

申请上海交通大学硕士学位论文

基于农业物联网和多物理场仿真的智能温室监测与控制研究

论文作者 \_\_\_\_\_ 高浩天 \_\_\_\_\_

学 号 \_\_\_\_\_ 1140359026 \_\_\_\_\_

导 师 \_\_\_\_\_ 黄震宇副教授 \_\_\_\_\_

专 业 \_\_\_\_\_ 仪器仪表工程 \_\_\_\_\_

答辩日期 \_\_\_\_\_ 2016 年 12 月 17 日 \_\_\_\_\_

Submitted in total fulfillment of the requirements for the degree of Master  
in Instrument

# Greenhouse Monitor

GAO HAOTIAN

Advisor

Associate Prof. HUANG ZHENYU

SCHOOL OF ELECTRONICS AND ELECTRIC ENGINEERING

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

SHANGHAI, P.R.CHINA

Dec. 17th, 2016

# 上海交通大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：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。除文中已经注明引用的内容外，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成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_年 \_\_\_\_\_月 \_\_\_\_\_日

## 上海交通大学 学位论文版权使用授权书

本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，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通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。

本学位论文属于

保 密 ☐，在 \_\_\_\_\_ 年解密后适用本授权书。

不保密 ☐。

(请在以上方框内打√)

学位论文作者签名：\_\_\_\_\_

指导教师签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_年 \_\_\_\_\_月 \_\_\_\_\_日

日 期：\_\_\_\_\_年 \_\_\_\_\_月 \_\_\_\_\_日

## 基于农业物联网和多物理场仿真的智能温室监测与控制研究

### 摘 要

上海交通大学是我国历史最悠久的高等学府之一，是教育部直属、教育部与上海市共建的全国重点大学，是国家“七五”、“八五”重点建设和“211工程”、“985工程”的首批建设高校。经过115年的不懈努力，上海交通大学已经成为一所“综合性、研究型、国际化”的国内一流、国际知名大学，并正在向世界一流大学稳步迈进。

十九世纪末，甲午战败，民族危难。中国近代著名实业家、教育家盛宣怀和一批有识之士秉持“自强首在储才，储才必先兴学”的信念，于1896年在上海创办了交通大学的前身——南洋公学。建校伊始，学校即坚持“求实学，务实业”的宗旨，以培养“第一等人才”为教育目标，精勤进取，笃行不倦，在二十世纪二三十年代已成为国内著名的高等学府，被誉为“东方MIT”。抗战时期，广大师生历尽艰难，移转租界，内迁重庆，坚持办学，不少学生投笔从戎，浴血沙场。解放前夕，广大师生积极投身民主革命，学校被誉为“民主堡垒”。

新中国成立初期，为配合国家经济建设的需要，学校调整出相当一部分优势专业、师资设备，支持国内兄弟院校的发展。五十年代中期，学校又响应国家建设大西北的号召，根据国务院决定，部分迁往西安，分为交通大学上海部分和西安部分。1959年3月两部分同时被列为全国重点大学，7月经国务院批准分别独立建制，交通大学上海部分启用“上海交通大学”校名。历经西迁、两地办学、独立办学等变迁，为构建新中国的高等教育体系，促进社会主义建设做出了重要贡献。六七十年代，学校先后归属国防科工委和六机部领导，积极投身国防人才培养和国防科研，为“两弹一星”和国防现代化做出了巨大贡献。

**关键词：** 上海交大 饮水思源 爱国荣校

## **Greenhouse Monitor**

### **ABSTRACT**

An imperial edict issued in 1896 by Emperor Guangxu, established Nanyang Public School in Shanghai. The normal school, school of foreign studies, middle school and a high school were established. Sheng Xuanhuai, the person responsible for proposing the idea to the emperor, became the first president and is regarded as the founder of the university.

During the 1930s, the university gained a reputation of nurturing top engineers. After the foundation of People's Republic, some faculties were transferred to other universities. A significant amount of its faculty were sent in 1956, by the national government, to Xi'an to help build up Xi'an Jiao Tong University in western China. Afterwards, the school was officially renamed Shanghai Jiao Tong University.

**KEY WORDS:** SJTU, master thesis, XeTeX/LaTeX template

## 目 录

插图索引	v
表格索引	vi
算法索引	vii
主要符号对照表	viii
<b>第一章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 国内研究现状	2
1.2.2 国外研究现状	2
1.3 论文的主要内容与章节安排	3
1.3.1 研究内容和创新点	3
1.3.2 章节安排	4
<b>第二章 基于农业物联网的智能温室架构</b>	<b>5</b>
2.1 农业物联网简介	5
2.1.1 物联网概念	5
2.1.2 物联网的特征及内涵	5
2.1.3 物联网在农业中的应用	6
2.1.4 农业物联网的特点	6
2.2 系统整体架构设计	7
2.2.1 物联网层次定义	7
2.2.2 智能温室整体架构设计	7
2.3 感知控制层	10
2.4 网络传输层	11
2.5 应用层	11
2.6 终端接入层	11
<b>第三章 智能温室监测与控制系统</b>	<b>12</b>
3.1 监测与控制系统硬件	12
3.2 监测与控制系统软件	12

<b>第四章 温室计算流体力学仿真及验证</b>	<b>13</b>
4.1 温室环境 CFD 建模	13
4.1.1 理论基础	13
4.1.2 温室对象	13
4.1.3 几何建模	13
4.1.4 多物理场	13
4.1.5 边界条件	13
4.1.6 网格划分和求解步骤	13
4.2 机械通风实验	13
4.2.1 实验方案	13
4.2.2 实验结果	13
4.3 模型验证	13
4.4 温室机械通风过程分析	13
<b>第五章 智能温室的实践与应用</b>	<b>14</b>
5.1 智能温室远程监测与控制系统应用	14
5.2 传感器测点位置选择与优化	14
5.3 机械通风控制策略优化设计	14
<b>第六章 总结与展望</b>	<b>15</b>
6.1 研究总结	15
6.2 研究展望	15
<b>附录 A Maxwell Equations</b>	<b>16</b>
<b>参考文献</b>	<b>17</b>
<b>致 谢</b>	<b>19</b>
<b>攻读学位期间发表的学术论文</b>	<b>20</b>
<b>攻读学位期间参与的项目</b>	<b>21</b>



## 插图索引

2-1 物联网的基本构成 . . . . .	5
2-2 物联网层次架构 . . . . .	8
2-3 智能温室系统整体架构 . . . . .	9
2-4 智能温室系统整体架构 . . . . .	10

## 表格索引

## 算法索引

## 主要符号对照表

$\epsilon$	介电常数
$\mu$	磁导率
$\epsilon$	介电常数

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景和意义

自古以来，我们中国的祖先就知道“民以食为天”“粮食定，天下定”这一治国理政之道<sup>[1]</sup>，中国作为一个人口大国，解决全国人民的粮食食物问题是关系到国计民生的根本问题。根据农业科学院预测到 2050 年我国的人口将超过 15 亿，人口的大量增加也必然带来粮食需求量的猛增，要满足人口增长对粮食的需求，每年至少需要多生产 1.2 亿吨粮食。随着我国经济的飞速发展和人们生活水平的提高，人们不再仅仅关注于温饱的问题，更加追求品质生活，更加关注食品的安全、营养和多样<sup>[2,3]</sup>。随之而来的，农业生产在不断扩大生产总量的同时也需要不断升级产业结构，以提供更加安全和高品质农副产品。

但是我国目前的农业生产的总体技术水平落后，现代化和信息化水平较低。农村的城镇化导致我国可用耕地面积不断减少，农村劳动力大量涌入城镇<sup>[4]</sup>，务农人口急剧减少，农业生产人员逐步呈现老龄化和副业化趋势<sup>[5]</sup>，传统的农业生产模式已经难以维持下去，这必然会促使农业生产者加大农药化肥产品的使用，食品安全受到前所未有的挑战，这与人民日益增长的对高品质安全食品的需求产生了难以消除的矛盾。同时随着中国市场的逐步开放，国内农产品市场与国际市场的竞争也在不断加剧。另一方面，我国还存在水资源紧缺、幅员辽阔但可用农业土地较少、生产能耗较高、基础设施建设不完善等问题。

为了解决这一系列问题，《国民经济和社会发展的第十三个五年规划纲要》提出要推进农业现代化，并指出“农业是全面建成小康社会和实现现代化的基础，必须加快转变农业发展方式，着力构建现代农业产业体系、生产体系、经营体系，提高农业质量效益和竞争力，走产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的农业现代化道路”，着重提出要推进农业物联网应用，提高农业信息化、智能化和精准化水平。

农业现代化的一个重要体现就是实现现代化的设施农业<sup>[6]</sup>。温室作为设施农业的重要组成部分，可以减少自然环境对于农业生产的限制，合理高效利用生产资源，人为地创造适宜的农业生产环境，提高农作物产量和质量，提高农业生产集约化程度。但是目前国内温室大多停留在电气化及以下水平，依靠农业生产者的经验对温室环境进行人工控制或电气化控制。已经实现的温室自动化监控系统多为本地监控，智能化和网络化程度较低，农业生产人员需要到现场才能获取相关数据，不便于生产应用和科学研究<sup>[7]</sup>。随着科技的发展进步，农业物联网为农业生产环境监控提供了新思路，通过物联网技术、传感器技术、互联网技术等先进的技术手段的综合运用可以实现农业环境的远程监测和控制，从而实现农业管理的智能化、网络化、综合化、多样化，是实现农业现代化的关键技术之一<sup>[8-10]</sup>。

本文课题来源于《现代农业装备与设施的研发》（沪农科攻字（2009）第 8-1 号），上海市 2009 科技兴农重点攻关项目，由上海市农业科学委员会主导并开展工作。随着近年来物联网技术、网络技术、云服务技术和智能终端的快速发展，本文综合运用物联网技术、无线传感技术和多物理场仿真技术等多领域前沿技术，设计并实现了一套基于物联网和计算流体力学仿真的智能温室监测与控

制系统,该系统可远程监测和控制温室环境,让农业生产管理人员足不出户即可远程查看当前温室内的环境数据,通过视频查看当前温室内的实时情况,同时可通过远程操作温室内的作动器实现对温室内环境参数的控制。该系统还可结合种植作物的需求和当前温室内的实时环境根据智能化的温室自动控制策略实施精准的温室环境控制,从而科学高效的管理温室。消费者也可通过该系统了解到农作物的生产环境,一方面可以让消费者吃的安心放心,另一方面也可让消费者农业生产进行监督,促进农业生产健康发展。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国内研究现状

我国是一个传统的农业大国,作为温室栽培的发源地,早在两千多年前就开始使用保护措施种植蔬菜。进入 21 世纪以来,我国的温室栽培技术得到快速提升,温室总面积不断增加,占据世界温室总面积的 85% 以上,是温室栽培第一生产大国<sup>[11]</sup>。我国在现代温室方面的研究开始于 20 世纪 30 年代,日光温室首先在辽宁省应用于栽培蔬菜,随后我国从日本引进塑料薄膜技术开始中小拱棚的栽培,之后我国的温室一直处于发展缓慢的小规模低水平状态,直到上世纪 70 年代末,我国引进了一些国外的先进技术,我国的设施农业展开了新的篇章<sup>[12]</sup>。上世纪 80 年代开始,我国研究温室环境控制系统,并开始引入计算机控制,温室环境的控制效果得到了有效的改善<sup>[13]</sup>。上世纪 90 年代后,我国在引进国外先进技术的基础上开始自主研制温室环境监控系统。上海交通大学、中国农业大学、中科院、农科院等科研院所和高校都研制出了具有不同特点的温室控制系统。

经过多年的研究和时间,我国在现代温室方面的水平已经有了很大程度上的提高,但是在很多方面仍然落后于国际领先水平,主要体现在基础研究薄弱、设施结构不合理、装备和调控能力差、信息化和集约化程度低等方面<sup>[14,15]</sup>,在温室环境的精准化、智能化控制等方面有较大的发展空间。

### 1.2.2 国外研究现状

美国、日本、荷兰等发达国家对于现代温室技术的研究起步较早,发展到今天,已经将计算机监控系统大规模应用到温室自动化生产中,在设备装备、环境控制和栽培技术等方面都处于国际领先水平。

西欧是世界现代温室的发源地,虽然西欧国家的设施农业面积在世界设施农业总面积中占比不高,但是其现代化水平、生产质量和生产能力都非常高<sup>[16]</sup>。荷兰是其中比较典型的设施农业非常发达的国家之一,主要对花卉和蔬菜进行专业化集约化生产,花卉和蔬菜出口量均居世界第一,有“欧洲菜园子”之称,其温室主要以玻璃温室为主,约占世界玻璃温室总面积的 26% 以上<sup>[17,18]</sup>,农业生产的自动化程度很高,生产效率很高位居世界第一<sup>[19]</sup>,其温室配套设备在满足内需的同时还大量出口到国外<sup>[20]</sup>。

美国的温室主要为连栋玻璃温室,现代化水平非常高。美国是最早将计算机技术投入到温室生产管理中的国家,通过政府的大力支持,采取了一系列的优惠政策,为农业现代化和信息化的发展创造了良好的氛围和环境。目前,美国约有 82% 的温室采用计算机进行环境控制,27% 的农民还运用的网络技术<sup>[21]</sup>。这样虽然提高了生产成本,但是也极大程度上给农业生产者带来了良好的经济效益<sup>[16]</sup>。

以色列是典型的中东国家，气候干旱，水资源匮乏，但是以色列的设施农业却非常发达，创造了沙漠中的片片绿洲，其开发的节水灌溉系统引入了计算机控制，可以精准控制水肥比例，处于世界领先水平，此外以色列对于作物生长机理的研究也比较深入，可据此建立合理的温室控制策略<sup>[16,22]</sup>，主要生产高质量的花卉和果蔬，不仅可以自给自足还大量出口国外，享有“欧洲厨房”的美誉<sup>[19]</sup>。

日本是一个资源非常匮乏的国家，且人口密度非常大，因此日本大力发展集约化、自动化的设施农业，主要生产果蔬和花卉，且依赖程度非常高<sup>[23]</sup>。日本是最先提出植物工厂的概念，突破了土地和环境的限制，利用自动控制技术、电子技术、生物技术、机器人和新材料可以实现作物的全年连续生产，对于解决全球粮食问题 and 环境问题有着重要的现实意义<sup>[24]</sup>。

由此可见，发达国家在设施农业和现代化温室方面的研究处于非常明显的领先地位，在温室管理中大面积采用计算机控制系统，自动化和集约化程度都较高，目前正在向更为先进的智能化、精准化和网络化的方向发展。

## 1.3 论文的主要内容与章节安排

### 1.3.1 研究内容和创新点

本文结合物联网技术和计算流体力学仿真技术，对温室智能化监测与控制系统展开研究，主要有以下五部分内容：

1. 适用于智能温室的农业物联网架构方案设计提出。
2. 针对温室机械通风三维全尺度瞬态及稳态计算流体力学仿真模型。
3. 针对南方地区典型的连栋塑料温室夏季机械通风实验与温室仿真模型验证。
4. 基于农业物联网的智能温室监测与控制系统的软件与硬件设计和实现。
5. 基于温室机械通风仿真模型的传感器测点位置选择与优化，及机械通风控制策略优化设计。

相比于已有的相关研究，本文具有如下创新点：

1. 本文根据农业生产环境的特殊性，通过分析温室监测与控制的特殊需求并参考物联网的标准框架，设计提出了一种适用于智能温室的农业物联网架构方案。设计并实现了基于该架构方案的智能温室远程监测与控制系统，并应用与连栋塑料温室，实现了对温室的智能感知、远程控制 and 智能控制，具有可靠性高、监测范围广、可灵活扩展、运行功耗低的优点，满足温室的智能运行和科学管理需求。
2. 为了解决我国南方地区夏季长期高温的恶劣天气对温室作物生长的严重影响，提高降温效果且减少通风能耗，本文以南方地区典型的连栋塑料温室为研究对象，针对温室机械通风，建立了三维全尺度瞬态及稳态计算流体力学仿真模型，研究了机械通风条件下温室内的气温变化和分布规律。通过在本文智能温室监测与控制系统平台上进行机械通风实验，验证了仿真模型瞬态和稳态计算的准确性和有效性。通过仿真模型模拟了室外高温条件下的风机数量、温室长度、入口温度和环境温度变化等参数对机械通风降温效果的影响程度，并模拟了不同数量风机启闭控制的降温效果，为智能温室监测和控制系统提供了优化的夏季机械通风控制策略，同时提供了优化的传感器测点布置策略，实现了以少量传感器测点数据准确反映大型温室气温分布。

### 1.3.2 章节安排

本文的章节结构安排如下：

第一章，绪论。介绍了本文课题的研究背景和研究意义、国内外在设施农业和现代化温室方面的研究进展和发展趋势、本文的主要研究内容和章节安排。

第二章，基于农业物联网的智能温室架构。介绍物联网，提出基于农业物联网的智能温室四层架构方案，并对每层结构进行阐述和设计。

第三章，智能温室监测与控制系统。详细介绍了基于本文农业物联网智能温室架构方案结合实际应用的具体实现，包括各层的硬件和软件实现。

第四章，温室计算流体力学仿真及验证。基于计算流体力学建立三维全尺度瞬态及稳态机械通风仿真模型，利用本文智能温室监测与控制系统进行机械通风实验，并通过实验结果对仿真模型进行了验证。

第五章，智能温室的实践与应用。详细介绍本文所设计实现的智能温室远程监测与控制系统在温室现场的实践与应用，以及温室仿真模型在实际应用中对于传感器测点位置选择优化作用和对温室机械通风控制策略的优化设计。

第六章，总结与展望。总结研究内容，展望研究内容的发展前景和改进方向。



## 第二章 基于农业物联网的智能温室架构

### 2.1 农业物联网简介

#### 2.1.1 物联网概念

物联网的概念最早来源于比尔·盖茨于 1995 年发表的《The Road Ahead (未来之路)》一书中所提及的 Internet of Things 的概念<sup>[25]</sup>，但是受限于当时的网络技术、传感器技术和智能硬件技术，并没有引起广泛的关注和重视<sup>[26]</sup>。直到 1999 年，麻省理工学院自动识别中心 (Auto-ID Center) 率先提出“物联网”的概念，主要建立在物品编码、RFID 技术和互联网的基础上<sup>[27]</sup>。2005 年国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 在《ITU Internet Report 2005: The Internet of Things》中正式提出了“物联网”的概念<sup>[26,28]</sup>。

为了解释物联网这一概念，首先要了解这个词是如何被创造的，物联网之父 Kevin Ashton 曾指出，互联网中的大部分数据都是通过人为的控制进入系统中的，在系统中，人所充当的角色无非是一种效率低下、易出错、对数据的数量和质量有所限制的路由器，并在一定的情况下可以对数据进行解释和修正，但是从另一个角度如果系统如果能够抛开人的限制直接连接到互联网，通过传感器获取现实世界的数据并对现实世界进行一定的控制，这样会变得更加高效、丰富和准确。物联网也即是万物相连的互联网，我们连接物体所获得的一切都是由互联网和物体自身控制，而非人<sup>[29]</sup>。因此，物联网是建立在互联网的基础之上的，是互联网的延伸和拓展，而信息的获取和交换从人为控制扩展到了物和物之间自主进行。我们可以用一个非常简单的组成关系来描述物联网的基本构成，如 2-1 所示。

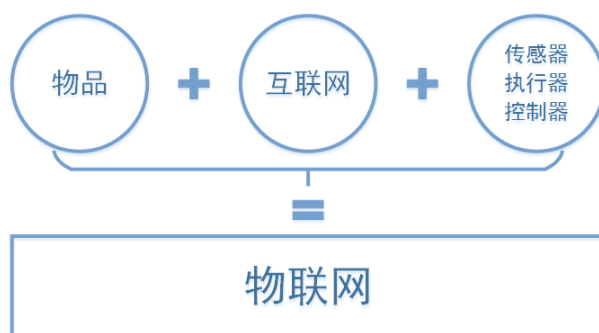


图 2-1 物联网的基本构成

Fig 2-1 Composition of the Internet of Things

#### 2.1.2 物联网的特征及内涵

根据物联网的概念、物联网和互联网的联系与区别，结合国内外专家的阐述，物联网具有如下的特征和内涵：

1. 物联网广泛运用了各种感知技术。物联网系统中包含大量不同类型的传感器，每个传感器都担任着连接万物的使命，连续不断的捕获和更新外界的实时数据。
2. 互联网是物联网的基础，物联网是建立在互联网上的网络，是互联网的延伸。物联网并不是一种全新的信息传递网络，其核心和基础仍是互联网，通过各种有线或者无线网络接入互联网进行物体信息的实时传递，实现物与物、人与物的实时交互，最终达到为人服务的目的。
3. 物联网自身也是一个智能系统，它不仅可以通过传感器获取数据，同样也具备智能分析处理的能力，对数据进行清洗筛选得到有意义的数据，然后通过控制器和执行器对物体进行智能控制。
4. 物联网即是未来的互联网。狭义上无论是否接入互联网，只要实现物与物通过传感网络相连的网络都属于物联网范畴，但是我们希望实现的不仅仅是物与物的局部信息传递，而是最终要实现所有的人和世间万物的互连互通，这也与未来的互联网的发展趋势是一致的。

### 2.1.3 物联网在农业中的应用

物联网被称为是继计算机、互联网之后，第三次世界范围内的信息产业浪潮<sup>[30]</sup>。“十三五”规划纲要也指出要加快构建高速、移动、安全、泛在的新一代信息基础设施，推进信息网络技术广泛运用，形成万物互联、人机交互、天地一体的网络空间，推进物联网感知设施规划布局，发展物联网开环应用。同时指出要推进农业现代化和信息化建设，推动信息技术与农业生产管理、经营管理、市场流通、资源环境等融合；实施农业物联网区域试验工程，推进农业物联网应用，提高农业智能化和精准化水平；推进农业大数据应用，增强农业综合信息服务能力。物联网技术的发展为实现农业的现代化、智能化、信息化和精准化带来新的解决方案和发展机遇。

目前，物联网技术在工业领域已经得到了较为广泛的应用，农业领域的物联网应用还处在研究发展阶段。近十年来，欧美等发达国家相继开展了农业物联网的相关研究，实现了农业生产管理、农业资源利用和精准农业的实践推广，推动了农业物联网的发展。我国也在农业物联网相关方面开展了积极的研究工作，主要实现农业生产环境、农业资源、生产和流通过程的信息获取和通信，形成产前合理规划提高资源利用率，产中现代化管理提高生产效率、安全生产、节约成本提高效益，产后高效流通和安全溯源的农业物联网一条龙解决方案，但是产品多处于试验阶段，产品的稳定性、可靠性、低功耗等性能参数上与国际领先的产品还存在一定的差距。因此我国的农业物联网开发和研究工作还有很大的发展空间<sup>[31]</sup>。

### 2.1.4 农业物联网的特点

农业的生产环境和工业环境相比，有其自身的特点和限制，这也决定了农业物联网所处的物理环境和网络条件与工业物联网有着本质的区别。因此农业物联网有其自己的特点和特殊的需求，主要有如下几点：

1. 农业生产的单位收益不高，农田面积往往较大，投入成本有限，此外，大面积在农田内布置传感器测点会给农业作业，尤其是农业机械化作业带来干扰，这就决定了农业物联网中不可能密集布置传感器测点。因此，农业物联网在大规模农田中应用时，往往布置稀疏的传感器测点，即通常情况下，根据实际的生产管理需要和生产环境的实际情况将农田划分为若干个

小区域，近似地认为各个区域内环境相同，在每个区域内布置一套传感器设备。这就要求农业物联网具有远距离传输和可灵活扩展的能力。

2. 农业物联网工作环境往往面积较大且地形复杂，不易于值守，也无市电供电。因此，在要求各节点具有远距离传输能力的同时还要求功耗尽量小，能够依靠环境能源实现长期不间断的工作。
3. 农业生产环境恶劣，设备经常长时间工作在高温、高湿、低温等极端环境下，且在进行无线通信时易受作物植被的干扰，这就对农业物联网设备的稳定性、可靠性、自诊断和免维护能力提出了要求。

## 2.2 系统整体架构设计

### 2.2.1 物联网层次定义

根据一般的物联网架构层次定义<sup>[32,33]</sup>，物联网可分为感知层、网络层和应用层三层结构<sup>[34,35]</sup>，如2-2所示。感知层是物联网的核心部分，位于物联网三层结构的最底层，是信息采集的关键部分，是架设在人类世界和物理世界之间的桥梁，主要负责物联网系统的“感知”，相当于人类五官的功能，包含各种感应器件和感应器组成的网络两部分，可以对物体的各类属性和环境状态等数据信息进行动态感知、快速识别和信息采集。该层的核心技术包括射频技术、新兴传感技术、无线网络组网技术、现场总线控制技术等，涉及的核心产品包括二维码标签和识读器、RFID 标签和读写器、摄像头、GPS 终端、传感器、M2M 终端、各类网关等。

网络层是物联网的枢纽部分，位于物联网三层结构中的第二层，是信息传输的重要部分，其功能为“传送”，即通过通信网络进行信息传输。网络层作为纽带连接着感知层和应用层，它由各种私有网络、互联网、有线和无线通信网等组成，相当于人的神经中枢系统，负责将感知层获取的信息，安全可靠地传输到应用层，然后根据不同的应用需求进行信息处理。网络层包含接入网和传输网，分别实现接入功能和传输功能。传输网由公网与专网组成，典型传输网络包括电信网、广电网、互联网等；接入网包括无线接入、以太网接入等各类接入方式，实现底层的传感器网络、RFID 网络的接入。物联网的网络层基本上综合了已有的全部网络形式，来构建更加广泛的“互联”。

应用层位于物联网三层结构中的最顶层，主要负责处理各种信息处理。应用层与最低层的感知层一起，是物联网的显著特征和核心所在，应用层可以对感知层采集数据进行计算、处理和知识挖掘，从而实现对物理世界的实时控制、精确管理和科学决策。目前，其核心功能主要围绕数据的管理与处理，以及数据与各行业应用相结合。从结构上划分，物联网应用层主要包括物联网中间件、物联网应用和云计算。从物联网三层结构的发展来看，网络层已经非常成熟，感知层的发展也非常迅速，而应用层不管是从受到的重视程度还是实现的技术成果上，以前都落后于其他两个层面。但因为应用层可以为用户提供具体服务，是与我们最紧密相关的，因此应用层的未来发展潜力很大。

### 2.2.2 智能温室整体架构设计

根据一般物联网架构层次定义和农业生产的特殊需求，本文基于农业物联网的智能温室系统自底向上划分为感知控制层、网络传输层和应用层，另外为了兼容各类终端设备接入添加了终端接入层<sup>[35]</sup>，如2-3所示。



图 2-2 物联网层次架构

Fig 2-2 Architecture of the Internet of Things

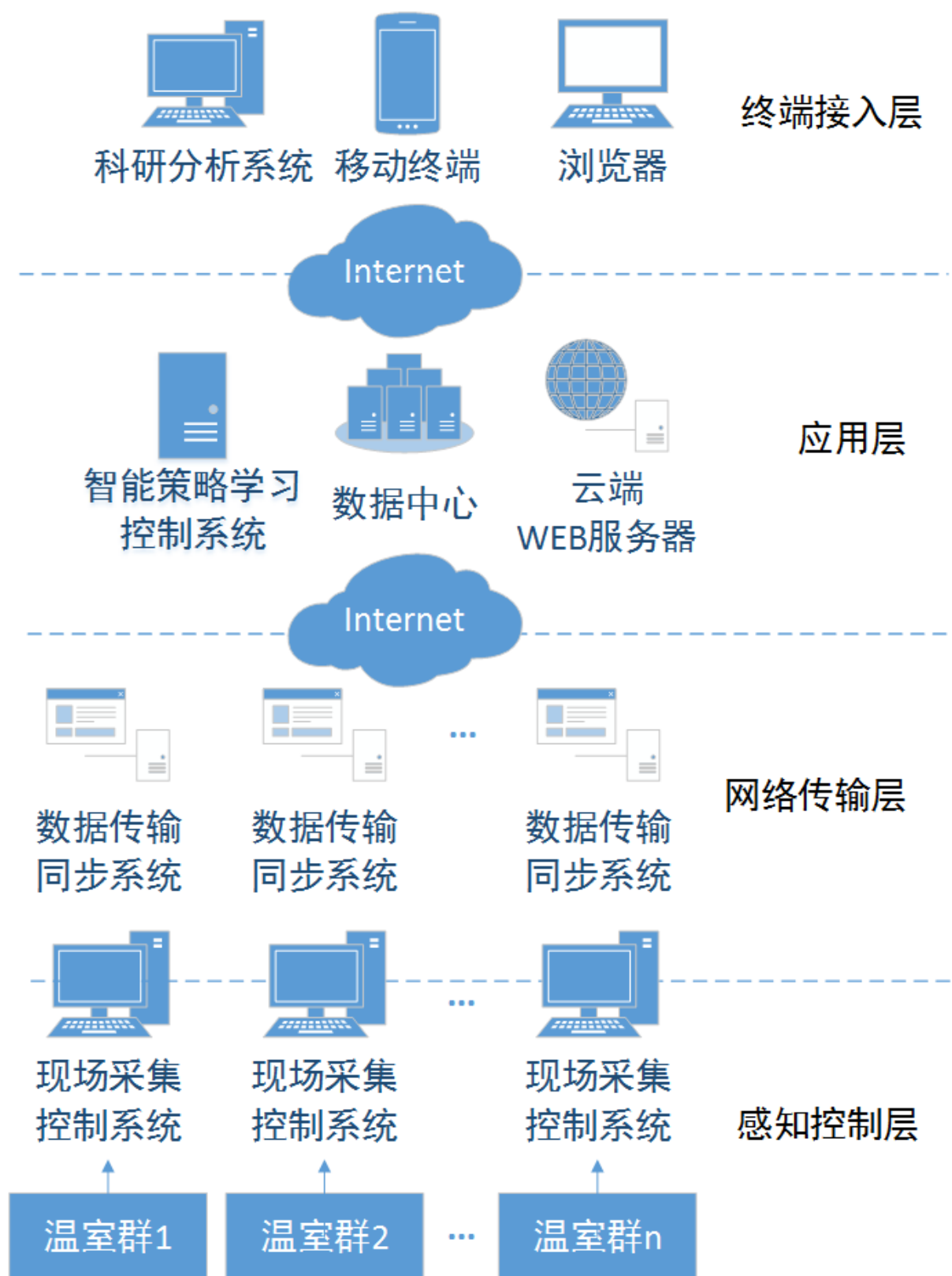


图 2-3 智能温室系统整体架构

Fig 2-3 Architecture of the intelligent greenhouse system.

## 2.3 感知控制层

感知控制层主要用于获取需要监测及用于控制的各类温室环境参数数据，已经对温室现场的作动器进行控制以达到控制温室内环境参数的目的。本层通过现场采集控制系统实现，其总体设计如2-4所示。针对农业特殊的生产环境，本层适合使用可靠性高、稳定性强、灵活性大、易于扩展的传感器网络采集温室环境参数数据，如基于 RS485 总线的传感器网络、基于 ZigBee 的无线传感器网络等。监测到当前温室环境后，系统需要通过控制温室内作动器的动作对温室内的环境加以控制，从而达到

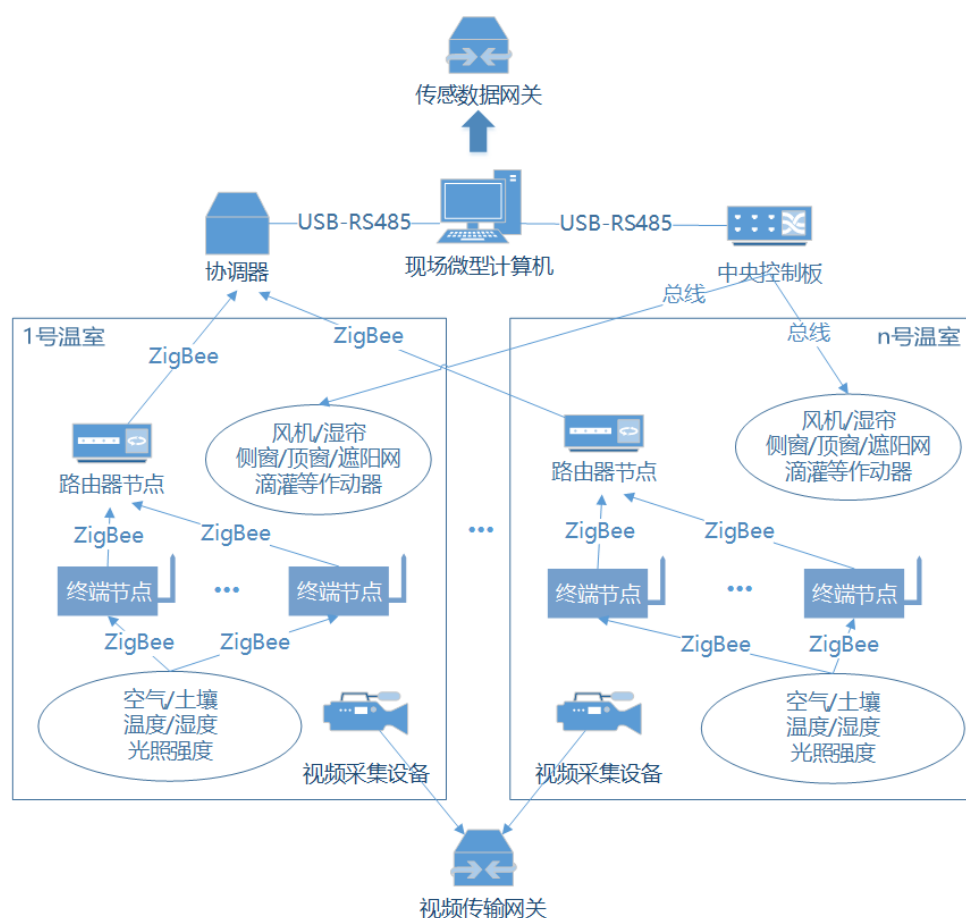


图 2-4 智能温室系统整体架构

Fig 2-4 Architecture of the intelligent greenhouse system.

到让温室环境更加适宜温室内作物生长的目的。因此本层还包括用于控制温室内作动器的中央控制板。为降低成本的同时提高设备的可靠性，本系统适合采用嵌入式计算机提供现场计算服务，同时兼用作网关服务，如基于 ARM 的微型计算机等。另外，为了增加对温室内环境的直观感知，本层添加了图像采集模块，包括图像采集设备和图像传输网关，该模块可在需要视频或图像监测的温室内使用。

## 2.4 网络传输层

## 2.5 应用层

## 2.6 终端接入层

## 第三章 智能温室监测与控制系统

### 3.1 监测与控制系统硬件

### 3.2 监测与控制系统软件



## 第四章 温室计算流体力学仿真及验证

### 4.1 温室环境 CFD 建模

#### 4.1.1 理论基础

#### 4.1.2 温室对象

#### 4.1.3 几何建模

#### 4.1.4 多物理场

#### 4.1.5 边界条件

#### 4.1.6 网格划分和求解步骤

### 4.2 机械通风实验

#### 4.2.1 实验方案

#### 4.2.2 实验结果

### 4.3 模型验证

### 4.4 温室机械通风过程分析

## 第五章 智能温室的实践与应用

### 5.1 智能温室远程监测与控制系统应用

### 5.2 传感器测点位置选择与优化

### 5.3 机械通风控制策略优化设计

## 第六章 总结与展望

### 6.1 研究总结

### 6.2 研究展望

## 附录 A Maxwell Equations

选择二维情况，有如下的偏振矢量：

$$\mathbf{E} = E_z(r, \theta) \hat{\mathbf{z}} \quad (\text{A-1a})$$

$$\mathbf{H} = H_r(r, \theta) \hat{\mathbf{r}} + H_\theta(r, \theta) \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (\text{A-1b})$$

对上式求旋度：

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \hat{\mathbf{r}} - \frac{\partial E_z}{\partial r} \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (\text{A-2a})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right] \hat{\mathbf{z}} \quad (\text{A-2b})$$

因为在柱坐标系下， $\bar{\mu}$  是对角的，所以 Maxwell 方程组中电场  $\mathbf{E}$  的旋度：

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{i} \omega \mathbf{B} \quad (\text{A-3a})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \hat{\mathbf{r}} - \frac{\partial E_z}{\partial r} \hat{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{i} \omega \mu_r H_r \hat{\mathbf{r}} + \mathbf{i} \omega \mu_\theta H_\theta \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (\text{A-3b})$$

所以  $\mathbf{H}$  的各个分量可以写为：

$$H_r = \frac{1}{\mathbf{i} \omega \mu_r} \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \quad (\text{A-4a})$$

$$H_\theta = -\frac{1}{\mathbf{i} \omega \mu_\theta} \frac{\partial E_z}{\partial r} \quad (\text{A-4b})$$

同样地，在柱坐标系下， $\bar{\epsilon}$  是对角的，所以 Maxwell 方程组中磁场  $\mathbf{H}$  的旋度：

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\mathbf{i} \omega \mathbf{D} \quad (\text{A-5a})$$

$$\left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right] \hat{\mathbf{z}} = -\mathbf{i} \omega \bar{\epsilon} \mathbf{E} = -\mathbf{i} \omega \epsilon_z E_z \hat{\mathbf{z}} \quad (\text{A-5b})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} = -\mathbf{i} \omega \epsilon_z E_z \quad (\text{A-5c})$$

由此我们可以得到关于  $E_z$  的波函数方程：

$$\frac{1}{\mu_\theta \epsilon_z} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{\mu_r \epsilon_z} \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + \omega^2 E_z = 0 \quad (\text{A-6})$$

## 参考文献

- [1] 陈云。陈云文选(第3卷)[M]。北京:人民出版社,1995:125。
- [2] 封志明。中国未来人口发展的粮食安全与耕地保障[J]。人口研究,2007,31(2):15-29。
- [3] 赵其国,杨劲松,周华。保障我国“耕地红线”及“粮食安全”十字战略方针[J]。土壤,2011,43(5):681-687。
- [4] 郁俊莉,韩文秀。复杂大系统的可持续发展与混沌研究[J]。地质技术经济管理,2001,23(2):10-13。
- [5] 罗朝斌,赖钢。现代信息技术在农业科研中的应用及发展方向[J]。北方蚕业,2005,26(4):3-5。
- [6] 刘蕾。我国设施农业发展现状与对策分析[J]。农业科技与装备,2013,(4):57-58。
- [7] 周德乐,陈大跃,孙丽娟等。多点大棚环境参数检测系统的设计[J]。电气自动化,2013,35(4):9-11。
- [8] 周春松,白皓然,尚书旗等。基于物联网草莓生长环境远程监控系统的设计[J]。农机化研究,2014,(12):220-223。
- [9] 钟华辉。物联网款款步入现代温室[J]。北京农业,2011,(22):47-48。
- [10] 何芬,马承伟。中国设施农业发展现状与对策分析[J]。中国农学通报,2007,23(3):462-465。
- [11] 郭世荣,孙锦,束胜等。我国设施园艺概况及发展趋势[J]。中国蔬菜,2012,(9X):1-14。
- [12] 周长吉。现代温室工程[M]。化学工业出版社,2010。
- [13] 韩毅。基于物联网的设施农业温室大棚智能控制系统研究[D],2016。
- [14] 张震,刘学瑜。我国设施农业发展现状与对策[J]。农业经济问题,2015,(5):64-70。
- [15] 蒋卫杰,邓杰,余宏军。设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]。中国农业科学,2015,48(17):3515-3523。
- [16] 郭世荣,孙锦,束胜等。国外设施园艺发展概况、特点及趋势分析[J]。南京农业大学学报,2012,35(5):43-52。
- [17] Watson N. Estimated greenhouse area worldwide [EB/OL], 2010. <http://www.freshplaza.com>.
- [18] 吉红。自动控制在设施农业中的应用。农业资源与环境学报,2007,24(5):52-54。
- [19] 秦柳。国外设施农业发展的经验与借鉴[J]。世界农业,2015,(8):143-146。
- [20] Ernesto Tavoletti and Robbin Te Velde. Cutting Porter's Last Diamond: Competitive and Comparative (Dis)advantages in the Dutch Flower Cluster. Transition Studies Review, 2008, 15(2): 303-319.
- [21] Kacira M. Greenhouse production in US: status, challenges, and opportunities [C]. In: CIGR. Conference on Sustainable Bioproduction WEF. Tokyo: Tower Hall Funabori, 2011: 19-23.

- [22] 唐黎标. 以色列的农业温室. 湖南农业, 2003, (17): 22–22.
- [23] 杨春君. 设施农业发展研究. 农业科技与装备, 2010, (2): 15–17.
- [24] 胡永光, 李萍萍 and 堀部和雄. 日本的植物工厂及其新技术. 世界农业, 2002, (11): 44–46.
- [25] Bill Gates. The Road Ahead [M]. Viking Press Inc, 1995.
- [26] 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网技术及其应用 [M]. 科学出版社, 2016。
- [27] 黄峰达. 自己动手设计物联网 [M]. 电子工业出版社, 2016。
- [28] ITU Strategy and Policy Unit(SPU). ITU Internet Report 2005: The Internet of Things. International Telecommunication Union(ITU), 2005.
- [29] Peter Waher. Learning Internet of Things [M]. Packt Publishing, 2015.
- [30] 凌志浩. 物联网技术综述. 自动化博览, 2010, (S1): 11–14.
- [31] 陈威 and 郭书普. 中国农业信息化技术发展现状及存在的问题. 农业工程学报, 2013, (22): 196–205.
- [32] Changhui Yu. Research and design of logistics management system based on internet of things. In: Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011 2nd International Conference on, 2011: 6314–6317.
- [33] 刘强, 崔莉, 陈海明. 物联网关键技术与应用. 计算机科学, 2010, 37(6): 1–4。
- [34] 韩毅, 许春雨, 宋建成 *et al.* 基于物联网的日光温室智能监控系统设计与实现. 北方园艺, 2016, (9): 207–210.
- [35] 王怀宇, 赵建军, 李景丽 *et al.* 基于物联网的温室大棚远程控制系统研究. 农机化研究, 2015, (1): 123–127.

## 致 谢

感谢所有测试和使用交大学位论文  $\text{\LaTeX}$  模板的同学!

感谢那位最先制作出博士学位论文  $\text{\LaTeX}$  模板的交大物理系同学!

感谢 William Wang 同学对模板移植做出的巨大贡献!

## 攻读学位期间发表的学术论文

- [1] CHEN H, CHAN C T. Acoustic cloaking in three dimensions using acoustic metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91:183518.
- [2] CHEN H, WU B I, ZHANG B, et al. Electromagnetic Wave Interactions with a Metamaterial Cloak[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(6):63903.



## 攻读学位期间参与的项目

- [1] 973 项目 “XXX”
- [2] 自然基金项目 “XXX”
- [3] 国防项目 “XXX”