适用于求解线性规划、二次规划等问题。

4. 凸优化在控制理论中的应用

凸优化在控制理论中的应用非常广泛，包括线性规划、二次规划、非线性规划等。线性规划广泛应用于资源分配、生产计划等问题。二次规划广泛应用于控制系统的优化设计。非线性规划广泛应用于非线性控制系统的优化设计。

5. 结论

凸优化方法作为一种有效的求解控制理论问题的工具，具有广泛的应用前景。随着计算技术的不断发展，凸优化方法将在控制理论的研究和应用中发挥越来越重要的作用。

一种求解控制理论问题的工具： SOS 凸优化方法

陈向勇*，李春吉，李 宁

(东北大学系统科学研究所，沈阳，110004)

摘 要：系统和控制理论中许多重要的问题，都可转化为线性矩阵不等式(LMI) 约束的凸优化问题。SOS (sum of square) 凸优化方法是建立在 SOS 分解的基础上提出的一种数值计算的方法。这一优化方法在控制中可以成为 LMI 凸优化方法的补充。本文在系统介绍 SOS 凸优化的概念以及相关理论知识和计算机软件的基础上，对其在控制问题的应用中作简单的介绍。

关键词：SOS (sum of square) 凸优化；半定规划 (SDP)；SOSTOOLS 工具箱

引 言

近几年来，一种基于 SOS 约束的凸优化方法^[1] 在国外控制界引起广泛关注。在系统及控制理论中，许多系统的分析与综合设计问题都可以表示成或转化成相应的 SOS 凸优化问题，运用近年提出的高效可靠的内点算法，从数值计算上给一些没有或很难得到解析解的问题带来生机。本文正是在这一基础上，通过对 SOS 凸优化方法的理论基础、具体理论、相关的应用以及形成的计算工具 SOSTOOLS 的详细介绍，对这一算法和技术有一个很好的认识，也为研究系统和控制问题提供一个适用算法。

1988 年，Nesterov 和 Nemirovskii 提出了用来求解具有线性矩阵不等式约束的凸优化问题的内点法，取得了良好的效果。其基本思想是运用约束集定义一个凸的障碍函数，将其附加到原问题的目标函数中，以一个无约束优化问题代替原有的约束优化问题，运用牛顿法求解。其过程类似于非线性规划中的罚函数法。内点法为线性矩阵不等式问题的求解提供了有效的算法。内点法的出现使得线性矩阵不等式(LMI) 成为处理系统与控制问题的一种有效工具，从而导致 LMI 凸优化方法^[2] 的提出，这也为控制问题的分析和控制器的设计带来了很大的方便。LMI 更多的是关注矩阵的变化，在线性系统中有着很深的影响。随着越来越多的人关注联系实际的非线性系统，LMI 凸优化存在很大的缺陷，因为在非线性系统中很难构造合适的求解矩阵，即使可以构造也很难找到解决问题的方法。

SOS 凸优化方法属于多项式系统研究的范畴，它是建立在 SOS 分解^{[1][3]} 的基础上产生的一种解决数值计算的有效方法，将矩阵问题的求解转化为多项式问题成为新的研究方向。SOS 凸优化理论的提出为解决系统和控制问题做了很好的铺垫。

第一作者：陈向勇，1983 年生，男，山东临沂人，硕士。研究方向：非线性鲁棒控制理论等。

* 通讯联系人 E-mail: cxy8305@163.com

1 理论基础

1.1 SOS 多项式和 SOS 分解

SOS 分解是建立在矩阵理论的二次性的基础上的一种特征值分解。对于 $x \in R^n$, 如果存在一些多项式 $f_i(x)$, $i=1, \dots, m$ 使得 $p(x) = \sum_{i=1}^m f_i^2(x)$, 这个多项式 $p(x)$ 是一个 SOS 多项式。

一个阶数为 $2d$ 的多项式 $p(x)$ 是一个 SOS 当且仅当存在矩阵 $Q(x)$ 和一个单向量 $Z(x)$ 使得 $p(x) = Z^T(x)Q(x)Z(x)$ 。其中 $Q(x)$ 是一个特征值非负的矩阵, $Z(x)$ 满足对应各元素的阶数小于 d 。

1.2 半定规划

半定规划^[4]是指线性函数在对称矩阵的仿射组合半正定的约束下的极小问题, 可视为线性规划 (简称 LP) 的推广。对半定规划的研究, 我们考虑关于变量 $x \in R^n$ 的线性函数 $f(x)$ 的极小问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & C^T X \\ \text{s. t.} \quad & F(x) > 0 \end{aligned}$$

$F(x) = F_0(x) + x_1 F_1(x) + \dots + x_m F_m(x)$ ($F_i(x)$ ($i=1, \dots, m$) $\in R^{n \times n}$) 为实对称矩阵不等式。 $F(x) > 0$ 表示 $F(x)$ 是半正定的。

对于一切 $z \in R^n$ 都有 $z^T F(x) z \geq 0$ 。我们称 $F(x) > 0$ 为线性矩阵不等式 (简称 LMI), 称上述问题为半定规划, 简称为 SDP。半定规划是一个凸规划, 因为其目标函数及约束函数都是凸函数, 其约束集为凸集, 若 $F(x) > 0$ 且 $F(y) > 0$, 则对于任意的 $0 \leq \lambda \leq 1$, 都有

$$F(\lambda x + (1-\lambda)y) = \lambda F(x) + (1-\lambda)F(y) \geq 0$$

一般说, SDP 的 LMI 约束是非线性的、非光滑的, 但却是具有凸性的。若 SDP 的最优解存在, 则必然在可行集的边界上一定存在一个最优解。半定规划作为数学规划的一个独立分支已经越来越成熟, 它实际上包含了线性规划、二次约束下的二次凸规划等。

1.3 SOS 凸优化方法

已知一个 SOS 多项式是全局非负定的, 利用这一性质在具体的使用过程中, 我们可以用 SOS 条件代替各样的多项式不等式, 即用 SOS 条件来替代非负定条件。

一个 SOS 规划是一个如下式的凸优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j=1}^J \omega_j c_j \\ \text{s. t.} \quad & a_{i,0}(x) + \sum_{j=1}^J a_{i,j}(x) c_j \text{ 是 SOS} \end{aligned}$$

其中, c_j 是标量决定变量; ω_j 是给定的实数; $a_{i,j}(x)$ 是给定的固定条件的多项式。

线性矩阵不等式 (LMI) 是处理系统与控制问题的一种有效工具。LMI 凸优化方法在系统及控制理论中应用广泛。许多分析与综合设计问题都可以表示成或转化成相应的 LMI 凸优化问题。

具有 LMI 约束的凸优化问题:

$$\begin{aligned} & \min F(x) \\ \text{s. t. } & \text{LMIF}(x) > 0 \end{aligned}$$

这里目标函数 $F(x)$ 为变量 x 的凸函数, 当 $F(x) = C^T X$ 时, 即上述的半定规划问题。

已知 $\text{LMIF}(x) > 0$ 是非负定的, 所以使用 SOS 条件来替代非负定条件, 则得到 SOS 凸优化方法在研究系统和控制问题的一般表达式:

$$\begin{aligned} & \min F(x) \\ \text{s. t. } & v^T F(x) v \text{ 是 SOS} \end{aligned}$$

SOS 凸优化方法使得许多难以解决的控制问题简单化, 对于得到的解更加精确化。这一方法也是对 LMI 凸优化的重要补充。

2 SOSTOOLS 工具箱的介绍

LMI 凸优化方法的技术思想主要采用的是近年提出的内点算法^[4]。Karmarkar 在 1984 年提出了一种用于求解线性规划的内点算法。20 世纪 90 年代初, Nemirovskii 和 Alizadeh 等将它推广至求解 LMI 约束的凸优化问题,。现在几乎所有用来求解线性规划问题的内点算法都可找到相应的半定规划版本。建立在 SOS 约束的凸优化方法和 SDP 问题对应的 SOSTOOLS 工具箱^[5]便成了解决问题的更加有效的工具。

SOSTOOLS 是一项免费的、第三方的用于解决 SOS 多项式的 MATLAB 工具箱。这一技术是建立在可以使用 SDP 有效地解决多变量多项式的 SOS 分解的基础之上。SOSTOOLS 是在越来越多的人对 SOS 多项式感兴趣的基础上被发展的, 更重要的是这一技术可以为很多复杂的问题提供优化松弛变量, 比如全局约束、布尔优化等问题。除了优化等上述问题, SOS 多项式在许多其他领域也有很重要的应用, 这包括在控制中的应用问题, 如搜索李雅普诺夫函数以证明动力系统的稳定、非线性系统的镇定等有关问题以及其他一些和最优控制相关的例子。

SOSTOOLS 可以解决最优化问题, 最优化问题的基本表达式如下:

$$\begin{aligned} & \min \omega^T c \\ \text{s. t. } & a_{0,j}(x) + \sum_{i=1}^N p_i(x) a_{i,j}(x) = 0, j = 1, 2, \dots, J \\ & a_{0,j}(x) + \sum_{i=1}^N p_i(x) a_{i,j}(x) \in \text{SOS}, j = J+1, \dots, J \end{aligned}$$

这里 c 是由多项式 $p_i(x)$ ($i=1, 2, \dots, \hat{N}$) 和 SOS 多项式 $p_i(x)$ ($i=\hat{N}+1, \dots, N$) 的未知系数构成的向量。 $a_{i,j}(x)$ 由标量常数系数多项式给出, $p_i(x)$ 为 SOS 变量, 对应的约束条件为 SOS 约束。由于上述问题对应的可行集是凸集, 所以一系列的 SOS 规划问题可以使用凸优化的工具箱求解。

3 SOS 凸优化方法在控制方面的应用

随着控制理论的不断深入化的研究, 对控制问题的数值计算有了更严格的要求, 目前控制问题的分析和设计控制器的问题上, 更多的是使用矩阵去解决。SOS 凸优化方法为解决

一些控制难题带来了方便,同时多项式方法的引入,使得解决控制问题不再严格受矩阵问题的约束。

SOS 凸优化方法及对应的工具箱 SOSTOOLS 在控制方面有很深的应用^{[6][7]}。目前主要的研究包括基于李亚普诺夫函数的非线性系统的稳定分析^[7]、非线性系统控制器的设计^[8]、混合以及时间延迟系统稳定性分析^[9]、LPV 的分析与综合^[10]、参数化鲁棒性分析^[11]、系统吸引域的估计^[12]等相关问题。SOSTOOLS 可以处理将对称简化和 SOS 问题相结合的一些难度比较大的问题。比如处理对于一个多项式 $p(x)$ 的 SOS 分解问题,这里 $p(x)$ 在关于 x 的有限群里是不变的。

目前矩理论在控制中已经有了很广泛的应用,矩理论和凸优化方法的结合在解决多项式的全局优化问题起了很大的作用。例如基于矩理论的多项式全局最优化的研究、多项式的鲁棒全局最优化的分析^[11]等等,这也为进一步研究控制问题提供了很大的帮助。例如基于矩理论的非线性系统的最大吸引域问题^[12]、基于矩理论的鲁棒控制问题研究以及最优控制问题的研究^[13]。

4 结 语

SOS、SOS 凸优化方法以及 SOSTOOLS 工具箱是相辅相成的,目前已经成为一种研究控制问题的重要工具,不管是李亚普诺夫函数的构造,还是系统控制器的设计,还是最优控制问题的研究,都发挥了重要的作用。可以说它是研究多项式系统最有效的工具。在用于多项式控制系统的分析和控制器的设计方面更是不可缺少的。本文正是在这基础上对 SOS 凸优化方法以及 SOSTOOLS 工具箱作了简单的介绍,从而让更多的人掌握这样一种解决控制问题非常有效的工具——SOS 凸优化方法。

参 考 文 献

- [1] Zachary William Jarvis-Wloszek. Lyapunov Based Analysis and Controller Synthesis for Polynomial Systems Using Sum-of-Squares Optimization. [PhD] thesis. California of University, 2003.
- [2] 张家凡. 一种求解控制理论问题的新工具: LMI 凸优化方法 [J]. 计算技术与自动化. Vol 22, No. 1 (2003. 3), 8-11.
- [3] P. A. Parrilo. Structured Semidefinite Programs and Semialgebraic Geometry Methods in Robustness and Optimization. [PhD] thesis, Technology California Institute of Pasadena, CA, 2000.
- [4] F. Alizadeh, J-P. A. Haeberly and M. L. Overton. Primal-dual interior-point methods for semidefinite programming: convergence, rates, stability and numerical results [J]. SIAM J. Optim. 1998 (8) . 746-768.
- [5] S. Prajna, A. Papachristodoulou and P. A. Parrilo. Introducing SOSTOOLS: A general purpose sum of squares programming solver [J]. In Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control. 2002.
- [6] Z. Jarvis-Wloszek, R. Feeley, W. Tan Etal. Some controls applications of sum of squares programming [J]. In Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, 2003.
- [7] S. Prajna, A. Papachristodoulou and P. Seiler. New developments in sum of squares optimization and SOSTOOLS [J]. In Proceedings of the American Control Conference. 2004.
- [8] S. Prajna, A. Papachristodoulou and F. Wu. Nonlinear control synthesis by sum of squares optimization; A Lyapunov-based approach [J]. In Proceedings of Asian Control Conference, 2004.
- [9] A. Papachristodoulou. Analysis of nonlinear time delay systems using the sum of squares decomposition [J]. In Proceedings of the American Control Conference. 2004.
- [10] F. Wu and S. Prajna. A new solution approach to polynomial LPV system analysis and synthesis [J]. In Proceedings of the American Control Conference. 2004.
- [11] J. B. Lasserre. Global optimization with polynomials and the problem of moments [J]. SIAM J. Optim 11 (3): 796-817, 2001.
- [12] P. Seiler. Stability region estimates for SDRE controlled systems using sum of squares optimization [J]. in Proceedings of the American Control Conference, 2003.
- [13] G. M. Sklyar. S. Yu Ignatovich. Representions of control systems in the flies algebra and in the algebra of nonlinear power moments [J]. Systems and Control Letters. 47 (2002) . 227-23.

A Useful Tool in Solving Control Theory Problems: SOS Convex Optimization Method

Chen Xiang-yong, Li Chun-ji, Li Ning

(Institute of System Science Northeastern University, Shenyang, 110004, China)

Abstract: A number of important problems from system and control theory can be reformulated as some convex optimization problems with linear matrix inequality (LMI) constraints. At present, the SOS (sum of square) convex optimization is a numerical calculation method on the basis of the decomposition of SOS. This optimization method can be the supplementary of LMI convex optimization methods in system and control theory. This paper introduces the application of this method in system and control theory on the basis of introducing the concept of SOS convex optimization, algorithms and the calculation software.

Key words: Sum of Square Convex Optimization; Semidefinite Programming; SOSTOOLS Box

微小线段加减速控制算法的研究与实现

李明珠*, 刘少君, 黄道平

(华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东广州, 510641)

摘要: 大量微小线段的加工造成系统频繁启停、速度缓慢、效率低。针对这一问题, 本文提出了将各微小线段融合成一个大逻辑段的标准。对加工过程中由于加速度不连续易造成的冲击, 本文采用四次位移曲线加减速控制算法克服了这一不足。仿真结果表明, 本融合标准和四次位移曲线加减速规划算法能保证速度、加速度的连续, 有效提高了系统的柔性。尤其在存在大量微小线段的加工中减少了很多的时间, 大大提高了加工效率。

关键词: 加减速, 微小线段插补, 柔性, CNC

引言

在现代的模具加工中, 精密加工占的比重很大, 其对加工的精度要求很高, 以便生产出高质量的模具。鉴于此, 不少数控编程人员特别地注重模具某些地方的光滑度, 生成加工代码时, 便会有大量小线段代码出来, 然后再交给数控机床来加工处理。小线段代码的出现意味着该处需要特别的加工处理以达到特殊的要求。与此相伴的是, 代码大量地增大, 加工时间会大大地增加, 加工速度不可避免地会受到拖累。因此数控机床中的微线段加工中是否能顺利地衔接各微线段, 能否高速、高精度地加工小线段, 已经成为数控系统中的一个不可避免的比较标准^[1]。

传统的数控中常用的加减速有直线加减速和指数加减速两种^[2]。这两种加减速方式在启动和加减速结束都存在加速度突变, 产生冲击, 因而不适合于高速数控系统。国外一些先进的 CNC 系统采用 S 形加减速, 通过对启动阶段即高速阶段的加速度衰减, 来保证电机性能的充分发挥和减小启动冲击^[3]。

本文针对微小线段的低速加工及加减速过程造成的冲击, 提出了将小线段融合的标准及比 S 高阶的四次位移曲线加减速算法。

1 融合过程及四次位移曲线算法原理

1.1 融合过程原理

通常, 数控系统中的各相关插补器对每一特定的微路径段进行插补运算。为了保证工件精度, 在微小路径段之间要进行加减速处理。常规的加减速方法是以每一小路径段为研究对象, 并使每段起始和末尾速度都为零, 则会耗费大量的时间来进行大的加减速运动, 对零件的损耗也非常大。

基金项目: 广东省科技计划项目 (2003B50301)

第一作者: 女, 1983 年生, 研究生。

* 通讯联系人 E-mail: limingzhu110abc@163.com

若能减少线段的个数,从而减少由于加减速过程的次数,增长匀速阶段的时间,则能极大地提高速度。融合成为了本算法的关键,如能设计出一种合并的标准,把其中的一些小线段与相邻的线段进行连接,把其它的一些小线段的转角速度尽可能地提高,减少加减速过程,当把小线段合成一个逻辑上的线段后,只需按单线段的运动模型运行一次的加速阶段与减速阶段即可,这样由于小线段代码带来的影响就最大可能地消除。

本算法在处理各段起始和末尾速度时,参照王宇晗^[4]等人提出的两相邻加工轨迹段转接速度,按式(1)来求解,而不是简单地设为零。其中 A_m 为指令给定最大加速度, θ 为线段之间的夹角, T 为插补时间, V_i 为第 i 及第 $i+1$ 两相邻线段之间的转接速度。

$$V_i = \frac{TA_m}{2\sin\theta/2} \quad (1)$$

由于两线段的长度 L_i 和 L_{i+1} 也影响速度,则两段的转角速度 $V_c = \min(L_i/T, L_{i+1}/T, V_i)$,即为第 i 段末速度及第 $i+1$ 段初速度。这样就可以提高加工段的起始和终止速度,避免频繁起停。

融合判断标准:角度 θ 很小时,两线段可以连接。 θ 大于 90° 时,不能连接。 $0^\circ < \theta < 90^\circ$,则还需要判断长度,若前段所在的逻辑段的总长 L_a 能从其初速度 V_1 加减速到其末速度 V_2 ,即满足式(2),不需要连接;若新段太短,则强制把新段连接在前段上。完成后,若新段没有连接上,再一次判断前一逻辑段是否满足式(2),不能则调整其末速度。这样完成前一逻辑段的连接过程。新段作为当前逻辑段,继续判断其与新加入段的连接。(其中 V_1 为逻辑段中第一个小段的初速度, V_2 为最后一个小段的末速度, L_a 为各小段和长, A_{\max} 为各小段的最小加速度。)

$$L_a \geq \frac{3(V_2^2 - V_1^2)}{4A_{\max}} \quad (2)$$

这样就把符合条件的小线段连接成了一个大的逻辑段,然后按单线段模型对其进行加减速规划。对于这个大的逻辑段只有一次加减速规划,对比传统对每个小线段都进行加减速过程的算法,在很大程度上提高了速度。

1.2 四次位移曲线加减速算法原理

在加减速控制算法中,直线加减速和指数加减速控制算法简单,实施容易;但启动和结束时存在加速度突变,易产生冲击。S型曲线加减速在任何一点的加速度都是连续变化的,从而避免了冲击,速度的平滑性很好。但算法相对来说比较复杂,故实现难度较大。其加减速过程细分为7个阶段:加加速段,匀加速段,减加速段,匀速段,加减速段,匀减速段,减减速段。每个段加速度-时间方程表达不统一,要分7个方程来分别描述。

本文在S曲线的基础上做了改进,提高加减速段加速度的阶次为两次。一个加(减)速段就可以由一条二次曲线来完整表示。算法简化为三个阶段:加速段,匀速段,减速段,只要3个方程分别表达。且两次加速度比起传统S曲线加减速算法的一次加速度,具有更好的柔性控制。

加速度、速度和位移之间存在着积分的关系,通过积分从而得到加减速段的三次速度方程 $v(t)$ 和四次位移曲线方程 $s(t)$,如式(3)-(5)。 V_e 、 V_s 分别为加速或减速过程的起始和终止速度, t_m 为加速或减速过程的时间, $t \in [0, t_m]$ 。

$$a(t) = \frac{6}{t_m^2} (V_e - V_s) \left(t - \frac{t^2}{t_m} \right) \quad (3)$$

$$v(t) = V_s + \frac{3(V_e - V_s)}{t_m^2} t^2 + \frac{2(V_s - V_e)}{t_m^3} t^3 \quad (4)$$

$$s(t) = V_s t + \frac{V_e - V_s}{t_m^2} t^3 + \frac{V_s - V_e}{2t_m^3} t^4 \quad (5)$$

$$\text{由于 } |a(t)| \leq A_{\max} \Rightarrow t_m \geq \frac{3|V_e - V_s|}{2A_{\max}}, \text{ 则取式: } t_m = \frac{3|V_e - V_s|}{2A_{\max}} \quad (6)$$

设 V_m 是该逻辑段的最大速度, 即 L_a 允许逻辑段由其初速度 V_1 到最大速度 V_m 然后再到末速度 V_2 的运动过程。根据式(5)和(6), 得到加速段长度 S_m 和减速段长度 S_q 分别为:

$$S_m = \frac{3(V_m^2 - V_1^2)}{4A_{\max}} \quad (7)$$

$$S_q = \frac{3(V_m^2 - V_2^2)}{4A_{\max}} \quad (8)$$

由式(7)和(8)及 $L_a = S_m + S_q$, 得到:

$$V_m = \sqrt{\frac{2A_{\max}L_a}{3} + \frac{V_1^2}{2} + \frac{V_2^2}{2}} \quad (9)$$

考虑到加工过程中指令最大速度 F 的影响, 则逻辑段允许的最大速度 $V_{\max} = \min(V_m, F)$ 。

当长度 L_a 足够长时, 该逻辑段的单线段模型可以简单理解为从 V_1 加速到 V_{\max} , 然后以 V_{\max} 匀速, 再从 V_{\max} 减速到 V_2 。当长度 L_a 比较短时, 没有中间的匀速过程。

设加速度、匀速段、减速段的长度为 S_m 、 S_p 、 S_q , m 、 p 、 q 为相应周期数。整个逻辑段的规划如式(10)~(12)。

$$\text{加速段: } S_m = \frac{3(V_{\max}^2 - V_1^2)}{4A_{\max}}, \quad m = \frac{3|V_{\max} - V_1|}{2A_{\max}T} \quad (10)$$

$$\text{减速段: } S_q = \frac{3(V_{\max}^2 - V_2^2)}{4A_{\max}}, \quad q = \frac{3|V_{\max} - V_2|}{2A_{\max}T} \quad (11)$$

$$\text{匀速段: } S_p = L_a - S_m - S_q, \quad p = \frac{S_p}{V_{\max}T} \quad (12)$$

2 算法的实现

首先通过各段长度和两相邻段的夹角求出转角速度, 然后根据融合标准把各小线段融合成一个大逻辑段。对逻辑段按式(10)-(12)进行四次位移曲线加减速规划, 得到各阶段的周期数 m 、 p 、 q , 然后根据所走的周期数来判断处于加速、匀速或减速的哪个阶段, 进而确定下一加工点位置。

规划插补过程流程如图1。

3 仿真及结果分析

下面对如图2代码(其中代码前部分为长线段, 后部分多为小线段), 分别采用非融合算法和融合算法对其加工过程进行仿真, 结果如图3和图4。

由以上两图比较可知, 两种算法对于长线段的加工速度差别不大。但对于后面小线段的加工, 非融合算法的起停频繁, 速度低。融合算法明显比非融合算法在转角速度及最高速度上有很大的提升。两算法采用的都是四次加减速控制, 速度过渡平滑, 有效地克服冲击。