

文章编号：1005-8451 (2010) 06-0014-04

基于排队论的立体车库特征及流畅性分析

李斌, 李建国

(兰州交通大学 机电技术研究所, 兰州 730070)

摘要: 以排队论为理论基础, 对立体车库中的选址、车流量、库存容量、工作效率等因素进行详细分析, 提出评价立体车库性能的多种工作指标, 对立体车库的流畅性进行阐述, 并给出立体车库规划设计过程中满足流畅性的某些要求。

关键词: 排队论; 立体车库; 流畅性; 分析

中图分类号: TP468.5 **文献标识码:** A

Liquidity analysis of three-dimensional garage based on queuing theory

Li Bin, Li Jian-guo

(Mechanical and Electronic Technology Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the queuing theory, this paper analyzed the factors in the three-dimensional garage such as the address, the traffic flow, the stock capacity and the work efficiency, then advanced some performance measures about the three-dimensional garage, expatiated the liquidity of the three-dimensional garage and given some desire about the liquidity.

Key words: queuing theory; three-dimensional garage; liquidity; analysis

随着我国经济的发展和控制技术的不断更新, 立体车库在我国的应用越来越广泛, 作为静态交

收稿日期: 2009-11-12

基金项目: 甘肃省科技基金资助项目 (2GS066-A52-001-04)

作者简介: 李斌, 在读硕士研究生; 李建国, 教授。

越高, 因此对此种制动方式进行数值研究越发显得必要。(2) 列车结构复杂, 需要大规模的计算网格, 本文所采用的LBM数值计算方法具有天然并行性, 非常适合列车的计算模拟。(3) 在列车空气动力制动研究的初步阶段, 应用CFD数值计算作为气动力制动初步设计的辅助手段, 代替许多实验性工作, 能够节约大量时间和经费, 并且为设计人员提供设计参考意见和建议。

由于风翼展开后, 将改变列车周围的空气流场。我们在研究中发现, 增加风翼后会增加列车的气动升力, 这对于列车制动是一个不利条件, 这需要对翼型作进一步的研究; 另外, 风翼展开后在特定的条件下, 可能产生负面效应, 这将也是我们对空气动力制动的后续研究内容。

4 致谢

本论文源起于和同济大学合作项目, 在此特

通核心的一部分, 立体车库不仅涉及到其自身设备, 还涉及到交通、环境、规划等不同的学科领域, 因此, 对立体车库技术进行研究不仅具有经济意义, 还具有一定的社会意义。迄今为止, 国内外的很多学者已经针对立体车库的不同方面进行了深

别感谢同济大学的吴萌岭教授、田春讲师和费巍巍同学的通力合作、全心配合和大力支持。另外, 对于文中参照或引用了前辈的研究成果, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 田春, 吴萌岭, 任利惠, 王孝延. 空气动力制动研究初探[J]. 铁道车辆, 2007, 47 (3): 10-12.
- [2] 周文. 日本最新研制的“姊妹”高速列车—Fastech 360S型和Fastech 360Z型高速列车[J]. 铁道知识, 2006 (4).
- [3] Kazumasa, O. and Masafumi, Y. Development of Aerodynamic Brake of Maglev Vehicle for Emergency Use. [J]. RTRI Report, 1989 (11).
- [4] 何雅玲, 王勇, 李庆. 格子Boltzmann方法的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 1.
- [5] 何冰, 封卫兵, 张武, 武频, 白文, 李立. 基于可压缩格子Boltzmann方法的高可扩展并行算法研究[J]. 航空计算技术, 2008, 38 (5): 65-68.

人的研究^[1~4]。本文在其研究基础上,以排队论为理论依据,综合考虑了车流量、库存容量、工作效率等因素,给出了对巷道式立体车库流畅性进行评价的一些性能指标,旨在推动我国立体车库技术的发展。

1 排队论

排队论起源于1909年A·K·爱尔朗发表的《概率与电话通话理论》一文,又称随机服务系统理论或等待线理论,是研究要求获得某种服务的对象所产生的随机性聚散现象的理论。通过研究各种服务系统在排队等待中的概率特性,排队论为服务系统的最优设计与最优控制提供了理论基础,利用其中的多种数学模型,可以对客户服务中出现的各种排队系统进行量化分析进而寻找最优的解决方案。

图1 为排队系统的结构图。

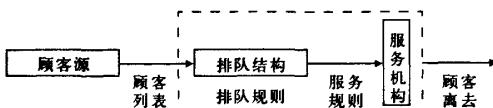


图1 排队系统结构图

在自动化立体车库中,用户的到达时间是随机的,而堆垛机的作业过程和车辆在库内的存放过程可以看做排队系统中的服务过程,因此可以利用排队论的相关理论来对立体车库的某些特征进行分析,进而给出对立体车库性能进行评价的指标。

2 立体车库特征分析

2.1 选址与车流量

2.1.1 商业中心

鉴于处于交通密集地,因此立体车库应以中小型为主,停车设备也应以存取时间短、土地利用率高的类型为主,以便分散交通流量。

2.1.2 办公楼周围

立体车库可以建在距离办公楼较远的位置,在选用停车设备时,可以根据实际可能的停车数量,考虑选取大型堆垛式停车设备。

2.1.3 居民区

通行能力与周围街道的数量有关,具有较好

的交通可达性。

2.1.4 特殊场所

这类场所包括体育场、会议中心、展览馆、音乐厅等。周围交通比较发达,具有较好的可达性,用户要求步行距离较短,平时停车极少,而有活动时车流激增,时间集中。

2.2 车流量与车库容量

根据排队论的理论分析可知,停车库的车辆到达时间服从泊松分布,车辆在库中的停放时间服从负指数分布,当车库车位全部停满后,再来的车辆将被拒绝,因此,停车现象属于M/M/n:n即多通道损失模型^[5]。假设车辆到达强度为 λ ,车辆的平均停放时间为 t_s ,则车库车位的平均停车率为 $\mu=1/t_s$ 。在库存容量为n的情况下,可以得到如图2停车库状态转移图: S_k 代表车库库存车量为k的状态。

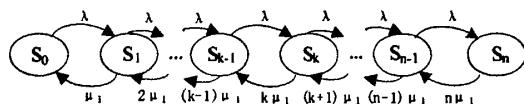


图2 停车场状态转移图

系统中的每种状态都有转移到另一种状态的可能,而且状态数n是有限的,所以有相应的极限概率: $P_0, P_1, \dots, P_k, \dots, P_n$ 存在,其中 P_k 为状态 S_k 发生的概率。根据系统平衡状态原理,得出各状态方程如下:

$$\begin{cases} S_0: \lambda P_0 = \mu_1 P_1, P_1 = \lambda / \mu_1 P_0, \rho = \lambda / \mu \\ S_1: \lambda P_1 = 2\mu_1 P_2, P_2 = \rho^2 P_0 / 2! \\ S_k: \lambda P_{k-1} = k\mu_1 P_k, P_k = \rho^k P_0 / k! \end{cases}$$

由正交性可知:

$$P_0 + P_1 + \dots + P_k + \dots + P_n = 1$$

则有:

$$P_k = \frac{\rho^k}{k! \sum_{i=0}^n \frac{\rho^i}{i!}}$$

依据排队论理论可得如下性能指标:

车辆被拒绝停放的概率:

$$P_n = \rho^n P_0 / n! = \rho^n / (n! \sum_{k=0}^n \rho^k / k!) \quad (1)$$

单位时间内停车库服务能力:

$$N = \lambda (1 - P_n) \quad (2)$$

停车位平均占用量:

$$\begin{aligned}
 n' &= 0P_0 + 1P_1 + \dots + kP_k + \dots + nP_n \\
 &= \sum_{k=0}^n k\rho^k P_0 / k! = \rho P_0 \sum_{k=0}^{n-1} \rho^k / k! \\
 &= \rho P_0 \left(\sum_{k=0}^n \rho^k / k! - \rho^n / n! \right) \\
 &= \rho (1 - \rho^n P_0 / n!)
 \end{aligned} \tag{3}$$

停车位的利用率：

$$\beta = n' / n = \rho (1 - \rho^n P_0 / n!) / n \tag{4}$$

在选址确定即 λ 和 μ_1 确定的情况下，立体车库系统服务能力的表征是，在满足一定的停车位利用率的同时，尽可能为更多顾客提供服务。在确定车库容量 n 时，需要充分考虑 β 和 P_n 两个指标。

2.3 作业效率与堆垛机数量

立体车库的作业效率主要取决于堆垛机的作业时间长短，依据目前我国的物流行业标准和欧洲物料搬运协会的物流标准选取 P_1 (0.2L, 0.67H), P_2 (0.67L, 0.2H) 为堆垛机作业循环的标准点，图3为其示意图，其中 L 代表货架的长度，H 代表货架的高度，则堆垛机作业循环的时间周期为^[6]：

$$T_s = \frac{2H}{3V_y} + \frac{2L}{3V_x} + \frac{V_y}{a_y} + \frac{V_x}{a_x} + 2T_f \tag{5}$$

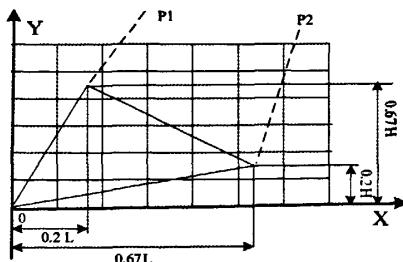


图3 堆垛机作业循环示意图

V_x —堆垛机水平速度， V_y —堆垛机垂直速度， a_x —堆垛机水平加速度， a_y —堆垛机垂直加速度， T_f —货叉作业时间。

根据文献[7]可知堆垛机的作业时间服从定长分布，且其平均服务率，当堆垛机的数量为 c 时，由用户和堆垛机构成的排队系统满足排队论中的模型，其状态转换如图 4。

设系统处于 S_k 的概率为 P_k ，已知堆垛机的数量为 c ，令 $\rho = \lambda / \mu_2$ ，根据图 4 存取车状态转换图和查普曼-柯尔莫哥洛夫方程一般法则可以推

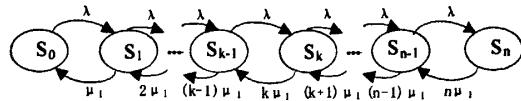


图4 存取车系统状态转换图

导出如下所示的稳态概率分布：

$$\begin{cases}
 S_0: \lambda P_0 = \mu_2 P_1, P_1 = \lambda / \mu_2, P_0 = \rho P_0 \\
 S_k: \lambda P_k = (k+1) \mu_2 P_{k+1}, \\
 \quad P_{k+1} = \rho^{(k+1)} P_0 / (k+1)! \quad k < c \\
 S_c: \lambda P_c = (c+1) \mu_2 P_{c+1}, \\
 \quad P_{c+1} = \rho^{(c+1)} P_0 / (c \cdot c!) \\
 S_k: \lambda P_k = c \mu_2 P_{k+1}, \\
 \quad P_{k+1} = \rho^{(k+1)} P_0 / (c^{(k-c+1)} \cdot c!) \quad k > c
 \end{cases}$$

由正交性可知：

$$P_0 = P_1 + P_2 + \dots + P_k + \dots + P_c + P_{c+1} = 1$$

则有：

$$P_0 = \left\{ [1 + \sum_{i=1}^c \rho^i / i!] + \frac{\rho^{c+1}}{(c-\rho) \cdot c!} \right\}^{-1}$$

$$P_i = \begin{cases} \rho^i P_0 / i! & i \leq c \\ \rho^i P_0 / (c! \cdot c^{i-c}) & i > c \end{cases}$$

依据排队论理论可得如下性能指标：

系统内排队等候作业的用户平均数：

$$L_q = \frac{\rho^{c+1} P_0}{c \cdot c! [1 - (\rho/c)]^2} \tag{6}$$

车辆的平均排队时间：

$$W_q = \frac{\rho^{c+1} P_0}{c \lambda \cdot c! [1 - (\rho/c)]^2} \tag{7}$$

堆垛机平均忙碌数量：

$$\bar{k} = \lambda / \mu_2 = \rho \tag{8}$$

车辆直接存取的概率：

$$P_{直} = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_{c-1} = 1 \tag{9}$$

3 流畅性分析

流畅性是衡量立体车库及其外围交通系统实现车辆顺利、安全、高效的出入和停放的综合性能指标^[4]，它不仅与立体车库的自身设备如库存容量等有关，还与周围的交通环境和车流量等紧密相连。正常情况下，流畅性体现了立体车库存取车的时间效率，而在突发事件（火灾、地震）发生时，立体车库的流畅性主要表现为对车辆的快速疏散能力。

3.1 提高作业效率，缓解交通拥挤

(1) 当有顾客到达时，必须有足够的车位可以提供。但过多的库存容量又会造成不必要的经济损失，因此要综合考虑 P_n 和 β 两个性能指标，一般情况满足 $P_n < 0.1$ 。(2) 缩短用户存取车时间，要求用户排队长度不可过长，一般满足 $L_q \leq 4$ ，通过增加堆垛机数量或缩短堆垛机作业时间 T ，可以满足这一要求。

3.2 快速疏散车辆，降低危害程度

根据文献[4]可知，提高立体车库的疏散能力，必须要满足效率参数如表1。并且在设计规划立体车库时要满足如下要求：

(1) 停车位停满，且出入口处等待车辆很多时，以不刻意安排的顺序以一辆进、一辆出的方式，全部更新一次所花的实际时间要小于预计计算时间。(2) 在停车库全空的情况下，全部停满所需的预计计算时间要小于实际存储时间。(3) 在停车库全满，且出入口无交通阻塞的情况下，全部车辆连续出库，所用的实际时间要小于预计计算时间。

表1 各种停车场效率参数

车库性质	停车场所	疏散时间/h
服务	商店、餐馆及类似场所	<1.5
	影剧院及类似场所	<1.0
	不属于上述场	<1.5
营业	居民区	<2.0
	办公楼	<1.0

3.3 实例计算

某升降横移式双层双列立体车库，上层10个车位，下层9个车位，升降电机功率为2.2 kW，速度为5 m/min，横移电机功率为0.25 kW，横移速度为10 m/min。

升降时间： $t1'=21.6\text{ s}$

横移时间： $t2'=13.8\text{ s}$

准备时间： $t0=23\text{ s}$ （驾驶员把车开到位停好，并离开车到安全区的时间，或者从安全区进入车内把车开出车库的时间）。

(1) 全部停满/取出时间

$$t1=(Ns+Ne)t0+Ne(t1'+t2')$$

$$=19 \times 23\text{ s} + 10 \times 35.4\text{ s} = 791\text{ s}$$

式中： N_s 为下层车位数， N_e 为上层车位数。

(2) 平均存取时间：

$$t=t1(Ns+Ne)$$

$$=Ne/(Ns+Ne))(t1'+t2')+t0$$

$$=23\text{ s} + 18.6\text{ s} = 41.6\text{ s}$$

(3) 假设车库停满/取出时间为1h，则有：

$$t1=(2Ns+1)t0+(Ns+1)(t1'+t2')$$

$$=81.4\text{ s} \times N\text{ s} + 58.4\text{ s} = 3600\text{ s}$$

解得 $N\text{ s} = 43.5$ ，取整后得 $N_s = 43$

上层车位数 $N_e = N_s + 1 = 44$

(4) 停车库单组最大停车位数为87，平均存取时间：

$$t=44/47 \times 35.4\text{ s} + 23\text{ s} = 40.7\text{ s}$$

双层双列升降横移式停车库，以1 h停满/取出为限，单组最多停车位87，平均存取时间40.7 s，当停车场设计超过87个时，应考虑分为几组。

4 结束语

本文是在广州某大型自动化立体车库基础上完成的，对立体车库的设计有一定的指导作用，在满足甲方提出的各项指标的前提下，在车库的服务能力及流畅性方面做出了一定的贡献。并根据结论数据对车库的一些参数（如：库容量、堆垛机数量及车库的分区）给出修正意见，最终使车库的特性及流畅性得到了很大的提高。

参考文献：

- [1] Malmborg, K.J. Design optimization models for storage and retrieval systems[J]. International Journal of Industrial Engineering, 2003, 4(1): 14-23.
- [2] Chang, D.T., Wen, U.P.. The impact on rack configuration on the speed profile of the storage and retrieval machine[J]. IIE Transactions, 1997(29): 525-531.
- [3] Koh, S.G., Kwon, H.W., Kim, Y.J.. An analysis of the end of aisle order picking system: Multi aisle served by a single order picker[J]. International Journal of Production Economics, 2005 (98): 162-171.
- [4] 周奇才, 熊肖磊, 任建强, 等. 立体停车系统特征分析及流畅性计算[J]. 中国工程机械学报, 2005, 3 (1): 41-45.
- [5] 周奇才, 缪宁, 熊肖磊. 基于排队论的停车库服务模型与效能探讨[J]. 中国工程机械学报, 2005, 3 (2): 161-164.
- [6] 秦舒斌. 有轨巷道堆垛起重机出入库能力的计算[J]. 起重运输机械, 2001 (11): 9-11.
- [7] 徐格宁, 程红政, 陈延伟. 基于排队论的立体车库车辆存取调度原则优化[J]. 起重运输机械, 2008 (5): 50-55.