编辑推荐·综述

微小型压电驱动机器人及其无系留驱动技术综述

杨俊杰，宋仙钊，张萌颖*，赵全亮
（北方工业大学 机械与材料工程学院，北京 100010）

摘要：随着新型功能材料驱动技术与微纳制造技术的发展，微小型机器人凭借小尺寸、高能效的优势展现出巨大的应用潜力。作为其核心基础技术，微小型机器人的驱动方式受到广泛关注。与受制于小型化瓶颈的传统电机驱动相比，基于新型功能材料的驱动器及其系统已成为该领域的研究热点。压电材料具有高效双向能量转换机制，兼具低功耗、快速响应和高输出力等优点，在微小型机器人驱动中展现出突出优势，同时也面临驱动位移较小、驱动电压高于常规机载电源等挑战。本文围绕微小型压电驱动机器人展开综述，介绍压电驱动器及其匹配传动机构，梳理移动式与固定式机型的研究进展。在此基础上，分析微小型机器人的无系留运动技术，探讨适配不同驱动模式的驱动电路特性，重点评述压电式微小型机器人的无系留驱动技术，汇总在其核心压电驱动电路方面的研究成果，并归纳当前无系留微小型压电驱动机器人的发展现状。本文系统总结微小型压电驱动机器人的研究进展，对无系留压电驱动技术进行重点分析与讨论，为后续实用化研究提供有益参考。

关键词：压电驱动；微小型机器人；无系留；驱动电路

中图分类号：TP242　　**文献标志码：**A

DOI: 10.3724/jfmd.2509075　　CSTR: 32180.14.jfmd.2509075

Review of micro-miniature piezoelectric-driven robots and their untethered actuation technologies

YANG Junjie, SONG Xianzhao, ZHANG Mengying*, ZHAO Quanliang
(School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100010, China)

Abstract: With the advancement of novel functional material-driven technologies and micro-nano manufacturing techniques, micro-miniature robots have demonstrated significant application potential due to their compact size and high efficiency. As a core foundational technology, actuation systems for micro-miniature robots have attracted considerable attention. In contrast to traditional motor-driven approaches limited by miniaturization constraints, actuators and drive systems based on novel functional materials have become the primary focus in micro-miniature robotics research. Piezoelectric materials, utilizing

收稿日期：2025−09−21；　**修订日期：**2025−11−05
基金项目：北京市教育委员会科学研究计划项目资助（No. KM202410009012）
作者简介：杨俊杰（2002— ），男，硕士研究生，研究方向为微小型机器人（E-mail: 2802604982@qq.com）
通信作者：张萌颖（1990—），女，讲师，研究方向为微机电系统与微机器人技术（E-mail: myzhang@ncut.edu.cn）

their efficient bidirectional energy conversion mechanism, offer distinct advantages in micro-miniature robotic applications, including low power consumption, rapid response, and high output force. However, they face challenges such as limited displacement and operating voltages that exceed those of conventional onboard power supplies. This review focuses on micro-miniature piezoelectric-driven robots, first introducing piezoelectric actuators and their associated transmission mechanisms, then summarizing research achievements in both mobile and stationary micro-miniature piezoelectric robots. It further analyzes untethered motion technologies for micro-miniature robots, examines characteristics of drive circuits tailored to different actuation methods, and specifically addresses untethered drive technologies for piezoelectric micro-miniature robots. The paper summarizes key developments in piezoelectric-drive circuits and the current state of untethered micro-miniature piezoelectric-driven robots. This work provides a systematic review of recent progress in micro-miniature piezoelectric-driven robots, with particular emphasis on untethered piezoelectric actuation technologies, offering a reference for future practical robotics research.

Key words: piezoelectric actuation; micro-miniature robot; untethered; drive circuit

0 引言

近年来，随着新型功能材料驱动技术与微纳制造技术的快速发展，微小型机器人已成为机器人领域的前沿研究方向。凭借小尺寸、高能效的优势，微小型机器人可在狭小、复杂或恶劣环境中执行精细操作，在生物医学、精密制造、环境监测及灾后救援等领域展现出巨大的应用潜力。例如，该类机器人可应用于微创手术等高精度任务，也可在灾难现场或具有极端温度、化学毒性的危险环境中完成检测与搜索任务。

驱动技术是微小型机器人最核心的基础技术。由于尺寸受限，微小型机器人难以集成传统电机和气动等驱动方式所需的复杂驱动-传动系统。因此，研究者普遍采用功能材料驱动来替代传统驱动方式。目前，国内外已基于电磁材料（如钕铁硼磁体）[1-4]、形状记忆合金（shape memory alloy, SMA）[5-8]、介电弹性材料（dielectric elastomer, DE）[9-11]、离子聚合物-金属复合材料（ionic polymer-metal composite, IPMC）[12-14] 以及压电材料[15-17] 等功能材料开发出多种微小型机器人，如图 1 所示。这些功能材料的驱动机理已得到广泛研究与验证，且各类材料在驱动性能与应用场景上均具备独特优势，同时也存在一定局限。磁驱动材料可通过外部磁场实现非接触式控制，且磁场能无害穿透多数生物与合成材料，但通常依赖外部设备产生特定磁场；SMA 可实现大驱动力与位移输出，且驱动器轻便小巧，但需较高的加热功耗以触发相变，热驱动响应时间较长；DE 具备大变形能力与快速响应特性，但需要极高的驱动电压，且高性能驱动器常需经过预拉伸处理，并采用复杂的堆叠结构。

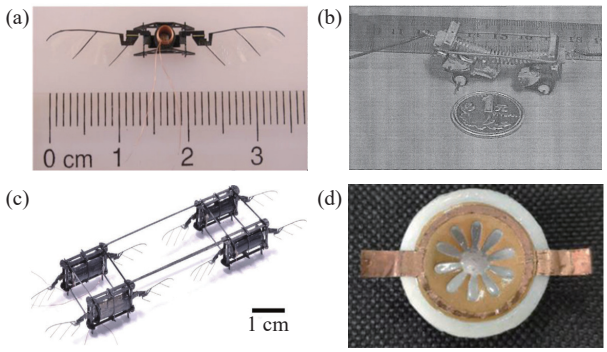

图 1 不同材料驱动的微小型机器人。(a)基于钕铁硼磁体的扑翼机器人[4]；(b)基于 SMA 的蠕动机器人[6]；(c)基于 DE 的飞行机器人[11]；(d)基于 IPMC 的仿墨鱼机器人[14]

Fig. 1 Micro-miniature robots driven by different materials. (a) Flapping-wing robot based on NdFeB magnets[4]; (b) peristaltic robot based on SMA[6]; (c) flying robot based on DE[11]; (d) squid-inspired robot based on IPMC[14]

综合对比表明，压电材料具有高效的双向能量转换机制，压电驱动技术具备低功耗、高分辨率、快速响应、大输出力及无电磁干扰等优点，因而在微小型机器人驱动中展现出不可替代的优势。通过精确控制压电驱动器的微小变形与协同动作，可实现多种运动模式与步态调控。因此，压电驱动微小型机器人的研究起步较早，压电驱动也成为当前

微小型机器人研发中最主流的驱动方式之一。然而, 其本征驱动位移较小, 且所需驱动电压通常高于常规电路兼容水平, 这对机器人的进一步微型化及其无系留自主运动构成了挑战, 并已成为近年来该领域研究的重点方向。

1 微小型压电式驱动机器人

1.1 压电驱动原理及其驱动器

压电驱动技术是微小型机器人实现高精度、高响应运动的核心机制, 其工作原理基于压电材料的逆压电效应, 即在外部电场作用下, 压电材料产生机械变形, 从而输出驱动位移。常用压电材料包括压电陶瓷、压电聚合物和压电单晶等, 其中压电陶瓷在微小型机器人驱动中应用较为广泛, 其等效电路模型如图 2 所示。通过调节施加在压电材料上的电压信号的频率、相位和幅值, 可激发其特定振动模式(如弯曲振动和纵向振动), 并利用谐振效应显著增大驱动振幅。此外, 通过不同振动模式的耦合, 可生成更复杂的运动轨迹, 例如将垂直与水平弯曲振动结合, 使驱动端形成椭圆轨迹, 进而借助摩擦力或流体反作用力实现微小型机器人的定向运动[18]。

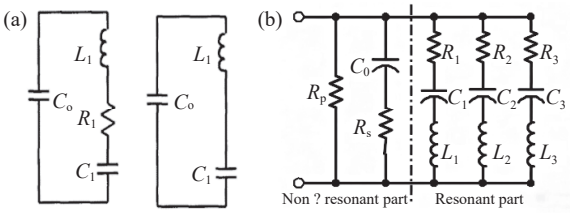

图 2 压电驱动器等效电路模型。(a)范戴克和复数电路模型[19]; (b)谐振并联电路模型[20]

Fig. 2 Equivalent circuit models of piezoelectric actuators. (a) Van Dyke and complex circuit models[19]; (b) resonant parallel circuit model[20]

压电驱动器作为机器人的核心动力部件, 其结构设计直接影响驱动性能与环境适应性。根据材料组成与结构集成方式, 可将其分为单一结构压电驱动器与复合结构压电驱动器。两类设计在微型化、输出特性及功能适配性方面各有侧重, 共同推动了压电驱动技术在微型和小型机器人领域的应用。

单一结构压电驱动器结构简单, 通过压电效应直接实现位移输出, 具有结构紧凑、响应迅速的显著优势。其中, 压电片与压电梁是两类典型的单一结构压电驱动器。Liu 等[21] 研制了一种仿生压电机器鱼, 采用压电双晶片作为驱动器, 将其与铜质柔性鳍连接构成尾鳍和侧鳍驱动单元, 如图 3(a)所示。该驱动单元依靠高频振动与流体强耦合, 实现机器鱼的水下运动, 可完成尾鳍驱动的直线行进和侧鳍驱动的转向动作。Alejandre 等[22] 研究了一种仿生机器水母, 以压电梁为驱动元件, 通过控制压电梁产生喷射推进实现运动, 如图 3(b)所示。该机器人施加包含快速激励脉冲和缓慢恢复脉冲的非对称正弦信号, 使压电梁产生周期性形变, 利用流体压力差产生推力, 同时, 通过独立或同步控制各驱动单元的压电梁, 可在三维空间中实现灵活运动。

复合结构压电驱动器通过多个压电元件的协同配置或压电结构与其他材料的集成设计, 形成较为复杂的驱动单元。采用此类驱动单元的微小型机器人能够在更紧凑的空间内实现多样化运动, 并具备更强的环境适应能力。Su 等[18] 开发了一种微型四足机器人, 其驱动器由 4 块压电陶瓷片和铝制长方体腿构成, 陶瓷片粘贴于腿的四周, 如图 3(c)所示。该机器人基于一阶垂直弯曲与一阶水平弯曲振动的模态耦合, 通过 4 条腿的协调振动提供驱动力: 当 4 条腿施加相同激励信号时实现直线运动, 仅对一侧 2 条腿施加激励则可实现转向。Liang 等[23] 提出了一种微型压电式惯性机器人(miniature piezoelectric inertial robot, MPIR), 其驱动器由菱形钢架与嵌入其中的压电叠堆组成, 施加锯齿波信号后, 利用惯性冲击力实现 x 轴方向的平移和绕 z 轴的旋转运动, 如图 3(d)所示。Wang 等[24] 研制了一种模拟蜗牛行波运动的微型机器人, 其驱动器由正方形不锈钢框架及 4 片粘贴于内侧的压电陶瓷片组成, 通过驱动单元产生行波, 借助驱动足与地面之间的摩擦及碰撞实现前进运动, 如图 3(e)所示。基于该单元设计的双框架压电机器人, 通过两个驱动单元的协同控制, 可实现直线移动与原位旋转。

此外, 新型压电驱动器的研发成果不断涌现, 例如集成位置传感功能并充分利用双向压电效应的驱动器[25]、基于锆钛酸铅单晶片弯曲梁的双稳态驱动器[26] 以及微型压电电机[27-31] 等。其中, 微型电机如图 3(f)所示。尽管部分器件目前尚未实际应用于机器人系统, 但其独特的性能优势预示着在微型机器人驱动领域具有广阔的应用前景。

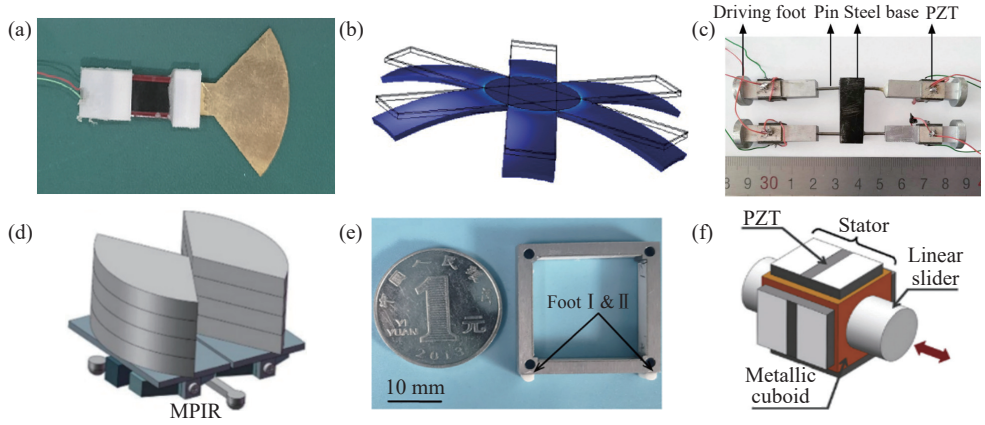

图 3　不同类型的压电驱动器。(a)压电片型驱动器[21]; (b)压电梁型驱动器[22]; (c)四陶瓷片腿驱动器[18]; (d)菱形驱动器[23]; (e)方框驱动器[24]; (f)微型电机[27]

Fig. 3 Different types of piezoelectric actuators. (a) Piezoelectric plate actuator[21]; (b) piezoelectric beam actuator[22]; (c) quadruple ceramic plate leg actuator[18]; (d) rhombus actuator[23]; (e) square-frame actuator[24]; (f) micro-motor[27]

1.2　压电驱动器传动机构匹配

压电机器人的驱动方式可分为直接驱动和间接驱动两类。由于压电材料在施加电压后产生的位移较小且方向单一，通常需借助传动机构实现位移放大、运动方向转换或多自由度解耦，以满足机器人在不同应用场景下的运动需求。

传动机构是微型压电机器人实现能量高效传递与运动精确控制的关键部件，其设计直接影响机器人的输出性能、结构紧凑性及环境适应能力。常用的传动机构包括四杆机构和曲柄滑块机构，此外还有齿轮齿条机构、菱形放大机构、柔性球面五杆传动机构等。

田波等[32]研制了一种用于微创手术的微小并联机器人，其传动机构采用模仿蜻蜓运动模式的四杆机构，可将压电驱动器的微小往复位移转化为末端基臂杆的大范围往复转动，如图 4(a)所示。Wu 等[33]开发了一种微型爬行机器人，采用滑块-曲柄连杆机构作为传动装置，能将压电驱动器的线性输入运动转换为腿部的摆动与升降运动，如图 4(b)所示。Liang 等[23]提出的 MPIR 采用菱形放大机构作为传动装置，可将压电叠堆的微小伸缩变形转化为机器人的平移与旋转运动，如图 4(c)所示。Goldberg 等[34]

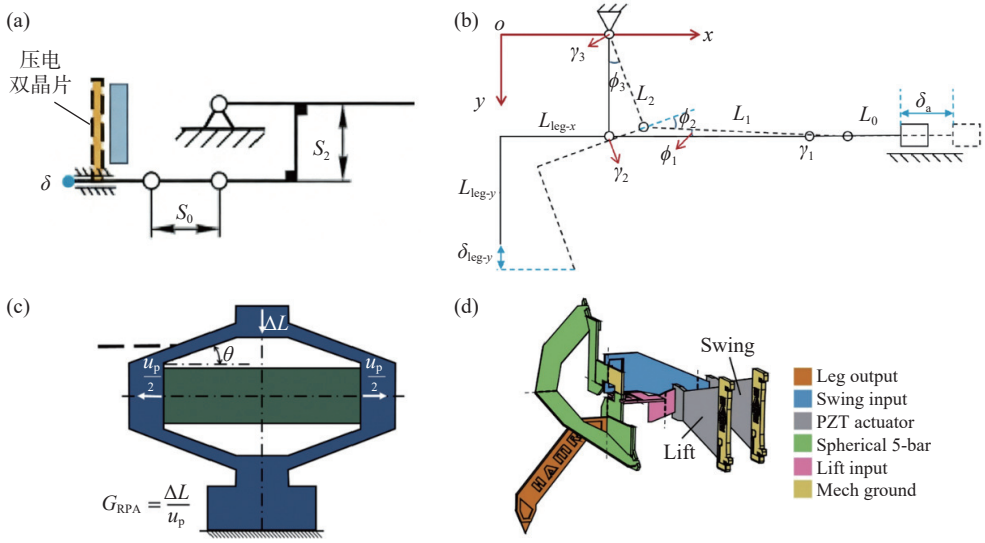

图 4　不同类型的传动机构简图。(a)四杆机构[32]; (b)曲柄滑块机构[33]; (c)菱形机构[23]; (d)球面五杆传动机构[34]

Fig. 4 Schematic diagrams of different types of transmission mechanisms. (a) Four-bar linkage mechanism[32]; (b) crank-slider mechanism[33]; (c) rhombus mechanism[23]; (d) spherical five-bar transmission mechanism[34]

研制了一种昆虫级步行机器人, 采用球面五杆传动机构, 能够将压电双晶片驱动器的弯曲变形转化为腿部的轨迹运动, 从而实现机器人的定向移动, 如图 4(d)所示。

综上所述, 传动机构的设计需结合机器人的应用场景与运动需求, 通过材料选型、结构参数优化及振动模式匹配, 实现微型化、高效能与高可靠性的统一, 为压电机器人的精准运动或操作应用奠定基础。

1.3 微小型机器人机体研制

近年来, 国内外研究者在微小型压电机器人领域已取得诸多成果, 这些微小型压电机器人总体可分为移动式和固定式两大类, 分别对应不同的应用方式, 如表 1 所示。其中, 移动式压电机器人根据不同工作场景, 可进一步分为地面爬行、空中飞行和水中游动 3 类。Wu 等[33] 研制了一种微型爬行机器人, 总质量仅 1.9 g, 长 45 mm, 可实现前后方向的稳定运动, 最高爬行速度达 250.5 mm·s^{-1}, 如图 5(a)所示。Xiang 等[35] 提出了一种新型飞行机器人设计方案, 并研制了两种昆虫尺度的样机: 双翼结构与 X 形结构, 如图 5(b)所示。其中, X 形结构机器人质量为 160 mg, 翼展为 170 mm, 具备 2.8∶1.0 的高升重比, 成功实现了无约束起飞, 飞行速度超过 1 000 mm·s^{-1}。Zhao 等[36] 开发了一种双尾鳍微型机器鱼, 质量仅为 1.93 g, 在水中的游动速度可达 45 mm·s^{-1}, 如图 5(c)所示。在固定式机器人方面, Pumphrey 等[37] 设计了一种新型球形柔性关节并联机器人, 由 6 个压电驱动器协同驱动, 可实现六自由度精密操作, 定位精度达到纳米级, 如图 5(d)所示。

2 微小型机器人无系留运动技术

微小型机器人的运动通常依赖物理线缆获取能量与控制信号, 这一限制使其难以在狭小封闭、动态复杂或远程不可达环境中实现自主作业。因此, 无系留运动技术成为突破该瓶颈、推动其实际

表 1 微型压电式机器人研究现状

Table 1 Research status of miniature piezoelectric robots

类型	文献	尺寸/mm	整机质量/g	最大速度/(mm·s^{-1})	驱动系统
扑翼飞行器	[17]	30	0.08	—	压电双晶片、四杆机构
爬行机器人	[18]	36×98×14	49.8	33.45	压电陶瓷片
机器鱼	[20]	80	驱动单元1.5	177.14	压电双晶片
爬行机器人	[23]	46×50×13.5	32.45	1.3	压电堆叠、菱形机构
平面并联机器人	[32]	21×26×5.6	3.05	—	压电双晶片、仿蜻蜓扑翼四杆放大机构、二轴
爬行机器人	[33]	45×38×21	1.9	250.5	压电双晶片、滑块-曲柄连杆机构
扑翼飞行器	[35]	双翼80, X形70	双翼0.14, X形0.16	X形>1 000	压电双晶片
机器鱼	[36]	6×2.8	1.93	45	压电双晶片、四杆机构
平面并联机器人	[37]	200×200×135	—	—	压电粘滑驱动器、柔性球铰及并联机构、六轴
机器鱼	[38]	27×50×65	550	25.19	压电单晶片、齿轮齿条和双曲柄机构
爬行机器人	[39]	2.5×2.5×2.6	1.74	120	压电片
管道机器人	[40]	ϕ25×30	—	6.84	压电叠堆和压电双晶片、柔性铰链放大机构
平面并联机器人	[41]	36×36×34	4.9	—	压电双晶片、柔性铰链机构、三轴
管道机器人	[42]	ϕ16~18	5.66	3.5	压电双层膜
仿蟑螂软机器人	[43]	10×15×3	0.024	200	压电单晶片
爬行机器人	[44]	40×30×18	—	2	压电陶瓷片

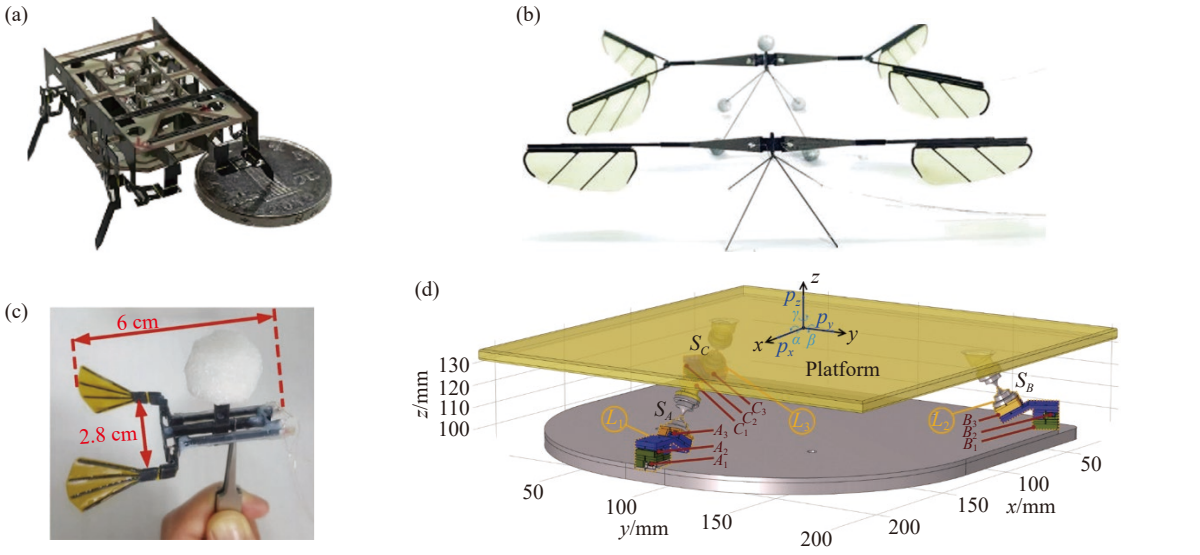

图 5　应用于不同场景的压电机器人。(a)微型四足机器人[33]；(b)微型扑翼机器人[35]；(c)微型仿生鱼[36]；(d)固定式六轴并联机器人[37]

Fig. 5 Piezoelectric robots applied in different scenarios. (a) Miniature quadruped robot[33]; (b) miniature flapping-wing robot[35]; (c) miniature biomimetic fish[36]; (d) stationary six-axis parallel robot[37]

应用的关键研究方向。无系留微小型机器人是指尺寸处于微米至毫米级，无需物理线缆即可获取能量、接收控制信号并执行操作的机器人系统。此类机器人摆脱了传统线缆的束缚，可在受限或动态环境中独立运行，已成为近年来机器人领域的研究热点，其实现完全无系留运动的核心挑战在于：如何在有限的机体尺寸和负载能力下，集成智能控制、环境感知与驱动执行等功能模块。

2.1　智能控制

在控制技术方面，无系留微型机器人面临尺寸限制带来的算力不足与能耗约束问题。当前主流控制方式可分为远程控制与自主控制两类。

远程控制通常依赖外部场控技术(如磁场、声场或光场)，通过外部设备产生可控能量场，实现对机器人运动轨迹的精确调控。Hu 等[45]研制了一种可由磁场控制的多模态小型软体机器人，通过施加不同模式的外部磁场，该机器人可实现行走、游动、滚动和跳跃等多种运动模式。Wang 等[46]则结合红外光与磁场协同控制机器人运动，通过调节光照强度与磁场方向，使机器人在水面上完成滑行及 180°翻滚跳跃动作。

自主控制一般基于微控制器(microcontroller unit, MCU)、微处理器(microprocessor unit, MPU)或专用集成电路构建核心计算单元，通过预设程序或环境反馈来实现运动决策。Karakadıoğlu 等[47]和 Kalın 等[48]开发的微小型无系留机器人均采用 Arduino 控制器，通过预设步态程序实现稳定运动。Li 等[49]设计的深海自供能软体机器人采用 STM32L4(MCU)进行控制，借助 MCU 对高压放大器的精准调制，实现机器人在深海环境中的稳定游动。De Wagter 等[50]开发了一款配备自动驾驶仪与机载立体视觉系统的扑翼微型飞行器，采用 ATmega328P-MLF28 微控制器与 STM32F405 处理器协同工作：前者负责高度维持、扰动抑制与姿态调节；后者结合立体视觉算法实现障碍物识别与避障。二者协同使机器人具备自主起飞、定高飞行、平稳转向及避障能力。

为实现无系留机器人与外界的信息交互，通常在控制板上集成无线通信模块。常用模块包括蓝牙、Wi-Fi、射频通信、红外接收器、无线电接收器以及 ZigBee 协议等无线通信单元。

2.2　传感反馈

传感模块是无系留微型机器人感知外部环境与自身状态的核心组件。受限于体积与功耗，传感器需具备微型化与低功耗特性。目前广泛应用的传感器包括惯性测量单元(inertial measurement unit,

IMU)、红外传感器、微型力传感器、温度传感器、气压计、光学传感器以及微型摄像头等。Goldberg 等[34] 开发的微型四足机器人集成了 IMU, 用于提供受控直线运动所需的姿态反馈。Karakadıoğlu 等[47] 研制的微型四足机器人则利用红外传感器检测凸轮编码图案, 以实现步态同步反馈。De Wagter 等[50] 设计的扑翼微型飞行器集成了 IMU、气压计与微型摄像头, 三者协同工作, 不仅保障了飞行姿态的稳定性, 还实现了高度控制与避障功能。

2.3 驱动电路

微小型无系留机器人的驱动电路是接收控制器指令、将机载能源转换为驱动器所需输入信号的核心模块, 其设计必须与驱动器的物理特性深度匹配, 在微型化、能耗管理与驱动效率之间取得平衡。如前所述, 当前主流的方式包括电磁驱动、DE 驱动、IPMC 驱动、SMA 驱动和压电驱动。由于各类功能材料的能量转换机制与电气特性各异, 其驱动电路架构也存在显著差异, 直接影响机器人的续航能力、响应速度与环境适应性。具体而言: 电磁驱动与 SMA 驱动侧重电流调控, 通常需要较大驱动电流; DE 驱动与压电驱动依赖高电压激励, 所需电压远高于常规机载电源与控制电路电压; 而 IPMC 驱动则要求稳定输出低电压信号。这些差异决定了相应驱动电路在基础模块选型、体积布局与功耗特征上的不同设计取向。

Ji 等[51] 研制了一种由 DE 驱动的自主导航机器人, 集成了开环反激式高压转换电路, 将 3.7 V 电源升压至约 450 V, 满足 DE 驱动器的工作需求。该机器人可在印刷路径上以 12 mm·s^{-1} 的速度独立行驶。Tan 等[52] 开发了由 IPMC 驱动的节能、静音、无系留仿生机器鱼, 通过集成一对整流器实现电流放大, 以满足驱动器的瞬时电流需求。该机器鱼在水中的游动速度可达 6.3 mm·s^{-1}。

综上所述, 无系留机器人的驱动方式多样。图 6 展示了基于不同驱动材料的代表性无系留机器人。

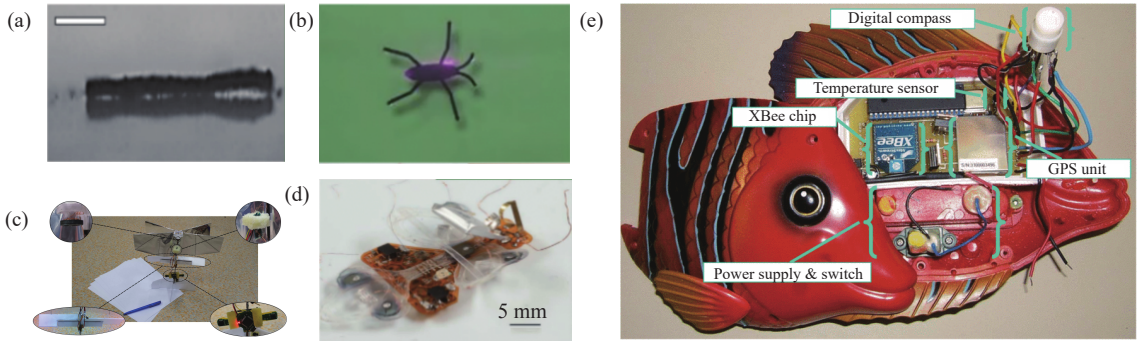

图 6 不同材料驱动的无系留机器人。(a)外部磁场驱动的微型机器人[45]; (b)红外光驱动的水面机器人[46]; (c)电磁驱动的飞行机器人[50]; (d)DE 驱动的自主导航机器人[51]; (e)IPMC 驱动的机械鱼[52]

Fig. 6 Untethered robots driven by different materials. (a) Miniature robot driven by an external magnetic field[45]; (b) water-surface robot driven by infrared light[46]; (c) flying robot driven by electromagnetic actuation[50]; (d) autonomous navigation robot driven by DE[51]; (e) robotic fish driven by IPMC[52]

3 微小型压电机器人无系留驱动技术

在微小型机器人驱动功能材料中, 压电材料及驱动器由于电压驱动信号响应速度快以及电容特性带来的低功耗优势, 成为无系留微小型机器人驱动技术的研究热点。

3.1 压电式微小型机器人驱动模块

压电式无系留机器人的驱动器通常需要数十至数百伏的驱动电压, 但由于微小型机器人尺寸受限, 其搭载的轻质电源一般仅能提供几伏的直流电压。因此, 驱动电路中必须集成高效的升压模块, 将低输入电压转换为满足驱动需求的高输出电压。该升压模块作为核心单元, 直接影响驱动电路的整体效率与体积, 对该模块的设计与优化已成为当前无系留压电驱动技术研究的关键挑战。

Cheng 等[53] 提出了一种新型低成本压电陶瓷驱动电路, 如图 7(a)所示, 由双 Boost AC-DC 转换器(交流-直流转换器)、耦合电感和半桥谐振 DC-AC 逆变器(直流-交流逆变器)构成, 采用具备功率因数校正(power-factor-correction, PFC)与软开关特

性的单级结构，并成功研制出额定功率为 50 W 的压电陶瓷驱动样机：在 110 V 交流输入下，可将电压升至 700 V 直流，通过半桥谐振电路转换为驱动压电陶瓷所需的交流信号。Steltz 等[54] 比较了 3 种 DC-DC（直流-直流）升压方案——升压转换器、变压器和混合转换器（图 7(b)），用于驱动微小型压电机器人，结果表明混合转换方案最适合微型系统供电，并通过实验验证了其可行性，实现了以锂电池低压输入为压电微型机器人提供 250 V 高压驱动信号。Dallago 等[55] 开发了一款集成化压电变压器控制器，配合压电变压器及少量外围元件（如电感、整流二极管等）构成 DC-DC 转换器，如图 7(c)所示，其最高可输出 1 kV 电压，并可在 2.7 V 直流输入时实现 500 V 直流输出。Montané等[56] 提出了基于商用 BCD（双极-互补金属氧化物半导体-双扩散金属氧化物半导体，bipolar-CMOS-DMOS）工艺的集成驱动方案，利用高压运算放大器连接成逆变器结构，生成压电驱动所需的高压信号，如图 7(d)所示，可在 0~5 V 输入范围内输出频率为 10 kHz、幅值达 50 V 的正弦波。吴凡等[57] 设计了一种克级小型化升压电路（图 7(e)），可用于驱动压电执行器，支持生成任意波形的单极性驱动信号，并具备能量回收功能，以 3.7 V 直流输入实现 250 V 以上直流输出。Han 等[58] 提出一种带软开关单元的超高升压耦合电感 DC-DC 转换器，如图 7(f)所示。该转换器在传统 Boost 拓扑中引入耦合电感，显著提升了电压增益并降低了开关管的电压应力，同时通过辅助开关实现零电压开关与零电流开关，有效减少了开关损耗，在 3.7 V 直流输入条件下，可输出达 209 V 的直流电压。

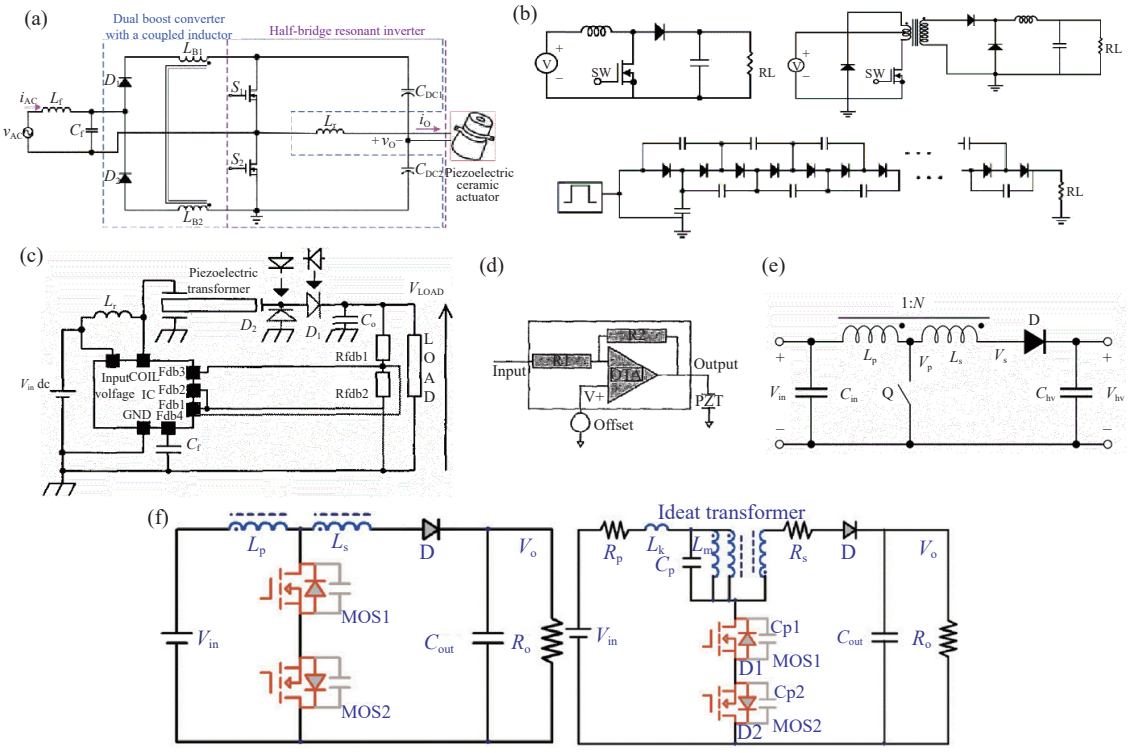

图 7　不同方式的升压电路。(a)可提供功率因数校正的驱动电路[53]；(b)升压转换器、变压器和混合转换器电路[54]；(c)压电变压器 DC-DC 转换电路[55]；(d)高压运算放大电路[56]；(e)驱动扑翼飞行器的升压电路[57]；(f)超高升压耦合电感 DC-DC 转换电路[58]

Fig. 7　Different types of boost circuits. (a) Driving circuit with power factor correction[53]; (b) boost converter, transformer, and hybrid converter circuits[54]; (c) piezoelectric transformer DC-DC conversion circuit[55]; (d) high-voltage operational amplifier circuit[56]; (e) boost circuit for driving a flapping-wing aircraft[57]; (f) ultra-high boost coupled inductor DC-DC conversion circuit[58]

3.2　无系留微小型压电机器人

基于 3.1 节所述驱动电路，研究人员开发了与之匹配的机载集成控制模块，并结合压电式驱动器的机体设计，研制出具有高度自主性和灵活性的无系留微小型压电机器人，如表 2 所示。

表 2　无系留微小型压电机器人的驱动机载模块、运动能力及集成质量

Table 2 Drive and onboard modules, motion capabilities, and integrated mass of untethered micro- and miniature piezoelectric robots

类型	文献	机载驱动控制模块	运动能力	集成质量/mg
爬行机器人	[24]	正方形刚架结构、微型相机、控制板、可无线控制、电源(3.7 V, 200 mAh)	383 mm·s^{-1}、负载200 g、续航14.5 min	1 500（含电源）
爬行机器人	[34]	压电双晶片、混合升压拓扑、惯性测量单元、MCU(含射频通信)、电源(8 mAh, 330 mg)	172 mm·s^{-1}、续航4.5 min	1 060
扑翼飞行器	[59]	铝桥压电驱动器、双向反激拓扑电路、MCU(ATTiny20)	700 mm·s^{-1}、负载70 mg、续航0.5 s	91
扑翼飞行器	[60]	压电单晶片、DC-DC转换器、三轴磁传感器、六轴惯性传感器、MPU(CC2640R2F)、蓝牙模块、电源(3.7 V, 386 mg)	续航5.6 min	360
爬行机器人	[61]	压电复合材料驱动器、DC-AC转换器、多级电压倍增器、微控制器、蓝牙模块、电源(3.7 V)	6 mm·s^{-1}、续航40 min	3 700
爬行机器人	[62]	单压电蜂鸣器驱动器、升压转换器、JPEG相机、微控制器、蓝牙模块、电源(3.7 V, 40 mAh, 5 g)	69 mm·s^{-1}、续航30 min	5 700
爬行机器人	[63]	压电复合梁、运算放大器、摄像头、TLC555定时器芯片、电源(3.7 V, 400 mAh, 8.4 g)	231.7 mm·s^{-1}、负载331.6 g、续航120 min	5 600
爬行机器人	[64]	压电叠层板、升压芯片、运算放大器、陀螺仪、STM32G474、电源(7.4 V)	241.5 mm·s^{-1}、负载2 265 g、续航 186 s	58 770
爬行机器人	[65]	压电双晶片、基于反激式转换器的升压电路、ESP32-PICO-D4、Wi-Fi模块、电源(1.48 g)	274 mm·s^{-1}	2 990（含电源）
水下喷射推进机器人	[66]	压电陶瓷片、压电喷射驱动单元、MCU(STM32KDX3-D)	48.4 mm·s^{-1}、续航>1 h	—

Jafferis 等[59]研制了一款微型扑翼飞行器, 如图 8(a)所示。该飞行器配备 4 个驱动器, 通过光伏阵列供电, 实现了短时间持续的无系留飞行。Ozaki 等[60]开发了另一种微型扑翼飞行器, 如图 8(b)所示, 采用 8 个压电单晶片驱动, 每对驱动器可独立调节拍打幅度, 成功实现了无姿态控制的无系留飞行。同时, 该飞行器集成了姿态估计传感器, 具备实现稳定可控飞行的潜力。Wang 等[24]研制了一种模拟蜗牛行波运动的微型机器人, 如图 8(c)所示, 采用正方形刚性框架结构及内侧 4 个压电陶瓷元件激发行波, 并结合定制电源与图像采集系统, 实现了自由移动与图像感知功能。Zheng 等[61]提出了一种微型爬行压电机器人, 如图 8(d)所示, 利用高频激励下压电驱动器产生的振动波, 结合机器人自身质量分布的不对称性, 通过与地面的非对称摩擦力实现双向爬行、转弯及就地旋转等可控运动。Hao 等[62]研制了一种基于压电蜂鸣器驱动的自主移动微型机器人, 如图 8(e)所示, 通过施加电压使蜂鸣器产生振动, 振动经由机器人的机械结构引发机械共振, 利用不同频率下的共振模式可实现转向与速度调控, 从而完成自主移动。

4　总结与展望

新型功能材料驱动方式因其结构简单、尺寸小、能效高等优势, 尤其适用于微小型机器人的研发。其中, 压电驱动技术在微小型机器人中的应用具备低功耗、快速响应和高输出力等显著优势, 已成为主流驱动方式之一。特别是压电驱动结构的电容特性使其具备突出的低功耗性能, 在无系留机器人长续航应用的研究方面展现出广阔前景。然而, 压电驱动所需电压明显高于常规机载电源输出能力, 这成为其实用化发展的主要瓶颈之一。目前针对无系留微小型压电驱动机器人的研究, 重点在

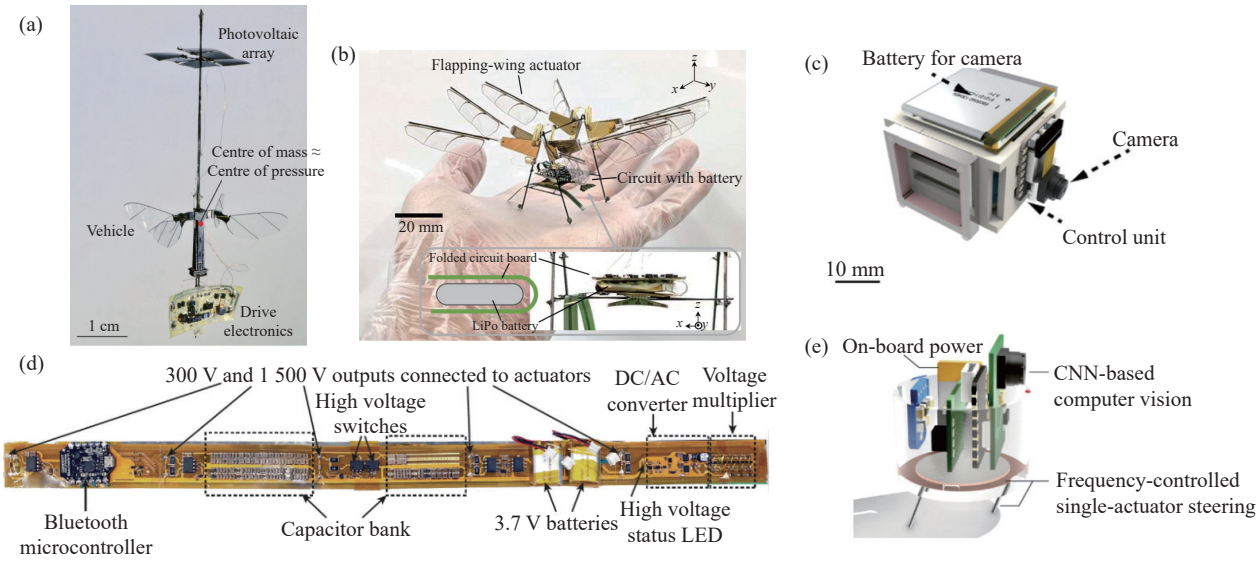

图 8　不同的无系留微小型压电机器人。(a)四机翼微型扑翼飞行器[59]；(b)八机翼微型扑翼飞行器[60]；(c)双框架压电机器人[24]；(d)微型爬行压电机器人[61]；(e)基于蜂鸣器的微型机器人[62]

Fig. 8　Various untethered micro-miniature piezoelectric robots. (a) Four-winged micro flapping-wing aircraft[59]; (b) eight-winged micro flapping-wing aircraft[60]; (c) dual-frame piezoelectric robot[24]; (d) miniature crawling piezoelectric robot[61]; (e) buzzer-based miniature robot[62]

于开发基于升压功能模块的小型化压电驱动电路，并将其与控制器及微传感模块集成，形成轻质化机载驱动控制电路，以实现机器人的无系留长续航运动。目前，已在扑翼飞行器、爬行机器人等样机上取得了研究成果。针对微小型压电驱动机器人的无系留驱动控制技术，驱动模块在兼容高压信号前提下的微型化与能效提升，以及其与控制模块的高性能集成，仍是关键的技术挑战。

未来，无系留微小型压电驱动机器人可从以下方面开展进一步研究。(1)材料与驱动性能优化：研发大位移、低驱动电压的新型压电材料，从源头改善驱动特性，降低对升压驱动电路的依赖，提升机器人整体性能；(2)核心模块技术突破：创新驱动电路设计，结合先进集成技术实现模块的微型化与高能效，延长机器人续航时间，探索控制、传感与驱动功能模块的一体化集成方案，以应对尺寸与负载受限的挑战；(3)多技术融合与应用拓展：融合人工智能、先进传感和无线通信技术，增强机器人的自主决策与环境适应能力，推动其在恶劣环境探测、复杂设备检测、医疗精密操作等特种领域的应用发展。

参考文献：

[1] Zhang Yunrui, Liu Yueyue, Fan Qigao. Design and control of a three-dimensional electromagnetic drive system for micro-robots[C]//2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Abu Dhabi: IEEE, 2024: 13090-13095.

[2] Bai Kai, Li Chaodong, Li Lexian, et al. Design and verification of a micro pipe robot[C]//2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems. Dalian: IEEE, 2020: 519-522.

[3] Tu Zhan, Fei Fan, Zhang Jian, et al. An at-scale tailless flapping-wing hummingbird robot. Ⅰ. design, optimization, and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 36(5): 1511-1525.

[4] Di Yue, Zhang Yuyan, Wen Yintang, et al. Inchworm-inspired bipedal crawling soft robot with forward and backward locomotion for confined spaces[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 10(6): 5839-5846.

[5] 王文慧, 胡俊峰. 仿尺蠖微机器人的设计与实验 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39(5): 90-93.
Wang Wenhui, Hu Junfeng. Design and experiment of bionic-inchworm micro-robot[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(5): 90-93.

[6] 秦昌骏, 马培荪, 姚沁. 基于 SMA 的仿昆虫蠕动微型车 [J]. 功能材料与器件学报, 2004, 10(2): 239-244.
Qin Changjun, Ma Peisun, Yao Qin. A micro trolley imitating

insect wriggling using SMA actuator[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2004, 10(2): 239-244.

[7] 单彦霞, 李宇鹏. 基于 SMA 驱动的仿尺蠖微型机器人 [J]. 机械设计与研究, 2017, 33(1): 50-53.
Shan Yanxia, Li Yupeng. The inchworm-like bionic micro robot driven by SMA[J]. Machine Design & Research, 2017, 33(1): 50-53.

[8] Yang Shaoqiong, Jia Lintao, Sun Anqi, et al. Design and analysis of a shape memory alloy buoyancy actuator[J]. Ocean Engineering, 2024, 296: 117005.

[9] Jiang Dongyue, Fan Zeng, Wang Hongchen, et al. Triboelectric nanogenerator powered electrowetting-on-dielectric actuator for concealed aquatic microbots[J]. ACS Nano, 2020, 14(11): 15394-15402.

[10] Youn J H, Jeong S M, Hwang G, et al. Dielectric elastomer actuator for soft robotics applications and challenges[J]. Applied Sciences, 2020, 10(2): 640.

[11] Ren Zhijian, Kim S, Ji Xiang, et al. A high-lift micro-aerial-robot powered by low-voltage and long-endurance dielectric elastomer actuators[J]. Advanced Materials, 2022, 34(7): 2106757.

[12] Guo Shuxiang, Ge Yaming, Li Lingfei, et al. Underwater swimming micro robot using IPMC actuator[C]//2006 International Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang: IEEE, 2006: 249-254.

[13] Shi Liwei, Guo Shuxiang, Asaka K. Modeling and experiments of IPMC actuators for the position precision of underwater legged microrobots[C]//2012 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Zhengzhou: IEEE, 2012: 415-420.

[14] 唐刚强, 王延杰, 张磊, 等. 离子聚合物材料驱动的仿墨鱼喷射结构设计与研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2020, 26(3): 219-225.
Tang Gangqiang, Wang Yanjie, Zhang Lei, et al. Design and research of cuttlefish-like jet structure actuated by ionic polymer materials[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2020, 26(3): 219-225.

[15] Ozaki T, Hamaguchi K. Bioinspired flapping-wing robot with direct-driven piezoelectric actuation and its takeoff demonstration[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(4): 4217-4224.

[16] Helbling E F, Fuller S B, Wood R J. Altitude estimation and control of an insect-scale robot with an onboard proximity sensor[M]//Bicchi A, Burgard W. Robotics research: volume 1. Cham: Springer, 2018: 57-69.

[17] Ma K Y, Chirarattananon P, Fuller S B, et al. Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot[J]. Science, 2013, 340(6132): 603-607.

[18] Su Qi, Quan Qiquan, Deng Jie, et al. A quadruped micro-robot based on piezoelectric driving[J]. Sensors, 2018, 18(3): 810.

[19] Sherrit S, Wiederick H D, Mukherjee B K. Accurate equivalent circuits for unloaded piezoelectric resonators[C]//1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. An International Symposium. Toronto: IEEE, 1997: 931-935.

[20] Guan Mingjie, Liao W H. Studies on the circuit models of piezoelectric ceramics[C]//International Conference on Information Acquisition. Hefei: IEEE, 2004: 26-31.

[21] Liu Biao, Li Kai, Zhang Hongze, et al. Research on piezoelectric direct-drive bionic fin and its high-frequency drive[J]. Ocean Engineering, 2025, 335: 121672.

[22] Alejandre A, Olszewski O, Jackson N. Actuation control of a PiezoMEMS biomimetic robotic jellyfish[C]//SPIE Proceedings. Barcelona: SPIE, 2017: 1024617.

[23] Liang Shichao, Wang Shuo, Gu Haoyu, et al. A micro-piezoelectric inertial robot with an ultra-high load-to-weight ratio: design and experimental evaluation[J]. Smart Materials and Structures, 2025, 34(7): 075017.

[24] Wang Weiyi, Li Jing, Zhang Shijing, et al. A snail-inspired traveling-wave-driven miniature piezoelectric robot[J]. Cell Reports Physical Science, 2024, 5(9): 102201.

[25] Chopra S, Gravish N. Piezoelectric actuators with on-board sensing for micro-robotic applications[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(11): 115036.

[26] Clad M, Rhee C H, Oldham K. Design and modeling of a piezoelectric, bistable out-of-plane actuator for micro-robotic appendages[C]//2022 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales. Toronto: IEEE, 2022: 1-6.

[27] Izuhara S, Mashimo T. Design and evaluation of a micro linear ultrasonic motor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 278: 60-66.

[28] Jin Haonan, Gao Xiangyu, Ren Kaile, et al. A relaxor ferroelectric crystal based Two-DOF miniature piezoelectric motor with fish body structure[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224: 112157.

[29] Kikuchi K, Hussain M, Mashimo T. Fabrication and

characterization of a submillimeter-scale ultrasonic motor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 360: 114524.

[30] 沈德新, 张健, 张保安, 等. 一种新结构薄型压电行波小马达 [J]. 功能材料与器件学报, 1996, 2(3): 137-142.
Shen Dexin, Zhang Jian, Zhang Baoan, et al. A new type of piezoelectric traveling wave micromotors[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 1996, 2(3): 137-142.

[31] 沈德新, 张健, 张保安, 等. 微机械加工的微型压电行波马达 [J]. 功能材料与器件学报, 1998, 4(2): 78-82.
Shen Dexin, Zhang Jian, Zhang Baoan, et al. Micromachined piezoelectric traveling-wave micromotors[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 1998, 4(2): 78-82.

[32] 田波, 娄军强, 沈家旭, 等. 可用于微创手术的毫米级微小并联机器人的设计、制造及实现 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(17): 147-155.
Tian Bo, Lou Junqiang, Shen Jiaxu, et al. Design, fabrication and realization of a parallel microrobot at the millimeter scale for minimally invasive surgery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(17): 147-155.

[33] Wu Guangping, Wang Ziyang, Zhao Jiaxin, et al. A piezoelectrically driven microrobot using a novel monolithic spatial parallel mechanism as its hip joint[J]. Journal of Bionic Engineering, 2024, 21(2): 803-820.

[34] Goldberg B, Zufferey R, Doshi N, et al. Power and control autonomy for high-speed locomotion with an insect-scale legged robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(2): 987-993.

[35] Lu Xiang, Wu Yulie, Chen Jie, et al. A high liftoff speed insect-scale aerial robot direct-driven with piezoelectric bimorph PZT actuator[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025, 38(9): 103494.

[36] Zhao Quanlaing, Liu Shiqi, Chen Jinghao, et al. Fast-moving piezoelectric micro-robotic fish with double caudal fins[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 140: 103733.

[37] Pumphrey M, Abouzarkhanifard A, Zhang L, et al. A parallel type micro-robotic system for semi-conductor manufacturing machines: preliminary results[C]//2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Delft: IEEE, 2021: 532-539.

[38] Heo S, Wiguna T, Park H C, et al. Effect of an artificial caudal fin on the performance of a biomimetic fish robot propelled by piezoelectric actuators[J]. Journal of Bionic Engineering, 2007, 4(3): 151-158.

[39] Wang Yuanyi, Wang Biao, Zhang Yanhu, et al. T-phage inspired piezoelectric microrobot[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 231: 107596.

[40] Ning Chao, Xing Jichun. Backward motion suppression in space-constrained piezoelectric pipeline robots[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 284: 109746.

[41] Shen Jiaxu, Fang Qin, Fang Xizheng, et al. Piezoelectric planar parallel microrobot with high bandwidth and precision for micromanipulation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 3971-3979.

[42] 刘品宽, 温志杰, 孙立宁. 压电双层膜驱动管内移动微小型机器人的研究 [J]. 科学通报, 2009, 54(15): 2257-2263.
Liu Pinkuan, Wen Zhijie, Sun Lining. An in-pipe micro robot actuated by piezoelectric bimorphs[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(15): 2257-2263.

[43] Wu Yichuan, Yim J K, Liang Jiaming, et al. Insect-scale fast moving and ultrarobust soft robot[J]. Science Robotics, 2019, 4(32): eaax1594.

[44] 杜启亮, 张勤, 田联房, 等. 压电陶瓷驱动微小型机器人的运动分析与仿真 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(3): 415-420,433.
Du Qiliang, Zhang Qin, Tian Lianfang, et al. Locomotion analysis and simulation of piezo-driven miniature robot[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(3): 415-420,433.

[45] Hu Wenqi, Lum G Z, Mastrangeli M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion[J]. Nature, 2018, 554: 81-85.

[46] Wang Xiaodong, Dai Liguo, Jiao Niandong, et al. Superhydrophobic photothermal graphene composites and their functional applications in microrobots swimming at the air/water interface[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 422: 129394.

[47] Karakadıoğlu C, Askari M, Özcan O. Design and operation of MinIAQ: an untethered foldable miniature quadruped with individually actuated legs[C]//2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Munich: IEEE, 2017: 247-252.

[48] Kalın M A İ, Aygül C, Türkmen A, et al. Design, fabrication, and locomotion analysis of an untethered miniature soft quadruped, SQuad[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 3854-3860.

[49] Li Guorui, Chen Xiangping, Zhou Fanghao, et al. Self-powered soft robot in the Mariana trench[J]. Nature, 2021,

591: 66-71.

[50] De Wagter C, Tijmons S, Remes B D W, et al. Autonomous flight of a 20-gram flapping wing MAV with a 4-gram onboard stereo vision system[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong: IEEE, 2014: 4982-4987.

[51] Ji Xiaobin, Liu Xinchang, Cacucciolo V, et al. An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators[J]. Science Robotics, 2019, 4(37): eaaz6451.

[52] Tan Xiaobo, Kim D, Usher N, et al. An autonomous robotic fish for mobile sensing[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2006: 5424-5429.

[53] Cheng C A, Cheng H L, Chang C H, et al. A novel and cost-effective drive circuit for supplying a piezoelectric ceramic actuator with power-factor-correction and soft-switching features[J]. Micromachines, 2021, 12(10): 1229.

[54] Steltz E, Seeman M, Avadhanula S, et al. Power electronics design choice for piezoelectric microrobots[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2006: 1322-1328.

[55] Dallago E, Danioni A, Ricotti G, et al. Single chip, low supply voltage piezoelectric transformer controller[C]//ESSCIRC 2004 —29th European Solid-State Circuits Conference. Estoril: IEEE, 2003: 273-276.

[56] Montané E, Miribel-Català P, López-Sánchez J, et al. High-voltage smart power integrated circuits to drive piezoceramic actuators for microrobotic applications[J]. IEE Proceedings - Circuits, Devices and Systems, 2001, 148(6): 343.

[57] 吴凡, 张卫平, 胡楠, 等. 微扑翼飞行器驱动电路设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(9): 75-77,81.
Wu Fan, Zhang Weiping, Hu Nan, et al. Design of driver circuit for micro ornithopter[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(9): 75-77,81.

[58] Han Shousheng, Jiang Hanjun, Ma Jingzhong, et al. Ultrahigh step-up coupled-inductor DC-DC converter with soft-switching for driving piezoelectric actuators[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems Ⅱ: Express Briefs, 2021, 68(8): 2902-2906.

[59] Jafferis N T, Helbling E F, Karpelson M, et al. Untethered flight of an insect-sized flapping-wing microscale aerial vehicle[J]. Nature, 2019, 570: 491-495.

[60] Ozaki T, Ohta N, Jimbo T, et al. Takeoff of a 2.1 g fully untethered tailless flapping-wing micro aerial vehicle with integrated battery[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(6): 3574-3580.

[61] Zheng Zhiwu, Cheng H, Kumar P, et al. Wirelessly-controlled untethered piezoelectric planar soft robot capable of bidirectional crawling and rotation[C]//2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation. London: IEEE, 2023: 641-647.

[62] Hao Zhijian, Lele A, Fang Yan, et al. FAVbot: an autonomous target tracking micro-robot with frequency actuation control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Artificial Intelligence, 2025, 2(4): 302-314.

[63] Li Jing, Deng Jie, Zhang Shijing, et al. An untethered tripodal miniature piezoelectric robot with strong load capacity inspired by land motion of seals[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024, 29(1): 85-96.

[64] Ding Zhaochun, Cui Mingyang, Wu Jiang, et al. Development of an untethered self-moving piezoelectric actuator with load-carriable, fast, and precise movement driven by piezoelectric stack plates[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(11): 11635-11646.

[65] Liu Yide, Chen Yanhong, Feng Bo, et al. S^2worm: a fast-moving untethered insect-scale robot with 2-DoF transmission mechanism[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(3): 6758-6765.

[66] Zhou Xianxin, Zhang Lu, Chen Weishan, et al. Study of an untethered bioinspired piezoelectric father-son robot for deep-sea narrow space[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(12): 16108-16119.