

doi: 10.7690/bgzdh.2024.01.015

基于系统动力学的机场割草机需求仿真研究

崔国伟¹, 曹晨羽², 李军亮¹, 滕 曰¹

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 中国人民解放军 91566 部队, 辽宁 大连 116043)

摘要: 为控制机场草坪高度符合机场环境安全使用要求, 建立机场割草机数量配置模型。分析机场割草作业存在的问题及影响因素, 基于系统动力学理论, 以机场草坪面积、割草机数量性能、机场草生长情况为基础, 建立机场割草作业过程的存量流量图和数学模型; 以北方某机场草坪为背景进行实例验证。结果表明: 模型运行结果与机场割草机实际使用数量及作业情况基本吻合, 可为机场管理人员配置割草机数量和安排作业时间提供理论依据和技术支撑。

关键词: 机场; 割草机; 数量; 草坪; 系统动力学; 模型

中图分类号: E075 **文献标志码:** A

Simulation Research on Airport Mower Demand Based on System Dynamic

Cui Guowei¹, Cao Chenyu², Li Junliang¹, Teng Yue¹

(1. Qingdao Campus, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China;

2. No. 91566 Unit of PLA, Dalian 116043, China)

Abstract: In order to control the height of airport lawn to meet the requirements of safe use of airport environment, a model of the number of mowers in airport was established. The existing problems and influencing factors of airport mowing operation were analyzed. Based on the system dynamics theory, the stock flow chart and mathematical model of airport mowing operation process were established based on the airport lawn area, mower quantity and performance, and airport grass growth. The model was verified by an example of an airport lawn in northern China. The results show that the running results of the model are basically consistent with the actual number of mowers used in the airport and the operation situation, which can provide theoretical basis and technical support for airport managers to allocate the number of mowers and arrange the operation time.

Keywords: airport; mower; quantity; lawn; dynamic system; model

0 引言

随着时代发展, 机场的飞行任务在不断增加, 对机场草坪环境的使用要求也越来越高。机场土质地区的草坪, 主要用于抑制尘土和提升道面的承载强度^[1]。草坪在改善土质地区性能的同时也吸引了昆虫和小型禽类。草坪成了小型动物和昆虫的良好栖息地, 同时也成了鸟类、猛禽的觅食地。鸟类进入飞行区觅食或栖息, 增加了飞行器撞鸟的风险^[2-3]。因此, 机场管理部门通常要求机场草坪的高度不超过 30 cm^[4-6], 使之符合机场环境要求。

机场管理部门通常采用割草机机械割草来控制草的高度。割草机一般由拖拉机牵引进行割草作业, 机场配备的拖拉机和割草机通常成套采购使用。在雨水充沛的季节, 草的生长速度很快, 场区管理人员需要及时割草, 使草坪高度符合机场使用要求。控制机场草坪高度, 防止鸟类在机场草坪栖息、觅食, 对降低鸟撞风险、保证航空飞行安全具有重要

作用^[7-8]。

目前对机械装备的数量配置研究, 主要是依据工作过程、某方面的特征等对数量配置进行研究。刘禹阳等^[9]基于停机等待时间特征对隧道运输机械的数量配置进行研究, 建立了相应的计算公式; 杨雷等^[10]基于遗传算法对自动导引车系统数量配置方法进行了研究, 建立了估算的数学模型。韩晓龙^[11]采用网络流模型对集装箱港口装卸中的龙门吊数量配置进行了研究, 给出了模型的最小流算法。目前, 对机场割草机数量配置的研究很少, 主要依靠经验来判断需要配置的数量, 若配置的数量过多则会导致资源浪费, 过少则会影响航空飞行安全, 缺乏理论依据和技术支撑。为保证航空飞行的安全及资源合理利用, 有必要对场割草机数量配置进行研究。通过运用机场割草机数量配置的系统动力学模型, 可为机场装备和人员充分发挥效能, 保障机场草坪环境安全, 提供理论依据和技术支撑^[12-14]。

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2023-10-18

第一作者: 崔国伟(1984—), 男, 山东人, 硕士。

1 机场割草作业需求分析

1.1 机场割草作业主要对象

机场草坪高度控制涉及的对象，主要有机场草坪、割草机、草的生长情况和作业人员。

1) 机场草坪。

机场飞行区的草坪，主要包含土跑道、平地区和跑道两端 3 部分区域。机场平地区由滑行道、联络道、主跑道三者包围，并被联络道分割成几个区域。为简化模型，计算平地区面积时，可取平地区的长度与跑道长度相同。跑道两端区域，主要指从跑道端到机场围界的区域。机场飞行区的草坪分布如图 1 所示。机场草坪区域土质道面平整度较跑道等结构道面相对差一些，会影响驾驶员的舒适度。

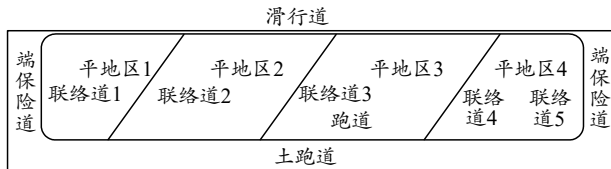


图 1 机场飞行区草坪分布

2) 割草机。

机场割草通常使用中大型的拖拉机牵引割草机开展作业，行驶速度不超过 30 km/h。在实施割草作业时，拖拉机的行驶速度为 5~15 km/h。割草机的作业宽度有 1.0、1.5、1.8、2.0 m 4 种主要规格，目前各机场主流使用宽度为 2.0 m 的割草机。

3) 草的生长情况。

机场草坪区域的草种类繁多，但优势种往往只有几种。机场草的高度，以优势种的草来统计。通常在雨水充沛、温度适宜的季节，草的生长速度较快。不同地域的机场，受当地土质等自然环境的影响，生长速度也不同。机场草的生长速度，以管理人员的经验和统计数据为主。

4) 作业人员。

作业人员对拖拉机-割草机的熟练操作程度，很大程度上决定了割草作业的效率。此外作业人员在机场自然环境和高强度的作业环境影响下，随着作业时间的延长其专注度会有所降低，作业人员也容易产生疲劳感影响作业的效率。割草作业活动主要在飞行间隙或者机械日进行，作业人员每天工作时间大约 6 h。

1.2 割草作业存在的主要问题

1) 作业时间少与草生长快的问题。

机场的飞行任务日益增多，割草作业通常在没

有飞机起降的时间段进行，每天留给机场管理人员进行割草作业的时间只有几小时。草的生长速度在不同季节受降水的影响比较大，如在雨水充沛的季节，白茅草短时间就会长到 30 cm 以上。

2) 场区面积大与作业设备少的问题。

单跑道机场的草坪面积，通常在几十万平方米左右。多跑道机场，草坪面积能够达到数百万平方米。机场成套的割草机和拖拉机数量相对较少，难以在短时间内完成场区割草作业。

3) 割草任务重与作业人员少的问题。

短时间内完成几十万甚至数百万平方米割草作业，对实施割草作业的人员提出了较高的作业强度要求。割草作业通常由专业人员实施，对人员的驾驶、安全意识要求较高。

2 机场割草机配置模型构建

2.1 影响割草作业的因素

割草作业主要受到割草设备性能、草生长速度、割草作业速度、割草作业管理方法等多种因素的影响。

1) 割草设备性能。

在割草作业过程中，割草机的刀片受作业过程产生的热量影响，性能会有所下降。此外，割草机规格不同、型号各异，也或多或少影响了割草作业的效率。

2) 草生长速度。

作业人员在割草的同时，草也在自然生长。在不同的季节，草的生长速度也不尽相同，在作业效率一定的情况下，草的生长速度也影响着割草频率。

3) 割草作业速度。

割草作业环境，对人员、设备性能的发挥都有一定影响。场区土质道面的平整度、机场排水设施、助航灯具等都会影响割草作业的速度。此外，机场从事割草作业人员的熟练程度，及其对劳动强度的承受能力，也会对割草作业的速度有一定影响。

4) 割草作业管理方法。

机场管理部门负责割草机的数量配置、型号选择以及调配使用。机场的割草机如果配置数量少，影响场区割草任务的完成；如配置数量过多，则造成资源浪费。

2.2 模型假设

1) 假设机场草坪植株密度是均匀分布的；

2) 假设机场割草人员每天作业时间相同；

- 3) 假设草的植株高度越低生长速度越快;
- 4) 假设草的植株高度越高生长速度越慢;
- 5) 假设草的生长速度由观察所得大致是准确的;
- 6) 假设机场草坪刈割后的平均高度为 10 cm;
- 7) 假设割草机的有效作业宽度是固定的;
- 8) 假设机场同种草的生长速度是基本一致的;

9) 假设机场允许短时间内草坪高度超过环境要求。

2.3 模型流图的建立

机场草坪高度控制系统运行的基础是信息反馈^[15], 主要是作业人员、割草机械、草的生长、机场草坪之间的相互影响, 模型流如图 2 所示。

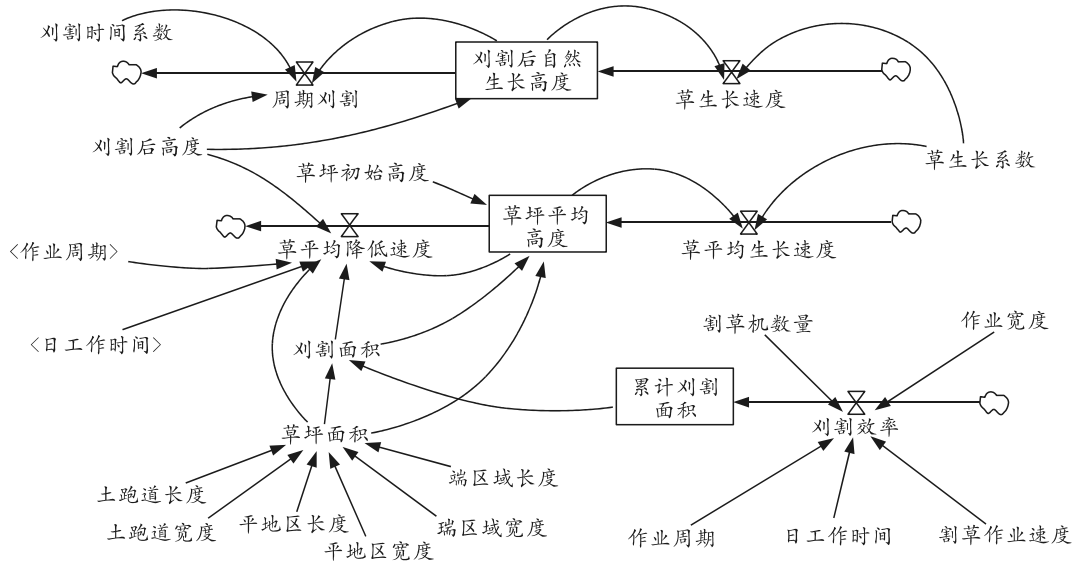


图 2 机场草坪高度控制流图

1) 状态变量及初值。

累计刈割面积=INTEG(刈割效率, 0), 初始值为 0, m²。

草坪平均高度=INTEG(草平均生长速度-草平均降低速度*MODULO(ABS(刈割面积), 草坪面积)/草坪面积, 草坪初始高度), 初始值为 30, cm。

刈割后自然生长高度=INTEG(草生长速度-周期刈割, 刈割后高度), 初始值为 10, cm。

2) 速率变量函数。

刈割效率=作业周期*作业宽度*割草作业速度*割草机数量*日工作时间, m²/h。

草平均生长速度=草生长系数(草坪平均高度), cm/h。

草平均降低速度=(草坪平均高度-刈割后高度)*刈割面积/草坪面积*日工作时间*作业周期, cm/h。

草生长速度=草生长系数(刈割后自然生长高度), cm/h。

周期刈割=(刈割后自然生长高度-刈割后高度)*刈割时间系数, cm/h。

3) 辅助变量函数。

日工作时间=PULSE TRAIN(0, 6, 24, 1000), h。

作业周期: PULSE TRAIN(0, 12, 24, 1000), h。

割草作业速度=STEP(5, 0), km/h。

草生长系数: 横坐标为草平均高度, (0, 0.125), (10, 0.125), (20, 0.09), (30, 0.08), (70, 0.03), (80, 0.005), (90, 0), (100, 0), cm/h。

刈割面积=草坪面积-未刈割草坪, m²。

草坪面积=2*两端区域面积+土跑道面积+平地区面积, m²。

土跑道面积=土跑道长度*土跑道宽度, m²。

平地区面积=平地区长度*平地区宽度, m²。

两端区域面积=端区域长度*端区域宽度, m²。

刈割时间系数=PULSE TRAIN(割一遍时间, 刈割到 10cm 时间, 重复刈割时间, 结束时间)

4) 常数。

作业宽度: 2 m。

日工作时间: 6 h。

割草作业速度: 5 000 m/h。

作业周期: 依据试验确定, h。

土跑道长度、土跑道宽度、平地区宽度、平地区长度、端区域长度、端区域宽度根据试验机场情况确定, m。

3 机场割草机配置数量仿真分析

3.1 系统模拟分析及政策试验

试验机场土跑道长度 2 600 m，宽度 80 m；平地区长度 2 600 m，宽度 80 m；端区域长度和宽度均为 200 m；机场草坪的总面积为 496 000 m²。在机场土跑道、平地区、端区域几何尺寸不变，割草机作业性能不变的情况下，通过割草机数量变化，进行试验寻找合适的配置数量。

1) 标准运行。

假设机场采用 1 台割草机进行割草作业，每天满负荷割草作业 6 h，为标准运行模式。模型的时间步长设为 0.125，进行仿真。从图 3 刈割面积仿真数据可以得到，在 193.500 h 时割草作业完成一遍。

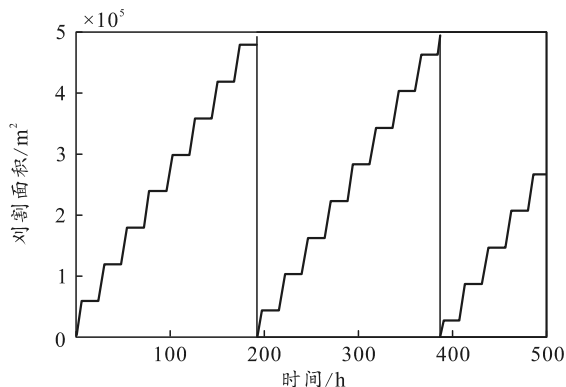


图 3 刈割面积 (1 台割草机)

从图 4 刈割后自然生长高度，可以看出当机场草坪均刈割一遍后，最初刈割的草的高度 43.665 2 cm，已经超过了 30 cm，不符合机场对草坪的高度要求。

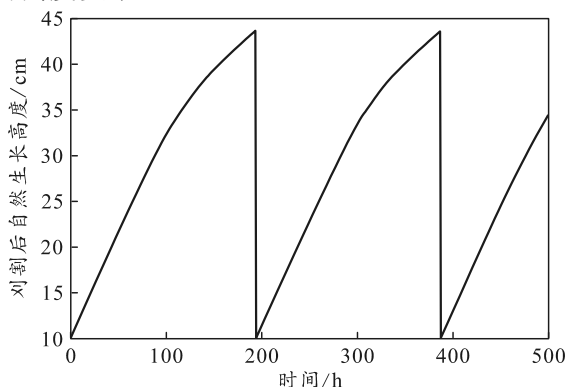


图 4 刈割后自然生长高度 (1 台割草机)

图 5 为草坪平均高度，从宏观上反映了机场草坪高度的变化，在割草周期内循环割草，草坪的平均高度峰值为 22.964 2 cm，也就是草坪的最高处高度超过了 30 cm。1 台割草机不能满足机场的割草作业需求。

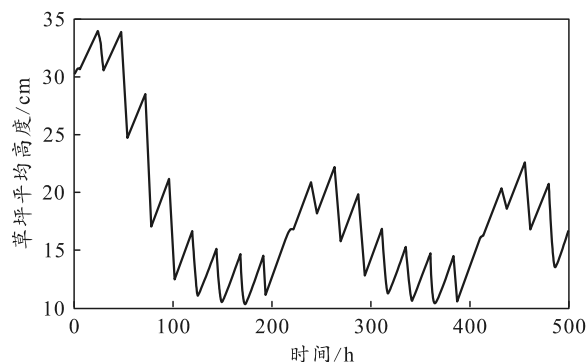


图 5 草坪平均高度 (1 台割草机)

2) 增量运行。

增加割草机的数量，其他数据不变的情况下，探寻合理的方案。当割草机的数量增加到 3 台，刈割一遍需要 52.5 h，约 2.187 5 d。作业完毕后刚开始作业处，自然生长高度为 22.264 6 cm，如图 6 所示，符合机场对草坪的高度要求。

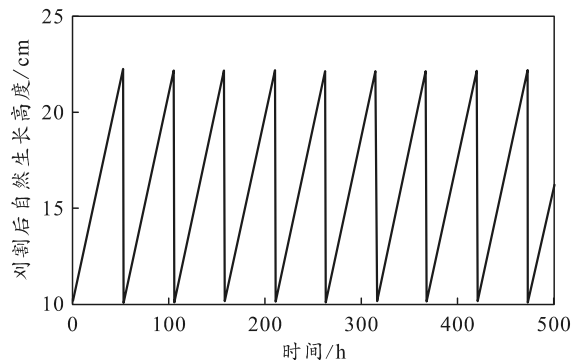


图 6 刈割后自然生长高度 (3 台割草机)

从图 7 草坪平均高度 (3 台割草机)，观察 5 个刈割周期内，草坪高度的峰值和超过环境要求的时间。在第 1、2 个刈割周期内，也就是 1T~2T 之间，草坪平均高度在 81.875 h 时，达到 15.013 1 cm，超过环境要求；在 96 h 时，达到峰值 18.309 2 cm；在 98.125 h，达到 15.075 3 cm；有 16.25 h 草坪高度不符合要求。

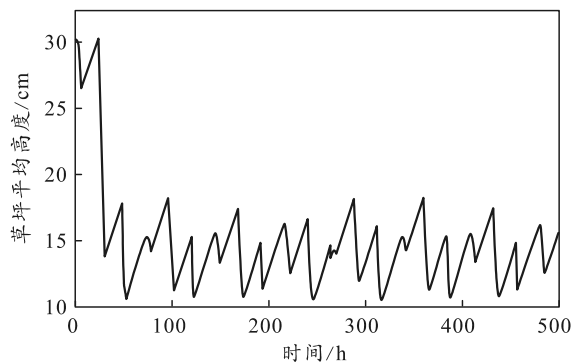


图 7 草坪平均高度 (3 台割草机)

增加割草机数量，观察草坪平均高度的峰值变

化和不符合要求的时间长度，记割草机刈割一遍时间为 T，观察 5T 内的草坪平均高度变化，表 1 中记录了草坪在刈割周期间隔时间段内的峰值变化。观察表 1 数据可得，割草机数量为 5 台或 8 台的时候，草坪高度较低。

为比较割草机数量对草坪的影响，根据表 1 分析草坪高度超过环境要求的时间，具体结果如表 2 所示。根据表 2，在 T~5T 的周期间隔内，当割草机的数量为 8 时，草坪的超高时间依次为 3.5、2.375、2.5、2.5 h，草坪的超高时间较其他方案更短。割草机的数量为 5 台时，草坪的超高时间依次为 5.875、

3.375、6、2 h。

由于鸟类在晚上的飞行活动很少，同时夜间有 6 h 的作业时间，因此允许机场的草坪高度在夜间超高。因此，在机场配置 5 台割草机或 8 台割草机，都能满足机场的使用需求。

从对表 1 和 2 的分析，可得：

1) 在机场面积一定的情况下，割草机的数量配置不是越多越好，应根据草的生长情况配置数量。

2) 在可接受的安全使用要求范围内，最优的结果不一定是经济的结果，应在可接受的范围内选取数量。

表 1 草坪平均高度变化

割草机数量	最早刈割处草高/cm	T~2T		2T~3T		3T~4T		4T~5T	
		时间/h	平均高度/cm	时间/h	平均高度/cm	时间/h	平均高度/cm	时间/h	平均高度/cm
3	22.264	81.875 0	15.013 1	141.875 0	15.020 6	147.125 0	15.001 6	232.750 0	15.016 2
		96.000 0	18.309 2	144.625 0	15.537 4	168.125 0	17.232 9	240.000 0	16.713 8
		98.125 0	15.075 3	147.125 0	15.001 6	169.250 0	15.145 1	240.750 0	15.011 3
4	21.330	61.750 0	15.028 2	112.125 0	15.028 2	161.375 0	15.000 3	210.500 0	15.016 4
		72.000 0	17.426 4	120.000 0	16.871 4	168.000 0	16.552 1	216.000 0	16.305 4
		73.625 0	15.109 0	121.625 0	15.004 2	169.625 0	15.023 0	217.625 0	15.067 6
5	16.598	44.250 0	15.025 0	68.750 0	15.010 6	91.125 0	15.012 4	120.875 0	15.022 4
		48.000 0	15.904 6	72.000 0	15.773 1	96.000 0	16.155 2	122.125 0	15.125 2
		50.125 0	15.025 1	72.125 0	15.323 7	97.125 0	15.013 0	122.875 0	15.021 5
6	16.218	41.375 0	15.025 9	70.625 0	15.017 3	94.375 0	15.011 5	114.625 0	15.011 7
		48.000 0	16.577 6	72.375 0	15.353 5	96.000 0	15.393 1	120.000 0	16.271 4
		49.125 0	15.091 9	73.750 0	15.019 5	96.125 0	14.873 2	120.500 0	15.148 8
7	15.926	41.250 0	15.015 6	68.000 0	15.015 1	93.125 0	15.005 4	117.875 0	15.004 1
		48.000 0	16.596 5	72.000 0	15.953 2	96.000 0	15.680 1	120.000 0	15.502 9
		48.500 0	15.150 2	72.500 0	15.161 9	96.750 0	15.094 0	121.375 0	15.043 5
8	15.721	44.625 0	15.010 5	69.750 0	15.001 4	93.625 0	15.028 9	117.625 0	15.026 1
		48.000 0	15.802 3	72.000 0	15.529 6	96.000 0	15.586 3	120.000 0	15.583 6
		48.125 0	15.196 9	72.125 0	14.995 0	96.125 0	15.085 9	120.125 0	15.121 9

表 2 割草周期内草坪超高时间 h

割草机数量	刈割一遍时间	T~2T	2T~3T	3T~4T	4T~5T
3	52.500	16.250	5.250	1.125	8.000
4	48.375	11.875	9.500	8.250	7.125
5	27.875	5.875	3.375	6.000	2.000
6	26.250	7.750	3.125	1.750	5.875
7	25.000	7.250	4.500	3.625	3.500
8	24.125	3.500	2.375	2.500	2.500

持续增加割草机的数量，刈割的时间会缩短到 1 个工作日内。由于割草工作通常一天只刈割一遍，因此选用间隔 24 h 观察草坪高度。通常机场内割草机数量不超过 20 台，因此在试验过程中，割草机数量上限选为 20。试验结果如表 3 所示，从表中可以得到当割草机的数量为 18 时，草坪超高时间相对较小。从表 3 草坪超高时间，可看到在 9~14 台割草机之间间隔 24 h 时，草坪超高时间是增加的。

对表 2 和 3 的比较分析，可得：

1) 当割草机的数量，增加到一定的数量，再增

加数量，草坪高度的控制效果没有显著增加。

2) 割草机数量的增加，割草频率提高的情况下，草坪超高的时间反而延长，这与机场草坪“割的越勤长的越快”的现象相吻合。

表 3 间隔 24 h 草坪超高时间 h

割草机数量	刈割一遍时间	24	48	72	96
9	5.500	13.625	5.500	4.375	4.125
10	4.875	17.125	6.625	3.625	2.000
11	4.500	17.375	5.250	0.625	4.500
12	4.125	18.125	2.750	3.750	2.500
13	3.750	21.375	3.750	3.750	2.875
14	3.500	21.375	4.625	2.625	3.375
15	3.250	16.500	5.250	3.375	2.875
16	3.000	14.500	4.000	3.125	3.125
17	2.875	12.250	4.125	3.250	3.500
18	2.750	11.750	4.250	3.250	2.625
19	2.500	15.750	5.250	2.000	2.875
20	2.375	16.250	3.750	3.000	3.500

3.2 仿真结果分析

根据系统模拟分析和政策试验结果，在机场草坪面积一定的情况下，割草机的数量为 8 台时，刈

割一遍时间 24.125 h，约 1.005 d，草坪高度的超高时间最短；割草机的数量为 5 台时，刈割一遍时间 27.875 h，约 1.161 d，草坪高度的超高时间次之；通过比较图 8 和 9 可发现 5 台割草机作业时刈割后草的自然生长高度和草坪平均高度均高于 8 台作业时的情况，但两者均符合机场环境的使用要求。将仿真结果与该机场的实际情况进行比较，仿真结果与该机场割草机的使用数量和割草作业情况基本吻合，模型的有效性较高。综合表 1—3 的分析结果，可得：

1) 机场割草机的数量配置，应当在可接受的安全范围内选取数量配置，以达到合理配置资源的目标。

2) 机场割草机的使用频率，应当控制在可接受的使用范围内，以达到合理使用资源的目标。

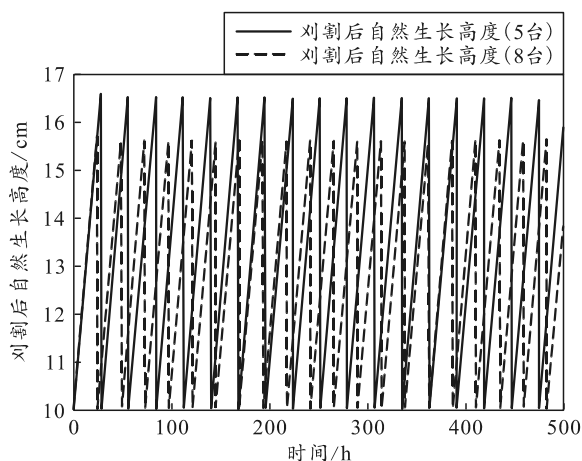


图 8 刈割后自然生长高度

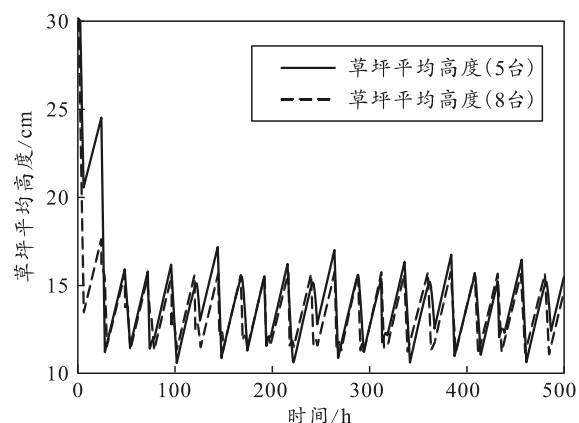


图 9 草坪平均高度

为探寻合理的割草机数量配置方案，以机场草坪的超高时间和割草机的数量为方案选取准则。方案选取准则如下：

1) 草坪超高时间越小越好。

一个工作日内飞机停飞或飞行间隙，允许机场

工作人员每天割草作业时间大约为 6 h。机场草坪超高时间 ≤ 6 h，得 1 分； > 6 h，得 0 分。根据草坪超高时间评价准则进行评分，结果如表 4 所示。从表 4 中可得，方案 3 和 6 评价得分均为 4 分，方案 1 和 8 得分均为 2 分，其余方案为 3 分。方案 3 和 6 的评价结果，优于其他方案。

表 4 草坪超高时间评价得分

方案	割草机数量	草坪超高时间/h				评价得分
		T~2T	2T~3T	3T~4T	4T~5T	
1	3	0	1	1	0	2
2	4	0	0	0	0	0
3	5	1	1	1	1	4
4	6	0	1	1	1	3
5	7	0	1	1	1	3
6	8	1	1	1	1	4
7	9	0	1	1	1	3
8	10	0	0	1	1	2
9	11	0	1	1	1	3
10	12	0	1	1	1	3
11	13	0	1	1	1	3
12	14	0	1	1	1	3
13	15	0	1	1	1	3
14	16	0	1	1	1	3
15	17	0	1	1	1	3
16	18	0	1	1	1	3
17	19	0	1	1	1	3
18	20	0	1	1	1	3

2) 割草机的数量越少越好。

在草坪高度符合使用要求的前提下，从经济效益角度看，机场割草作业配置的数量越少越好。结合表 4 的评价结果，方案 3 中割草机的数量为 5 台，方案 6 中割草机的数量为 8 台。因此，从经济效益的角度，方案 3 优于方案 6。

综合机场草坪的超高时间和割草机数量评价准则，可得方案 3 也就是配置 5 台割草机，对于该机场是最优的配置方案。在 5T 内，方案 6 草坪高度均符合使用要求，是可行的配置方案。

4 结束语

笔者通过机场割草事件的分析，建立机场割草机数量配置模型。通过仿真分析割草机的数量和草坪高度超高时间变化，筛选合理的数量配置方案。机场管理人员根据模型仿真结果，可合理配置割草机、作业人员数量，充分发挥机械的使用效能，合理安排人员的工作时间。

参考文献：

[1] 施泽荣. 机场生态灾害防范植物卷[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2018: 2-3.
 [2] 马金生, 孟祥海, 张建生, 等. 飞机场植被与鸟击防范的研究[J]. 齐鲁师范学院学报, 2012(5): 56-63.