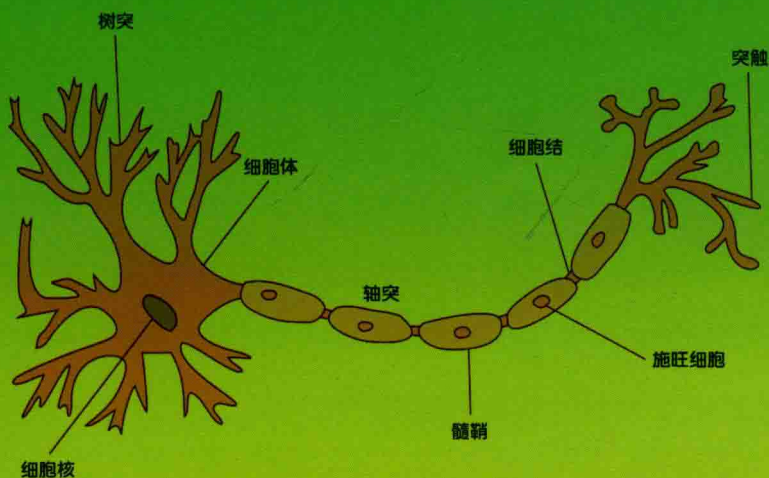


生物神经系统同步的 抗扰控制设计与仿真

► 魏 伟 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

生物神经系统同步的 抗扰控制设计与仿真

魏 伟 著

北 京

冶金工业出版社

2017

内 容 提 要

本书共分9章,分别为绪论,生物神经系统动力学模型,HR生物神经系统的Shilnikov分析,HR生物神经系统的抗干扰同步,FitzHugh-Nagumo生物神经系统的抗干扰同步,Ghostbuster神经元的抗干扰同步,Morris-Lecar神经系统的抗干扰同步,Hodgkin-Huxley神经系统的抗干扰同步和总结与展望。其中还介绍了主动补偿控制算法及线性自抗扰控制算法,生物神经元之间、生物神经网络各节点间膜电位的同步计算等。

本书可供从事自动控制、生物医学工程等相关研究领域的工程技术人员阅读,也可供控制理论与控制工程专业的师生以及从事非线性系统控制理论与应用研究的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

生物神经系统同步的抗扰控制设计与仿真/魏伟著. —北京:
冶金工业出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5024-7391-4

I. ①生… II. ①魏… III. ①计算机仿真—仿真算法—研究
IV. ①TP391. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 315358 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 杨 帆 版式设计 彭子赫

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7391-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版, 2017 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9.75 印张; 202 千字; 143 页

48.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号 (100010) 电话 (010)65289081 (兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

生物神经系统是由数量巨大的生物神经元相互连接而成的复杂的非线性系统，是生命系统的重要调节机构。它直接或间接地完成生命系统的机能调节和控制功能。对于生物体内外环境的变化，生物神经系统以生物神经元放电的不同模式对信息进行编码、传输和解码，从而实现生物神经系统信息的产生、传递和处理。不同外部激励引起的生物神经元放电模式、生理效应不同。早期研究中，受人们认识事物的水平以及研究手段的限制，神经系统中生物神经元的非周期、不规则的放电行为被认为是噪声。然而，随着非线性系统理论和方法的不断发展、完善，特别是混沌理论在生物神经科学领域研究及应用的不断深入，人们逐渐认识到这些貌似随机的神经元放电行为并不是无规律可循的噪声信号，这些信号具有内在的确定性，认为生物神经系统是一个由大量非线性元件连接而成的多级系统，混沌广泛存在于生物神经系统之中。

单个神经元、小规模的神组织、神经中枢、心脏搏动、血液流动、胃电信号、脑电信号、中枢神经系统的动态、可兴奋细胞中的放电、细胞信号传递及其新陈代谢等存在着混沌现象，混沌理论能够很好地解释这些复杂的动力学行为，具有混沌放电特性的神经元对内部和外部环境具有很强的适应能力，这使人们逐渐意识到健康状态的生理节律是混沌的，缺乏变化和灵活性的周期状态不能适应外界环境的变化，是病态的表现。生理系统所具有的这种复杂的非线性动力学特性——混沌，已经成为人们健康与否的重要标志。

生物神经元的混沌放电是生命体健康的必要条件，生物神经元组成的神经系统的混沌行为同步是保证生命体正常生理功能实现的重要机制。神经系统的同步活动对其信息编码、传递、处理（记忆、计算等）以及其他各种生理功能的实现具有重要作用；甚至一些疾病，如癫痫、帕金森、老年痴呆等的抑制和治疗都可以利用外部激励使神经

系统中的神经元呈现混沌并达到混沌同步的手段来实现。因此,生物神经系统的混沌行为同步对于神经生物学而言具有极其重要的意义。

然而,传统的神经生物学是一门实验科学,通常需要大量实体实验数据才有可能获得结论;个体差异又使得具有统计意义的结论需要大量重复性实验,耗费巨大的人力、物力、财力;此外,由于实验技术条件及手段的限制,有的无法进行实体实验。因此,利用已有实验数据建立生理系统的数学模型,借助计算技术,对数学模型进行计算机仿真研究,并利用计算机仿真结果指导实体实验,不仅可以减少危险性、提高效率,甚至在一些无法实验的极端条件下还可以成为实体实验的最佳补充。可以预见,非线性系统理论与计算机仿真技术结合在神经生物学中的广泛应用是现代神经生物学发展的必然趋势。

同时,近年来因电力、通信事业的迅速发展以及电子电气设备的广泛应用,使得人们所处的外部电磁环境发生改变,外部电磁场的刺激会影响生物神经元的放电节律,导致生物体功能异常。关于电磁辐射威胁人体及其他生物体健康和安全的报道逐渐增加,促使人们需要对反映健康状态的神经电信号以及外部电磁场对神经电信号的影响具有更多的认识。

综上所述,生物神经系统的混沌行为及其同步是生命健康状态的表征,将非线性系统理论、控制理论以及计算机仿真技术结合可为生物神经动力学研究提供新的有效手段。生物神经系统的混沌行为及其同步研究对生物信息处理、计算,生物神经系统动力学理论以及计算神经生物学而言具有重要的理论价值和现实意义,但因生物神经系统混沌行为及其同步机制本身的特殊要求和制约因素,使得这一问题的研究也面临不少挑战。

本书综合了作者在非线性的动力学理论、控制理论、生物神经系统动力学理论以及计算机仿真技术结合领域的研究成果,主要包括 HR 生物神经系统的 Shilnikov 分析,给出了 HR 生物神经元系统的级数解、HR 生物神经元系统的同宿轨道以及 HR 生物神经元呈混沌放电状态时外电场激励的理论值;HR 生物神经元、HR 生物神经网络的抗干扰同步控制设计与仿真;FHN 生物神经元系统的抗扰同步控制设计与仿真;Ghostbuster 神经元的抗扰同步控制设计与仿真;Morris-Lecar 神经元系统的抗扰同步控制设计与仿真;以及 HH 生物神经元的抗扰同步控制设

计与仿真。通过本书读者可了解生物神经元混沌动力学分析的 Shilnikov 方法以及生物神经系统同步的抗扰控制设计方法, 研究结果可为生物神经动力学分析提供新的有效手段, 对于探寻外电场对神经动力学特性的影响规律具有重要的理论价值和现实意义, 为计算神经生物学、生物医学的工程应用奠定良好的理论和数值实验基础。

在本书出版之际, 衷心感谢北京工商大学计算机与信息工程学院的刘载文教授、金学波教授, 自动化系各位同事以及中国民航管理干部学院田玲玲博士的无私帮助。在此, 向所有关心、帮助支持我的老师和朋友表示最崇高的敬意和感谢!

本书研究内容和出版得到了北京市自然科学基金(项目号: 4132005)的资助, 特此致谢!

因作者水平和经验所限, 书中难免有不妥和疏漏之处, 真诚欢迎广大读者批评指正。

作 者

2016 年 9 月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 生物神经系统简介	3
1.2.1 生物神经元	3
1.2.2 生物神经信号	4
1.2.3 生物神经网络	5
1.2.4 生物神经系统同步	6
1.3 生物神经系统的研究概况	6
1.4 生物神经系统的研究意义	7
1.5 本书内容简介	8
参考文献	8
2 生物神经系统动力学模型	10
2.1 生物神经元模型	10
2.1.1 Hodgkin-Huxley (HH) 神经元模型	10
2.1.2 FitzHugh-Nagumo (FHN) 神经元模型	12
2.1.3 Morris-Lecar 神经元模型	13
2.1.4 HR 神经元模型	13
2.1.5 Chay 模型	14
2.1.6 Ghostbuster 神经元模型	15
2.1.7 Leech 模型	16
2.2 生物神经网络模型	17
2.2.1 HH 生物神经网络	18
2.2.2 HR 生物神经网络	19
2.2.3 FitzHugh-Nagumo 生物神经网络	20
2.3 本章小结	21
参考文献	21

3	HR 生物神经系统的 Shilnikov 分析	22
3.1	引言	22
3.2	HR 神经元模型及数学分析	23
3.3	HR 神经元模型的 Shilnikov 分析	24
3.4	数值仿真研究	29
3.5	本章小结	32
	参考文献	32
4	HR 生物神经系统的抗干扰同步	34
4.1	HR 生物神经元的抗干扰同步	34
4.1.1	基于主动补偿的抗扰控制同步设计	36
4.1.2	线性自抗扰同步设计	46
4.2	HR 生物神经网络的线性自抗扰同步	53
4.2.1	问题描述	54
4.2.2	线性自抗扰同步控制设计	56
4.2.3	仿真研究	56
4.2.4	小结	60
4.3	HR 生物神经网络的主动补偿抗扰同步	60
4.3.1	问题描述	61
4.3.2	主动补偿抗扰同步控制设计	61
4.3.3	仿真研究	62
4.3.4	小结	66
4.4	HR 生物神经网络的复合抗干扰同步	66
4.4.1	HR 生物神经网络模型	67
4.4.2	滑模及线性自抗扰复合抗干扰同步设计	68
4.4.3	仿真研究	69
4.4.4	小结	72
4.5	本章小结	72
	参考文献	72
5	FitzHugh-Nagumo 生物神经系统的抗干扰同步	77
5.1	引言	77
5.2	FHN 生物神经系统同步问题描述	78
5.2.1	FHN 生物神经元的动力学模型	78

5.2.2 FHN 生物神经元的同步问题描述	79
5.3 基于动态补偿的抗扰控制同步设计	80
5.4 仿真研究	82
5.5 本章小结	85
参考文献	85
6 Ghostbuster 神经元的抗干扰同步	87
6.1 引言	87
6.2 问题描述	88
6.2.1 Ghostbuster 神经元模型	88
6.2.2 Ghostbuster 神经元的动力学行为	90
6.2.3 Ghostbuster 神经元同步问题描述	90
6.3 基于主动补偿的抗扰控制器设计	92
6.4 仿真研究	96
6.5 本章小结	102
参考文献	103
7 Morris-Lecar 神经系统的抗干扰同步	106
7.1 引言	106
7.2 Morris-Lecar 神经元模型	107
7.3 Morris-Lecar 神经元的放电特性	108
7.4 Morris-Lecar 神经元的同步问题描述	108
7.5 基于主动补偿的抗干扰同步设计	109
7.5.1 同步结构及抗干扰控制律	109
7.5.2 Morris-Lecar 生物神经元的抗干扰同步效果	109
7.5.3 小结	112
7.6 基于线性自抗扰的 Morris-Lecar 生物神经元同步设计	112
7.6.1 二阶线性自抗扰控制律	112
7.6.2 Morris-Lecar 神经元线性自抗扰同步的闭环稳定性	113
7.6.3 Morris-Lecar 神经元的线性自抗扰同步效果	115
7.6.4 小结	117
7.7 本章小结	118
参考文献	119
8 Hodgkin-Huxley 神经系统的抗干扰同步	121
8.1 引言	121

8.2 HH 神经元模型.....	122
8.3 HH 神经元的放电特性.....	123
8.4 HH 神经元的同步问题描述.....	124
8.5 基于主动补偿的抗干扰同步设计	125
8.5.1 基于主动补偿的抗干扰同步控制律设计	125
8.5.2 基于主动补偿的抗干扰闭环同步控制稳定性分析	126
8.5.3 仿真研究	128
8.5.4 小结	135
8.6 基于线性自抗扰的 HH 生物神经元同步设计	136
8.6.1 线性自抗扰同步控制律设计	136
8.6.2 基于线性自抗扰控制的闭环同步偏差分析	136
8.6.3 仿真研究	137
8.6.4 小结	141
8.7 本章小结	141
参考文献	142
9 总结与展望	144

1 绪 论

1.1 引言

神经科学源于 19 世纪末人类对脑与精神、行为关系的探索。1873 年,意大利细胞学家 Camillo Golgi 将脑组织做成薄片,用重铬酸钾-硝酸银进行染色,利用显微镜第一次观察到了神经细胞。随后,西班牙神经组织科学家 Santiago Ramon y Cajal 改良了 Golgi 的染色方法,发现神经细胞间没有原生质,认为神经细胞是神经系统活动的基本单位。这为神经科学的发展开创了新的纪元。他们因此获诺贝尔奖。一个多世纪以来,神经科学蓬勃发展,先后有 15 位神经科学家荣获诺贝尔奖。到目前为止,神经科学已经发展成为一门研究神经系统的综合性学科,它包含神经解剖学、神经生理学以及计算神经科学等多学科理论和技术,侧重于人脑器官和神经系统的基础理论研究,其目的是揭示人脑的奥秘。

计算神经科学作为神经科学的一个重要领域,诞生于 20 世纪初,Louis Lapicque 提出了第一个生物神经元模型——Integrate-and-Fire (I&F) 模型。之后,于 20 世纪 40 年代,Pitts 与 McCulloch 提出了模拟生物神经元处理信息的人工神经元模型,奠定了人工神经网络研究的基础。至 50 年代英国生物学家 Hodgkin 和 Huxley 首次实现了静息电位和动作电位的细胞内记录,提出了描述乌贼神经轴突生理特性的数学模型——Hodgkin-Huxley (HH) 模型。HH 模型是第一个能够详细、定量刻画神经元动作电位的模型,是神经生物学研究的里程碑式的成果。它的提出使复杂神经系统的计算机模拟成为可能,为计算神经生物学的定量计算以及生物神经网络的研究奠定了基础。此后,于 60 年代,FitzHugh 与 Nagumo 在 HH 模型的基础上,提出了一个简化的二维神经元模型——FHN 模型。80 年代,Morris 与 Lecar 在 HH 模型和 FHN 模型的基础上,结合细胞内钾、钠离子的动态特性建立了 ML 神经元模型;而后,Hindmarsh 与 Rose 在 FHN 模型的基础上又提出了一个新的神经元模型——HR 神经元模型,该模型由 3 个微分方程组成,与 ML 神经元模型相比可描述更多的神经元动力学特性。Leech 模型、Ghostbuster 模型之后也相继提出。到目前为止,已经建立的神经元动力学模型有 FitzHugh-Nagumo (FHN) 模型、Hindmarsh-Rose (HR) 模型、Chay 模型、Morris-Lecar (ML) 模型、Leech 模型、Ghostbuster 模型等。

近年来,在已经建立的神经元数学模型基础上,计算神经科学有了进一步发展,主要集中于分析生物神经元自身、生物神经元之间以及由生物神经元组成的生物神经网络的动力学特性及其同步控制研究。

实际上,生物神经系统(如人的大脑)是由数量巨大的神经元相互连接而成的复杂的非线性系统,它有惊人的信息处理速度,是生命系统重要的调节机构,直接或间接地完成生命系统的机能调节和控制功能。对于生物体内外环境的变化,生物神经系统以神经元放电的不同模式对信息进行编码、传输和解码,从而实现神经系统信息的产生、传递和处理。不同外部激励所引起的神经元放电模式、生理效应不同。

早期研究中,受人们认识事物的水平以及研究手段的限制,生物神经系统中神经元的非周期、不规则的放电行为被认为是噪声。然而,随着非线性系统理论和方法的不断发展、完善,特别是混沌理论在神经科学领域研究及应用的不断深入,人们逐渐认识到这些貌似随机的生物神经元放电行为并不是无规律可循的噪声信号,这些信号具有内在的确定性。Glass 认为生物神经系统是一个由大量非线性元件联接而成的多级系统,混沌广泛存在于神经系统之中。随后,人们发现单个神经元、小规模的神组织以及神经中枢中都存在混沌现象,混沌理论能够很好的解释神经系统的复杂动力学行为。Rabinovich 和 Abarbanel 也认为具有混沌放电特性的神经元对内部和外部环境具有很强的适应能力。各种研究表明生命系统的复杂动力学特性:心脏搏动、血液流动、胃电信号、脑电信号、中枢神经系统的动态、可兴奋细胞中的放电、细胞信号传递及其新陈代谢等都能用混沌理论进行很好的解释。人们逐渐意识到健康状态的生理节律是混沌的,缺乏变化和灵活性的周期状态不能适应外界环境的变化,是病态的表现。例如心脏病发病前夕,心电图表现为惊人的周期规律,而非正常时的混沌动力学规律;癫痫病人发作时其脑电图具有周期特征,而非人脑健康的混沌状态。生理系统所具有的这种复杂的非线性动力学特性——混沌,已经成为人们健康与否的重要标志。

生物神经元的混沌放电是生命体健康的必要条件,由神经元组成的生物神经系统的混沌行为同步是保证生命体正常生理功能实现的重要机制。生物神经系统的同步活动对其信息编码、传递、处理(记忆、计算等)以及其他各种生理功能的实现具有重要作用;甚至一些疾病,如癫痫、帕金森、老年痴呆等的抑制和治疗都可以利用外部激励使神经系统中的神经元呈现混沌并达到混沌同步的手段来实现。因此,神经系统的混沌行为同步对于神经生物学而言具有极其重要的意义。

然而,传统的神经生物学是一门实验科学,人们需要大量实体实验数据才有可能获得结论;个体差异又使得具有统计意义的结论需要大量重复性实验,耗费巨大的人力、物力、财力;此外,由于实验技术条件及手段的限制,有的无法进

行实体实验。因此,利用已有实验数据建立生理系统的数学模型,借助计算技术,对数学模型进行计算机仿真研究,并利用计算机仿真结果指导实体实验,不仅可以减少危险性、提高效率;甚至在一些无法实验的极端条件下,计算机仿真可以成为实体实验的最佳补充。可以预见,非线性系统理论与计算机仿真技术结合在神经生物学中的广泛应用是现代神经生物学发展的必然趋势。

同时,近年来因电力、通信事业的迅速发展以及电子电气设备的广泛应用,使得人们所处的外部电磁环境发生改变,外部电磁场的刺激会影响神经元的放电节律,导致生物体系统功能异常。关于电磁辐射威胁人体及其他生物体健康和安全的报道逐渐增加,促使人们需要对反映健康状态的神经电信号以及外部电磁场对神经电信号的影响具有更多的认识。

综上所述,神经系统的混沌行为及其同步是生命健康状态的表征,将非线性系统理论以及计算机仿真技术结合可为神经动力学分析提供新的有效手段。研究神经系统的混沌行为及其同步对生物信息处理、计算,神经系统动力学理论以及计算神经生物学而言具有重要的理论价值和现实意义,但因神经系统混沌行为及其同步机制本身的特殊要求和制约因素,使得这一问题的研究也面临不少挑战。

本书将非线性系统理论、先进控制理论、计算机仿真技术与计算神经生物学相关知识交叉融合,给出从算法、仿真角度进行的生物神经系统的动力学行为与同步机制的研究结果。

1.2 生物神经系统简介

1.2.1 生物神经元

生物神经元亦称生物神经细胞,是生物神经网络的基本结构单元,也是其功能的基本单元。生物神经细胞内及细胞间的信息传导是生物神经系统功能实现的基本形式。生物神经细胞具有跨膜电压差,跨膜传导电压的迅速变化为动作电位。动作电位从细胞的一个部位扩散到另一个部位,用于生物神经元的信息编码。

生物神经细胞内的信息通信和细胞间的电信号传递由生物神经细胞的特有结构决定,主要由细胞体和细胞突起组成,其中细胞突起又包括轴突和树突两部分。生物神经元结构如图 1-1 所示。

细胞体是生物神经元中包含细胞核的部分,其表面是细胞膜,细胞膜与细胞核之间为细胞质。细胞质中包含线粒体、高尔基体、尼氏体和神经原纤维。尼氏体为蛋白质合成的地方,与神经递质乙酰胆碱的合成有关。神经原纤维的本质为神经元内的神经微丝及神经微管在固定时凝聚而成,其功能与物质运输、轴突生长有关。

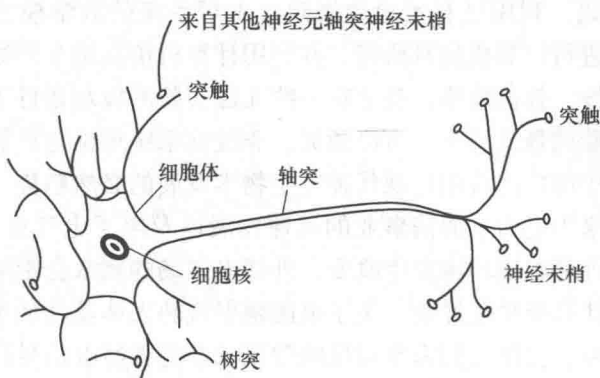


图 1-1 生物神经元基本结构

树突是神经细胞的突起结构，是生物神经元特有的、高度异化的结构，是神经元之间信息传导的部位。树突的形状犹如微小的树状分支，数目较多，姿态各异。与轴突相比，树突粗、短，常有多重分叉，形成致密的树突网。树突通过分支上的突触接收其他生物神经元的动作电位，融合各动作电位信号后，传输给生物神经元的细胞体。树突负责接收其他神经细胞的信息，是生物神经细胞的输入通道。

轴突是生物神经元细胞体发出的纤细管状突起，可延长数微米到数米，轴突末端反复分岔、膨大，终止于其他神经元，并与之形成突触。脊椎动物中许多神经元的轴突外层有髓鞘，其成分是施旺细胞，提供轴突之间的电气绝缘，通过“跳跃式传导”机制加速传递动作电位，并引导轴突再生。轴突负责神经细胞内的信息传递，它将细胞体的动作电位传递至突触，是生物神经细胞的输出通道。可见，生物神经元通过自身特有的突起结构实现感受刺激和传导兴奋的功能。

大量的生物神经细胞，其种类多样。若从神经元传导兴奋（信息）的功能来看，可通过感受器接受外界刺激，并转化成神经冲动的一类神经元称为传入神经元；而将中枢神经冲动传到效应器的另一类神经元称为传出神经元（传出神经元可引起生物体肌肉运动或者分泌腺液等）。连接传入神经元和传出神经元的称为中间神经元或者联络神经元，促使信号在传递过程中不衰减。此外，从形态上还可将生物神经元分为假单极神经元、双极神经元和多极神经元等。

1.2.2 生物神经信号

19 世纪初，Bemstein 提出了细胞生物电膜学说。细胞膜内外的体液称为细胞内液和细胞外液，其化学成分和离子浓度有别。因细胞膜对不同离子的通透性不同，使得细胞内液与外液的化学成分及离子浓度的差别得以维持。细胞膜内外侧的离子浓度差形成电位差。因细胞内液及细胞外液离子浓度的差异、细胞膜对各

离子通透性的差异以及膜内外电位梯度的存在,使离子浓度保持动态平衡。

神经元未受刺激(细胞内电位低于细胞外电位)时的膜电位称为静息电位,静息电位一般在 -70mV 左右。突触收到神经兴奋时释放出神经递质,改变离子通道的通透性,使膜电位发生变化。若膜电位大于临界值(-50mV 左右),神经元将产生一个动作电位沿轴突传播,以完成接收、处理、传递信息的过程。

神经元发放时,膜电位发生变化,该变化的幅值及间隔的大小与刺激类型及神经元传递的信号有着密切的关系。生物神经元处于兴奋状态,细胞内电位高于细胞外电位,电位差在 $60\sim 100\text{mV}$ 之间。细胞兴奋时,电脉冲宽度约 1ms ,传递迅速。

概括而言,生物神经系统中,传递的信号包括局部电位和动作电位。局部电位一般只能短距离传播(通常在 $1\sim 2\text{mm}$),这种信号在特别区域(神经末梢)比较重要;较长距离的信号传输则依靠动作电位。

1.2.3 生物神经网络

单个生物神经元功能有限,神经元之间以某种方式相互连接,构成功能强大的生物神经网络。在中枢神经系统中,神经元以突触互联。所谓突触,就是神经元之间,或神经元与肌细胞之间的通信媒介,可分为化学突触和电突触两类。它们分别承担不同的信息传导功能:化学突触承担释放与接收神经递质的任务,其信息传导是单向的;电突触则实现电气耦合,其信息传导是双向的。生物体内,化学突触更为常见,种类也更为丰富。突触前细胞发生冲动时,钙离子通道将突触小泡内的神经递质释放到突触间隙中,即兴奋-分泌耦合,神经递质扩散到突触后膜与特异性受体结合,改变突触后细胞的局部电位,这样便完成了信息在突触的传导过程。突触的强度影响突触后细胞动作电位的幅度。突触强度与诸多因素有关,包括突触前膜内神经递质的含量、突触前膜兴奋-分泌耦合的强度、突触后膜受体的数量以及神经递质释放后重吸收的速率等。

众多神经元通过突触相互连接,构成了功能强大的生物神经网络。生物神经网络具有复杂性、交互性和大规模性。随着对复杂网络认识的不断深入,人们发现自然界、社会生活、生物系统中大量的实际系统都可以通过由节点和边构成的网络进行描述。网络中的节点表示该系统的基本单元,边表示基本单元之间的相互作用或关联,两个节点之间具有相互作用关系则存在一条边,否则节点之间没有边。这样,生物神经系统可以看作由大量生物神经元通过神经纤维相互连接形成的复杂网络。

在复杂网络的研究中,通常采用图论法。然而,经典图论主要研究规则图,它在描述复杂网络时存在较大的局限性。20世纪60年代初,匈牙利数学家 Erdős 及 Rényi 提出了随机网络模型,用随机图描述网络的拓扑结构,为更好地研究复

杂网络奠定了理论基础。1998 年, Watts 及 Strogatz 为描述从规则网络到随机网络的转变, 提出了小世界网络模型; 1999 年, 为描述真实网络幂律形式的度分布, Barabási 及 Albert 建立了无标度网络模型。小世界网络及无标度网络模型的提出促进了复杂网络理论的迅速发展。

目前, 复杂网络理论已渗透至数理科学、生命科学以及工程科学等众多研究领域, 对复杂网络定量与定性特征的研究已成为网络时代科学研究中一个重要且极具挑战性的课题。特别是在神经生理学家发现生物神经网络具有小世界网络特性后, 诸多研究人员将复杂网络理论与生物神经元模型结合, 以单个生物神经元模型为复杂网络的节点模型, 研究外部激励存在时生物神经网络的动态响应, 取得了一系列有意义的结果。例如: 小世界网络下, 生物神经元的相干共振现象; 具有侧向抑制机制的小世界生物神经网络在直流和交流激励下, 神经元放电的兴奋特性。研究结果在一定程度上表现出与真实生物神经网络在受到外部信号及噪声激励时具有相类似的行为。因此, 生物神经元模型及复杂网络理论的迅速发展为人们利用非线性系统理论、计算机仿真技术研究生物神经科学奠定了坚实的基础, 有助于人类深入认识生物神经系统, 为相关生物神经系统疾病的诊疗提供理论依据。

1.2.4 生物神经系统同步

同步, 简言之是指动态系统中步调一致的现象。日常生活中, 同步现象比比皆是, 相当普遍, 例如: 钟摆的同步摆动; 萤火虫同步发光; 观众掌声同步; 心肌细胞和大脑神经网络的同步现象等。同步现象的发现使耦合振子理论得以建立。同时, 在生命系统领域, 因同步现象的存在, 使人们认识到生命系统的生理节律会与环境节律同步, 即生命系统中存在生物钟。

自然界的同步现象越来越多地被发现, 其覆盖领域也越来越广泛。同步在诸多系统中也起着至关重要的作用, 如同步在通信系统、核磁共振仪中具有非常重要的作用。然而, 并非所有同步都是有益的, 如互联网上路由器同步会引发网络堵塞。

在生命系统中, 同步, 通常是实现正常生理功能的前提, 是记忆的基础, 但是异常的同步会导致疾病, 如癫痫、帕金森氏症等神经系统疾病。癫痫发作的重要特征是兴奋神经元的同步振荡。神经元的同步行为对其信息处理过程中的信号编码和转换也是非常重要的。因此, 生物神经网络实现放电同步的机制是一个在理论上和实践中都被关注的重要课题。

1.3 生物神经系统的研究概况

随着人们对生物系统认识的不断深入, 仅研究单个生物神经元的发放特性、

动态模型，无法让人们真正把握生物神经系统，弄清生物神经系统信息传递、信息处理、完成生命功能的机制。实际上，生物神经系统是由无数个生物神经元以某种方式相互连接而成。生物神经系统的所有功能，包括自主神经活动的调节、生物的复杂行为（如运动、比赛、学习等）都是生物神经系统中各神经元相互作用的协同效应。生物神经元的相互作用包含神经元之间电信号的传递、突触的联系。认清这些机制，才能认识生物神经系统处理信息、完成生命功能的本质。

以乌贼轴突的电压钳位实验数据为基础建立的 Hodgkin-Huxley 模型（HH 模型）成为定量描述神经元兴奋传递的数学模型之后，人们利用非线性系统理论（自激振荡、混沌及多重稳定性等）、控制理论、计算机仿真技术等理论和技术手段，从非线性理论、控制系统分析和设计、计算机仿真模拟的角度研究并模拟生物神经系统的动态特性。

神经解剖学研究证实了众多生物神经网络具有明显的聚类现象和相对短的路径；同时，利用图论工具分析灵长目动物大脑皮层的大量结构数据发现：被考察的数据都表现出大连接聚集与小平均路径的特点。这些特征完全符合小世界网络的特点。此外，人们还发现具有小世界连接的网络模型具有快速响应与相干振荡特性。因此，小世界效应可能体现了信息处理的最佳模式，在生物神经系统的信息处理过程中，小世界效应显得非常重要。

在此基础上，从复杂网络角度研究生物神经系统，人们已做大量研究工作。这些工作大致可分为两类：一类根据生物神经网络的实际演化规律，设计变化规则，提出新的生物神经网络模型；另一类在生物神经网络模型的基础上，研究网络模型的一些动力学特性，如网络同步、兴奋节律、随机和一致共振等现象。

在生物神经系统的第二类研究工作中，人们考虑生物神经网络模型取不同参数、不同拓扑结构、不同连接强度以及不同外部刺激时的复杂动力学特性及其信息传播规律；进而模拟、解释真实生物神经网络在神经细胞受外界刺激时产生“刺激—兴奋—传导—效应”的过程、特点和规律。将复杂网络理论与人脑的自组织、自适应和信息的存储、联想记忆的机制联系起来对探索人脑的记忆、学习方式和信息处理能力可提供有益参考。

1.4 生物神经系统的研究意义

运用非线性系统理论、神经系统动力学理论研究生物神经系统的放电特性，可以揭示生物神经元放电与外电场激励的关系，建立生物神经元混沌特性分析的解析方法。通过数学分析、计算机模拟的方式从不同角度分析生物神经网络放电模式及其同步规律，研究更为丰富的神经网络动态特性，理解生物神经网络信息处理的本质，可为实现生物神经网络的大规模仿真以及模拟生物神经网络的功能