

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 32020141152849

UDC _____

厦门大学

硕士学位论文

三棱柱绕流流场特性实验研究

Experimental Study on Flow Characteristics Around
a Triangular Prism

江建华

指导教师姓名: 鲍锋教授

专业名称: 航空宇航推进理论与工程

论文提交日期: 2017年 4月

论文答辩时间: 2017年 5月

学位授予日期: 2017年 6月

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

2017年 4月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

本文为实验研究不同截面尺度比 H 的三棱柱绕流流场特性。主要关注雷诺数 Re 和柱体截面尺度比 H 对三棱柱绕流流场中阻力系数 C_d 、斯特劳哈尔数 St 和涡街流向输运速率 U_{local} 等重要尾流参数的影响。实验在厦门大学 FMPL 实验室中的循环拖曳水槽中进行。实验中应用氢气泡显示技术,该技术即能定性分析流场特性又能揭示流场中分离点位置。结果表明,在实验雷诺数范围内,分离点均位于最大横向宽度对应的顶点(这里称“横顶点”),即分离点位置固定。应用粒子成像测速技术(PIV)对三棱柱绕流流场进行定量测量,结合本征正交分解法得到尾流场相干结构。研究发现前二阶模态流场结构代表流场中卡门涡街结构,第三阶模态流场结构可表征尾流场中自由剪切层形态且该形态对雷诺数 Re 相对敏感。雷诺数 $Re=400$ 工况,三棱柱绕流流场中自由剪切层形态出现不稳定现象,抑制了自由来流与尾流区内流体间动量交换,使得尾流区内流体恢复系数减弱,尾流场中阻力系数 C_d 突增。对雷诺数 $Re=500$ 工况下分析柱体截面尺度比 H 对尾流场的影响,研究发现尾流场中湍动能生成速率与柱体截面尺度比 H 成正相关,然而涡街稳定运输区域和涡街流向输运速率均与柱体截面尺度比 H 成负相关,导致湍动能生成速率沿展向分布加剧,尾流场阻力系数 C_d 增大。

关键词: 三棱柱柱体; 本征正交分解; 自由剪切层

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

The present thesis work is an experimental investigation on the near wake flow characteristics of a triangular prism with different aspect ratios of cross section. The research was focused on the influence of Reynolds number and aspect ratio H on the coefficient of drag, Strouhal number, vortex transport rate and other important wake parameters of the triangular prism's wake flow. Data measurement was carried out in the water towing tank with circulating function in the FMPL laboratory of Xiamen University. Hydrogen bubble technique was employed for the qualitative measurement, which reveals the vortex shedding scenarios as well as the location of separation point. The result indicates that in the range of experimental Reynolds number, separation point is located at the vertex of the maximum lateral width (here called "horizontal vertex"), that is, the separation point is relatively fixed. The quantitative flow information of near wake flow field was acquired by the Particle Image Velocimetry (PIV). Analysis of coherent structures of the flow field using Proper Orthogonal Decomposition method indicates that the last two order modes of flow structure are on behalf of the Karmen vortex structure, the third order mode structure could represent the free shear layer morphology which is sensitive to the Reynolds number. The free shear layer exhibits unsteady phenomenon with the condition of Reynolds number around 400, which retards the exchange of fluid between the free flow and the wake region, leading to a weakened fluid recovery coefficient and a sudden increase in the drag coefficient. The influence of the aspect ratio H on the wake field which obtained under the Reynolds number of 500 shows that the turbulent kinetic energy generation rate is proportional to the aspect ratio H , however, the steady-state transport zone and the vortex streamwise transport rate are in direct proportion to the aspect ratio H , as a result, the turbulent kinetic energy generation rate increases along the spreading distribution, causing the drag coefficient C_d to increase.

Keywords: triangular prism; Proper Orthogonal Decomposition; free shear layer

厦门大学博硕士学位论文摘要库

主要符号说明

| 序号 | 数学符号 | 单位 | 描述 |
|----|---------------|-----------------|-------------|
| 1 | D | mm | 三棱柱柱体截面底边长度 |
| 2 | C_d | — | 阻力系数 |
| 3 | St | — | 斯特劳哈尔数 |
| 4 | f_s | Hz | 涡脱频率 |
| 5 | L | mm | 三棱柱柱体展向长度 |
| 6 | U_∞ | m/s | 自由来流速度 |
| 7 | H | ° | 柱体截面尺度比 |
| 8 | L | mm | 水面高度 |
| 9 | Re | — | 雷诺数 |
| 10 | l_f | mm | 尾涡长度 |
| 11 | D_f | um | 尾迹宽度 |
| 12 | σ_u | m/s | 流向速度均方根 |
| 13 | σ_v | m/s | 法向速度均方根 |
| 14 | ε | m/s | 湍流度 |
| 15 | U | m/s | 流向速度 |
| 16 | V | m/s | 法向速度 |
| 17 | u_{rms} | m/s | 流向脉动均方根 |
| 18 | v_{rms} | m/s | 法向脉动均方根 |
| 19 | TKE | — | 湍动能 |
| 20 | E_{tk} | — | 湍动能生成率 |
| 21 | R | — | 相关系数 |
| 22 | l | mm | 旋涡积分尺度 |
| 23 | ω | s ⁻¹ | 涡量 |
| 24 | l_f^* | — | 尾涡形成长度 |
| 25 | D_f^* | — | 尾流宽度 |
| 26 | α | ° | 倾斜角 |
| 27 | U_{local} | m/s | 涡街平均输运速率 |

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

| | |
|----------------------------|-----------|
| 摘 要 | I |
| Abstract | II |
| 主要符号说明 | IV |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 研究背景及意义 | 1 |
| 1.2 国内外研究状况 | 2 |
| 1.2.1 圆柱绕流..... | 2 |
| 1.2.2 矩形柱绕流研究..... | 3 |
| 1.2.3 三棱柱研究..... | 4 |
| 1.2.3 Cd、St 等表征参数的研究..... | 5 |
| 1.2.4 国内外研究特点及问题..... | 5 |
| 1.3 本文主要研究内容 | 6 |
| 第二章 实验设备和测试方法 | 8 |
| 2.1 实验设备 | 8 |
| 2.1.1 多功能精密循环水槽..... | 8 |
| 2.1.2 PIV 试验测速系统..... | 11 |
| 2.2 测试内容 | 14 |
| 2.3 测试方法 | 15 |
| 2.3.1 水洞流速校准..... | 15 |
| 2.3.2 PIV 测量方法..... | 17 |
| 2.4 尾流场特性分析方法 | 18 |
| 2.4.1 PIV 自适应互相关分析..... | 18 |
| 2.4.2 尾流场基本特性分析..... | 19 |
| 2.4.3 空间时间关联..... | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.4 本征正交分解方法..... | 22 |
| 2.4.5 二维涡旋识别准则..... | 23 |
| 2.5 本章小结..... | 27 |
| 第三章 三棱柱绕流流场特性..... | 28 |
| 3.1 三棱柱流动分离及尾迹特征..... | 28 |
| 3.1.1 参数定义..... | 28 |
| 3.1.2 流动分离点..... | 29 |
| 3.2 三棱柱绕流尾流场特性..... | 30 |
| 3.3 本章小结..... | 32 |
| 第四章 三棱柱绕流流场特性 PIV 实验分析..... | 34 |
| 4.1 雷诺数 Re 对三棱柱尾流场的影响..... | 34 |
| 4.1.1 三棱柱绕流流场定常分析..... | 34 |
| 4.1.2 流场相干结构分析（雷诺数 $Re=300$ ）..... | 37 |
| 4.1.3 流场相干结构分析（雷诺数 $Re=400、500$ ）..... | 45 |
| 4.2 尺度比 H 对三棱柱尾流场的影响..... | 50 |
| 4.2.1 不同截面尺度比 H 的三棱柱绕流流场定常分析..... | 50 |
| 4.2.2 不同截面尺度比 H 的三棱柱绕流流场相干结构..... | 58 |
| 4.3 本章小结..... | 62 |
| 第五章 总结与展望..... | 64 |
| 5.1 总结..... | 64 |
| 5.2 展望..... | 65 |
| 参考文献..... | 66 |
| 攻读硕士学位期间取得的学术成果..... | 68 |
| 致谢..... | 69 |

Table of Contents

| | |
|--|----|
| Chapter1 Introduction | 1 |
| 1.1 Research background..... | 1 |
| 1.2 Research status..... | 2 |
| 1.2.1 Circular cylinder..... | 2 |
| 1.2.2 Rectangular cylinder..... | 3 |
| 1.2.3 Triangular prism..... | 4 |
| 1.2.3 Research of Cd&St..... | 5 |
| 1.2.4 Research characteristics and problems..... | 5 |
| 1.3 Work of this paper..... | 6 |
| Chapter2 Laboratory equipment and measurement methods | 8 |
| 2.1 Laboratory equipment..... | 8 |
| 2.1.1 Multi-functional water towing tank..... | 8 |
| 2.1.2 Particle Image Velocimetry system..... | 11 |
| 2.2 Measurement content..... | 14 |
| 2.3 Measurement methods..... | 15 |
| 2.3.1 Velocity calibration..... | 15 |
| 2.3.2 Measurement method of Particle Image Velocimetry..... | 17 |
| 2.4 Analysis method of wake field characteristics..... | 18 |
| 2.4.1 Adaptive cross correlation analysis..... | 18 |
| 2.4.2 Analysis on basic characteristics of wake flow field..... | 19 |
| 2.4.3 Spatial time correlation..... | 21 |
| 2.4.4 Proper Orthogonal Decomposition..... | 22 |
| 2.4.5 Two-dimensional vortex recognition criteria..... | 23 |
| 2.5 A brief sum-up..... | 27 |
| Chapter3 Flow field characteristics of triangular prism | 28 |
| 3.1 Triangular prism flow separation and wake characteristics..... | 28 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.1 Parameters definition..... | 28 |
| 3.1.2 Separation point..... | 29 |
| 3.2 Characteristics of wake flow around triangular prism..... | 30 |
| 3.3 A brief sum-up..... | 32 |
| Chapter 4 Experimental analysis on flow field characteristics..... | 33 |
| 4.1 Effect of triangular prism wake field Reynolds number..... | 31 |
| 4.1.1 Steady analysis of flow field..... | 33 |
| 4.1.2 Analysis of coherent structures of the flow under Reynolds number equals to 300..... | 36 |
| 4.1.3 Analysis of coherent structures of the flow under Reynolds number equals to 400 and 500..... | 44 |
| 4.2 The influence of aspect ratio H on wake field..... | 50 |
| 4.2.1 Stability analysis of the flow..... | 50 |
| 4.2.2 Analysis of coherent structures of the flow..... | 57 |
| 4.3 A brief sum-up..... | 62 |
| Chapter 5 Conclusion and Outlook..... | 63 |
| 5.1 Conclusion..... | 63 |
| 5.2 Outlook..... | 64 |
| Reference..... | 65 |
| Academic Achievements during a Master's Period..... | 68 |
| Thanks..... | 69 |

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库