

分类号: _____
密 级: _____

单位代码: 10364
学 号: 12720613

安徽农业大学

学位论文

洒水机结构设计及流体分析

Structure Design of Sprinkler and Fluid Analysis

研 究 生: 沈 一 名

指 导 教 师: 蒋 德 云 教 授

申 请 学 位 类 别: 农业推广硕士

专 业 领 域 名 称: 农业机械化

研 究 方 向: 农业机械设计

所 在 学 院: 工 学 院

答辩委员会主席: _____

2014 年 05 月



独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得安徽农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 沈一名

时间： 2014 年 5 月 31 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解安徽农业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意安徽农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名： 沈一名

时间： 2014 年 5 月 31 日

第一导师签名： 蒋德云

时间： 2014 年 5 月 31 日

摘要

随着城镇化的发展,为了防治沙尘暴、美化城镇,很大一部分的裸露地面都要求种植草坪。人工草坪的洒水是草坪护理的必要环节。本文研制了一种结构简单、可随水管随意移动的洒水机,该洒水机动力是水压,采用水压变化实现洒水部位自动左右摇摆,洒水的范围可达 10 米。洒水机基于 CATIA 建立了三维实体模型,通过对水流的压力的分析获得旋转叶轮的流线结构,从而实现了利用水的冲击压力使得叶轮自动旋转将水流压向不同的部位,促使出水部位匀速转动洒水。因此,本文展开以下几方面的内容的研究:

1. 完成了洒水机结构设计,确立了零部件的结构参数和尺寸。分析洒水机各个部件间的传动关系、性能要求、工作原理以及装配关系,初步确定了洒水机结构和尺寸。

2. 完成流体力学计算,为结构设计提供理论基础。计算水流经过各部位的流速以及压强,换向件的转速、主轴洒水部位的转速以及洒水机洒水的覆盖面积等,检验是否满足设计要求。

3. 在 ANSYS CFX 中仿真模拟洒水机水流流动情况,检验设计是否达到预期的设计要求。

关键词: 洒水机, 结构设计, 流体分析, 流体计算

Abstract

With the development of urbanization, in order to control dust and beautify the town, a large part of the bare ground are required lawns. Watering for artificial lawn is a necessary part of lawn care. In this article, we developed a simple structure, which can move freely with the sprinkler pipes, the power of sprinkler is the water pressure, Watering part is automatically swing around by the water pressure changes, watering range up to 10m. We built a three - dimensional solid model on CATIA, and analysis the water pressure to obtain rotation of the impeller the flow line structure, enabling the use of water impact pressure will let the impeller automatically rotate such that the water pressure to the different parts, to promote the outlet uniform rotation. Therefore, this research expanded following aspects:

1. Complete sprinkler design, established the structural parameters and dimensions of parts. The relationship between the various components of the sprinkler analysis, performance requirements, operating principles and assembly relationships, determine the structure and size of the sprinkler.

2. Completion of computational fluid dynamics, provide a theoretical basis for the structural design. After calculating the flow velocity and pressure of the various parts, for the speed of the member, the coverage and the rotational speed of the spindle portion NW NW NW access other machines, testing meet the design requirements.

3. The simulation in ANSYS CFX sprinkler water flow, testing whether the design to achieve the desired design requirements.

Key words: Sprinkler; Structural design; Fluid analysis; Computational of fluid

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	III
插图清单.....	V
附表清单.....	VII
1 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 国内外洒水机构发展现状.....	1
1.2.1 国内洒水机构发展现状.....	1
1.2.2 国外洒水机构发展现状.....	2
1.3 课题研究内容.....	2
1.4 本章小结.....	3
2 洒水机结构设计.....	4
2.1 CATIA 三维绘图软件简介.....	4
2.2 洒水机设计方案.....	4
2.2.1 设计要求.....	4
2.2.2 设计思路.....	4
2.2.3 设计方案.....	5
2.3 洒水机原理简介.....	6
2.3.1 设计原理.....	6
2.3.2 工作原理.....	6
2.4 结构设计.....	7
2.4.1 出水口结构设计.....	7
2.4.2 主轴部位结构设计.....	8
2.4.3 换向件结构设计.....	10
2.4.4 左右挡盘结构设计.....	10
2.4.5 底座结构设计.....	13
2.5 洒水机虚拟装配.....	14
2.5.1 虚拟装配简介.....	14
2.5.2 洒水机装配过程.....	14
2.5.3 虚拟装配的约束.....	15
2.5.4 干涉分析与检查.....	17
2.6 本章小结.....	18
3 洒水机内部管道流体力学计算.....	19
3.1 计算流体力学发展概况.....	19
3.2 湍流理论概述.....	20
3.3 流体的控制方程.....	23
3.4 管道内流体计算.....	24
3.5 本章小结.....	28
4 洒水机内部管道的流体力学分析.....	29
4.1 CFX 软件的简介.....	29
4.2 网格的划分与具体生成步骤.....	30

4.2.1 网格的划分.....	30
4.2.2 网格生成具体步骤.....	30
4.3 CFX 的设置.....	32
4.3.1 CFX 边界条件设置.....	32
4.3.2 CFX 求解设置.....	33
4.4 模型基于 CFX 求解.....	34
4.5 模型仿真结果分析.....	34
4.5.1 主管道正方有无出水口分析.....	34
4.5.2 仿真结果分析.....	36
4.5.3 出口速度与主管道直径的关系.....	36
4.5.4 仿真结果分析.....	37
4.5.5 洒水机覆盖范围计算.....	37
4.6 本章小结.....	38
5 全文总结与展望.....	39
5.1 总结.....	39
5.2 展望.....	39
参考文献.....	40
致 谢.....	42
作者简介.....	43
攻读硕士期间研究成果.....	44

插图清单

图 2-1	设计流程图.....	5
图 2-2	洒水机分类图.....	6
图 2-3	洒水机工作原理图.....	6
图 2-4	洒水机示意图.....	7
图 2-5	出水口 1.....	7
图 2-6	出水口 2.....	8
图 2-7	左半轴工程图.....	9
图 2-8	右半轴工程图.....	9
图 2-9	换向件工程图.....	10
图 2-10	左挡盘结构图.....	11
图 2-11	左挡盘结构尺寸图.....	11
图 2-12	右挡盘结构尺寸图.....	12
图 2-13	圆锥销工程图.....	13
图 2-14	底座工程图.....	13
图 2-15	虚拟装配过程图.....	15
图 2-16	洒水机装配图.....	17
图 3-1	流体力学关系图.....	19
图 3-2	CFD 工作流程图.....	20
图 3-3	洒水机断面图.....	24
图 3-4	换向件投影图.....	26
图 3-5	左半轴截面图.....	28
图 4-1	网格基本形貌图.....	29
图 4-2	导入外部几何体.....	31
图 4-3	几何体模型.....	31
图 4-4	网格划分.....	31
图 4-5	流体域模型.....	32
图 4-6	生成网格.....	32
图 4-7	生成边界条件.....	33
图 4-8	入口边界条件.....	33
图 4-9	出口边界条件.....	33
图 4-10	迭代残差收敛图.....	34
图 4-11	有出水口速度矢量图.....	35

图 4-12 有出水口流线图.....	35
图 4-13 无出水口速度矢量图.....	35
图 4-14 无出水口流线图.....	36
图 4-15 管径为 20mm 的速度矢量图和流线图.....	36
图 4-16 管径为 25mm 的速度矢量图和流线图.....	37
图 4-17 管径为 30mm 的速度矢量图和流线图.....	37
图 4-18 速度矢量放大图.....	38

附表清单

表 2-1 相合约束.....	16
表 2-2 接触约束.....	16
表 2-3 偏移约束.....	16
表 2-4 角度约束.....	17
表 4-1 仿真数值分析表.....	37

1 绪论

1.1 课题研究背景

随着城镇化的发展,为了防治沙尘暴,美化城镇很大一部分的裸露地面都要求种植草坪。但随着大面积的草坪种植,草坪灌溉也随之而产生了问题。目前很多地方的草坪洒水都是通过人工实现,人工洒水就存在很多的问题。例如洒水不均匀、很多地方没有喷洒扫到等问题,需要的劳动力多,而且浪费水资源。一切生命繁衍、发展的过程中水都是不可代替的最基本要素,水资源是国民经济和和社会发展的基础资源,是实现可持续发展的非常重要基础元素。但我国又是一个水资源不够充足的国家,淡水资源只占世界总量的8%。^[1, 2]所以在我国如何更好的利用水资源,节约用水等显得尤为重要。

1.2 国内外洒水机构发展现状

1.2.1 国内洒水机构发展现状

目前,国内在洒水机上做了大量研究工作,为洒水机设计提供了理论依据。刘彬^[3-6]等人设计了一种扇形区域洒水机射流元件。洒水机喷头内的扇形区域根据需要预定的旋转角度,可达到边角、死角洒水的目的,在道路上能不影响行人而洒水。射流元件为扇形喷嘴洒水的核心部件,其作用是产生射流驱动旋转装置来控制旋转以及旋转角度,所以要求射流能产生足够的动力从而驱动旋转装置旋转。当旋转装置旋转到一个预定的角度,不完全阻塞喷出口通道可以切换到喷射构件的另一端装置被旋转的旋转相反的方向,如此反复,达到旋转的目的。方针稳^[10-13]设计的机械式定时自动洒水机。这种洒水机提供了一种结构简单,故障少、成本低的机械定时自动洒水机。这种洒水机主要有五大部分组成:进水管,贮水部位,杠杆式阀门控制系统和出水部位。该种洒水机非常适合种植豆芽,它也很容易在没有其他动力源(如电力)的场合使用,它改变了人工昼夜定时浇水的传统豆芽培育方法,从很大程度上减轻了工人的劳动强度。杨继跃^[14]等人设计了一种洒水器的传动机构以及应用该传动机构的洒水器。该洒水器传动机构包括:固定装配在轴上的全齿轮,全齿轮由上齿轮和下齿轮组合而成;由固定装设在同一轴上的上半齿轮和下半齿轮组成的半边齿轮、齿条,上半齿轮和下半齿轮都只设置有半边圆弧齿牙且相互呈90°错开的,上齿轮和上半齿轮啮合,下齿轮和与齿条啮合,下半齿轮与齿条啮合。该洒水器包括进水部位、驱动部位、齿轮传动机构以及洒水机构,进水部位一端与补给管道相连接,另一端与驱动机构相对,驱动机构与上述传动机构之间轴连接,传动机构与洒水机构连接,所述的驱动机构装设在由进水罩和减速罩组成的空间内,所述齿轮传动机构装设在由减速罩

和齿轮罩组成的空间内；如果采用本实用新型结构，则洒水器喷管转动角速度恒定，运动也相对平稳，无冲击，对地喷洒均匀，不易损坏，安装方便。

在流体分析优化方面国内也做了大量的研究。如汪国胜，王国丽^[7-9]等人在复杂流体通道的流体分析研究，在流体通道中，通常都具有厚壁孔、细长孔、薄壁孔、间隙等典型通道，以及其他的形状不规则的通道。在这些地方，除了那些不规则形状的通道，其它通道大部分都有一个现有的公式来计算的流速和压降，而那些不规则形状的通道中，也有一些的局部阻力系数可以通过查表来取得；但有些复杂的结构，没有规则的通道是不能由查表或现有的公式计算，解决这种问题的方法通常是忽略该部分的办法。但是，如果这些地方的局部阻力系数已经达到了一定程度的不可忽视，我们必须考虑到这些。那么该如何去计算这部分的局部阻力系数？像在这个问题上书本有没有现成的答案，我们提出了一种方法，即通过实验来分析复杂的局部阻力系数。

1.2.2 国外洒水机构发展现状

Mawhinney, JR等人^[15-18]研究了一种固定洒水系统的洒水机。这种洒水机的工作核心为微型直流水泵和电瓶，其他零部件包括开关、喷头、桶盖、导水管、车箱、储水箱、充电器、桶盖、过滤网、充电插孔、开关等。该种新型洒水机构采用的工作原理很简单，即利用水泵将储水箱里的水抽取出来再向车箱前端的两个喷头处输送，并使用水泵的液压进行喷洒，他的供电系统是全新的电动自行车电瓶，与其它部件相结合一起进行洒水工作。这种新型洒水机具有使用方便，操作简单的特点，并且具有很好的洒水效果。这种洒水机在学校餐厅、楼道等地面使用非常方便。

1.3 课题研究内容

利用水流在换向件凹槽内流动对壁面有切向力，使得换向件不停的转动，与换向件相接处的主轴由经过换向件的水流冲击开始转动。主轴与换向件接触面有两个管道，当不同的管道与换向件接触时主轴会向不同的方向转动。本课题通过调查研究目前我国洒水机现状，设计和研制洒水机一台，主要内容如下。

(1) 洒水机结构设计

分析洒水机各个部件间的关系、性能要求、工作原理以及装配关系，确定洒水机结构和尺寸。

(2) 洒水机管道内流体力学计算

流体力学计算为结构设计提供理论基础。计算水流经过各部位的流速以及压强，换向件的转速、主轴洒水部位的转速以及洒水机洒水的覆盖面积等，检验是否满足设计要求。

(3) 洒水机的性能仿真和流体元分析

对洒水机的换向件利用 CATIA 软件建模，并将建好的三维模型导入 ANSYS-Workbench 中，划分网格并根据实际工作情况设计相应的边界条件，对主轴内部流道进行流场分析。

1.4 本章小结

本章对水资源、草坪洒水现状、国内外洒水装置现状做了详细的综述，确定了本文的主要研究内容。从调研的结果得知目前的洒水装置基本上都配备有动力。而本文设计的洒水机则不再需要添加额外的动力（如电力），直接利用水流产生的冲击力达到调节洒水方向的目的。

2 洒水机结构设计

2.1 CATIA 三维绘图软件简介

CATIA 三维绘图软件的开发公司是法国达索 (Dassault System)，它是一款高档 CAD/CAE/CAM 一体化软件。CATIA 的第一个用户是 Dassault Aviation，在上世纪 70 年代开始运用。其的内容囊括了产品的动态模拟与仿真、概念设计、工程图生成、分析计算、三维建模、工业设计、生产加工成产品的全过程，其中还涵盖了大量的电缆和管道布线、多种模具设计和分析、人机交换等实用模块^[19]。CATIA1 版本、2 版本、3 版本的是从 1982 年到 1988 年发布的，功能强大的版本 4 是在 1993 年发布的，V4 版本、V5 版本两个系列是现在经常用的 CATIA 版本。在 UNIX 平台主要应用 V4 版本，而 V5 版本则可以应用于应用于 UNIX 和 Windows 两种平台。为了使软件更容易学习和运用，达索系统公司于 1994 年开始重新开发了一种全新的 CATIA V5 版本，从而开创了 CAD/CAE/CAM 软件的一种全新的风格^[20]。该软件在机械制造，电子电器，汽车制造，航天航空，工业造船等行业运用非常广泛。CATIA 的集成解决方案覆盖了所有的产品设计和制造领域，混合建模技术和 DMU 电子样机的模块是其他绘图软件所不具备的，这种特性很大程度上的促进了企业生产力和竞争力的提升。CATIA 可以提供解决方案非常方便，从而迎合工业领域所有的各企业的需要。

CATIA 产品开发过程由以下几方面构成：成品制造以及产品的使用与维护；工程分析；中期详细设计；初期概念设计。CATIA V5 版本支持不同应用层次扩充性以及 NT 和 UNIX 硬件相对的对立性，在产品开发环节中任何一个相关的专业成员都可以得到最为合理的解决方案。允许任意配置的解决方案可满足不同层次的公司需要。并且重新构造了新一代的体系，专用知识捕捉和重复使用以及给客户稳定升级等诸多特点。CATIA V5 新的体系结构打破了传统设计技术，快速适应了企业业务需求，让客户具备了更加强大的竞争优势。CATIA 软件是汽车行业的事实标准，是世界各国顶尖汽车制造业所使用的核心系统，并且被各国的汽车零部件供应商所认可^[21]。

2.2 洒水机设计方案

2.2.1 设计要求

由于课题所设计洒水机主要是草坪洒水所使用，所以要考虑到以下几点：(1) 在大面积草坪洒水时要经常移动，所以要考虑洒水机的尺寸和重量；(2) 考虑其洒水覆盖面积；(3) 考虑其使用的频率，零件长期在潮湿环境下工作以及动力来源于水的压力，要选择合理的零件材料。

2.2.2 设计思路

洒水机的设计思路是以流体力学为理论基础，以系统工作原理为依据，首先对洒

水机进行结构设计，然后利用三维软件 CATIA 对其进行虚拟设计，并根据实验室要求研制出实验样机，最后利用样机对草坪进行洒水实验，来验证所设计的洒水机洒水效果。洒水机的整体设计思路如图 2-1 所示。

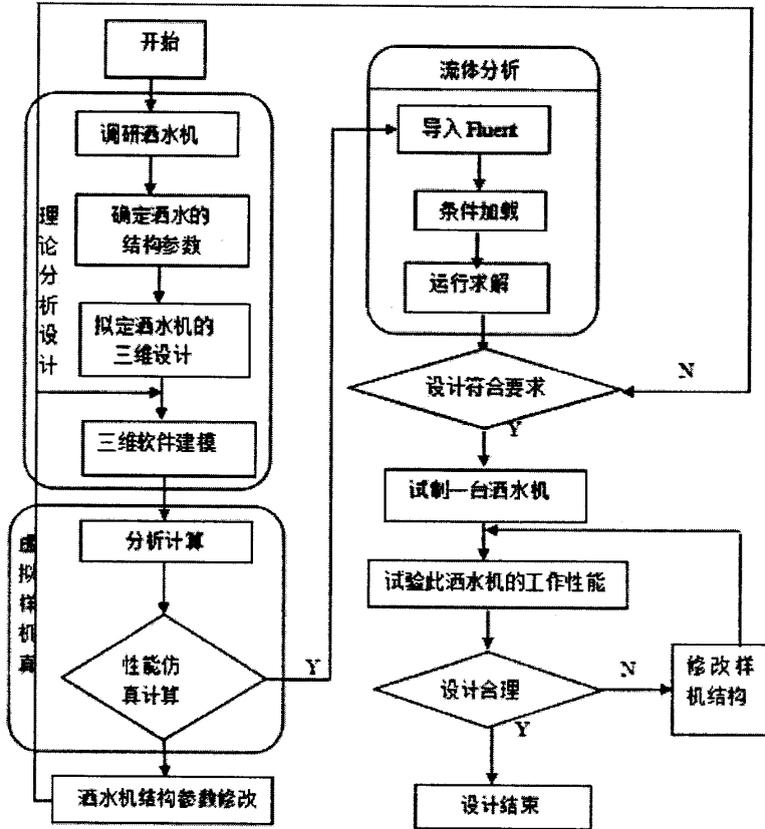


图 2-1 设计流程图

Figure 2-1 The Procedure of Design

2.2.3 设计方案

本文设计的洒水机在设计过程中根据主轴的主管道直径的大小可以分为三大类，分别为直径是 20mm、25mm、30mm，然后在每个直径下根据主管道上方是否有出水口再细分为两类，即主管道上方有出水口和无出水口，如图 2-2 所示。

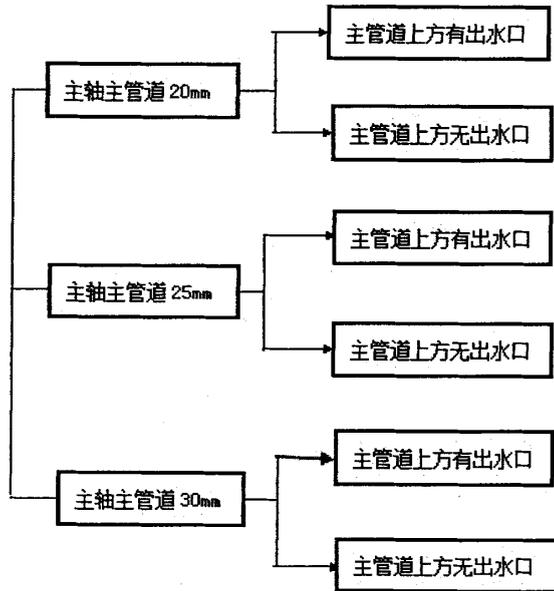


图 2-2 洒水机分类图

Figure 2-2 The Kind of Sprinkler

2.3 洒水机原理简介

2.3.1 设计原理

图2-3是草坪洒水机的工作原理图，实验人员首先将自来水接通，自来水经换向部位分为两部分流入洒水部位。其中一个管道是用来调节洒水方向的，另一管道直通洒水部位的贮水部位。

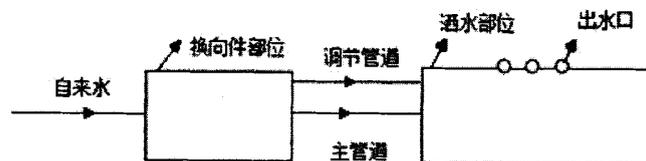
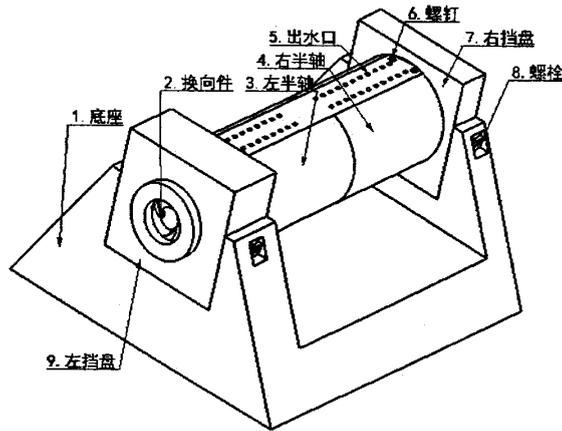


图 2-3 洒水机工作原理图

Figure 2-3 Working Principle Diagram of Sprinkler

2.3.2 工作原理

图2-4是洒水机的示意图。其主要组成换向机构和洒水机构。本文设计的洒水机主要动力是来源于水的冲击压力，换向件是核心部件。如图2-4所示，水流由左挡盘进水口流入并且冲击换向件，主要水流经过换向件的主通水管道进入主轴并到达其贮水部位。部分水流经过换向件的支路通水管道间断的与主轴的两个支管路接通，接通不同的支管时产生不同方向的力使得主轴在径向上往复运动。水流经换向件时会冲击换向件的叶片式凹槽部位，产生切向的力从而使得换向件不停的转动。



1.底座,Chassis2.换向件,Reversing Part3.左半轴,Left Spindle4.右挡盘 Right Spindle5.出水口,Outlet6.螺钉 Bolt7.右挡盘,Right Baffle Plate8.螺栓,Bolt9.左挡盘,Left Baffle Plate

图 2-4 洒水机示意图

Figure 2-4 Schematic Diagram of Sprinkler

2.4 结构设计

从洒水机的实用性考虑,洒水机必需要具有一定的浇注面积才具有实际的使用价值。本文设计的洒水机单侧浇注面积至少达到 $A = 4m \times 0.2m$ 。其中 A 表示浇注面积,4m 为洒水机至少达到的洒水距离,0.2m 为洒水的宽度。为了使洒水机达到预期的洒水目标进行下面各个零部件的结构尺寸设计。

2.4.1 出水口结构设计

本文设计的出水口有两种形式,即主轴主管道正上方没有出水口,如图 2-5 所示。另一种是主管道正上方有出水口,如图 2-6 所示。为了保证洒水机预期的洒水宽度,则左右两端的出水口距离应大于 0.2m,而本文初步确定左右两端出水口距离为 0.22m,整个出水部位的长度为 0.26m。出水口通过四根螺丝固定在洒水机主轴的贮水部位,螺丝选择介子尖脚螺丝。

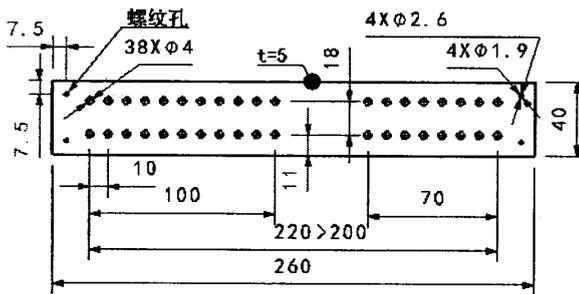


图 2-5 出水口 1

Figure 2-5 Outlet 1

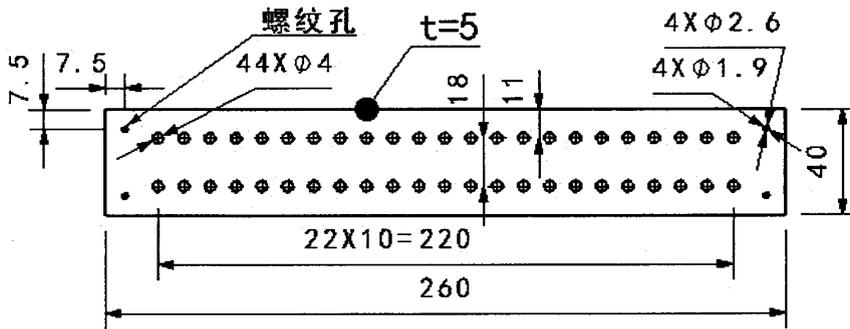


图 2-6 出水口 2

Figure 2-6 Outlet 2

2.4.2 主轴部位结构设计

从加工工艺方面考虑，本文设计的洒水机主轴分为左、右两个半轴使用螺纹连接使得两个半轴连接在一起，在两个半轴连接部位添加一个垫片防止漏水。两个半轴装配后的长度应该略大于出水口长度，因为长度增长主管道的长度也会相应的增加，导致水流的沿程阻损增大，故初步确定主管道的总长为0.3m。本文中总共设计三种不同主管道，该三种方案的主轴部位只有主管道的直径不同，其他的相关数值均相同。故此处只给出了主管道直径为20mm的结构图，如图2-7、2-8所示。调节管道的直径初步设定为10mm。本文设计的主轴既是贮水部位也是出水部位，它由五部分组成，即左半轴、右半轴、出水口、垫片和螺帽。水流从换向件流入，由主轴流向贮水部位，然后从出水口流出。另有一部分水流由换向件的调节管道流入，因为换向件一直匀速转动，所以换向件的调节管道会周期性的分别与主轴的两个调节管道连接从而使得主管道匀速转动洒水。

洒水机工作时只要控制水流的条件不变，换向件则一直沿着一个方向匀速转动，而主轴是做周期性摇摆式转动。故换向件和主轴存在同向转动和反向转动。由第三章流体计算可知换向件转动角速度为28.77rad/s，主轴转动的角速度为9rad/s。为了满足主轴周期性摆动，则满足：

$$\frac{\theta_1}{\omega - \omega_s} = \frac{360^\circ - \theta_2}{\omega + \omega_s}, \text{ 其中 } \theta_1 + \theta_2 = 309^\circ。$$

解得： $\theta_1 = 104^\circ$ ， $\theta_2 = 205^\circ$ 。

主轴转动的范围： $\theta = \frac{\theta_1 \omega_s}{\omega - \omega_s} = 48^\circ$ 。故主轴在左右两侧 48° 范围内摆动洒水。

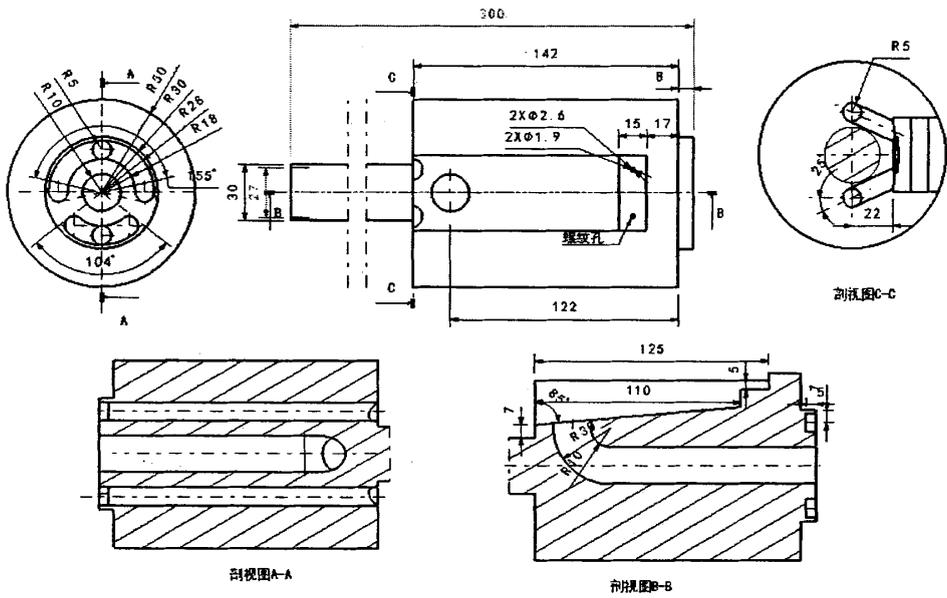


图 2-7 左半轴工程图

Figure 2-7 The Drawings of Left Spindle

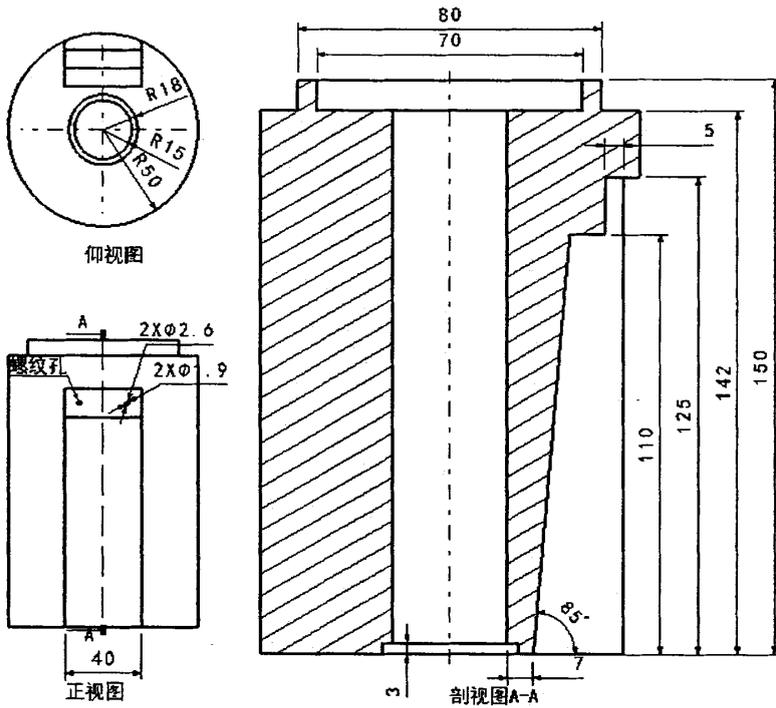


图 2-8 右半轴工程图

Figure 2-8 The Drawings of Left Spindle

2.4.3 换向件结构设计

换向件为本文设计的洒水机最关键的部件，顾名思义该部件是用来调节后面主轴部位径向做摇摆式运动洒水的。换向件的直径 $D_{换}=D_{轴左}=60\text{mm}$ ，如图2-9所示，水流从左挡盘流入换向件，以直径为40mm的水柱冲击换向件，水流冲击换向件后分为两个支流。一部分水流沿着弧形凹槽流动，水流在流动过程会对凹槽壁面产生冲击力 F ，冲击力 F 的切向分力使得整个零件不停的做圆周运动；另一部分水流由主管道流向工作轴部位。水流流过主管道时有一部分由调向管道流出。该部分设计的关键在于保证弧形凹槽部位进水出的角度为 45° ，凹槽出水部角度为 30° 。因为水流在凹槽部位流动较为复杂，为分析其流动规律做如下假设^[22,23]：

(1) 换向件中的凹槽为无限薄，即认为一些无厚度的骨线（或称型线）。受换向件凹槽型线的约束，流体微团的运动轨迹完全与凹槽型线相重合。

(2) 水流为理想流体，即忽略了水流的粘性。所以可暂时不考虑由粘性使速度场不均匀而带来的换向件内的流动损失。

(3) 流动为稳定流，即流动不随时间变化。

(4) 水流为不可压缩的，这种假设和实际情况的差别不大，因为液体在很大压强下体积变化很小。

(5) 水流在换向件凹槽内的流动是轴对称的流动。即在同一半径的圆周上，流体微团有相同大小的速度。也就是说，每一层流面（流面是流线绕换向件轴心线旋转一周所形成的面）上的流线形状完全相同，因而，每层流面只需研究一条流线即可。

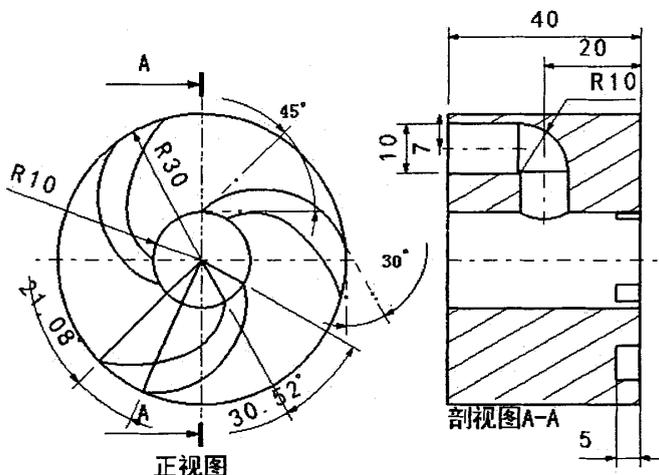


图 2-9 换向件工程图

Figure 2-9 The Drawings of Reversing Part

2.4.4 左右挡盘结构设计

左挡盘是安置在底座的左边，换向件在其内部实现转动并和主轴的左端口配合。如图2-10所示，水流从其左端口流入，然后流经换向件。其底部有一个锥形孔，通过圆锥销与底座连接限制它轴向移动。它侧面各有一个螺纹孔用螺钉将其与底固定从而限制左挡盘径向移动，如图所示。进水口部分设计的距离较短，减少水流的沿程阻损。

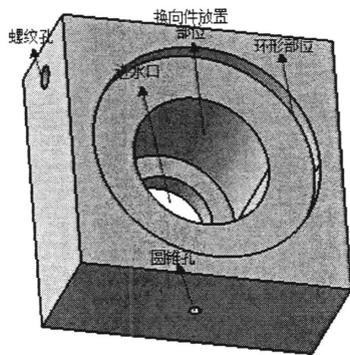


图 2-10 左挡盘结构图

Figure 2-10 Structure Diagram of Left Baffle Plate

中间安放换向件部分的长度等于换向件的长度与主轴伸进部分长度的总和，即 $L_1 = L_{\text{换}} + L_{\text{伸}} = 48\text{mm}$ ，右边的环形部分直径比主轴直径稍大一些，初步确定为100.5mm，与主轴实现间隙配合整个左挡盘的结构尺寸如图2-11所示。

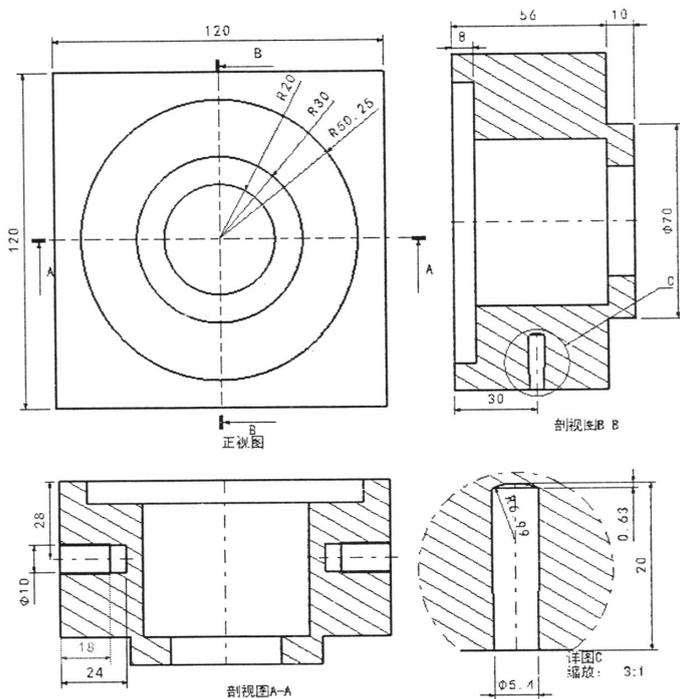


图 2-11 左挡盘结构尺寸图

Figure 2-11 The Structure Size of Left Baffle Plate

右挡盘安置在底座的右边，也是通过圆锥销限制其轴向移动，螺钉限制其径向移动。环形部位与左挡盘一致，实现间隙配合。其厚度需要满足 $L_2 > D_{\text{螺栓}} + L_{\text{伸}} = 18\text{mm}$ ，本文设计的右挡盘厚度初步确定为 30mm，详细尺寸如图 2-12 所示。左右挡盘用来定位的圆锥销选择长度为 40mm，锥度为 1: 50，尺寸如图 2-13 所示。左右挡盘侧面各有两个螺纹孔，是用螺钉来限制其径向移动的，螺钉选择铝合金螺钉，螺钉直径选择 10mm，其螺距为 1.5mm，螺纹孔旋入深度 $H = 1.5d = 15\text{mm}$ ，则螺纹孔深度 $H_1 = H + 2p = 18\text{mm}$ ，钻孔深度 $H_2 = H_1 + 0.5d = 23\text{mm}$ ，螺纹余留长度 $l_1 = 0.3d = 3\text{mm}$ 。

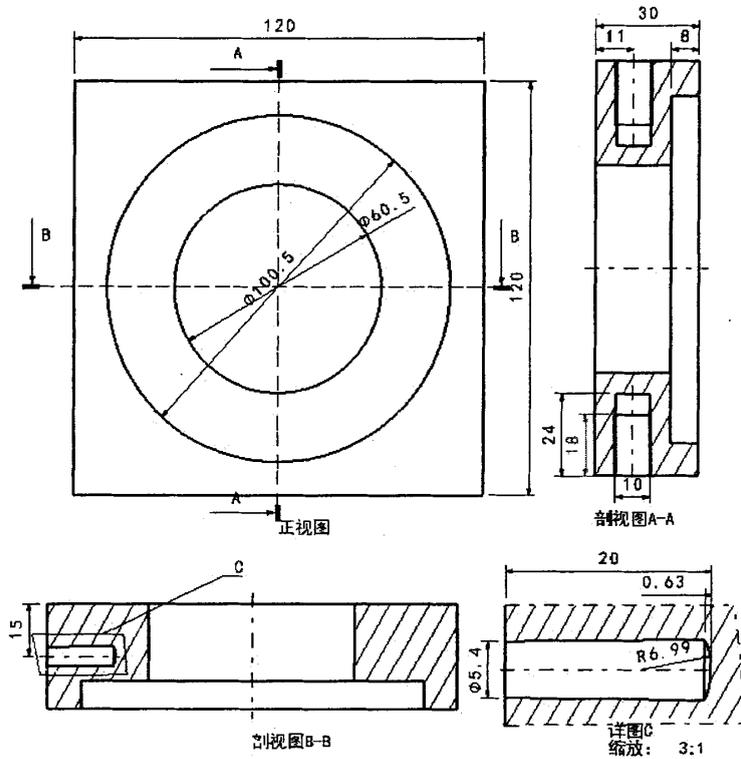


图 2-12 右挡盘结构尺寸

Figure 2-12 The Structure Size of Right Baffle Plate

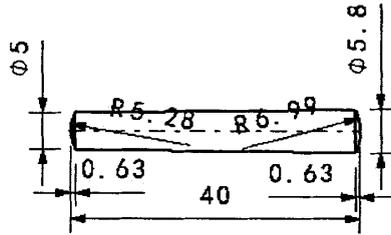


图 2-13 圆锥销工程图

Figure 2-13 The Drawings of Pin

2.4.5 底座结构设计

图2-14是洒水机底座的结构设计图。从图中结构可以看出底座为梯形结构，因为主轴在转动时会使得底座有翻到的可能性，若要整个洒水机可以稳定工作，则 $G_{底}L_{底} > F_{轴}L_{轴}$ ， $G_{底}$ 是洒水机底盘的重力， $L_{底}$ 为重力到支点的力臂 $F_{轴}$ 为主轴转动过程产生的切向力， $L_{轴}$ 是切向力到支点的力臂，底座设计为梯形增大了重力的力臂，使得整个洒水机的稳定性增加。左右挡盘放置于底座的矩形部位，是通过圆锥销和螺钉将底座和挡盘连接在一起的。洒水机底座长 $L = L_{轴长} + L_{左挡盘} + L_{右挡盘} - L_{伸} = 340mm$ ，图2-9为底座的工程图。考虑到底座的工作环境以及需要达到相对稳定的性能要求，该部件选择的材料应该达到不易锈蚀且密度相对较大的材料。

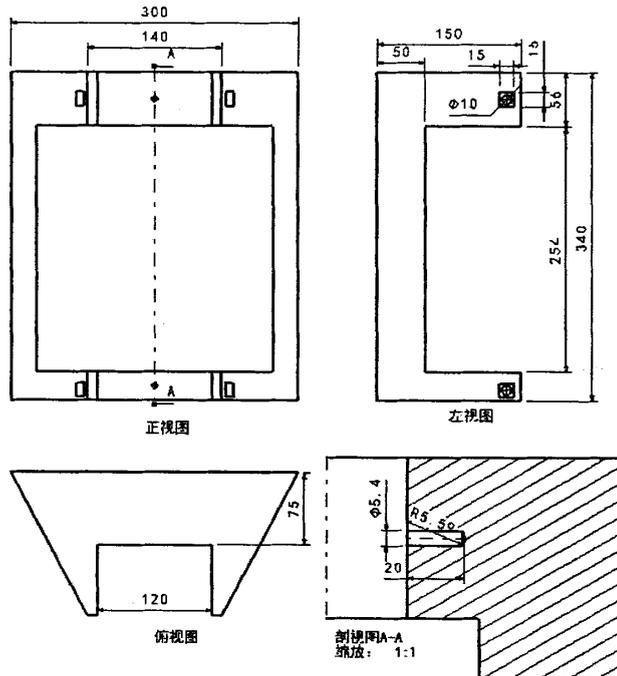


图 2-14 底座工程图

Figure 2-14 The Drawings of Chassis

2.5 洒水车虚拟装配

2.5.1 虚拟装配简介

虚拟装配是指没有真实产品运用计算机将产品的三维模型装配在一起的装配。在虚拟装配中，设计人员进行模型的建立以及修改很方便，使得产品的装配结构的修改更容易，从而降低了产品的生产成本，设计周期也同时减短^[24]。虚拟装配是用一定的装配约束约束零部件所在位置的过程，是根据真实产品具备有的特性在计算机中模拟产品装配的过程，在虚拟装配过程中，是用户在控制整个产品的装配过程，是用来用来检查产品在现实中是否可以装配^[25]。

产品在虚拟装配过程中，需要考虑到以下这些因素的影响：

(1) 首先考虑能完成虚拟装配的一些条件以及在装配过程中哪些因素影响虚拟装配的精确性。

(2) 产品进行虚拟装配是建立在实际产品装配的关系上，所以虚拟装配完成时必须与实际的装配关系相同。

(3) 对虚拟装配知识的理解与掌握程度直接关系到虚拟装配的正确性和真实性，所以更深的学习虚拟装配软件能更真实的模拟真实的装配环境，使虚拟装配可以更具有实用性。

虚拟装配是一项综合、复杂的工作，它包括产品材料的分析与选择、零件的框架结构与分配、公差分析、装配工艺规划等内容。虚拟装配主要具有以下几方面的优势：

1. 方便的确定产品的结构方案，优化产品装配结构。
2. 虚拟装配是以实际产品为基础建立的，可以作为产品制造的依据和基础。
3. 在计算机中实现模拟了装配的可能再继续优化，改进了实际产品的装配性能，降低装配成本。
4. 虚拟装配是实现产品并行设计的技术支持和保障。

2.5.2 洒水车装配过程

虚拟装配过程是用户把手动装配操作过程转变为软件系统自动装配操作过程。即不需要在进行传统的手动装配，产品零部件之间的关系和约束可以通过软件系统自动的识别，通过零部件之间的约束关系实现铲平的自动装配，简化了装配过程。装配完成后通过干涉分析检查对装配中出现的问题进行反馈继续优化，最终完成整个产品的虚拟装配虚拟装配，整个装配过程如图 2-15 所示。

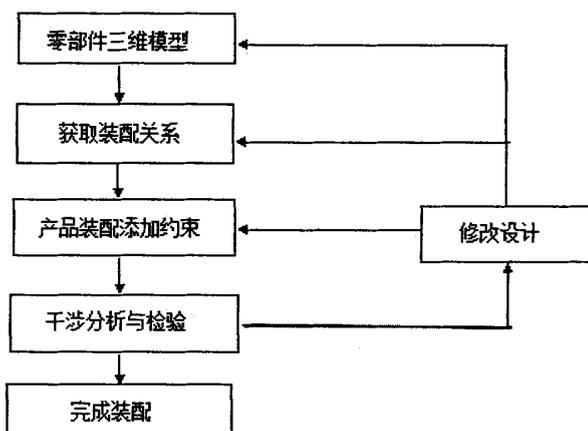


图 2-15 虚拟装配过程图

Figure 2-15 Virtual Assembly Process

根据虚拟装配原则对洒水机进行虚拟装配过程：首先，根据洒水机零部件的设计需求，在 CATIA 绘图软件中机械设计的零部件设计模块将零部件的三维实体模型建立好；其次，在 CATIA 软件中机械设计的装配设计模中根据洒水机装配方式建立装配模块，并导入所有零部件及获取各个零部件之间装配关系；第三步，在 CATIA 虚拟装配环境中根据洒水机零部件之间的配合关系与传动关系，对各部件添加必要的约束关系；最后对洒水机整体虚拟装配体进行干涉分析与检验，对整个设计和装配的方式进行检查分析，修改不合理的设计或者装配关系，从而完成洒水机的虚拟装配。

通过分析洒水机的结构特点和和各个零部件之间的装配关系，本文设计的洒水机可以划分为两个子装配：底座和左右挡盘以及换向件的装配、主轴装配。

底座和左右挡盘以及换向件的装配：首先将换向件压入左挡盘中，使换向件的左端面与左挡盘的内部端面贴合。然后将两根圆锥销分别插入底座的锥形孔中，然后将两挡盘底部放在底座的矩形凹槽部位，挡盘底面的圆锥孔和圆锥销轴线相合的装配关系，最后用四支螺栓限制两挡盘的径向自由度。

主轴装配：首先将垫片套在左半主轴的长轴部位，然后将右半轴套在左半轴上用螺帽将左右半轴固定在一起，最后再将出水口安装上去，出水口用四根螺钉固定在主轴上。

2.5.3 虚拟装配中的约束

装配约束是指在装配零件时使用的各种约束关系，从而使得零件按照添加的约束条件确定位置，零件之间的机械关系也可以通过约束来指定。在 CATIA 装配设计中有以下四种常用的约束：偏移约束、重合约束、接触约束、角度约束。

重合约束根据所选择的几何元素，可获得同心、同轴或共面约束；接触约束的功能是在两个平坦的面之间产生接触约束，其公共区是面、线或点；偏移约束是将装配

中两部件的面与面实现偏移的约束;角度约束主要用来在装配体中两部件的平面之间建立角度约束。四种约束的使用范围如表 2-1、2-2、2-3、2-4 所示。

表 2-1 偏移约束

Table 2-1 Offset constrain

偏移约束	点	线	曲面	平面
点	√	√	√	
线	√	√	√	
曲面	√	√	√	√
平面			√	√

表 2-2 相合约束

Table 2-2 Coincidence constrain

相合约束	点	线	曲面	平面	球	曲线	圆柱体
点	√	√	√	√		√	√
线	√	√	√		√		√
曲面	√	√	√	√	√		√
平面	√		√	√			
球	√	√	√				
曲线	√					√	
圆柱体	√	√	√				

表 2-3 接触约束

Table 2-3 Contact constrain

接触约束	平面	球面	柱面	圆锥面	圆
平面	√	√	√		
球面	√	√		√	√
柱面	√		√		
圆锥面		√		√	√
圆		√		√	

表 2-4 角度约束

Table 2-4 Angle constrain

角度约束	线	曲面	平面	柱面轴线	锥面轴线
线	√	√	√	√	√
曲面	√	√	√	√	√
平面	√	√	√	√	√
柱面轴线	√	√	√	√	√
锥面轴线	√	√	√	√	√

按照洒水机零件间的关系，添加合适的装配约束从而得到洒水机的装配模型。

2.5.4 干涉分析与检查

干涉分析是虚拟装配的一个重要环节，它分为干涉检查和间隙分析两种情况。干涉检查只检查形体间是否相互侵入，而间隙分析除检查形体间是否发生干涉外，还要检查形体间的间隙是否满足设计要求^[26]。在 CATIA 当中的干涉分析有五种结果，其中包括间隙加碰撞加冲突、接触加碰撞、碰撞、接触加碰撞、穿透深度、穿透深度对规定穿透。在虚拟装配设计过程中，对整个洒水机进行干涉并没有发生干涉现象，说明论文中洒水机的装配在实际生产中是可以实现的。洒水机装配图如图2-11所示。

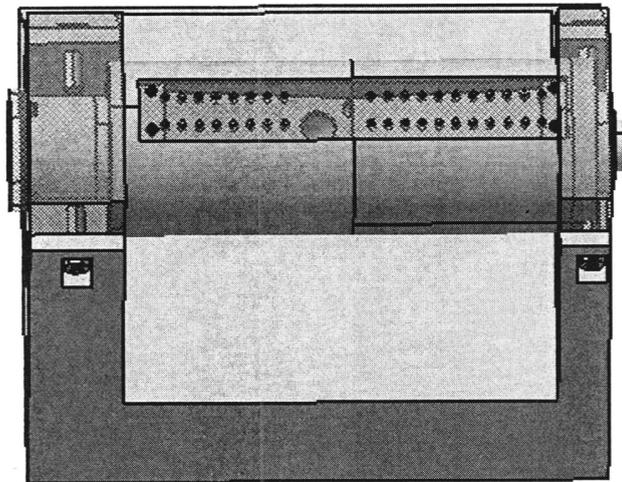


图 2-16 洒水机的装配图

Figure 2-16 Assembly Diagram of Sprinkler

2.6 本章小结

本章首先对 CATIA 绘图软件进行了简单的介绍，然后介绍了洒水机工作原理和设计思路，详细介绍了洒水机各部件的机构设计，并基于 CATIA 绘图软件建立了洒水机各零部件的三维实体模型，于工程图中给出了各个零部件的具体结构尺寸，在虚拟装配模块对洒水机进行了装配。

3 洒水机内部管道流体力学相关计算

3.1 计算流体力学简介

计算流体力学或计算流体力学，简称 CFD，是用电子计算机与离散化的数值方法对流体力学问题进行数值模拟和分析的一个分支。CFD 是建立在经典流体力学和数值计算方法之上的新型的独立学科。

计算流体力学技术是一种数值计算的艺术，目前是国际上非常强有力的一個研究领域，是进行多相流、动量传递和燃烧、传质、燃烧和化学反应研究的核心和重要技术，已经广泛应用在汽车设计、化工处理工业、半导体设计、航空航天设计、生物医学工业、涡轮机设计、HAVC&R 等诸多工程领域，板翅式换热器设计是 CFD 技术应用的重要领域之一^[27-29]。

流体力学是在理论分析和实验研究两种方法的基础上最终发展起来的。理论流体力学和实验流体力学这两大分支在很早之前就已经存在。理论分析是通过数学求解的方法求出问题的定量结果，可是通过数学求解直接求出结果这种问题在实际问题中毕竟是很少一部分，为了弥补理论分析方法的不足从而促使了计算流体力学的发展。图 3-1表示了 CFD 方法，传统理论分析法和实验测量方法三者之间关系。

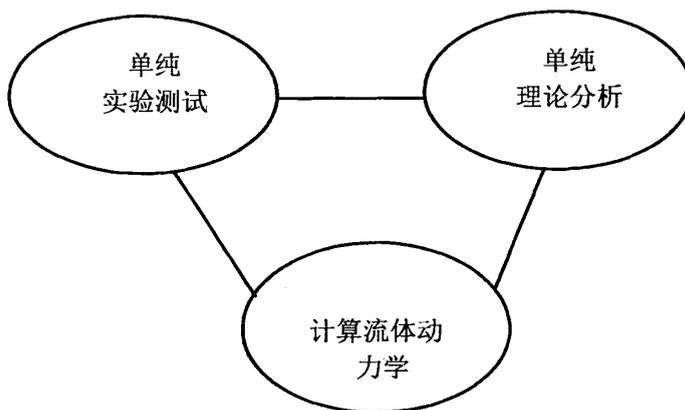


图 3-1 流体力学关系图

Figure 3-1 Relational Graph of Fluid Mechanics

在上世纪初，用数值方法来解决流体力学问题的思想被理查德提出。可是由于流体力学问题本身所具有的复杂性和当时相关计算工具的落后，该种思想并未能引起人们的广泛重视。自从电子计算机问世以后，用电子计算机对数值模拟计算才成为现实。二维长方形柱体的绕流问题以及尾流涡街的形成和演变过程于 1963 年被美国的 F.H. 哈洛和 J.E. 弗罗姆借助 IBM7090 计算机成功的解决，受到了广泛的重视。计算流体

力学现如今已广泛深入到流体力学的各个领域，相应地也成了各种不同的数值求解方法。有限差分方法和有限元法是目前最常用也是最为主要的求解方法。在流体力学中有限差分方法已得到了广泛的应用，而有限元法则是最近几十年才提出来的，在流体力学中的应用已是上世纪的六十年代中期，这种求解方法是从求解固体力学问题发展起来的。在处理低速流体的问题中，已有相当多的应用，而且还在迅速发展。计算机工业的快速更新换代为计算流体力学的快速发展提供了强劲有力的基础，主要还是传统的理论分析方法和试验方法在使用条件上存在很大的局限性，有些复杂的问题无法做出准确的分析解答，或者因为试验费用的昂贵而无法进行，但是在 CFD 中可以在低成本的条件模拟复杂的实验过程，所以 CFD 在最近几十年得到了快速的发展。CFD 具体的求解过程如图 3-2 所示。

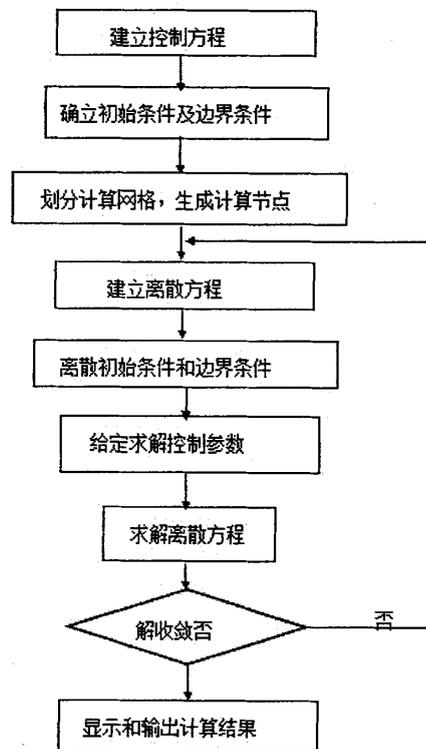


图 3-2 CFD 工作流程图

Figure 3-2 The Procedure of CFD

3.2 湍流理论概述

自然环境和工程装置中的流动常常是紊流流动，其中包括海洋的流动，大气的流动甚至是管道和机械内部的流动。模拟任何实际过程首先遇到的就是紊流问题，而紊流问题本身又是流体力学理论上的难题。对于某些简单的均匀时均流场，如果紊流脉

动是各向均匀及各向同性的，可以用经典的统计理论来分析，但实际上的紊流往往是不均匀的，这就给理论分析带来了极大地困难。这也就引发了对紊流过程进行模拟的想法。

紊流模式理论是以脉动运动方程和雷诺运动方程为理论基础通过模型的模拟假设，依靠理论与经验相结合，来描述紊流平均量的方程组封闭的一种理论计算方法。目前常用的湍流模型可根据所采用的微分方程数进行分类为：零方程模型、一方程模型、两方程模型、四方程模型、七方程模型等。对于简单流动而言，一般随着方程数的增多，精度也相对越高，计算量也越大、收敛性也就越差。但对于复杂的湍流运动，则不一定。根据微分方程的个数将紊流模型分为零方程模型、一方程模型、二方程模型和多方程模型。这里所说的微分方程是指除了时均 N-S 方程外，还要增加其他方程才能是方程封闭，增加多少个方程，则该模型就被成为多少个模型。

流体的流动通常分为层流流动和紊流流动两种形式，流体的层与层之间有相互干扰且层与层之间具有动量和质量的传递的流动称之为紊流流动；而将流体层与层之间无相互干扰且层与层既无动量传递也无质量传递的流动称为层流流动。判断流体是层流还是紊流的标准是雷诺数（Reynolds 数简写为 Re，Re 为无量纲参数），它是区分层流和紊流的指标其表达式为^[33]：

$$Re = \frac{\nu \rho d}{\mu} = \frac{\nu d}{\nu} \quad (3-1)$$

其中 ν 为平均速度， d 为流道直径， ρ 为流体密度， μ 为流体的黏度， ν 为运动黏度。当管径或者流动介质不同时，临界流速不同，但对于任何管径和任何牛顿流体，判别流态的临界雷诺数 Re_c 却是相同的。Re 在 2000-4000 是有层流向紊流转变的过渡区。在工程实际计算中由于管路的环境复杂，判别圆管流态的临界雷诺数数值约为 2000，即

$$Re_c = \frac{\nu d}{\nu} = 2000 \quad (3-2)$$

用式 3-2 来判断流态是十分简便的，小于临界值 2000 时其内部流动为层流，大于 2000 则认为是紊流。而本文将洒水机内部管道的流道看作是圆形管道，所以下文中通过计算可以得出此时洒水机内部的流动为紊流流动。

对紊流最根本的模拟方法是在湍流尺度的网格尺寸内求解瞬态的三维 N-S 方程的全模拟方法，此时无需引进任何模型。然而由于计算方法及计算机运算水平的限制，该方法不易实现。另一种要求稍低的方法是亚网格尺寸度模拟即大涡模拟（LES），也是由 N-S 方程出发，其网格尺寸比湍流尺度大，可以模拟紊流发展过程的一些细节，但由于计算量仍然很大，只能模拟一些简单的情况，直接应用于实际的工程问题也存在很多问题。目前数值模拟主要有三种方法：第一种方法是平均 N-S 方程的求解，第

二种是大涡模拟 (LES)，第三种是直接数值模拟 (DNS)，而模拟的前提是建立合适的湍流模型。

CFX 提供的紊流模型可以划分为以下几大类，分别为单方程模型 (Spalart-Allmaras 模型)，双方程模型 (标准 $k-\varepsilon$ 模型)，雷诺应力模型以及大涡模拟等。其中本文所运用模型为标准 $k-\varepsilon$ 模型，一般说 $k-\varepsilon$ 模型对高 Re 数充分发展的紊流模拟较好，下面主要介绍标准 $k-\varepsilon$ 模型。在 $k-\varepsilon$ 模型中 ε 表示紊动耗散率 (turbulent dissipation rate)，其表达式为：

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_k} \right) \quad (3-3)$$

紊流黏度 μ_t 可也表示为 k 和 ε 的函数，即：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-4)$$

其中， C_μ 为经验常数。

在标准 $k-\varepsilon$ 模型中， k 和 ε 是两个基本未知量，与之相对应的运输方程为^[32]：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3-6)$$

其中 G_k 是由于平均速度梯度引起的稳动能 k 的产生项， Y_M 代表可压紊流中脉动扩张的贡献， G_b 是由浮力引起的紊动能 k 的产生项， $G_b = 0$ ， $Y_M = 0$ ， $S_k = 0$ ， $S_\varepsilon = 0$ ， S_k 和 S_ε 是用户定义的源项， $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数， σ_k 和 σ_ε 分别是与紊动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数。在标准 $k-\varepsilon$ 模型中，根据 Launder 等的推荐值及后来的实验验证，模型常数 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ε 的取值为：

$$C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_{3\varepsilon}=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$$

对于当流动为不可压时，且不用考虑用户自定义的源项时，标准 $k-\varepsilon$ 模型变为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3-7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-8)$$

对于标准 $k-\varepsilon$ 模型的适用性，有如下三点需要注意：

(1) 模型中的相关系数是根据一些特殊条件下的实验结果而得出的。在实际应

用过程中，需要针对特定的问题，参考相关文献查找更合理的数值。

(2) 给出的 $k-\varepsilon$ 模型是在绝对紊流流动模型中构建的，当 Re 数比较低时紊流的脉动影响不如黏性的影响大，流动可能出现层流状态，不适用该模型。

(3) 标准 $k-\varepsilon$ 模型在处理强旋流、弯壁曲面流动或弯曲流线流动时，会产生一定失真。

3.3 流体的控制方程

流体流动物理守恒定律支配着流体的流动，有三大基本的守恒定律，即质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。而这些守恒定律的数学描述就是控制方程。

(1) 质量守恒方程

任何流动问题都必须遵守质量守恒定律。该定律可表示为：单位时间内流体微元体中质量的增加等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量^[31]。由质量守恒定律得出质量守恒方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3-9)$$

其中 ρ 是密度， t 是时间， u 、 v 和 w 是速度矢量在 x 、 y 和 z 三个方向的分量。若流体为不可压缩流体，则密度 ρ 为常数，式 (3-9) 变为：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3-10)$$

若流动处于稳态，则密度 ρ 不随时间变化，式 (3-9) 变为：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3-11)$$

质量守恒方程的另一种称呼为连续方程。

(2) 动量守恒方程

运动方程是动量守恒定律在流场中的数学表达式，该定律也是所有流动系统必须满足的基本定律。它可表述为：作用在控制体上的外力的合力与单位时间内通过控制面流入控制体的动量之和等于单位时间内控制体中流体动量的增量。

若设 A 点的流体密度为 ρ ，速度为 \bar{U} ，单位质量流体所受到的质量力为 \bar{f} ；微元表面积 dS 上的应力张量为 Π ，分量为 σ_{ij} ，其中 $\bar{p}_x = (\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}) = (\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13})$ ，微元表面积 dS 的外法线单位向量为 \bar{n} ，则该控制体受到的总质量为 $\int_V \rho \bar{f} dV$ ，表面力为 $\oint \Pi \cdot \bar{n} dS$ ，而流体具有的总动量为 $\int_V \rho \bar{U} dV$ ，则动量守恒定律的数学表达式为：

$$\int_V \frac{\partial(\rho\bar{U})}{\partial t} dV = \int_V \rho \bar{f} dV + \oint_S \Pi \cdot \bar{n} dS - \oint_S (\bar{n} \cdot \bar{U}) \rho \bar{U} dS \quad (3-12)$$

(3) 能量守恒方程

任何包含有热交换的流动系统都必须满足能量守恒定律。该定律可表述为：单位时间内由外界给予控制体的热量、功及通过控制面流入控制体的能量之和等于单位时间内控制体中流体能量的增量。

流体的能量 E 通常是内能 i 、动能 $K = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ 和势能 P 三项之和，扣除动能的变化得到关于内能 i 的守恒方程。而内能 i 与温度 T 存在 $i = c_p T$ 的关系，其中 c_p 是比热容。从而得到以温度 T 为变量的能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_r \quad (3-13)$$

其中 k 为流体的传热系数， S_r 为流体的内热源及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分。能量守恒方程是了流体流动与热传递问题的基本控制方程，但对于不可压流动且热交换量很小时，可以不考虑能量方程。

3.4 管道内流体计算

如图3-3所示将洒水机内水流流动划分5个断面，其中断面1-1为水流进水口断面，断面面积 $A_1 = \pi R_1^2 = 0.02^2 \pi m^2$ ，压强 $p_1 = 0.26 MPa$ 速度 $v_1 = 1.2 m/s$ ；断面2-2为换向件的左侧截面，其截面如图2-6所示，水流在该截面处分为两个支流，沿主管道水流的面积 $A_{21} = \pi R_{21}^2 = 0.01^2 \pi m^2$ ，速度为 v_{21} ，压强为 p_{21} ，沿凹槽部分过流面积

$$A_{22} = 5 \times 10^{-3} \times \frac{\pi}{6} R_{21}^2 = \frac{25\pi}{3} \times 10^{-6} m^2，速度为 v_{22} ，压强为 p_{22} ；$$

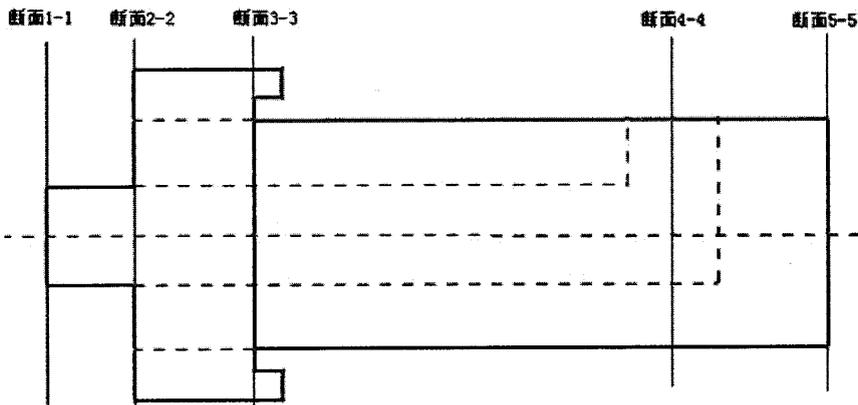


图 3-3 洒水机断面图

Figure 3-3 Sectional View of Sprinkler

取1-1、2-2两断面列伯努利方程：

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_{21}}{\rho g} + \frac{v_{21}^2}{2g} + h_{1m1-2} + h_{1f1-2} \quad (3-14)$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_{22}}{\rho g} + \frac{v_{22}^2}{2g} + h_{2m1-2} + h_{2f1-2} \quad (3-15)$$

$$Q_1 = Q_{21} + 3Q_{22}, Q_1 = v_1 A_1, Q_{21} = v_{21} A_{21}, Q_{22} = v_{22} A_{22} \quad (3-16)$$

雷诺数 $Re = \frac{vd}{\nu}$ ，黏度 ν 取温度为25摄氏度的黏度值即 $\nu = 0.897$

解得 $Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{1.2 \times 0.04}{0.897 \times 10^{-6}} = 5.36 \times 10^4$ ，雷诺数远大于2000，故管道中水流流动是紊流。

列并联管道流量式得： $Q_{21} : Q_{22} = \sqrt{S_{22}} : \sqrt{S_{21}}$ ，其中 $S = al, a = \frac{10.3n^2}{d^{5.33}}$ ， S 为管道的阻抗，

n 为管道的粗糙系数，该计算所涉及各管道的粗糙相同。

$$\text{凹槽部位水力半径 } R_{22} = \frac{A_{22}}{\chi} = \frac{8.33 \times 10^{-6} \pi}{0.01 + 5.23 \pi \times 10^{-4}} = 2.5 \times 10^{-3} m$$

沿程阻损 $h_{1f1-2} = h_{2f1-2} = \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g}$ ，根据 Re 和 K/d 查莫迪图得 $\lambda_1 = 0.016$

$$\text{局部阻损 } h_{1m1-2} = \xi_{11} \frac{v_1^2}{2g} = 0.5 \left(1 - \frac{A_{21}}{A_1}\right) \frac{v_1^2}{2g} = 0.5 \left(1 - \frac{0.01^2 \pi}{0.02^2 \pi}\right) \frac{1.2^2}{2 \times 10} = 0.009$$

$$h_{2m1-2} = \xi_{12} \frac{v_1^2}{2g} = 2 \frac{1.2^2}{2 \times 10} = 0.144$$

联立以上所有等式解得 $p_{21} = 259591P_a$ ， $v_{21} = 4.44 m/s$ ， $p_{22} = 249421P_a$ ，

$$v_{22} = 1.44 m/s, Q_{21} = 37Q_{22}, Q_{22} = \frac{Q_1}{40}。$$

图3-4为换向件的投影图，水流沿着凹槽流至凹槽末端时的速度为 v_{23} ，凹槽末端断面面积为 A_{23} ，对换向件凹槽部位列动量方程，首先作如下的假设

(1) 换向件的工作环境在水的长期浸泡下，故其材料选择为不锈钢，该材料运动粘

度很小，假设水流在凹槽部位流动沿程阻损为零，即忽略水流在凹槽内的沿程阻损。

(2) 换向件的凹槽部位为一自由曲线，不考虑沿程水流损失，流经凹槽初端和末端的流量是相等的，即沿程没有漏水。

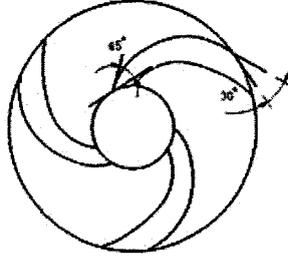


图 3-4 换向件投影图

Figure 3-4 The Projection View of Reversing Part

故有 $v_{22}A_{22} = v_{23}A_{23}$ ，解得 $v_{23} = 0.686m/s$ 。

列控制体的动量方程： $F_1 - p_{22}A_{22} = \rho Q_{22}v_{22} \cos 30^\circ - \rho Q_{22}v_{23} \cos 45^\circ$

其中 F_1 为换向件对每个凹槽内水流的作用力。

由牛顿第三定律可知 $F = 3F_1$ ，解得 $F = 19.644N$ 。

$F = (m_1 + m_2)\omega^2 r$ ，其中 m_1 为换向件的质量，在 CATIA 中直接测量出其值为 0.755Kg，

m_2 为换向件内包含水的质量 0.036Kg， r 为旋转半径。联立以上几式解得：

$\omega = 28.77 \text{ rad/s}$ 。

水流由换向件主管道流至主轴端面流速为 v_{31} ，压强为 p_{31} ，流量为 Q_{31} ；水流由换向件

支管道流至主轴端面的流速为 v_{32} ，压强为 p_{32} ，流量为 Q_{32} 。

取断面 2-2、3-3 列伯努利方程得：

$$\frac{p_{21}}{\rho g} + \frac{v_{21}^2}{2g} = \frac{p_{31}}{\rho g} + \frac{v_{31}^2}{2g} + h_{1m2-3} + h_{1f2-3} \quad (3-17)$$

$$\frac{p_{21}}{\rho g} + \frac{v_{21}^2}{2g} = \frac{p_{32}}{\rho g} + \frac{v_{32}^2}{2g} + h_{2m2-3} + h_{2f2-3} \quad (3-18)$$

$$Q_{21} = Q_{31} + Q_{32}, Q_{31} = v_{31}A_{31}, Q_{32} = v_{32}A_{32}$$

换向件的主管道和支管道是并联管道，故列并联管道流量式得：

$$Q_{31} : Q_{32} = \sqrt{S_{32}} : \sqrt{S_{31}}, \text{ 其中 } S = al, a = \frac{10.3n^2}{d^{5.33}}$$

局部阻损 $h_{1m2-3} = 0$,

$$\text{沿程阻损 } h_{1f2-3} = \lambda_{31} \frac{l_{31}}{d_{21}} \frac{v_{21}^2}{2g}, \text{ 查莫迪图可知 } \lambda_{31} \text{ 取 } 0.03。$$

$$\text{局部阻损 } h_{2m2-3} = \xi_{31} \frac{v_{21}^2}{2g} + \xi_{32} \frac{v_{32}^2}{2g}, \text{ 其中 } \xi_{31} \text{ 取值 } 0.1, \xi_{32} \text{ 取值 } 0.25。$$

$$\text{沿程阻损 } h_{1f2-3} = \lambda_{31} \frac{l_{31}}{d_{31}} \frac{v_{21}^2}{2g} + \lambda_{32} \frac{l_{32}}{d_{32}} \frac{v_{32}^2}{2g}, \text{ 查莫迪图知 } \lambda_{31} \text{ 取 } 0.03, l_{31} = 20\text{mm},$$

$$d_{31} = 20\text{mm}, \lambda_{32} \text{ 取值为 } 0.038, l_{32} = 22.535\text{mm}, d_{32} = 10\text{mm}。$$

$$\text{解得: } v_{31} = 4.017\text{m/s}, p_{31} = 260788\text{Pa}, v_{32} = 1.691\text{m/s}, p_{32} = 266614\text{Pa}。$$

取断面3-3、5-5列伯努利方程得:

$$\frac{p_{32}}{\rho g} + \frac{v_{32}^2}{2g} = \frac{p_5}{\rho g} + \frac{v_5^2}{2g} + h_{m3-5} + h_{1f3-5} + h_{2f3-5} + z_5$$

其中 $Q_{32} = Q_5, Q_{32} = v_{32}A_{32}, Q_5 = v_5A_5, A_{32} = 2A_5, Z_5$ 取值为22mm, 是水流上升的高度, 如图3-5所示。

$$h_{m3-5} = \xi_5 \frac{v_{32}^2}{2g}, \xi_5 \text{ 取 } 0.5。$$

$$h_{1f3-5} = \lambda_{51} \frac{l_{51}}{d_{51}} \frac{v_{32}}{2g}, h_{2f3-5} = \lambda_{52} \frac{l_{52}}{d_{52}} \frac{v_5}{2g}, \text{ 其中 } \lambda_{51} \text{ 取值为 } 0.038, \lambda_{52} \text{ 取值为 } 0.48。$$

$$d_{52} = 2R_{52} = 2 \frac{A_{52}}{\chi_{52}} = \frac{0.005^2 \pi}{0.005\pi + 0.01} = 3 \times 10^{-3} \text{m}, l_{51} = 0.145 \text{m}, l_{52} = 0.024 \text{m}。$$

$$\text{解得 } p_5 = 240018.5\text{Pa}, v_5 = 3.382\text{m/s}。$$

$p_5 A_{52} = m_5 \omega_5^2 r_5, m_5 = m_{51} + m_{52}$, 其中 m_{51} 为整个主轴的质量, m_{51} 为主轴内部水的质量,

r_5 为转动半径。解得: $\omega_5 = 9\text{rad/s}。$

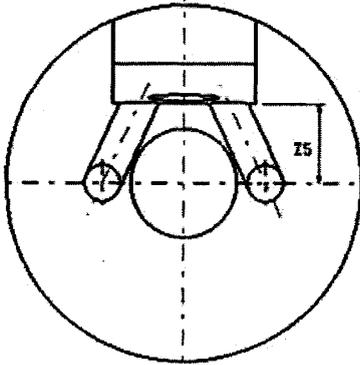


图 3-5 左半轴截面图

Figure3-5 The Sectional view of Left Axle

主轴转动的范围： $\theta = \frac{\theta_1 \omega_3}{\omega - \omega_3} = 48^\circ$ ，故主轴在左右两侧 48° 范围内摆动洒水。

3.5 本章小结

本章主要介绍了流体力学相关的知识，包括计算流体力学发展概况，湍流理论概述以及流体的控制方程，最后用过流体力学计算得到洒水机各流水口的水流流速压强等，为第二章结构设计提供理论依据，同时也为第四章的流体分析提供了数值条件，奠定了理论基础。

4 洒水机内部管道的流体力学仿真分析

4.1 CFX 软件的简介

CFX 是英国 AEA Technology 公司开发的, 开发这款软件的目的是为了解决在科技咨询服务中遇到的实际工业问题, 这款软件是全球第一个通过 ISO9001 质量认证的大型商业 CFD 软件, CFX 发展的基本要求为物理模型丰富、计算结果精确、用户扩展性强大, 通过这些方面的成就, CFX 引领着 CFD 技术的不断发展。目前, CFX 已经在旋转机械、石油化工、航空航天、能源、汽车、机械制造、火灾安全、环保、生物技术、水处理、冶金等领域得到很广泛的应用^[35]。

CFX 是全球第一个在复杂几何问题、网格划分、求解这三个 CFD 传统瓶颈问题上均取得了重大突破。CFX 有着独一无二有别于其他的 CFD 软件的技术特点, 并利用其独一无二的技术特点引领着新一代高性能的 CFD 软件整体发展。基于有限元的有限体积法被 CFX 所采用, 吸收了有限元法的数值精确性同时也保留了有限体积法的守恒特性。CFX 具有先进的全隐式耦合多网格线性求解器, 求解的收敛速度快, 可以读入多种形式的网格, 并能在计算的过程中自动进行加密或者稀疏网格, 前后处理具有强大的并行计算功能, 物理模型丰富, 可以真实模拟各种工业流动, 支持批处理操作, 支持多物理场耦合, 支持 Workbench 集成。

CFX 分析软件主要由五大部分实现其功能: 几何建模、网格划分、前处理、求解和后处理。CAD、CATIA、Pro-E 等绘图软件绘制的图形都可以导入 CFX 当中。网格划分使用具有强大的网格生成功能和几何建模功能的 ICEM CFD 软件。划分四面体网格可以通过自动生成网格的功能来实现, 若要生成质量更高的六面体网格和 O-Gird 网格, 可以通过生成拓扑功能来实现。其网格基本形貌如图 4-1 所示, 四面体网格适合形貌复杂的几何图形, 生成简单; 六面体适合表征两相交界面, 形貌清楚, 质量较高, 适合对网格质量要求较高的模型, 但生成过程复杂; 三棱柱适合描述薄壁特征; O-Gird 适合描述圆圆弧特征, 可很好表征圆弧边缘。

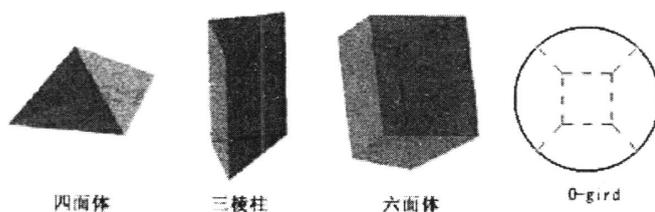


图 4-1 网格基本形貌图

Figure 4-1 The basic morphology of the grid

CFX 前处理主要用来建立准确计算区域，选择适合的物理模型，选择合理物质，设定边界条件，设定求解等功能，同时 CFX 提供的复杂模型还可以用来建立燃烧、化学反应、动静干涉气蚀、多孔介质、相间传质、非牛顿流、真实气体等大批复杂现象的模型。CFX 求解使用了有限元的有限体积法，在保证有限体积法的守恒特性基础上，吸收了有限元法的数值精确性。CFX 后处理可以快速的展示计算结果，生成点线面体等位置，创建矢量图、流线图、云图、曲线等对象，还可以生成数据、传输数据。在湍流模型的应用中 CFX 也是业界领先的。常用的湍流模型除外，CFX 还最先使用了分离涡模拟（DES）、大涡模拟（LES）、和大涡模拟（LES）等高级的湍流模型。

4.2 网格的划分与具体生成步骤

4.2.1 网格的划分

网格为 CFD 模型的几何表达形式，是其模拟和分析的载体。网格划分是进行仿真分析的前处理过程，是仿真分析结果正确的保障。与此同时，网格划分也是进行数值分析的前提，网格的质量直接关系到 CFX 求解收敛性的好坏以及结果的可靠性，生成高质量的网格是进行流体计算的必要条件。网格的划分有三大类，分别为：结构网格、非结构网格、混合网格。结构网格的特点是网格相邻点排列有序且关系明确，它的优点是构造方便，数据结构简单，网格生成迅速并且质量高；其缺点是只适用于简单的结构，对于模型复杂的结构生成网格就有困难，适用的范围有限。非结构网打破了对网格节点的结构限制，在划分可以适当的调节节点的坐标，网格的大小以及单元的形状，并且非结构网格能够做到对模型关键位置网格细化。非结构网格的适用性很好，可以方便的形成复杂的网格，但其无规格性也导致了计算效率低，存储空间大，计算时间长等不足。而混合网格是结构网格与非结构网格的混合结构，具有了结构网格和非结构网格的特点^[39-41]。

4.2.2 网格生成具体步骤

以主管道直径为 20mm 的结构为代表划分网格。洒水机换向件和水流的流域三维模型是在 CATIA 中完成，将图另存为 .stp 格式，此格式可以直接导入 ANSYS-Workbench 界面中。启动 ANSYS 软件进入 Workbench 界面，在 Workbench 栏左侧，用鼠标将 Geometry 标签直接拖到右边空白区，则在 Project Schematic 内就会名为 A 的 Geometry 块，选中 A2 栏，然后再右键弹出的快捷菜单中选中导入几何体过程如图 4-2 所示。双击 A2 栏，打开几何模型，当要确定单位时选择 mm，在进入 Geometry 界面后单击 Generate 更新显示出模型，其模型如图 4-3 所示。

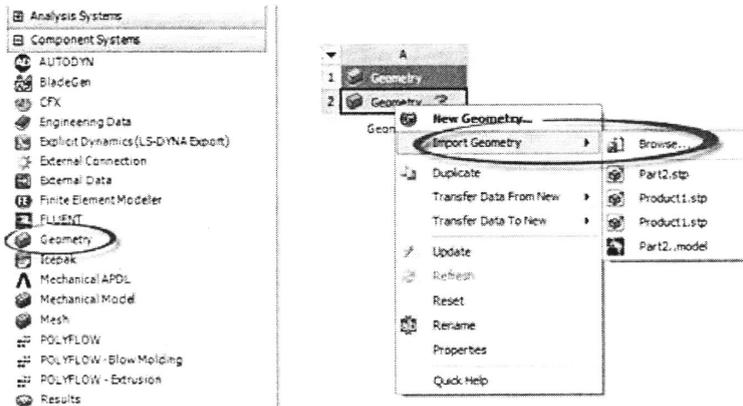


图 4-2 导入外部几何体

Figure 4-2 Import External Geometry

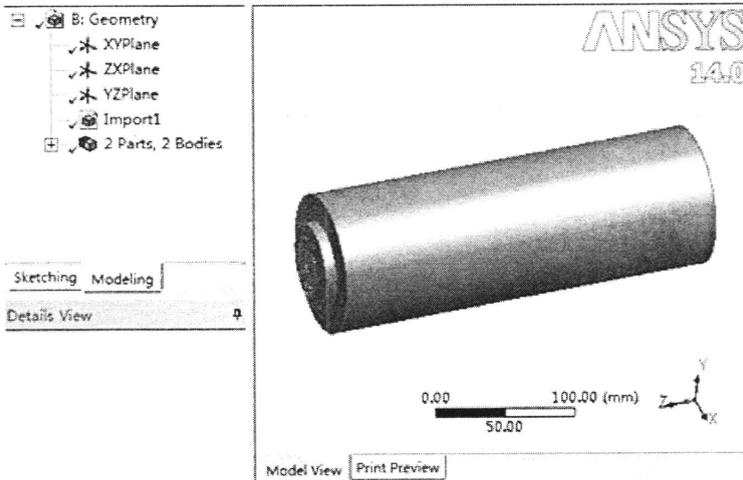


图 4-3 几何体模型

Figure 4-3 Geometry Model

导入模型后可以关闭该窗口，重新进入 Workbench 主界面，将工具栏下 Component 下的 Mesh 项拖至右边的空白处并于 A 栏中的 Geometry 建立关联，如图 4-4 所示。

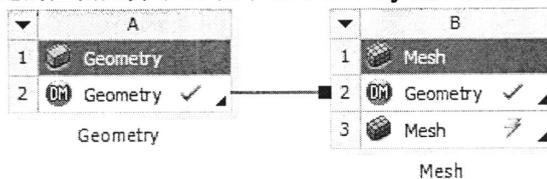


图 4-4 网格划分

Figure 4-4 Meshing

双击 B3 栏，进入网格划分界面。在进入 Mechanical 后，选中管道部件再在右键弹出

的快捷菜单中选 **Suppress Body** (抑制) ，然后只剩下流体域，如图 4-5 所示。

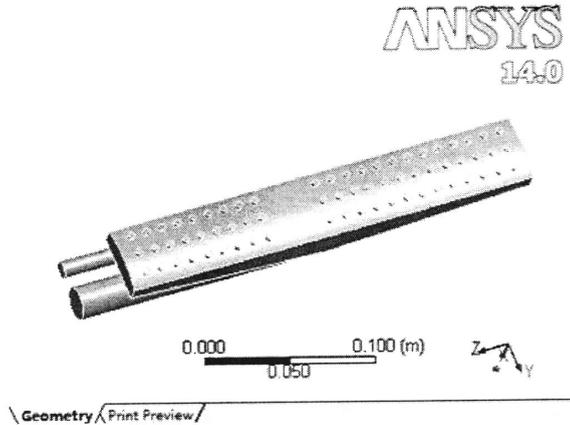


图 4-5 流体域模型

Figure 4-5 The model of Fluid domain

为了后面的分析方便对该部件一些位置进行命名。在选择过滤器中将鼠标过滤为面 ，点击图 4-5 中较粗圆柱的最左端面，将其命名为 inlet1 (一号流体进入面)。再用鼠标点击图 4-5 中细圆柱的最左端面，将其命名为 inlet2 (二号流体进入面)。同理在命名出水口为 outlet (出水口端面) 以及流体和固体的接触面为 wall。选中树形窗的 Mesh 项，然后在鼠标右键快捷菜单中选择 Insert→Method 命令，选择自动化分网格，然后在选择过滤器中将鼠标过滤为体  并选中几何体，最后在详细栏中单击 Apply 按钮确定。在详细栏中的 Sizing 栏中可修改网格尺寸的大小。最终生成的网格如图 4-6 所示。

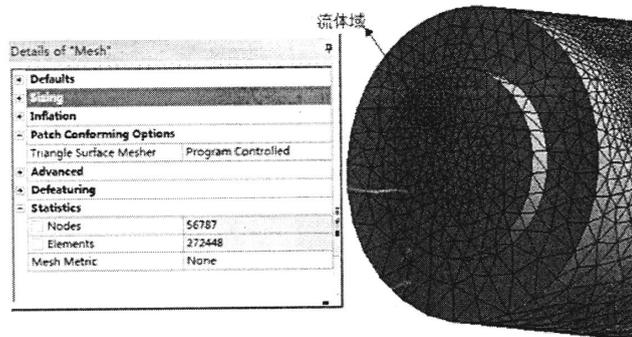


图 4-6 生成网格

Figure 4-6 Create Mesh

4.3 CFX 的设置

4.3.1 CFX 边界条件设置

边界条件 (Boundary Condition) 是基于域的，故边界条件应该是设置在相应的

域里。边界条件生成方法如图 4-7 所示。

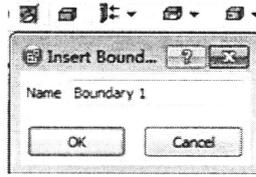


图 4-7 生成边界条件

Figure 4-7 Create Boundary Condition

(1)入口边界条件：本文中分析的管道有两个入口，流体的入口速度是已知条件，研究在恒定速度入口条件下管道内流体流动情况。速度入口边界条件常用于定义入口处的流动速度以及相关其他值，用于不可压缩流体。本文的流体速度为亚音速，在 Boundary Details 中选择标准速度（Normal Speed），并分别输入值 4.017m/s 和 1.691m/s，该速度的方向默认垂直入口面，如图 4-8 所示。

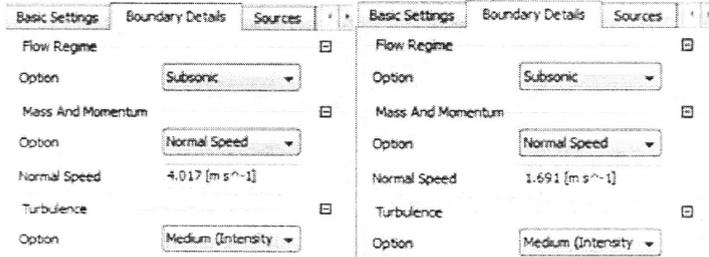


图 4-8 入口边界条件

Figure 4-8 Boundary Condition of Inlets

(2)出口边界条件：本文分析的管路只有一个出口，该出口的边界条件为压力边界条件（Pressure Outlet），参考压力为大气压，设置相关压力（Relative Pressure）为 1atm，如图 4-9 所示。

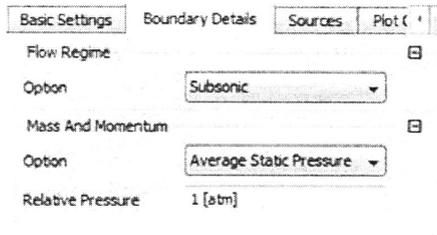


图 4-9 出口边界条件

Figure 4-9 Boundary Condition of Outlet

(3)壁面边界条件：壁面是流动问题中最常用的边界。壁面边界对流体来说是固体界面，即流体无法穿越。壁面边界条件（wall）主要用来限制流体域和固体域，默认为无滑移壁面，其材料为聚四氟乙烯。

4.3.2 CFX 求解设置

本文中的流体介质是水，它是不可压缩流体，因此选用压力求解器（Pressure Based）稳态（Steady）格式求解，紊流模型采用 $k-\epsilon$ 紊流模型。

4.4 模型基于 CFX 求解

图 4-10 为洒水机主轴管道直径为 20mm 时迭代 100 次求解迭代的残差收敛图。

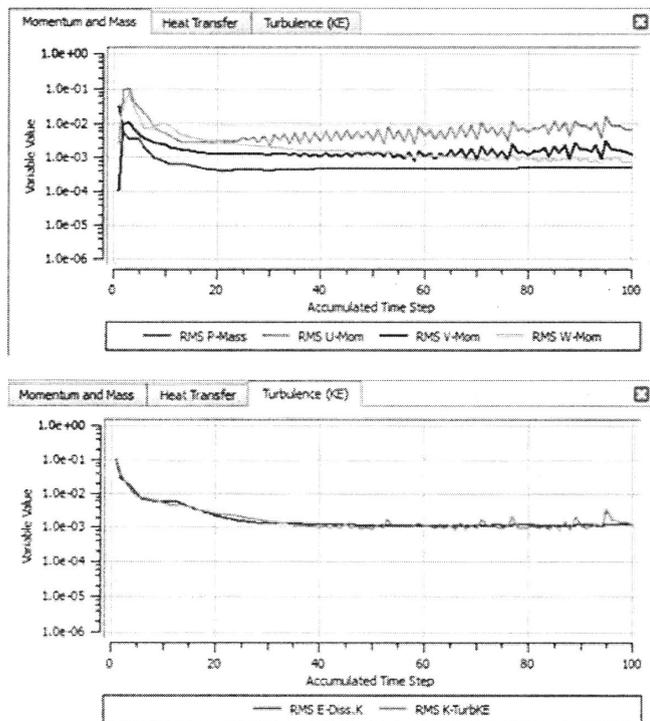


图 4-10 迭代残差收敛图

Figure 4-10 Iterative residual convergence plan

4.5 模型仿真结果分析

4.5.1 主管道正方有无出水口对比分析

在第二章结构设计时讨论根据主轴主管道正上方是否有出水口将设计分为两大类。现在以主管道直径为 20mm 分别分析在主管道正方有出水口和无出水口两种情况下洒水机出水口水流情况，得出的速度矢量图和流线图如图 4-11、4-12、4-13、4-14 所示。

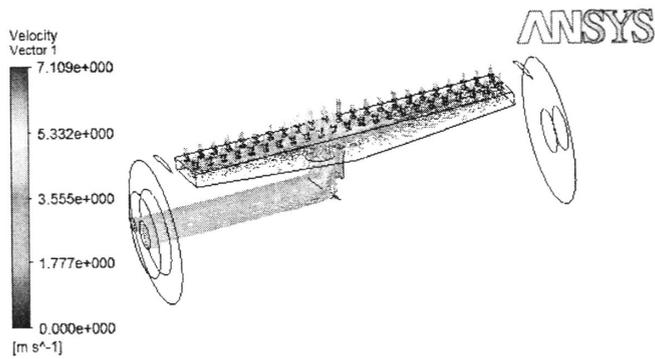


图 4-11 有出水口速度矢量图

Figure 4-11 The Velocity Vector of Have Outlet

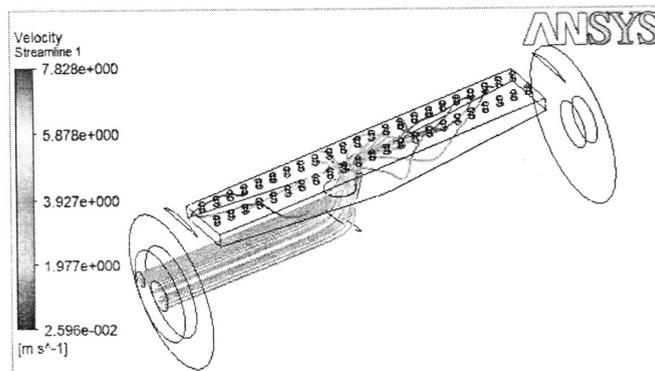


图 4-12 有出水口流线图

Figure 4-12 The Flow Charts of Have Outlet

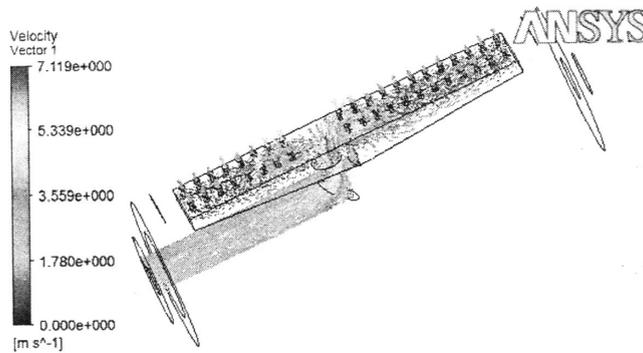


图 4-13 无出水口速度矢量图

Figure 4-13 The Velocity Vector of No Outlet

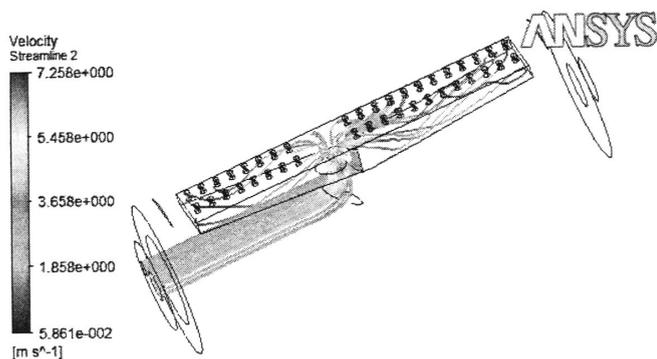


图 4-14 无出水口流线图

Figure 4-14 The Flow Charts of No Outlet

4.5.2 仿真结果分析

从上面四幅图中可知，在主管道上方有出水口时最大流速为 7.109m/s 且主管道正上方的出水口速度大，而旁边的出水口速度则很小，流速分布不均匀。在主管道正上方没有出水口时，水流最大速度达到 7.119，且各个出水口的流速很均匀，不存在水流集中流出现象。通过比较可以看出在主管道上方没有出水口的设计方案更合理、更符合设计要求。所以最终的设计选择主管道正上方没有出水口的方式。

4.5.3 出口速度与主管道直径的关系

在第三章流体力学计算中可知在换向件末端面流向主轴主管道水流的流速为 4.017m/s，流向调节管道水流流速为 1.691m/s。因经过换向件到主轴调节管道的管径相同，故流速相同都为 1.691m/s。当主轴的主管道直径为 20mm 时，主管道水流流速为 4.017m/s；当主管道直径为 25mm 时，由流量守恒可知主管道水流流速为 3.2136m/s；当主管道直径为 30mm 时，同理可知其水流流速为 2.678m/s。分别做出该三种管径的速度矢量图以及流线图，如图 4-11、4-12、4-13 所示。

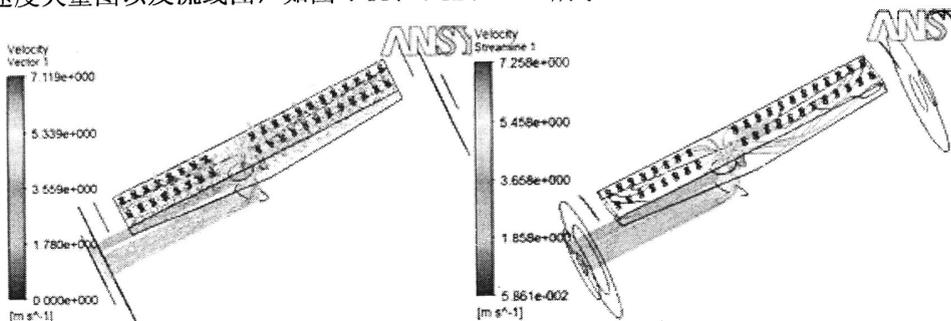


图 4-15 管径为 20mm 的速度矢量图和流线图

Figure 4-15 The Velocity Vector and Flow Charts of 20mm

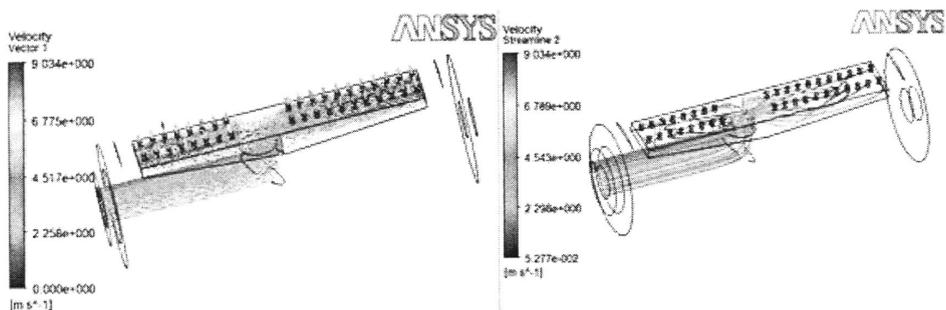


图 4-16 管径为 25mm 的速度矢量图和流线图

Figure 4-16 The Velocity Vector and Flow Charts of 25mm

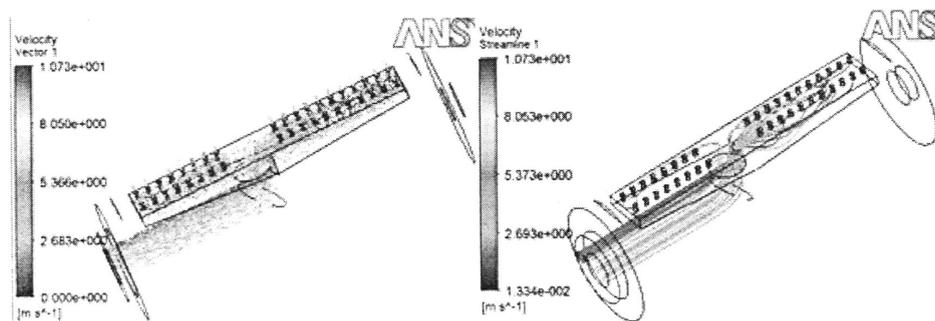


图 4-17 管径为 30mm 的速度矢量图和流线图

Figure 4-17 The Velocity Vector and Flow Charts of of 30mm

4.5.4 仿真结果分析

由以上边界条件得到出口流速情况，计算数值结果如表 4-1 所示。

表 4-1 仿真数值分析表

Table 4-1 Numerical Simulation Analysis Table

NO	Vmax(m/s)	Vmin(m/s)
20mm	7.119	3.559
25mm	9.034	4.517
30mm	10.73	5.366

由表 4-1 可以看出随着主管道直径的增大，出口水流的 maximum 速度和 minimum 速度也随着增大。出水口速度增加洒水机的洒水覆盖面积也随着增加，故最终选择主管道的直径为 30mm。

4.5.5 洒水机覆盖范围计算

图 4-18 为主管道直径为 30mm 的速度矢量图主管道上方部位的局部放大图。从图中可以看出，水流由主管道流出冲击出水口壁面从而一分为二，流向主管道上方的左右两侧，从而满足了设计要求。从其速度矢量图可以看出，出水口水流平均速度为

7.16m/s, 从第三章的计算得知主轴的转动范围为左右 48°。当主轴转动到最大幅度时, 水流射程达到最大位置, 这时出水口高度为 H, 水流从出口流出的落地时间为 t。

$$H = 0.15 + 0.05 \sin 48^\circ = 0.187m \quad (4-1)$$

$$\frac{1}{2}gt^2 - v \sin 48^\circ t = H \quad (4-2)$$

$$L = v \cos 48^\circ t \quad (4-3)$$

联立以上三式解得: L=5m。所以本文设计的洒水机的洒水范围是 10m。

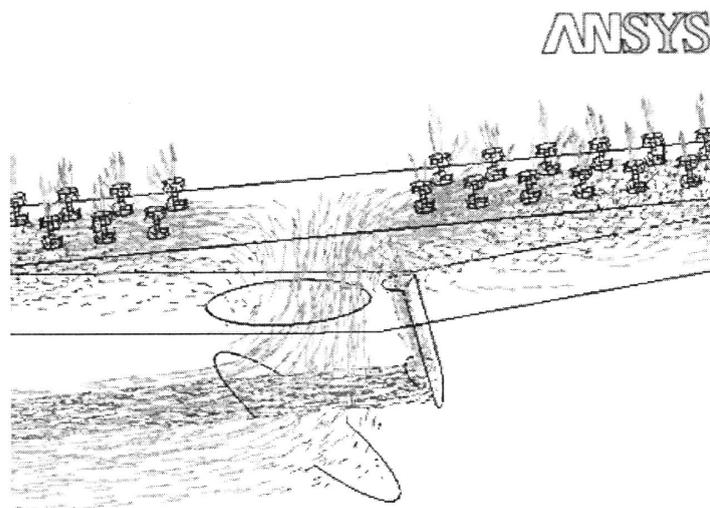


图 4-18 速度矢量放大图

Figure 4-18 Enlargement of Velocity Vector

4.5 本章小结

本章首先对 CFX 做了一个简单的介绍, 然后基于 CFX 对洒水机主轴管道进行了仿真研究。详细的介绍了 CFX 中模型的建立, 网格划分以及添加边界条件, 以及管道的流体力学分析和仿真分析结果。在本章中首先对比了不同出水口方式的水流情况, 得到了在主轴的主管道正上方没有出水口的设计方案更合理。然后再对比不同的主管道直径的出水情况, 确定了主管道直径选择为 30mm。本章是整个的大论文的核心部分, 为设计提供理论基础。

5 全文总结与展望

5.1 总结

本文对大面积草坪洒水现状做了详细的调研,了解到目前草坪洒水主要是通过人工拖动水管或者是固定喷头来实现大面积草坪的洒水。本文主要设计了一种利用水压自动调节摇摆式洒水机,利用 CATIA 软件对洒水机进行了虚拟结构设计,然后根据流体力学知识进行计算,最后利用 CFX 软件进行分析。最后试制样机进行对草坪进行洒水实验,证明洒水机的洒水效果。本文主要完成了以下内容:

(1) 通过对洒水机的调研和学习机械设计方面相关知识,对洒水机进行了机构设计。

(2) 利用 CATIA 对洒水机进行了虚拟样机设计,确定了三维模型。

(3) 学习流体力学知识,利用流体力学对洒水机内部管道水流进行计算,初步检验设计是否能达到预期目标。

(4) 利用 CFX 软件仿真分析了主轴部件管道内的水流流动情况。分析了不同直径的管道的情况,然后通过对比分析各管道的速度矢量图和流线图,最终选择最为合适的管道直径。

5.2 展望

本文设计的洒水机涉及的知识面很广泛也相当的复杂,本人目前掌握的知识有限不能更进一步的对本文的设计做更深层次的阐述。今后会从以下几个方面更进一步的研究:

(1) 对洒水机的机构、尺寸、材料等进一步优化,方便大批量化加工。

(2) 该洒水机设计主要是用于大面积草坪洒水,所以在保证洒水覆盖面积的同时也要保证洒水的均匀性。

(3) 机械化是未来各项工作的趋势,所以需要洒水机进行改造,从而使得其移动更加方便。

参考文献

- [1] 刘建德, 柳小龙. 节水灌溉技术与应用[M]. 兰州大学出版社, 2007.
- [2] 李宗尧, 缴锡云. 节水灌溉技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [3] 刘彬, 熊青山. 扇形区域洒水机射流元件试验研究[J]. 液压与气动, 2011, (11): 51-53.
- [4] 熊青山, 彭振斌, 殷琨, 刘静. 射流元件损坏机理试验研究及分析 [J]. 水文地质工程地质, 2004, (05): 97 -100.
- [5] 马汝涛, 徐义. 射流元件及其应用[J]. 液压与气动, 2008, 02: 82-85.
- [6] 熊青山, 秦亮, 张小春. 喷嘴宽度对凹凸劈射流元件切换性能影响模拟试验研究 [J]. 矿山机械, 2005, 33(11): 9 - 11.
- [7] 汪国胜, 王国丽. 复杂流体通道的流体分析与检测[J]. 液压与气动, 2003, (5): 42-45.
- [8] 路甬祥, 胡大紘. 电液比例控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [9] 吉林工业大学, 等. 工程机械液压与液力传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [10] 王中发. 实用机械设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [11] 姚新. 液压泵压力脉动分析及衰减措施[J]. 机床与液压, 2004, (8): 171-172.
- [12] 王占林. 飞机高压液压能源系统[M]. 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [13] 郭生荣等. 直轴式恒压泵的脉动分析与研究[C]. 中国航空学会控制与应用第十届学术年会论文集, 2003, 325-328.
- [14] Mawhinney, JY. The Effects of Moisture Content, Compression Speeds, and Axes on Mechanical Properties of Walnut Cultivars [J]. Food Bioprocess Technol, 2011, 4: 1288 - 1295.
- [15] R. Bernik, D. Stajnik, M. Lakota. Advanced transport phenomena fluid mechanics and convective transport processes [M]. Cambridge University Press, 2007
- [16] Hu W, Schroeder M. Starr A. G A knowledge-based real-time diagnostic system for PLC controlled manufacturing system[J]. IEEE SMC' 99 Conference Proceedings, 1999(4): 5~8
- [17] Clarke S. J. Safety considerations in using IEC1131-3 programming languages[J]. Open Control in the process and manufacturing Industries, 1998(5): 16~19
- [18] Dick Johnson. Product focus programmable logic controllers[J]. control Engineering, 2002. 49(8). - 43-44

- [19] 李树春, 张瑞乾, 苏功鹤.CATIA 机械设计及实例解析[M].北京: 机械工业出版社, 2006
- [20] 宋成.CATIA V5 实用教程[M].北京: 北京大学出版社, 2008.
- [21] 周仙娥.基于 CATIA 的数控机床加工仿真的研究与开发[D].沈阳: 沈阳航空工业学院, 2008。
- [22] 白桦, 鲍东杰.流体力学泵与风机[M].武汉理工大学出版社, 2008
- [23] 陈少.三次 NURBS 曲线的插值与应用[J].机械科学与技术, 2001,20(5): 692,693.
- [24] 单岩, 谢龙汉.CATIA V5 机械设计[M].北京: 清华大学出版社, 2004。
- [25] 张婕.基于 CATIA 二次开发的锥形石英灯加热参数化设计[J].科学技术与工程, 2011,21(12): 6114-6117。
- [26] 周桂生, 陆文龙.CATIA 二次开发技术研究与应用[J].机械设计与制造, 2010,19(3): 81-83.
- [27] 江洪, 李仲兴, 陆利锋.CATIA 基础教程[M].北京: 机械工业出版社, 2005。
- [28] 周雪漪.计算水力学[M].北京: 清华大学出版社, 1995。
- [29] 张鸣远, 景思睿, 李国军.高等工程流体力学[M].西安: 西安交通大学出版社, 2006。
- [30] 陶文铨.数值传热学[M].西安: 西安交通大学出版社, 2001。
- [31] 郭鸿志.传输过程数值模拟[M].北京: 冶金工业出版社, 1998。
- [32] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京: 清华大学出版社, 2005:7-10。
- [33] H.K.Versteeg,W.Malalasekera,An introduction to Computational Fluid Dynamics:The Finite Volume Method.Wily ,New York,1995。
- [34] Fluent Inc., FLUENT User's Guide[M]. Fluent Inc., 2003。
- [35] B.E.Launder,D.B.Spalding,Lectures in Mathematical Models of Turbulence.Academic Press, London, 2002。
- [36] 徐正坦, 马金花.流体力学[M].北京: 化学工业出版社, 2009。
- [37] 谢龙汉, 赵新宇.ANSYS CFX 流体分析及仿真[M].北京: 电子工业出版社, 2013。
- [38] 丁源, 吴继华.ANSYS CFX14.0 从入门到精通[M].北京: 清华大学出版社, 2013。
- [39] 纪兵兵, 陈金瓶.ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M].北京: 中国水利水电出版社, 2012。
- [40] 李明高, 李明.ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例[M].北京: 机械工业出版社, 2012。
- [41] 宋学官, 蔡林, 张华.ANSYS 流固耦合分析与工程实例[M].北京: 中古水利水电出版社, 2012。

致谢

又是一年毕业季，又是一年离别时，做为安徽农业大学的一名学子我即将离开母校的怀抱。我在农大度过了本科和研究生的六年时间，在这六年期间我留下了很多美好的回忆，是母校的领导和老师们教育我成长成才，在此表达我最诚恳的感激和谢意。

在论文撰写的过程中一直是在我的导师蒋德云教授的耐心的指导下完成的，蒋老师对我这两年的学习以及工作给予了很大的支持与鼓励。

蒋老师他知识渊博、治学严谨，平时对待学生学习方面要求非常严格，总是把科学研究放在第一位，但在生活方面总是给我们很多的关怀和鼓励。虽然即将退休，但是在对待工作方面依然是一丝不苟，一直是我们的楷模。这两年来，蒋老师对我的学习、生活和工作等多方面给予了帮助与指导，是一位十分优秀、称职的好导师。

刘素梅副教授是我从本科开始到研究生阶段一直非常感激的以为恩师，是她给我机会送我出去培训，让我学会了CATIA、ANSYS这些软件，同时还辅导我学习流体力学的知识，而我的整个研究生阶段的课题都是以这些知识为平台进行下去的。而且刘老师在我工作生活中也给予很大帮助，我十分感谢刘老师。

孔晓玲教授在我研究生学习期间给予了我很大的帮助，她以其严谨的科学研究态度一直深深的影响着我们，教导着我们。孔老师对我的培养是尽心尽力，除了在学习上给予我很大的帮助外，在我个人的生活等方面的照顾都做到了无微不至，是一位和蔼可亲十分值得我尊敬的导师。

同时我还要感谢实验室里的各位师兄姐妹，包括孙斌、郝凤佩、张旭李新红、汪莲莲等，正是与他们的相处互帮互助，共同学习共同进步，使得我的研究生期间生活丰富多彩。

沈一名
2014年4月25日

作者简介

沈一名，男，1988年10月出生，安徽庐江人。2012年7月毕业于安徽农业大学工学院机械设计制造及其自动化专业，获得工学学士学位。2012年9月攻读安徽农业大学农业机械化专业硕士研究生至今。

攻读硕士期间研究成果

1. 刘素梅, 孔晓玲, 蒋德云, 沈一名. 一种草坪洒水机发明专利, 已授权.