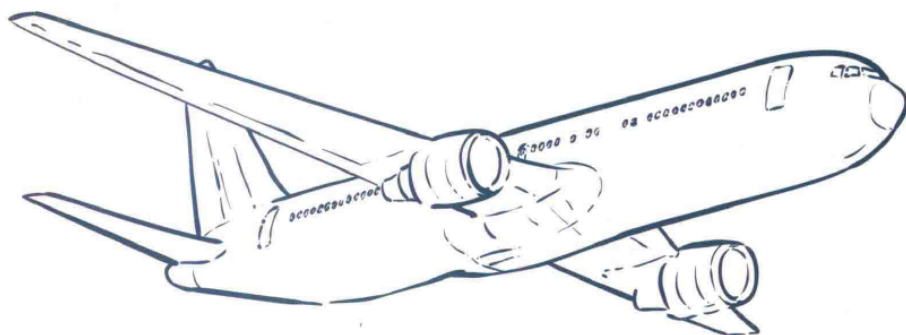


北京理工大学“985 工程”国际交流与合作专项资金资助图书

Aircraft Control Allocation



飞机控制分配

[美]韦恩·达拉谟(Wayne Durham)
[美]肯尼思·博尔迪尼恩(Kenneth A. Bordignon) 著
[美]罗杰·贝克(Roger Beck)

张卫忠(Weizhong Zhang) 译

WILEY

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

Aircraft Control Allocation

飞机控制分配

[美]韦恩·达拉谟(Wayne Durham)
[美]肯尼思·博尔迪尼恩(Kenneth A. Bordignon) 著
[美]罗杰·贝克(Roger Beck)

张卫忠(Weizhong Zhang) 译

WILEY

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机控制分配 / (美) 韦恩·达拉谟 (Wayne Durham), (美) 肯尼思·博尔迪尼恩 (Kenneth A. Bordignon), (美) 罗杰·贝克 (Roger Beck) 著; 张卫忠译. —北京: 北京理工大学出版社, 2018. 8

书名原文: Aircraft Control Allocation

ISBN 978-7-5682-6000-8

I. ①飞… II. ①韦… ②肯… ③罗… ④张… III. ①飞行控制
IV. ①V249.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 172951 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2017-5090 号

Copyright © 2017 John Wiley & Sons, Ltd.

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Beijing Institute of Technology Press Co., LTD and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 19.75

字 数 / 338 千字

版 次 / 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 98.00 元

责任编辑 / 李玉昌

文案编辑 / 李玉昌

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

题 献

献给克雷格·斯泰德尔、鲍勃·汉利和约翰·福斯特。
谢谢各位。

For Craig Steidle, Bob Hanley, and John Foster. Thanks guys.

译者序

首先感谢北京理工大学国际教育交流与合作教材专著建设计划的支持，使得本人有幸为韦恩·达拉漠等学者于2017年出版的《飞机控制分配》进行翻译工作。翻译过程得到了北京理工大学宇航学院飞行器控制系徐军老师的专业指点以及北京理工大学出版社学术出版中心张海丽编辑和国珊编辑的帮助与支持，在此一并表示感谢。

本书主要反映了原著者针对飞机控制分配问题的最新理论和工程实践经验的总结，特别是原著者利用几何关系进行飞机控制分配问题的分析和求解，显示了解决问题的新思路和新方法，对于国内从事飞机设计、飞机动力学控制相关方向的工程师和研究者具有借鉴意义。

译者在翻译过程中，对于专业词汇的把握和翻译，主要参考词典为商务印书馆2014年出版的由梁炳文主编的《英汉航空航天工程词典》，同时借鉴了《网易有道词典》《21世纪大英汉词典》等词典。翻译指导原则力求“信、达、雅”，既保持原英文的行文逻辑，同时必要时以汉语习惯的表达形式进行呈现。

最后，感谢北京理工大学出版社的编辑与审读，在审读意见下，本书的行文式样进行了仔细核对和修改，主要改变为在尽量保证原著意义的前提下，对词句的组织编排根据中文逻辑和习惯进行了合理修改，在直译和意译之间进行了适当的妥协，使得行文流畅，更符合中文习惯。

由于译者才疏学浅，错误纰漏之处，请读者不吝指正。

作者
2018年

术 语

$\dot{(\)}$ 点在数值上: 括号中内容是关于时间的导数。

$\hat{(\)}$ “帽子”在数值上: 括号中内容是近似的。

α 迎角: 投影到飞机对称面的相对风速和合适定义的机体固定 x 轴之间的气动角。

β 侧滑角: 速度向量和飞机对称面之间的气动夹角。

l_1, l_2, l_∞ 向量范数: l_2 是向量元素平方和的平方根。它出现在每一个地方。 l_1 是这些元素绝对值的和并且 l_∞ 是最大绝对值。 l_1 和 l_∞ 经常出现在线性规划问题中。

Ω 以下两者之一:

(1) 每一种控制执行机构允许偏转的组合; 换句话说, 在移动或者偏转限值内的组合。

(2) 用来在动态逆控制律中指定动力学的通常对角矩阵。

Φ 常常指控制执行机构偏转在 Ω 中的每一种组合的机体轴力矩、力矩系数或者角加速度等效果。有时称为 AMS, 表示可达力矩集或者子集。

ϕ 滚转角: 定义从惯性系到机体参考系的 3-2-1 ($z-y-x$) 旋转三个角度之一。

Π 以下两者之一:

(1) (主要) 包含特定控制分配方法生成的所有力矩的可达力矩子集。

(2) 用于三力矩问题的 Banks 分配方法中出现的平面。

ψ 航向角: 定义从惯性系到机体参考系的 3-2-1 ($z-y-x$) 旋转的三个角度之一。

Θ Ω 的子集: 来自特定控制分配方法的作为控制分配问题解的所有允许控制。

θ 俯仰姿态: 定义从惯性系到机体系的 3-2-1 ($z-y-x$) 旋转的三个角度之一。

B 线性化运动学方程矩阵之一: A 是系统矩阵, B 是控制有效性矩阵, C 是输出矩阵。

C_{x_y} : 无量纲稳定性或者 x 相对于 y 的操纵导数: 它是 X_y 的无量纲形式。

Comp; Complementary: 表示补充的, 某些动力学响应的上标。

Cont; Controllable: 表示可控的, 某些动力学响应的上标。

d, des : Desired: 表示期望的, 某些动力学响应或者其他量的上标。

F_B 机体坐标系。原点在飞机的质心。轴 x_B 和 z_B 在飞机的对称平面内, y_B 按照右手法则确定。一旦定义, 机体固定参考系统相对机体的方向不变化。两种经常使用的机体固定坐标系是主轴和稳定轴系统。

F_H : 本地水平参考系。 x_H 、 y_H 和 z_H 分别指向北、东和下。假设地球是平的。

F_W : 风轴系统。 x_W 轴在飞行方向, 与相对风方向相反。 z_W 在对称面内, 指向下。

g 以下两者之一:

(1) 重力加速度。

(2) 载荷因子 n 的无量纲单位参照。

I 有下标; 惯性力矩。

Kine Kinematic: 运动学的, 某些动力学响应的上标。

L, C, D 升力、侧力和阻力: 分别在 x_W 、 y_W 和 z_W 方向上的风轴力。

L, M, N 分别关于 x_B 轴(滚转)、 y_B 轴(俯仰)和 z_B 轴(偏航)的机体轴力矩。

L 以下两者之一:

(1) 升力。

(2) 滚转力矩, 根据上下文确定。

LD 横侧向, 表示不是纵向的所有运动, 加速度、力等。有时表示为 lat-dir。

Long 表示在飞机的对称面内发生的所有纵向运动、加速度和力等。俯仰力矩、速度和加速度是关于飞机的 y_B 轴, 但运动是在 x_B-z_B 平面内的。

m 飞机质量。

n 载荷因子, 升力对重力的比例, $n=L/W$ 。以 gs 测量。

p, q, r 分别指机体轴滚转速度、俯仰速度和偏航速度。

P 矩阵 B 的一般逆: $BPB=B$ 和 $PBP=P$, 有适当维度。

Ref 下标, “在参考条件下估计”。

u 控制执行机构变量向量。

$u_{\min}, u_{\max}$ 执行机构限值向量, 最小或最大。

u_l, u_u 控制执行机构限值向量, 下界或上界。在线性规划中比 $u_{\min}$, $u_{\max}$ 更常用。

x_B, y_B, z_B 机体轴名。

W 加权矩阵, 一般是三角的和正的。

x_w, y_w, z_w 风轴名。

X_y 这里 X 是力或者力矩而 y 是状态或者控制, 假如是 C_{x_y} 维度形式, 表示一个维度导数, $\partial X/\partial y$ 。这个定义没有包括被质量或者惯性力矩所除。假如 y 是一个控制执行机构, 这个结果被称为操纵导数, 否则它被称为稳定性导数。

X, Y, Z 机体轴力分别在 x, y 和 z 方向。

x, y, z 轴名。没有下标时通常表示机体轴。

ACTIVE Advanced Control Technology for Integrated Vehicles. 用于一体化飞机的先进控制技术。F-15 研究使用差分鸭翼, 轴对称推力矢量, 以及其他创新性特征。

ADMIRE Aero-Data Model In a Research Environment. 在研究环境下的气动数据模型, 仿真代码。见附录 B。

Admissible 在一个控制执行机构或者一组控制执行机构中, 那些在使用时处于物理限值内的偏转。

AMS Attainable moment subset or set, 可达力矩子集或者集, Φ 。

Angular accelerations 角加速度, 见 Objectives。

ARI Aileron-rudder interconnect, 副翼—方向舵互联。通常用作减小由于副翼偏转导致的不利偏航。

Attainable 与力矩或者加速度有关; 由那些能被控制执行机构的一些允许组合生成。这个词意味着对于特定控制分配方法有一些理论组合, 能在全局或者本地被使用, 意味着这种方法能生成控制执行机构的那些组合。

Basic feasible solution 基本可行解, 满足线性规划等式约束的基础解, 同时也满足了不等式约束。

Basic solution 基本解, 满足“标准形式”线性规划问题的 l 个线性等式约束, 有 $k-l$ 个确定变量在它们的界上。

CAS Control augmentation system 控制增强系统。

Control effectiveness 使用控制执行机构, 或者是力矩, 力矩系数或者角加速度效果的测度。

Control authority 任意组合下所有控制执行机构有效性的集合。

Control power 单位控制偏转的角加速度。

CHR Cooper-Harper rating; Cooper-Harper 评定; 有时表示为 HQR。

Constraint 控制执行机构的限制位置, 通常受制于硬件。它也可能表示移动速度限制。在线性规划中, 约束可能表示位置限制, 或表示必须满足的等式。因此, $u \leq u_{\max}$ 是一个不等式约束, 但是 $Bu = m_{\text{des}}$ 是一个等式约束。

Control effector 通过改变力或者力矩直接影响控制的装置,如副翼或者方向舵。当我们说“这些控制”没有特指,通常表示控制执行机构。对于通常的拍动控制执行机构,符号的约定依据右手法则,大拇指沿着执行机构生成力矩的轴,弯曲的手指表示机翼后缘的正偏转。

Control inceptor 驾驶舱内装置,通过直接连接或通过飞行控制系统或计算机连接,控制执行机构。正的控制接收器偏转对应于连接它们的执行机构的正偏转,除了如副翼—方向舵连接(见ARI)。

Cycling 线性规划的条件,此时解法器访问序列顶点时目标函数没有减小,最终回到循环中的起点。循环表示收敛失败并且必须考虑通过选择一种交换规则来防止它。

Degenerate basic solution 退化基础解,线性规划的一个基础解,在非基础变量之外,在基础中 l 个决定变量之一是在它的界上。

Decision variables 决定变量,线性规划中正被优化的未知参数集。

FBW Fly by wire. 飞行员通过计算机控制飞机。

FQ Flying qualities 飞行品质。

Ganged 机械装置连接在一起,所以它们以固定关系移动,如副翼。

HARV High angle-of-attack research vehicle. 大迎角研究飞机。

HQ Handling qualities. 处理质量。

HQR Handling qualities rating. 处理质量评价。

Interior point method 在可行集内部移动来寻找线性规划最优解的一种数值方法。

Intersection 与两个对象有关(参照),此对象全部包含于两个中的一个。

Lat-Dir Lateral-directional 横侧向的。

LEU, LED Leading-edge up, down. 前缘向上,向下。词语用来描述前缘控制面的偏转。

Linear programming 受限于线性和非线性约束的目标函数优化的一个问题,或者求解这个问题的方法。在此书中,指受到位置约束条件时分配控制的一种方法。

Moments 见 Objectives。

Moment coefficient 见 Objectives。

Object 描述允许控制和可达力矩集的几种多面体中的任一种一般形式。

Objectives 控制执行机构倾向于引起的结果。初始时控制分配寻找生成期望力矩或者力矩系数的控制执行机构。接下来研究人员优先使用角加速度作为目标。我们一般称这些目标为力矩。

Object notation 标记对象(参照)的一种方法,在它下限值控制时使用 0,上限值时用 1,2 用于任何中间。

OBM On-board model. 存储在飞机飞行控制计算机内的飞机气动数据。

Over-actuated control system 见 Redundant controls。

Phase one/two program 线性规划解法器阶段一中求解修改后的问题找一个初始可行解,用于在阶段二中优化求解这个初始问题。

PIO Pilot-induced oscillation. 飞行员引起的振动,有一个道义上更正确的词,移除飞行员责任。

PR Pilot rating 飞行员评估;有时参见 HQR。

Preferred 关于控制分配问题的解,控制执行机构配置尽可能接近优先解。最小范数解经常被用作优先解。

Pseudo control 控制执行机构的一些组合倾向产生某些效果,例如激发飞机的特定动态响应。

Redundant controls 从设计者没有考虑用它们的角度看,控制执行机构很少有冗余。在更高速度飞行时冗余的控制执行机构在低速时可能是关键的。这个词仅表示有比目标更多的控制执行机构。在本书中使用时,意味着有多于三个控制执行机构来生成三个力矩或者角加速度。

SAS Stability augmentation system. 增稳系统。

Simplex 扩展三角形(二维),或者四面体(三维)到任意维度。一个 n 维单纯形被 $n+1$ 个顶点的凸包所定义。

Simplex method 以下两者之一:

(1) (Dantzig) 基于 1947 年 Dantzig 原创用于求解线性规划的数值算法。单纯形方法在可行集的相邻顶点,基础解之间移动,减小代价直到最优解被找到。

(2) (Nelder Mead) 也被认为是向下单形。数值求解迭代一个 n 维单纯形来最小化 n 维非线性无约束优化问题。启发型法则在每一步规定如何修改这个单纯形。

Slack variable 线性规划中增加的变量,以便不等式约束能被转换为等式约束。

TEU, TED, TEL, TER Trailing-edge up, down, left, right. 机翼后缘向上、向下、向左、向右。用来描述拍动控制面的偏转。

Union 最小的对象在其中两个给定的对象都是其成员。

Warm start 通过给定类似问题预先存在的最优解初始化线性规划解法器的启发型方法。

目 录

CONTENTS

第1章 引言	001
1.1 冗余控制执行机构	001
1.2 概述	003
参考文献	005
第2章 飞机控制	006
2.1 飞行动力学	006
2.1.1 运动方程	006
2.1.2 线性化的运动方程	010
2.2 控制	012
2.2.1 概述	012
2.2.2 飞机控制执行机构	014
2.2.3 飞机控制信号发生器	017
2.3 后记	018
参考文献	019
第3章 控制律	021
3.1 飞行品质	021
3.1.1 必要条件	022
3.1.2 满足飞行品质要求的控制律设计	022
3.2 动态逆控制律	022
3.2.1 基础	022
3.2.2 方程类型	024

3.2.3 被控方程	024
3.2.4 运动学及其补充方程	026
3.3 模型跟踪控制律	028
3.4 “传统”控制律	028
3.5 后记	029
参考文献	030
第4章 问题	031
4.1 控制有效性	031
4.2 约束	032
4.3 控制分配	032
4.3.1 控制分配问题	033
4.4 后记	033
参考文献	034
第5章 控制分配几何结构	035
5.1 允许控制	035
5.1.1 概述	035
5.1.2 对象	036
5.1.3 交叉和合并	038
5.1.4 凸包	039
5.2 可达力矩	039
5.3 二力矩问题	044
5.3.1 面积计算	048
5.4 三力矩问题	049
5.4.1 确定 Φ_3	049
5.4.2 体积计算	056
5.5 最大值集合的意义	058
5.5.1 作为不同方法比较的一个标准	059
5.5.2 机动要求	060
5.5.3 控制故障重新配置	062
5.6 后记	063
参考文献	063
第6章 解	064
6.1 在线解对比离线解	064
6.1.1 在线解	064

6.1.2 离线解	064
6.2 最优和非最优解	065
6.2.1 最大能力	065
6.2.2 最大体积	065
6.2.3 离优先最近	065
6.2.4 不可达力矩	066
6.3 优先解	067
6.4 联动	067
6.5 广义逆	068
6.5.1 一般情况和 P_2 的意义	068
6.5.2 定制的广义逆	072
6.5.3 “最好” 广义逆	073
6.5.4 伪逆	073
6.5.5 包含广义逆的方法	075
6.6 直接分配	078
6.6.1 二力矩问题的直接方法	079
6.6.2 针对三力矩问题的直接方法	080
6.7 边和面搜索	082
6.7.1 二维边搜索	082
6.7.2 三维面搜索	086
6.8 Banks 方法	088
6.8.1 找到初始三顶点	090
6.8.2 确定一个新顶点	091
6.8.3 代替一个旧的顶点	091
6.8.4 终止算法	093
6.9 线性规划	093
6.9.1 配置控制分配为线性规划问题	093
6.9.2 单纯形	097
6.10 通过多种求解方法的可达力矩	097
6.10.1 一般情况 (三力矩问题)	098
6.10.2 广义逆 (二力矩和三力矩问题)	099
6.11 实例	108
6.11.1 广义逆	108
6.11.2 直接分配	115

6.11.3 边和面搜索	118
6.11.4 Banks 方法	124
6.11.5 线性规划	128
6.11.6 凸包体积计算	130
6.12 后记	133
参考文献	133
第 7 章 帧方式控制分配	135
7.1 概述	135
7.2 路径依赖	137
7.2.1 路径依赖实例	138
7.3 全局相对于本地控制有效性	143
7.4 复原	145
7.4.1 增广 B 矩阵	145
7.4.2 实现	148
7.4.3 振荡	148
7.4.4 最小范数复原	150
第 8 章 控制分配和飞行控制系统设计	156
8.1 动态逆期望加速度	156
8.1.1 期望加速度	156
8.1.2 指令和调节器实例	158
8.2 最大值集合和控制律设计	162
8.2.1 在设计过程中	162
8.2.2 在一个成熟设计中	166
8.2.3 非最优例子	168
参考文献	171
第 9 章 应用	172
9.1 从设计 X-35 飞行控制系统获得的经验	172
9.1.1 理论对比于实践	172
9.2 冗余的使用	173
9.2.1 优先解	173
9.2.2 再次解决路径依赖问题	174
9.3 设计约束	174
9.3.1 轴优先次序	174
9.3.2 结构载荷	176

9.3.3 执行机构带宽	177
9.3.4 增益限制和稳定裕度	177
9.4 容错	178
参考文献	179
附录 A 线性规划	180
A.1 控制分配作为线性规划	181
A.1.1 对于可达指令的优化	182
A.1.2 对于不可达指令的优化	182
A.2 线性规划问题的标准形式	187
A.2.1 处理负的未知量	188
A.2.2 处理不等式约束	189
A.2.3 编写一个程序用于标准形式的控制分配	190
A.2.4 有上界时修正的标准形式	193
A.3 线性规划解的特征	195
A.3.1 基础解	196
A.3.2 退化的基础解	197
A.3.3 基础可行解	197
A.4 分配可行指令	198
A.4.1 最小化一个优先解的误差	199
A.4.2 最小化最大误差	202
A.4.3 最优化线性次要目标	206
A.5 构造控制分配器用于可行和不可行解	207
A.5.1 双分支	207
A.5.2 单分支或者混合优化	209
A.5.3 没有次要优化时减小了规划规模	211
A.6 解法器	213
A.6.1 预先处理	213
A.6.2 求解算法	214
A.6.3 单纯形方法	215
A.6.4 单纯形算法初始化	225
A.7 后记	227
参考文献	228
附录 B 飞行仿真	230
B.1 引言	230

B. 2 修改	230
B. 2. 1 三个顶层模块几乎完全没有修改	230
B. 2. 2 小的改动包括新的 Pilot 和 Sensors 模块	231
B. 3 NDI_CLAW	231
B. 3. 1 NDI_CLAW/Rate Transition	231
B. 3. 2 NDI_CLAW/PILOT_Mod	231
B. 3. 3 NDI_CLAW/INPUT	232
B. 3. 4 NDI_CLAW/Mission Manager	232
B. 3. 5 NDI_CLAW/Dynamic Inversion Control	233
参考文献	239
附录 C 有注释的文献列表	240
参考文献	240
索引	288

第 1 章

引 言

本书是作者在飞机控制分配领域开创性工作中取得的科研成果与深刻认识的总结和概括。在此控制分配领域，还有很多研究工作需要进一步开展，通过了解其他研究人员前期成果丰硕的研究方向，能开辟新的研究探索领域。

作者认为他们的几何方法把求解问题过程可视化，只要解是存在的或者能被考虑存在的，这种机制就提供了更深刻的认识，特别是当辨识某个故障后考虑重新进行控制分配的时候更是如此。

强调一下，作者的主要兴趣和本书的关注点是飞机。因此，我们对于控制分配问题坚持只考虑相对来说比较少的目标，主要就是飞机的三个旋转自由度，其次是线性自由度。我们意识到在很多其他学科领域存在类似的问题，也相信我们的研究成果经过修改能为其他研究人员针对他们特定的问题提供良好的借鉴。

本书没有提供严密的数学证明。本书作者都不是数学家，这一点很容易被读这本书的真正数学家所证实。确切地说，我们在开展这项研究工作之前从没想过“零空间”和“飞机”能有机会在同一句中出现。我们通常一开始是在黑板上勾画出一个二维图，该图形对我们“直观而明显”，然后考虑这个图形是否可以推广到更高维。

最重要的结果已经在其他资料中得到证明：例如有许多技术报告，硕士论文和我们研究中撰写的博士论文，教材（特别是有关线性代数的教材）。附录 C 提供了其中一些发表的文献资料摘要。这里只是声明我们很相信这些的正确性。例如，本书没有证明凸性在我们描述的映射下保持不变，只是断言如此，而也许应该给出关于这个定理令人信服的证据。

1.1 冗余控制执行机构

我们对于飞机控制分配的研究来源于对模型跟踪和动态逆控制算法的早期研究。模型跟踪和动态逆算法的本质是希望找到描述控制执行机构偏转向