



北京建筑大学学术著作出版基金资助出版

IGPS 基站网络时钟同步 及复杂网络同步

RESEARCH ON CLOCK SYNCHRONIZATION OF IGPS BASE STATION NETWORK
AND SYNCHRONIZATION PROBLEMS OF COMPLEX NETWORK

于淼 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

IGPS 基站网络时钟同步 及复杂网络同步

RESEARCH ON CLOCK SYNCHRONIZATION OF IGPS BASE STATION NETWORK
AND SYNCHRONIZATION PROBLEMS OF COMPLEX NETWORK

于淼 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

IGPS 基站网络时钟同步及复杂网络同步/于森著.

—北京: 知识产权出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-5130-5457-7

I. ① I… II. ①于… III. ①全球定位系统—时间同步 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 042479 号

责任编辑: 张 冰

责任校对: 潘凤越

封面设计: 张 悦

责任出版: 孙婷婷

IGPS 基站网络时钟同步及复杂网络同步

于森 著

出版发行: 知识产权出版社 有限责任公司

社 址: 北京市海淀区气象路 50 号院

责编电话: 010-82000860 转 8024

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

印 刷: 北京九州迅驰传媒文化有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

版 次: 2018 年 3 月第 1 版

字 数: 120 千字

ISBN 978-7-5130-5457-7

网 址: <http://www.ipph.cn>

邮政编码: 100081

责编邮箱: zhangbing@cnipr.com

发行传真: 010-82000893/82005070/82000270

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

印 张: 6.5

印 次: 2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 元



出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

前 言

近年来，越来越多的学者对时钟同步问题的研究产生了浓厚兴趣，并取得了一系列令人瞩目的成果，时钟同步也已成为分布式网络中的重要研究课题。作者在北京建筑大学机电与车辆工程学院机械电子工程系复杂系统建模与控制团队从事复杂系统同步与控制研究已有多年时间。随着时钟同步技术的不断发展，作者敏锐地发现其在 IGPS 基站网络间的广阔应用前景，从基本理论研究开始到实际应用，均取得了一系列的成果；同时，作者针对一些其他复杂网络同步问题也进行了探索与研究。本书结合作者十余年的理论研究成果和工程应用体会，系统地介绍了 IGPS 基站网络时钟同步以及其他复杂网络同步问题方面的基础知识和最新进展。

本书第 1 章是相关背景和基础知识的介绍，包括时钟同步研究概况以及复杂网络同步研究概况等。

第 2 章主要介绍本书中涉及的一些基本概念和主要引理，包括常用记号和特殊矩阵、图的基本概念和图的 Laplacian 矩阵。

第 3 章针对 IGPS 的组成结构以及定位原理进行了描述，并详细分析了系统的定位精确度。其中主要分析了 IGPS 乘性误差因素最小边界值，并通过仿真实验，总结出 IGPS 基站布局和信号接收机高度对定位精度的影响以及此套 IGPS 的定位性能。

第 4 章针对 IGPS 基站网络时钟同步问题提出了两种时钟同步的算法。一种是自适应离散卡尔曼滤波方法，该方法利用测量新息信息和状态修正序列在估计窗内分段静止的特性，克服了传统卡尔曼滤波过程过分依赖于数学模型和统计模型正确性的问题。使用这种方法可以在线实时修正和转换 IGPS 基站间的时钟相位偏差和时钟偏移，找出最佳时钟适应曲线，并估计过程噪声和测量噪声的协方差矩阵。另一种是借助多智能体一致性理论思想的快速平均同步算法（FASA）来实现处于复杂网络中时钟节点之间具有通信延迟的同步。首先详细阐述了实现 FASA 的过程，并从数学角度分析了此算法的收敛性，通过鲁棒最优设计的方法来证明 FASA 的收敛速率。通过与其他时钟同步算法比较后，得出 FASA 在时间上达到了快速一致，FASA 已成功应用到具有延迟结构的 IGPS 基站网络中，同步时间可达到纳秒级别，数值仿真和实验结果说明了 FASA 的正确性和有效性。

第5章针对一类具有时滞节点和耦合延迟结构的网络同步问题,将自适应同步方法应用到该网络中,设计了自适应控制器。利用 Lyapunov 稳定性理论证明复杂网络节点状态局部或全局地渐近同步在网络中独立的节点状态,并在由 M-G 系统组成的环状网络上证明了该自适应控制器的有效性。针对智能体惯性节点是二阶系统且具有时变通信延迟和切换通信拓扑结构的网络,研究了其指数同步问题。采用分解变化技术将网络中每个节点的惯性作用合成到控制器的设计中,对具有任意切换通信拓扑、拓扑图为平衡图且考虑通信延迟的分布式智能体惯性节点组成的网络,给出了实现指数二阶同步控制的充分条件。

本书在系统介绍理论和方法的同时,也结合了 IGPS 基站时钟同步网络的应用案例,可供从事相关工作的高校师生、研究人员或相关部门工程师参考。

本书及相关工作的完成,离不开众多专家的指导和支持,以及朋友、同事的关心和帮助,衷心感谢北京建筑大学刘永峰教授的悉心指导,感谢华北电力大学毕天姝教授对本书提出的修改建议,感谢我的硕士研究生尚伟鹏和路昊阳在本书整理过程中的辛勤工作。

本书得到国家自然科学基金项目(51407201)以及北京建筑大学学术著作出版基金项目(CB201719)资助出版,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

于淼

2017年11月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 时钟同步研究概况	2
1.2.1 时钟同步国外研究概况	2
1.2.2 时钟同步国内研究概况	4
1.2.3 时钟同步算法研究概况	4
1.3 复杂网络同步研究概况	6
1.4 时钟同步以及网络同步问题研究的难点	8
1.5 本书的结构安排	9
第 2 章 基本概念和主要引理	11
2.1 常用记号和特殊矩阵	11
2.2 图记的基本概念	12
2.3 图的 Laplacian 矩阵	13
2.4 主要引理	13
第 3 章 IGPS 定位精确度研究	15
3.1 引言	15
3.2 IGPS 组成结构及其定位原理	16
3.2.1 IGPS 组成结构	16
3.2.2 IGPS 定位原理	17
3.3 IGPS 定位精确度研究	18
3.3.1 IGPS 乘性误差 GDOP 最小边界	19
3.3.2 IGPS 加性误差因素	22
3.4 仿真实验	22
3.5 本章小结	31

第4章 IGPS 基站网络的时钟同步	32
4.1 引言	32
4.2 IGPS 基站时钟模型建立	33
4.3 一种新的自适应离散卡尔曼滤波时钟同步方法	33
4.3.1 IGPS 基站网络时钟同步分析	33
4.3.2 一种新的自适应离散卡尔曼滤波时钟同步方法	36
4.3.3 实验和仿真	39
4.4 一种时钟快速平均同步算法 (FASA)	41
4.4.1 问题描述和数学预备知识	42
4.4.2 一种快速平均同步算法 (FASA)	45
4.4.3 FASA 收敛性分析	48
4.4.4 FASA 收敛速度分析	49
4.4.5 仿真与实验	51
4.5 本章小结	57
第5章 一些不同类型节点的网络同步问题	58
5.1 引言	58
5.2 自适应同步分析与控制器设计	60
5.2.1 含时滞节点和耦合延迟网络模型描述	60
5.2.2 含时滞节点和耦合延迟网络的局部同步结果	62
5.2.3 含时滞节点和耦合延迟网络的全局同步结果	65
5.2.4 数值仿真	67
5.3 含二阶节点的带通信延迟和切换拓扑结构的复杂网络指数 同步研究	71
5.3.1 数学模型及其网络同步问题	71
5.3.2 二阶智能体惯性节点的分解变换	72
5.3.3 含二阶节点的任意切换拓扑结构的时滞复杂网络同步	74
5.3.4 仿真研究	79
5.4 本章小结	81
第6章 总结与展望	82
6.1 本书创新点	82
6.2 未来研究展望	82
参考文献	84

第 1 章

绪 论

1.1 引言

随着人类对整个物质世界探索的深入，时钟同步技术越来越在通信、国防等高精尖技术应用领域中得到广泛的应用，从火箭、导弹、飞机等目标的精密定位、突发的保密通信、预警及火控雷达网的协调工作到各兵种的协调作战都离不开时钟同步，它们对时钟同步的同步精度和工作可靠性提出了更高的要求。近 20 年来，网络技术和计算机技术都取得了突飞猛进的发展，人们对时钟同步实现的精确性、有效性、故障回复和容错能力以及应用范围等不断地创新和发展，并根据不同情况提出了可以应用于不同要求的模型算法^[1-8]。但是，随着分布式系统中时钟同步技术的不断发展和完善，人们逐渐发现它具有一定的局限性。由于传统的时钟同步算法一般使用即时时间来进行时钟同步，并没有考虑本地节点的自身能力，而且受网络延迟及其不确定性因素的影响，使得时钟同步的实现无法实现更高的突破，很难满足对时钟同步要求快速的场合需求。

英语中的同步“synchronization”一词来源于希腊语词根“συνχρόνικ”，意思是“共享相同的时间”。同步问题广泛存在于自然界当中，这是一类非常重要的非线性现象。1665 年，荷兰物理学家 Huygens 最早发现同步问题，他观察到两个墙上的挂钟同步摆动的现象很有趣，即两个钟摆不管从哪个初始位置出发，一段时间后这两个钟摆的摆动总会趋向于同步状态^[9]。然后，荷兰旅行家 Kempfer 于 1680 年在泰国湄南河上发现了萤火虫一起同步闪光的有趣现象。接下来，Winfree 将同步问题转化为相位变化问题，并且对多个耦合振子之间的同步问题进行了深入研究；Kuramoto 针对有限个恒等振子的耦合同步问题也进行了细致讨论；Wu 也针对各种耦合格子和细胞神经网络的同步问题进行了深入研究。^[10,11]时钟同步问题早在 20 世纪 60 年代末 70 年代初就

成了人们研究和关心的热点问题。1978年，科学家 Lamport 对如何实现多个节点之间的时钟同步问题进行了研究，他指出时钟同步是可能的，并且描述了实现的算法，为后来的研究学者们指出了方向。

目前，时钟同步应用系统都是建立在分布式网络环境之上的，因此我们需要进一步了解和加深对网络的认识。人们对网络最早的研究起源于欧拉七桥问题，之后随着社会的发展，人类知识量的激增，以及信息时代的到来，各种各样的与网络有关的问题摆到了人们面前，对这些网络^[12-33]的研究会有助于我们更好地处理网络时钟同步的一些问题。最早对网络进行研究的是数学家们，他们认为网络可以看成是由具有一定功能和特征的个体组成的集合，并且在个体与个体之间存在着相互联系和相互影响。如果不考虑个体的功能和特征，网络可以用一个图（graph）来描述：将网络中的个体看成是图中的节点（node），将个体之间的影响看成是节点之间的边（edge）。他们发现可以用图论的工具来分析网络。经典的图论知识总是用某种规则的拓扑结构来模拟真实网络世界，直到1960年数学家 Erdős 和 Rényi 提出了随机网络基本模型^[31]。在之后的近半个世纪里，科学家们把随机网络基本模型图看作研究真实网络世界最好的工具。但随着研究的进一步深入，科学家们从大量的实验结果中发现：真实网络世界中的结构既不是非完全规则的也不是非完全随机的。直到最近几年，由于科学技术领域的高速发展，供我们刻画现实世界网络特征的结论越来越多，这迫使学者们不得不重新认识网络，学者们发现不能单单用图论知识来研究网络，必须要提出新的模型和方法^[29-32]。科学家们发现大量的真实网络是具有与规则网络和随机网络性质都不同的网络，并把这种网络称为复杂网络。1998年，Watts 和 Strogatz 发现了复杂网络的小世界（small world）。1999年，Barabási 和 Albert 发现了复杂网络的无标度（scale free）特征^[29-32]。复杂网络最重要的特性是小世界效应和无标度特性。小世界效应和无标度特性的提出极大地推动了复杂网络研究的发展。

综上所述，如何将高精度、高稳定度的时钟源应用到网络领域是一个亟待研究的课题。本书以应用为导向，主要目的就是进一步深入研究时钟同步的原理和方法，并通过实验和仿真给出可行性的方案，是时钟同步满足快速性的场合需要。本书在以上方面做了一些基础性的研究，取得了一些成果，对分布式网络系统和精确的时钟同步都具有非常重要的意义。此外，本书也研究了不同类型节点组成的复杂网络同步问题。

1.2 时钟同步研究概况

1.2.1 时钟同步国外研究概况

1978年7月，Leslie Lamport 在发表的论文“Time, Clocks and the Ordering

of Events in a Distributed System”^[2] 中就比较系统地阐述了时钟同步的原理、方法以及时钟同步在分布式系统中的应用，同时还特别阐述了逻辑时钟在带时序的分布式事件处理中的作用。随着计算机应用的发展以及分布式网络系统的出现，更高级的应用场合对时钟同步的精度要求也越来越高。分布式系统中如何实现多个节点间的时钟同步，就成为人们研究和关心的热点。进入 20 世纪 80 年代后，随着计算机的普及和发展，在时钟同步方面的研究取得了很大的进展。许多有关时钟同步问题的研究都受到政府各种基金的资助。例如，在美国，美国国防部、美国国家航空航天局资助了许多有关时钟同步方面的研究项目。1988 年，美国国家航空航天局发布的技术备忘录中就有专门讨论时钟同步问题的综述性论文 “A Survey of Correct Fault-Tolerant Clock Synchronization Techniques”。这篇论文不仅详细地论述了当前各种时钟同步技术和方法，而且还特别论述了有关时钟容错和修正方法的问题，最后在论文中还提出了时钟同步领域未来的研究方向。1995 年，美国加州大学的两位在时钟同步研究领域具有很大影响力的教授 Christof Fetzer 和 Flaviu Cristian 联合发表了一篇名为 “An Optimal Internet Clock Synchronization Algorithm” 的学术报告。该报告中所采用的收敛函数 “微分容错中的点收敛函数” 能够保证最大限度地优化系统的修正、评估最大漂移率和最大偏差，并给出其对应关系。1999 年，Sue B. Moon 等人^[34-36] 认为网络工程师和网络应用经常用到包延迟和包丢失路径来分析网络性能。但是，用于测量延迟的终端系统上的时钟并不总是同步的，这种不同步降低了测量的精确性。因此，估计和去除发送时钟和接收时钟延迟测量中相应的时钟脉冲相位差和偏移，对于准确评估和分析网络性能是至关重要的。研究者们提出了线性规划算法，并用它估计网络延迟中的时钟相位脉冲差，准确地评估和分析了网络性能。2000 年，欧盟各国联合实施了一项 “欧米伽” 计划，其主要目的就是要促进时钟同步技术的改进和发展，进一步为实际应用和研究提供更高精度的时钟。这项计划的实施同时也加快了欧盟数字同步通信网的建设。2002 年，日本东京大学的 Masato TSURUZ^[37] 发表了题目为 “Estimation of Clock Offset from One-way Delay Measurement on Asymmetric Paths” 的文章，主要讨论了基于两台主机单向延迟策略下的偏移估计和时钟漂移率，减小了由带宽不同引起的估计误差。2003 年 5 月，Flaviu Cristian 和 Christof Fetzer 又联合发表了一篇名为 “Probabilistic Internal Clock Synchronization” 的学术报告。在该报告中，他们研究了在无边界通信延迟的情况下使用一个改进的概率论方法来读取远程的时钟，并设计了一个容错的和基于概率论的内部时钟同步协议，此时系统内部的时钟能够容忍任意的错误发生。由于采用的是基于概率论的方法进行读取时钟，因此它的精度要优于采用确定性算法进行时钟的远程读入。另一个优点就是

用一个线性方程取代一个二次方程来描述信息的交换过程，这样做简化了问题的解决。此方法不仅有效减少了读取时钟信息的数量，也能够实现及时的信息交换。

1.2.2 时钟同步国内研究概况

时钟同步研究起源于国外，并且得到了迅速发展。国内在时钟同步领域的研究起步相对较晚，但是借助于较成熟的技术，也取得了良好的成果。部分相关的文献见文献 [38]~[41]。目前大部分的研究内容还停留在对国外研究的介绍或对国外的某些时钟同步算法进行相应的改进。其中，文献 [38] 介绍了基于概率同步算法的计算机外时钟同步系统的设计，并推导了在网络延迟为对数正态分布模型下的同步包数目的计算公式。同时，作者也研究了基于该公式的概率同步算法参数设计。但这种研究还是基于某种限定条件，时钟的调整也采用的是即时时间，很难在实际系统中进行应用。文献 [39] 指出在许多分布式实时系统中，要求整个分布式系统上的各个处理器时钟彼此同步，因而就要采取各种手段进行同步处理。时钟同步算法保证了空间上分散的处理器时钟彼此同步，该作者研究了当前基于软件实现的忍受故障的几种时钟同步算法，即确定型、概率型和统计型同步算法，并进行特性分析，提出了结构化分析的方法。文献 [40] 主要介绍了广域网的时间同步算法，并讨论了影响时间同步精度的主要技术问题，同时该文献也给出了基于网络时间服务协议实现的结果和分析。文献 [41] 首先研究了时钟同步系统的三个主要方面，即同步模型、同步时钟源和同步方法。然后讨论了应用最为广泛的绝对物理时钟同步系统的设计方法，并对其中的两个核心算法 CRI 算法和 PCS 算法进行了详细的分析和性能比较。文章的最后还介绍了基于网络时间协议 (NTP) 的同步技术及其软件实现。文献 [42] 针对单向网络性能测量过程中存在的时钟同步问题，提出了基于法向距离最小的优化目标利用凸集性质推导估算时钟同步的误差算法，并对基于机群的分布式数据采集技术进行开发，减轻了网络传输的负载，提高了网络数据的采集速度，取得了良好效果。

1.2.3 时钟同步算法研究概况

在分布式网络的时钟同步研究中，时钟同步算法是整个系统的核心，系统时钟的调整就是通过这些算法来实现的，时钟同步算法^[43-61]通常在网络中相互交换带时间戳的同步消息来达到时钟同步的目的。一般来说，尽管软件时钟同步算法不需要一些特殊的硬件支撑，但它却不能够提供向硬件时钟同步算法那样精确的时钟同步^[62]。Goyer 算法是由 Goyer P. 等人提出，在他们

发表的论文^[63]中使用简单的时钟同步方法定义了一系列可靠的同步原语。但是该时钟同步的实现采用了集中式管理,缺乏整个系统的可扩展性和健壮性。Cristian 算法^[49]是一个非常著名的外部时钟同步算法,它是由本领域的资深专家 Cristian F. 所提出的,这种方法可以往返测量延迟的重复修整策略,可以有效地保证对网络延迟测量的准确性。该方法的基本原则就是利用前一次信息传输延迟的结果对新的传输延迟进行评估。早期的 Cristian 算法使用一个时间服务器,客户端主机要想进行时间调整就必须向这个时间服务器发送时间请求。服务器接收到请求后,将其本身的时间值返回到客户端主机,此时的服务器处于被动工作状态,即根据客户的请求,服务器才能完成相应的动作。而 Berkeley 算法工作在 Berkeley Unix 环境下,服务器是一个主动的实体。它定期轮询客户机的时间,然后根据自己的判断向客户机发送调整时钟的命令。一般来说,如果时钟偏移的分布均值为 0,则使用平均值来调整时钟要比使用单个时钟的偏差来调整会更加准确。服务器会丢弃那些超过选择边界的往返时间值,并向客户端发送需要调整的时间偏差值,而这个值并不受到信息传输延迟的影响。在这个算法中,如果服务器时钟失败,则系统会重新选择出一个新的时间服务器来负责时钟同步的任务。以上的 Goyer 算法、Cristian 算法和 Berkeley 算法采用的都是集中管理策略,这就很难保证分布式系统的容错能力。也就是说,当中心节点出现故障后,客户端节点就退出了时钟同步的过程。

平均值算法就是根据上述问题而提出的。在采用平均值算法的系统中,每个节点在广播它本地时间的同时,还启动一个本地的时间采集器来获取系统中其他节点广播的时间信息。然后,系统中的各个节点再根据收集的这些信息计算出一个新的时间,这里最简单的方法就是求这些时间的平均值。由于没有充分考虑到信息延迟对时钟同步的影响,因此这种直接求平均值的算法很少被使用。但是,要计算出服务器到客户端的信息传输延迟也是一项艰难的工作。具体求平均值的方法可参见文献 [64]。例如,交互收敛函数、容错中点函数、差分容错中点函数、滑动窗口函数等。

一般来说,硬件的时钟漂移率都有一定的边界,而逻辑时钟的规定就不那么严格了。优化的时钟同步算法就是在保证这些逻辑时钟同步的基础上,使运行的精度还要超过硬件时钟。但是,如果硬件时钟的运行出现故障,同样会引起逻辑时钟的漂移。信息传输时间的变化也会引起对时钟值测量的不确定性。Srikanth 等人在论文^[60]中所提出的一个优化的时钟同步算法,能够在没有牺牲时钟同步精度的情况下完成优化的时钟同步。为了达到优化的精度,至少要有一半以上的时钟不会出现故障。他们采用了一个统一的方案来解决时钟同步问题、对所有时钟的初始化问题以及新时钟加入系统的问题。

目前在内部时钟同步领域中,一类著名的算法就是交互收敛算法 (Interactive Convergence)^[65-67]。其中,单步交互收敛 (Unistep Interactive Convergence, UICV) 算法定期读取系统中的部分或全部时钟,然后使用一个容错的平均收敛函数来计算时钟的修正值。在大型的分布式系统中,这个过程是很耗时的,所以它在实际应用中受到了一定的限制。这个算法的改进是多步交互收敛 (Multistep Interactive Convergence) 算法^[43,68]。该算法采用分级收敛、分级修正的策略,以提高时钟同步的精度和通信效率。尽管这个算法克服了单步交互收敛算法的一些限制^[44],但是每一次收敛也是非常耗时的,并且收敛的开始时间也很难确定。同时,大量的信息交换也加重了网络负载,并降低了时钟同步的精度。上述两种算法,一般采用部分时钟作为采样时钟。因为在收敛时间值的过程中,如果选用系统中的全部节点,则对网络带宽的需求非常大,容易造成更大的时间延迟,不利于时间基的计算。

最近,文献 [69] 研究了时变时滞动态网络中时钟振荡器的同步,也有不少学者提出用不同的策略来解决动态网络中的时钟同步问题。一个普遍的方法是洪泛时间同步协议 (FTSP)^[57],这种方法把网络建模成一个有根树;另一种方法是参考广播同步 (RBS)^[70],在这个算法中,选择一个参考时钟节点来同步簇中其他节点,不同簇中的参考时钟节点一起同步并且被看作转换某个簇和另一个簇中本地时钟节点的通道。然而,RBS 方法会面临把动态网络划分成簇并选出一个参考时钟节点的巨大系统开销,而且 RBS 对失效的时钟节点是很敏感的。因此,为了克服 FTSP 和 RBS 的缺点,学者们提出了一种完全分布式的通信拓扑结构,这种结构之中没有特殊的根节点或门节点。一个分布式同步策略的例子就是受萤火虫同步机理启发的后传萤火虫算法 (RFA)^[71],但是这种方法没有补偿时钟偏移值。随后 Solis^[72] 等人提出了分布式时间同步协议 (DTSP),它是一种完全分布式的并能补偿时钟振荡器的偏移和偏差的方法,DTSP 规划出一种分布式的梯度下降最优问题。

1.3 复杂网络同步研究概况

顾名思义,复杂网络就是一类极其复杂的网络^[73-109],其复杂性表现在三个方面:一是节点自身的主体性,每个节点都是具有独立行为的主体,表现出不同的活力和不确定性;二是相互影响的局域性,即网络中节点既影响周围的节点又被周围节点影响,随距离的增大影响而减小;三是拓扑结构的不均匀性,网络中的一些节点会呈现一定的抱团特性。

复杂网络系统的同步作为复杂网络最基本的特征,对其研究是非常重要的和有意义的。最近,不同领域的学者研究得出许多实际的复杂网络在弱耦合

条件下仍能展示出很强的同步倾向性^[110,111]。对全连接的网络结构来说,无论耦合强度多么小,如果网络结构充分大,那么一个全局耦合网络一定可以达到同步。对最近邻耦合结构的网络来说,无论耦合强度多大,如果网络结构充分大,那么一个局部耦合的网络一定不能同步。学者们通过研究进一步发现,网络的拓扑结构和节点的动力学特性是影响复杂网络同步的重要因素。近年来,对复杂网络同步性的研究已经得到了广泛的重视,并取得了一系列令人瞩目的成果。参考文献 [112]~[115] 指出同步是使系统实现状态一致所采取的动作、策略、方法或过程。但是到目前为止,科学家们很难总结出关于复杂网络同步普遍适用的方法和结论,所以,不同领域的科学家们要从各自的领域出发,相互研究和讨论,不断地在具体应用中得到验证和完善,只有这样做才能对同步理论不断创新和发展。

目前的复杂网络同步研究概况如下。Gade^[116]首先研究了在长程连接网络结构中节点的动力学系统为离散系统的同步特性,后来他又与 Hu^[117,118]合作研究了中程连接和小世界网络的同步现象; Hong 等^[119]研究了 WS 小世界网络中的各个特征量对动力学系统同步区域有界时网络同步稳定性的影响; 然后汪小帆和陈关荣^[120-124]提出了一般复杂动力学网络的模型,并研究了具有小世界和无标度模型的动力学网络和控制问题; Motter、Zhou 和 Kurths^[125]提出一种通过调节耦合强度的方法来降低这种不均匀性,提高复杂网络同步能力的方法。李春光和陈关荣^[126]则把汪小帆和陈关荣的模型扩展成为一般带有耦合延时的复杂动力学网络模型,并研究了它的同步问题; Li 等人^[127]也研究了具有时滞的一般复杂动力学网络的同步; 蒋品群等^[128]研究了确定性小世界网络的超混沌同步,得出即使单个节点自反馈系统的最大 Lyapunov 指数大于零,复杂网络也能实现同步,解释了为什么在很弱的耦合强度下有些网络仍表现出了很强的同步能力; 李春光等^[129,130]则进一步研究了具有延迟耦合的耦合映像格子的同步现象; Atay、Jost 和 Wende^[131]发现时间延迟有助于网络同步,他们也研究了耦合节点间存在延迟对网络同步的影响; Denker 等^[132]发现增加复杂网络的随机性,而且当网络上的脉冲耦合振子不均匀时,网络的同步状态会失去稳定; Restrepo、Ott 和 Hunt^[133]在研究复杂网络节点不完全相同问题的同步时,某些参数值在利用主稳定性函数的方法下,整个网络会出现不同步的斑图和爆发。

复杂网络同步的定义有很多不同的类别,下面给出的是常用的恒等同步定义^[96]。

定义 1.3.1 如果将复杂网络的每个节点看作一个动力学系统,那么有边相连的两个节点的动力学系统之间存在着相互的耦合作用,形成了一个动力学网络系统。考虑 N 个节点的复杂网络,假定 $x_i(t, X_0) (i = 1, 2, \dots, N)$

是复杂网络

$$\dot{x}_i = f(x_i) + g_i(x_1, x_2, \dots, x_N), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.1)$$

的一个解, 其中 $X_0 = ((x_1^0)^T, (x_1^0)^T, \dots, (x_1^0)^T)^T \in \mathbb{R}^{nN}$, $f: D \rightarrow \mathbb{R}^n$ 和 $g_i: D \times \dots \times D \rightarrow \mathbb{R}^n (i = 1, 2, \dots, N)$ 都是连续可微的, $D \subseteq \mathbb{R}^n$, 且满足 $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ 。若存在一个非空开集 $E \subseteq D$, 使得对于任意 $x_i^0 \in E (i = 1, 2, \dots, N)$ 和 $t \geq 0, i = 1, 2, \dots, N$ 有 $x_i(t, X_0) \in D$ 且

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t, X_0) - s(t, x_0)\|_2 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.2)$$

其中, $s(t, x_0)$ 是系统 $\dot{x} = f(x)$ 的一个解且有 $x_0 \in D$, 则复杂网络 (1.1) 能够实现恒等同步且 $E \times \dots \times E$ 称为复杂网络 (1.1) 的同步区域。

恒等同步是一类最常见的网络同步现象。简单地说, 复杂网络恒等同步是指所有的网络节点都趋近于相同的状态。具体而言, 上述定义中的 $s(t, x_0)$ 是复杂网络的同步状态, 而 $x_1 = x_2 = \dots = x_N$ 是复杂网络状态空间中的同步流形。

1.4 时钟同步以及网络同步问题研究的难点

在时钟同步研究方面的难点如下:

(1) 网络传输延迟的不确定性使得节点时钟无法准确地得到标准远程时钟的即时时间值。

(2) 每个时钟存在着一个漂移率, 使得多个时钟即使在同一个标准时间启动, 它们也不可能长期保持同步。事实上, 影响时钟漂移率的因素有很多, 如晶体质量、生产工艺、温度变化、环境变化、老化程度等, 因此两个时钟时间的不同也会随着时间流逝而改变。

(3) 在分布式网络的时钟同步中, 如何保证单个节点具有容错和自适应的能力。即使通信网络发生抖动, 甚至通信中断, 时钟也能够最大限度地保证正确运行。

(4) 通过什么样的方法进一步减少时钟传输过程中的不稳定性。

在网络同步研究方面的难点如下:

(1) 在实际网络系统当中, 很多复杂网络系统的同步受到时滞的影响。因此研究具有时滞的复杂网络系统是很重要的, 而且具有很大的实际应用价值。

(2) 虽然目前对于复杂网络的同步已经得到了广泛的研究, 但是对于使复杂网络达到同步的控制手段或控制策略的研究需不断加强, 特别是要研究复杂网络是否可同步化, 因为它决定了实施控制作用的必要性和可行性。

(3) 从工程应用的角度来说, 涉及分布式控制器的复杂网络同步问题成为当前的一个研究热点。研究具有时变通信拓扑以及通信延迟情况的同步问题是迫切需要的, 因此, 这类网络的同步性也需要研究。

(4) 在复杂网络同步理论不断发展的同时, 还需加强其应用研究。在信息领域, 可以考虑将同步性用于一些实际工程中。

1.5 本书的结构安排

本书主要研究 IGPS 基站网络间时钟同步即其他网络同步问题, 共分为 6 章。

第 1 章为绪论, 介绍了本书的研究背景, 详细综述了国外和国内对时钟同步的研究现状以及对时钟同步算法的研究现状, 同时也概述了复杂网络同步和当前研究存在的问题。同时, 提出本书的研究内容和研究意义。

第 2 章给出了本书用到的符号、一些基本概念和重要的引理, 这些理论基础在后面几章的理论分析和应用当中起着十分重要的作用。

第 3 章首先介绍了 IGPS 的组成结构以及定位原理, 然后分析了 IGPS 与定位误差之间的关系, 从数学角度分析了四基站 IGPS 的乘性误差 (几何精度系数 GDOP) 的最小边界, 总结了加性误差因素。通过在三维虚拟区域中对信号接收机和基站站址之间的关系的仿真实验, 分析了 IGPS 的定位性能, 并总结出影响 IGPS 定位精度的因素。仿真结果表明, 在实际中应用 IGPS 定位时应适当减小乘性和加性误差因素, 才能提高 IGPS 的定位精确度。

第 4 章主要研究了 IGPS 基站网络的时钟同步问题。首先, 提出了与 IGPS 基站时钟参数相结合的一种新的自适应离散卡尔曼滤波方法, 该方法利用测量新息和状态修正序列在估计窗内分段静止的特性, 克服了传统卡尔曼滤波过程过分依赖于数学模型和统计模型正确性的问题。使用这种方法可以在线实时修正和转换 IGPS 基站间的时钟相位偏差和时钟偏移, 找出最佳时钟适应曲线, 并估计出过程噪声和测量噪声的协方差矩阵。为了适应快速时钟同步场合的需要, 提出了一种基于多智能体一致性理论思想的快速平均同步算法 (FASA) 来实现处于动态网络中时钟节点之间具有通信延迟的同步问题, 并详细地介绍了 FASA 的三个步骤, 之后从数学角度给出了此算法的收敛性分析, 并通过鲁棒最优设计的方法来证明 FASA 的收敛速率。通过仿真把 FASA 与相类似的算法比较后表明, FASA 在时间上达到了快速一致。在 IGPS 基站上的实验结果验证了这种算法的有效性和正确性。最后, 对比这两种时钟同步方法的优缺点和应用的场合。

第 5 章主要针对两种不同类型的节点构成的复杂网络同步问题进行研究。

首先,针对带时滞节点和耦合延迟结构的复杂网络进行自适应同步分析和设计,将自适应同步方法应用到以 M-G 系统为节点构成的环状网络中,设计了自适应控制器,然后利用 Lyapunov 稳定性理论证明了该复杂网络的状态局部或全局地渐近同步在某个独立的节点状态。其次,通过仿真实验来说明所提出的自适应控制器设计方法的有效性。最后,针对具有时变通信延迟和切换拓扑结构、节点是二阶系统的复杂网络,研究了其指数同步问题。我们采用分解变化技术将网络中每个节点的惯性作用合成到控制器的设计中,针对具有任意切换通信拓扑、拓扑图为平衡图且考虑通信延迟的分布式智能体惯性节点网络,给出了实现指数二阶同步控制的充分条件。数值仿真实例进一步解释了理论结果。

第 6 章在总结全书内容的基础上,提出了有待进一步研究的课题。