

塔机群防碰撞避让算法的研究*

马东方,周见行*,姜 伟,陈 龙,沈姗姗

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室,浙江 杭州 310014)

摘要:为了防止同一施工工地中多台干涉塔机之间的相互碰撞,首先分别建立了等高塔机碰撞模型和高低塔机碰撞模型;然后在传统塔机群防碰撞算法上分别建立了等高塔机等待总时间最短和高低塔机的最迟干预智能避让算法;最后给出了塔机群防碰撞智能避让算法的具体实现方法。研究表明,通过采用该智能避让算法可以大幅度减少塔机群总体停机等待时间,有效提高现场施工效率。

关键词:塔机群;防碰撞;智能避让

中图分类号: TP29;TH213.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)10-1222-04

Anti-collision and avoidance algorithm for group of tower cranes

MA Dong-fang, ZHOU Jian-xing, JIANG Wei, CHEN Long, SHEN Shan-shan

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,

Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to prevent the collision between several interference tower cranes in the same construction site, the collision model of the same height and different height tower cranes was firstly established. On the basis of the traditional tower cranes anti-collision algorithm, the intelligent collision avoidance algorithm was presented, which used the shortest waiting time method on the same height tower cranes and used the latest intervention method on the different height tower cranes. Finally, the realization of the intelligent collision avoidance algorithm was given. The research results show that this intelligent collision avoidance algorithm can significantly reduce the tower cranes' waiting time and effectively improve the construction efficiency.

Key words: group of tower cranes; anti-collision; intelligent collision avoidance

0 引 言

塔式起重机(亦称塔机或塔吊)是工业和民用建筑施工中的重要设备,具有工作效率高、使用范围广、操作容易、安装拆卸简便等特点。塔机的优点是能将构件或材料准确地吊运到建筑楼层的任意部位,在吊运方式和吊运速度方面胜过任何其他起重机械。因此,它对减轻疲劳强度、节省人力、降低建设成本、提高施工质量、实现工程施工机械化起着重要作用。然而,塔机具有中心高、起重量大、运行速度快的特点,在工作过程中,由于频繁起、制动,有比较大的动载荷存在,故塔机是一类蕴

藏危险因素较多的机械,当其发生事故时,产生的危害相当严重,轻则设备损坏,重则机毁人亡^[1-2]。国内外已有不少学者和研究机构对塔机安全防碰撞技术进行研究,典型的有德国生产的 LIEBHERR 起重机^[3],法国 SMIE 公司的 AC30 系统^[4],西安理工大学自主研发的基于多 AGENT 的塔机防碰撞系统^[5]。

上述系统通过对塔机运行状态的分析,能够有效判断塔机发生碰撞的可能,提前报警提醒塔机司机,并在碰撞危险来临时,及时停止塔机运动,防止碰撞。但在停机之后,往往需要司机操作塔机反向运行来退出碰撞危险区域,降低施工效率。

收稿日期:2011-03-15

基金项目:浙江省科技支撑和引导计划面上资助项目(2008C21112)

作者简介:马东方(1987-),男,浙江杭州人,主要从事塔机安全系统方面的研究。E-mail: easticeufo@163.com

通信联系人:周见行,男,高级工程师。E-mail: zhoujx@mail.hz.zj.cn

本研究在现有塔机防碰撞系统的基础上,研究一种塔机群智能避让算法,在保证塔机之间互不碰撞的前提下,尽可能地减少塔机群停机时间和重复运行路径。

1 算法概述

塔式起重机的运动方式主要有吊钩的起升运动、变幅小车的变幅运动和塔臂的回转运动。因此,塔机与塔机之间的碰撞方式主要分为以下 3 种:

- (1) 等高塔机的塔臂与塔臂之间的碰撞;
- (2) 低塔机的塔臂与高塔机的吊钩或吊绳的碰撞;
- (3) 低塔机的塔臂与高塔机的塔身之间的碰撞。

根据塔式起重机互相碰撞的方式与特点,本研究将该算法分成传统防碰撞算法和智能避让算法两个层次。传统防碰撞算法作为系统安全的最低保障,每一轮的算法决策都必须经过传统防碰撞算法的计算做出最终决策。其主要功能就是计算塔机与塔机之间的距离,如果这个距离小于安全距离,则立刻使塔机停止运行。智能避让算法则作为一种提高施工效率的选择性算法,在传统防碰撞算法计算之前,满足避让条件的情况下,对塔机运行行为进行预估计、计算决策。下面对以上 3 种碰撞方式分别介绍其避让防碰撞算法。

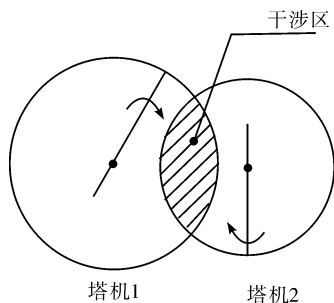


图1 两台干涉塔机

两台干涉塔机如图 1 所示,塔机 1 和塔机 2 为两台等高塔机,两台塔机之间存在公共干涉区,塔机 1 的塔臂顺时针回转,塔机 2 的塔臂逆时针回转。假设两台塔机保持当前运行状态不变,塔机 1 首先进入干涉区域,若在塔机 1 退出干涉区前,塔机 2 进入干涉区,则两台塔机将发生碰撞;若在塔机 1 退出干涉区后塔机 2 进入干涉区,则两台塔机将不发生碰撞。如果本研究采用传统防碰撞算法,可能出现的情况是:塔机 1 与塔机 2 同时处在干涉区域,并且都被停止运行。这时,需要其中一台塔机反向运行退出干涉区域,等待另一台塔机通过干涉区域后再次进入通过干涉区域。这样不仅同时降低了两台塔机的施工效率,并且由于其中一台塔机重复运行路径,增加了其机电损耗。这里

若采用智能避让算法,将首先预判断两台塔机是否会发生碰撞,若有碰撞的可能,则选择其中一台塔机不能进入干涉区,等待另一台塔机通过干涉区后才能进入。

低塔机的塔臂与高塔机的吊钩或吊绳的碰撞必须满足以下条件:

- (1) 高低塔机的塔臂同时转到干涉区域;
- (2) 高塔机的吊钩降低到低塔机的塔臂以下;
- (3) 高塔机的变幅小车变幅到使吊绳伸到足以够着低塔机的前臂的位置;
- (4) 高塔机的吊绳到低塔机的前臂的距离小于安全距离。

高低塔机的智能避让算法主要采用移动变幅小车或者提升高塔机的吊钩的方式来破坏碰撞条件,达到智能避让的目的。

低塔机的塔臂与高塔机的塔身之间的碰撞不存在避让情况,所以直接采用传统防碰撞算法进行计算即可。

2 等高塔机的智能避让算法

2.1 算法的选择

本研究以两台相互干涉的等高塔机为例,每一轮决策判断时,都假设塔机的塔臂将保持当前回转速度不变。两台相互干涉的平臂塔机如图 2 所示,图中实线代表塔机当前位置,以当前塔机 1 和塔机 2 的运行速度计算,塔机 1 进入干涉区的时刻为 T_{1in} ,退出干涉区的时刻为 T_{1out} ,塔机 2 进入干涉区的时刻为 T_{2in} ,退出干涉区的时刻为 T_{2out} 。当 $T_{1out} < T_{2in}$ 或 $T_{2out} < T_{1in}$ 时,表明两台塔机先后通过干涉区,不会发生碰撞。否则,两塔机将有发生碰撞的可能性。

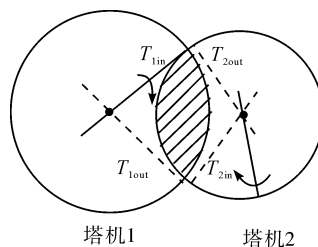


图2 两台相互干涉的平臂塔机

本研究为了实现两台塔机的智能避让,可以选择塔机 1 等待塔机 2 通过干涉区或者选择塔机 2 等待塔机 1 通过干涉区。若以“先进入干涉区的塔机不避让”为原则,塔机 1 先进入干涉区,则塔机 2 必须等待塔机 1 通过干涉区以后才能进入干涉区,塔机 1 的施工效率不受影响,塔机 2 由于需要停机等待塔机 1 通过干涉区,其施工效率将受影响,受影响时间即等待干涉区时间,大小为 $T_{2s} = T_{1out} - T_{2in}$ 。若以“等待干涉

区总时间最短”为原则,则还需计算塔机 1 等待塔机 2 通过干涉区的等待时间 $T_{1s} = T_{2out} - T_{1in}$,然后比较 T_{1s} 和 T_{2s} 的大小,选择等待时间短的塔机进行避让。对比上述两种算法,先进干涉区不避让算法处理方式简单,运算量小,但其施工效率较低;等待总时间最短算法能使系统总体施工效率达到最优,但该算法需遍历计算各种情况下的等待总时间,比较选择最优等待方式,随着相互干涉塔机数量的增加,相应运算量也会大幅度增加。考虑到实际施工环境中的干涉塔机数量有限,并且施工效率往往为现代工程的主要考虑因素,本研究选择等待总时间最短算法为该智能避让算法的核心。

2.2 塔机群的等待总时间最短算法

当系统中存在两台以上的干涉塔机时,最短等待总时间的计算必须从全局的角度出发,计算比较各种避让方式的等待时间,选择等待总时间最短的避让策略。三塔机干涉图如图 3 所示,3 台相互干涉的塔机若保持当前运行状态,塔机 1 进入和退出干涉区 1 的时刻分别为 0 和 10,塔机 2 进入和退出干涉区 1 的时刻分别为 3 和 6,塔机 2 进入和退出干涉区 2 的时刻分别为 0 和 3,塔机 3 进入和退出干涉区 2 的时刻分别为 0 和 2。

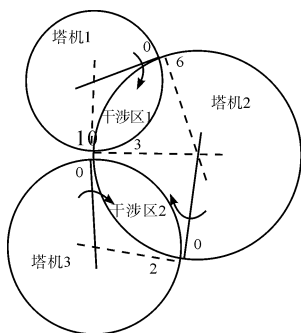


图 3 三塔机干涉图

可以选择的避让方式有以下 4 种:

- (1) 塔机 1 等待干涉区 1, 塔机 3 等待干涉区 2;
- (2) 塔机 1 等待干涉区 1, 塔机 2 等待干涉区 2;
- (3) 塔机 2 等待干涉区 1, 塔机 3 等待干涉区 2;
- (4) 塔机 2 等待干涉区 1, 塔机 2 等待干涉区 2。

本研究计算每种避让方式下系统总体等待时间 $T_s = T_{1s} + T_{2s} + T_{3s}$, 可得 4 种避让方式下系统的等待总时间分别为: 9、10、10、7。即选择方式 4 (塔机 2 避让塔机 1, 塔机 2 避让塔机 3) 时, 系统等待总时间 T_s 取到最小值 7, 施工效率达到最优。

2.3 等待总时间最短算法的实现

为了能够将上述算法编程实现, 计算机中通常采取“遍历各种避让情况, 计算比较等待总时间, 选择出

最短”的避让方案。该算法假设系统中只存在两两塔机干涉的情况, 即一台塔机可以与多台塔机都存在干涉区, 但一个干涉区仅与某两台塔机相关。

若某系统如图 4 所示, 5 台塔机存在 4 个干涉区。首先建立如图 5 所示的塔机数据结构, 每台塔机后继节点表示与该塔机相关的干涉区信息, T_{in} 代表该塔机进入该干涉区的时刻, T_{out} 代表该塔机退出该干涉区的时刻, 后继节点的顺序为该塔机通过各个干涉区的先后顺序。

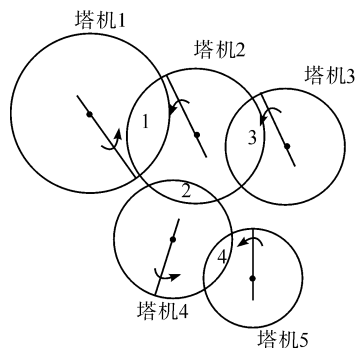


图 4 塔机群干涉图

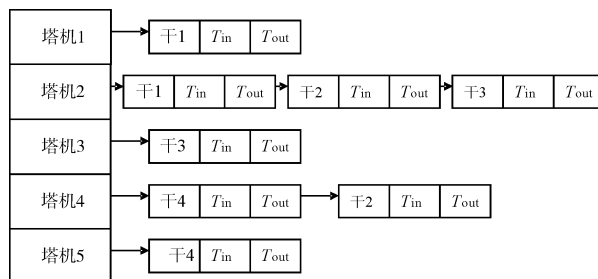


图 5 塔机数据结构

然后本研究建立如图 6 所示的干涉区数据结构, 每个节点代表一个干涉区并包含与该干涉区相关的两台塔机, 根据塔机数据结构中每台塔机通过干涉区的先后顺序确定干涉区数据结构中节点之间的前驱后继关系。

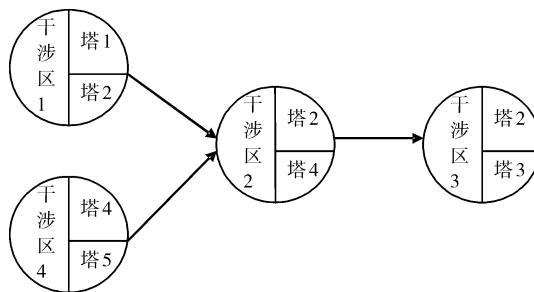


图 6 干涉区数据结构

本研究利用塔机数据结构和干涉区数据结构, 计算系统等待总时间。计算方式如下:

- (1) 从干涉区 1 开始, 选择其中一台塔机等待该

干涉区,计算该干涉区的等待时间。如选择塔机2等待干涉区,则塔机1的退出干涉区时刻和塔机2的进入干涉区时刻之差即为干涉区1的等待时间,若两者之差为负,表示没有发生碰撞的可能,该干涉区等待时间为0。

(2)修改塔机数据结构中塔机2的各个后继干涉区节点的进入时刻和退出时刻(需要加上干涉区1的等待时间)。

(3)按照干涉区数据结构中节点的前驱后继关系,对干涉区4、干涉区2、干涉区3重复(1)、(2)两步,选择等待塔机并计算干涉区等待时间。

(4)将每个干涉区的等待时间相加即为系统等待总时间。

最后,本研究遍历每种避让方案,比较、选择系统等待总时间最短的方案为该智能避让算法的最优解。

3 高低塔机的智能避让算法

对于两台高低不等的塔式起重机,其运行过程中可能发生的碰撞情况为:低塔机的塔臂碰撞高塔机的吊钩或重物。为了不影响两台塔机的回转运动,该智能避让算法通过高塔机变幅小车的变幅运动或者吊钩的起升运动来实现智能避让。同时,为了减少对塔机司机操作塔机不必要的干预,本研究只对以下几种情况进行避让处理:

(1)高塔机变幅小车静止,吊钩正在起升运动,控制变幅小车变幅运动实现避让;

(2)高塔机变幅小车正在变幅运动,吊钩静止,控制吊钩起升实现避让;

(3)高塔机变幅小车和吊钩都静止,比较变幅运动和起升运动避让的干预开始时间,选择最迟干预开始时间的运动方式进行避让。

其他各种情况均由传统防碰撞算法直接处理。

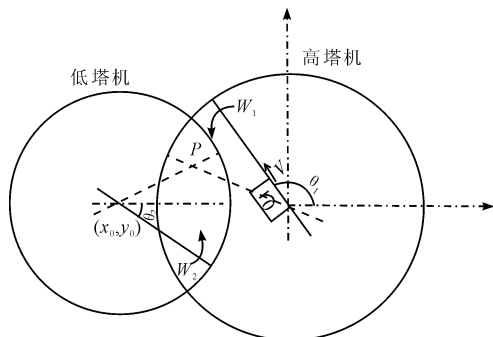


图7 高低干涉塔机

为了实现上述算法,本研究首先需要根据两台塔机当前的运动状态,预测判断其是否会发生碰撞。高

低干涉塔机如图7所示,以高塔机的塔基为坐标轴原点,高塔机的变幅小车当前到原点的距离为 r_0 ,运动速度为 v ,假设 t 秒后在点 $P(x_p, y_p)$ 发生碰撞,则有:

$$x_p = (r_0 + vt) \cos(\theta_1 + \omega_1 t) \quad (1)$$

$$y_p = (r_0 + vt) \sin(\theta_1 + \omega_1 t) \quad (2)$$

本研究设低塔机塔基的坐标为 (x_o, y_o) ,对方程: $\tan(\theta_2 + \omega_2 t) = (y_p - y_o) / (x_p - x_o)$ 求解,若有解并且点 P 到低塔机塔基的距离小于低塔机的塔臂,则在 t 秒后高低塔机可能在 P 点发生碰撞。

若采用高塔机提升吊钩的方式实现智能避让,则在 t 秒前须将吊钩高度提升至高塔机塔臂高度之上,同样,若采用变幅小车的变幅运动避让方式则情况也类似。本研究通过比较两种方式避让的干预开始时间,选择最迟干预策略进行避让。

4 结束语

本研究在传统防碰撞算法的基础上加入智能避让环节,能够对相互干涉塔机之间可能发生碰撞进行预测与估计,通过对选择某台塔机提前等待干涉区的策略,避免停机后需要反向运行离开而造成的施工效率降低,并且给出了最优等待时间的避让算法和计算机中实现方法。该研究在保证塔机群施工安全的前提下,为提高现场施工效率提供了一种思路和解决方法。

参考文献(References):

- [1] 黄洪钟,姚新胜. 塔式起重机安全性研究与展望[J]. 建筑安全,2001,16(3):1-6.
- [2] 门长根. 塔机常见事故的分析和预防[J]. 建筑安全,2002,17(8):18-19.
- [3] MOON S, BERNOLD L E. Graphic-based human-machine interface for construction manipulation control[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1998(7):305-311.
- [4] 马燕明,朱冬梅,杨清泉,等. 塔机防碰撞及工作区域限制技术[J]. 建筑机械,2004,26(6):16-20.
- [5] 令召兰. 基于MAS的多塔机防碰撞控制系统研究[D]. 西安:西安理工大学机械与精密仪器工程学院,2007:3-15.
- [6] 韩九强,沈建坤,魏全瑞,等. 建筑塔吊群智能防碰撞系统[J]. 建筑安全,2008,23(2):11-14.
- [7] 彭万仓,王水波,王全州. 基于编码技术的塔吊防碰撞系统设计[J]. 现代电子技术,2008,31(16):51-54.
- [8] ALI A M S, BABU R N, VARGHESE K. Collision free path planning of cooperative crane manipulators using genetic algorithm[J]. *ASCE*, 2005,19(2):182-193.

[编辑:李 辉]