

## MCM 2023 Training Contest, Problem A

### 植物工厂:人造仙境

植物工厂是现代设施农业的发展趋势，通过在一个封闭的植物生产系统(CPPS)中控制光照、温度、湿度、二氧化碳和营养液的输送，为作物提供一个人工而舒适的环境，以达到最佳的作物生长。它可以提供高产的优质食品，同时减少农药和化肥的使用。在植物工厂中，会安装多层种植架，这样我们就可以在每一层的地板上种植作物，而照明系统则位于顶部

近年来，集装箱工厂出现了一种新的形式，由于其低成本、高移动性和模块化能力而受到广泛欢迎。集装箱工厂由标准集装箱改装而成，并进一步配备智能气候系统和照明系统，维持人工环境，以满足多种作物的需求。图1展示了一个典型的集装箱工厂的照片。



Figure 1. Interior and exterior of a container plant factory.

植物的生长与光照和温度密切相关。适宜的温度和光照可以提高植物的产量，而不适宜的环境则会影响植物的生长。对于植物工厂来说，保持适宜的环境需要大量的能源，能源的消耗成为制约未来发展的重要瓶颈。由于其体积有限，比表面积大，集装箱工厂需要精心的节能设计。

植物工厂的能源消耗主要来自照明和空调。在一定的光照强度范围内，植物生长速率和能量消耗随光照强度的增加而增加。一部分照明能量以热的形式散去到工厂的内部大气中。它会提高内部温度，因此可能需要空调来控制温度。植物工厂有两种状态(拍照/暗期)，照明只在拍照期使用。

除了照明系统产生的热量外，外部气候与CPPS之间通过围护结构(如墙壁、天花板和地板)的热量传递是空调能耗的另一个重要组成部分。容器围护结构由具有特定热性能(如热阻和太阳辐射吸收性能)的固定材料制成，其性能将影响传热效率。此外，容器的方向将改变其对太阳辐射的吸收。同时，室外气候的动态变化也影响着空调能耗。例如，在冬季，照明热量有助于降低加热负荷，适当的绝缘可以防止热量从容器中逸出。但在夏季，如果结合明显的照明热，高绝热会阻止内部的热增益传递到外部，增加冷负荷。

还需要考虑种植密度:如果太低，则植物工厂没有得到充分利用。

然而，如果种植密度超过一定的阈值，植物之间就会出现资源竞争，导致生长迟缓甚至早衰。

现代集装箱农业管理公司(MCM)聘请您的团队在上海崇明岛设计了一个标准的20英尺(长\*宽\*高:6.10米\* 2.44米\*2.63米)的集装箱工厂，用于种植生菜。该项目旨在提高作物产量，同时降低每新鲜生菜重量的能源消耗。你被要求选择合适的围护材料和容器的方向，并确定封闭系统的最佳照明功率密度、温度和种植密度。具体而言，您的团队需要解决以下问题:

- **Task 1:**提供一个生长模型，描述单个生菜的新鲜重量作为光强和温度的函数。

- **Task 2:**考虑到种植密度和收获策略，请给出一个模型来描述在一个20英尺集装箱的空间中可以收获的生菜的年鲜重。

假设气候参数与外部环境一致，光线可以均匀分布在内部区域。莴苣的重量在250克到500克之间时就可以收获了

- **Task 3: 考虑到20英尺集装箱厂房的能源消耗。请开发：**
  - 建立了集装箱工厂厂房空调年能耗随温度、保温材料(附录B)、朝向、种植密度和光照/暗期(生菜为光照期16小时，暗期8小时)变化的计算模型;而且
  - 一个模型计算照明能源消耗的集装箱工厂作为一个函数的人工照明强度和种植密度。

在计算空调能耗时，我们可以忽略通风，根据空调系统的性能系数(COP)(附录B)将一个工厂工厂的负荷转换为用电量。空调负荷由内部热获得和通过围护结构的热传递(包括吸收的太阳辐射)组成。

- Task 4:** 根据以上问题得到的模型，请建立一个可以预测每新鲜生菜重量能耗的模型。描述单位产量的能源消耗如何受到设计因素的影响，如种植密度、照明强度、温度、绝缘材料、朝向和光照/暗期的持续时间。请提供一个最佳的设计和操作策略，以平衡产量和能源消耗
- 

- Task 5:**减少空调能耗的一种解决方案是在外部气候条件适宜的情况下进行通风。由于自然通风不稳定，可以采用风机驱动的机械通风。机械通风的能耗与风机提供的通风量有关，通常比空调低得多。机械通风的最大换气次数可假定为每小时2次。请开发一个模型来确定机械通风的运行策略，并评估其节能潜力
- 

As part of your solution submission, prepare a one-page article of your findings to MCM Corporation outlining your research.

-

总页数不超过25页的PDF解决方案应包括:

- 一页大纲。
- 目录。
- 完整的解决方案。
- MCM公司的一页文章。 • 参考列表。

注意:本次竞赛的篇幅限制为25页。你提交的所有内容都计入25页的限制(摘要表, 目录, 参考列表和任何附录)。你必须为你的观点、图片和报告中使用的任何其他材料注明出处。

#### **Appendix A: Reference 参考文献**

- [1]. Graamans, L., Baeza, E., Van Den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I. and Stanghellini, C., Plant factories versus greenhouses: Comparison of Resource Use Efficiency, *Agricultural Systems*, 160, pp.31-43, 2018.
- [2]. Van Henten, E.J., Validation of a Dynamic Lettuce Growth Model for Greenhouse Climate Control, *Agricultural Systems*, 45(1), pp.55-72, 1994.
- [3]. Chen Y.K., Huang Y.Y., Lan J., Wang T., Kang Y.X., Growth Model of Lettuce Cultivated by NFT based on Product of Thermal Effectiveness and Photosynthesis Active Radiation. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 49(19):201-204+215, 2021. (Chinese)
- [4]. Xu W.D. Effects of Different Light, Plant Density and Harvest Time on Yield and Quality of Lettuce in Plant Factory. Dissertation from Nanjing Agricultural University, 2015. (Chinese)
- [5]. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Handbook - Fundamentals
- [6]. Al-Homoud, M.S., Computer-Aided Building Energy Analysis Techniques. *Building and Environment*, 36(4), pp.421-433, 2001.
- [7]. Typical Meteorological Year Data: <https://www.ladybug.tools/epwmap/>

## Appendix B: Description of parameters 参数说明

1. 根据以下公式，工厂的系统负荷(Q)按照各自的性能系数(COP)转换为用电量(E):

$$COP = \frac{Q}{E} \quad (1)$$

其中，冷却COP设置为2.5，加热COP设置为3.5。

2. 照明系统的效率(电力以热的形式消散)设定为50%。

3. 集装箱可选保温材料热性能参数。

Table 1 无机和复合保温材料的热性能。

材料	密度 kg m <sup>-3</sup>	热导率 W/m <sup>2</sup> K	比热容 kJ/(kg K)
Rockwool	120	0.041	1.22
Glass wool	40	0.04	1.22
Aerogel blankets	266	0.017	1.24
Aerogel vacuum panel	333	0.006	1.005

4. Air change rate (ACH):

换气速率(ACH):指一个房间或空间内的总风量在一小时内完全排出和更换的次数。

致谢:这个问题是由上海交通大学设计学院赖大奕教授提出的，国防科技大学理学院王丹教授和毛紫阳教授对这个问题进行了修改和形式化。随后，上海交通大学设计学院博士生余志桐对其进行了整合、重组和定稿。来自上海交通大学农业与生物学院的张景金教授、全球未来技术研究所的包华教授、计算机科学与工程系的高晓峰教授以及MCM/ICM训练营的助教施晨飞和廖志伟为我们提供了许多宝贵的意见和建议。

声明:本次MCM训练大赛版权归上海交通大学MCM/ICM 2023联合训练营所有，由上海交通大学(导师:高晓峰教授)和国防科技大学(导师:王丹教授)所有，仅供训练营学员练习使用。请不要将本次比赛的内容和数据分享给他人或用于其他目的