

前 言

生物机械量感受器是可以将机械量信号(如位移、速度、加速度、力、应变、振动等)中蕴含的机械能转化为生物电能(生物电信号)的一类感受器,是生物感知外界及内部刺激的重要感官。在残酷生存压力的推动下,生物机械量感受器完美集成微尺度、抗干扰、高可靠、高精度、高灵敏、低功耗等优异性能,极大地提高了生物的生存能力。“见窾木浮而知为舟,见飞蓬转而知为车”,师法自然是先贤留给我们的宝贵经验和启示。生物出色的机械量感知能力为新一代机械量传感技术的发展提供了创新灵感。

本书主要阐述生物机械量感受器内在功能机理及传感器仿生设计与制造理论,涵盖传感器仿生研究过程中具有普遍意义的基本规律,包括面向感受器功能机理的生物学研究和面向应用的传感器仿生研究两个重要方面。这些研究具有显著的多学科交叉融合特性,不但涉及基础学科,如物理、化学和生物学,还涉及众多专业学科,如材料科学、电子工程、机械工程、通信工程和计算机科学等。

全书共7章。第1章总结、评述目前传感器的分类及各自特点,重点对生物感受器和仿生传感器进行介绍,阐述生物感知和仿生感知的关系,对仿生机机械量感知进行初步分类,即传感、识别及定位。第2章阐述生物体表机械量感受器感知原理研究方法,具体包括构成要素分析(形态、结构和组织成分等)、响应特性研究、电生理试验、模型建立、测试仪器与表征方法。第3、4章对仿生机机械量传感功能进行介绍,阐述生物体表感受器微流量和微振动传感机理,以及仿生机机械量传感原理,提出基于该原理的仿生传感元件设计方法,构建从生物机械量传感机理到仿生工程传感元件设计的技术路线。第5章对仿生机机械量识别功能进行介绍,基于对感受器神经元频响规律的研究,阐述生物体表感受器微振动精准识别机理,提出基于该原理的仿生传感元件设计方法,构建从生物机械量识别机理到仿生识别元件设计的技术路线。第6章对仿生机机械量定位功能进行介绍,基于对生物捕食定位行为学的研究,阐述生物体表感受器微振动快速定位机理,提出基于该原理的仿生算法设计及仿生元件设计方法,构建从生物机械量定位机理到仿生定位元件设计的技术路线。第7章对提出的各类机械量仿生传感器件设计进行实验室验证和工程化应用试验与探索。

与本书内容相关的研究获得了国家自然科学基金创新研究群体项目(52021003)和国家自然科学基金重点项目(51835006)等的资助。在撰写本书过程中,吉林大

学任露泉院士给予了指导和支持，在此表示衷心感谢！此外，书中引用了国内外许多相关文献资料及团队的研究成果，在此也向文献作者及团队成员张俊秋、冯美、侯涛、宋洪烈、陈道兵、王可军、刘林鹏、王大凯、孟宪存、张昌超、赵宇峰、王柯、王泽等表示感谢！同时，向关心、支持本书著述与出版的专家学者和同事谨致谢意。

鉴于仿生感知原理与技术日新月异，前沿成果层出不穷，加之涉及多学科交叉融合，作者学识有限、笔力不逮，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器	1
1.1.1 传感器类型	1
1.1.2 传感器特点与挑战	2
1.1.3 机械量传感器	3
1.2 生物感受器	4
1.2.1 生物感受器的类型与特点	4
1.2.2 生物体表感受器	4
1.2.3 生物体表机械量感受器	5
1.3 仿生传感器	8
1.3.1 仿生传感器类型	8
1.3.2 仿生传感器特点	9
1.3.3 仿生机械量传感器及其发展现状	10
1.4 生物感知与仿生感知	20
1.4.1 生物感知功能	20
1.4.2 生物感知原理	22
1.4.3 仿生感知技术	22
参考文献	24
第 2 章 生物体表感受器感知原理研究方法	37
2.1 生物体表感受器构成要素分析	37
2.1.1 感受器形态	37
2.1.2 感受器结构	40
2.1.3 感受器组织成分	43
2.1.4 感觉神经元	46
2.2 生物体表感受器响应特性	47
2.2.1 感知结构动态响应特性	48
2.2.2 感知材料力学性能动态特性	49
2.2.3 感觉神经元电位信号动态响应特性	51
2.3 生物体表感受器电生理试验	53

2.3.1 试验样品制备及试验方法	53
2.3.2 试验仪器设备及测试原理	54
2.3.3 感受器电生理表征及生物电信号特征	57
2.4 生物体表感受器模型建立	58
2.4.1 感受器生物模型	59
2.4.2 感受器物理模型	62
2.4.3 感受器数学模型	64
2.5 生物体表感受器测试仪器与表征方法	68
2.5.1 感受器形态结构测试仪器与表征方法	68
2.5.2 感受器材料特性测试仪器与表征方法	71
2.5.3 感受器应激响应测试仪器与表征方法	74
参考文献	77
第3章 生物体表感受器微流量传感机理与仿生超敏传感	87
3.1 典型生物体表感受器微流量感知行为	87
3.2 蝎子微流量感受器多尺度形态结构特征	89
3.2.1 蝎子螯毛感受器表面分布特征	89
3.2.2 蝎子螯毛感受器外部形态特征	90
3.2.3 蝎子螯毛感受器内部结构特征	94
3.3 蝎子体表微流量感受器关键材料力学参数的测定	98
3.3.1 蝎子螯毛力学简化模型及静力学分析	99
3.3.2 蝎子螯毛力曲线测试试验方法	100
3.3.3 蝎子螯毛力曲线测试结果及分析	103
3.3.4 蝎子螯毛的材料力学参数计算	106
3.4 蝎子体表微流量感受器超敏感知机理	109
3.4.1 类不倒翁模型	109
3.4.2 复合梁结构应力集中模型	110
3.4.3 杠杆放大原理	116
3.4.4 蝎子螯毛共振感知特性	121
3.5 仿生微流量传感元件设计与制造	126
3.5.1 基于生物微流量感受器的仿生传感元件制造工艺	126
3.5.2 基于蝎子螯毛感受器的仿生传感器基本设计原理	130
3.5.3 基于蝎子螯毛感受器的仿生传感器模型优化与数值模拟	132
3.5.4 基于蝎子螯毛感受器的仿生传感元件制造方法	134
参考文献	137

第 4 章 生物体表感受器微振动传感机理与仿生超敏传感	143
4.1 生物体表感受器微振动感知行为	143
4.2 蝎子缝感受器感知功能要素	146
4.2.1 缝感受器的形态特征	146
4.2.2 缝感受器的结构特征	149
4.2.3 缝感受器的组织成分	153
4.2.4 缝结构表皮和皮下组织力学性能	157
4.2.5 缝结构与感觉神经元的耦合位点	158
4.3 蝎子缝感受器微振动超敏感知机理	160
4.3.1 应力集中效应与感受器功能单元超敏感知的内在联系	160
4.3.2 缝尖端应力集中效应与缝单元超敏感知的内在联系	162
4.3.3 尖端应力放大特性与 V 形沟槽结构模型的内在联系	163
4.4 蝎子缝感受器微振动全向传感机理	164
4.4.1 缝感受器全向感知行为学观察与分析	164
4.4.2 缝感受器阵列分布结构特点分析与表征	166
4.4.3 缝感受器全向感知结构模型与数值模拟	166
4.5 蝎子缝感受器应力/应变放大模型及其放大机理	169
4.5.1 基于缝感受器结构-材料耦合的应力/应变放大模型	169
4.5.2 缝感受器非连续刚性层与柔性层耦合结构的应力放大效应	170
4.5.3 缝感受器砖泥镶嵌刚柔耦合结构的应变放大效应	174
4.6 具有应力集中特征的缝感受器结构安全性机理	177
4.6.1 缝感受器离散化结构分布与应力缓冲性能	178
4.6.2 缝感受器层状梯度结构与抗断裂性能	179
4.6.3 节肢弹性蛋白与缝感受器优异抗疲劳性能	181
4.6.4 缝单元超敏感知性能与止裂性能兼顾机理	182
4.7 基于缝感受器的仿生传感元件设计与性能分析	188
4.7.1 仿生六轴力/力矩应力集中传感元件	189
4.7.2 仿生超敏柔性传感元件	204
4.7.3 仿生超敏、全向感知传感元件	218
4.7.4 超敏与高延展性协同的仿生柔性传感元件	227
4.7.5 超敏与高耐久性协同的仿生柔性传感元件	232
4.7.6 超敏与高线性协同的仿生柔性传感元件	238
4.7.7 高稳定性仿生传感元件	241
4.7.8 低功耗仿生传感元件	248
参考文献	257

第 5 章 生物体表感受器微振动识别机理与仿生精准识别	267
5.1 蝎子体表感受器微振动识别行为	267
5.2 蝎子缝感受器神经元频响规律	269
5.2.1 感知结构与神经元作用关系	269
5.2.2 神经元分布特性	269
5.2.3 感觉神经元不同频率振动刺激下的响应规律	271
5.3 蝎子缝感受器前端功能结构形态特征	275
5.3.1 微振动信号传递路径	275
5.3.2 前端功能结构宏观形态特征	278
5.3.3 前端功能结构微观形态特征	279
5.3.4 前端功能结构材料特性可视化分析	281
5.3.5 前端功能结构动态力学特性	283
5.4 蝎子缝感受器的缝单元两侧功能结构形态特征	287
5.4.1 缝单元两侧孔洞结构形貌特征	287
5.4.2 缝单元尾部形变特征	289
5.5 蝎子缝感受器微振动精准识别机理	290
5.5.1 低频振动信号滤波机理	290
5.5.2 微弱信号放大效应	291
5.6 基于缝感受器功能结构的敏感元件设计与制造	294
5.6.1 受前端功能结构启发的应变传感元件	294
5.6.2 受缝感受器功能结构启发的宽域仿生应变传感元件	303
5.6.3 受缝感受器功能结构启发的高灵敏仿生柔性压力传感元件	309
5.6.4 受缝感受器裂纹结构启发的高性能仿生压力传感元件	314
5.6.5 受缝尾部结构形变特征启发的仿生力传感元件	322
5.7 受蝎子缝感受器启发的多类型仿生应变传感元件集成	332
5.7.1 基底材料的仿生设计与集成机理	332
5.7.2 柔性垂直集成的机械连接与信号通信	336
5.7.3 材料类柔性传感器的垂直集成与信号解耦	340
5.7.4 结构类柔性传感器的垂直集成与信号解耦	342
参考文献	344
第 6 章 生物体表感受器微振动定位机理与仿生快速定位	349
6.1 生物振动定位行为	349
6.1.1 一般生物的振动定位行为	349
6.1.2 蝎子的振动定位行为	353
6.2 蝎子定位感受器及其分布特征	356

6.2.1 蝎子定位感受器的缝单元几何特征	356
6.2.2 蝎子定位感受器的空间位置分布	358
6.3 蝎子捕食定位行为学试验	358
6.3.1 蝎子捕食定位反应的行为学测试装置	359
6.3.2 蝎子捕食定位反应的行为学观察试验	361
6.3.3 蝎子捕食定位行为响应	361
6.4 蝎子感受器微振动快速定位机理	363
6.4.1 蝎子振源定位机理	363
6.4.2 蝎子的兴奋-抑制定位模型	364
6.5 蝎子振动感知结构的信号处理特性	365
6.5.1 缝感受器缝单元阵列结构有限元模型建立	366
6.5.2 缝感受器缝单元阵列结构有限元结果分析	367
6.5.3 缝感受器缝单元结构与应力响应回归分析	375
6.5.4 缝感受器缝单元阵列结构信号处理机制	379
6.6 仿蝎子振源定位原理的算法设计与装置研制	381
6.6.1 仿蝎子振源定位装置	381
6.6.2 仿蝎子振源激励-应激神经元定位方法	383
6.6.3 仿蝎子振源定位机理的位置指纹定位方法	386
6.6.4 仿蝎子振源定位装置集成制造与性能测试	392
参考文献	400
第 7 章 高性能机械量仿生传感器件应用	406
7.1 机械量仿生传感器件人体健康监测应用	406
7.1.1 人体状态监测	406
7.1.2 室内人体行动轨迹检测及定位	417
7.1.3 人体行走姿态及步态识别	431
7.2 机械量仿生传感器件工程化应用	456
7.2.1 微压力、微质量与气体流动状态检测	456
7.2.2 生物软组织力学性能检测	470
7.2.3 桥梁振动状态检测	471
7.2.4 数控机床刀具健康状态监测	478
7.2.5 车辆底盘运动状态检测	489
7.2.6 车况信息监测	489
参考文献	491

第1章 绪 论

1.1 传 感 器

1.1.1 传感器类型

传感器是用于感知被测量信息，并按一定规律将被测量转换成同种或其他量输出(通常是电信号)的检测类器件。传感器通常由敏感元件和转换元件组成，敏感元件直接感受被测量的变化并做出相应响应，转换元件则将敏感元件的输出信号转换为易测量和处理的信号^[1]。

传感器常用分类方法如下^[2]：

(1)按检测原理分类。现有传感器通常以物理、化学及生物学等基础学科的规律或定律等作为检测原理，以实现输入信号至输出信号的转换。因此，根据传感器检测原理，可将其分为电阻式、电感式、电容式、压电式、磁电式、热电式、光电式、光纤式及流体式等传感器。

(2)按被测量分类。根据被测量或传感器应用场景进行分类，传感器可大致分为机械量检测传感器、热工量检测传感器及其他物理参量检测传感器。其中，机械量检测传感器包括位移传感器、力传感器、扭矩传感器、速度传感器、加速度传感器、流量传感器、液位传感器等；热工量检测传感器包括温度传感器、热量传感器等；其他物理参量检测传感器包括浓度传感器、密度传感器、黏度传感器、酸碱度传感器等。

(3)按能量关系分类。该分类方法依据敏感元件与被测对象间的能量传递方式进行分类。根据传感器工作时敏感元件是否需要从外部获取能量，可将传感器分为无源型和有源型(能量控制型和能量转换型)传感器。其中，能量控制型传感器先将被测量的变化转换成电参量的变化，再通过外部激励源的作用输出电信号，如电阻式、电感式、电容式等；能量转换型传感器能够直接将被测量转换成电信号进行传输，如热电偶式传感器、压电式传感器等。

(4)按信号转化特征分类。该分类方法按照被测量转换形式的差异性，将传感器分为物性型和结构型传感器。其中，物性型传感器的敏感元件自身特性会随着被测量的变化而产生变化，如半导体压力传感器，当被测量作用于半导体时，其电导率会改变，进而引起电信号的变化以实现对被测量的检测；结构型传感器利

用敏感元件结构形态的变化来检测被测量,如电容式流量传感器,当被测流量作用在电容的动极板上时,动极板移动引起电容变化,进而通过电信号的变化来测量流量的大小。

(5) 新型传感器。通常情况下,一种传感器仅能检测一种被测量,而多功能传感器能够同时测量两种或两种以上的被测量。新型传感器主要向多功能集成与微型化方向发展。组合不同类型的敏感元件可以形成新型多功能传感器,例如,温湿度传感器,其内部包含温度检测敏感元件和湿度检测敏感元件,能够同时测量温度和湿度;微型传感器将微纳加工技术与传统传感技术相结合,通常采用刻蚀、沉积等技术制造而成,具有体积小、质量轻、功耗低、集成度高、智能化等特点。

上述传感器分类主要从传感器原理与用途方面来考虑,不同传感器类型之间具有交叉、重叠等关系。随着材料学与先进制造工艺的飞速发展,未来将有大量新型传感器不断涌现,传感器分类有待进一步细化。

1.1.2 传感器特点与挑战

传感器具有微型化、数字化、智能化、高精度、高可靠性等多个特点,其在工业智能化、环境监测、医疗健康、智能交通等领域的广泛应用促进了传感器领域的蓬勃发展。然而,在实际应用中,传感器还面临以下诸多挑战^[3]。

(1) 传感器低线性度。线性度是指传感器输入与输出之间的关系和理想直线关系的偏离程度,其影响传感器信号处理难度及检测准确度。一般地,通过静态标定测试所获得的输入数据点与输出数据点不会完全分布在一条直线上,因此这些数据的线性拟合十分关键,其线性度是决定传感器精度参数的重要因素之一。

(2) 传感器量程与灵敏度互斥。量程是指传感器的测量范围,灵敏度是指传感器单位输入变化所引起输出的改变。以压力传感器为例,为提高传感器的量程,通常采取增大传感器敏感膜片单元物理尺寸的改进方式;然而,随着尺寸的增大,传感器灵敏度又会降低,二者存在相互制约的关系。

(3) 传感器迟滞效应。迟滞性,即回程误差,用于描述传感器在输入量由小到大(正行程)及输入量由大到小(反行程)变化期间,输入输出特性曲线的不重合程度。对于同一大小的输入信号,传感器正、反行程输出信号的最大差值称为回程误差。

(4) 传感器输出漂移。输出漂移主要包含零点漂移和灵敏度漂移,在传感器中普遍存在,会对传感器的精度造成影响。零点漂移是指传感器在输入量不变的情况下,输出零点随时间或环境因素发生偏移的现象;灵敏度漂移是指传感器输出信号与实际输入量之间的比例关系发生偏移的现象。具体地,随时间延长发

生的信号偏移称为时间漂移(时漂),随温度变化发生的信号漂移称为温度漂移(温漂)。

1.1.3 机械量传感器

机械量传感器是指将被感知对象在运行过程中产生的随时间变化的各类以机械能为载体的机械量信号(如流量、振动、声音、触觉力等)按照一定规律转换成电信号或其他所需形式信息的传感器,它一般由敏感元件、转换要素、测量/辅助基本电路等组成^[4,5]。敏感元件主要负责对被测信号量进行拾取并输出具有对应关系的模拟信号量,该模拟信号量经由测量/辅助基本电路进行加工处理和变换。

机械量传感器依据工作原理,可分为电阻式传感器、压电式传感器、电容式传感器、光电式传感器等;按照检测信号的物理特征差异,可分为振动传感器、流量传感器、声传感器和触觉传感器等;按照应用场景不同,又可分为位移传感器、速度传感器、加速度传感器、力传感器等。由于一些机械量传感器涉及的检测与转换原理仍处于探索阶段,目前针对机械量传感器的分类难以给出固定的模式和框架。如何将这些机械量传感器进行科学分类,是传感器领域一个重要课题^[6,7]。

设备运行所产生的实时机械量信号中包含其状态参数,因此机械量传感器可监测工业设备运行状态,是我国高端制造业重点发展技术领域中应用最为广泛的一类传感器。目前,机械量传感器已成为测量仪器、智能化仪表、自动控制系统等装置中必不可少的感知元件,其应用领域包括基础科学研究、医学诊断、航空航天、海洋探测、军事国防、可穿戴智能电子装备、物联网商检质检等^[8,9]。例如,在航空航天领域,智能机器人、空间站及卫星的速度、加速度、位置、姿态、振动等每个参数的检测都必须由多种机械量传感器来完成。高速旋转的航空发动机因振动产生的交变应力可能导致材料失效、强度减弱及噪声增大等故障,基于振动传感器的振动监控系统对发动机损伤和非正常磨损进行早期检测,可有效提高航空发动机工作的安全性和可靠性。在高端制造领域,用于加工大传动轴、大涵道比涡扇叶片、大口径光学镜片等零部件的高端装备离不开高精度流量传感器、振动传感器、压力传感器等对复杂工况环境的实时监测。在机器人领域,触觉、振动等机械量传感器是机器人智能感知系统的重要组成部分。

机械量传感器作为“工业4.0”的终端神经触角,是实现“中国制造”向“中国智造”转型的重要基础。然而,传统型的机械量传感器很难满足高精尖重点领域对高端传感器在低功耗、高稳定性、微型化、高精度、可移动性强等方面的优异性能集成设计需求。因此,新一代高性能机械量传感器的研发是智能制造重点领域的共性技术需求。

1.2 生物感受器

1.2.1 生物感受器的类型与特点

基于感受器所在的部位、接收刺激的来源,可将生物感受器分为体表感受器、内感受器、本体感受器。其中,体表感受器分布在生物体表与外界环境的界面处,用于感知外界刺激,获取光、热、机械量、磁、化学等信息^[10-14];内感受器分布于内脏和躯体深部,感知生物体内部的物理性和化学性刺激,如温度、压力、组织液浓度、渗透压等^[15];本体感受器分布于肌腱、肌肉、关节及韧带等处,感知自身运动和平衡状态变化时所产生的信号,如位置、运动、负重等,它是一种特化的神经末梢结构,主要包含肌梭、高尔基腱器官等^[16]。本书关注的仿生原型属于生物体表感受器的范畴,因此仅对体表感受器进行进一步探讨。

1.2.2 生物体表感受器

在工程实际中,传感器分类体系通常以被测信号物理特性、化学特性为依据,同理,对生物体表感受器的分类也可以从信号特征的角度切入(图 1.1)。基于信号物理特性、化学特性的不同,生物体表感受器能够感知的信号可分为化学信号和物理信号,相应的生物体表感受器可分为化学感受器和物理感受器。其中,化学信号一般指空气或水体中存在的化学刺激,化学感受器可依据感知距离、分布位置、功能要素组成差异等分类^[17,18],本书对化学感受器的内容不展开介绍。物理信号主要包括光、热(红外)、机械量、磁、电等,信号传递需要以一定形式的能量为载体,能量种类主要分为光能、机械能、磁能、电能等。感受器接受刺激的本质是能量转换的过程,即蕴含某种类型能量的信号通过刺激神经元产生动作电位进而转变成生物电能的过程^[19]。因此,以信号的能量特征差异性为依据,生物体表物理感受器可进一步分为视觉(光)感受器、红外感受器、机械感受器、磁感受器和电感受器等。对上述感受器的进一步分类,多以感受器分布、形态、功能等因素的差异性为依据。例如,自然界中的视觉感受器复杂多样,目前动物学研究尚未对视觉感受器进行确切的精细化分类,但按照视觉感知功能单元数量的不同,大致分为复眼和单眼两类^[20,21]。其中,昆虫的视觉感受器多为复眼,而简单的无脊椎动物和哺乳动物的视觉感受器多为单眼。又如,针对红外感受器的研究主要集中在吉丁科昆虫、蛇、吸血蝙蝠等少数几种生物,研究案例较少,因此其分类多以生物类型为依据^[22]。

在众多类型的物理感受器中,生物体表机械量感受器是研究较为广泛的一类

生物感受器，基于刺激信号物理特征的差异性可细分为流量、触觉、听觉、振动等多种类型的感受器^[17,18]。其中，流量感受器因信息传递介质的不同，又分为水流量感受器和空气流量感受器^[23,24]，而触觉感受器依据物种的差异性进一步分为植物触觉感受器和动物触觉感受器^[25,26]。

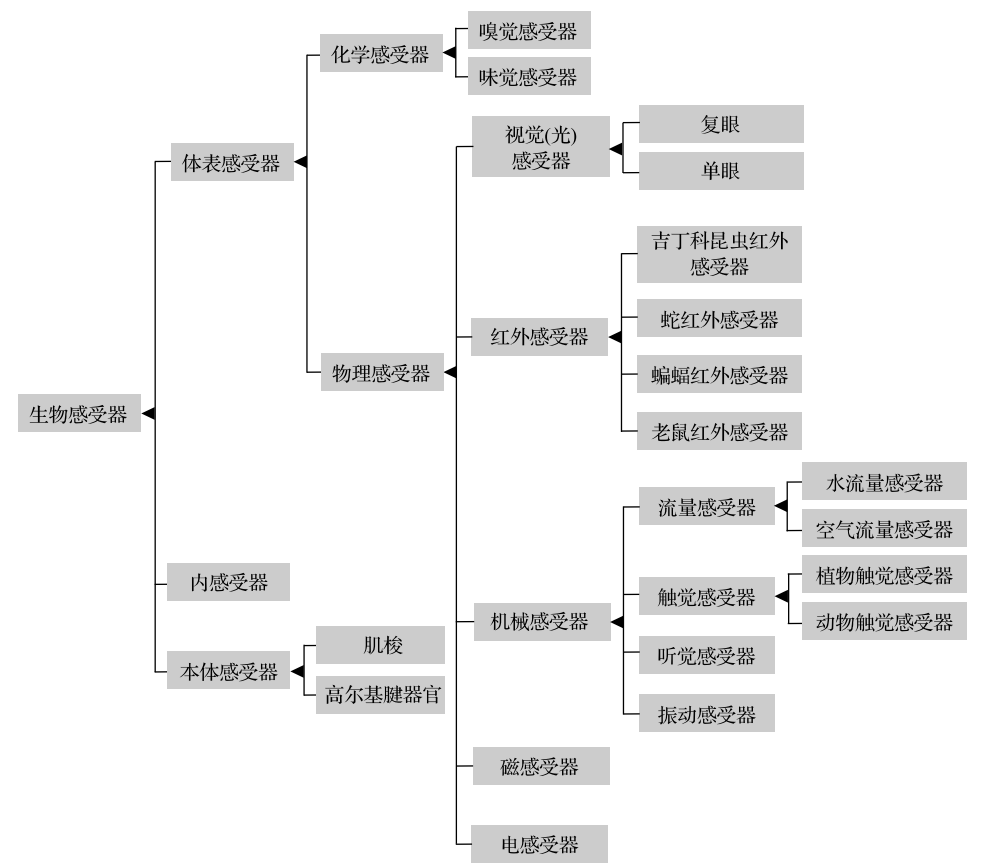


图 1.1 生物感受器的种类

伴随环境和种群的差异，生物感受器呈现类型繁多、功能各异的特点。科学、合理的分类方法有助于相关学者对纷繁复杂的生物感受器进行有效归类，并揭示同类型感受器的普遍性、特殊性原理。目前，生物体表物理感受器在机理研究程度和类型挖掘广度上仍处于初步探索阶段，完善体表感受器分类体系任重道远。

1.2.3 生物体表机械量感受器

1. 机械量信号的含义及分类

生物感知外部信息是获取外部信号并转导为生物电信号(神经冲动)的过程，

这种转导功能也被称为换能作用,即将不同信号中蕴含的机械能、化学能、光能等各类能量通过感觉神经元转换为动作电位^[27]。虽然各类生物体表感受器繁简不一、功能多样,但都能凭借感觉神经元的换能功能将作用于感受器上的刺激转变为传入神经纤维上的动作电位,每一类感受器都可视为一种生物换能器,这不仅在宏观上实现了能量形式的转换,更是将能量中承载的环境信息编码为神经系统可识别分析的电位信息。例如,动物在通过听觉器官感知各种声音的过程中,具有复杂波形特征的机械能依次经由听觉结构的高效收集和听觉神经元的换能作用进行传导,最终在神经中枢形成听觉概念^[28,29]。又如,人类肉眼所看到的各种物像,是物体反射的光线经过视觉感受器成像与换能,将光能转化为电信号,继而触发神经冲动,传递至大脑视觉中枢,最终形成的视觉感知。

机械量信号是以机械能为信息载体的各类物理信号的统称,按照机械能(波形、频率、幅值、强度等物理表现形式)的不同,它可进一步分为振动信号、声音信号、流量信号、触觉信号等。

振动信号又称为基底振动信号^[30],与传统意义上的宽泛振动信号不同,专指具有特定物理属性的某一类振动信号。基底振动信号的传播主要发生在两种不同介质(固体/空气、水/空气、固体/水等)之间的界面处。大量研究表明,生物间通信涉及的振动信号是一种典型的界面波,即瑞利波或弯曲波^[31]。其中,瑞利波是纵波和横波的组合,可在固/气、液/气、固/液等两种介质界面处传播;而弯曲波在直径尺寸小于结构长度和信号波长的活体植物叶与茎部等结构处传播。传递振动信号的固体介质具有非连续性、非弹性等物理性质与较高的衰减因子,这使得低频振动信号极易被吸收,高频信号又极易被散射^[32],上述特点决定了以界面波为信号的交流方式是一种典型的近距离交流方式。

声音信号也是一种机械波,但与基底振动信号不同的是,它是典型的纵波,以空气为介质进行传播,并且振动方向与传播方向相同。在信号传播过程中,空气分子会有节奏地振动,使周围空气产生疏密变化,呈现疏密相间的特征。

流量信号是流体物质自身流动所产生的一类机械量信号,根据流体性质的不同,生物感知的流量信号主要包括空气流量信号和水流量信号^[23,33,34]。空气流量信号和声音信号之间存在显著差异。需要明确的是,流量信号并非一类机械波,它实现机械能传递的方式是凭借流体自身的流动。声音信号在空气介质中的传播类似于振动信号在固体介质中的传播,虽然信号所经之处的介质粒子在自身位置周围实现了周期性振动,但介质本身并未发生整体移动。此外,流量信号通过流速、流向等物理量进行表征,而声音信号则通过声压级(分贝)、频率和幅值等物理量进行表征。

触觉信号也是一种典型的机械量信号。触觉信号是施加外部刺激的物体与具有触觉感知功能的生物体表直接作用所产生的接触、滑动、振动等机械刺激的统

称^[35-37]。与振动、流量等机械量信号的传递过程不同,触觉信号的传递不需要介质,而是施加刺激的物体与感受器所在生物表面直接接触作用。

上述对机械量信号的分类为明确生物机械量感受器的类别奠定了基础,各类机械量信号物理特性的不同,是导致生物机械量感受器在形态、结构、功能原理等方面存在显著差异的重要原因之一。

2. 机械量感受器的种类与特点

不同类型机械量信号物理特性之间存在显著差异,无法凭借单一功能的生物感受器完成对所有类型机械量信号的高效感知。因此,受感知环境、信号物理特性、物种多样性等因素的共同制约,自然界中生物已进化出种类丰富、类型多样的机械量感受器。这些机械量感受器可分别对不同物理特性机械量信号进行高效感知。根据生物感受器的定义及机械量信号的分类,生物机械量感受器主要包括触觉感受器、声音感受器、流量感受器及振动感受器等。

触觉感受器是分布在生物体表,能够感知接触、滑动、按压等触觉刺激的一类机械量感受器。触觉是生物与被感知对象直接接触产生的感觉,在生物彼此互动过程中发挥重要作用。目前,关于生物触觉感受器的研究主要集中在人体皮肤、触须等动物触觉感受器及自然界中含羞草叶片、捕蝇草触毛等植物触觉感受器上。

人体触觉感受器主要存在于皮肤中。基于形态特征的差异,触觉感受器可分为梅克尔细胞、迈斯纳小体(Meissner corpuscle)、鲁菲尼小体(Ruffini's corpuscle)和帕奇尼小体等四种类型。皮肤组织自身的力学性能和微观结构对触觉感受器的感知性能有较大影响^[38,39]。例如,指纹的纹理在增加手与物体之间的摩擦力以实现物体抓取的同时,也会影响对物体表面纹理的动态检测精度^[40-42]。此外,皮肤是由弹性模量相差10~10000倍的表皮、真皮和皮下组织等部分构成的层状组织,层间通过互锁的微脊结构连接,皮肤层状组织的梯度特征和彼此间的微脊结构互锁特征,有助于触觉信号在接收场内的高效集中及向深层感受器的高效传递^[43,44]。又如,触须是啮齿类动物面部触觉神经末梢和触觉感受器的受体,具有强大的触觉感知能力^[45]。鼠与侏儒鼯依靠触须在黑暗环境中完成定向、捕食和求爱等生命活动。在感知过程中,触须并非被动地遇到感知对象而偏转,而是主动地往复扫略^[46]。此外,触觉感知能力并非动物的专属,自然界中的许多植物在其体表同样进化出了性能非凡的触觉感受器,以满足防御、捕食、授粉等生存需求,其中捕蝇草触毛和含羞草叶片的体表感受器是众多触觉感受器中有待深入研究的两类代表^[47]。

声音感受器,又称为听觉感受器,听觉指的是声音刺激听觉器官产生的感觉。关于生物听觉感受器的研究主要集中于人类和一些听觉感知系统发达的动物感受器上。人耳是研究最为广泛的一类听觉感受器。自然界中,少数哺乳动物(如蝙蝠

和海豚)可以感受到峰值约为 100kHz 的超声波^[48,49]。其中,蝙蝠对高频信号的感知,得益于其耳蜗中央凹区域(在基底膜和下丘之间的扩展区域称为“声中央凹”或“听觉中央凹”)外毛细胞上的短立体纤毛束(约 0.8 μm)。这种纤毛尺寸显著减小了外毛细胞的表面积和膜电容,从而提升对高频声波信号的敏感性^[50]。除哺乳动物外,昆虫也进化出多种性能优异的听觉感受器,主要类型为鼓室听觉感受器和天线听觉感受器^[51-53]。

流量感受器是指对气流及水流波动进行定向感知的感受器。在气流波动感知方面,有关节肢动物体表流量感受器的研究较为广泛,如蟋蟀尾部的丝状毛^[54]、蜘蛛运动足上的盅毛等^[55,56]。鱼类和水生两栖动物的侧线也是一种极为灵敏的流量感受器,能够快速感知皮肤表面水流的扰动^[57,58]。侧线的基本功能单元是由纤毛感觉细胞(方向敏感性细胞)、套细胞、支柱细胞等功能细胞组成的神经丘^[59]。根据位置的不同,神经丘又分为鱼表皮之上的表面神经丘和嵌在皮下充满液体管道中的管道神经丘^[34,58,60-62]。表面神经丘对流体速度响应较为敏感,而管道神经丘对加速度响应较为敏感^[63,64]。

振动感受器是接收振动信号,并将其转化为电信号的感受器。振动感知是自然界中较为常见的一种通信方式。现有统计数据表明,有超十万种生物通过振动信号进行交流^[65],但针对相关振动感受器的研究较少,主要集中于蜘蛛、蝎子两类蛛形纲生物。

1.3 仿生传感器

1.3.1 仿生传感器类型

仿生传感器最初的研究目标是开发与人体五大感觉器官相似的传感装置,通过模仿人体感官对外界信号的感知机制,赋予机械设备或装置类似人类的感知能力,以提高工业生产效率。随着科学的进步和发展,关于生物材料、结构等方面的研究越来越丰富,仿生材料得到广泛的应用,微纳结构的多样化制作工艺也日渐成熟。在此基础上,形成的仿生传感器类型也多种多样。然而,目前的仿生传感器分类还没有统一、规范化的定义,有按照人类五大感觉器官进行分类的方式,主要包括仿生视觉、嗅觉、听觉、味觉和触觉传感器^[66];也有按照仿生生物原型进行分类的方式,主要包括仿人类五大感官的传感器、仿植物的传感器及仿其他动物的传感器等^[67-69]。

除上述分类方式外,仿生传感器也有按生物特殊功能启发来划分的例子。在自然界的生物中,有众多优异功能特性的典型材料或结构,概括来说,这些材料或结构包括刚性、柔性、延展性、透气性、黏性、发光、坚韧、自愈、润湿、再

生、形变、变色等各种功能特性^[70-72]。以自愈功能为例,自然生物在日常行为活动过程中,由于过度拉伸、刮擦或切割,伤口的产生不可避免,生物系统通过在皮肤伤口中分泌活性分子^[73]或植物叶片的可再生蜡层来恢复这些损伤^[74,75],使器官得以持续运作。又如黏性、透气性等功能,通常用于人体可穿戴方面的表皮仿生传感器,不但能够贴附于关节等具有不定形曲面的身体部位,还要尽量不干扰汗液的排出,以免产生不适感。这种自黏附功能与透气性功能在生物中都有极为完美的原型与之相匹配,如章鱼吸盘、壁虎脚掌和贻贝足丝等表面结构能够解决皮肤可黏附问题^[76],海绵、硅藻、植物纤维等多孔网状结构能够解决透气性问题^[77]。因此,针对不同应用领域,根据特定功能对仿生传感器类型进行划分也是传感器群体中的一种特殊分类方式。

1.3.2 仿生传感器特点

仿生传感器的特点主要涵盖两方面:一方面是生物敏感感知要素的仿生,包括但不局限于敏感材料、结构的仿生设计;另一方面是生物敏感感知机制与功能的仿生。前者主要侧重于依托生物器官组织中的特殊材料或结构设计,结合当前的传感技术发展水平,达到某种性能的提升或赋予某种传感功能;后者则主要侧重于对生物特殊的感知功能深层次原理及作用机制开展研究,进而发展传感新原理、新技术,为新型传感器的研发奠定丰富的基础传感理论。

研究仿生敏感材料与结构是发展仿生传感器的核心内容之一,目前该领域研究极为活跃。自然界中大部分的材料或结构都有可能成为仿生传感器的设计源,即便仿生对象和传感器两者之间并没有特别直观的联系。例如,在自然界中,蜘蛛丝是结网型蜘蛛用来捕猎的重要工具,因具有高强度、高韧性、高杨氏模量而著名,其性能甚至优于尼龙-66、凯夫拉纤维、碳纤维(carbon fiber, CF)等人造材料^[78]。蜘蛛的腹部分布着能产生七种腺丝的多个腺体,各种丝组成了结实的蜘蛛网。其中,牵引丝(大壶状腺丝)的力学性能最优异,其断裂强度可达1652MPa,也是构成蜘蛛网骨架的框丝。蜘蛛丝是一种核壳结构的纤维,内部由纳米原纤维组成,纳米原纤维的内部类似渔网结构。因此,模仿蜘蛛丝的结构与材料组成,是研发具有超强韧性与强度人造纤维的重要途径。除此之外,研究人员在蜘蛛丝优异力学性能的基础上,基于蜘蛛丝的空气动力学特性开展了其在流量传感方面的研究^[79]。Norte和Bessa等学者观测到,蜘蛛网在外界激励下表现出极强的振动特性,能够在微弱外力下持续发生振动,并具有极高的信噪比。受蜘蛛网络结构布局启发,他们将纳米技术与机器学习相结合,设计出一种基于微机电系统(micro-electromechanical system, MEMS)的硅微机械振动传感器,该传感器具有高固有应力、高屈服强度、高温稳定性等特性^[80]。此外,蜘蛛丝还具有湿度/水响应、水分收集、光导、热导、扭转能量耗散、形状记忆等性能,受此启发,研究人员可

制造具有光波导功能的仿生人造功能纤维^[81]、微流控芯片^[82]、湿度传感器^[83,84]、pH 传感器等^[85]。

挖掘深层次的生物感知作用与功能机制、形成新的传感技术与原理是仿生传感器研究中的另一核心内容。生物独特的感知机制将生物感官的各组成要素(如材料、结构、神经等)按照一定的规律形成系统架构,为仿生传感器设计提供思路。例如,人体皮肤作为典型的生物触觉感知器官,能够感知压力、振动、应变等多种激励信号,其触觉感知功能机理对于仿生皮肤传感器的发展至关重要。20 世纪 90 年代,Julius 和 Patapoutian 分别针对皮肤感官系统中触觉和痛觉触发的分子机制及外界激励信号与生物信号之间的转导机制开展研究,并因此于 2021 年获得诺贝尔生理学或医学奖。人体皮肤的感觉系统不仅是与外界环境信号的交换媒介,也在疾病发生与发展、诊断与治疗中具有重要作用。研究表明,位于表皮层下的真皮层内分布着多种机械感受器、血管、汗腺和自由神经末梢,它们使人体产生触觉^[86]。各种类型的机械感受器都有自己的触觉感应机制来响应特定的刺激。例如,皮肤中的迈斯纳小体和帕奇尼小体属于快速适应型机械受体,主要对动态激励具有快速响应功能,而梅克尔盘(Merkel disk)和鲁菲尼小体属于缓慢适应型机械受体,主要响应静态激励信号。当皮肤受到触觉刺激时,皮下感受器对这些激励信号进行转导编码形成一种由离子传输引起的高频动作电位^[87],产生的动作电位通过神经纤维传递到大脑,由众多神经元和突触组成的神经网络将动作电位加工成大脑触觉的多层次特征^[88]。在揭示皮肤的触觉功能机制后,一系列仿生电子皮肤应运而生。例如,基于真皮中褶皱、互锁结构的结构设计或基于皮肤组织材料的梯度弹性模量分布的设计,能够启发当前压力传感器的设计,进一步提升其灵敏度性能^[89,90]。在皮肤触觉功能机制的基础上,鲍哲南等研发出一种仿生传入神经系统,该系统主要包括仿生触觉传感器、人造神经元和突触晶体管,不仅模拟了皮肤下的微纳结构,而且模仿了皮肤传入神经系统的触觉产生机制,实现了生物神经系统的替代^[91]。

1.3.3 仿生机械量传感器及其发展现状

仿生机械量传感器是指在机械量传感器的研究基础上引入仿生元素,即通过师法自然的方法,在自然生物感受器的独特结构、构成材料、功能机理等启发下,研发出的一类具有鲜明仿生特色的机械量传感器。仿生机械量传感器的分类方法与传统机械量传感器相似,可以通过工作原理(电容、电阻、压电等)或者机械量信号(力、振动、流量等)来进行分类。目前,国内外已经报道了多种多样的受生物启发的仿生传感器,但大部分仿生传感器仍停留在实验室阶段,仿生传感技术的发展还处于幼年期。受限于当前的材料、微纳结构等复杂制造技术,目前还没有形成适用于大面积、大批量制造仿生传感器的工业工艺流程与统一标准。对于