

# 心电散点图——大数据分析的新视野

李方洁

**[摘要]** 不同于以往利用计算机简单模仿人工诊断心电图的方法,心电散点图突破性地将认识心脏节律的视野从心电波形图拓展至相空间,用奇怪吸引子的截面图直观反映心电大数据中不同心律失常的诊断特征。随着心电散点图技术与人工智能、可穿戴心电设备及区块链技术的结合运用,心电大数据分析将朝着智能化、远程化、便捷化的方向发展,患者/用户的信息安全也会更有保障。

**[关键词]** 心电散点图;相空间;奇怪吸引子;智能化诊断;可穿戴心电设备;区块链

**[中图分类号]** R540.4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2095-9354(2018)01-0007-02

DOI:10.13308/j.issn.2095-9354.2018.01.002

**ECG scatterplot: a new horizon for big data analysis** Li Fang-jie (Cardiac Function Department, Wangjing Hospital Affiliated to China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China)

**[Abstract]** Different from old way in which computer simply intimulates artificial ECG diagnosis before, ECG scatterplot makes a breakthrough by expanding the horizon of cardiac rhythm from ECG waveform to phase space. With the sectional view of strange attractor, it visually reflects the diagnostic characteristics of different arrhythmias from ECG big data. By combining ECG scatterplot technique with artificial intelligence, wearable ECG equipment and block chain technology, ECG big data analysis will develop in the direction of intelligentization and facilitation, and provide more protections for patients'/users' information safety in remote ECG monitoring.

**[Key words]** ECG scatterplot; phase space; strange attractor; intelligent diagnosis; wearable ECG equipment; block chain

20世纪60年代计算机技术突飞猛进的发展,在不知不觉间将人类带入大数据时代。在心电分析领域,以动态心电图的问世为分水岭,此前只能记录短暂的“常规心电图”,此后可以连续记录24 h的大数据心电图。计算机带来的福音不止如此,动态心电图系统一经临床应用,就可模仿人工方法对24 h心电图进行自动分析。直至心电散点图的问世,又一分水岭出现。心电散点图突破了过去由计算机简单模仿人工诊断心电图的方法,采用对连续RR序列进行迭代作图这一能展现心率系统非线性混沌特征的方法,将人们认识心脏节律的视野从心

电波形图拓展至相空间,使心电大数据的分析模式为之面貌一新。

## 1 相空间

相空间(phase space)是数学与物理学概念,是一个用以表示动力系统所有可能状态的空间,系统每个可能的状态都对应于相空间的点。心脏电活动的速率和节律所形成的不是空间系统,而是一个时间序列,属于动力系统。自从用心电图纸上的数值表达心电活动的速率、节律以来,随着心电记录卷纸从心电图机中不断被释放出,使人感到心电似

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30873216)

作者单位:100102 北京,中国中医科学院望京医院心功能科

作者简介:李方洁,主任医师,主要从事心内科与心电学诊断的临床与研究,E-mail:lifangjie5166@163.com

乎是一种流动的“视觉有形之物”,而忽视了其本质是时间序列中的“节奏”,属于动力系统。相空间是表达时间序列的“虚拟空间”,心电散点图就是将心脏电活动的时间序列表达在相空间中的方法。

相空间被定义为具有高维度。我们知道,描述一个动力系统的维度越高,信息损失就越少,同时意味着所需处理的信息量越大,所要求的信息处理能力也越强。因此,在实际应用中,我们总是在掌握信息量与处理信息能力之间找寻最佳平衡点,目前临床应用的心电散点图只是相空间的二维图形,包括经典的 RR 间期散点图(Lorenz 散点图)和 RR 间期差值散点图(可以理解为另一维度的 Lorenz 散点图)。二者均由连续的 RR 间期迭代追踪作图而成,图的横、纵坐标都是 RR 间期。除此以外,临床常用的还有时间 RR 间期散点图。单纯的时间 RR 间期散点图不属于相空间图,而是一种线图。图的横坐标是记录的时间过程,纵坐标是对应的实时 RR 间期。但现有的时间 RR 间期散点图被制作成横坐标能够“自由伸缩”的图形,当图形被“压缩”时有利于观察整体,当图形被“拉伸”或“稀释”时有利于观察局部细节。同时,利用逆向技术可在时间 RR 间期散点图与 RR 间期散点图之间自由切换,便于了解不同时段所包含的不同心律及心律失常。

上述三种作图方法各具优势:RR 间期散点图侧重于表现 RR 间期之间的关系,在临床应用较多、认识较深,是最常用的方法;RR 间期差值散点图主要表现相邻 RR 间期差值的变化,目前观察总结得较少,但在室上性心律失常与室性心律失常,以及二联律、三联律的区分方面显示出优势;时间 RR 间期散点图可实现时间与相空间散点图的联动,并通过对横坐标的“伸缩”,帮助我们获得心率的分层(不同长度的 RR 间期)信息,从而更快地识别不同性质的心律和心律失常。

心电散点图这种相空间图是采用大数据连续 RR 间期迭代追踪而成的,不仅能很好地表现心电图系统的混沌特征,而且能清晰地揭示出传统的动态心电图分析方法无法揭示的某些隐含的规律。例如:心电散点图明确显示,心率变异性(HRV)正常的窦性心律,毫无例外地出现心率加快时相邻 RR 间期的瞬间变化减小、心率变慢时相邻 RR 间期的瞬间变化增大的现象;在房颤时能观察到房室结功能不应期及其变化;能发现绝大多数动态心电图无法诊断的并行心律;能一目了然地识别伴有隐匿传导的自律性增高性房早,并区分多源性房性早搏与心房颤动;能准确鉴别大多数房颤时宽 QRS 波的性

质;能更好地表现起搏心电图的不同特征。心电散点图在 HRV 分析方面也颇有独特之处,与时域、频域 HRV 分析方法相比,心电散点图可以显示和记录伪差 RR 间期失真对分析结果所产生的影响,提高 HRV 分析的准确性。

## 2 奇怪吸引子

吸引子(attractor)在数学中是描述动力系统行为模式的相空间几何构形,是动力系统活动的相空间轨迹图。吸引子刻画系统的整体特性,反映系统演化过程的终极状态,具有终极、稳定和吸引的特性,因此系统的吸引子具有不可分割性;反之,不同的动力系统不能相互融合成同一个吸引子。在吸引子中,越靠近吸引源的内部,吸引力越强;越远离吸引源的外缘,吸引力越弱,像水滴凝聚或磁铁吸引铁砂,核心饱满充实,边缘光滑而虚疏。周期系统运行节律的吸引子相空间的维数为整数,称为“平庸吸引子”(periodic vibration),其内部结构相对简单,边缘相对规则;而非线性系统运行节律的吸引子具有分数维,称“奇怪吸引子”(strange attractor),其相空间结构复杂,轮廓不规则,反映系统中存在混沌运动。由于动力系统有各自的行为模式,因此吸引子的性态(外部轮廓与内部结构)也各不相同。心电 RR 间期序列属于非线性动力系统,其几何构形为奇怪吸引子<sup>[1]</sup>。

吸引子的几何图形是通过对动力系统中的序列变量进行大量迭代计算而得到的。混沌系统的吸引子是相空间的高维几何构形。天才的法国数学家 Jules Henri Poincaré 提出将相空间中“立体”的吸引子“剖切”成不同的二维横断面(现称“Poincaré 截面”)来加以研究。时至今日,“Poincaré 截面”仍然是研究吸引子相空间结构的经典方法。20 世纪 60 年代,计算机技术问世,被称为“混沌理论之父”的美国动力气象学家 Edward Norton Lorenz 用计算机编程,绘制了气象动力系统的吸引子几何图形,即形似一只蝴蝶的“Lorenz 混沌吸引子”,并由此揭示了系统的混沌特征。目前,心电散点图采用迭代算法制作的 Lorenz 吸引子的 Poincaré 截面,可以视为心电吸引子的 Poincaré 截面图。

心电吸引子分为两大类——“稳态吸引子”和“非稳态吸引子”。稳态吸引子是同一起源心律的动力系统,最常见的是连续窦性心律;其次是各种连续异位心律,如房/室性心动过速或逸搏心律。当这些系统处于稳态时,RR 序列总是在自身频率范围内随时间产生微小的变化,其吸引子图形分布

于二维相空间图的 45°线上。稳态吸引子的频率范围和形态是区分不同系统的标志。非稳态吸引子是心搏从一个起源点变化为另一个起源点时产生的吸引子,是一个系统向另一系统过渡的吸引子,由不同系统的 RR 间期耦合而成。窦性心律伴各种异位心律或阻滞等都可产生非稳态吸引子。不同的系统有各自的频率范围,当这两个系统发生交替时,就会产生与两者频率相关的耦合吸引子,如窦律与早搏、逸搏耦合而成的非稳态吸引子分别分布在图形的近端和远端。由于不同的系统随时间变化呈现不同的发展趋势,因此非稳态吸引子不仅可以脱离 45°线,还能以不同形态分布于相空间的不同位置,如由窦律间期与房早联律间期形成的吸引子,其发展趋势多是在相空间中形成一个与坐标轴成一定夹角  $\theta(0 > \tan\theta < 1)$  的图形;由窦律间期与室性早搏联律间期形成的吸引子,其发展趋势多是在相空间中形成与 X 轴平行的图形。由此可见,从吸引子的角度来分析心电大数据可化繁为简,化难为易。

3 智能化诊断模型

人工智能(artificial intelligence, AI)是近年来人们热议的话题之一。它在医学领域最杰出的应用是图像识别和深度学习,而这两项重要应用都建立在医学影像大数据挖掘的基础上。人工智能正是在大数据、互联网和云计算等方法的催化作用下,一步步向我们走来。心电散点图是将大数据心电图转化为“图像”,这对擅长图像识别的人工智能技术而言更容易识别和分析。

目前,心电散点图作为心电大数据分析的实用方法,其在心电自动分析方面的优势已越来越被人们所认识并被日益广泛地应用于临床。然而,它的应用绝不仅局限于临床诊断范畴(如更多类型心律失常诊断模型的建立、复杂心律失常的诊断、非生物心脏起搏图形的解析,以及对未知心电现象和心律失常的认识),还包括应用几何数学原理,深入探究心脏节律规律的产生机制(如“几何画板”的应用)。目前,几何画板<sup>[2]</sup>主要用于制作心律失常的心电散点图模型。模型数据来源于对心电图的人工诊断经验,将已知的某种心律失常的 RR 间期特征值代入几何画板的公式中。如多数室性早搏的 RR 间期序列特征是联律间期相对固定,联律间期与代偿间期之和是窦律间期的两倍。例如:要制作室性早搏的心电散点图模型,只需要分别测量一次室性早搏之前窦律 RR 间期、联律间期、代偿间期、代偿间期

后的窦律间期值,并代入几何画板的公式中,再输入“联律间期相对固定”“联律间期加代偿间期是窦律间期的倍数”“倍数数值是 2”这些特征和特征值,就可自动绘制出与真实室性早搏极其相近的散点图。而室性并行心律的 RR 间期序列特征是联律间期不固定,其余特征与室性早搏完全一致,则只需代入这个不同特征,就可基于室性早搏模型制作出四分布“倒 Y 字形”的并行心律心电散点图模型。但存在问题,首先需要对每一种心律失常 RR 间期序列的特征与特征值进行定义,而这正是过去心电波形图诊断中缺少的观察视角。对于大部分心律失常,都无法仅根据心电波形图上 RR 间期的变化做出诊断,单纯依靠心电波形图也难以推导出大部分心律失常的 RR 间期序列,因此限制了几何画板的应用。与此相比,逆向技术的应用更快地拓展了心电散点图的诊断视野,通过心电散点图与心电波形图的实时对照,许多原来不甚清楚的心律失常 RR 间期序列及其心电生理指标,如心房颤动及房室结功能不应期的变化<sup>[3]</sup>、并行心律<sup>[4]</sup>、心房扑动、逸搏及逸搏心律、窦性心律去未知的变化模式<sup>[5]</sup>等都一一展现出来。因此,利用逆向技术及多中心大数据的对照研究,掌握更多心电散点图诊断模型,是实现心电智能化自动诊断的基础。

人工智能促使我们的工作模式发生翻天覆地的变化,其与心电技术的结合给心电诊断带来了崭新的视角,并不断取得颠覆性和突破性的进展。然而,我们必须指出,生命状态是一个动态的非线性过程,一切都是不可逆和不可能完全重复的,人工智能很难完全脱离人的思维而独立存在。因此,我们要清醒地认识到人工智能不可能完全替代人,要在充分发挥人的聪明才智及主观能动性的前提下,真正运用好人工智能技术。

4 匹配可穿戴心电设备

可穿戴医疗设备也是近年来日益受到关注的新技术。这类设备的应用使原本须在医院进行的很多检查项目(如血压、血氧和血糖监测)可以在社区卫生服务中心或患者家中进行。而心电图检查由于须由专业人员诊断而无法在百姓家中完成,可穿戴心电设备的使用受到限制。目前,心电记录虽然可在患者家中完成,但将心电信息远程传输至专业的诊断中心来判读结果是必需的。如果未来这种远程心电诊断模式成为常态,势必对海量心电信息的处理和诊断速度提出更高要求。传统的医疗模式下,是以医院为中心,按照医院的接诊能力接

诊患者;而未来的医疗模式将以患者为中心,患者在家庭中记录的长时程心电信息可以随时传至医疗机构,并要求实时诊断。因而,擅长处理大数据心电信息的心电散点图将会大有用武之地:一方面,掌握散点图分析技术的医师能更快地分析心电数据;另一方面,心电散点图更为可视化和直观,它能够将只有专业医生才能看懂的心电波形图转化成简明的几何图形,使患者也能读懂心电诊断结果。因此,心电散点图可谓是可穿戴心电设备最匹配的软件“搭档”。

可穿戴设备以前所未有的方式扩大了心电信息采集以及数据利用广度和深度,与此同时也带来了巨大的安全隐患。可穿戴设备采集的个人数据通常涉及私人信息,如使用者的位置、家庭住址、工作单位、健康状况等,设备通过互联网将其传给云端或本地数据服务器进行存储,不同身份的用户通过不同权限访问服务器中的数据。如不进行妥善的信息安全管理,用户隐私信息很可能遭到泄露<sup>[6]</sup>。区块链是分布式数据存储、点对点传输、共识机制、加密算法等计算机技术的新型应用模式。近年来,区块链技术被认为适用于解决医疗大数据在数据收集和交换方面出现的安全问题。如果说互联网信息技术负责数据的传输,那么区块链是确保信息安全的技术。有学者认为,医疗健康领域将是继金融领域后区块链技术最重要的服务方向之一<sup>[7]</sup>。

## 5 结语

心电散点图的开拓性研究和临床应用打开了心电大数据分析的新视野,它利用相空间中吸引子几何构形截面这种表达方法使心律失常的表现“图

像化”和直观化,将动态心电图的临床诊断化繁为简、化难为易。心电散点图与人工智能技术相结合,可制作心电智能化诊断模型,实现心电自动化智能化诊断。心电散点图软件与可穿戴心电设备及区块链技术相结合,可快速处理海量心电数据和出具准确诊断结果,同时保障患者/用户的网络信息安全,使远程心电监护如虎添翼。随着心电散点图技术的发展和临床应用的进一步深化,随着其他相关技术应用的加持和保障,相信未来散点图技术的发展更加值得期待!

## 参考文献

- [1] 李方洁,向晋涛. 心电散点图[M]. 北京:人民卫生出版社,2014:38-47.
- [2] 向晋涛,景永明. 临床心电散点图学[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2016:7-10.
- [3] 李方洁,向晋涛. 心电散点图呈现的房室结功能不应期及对宽 QRS 波的鉴别[J]. 中国心脏起搏与心电生理杂志,2011,25(1):16-19.
- [4] 景永明,黄焰. 并行心律的心电散点图特征[J]. 实用心电学杂志,2015,24(3):158-160.
- [5] 许以德,许智永. 心电散点图在窦性心律失常二联律鉴别诊断中的应用[J]. 实用心电学杂志,2017,26(3):175-178,225.
- [6] 任晓霞,卢烨. 可穿戴医疗设备的安全性研究以及策略分析[J]. 中国数字医学,2017,12(5):100-102.
- [7] 李伟. 医疗“联姻”区块链——如何在分享数据的同时保护隐私[J]. 华东科技,2017,35(9):36-38.

(收稿日期:2018-01-12)

(本文编辑:顾艳)

读者·作者·编者

## 《实用心电学杂志》2018 年征订启事

本刊是由江苏省教育厅主管,江苏大学主办,中国医师协会、中国心电学会等单位协办的心电学专业权威期刊。ISSN 2095-9354, CN 32-1857/R, 双月刊,大 16 开,双月 28 日出版,国内邮发代号:28-438,定价:10 元/期,2018 年杂志全年 60 元。目前,2016+2017 年过刊,2 年 12 期优惠价 100 元,快递包邮。订阅方式:

### 1. 邮局汇款

收款人:《实用心电学杂志》编辑部

地址:江苏省镇江市梦溪园巷 30 号

邮编:212003

### 2. 银行汇款

户名:江苏大学

开户行:交通银行镇江分行

账号:381006700010149002346

欢迎订阅!

(本刊编辑部)