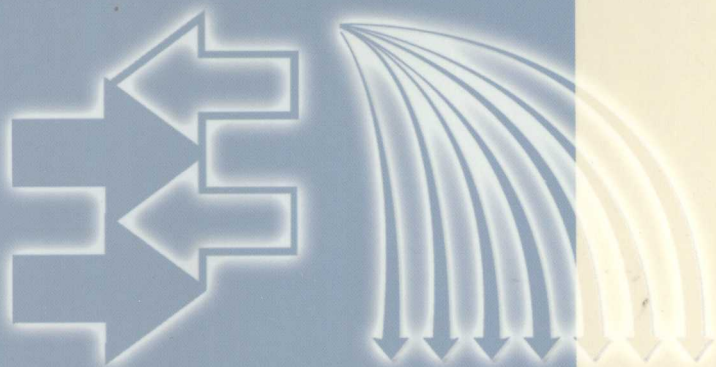




全国高等农林院校“十一五”规划教材

农业设施设计基础

陈青云 主编



 中国农业出版社

全国高等农林院校“十一五”规划教材

农业设施设计基础

陈青云 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

农业设施设计基础/陈青云主编. —北京: 中国农业出版社, 2007. 1

全国高等农林院校“十一五”规划教材

ISBN 978-7-109-10611-6

I. 农... II. 陈... III. 农业建筑—设计—高等学校—教材 IV. TU26

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 150635 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

责任编辑 郑剑玲

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

开本: 720mm×960mm 1/16 印张: 20

字数: 355 千字

定价: 26.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

“设施农业科学与工程”本科系列 教材编写委员会

主任委员 邹志荣（西北农林科技大学）

副主任委员（按姓氏笔画排列）

王秀峰（山东农业大学）

李天来（沈阳农业大学）

陈青云（中国农业大学）

郭世荣（南京农业大学）

委员（按姓氏笔画排列）

朱世东（安徽农业大学）

吴凤芝（东北农业大学）

别之龙（华中农业大学）

邵孝侯（河海大学）

黄丹枫（上海交通大学）

崔世茂（内蒙古农业大学）

本书编写人员

主 编 陈青云 (中国农业大学)

副主编：佟国红 (沈阳农业大学)

梁宗敏 (中国农业大学)

编 者 (按姓氏笔画排序)

马承伟 (中国农业大学)

曲 梅 (中国农业大学)

佟国红 (沈阳农业大学)

陈青云 (中国农业大学)

周长吉 (中国农业工程设计研究院)

袁巧霞 (华中农业大学)

徐志刚 (南京农业大学)

梁宗敏 (中国农业大学)

总 序

设施农业是在相对可控的环境条件下,利用必要的设施和设备,实现集约化高效可持续发展的现代农业生产方式。随着现代设施设备和信息技术的不断更新,设施农业成为现代农业发展的典型代表。世界各国竞相投入,大力发展设施农业,提高本国的农业发展水平。我国目前的设施农业面积达到 250 万 hm^2 ,成为全球设施农业大国之一。但要成为设施农业强国,不断缩小与农业发达国家在农业技术装备水平和农产品国际竞争力方面的差距,仍需投入大量的人力物力,特别是要突破设施农业人才短缺对我国设施农业发展的瓶颈制约,开展以培养一大批优秀的设施农业专门人才和高素质劳动者的设施农业高等教育,势在必行。

2002 年,教育部颁布了新的专业目录,增加了“设施农业科学与工程”本科专业,培养学生掌握生物学、园艺学、农业工程的基本知识,对学生进行设施设计与建造、设施环境调控、设施设备开发与应用、设施农业生产经营与管理等方面的基本训练,使他们具有从事设施农业的技术推广与开发、工程设计、经营管理、教学与科研的基本素质和能力。设施农业学科迎来了发展的契机。

但由于设施农业学科属于新兴交叉学科,为了做好该学科的人才培养工作,还需开展大量的基础性学科建设工作,教材建设是其中之一。根据这种需要,中国农业出版社组织全国同行专家召开了教材建设研讨会,组建了“设施农业科学与工程”本科系列教材编写委员会。经讨论达成共识,本专业核心课程应包括设施农业栽培、设施农业工程和设施环境控制三部分内容,确定首批出版 11 本教材。这套教材以实施素质教育、培养学生的实践能力和创新能力为出发点,根据“设

施农业”是一个包含生物、工程、环境三方面内容的新兴交叉学科的特点组织素材，在教材中，新知识和新方法相互渗透，相互融合，浑然一体。这套教材的出版，标志着设施农业学科的理论体系基本得以确立，也反映出该学科的最新发展水平。

这套教材的出版在国内外尚属首创，解决了新专业教学急需。教材的编写是根据各院校和编者的优势安排的，但由于缺乏可以借鉴的经验，错误和纰漏在所难免，恳请广大读者和同行专家批评指正。

邹志荣

2006年10月于西北农林科技大学

前 言

农业设施设计基础是设施农业科学与工程专业的一门专业基础课。该专业的培养目标包括初步掌握温室等农业设施的设计、建造与施工,环境调控的理论与技术,这些知识是建立在材料力学、结构力学、流体力学、传热学、控制学等基础学科之上的。在设施农业科学与工程这一专业之内,要单独开设这些课程,从学时安排来看是不可能的,因此,特设本课程,将农业设施设计所涉及的最基本、最常用的基础知识融为一体。

农业设施种类繁多但它们有两点是共通的,即每种设施都由某种建筑及其附属设备构成,建筑物内的环境都有必要施行调控。如温室、畜禽舍、冷库等都是建筑物,要根据生产对象不同而分别对其温度、湿度、光照、气体成分、气流速度等施行单因子或多因子环境调控。因此,农业设施设计的基础知识主要就是与结构设计和光热环境有关的学科。根据这一要求,本教材设置了“流体”、“传热”、“力学”、“材料”、“电”等章节。其中“流体”包含了湿空气、空气调节与焓湿图、流体静力学与动力学、设施通风换气等内容。这些内容是温湿度环境调节的基础知识。“传热”包含了导热、对流与辐射传热,这些内容是进行设施保温、加温甚至降温设计,揭示设施热环境特性必不可少的基础知识。“力学”则包含了部分理论力学、材料力学与结构力学的内容,是进行设施结构设计的基础知识。“材料”几乎包含了农业设施中所用的各种材料的性能与选用。“电”则包含了自动控制所需要的主要设备的结构与性能等知识。初看起来,这样安排似乎有些杂乱,但实际上这些知识也有着内在联系,所有内容都是紧扣环境和结构,为设施环境和结构设计提供理论基础,为学习后续的专业课“农业设施设计与建

造”、“设施农业环境工程学”等打下基础。

这本教材涉及的学科门类多，其内容选择都是本着“少而精”的原则，在编写过程中力戒重复多余。在某种程度上说，也具有启发性、向导性的作用，同学们也许感觉到在进行更加复杂的设计时这些知识尚显不够，但通过对本教材的学习，应该具备进一步深入学习钻研的能力。

目 录

总序

前言

第一章 流体	1
第一节 湿空气的性质	1
一、湿空气物理性质基本定律	1
二、湿空气的性质与状态参数	2
三、焓湿图	6
四、湿空气性质计算实例	8
第二节 流体力学基础	9
一、流体静压强	9
二、恒定流动能量方程	11
三、流动阻力与能量损失	18
四、孔口管嘴与管路流动	23
五、农业设施通风基础	27
第二章 传热	33
第一节 导热	33
一、导热的基本定律	33
二、稳态导热	36
三、非稳态导热	42
四、导热问题的数值解法	47
第二节 对流换热	51
一、对流换热及其影响因素	51
二、相似准则与准则方程	54
三、强制对流换热	57
四、自然对流换热	65
第三节 辐射换热	69
一、热辐射的基本概念	69
二、热辐射的基本定律	71
三、辐射换热计算	72

第四节 农业设施的传热分析	79
一、传热过程与传热系数	79
二、换热器及其传热计算	81
三、围护结构保温、隔热分析与计算	88
第三章 力学	102
第一节 结构与力学分析	102
一、结构与力	102
二、力系与平衡	106
三、内力与变形	119
四、杆系结构分析	132
第二节 材料的力学性能	163
一、应力与应变	164
二、常用农业设施工程材料的性能	173
第三节 结构的强度、刚度、稳定设计	179
一、轴向拉伸(压缩)时杆件的强度	179
二、应力集中现象	180
三、剪应力互等定理 剪切虎克定律	180
四、扭转应力及强度	182
五、受弯杆件的强度	185
六、应力状态与强度理论	187
七、复杂应力状态强度问题	191
八、刚度与稳定设计	195
第四章 材料	201
第一节 透光覆盖材料	201
一、温室透光覆盖材料的沿革	201
二、温室对透光覆盖材料的基本性能要求	202
三、温室常用透光覆盖材料及其选择	207
第二节 保温隔热材料	216
一、保温隔热材料的保温隔热机理	216
二、保温隔热材料的基本特性	218
三、常见保温隔热材料	223
四、建筑围护结构的保温性能设计	227
五、建筑保温隔热材料选用原则与施工要点	232
第三节 金属材料	234

一、钢材	234
二、农业设施结构中钢材强度设计指标	240
三、型钢	242
第四节 其他材料	242
一、遮阳材料	242
二、防虫网	246
第五章 电	249
第一节 三相交流电的基础知识	249
一、三相交流电的特点	249
二、三相交流电的产生	249
三、正弦交流电的三要素（最大值、频率、初相位）	251
四、基本典型交流电路的分析	253
五、三相电源的绕组联接	257
六、三相负载的联接与接法	258
七、交流电路的功率与功率因素	260
八、三相四线制电路及中线的作用	262
第二节 电动机与常用低压电器	263
一、电动机的类型与特性	263
二、交流异步电动机的构造与工作原理	265
三、三相交流异步电动机的性能指标与工作特性	270
四、农业设施中常用电机的选型及运用	274
五、农业设施中常用低压电器的选型、计算及运用	275
六、交流异步电动机的控制电路	285
第三节 设施环境调控常用执行电路的设计基础	290
一、温度控制电路的设计	290
二、换气控制电路的设计	292
三、灌水、供液控制电路的设计	295
四、光照控制电路的设计	298
第四节 安全用电	301
一、触电的基本类型	301
二、防止触电的基本措施	302
三、触电急救	304
主要参考文献	307

第一章 流 体

液体和气体统称为流体，流体广泛存在于农业设施中。一方面，流体是农业设施环境的重要组成方面，任何农业设施，均处在空气或水的包围之中，其状况，如空气的温度、流动速度、空气的成分组成、水蒸气数量等等，均是构成农业设施环境的重要因素。同时，农业设施中的环境调节、通风除湿、热量或流体输送等等，都是以流体作为工作介质，通过流体的各种物理作用，对流体的流动有效地进行组织而实现的。因此有关流体的知识，是研究和处理设施农业工程中有关流体问题的基础。

第一节 湿空气的性质

空气环境调控是农业设施环境控制工程中的重要内容，为了很好地解决空气环境调控有关的工程问题，必须了解空气在调控过程中的状态变化。

一、湿空气物理性质基本定律

农业设施的实际环境中存在的空气均为湿空气，即干空气与水蒸气的混合物，这里干空气是指完全不含水蒸气的空气；是氧、氮等多种气体的混合物。

湿空气中干空气的组成基本稳定不变，而水蒸气的数量有较大变化。

在农业设施的空气环境调控中，研究湿空气的热、湿方面性质时，湿空气是被当作干空气与水蒸气二种“单一”气体的混合物，二组成部分均可看作理想气体，其物理性质变化遵循理想气体的规律。

1. 道尔顿分压定律

$$p_a + p_w = p \quad (1-1)$$

式中： p_a ——干空气的分压力，Pa；

p_w ——水蒸气的分压力，Pa；

p ——大气压力，标准状态 $p = 101\,325\text{ Pa}$ 。

2. 理想气体状态方程

干空气：

$$p_a V = \frac{m_a}{M_a} R_0 T = n_a R_0 T = m_a R_a T \quad (1-2)$$

水蒸气:

$$p_w V = \frac{m_w}{M_w} R_0 T = n_w R_0 T = m_w R_w T \quad (1-3)$$

式中: V ——空气体积, m^3 ;

T ——气温 (热力学温度), K ;

m_a, m_w ——干空气与水蒸气的质量, kg ;

M_a, M_w ——干空气与水蒸气的千摩尔质量, kg/kmol ;

R_0 ——通用气体常数, $R_0 = 8\,314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

n_a, n_w ——干空气与水蒸气的摩尔数, ($n_a = m_a/M_a, n_w = m_w/M_w$), kmol ;

R_a, R_w ——干空气与水蒸气的气体常数, ($R_a = R_0/M_a, R_w = R_0/M_w$), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

由干空气与水蒸气的千摩尔质量 $M_a = 28.97 \text{ (kg/kmol)}$ 与 $M_w = 18.02 \text{ (kg/kmol)}$, 有:

$$R_a = 287.0 \text{ [J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad R_w = 461.5 \text{ [J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

二、湿空气的性质与状态参数

由工程热力学, 三个独立的状态参数确定湿空气的一个状态。在有关湿空气的工程问题中, 了解湿空气的状态变化, 必须从湿空气的状态参数着手。

1. 湿空气的总压力 p 即大气压力 $p \text{ (Pa)}$ 。大气压力随地理位置、海拔高度及季节等因素, 在一定范围内变化, 其中随海拔高度的变化较大, 海拔越高处, 大气压力越低。通常以北纬 45° 处海平面的全年平均气压作为一个标准大气压, 其值为 $p = 101\,325 \text{ (Pa)}$ 。

2. 空气干球温度 T 与 t 常用的有热力学温标 $T \text{ (K)}$ 与摄氏温标 $t \text{ (}^\circ\text{C)}$, 二者关系为: $T = t + 273.15$ 。

3. 水蒸气的分压力 p_w 水蒸气的分压力为水蒸气单独占有湿空气的容积, 并与湿空气温度相同时所具有的压力, 其值大小反映了湿空气中水蒸气量的多少, 单位为 Pa 。

4. 饱和水蒸气分压力 $p_s \text{ (Pa)}$ 湿空气中水蒸气数量达到饱和状态时的水蒸气分压力。

饱和水蒸气分压力的大小决定于气温的高低, 可表达为:

$$p_s = f(T)$$

因此 p_s 与气温 T (或 t) 不是相互独立的参数。 p_s 可由气温 T (或 t) 查表 1-1 确定。

表 1-1 不同气温下的饱和水蒸气压力

t (°C)	p_s (Pa)	t (°C)	p_s (Pa)	t (°C)	p_s (Pa)	t (°C)	p_s (Pa)
0	610.8	8	1 072	16	1 817	26	3 360
2	705.4	10	1 227	18	2 063	30	4 242
4	812.9	12	1 402	20	2 337	35	5 622
6	934.6	14	1 597	22	2 642	40	7 375

5. 相对湿度 ϕ 相对湿度定义为用小数或百分数 (%) 表达的如下比值:

$$\phi = \frac{p_w}{p_s} \quad (1-4)$$

相对湿度反映了湿空气中水蒸气分压力接近饱和水蒸气压力的程度, 是衡量空气干燥或潮湿程度的一个参数。在某温度下, 相对湿度越小, 表明空气越为干燥, 吸湿能力越强, 反之则较为潮湿, 吸湿能力较小。相对湿度的最大值为 1 或 100%, 这时空气中的水蒸气分压力等于饱和水蒸气压力, 这样的湿空气称为饱和湿空气。饱和湿空气中水蒸气数量达到最大, 不再具有吸湿的能力。

6. 含湿量 d 在调节空气的湿度 (干燥除湿或加湿) 时, 需要确定对湿空气加入或减少的水蒸气数量, 因此需掌握湿空气中水蒸气的数量及变化。含湿量 d 就是反映湿空气中水蒸气数量的参数。其定义为每单位质量干空气的湿空气中所含有的水蒸气质量, 单位为 kg/kg干空气 或 g/kg干空气 。当已知湿空气的水蒸气分压力时, 可计算出其含湿量为:

$$\begin{aligned} d &= \frac{m_w}{m_a} = \frac{\frac{p_w V}{R_w T}}{\frac{p_a V}{R_a T}} = \frac{R_a}{R_w} \cdot \frac{p_w}{p_a} = \frac{287}{461.5} \cdot \frac{p_w}{p_a} \\ &= 0.622 \frac{p_w}{p_a} = 0.622 \frac{p_w}{p - p_w} \quad (\text{kg/kg干空气}) \quad (1-5) \end{aligned}$$

农业设施中的空气状态发生变化时, 设变化前后空气含湿量分别为 d_1 与 d_2 , 则空气中水蒸气的变化量 W 就可采用下式进行计算:

$$W = m_a(d_2 - d_1) \quad (\text{kg}) \quad (1-6)$$

7. 比容 v 比容是指每单位质量干空气的湿空气的容积, 单位为 $\text{m}^3/\text{kg干空气}$, 有:

$$v = \frac{V}{m_a} = \frac{R_a T}{p_a} = \frac{R_a T}{p} (1 + 1.608d) \quad (\text{m}^3/\text{kg干空气}) \quad (1-7)$$

由湿空气的干空气质量及比容,可计算出湿空气的容积。

8. 密度 ρ 湿空气的密度为单位容积湿空气的质量,单位为 kg/m^3 ,有:

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{m_a + m_w}{V} = \frac{m_a}{V} \left(1 + \frac{m_w}{m_a}\right) \\ &= \frac{1}{v} (1 + d) \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-8)\end{aligned}$$

密度 ρ 与比容 v 具有互为倒数的近似关系,但因为二者在计算质量时,比容 v 是只计算干空气,而密度 ρ 是计算干空气与水蒸气全部,二者严格的关系应如上式所示。

密度 ρ 在已知空气干球温度时可简单近似计算,推导如下:

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{1}{v} (1 + d) = \frac{p}{R_a T (1 + 1.608d)} (1 + d) \\ &\approx \frac{p}{R_a T} = \frac{101325}{287T} = 353/T \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-9)\end{aligned}$$

9. 焓 h 湿空气中含有的总热量。一般在空气调节的过程中,空气压力是固定不变的,根据工程热力学,在这种条件下,空气因状态发生变化而吸收或放出的热量,等于空气焓的变化量。因此,焓是在空调工程中计算空气热量变化的一个重要参数。焓也是以干空气质量作为基准进行计算的,并以 0°C 为起算点。其值是 1kg 干空气的焓与 $d\text{kg}$ 水蒸气的焓的总和,即:

$$h = c_{pa}t + d(r + c_{pw}t) \quad (\text{kJ}/\text{kg}_{\text{干空气}}) \quad (1-10)$$

式中: c_{pa} , c_{pw} ——干空气与水蒸气的定压质量比热容,分别为 1.01 与 $1.85\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

r ——水在 0°C 时的汽化潜热, $2501\text{kJ}/\text{kg}$ 。

上式中直接代入数值,成为:

$$h = 1.01t + d(2501 + 1.85t) \quad (\text{kJ}/\text{kg}_{\text{干空气}}) \quad (1-11)$$

(1-10) 式也可写作如下形式:

$$h = (c_{pa} + dc_{pw})t + dr = h_s + h_1 \quad (\text{kJ}/\text{kg}_{\text{干空气}}) \quad (1-12)$$

其中 $h_s = (c_{pa} + dc_{pw})t$ 为与温度变化有关的热量,是伴随着温度变化而产生的热量变化,称为显热。而 $h_1 = dr$ 是与温度变化无关,仅与含湿量变化有关的热量,称为潜热。

在农业设施中的空气,当其状态发生变化时,变化前后吸收或放出的热量为:

$$Q = m_a(h_2 - h_1) \quad (\text{kJ}) \quad (1-13)$$

如果空气状态发生变化过程中,空气含湿量未发生变化,其吸收或放出的热量可只计算其因温度变化产生的显热量变化,此外,为方便计算,采用湿空气质量

为计算基准, 这样, 可采用如下近似计算式计算湿空气状态变化时的热量变化:

$$Q = mc_p(t_2 - t_1) \quad (\text{kJ}) \quad (1-14)$$

式中: m —— 湿空气的质量, kg ;

c_p —— 湿空气在含湿量未发生变化时的定压质量比热容, $c_p \approx 1.03 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_1, t_2 —— 分别为湿空气状态变化前后的温度, $^\circ\text{C}$ 。

注意上式适用于空气含湿量无变化时, 其热量变化完全归因于空气温度变化。

10. 露点温度 t_d 湿空气温度一定时, 其中所能容纳的水蒸气量是有一定限度的, 空气温度越低, 能容纳的水蒸气量越小。如果将未饱和湿空气在含湿量保持不变的情况下逐渐冷却, 则空气能容纳的水蒸气量逐渐变小, 当空气温度降低到其饱和含湿量与实际含湿量相等时, 湿空气即成为饱和状态, 如空气温度继续降低, 则空气中的水蒸气就将凝结出来。这个使空气成为饱和湿空气的温度, 称为露点温度。即露点温度是指未饱和湿空气在含湿量不变的情况下, 冷却至饱和湿空气时的温度。

露点温度是湿空气是否有冷凝结露情况发生的判断条件。在空气湿度的调节技术中, 常利用冷却方法, 使空气温度降至露点温度以下, 使空气中水蒸气凝结出来, 空气被除湿得到干燥。

11. 空气湿球温度 t_w 如图 1-1 所示干湿球温度计, 为二支相同的温度计, 但其中一支用湿纱布包裹起来, 纱布一直保持湿润, 纱布周围保持良好的通风, 则其测得的温度称为湿球温度, 相对应地, 未包纱布的温度计 (干球温度计) 测得的就是湿空气的温度 (干球温度)。

湿球温度反映的是最贴近湿球的气流的温度。空气流经湿球表面时, 湿球上的水分不断蒸发, 将从空气中吸取热量, 因此贴近湿球周围的空气温度较低, 且达到饱和状态。这就形成了最贴近湿球的空气 (其温度等于湿球温度) 与稍远处空气 (其温度等于干球温度) 间存在的温差和水蒸气压差, 因而使得热量从稍远处向湿球传递, 而水蒸气由湿球向外扩散。当达到热湿平衡的状态时, 传递的热量正好等于水分蒸发所消耗的潜热。当空气湿度越低时, 其水蒸气压越低, 则与贴近湿球的饱和空气间的水蒸气压差越大, 水蒸发越强烈, 形成的温差就越大 (即湿球温度相对越低), 以传递越多的热量提供水分蒸发的潜热消耗。因此, 湿球

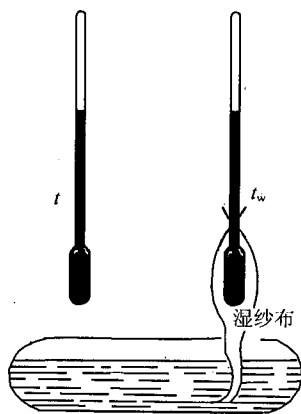


图 1-1 干湿球温度计