



国防科技图书出版基金

多操纵面飞机控制 分配理论与应用

Control Allocation Theory and Its Application for
Aircraft with Multiple Control Surfaces

◎ 史静平 屈晓波 著

非
外
借



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

多操纵面飞机控制 分配理论与应用

Control Allocation Theory and Its Application for
Aircraft with Multiple Control Surfaces

史静平 屈晓波 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

多操纵面飞机控制分配理论与应用 / 史静平, 屈晓波著. —北京: 国防工业出版社, 2017.9

ISBN 978-7-118-11246-7

I. ①多… II. ①史… ②屈… III. ①飞机-操纵面-设计 IV. ①V225

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 214550 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 插页 6 印张 19 字数 355 千字

2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 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

致 读 者

本书由中央军委装备发展部**国防科技图书出版基金**资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

随着现代飞机在可靠性、机动性、安全性等性能方面的要求不断提高,飞机的气动布局发生了很大变化,特别是在操纵面的数量上有了显著增加,使用了推力矢量技术。与传统常规布局飞机的控制系统设计不同,多操纵面飞机控制系统的设计不仅需要设计控制律使飞行控制系统满足品质评价的准则,而且还需要设计分配律使期望的控制力矩合理地分配到各个操纵面上。新型飞机操纵面功能耦合和气动耦合的复杂性使得现有针对“常规布局飞机飞行控制系统设计”的理论方法难以满足复杂、多目标飞行任务下对操纵面进行控制、分配与管理的设计要求,这就对飞行控制理论提出了更高、更新的要求。本书所讲述的内容——多操纵面飞机控制分配理论,正是用于解决这一工程问题的基本理论,是作者及所在课题组人员近 10 年来对多操纵面飞机控制分配理论研究的归纳与总结。

本书以多操纵面飞机为研究对象,进行了多操纵面飞机控制分配系统优化设计的相关研究,本书的研究内容和结构安排如下:

第 1 章为绪论,阐述了本书的选题背景和研究意义,对控制分配理论的研究现状做了较为详细的综述,并简要概括本书的研究内容和结构安排。在对多操纵面控制分配技术的综述研究中,本书详细阐述多操纵面控制系统的发展历程,介绍常见飞行器的布局与舵面配置情况,并对广义逆、几何、数学规划三类分配方法的研究现状、存在问题和应用情况做了较为详细的分析与探讨。本章还集中探讨了近 5 年控制分配技术发展的新动向,对一些研究热点和难点问题进行了介绍。

第 2 章以 *Admire* 飞机模型为研究对象,对多操纵面飞机的数学建模问题进行研究。较之于常规飞机的控制系统,分配子系统的加入增加了控制系统设计的复杂度,也改变了控制律输出的物理含义,这一变化与控制律参数整定息息相关。本章对该问题进行细致的分析,对控制律与分配律的串联耦合关系进行详细分析,指明了控制律输出的物理含义,并给出控制效率矩阵的提取方式。

第 3 章对多操纵面飞机转矩可达集的求解问题进行研究。主要介绍了由滚转力矩、偏航力矩构成的二维转矩可达集的求解方法,以及由俯仰力矩、滚转力矩、偏航力矩构成的三维转矩可达集的求解方法,特别针对奇异过驱动系统转矩可达集的求解问题进行了较为细致的讨论。

第 4 章对广义逆类分配方法进行研究。伪逆法、加权伪逆法、再分配伪逆法、多级广义逆分配法等含有伪逆计算的分配方法统称为广义逆类分配方法。广义逆

类分配方法无法实现对于转矩可达集的完全分配,本章在探讨加权伪逆分配法局限性的基础上,提出了加权伪逆法可达转矩集与非凸可达转矩集的求解方法。

第5章围绕如何提高广义逆类分配算法的分配效率问题,利用遗传算法做了深入研究,研究表明:通过遗传算法选择伪逆阵或加权矩阵均能获得最优的分配阵。飞机在实际飞行时,特殊的机动将使期望的转矩向量集中在特定方向或区域。如何裁剪伪逆阵从而对该区域的转矩集具有较高的分配效率,是一个难点。本章利用遗传算法对该问题做深入研究,并给出了合理的伪逆阵裁剪方法。

第6章对几何类分配方法进行研究。直接分配法、面搜索法和力矩旋转变换法等一些需要先直接或间接计算系统转矩可达集,再进行分配求解的方法统称为几何类分配方法。本章重点介绍直接几何法、面搜索法、力矩旋转变换法三种几何类分配方法,并给出了相应的仿真算例。

第7章对数学规划分配方法进行介绍。数学规划方法在带约束的优化问题中具有明显的优势,通过建立合适的优化性能指标,这类方法能够很好地解决操纵面的控制分配问题。可用于控制分配的数学规划方法众多,本章仅对基于线性规划法、序列线性规划法和不动点迭代法的三种常见分配方法进行介绍,并给出了相应的仿真算例。

第8章对基于智能优化算法的分配方法进行研究。20世纪中期以来,人们受到达尔文生物进化论的启发,提出了一些有别于传统解决复杂优化问题的新方法和新策略,如遗传算法、粒子群算法、蚁群算法、鱼群算法等。智能优化算法作为一类特殊的随机搜索算法已经被越来越多地学习及研究,并促成巨大发展,本章将智能优化算法应用于分配律设计,着重介绍了基于粒子群算法的分配方法、基于多种群算法的分配方法和基于鱼群算法的分配方法。

第9章对操纵面偏转角与三轴力矩系数的关系进行气动分析。当飞机进行大迎角、大角速运动时,气动力及力矩特性的线性度差,操纵面气动导数的非线性特性以及操纵面之间的耦合效应十分突出,这时如果仍使用线性化的做法将导致较大的解算误差,因此就需要研究飞机的非线性控制问题。本章针对单调非线性、非单调非线性、耦合非线性三种典型的非线性分配问题进行探讨,提出了改进的分配模型建模方法。

第10章对多操纵面的分配与管理方案进行研究。多操纵面的控制分配问题本质上是一个多目标优化问题,现代战争对于飞机敏捷性、机动性的要求使得飞机对操纵面任务的分配与管理呈现多目标化。例如:起飞着陆时应考虑飞机对于升力的需求;超声速巡航时操纵面的配平值应使阻力最小;突防时应使操纵面的雷达反射面最小;大机动飞行时使飞机可用控制力矩最大;等等分配管理设计目标。本章介绍了三种操纵面多目标分配管理方案:基于飞行任务的多操纵面分配管理方案、基于线性规划的多操纵面分配管理方案和基于转矩可达集的多操纵面分配管理方案。

第 11 章对基于多操纵面的重构控制系统设计问题进行研究。多操纵面控制分配技术为重构控制提供了新的设计方案和解决途径。基于多操纵面的综合重构飞行控制方法是一种主动重构控制方法,它通过对冗余的操纵面管理实现主动重构,根据故障信息自动选择具有最高效率的受限基控制组进行分配律重新设计,来保障系统在不同的故障状态下都具有较好的控制效果,从而提高飞机在故障及损伤情况下的鲁棒性和安全性。

第 12 和 13 章对矢量操纵面与气动操纵面的协调控制问题进行研究。过失速机动的实现,除解决气动耦合、惯性耦合和非线性问题外,关键在于引入推力矢量技术并解决气动操纵面同矢量操纵面的协调控制分配问题。第 12 章在介绍矢量发动机分配模型的基础上采用了非线性动态逆方法分快回路、较慢回路设计了飞机的控制律,实现了大攻角保持、“眼镜蛇”机动控制和“矢量滚筒”机动控制。在此基础上,第 13 章探讨矢量操纵面与气动舵面的协调控制方案,着重研究了对矢量操纵面的调度与管理方案,验证了控制分配技术对于解决矢量操纵面与气动操纵面协调控制的有效性。

第 14 章对无尾飞翼布局飞机控制分配系统的设计问题进行研究。无尾飞翼布局飞机由于取消了水平尾翼和垂直尾翼,使得无人机的纵向与横侧向静稳定性急剧降低甚至不稳定、纵向与横侧向运动出现严重耦合现象等。因此,针对无尾飞翼布局飞机操纵面进行合理的组合与分配是实现其控制系统设计的关键。本章以课题组自主研发的一款具备 10 个操纵面的小型飞翼布局飞机为研究对象,介绍其控制分配系统的设计过程,特别对三种不同的操纵面分配构型进行了研究与仿真验证。

本书由史静平、屈晓波著。其中第 1~6 章、第 11~13 章由史静平撰写,第 7~10 章、第 14 章由屈晓波撰写。在此,作者感谢对本书的出版给予关心、支持和帮助的人们。特别需要提及并感谢:对本书书稿进行审读并给出建设性指正的章卫国、董新民、李俊民教授;为本书的撰写从事创造性科研实践并贡献宝贵设计经验的李广文副教授、刘小雄副教授、毕可军高级工程师;课题组的吕永玺、倪焯斌、张一玮等研究生。同时感谢自始至终为本书出版给予帮助的毛俊权等编辑。

本书内容涵盖的知识包括飞行力学与飞行控制、非线性控制理论、数学规划理论和凸包络计算等,对读者的专业知识有较高的要求,适合于飞行控制专业研究生和国防专业工程技术人员阅读。

史静平 屈晓波

2017. 4. 26

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究目的与意义	4
1.2 多操纵面控制分配技术综述	6
1.2.1 多操纵面控制分配技术的发展历程	6
1.2.2 常见飞行器操纵面的配置情况	9
1.2.3 线性过驱动系统分配方法的研究现状	12
1.2.4 控制分配研究的新进展与应用	20
第 2 章 多操纵面飞机的数学模型	25
2.1 多操纵面飞机的运动方程	25
2.2 推力矢量机构	27
2.2.1 推力矢量偏转角的定义	28
2.2.2 推力矢量产生力和力矩的计算	28
2.3 多操纵面飞机控制分配问题的描述	30
2.4 Admiral 飞机模型	32
2.4.1 Admiral 模型介绍	32
2.4.2 Admiral 配平与线性化	35
2.5 多操纵面布局飞机控制 - 分配系统结构分析	37
2.6 多操纵面布局飞机过驱动系统数学模型的提取	38
2.6.1 根据气动力矩计算式提取控制效能矩阵	39
2.6.2 根据线性化小扰动方程提取控制效能矩阵	40
第 3 章 转矩可达集的求解	42
3.1 二维转矩可达集求解	42
3.2 三维转矩可达集求解	44
3.3 奇异分配系统转矩可达集求解	48
3.3.1 II 型奇异分配系统的 AMS 构成分析	49
3.3.2 II 型奇异分配系统的 AMS 求解	50
3.3.3 I 型奇异分配系统的 AMS 求解	52

第4章 广义逆类分配方法研究	55
4.1 伪逆法与加权伪逆法	55
4.1.1 伪逆法	55
4.1.2 加权伪逆法	56
4.2 广义逆类分配方法的局限性	58
4.2.1 伪逆法和加权伪逆法转矩可达集求解	59
4.2.2 三种分配方法转矩可达集的求解算例	60
4.3 再分配伪逆法与串接链分配法	63
4.3.1 再分配伪逆法	63
4.3.2 串接链分配法	64
4.4 非凸广义逆类分配方法转矩可达集求解	65
4.4.1 求解思路	65
4.4.2 再分配伪逆法与串接链法转矩可达集的求解算例	66
4.5 基于广义逆类分配法的飞行控制系统设计	69
4.5.1 控制分配的工程化设计	69
4.5.2 仿真分析	70
第5章 基于遗传算法的广义逆阵优化设计	76
5.1 遗传算法等启发式算法简介	76
5.1.1 启发式优化算法研究概况	76
5.1.2 遗传算法的基本概念及操作	79
5.2 基于小生境遗传算法的分配阵优化设计	80
5.2.1 问题描述	81
5.2.2 基于小生境遗传算法的广义逆阵优化	82
5.2.3 仿真算例	84
5.3 基于小生境遗传算法的加权伪逆阵优化设计	86
5.3.1 基于小生境遗传算法的加权伪逆优化	86
5.3.2 仿真算例	86
5.3.3 优化结果的应用推广	88
5.4 基于遗传算法的广义逆阵裁剪设计	90
5.4.1 广义逆的定向裁剪	91
5.4.2 广义逆的定区域裁剪	92
5.4.3 仿真算例	94
第6章 几何类分配方法	97
6.1 直接几何法	97
6.1.1 受限分配问题凸包络的求解	98
6.1.2 控制变量的求解	100

6.1.3	算例分析	101
6.2	面搜索算法	104
6.2.1	转矩可达集的求解	104
6.2.2	对于指向面的搜索	104
6.2.3	算例分析	105
6.3	基于力矩旋转的搜索分配算法	106
6.3.1	基于力矩旋转的搜索分配算法原理	106
6.3.2	算例分析	109
第7章	基于数学规划的分配方法研究	112
7.1	基于线性规划的控制分配问题研究	112
7.1.1	线性规划法及其算法描述	112
7.1.2	仿真分析	115
7.2	基于序列线性规划的非线性分配求解	117
7.2.1	序列线性规划的理论基础与算法描述	117
7.2.2	仿真分析	121
7.2.3	两类规划算法的比较	122
7.3	基于 MDDIFXP 的二次规划分配算法	124
7.3.1	基本不动点迭代的二次规划方法	124
7.3.2	基于 MDDIFXP 的二次规划分配算法原理	125
7.3.3	仿真分析	127
第8章	基于智能优化算法的分配方法研究	130
8.1	基于粒子群寻优算法的控制分配问题研究	130
8.1.1	粒子群算法的理论基础与算法描述	130
8.1.2	仿真分析	131
8.2	基于多种群遗传算法的控制分配问题研究	134
8.2.1	多种群遗传算法的理论基础与算法描述	134
8.2.2	建模与仿真分析	136
8.3	基于鱼群算法的控制分配问题研究	139
8.3.1	鱼群算法的理论基础与算法描述	139
8.3.2	建模与仿真分析	142
第9章	操纵面偏转角与三轴力矩系数关系的气动分析	146
9.1	F-18 战斗机力矩系数-操纵面偏转角拟合关系	146
9.2	力矩系数-操纵面偏转角的单调非线性特性	148
9.2.1	单调非线性特性分析与求解	148
9.2.2	仿真分析	150

9.3	力矩系数 - 操纵面偏转角的非单调非线性特性	152
9.3.1	非单调非线性特性分析与求解	152
9.3.2	仿真分析	153
9.4	力矩系数 - 操纵面偏转角的耦合非线性特性	155
9.4.1	耦合非线性特性分析与求解	155
9.4.2	算例分析	157
第10章	多操纵面的分配与管理方案设计	159
10.1	基于飞行任务的多操纵面分配管理方案	159
10.2	基于线性规划的多操纵面分配算法	164
10.2.1	基于线性规划的直接分配算法	164
10.2.2	仿真分析	165
10.3	基于线性规划的多操纵面分配管理方案	167
10.3.1	多步线性规划实现控制分配管理	167
10.3.2	控制分配管理的设计与实现	169
10.3.3	分配管理的验证分析	176
10.4	基于转矩可达集的多操纵面分配管理方案	179
10.4.1	基于转矩可达集的多操纵面分配方案	179
10.4.2	仿真分析	182
第11章	基于多操纵面的重构控制系统设计	185
11.1	重构控制	185
11.1.1	重构控制概述	185
11.1.2	模块化控制分配设计概述	187
11.2	基于多操纵面的重构控制	188
11.2.1	多操纵面重构控制的基本原理	188
11.2.2	控制分配进行重构的条件	189
11.3	多操纵面重构控制设计	190
11.3.1	操纵面卡死时分配律的设计	190
11.3.2	操纵面松浮时分配律的设计	191
11.3.3	操纵面损伤时分配律的设计	191
11.4	多操纵面重构控制仿真及分析	192
11.4.1	操纵面卡死	192
11.4.2	操纵面松浮	193
11.4.3	操纵面损伤	195
第12章	推力矢量飞机超机动控制律设计	198
12.1	推力矢量技术概况	198
12.1.1	推力矢量技术及其特点	198

12.1.2	推力矢量装置喷管的结构类型	199
12.2	推力矢量飞机模型及非线性动态逆控制方法简介	200
12.2.1	推力矢量飞机模型简介	200
12.2.2	非线性动态逆方法	203
12.3	非线性动态逆快回路及较慢回路控制律设计与仿真	206
12.3.1	快回路控制律构成及仿真	206
12.3.2	较慢回路控制律构成及仿真	209
12.4	两类超机动动作的仿真	215
12.4.1	“眼镜蛇”机动仿真	215
12.4.2	“矢量滚筒”机动仿真	217
12.5	控制分配技术与非线性动态逆的联系(快回路)	219
第13章	推力矢量与气动操纵面的协调控制	222
13.1	传统控制分配理论在矢量飞机上的应用	222
13.1.1	广义逆类控制分配方法运用	223
13.1.2	数学规划类控制分配方法运用	226
13.1.3	几何类控制分配方法运用	227
13.2	气动操纵面与矢量操纵面的分配与管理方案	229
13.2.1	基于飞行任务的矢量飞机分配管理方案	229
13.2.2	基于关键飞行状态(迎角)切换的矢量飞机分配管理方案	233
13.2.3	基于基排序方法的矢量飞机分配管理方案	235
第14章	无尾飞翼布局飞机的控制分配系统设计	239
14.1	研究对象简介	239
14.2	无尾飞翼飞机气动特性分析	240
14.2.1	纵向基本特性	240
14.2.2	横侧向基本特性	241
14.2.3	舵面操纵效率分析	242
14.3	无尾飞翼多操纵面飞机 AMS 求解	248
14.4	无尾飞翼飞机多操纵面控制分配系统设计	249
14.4.1	飞行控制律设计	249
14.4.2	基于伪逆法的分配律设计	250
14.4.3	基于加权伪逆法的分配律设计	252
14.4.4	基于不动点迭代法的分配律设计	256
14.4.5	基于 SQP-CT 的分配律设计	258
14.4.6	算法的分配效率对比	260
14.5	多操纵面控制分配系统品质评价	260

14.5.1 传统评价指标计算..... 261

14.5.2 基于最大稳定角速率的品质评价方法..... 262

14.5.3 仿真分析..... 263

附录 I 无尾飞翼多操纵面无人机(方案 A) 267

附录 II 无尾飞翼多操纵面无人机(方案 B) 268

附录 III 无尾飞翼多操纵面无人机线性模型(方案 B) 269

参考文献 271

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Research background and significance	1
1.1.1	Research background	1
1.1.2	Purpose and significance	4
1.2	Review of control allocation techniques for aircraft with multiple control surfaces	6
1.2.1	The development of control allocation technique	6
1.2.2	Types of control surface	9
1.2.3	Research status of linear over actuated system	12
1.2.4	New development and application of control allocation technology	20
Chapter 2	The mathematical model of aircraft with multiple control surfaces	25
2.1	Motion equation of aircraft with multiple control surfaces	25
2.2	Thrust vector engine	27
2.2.1	Definition of thrust vector deflection angle	28
2.2.2	Force and torque calculation of thrust vector engine	28
2.3	Description of the control allocation problem	30
2.4	Admire model	32
2.4.1	Introduction of Admire model	32
2.4.2	Trim and linearization of Admire model	35
2.5	Structural analysis of control allocation system	37
2.6	Modeling of over actuated system	38
2.6.1	Obtain control effectiveness matrix by aero dynamic data	39
2.6.2	Obtain control effectiveness matrix by using linear aircraft equation	40
Chapter 3	Attainable moment subset	42
3.1	Solution of two dimensional attainable moment subset	42
3.2	Solution of three dimensional attainable moment subset	44

3.3	Solution of attainable moment subset of singular allocation system	48
3.3.1	Structural analysis of type II singular allocation system	49
3.3.2	Boundary solution of type II singular allocation system	50
3.3.3	Boundary solution of type I singular allocation system	52
Chapter 4	Research on allocation methods of generalized inverse category	55
4.1	Pseudo inverse method and weighted pseudo inverse method	55
4.1.1	Pseudo inverse method	55
4.1.2	Weighted pseudo inverse method	56
4.2	The limitation of the method of generalized inverse category	58
4.2.1	Solution of attainable moment subset of pseudo inverse method and weighted pseudo inverse method	59
4.2.2	Examples	60
4.3	Redistributed pseudo inverse method and daisy chain allocation method	63
4.3.1	Redistributed pseudo inverse method	63
4.3.2	Daisy chain allocation method	64
4.4	Solution of non convex attainable moment subset	65
4.4.1	Principle of solving method	65
4.4.2	Examples	66
4.5	Design of control allocation system based on generalized inverse methods	69
4.5.1	Design of control allocation system	69
4.5.2	Simulation analysis	70
Chapter 5	Generalized inverse matrix optimization design based on genetic algorithm	76
5.1	Introduction of genetic algorithm	76
5.1.1	Introduction of heuristic optimization algorithm	76
5.1.2	Basic concepts and operation of genetic algorithm	79
5.2	Optimization design of pseudo inverse matrix based on niche genetic algorithm	80
5.2.1	Describes of the problem	81
5.2.2	Pseudo inverse matrix optimization design	82
5.2.3	Simulation example	84

5.3	Optimization design of weighted pseudo inverse method	86
5.3.1	Weighted pseudo inverse matrix optimization design based on niche genetic algorithm	86
5.3.2	Simulation example	86
5.3.3	Application of optimization results	88
5.4	Generalized inverse matrix tailoring design based on genetic algorithm	90
5.4.1	Tailoring design focusing on certain direction	91
5.4.2	Tailoring design focusing on certain region	92
5.4.3	Simulation example	94
Chapter 6	Geometric allocation methods	97
6.1	Direct allocation method	97
6.1.1	Constrained allocation problem	98
6.1.2	Solution of control variables	100
6.1.3	Simulation analysis	101
6.2	Surface search algorithm	104
6.2.1	Solving of AMS	104
6.2.2	Surface searching	104
6.2.3	Simulation analysis	105
6.3	Allocation algorithm based on moment rotation search	106
6.3.1	The basic principle of the algorithm	106
6.3.2	Simulation analysis	109
Chapter 7	Research on allocation methods based on mathematical programming	112
7.1	Allocation method based on linear programming	112
7.1.1	Linear programming method and algorithm description	112
7.1.2	Simulation analysis	115
7.2	Allocation method based on sequential linear programming	117
7.2.1	Sequential linear programming method and algorithm description	117
7.2.2	Simulation analysis	121
7.2.3	Comparison of above two programming algorithms	122
7.3	Quadratic programming allocation method based on MDDIFXP	124
7.3.1	Fixed point iteration quadratic programming method	124
7.3.2	The basic principle of the MODIFXP allocation algorithm	125
7.3.3	Simulation analysis	127