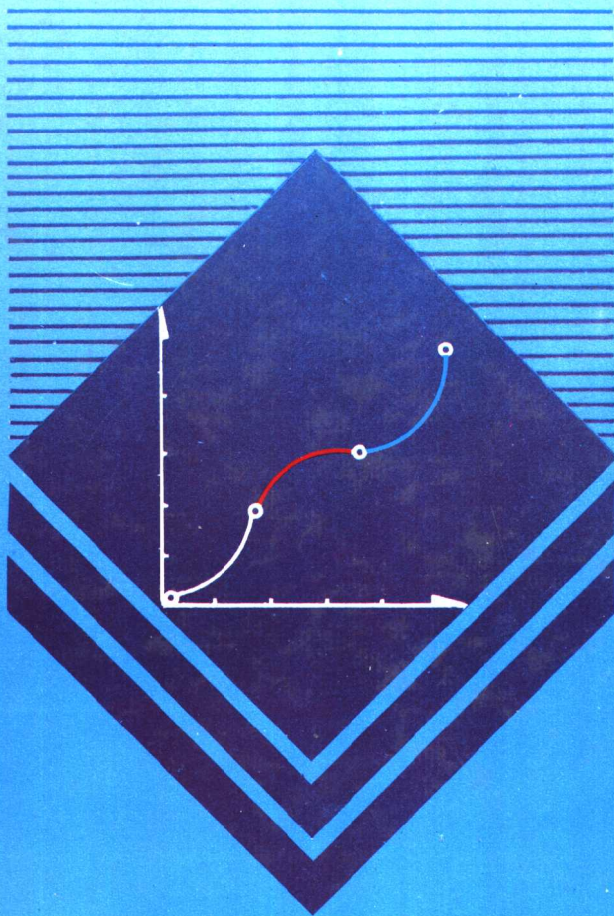


农业生物力学及 农业生物电磁学

孙一源 余登苑 编著



中国农业出版社

农业生物力学及 农业生物电磁学

孙一源 余登苑 编著

中国农业出版社

农业生物力学及农业生物电磁学

孙一源 余登苑 编著

*** * ***

责任编辑 段丽君

中国农业出版社出版 (北京市朝阳区发展馆北路2号)

新华书店北京发行所发行 中国农业出版社印刷厂印刷

850×1168mm32开本 15.25 印张 396千字

1996年5月第1版 1996年5月北京第1次印刷

印数 1—1,000册 定价 35.00 元

ISBN 7-109-03860-2/S·2440

前 言

本书是继1985年作者的拙作，注意农业土壤特点（如肥力等）的《农业土壤力学》^{〔14〕}之后的又一本力学方面的专著，只是涉及的范围更广，考虑到广义力学（如传统力学、热力学和电场、磁场力学等）对农业-生物物料的多方面响应，特别是对农作物、农产品和役畜的生理、生命活动与电磁学等有关的广义力学问题进行讨论，可以认为是农业中的生物力学与电磁学，称为《农业生物力学及农业生物电磁学(agribiomechanics and agri-bioelectromagnetics)》。

从1985年第二届全国生物力学学术会议上，作者提出建立“农业生物力学”新学科以来，作者从教学和科学研究两个方面来发展这一学科。自1988年起同时在江苏工学院和南京农业大学农业工程学院两校内为本科生和研究生（硕士生和博士生）开设此课，招收研究生并进行了多项科学研究。本书是为农业工程、农业机械、农产品加工工程、农学、生物物理、畜牧学和生物学等专业人员及师生，提供的一本基础性专著。其主要内容是：植物流体力学、农业物料流变学、农产品损伤力学、役畜力学、农业生物电学与磁学的基础理论和实际应用。本书不同于医用的生物力学（参见图1—1）。

本书的基本内容，是为新技术的发展服务。例如节水农业灌溉控制、低污染植保工程、农业物料流变特性的应用、按生命力选种等，为推动现代化的低耗、持续农业的发展，将产生巨大作用。

本书分工为：第一至第五章由孙一源编写，第六至第八章由

余登苑编写,并经互相审校后,最后由孙一源对全书统一定稿。

在本书编写过程中曾得到江苏理工大学沈林生教授的关注并审阅了部分手稿;国际著名生物力学专家冯元桢教授^①校阅了“前言”和“导论”,他们均提出不少宝贵意见;本书还引用了两校研究生的学位论文以及国内外同行的论著,在此一并谨致谢意。

本书是由二位教授评审的,第一至第五章是北京农业大学华云龙先生审阅,第六至第八章则由南京大学余启祥先生审阅。二位先生均极为认真负责,提出了大量十分中肯的意见,对提高本书质量,起了很大作用,为此,作者表示深切的谢意。

由于农业生物力学及农业生物电磁学属于初创,从研究范围、方法到实际应用,均有待发展。限于作者水平,纰短汲深,讹谬难免,敬希读者多加匡正,也盼有志者共同创建这一全新学科,造福人类。

作 者

1994年春

通讯地址: 212013

江苏镇江江苏理工大学 孙一源

210032

南京浦镇南京农业大学农业工程学院 余登苑

目 录

前 言

第一章 导论	1
第一节 农业生物力学及农业生物电磁学与其它学科的关系	1
第二节 生物力学的发展简史	3
第三节 农业生物力学及农业生物电磁学的研究现状	7
第四节 农业生物力学及农业生物电磁学的基本研究方法	9

第一篇 农业生物力学

第二章 植物流体力学	13
第一节 引言	13
第二节 水(溶液)在土壤和根内流动	18
第三节 木质部内水分(溶液)的输运及其流速的测定	61
第四节 韧皮部内的同化物输运	87
第五节 气孔蒸腾与气孔计	101
第六节 植物流体力学的工程应用	112
第三章 农业物料的流变学	133
第一节 流变现象与农业物料流变体	133
第二节 农业物料的流变特性	140
第三节 面团的流变特性及其模型	172
第四节 农业物料流变特性测量	177
第五节 农业物料流变特性的应用	192
第四章 农产品损伤力学	205
第一节 农产品损伤状况	205
第二节 农产品损伤的分类、原因及其测定	206
第三节 撞击损伤	213

第四节	静重与振动损伤·····	230
第五节	农产品机械损伤与疲劳损伤模型·····	243
第六节	农产品损伤力学的应用——损伤控制·····	254
第五章	役畜力学·····	265
第一节	引言·····	265
第二节	陆地行走力学·····	267
第三节	肌肉力学基础·····	289
第四节	骨骼的基本力学性质·····	300
第五节	役畜力学的应用——役畜的合理使用·····	309

第二篇 农业生物电磁学

第六章	生物电磁的产生原理·····	327
第一节	生物的电磁现象·····	327
第二节	生物电的产生原理·····	330
第三节	细胞膜电位的测定方法·····	341
第四节	生物体的动作膜电位·····	346
第五节	植物的动作电位·····	358
第六节	生物电传导的电缆理论·····	363
第七节	生物磁产生原理概述·····	371
第七章	农业生物体的电磁特性·····	379
第一节	生物膜的电特性·····	379
第二节	生物膜电容的测定方法·····	388
第三节	生物电阻抗·····	392
第四节	种子的电磁特性·····	404
第八章	农业生物电磁特性的应用·····	433
第一节	种子静电清选分级·····	433
第二节	植株电特性和静电喷雾的关系·····	453
第三节	电(磁)致生物效应·····	464

第一章 导 论

第一节 农业生物力学及农业生物电磁学 与其它学科的关系

生物学是研究生命的科学，力学是研究物质运动规律的科学，而生物力学则是研究与生命相关的物质特性及其运动规律的科学〔1〕。生物学的主要研究对象是动物与植物，生物力学理应研究动、植物的生物力学，但由于人类健康是当代人关心的热点，因此国内外的生物力学大多是以人体、医学和体育运动为研究对象，20多年来也取得了令人瞩目的成绩。而人类赖以生存的农业中的生物力学，则研究者寥若晨星。我国是农业大国，农业又是国民经济的基础。在实现农业现代化的进程中，会有大量的问题需用以现代广义力学为基础的农业生物力学去解决，例如如何能最大限度地发展低污染植保工程与节水灌溉，能否按植物生理需水来供水，这些应是植物流体力学的研究内容；又如何能按生命活力选种和利用电场、磁场的生物效应，提高农产品品质（如保鲜）和产量，这些则是农业生物电学、磁学要回答的问题。再者对大量役畜如何改良挽具，提高牵引效率及使用年限，这些应是役畜力学要解答的问题。总之，农业生物力学及农业生物电磁学的研究内容与目前以人体为主的医用生物力学要研究的内容，大相径庭。为之，我们早于1985年的第二届全国生物力学学术会议上，便倡议建立这一门新型学科“农业生物力学”。这几年来有了相当的发展。

“农业生物力学及农业生物电磁学”在于认识农业生产（农

林牧渔等) 中的生命现象, 试图用现代力学的方法, 尽可能定量地去研究其构造、生理过程和生长进程, 为高产优质稳产的农业生产服务〔2〕。无庸讳言, 目前的研究工作大多尚未涉及到力的作用对活的生命体的效应, 力学和电磁学与生命的耦合, 将是生物力学、农业生物力学和农业生物电磁学工作者的研究方向。

生命现象是自然界中最复杂的现象, 它是物质、能量和信息三者统一, 三个方面同时发生、相互依存、相互制约。一般表现为开放型的新陈代谢过程, 生命活动如植物的光合作用, 水与同化物的输运, 以及动物的肌肉收缩、神经传导、视觉、听觉、味觉、和感觉功能等, 生物体的呼吸、消化、吸收、生长、发育、遗传、变异、新陈代谢、生物体内外的传质、能量转化、信息加工(如调控)以至思维活动等。既要研究酶、物质的本质, 还要分析其催化作用, 这些都要能量(如高能磷酸键 ATP 的释放)和过程控制(信息处理)。甚至可以利用信息, 作非药物的治疗手段②和育种及“抗衰老”等方法。③因此, 整个生命活动中均贯穿了物质、能量和信息的三者变化、协调和统一〔4〕, 其中存在着广义力(引力、电磁力、强相互作用力、弱相互作用力)的作用。

农业生物力学及农业生物电磁学涉及生命科学、现代力学、基础科学和工程科学等多个学科, 详见图1—1。其中关系最为密切的是连续介质力学、生物力学、动植物生理学、生物物理学、电磁学和数学。冯元桢与 Sidney Sobin 在研究肺泡片中的微循环获得成功, 其关键在于充分考虑了生理背景, 即注意了生命活动的特征和影响。因此, 在从事农业生物力学及农业生物电磁学研究时, 必需注意二点: 一是动植物生理学——生命活动的作用; 二是实验验证。

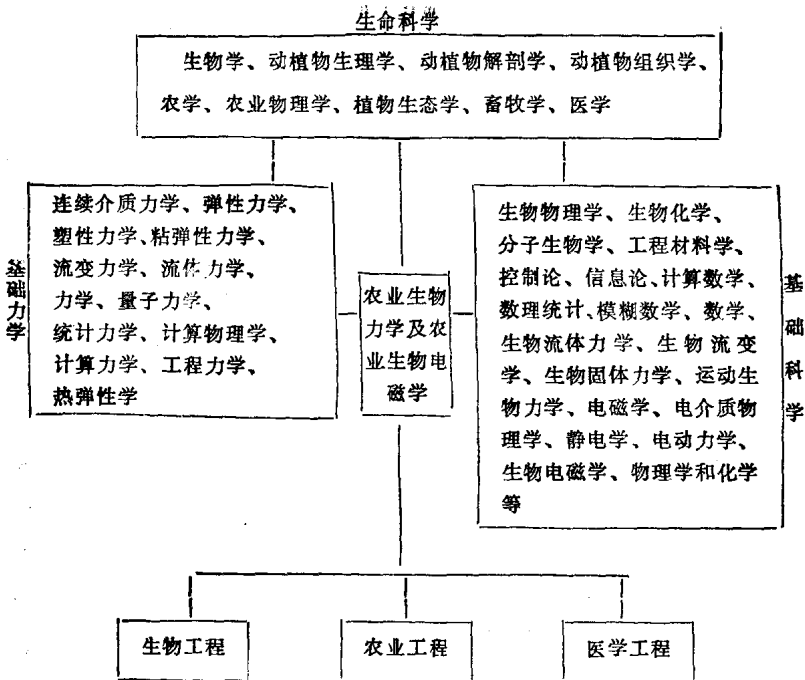


图 1—1 农业生物力学及农业生物电磁学与其它学科的关系

第二节 生物力学的发展简史

生物力学是一门既古老又年轻的科学，近20年内才有了突飞猛进的发展，在国内也仅有10多年历史，农业生物力学则是1985年才开始提出的。但是研究生命现象的力学规律却又是源远流长。为数众多的天文学家、物理学家、数学家和力学家都对生命中的力学问题作出过重要贡献。同样，生理学家和著名医生也曾为生物力学的发展，作出过重大努力，这就证明生物力学和农业生物力学的发展是科学发展的必然，这可从血液循环系统和生物电磁学等研究的发展过程中得到证明。人类一开始便注意到血液循环，最初古希腊哲学家Aristotic (384—322 B. C.) 就提出

了血液循环的原始概念，认为是血液自行流入血管，心脏是血液的循环中心。我国汉代名医华佗（A. D. 145—208）是著名外科医生，已经可以用麻沸散在麻醉状态下作手术，甚至是脑的手术。16世纪的达·芬奇（Leonardo de Vinci 1452—1518）是欧洲文艺复兴时代的艺术家，又是工程师和科学家，在详细研究了骨和肌肉活动原理之后，创立了解剖学。在血液循环上最有贡献的是英国生理学家William Harvey（1578—1658），也是一位医生，生于英国南部的 Folkestone 镇，先在剑桥大学学医，后去意大利学习解剖（1598年），1602年回国，成为伦敦的解剖学教授。他是伽利略（Galilei Galileo）的学生，1615年W. Harvey测得了心室的容量为二英两，脉搏是72次/分，1小时输出540磅血液，这么多的血液是从何处来，又到何处去，于是他从理论上推断出：必然有一个循环系统存在。事实上这便是人们熟知的质量守恒原理和流体力学的连续性定理。直到1628年，他才发表了不朽名著《关于生物心脏和血液运动的解剖研究》，开创了实验生理学的先河，堪与他的老师伽利略及天文学家开普勒比美。但证实微循环的是Marcello Malpighi（1628—1694），在解剖青蛙的肺时，用显微镜观察到了微血管及其中的血液，这是1661年，距Harvey的预言达45年之久。

英国生理学家Stephen Hales（1677—1771）对心血管系统也作了研究。如测定了马的动脉的血压，求得血压与排血量的关系；测得了心室处于舒张压时蜡制模型的体积；估计心的输出量和心肌力等。1733年发表了《血液静力学》（Haemastatics）。该书说明了由于动脉的弹性扩张功能，使间歇排血的血流在血管中变为平稳的射流，起平滑的作用，他还发现血液流动中未稍阻力来自微血管，热水和白兰地酒有扩张血管的作用。

早在1727年S. Hales还发表了由牛顿批准出版的《蔬菜静力学》〔5〕。该书有七章，共作了124个试验。系统测定了植物体内水分、氧气的输运和呼吸作用，是研究植物流体力学的先驱，也

是最早注意到“农业生物力学”的学者。234年之后于1961年再版此书，是科技史上的奇迹。这是因为该书“为每个认真学习水分在植物体内运输的人所必读”。无论是血液流动还是植物流体力学均是生物流体力学。这说明Hales的研究范围极广。

对于血液流动、血液循环还有不少著名的科学家注意，如英国数学家、自然哲学家Isaac Newton (1642—1727) 在1700年也研究了血液循环力学，测定动脉与静脉血压和血的输出量，讨论了动脉弹性问题，认识到血管末稍的阻抗存在。在工程界、力学界十分出名的杨氏弹性模量，是在研究声带发音的弹性理论时观察到的。又于1808年发表了“论血液运动”，讨论了血液的粘性阻力并估算红血球直径，他既是英国的医生又是物理学家。法国医生Jean Poiseuille (1799—1869) 在1842年求得了毛细管内血液流动定律，流量是与圆管半径四次方成正比，称为Hagen-Poiseuille定律。20年后才为德国的Wiedemann和Hagenbach (1860) 在理论上得到证明。流体的粘度被定为泊(Pois, P是他的名字的缩写)，由于他解释了大量的血液循环中的问题，Poiseuille定理成为流体力学的基本定理，也称他为流体力学家。

著名数学家Van der Pol (1889—1959) 于1929年用非线性振荡器模拟心脏。

意大利的数学家、天文学家Borelli (1608—1679) 于1680年成功地发表了“论动物运动”，讨论了肌肉、心脏和肠的运动及飞鸟与游鱼的运动等，堪称仿生学的先驱。

瑞士的著名数学家Leonard Euler (1707—1783) 于1775年发表了血液流动的第一篇数学分析论文，他是用不可压缩的理想流体，在弹性管中的一维流动方程组，分析波在动脉中传播。生理学家Adolf Fick (1829—1901) 提出了物质扩散定理。August Krogh (1874—1949) 对微循环的贡献，获1920年Nobel生理学及医学奖。流体力学家Korteweg (1879) 和Lamb (1898) 对血管中波的传播分析，Frank提出了心脏流体力学理论等，才

使血液循环的生物力学日趋完善。

1917年意大利生理学家Galvani和物理学家 Volta 关于生物电的争论，延续了二百余年。直至20世纪的阴极射线管、细胞内微电极等技术的发展，才极大地提高了生物电的研究水平。Xuxley-Hodgin方程至今仍是生物电的基本方程。

长期以来，因生物磁场极为微弱，未引起重视，直至高灵敏度微磁测量技术——SQUID梯度计（分辨率达到 10^{-11} Gs）的出现，才使人的脑磁、心磁等研究与应用日益广泛。

生物力学的其它领域也都有一个发展过程⁽¹⁴⁾。

生物力学的迅猛发展是在20世纪中叶，特别是一批从事航空工程的科学家转到生物力学之后，发展得更快，其中以冯元桢^①等的贡献较大。无论在基础研究和应用开发方面均取得了重大进展。在基础研究方面如亚微观生物力学、生物组织的力学性质、生物流变学和生物热力学等均有发展；在应用方面如人工脏器、器官移植、医学、交通、宇航、体育运动、军事科学和工程仿生、农业应用等多项研究，也都取得较好结果。在国内外学术交流方面也起到繁荣学术的良好作用。

1967年由Wartenweiler主持在瑞士举行首届国际生物力学研讨班；

1968年美国生物力学杂志创刊；

1969年在荷兰举行国际生物力学学术讨论会；

1970年在美国加州大学举行国际生物力学学术讨论会；

1971—1973年分别在罗马和美国宾州大学举行第三、四次国际生物力学研讨班，1973年成立国际生物力学协会；

1975年在芬兰瓦斯凯拉大学举行国际生物力学专业会议，也就是第五届国际生物力学研讨会。会上选举了瑞士联邦技术研究室生物力学实验室的J. Wartenweiler为国际生物力学协会主席，R. C. Nelson为副主席，并确定每二年召开一次国际会议。

1948年在第一届国际流变学会议上，A. L. Copley提出了生

物流变学 (Biorheology)。四十多年来, 生物流变学已发展成一门新学科, 成立了国际生物流变学学会, 出版了“生物流变学”国际刊物。1978年8月在美国加州大学圣地亚哥分校, 举行了第三届国际生物流变学学术会议, 确定每三年召开一次, 1989年在南锡召开第七届国际生物流变学学术会议, 我国提供17篇论文, 居第三位。吴云鹏在1990年第三届全国生物力学学术会议上, 作了题为“生物流变学进展”^[9]的专题发言。

我国生物力学于1978年列入全国力学规划, 1980年11月在北京召开第一届生物医学工程会议。1981年7月在上海市复旦大学召开第一届全国生物力学会议, 收到论文79篇, 有84个单位、156位代表参加。冯元桢和毛昭宪等均到会作报告。1985年在太原由太原工学院为东道主, 召开第二届全国生物力学学术会议, 宣读论文80余篇, 有9位美国同行参加。会上作者倡议成立《农业生物力学》新学科^[10]。两届会议期间, 召开了六次生物固体力学和生物流体力学分组学术讨论会。1990年11月在珠海由华南理工大学为东道主, 召开第三届全国生物力学学术讨论会, 由华南理工大学出版社正式出版论文集《生物力学研究和应用》, 收入论文200余篇。作者报道了我国农业生物力学的研究情况^[11]。

1986年在上海出版《生物力学》杂志, 1991年第二届编委将《农业生物力学》列入征稿范围。

第三节 农业生物力学及农业生物 电磁学的研究现状

与农业生物力学及农业生物电磁学相关的文献, 大约有以下五个方面:

(一) 农业力学 以В. П. Горячкин为代表的农业力学自1918年问世以来, 前苏联农业科学院、白俄罗斯农业机械化研究所出版的论文集, 冠以“农业力学”或“农业力学问题”, 均

是一般力学在农业机械设计、研究领域中的应用,极少与生命现象产生联系。1968年匈牙利György Sitkei出版了《农业物料力学》,共18章,涉及农业物料的物理、力学、光学、热学、电学和流变等性质,此外还讨论了接触应力、撞击载荷、机械损伤、摩擦、空气及流体动力特性、有限元法、农业物料的压扁与压缩、农业物料的切割与粉碎等,基本上属于“农业力学”的体系,增加了物性学和少部分农业生物力学的内容。

(二) 物性学 美国宾州大学Nuri Mohsenin教授堪称物性学的最著名学者,他的三本巨著共1728页:《动植物材料的物理性质——结构、物理特征和力学性质》(1968、1970、1980三个版本);《食品及农业物料的热特性》(1980)和《食品及农业物料的电辐射特性》(1982);以物理学为主,部分内容可供农业生物力学及农业生物电磁学借鉴。

日本京都大学的《农产物性研究》(一、二、三集,1979,1985,1988)较全面地收集了日本国内外的研究成果。国内于1987年出版了赵学笃等合编的《农业物料学》,讨论了国内外关于农业物料的物理、流变、热、光、电、散粒体和流体动力学等特性。国内还有对大豆力学性质、茶叶摩擦特性、水果机械特性和损伤研究、松籽脱壳、酸枣仁脱壳的机理等物性研究,均属于农业生物力学的范畴。

(三) 生物物理的植物生理与生态学 为美国加州大学(洛杉矶)的Park S. Nobel (1974, 1983二个版本)所著,是近代研究植物流体力学的专著,对农业生物力学的建立很有启发,只是在灌溉控制和低污染植保工程中的应用,均未涉及。

(四) 动物力学 Leeds大学动物学教授R. McNeill Alexander的《动物力学》(1968, 1983二个版本),1977年又出版了《动物运动力学和力能学》,对役畜力学有一定参考价值,但尚需补充挽具及提高牵引力等内容。

(五) 农业生物电磁学 程极济等的《生物物理学》、G. B. Benedek和F. M. H. Villars的适用于医学和生物学的《物理

学》，坂村彻的《植物生理学》，R. 科埃略的《电介质物理学》和李国栋的《生物磁学及其应用》以及有关静电学、电动力学与电生理学等，对本书均有参考价值。

这几年来，在国内外的院校、研究所等单位，在农业物流变特性、节水灌溉控制、低污染植保工程、按种子活力选种的电选机、利用鸡蛋生物电鉴别无精蛋、热流变和电磁场在果品保鲜上的应用等方面作了大量研究，但“农业生物力学及农业生物电磁学”在国内外尚未形成体系，仅有美国马里兰大学 A.T. 约翰逊⁽¹³⁾ 提出建立“农业生物工程”的设想，亦未形成体系，正如冯元桢先生 1990 年 6 月致作者函中称：“美国早年生物力学发展之初，农业方面还有人开始研究工作，后来似乎停滞了，国际生物力学会议中，这方面的文章凤毛麟角，不大见……没有看到任何书本，不过我深信这是一门重要的学问，对以农立国的中国一定会做出很多贡献……”，“将这门学问（指农业生物力学及农业生物电磁学）在中国发扬光大，领先世界”。这是冯先生对作者的鞭策和希望，也是出版本书的原因之一。

第四节 农业生物力学及农业生物电磁学 的基本研究方法

参照力学和电磁学的传统研究方法，提出农业生物力学及农业生物电磁学的基本研究程序：

（一）了解研究对象 对研究对象如作物、役畜、果蔬、种子、农畜产品等生物体或农业生物物料的解剖学和组织学特征，从整体、器官到超微结构都要有所了解，如动物的各个系统（如呼吸系统、血液循环系统、骨骼肌肉系统），以及农产品（如果蔬、蛋肉奶等）的整体和细胞结构及超微结构的几何学特征，可作为空间边界条件。

（二）研究生命活动过程 对农业-生物体在生命活动过程中的物理-化学变化，特别是这些变化所伴随的力学、电磁学性

质的变化对生长发育有重要影响的，也要考察与了解。

(三) 测定力学及电磁学特性 农业生物体或生物物料的力学和电磁学性质的测定，要尽可能地与在体状态接近*，离体时也要创造在体的生物体环境，如新鲜骨的拉压试验，需要在体温条件下并浸泡在生理盐水中进行，并需注意：①参照物理学中的端本原则，如质量守恒、动量守恒和能量守恒等，以及农业生物体、生物组织或生物物料的本构方程，导出能说明所研究对象的微分方程或积分方程，必要时还要用热力学进行检查，是否满足相容方程条件。②由农业生物物料的工作条件和环境，确定边界条件。③生物体的力学中的应力-应变与电磁现象中的问题大多是非线性，有时需要作线性化处理或粘弹问题与弹性问题的对应处理。④如已建立合适的控制方程，可用解析方法解初值或边值问题，再作生理试验，以检验上述初值或边值问题的合理性。⑤在难以建立理论方程时，可借助于相似理论，进行模型试验，导出相似准则方程(π 方程)，再用实验的方法确定系数，得到半经验半理论的方程。也可从物理量经量纲分析，导出支配现象的相似参数，再用运动学、动力学的相似方法确定 π 方程。例如冯元桢和李仁师在1967年利用这一方法确定了红血球通过毛细血管时在血管壁上的压力分布。1972年又和颜荣次用同样的方法证实了肺泡片中压力和流量呈线性关系^{〔8〕}。说明这个方法是有效的。

(四) 农业生物力学及农业生物电磁学问题的数值解 在试验的基础上应用计算物理学(或计算力学)的方法，进行数值模拟，实现“纸面上的试验”，只要局部瞬时规律是正确的，就有可能建立长期全局图像，说明整个变化过程的数值解和过程图。这个方法成功地应用于天体物理、核武器爆炸、犁耕过程等，也可望用于农业生物力学及农业生物电磁学，水在植物体内的输运

* 我国第三军医大学成海平博士研制了HIC-I型生物活组织力学试验机，可以在体测量活体的力学性质，已通过鉴定，具有先进水平(《科技日报》，1991年11月29日)。