

# 塔机障碍物避让算法的研究\*

陈 龙, 周见行\*, 姜 伟, 马东方

(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:**作为建筑工程的主要垂直运输工具,塔式起重机的安全、可靠、高效对建筑工程而言是至关重要的,如何预防塔机碰撞事故是塔机安全防范中的一项重要内容。为了防止塔机与障碍物之间发生碰撞,首先对现有的塔机工作区域内障碍物进行了建模分析;然后在障碍物周围设置减速调整区域来防止碰撞;最后根据效率和能量两个角度提出了一种塔机障碍物避让算法。研究结果表明,采用该智能避让算法可以大幅度提高效率和节省能量。

**关键词:**塔式起重机;障碍物;防碰撞;避让;算法

中图分类号: TH213.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)09-1056-04

## Avoidance algorithm for obstacles of tower cranes

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

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** As a main transport tool, the safety credibility and high efficiency of tower crane is very important for the whole construction project. How to prevent the collision of the tower crane is an important matter for safety guarantee. In order to prevent the collision between the obstacle and tower crane, firstly, the model of obstacles within the tower crane working area was established, and the deceleration zone around the obstacles was used to avoid colliding. Finally, the avoidance of obstacles algorithm of the tower crane according to efficiency and energy was proposed. The results indicate that the intelligent collision avoidance algorithm can significantly improve the construction efficiency and save energy.

**Key words:** tower crane; obstacle; anti-collision; avoidance; algorithm

## 0 引 言

在进入 21 世纪以来,随着经济建设和改革开放的进一步发展,我国城市化发展的步伐也越来越快,而作为城市发展的基础产业—建筑业也随之得到了蓬勃的发展。随着建筑业的迅速发展,作为工业和民用建筑施工中的重要设备,塔式起重机的发展面临前所未有的发展机会,但同时也遭到了挑战。当前我国塔机虽然在数量上与日俱增,但塔机事故仍频繁发生<sup>[1-2]</sup>。

因此,笔者以减少事故的发生率和提高塔机工作效率作为出发点,进行对塔机障碍物避让算法的研究。

在塔机工作区域内对障碍物进行建模分析的基础上,提出了塔机防碰撞算法与塔机避让策略。

## 1 障碍物的建模分析

塔式起重机在工作时所遇到的障碍物,如已有街道、已有建筑、公路、人群集中区域等等<sup>[3]</sup>,其区域外形可描述为不规则图形,如图 1 所示,以上所描述的都是有一定高度的几何体。中国建筑科学研究院与上海新时达电气股份有限公司共同研究提出了障碍物建模方法<sup>[4]</sup>,下面对建模方法、优缺点、权衡改进作一个简单描述:把建筑物平面几何模型分割为若干扇形,如图

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:陈 龙(1986-),男,浙江富阳人,主要从事嵌入式方面的研究. E-mail:chenlong19860929@163.com

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

2中各区域所示,将图2的一个立体模型分割为以回转中心为圆心的A、B、C、D、E、F共6个所对的圆心角度相同的扇形区域。则每个扇形区域对应5个变量 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $H_1$ ,如图3所示。

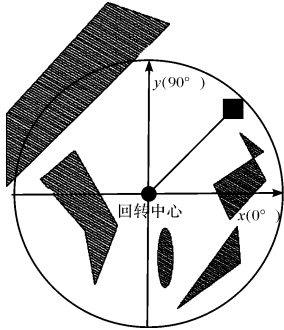


图1 塔机需避让障碍物不规则平面模型

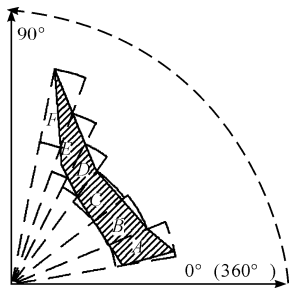


图2 障碍物投影平面分割

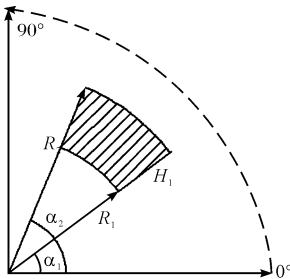


图3 分割后的障碍物特征参数

$\alpha_1$ —扇形区域的起始角度;  $\alpha_2$ —扇形区域的结束角度;  $R_1$ —障碍物离开回转中心的最短距离;  $R_2$ —障碍物离开回转中心的最大距离;  $H_1$ —扇形区域的高度

该建模方法使得模型复杂、输入参数量不确定的障碍物变得简单且利于用户操作;不过这样对障碍物分割也造成了一些缺陷,使一些原本不是障碍物的地方变成了障碍物,减少了塔机能运行的区域,降低了控制精度。

当对障碍物分割区域所对应的角度 $\varphi$ 越小,控制的精度也就越大,但数据量也将会增加,而对于控制塔机的嵌入式设备是致命的,因为嵌入式设备的存储容量不大而且非常珍贵,必须在嵌入式设备合理的障碍物存储容量 $S$ 和 $\varphi$ 之间作个平衡。假设障碍物所占

的圆周角度 $\theta$ ,则可以分 $\theta/\varphi$ 个障碍物模型,每个障碍物有5个参数,每个参数占4个字节,则可以得到公式 $S = 20\theta/\varphi$ 。所以可以得出:嵌入式设备性能越好,可以对障碍物分割得越细,控制精度越高。

## 2 防碰撞算法的研究

塔机工作时,塔臂所吊的重物不能进入障碍物所在区域,并且塔机必须采取一定措施来避免塔臂所吊重物与障碍物发生碰撞<sup>[5-10]</sup>。本研究采用一种在扇形障碍物周围设置一个减速调整区域,并将减速调整区域也设置成扇形区域。其平面模型如图4所示,当塔机运行到减速调整区域时立即减速。塔机运行与障碍物发生碰撞主要有两大情况(带矩形末梢的线段代表塔臂,小圆点代表塔臂所吊的重物):情况1代表当塔机做回转运动进入减速调整区域;情况2代表当塔臂不动,塔臂上的小车做变幅运动进入减速调整区域。本研究就以情况1为参考对塔机障碍物减速调整区域进行讨论。对于塔臂不同运行状态(不同的运行速度以及减速时不同的加速度),减速调整区的大小不一样。将塔臂不同运行状态下减速调整区的大小以链表的形式存储在嵌入式设备中,当塔机运行时通过查表得到减速调整区的大小,塔机遇到障碍物减速运行示意图如图5所示。减速调整区域大小的计算主要考虑到以下几种因素:

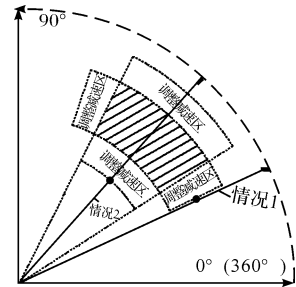


图4 障碍物减速调整区平面模型

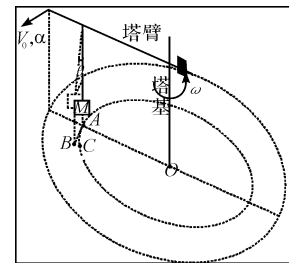


图5 塔机遇到障碍物减速运行示意图

(1)塔机运行时的速度 $V_0$ 以及减速时的加速度 $\sigma$ ,可计算出重物减速过程运动的距离 $S$ 。

(2)塔臂在减速调整时所吊重物会离开平面(塔

基和塔臂所组成的平面)形成一个摆角  $\theta$  ,由于重物摆动的最大摆角  $\theta$  所形成的距离为  $L\sin\theta$  ( $L$  为吊钩与塔臂的距离)。所以减速调整区所对应的圆心角可计算为  $\phi = (S + L\sin\theta)/R_1$  。通过对塔臂不同运行状态下减速调整区域大小的计算可得结果如表 1 所示,并用链表的形式存储于嵌入式设备中。

表 1 减速调整查找表

塔机运行状态	减速调整去所对应的 $\phi$ 角
状态 1	$\phi_1$
状态 2	$\phi_2$
...	...

### 3 避让策略的研究

在塔臂进入减速调整区进行减速的同时塔臂上小车也在运行做调整,小车可以向着离开回转中心的方向调整,也可以向着回转中心的方向调整。塔臂避让障碍物示意图如图 6 所示, A 区域为减速调整区域,  $\phi$

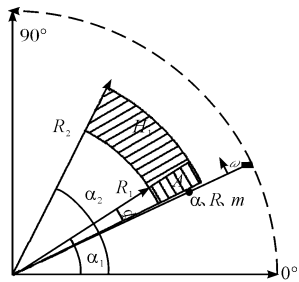


图 6 塔臂避让障碍物示意图

为减速调整区所对应的圆心角,塔臂所吊重物信息  $R$ 、 $\alpha$ 、 $H$ 、 $m$  分别代表重物在塔机回转区域内的回转半径、回转角度、重物的高度、重物的重量,其中回转半径  $R$  与回转角度  $\alpha$  随塔臂和小车调整运行而不断改变。本研究定义从塔臂所吊重物进入减速调整区直到重物的回转角  $\phi$  等于障碍物结束角度  $\alpha_2$  的过程为避让过程。该避让策略的研究是基于对效率、节能以及最大力矩的综合考虑,即在不超过塔臂最大力矩的情况下,避让过程的时间与塔机在重物上所消耗的能量之和  $\Sigma$  最小。假定塔臂的最大承受力矩为  $M$ ,当  $mR_2 > M$  时,小车不能向着离开回转中心的方向调整,以免超过塔臂所能承受的最大力矩而导致危险。塔臂以角速度为  $\omega$ 、角加速度为  $\beta$  进入减速调整区直到塔臂停止所需的时间为  $t = \omega/\beta$  (单位:s)。根据避让方法的不同,本研究分为两种情况讨论。

#### 3.1 小车向着离开回转中心的方向调整

当小车运动的速度为  $V_1$ ,则重物从进入减速调整区到出减速调整区所需的时间为:

$$t_1 = \frac{R_2 - R}{V_1} \tag{1}$$

(1)当  $t_1 > t$  时,说明当塔臂停止时变幅小车还没有调整结束。塔臂所扫过的角  $\theta_1$  为:

$$\theta_1 = \omega t - \frac{1}{2}\beta t^2 \tag{2}$$

整个避让过程所需的总时间  $t$  为:

$$t = t_1 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1 + \phi - \theta_1}{\omega} \tag{3}$$

重物出减速调整区后正常运行获得角速度  $\omega$ ,所以塔机在重物上所消耗的能量  $\nabla$  为:

$$\nabla = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mV_1^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 R_2^2 + \frac{1}{2}mV_1^2 \tag{4}$$

从而  $\Sigma$  可表示为:

$$\Sigma = a \left[ t_1 + \frac{(\alpha_2 - \alpha_1 + \phi - \theta_1)}{\omega} \right] + (1 - a) \left( \frac{1}{2}m\omega^2 R_2^2 + \frac{1}{2}mV_1^2 \right) \tag{5}$$

式中:  $\phi$  一减速调整区角度,  $a$  一权重值(代表在避让策略中效率和消耗能量各自所占的比重)。

(2)当  $t_1 < t$  时,说明塔臂没有停止就已调整结束。塔臂所扫过的角  $\theta_1$  为:

$$\theta_1 = \omega t_1 - \frac{1}{2}\beta t_1^2 \tag{6}$$

塔臂剩余角速度为  $\omega_1 = \omega - \beta t_1$ ,重物出调整区后正常运行获得角速度  $\omega$ ,所以重物获得能量  $\nabla$  为:

$$\nabla = \frac{1}{2}m\omega^2 R_2^2 - \frac{1}{2}m(\omega - \beta t_1)^2 R_2^2 + \frac{1}{2}mV_1^2 \tag{7}$$

同理也可计算得到  $t_1 < t$  时的  $\Sigma$  值。

#### 3.2 小车向着回转中心方向调整

和情况 1 一样,小车的运行速度为  $V_1$ ,则重物从进入减速调整区到出减速调整区所需的时间  $t_1$  为:

$$t_1 = \frac{R - R_1}{V_1} \tag{8}$$

(1)当  $t_1 > t$  时,说明当塔臂停止时变幅小车还没有调整结束。塔臂所扫过的角  $\theta_1$  与情况 1 一致,重物出调整区后正常运行获得角速度  $\omega$ ,所以重物获得的能量  $\nabla$  为:

$$\nabla = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 R_1^2 + \frac{1}{2}mV_1^2 \tag{9}$$

从而  $\Sigma$  可表示为:

$$\Sigma = a \left[ t_1 + \frac{(\alpha_2 - \alpha_1 + \phi - \theta_1)}{\omega} \right] + (1 - a) \left( \frac{1}{2}m\omega^2 R_1^2 + \frac{1}{2}mV_1^2 \right) \tag{10}$$

(2) 当  $t_1 < t$  时,说明塔臂先停止再调整结束。塔臂所扫过的角  $\theta_1$  与情况 1 一致,塔臂剩余角速度为  $\omega_1 = \omega - \beta t_1$ ,重物出调整区后正常运行获得角速度  $\omega$ ,所以重物获得能量  $\nabla$  为:

$$\nabla = \frac{1}{2}m\omega^2 R_1^2 - \frac{1}{2}m(\omega - \beta t_1)^2 R_1^2 + \frac{1}{2}mV_1^2 \quad (11)$$

同理也可计算得到  $t_1 < t$  时的  $\sum$  值。

将情况 1 和情况 2 所计算的  $\sum$  值进行比较,选择  $\sum$  最小的策略即可实现一种能在效率和耗能间做到均衡的最优避让策略。

## 4 结束语

本研究所讨论的塔机智能避让系统与传统防碰撞方法相比,实现了智能控制,防止了塔机与障碍物间的碰撞,在避让障碍物策略上也有了新的突破,提高了塔机的运行效率,节省了塔机耗能,对本课题的进一步研究可着眼于对障碍物进行不同的建模分析,从而提出不同的算法。

### 参考文献 (References):

[1] 门长根. 塔机常见事故的分析与预防[J]. 建筑安全,2002

(上接第 1047 页)

## 4 结束语

本研究根据摆线齿锥齿轮的切齿加工原理,建立了利用计算机技术模拟齿轮铣齿加工过程的基本方法,通过编程实现了加工仿真的功能,并用实例验证了仿真系统的正确性。加工仿真结果可为摆线齿锥齿轮强度的有限元分析以及基于加工中心进行仿形加工提供精确的三维实体模型。

此外,通过仿真结果可直观地了解齿轮的根切、齿底的尖脊、二次切削以及齿长方向齿形的收缩情况,对指导设计人员选择合理的设计参数和刀具参数具有重要的意义。

### 参考文献 (References):

[1] 曾 韬. 螺旋锥齿轮设计与加工[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1989.  
[2] 董学朱. 摆线齿锥齿轮及准双曲面齿轮设计和制造[M].

(8):18-19.

- [2] 刘晓胜,周进. 塔机运行的关键控制算法研究[J]. 科学技术与工程,2010,24(10):5890-5894.  
[3] 王保路. 塔机防互撞及区域保护系统[J]. 建筑机械,2001(8):44-46.  
[4] 万宏权,蔡亮,马荣章,等. 塔机监控系统的工作区域限制逻辑算法[J]. 建筑机械化,2009,30(11):41-43.  
[5] 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.  
[6] RONIE N. Automated project performance control of construction projects[J]. **Automation in Construction**, 2005, 14(4): 467-476.  
[7] YEHIEL R, AVIAD S. Automation of existing tower cranes: economic and technological feasibility[J]. **Automation in Construction**, 1998,7(4): 285-298.  
[8] 马燕明,朱冬梅,杨清泉,刘春林. 塔机防碰撞及工作区域限制技术[J]. 建筑机械,2004,26(7):78-90.  
[9] 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):51-58.  
[10] 刘卫兵. 塔式起重机吊钩远离危险区域的自动控制[J]. 建筑安全,2000,15(12):18-19. [编辑:张翔]

北京:机械工业出版社,2003.

- [3] 董学朱. 摆线齿锥齿轮连续分齿法铣齿原理的研究[J]. 机械传动,1999,23(2):29-30.  
[4] STADTFELD H J. Handbook of Bevel and Hypoid Gears, Calculation, Manufacturing and Optimization [M]. New York: Rochester Institute of Technology, 1993.  
[5] SHI Y P, FONG Z H, LIN C Y. Mathematical model for a universal face hobbing hypoid gear generator [J]. **ASME Journal of Mechanical Design**, 2004, 129(1): 38-47.  
[6] FAN Q. Enhanced algorithms of contact simulation for hypoid gear drives produced by face-milling and face-hobbing processes [J]. **ASME Journal of Mechanical Design**, 2004, 129(1): 31-37.  
[7] 王志永. 摆线齿锥齿轮数控加工装备及其数字化制造关键技术的研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2010:52-87.  
[8] 于水琴,曾 韬. 数控螺旋锥齿轮磨齿机加工仿真系统的研究[J]. 机械制造,2008,46(3):5-7. [编辑:罗向阳]