

海军新军事变革丛书



总策划：魏刚 主编：马伟明

多航行体协同控制中的 分布式一致性

——理论与应用

[美] Wei Ren, Randal W. Beard 著

吴晓锋 译
李明 主审



DISTRIBUTED CONSENSUS
IN MULTI-VEHICLE
COOPERATIVE CONTROL:
THEORY AND APPLICATIONS



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

海军新军事变革丛书

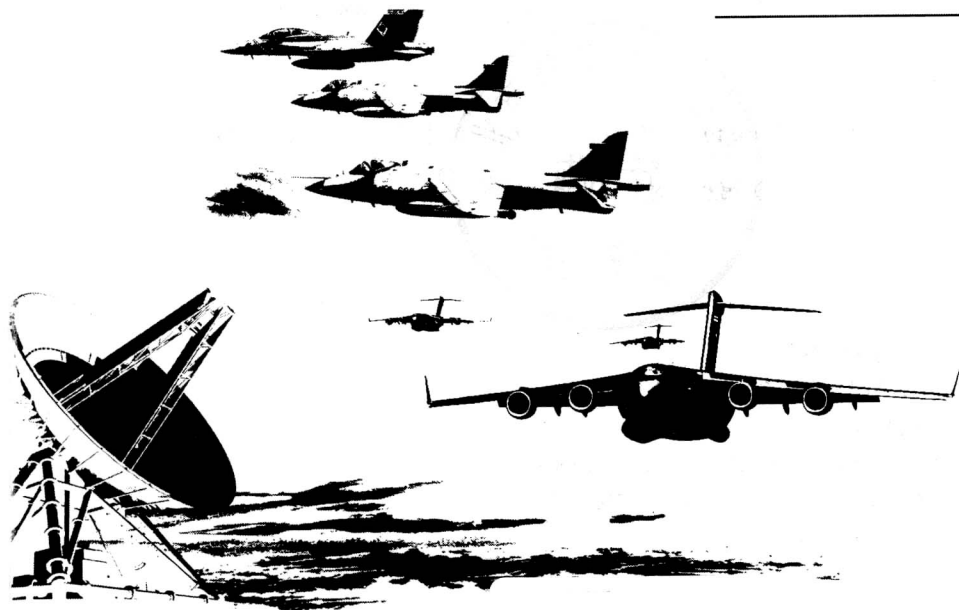
总策划：魏刚 主编：马伟明



多航行体协同控制中的 分布式一致性 ——理论与应用

[美] Wei Ren, Randal W. Beard 著

吴晓锋 译
李明 主审



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

©2007 Springer-Verlag London.

This translation of *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control : theory and applications* is published by arrangement with Springer-Verlag London Publishing Limited. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission in writing from the Proprietor. 本书简体中文版由 Springer-Verlag 伦敦出版公司授权出版。未经许可,不得以任何形式和手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号: 图字 01-2013-4699

图书在版编目 (CIP) 数据

多航行体协同控制中的分布式一致性: 理论与应用 / (美) 任伟 (Ren, W.), (美) 比尔德 (Beard, R.W.) 著; 吴晓锋译. —北京: 电子工业出版社, 2014.3

书名原文: Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control: theory and applications (海军新军事变革丛书)

ISBN 978-7-121-22435-5

I. ①多… II. ①任…②比…③吴… III. ①通信技术—应用—海上编队 IV. ①E925.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 020017 号

责任编辑: 张 毅

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 21 字数: 302 千字

印 次: 2014 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 75.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。
服务热线: (010) 88258888。

海军新军事变革丛书

- 丛书总策划 魏 刚
- 编委会主任 马伟明
- 编委会副主任 敖 然 高敬东 李 安 李敬辉
赵晓哲 曹跃云
- 常务副主任 贲可荣
- 编委会委员 (以姓氏笔画为序)
- | | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 王公宝 | 王永斌 | 王德石 | 卢晓平 |
| 朱 锡 | 邢焕革 | 邱志明 | 宋裕农 |
| 何 琳 | 吴晓锋 | 张永祥 | 张明敏 |
| 张晓晖 | 张晓锋 | 郁 军 | 侯向阳 |
| 高 俊 | 夏惠诚 | 鲁 明 | 察 豪 |
| 蔡志明 | 黎 放 | | |
- 选题指导 鞠新春 唐宗礼 胡 颀 裴晓黎
胡 波 邹时禧 顾 健 徐 勇
- 出版策划 卢 强 吴 源 张 毅

多航行体协同控制中的分布式一致性 ——理论与应用

主审 李 明

翻译 吴晓锋

审稿 王小非 马 中 裴晓黎

丛 汉 策 总 编

丛 汉 策 主 编

丛 汉 策 主 编

丛 汉 策 主 编

丛 汉 策 主 编

丛 汉 策 主 编

(有 限 公 司)

员 委 会 委 员

平 湖 中 心 王 志 强 王 志 强 王 志 强

亦 济 宋 志 强 王 志 强 王 志 强

延 州 宋 志 强 王 志 强 王 志 强

田 尚 宋 志 强 王 志 强 王 志 强

蔡 强 宋 志 强 王 志 强 王 志 强

蔡 强 宋 志 强 王 志 强 王 志 强

蔡 强 宋 志 强 王 志 强 王 志 强

蔡 强 宋 志 强 王 志 强 王 志 强

蔡 强 宋 志 强 王 志 强 王 志 强

《海军新军事变革丛书》第二批总序

当今世界，国际战略格局正在发生深刻变化。传统安全和非传统安全威胁因素相互交织，霸权主义、强权政治有新的表现，恐怖主义、极端主义、民族分裂主义此起彼伏，和平与发展的车轮在坎坷的道路上艰难前行。

发端于 20 世纪 70 年代的世界新军事变革，从酝酿、产生到发展，经历了近四十年由量变到质变的过程。海湾战争、科索沃战争、阿富汗战争，以及伊拉克战争这几场高技术条件下局部战争确定了世界新军事变革的发展轨迹和基本走向，展现了未来信息化战争的主体框架。这些新军事变革就是一场所由信息技术推动，以创新发展信息化的武器装备体系、军队编制体制和军事理论为主要内容的世界性军事变革。

世界军事变革大势促使军队改革步伐加快。世界范围的军事变革正在加速推进，这是人类军事史上具有划时代意义的深刻变革。美国凭借其超强的经济和科技实力，加快部队结构重组和理论创新，大力研发信息化武器装备，积极构建数字化战场与数字化部队。目前正大力深化军事转型建设，通过发展航空航天作战力量等四十多项措施，进一步提高军队信息化程度和一体化联盟作战能力。俄军也以压缩规模、优化结构、组建航天军、争夺制天权等为重点，全面推行军事改革，着力恢复其强国强军地位。英、法、德等欧洲国家和日、印等亚洲大国，则分别推出军队现代化纲领，努力发展最先进的军事科技，谋求建立独立自主的信息化防务力量。

世界新军事变革的发展趋势：在人才素质方面，加速由简单操作型向复合知识型转化；在军事技术方面，加速由军事工程革命向军事信息革命转化；在武器装备方面，加速由机械化装备向信息化装备过渡；在战争形态方面，

加速由机械化战争向信息化战争转变；在作战理论方面，正在酝酿着全方位突破；在军事组织体制方面，正朝着小型化、一体化、多能化的方向发展。此外，诸如战争本质、军事文化、军事法规等方面都在悄然发生变化。

胡锦涛主席指出：“我们要加强对世界新军事变革的研究，把握趋势、揭示规律，采取措施、积极应对，不断加强国防和军队现代化建设，为全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化提供可靠的安全保障。”今天的人民海军正承担着完成机械化和信息化建设的双重历史任务，时不我待，形势逼人，必须顺应潮流，乘势而上，积极推进中国特色军事变革，努力实现国防和军队现代化建设跨越式发展。

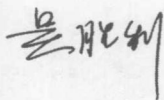
信息时代的人民海军，责无旁贷地肩负着国家利益拓展、保卫领土完整的历史重任，我们只有以大胆创新和求真务实的精神全面推进军事技术、武器装备、作战理论、体制编制、人才培养等方面的变革，才能赶上时代的步伐，逐步缩小与西方强国之间的差距，最终完成信息化军队建设的重大任务，打赢未来的信息化战争。

根据海军现代化建设的实际需求，2004年9月以来，海军装备部与海军工程大学以高度的政治责任感和思想敏锐性，组织部分学术造诣深、研究水平高的专家学者，翻译出版了“海军新军事变革丛书”。丛书着重介绍和阐释世界新军事变革的“新”和“变”。力求讲清世界新军事变革进入质变阶段后的新变化、新情况，讲清信息化战争与机械化战争、信息化军队建设与机械化军队建设在各个领域的区别和发展。其中2004年至今陆续出版的第一批系列丛书集中介绍了信息技术及其应用，出版以来深受广大读者好评。为更好地满足读者的需求，丛书编委会出版了第二批系列丛书。与第一批系列丛书相比，更加关注武器装备、军事思想、战争形态、军队建设编制等全局性问题，更加关注大型水面舰艇、新型潜艇、作战飞机、远射程导弹等新一代武器装备，是第一批系列丛书的发展深化。

丛书编委会和参加翻译的同志投入了很大精力，付出了辛勤劳动，取得了很好的成果。相信第二批系列丛书的出版为深入学习领会军委国防和军队建设思想、了解和研究世界新军事变革提供有益的辅助材料和参考读物，在加速推进中国特色军事变革的伟大实践中发挥应有的作用。

中央军委委员

海军司令员



2009年7月15日

译者序

本书是国际控制理论界第一部系统论述多智能体信息一致性的专著。

所谓的多智能体信息一致性,是指多智能体在网络环境下通过近邻之间可测信息(如智能体的位置、速度和姿态等)的交换,在各智能体上分布式地产生某种算法(或协议),使得这些智能体在事关相互协作的若干变量(数据、参数)问题上达成一致意见,从而自主、协同地完成共同的任务。

早期的多智能体信息一致性研究大都针对一些具体的协同控制问题,例如,生物种群(鸟群、鱼群等)的聚集运动、多传感器对目标信息的协同滤波和数据融合、卫星编队的姿态校准等。2003年前后,美国耶鲁大学的 A Stephen Morse、宾州大学的 Ali Jadbabaie、加州理工学院的 Richard M. Murray 和 Reza Olfati-Saber 等人把计算机分布式计算中的一致性(Consensus)概念引入了网络化的动态系统中,建立了多智能体信息一致性的统一理论框架,从而推动了这一领域的理论发展。目前,多智能体信息一致性已成为控制理论界十分活跃的一个研究方向。

本书的英文原著作者 Wei Ren (任伟) 和 Randal W. Beard 是较早从事多智能体信息一致性研究而且成果颇丰的两位学者。多年来,他们在开展无人飞行器、地面机器人和卫星编队协同控制等课题的研究工作中,取得了一系列关于多航行体(一类多智能体)信息一致性的研究成果。本书是他们在 2004—2007 年间所获成果的总结,内容涉及一些最基本的多航行体信息一致性理论问题,包括分布式(无领航者)航行体编队中,一致性算法分别由一阶连续线性系统、一阶离散线性系统、二阶连续线性系统和非线性刚体姿态动力系统确定的信息一致性,以及有单一领航者的航行体编队中,一致性算法分别由一阶连续线性系统、二阶连续线性系统和非线性刚体姿态动力

系统确定的信息一致性。该书还可移动多轮机器人编队、无人飞行器编队和刚体航天器编队为应用对象,较详细地阐述了如何运用信息一致性理论去解决这些航行体编队中的自主集结、自主形成和保持编队队形等问题,并给出了一些实验验证方法和结果。

从 2008 年本书英文原著出版以来,多智能体信息一致性理论又有了诸多进展。例如,所考虑的智能体一致性算法除了本书涉及的线性连续和离散系统,以及非线性(连续)刚体系统和非线性(离散)Vicsek 动力系统之外,一些文献还研究了有实际应用背景的其他非线性动力系统,如仿射动力系统(Affine Dynamics)、欧拉-拉格朗日动力系统(Euler-Lagrange Dynamics)和连续分数维动力系统等。各智能体的一致性算法可以是相同的,也可以是不同的或混杂的。多智能体中还可以存在有缺陷、甚至有敌意的节点。有少量文献研究了智能体的状态变量取值被约束在某一区间或取整数时的情况。

关于多智能体的通信拓扑结构,除了本书考虑的固定(不变)拓扑结构和确定性时变(切换)拓扑结构等情况之外,一些文献还研究了通信拓扑随机时变的情形。此外,本书所涉及的多智能体(航行体)编队结构属于分布式(无领航者)或单一领航者结构,一些文献已在此基础上进一步研究了多领航者情形下的信息一致性问题。

关于智能体一致性算法中的控制器设计,本书主要考虑每个智能体通过与其他近邻智能体(或领航者)的信息交互,以线性控制或一定的非线性控制(包括饱和控制和无源化方法等)达到信息一致性。近年来,一些文献根据网络化多智能体系统的特点,引入了牵引控制、预测控制和基于事件驱动的控制等网络控制方式来改善信息一致性能。

由于每个智能体在一致性过程中都需要通过接收近邻智能体的信息来驱动自身的执行器,因此,智能体之间的通信信道性能和信息传输质量直接影响多智能体实现信息一致性的程度。实际的通信信道可能存在时延、噪声、衰减和丢包等现象。本书在第 1 章和第 2 章中初步介绍了有通道时延或噪声的信息一致性问题,目前已有更多的文献研究了这些问题。特别是近两年来,

一些文献开始涉及有通信衰减和丢包的情形。有些文献还根据多智能体之间信息交换机制的实际情况,研究了多智能体之间的信息异步传输和有量化器或离散数据采样的信息传输问题。

此外,本书主要讨论渐近的信息一致性问题(即多智能体达到信息一致的时间为无穷大)。最近的一些文献已开始研究如何在有限时间内达到信息一致性,即所谓的有限时间信息一致性问题。

本书的作者近年来已进一步在有关欧拉—拉格朗日动力系统的信息一致性、多领航者情形下的分布式包含控制、有信道时延的信息一致性和有限时间信息一致性等领域做出了系统的贡献,这些成果部分可见于 Wei Ren 和 Yongcan Cao 的另一本专著《Distributed Coordination of Multi-agent Networks: Emergent Problems, Models, and Issues》(Springer, 2011)。值得说明的是,多智能体信息一致性理论的上述进展都可以在本书中找到理论和方法的基础。通过 Google Scholar 的查询,截至 2013 年 12 月 3 日,本书已被相关论文和著作引用 664 次。它无疑对其后信息一致性理论与应用的发展起到重要的促进作用。对于需要了解或掌握信息一致性问题的读者来说,本书是一本难得的参考书。

信息一致性理论的建立和发展使人们有可能对自然界和人类社会中的许多群体行为进行理性的探索 and 认识。例如,人们可以采用离散的 Vicsek 模型来描述生物种群(如鱼群、鸟群和蜂群等)中个体的运动过程及其交互关系,通过分析个体信息状态的一致性来揭示生物种群是如何自主地形成速度匹配、聚集且相互避免碰撞的群体集聚运动。

信息一致性理论也可以应用于人工网络系统,使网络中的个体自主地相互协调,从而产生群体智能行为。例如,在多传感器网络中,人们可以采用信息一致性原理在各传感器中建立某种一致滤波器(Consensus Filter),当每个传感器与其近邻传感器交换感知到的、有噪声的目标信息时,这些一致滤波器可以协同抑制噪声信号,最终获得高质量(低误差协方差)的一致目标信息,实现分布式信息融合。

信息一致性理论的另一个潜在应用对象是无人航行体编队，包括航天器、无人机、无人水面舰船、无人潜航器、无人战车和地面机器人等编队。信息一致性理论可以用于在无人航行体编队内建立某种自主协商和控制机制，使之具有自主处置问题的能力，如自主地形成编队队形、保持机动队形、规避障碍、识别目标、分配任务、协商行动要素（如攻击阵位和到达时间等）、集结到达任务区和协同火力打击等，从而实现自主协同完成任务的目标。

本人开始接触信息一致性理论的时间大概是 2007 年上半年。当时，我与学生正试图把混沌同步的研究工作拓展到复杂网络同步领域。这时我们诧异地发现，控制理论界的另一些人正在研究的“信息一致性”与“复杂网络同步”几乎属于同类型的问题。所谓的同步（Synchronization）与一致性（Consensus 或 Agreement）的概念实际上是相同的。按照我们的理解，研究复杂网络同步的人比较侧重于关注网络复杂性（如小世界、无尺度特性等）对同步的影响，而且更喜欢把网络中的结点（即智能体）考虑为混沌动力系统；而研究信息一致性的人则比较关注信息交换只在近邻结点之间进行的分布式网络结构对一致性的影响，其结点大多考虑为线性连续或离散系统（当时的情况）。从当时的理论框架和成果形式来看，信息一致性理论巧妙地把经典的线性系统理论和代数图论结合起来，理论结果似乎更“优美”一些（比如，可以得到充要条件）。

2008 年下半年，我得到了 Wei Ren 和 Randal W. Beard 撰写的原著的电子版，随即和博士生们一边阅读、一边讨论这本书。2009 年 8 月，电子工业出版社“海军新军事变革丛书”编委会给我发来了有关该丛书第二批重点推荐翻译的书目供选题。在那 70 本书目中，我发现了 Wei Ren 和 Randal W. Beard 的这本著作，随即申报立项，并于 2010 年 3 月得到电子工业出版社的批准。同时，电子工业出版社从 Springer 出版社购买了该书中文版的版权。

在国内，信息一致性理论与应用正引起越来越多专业人员的关注，一些学者甚至已在该领域做出了具有最前沿水平的工作。但是，国内至今还没有出版一本系统介绍信息一致性的专著，这也激发了我翻译这本书的兴趣。在

翻译过程中,我特别注意保持原书的内容、顺序和框架,只是根据中文习惯,对分段进行了少量调整。由于书中出现不少新的专业术语,有的查不到中文名称,有的中文名称还不统一,因此在翻译时尽可能选用国内较通行的名词,其余只好按我们的理解进行取舍了,希望不会产生含义上的误解(书中的专业术语后都注释了原英文名称)。对于原文中一些较难理解的段落或语句,我都以译注的形式给出了自己的理解,仅供读者参考。

本书的翻译工作得到了许多人的帮助和支持。首先,特别感谢本书作者之一的 Wei Ren (任伟) 教授给予的信任和帮助。他浏览了该中文译本的初稿,并提出了一些建议。在他的邀请下,我于 2013 年 3 月至 2013 年 9 月作为国家公派的访问学者赴其所在的加州大学河滨分校的实验室进行了访问,从而有机会与 Wei Ren 教授及其团队成员进行了更深入的接触和讨论。在此期间,我对该书的校对稿进行了再一次仔细的修改和润色。我十分感谢香港城市大学的陈关荣教授,是他在 2008 年把该书推荐给我,并在其后的研究过程中给予了诸多帮助。本书曾经在我的研究生讨论班中进行过仔细研讨,我的学生为此付出了努力,他们是杨亚桥、吴泽伟、林茜、桂志芳和陈云等几位博士,特别是杨亚桥博士帮助我编排了部分公式和插图,我十分感谢他们的贡献和付出。在本书的出版过程中,得到了电子工业出版社编辑和老师细心而专业的帮助,在此表示衷心感谢。

由于工作中其他事情的牵累,翻译工作时断时续,完成时间一再推后,借此机会表示歉意。此外,由于译者水平有限,特别是书中后六章的内容涉及比较专门的应用对象,其中的一些知识领域(如航天器)超出了译者的专业范围,因此,本译著难免存在错误或不妥之处,敬请读者批评指正。

吴晓锋

二〇一四年一月于广州石井北园

前 言

近年来,随着计算、通信、感知和推进设备的小型化,人们已经有理由相信数量众多的自治航行体(空中、地面、水上)可以通过协同工作来实现同一目标。多航行体的协同控制在民事、国土安全和军事等领域都有着广泛的应用前景。在民事领域的应用包括森林火灾监测、油田巡查、管线监控、野生动物跟踪等;在国土安全领域可应用于边境巡逻和核电厂周边环境监控等;在军事领域的应用则包括监视、侦察及战场损伤评估等。但是在上述所有应用中,航行体编队受到通信带宽和通信功率的限制,很难采取集中式指挥控制方式。

本书介绍信息一致性(information consensus)问题,其中一群航行体通过邻里之间的通信对关键信息达成一致意见,以协作方式一起工作。由于通信信道带宽有限,而且在通信过程中还存在信号衰减和数据掉包等现象,研究信息一致性问题具有很大挑战性。要理解多航行体之间如何协作,很重要的一点是要研究编队中多航行体之间的信息传递和分享机制。因此,协同控制的一个关键问题是设计合理的分布式算法,使得编队中各航行体在信息交换能力受限且不可靠、通信拓扑时变等条件下对共享信息达成一致意见。

我们关注分布式一致性算法及其应用问题,源自于对多航行体系统、特别是无人飞行器(UAV)协同控制的研究工作。由于无人飞行器不断地运动,其通信能力是动态变化的。此外,现有的军用无人飞行器,除了像“捕食者”这样的大型装备可以进行双向通信之外,大量的微型无人飞行器仅有接收指令的能力。这激发我们研究有噪声、带宽受限、结构时变并且可能单向传输的通信网络条件下的分布式协作问题。

当然, 实现一致性或达成一致意见还不是我们研究问题的全部。编队中的每个航行体都必须利用最有效的信息实现编队目标。通信(或一致性)和控制之间的相互影响是一个挑战性很强的问题, 我们才初窥门径。在目前关于协同控制的诸多研究中, 要么是不考虑应用背景的一致性研究; 要么是在全连通并且可靠的通信能力假设下的协同控制研究。

撰写本专著的目的是为了总结我们在协同控制领域关于分布式一致性算法的工作。本专著的内容分为两部分: 本书的前半部分(第1章~第7章), 介绍了分布式一致性算法的理论成果, 其中, 航行体的信息状态演化规律由单积分动力系统、双积分动力系统和刚体姿态动力系统确定, 这些一致性算法仅需要邻里节点间的信息交互, 因此, 编队的功率消耗小, 隐蔽性强, 可扩充性和鲁棒性也得到了改善; 本书的后半部分(第8章~第14章), 介绍了把信息一致性理论应用于各种实际协同控制问题的情况, 包括轮式移动机器人编队和航天器编队的队形保持、无人飞行器编队协同跟踪火灾区火线及无人飞行器编队协同定时等问题。我们提供了一个网站 <http://www.engineering.usu.edu/ece/faculty/wren/book/consensus>, 从中可以找到与本书相关的仿真实例、试验视频和其他有用资料(译注: 目前可通过转接或直接链接新网站 <http://www.ee.ucr.edu/~ren/coven/index.htm> 查询)。

如果没有我们同事和学生的帮助和支持, 本书中的成果, 尤其是第8章~第14章的成果是不可能取得的。感谢杨百翰(Brigham Young)大学的 Tim McLain 教授在无人飞行器协同控制领域对我们的指导, 特别感谢他与我们在协同控制一致性理论和其他应用问题所进行的无数次探讨。十分感谢密歇根(Michigan)大学的 Ella Atkins 教授、犹他(Utah)州立大学的 YangQuan Chen 教授和 MacMcKee 教授与我们在研究思路上进行诸多富有成效的讨论。同时还要感谢犹他州立大学的 Nathan Sorensen、Yongcan Cao、Haiyang Chao、William Bourgeois 和 Larry Ballard, 以及杨百翰大学的 Derek Kingston、Jonathan Lawton、Brett Young、David Casbeer、Ryan Holt、Derek Nelson、Blake Barber、Stephen Griffiths、David Johansen 和 Andrew Eldridge 的工作。感谢

本书编辑 Oliver Jackson 对我们工作的关注和在出版方面的帮助。此外，感谢 IEEE、John Wiley & Sons、Elsevier、AIAA 和 Taylor & Francis 等出版机构允许在本书中使用我们在它们刊物上发表的论文，每章的最后一节均详细地列出该章所用到的参考文献。最后，由衷地感谢犹他 Water 研究实验室和 Community/University Research Initiative 计划，以及美国国家科学基金信息技术研究（National Science Foundation under Information Technology Research）项目 CCR-0313056，美国航空航天局（NASA）小企业技术转换计划（STTR）合同项目 NNA04AA 19C，美国空军科学研究处（Air Force Office of Scientific Research under Award）资助项目 F49550-04-0209、F49620-01-1-0091 和 F49620-02-C-0094，以及美国国防部研究计划局（Defense Agency Research Projects Agency）项目 NBCH1020013 对我们研究一致性算法和协同控制问题的资助。

犹他州洛根（Logan）市，犹他州立大学 Wei Ren

犹他州普若佛（Provo）市，杨百翰大学 Randal W. Beard

目 录

第 1 章	协同控制中一致性算法概述	1
1.1	引言	1
1.2	文献综述：一致性算法	5
1.2.1	基本一致性算法	5
1.2.2	一致性算法的收敛性分析	8
1.2.3	一致性算法的设计与扩展	15
1.2.4	基于一致性算法的协作策略设计	18
1.3	本书概况	21
1.4	注释	23
	致谢	23
第 2 章	关于单积分动力系统的一致性算法	24
2.1	基本算法	24
2.2	时不变通信拓扑下的一致性	27
2.2.1	采用连续时间算法的一致性	27
2.2.2	采用离散时间算法的一致性	40
2.3	时变通信拓扑下的一致性	43
2.3.1	采用连续时间算法的一致性	47
2.3.2	采用离散时间算法的一致性	51
2.3.3	仿真结果	53
2.4	注释	55
	致谢	56
第 3 章	关于基准状态的一致性跟踪	57
3.1	问题描述	57