

分类号: TM619

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220110148



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于仿生表面的流致振动能
量采集器研究

论文作者 袁义凯

指导教师 王海（教授）

学科（专业） 机械

研究方向 振动能量采集

论文提交日期: 2025 年 5 月 12 日

分类号：TM614

分类号：TM614

单位代码：10363

密级：公开

学号：2220110148

基于仿生表面的流致振动能量采集器研究

Research on flow-induced vibration energy harvester
based on bionic surface

学生姓名：袁义凯

指导教师：王海（教授）

专 业：机械

研究方向：振动能量采集

论文答辩日期：2025 年 5 月 12 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：袁义凯

日期：2025 年 5 月 12 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密□，在____年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密□。

学位论文作者签名：袁义凯

指导教师签名：王海

日期：2025年5月12日

日期：2025年5月12日

摘要

随着无线传感器网络的快速发展,能量采集技术成为保障节点持续供能的重要手段。传统风能采集设备体积大且易受电磁干扰,限制了其在微型传感器应用中的推广。流致振动能量采集技术凭借小型化和抗电磁干扰的优势,展现出良好应用前景。

本文提出了一种基于仿生表面的流致振动能量采集器。首先推导了包括流体动力学、结构动力学与机电耦合的综合数学模型,分析了升力和阻力系数对流致振动力的影响及振动特性。然后,受自然界贝壳微观结构启发,设计了波纹、直纹、斜纹和折纹四种仿生钝体,以优化气动性能并增强能量采集能力。采用三维有限元仿真,系统分析了仿生结构对流场特性和气动力的影响,并在风洞中进行了实验验证。

实验结果表明,仿生钝体能显著提高输出电压和拓宽能量采集频带。折纹钝体在 4 m/s 风速下的输出电压较传统圆柱提高 396.86%,其他仿生结构在不同风速下的电压提升幅度在 94.24%至 287.75%之间;同时,各仿生设计有效拓宽了能量采集器的工作频段,提升了中高风速环境下的适应能力。

本研究为流致振动能量采集器的小型化、高效化设计提供了新思路,为低功耗无线设备的持续供能技术发展提供了理论与实践支撑。

关键词: 能量采集; 流致振动; 仿生表面; 钝体; 风洞实验

RESEARCH ON FLOW-INDUCED VIBRATION ENERGY HARVESTER BASED ON BIONIC SURFACE

ABSTRACT

With the rapid development of wireless sensor networks, energy harvesting technology has become a crucial means to ensure the continuous power supply of sensor nodes. However, traditional wind energy harvesting devices are often bulky and susceptible to electromagnetic interference, limiting their application in micro-scale sensor systems. Flow-induced vibration (FIV) energy harvesting technology, characterized by its compact size and low sensitivity to electromagnetic interference, offers promising application prospects.

In this study, a novel flow-induced vibration energy harvester based on biomimetic surface structures is proposed. A comprehensive mathematical model encompassing fluid dynamics, structural dynamics, and electromechanical coupling is first derived to analyze the effects of lift and drag coefficients on flow-induced forces and vibration characteristics. Inspired by the microstructures of natural shells, four types of biomimetic bluff bodies — corrugated, straight stripe, oblique stripe, and folded stripe designs — are developed to optimize aerodynamic performance and enhance energy harvesting capability. Three-dimensional finite element simulations are conducted to systematically evaluate the influence of biomimetic structures on flow field characteristics and aerodynamic forces, followed by experimental validation through wind tunnel tests.

The experimental results demonstrate that the biomimetic bluff bodies significantly improve output voltage and broaden the operational

frequency bandwidth. Specifically, the folded-striped bluff body achieves a 396.86% increase in output voltage compared to the conventional cylindrical design at a wind speed of 4 m/s, while other biomimetic designs exhibit voltage improvements ranging from 94.24% to 287.75% across various wind speeds. Furthermore, all biomimetic designs effectively expand the working frequency bands, enhancing adaptability under medium-to-high wind speed conditions.

This research provides new insights into the miniaturized and high-efficiency design of flow-induced vibration energy harvesters, offering theoretical and practical support for the sustainable powering of low-power wireless devices.

Yuan Yikai (Mechanical Engineering)

Supervised by Prof. Wang Hai

Keywords: energy harvesting, flow-induced vibration, biomimetic metasurface, bluff body, wind tunnel

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目录.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 流致振动能量采集的研究现状和前景.....	1
1.3 基于仿生表面流致振动能量采集器的研究现状.....	4
1.4 论文研究的目的与意义.....	5
1.5 论文结构安排.....	5
第 2 章 流致振动能量采集器理论建模及设计.....	7
2.1 流致振动能量采集器基本原理.....	7
2.2 基于仿生表面流致振动能量采集器的设计.....	8
2.2.1 仿生表面生物学基础及灵感来源.....	8
2.2.2 仿生表面的钝体结构设计及参数优化.....	10
2.3 基于仿生表面流致振动能量采集器的动力学分析.....	11
2.4 本章小结.....	17
第 3 章 流致振动能量采集器三维流场仿真.....	18
3.1 三维流场仿真模型参数设置及优化.....	18
3.2 基于传统圆柱钝体绕流的流场分析.....	22
3.2.1 仿真模型的建立.....	22
3.2.2 传统圆柱钝体的流致振动及流场分析.....	23
3.3 基于仿生表面钝体绕流的流场分析.....	27
3.3.1 仿真模型的建立.....	27
3.3.2 仿生表面钝体的流致振动及流场分析.....	28
3.4 基于流致振动能量采集器流场对比与分析.....	34

3.5 本章小结.....	41
第 4 章 流致振动能量采集平台构建及实验设计.....	43
4.1 实验平台的搭建.....	43
4.1.1 流致振动能量采集器实物建模.....	43
4.1.2 流致振动能量采集器装置的搭建.....	47
4.2 实验.....	51
4.2.1 实验设备的选型.....	51
4.2.2 实验装置的搭建.....	56
4.3 实验方案的设计.....	58
4.4 本章小结.....	61
第 5 章 实验结果与分析.....	62
5.1 基于传统圆柱钝体能量采集器的输出电压测试.....	63
5.2 基于四种仿生表面钝体能量采集器的输出电压测试.....	66
5.2.1 波纹钝体能量采集器输出电压测试.....	67
5.2.2 直纹钝体能量采集器输出电压测试.....	69
5.2.3 斜纹钝体能量采集器输出电压测试.....	71
5.2.4 折纹钝体能量采集器输出电压测试.....	73
5.3 基于不同钝体流致振动能量采集器的输出能力分析.....	74
5.4 基于不同钝体流致振动能量采集器的频域及带宽分析.....	82
5.5 本章小结.....	85
总结与展望.....	86
总结.....	86
展望.....	87
参考文献.....	88
攻读学位期间发表的学术成果情况.....	96
致谢.....	95

插图清单

图 1-1 各种超表面图案装饰的钝体.....	3
图 1-2 刻蚀不同超表面图案的钝体.....	3
图 1-3 一种新型圆筒式变换器及其能量收集系统.....	4
图 1-4 具有仿生钝体的驰振式压电能量采集器.....	4
图 1-5 具有仿生结构的钝体物理模型.....	5
图 2-1 具有自然纹理的贝壳.....	9
图 2-2 具有仿生表面的钝体.....	10
图 2-3 传统 FIV 能量采集器原理.....	12
图 3-1 CFD 模拟区域结构及边界条件俯视图.....	20
图 3-2 流致振动流场网格划分示意图.....	21
图 3-2 传统圆柱钝体流场仿真建图.....	23
图 3-4 传统圆柱钝体的升反力示意.....	24
图 3-5 传统圆柱钝体在流场中的速度云图(7s).....	25
图 3-6 流场中传统圆柱钝体在点(250, 52.141, 50)处速度大.....	26
图 3-7 四种不同仿生表面钝体流场仿真建模图.....	28
图 3-8 波纹钝体的升反力示意图.....	29
图 3-9 直纹钝体的升反力示意图.....	30
图 3-10 斜纹钝体的升反力示意图.....	32
图 3-11 折纹钝体的升反力示意图.....	33
图 3-12 不同钝体的升反力对比示意图(N=24).....	34
图 3-13 不同仿生表面钝体在流场中的速度云图(7s).....	37
图 3-14 流场中的最优点速度对比.....	38
图 3-15 传统圆柱钝体及四种仿生表面钝体的涡落模式.....	41
图 4-1 能量采集器设计模型.....	44
图 4-2 基于传统圆柱钝体能量采集器实物模型.....	45
图 4-3 基于仿生钝体能量采集器实物模型.....	46
图 4-4 压电悬臂梁整体示意图.....	48
图 4-5 HP Compaq dx2310 MT 台式电脑.....	52
图 4-6 NI PXI-1042Q 数据采集器.....	53
图 4-7 实验风洞.....	54
图 4-8 轴流风机.....	54
图 4-9 皮托管.....	55

图 4-10 流致振动能量采集器样机及风洞试验装置.....	57
图 4-11 实验方案设计流程图.....	59
图 4-12 实验设计内容流程图.....	61
图 5-1 不同风速下的传统圆柱钝体能量采集器输出电压时域图和频域图.....	65
图 5-2 不同风速下的波纹钝体能量采集器输出电压时域图和频域图.....	68
图 5-3 不同风速下的直纹钝体能量采集器输出电压时域图和频域图.....	70
图 5-4 不同风速下的斜纹钝体能量采集器输出电压时域图和频域图.....	72
图 5-5 不同风速下的折纹钝体能量采集器输出电压时域图和频域图.....	73
图 5-6 风速 0-10m/s 下基于传统圆柱钝体与波纹钝体能量采集器输出电压对.....	75
图 5-7 风速 0-10m/s 下基于传统圆柱钝体与直纹钝体能量采集器输出电压对.....	76
图 5-8 风速 0-10m/s 下基于传统圆柱钝体与斜纹钝体能量采集器输出电压对.....	78
图 5-9 风速 0-10m/s 下基于传统圆柱钝体与折纹钝体能量采集器输出电压对.....	79
图 5-10 风速 0-10m/s 下基于不同钝体流致振动压电能量采集器峰值电压比较....	81
图 5-11 基于不同钝体流致振动能量采集器的频响特性.....	83

插表清单

表 2-1 四种仿生钝体结构与动力学模型参数映射关系.....14

表 3-1 流场的初始条件.....19

表 3-2 三维 CFD 仿真的参数设置.....19

表 3-3 不同仿生表面钝体的升力和反力(N=24)34

表 4-1 3D 打印树脂材料参数.....47

表 4-2 压电悬臂梁黄铜材料属性及参数.....49

表 4-3 压电片 PZT-5H 材料属性及参数.....50

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

能量采集技术^[1]通过捕捉环境中的可用能量源并将其转化为电能，主要来源包括太阳能^[2]、风能^[3]、热能^[4]、振动能^[5]和电磁能^[6]。其核心目标是高效收集低密度、分散的能量，并用于储存或直接驱动低功耗设备，在物联网^[7]、传感器网络等领域具有重要应用，可为难以更换电池的设备提供持续供能，从而延长寿命并降低维护成本。

随着化石能源消耗引发的环境问题和能源短缺日益严重，可再生能源的开发受到广泛关注。在无线传感器网络(WSNs)^[8-11]、微机电系统(MEMS)^[12]及无人机(UAV)^[13]等技术快速发展的背景下，微电子设备的自供能需求迫切。传统电池受限于容量、寿命、维护成本及环境污染等问题，难以满足现代技术需求。因此，环境能量俘获技术凭借其可持续供能优势，成为研究重点。

振动能量收集技术利用环境中的机械振动将其转化为电能，广泛应用于无线传感器网络、可穿戴设备及微电子系统。常见方式包括电磁式、静电式和压电式，其中压电式^[14]因其高能量密度、结构简单、轻量化、宽频带响应、环境适应性强及高效能量转换率等优势，成为振动能量收集领域的研究热点。

流致振动能量采集器作为一种将流体动能转化为电能的新兴技术，具备结构简单、体积小巧、适用于中低风速环境等特点，特别适合于分布式部署的微型传感设备。相比压电叠层、静电式等采能装置，流致振动结构不依赖高频激励条件，更能适应自然环境中的复杂气流变化。

本文以仿生表面结构为研究切入点，借鉴自然界贝壳等结构的表面纹理特征，增强钝体诱导的涡街强度，进而提升能量采集器的输出性能与适应带宽，在微功率能量采集方向具备重要工程价值和推广潜力。

1.2 流致振动能量采集的研究现状和前景

流致振动能量采集^[15]是指利用流体(如空气或水)与固体结构相互作用时产

生的振动，将机械振动转化为电能的技术。它利用流体在流经物体表面时引发的涡旋脱落、压力波动等现象，使结构发生振动，从而捕获振动能量并进行转换。流致振动能量采集技术广泛应用于河流、水道、风力环境等领域，特别适合那些受限于传统电源供应的设备。

流致振动的主要形式分为：涡激振动(Vortex-Induced Vibration, VIV)^[16]是当流体绕过物体时，会在物体下游产生周期性的涡旋脱落，形成不平衡的压力分布，使物体发生横向振动。VIV 是流致振动能量采集中的常见形式。驰振(Galloping)^[17]是一种由流体与结构相互作用引发的非线性、自激振动现象，通常发生在具有非圆形截面的柔性结构（如方形、矩形或三角形截面）暴露于气流或水流中的情况下。当流体流过物体时，会导致结构发生周期性的振动，振动幅度随着流速的增加而显著增大。颤振(Flutter)^[18]是一种流体与结构之间的耦合振动现象，常见于薄板或机翼等柔性结构。在一定的流速下，流体与结构的相互作用引起周期性的自激振动，产生能量。

流致振动能量采集的具有以下特点，高效能量转换：流致振动能量采集技术能够在流体环境中连续捕获振动能量，特别是在稳定的流动环境中(如河流、潮汐和风力条件)。无外部电源需求：完全依靠自然的流体动力产生能量，尤其适合偏远地区或海洋环境等难以布置传统电源的场景。适应性强：流致振动能量采集技术能够适应各种流体介质(如空气或水)以及不同的流速条件。流致振动具有非线性^[19]、大振幅^[20]和低频振动^[21]等显著优点，吸引了众多国内外研究人员的广泛关注。

Zhiyong Zhou^[22]研究了一种新型的双稳态风能收集器，该收集器通过涡激振动和驰振的协同效应来承受井间振荡。Mingjie Zhang^[23]利用谐波强迫振动数据估计了涡激振动对具有非线性刚度的圆柱的影响。

如图 1-1 所示，Junlei Wang 设计了四种超表面图案来修饰普通圆柱钝体^[24]，以改变其气动特性，并通过三维 CFD 和风洞实验进行了验证。与采用光滑表面的普通钝体的基准相比，采用不同的超表面图案的钝体可以增强或抑制系统的涡激振动。

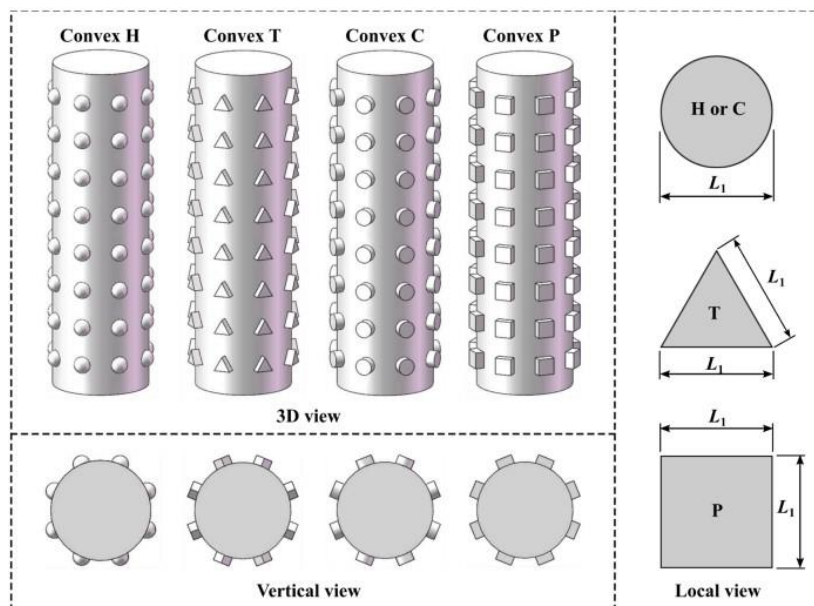


图 1-1 各种超表面图案装饰的钝体

Junlei Wang 鉴于超表面在许多领域的广泛应用, 提出在圆柱钝体上刻蚀几种超表面图案^[25], 如图 1-2 所示。通过建立了一个通用的集总参数模型和三维 CFD 仿真模型, 得到了升力和阻力系数, 验证了不同的凹型超表面会显著影响尾迹压力, 从而影响气动性能。

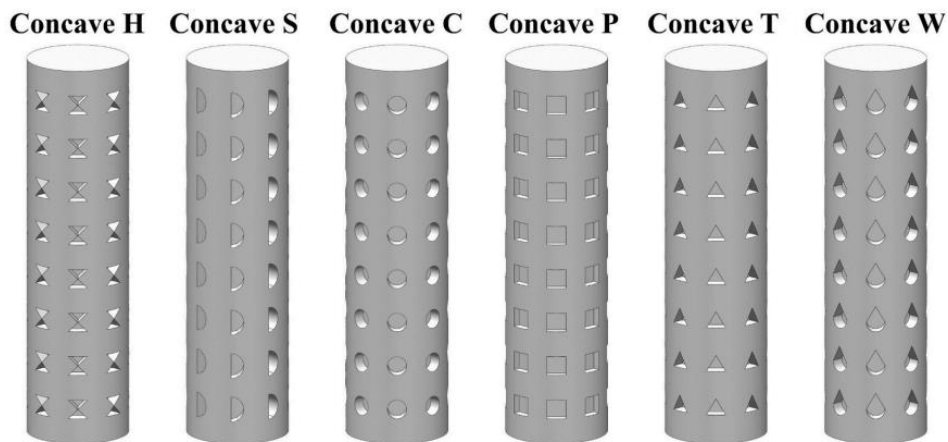


图 1-2 刻蚀不同超表面图案的钝体

超表面在流致振动能量采集器中的成功应用, 得益于其精细的结构设计和对流体振动的高效调控能力。通过对表面微结构的优化, 超表面能够有效增强流体与结构之间的相互作用, 增加振动幅度并提高能量转换效率。这一技术的成功, 不仅推动了能量采集器的小型化和高效化, 还为探索更多创新型表面结构奠定了基础。

1.3 基于仿生表面流致振动能量采集器的研究现状

在此背景下，仿生表面概念^[26]逐渐引起了广泛关注。仿生表面通过模仿自然界生物体表面的微观结构，如鲨鱼皮^[27]、昆虫翅膀^[28]等，进一步优化了流体与结构的耦合作用，能够在复杂环境中实现更高效的能量采集^[29]。这种基于自然启发的设计理念为流致振动能量采集技术带来了新的发展方向。

Hongjun Zhu 等采用数值模拟的方法研究了一种表面带有鳍状带的圆柱体谐振能量收集装置^[30]，如图 1-3 所示。分析了不同鳍状带夹角对振动特性的影响，发现将鳍状带交错布置，最大功率密度可达 441.11 W/m^3 。

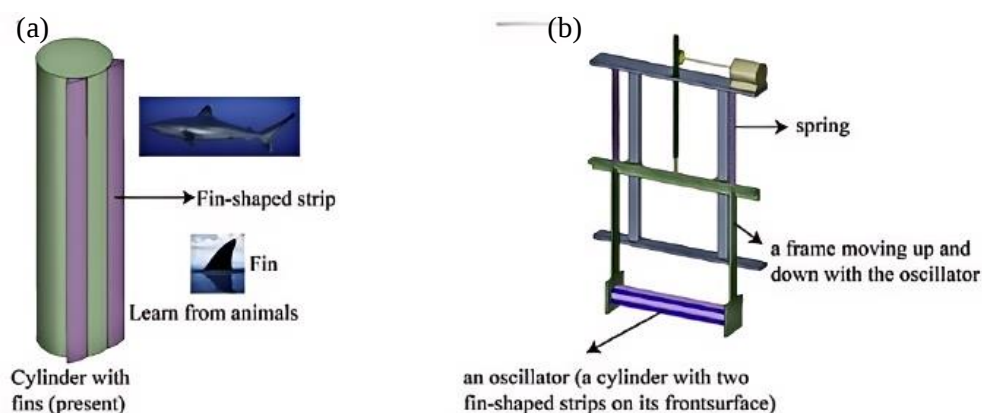


图 1-3 一种新型圆筒式变换器及其能量收集系统

(a)前表面装有鳍形条的钝体；(b)对流器的能量收集系统

Ewere 等受鸵鸟波浪状背部的启发^[31]，设计了一种仿生钝体结构用于谐振能量收集。如图 1-4 所示，方柱一侧设计成波浪状并面向来流方向，与底端带有压电材料的悬臂梁相连接。风洞实验显示，由于升阻力的减小，能量采集器的电压和振幅随波陡度的增大和波长的减小而减小。

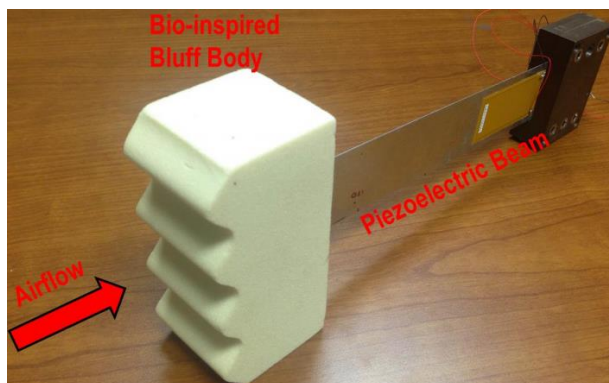


图 1-4 具有仿生钝体的谐振式压电能量采集器

Zunlong Jin 等设计凹坑、凸包型结构仿生钝体^[32]，如图 1-5 所示。对于凹坑型结构而言，实现了将锁定区域集中在 2-3.5 m/s，对于凸包型结构钝体，3 列和 6 列 10 mm 半球形凸包结构对增加振动幅值有很好的效果，即振幅越大，测量电压越高。

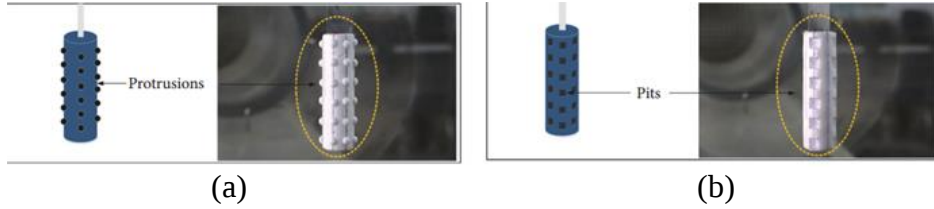


图 1-5 具有仿生结构的钝体物理模型：(a)凸包示意图；(b)凹坑示意图

尽管前人在仿生表面方面的研究取得了一定进展，但目前流致振动能量采集器的性能尚无法满足实际应用需求。为此，本文提出了四种不同的基于仿生表面的钝体设计，以提升能量采集效率。该设计借鉴了自然界中的贝壳的生物结构，通过优化表面纹理和流体动力学特性，改善了能量采集器在复杂环境中的适应性与转换效率。

1.4 论文研究的目的与意义

本研究旨在探索并优化基于仿生表面的流致振动能量采集器，以提高其能量收集效率和适应性。随着无线传感器网络、微机电系统和其他低功耗设备的快速发展，传统电池供电方式面临寿命短、容量有限、环境污染等问题。流致振动能量采集技术凭借其从环境中获取可再生能源的优势，为设备提供了一种可行的可持续能源解决方案。然而，目前对于仿生表面在振动能量采集中的应用研究仍较有一定局限性。因此，本文通过借鉴自然界中生物表面的独特结构，设计出一种新型仿生表面钝体，并验证其在不同流体环境中的能量采集效果。研究的意义在于不仅为振动能量采集器的设计提供新的思路，还推动了低功耗设备的能源自给技术的发展，为未来智能设备和物联网系统的能源供应提供了一种绿色、可持续^[27]的解决方案。

1.5 论文结构安排

本文共分为 5 章，各章内容安排如下：

第 1 章首先介绍了研究的背景和流致振动能量采集的研究现状及前景,阐述了基于仿生表面流致振动能量采集器的研究现状,进而明确了本研究的目的是与意义,最后对论文的结构进行了安排。

第 2 章介绍了流致振动能量采集器的基本原理,重点探讨了基于仿生表面的能量采集器设计,包括仿生表面的生物学基础及灵感来源、仿生表面钝体的结构设计及参数优化。随后,对所设计的仿生表面流致振动能量采集器进行了动力学分析。

第 3 章通过三维流场仿真分析了传统圆柱钝体和仿生表面钝体的流致振动特性。首先,建立了三维流场仿真模型并进行了参数优化,随后对传统圆柱钝体的流场进行了分析,并与基于仿生表面钝体的流场进行对比,探讨了不同设计对流场的影响。

第 4 章介绍了流致振动能量采集器的实验平台搭建过程,重点包括采集器的实物建模及实验装置的搭建。随后,详细描述了实验设备的选型和实验方案的设计,并进行了实验操作与测试。

第 5 章展示了基于传统圆柱钝体和四种仿生表面钝体能量采集器的实验结果,重点分析了不同钝体形态下的输出电压性能。结合实验结果,对能量采集器的输出能力、频域特性及带宽进行了深入分析,最后对实验结果进行了总结。

第 2 章 流致振动能量采集器理论建模及设计

2.1 流致振动能量采集器基本原理

流致振动 (Flow-Induced Vibration, FIV) 是指流体与固体结构相互作用时, 由流体的不稳定力引起的结构振动现象。当流体绕过物体时, 在物体的后方会形成涡流, 涡流会产生周期性变化的升力和阻力, 使结构发生振动。这种振动现象在一定条件下与结构的固有频率相匹配时, 会引起结构共振, 产生大幅振动。流致振动现象的研究在流体力学和结构动力学中非常重要, 特别是在风能、桥梁、海上平台和管道等工程领域中, 它既可能导致结构疲劳和损坏, 但也可以用于能量采集。

为准确描述流致振动现象, 必须使用相关的数学模型对其进行建模分析。涡激振动可以通过斯特劳哈尔数(Strouhal Number)^[33]进行定量描述, 斯特劳哈尔数 St 是一个无量纲参数^[34], 用于描述涡旋脱落频率 f 、物体特征尺寸 D 和流体速度 U 之间的关系:

$$St = \frac{fD}{U} \quad (2-1)$$

斯特劳哈尔数表明, 在固定的流体速度下, 涡旋脱落的频率与物体的特征尺寸成反比关系。在流致振动能量采集中, 通过调节钝体的特征尺寸 D 可以有效调控涡旋脱落频率^[35], 以提高能量采集效率。

此外, 对于驰振和颤振的分析, 则需引入更复杂的非线性耦合方程^[36], 以描述流体与结构之间的相互作用。驰振的振幅与流速成非线性关系, 而颤振涉及到流体动力学和结构弹性动力学之间的相互反馈。因此, 现象的准确建模通常需要通过数值模拟来解决。

在流致振动能量采集器中, 主要依赖于流体流动对结构物体的振动激励作用, 将流体动力转化为机械能或电能。流体与固体表面相互作用时, 流体的运动会在结构物体上产生周期性的振动, 这种振动可以通过适当的结构设计和能量转换机制被有效捕获和转化。流致振动能量采集器通常包括具有特定几何形状的弹性结构, 利用流体的剪切力^[37]或压力波动使结构发生振动。振动的能量通过机械振动

转换器（如压电材料、压电晶体或电磁线圈）转换为电能，从而实现能量的有效回收。为了提高能量采集效率，设计过程中需考虑流体流动特性、结构动力学行为以及能量转换效率等因素。流致振动能量采集器的优势在于能够在低速流体流动环境中实现能源捕获，尤其适用于风能、海洋潮汐能^[38]以及管道内流体流动等场景。

2.2 基于仿生表面流致振动能量采集器的设计

仿生表面设计的生物学基础源于对自然界生物体表面微结构及其功能的深入研究。在长期的进化过程中，许多生物的表面结构通过自然选择，形成了适应环境的独特形态和功能。例如，鲨鱼皮的微小鳞片结构能够有效减少流体阻力^[39]，提高游动速度；蝴蝶翅膀的细微鳞片则能改变空气流动模式^[40]，增加飞行的稳定性。生物表面结构不仅具备调控流体流动的能力，还能够减少能量损耗，增强环境适应性。

通过仿生学原理，研究人员将天然表面的结构特征应用到人工设计结构中，用以优化流体与固体表面的相互作用。在能量采集领域，仿生表面通过模仿生物体表面的纹理、沟槽或鳞片结构，仿生表面能够有效控制流体的流动方向、减少流体分离和湍流现象，从而显著提高能量转换的效率。生物学基础为仿生表面的设计提供了坚实的理论依据，并为流致振动能量采集技术的创新发展奠定了基础。

2.2.1 仿生表面生物学基础及灵感来源

仿生表面的结构设计通过模仿自然界中生物表面的微观结构，旨在优化流体与表面之间的相互作用，以提高能量采集效率。

在本研究中，基于大自然中的生物表面结构，设计了四种不同类型的钝体，其灵感来源于螺旋贝壳、蛤壳、扇贝壳和玻璃鹦鹉螺壳^[41]，如图 2-1 所示。每种设计都经过仔细推敲，以最大程度优化流体与结构的相互作用，从而提高流致振动能量采集器的性能。设计钝体的核心理念是，通过模仿自然界中长期进化出的表面结构，充分利用其在流体调控方面的优势，使能量采集器在不同流动环境中都能有效工作。

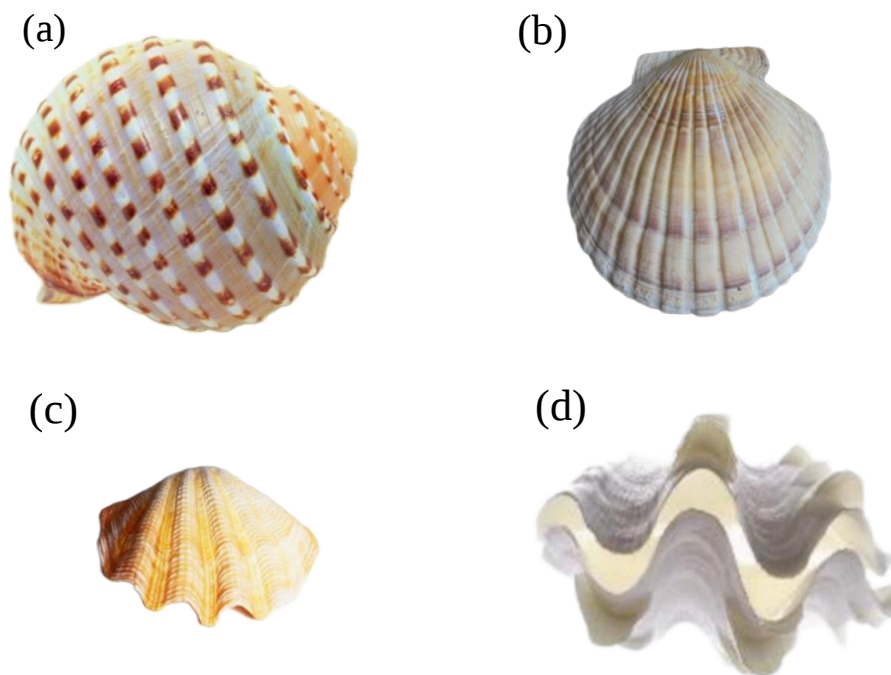


图 2-1 具有自然纹理的贝壳 (a):螺旋壳(波纹条纹) (b):蛤壳(直条纹)
(c):扇贝壳(斜条纹) (d):玻璃状鹦鹉螺壳(折叠条纹)

螺旋贝壳设计的灵感来源于其表面展现了连续的波纹曲线^[42], 这种结构不仅可以引导气流, 增加涡旋的形成, 还能显著降低流体阻力。引入这一结构是为了优化钝体在流体中的稳定性, 确保在不同流速下能够减少涡流引起的振动干扰, 进而提高能量采集效率。螺旋设计的目的是通过流线型几何形状实现更顺畅的流体分离, 使其在能量转换过程中表现出更高的稳定性。

蛤壳设计灵感来源于其表面的密集条纹具有减少流体分离的能力^[43], 这种设计使得钝体在流体中能够增强流动稳定性, 增加涡流和湍流的形成。通过引入这种结构, 减少流体对钝体表面的不均匀冲击, 确保在流致振动中, 表面压力分布更加均衡, 从而提高能量转换的效率。

扇贝壳设计灵感来源于其表面的倾斜或交错条纹结构可以增加局部湍流^[44], 这一设计旨在通过引发更多的湍流和流体扰动, 促进振动能量的产生。该设计背后的理念是利用不规则表面引发的湍流效应, 激发更大幅度的振动, 以增强低风速下的能量采集效率。通过这样的湍流增加, 可以更有效地捕捉风能或水能。

玻璃鹦鹉螺壳设计灵感来源于其表面的复杂折叠纹理结构增加了与流体的接触面积^[45], 从而提高了其水动力性能。这种设计理念是通过增加表面与流体的

相互作用，使钝体能够更有效地捕获能量。折叠纹理不仅可以改善涡旋的生成，还可以通过增加流体的分离点来提高振动频率，从而增强能量收集的效果，尤其适用于中等风速条件下的能量采集。

设计仿生表面的动机来源于自然界中表面结构在与流体交互时表现出的卓越功能，结构通过减少阻力、优化流体分离、引发湍流等方式提高了生物在复杂环境中的生存效率^[46]。通过借鉴自然进化的成果，本文将其转化为流致振动能量采集器的设计优势，推动其在能量收集效率、适应性和稳定性方面取得突破。这种基于自然灵感的设计不仅具有理论上的创新性，还为实现高效、绿色的能源采集提供了全新思路。

2.2.2 仿生表面的钝体结构设计及参数优化

本文结合仿生学的理念，借鉴了自然界中贝壳类生物的表面结构，对钝体表面进行了创新设计。通过将自然界中的表面特征转化为工程应用中的几何结构，能够有效地改善气流与表面的相互作用，增强能量采集效率。为更直观地展示仿生钝体的设计细节，本文利用 SolidWorks 软件(SW)对不同类型的钝体进行了建模，并绘制了具体的设计图，如图 2-2 所示。

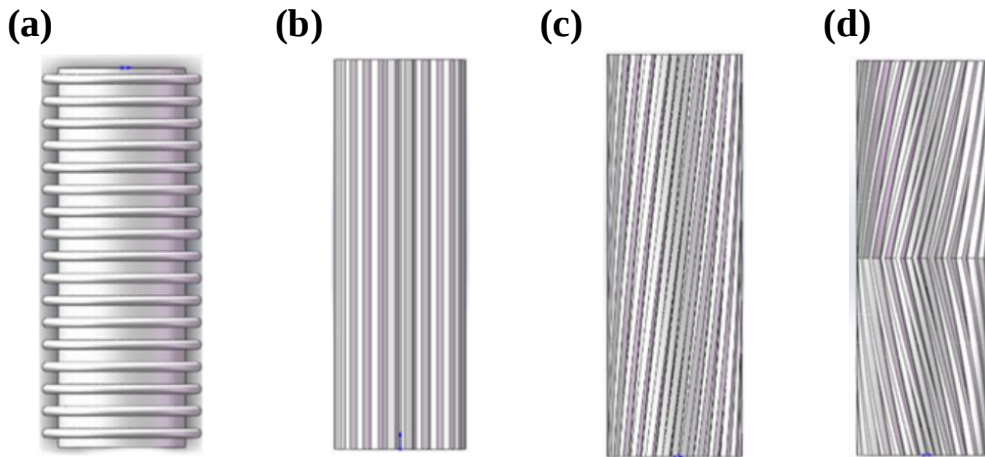


图 2-2 具有仿生表面的钝体 (a):波纹钝体 (b):直纹钝体 (c):斜纹钝体 (d):折纹钝体

在本文的研究中，钝体的设计涉及多个关键参数，其中包括：钝体的纹理厚度，纹理数量以及表面倾角。参数对流致振动能量采集器的性能有重要影响。通过优化参数，可以显著提高采集器的能量转换效率。以下是对钝体设计中几个主要参数的分析，以及参数设计的合理性说明。

纹理厚度决定了气流在钝体表面的分离和再附着行为。较厚的纹理会引发更明显的流体分离，可能导致更大的阻力；而较薄的纹理则有助于减小阻力，但可能无法有效引导涡旋生成，降低能量采集效率。纹理厚度需要在保证涡旋生成与分离的基础上，同时减小气动阻力。为保证实验变量的统一性与一致性，本文选择相同的厚度，所有钝体厚度均设置为 2.5mm。

纹理的数量直接影响钝体表面与流体的相互作用。更多的纹理可以增加流体接触面积，促进更多的涡旋生成，进而提高能量采集效率。然而，过多的纹理可能会增加表面的气动阻力，不利于气流的顺畅分离。纹理数量需要在能量采集效率和气动阻力之间找到平衡。本文设计时选择 16、20 或 24 条纹理，结合仿真数据确定最优的纹理数量。

倾角决定了钝体表面纹理与气流的交互方式。较大的倾角可能导致涡旋在不利的位置生成，增加湍流和阻力；而较小的倾角则可能无法有效引导气流，降低涡旋生成的效率。本文在 15° 至 30° 之间调整倾角。通过 CFD 仿真，确定在不同风速下能够最大化能量采集的倾角。

四种仿生结构不仅在几何外观上具有差异，其对应的流体调控机理亦各不相同。波纹结构可有效诱导边界层内的横向扰动，增强尾流剪切层的不稳定性，促使涡街提前脱落；直纹结构则通过规整条纹引导来流方向，提高流体附着性，抑制逆压梯度导致的分离现象；斜纹结构引入了非对称扰动，激发较强的三维旋涡结构，有助于激发低频驰振响应；而折纹结构则通过多角度折射路径诱发局部强剪切，增强尾流区域涡旋强度，从而提升结构激振能力与能量转换效率。

上述结构在形态参数（如倾角、条纹数量）上的差异，决定了其在升反力分布、涡旋尺度与尾流演化路径等方面的性能特点，为后续理论模型参数差异化设计提供了基础。

2.3 基于仿生表面流致振动能量采集器的动力学分析

为验证所建立的流致振动能量采集器数学模型的可行性与准确性，本文基于 COMSOL6.1 平台对相关方程进行了数值求解。在建模过程中，选用“结构力学”与“流体流动(层流)”模块进行流固耦合建模，并引入机电耦合多物理场接口，以实现流体—结构—压电效应三场的协同分析。

动力学模型中涉及的流体动力学方程(连续性方程与 Navier-Stokes 方程)、结构动力学方程及压电耦合方程均通过有限元方法(FEM)在 COMSOL 中进行离散求解。对于状态空间形式表达的系统模型,采用时域瞬态求解器,结合时间步长控制与自适应网格加密策略,实现了系统在不同风速下的动态响应计算。

如图 2-3 所示,传统的流致振动(FIV)能量采集器主要由以下几个关键组件构成:钝体,悬臂梁,压电片。钝体通常是设计成特定形状(如圆柱形、方形)的固体物体,固定在悬臂梁的一端^[48]。钝体的形状和表面特性直接影响涡旋的形成和流体的动力学特性。悬臂梁一端固定在基座上,另一端与钝体连接。当风流作用于钝体时,其产生的振动会使悬臂梁发生振动。压电元件安装在悬臂梁上,用于将机械振动转换为电能。压电材料在受到机械应力时,会产生电压,进而实现能量转换。

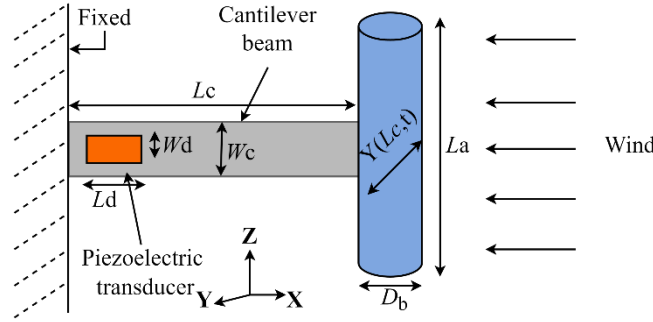


图 2-3 传统 FIV 能量采集器原理图

传统的流致振动(FIV)能量采集器通常工作在主模态占优的低风速下,从而可以忽略高阶模式。为此,本文建立了 FIV 能量采集器的数学模型,流场由流体动力学方程控制。对于不可压缩流体,基本方程为连续性方程和动量守恒方程,分别用式(2-2)和式(2-3)表示。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2-2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (2-3)$$

其中, $\mathbf{v}$ 代表流体速度场, ρ 表示流体密度, p 是压力, μ 表示动态粘度, $\mathbf{g}$ 为重力加速度。此方程为描述流体在流致振动能量采集器内的流动提供了基础。

在流体动力学方程的框架内,本文建立了描述流体流动的基本方程,此方程为理解流动特性提供了基础。为了深入探讨流体运动的复杂性,需要进一步引入纳维-斯托克斯方程。此方程不仅考虑了流体的连续性和动量守恒,还详细描述

了流动中各力的相互作用。因此,纳维-斯托克斯方程(The Navier-Stokes equations)为分析能量采集器中的流动行为提供了全面的理论支持^[47]。

纳维-斯托克斯方程全面描述了流体运动中的动量守恒^[48],详细阐述了压力梯度^[49]、惯性力^[50]和粘性力^[51]之间的相互作用。随着风流的作用,钝体与流体的相互作用会导致振动产生,进而引起压电元件的变形。钝体上的气动力学作用引发的压电悬臂梁的动态行为可由方程(2-4)描述:

$$\ddot{Y}(t) + 2\xi_l \omega_n \dot{Y}(t) + \omega_n^2 Y(t) + \alpha V(t) = F_{fiv}(t) \quad (2-4)$$

其中 $Y(t)$ 为空间坐标, $\dot{Y}(t)$ 和 $\ddot{Y}(t)$ 分别表示速度和加速度, ξ_l 为基本模态下的阻尼比, ω_n 为基本共振的固有角频率, α 为基本模态下的机电耦合系数, $F_{fiv}(t)$ 为流致振动的气动力。

在纳维-斯托克斯方程的框架下,本文可以全面描述流体在能量采集器内部的动态行为。方程揭示了压力梯度、惯性力和粘性力之间的复杂相互作用,进而影响到钝体在流体作用下产生的振动模式。特别是,这种振动是由流体对钝体施加的气动力引发的,而气动力的大小和性质又与钝体的几何特征密切相关。因此,为了更准确地描述流致振动所产生的气动力,需要进一步研究升力和阻力系数,系数在流动条件下起着关键作用。

流致振动力受升力和阻力系数的影响^[52],系数会随钝体外观几何参数(如厚度、数量和倾斜角)变化,为体现四种仿生结构在动力学模型中的参数差异,本文在升力系数 C_L 与阻力系数 C_D 的表达式中引入了结构特异性调整系数 K_i ($i = 1, 2, 3, 4$),分别对应波纹、直纹、斜纹与折纹结构。该系数基于流场仿真提取的平均升力与涡频数据进行拟合修正,从而实现结构与动力学模型之间的定量耦合,如公式(2-5)和(2-6)所示:

$$C_L = C_{L0} \left(1 + K_1 \frac{D_1}{D_b} \cos(\theta) \right) \left(1 + k_2 \frac{N}{N_0} \right) \quad (2-5)$$

$$C_D = C_{D0} \left(1 + K_3 \frac{D_1}{D_b} \cos(\theta) \right) \left(1 + k_4 \frac{N}{N_0} \right) \quad (2-6)$$

其中, C_L 为升力系数, C_{L0} 是光滑表面钝体的升力系数, C_D 为阻力系数, C_{D0} 是光滑表面钝体的阻力系数。 D_1 代表纹理厚度, N 是条纹数量, θ 是纹理的倾斜角, D_b 是钝体的特征直径, N_0 是条纹的参考数量。 K_1 , K_2 , K_3 , K_4 是与纹理相

关的调整因子。

表 2-1 四种仿生钝体结构与动力学模型参数映射关系

仿生结构	功能机制	影响参数	模型差异体现
波纹	增强边界扰动, 诱导 早期脱落	提升 C_L	K_1 修正系数
直纹	引导来流, 稳定边界 层	降低 C_D	K_2 影响尾流阻尼
斜纹	引入非对称扰动, 激 发旋涡	增强涡频 ω_v	K_3 增加振幅因子
折纹	提高局部剪切, 增强 激振	提高升力波动幅度	K_4 调大非线性项

升力和阻力系数的变化直接影响着流体与钝体之间的相互作用, 从而决定了流致振动的强度与特性。力不仅包括促进结构振动的升力, 还包括在一定程度上抑制振动速度的阻力。接下来, 本文探讨了这两种力的分解及其在整体振动行为中的作用, 如公式(2-7)所示:

$$F_{viv}(t) = \frac{1}{2} \rho D_b U^2 L_a C_L \Phi(L_c) - \frac{1}{2} \rho D_b U L_a C_D [\Phi(L_c)]^2 \frac{\partial w}{\partial t} \quad (2-7)$$

其中, ρ 是空气密度, U 是流体流动速度, D_b 是钝体的特征直径, L_a 是钝体的长度, $\Phi(L_c)$ 是固有模态的形状函数。

在分析流致振动力的组成后, 升力和阻力对钝体振动的具体影响被明确。然而, 理解外力的作用不足以全面描述能量采集器的动态行为。为深入研究结构在外部气动力作用下的响应, 本文引入结构动力学方程^[53], 如公式(2-8)所示, 以更准确地描述能量采集器的弯曲和振动反应, 为后续的性能分析奠定基础。

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2\xi_2 \omega_n \frac{\partial w}{\partial t} + \omega_n^2 w = \frac{F_{viv}(t)}{m} \quad (2-8)$$

其中, w 为梁的位移, ξ_2 为梁的阻尼比, ω_n 为梁的固有频率, m 为梁的质量。

通过结构动力学方程, 可以有效描述能量采集器在气动力作用下的振动特性。然而, 在实际流动环境中, 尾流的动态行为同样对振动特性产生显著影响。因此, 有必要引入尾流动态模型^[54], 以更全面地理解流体与结构之间的相互作用。该模型不仅考虑了结构的振动, 还揭示了流动中尾流的形成及其对振动行为的影响。

假设尾流的动态运动遵循范德堡尔振子的行为,其方程可以包含时变的外部扰动或激励函数。该方程的具体形式取决于所研究的系统和应用。范德波尔振子模型考虑了壳体结构、结构振动和电势之间的复杂耦合。此外,尾流动态模型中 Van der Pol 振子非线性项系数 B 根据各仿生结构的尾流振幅变化范围进行差异化设定。在该模型中,振荡速率由非线性项 q^2-1 和壳体的纹理参数控制,如式(2-9)所示:

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \lambda \omega_v (q^2 - 1) \frac{\partial q}{\partial t} + \omega_v^2 q = \frac{A}{D_b} \Phi(L_c) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + B \frac{D_1}{D_b} \frac{N}{N_0} \cos(\theta) \quad (2-9)$$

其中, $q(t)$ 描述近尾流涡流运动的变量, λ 是阻尼系数, ω_v 是涡旋脱落的角频率, A 是常数, B 是与纹理相关的调整系数。

在引入尾流动态模型后,可以更清晰地理解涡流的形成及其对结构振动的影响。然而,单独分析结构振动和流体力学特性仍不足以全面描述能量采集器的行为。为进一步完善模型,需要考虑能量采集过程中机电耦合效应的影响。因此,接下来将引入机电耦合控制方程,以全面描述能量采集器在外部负载下的动态行为。

假设流致振动(FIV)能量采集器的外接负载为一个简单的电阻 R_L , 结合机电耦合控制方程可以描述系统的动态行为, 如公式(2-10)所示:

$$\alpha_e \frac{\partial w}{\partial t} - C_p \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{V(t)}{R_L} \quad (2-10)$$

其中, α_e 是模态机电耦合系数, C_p 是压电换能器的夹持电容, $V(t)$ 是电压, R_L 是外部负载电阻。

在引入机电耦合控制方程后,可以清晰地描述压电换能器在外部负载下的动态行为。然而,为了更系统地分析整个能量采集器的动态特性,需要将上述方程整合为一个更全面的模型。状态空间表示提供了一种有效的方法,将系统的所有动态变量和相互关系整合为一个统一的框架。因此,接下来将介绍状态空间表示,以便深入理解系统的动态演变过程。其中状态向量 Y 、系统矩阵 A 和输入向量 B 表征了整个系统的动态演化。这种表示形式涵盖了结构振动、势能和 Van der Pol 振子态的时间演化, 如公式(2-11)所示:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(t) \\ \frac{\partial Y}{\partial t} \\ V(t) \\ q(t) \\ \frac{\partial q}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

其中 $\mathbf{Y}$ 为状态向量，包括位移 $Y(t)$ ，速度 $\partial Y/\partial t$ ，电压 $V(t)$ ，尾涡运动 $q(t)$ ，其速度 $\partial q/\partial t$ 。因此，状态空间方程可以表示为公式(2-12)：

$$\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial t} = \mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{B} \quad (2-12)$$

其中,系统矩阵 $\mathbf{A}$ 为：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n & \alpha_e & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_e & -\frac{1}{R_L C_p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{A}{D}\Phi(L_c) & 0 & 0 & -\lambda\omega_v(q^2 - 1) & -\omega_v^2 \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

系统矩阵 $\mathbf{A}$ 包含了系统内的动态行为和相互作用。其中， $-\omega_n^2$ 和 $-2\zeta\omega_n$ 表示结构振动的固有频率和阻尼， α_e 代表机电耦合， $-1/R_L C_p$ 而则表示电气元件的时间常数。

输入向量 $\mathbf{B}$ 描述了外部激励对系统的影响。例如，公式第二行右侧的第一个项表示流体对结构施加的升力，第二项量化了阻力的影响，第五行反映了纹理参数对系统的影响。状态空间方程将系统的所有状态变量整合为矩阵形式，描述其动态行为。这一形式化表示有助于分析和仿真复杂系统的动态特性，特别是在受到多重外部激励和内部耦合时。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_{viv}(t) = \frac{1}{2}\rho D_b U^2 L_a C_L \Phi(L_c) - \frac{1}{2}\rho D_b U L_a C_D [\Phi(L_c)]^2 \frac{\partial w}{\partial t} \\ 0 \\ 0 \\ B \frac{D_1}{D_b} \frac{N}{N_0} \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

此公式和模型为理解壳体纹理如何影响流致振动和能量收集性能提供了理论框架，并为进一步的仿真研究和实验验证提供了指导和基础。

2.4 本章小结

本章重点介绍了基于仿生表面流致振动能量采集器的结构参数设计与优化。借鉴贝壳类生物的表面特征,对钝体表面进行仿生设计,并系统分析了纹理厚度、数量、倾角等关键参数对能量采集性能的影响。合理的参数配置可增强气流与钝体表面的相互作用,提高涡旋生成效率,从而提升能量转换效果。此外,结合仿真分析,进一步优化钝体设计,以确保其在不同风速条件下均具备高效能量采集能力。同时,系统构建了基于仿生表面的流致振动(FIV)能量采集器的数学模型。首先,通过流体动力学方程与纳维-斯托克斯方程描述流体流动特性及其与结构的相互作用。随后,分析升力和阻力系数对流致振动力的影响,并将流致振动力进行升力与阻力分解。进一步引入结构动力学方程和尾涡动态模型,解析能量采集器的振动特性及尾流效应。最终,结合机电耦合控制方程与状态空间表示,建立综合动力学模型,为后续仿真分析与实验研究奠定理论基础。

第 3 章 流致振动能量采集器三维流场仿真

本研究采用 COMSOL Multiphysics 6.1 作为流体动力学仿真软件^[55-57]，因其强大的多物理场耦合能力和用户友好的界面。COMSOL 的模块化设计允许轻松集成流体动力学与结构分析，从而提高流致振动能量采集器仿真的精确性。此外，该软件提供丰富的后处理功能，有助于深入分析流场特性、升力和反力系数等关键参数，使得 COMSOL 成为研究流动特性及其对能量采集性能影响的理想选择。

3.1 三维流场仿真模型参数设置及优化

在流致振动能量采集器的研究中，前人普遍采用二维模型进行 CFD 仿真。然而，三维模型相较于二维模型具有显著的优势。首先，三维仿真能够更准确地捕捉复杂的流动特征和涡旋结构，尤其是在流体与固体结构的边界作用时的细微变化。其次，三维模型可以更全面地反映不同几何形状对气动性能的影响，有助于揭示更复杂的气动行为。此外，三维仿真提供了对流场和压力分布的更详细分析，从而为优化设计提供更有力的支持。综上所述，采用三维 CFD 仿真不仅提高了结果的可靠性，还为流致振动能量采集器的性能改进奠定了基础。

本小节将详细介绍用于模拟流体与结构相互作用的三维 CFD 流域参数设置，确保了仿真条件与实际应用环境的一致性，从而能够有效地分析钝体在流致振动(FIV)中的空气动力学特性以及其对能量采集性能的影响。

为确保数值模拟的可靠性和结果的可比性，本研究对所有仿真模型设置了相同的初始条件。这种一致性不仅有助于排除由于边界条件或物理参数不同而导致的偏差，还能确保在分析过程中，任何性能差异都仅由钝体几何形状或表面特征的不同所引起。通过保持流体参数、流场特性以及外部环境条件的一致，本研究能够更精准地评估不同钝体结构在流致振动（FIV）中的空气动力学表现，并保证结果具有较高的可重复性和科学性。这种一致的初始条件设置为探索钝体表面设计对能量采集效率的影响提供了坚实的基础。

本研究采用 COMSOL 对静止钝体进行三维 CFD 仿真，所有仿真均在一致的初始条件下进行。钝体的直径为 $D_b=40\text{ mm}$ ，长度为 $L_a=120\text{ mm}$ ，流体速度设

置为 $U=1\text{ m/s}$ 。根据流动条件，计算得到的雷诺数为 $Re=2889$ 。流场的各项参数详见表 3-1，其中 T 表示空气温度， P 表示空气压力， C 为空气的比热容， λ 为空气的导热系数， M_n 则为空气的平均摩尔质量。通过详细的物理参数设定，本仿真能够精确再现钝体周围的流体动力学行为，为后续的结果分析提供了可靠的基础。

表 3-1 流场的初始条件

参数	数值	单位
T	293.15	K
P	101325	Pa
C	1400	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
λ	0.023	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
M_n	0.02897	$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$

由于本研究中的雷诺数^[58]较低，流场预计表现出层流特性。因此，在 CFD 仿真中，流场采用了层流模块进行设置，以确保流动模式符合实际物理情况。具体仿真参数如表 3-2 所示，层流模块能够精确捕捉钝体周围的流体行为，尤其是在较低速度下的流动分离和涡街生成过程。通过这种设置，本研究能够更好地模拟流致振动条件下的空气动力学特性，并确保仿真结果的准确性和稳定性。

表 3-2 三维 CFD 仿真的参数设置

参数	数值	单位
U_{mean}	1	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
W	205	mm
L	1250	mm
D_b	40	mm
L_a	120	mm
μ	17.9×10^{-6}	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ρ	1.293	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
P_{outlet}	0	Pa

在本研究中， U_{mean} 表示流场中的平均流速， W 为流域的宽度， L 为流域的长度， D_b 表示钝体的直径， L_a 为钝体的长度。流体的空气动力学粘度系数用 μ 表

示，空气密度则为 ρ 。出口压力 P_{outlet} 设定为 0 Pa，以模拟自由流出条件。

在介绍了仿真中流场的设置之后，接下来需要对边界条件的设置进行详细说明。边界条件的合理配置对于确保仿真结果的准确性至关重要，能够有效控制流体的行为并模拟实际物理环境中的流动现象。通过对不同边界条件的设置，可以进一步优化流体流经钝体时的流动特征，确保仿真过程中能够准确捕捉到流致振动的关键动态特性。

如图 4-3 展示了流域及计算域结构的俯视图，并对负载和边界条件进行了详细说明。

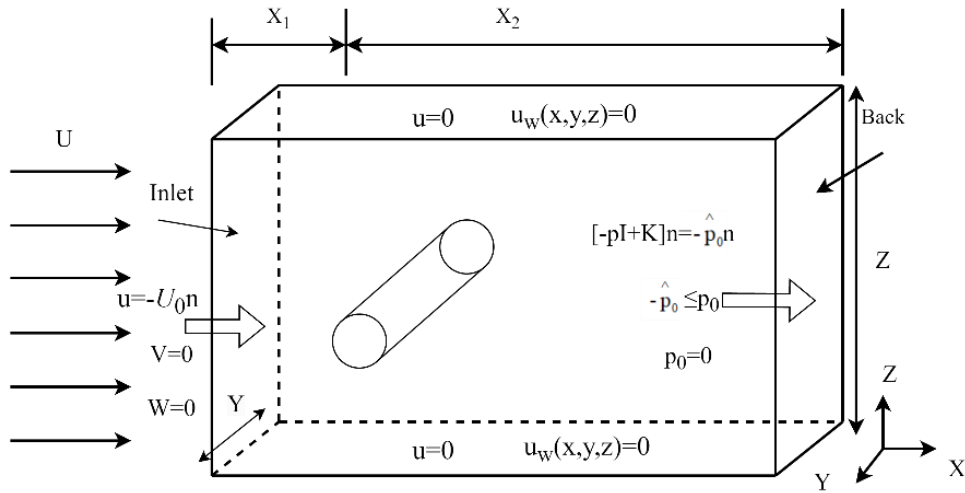


图 3-1 CFD 模拟区域结构及边界条件俯视图

在计算流体域中，顶部边界采用诺伊曼(Neumann)边界条件^[59]，而底部边界则采用狄利克雷(Dirichlet)边界条件^[60]，用于固定变量的值。Neumann 边界条件规定了边界处函数的导数，通常在流体力学中代表无通量边界，这意味着该边界上不存在流体流动或热量传递。这种设置确保了垂直方向上没有通量，即没有流体的垂直运动或热传递发生。相反，Dirichlet 边界条件用于在边界上规定函数的具体值，例如温度或速度的指定值，从而在 CFD 仿真中保持该边界的恒定温度或速度。通过这种边界条件的配置，能够有效地控制流体在边界处的行为，确保仿真过程中的数值稳定性和理论合理性。

本研究所使用的 CFD 模型应用了 Navier-Stokes 方程（如公式 3-1 所示）。该模型考虑了侧向扩散和流线扩散的影响，同时忽略了各向同性扩散。这种设置能够更好地模拟流动过程中细微的速度梯度和压力变化，尤其是在流致振动条件下，

确保了仿真结果能够反映流体运动的真实动力学行为。通过忽略各向同性扩散，仿真更专注于分析特定方向的流动特征，从而提高了计算效率和模型的针对性。

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u &= \nabla \cdot [-pI + K] + F \\ \rho \nabla \cdot u &= 0 \end{aligned} \quad (3-1)$$

其中， ρ 表示空气密度， u 为速度场向量， t 表示时间， p 为压力场， I 为单位矩阵， K 表示粘性应力张量， F 则代表外部体积力场，构成了 Navier-Stokes 方程的基础，用于描述流体的运动规律。在该方程中，粘性应力张量 K 反映流体内部的摩擦作用力，外部体积力场 F 则考虑了重力等外部作用力的影响。通过参数的综合作用，CFD 模型能够精确地模拟出在复杂流动环境下，流体的动态变化及其与固体结构的相互作用。

为了确保仿真结果的精确性，同时降低计算成本与资源使用，本文采用了如图 3-2 所示的 CFD 网格划分策略。该策略通过精细划分关键区域的网格（如流动分离区域和涡旋发生区域），确保了对仿真结果影响较大的区域能够获得足够的分辨率。此外，在流场变化较为平稳的区域，适当采用较为粗糙的网格划分，以减少不必要的计算量。通过这种分区加密与粗化相结合的网格划分方式，不仅有效提升了计算效率，还保证了流场特性的准确捕捉。为了进一步提升计算的稳定性，使用了非结构化网格，这种网格在处理复杂几何形状时具有较好的灵活性。

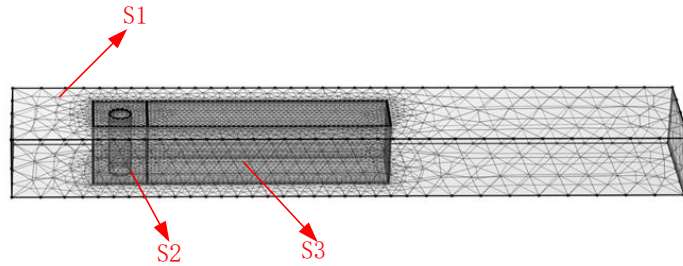


图 3-2 流致振动流场网格划分示意图

为了提升仿真的计算效率，本研究将计算域划分为多个不同区域，并采用自适应的时间步长。以传统圆柱钝体为例，在确保精度和效率的前提下，将计算域分为三个区域：S1、S2 和 S3，分别对应较粗化网格、极细化网格和细化网格。这种分区方法可以根据流场特征的复杂性选择不同的网格分辨率，从而在计算精度和计算成本之间取得平衡。具体而言，S1 区域包含 61221 个网格单元，S2 区域包含 30494 个网格单元，S3 区域则包含 131212 个网格单元。这样的划分确保

了在关键区域（如涡街生成区域和流动分离区域）使用精细网格，而在流场变化较为平稳的区域采用较为粗糙的网格，以减少计算量。

在边界层的处理上，通过多次对比和实验确定了最佳参数。边界层厚度设置为 8，伸展系数为 1.2，边界层初始厚度为 1 毫米，保证了边界层的准确模拟，从而使仿真结果更接近实际物理现象。这样的网格划分策略不仅在保证计算精度的同时，也极大地提升了仿真的计算效率，减少了资源的消耗。

3.2 基于传统圆柱钝体绕流的流场分析

在 3.1 小节中，本文对三维流场仿真模型参数设置与优化进行了系统阐述，确保了模型能够准确反映流体与结构相互作用的复杂性。通过优化参数配置，仿真模型能够更精确地描述流动特性及其对结构的影响。在此基础上，3.2 小节将聚焦于基于传统圆柱钝体的绕流流场分析，深入探讨流体与钝体表面之间的相互作用及其对流致振动的影响。该分析不仅为传统钝体的流动特性提供了定量化的研究依据，也为后续基于仿生表面设计提供了参考框架。

3.2.1 仿真模型的建立

在本小节中，本文基于三维计算流体力学（CFD）仿真技术，模拟了传统圆柱钝体在流致振动过程中的流场变化。仿真模型如图 3-3 所示，采用了合理的边界条件和物理参数，以准确再现流体与圆柱钝体相互作用的全过程。通过该仿真模型，详细分析了传统钝体形态下流场中的关键现象，包括压力分布、流动分离以及涡街结构的演化。此仿真分析为进一步研究流体动力学特性与振动响应之间的关系提供了理论依据。

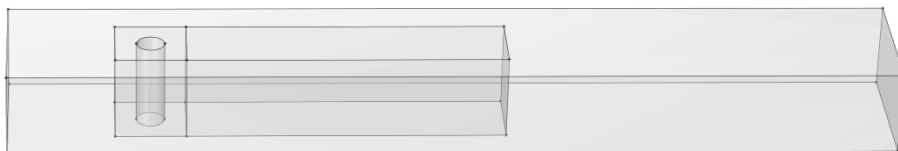


图 3-3 传统圆柱钝体流场仿真建模图

如上图所示，所建立的三维 CFD 仿真模型准确地反映了传统圆柱钝体在流场中的情况，并为后续的流致振动和圆柱绕流分析提供了基础。在此基础上，接下来的分析将重点探讨传统圆柱钝体在流体作用下的振动特性及其对流场结构的反馈影响。具体而言，3.2.2 小节将深入分析流体绕过传统圆柱钝体时所形成的涡街结构、压力分布的变化及其升力和反力对结构振动的驱动作用。同时，通过对一定流速条件下流动分离现象进行更加详细地研究，本文将揭示流体与结构相互作用对振动强度及频率的影响，为流致振动能量采集器的设计优化提供理论依据，为理解传统圆柱钝体在流致振动中的动力学行为奠定了重要的基础。

3.2.2 传统圆柱钝体的流致振动及流场分析

在本小节中，将以传统圆柱钝体为研究对象，重点分析其在流场中的流致振动状态及相关特性。通过三维 CFD 仿真，详细探讨圆柱钝体在流体作用下的升反力变化、流场中的速度分布及涡流量特性。分析结果不仅揭示了传统圆柱钝体在流场中的动力学行为及其产生的流动特性，还为后续仿生钝体的对比分析提供了参考基准，旨在评估不同钝体形态在流致振动能量采集中的性能差异与优化潜力。

在分析传统圆柱钝体的流场特性时，升反力的大小和变化情况是研究的关键参数之一。升反力是指流体作用在物体上的垂直于来流方向的力，其大小和方向由流体绕流过程中产生的压力分布和流动分离现象决定。在流致振动中，升反力的周期性变化直接驱动结构的垂直振动，是引发涡街结构和能量转换的重要动力来源。

分析升反力的意义在于，它不仅可以反映流体与结构之间的非线性耦合作用，还能揭示流动特性与振动状态之间的内在联系。例如，通过研究升反力的幅值和频率，可以确定圆柱钝体在不同流速条件下的振动强度及其稳定性。同时，升反力特性的分析也为流致振动能量采集器的设计提供了理论依据。

在传统圆柱钝体的仿真结果中，可以观察到升反力的周期性波动特性，其大小受到流速、涡街结构以及流动分离点位置的影响。通过量化升反力的变化趋势，能够更深入理解传统圆柱钝体的动力学响应特性，为后续仿生钝体的对比研究奠定基础。

通过使用 COMSOL 仿真软件，对传统圆柱钝体在流场中受到的升反力大小进行了详细分析。在仿真中，选取流速恒定为 1 m/s 的条件，模拟圆柱钝体在流体作用下的升反力变化情况，并提取了升反力随时间变化的曲线，如图 3-4 所示。该曲线直观反映了升反力的波动特性以及其与涡街结构之间的相互关联性。

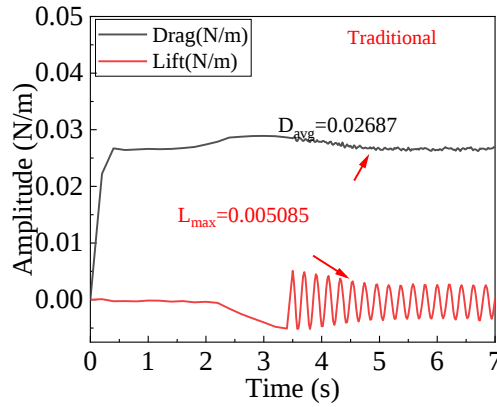


图 3-4 传统圆柱钝体的升反力示意图

从仿真结果可以看出，升反力在一定时间范围内呈现出典型的周期性变化，这与卡门涡街的形成频率高度一致。这种波动特性表明，在恒定流速条件下，流体绕过圆柱钝体时产生的非对称压力分布是升反力变化的主要驱动力。具体而言，当涡街在圆柱的上下两侧交替脱落时，会引起压力中心的交替变化，从而形成升反力的周期性波动。

通过对升反力曲线的进一步分析，可以量化其峰值、平均值以及波动频率，不仅能够反映流体与钝体之间的动力学耦合关系，还可用于预测不同条件下振动幅值的变化趋势。此外，仿真结果还显示，升反力的大小和周期性在一定程度上受到雷诺数和流场初始条件的影响。

本分析为后续仿生钝体的研究提供了重要的参考基准。相比传统圆柱钝体，仿生钝体通过优化表面结构可能显著改变升反力的幅值和频率，从而提高流致振动能量采集的效率。对传统圆柱钝体升反力特性的研究，不仅验证了仿真模型的准确性，也为深入探讨不同钝体形态下的动力学行为奠定了坚实的理论基础。

在对传统圆柱钝体的升反力进行分析之后，接下来将进一步探讨流体流经传统圆柱钝体时流场中的速度分布特性。流体的速度场是流致振动现象中的一个关键因素，其直接影响着涡流的生成、脱落及其对钝体的作用力。通过对流场中速度分布的详细分析，可以更全面地理解流体与结构之间的相互作用，并为后续能

量采集性能的评估提供必要的理论支持。

具体来说,流速分布的变化能够反映出流体绕过圆柱钝体时的流动状态,揭示流体的分离区域、再附着区以及涡街的生成位置。不同的流速分布对升反力的波动特性、钝体的振动响应等因素都有重要影响,因此对速度场的分析不仅能够帮助理解钝体在流场中的动态行为,还为优化钝体形态和提高能量采集效率提供了重要依据。

通过使用 COMSOL Multiphysics 6.1 仿真软件,本文对传统圆柱钝体在流场中的速度分布进行了详细模拟,并得到了流场中的速度云图,如图 3-5 所示。该速度云图直观地展示了流体在绕流过程中的速度分布和流动结构和速度最优点位置,从中可以清晰地观察到流体在圆柱钝体周围的不同区域的速度变化情况。

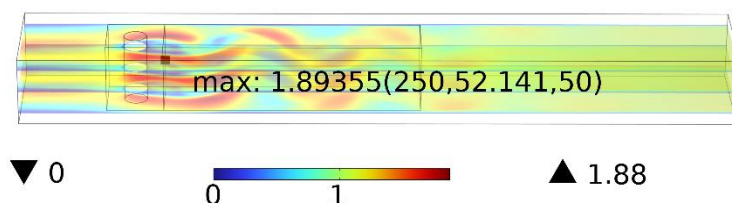


图 3-5 传统圆柱钝体在流场中的速度云图(7s)

在仿真分析中,可以观察到传统圆柱钝体在流场中运行至 7 秒时,流体动力学行为逐渐趋于稳定,涡街结构形成了更加有序的模式。此时,涡街的脱落与生成过程呈现出明显的周期性特征,表明流体与钝体之间的相互作用已从初始的过渡状态进入到动态平衡状态。

具体而言,涡旋的间距和脱落频率在此阶段趋于稳定,这种规律性表明流场的整体流动特性已经不再发生显著的变化。同时,涡街的对称性也得到了显著改善,其周期性脱落不仅反映了流体绕流过程中压力分布的动态均衡,还与升反力周期波动密切相关。

这种平衡状态的形成对流致振动的研究具有重要意义。一方面,稳定的涡街结构为深入分析钝体的动力学特性及能量采集性能提供了可靠的参考依据;另一方面,这一状态下的流动特性可以作为对比仿生钝体性能优化的基准条件,为后续研究不同钝体形态在流致振动能量采集中的特性分析提供理论支撑。

通过仿真计算发现,在传统圆柱钝体的流场中,坐标点为 (250, 52.141, 50) 的位置处涡街速度达到最大值,速度大小如图 3-6 所示。这一结果表明,该点处

流动能量最为集中，是涡旋效应最为显著的区域。

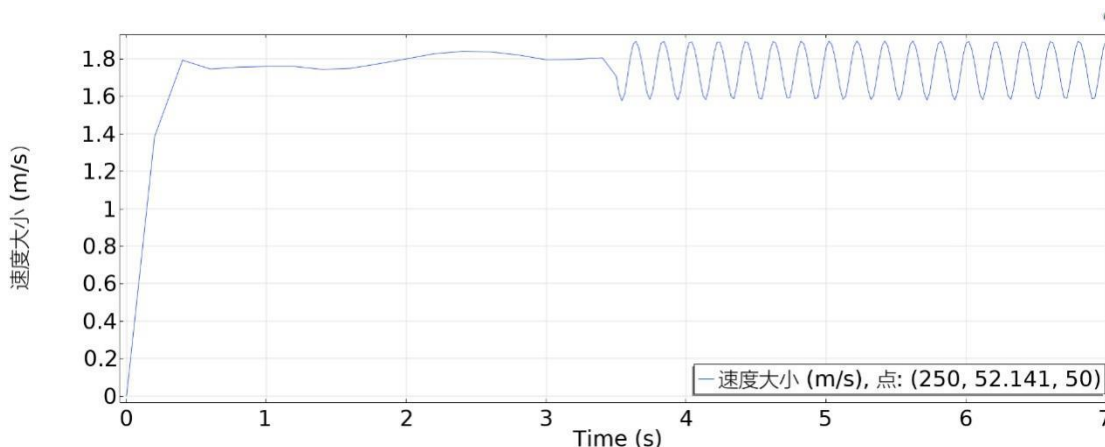


图 3-6 流场中传统圆柱钝体在点(250, 52.141, 50)处速度大小

涡街速度的最大值反映了流体动能在该位置的高度集中，这是由涡旋的剧烈运动和强烈的剪切层作用共同造成的。此现象进一步表明，该区域是流场动力学行为的关键区域，不仅对流致振动的形成具有重要影响，还对钝体的升反力和阻力特性起到了显著的调控作用。

如上图所示，在仿真初始阶段（0 至 3.4 秒），涡街速度呈现出明显的快速上升趋势，表明流体在绕流过程中动能逐步积聚。此阶段的速度增长反映了涡旋效应的逐渐增强，以及流体在钝体周围的流动特性尚处于不稳定状态。随着时间的推移，流体动力逐步作用于钝体并诱导出稳定的流动模式。

在 3.4 秒至 7 秒时间段内，涡街速度的变化开始表现出周期性特征，其波动曲线近似于正弦波围绕最大速度值振荡。这种速度波动现象表明流体与钝体之间的相互作用逐步趋于平衡，涡街的生成与脱落过程进入稳定周期，揭示了流体动力学特性从不规则状态向动态平衡状态的转变。

最终，速度的最大值达到 1.89 m/s，这标志着此时刻流场的稳定性已基本确立，涡街的生成与演化进入稳定阶段。此时，流体的空气动力学特性得到了充分展现，钝体周围的涡流结构也反映出稳定的周期性脱落特征。这一过程的研究不仅为理解传统圆柱钝体的流致振动行为提供了定量依据，也为后续对比分析仿生钝体的性能优化奠定了基础。

对这一高能量区域的定位和分析，不仅为理解涡街的生成与演化机制提供了依据，也为优化能量采集器的设计提供了指导。通过调整钝体的形态或表面特性，可以增强该区域的涡旋效应，从而提高能量转换的效率。这一发现为后续仿生钝

体在提升能量采集性能方面提供了重要的理论支持。

综上所述,通过对传统圆柱钝体绕流的流场分析,可以清晰地观察到其升反力、速度分布及涡街生成的规律性特征。结果不仅揭示了传统圆柱钝体在流致振动中的动力学行为,也为能量采集性能的优化提供了参考基准。然而,传统圆柱钝体在流动稳定性及能量转换效率方面仍存在一定的局限性。为了进一步提高流致振动能量采集器的性能,接下来的研究将聚焦于基于仿生表面设计的钝体,探讨其绕流特性对流场分布、涡街结构及动力学响应的改进效果,以期实现更高效的能量采集和更优异的流体控制性能。

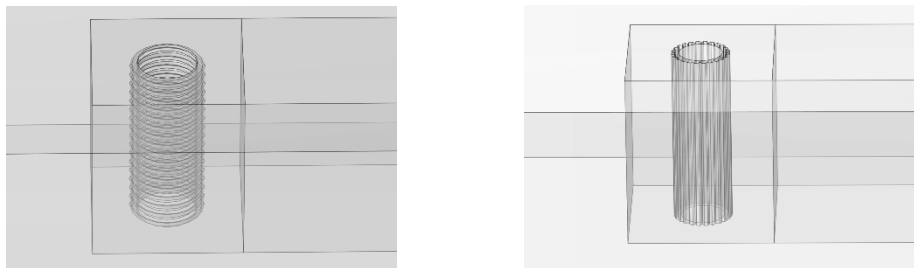
3.3 基于仿生表面钝体绕流的流场分析

在传统圆柱钝体绕流流场分析的基础上,为进一步提升流致振动能量采集器的性能,本文引入了仿生表面设计的钝体。仿生设计通过借鉴自然界生物表面的结构特性,旨在优化钝体的流体动力学性能,从而改善流场分布特性、增强涡街稳定性并提高能量采集效率。

本节将围绕基于仿生表面的钝体绕流特性展开研究。首先,通过建立仿生钝体的三维仿真模型,模拟其在流场中的动力学行为和流动特性。随后,将重点分析仿生钝体的流场分布、涡旋生成及流动分离特性,并与传统圆柱钝体进行对比,探讨仿生设计对流场结构优化的潜在作用。接下来,在 3.3.1 小节中,将详细介绍仿生表面钝体仿真模型的建立。

3.3.1 仿真模型的建立

在本小节中,基于 COMSOL Multiphysics 6.1 仿真软件,完成了仿生表面钝体的三维建模及相关参数设置。通过在建模过程中引入仿生表面特征,旨在模拟仿生钝体在流场中的动力学行为及流动特性,如图 3-7 所示。



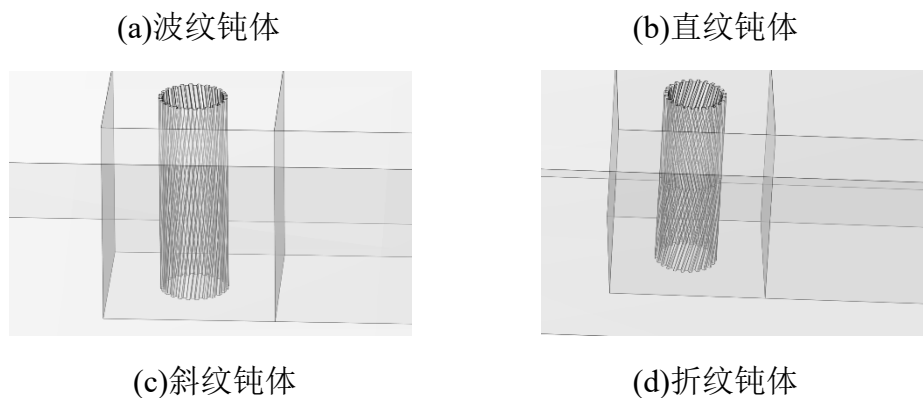


图 3-7 四种不同仿生表面钝体流场仿真建模图

该仿真模型在沿用传统圆柱钝体基本特征的基础上,通过添加仿生表面的几何结构(如波纹、折纹或其他形态),进一步优化了钝体的流体动力学性能。模型的建立充分考虑了仿生表面特性的影响,并结合实际流场条件设置了合理的边界条件、流体属性及网格划分,以确保仿真结果的准确性和可靠性。接下来将以该模型为基础,展开对仿生钝体绕流特性的深入分析。

3.3.2 仿生表面钝体的流致振动及流场分析

在本小节中,将针对四种不同仿生表面钝体的流致振动及流场特性进行详细分析。通过 COMSOL Multiphysics 6.1 仿真软件,分别对四种仿生钝体在流场中的动力学响应进行了建模和模拟,重点探讨其升反力、流场速度分布及涡流量的变化特性,不仅能够揭示不同仿生设计对流体动力学性能的影响,还可进一步评估其在能量采集上的潜在优势。

在仿真过程中,通过提取关键动力学参数,分析各仿生钝体在不同流速条件下的流致振动状态,并对其涡街结构的生成与演化进行深入研究。随后,将结果与传统圆柱钝体的性能指标进行对比,探讨仿生表面设计在流致振动特性优化及能量采集性能提升方面的有效性和优势。

通过使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件,对四种不同仿生钝体在流场中受到的升反力大小进行了深入分析。不同仿生钝体的升反力曲线呈现出各自的波动特性和规律,这与其表面结构设计的差异密切相关。通过分析升反力的幅值、平均值和波动频率,可进一步探讨不同仿生设计在升反力特性优化及流致振动能量采集效率提升方面的潜在作用。结果为评估仿生钝体的流体动力学性能及其相较于传统圆柱钝体的优势提供了重要依据。

图 3-8 展示了波纹钝体在流速恒定为 1m/s 条件下的升反力曲线图。仿生钝体的仿真条件，包括边界条件、参数设置及网格划分模式，与传统圆柱钝体仿真模型保持完全一致，以确保对比分析的科学性和准确性。

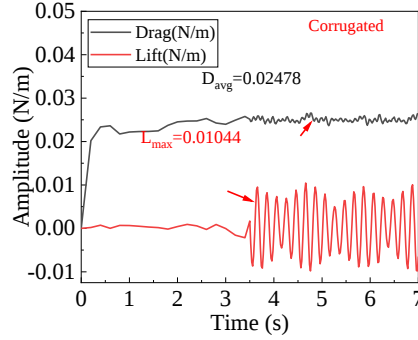


图 3-8 波纹钝体的升反力示意图

仿真结果表明，波纹钝体的升力和反力大小与其纹理数量无直接关联。这是由于波纹钝体在特征截面上的空气动力学特性保持一致，即使纹理数量发生变化，也不会对其整体升反力产生显著影响。在流场中，钝体的特征截面形状是影响其空气动力学性能的关键因素，包括流体的压力分布、流动分离点位置以及涡街生成特性等。

此外，本文所有钝体的厚度均设置为 2.5 mm，以确保研究结果的可比性和一致性。图中展示的仿真结果均基于厚度为 2.5 mm 的设定条件。这种统一的厚度设计在保证结构特性相同的同时，突出了特征截面对钝体空气动力学性能的决定性作用，为后续进一步优化和分析奠定了重要基础。

接下来将分析其余三种仿生钝体在流场中的升反力情况。钝体的基本参数与前文保持一致，纹理数量分别设置为 16、20 和 24，以探讨纹理数量逐渐递增对钝体特征截面及其空气动力学性能的影响。

随着纹理数量的增加，钝体的特征截面形状发生变化，从而可能改变流体绕流时的压力分布、流动分离位置及涡街的生成特性。通过对比分析这三种钝体的升反力曲线，能够更全面地了解纹理数量对钝体空气动力学行为的影响，揭示其在流场中的流致振动特性。

最终，通过比较不同纹理数量钝体的升反力特性，可以筛选出在性能上最优的纹理设计，为后续实验分析提供理论依据。最优纹理数量的选择将为仿生钝体能量采集器的设计优化及实际应用奠定基础，同时也有助于进一步提升其空气动力

力学性能和能量采集效率。

如图 3-9 所示,直纹钝体在纹理数量分别为 16、20 和 24 时的升反力曲线得到了直观展示。通过仿真分析,可以清晰地观察到不同纹理数量的直纹钝体在流场中的升反力变化规律。

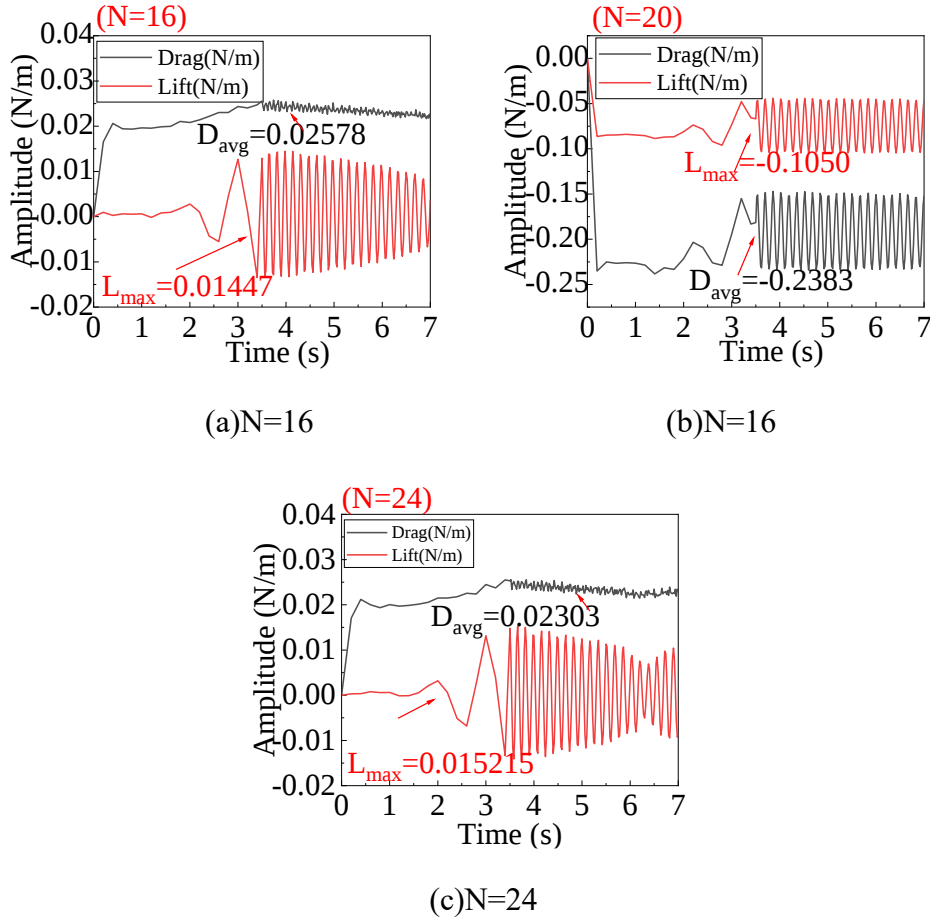


图 3-9 直纹钝体的升反力示意图

从图中可以看出,随着纹理数量的增加,升反力的波动特性及幅值呈现一定的变化趋势。这种变化反映了纹理数量对钝体表面压力分布及流体分离行为的影响。纹理数量的增加可能导致特征截面的流动阻力变化,从而影响涡街的生成规律和升反力的周期性波动特性。

对于直纹钝体,当纹理数量增加至 24 时,仿真结果显示其升力和反力之间的差值显著增大,同时升反力的波动幅度更加明显。这一现象表明,该纹理数量下钝体在流场中的动力学响应特性得到了增强,表现出更强的流致振动行为。

升反力差值的增大反映了流体在钝体表面的压力分布不对称性增强,这通常与流动分离的变化及涡街生成的规律性密切相关。此外,波动的明显性也表明涡

旋的生成和脱落更加有序，从而提升了流场的动态稳定性。这种增强的稳定性有助于钝体在流致振动能量采集中的性能提升，因为更稳定的涡街结构通常伴随着更高的能量转换效率。

因此，可以推测，纹理数量为 24 的直纹钝体在一定条件下可能具有优化的空气动力学性能。这为后续的实验验证及性能对比提供了重要的理论依据，同时也为仿生钝体设计的进一步优化提供了方向。

通过对不同纹理数量的直纹钝体升反力特性的深入对比，可以进一步理解纹理数量与钝体空气动力学性能之间的关系。这为优化直纹钝体设计提供了重要的参考依据，也为后续仿生钝体性能改进和能量采集效率提升奠定了数据支持。

接下来对斜纹钝体在流场中的仿真情况进行分析，如图 3-10 所示为斜纹钝体在纹理数量分别为 16、20 和 24 时的升反力示意图。通过仿真分析，可以直观地观察到不同纹理数量的斜纹钝体在流场中升反力的变化趋势及其波动特性。

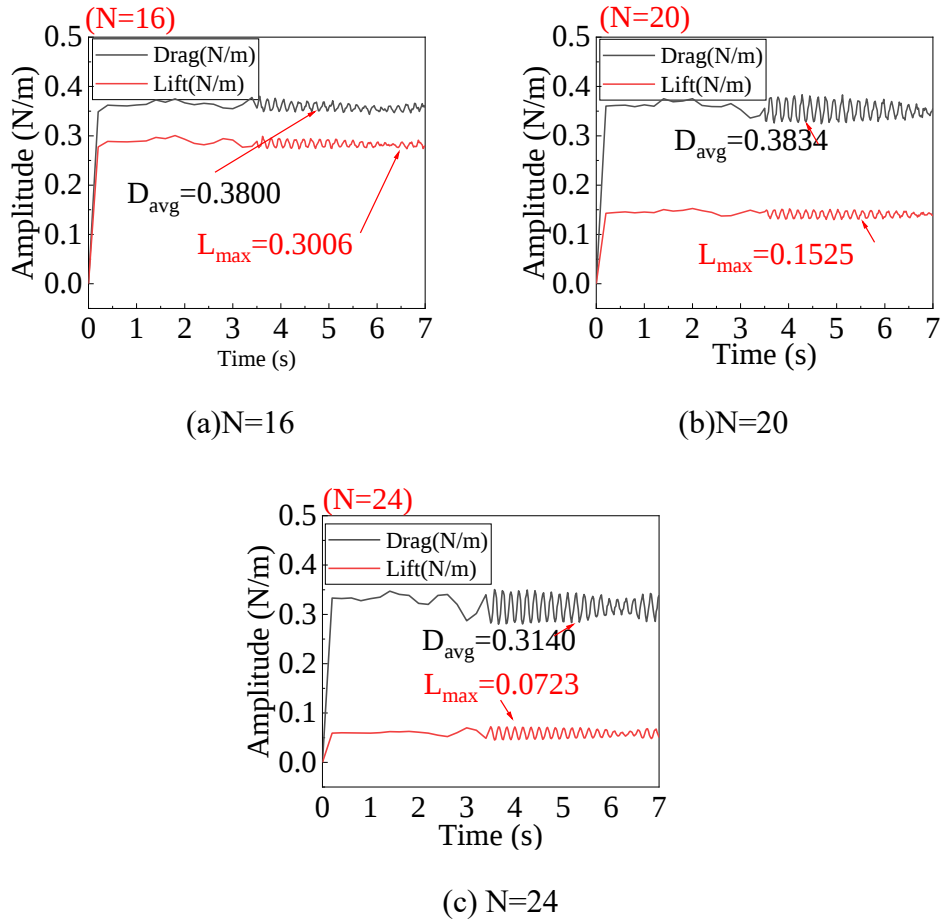


图 3-10 斜纹钝体的升反力示意图

从图中可以看出，随着纹理数量的增加，斜纹钝体的升反力曲线呈现出一定

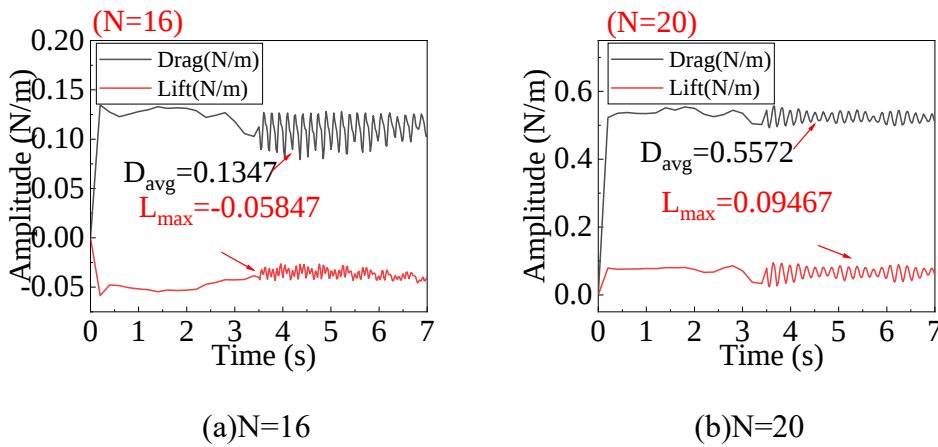
的规律性变化。对于斜纹钝体，当纹理数量增加至 24 时，仿真结果显示其升力和反力的整体值相对较低且更加均衡。这表明流体在绕流过程中产生的压力分布趋于平稳，流动分离现象得到了有效控制，从而提升了钝体的稳定性。然而，与其他纹理数量相比，纹理数量为 24 时的升反力差值更大，反映出涡街生成与脱落过程中的流体动力学效应得到了增强。

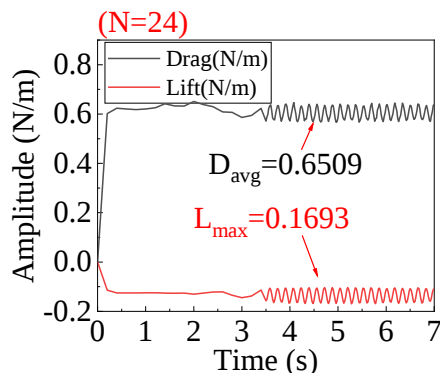
这一结果表明，纹理数量为 24 的斜纹钝体能够在保持升反力均衡的同时，显著提升流致振动的动力学响应幅度，从而表现出较优越的空气动力学性能。这种设计优化的特性不仅有助于提升流体稳定性，还能够增强能量采集效率，为流致振动能量采集器的进一步优化提供了重要参考依据。

与直纹钝体相比，斜纹设计能够引导流体沿特定方向偏转，从而进一步影响流体分离的位置和压力分布的不对称性。这种特性使得升反力的周期性波动在不同纹理数量下表现出独特的行为模式。

通过对比分析斜纹钝体在不同纹理数量下的升反力特性，可以进一步探讨斜纹设计对涡街生成、流动分离及流场稳定性的具体影响。研究结果不仅为理解斜纹钝体的动力学特性提供了理论支持，也为优化其空气动力学性能和提升流致振动能量采集效率提供了科学依据。

最后对折纹钝体在流场中的仿真情况进行分析，如图 3-11 所示为折纹钝体在纹理数量分别为 16、20 和 24 时的升反力示意图。通过仿真模拟，可以观察到不同纹理数量的折纹钝体在流场中的升反力变化趋势及其动力学特性。





(c)N=24

图 3-11 折纹钝体的升反力示意图

从图中可以看出,折纹钝体的升反力曲线随着纹理数量的增加呈现出独特的波动特性。对于折纹钝体,当纹理数量增加至 24 时,仿真结果显示其升力和反力均达到了较高水平,且二者之间的差值最大。这表明在该纹理数量条件下,折纹钝体表面的流体压力分布和涡旋效应得到了显著增强,流体动力学特性更加突出。同时,升反力的波动表现出更高的稳定性,反映了涡街生成与脱落的规律性进一步优化。

这一结果表明,纹理数量为 24 的折纹钝体具备最佳的空气动力学性能。升反力的高幅值和稳定波动不仅提升了流致振动的能量转换效率,也确保了钝体在流场中的动态稳定性。这种优化的动力学响应特性为后续能量采集器的设计提供了可靠的理论依据,并突显了折纹钝体在仿生表面设计中的应用潜力。

折纹设计的几何形状引导流体在表面形成复杂的分离与再附着现象,这不仅改变了流场中压力分布的规律性,也对涡街的生成与脱落过程产生了显著影响。纹理数量的变化使折纹钝体的特征截面逐步优化,从而在不同条件下展现出各自的空气动力学行为。

通过对不同纹理数量下折纹钝体升反力特性的深入分析,可以进一步探讨折纹设计在优化流动稳定性及提升流致振动能量采集效率方面的潜力。这为全面评估仿生钝体的空气动力学性能提供了数据支持,并为研究中选择最优纹理数量的折纹钝体奠定了重要基础。

3.4 基于流致振动能量采集器流场对比与分析

在前文中，已对不同钝体在流场中的升反力特性进行了详细分析，揭示了不同纹理设计对流体动力学性能的影响。为了更具体地探讨仿生钝体与传统圆柱钝体在性能上的差异，接下来将进一步分析流场中的速度分布特性以及涡流量的变化情况。

为了更加直观地展示不同纹理数量仿生钝体在流场中的升反力特性，将四种不同纹理数量仿生钝体的升反力曲线进行归纳，并统一绘制在同一张图中进行比较，如图 3-12 所示。

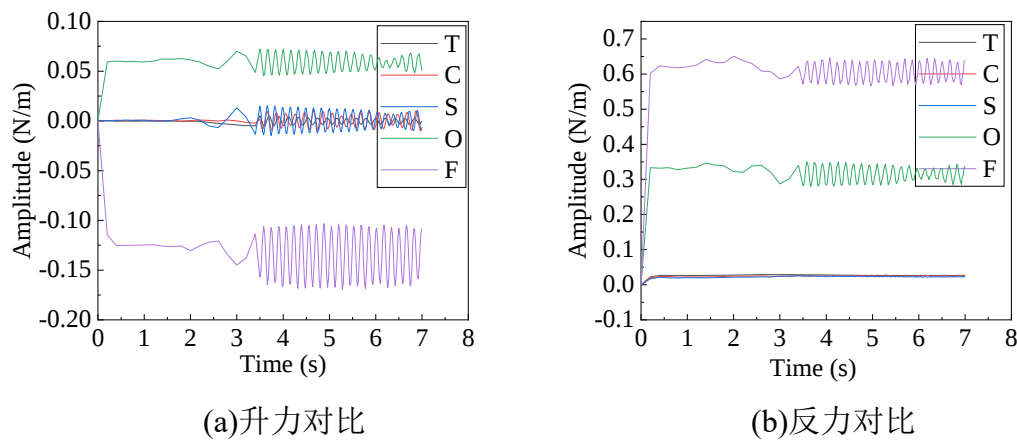


图 3-12 不同钝体的升反力对比示意图(N=24)

图 3-12 不仅展示了各仿生钝体升反力的整体变化趋势，还通过数据对比量化了不同纹理设计的性能特性。相较传统圆柱钝体，仿生钝体在升反力幅值、波动稳定性及差值等方面表现出不同程度的优化。表 3-3 列出了各钝体在流场中的升反力大小，基于数据的对比分析可更精确评估仿生表面对流致振动性能的影响，为优化钝体设计提供依据。

表 3-3 不同仿生表面钝体的升力和反力(N=24)

仿生表面类型	升力幅值(N/m)	平均反力(N/m)
传统	0.005085	0.02687
波纹	0.01044	0.02478
直纹	0.015215	0.02303
斜纹	0.0723	0.3140
折纹	0.1693	0.6509

如上表所示, 五种不同仿生表面钝体 ($N=24$) 的升力振幅和平均反力值展现出了显著的性能差异。分析结果表明, 仿生表面的设计能够显著影响钝体的空气动力学性能。例如, 波纹表面钝体相较于传统圆柱钝体, 将平均反力降低了 97.5%, 同时将升力振幅提高了 105%, 展现出优异的流体稳定性和更强的流致振动能力; 斜纹表面钝体的平均反力则增加了 106.9%, 升力振幅提升了 99.3%, 显示出其对涡街生成和动力响应的显著增强。

数据表明, 仿生表面的几何特性能够通过改变流场中的压力分布与涡旋特性, 有效优化钝体的动力学行为。这种优化效果不仅提升了升反力的控制能力, 还为能量采集效率的提高提供了可能性。此外, 通过调整仿生表面的纹理设计, 可以在空气动力学性能上实现特定目标的优化。这种设计方法为工程应用中的钝体性能优化提供了理论支持, 同时也展现了仿生表面在高效能量采集与流体控制领域的广阔应用前景。

综上所述, 在四种仿生钝体中, 当纹理数量为 24 时, 其升力和反力的差值达到了最大值, 同时波动表现出较高的稳定性与均衡性, 展现出最佳的空气动力学特性。这种性能优势表明, 24 个纹理的设计能够显著优化钝体表面的流体分离特性, 减少涡旋的不规则生成, 进而提升钝体的动力学稳定性和流致振动效率。

因此, 选择具有 24 个纹理的仿生钝体作为实验研究对象是最优方案。这不仅能够确保实验结果的科学性和准确性, 还为进一步研究仿生表面设计对流场特性的影响奠定了坚实基础。同时, 这一选择也为探索高效能量采集器的设计优化提供了可靠的理论支撑和实践指导。

在完成对不同钝体在流场中的升反力分析后, 接下来将重点分析钝体绕流对流场中涡量大小和尾流速度分布的影响。涡量大小是衡量涡旋强度的重要参数, 直接反映了流体绕流过程中涡街生成与脱落的规律性及动力学行为。而尾流速度的大小则能够揭示流场中能量分布的变化情况, 以及钝体对流体动量传递和能量损耗的影响。

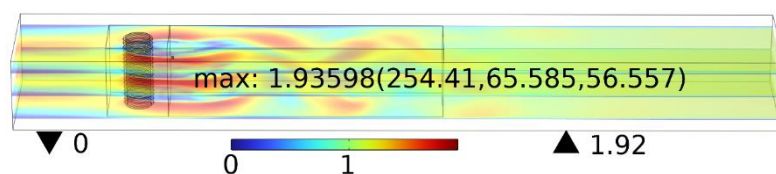
通过对不同钝体涡量和尾流速度的比较分析, 可以深入探讨仿生表面纹理设计对流体分离点位置、涡旋生成强度及尾流区域特性的调控作用, 不仅能够揭示仿生钝体在优化空气动力学性能方面的潜在优势, 还为后续能量采集效率的提升提供了关键的理论依据和数据支持。同时, 与传统圆柱钝体的对比分析将进一步

明确仿生表面设计在流体控制领域中的应用价值。

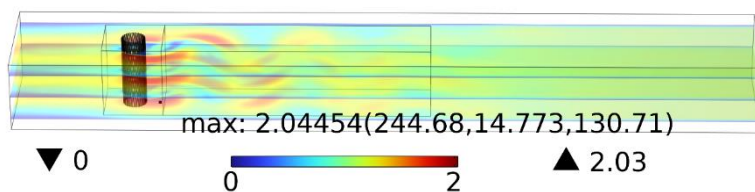
首先,将对尾流速度大小及流场中的速度分布情况进行详细分析。在前文中,通过对传统圆柱钝体的速度分布规律进行研究,可以清晰地观察到其涡街的生成特性和速度分布的动态变化,为理解流体绕流过程中速度梯度的分布规律及动能传递机制提供了重要参考。

为了进一步探讨几何结构对流体运动的调控作用,接下来将分析其余几种仿生表面钝体在流场中的速度分布情况。通过对不同仿生钝体的速度分布进行对比研究,可以更直观地揭示表面纹理设计对流体分离点、尾流区域以及流体动量传递的影响。

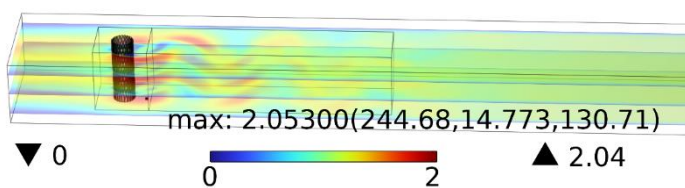
如图 3-13 所示,展示了四种贝壳状仿生表面钝体在 COMSOL 6.1 软件的层流模块中分析得到的速度云图,速度云图清晰地呈现了不同仿生表面钝体在流场中的速度分布特性,为研究钝体表面几何结构对流体动力学行为的影响提供了直观的依据。



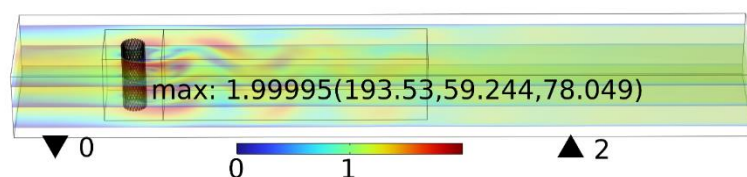
(a)波纹钝体



(b)直纹钝体



(c)斜纹钝体



(d)折纹钝体

图 3-13 不同仿生表面钝体在流场中的速度云图(7s)

从云图中可以观察到，不同仿生表面钝体由于纹理设计的差异，流场中的速度分布表现出显著差异。流体在绕流过程中形成的速度梯度和尾流区域的动量传递特性明显受到表面几何形状的影响。特别是，在尾流区域，速度分布的均匀性和低速区的范围直接反映了钝体对涡街生成与分离行为的调控能力。

所有钝体置于流场后均出现了明显的卡门涡街现象，但不同钝体生成的涡街特征存在显著差异。具体而言，差异表现为涡街的尺寸、谐振频率及生成间隔的不同。仿生钝体表面的纹理特征对流体分离行为产生了显著影响，从而导致涡街在大小、形状及周期性方面呈现出各自独特的特性。此外，不同涡街中产生的最大速度值也因钝体表面结构的差异而有所不同，这直接反映了流体动能在涡旋区域的分布规律及强度变化。

结果进一步说明，仿生表面的设计不仅改变了流体的分离点位置，还显著优化了流体能量分布及动量交换的效率，为提升钝体的空气动力学性能提供了重要的理论依据。通过对比分析云图，可以深入理解不同仿生表面钝体的性能优势及其在流致振动能量采集中的潜在应用价值。

为了进一步探讨仿生表面设计在空气动力学性能上的具体表现，接下来将重点对各类钝体在流场中涡街最大速度的差异进行对比分析。这一研究将揭示不同仿生表面结构对涡街生成和流场稳定性的优化作用，并为优化钝体结构及提升其流致振动能量采集效率提供科学依据和设计指导。

为了更加直观地比较不同仿生表面钝体与传统圆柱钝体在流场中的空气动力学特性，本文将入口流速设定为 1 m/s ，并利用 COMSOL 6.1 仿真软件对各钝体在流场中的最优点涡街最大速度进行了详细分析。同时，通过模拟结果绘制了流域中的速度分布，如图 3-14 所示，展示了不同仿生表面钝体与传统圆柱钝体

最优点速度的对比情况。

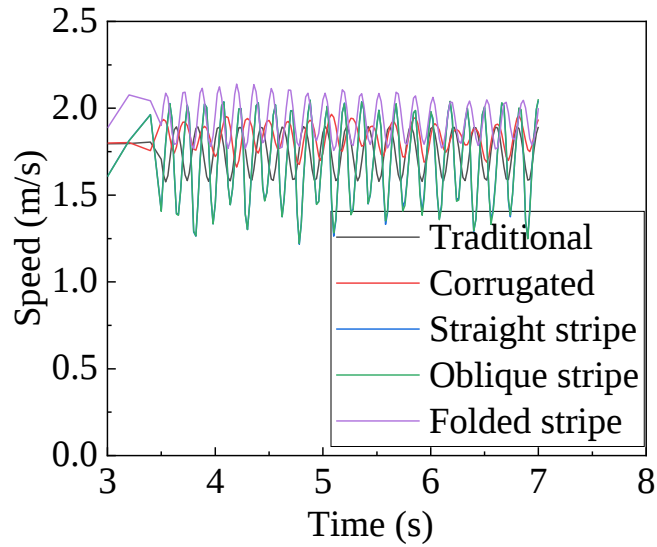


图 3-14 流场中的最优点速度对比

从图中可以清楚地看到，各类仿生表面钝体的涡街速度特性明显不同于传统圆柱钝体。这种差异反映了表面纹理设计对流体分离点位置、涡街生成强度及脱落规律的显著影响。具体而言，不同仿生钝体表面的几何特性对涡街最大速度的调控效果存在差异，这表明仿生表面的设计能够有效优化流体分布及动能传递效率。

如上图所示，研究结果表明，通过优化钝体的几何结构，可以显著改善流体的流动特性，并提升其空气动力学性能。传统圆柱钝体在流场中尾流的最大速度出现在坐标(250, 52.141, 50)，最大涡街速度为 1.89 m/s。而相比之下，优化后的仿生表面钝体表现出更优异的性能。

具体而言，波纹钝体在坐标(254.41, 65.585, 56.557)处的最大涡街速度达到 1.94 m/s，相较于传统圆柱钝体提高了约 2.64%。直纹钝体的最大速度出现在坐标(244.68, 14.773, 130.71)，为 2.04 m/s，提升约 7.95%。斜纹钝体在相同坐标处的最大速度达到了 2.05 m/s，较传统圆柱钝体增加了约 8.47%，表现出显著的优化效果。最后，折纹钝体在坐标(193.53, 59.244, 78.049)处的最大速度为 2.00 m/s，相对提高了约 5.82%。

结果清晰地表明，仿生表面钝体通过优化几何结构，能够有效减少流体的分离和摩擦损失，增强涡街生成的强度和规律性，从而显著提升流场性能。这种基

于仿生设计的性能优化不仅在空气动力学性能上展现出明显优势，同时也为提高流致振动能量采集效率提供了理论支持，为钝体结构设计在工程应用中的进一步优化提供了科学依据，展现了仿生表面在流体动力学领域的广阔前景。

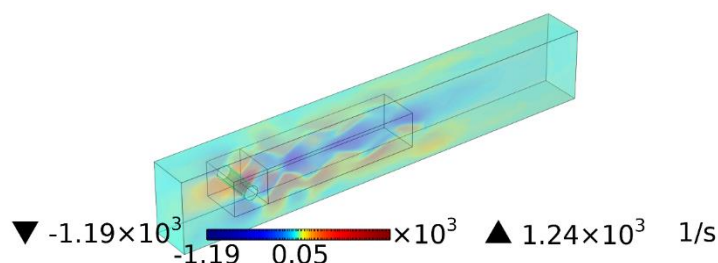
通过对比分析，不仅能够深入理解不同表面特征对涡街生成与流体分离行为的影响，还为后续提升钝体的空气动力学性能和能量采集效率提供了关键的理论支持。

在对不同仿生表面钝体在流场中的速度分布进行了详细比较之后，本文进一步探讨钝体所产生的涡流量特性。涡流量作为衡量流体动力学行为的重要参数，不仅能够反映流体在钝体周围的动态特征，还可以揭示钝体几何设计对流场结构的调控作用。

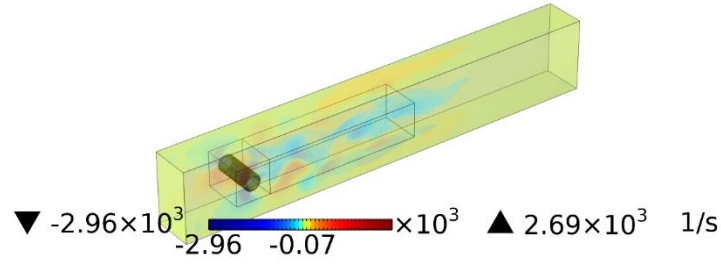
通过分析涡流量的变化规律，可以更加深入地了解仿生表面设计对流体分离点位置、涡街生成强度及其周期性脱落的具体影响。此外，涡流量的分布特性能够直接反映钝体对流场中动能传递和能量耗散的调节能力，从而为评估其空气动力学性能提供关键参考。

这一分析不仅补充了对不同钝体流场性能的全面认识，同时也为优化钝体设计提供了更具指导性的视角。通过理解仿生表面设计如何影响涡流量特性，可以为提升能量采集效率、改善流场稳定性和降低流体阻力提供科学依据，为未来高性能仿生钝体的开发奠定理论基础。

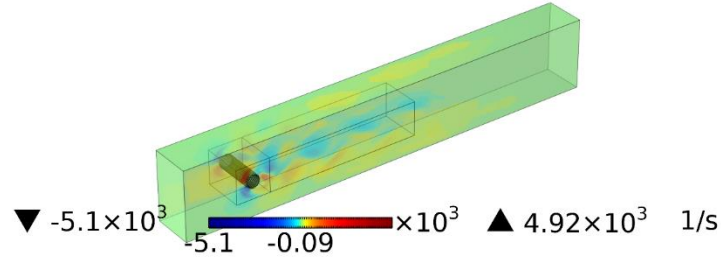
如图 3-15 所示，展示了流域中传统圆柱钝体及其余四种仿生表面钝体的涡脱落模式，并将其与传统圆柱钝体在 x 轴方向上的涡量变化进行了详细比较，涡脱落模式直观地反映了不同钝体几何设计对流体流动特性的调控作用，为深入理解仿生表面设计如何影响流场行为提供了重要依据。



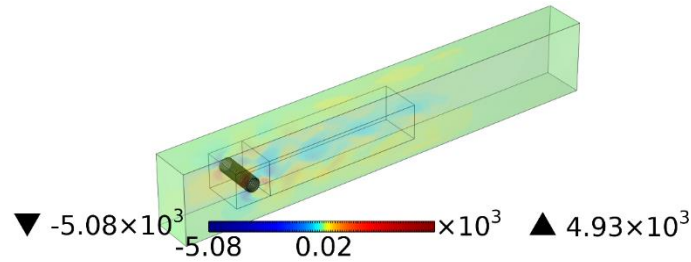
(a) 传统钝体绕流涡街示意图



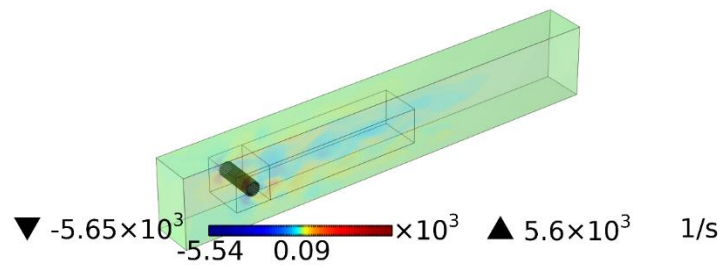
(b) 波纹钝体绕流涡街示意图



(c) 直纹钝体绕流涡街示意图



(d) 斜纹钝体绕流涡街示意图



(e) 折纹钝体绕流涡街示意图

图 3-15 传统圆柱钝体及四种仿生表面钝体的涡街脱落模式($U_{\text{mean}}=1\text{m/s}$) (a):传统 (b):波纹 (c):直纹 (d):斜纹 (e):折纹

如图所示,不同仿生表面钝体在流场中展现出各异的涡街脱落模式,其 x 轴方向上的涡量分布相较传统圆柱钝体显著增强。传统圆柱的最大和最小涡量分别为 $1.24 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 和 $-1.19 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$; 而仿生钝体涡量特性普遍提升,其中:波纹钝体最大/最小涡量分别为 $2.69 \times 10^3 / -2.96 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$,增幅达 116.94%和 148.74%;直纹钝体分别为 $4.92 \times 10^3 / -5.10 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$,增幅达 296.77%和 328.57%;斜纹钝体为

$4.93 \times 10^3 / -5.08 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ，增幅分别为 297.58%和 326.89%；折纹钝体则达到 $5.60 \times 10^3 / -5.65 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ，增幅高达 351.61%和 374.79%。

仿生结构的性能提升不仅体现在输出特性上，其在流动控制机制上的优势也通过 CFD 仿真得到了揭示。以斜纹钝体为例，其表面非对称条纹引发了明显的三维扰动结构，使得尾流区形成不对称旋涡对，增强了尾涡剪切层的不稳定性，进而激发出更高幅值的横向振动。

折纹结构在流体绕流过程中表现出多重分离点与重附着区，其复杂折线形表面诱导了多尺度涡旋结构，导致涡街频率升高、尺度减小。这种小尺度高频涡街直接导致升力波动增强，是本文后续中其输出电压提升的主要根因。相比之下，传统圆柱钝体流动分离稳定性强，激振能力弱，因此响应带宽窄、输出效率低。

结果表明，仿生几何结构显著增强了流场中的涡量强度与变化幅度，改善了流体分离行为与涡街生成特性，提升了流动控制效果。复杂表面结构诱导更强烈的扰动和更高频率的涡旋生成，展现出优异的流体动力学性能。上述研究为仿生钝体在空气动力优化、流致振动能量采集及流体控制等领域的应用提供了理论依据与实践参考。

由此可见，仿生结构通过“流动扰动强化—尾流结构调整—升力激励增强”的路径，实现了对系统动力学特性的优化，其流动控制能力正是结构创新的根本物理来源。

3.5 本章小结

本章基于 COMSOL Multiphysics 6.1 平台，构建了三维 CFD 仿真模型，并优化参数设置，以分析不同仿生钝体在流致振动中的流场特性。相较于传统二维模型，三维 CFD 模型能够更精确地捕捉流体与固体边界的复杂交互作用，揭示流动特征及涡旋结构的细微变化。仿真涵盖了传统圆柱钝体及波纹、直纹、斜纹、折纹等多种仿生表面，重点探讨了其压力分布、流动分离及涡街生成特性。

在网格划分和流场参数设置方面，本研究采用精细网格划分策略，确保在流动分离与涡旋区域使用高分辨率网格，以提高计算精度。同时，通过统一设置流体参数、流场特性及边界条件，保证仿真结果的可靠性和可比性。研究表明，表面几何结构对流动分离、涡街生成及能量采集效率具有显著影响。

通过对比各类钝体的升力、反力、速度分布和涡流量，本章揭示了仿生表面对流致振动性能的影响。结果表明，复杂表面结构能够优化流体动力学特性，尤其在折纹钝体中，涡流量及涡旋生成频率表现出更高的强度与一致性。研究成果为能量采集器的设计提供了理论支持，并为进一步优化钝体结构、提升能量采集效率奠定了基础。

本章不仅通过三维 CFD 仿真揭示了仿生结构对流场特性的影响，还进一步从尾流结构、剪切层稳定性及分离点位置等方面反推了不同仿生设计的性能差异来源。仿真结果表明，仿生结构在气动性能优化中的核心作用机制在于其对涡旋尺度与强度的调控能力，为后续的结构优化与参数设计提供了依据。

第 4 章 流致振动能量采集平台构建及实验设计

在对仿生钝体的流场仿真和性能分析完成之后,为验证仿生设计在实际应用中的有效性,进一步探讨其空气动力学特性与能量采集性能,本文设计并搭建了实验平台,以实现对流致振动能量采集器的样机测试。本章将详细介绍实验平台的搭建过程,包括流致振动能量采集器的样机制备及测试实验装置的具体搭建步骤,并通过实验测试验证仿生表面钝体在不同条件下的性能表现。

4.1 实验平台的搭建

为了验证仿生表面钝体在流致振动能量采集中的实际性能,并进一步探讨其不同工况下的动力学响应特性,本文设计并搭建了专门的实验平台。实验平台的搭建不仅包括流致振动能量采集器的样机制作,还涉及实验装置的设计与构建,以确保实验条件与仿真分析保持一致。通过合理的实验平台搭建,可以为后续的实验测试提供稳定且精确的环境,同时为验证仿生钝体的优化性能和实际应用效果奠定基础。接下来将详细介绍实验平台的具体搭建过程。

4.1.1 流致振动能量采集器原型制备

在实验平台的搭建过程中,流致振动能量采集器的实物建模是关键环节之一。为保证实验结果的准确性和与仿真分析的一致性,本文依据仿生钝体的优化设计参数对流致振动能量采集器进行样机制作。在样机设计过程中,不仅严格遵循仿真模型的几何参数和材料特性,还充分考虑了实验环境中的实际工况,以确保样机在真实流场中的动态响应能够真实反映其性能特性。接下来,将对流致振动能量采集器的样机设计过程进行详细阐述。

为了更加直观地展示钝体与其他支架之间的连接模式,本文在 SolidWorks 三维建模软件中构建了能量采集器各个部件之间相互连接的装配图。该装配图详细展示了钝体、支架及其他关键零部件如何在空间中相互配合,以实现能量采集器的整体功能。通过这一图示,可以清晰地看到各组件之间的相对位置和连接方式,从而为后续实验和分析提供准确的参考。图 4-1 展示了该装配图的具体内容。

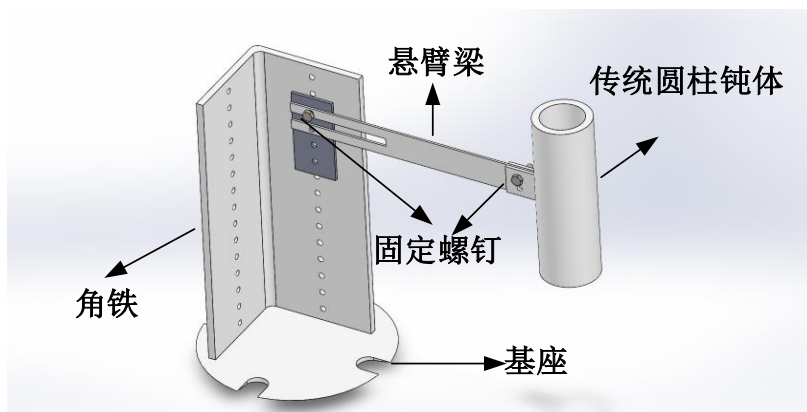


图 4-1 能量采集器设计模型

传统圆柱钝体能量采集器的设计方案采用了可拆卸式结构，以便于实验操作和后期维护。在该设计中，钝体与悬臂梁通过螺栓连接，确保了两者之间的稳定固定，并且便于进行拆卸和更换。悬臂梁的末端与角铁连接，角铁底部通过焊接固定于基座上，进一步增强了整个结构的稳固性和抗振性能，从而提高了能量采集器在实际应用中的稳定性与可靠性。为了保证各类仿生钝体能量采集器实验的一致性，其他仿生钝体设计在连接方式和结构构造上与传统圆柱钝体保持一致，确保不同设计之间的可比性和实验条件的统一性。

在角铁的内部设计中，考虑到流体引导和气动优化的需要，两侧的中间位置按照等距间隔开设了若干个直径为 4mm 的圆形小孔，孔间距为 13mm。小孔不仅有助于流体流动的有效引导，还能通过优化流场分布，减少气动阻力，从而提高能量采集器的工作效率。此外，孔的布置在增强流体通过结构时的稳定性和均匀性方面起到了关键作用，进一步提升了系统的气动性能。

为了增强结构的稳定性和提高连接的可靠性，角铁的内侧采用了厚夹片与螺栓连接的方式，将悬臂梁的末端牢固地固定在角铁内部。这一设计有效地减少了因外力作用导致的松动或移位问题，确保了悬臂梁在实验过程中能够保持稳定状态，避免了可能的系统振动干扰。

该设计方案的合理性不仅简化了能量采集器的组装过程，降低了生产和维护的难度，也为后续的实验提供了良好的平台基础。通过这一稳固、可靠的连接方式，确保了各部件在实验过程中能够高效协同工作，从而为实验结果的准确性和可重复性提供了有力保障。

本文第 3 章通过三维计算流体动力学 (CFD) 仿真模拟了不同类型钝体在流场中的行为，采用了高精度的数值模拟方法，对各类仿生表面钝体在不同流速、

流场条件下的流动特性进行了详细分析。通过这一过程，研究不仅对流体流动模式进行了全面的预测，还量化了各类钝体设计对流动分离、涡旋生成以及流体压降等关键参数的影响，从而为进一步优化钝体形状提供了理论支持。

通过进一步的分析，本研究成功地确定了最佳的钝体纹理数量($N=24$)，以指导后续实验中钝体实物构造的设计。

在前述仿生表面设计及仿真模型的基础上，本采用了 3D 打印成功加工了传统圆柱钝体及四种仿生表面圆柱钝体。与传统加工方法相比，3D 打印技术能够更精确地控制细节，确保复杂几何结构的高精度再现，特别适用于制造精密的仿生表面结构。所有的钝体均采用树脂材料进行制造，以保证其表面光滑度和几何形状的精确度，符合仿真模拟中的设计要求。图 4-2 展示了基于传统圆柱钝体能量采集器的实际制作效果。

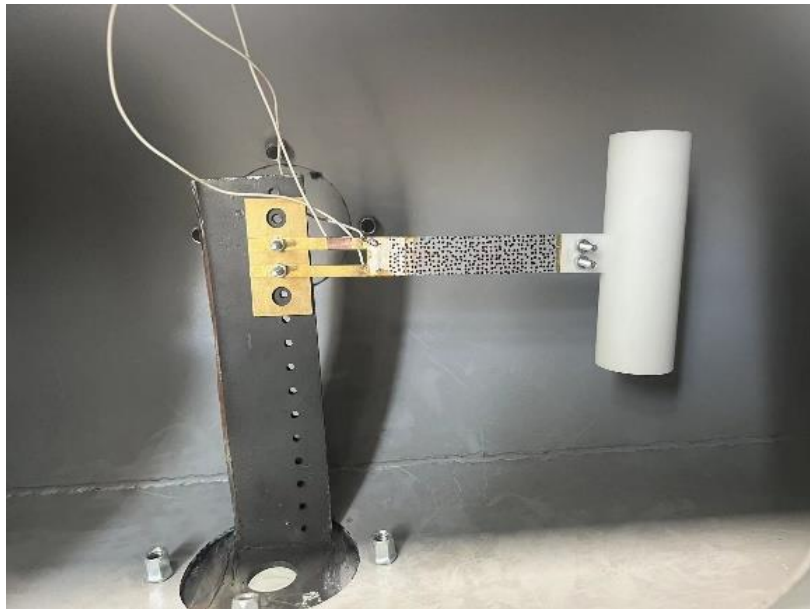
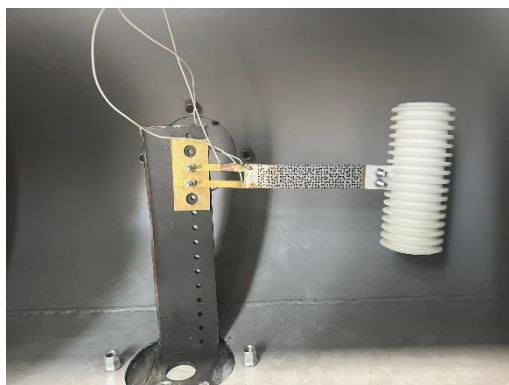


图 4-2 基于传统圆柱钝体能量采集器实物样机

图 4-3 展示了基于仿生表面钝体能量采集器的实物图。该图清晰地呈现了能量采集器各部件的实际构造及其组装过程，包括钝体、悬臂梁、基座等核心组件。每个部件的尺寸、形状以及表面纹理均经过精确设计和加工，以确保实验平台的高精度与高可靠性。在钝体部分，采用了不同类型的仿生表面，包括波纹、直纹、斜纹和折纹设计，表面纹理在实验中将对流场和能量采集效率产生显著影响。



(a)波纹钝体



(b)直纹钝体



(c)斜纹钝体



(d)折纹钝体

图 4-3 基于仿生钝体能量采集器实物模型

通过该实物图，能够直观地看到仿生表面钝体与其他部件的连接方式及其在整个能量采集系统中的位置。这一图像不仅展示了实验装置的整体构造，也为后续实验中的操作和调试提供了有价值的参考。

从图中可以看出，不同仿生表面的设计在实际加工中得到了良好的体现。传统圆柱钝体保持了简单、均匀的表面形态，而其他四种仿生表面钝体（波纹、直纹、斜纹及折纹）则展现出各自独特的几何特征。钝体表面的微结构设计旨在优化流体的流动特性，改善能量采集器的气动性能，并促进流体动力学行为的有效调控。

树脂材料的具体参数见表 4-1。参数包括材料的密度、弹性模量、热膨胀系数等重要物理特性，均经过严格测试和验证，确保了材料在实验过程中能够稳定表现。具体参数的确定不仅为后续实验提供了准确的物理特性参考，还确保了实验结果的准确性和可比性。通过对参数的精确控制，可以有效排除因材料差异所引起的实验误差，从而提高实验数据的可靠性与科学性。同时，还为不同仿生表

面钝体的性能对比提供了基础,帮助研究者更加清晰地理解各类表面设计对流体动力学特性的影响。

表 4-1 3D 打印树脂材料参数

参数	数值	单位
密度	1.3	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
弹性模量	3	GPa
抗拉强度	50	MPa
断裂韧性	1.5	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
熔点	150	$^{\circ}\text{C}$

树脂材料的选择不仅能够确保高精度的制造,还能提供足够的表面光洁度,避免因表面粗糙度过大而影响实验结果。同时,树脂材料的轻质特性也有助于减小钝体本身的重量,避免在实验过程中因重力引起不必要的影响。借助 3D 打印技术,本研究能够迅速且高效地制造出多种形态的仿生表面钝体,为后续的流致振动能量采集实验提供了可靠的硬件基础。

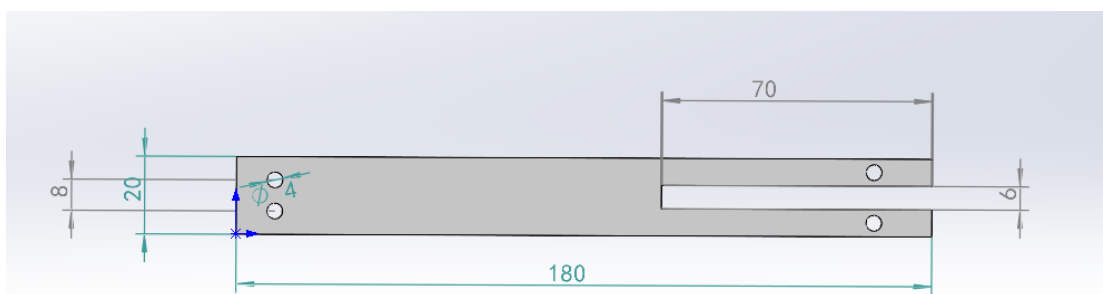
该部分的制作不仅验证了前期仿真设计的可行性,还为实验过程中的气动性能评估和数据分析提供了精确的样品基础。通过高精度制造的钝体,研究得以进一步深入探讨仿生设计在实际应用中的效果,并为优化能量采集器的结构和性能提供了宝贵的实验数据。

4.1.2 流致振动能量采集器装置的搭建

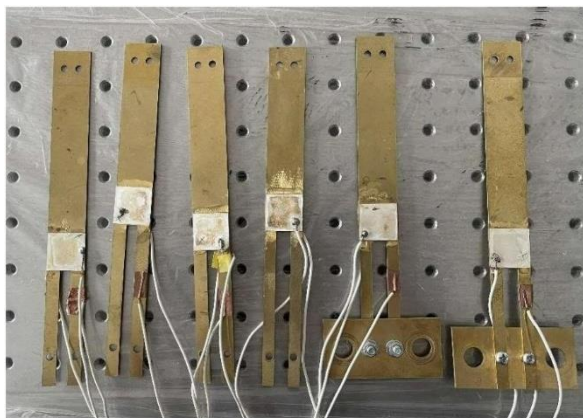
上述小节详细介绍了传统圆柱钝体和仿生表面钝体的原型制备过程,以及所有相关的材料参数,为后续实验提供了坚实的基础,确保了各类钝体的准确制造和物理特性的精确控制。接下来,本节将重点介绍流致振动能量采集器的制作过程,其中压电悬臂梁的设计尤为关键。作为连接钝体与支架的核心部件,压电悬臂梁在能量采集系统中发挥着至关重要的作用。其设计不仅需要满足结构强度和刚度的要求,还需优化其与流体流动的相互作用,以最大化能量转化效率。因此,精确的压电悬臂梁设计是实现高效能量采集的关键步骤之一。

如图 4-4 所示为压电悬臂梁的设计方案和实物图。本研究的悬臂梁设计沿用了课题组前期基于超表面的流致振动能量采集器的研究成果^[61],并在此基础上

进行了创新优化，以进一步提高能量采集效率。其总体尺寸为：悬臂梁总长 180mm，宽度 20mm，厚度 1.5mm。设计采用了 U 字型双分支梁结构，且有效分支距离为 70mm。这种结构的主要优势在于，通过双分支的设计能够显著增大悬臂梁的共振幅度，同时降低所需的共振频率。具体而言，U 字型结构通过优化梁的受力分布，使得梁体能够在较低频率下达到更大的变形幅度，从而提高了能量转换效率。此设计不仅增强了系统在流体流动激励下的响应能力，还能够适应多种流场条件下的动态变化，进一步提高了能量采集器的工作稳定性和效率。此外，双分支结构还能够通过改变分支位置和角度，灵活调节悬臂梁的共振频率，使其与流体激励的频率匹配，从而实现更加高效的振动能量采集。



(a) 压电悬臂梁结构示意图



(b) 压电悬臂梁实物图

图 4-4 压电悬臂梁整体示意图

分支梁的设计宽度为 6cm，旨在保证梁体的足够强度同时降低结构的质量，以提高振动响应效率。在悬臂梁的结构中，特意设计了四个小圆孔，每个圆孔的直径为 8mm。圆孔的位置经过精确计算，确保其对悬臂梁的力学性能和振动特性没有负面影响。为了增强悬臂梁与其他部件的连接稳定性，螺栓穿过小圆孔，将梁体牢固地固定在支架或其他结构上。这种设计有效避免了悬臂梁与外部载荷

之间的滑移或松动，确保了振动能量采集过程中结构的稳定性和可靠性。通过优化圆孔的位置和尺寸，进一步提高了悬臂梁的刚性与耐久性，同时不增加过多的质量负担，使得能量采集器能够在长时间运行中保持较高的效率和稳定性。

压电悬臂梁采用黄铜材料制作，其优越的力学和物理特性使其成为理想的选择。具体参数如表 4-2 所示。黄铜是一种具有高强度、良好韧性及出色耐腐蚀性的合金，确保了压电悬臂梁在流致振动过程中能够承受较大的机械应力，并维持其结构的稳定性和可靠性。具体来说，黄铜具有优异的抗弯曲性能和高刚性，使得悬臂梁在工作时能够有效传递振动能量而不发生塑性变形，从而保证了能量转换的高效性。此外，黄铜的优良导热性有助于在高频振动时快速散热，避免因热积累导致的性能下降或材料老化。其较好的导电性能也能够有效支持压电材料的电气特性，增强能量采集器的工作效率。黄铜还具备出色的加工性能，能够通过传统机械加工方法精确成型，确保悬臂梁的几何尺寸和结构强度达到设计要求。综合来看，黄铜不仅满足了压电悬臂梁在机械强度和振动能量转换过程中的需求，还提供了长期可靠运行的保障，成为理想的压电悬臂梁材料选择。

表 4-2 压电悬臂梁黄铜材料属性及参数

参数	数值	单位
密度	8500	kg·m ⁻³
杨氏模量	110	GPa
抗弯强度	3.04	N·m ²

压电片的选择对于流致振动能量采集器的性能至关重要。在本研究中，选用了浙江神镭超神材料生产的 PZT-5H 压电陶瓷作为压电片材料。PZT-5H 是一种常见的高性能压电陶瓷，广泛应用于振动能量采集、传感器和执行器等领域，其在转换机械振动为电能方面具有优异的效率和稳定性。PZT-5H 具有较高的压电常数和介电常数，能够在振动过程中产生较强的电荷积累，进而提高能量采集的效率。压电片的具体参数如表 4-3 所示。此外，该材料的机械性能优越，能够在高频振动和反复应力的作用下保持良好的稳定性，从而确保了长期使用中的可靠性。

表 4-3 压电片 PZT-5H 材料属性及参数

参数	数值	单位
密度	7500	$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$
电容	5660	pF
介电损耗	3200	/
杨氏模量	60	Gpa
压电效应 d_{31}/d_{33}	$275\times 10^{-12}/620\times 10^{-12}$	$\text{C}\cdot\text{N}^{-1}$
压电系数 g_{31}/g_{33}	$9.7\times 10^{-3}/22\times 10^{-3}$	$\text{vm}\cdot\text{n}^{-1}$
耦合系数 $K_p/K_{31}/K_{33}/K_t$	0.68/0.38/0.76/0.52	/

压电片的尺寸为 $20\text{mm}\times 20\text{mm}\times 0.2\text{mm}$ ，经过精确裁剪以适应压电悬臂梁的设计要求。为了确保压电片与悬臂梁之间的良好接触和有效的应力传递，压电片被粘贴在分支梁分支与主梁的交接处。粘接过程采用了高强度的 AB 胶，这种胶水具有优良的粘结性能和较好的机械稳定性，能够有效避免压电片在受力过程中发生脱落或位移，同时也不会影响其正常的振动响应。通过将压电片定位在悬臂梁的关键部位，不仅优化了能量的转换效率，还确保了压电片能最大限度地捕获到由流体流动产生的振动能量，从而提高了整体能量采集系统的性能和稳定性。

综上所述，PZT-5H 压电陶瓷的高效能量转化特性、良好的稳定性和适当的尺寸选择，使其成为本实验中理想的压电片材料，而高强度 AB 胶的使用确保了压电片与悬臂梁的牢固连接，为能量采集系统的可靠运行提供了保障。

以上关键组件是流致振动能量采集器的核心组成部分，其中每一部分的材质选择都经过了精心考量，旨在优化实验的可靠性、效率和可重复性。首先，压电悬臂梁作为能量转换的主要载体，其选用黄铜材质的优势已在前述中提到。黄铜的高刚性和优异的疲劳性能使得悬臂梁在振动过程中能够保持稳定的形变，从而有效地转化机械振动为电能。其次，PZT-5H 压电陶瓷片的选择进一步确保了振动能量的高效捕获。该材料的高压电性能、稳定的电气特性以及在振动环境中的良好响应，能够在流体引起的振动中产生较大的电压信号，显著提高能量采集的效率。

此外，所有连接部件的选材，如 AB 胶用于压电片的粘接、黄铜材料用于悬臂梁的制作，确保了各个部件之间的高强度固定与良好的机械耦合，避免了因连

接不牢固而导致的振动能量损失或结构故障。所有的组件共同作用，为能量采集器提供了一个稳定、可靠的工作平台。更重要的是，材质选择不仅优化了能量采集效率，还增强了装置的长期稳定性和抗振性能，使其在复杂流场环境下能够长时间高效工作。

因此，正确的材料选型为后续实验提供了坚实的基础，为实现更精确的实验数据和更高效能量采集系统奠定了重要的保障。每一项材质的选择和构造设计，都充分考虑到实验的实际需求，从而确保了整个能量采集器在模拟流致振动环境中的良好表现。

4.2 流致振动能量采集性能测试平台搭建

在前述章节中，本文对流致振动能量采集器的关键部件进行了详细的设计与材料选型，并通过精确的建模与加工手段实现了其各部分的组装。为了进一步验证理论设计的可行性，并评估该能量采集器在实际应用中的性能表现，接下来的实验部分将针对所构建的流致振动能量采集器进行系统的测试与分析。通过一系列的实验，本文将深入探讨不同钝体表面形态、悬臂梁设计、以及压电材料对振动能量采集效率的影响。

实验的核心目标是评估在流体作用下，不同设计方案所带来的振动响应差异，以及它们在能量转化过程中的表现。通过对实验数据的细致分析，本研究旨在为流致振动能量采集器的优化设计提供理论依据，探索提高能量采集效率的方法，进而推动其在实际工程中的应用。此外，本章还将探讨实验设备的选型、实验方案的设计等内容，为后续测试的顺利开展提供全面的技术支持。

4.2.1 实验设备的选型

在进行流致振动能量采集器的实验研究时，实验设备的选型至关重要。合适的设备不仅能保证实验数据的准确性和可靠性，还能有效地模拟真实工况，从而确保实验结果的可比性与实验设计的合理性。因此，实验设备的选择需要考虑多个因素，包括实验的目的、所需的测量精度、实验环境的控制、以及设备的可操作性和耐用性等。

本实验的核心设备包括流体模拟系统、振动测量装置、压电能量采集系统以

及数据采集与处理设备。每一项设备的选择都紧密围绕实验目标展开，以确保能够充分反映不同钝体设计在流体流动下的响应特性。首先，流体模拟系统必须能够提供稳定、可控的流速和流场特性，模拟实际应用中可能遇到的流动条件；其次，振动测量装置需具备高精度的振动信号检测能力，以准确捕捉能量采集器在振动过程中产生的电信号；最后，数据采集与处理系统的高效性也不可忽视，它需要能够实时记录实验过程中各类数据，并进行后续分析。

本小节将详细介绍实验设备的具体选型过程，分析每种设备的技术参数以及选型依据，以便为实验过程的顺利进行提供坚实的硬件基础。

(1) 计算机

数据记录使用的计算机为 HP Compaq dx2310 MT 台式电脑，实验平台所使用的计算机设备满足数据采集与实时监测的基本需求，配合 LabVIEW 实现对多通道信号的实时记录与存储。图 4-5 展示了该台式电脑的外观。

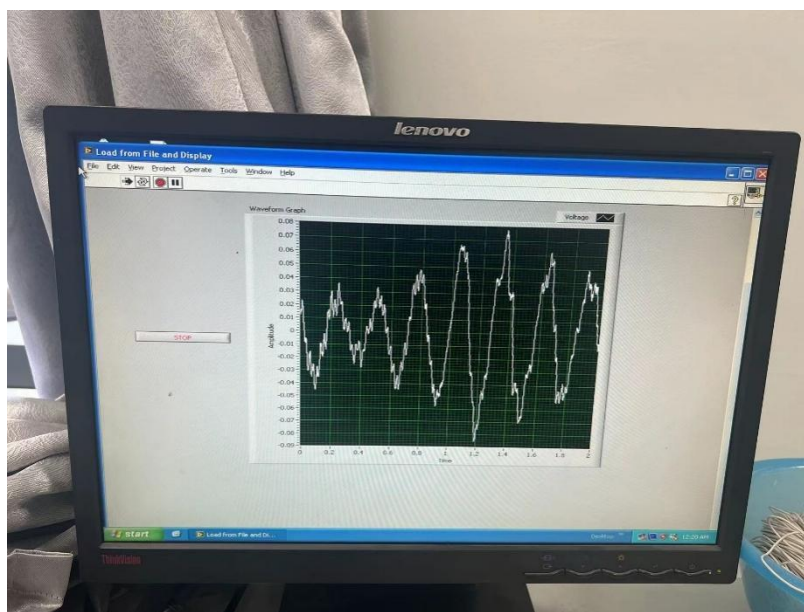


图 4-5 HP Compaq dx2310 MT 台式电脑

(2) 数据采集器

数据采集器为美国国家仪器有限公司（NI）生产的 NIPXI-1042Q 机箱（见图 4-6），符合 PXI 标准，具备高度模块化与灵活性，适用于复杂的数据采集与控制任务。该机箱以其高性能与可靠性广泛应用于工程测试、自动化测试及科研实验，提供精确稳定的信号采集与处理功能。

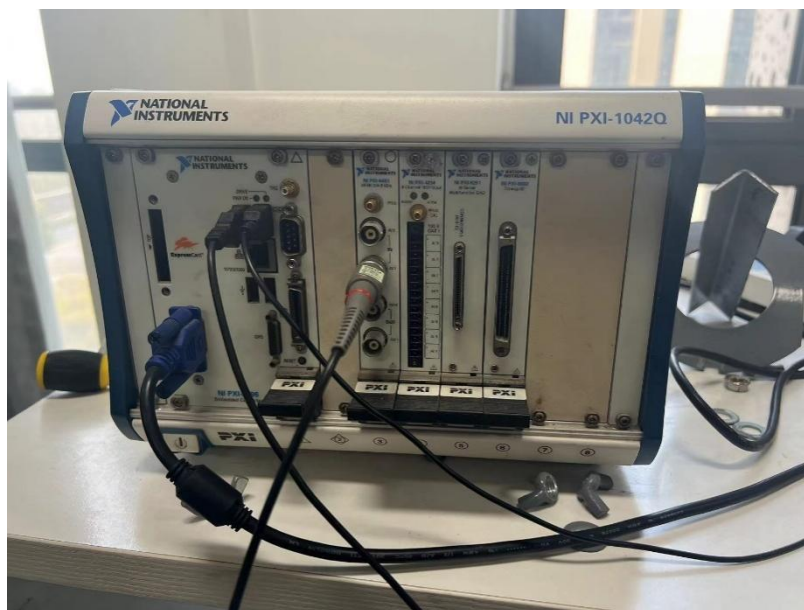


图 4-6 NI PXI-1042Q 数据采集器

该机箱支持多个扩展槽位，可安装不同的 PXI 模块，满足模拟信号采集、数字信号处理等多种数据采集需求。其高度同步性确保多通道数据采集时的时序精准，避免采样误差干扰。配备高速总线与强大计算能力，能够快速处理和存储数据，并支持实时数据分析与实验反馈。

此数据采集器的选用确保了实验数据的高精度、可靠性和效率，为实验结果的准确性与可重复性提供了保障。

(3) 风洞

实验使用的风洞为上海仪器厂家定制，专为流体力学实验设计，提供稳定可调的气流条件，广泛应用于钝体流动特性、气动优化及流致振动研究。该风洞具备精准的风速调节功能，能够模拟不同流速下流体与钝体的相互作用。其高效的气流调节与滤波技术有效减少了气流不均匀性和涡流干扰，确保了实验的稳定性和一致性。

风洞还配置实时流速测量仪器，动态监测风速变化，确保精确控制与数据采集。其设计注重实验便捷性与安全性，为钝体能量采集器测试提供了理想平台，支持高质量、高可靠性的流体动力学特性研究。



图 4-7 实验风洞

(4) 轴流风机

实验中采用的轴流风机，也称为流致振动测试平台，是由上海仪器厂家根据实验需求定制制造的，如图 4-8 所示。该轴流风机具有高效的气流输送能力，能够提供稳定且可调的风速，是实现流体与钝体交互实验的核心设备之一。



图 4-8 轴流风机

该风机系统设计旨在提供均匀气流分布，并可模拟多种流速环境，满足不同

实验需求。其广泛的风速调节范围可从低速到高速精准控制，确保多工况下对钝体的测试，获取详尽的流体动力学数据。同时，风机的稳定性经过严格调校，减少了气流波动对实验结果的影响，保证流体稳定性与一致性。

考虑到流致振动的需求，风机设计融入了振动抑制技术，避免过多振动干扰，提供准确可靠的实验环境，支持能量采集器及压电悬臂梁的振动响应研究。风机与其他设备的良好匹配为实验提供了理想的测试条件，确保精确分析流体与钝体相互作用。

该轴流风机系统为实验提供了稳定高效的气流支持，为后续流致振动能量采集研究奠定了坚实基础。

(5) 皮托管

实验中采用的皮托管用于精确测量风速、风量和风压，型号为上海里诺仪器科技有限公司生产的皮托管，如图 4-9 所示。该皮托管采用了高精度传感器，能够在不同风速和流体条件下提供稳定可靠的测量数据。



图 4-9 皮托管

皮托管通过测量气流的静压与动压差异，计算风速和风量，提供高精度测量，适应复杂流体环境。在本实验中，皮托管用于监测风洞内气流速度和压力，评估能量采集器在不同流速条件下的性能。

其高灵敏度和抗干扰能力使其能够精确跟踪气流变化，确保实验数据的准确性和可重复性。与风洞系统和流致振动平台协同工作，皮托管为实验提供了关键

的流速与风压信息，为能量采集器工作状态、流场行为及能量效率评估提供了可靠依据。

4.2.2 实验装置搭建

在完成了实验设备的选型之后，接下来需要对实验装置进行搭建，以确保各组件能够在实验过程中高效协同工作。实验装置的搭建是实现流致振动能量采集器实验的基础，其搭建过程包括各个设备与仪器的合理布局、连接以及调试。只有通过精确的装置搭建，才能确保实验中数据采集的准确性与系统的稳定性。

本实验装置的搭建主要涵盖了能量采集器、风洞系统、数据采集器以及相关辅助装置的整合。在这一过程中，重点是对压电悬臂梁、流致振动采集器以及风速控制系统的配置与安装，确保系统能够在预设条件下稳定运行。此外，整个实验装置的结构布局也需考虑到实验操作的便捷性和设备之间的互联性。

如图4-10所示，整体的风洞实验装置测试平台展示了各个组件的整体布局。在该实验平台中，每个部分都承担着特定的功能，协同作用以确保实验的顺利进行。风洞系统作为主要测试平台，通过调节风速和风压，模拟不同流体动力条件下的环境，为流致振动能量采集器提供了实际的工作载荷。实验装置的各个部分，如风机、流量测量装置、采集系统、传感器等，均依照实验需求精心设计和布置，确保测试结果的可靠性和精度。

其中，能量采集器部分负责捕获由流动气体引起的振动，并将其转换为电能；数据采集系统负责实时记录采集到的数据并进行分析，确保能够准确评估不同钝体形态和结构的性能表现；风速调节与监控系统则为实验提供稳定的气流环境，通过精确控制气流参数，模拟真实的风力条件。

组件之间的紧密配合，保障了实验的高效性和实验结果的可比性。每一部分都是系统整体运行的关键，没有任何一个组件可以忽视。因此，装置搭建过程中的每一个细节都需要精心设计与调试，以确保实验能够顺利开展，并为后续的数据分析提供有力支持。

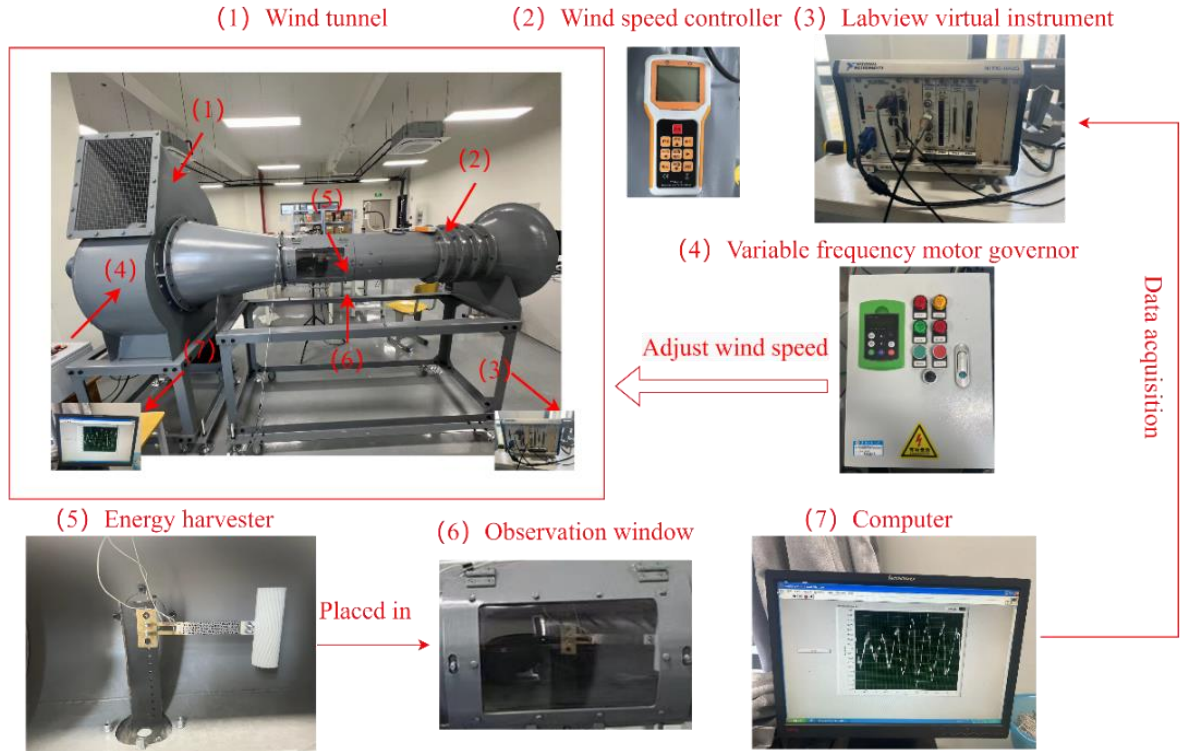


图 4-10 流致振动能量采集器样机及风洞试验装置

图4-10 为用于流致振动能量采集器的风洞实验平台示意图。该平台由风洞、压气机、扩压器、试验段和数据采集设施等多个关键部分组成。风洞系统采用变频器调节风机的转速，从而实现不同风速的精准控制，以满足不同实验条件下的需求。通过这一调节系统，可以模拟不同流速和气压条件，精确地再现流致振动能量采集器在真实环境中的工作状态。

在该平台的设计中，钝体的状态可以通过观察窗口进行实时监控，如图 4-10 中的第 6 项所示。这一设计为实验人员提供了一个直观的观察途径，能够实时了解钝体在气流作用下的动态表现。流致振动能量采集器被安置在一个尺寸为 50 cm × 50 cm 的风洞试验段中，确保了足够的气流空间，能够模拟出多种工况下的振动响应。

此外，平台中还包括了数据采集设施，用于实时记录实验过程中的风速、振动响应、电能输出等参数，将为后续分析提供宝贵的依据，帮助评估不同钝体设计对能量采集性能的影响，并进一步优化流致振动能量采集器的结构与效率。

风洞在入口处设置了两个蜂窝挡板，目的是稳定来流并减少流动的湍流度，以确保实验环境中的气流更为均匀和稳定。这一设计有助于模拟真实的气流条件，从而提高实验结果的准确性和可靠性。风洞末端则设置了一个轴流风机，通过产

生气流实现对风速的调节，以适应不同的实验需求。

风速的控制通过使用变频器来调节频率 f ，进而管理气流的速度。具体地，风速 U 与频率 f 之间的关系可以通过以下公式来确定：

$$U = \frac{\ln(f/6.65)}{0.688} \quad (4-1)$$

这一公式反映了风速和变频器频率之间的函数关系，可以通过改变变频器的频率来实现所需的风速。风速的精准调节对实验的顺利进行至关重要，它确保了流致振动能量采集器在不同风速条件下的工作表现能够得到充分测试。

为了精确测量风速、气流速率以及风洞内部的气压，实验使用了上海雷诺仪器技术有限公司生产的皮托管(如图 4-10 第 2 项所示)。该设备能够提供准确的气流数据，为后续的数据分析和性能评估提供必要的测量依据。皮托管的使用确保了实验中气流参数的可靠性，从而使实验结果具备高精度和可比性。

为了精确地采集和记录实验数据，实验采用了 LabVIEW 虚拟仪器平台，该平台能够实时采集并处理来自 PZT 薄膜上负载电阻的输出电压数据，如图 4-10(第 3 项)所示。LabVIEW 作为一种集成化的测量和自动化控制系统，具备强大的数据采集、分析和可视化能力，能够确保实验过程中所有电压信号的精确获取。

通过将 LabVIEW 与相关硬件设备相连接，系统能够实时监控并记录 PZT 薄膜在不同风速条件下的输出电压。这一过程对于流致振动能量采集器的性能评估至关重要，因为输出电压的变化可以反映其能量转换效率和响应特性。在数据采集的同时，实验系统还能够实时显示各项参数的波动情况，帮助研究人员快速评估实验状态并做出调整。

采集到的数据随后会通过计算机进行进一步处理，如图 4-10(第 7 项)所示。计算机上运行的数据处理程序会对原始电压信号进行滤波、去噪及分析，确保实验结果的准确性和可靠性，能够得到更为精确的实验数据，为后续的性能分析和结果验证提供坚实的基础。这种实时的数据采集和处理能力，不仅提高了实验的效率，还使得实验数据的可靠性得到了更高的保障。

4.3 实验方案的设计

在前述章节中，已详细讨论了实验平台的搭建及实验设备的选型，为实验的顺利进行提供了坚实的基础。接下来，实验方案的设计将成为验证流致振动能量

采集器性能和效果的核心环节。实验方案的设计不仅是实现实验目标的具体步骤，更是确保实验数据的可靠性、可重复性与科学性的关键所在。

如图 4-11 所示，实验方案设计的整体框架可分为三个主要部分：实验内容、能量采集系统的设计和整体试验体系的构建。首先，实验内容是围绕着流致振动能量采集器的验证展开，重点研究其在特定环境下的能量采集效果。其次，能量采集系统的设计涵盖了系统硬件与控制软件的选型与搭建，以确保实验数据的采集精准、稳定。最后，试验体系的构建包括了实验平台的搭建，具体涉及实验设备的选择、实验变量的设置以及数据采集与分析流程的制定。

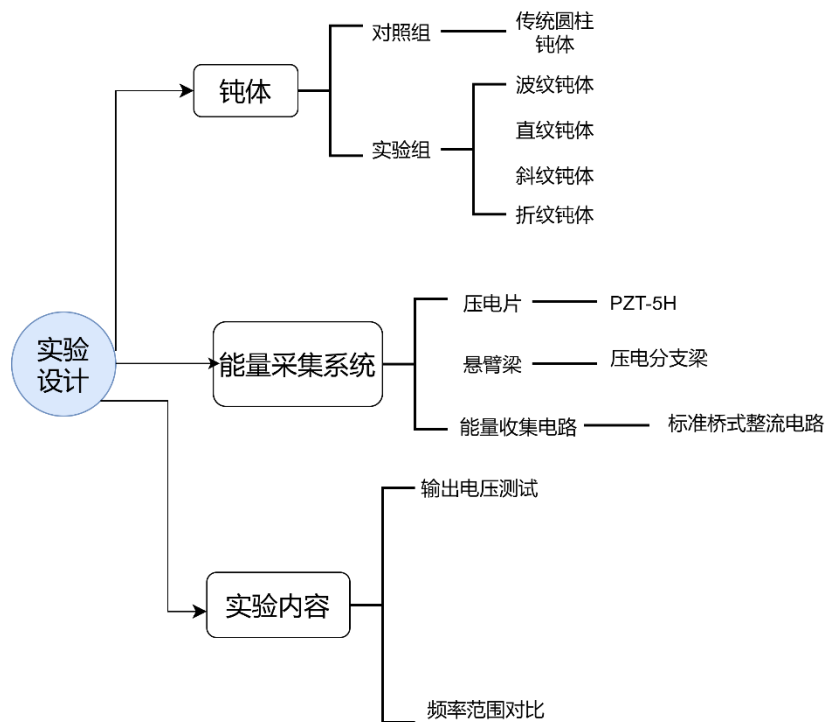


图 4-11 实验方案设计流程图

本文实验方案设计采用对照组与实验组相结合的方式进行比较研究。对照组选用传统光滑圆柱作为钝体，旨在提供一种标准的实验基准，以评估钝体表面粗糙度对流致振动能量采集器性能的影响。实验组则采用具有仿生表面的圆柱体作为钝体，仿生表面的设计灵感来源于自然界中贝壳表面的特定结构，有助于改善流体与固体表面之间的相互作用，从而增强流体的流动性和能量转化效率。

通过对比两组实验数据，可以系统地分析仿生表面在不同流动条件下对流致振动能量采集器性能的改善作用。具体而言，实验组中的仿生表面通过调整表面微观结构，模拟自然界中贝壳形态的效果，以期提升流体流动的稳定性与能量的

有效捕获。通过这种设计，旨在验证仿生结构是否能够显著提高能量采集效率，并进一步分析表面结构对流动行为和能量转化效率的具体影响。

本实验方案设计的核心在于对比分析两组在相同流动条件下的性能差异，以科学严谨的方式探讨不同钝体表面特性对流致振动能量采集效果的实际作用。

本实验旨在通过风洞测试平台对传统圆柱钝体与仿生表面钝体的流致振动特性进行比较研究。实验中，传统圆柱钝体与仿生表面钝体均竖直放置在风洞中，采用相同的测试方法进行流致振动测试。实验风速范围设定为 0 至 10 m/s，风速间隔为 0.5 m/s。在每个风速点下，进行多次测量以确保数据的稳定性与可靠性，最终通过分析各组数据，提取风速与流致振动之间的关系。

具体实验步骤如下：

1. 将传统圆柱钝体和仿生表面钝体分别竖直安装于风洞测试平台。
2. 设置风洞流速范围为 0-10 m/s，并选择 0.5 m/s 为风速增量，逐步改变风速进行测试。
3. 启动流致振动测试平台，进行振动响应数据采集，确保每个风速下进行多次测量。
4. 对所得到的数据进行处理，获取不同风速下的能量采集的输出电压及频率，分析风速对不同类型钝体的流致振动特性的影响。

实验内容设计如图 4-12 所示。

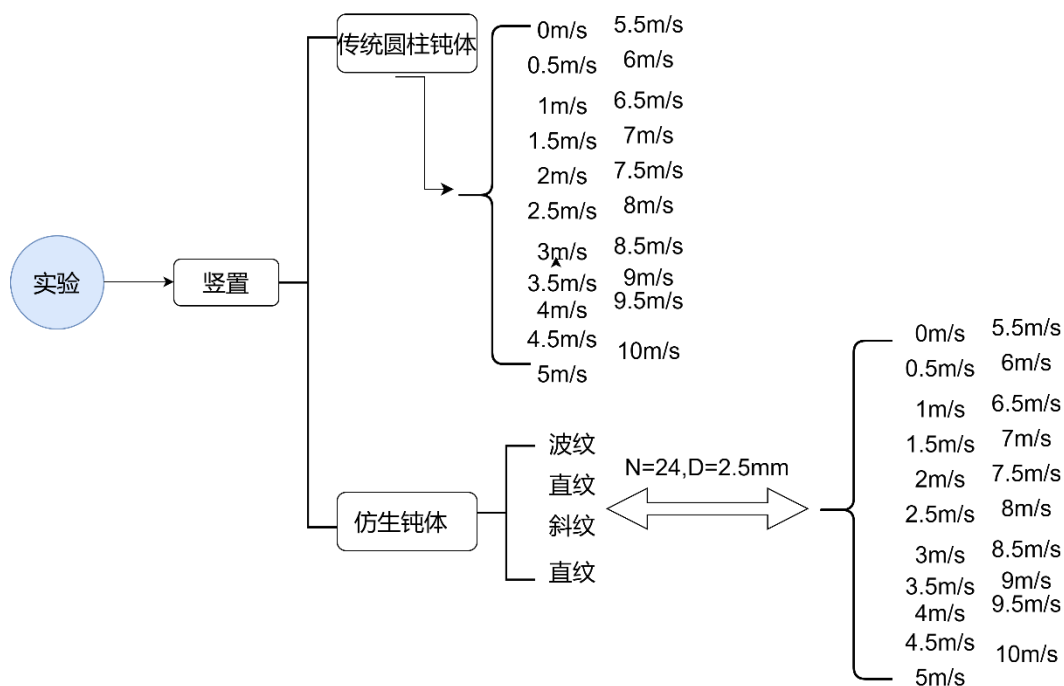


图 4-12 实验设计内容流程图

本实验旨在揭示传统圆柱钝体与仿生表面钝体在不同风速下的流致振动行为，并通过数据分析对比两者在相同风速条件下的振动响应，进而探讨仿生表面设计对钝体流致振动抑制的效果。

4.4 本章小结

本章介绍了实验平台的搭建及实验设计方案。首先，对流致振动能量采集钝体的实物建模进行了详细阐述，并基于该模型构建了完整的流致振动能量采集器，为实验平台的功能实现奠定基础。

随后，重点介绍了实验设备的选型，确保所选仪器满足实验需求，并详细说明了实验装置的搭建过程，包括硬件配置、风洞系统构建及振动响应采集系统的配置。实验方案设计部分明确了实验目的、测试流程、风速范围及数据采集方式，以确保实验的系统性和精准性。

本章所述实验平台的构建和实验设计方案，为后续数据采集与分析提供了必要支持，并为深入研究流致振动及能量采集机制奠定了实验基础。

第 5 章 实验结果与分析

前文中通过仿真分析验证了仿生表面在流体系统中的重要作用，尤其是其对流体力学特性和能量采集效率的影响。本章将通过实验测试能量采集器的实际输出电压，进一步评估仿生表面设计对系统性能的实际贡献。

具体而言，本实验将着重考察仿生表面在三维流动环境下对能量采集器输出电压的影响，分析不同类型仿生表面的设计如何改变能量采集效率及系统的流体力学性能。实验中，随着风速、流体特性等外部条件的变化，输出电压的变化为仿生表面设计对系统性能的直观反馈，验证其在实际应用中的可行性。此外，通过对不同仿生表面方案的对比，能够进一步探索最佳设计参数，优化系统性能。实验结果将为后续能量采集器的设计和改进提供重要依据，推动该技术在可持续能源和智能设备中的应用。

本章将重点测试并分析传统圆柱钝体与含有仿生表面的圆柱钝体在不同风速下的能量采集性能。首先，本文将在不同的风速条件下，测试并记录不同仿生表面钝体能量采集器的峰值电压响应。通过实验中采集的电压数据，能够评估不同仿生表面钝体在实际工作环境中的能量转换效率，并为后续的设计优化提供数据支持。

在测试过程中，通过实验软件对不同钝体能量采集器的频率响应进行分析，进一步揭示钝体表面结构对系统的共振频率、能量捕获能力以及整体采集性能的影响。特别地，本文将比较传统圆柱钝体与仿生表面钝体的性能差异，探索仿生表面如何通过优化流体流动、改变气动特性，进而提升能量采集器的输出电压和工作效率。通过数据的综合分析，本章旨在为能量采集器的设计提供理论依据，并为仿生设计的工程应用提供实验验证。

为了确保实验数据的准确性和可靠性，所有的实验数据均在风洞内通过皮托管测得风速达到稳定状态后进行测试。在进行实验时，确保风速在整个测试过程中保持恒定，以避免因风速波动对测量结果的影响。为了确保数据的有效性，峰值电压的选取基于所有测试数据中的最大峰值，这一最大峰值是经过多次测试确认的，并且去除了明显的干扰信号或异常值，以确保所记录的数据能够真实反映

能量采集器的性能。

此外,所有时域信号的采集时间超过 120 秒,以保证数据的稳定性和可信度。通过长时间的信号采集,可以有效避免短时间内的偶然波动,确保测得的信号充分反映系统的长期工作状态,从而提高实验结果的准确性和科学性。精确的数据处理和严格的实验条件将有助于确保实验结果的有效性,并为后续的分析提供可靠依据。

5.1 基于传统圆柱钝体能量采集器的输出电压测试

风洞的运行速度范围为 0~30 m/s,所有实验均在恒定大气压和其他可控条件下进行,以确保实验的可靠性和数据的可比性。流致振动能量采集器的具体测试集中在 0 m/s 到 10 m/s 的风速范围内。在测试中,实验主要通过记录电压和时间响应,评估采集器在开路条件下的性能。开路测试中,电路不连接负载或其他电路元件,这有助于测量能量采集器在无外部电流负荷影响下的输出性能。

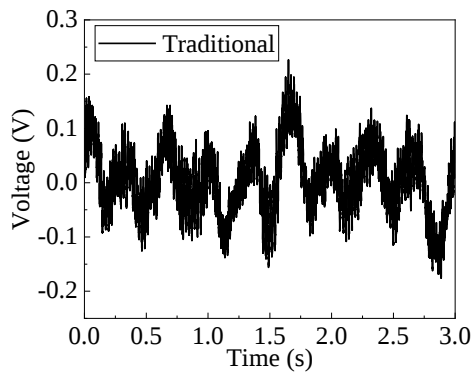
在实验中,压电换能器(PZT)的阻抗通常很高,通常在兆欧($M\Omega$)级别,而用于数据采集的虚拟仪器具有更高的输入阻抗,这确保了仪器对电路的影响微乎其微,从而避免了由于测量过程中的电流流动而引起的误差。此外,系统中采用的电压放大器具有千兆赫量级($G\Omega$)的输入阻抗,进一步确保电流几乎为零。由于电压和电流之间的关系,极高的阻抗保障了开路测试的准确性,即使在电路的特定测量点测得电压值时,电流的流动依然可以忽略不计,因此,能够确认测试条件处于开路状态,确保测试结果的有效性。

在风能转换系统的研究中,传统圆柱钝体能量采集器作为基础模型,广泛应用于流致振动能量收集领域。通过对其结构进行合理设计,可以有效地将气流的动能转化为电能。本节将首先介绍基于传统圆柱钝体能量采集器的输出电压测试过程,重点关注风速范围为 0 至 10 m/s 时,系统在不同风速条件下的峰值电压响应。实验测试结果将为后续分析提供重要的数据支持,可以深入理解在此风速范围内,传统圆柱钝体能量采集器的工作特性以及其电能转换效率的变化趋势。通过对测试数据的进一步处理与分析,将揭示风速对峰值电压的影响,为优化能量采集器的设计与性能提供科学依据。

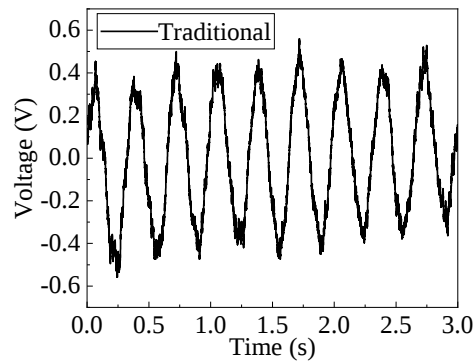
在实验中,为了确保数据的准确性和可靠性,风速的测量采用了每间隔 0.5

m/s 的细化间距进行采样，以全面覆盖风速范围内的变化情况。风速的具体数值由皮托管进行精确测量，皮托管通过其独特的原理提供了稳定且高精度的气流速度数据。此外，所有的实验数据均通过流致振动能量测试平台系统进行实时收集与处理分析，从而确保实验结果的科学性与一致性。

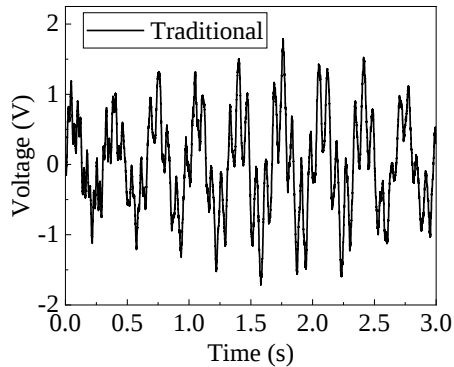
在实验中，传统圆柱钝体能量采集器的输出电压随风速的变化而呈现出不同的规律，反映了风速对能量采集器性能的影响。从 0.5 m/s 到 8 m/s 的风速范围内，输出电压峰值逐渐增加，表明风速对能量采集器的影响显著。以下是对每个风速对应的输出电压峰值的分析和原因。



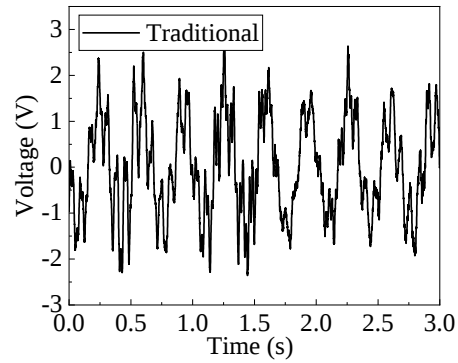
(a) 0.5m/s



(b) 1.5m/s



(c) 3.5m/s



(d) 5m/s

增长,振动幅度进一步增大,且波形更加规则,显示出系统的动态响应趋于稳定。在风速达到 7 m/s 后,尽管电压峰值略有波动,但整体波形保持稳定,说明此时系统的振动幅度已接近极限,能量采集效率达到饱和状态。随后,在 7.5 m/s 风速下,电压峰值略有回升,表明系统仍然维持较高的能量转换效率,但增长幅度已趋于平缓。

在 8 m/s 风速下,输出电压峰值达到最高值 6.94447V,此时流体与圆柱钝体的相互作用最为强烈,涡街形成最明显,能量采集器的振动响应和能量转换效率达到最佳状态,电压波形高度稳定,呈现出极强的周期性特征。这一实验结果表明,风速对流致振动能量采集器的性能具有显著影响,且在一定范围内能量采集效率随风速增加而提升,但当风速达到特定值后,系统进入稳定工作区域,采集效率趋于饱和。

从频域分析结果可以看出,在基本固有频率下,传统圆柱钝体的振幅随着风速的增加呈现递增趋势。具体而言,振幅在低风速时较小,随着风速的提升,流体与钝体之间的相互作用增强,诱导的振动幅度逐渐增大。实验测得的振幅分别为 0.04、0.28、0.555、0.888、1.24、1.57 和 2.5,对应的风速增加过程中,系统的动力学响应逐步增强。该趋势表明,风速对振动幅度具有显著影响,在一定范围内,较高的风速能够有效激发涡街的形成和发展,进而增强结构的振动响应。

变化表明,流体与能量采集器的相互作用和涡街形成是影响输出电压的关键因素,且在较高风速下,系统的能量转换效率趋于饱和,振动和电压输出稳定。

5.2 基于四种仿生表面钝体能量采集器的输出电压测试

随着风能采集技术的发展,研究者们逐渐意识到,传统的圆柱钝体能量采集器在风速较低或流场复杂条件下可能面临较为严重的效率瓶颈。为了进一步提高能量采集效率并拓宽应用范围,仿生学概念应运而生,许多研究尝试通过模仿自然界中的流体力学特性,设计具有特殊表面结构的钝体,以期在不同流场环境下实现更高效能量采集。

本节将重点探讨基于四种仿生表面结构的钝体能量采集器的输出电压性能。通过设计不同类型的仿生表面,并结合流体力学和振动响应特性,比较仿生表面结构在不同风速条件下的电压输出表现。为了评估不同仿生表面钝体的能量采集

性能，本实验在控制环境下，使用风洞实验对四种仿生表面钝体的输出电压进行系统测试。与传统圆柱钝体能量采集器的性能相比，仿生表面结构是否能够有效提升能量采集效率，将成为本实验分析的关键。

在本节中，将详细讨论每种仿生表面钝体的设计思路及其对风速变化的响应特性，探索不同仿生设计如何通过改变表面流体动力学行为，从而提高系统的振动幅度和能量转换效率。此外，通过实验数据的对比分析，评估不同仿生表面结构在风速范围 0-10m/s 下的输出电压变化，并讨论其可能的物理机制和实际应用潜力。

5.2.1 波纹钝体能量采集器输出电压测试

在本节中，将探讨基于波纹表面结构的仿生钝体能量采集器在不同风速条件下的性能表现。波纹表面作为一种仿生结构，模拟了自然界中螺旋壳结构特征。这种波纹形状能够在流体流动中产生独特的流场效应，增强气流与表面的相互作用，从而可能提高系统的振动响应和能量采集效率。

为评估基于波纹钝体流致振动能量采集器的性能，本实验在风速范围 0-10m/s 内选取了若干具有代表性的、波形稳定的风速进行测试。测试过程中，重点关注了风速对电压输出的影响，并通过数据分析选取了具有代表性且具有明显趋势的测试数据，绘制了对应的输出电压图。测试数据的选择基于每个风速下的波形稳定性和最大峰值电压的清晰呈现，确保了测试结果的准确性和可靠性。

通过对波纹钝体能量采集器在不同风速下的输出电压数据进行分析，能够揭示波纹表面设计在不同流场条件下的振动特性以及其对能量采集效率的影响。接下来，将通过具体的数据和图形展示波纹钝体能量采集器在风速 0-10m/s 下的电压响应，并进一步分析其电压波形特征与风速变化之间的关系。

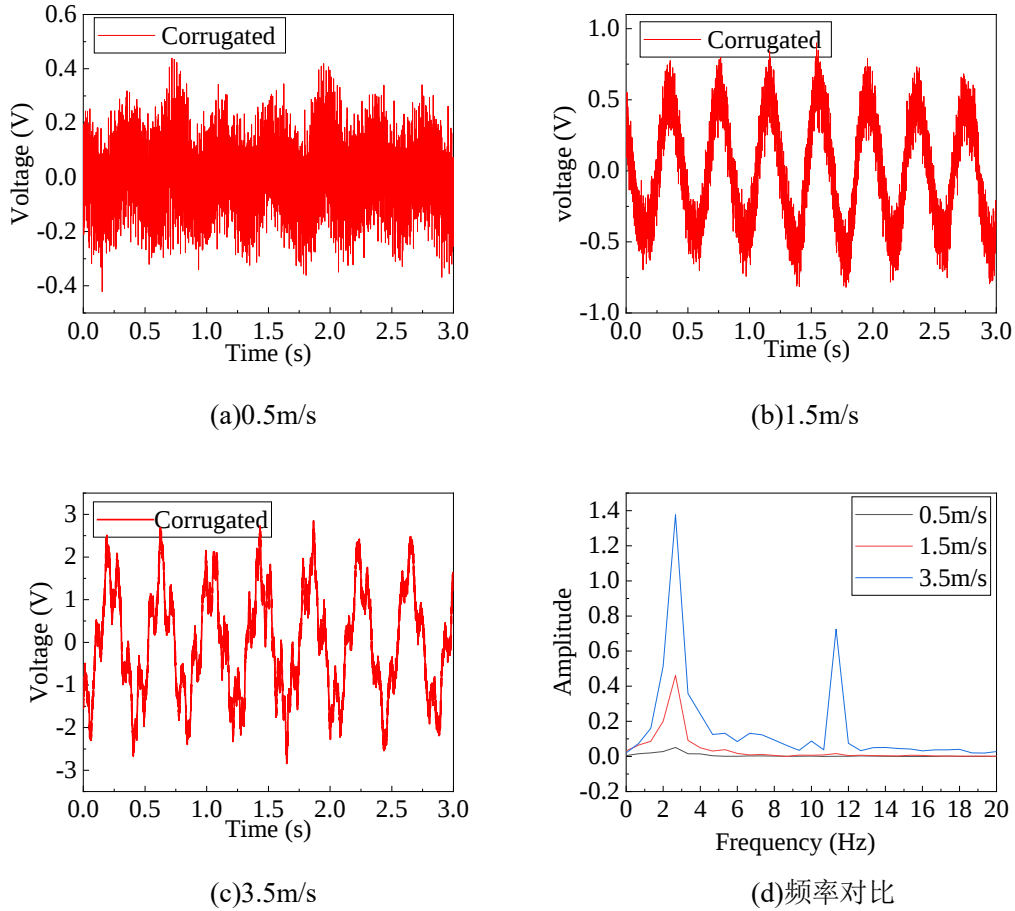


图 5-2 不同风速下的波纹钝体能量采集器输出电压时域图和频域图

如图 5-2 所示，在低风速 0.5 m/s 下，气流速度较慢，风压不足以有效激发波纹钝体的振动响应。此时，气流经过波纹表面时未形成强烈湍流，导致表面振动幅度较小，压电材料输出电压较低，仅为 0.43948 V ，能量采集效率较低，信号波形不明显。

当风速升至 1.5 m/s 时，气流对波纹表面的扰动增强，开始激发波纹结构的振动，尽管仍处于较低风速范围。随风速提高，波纹表面产生小范围湍流，振动幅度增加，输出电压提升至 0.89938 V 。此时，振动波形趋于稳定，接近正弦波形态，能量采集效率有所提高。

当风速增至 3.5 m/s 时，气流对波纹钝体的激发作用显著增强，湍流效应加剧，使波纹表面振动幅度及频率进一步提升，导致压电材料输出电压显著增加至 2.84638 V 。此时，振动波形稳定且趋近正弦波，能量采集效率大幅提高，表明风速的进一步提升促进了气流与表面结构的强烈相互作用，从而增强振动并提升输出电压。

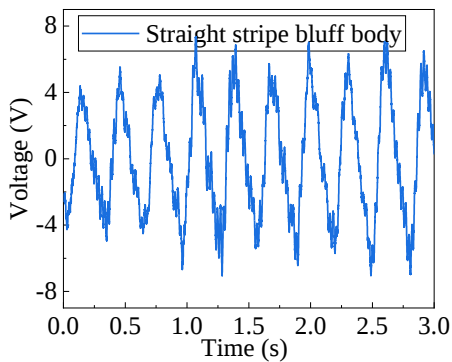
从频域图可见,在基本固有频率下,波纹钝体的振幅随风速增加而显著上升。低风速时,振幅较小,仅为 0.05,表明气动力激励作用有限。随着风速提升,振幅增至 0.46,流致振动效应开始显现,气流与钝体的相互作用增强。当风速进一步增加至高水平时,振幅达到 1.38,表明涡激振动效应显著,振动能量积累加剧。整体来看,风速的提升显著增强了波纹钝体的振动响应,对流固耦合作用及结构稳定性具有重要影响。

5.2.2 直纹钝体能量采集器输出电压测试

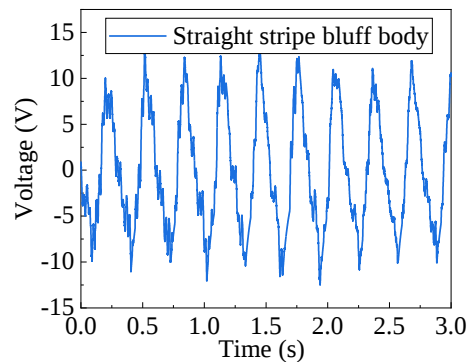
在本节中,将探讨直纹钝体能量采集器在不同风速条件下的输出电压特性。直纹钝体作为一种常见的仿生结构,因其表面特征呈现规则的直线形态,在气流作用下能够产生特定的振动响应。本实验通过在风速范围 0-10 m/s 之间选取波形稳定、具有代表性的几个风速点,进一步分析风速变化对直纹钝体能量采集器输出电压的影响。

与其他仿生结构(如波纹钝体或圆柱钝体)相比,直纹钝体的表面设计具有较强的方向性,因此在气流通过时,可能会表现出与气流方向相关的特定振动模式。在测量中,选取的风速点代表了不同振动状态下的典型输出电压波形,并能反映风速与输出电压之间的关系。所选风速数据将在后续的图表中呈现,旨在为分析基于直纹钝体流致振动能量采集器在不同风速下的振动特性和采集性能提供详细依据。

本节所展示的数据将涵盖风速从 0 m/s 到 10 m/s 范围内的一些关键测量点,以便全面呈现直纹钝体在该风速区间内的电压响应特性,不仅为能量采集器的设计提供了理论支持,也为后续在类似条件下的应用研究奠定了基础。



(a)6m/s



(b)7.5m/s

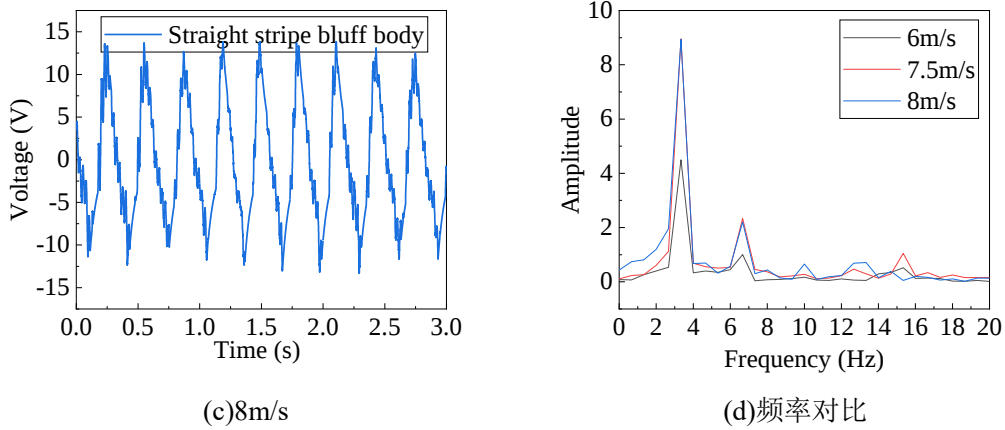


图 5-3 不同风速下的直纹钝体能量采集器输出电压时域图和频域图

如图 5-3 所示，当风速为 6 m/s 时，直纹钝体的输出电压峰值达到 7.36141V，较低风速阶段有所提升，表明气流对钝体的振动激励逐步增强。在此风速范围内，气流动能已足以激发明显的振动响应，但能量采集器尚未进入高效工作状态，输出电压仍呈线性增长趋势。

当风速增至 7.5 m/s，输出电压峰值显著升高至 13.78662V，较前一风速点大幅提升，表明风流对钝体的作用明显增强，振动响应更为剧烈。这一变化可能源于气流剪切效应、湍流特性及气流与钝体表面相互作用的强化。此风速下，气流动能远超低风速阶段，使钝体表面形成稳定的振动模式，电压输出大幅提高。当风速进一步增加至 8 m/s，输出电压峰值小幅增长至 13.83183V，但变化幅度趋于平缓，表明振动模式已基本稳定，气流激励效应接近饱和。此时，能量采集器处于高效工作状态，风速的进一步提升对输出电压的影响逐渐减弱。

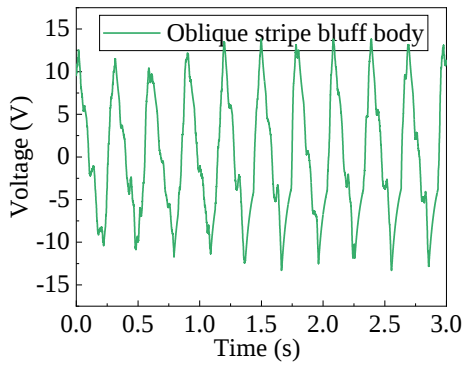
从频域图可以观察到，在基本固有频率下，直纹钝体的振幅随着风速的增加逐渐趋于稳定，并不再呈现显著变化。这表明在该频率范围内，风速的提升对直纹钝体的振动响应影响有限，可能是由于气流与结构相互作用已达到稳定状态，湍流效应和剪切力的进一步增强未能显著激发更大的振动幅度。因此，在较高风速下，钝体的振动趋于稳定，振幅保持在相对恒定的水平。

这一分析表明，在直纹钝体能量采集器的设计与应用中，风速对于振动激励和能量采集效率起到了关键作用。通过优化仿生表面设计及控制风速范围，可以有效提升能量采集器的性能，进而在实际应用中达到最佳能量转化效率。

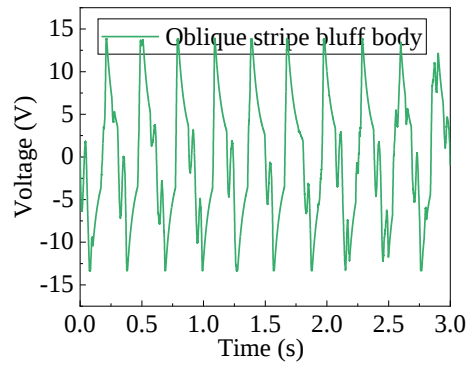
5.2.3 斜纹钝体能量采集器输出电压测试

在本节中，将探讨斜纹钝体能量采集器在风速 0-10 m/s 范围内的输出电压特性。与其他仿生表面钝体不同，斜纹钝体采用了一种具有倾斜波纹纹理的表面设计。斜纹结构的引入旨在通过改变气流与钝体表面接触的角度，优化流体动力学效应，从而增强振动响应并提高能量采集效率。

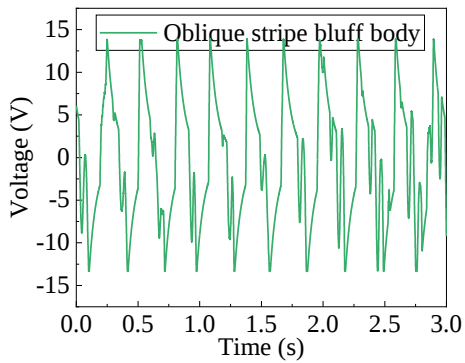
为准确评估斜纹钝体采集器的性能，本文从实验中选择了风速从 0 m/s 到 10 m/s 的多个风速点，重点测试了在每个风速下，输出电压表现较为稳定且具有代表性的波形数据。通过分析数据，可以观察到斜纹表面设计对输出电压的影响，并进一步探讨风速变化对能量采集器性能的具体作用。



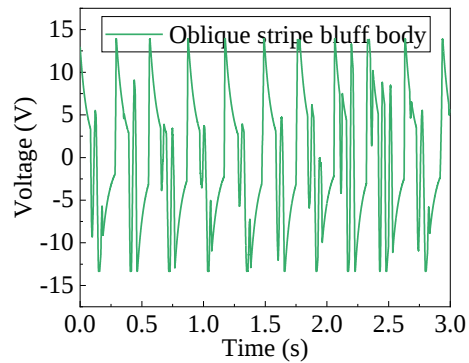
(a)6m/s



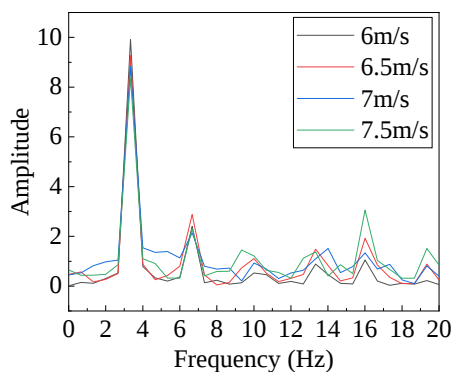
(b)6.5m/s



(c)7m/s



(d)7.5m/s



(e)频率对比

图 5-4 不同风速下的斜纹钝体能量采集器输出电压时域图和频域图

如图 5-4 所示，在风速 6 m/s 时，斜纹钝体能量采集器的输出电压为 13.81109V，表明此风速已足以激发显著振动，但尚未达到最高效率。此时，气流对钝体的扰动作用逐步显现，气流与表面纹理的相互作用趋于稳定，但尚未达到最佳共振状态。

当风速增至 6.5 m/s，输出电压上升至 13.88722V，说明气流动能进一步增强，推动振动幅度增加，钝体表面产生更显著的振动响应。风速接近一定阈值，气流激励效果逐渐增强。在 7 m/s 风速下，输出电压达到 13.91415V，振动幅度继续增长，但扰动趋于稳定，系统响应接近物理极限，电压增幅减缓。当风速升至 7.5 m/s，输出电压为 13.92545V，增长幅度进一步减小，表明振动幅度已达最大，气流动能已接近饱和，电压变化趋于稳定。

从频域分析结果可见，在基本固有频率下，斜纹钝体的振动幅度在不同风速条件下均保持稳定，未出现显著变化。这表明，该结构在该频率范围内已达到振动平衡状态，气流的扰动虽存在但不足以引发振幅的进一步增长。随着风速的增加，振动响应未表现出明显的增强或衰减趋势，说明斜纹钝体的动力学特性使其在该固有频率下具有较强的稳定性，不易受到风速变化的影响。

从以上的风速数据分析可以看出，随着风速的增加，斜纹钝体的输出电压逐渐上升，表明气流的增加有效地提高了表面振动的强度和能量转化效率。然而，在达到一定风速后，输出电压的增幅逐渐减缓，说明系统的振动强度已接近其物理极限或饱和状态。斜纹钝体的设计优化了气流与表面相互作用的方式，使得风速增大时能够有效增强振动幅度和能量采集，但在高风速下，系统可能会受到共振频率、摩擦力及其他物理限制的影响，导致输出电压增幅趋于平稳。

5.2.4 折纹钝体能量采集器输出电压测试

在本节中，将重点探讨折纹钝体能量采集器在风速 0-10 m/s 范围内的输出电压特性。与传统圆柱钝体、波纹钝体以及直纹钝体能量采集器不同，折纹钝体采用了一种具有特殊几何形状的表面结构，其折纹的存在能够显著改变气流对钝体表面的流动特性，从而影响振动模式和能量采集效率。

为了准确评估基于折纹钝体流致振动能量采集器的性能，本实验选择了风速从 0m/s 至 10 m/s 的多个代表性风速值，并记录了每个风速下的电压波形。根据气流速度的变化，选择了在各风速下波形较为稳定的测试数据，展示了不同风速条件下折纹钝体的输出电压响应特性。

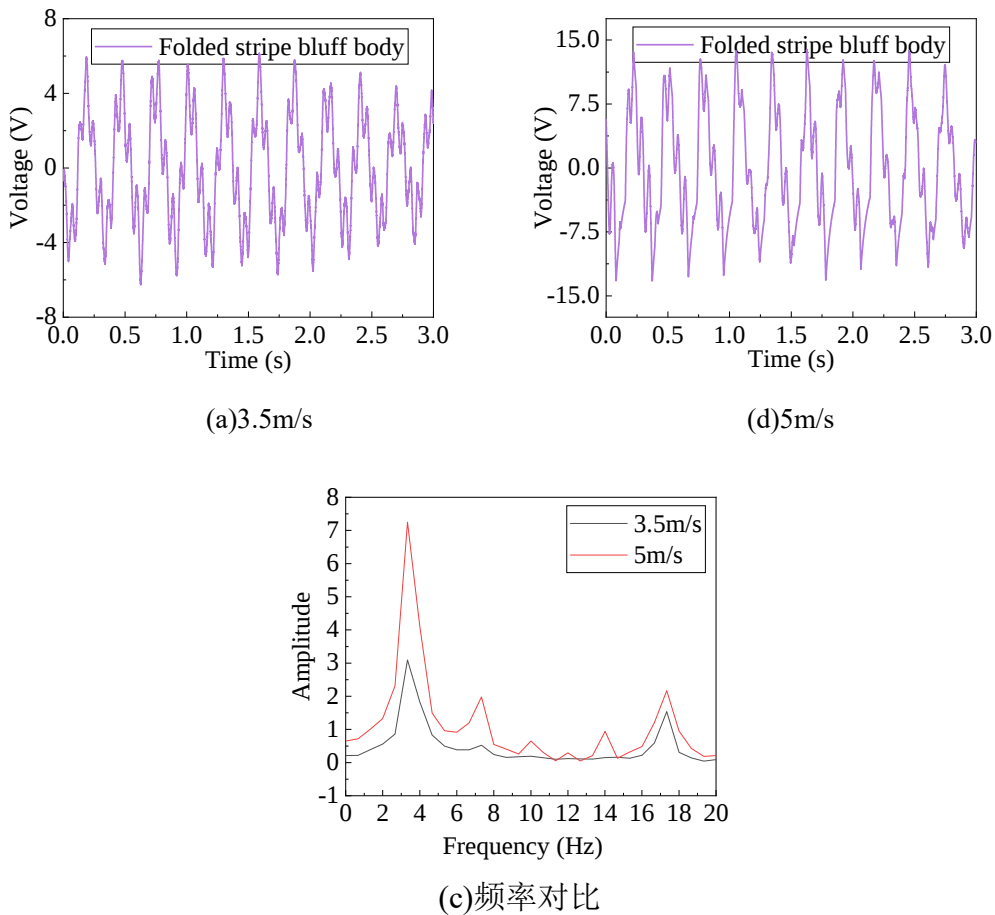


图 5-5 不同风速下的折纹钝体能量采集器输出电压时域图及频域图

如图 5-5 所示，当风速为 3.5 m/s 时，基于折纹钝体的能量采集器输出电压为 6.13975V，表明气流已能激发钝体表面初步振动，但振幅较小，能量转化效率较低，尚未达到最佳工作状态。此时，气流对钝体的扰动作用开始显现，但振

动模式仍处于弱激励阶段。当风速增至 5 m/s ，输出电压大幅提升至 13.8314V ，表明气流动能得到有效利用，钝体表面振动幅度显著增强，能量转换效率大幅提高。在该风速下，折纹钝体可能已进入或接近共振状态，进一步强化了振动响应，从而提升输出电压。

从频域图可观察到，在基本固有频率下，折纹钝体的振幅在风速由 3.5 m/s 增加至 5 m/s 时，呈现显著跃升，从 3.1 增加至 7.3 ，增幅达到 135.48% 。这一变化表明，在该风速区间内，气流对钝体的激励效应显著增强，导致振动幅度大幅增长。可能的原因在于，该风速下折纹钝体已接近或进入共振状态，使得气动力对结构的作用更为显著，涡街的脱落频率与钝体的固有频率趋于匹配，从而有效放大了振动响应并提升了能量采集效率。这一现象表明折纹钝体在特定风速区间内具备良好的流致振动放大效应，为进一步优化其结构设计提供了理论依据。

5.3 基于不同钝体流致振动能量采集器的输出能力分析

在前述章节中，详细讨论了不同类型钝体（包括传统圆柱钝体、波纹钝体、直纹钝体、折纹钝体和斜纹钝体）在不同风速条件下的输出电压变化及其影响因素。通过对各类钝体的实验数据分析，已揭示出气流速度对振动响应以及能量转化效率的深远影响。然而，单一的输出电压数据仅能反映能量采集器在某一时刻的性能表现，尚未全面揭示各类钝体能量采集器在不同风速下的输出能力差异。

因此，本节将在此基础上进一步进行不同钝体流致振动能量采集器的输出能力分析。通过对比各类钝体在相同风速条件下的电压输出峰值与能量转化效率，结合实验结果，将探讨不同表面结构对能量采集能力的优化效果。特别地，将分析各钝体表面纹理对风能转化的影响，阐明仿生结构如何通过不同的振动模式和流动特性，增强或抑制风能的捕获和转化。

这一分析不仅有助于进一步理解各类钝体能量采集器在实际应用中的性能表现，还为优化钝体设计与表面结构提供了理论依据和实践指导。

在进行基于不同钝体流致振动能量采集器的输出能力分析时，本文首先对比了传统圆柱钝体流致振动能量采集器与波纹钝体流致振动能量采集器的性能，其流致振动特性在不同风速下呈现出显著差异。

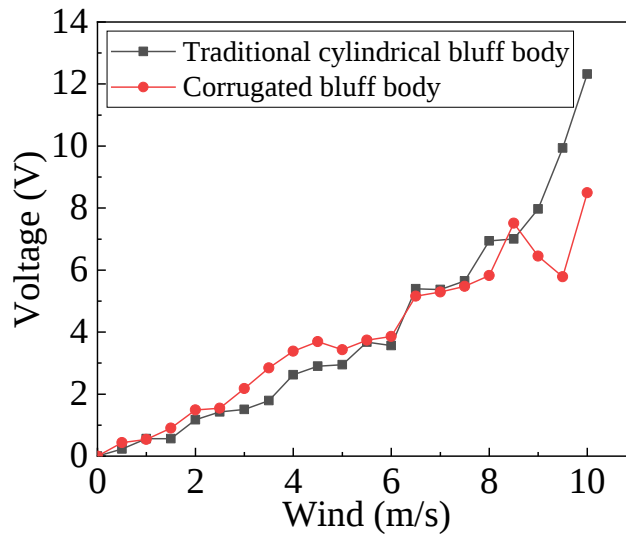


图 5-6 风速 0-10m/s 下基于传统圆柱钝体与波纹钝体能量采集器输出电压对比

传统圆柱钝体的简单几何形状使其在低风速下产生的振动相对较小,随着风速的增加,振动幅度逐渐增大,导致输出电压也随之升高。然而,波纹钝体由于其表面结构的特殊设计,能够在较低风速下产生明显的振动响应,进而提升了其在整个风速范围内的输出电压。

由图 5-6 可知,在风速为 0.5 m/s 时,传统圆柱钝体流致振动能量采集器的输出电压峰值为 0.23 V,而波纹钝体采集器的输出电压峰值为 0.44 V,提升幅度高达 94.24%。这一显著的差异表明,波纹钝体在低风速下具有较强的能量采集能力。随着风速的增加,在 1.5 m/s 时,波纹钝体的输出电压相比传统圆柱钝体提高了 60.73%。而当风速达到 3.5 m/s 时,波纹钝体的输出电压仍然保持高于传统圆柱钝体,达到 59.24%的提升。在 0.5 m/s 至 5 m/s 的风速范围内,波纹型钝体的输出电压普遍超过传统圆柱型钝体,特别是在低风速(0.5 m/s)时,波纹钝体表现出明显的优势。

然而,在风速为 6.5 m/s 至 10 m/s 的较高风速区间内,波纹钝体的输出电压普遍低于传统圆柱钝体的输出电压,尤其在风速为 9.5 m/s 和 10 m/s 时,输出电压分别下降了 41.81%和 31.06%。这表明,在高风速条件下,波纹钝体的能量采集性能逐渐不如传统圆柱钝体,甚至出现明显的劣势。这一现象的原因可能与波纹钝体表面的复杂几何形状在高风速下造成了较大的空气流动阻力,进而影响了其流致振动的强度和稳定性。

从上述结果可以看出,在低、中风速条件下,波纹钝体的能量采集效果更为优越。特别是在 0.5 m/s 至 3.5 m/s 的风速范围内,波纹钝体展现了明显的性能优势。传统的圆柱形钝体由于其简单的表面结构,往往经历了较长的气流分离延迟,导致在较低风速下表现不理想。相反,波纹钝体通过其特殊的表面设计,能够促进早期的涡流分离,扩大了低风速下的优势区域,从而有效提升了输出电压。

然而,随着风速的增大,尤其是超过 5 m/s 后,波纹钝体的输出电压增幅开始减缓,并在高风速下逐渐显现劣势。这可能是由于风速增加时,波纹表面对气流的干扰作用逐渐增强,导致涡流分离点的变化和流动阻力的增加,进而抑制了振动的幅度和稳定性,影响了能量转化效率。

值得注意的是,在高风速(例如 8.5 m/s)下,波纹结构的表面设计有可能通过有效地控制气流的分离点,减少空气阻力并增加升力。这种空气动力学的改进可能有助于提高波纹钝体的输出电压,但实际实验数据表明,波纹钝体的效率在风速增大到一定值后仍然表现出逐渐降低的趋势。因此,在实际应用中,需要根据环境风速的具体范围来选择合适的钝体形状,以最大化能量采集效率。

综合来看,波纹钝体在低风速条件下,尤其是在 0.5 m/s 至 3.5 m/s 范围内,具有明显的优势,其输出电压明显高于传统圆柱钝体。然而,在较高风速(6.5 m/s 以上)时,传统圆柱钝体的表现逐渐超越波纹钝体,所以在设计能量采集器时,需要根据不同风速条件进行优化调整,以获得最佳的能量转化效果。

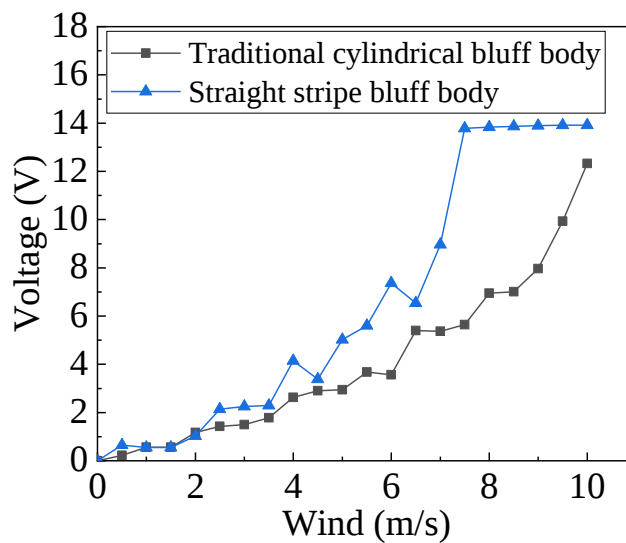


图 5-7 风速 $0\text{--}10\text{ m/s}$ 下基于传统圆柱钝体与直纹钝体能量采集器输出电压对比

其次,本文对比了基于传统圆柱钝体流致振动能量采集器与基于直纹钝体流致振动能量采集器的输出能力。在实验中,风速范围选择了 0-10 m/s,以确保能够覆盖不同风速下的性能表现,并且选取了具有代表性的风速值来进行详细分析。

在图 5-7 中,可以观察到在不同风速下基于直纹钝体流致振动能量采集器与传统圆柱钝体的输出电压对比。在风速为 6.0 m/s 时,直纹钝体的峰值输出电压为 7.36 V,较传统圆柱钝体的 3.56 V 高出 106.64%。当风速增加到 7.5 m/s 时,直纹钝体的峰值电压提升至 13.79 V,比传统圆柱钝体的 5.65 V 高出 144.11%。同样,在风速为 8.0 m/s 时,直纹钝体的输出电压为 13.83 V,相比圆柱钝体的 6.94 V,增加了近一倍,达到了 99.16%。从数据可以看出,直纹钝体在中至高风速(6.0 m/s 至 8.5 m/s)区间内的表现明显优于传统的圆柱钝体。

然而,在较低风速(如 1.0 m/s 至 2.0 m/s)下,直纹钝体的输出电压明显低于圆柱钝体,尤其在风速为 2.0 m/s 时,其峰值电压降低了 12.42%。这一现象表明,尽管直纹钝体在较低风速下的性能较传统圆柱钝体稍逊,但随着风速的增加,直纹钝体的优势逐渐显现,并在中高风速下展现出显著的能量收集能力。特别是在风速为 3.5 m/s 至 8.5 m/s 范围内,直纹钝体的能量采集效率表现突出。

直纹钝体能够在中高风速范围内发挥优势,关键原因在于其表面纹理能够有效促进早期涡流的形成。早期涡流的生成使得流体与钝体表面之间的相互作用更加充分,从而增加了振动频率与钝体结构固有频率之间的同步性。频率的同步性是提高流致振动能量采集效率的一个重要因素,能够显著提升能量转换的效果。

此外,随着风速的增加,直纹钝体的表面纹理有助于减少气流分离所引起的湍流现象,增强了涡流的稳定性。通过稳定涡流的形成,直纹钝体能够有效减少流体阻力的波动,进一步提高了能量收集效率。尤其在中、高风速下,直纹钝体能够更好地控制涡流的形成,从而提高整体的输出电压。

尽管如此,值得注意的是,在风速达到 7 m/s 时,直纹钝体可能会出现涡激振动(VIV)中的“失锁”现象。当风速继续增大时,旋涡脱落频率可能与结构的固有频率不再同步,这一现象称为“失锁”。失锁现象会导致涡激振动的效率下降,从而影响能量收集效果。在此现象下,尽管涡流仍然存在,但由于频率不匹配,振动幅度减少,导致能量收集能力下降。

总体而言,直纹钝体在中高风速区间内的电压输出和能量采集效率显著高于

传统圆柱钝体，尤其是在 6.0 m/s 至 8.5 m/s 的风速范围内，其性能优势尤为突出。通过优化直纹结构的设计，能够进一步提升其在中高风速下的能量收集能力。然而，在非常高风速的条件下，旋涡脱落频率与结构固有频率的失配可能会导致能量收集效率的下降。因此，针对不同风速范围，设计更加适合的钝体结构和表面纹理，有助于在广泛的风速条件下实现最优的能量收集效果。

接着，本文对比了基于传统圆柱钝体流致振动能量采集器与基于斜纹钝体流致振动能量采集器的输出能力。在这一部分的分析中，重点关注了斜纹钝体结构在不同风速下对能量收集能力的提升效果。斜纹钝体的表面纹理设计使得其在流体与钝体表面的相互作用过程中产生不同的涡流模式，从而影响涡激振动的特性并最终影响能量采集效率。

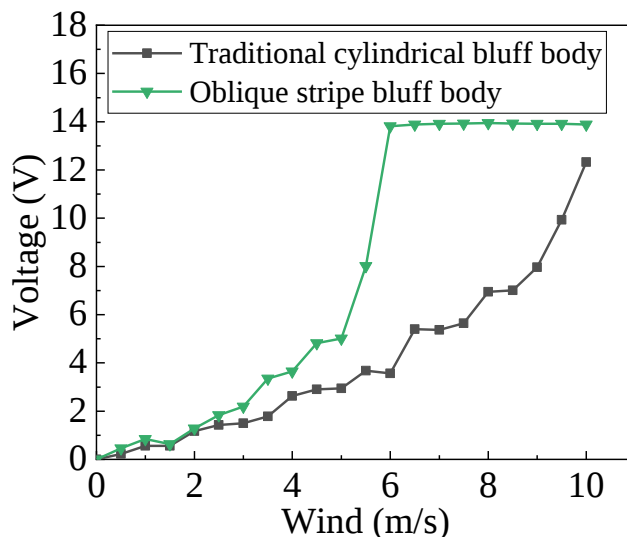


图 5-8 风速 0-10m/s 下基于传统圆柱钝体与斜纹钝体能量采集器输出电压对比

如图 5-8 所示，在风速范围为 5.0 m/s 至 7.5 m/s 之间时，基于斜纹钝体流致振动能量采集器的输出电压峰值分别为 5.01V、8.01V、13.81V、13.89V、13.91V 和 13.93V，相较于传统圆柱钝体，分别提高了 70.27%、117.93%、287.75%、159.00%、157.45%和 146.57%。从这一数据可见，在风速为 6.0 m/s 至 7.5 m/s 的风速范围内，斜纹钝体的输出电压显著高于传统圆柱钝体，表现出明显的优势。

然而，值得注意的是，在低风速区间（1.0 m/s 至 2.0 m/s），斜纹钝体的输出电压低于传统圆柱钝体，优势并不明显。这一现象可能是由于斜纹钝体的表面纹理对气流的分离影响在低风速时未能充分激发，从而导致其能量收集效果较为有

限。这表明，斜纹钝体的设计在低风速情况下尚未能够有效提升能量采集性能。

斜纹钝体的优势区域主要集中在风速为 5 m/s 至 7.5 m/s 之间。这一现象的原因在于，斜纹钝体表面纹理的独特设计增加了气流分离的复杂性，从而在气流通过钝体表面时产生了更强的升力和阻力。这种流动特性的改变，使得斜纹钝体在中高风速区间内能够有效增强能量采集效率，尤其在风速范围 5 m/s 至 7.5 m/s 内表现出极佳的适应性和性能。

总体来看，斜纹钝体的表现强烈依赖于风速条件，尤其在中高风速下展现出显著的优势，其输出电压与能量收集效率的提升表现出极大的潜力。虽然在低风速下其性能表现略逊，但在风速较高的环境中，斜纹钝体无疑是一种更为高效的能量采集解决方案。

最后，本文对比了基于传统圆柱钝体和基于斜纹钝体的流致振动能量采集器的输出能力。在该分析中，重点探讨了两种类型的能量采集器在不同流动条件下的性能差异。

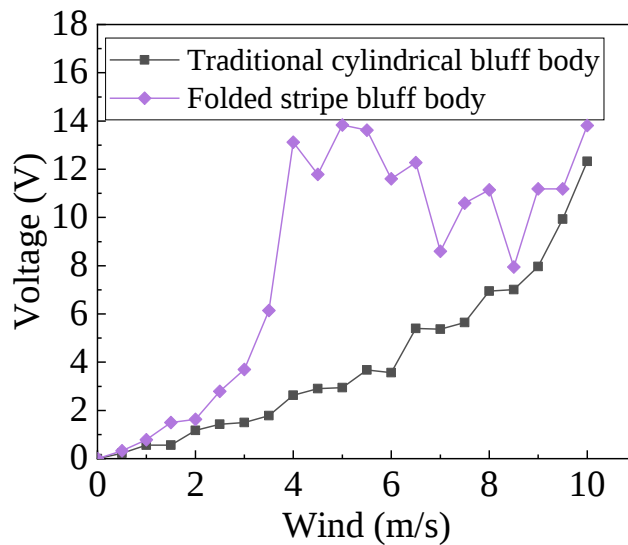


图 5-9 风速 0-10m/s 下基于传统圆柱钝体与折纹钝体能量采集器输出电压对比

如图 5-9 所示，当风速范围在 3.5 m/s 至 5.0 m/s 之间时，基于折纹钝体的流致振动能量采集器的输出电压峰值分别为 6.14V、13.11V、11.78V 和 13.83V。而传统圆柱钝体的输出电压峰值分别为 1.79V、2.62V、2.90V 和 2.94V。折纹钝体的输出电压峰值相比传统圆柱型钝体分别提高了 243.51%、399.86%、306.70%和 369.84%。进一步分析表明，折纹钝体的优势区域主要集中在风速 3.5 m/s 至 6.0

m/s 的范围内。在该风速范围内，折纹钝体的输出电压显著高于传统圆柱钝体，体现出明显的性能优势。特别是在风速为 4.0 m/s 至 5.5 m/s 时，折纹钝体的输出电压比传统圆柱钝体高出超过 270%，展示了其强大的能量收集潜力。这一优势主要归因于折纹钝体表面结构的独特设计，该设计有效增加了旋涡脱落的频率。旋涡频率的增加进一步提升了振动频率和电压输出，使得折纹钝体在中等风速条件下保持较高的能量收集效率，进而优化了其在风能采集应用中的表现。

实验结果验证了 0~10 m/s 风速下的模拟结果。采用传统圆柱钝体的流致振动能量采集器，其输出电压峰值随着风速的增加逐渐增大。然而，在波纹、直纹、斜纹和折纹表面钝体的 FIV 能量收集器中，观察到了一些不同的趋势。

具体来说，采用波纹钝体的流致振动能量采集器在低风速条件下表现出较好的性能，但随着风速的增加，其性能开始下降。相反，具有直纹和斜纹钝体的能量采集器在中高风速范围内一直保持较高的峰值输出电压。在中等风速范围内，折纹钝体的流致振动能量采集器则显示出明显的性能优势。

实验结果突显了不同风速下，各种钝体设计对流致振动能量采集器性能的显著影响。这一发现进一步强调了根据特定应用需求的仿生表面的重要性，以优化其能量收集性能。图 5-10 展示了不同流致振动能量采集器的输出电压峰值与风速之间的关系。初期，旋涡的脱落频率低于系统的共振频率。然而，随着风速的增加，旋涡的脱落频率逐渐增大。当涡流脱落频率接近系统共振频率时，动态响应的幅值增大，从而导致输出电压达到峰值。反之，当涡流的脱落频率超过系统的共振频率时，输出电压则开始下降。

与其他研究相比，本文讨论的具有圆柱形钝体的流致振动能量采集器并未表现出明显的锁定区现象。这一现象的缺失可以归因于所采用的 3D 打印技术制造的钝体，增加了其质量。随着风速的增大，钝体质量的增加使得其难以达到最大振动幅值，阻碍了进入锁定区域的有效性。较大的质量提高了系统的惯性，限制了在特定风速范围内振动幅度的实现。这一因素影响了流致振动的整体性能，导致锁定区域现象在本研究中不如预期般明显。

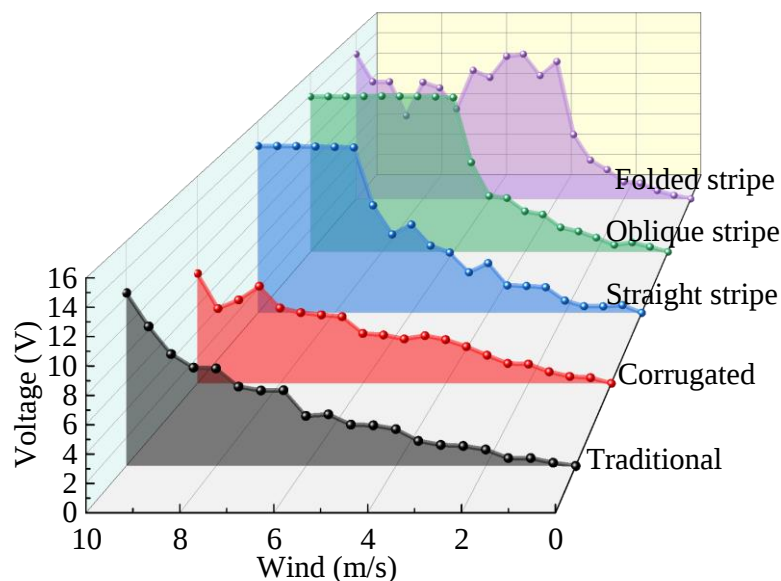


图 5-10 风速 0-10m/s 下基于不同钝体流致振动压电能量采集器峰值电压比较

总的来说，钝体的重量和 3D 打印材料的特性导致在本实验中未能观察到明显的锁定区现象。尽管风速的逐渐增加增强了振动强度，但在某些特定风速范围内，并未达到共振状态。这一效应表现为实验中的电压逐渐升高，而并未形成稳定的锁相区域。

从图 5-10 中可以看出，传统的圆柱形钝体涡致能量采集器与其他钝体采集器相比，主要表现为其在较低风速范围内的优越性。其峰值输出电压位于 1 m/s 到 2.5 m/s 之间，在该范围内表现出较好的性能，并相较于其他钝体设计具有一定的优势。

波纹钝体的优势区域从 0.5 m/s 扩展到 3.5 m/s。与传统圆柱形钝体的优势区域（1 m/s 到 2.5 m/s）相比，波纹钝体的优势区域扩展了 1.5 m/s，增长幅度达到 200%。波纹钝体在低风速下的优异表现，显著延长了其有效工作范围，并提升了整体输出电压。直纹钝体则在 3.5 m/s 到 10 m/s 的风速范围内表现出优势，相较于传统圆柱钝体，其优势区扩展了 6.5 m/s，增长幅度高达 433.33%。斜纹钝体的优势区位于 5 m/s 到 7.5 m/s 之间，而折纹钝体的优势区则集中在 3.5 m/s 到 6 m/s 的范围内。与传统圆柱形钝体相比，后两者的优势区均扩大了 2.5 m/s，增长幅度为 166.67%。

实验结果突显了钝体表面结构对优势区域的显著影响。某些特定的仿生表面设计能够显著扩大其优势区域，这对于提升系统的稳定性和性能具有重要意义。

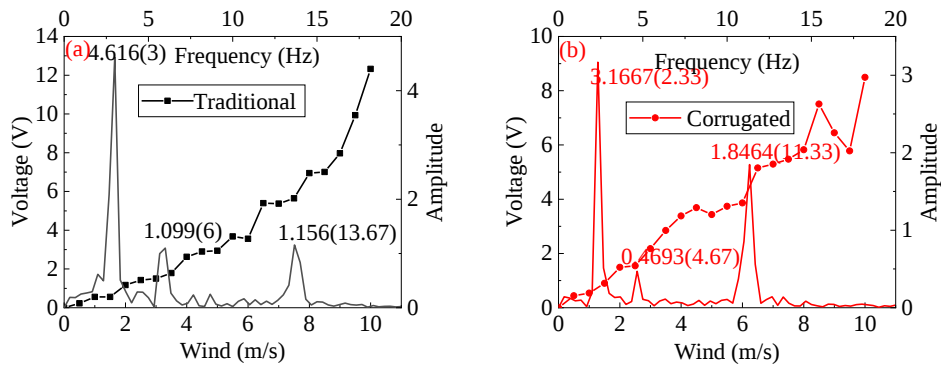
5.4 基于不同钝体流致振动能量采集器的频域及带宽分析

在前述章节中，深入分析了不同类型钝体流致振动能量采集器的输出电压及其性能表现。为了更全面地评估能量采集器的性能，特别是在实际应用中的适应性，频域及带宽分析成为了不可忽视的研究内容。频域分析能够揭示能量采集器在不同频率范围内的响应特性，而带宽分析则有助于评估其在特定频率范围内的工作稳定性和效率。

本节将重点讨论基于不同钝体结构的能量采集器在不同风速条件下的频域特性和带宽表现。通过对各类钝体的频率响应曲线进行对比，将探讨其在实际环境中能否有效捕捉流体动力学变化所带来的能量，并在一定频率范围内保持较高的能量转换效率。该分析对于理解不同结构的钝体能量采集器的适用性和优化方向具有重要意义。

通过使用 Origin 软件中的快速傅里叶变换（FFT），可以精确地确定流致振动能量采集器的振动频率。首先，在实验过程中，采集时域电压数据，作为输入被导入到 Origin 软件中。随后，通过应用 FFT 函数，时域数据被转换为频域数据。通过对得到的频谱进行详细分析，能够识别出系统的主导振动频率。

这一过程为提供了准确的振动频率测量，这对于评估能量采集器在不同风速条件下的性能表现至关重要。利用 FFT 进行频域分析，能够有效地揭示振动频率随风速变化的趋势，从而帮助更好地理解不同钝体结构在不同工作条件下的能量采集效率。此外，Origin 软件强大的数据处理和频谱分析功能，保证了整个频率分析过程既高效又具有高度的可靠性，为进一步的实验分析提供了坚实的数据支持。



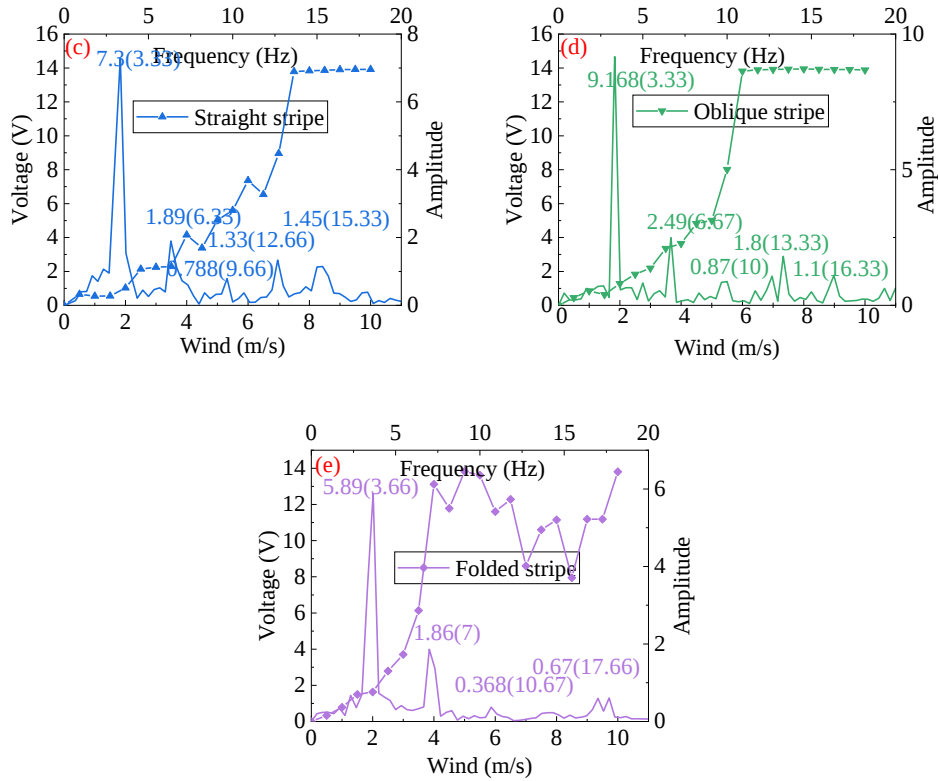


图 5-11 基于不同钝体流致振动能量采集器的频响特性 (a):传统 (b):波纹 (c):直纹 (d):斜纹 (e):折纹

图 5-11 展示了不同钝体设计的流致振动能量采集器的频响特性，涵盖了传统圆柱、波纹、直纹、斜纹和折纹等多种钝体结构。传统圆柱钝体采集器的有效工作带宽为 2.33-3.33 Hz、5.33-6.33 Hz 和 13.33-14.33 Hz，其主导固有频率分别为 3 Hz、6 Hz 和 13.67 Hz，幅值分别为 4.616、1.099 和 1.156。

相比之下，波纹钝体采集器展现了较为扩展的频响特性，其有效工作带宽为 1.67-4 Hz、4.33-5 Hz 和 10.33-12 Hz，固有频率为 2.33 Hz（幅度 3.17）、4.67 Hz（幅度 0.47）和 11.33 Hz（幅度 1.85）。直纹钝体采集器显示出更宽的带宽，频率范围包括 2.66-4.33 Hz、6-8 Hz、8-11 Hz、11-13.3 Hz 以及 14.66-17 Hz，主导频率为 3.33 Hz、6.33 Hz、9.66 Hz、12.66 Hz 和 15.33 Hz，对应的幅值分别为 7.3、1.89、0.79、1.33 和 1.45。

斜纹钝体采集器的频率响应较为均匀，其带宽覆盖 3~3.66 Hz、5.3~7 Hz、9.3~10.3 Hz、11.3~14 Hz 以及 15.66~17 Hz，固有频率分别为 3.33 Hz（幅值 9.17）、6.67 Hz（幅值 2.49）、10 Hz（幅值 0.87）、13.33 Hz（幅值 1.8）和 16.33 Hz（幅值 1.1）。最后，折纹钝体采集器主要在较高频率范围内工作，其带宽为

2.66 ~ 5 Hz、6.67 ~ 7.66 Hz、10.33 ~ 12 Hz、11.3 ~ 14 Hz 以及 16 ~ 18 Hz，主导频率为 3.66 Hz、7 Hz、10.67 Hz 和 17.66 Hz，幅值分别为 5.89、1.86、0.37 和 0.67。

频响特性表明，不同钝体设计显著影响了能量采集器的频带宽度和主导固有频率。在一定的风速范围内，钝体的设计能够有效扩展或缩小工作频带，从而优化系统的性能表现。仿生钝体能量采集器在有效工作带宽方面优于传统圆柱钝体采集器，主要体现在频率范围的拓宽和多频响应能力的增强。传统的圆柱钝体工作带宽有限，分别为 2.33-3.33 Hz、5.33-6.33 Hz 和 13.33-14.33 Hz，频率范围窄，幅值响应相对较低。这种限制源于其光滑的表面，导致其单一的涡脱落模式，限制了结构振动激励，从而限制了其整体能量收集效率。

相比之下，仿生钝体（如波纹、直纹、斜纹和折纹设计）由于优化了表面结构，显著拓宽了有效工作带宽。以波形钝体为例，实现了 1.67-4 Hz、4.33-5 Hz 和 10.33-12 Hz 的带宽，分别比传统设计提高了 233%、67%和 167%。这种改进归功于其在较低频率下产生涡流的能力增强，从而扩大了激励范围并提高了振动响应。直纹钝体进一步展示了卓越的性能，在多个频率范围内的带宽跨越 2.66-17 Hz，最大带宽增加了 300%。它的表面结构稳定了旋涡脱落，增强了激励频率与固有频率之间的同步，从而在中高频范围内具有优越的响应。

同样，斜纹和折纹钝体在特定频段上提供有针对性的改进。斜纹设计实现了更均匀的频率响应，带宽从 3-17 Hz 扩展，最大增加 270%。倾斜的表面特征增加了气流分离的复杂性，增强了升力和阻力，提高了对中上风速的适应性。折纹钝体在高频范围内具有明显的优势，有效带宽为 2.66 ~ 18 Hz，提高了 200%。其复杂的表面几何形状促进了更高的涡流脱落频率和更强的流动扰动，从而提高了高风速条件下的振动幅度和能量收集效率。

为验证仿生结构设计的有效性及其理论模型的适用性，本文尝试从理论建模、CFD 仿真与实验测试三方面对系统性能进行了多维度分析。尽管三种方法在建模假设与测试环境方面存在一定差异，但整体趋势保持一致，表明结构设计方案具备较强的理论支持与工程可行性。

此外，实验过程中尽可能控制环境变量，并进行了多次重复性测试，以增强测试结果的代表性与稳定性。总体而言，理论-仿真-实验之间形成了较为良好的对

应关系，为仿生结构优化设计提供了有效支撑。

综上所述，仿生钝体工作带宽的拓宽和多频适应性的提高凸显了其增强涡流产生模式和振动耦合效率的能力，不仅扩展了能量收集器的工作范围，而且确保了在不同风力条件下稳定的能量输出，为实际的风能收集应用提供了更高效和通用的解决方案。

5.5 本章小结

本章对不同类型的仿生钝体流致振动能量采集器的性能进行了对比分析，探讨了不同表面纹理设计对能量采集输出性能的影响。研究表明，仿生钝体相较于传统圆柱钝体，在中高风速范围内具有更高的能量采集效率。波纹、直纹、斜纹和折纹等仿生设计通过优化表面结构，不仅拓宽了工作带宽，还增强了多频响应能力，从而提升了能量收集效率。

此外，仿生钝体在不同风速条件下展现出稳定的能量输出性能，为风能采集的实际应用提供了更高效和通用的解决方案。总体而言，仿生钝体在提高能量采集效率、拓宽工作带宽及增强多频适应性方面具有显著优势，为风能采集技术的发展提供了重要的研究基础和广阔的应用前景。

总结与展望

总结

本文介绍了几种新型钝体设计,并且仿生表面的特性,旨在增强流致振动能量收集的效率。为了全面了解钝体的气动特性,本文建立了一个综合的数学模型,并利用计算流体动力学(CFD)模拟工具(COMSOL)分析了钝体的升力和阻力系数。通过风洞实验,验证了所设计的流致振动能量收集器的气动特性和能量采集性能。

CFD 模拟结果表明,流致振动能量采集器的升力和阻力系数均呈现出典型的正弦模式,反映了周期性振动特性。与传统光滑钝体相比,配备波纹表面的钝体在性能上展现了显著的提升。具体而言,波纹钝体的平均阻力系数显著降低了 97.5%,同时升力系数的幅值增加了 105%。此外,斜纹钝体与传统圆柱钝体相比,在升力和阻力特性上也有显著变化,特别是在阻力方面,斜纹设计的钝体显著提高了 106.9%,升力幅值增加了 99.3%。

实验数据进一步揭示了流致振动能量采集器在不同风速条件下的输出电压特性。具体来说,在风速范围 $U=0.5\sim3.5$ m/s 内,采用波纹钝体的能量采集器输出电压始终高于传统圆柱钝体,尤其是在 $U=0.5$ m/s 时,输出电压幅值较传统设计提高了 94.24%。然而,当风速超过 $U=5$ m/s 时,输出电压的增速逐渐减缓,表明存在较为明显的阻尼效应。与波纹钝体相比,直纹钝体表现出更加优异的性能,尤其在中高风速区段。具体来说,在 $U=6$ m/s 时,直纹钝体的能量采集器输出电压峰值比传统圆柱钝体高出约 106.64%。此外,采用直纹钝体的流致振动能量采集器的有效工作带宽也延长了 8.31 Hz,增加幅度为 277%。

在斜纹钝体方面,流致振动能量采集器在中高风速下的性能明显优于传统圆柱钝体,尤其在 $U=6.5$ m/s、 $U=7$ m/s 和 $U=7.5$ m/s 风速下,输出电压峰值分别提高了 287.75%、159.00%、157.45%和 146.57%,显示出较强的适应能力,特别适合在中高风速条件下运行。此外,在 $U=4$ m/s 时,采用折纹钝体的能量采集器输出电压峰值比传统设计提高了约 396.86%,表明其在高风速环境下具有极大的能

量采集潜力。

实验和模拟结果突显了具有仿生仿生表面的钝体对气动特性的显著影响,进而有效提升了流致振动能量收集器的能量转换效率。综上所述,本文的研究不仅验证了不同仿生钝体设计的优越性能,也为未来优化仿生表面设计提供了理论依据,特别是在增强流致振动特性和提高能量转换效率方面。未来的研究应继续聚焦于进一步优化仿生表面设计,探索不同表面几何形状对流致振动能量收集器性能的影响,推动该领域在实际应用中的可行性和高效性。

本文的创新点如下:

- (1)钝体中引入了四种贝壳状的仿生表面的设计;
- (2)仿真模拟中利用 COMSOL6.1 的三维模块进行了仿真模拟分析;

展望

仿生表面作为一种独特的超结构,近年来在能量采集领域引起了广泛关注。其通过模仿自然界中具有特殊流体动力学特性的结构,如贝壳、鳞片等,能够有效地优化流体与固体表面的相互作用,从而提升能量转换效率。本文提出了四种不同的贝壳状仿生表面,在一定程度上解决了传统能量采集器在性能方面的瓶颈问题。具体而言,通过优化表面结构,仿生表面能够显著拓宽工作带宽,增强结构的流致振动响应,从而提高能量收集器的整体效能。然而,尽管取得了一定的成功,仍有一些关键问题亟待进一步探索 and 解决。

(1)如何在保证结构稳定性的同时进一步提高仿生表面的适应性,如何优化设计以适应更广泛的工作环境等,都是未来研究的重要方向。

(2)流致振动能量采集系统通常采用集中参数模型来描述系统的整体特性。尽管这一方法能够有效地把握系统的宏观行为,但在细节表现方面存在一定的局限性,特别是在精确描述系统的局部动态特性和各个子系统之间的相互作用时。

(3) 由于风洞风机调控精度有限,无法实现以 0.1 m/s 为增量的精细风速调节,导致采集器在微小风速变化下的电压响应难以准确测量,限制了对风速与能量采集效率关系的细致分析,尤其影响了低风速性能评估。

参考文献

- [1] ZHU J, ZHU M, SHI Q, et al. Progress in TENG technology—A journey from energy harvesting to nanoenergy and nanosystem [J]. *EcoMat*, 2020, 2(4): e12058.
- [2] HAYAT M B, ALI D, MONYAKE K C, et al. Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future [J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(3): 1049-67.
- [3] 朱蓉, 王阳, 向洋, et al. 中国风能资源气候特征和开发潜力研究 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(6): 409-18.
- [4] YUAN K, SHI J, AFTAB W, et al. Engineering the thermal conductivity of functional phase-change materials for heat energy conversion, storage, and utilization [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(8): 1904228.
- [5] YANG T, ZHOU S, FANG S, et al. Nonlinear vibration energy harvesting and vibration suppression technologies: Designs, analysis, and applications [J]. *Applied Physics Reviews*, 2021, 8(3).
- [6] CAO M, WANG X, CAO W, et al. Thermally driven transport and relaxation switching self-powered electromagnetic energy conversion [J]. *Small*, 2018, 14(29): 1800987.
- [7] KOPETZ H, STEINER W. Internet of things [M]. *Real-time systems: design principles for distributed embedded applications*. Springer. 2022: 325-41.
- [8] KANDRIS D, NAKAS C, VOMVAS D, et al. Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey [J]. *Applied system innovation*, 2020, 3(1): 14.
- [9] RANTZ R, HALIM M, XUE T, et al. Architectures for wrist-worn energy harvesting [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(4): 044001.
- [10] ZHANG Z, WANG S, KAN J, et al. A pneumatic piezoelectric vibration energy harvester based on the compressed air-transducer-structure interaction [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 213: 112861.

- [11] ZHAO L-C, ZOU H-X, YAN G, et al. Magnetic coupling and flextensional amplification mechanisms for high-robustness ambient wind energy harvesting [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 201: 112166.
- [12] ZHU J, LIU X, SHI Q, et al. Development trends and perspectives of future sensors and MEMS/NEMS [J]. *Micromachines*, 2019, 11(1): 7.
- [13] FAHLSTROM P G, GLEASON T J, SADRAEY M H. Introduction to UAV systems [M]. John Wiley & Sons, 2022.
- [14] ZHOU W, DU D, CUI Q, et al. Recent research progress in piezoelectric vibration energy harvesting technology [J]. *Energies*, 2022, 15(3): 947.
- [15] HAMLEHDAR M, KASAEIAN A, SAFAEI M R. Energy harvesting from fluid flow using piezoelectrics: A critical review [J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 1826-38.
- [16] 齐国胜, 韩翔希, 翟煜, 等. 基于重叠网格法的圆柱涡激振动非线性特性研究[J]. *船舶*, 2024, 35(04): 38.
- [17] 徐迎, 滕燕, 胡万兴, 等. 基于驰振的压电能量收集器的仿真与试验[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2024, 52(23).
- [18] 李凯, 蔡春声, 韩艳, 等. 大跨度桥梁非线性颤振理论与试验研究[J]. *工程力学*, 2024, 41(2): 1-24.
- [19] Heit D R, Ortiz-Calo W, Poisson M K P, et al. Generalized nonlinearity in animal ecology: Research, review, and recommendations[J]. *Ecology and Evolution*, 2024, 14(7): e11387.
- [20] Rivera Y J, Badman S T, Stevens M L, et al. In situ observations of large-amplitude Alfvén waves heating and accelerating the solar wind[J]. *Science*, 2024, 385(6712): 962-966.
- [21] Yu N, Yang K, Wu Z, et al. Low-frequency vibration absorption of magnetic quasi-zero-stiffness structures with lever mechanism[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 267: 108973.
- [22] ZHOU Z, CAO D, HUANG H, et al. Efficiently harvesting low-speed wind energy by a novel bi-stable piezoelectric energy harvester from vortex-induced vibration and galloping [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 209: 111124.

- [23] ZHANG M, SONG Y, ABDELKEFI A, et al. Vortex-induced vibration of a circular cylinder with nonlinear stiffness: prediction using forced vibration data [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 108(3): 1867-84.
- [24] WANG J, SUN S, TANG L, et al. On the use of metasurface for Vortex-Induced vibration suppression or energy harvesting [J]. *Energy conversion and management*, 2021, 235: 113991.
- [25] WANG J, ZHANG Y, LIU M, et al. Etching metasurfaces on bluff bodies for vortex-induced vibration energy harvesting [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 242: 108016.
- [26] Zhan Z, Wang Z, Xie M, et al. Programmable droplet bouncing on bionic functional surfaces for continuous electricity generation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(1): 2304520.
- [27] 徐征, 刘日, 王天昊, 等. 仿生鲨鱼皮复合微纳减风阻结构的仿真与制备[J]. *实验流体力学*, 2024, 38(2): 107-114.
- [28] 何皓翔, 付嘉钧, 白宏磊. 极小昆虫翅膀拍动模式的气动特性实验研究[J]. *力学学报*, 2024.
- [29] Ali A, Ali S, Shaukat H, et al. Advancements in piezoelectric wind energy harvesting: A review[J]. *Results in Engineering*, 2024, 21: 101777.
- [30] ZHU H, GAO Y. Hydrokinetic energy harvesting from flow-induced vibration of a circular cylinder with two symmetrical fin-shaped strips [J]. *Energy*, 2018, 165: 1259-81.
- [31] EWERE F, WANG G, FRENDI K. Galloping Piezoelectric Energy Harvester with Bio-inspired Square Bluff Body; proceedings of the 23rd AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, F, 2015 [C].
- [32] JIN Z, LI G, WANG J, et al. Design, Modeling, and Experiments of the Vortex-Induced Vibration Piezoelectric Energy Harvester with Bionic Attachments [J]. *Complexity*, 2019, 2019(1): 1670284.
- [33] Sharma P, Mirikar D, Sahu S K, et al. An experimental investigation on the influence of Strouhal number and amplitude on the flow and heat transfer behavior

- p>of synthetic jet impingement[J].
- Experimental Heat Transfer*
- , 2025, 38(3): 245-270.
- [34] Makarov A S, Afonin G V, Konchakov R A, et al. Dimensionless parameter of structural ordering and excess entropy of metallic and tellurite glasses[J]. *Scripta Materialia*, 2024, 239: 115783.
- [35] Chauhan A, Raffi S, Sasmal C. Suppression and augmentation in vortex shedding frequency due to fluid elasticity[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2025, 335: 105348.
- [36] Yang R, Kai Y. Dynamical properties, modulation instability analysis and chaotic behaviors to the nonlinear coupled Schrödinger equation in fiber Bragg gratings[J]. *Modern Physics Letters B*, 2024, 38(06): 2350239.
- [37] Lee D, Shim Y, Kim Y, et al. Shear force effect of the dry process on cathode contact coverage in all-solid-state batteries[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 4763.
- [38] Yang H, Wu Q, Li G. A multi-stage forecasting system for daily ocean tidal energy based on secondary decomposition, optimized gate recurrent unit and error correction[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 449: 141303.
- [39] DOMEL A G, SAADAT M, WEAVER J C, et al. Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance [J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2018, 15(139): 20170828.
- [40] LE ROY C, DEBAT V, LLAURENS V. Adaptive evolution of butterfly wing shape: from morphology to behaviour [J]. *Biological Reviews*, 2019, 94(4): 1261-81.
- [41] HAMID H, ABD EL MAKSOUD R M. An optimization study of passive flow control mechanism for a seashell-shaped wind turbine [J]. *Energy*, 2024, 289: 129912.
- [42] RANDALL S, TREJO A, HUMPHREYS E, et al. Discovery of a complex spiral-shell structure around the oxygen-rich AGB star GX Monocerotis [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 636: A123.
- [43] FITRIYANAD F, ISMAIL R, SANTOSA Y I, et al. Hydroxyapatite synthesis from clam shell using hydrothermal method: A review; proceedings of the 2019

- International Biomedical Instrumentation and Technology Conference (IBITeC), F, 2019 [C]. IEEE.
- [44] FEO L D, FOUOTSA T B, KUTAS P, et al. SCALLOP: scaling the CSI-FiSh; proceedings of the IACR international conference on public-key cryptography, F, 2023 [C]. Springer.
- [45] JALŠOVEC P. The nautilus shell as a liminal object between naturalia and artificialia in seventeenth-century Amsterdam [D], 2023.
- [46] ALEXAKIS A, BIFERALE L. Cascades and transitions in turbulent flows [J]. Physics Reports, 2018, 767: 1-101.
- [47] Temam R. Navier–Stokes equations: theory and numerical analysis[M]. American Mathematical Society, 2024.
- [48] Wu Y, Rawlinson J, Littlejohn R G, et al. Linear and angular momentum conservation in surface hopping methods[J]. The Journal of Chemical Physics, 2024, 160(2).
- [49] Ahmed F, Zaman I, Rezgui D, et al. Aeroacoustics of a ducted fan ingesting an adverse pressure gradient boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2024, 985: R1.
- [50] Li Y, Yang Y, Dong M. CO₂ capillary trapping in layered sandstone dominated by inertial force and gravity[J]. Capillarity, 2024, 10(1): 22-28.
- [51] Liu S, Wang H, Yang J, et al. Force field benchmark of asphalt materials: Density, viscosity, glass transition temperature, diffusion coefficient, cohesive energy density and molecular structures[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 398: 124166.
- [52] ULLAH A, ZAMAN M B, BHATTI M A, et al. CFD study of drag and lift coefficients of non-spherical particles [J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2021.
- [53] ASPAROUHOV T, HAMAKER E L, MUTHÉN B. Dynamic structural equation models [J]. Structural equation modeling: a multidisciplinary journal, 2018, 25(3): 359-88.

- [54] GE M, WU Y, LIU Y, et al. A two-dimensional model based on the expansion of physical wake boundary for wind-turbine wakes [J]. *Applied energy*, 2019, 233: 975-84.
- [55] ILIEV I K, GIZZATULLIN A R, FILIMONOVA A A, et al. Numerical Simulation of Processes in an Electrochemical Cell Using COMSOL Multiphysics [J]. *Energies*, 2023, 16(21): 7265.
- [56] SHARMA P. Simulation Model for the Corrosion Behavior of Additively Manufactured Iron in Electrolytic Environment Using COMSOL Multi-physics [J]. 2023.
- [57] JAHAN I. Implementation and experimental evaluation of a parameterized PMSynRM model using Matlab and COMSOL Multiphysics [Z]. 2019
- [58] PANTON R L. Incompressible flow [M]. John Wiley & Sons, 2024.
- [59] TAN Y, HUANG C, SUN B, et al. Dynamics of a class of delayed reaction–diffusion systems with Neumann boundary condition [J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2018, 458(2): 1115-30.
- [60] MIAO R-X. Holographic BCFT with Dirichlet boundary condition [J]. *Journal of High Energy Physics*, 2019, 2019(2): 1-27.
- [61] 孙航. 基于超表面的流致振动能量采集器研究 [D]. 安徽工程大学, 2023. DOI:10.27763/d.cnki.gahgc.2023.000289.

攻读学位期间发表的学术成果情况

一、论文发表情况:

[1] YUAN Y, WANG H, YANG C, et al. Exploring the potential of flow-induced vibration energy harvesting using a corrugated hyperstructure bluff body [J]. Micromachines, 2023, 14(6): 1125.

[2] YANG C, YUAN Y, WANG H, et al. Research on vibration energy harvester based on two-dimensional acoustic black hole [J]. Micromachines, 2023, 14(3): 538.

[3] A flow-induced vibration energy harvester based on bioinspired shell surface bluff body.(审稿阶段)

发表国际会议论文:

Flow induced vibration energy harvester based on honeycomb bluff body. 发表在 The 5th International Conference on Vibration and Energy Harvesting Applications (VEH 2024) 26-29 June 2024, Auckland, New Zealand

二、专利发表情况:

[1] 王海,袁义凯,杨春来,张子豪,孙航. 海浪型仿生表面能量采集器[P]. 安徽省: CN116582026A,2023-08-11. (发明专利实审)

致谢

时光飞逝，转眼间在安徽工程大学攻读硕士研究生的三年时光已经悄然过去。在这段充实而又富有挑战的岁月里，我收获了知识与成长，也经历了诸多宝贵的经历与难忘的瞬间。即将毕业之际，我怀着感恩的心情，向所有曾给予我帮助和支持的人表达最真诚的谢意。

首先，我要衷心感谢安徽工程大学和机械工程学院为我提供的良好学习和生活条件。在这里，我不仅获得了学术上的启迪，也结识了许多优秀的老师和同学，得到了不断进步的动力和支持。

特别感谢我的导师王海教授。从课题的选择到论文的定稿，王老师一直给予我悉心的指导与鼓励。王老师不仅拥有深厚的学术功底和科研经验，更以严谨治学、创新思维和育人之道为我树立了榜样。在王老师的指导下，我不仅学到了宝贵的专业知识，更领悟了科研的精神和做人的道理。感谢王老师在学术研究中无私的帮助和悉心的教诲，您对我的影响将伴随我一生。

在此，我还要感谢杨春来老师在实验方面给予的帮助和支持，以及所有曾在我研究过程中提供指导和帮助的老师。你们的辛勤付出让我能够顺利完成各项任务，走到今天。

感谢我的室友、同学、朋友和师兄弟们，正是你们的陪伴与鼓励，使我度过了硕士研究生生涯中的每一个难关。你们的友谊与支持，始终是我前行的动力。

最后，感谢我的家人，你们一直以来无条件的支持和理解，给予我无限的力量。没有你们的鼓励与陪伴，我无法顺利走到今天。

衷心感谢答辩委员会的各位老师和专家，感谢你们对我论文的认真审阅和宝贵意见，也祝愿你们工作顺利，身体健康！

再次感谢所有给予我帮助的人，感恩有你们！

尚德敏学 唯实惟新

