

轨道式自动导引车抗倾覆稳定性校核*

OVERTURNING STABILITY EXAMINATION ON RAIL GUIDED VEHICLE

杨建国** 杨晨星*** 项 前 吕志军 符鹏程****

(东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

YANG JianGuo YANG ChenXing XIANG Qian LV ZhiJun FU PengCheng

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

摘要 轨道式自动导引车是现代自动化物流系统中的重要组成部分,抗倾覆稳定性是设计中极其重要的要求。为了客观合理的评估抗倾覆稳定性,分析轨道式自动导引车稳定性校核的基本原则及不同的工况条件。结合轨道式自动导引车的实际作业情形,基于直道加速、直道刹车和弯道行驶三种工况分析,建立了穿梭车不同工况下的抗倾覆计算数学模型,并通过分析和比较,提出了判断轨道式自动导引车抗倾覆稳定性计算的公式。

关键词 自动化物流系统 轨道式自动导引车 倾覆稳定性

中图分类号 TH122

Abstract Rail guided vehicle is a very important part of modern automated logistics system. Overturning stability is extremely important requirement on rail guided vehicle design. In order to assess overturning stability objectively, this paper analyzes the basic principles of examining the rail guided vehicle stability and different working conditions. Based on three different working conditions of straight acceleration,braking and turn driving, this paper establishes the mathematical model calculations of rail guided vehicle. Besides, through analysis and comparison, this paper proposes the formula of the overturning stability.

Key words Automated logistics system; Rail guided vehicle; Overturning stability

Corresponder: YANG ChenXing, E-mail: ychenxing1990@163.com.

The project supported by the Shanghai Zhangjiang High-Tech Park (No. 201310-MH-C0-011), and Shanghai Logistics Equipment Engineering Technology Center (No. 10dz2250800), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2232012D3-22).

Manuscript received 20131114, in revised form 20131224

引言

物流在一个国家的物料运输和经济发展中占有非常重要的位置。随着物流技术和市场的逐渐成熟,企业物流都向着高效、高可靠性、高度自动化方向发展,向计算机全面集成管理过渡^[1]。在这种趋势下,自动化物流系统应运而生。自动化物流系统是现代物流技术的核心,是典型的现代机械与电子技术相结合的系统,由具有一定智能的物流设备和计算机管理与控制系统组成^[2]。由于其空间利用率高,仓储能力强,便于实现存取自动化等优点,在烟草、医药保健品、食品、通讯、信息和机械制造等领域的应用日益广泛^[3]。

轨道式自动导引车(Rail Guided Vehicle),简称穿梭车,以其灵活、方便、经济等特点得到广泛应用,是自

动化物流系统中最常用的智能型轨道导引搬运设备。在电控系统控制下,通过编码器、激光测距等认址方式精确定位于各个输入、输出工位,接受物料后进行往复穿梭运输,具有高度的自动化和灵活性^[4]。

穿梭车运行的稳定性对仓储运输安全具有极为重要的影响,其工作性能取决于穿梭车机构的承载能力和稳定性。现代自动化物流系统的飞速发展,特别是运输速度、运载重量的大幅度提高,使得穿梭车运行稳定性的问题尤为突出。准确的计算穿梭车的抗倾覆稳定性,对于合理的评价穿梭车的作业稳定性,确定整机重量、负载重量、总体布局,有着极其重要的作用。既能找出和发现潜在的设计问题,降低研发成本,又能有效的提高穿梭车作业性能,防止穿梭车倾覆事故的发生。

* 20131114 收到初稿, 20131224 收到修改稿。上海张江科技园区项目 (201310-MH-C0-011)、上海仓储物流设备工程技术研究中心项目 (10dz2250800) 及中央高校基本科研业务费专项资金 (2232012D3-22) 资助。

**杨建国, 男, 1951 年 4 月生, 上海人, 东华大学教授, 博士生导师, 研究方向为智能设计与制造等。

***杨晨星, 男, 1990 年 8 月生, 安徽芜湖人, 东华大学在读硕士研究生, 研究方向为物流装备。

1 抗倾覆稳定性的研究现状及校核原则

穿梭车抗倾覆稳定性指的是穿梭车在自重和负载作用下抵抗倾覆的能力。穿梭车属于物流车辆,本文在校核穿梭车时,按欧盟现行物流车辆标准《Rail dependent storage and retrieval equipment—Safety requirements》EN528:2008 中规定的倾覆性评定方法来校核^[5]。穿梭车的结构示意图见图 1。

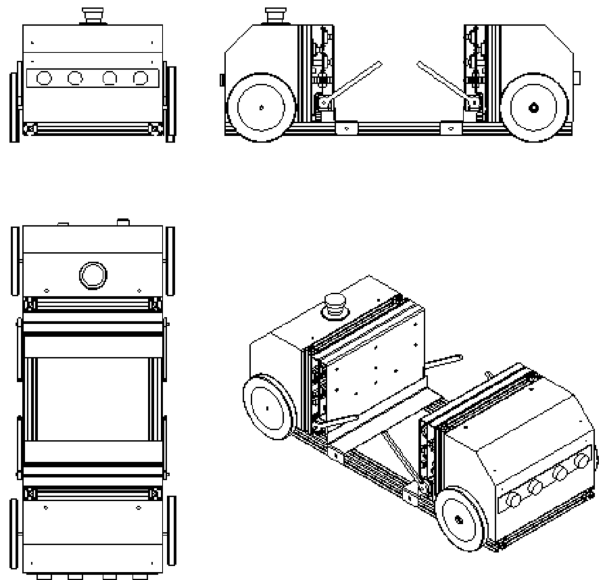


图 1 穿梭车示意图

Fig. 1 Rail guided vehicle

1.1 研究现状

针对车辆抗倾覆稳定性,国内外的一些学者已经做过相关的研究。胡敏,杨建国等分析和总结了穿梭车在直线轨道上的侧偏原因,并对穿梭车提出了机构改进^[6];S. G. Lee 等对立体仓库中穿梭车的出入库效率进行了仿真分析^[7];Amir Kolaei 等研究了槽罐车的线性流体晃动理论,并对槽罐车的瞬态横向晃动和侧倾稳定性进行了预测和分析^[8];A. Carrarini 等基于可靠性的理论,分析了铁路车辆的侧风稳定性问题^[9];Ashok Kumar 等研制了一种可以测量拖拉机前轮动态反应的装置,用来预防农业拖拉机的后侧倾翻^[10];周景成,杨建国等基于 Adams 软件对穿梭车的弯道倾覆性进行了分析及设计改进^[11];李永刚等分析了楔形截面弯道上行驶时,车辆发生侧滑和倾覆的影响因素^[12]。上述的论文尚未对穿梭车倾覆的校核方法做出理论分析与研究,也没有推导出不同工况下穿梭车抗倾覆稳定性的判别方法和计算公式。

1.2 抗倾覆原则分析

在设计和制造穿梭车的过程中,确保穿梭车具有足够的抗倾覆稳定性,是最基本的要求之一。目前,国内外对抗倾覆稳定的校核主要有五种方法:①力矩法;

②车轮力法;③稳定系数法;④稳定性极坐标法;⑤按临界倾覆载荷标定额定负载量法。穿梭车属于物流车辆,按 EN528-2008 中规定,采用力矩法进行抗倾覆稳定性的校核计算。

1) 倾覆系数 v_s 为

$$v_s = \frac{M_G}{M_Q}$$

式中, v_s 为穿梭车的倾覆系数; M_G 为整机稳定力对倾翻边的稳定力矩之和 (Nm); M_Q 为各种倾覆力对倾翻边的倾覆力矩之和 (Nm)。

2) 当倾覆系数 $v_s \geq 1.5$ 时,可以认为穿梭车抗倾覆性能是稳定的。当穿梭车在紧急情况下急刹车等情形时,倾覆系数会减小,但要求 v_s 不能小于 1.1,即 $v_s \geq 1.1$ 。当 $v_s < 1.1$ 时,则认为穿梭车有倾覆的危险。在校核的过程中,当穿梭车运行稳定时, v_s 的安全系数取 1.5;当穿梭车有倾覆的趋势时, v_s 有减小的趋势,此时 v_s 的安全系数取 1.1。由于工作条件的不同,在进行抗倾覆稳定性校核计算时的要求、条件等是不同的,应分别校核穿梭车的抗倾覆稳定性。

3) 在直道上作业时,假定穿梭车工作在坚实、水平的轨道上。在弯道处运行,计算其抗倾覆稳定性时,必须考虑所给定的条件,如线路坡度、曲线超高及轨道面对地面的倾角的影响。

1.3 穿梭车工况分析

根据穿梭车结构特征和作业条件,有 3 种工况:①以加速度 a 在直道上运行;②直道上运行,因突发状况而紧急刹车;③弯道运行。

1) 工况 1,以加速度 a 在直道上运行,即穿梭车以加速度 a 在直线轨道上加速运行,满载货物情况下的作业稳定性。

2) 工况 2,因突发状况而紧急刹车,即穿梭车在直线轨道上以规定的速度运行,突然紧急刹车情况下的作业稳定性;

3) 工况 3,弯道运行,即穿梭车在有弯道的轨道上运行,以规定的速度通过弯道,满载货物情况下的作业稳定性。

2 倾覆线确定

倾覆线指在穿梭车发生倾覆时绕其翻转的轴线。倾覆线与穿梭车的机构特征和作业工况有关。在校核穿梭车的抗倾覆稳定性时,应在最危险的情况下进行,即穿梭车以线路容许的最高速度通过时的运行状态下测试。

穿梭车的支承面是一个矩形,通常情况下抗倾覆稳定性校核的倾覆线如图 2 所示。图中粗实线边代表危险倾覆线。

1) 穿梭车直道运行时,可能发生纵向倾覆,定义此时的倾覆线为纵向倾覆线。纵向倾覆线是前轮轮对或后轮轮对的轴线。穿梭车以纵向倾覆线为轴线,发生向前或向后的倾翻;

2) 穿梭车弯道运行时,可能发生横向倾覆,定义此时的倾覆线为横向倾覆线。横向倾覆线是左轮轮对或右轮轮对的轴线。穿梭车以横向倾覆线为轴线,发生向轨道左侧或右侧的倾翻。

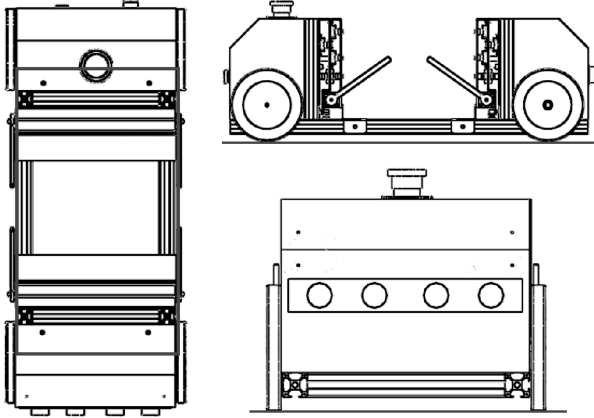


图2 穿梭车倾覆线示意图

Fig. 2 Overturning line of RGV

3 计算模型的建立与分析

3.1 计算模型的建立

以穿梭车车轮为支撑建立模型,由于在有弯道的轨道上作业时存在线路超高,在计算抗倾覆稳定性时设轨道平面和地面的倾角为 θ ,见图3。图中 G_c 为穿梭车车体自重(N), G_{b0} 为伸缩臂内侧板的重量(N), G_{b1} 为伸缩臂中间板的重量(N), G_{b2} 为伸缩臂外侧板的重量(N), G_g 为卡勾的重量(N), G_h 为运载的货物重量(N), h_1 为穿梭车车体的重心距轨道表面的高度(m), h_2 为伸缩臂中间板的重心距轨道表面的高度(m), h_3 为穿梭车外侧板的重心距轨道表面的高度(m), h_4 为卡勾的重心距轨道表面的高度(m), L_1 为穿梭车车体在轨道纵向上的长度(m), L_2 为穿梭车车体重心线的垂线在纵向上距后端面的距离(m), L_3 为穿梭车车体在轨道横向上的长度(m), L_4 为穿梭车车体重心线的垂线在横向上距侧面的距离(m), θ 为地面倾角允许的最大坡度。

为了计算的简便,将伸缩臂的内侧板、中间板和外侧板看着一个整体,并将整个伸缩臂、货物的自重换算到穿梭车的车体上,按照这种思想,穿梭车的自重按式(1)计算。

$$G = G_c + 2(G_{b0} + G_{b1} + G_{b2} + 2G_g) + G_h \quad (1)$$

式中,所有符号如上所述。简化后的模型见图4,图中

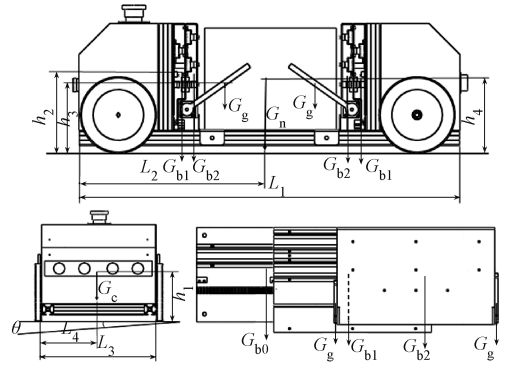


图3 穿梭车计算模型建立

Fig. 3 Calculation model of RGV

G 为穿梭车总的重量(N), M 为对应的质量(kg), h 为穿梭车整体重心对轨道平面的距离(m)。

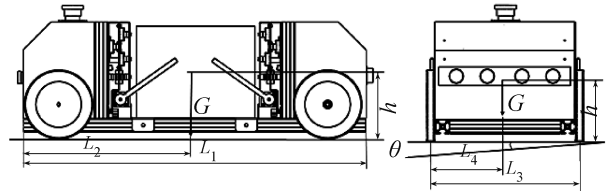


图4 穿梭车简化计算模型

Fig. 4 Simplified calculation model of RGV

3.2 倾覆性计算公式

3.2.1 工况1——以加速度 a 在直道上运行

当穿梭车以加速度 a 在直线轨道上加速行驶时,穿梭车受到重力 G ,方向竖直向下,作用在重心 C 上;约束力 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 ,方向竖直向上,分别作用在两个后轮和两个前轮上;后轮的摩擦力方向向前,作用在车轮与轨道的接触面上;前轮的摩擦力方向向后,也作用在车轮与轨道的接触面上。计算模型见图5,图中 N_1 、 N_2 为后端的两个车轮受到的反支撑力(N), F_1 、 F_2 为后端的两个车轮受到的摩擦力(N), N_3 、 N_4 为前端的两个车轮受到的反支撑力(N), F_3 、 F_4 为前端的两个车轮受到的摩擦力(N), L_5 为前后轮之间的距离(m)。在这种工况下,穿梭车可能以后轮与轨道的接触点连线为倾覆线,发生向后的纵向倾覆,不计附加载荷、坡度和线路超高的影响,其抗倾覆稳定性校核计算公式为

$$v_s = \frac{M_G}{M_Q} = \frac{MgL_2}{Mah + (N_3 + N_4)L_5} \geq 1.5 \quad (2)$$

在穿梭车发生倾翻的瞬间,前轮的两个反支撑力 N_3 和 N_4 减小到0,其临界抗倾覆稳定性校核计算为

$$v_s = \frac{M_G}{M_Q} = \frac{gL_2}{ah} \geq 1.1 \quad (3)$$

3.2.2 工况2——在直道上紧急刹车

当穿梭车在直线轨道上行驶,遇到紧急情况突然刹车时,后轮的摩擦力方向也向后;质心的加速度方向

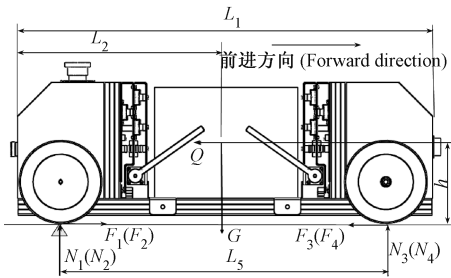


图5 工况1受力分析

Fig. 5 Force analysis of condition 1

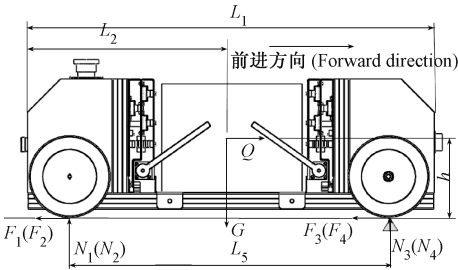


图6 工况2受力分析

Fig. 6 Force analysis of condition 2

向后,作减速运动,惯性力 Q 方向与加速度方向相反,作用在质心 C 上,计算模型见图6。在这种工况下,穿梭车可能以前轮与轨道的接触点连线为倾覆线,发生向前的纵向倾覆,其抗倾覆稳定性校核计算为

$$v_s = \frac{M_G}{M_Q} = \frac{Mg(L_1 - L_2)}{Mah + (N_1 + N_2)L_5} \geq 1.5 \quad (4)$$

在穿梭车发生倾翻的瞬间,后轮的两个反支撑力 N_1 和 N_2 减小到0,其临界抗倾覆稳定性校核计算为

$$v_s = \frac{M_G}{M_Q} = \frac{g(L_1 - L_2)}{ah} \geq 1.1 \quad (5)$$

3.2.3 工况3——弯道运行

当穿梭车以规定的速度 v 通过弯道时,穿梭车受到离心力 F_r ,方向指向弯道内侧;轨道内侧面面对穿梭车导向轮的约束力 F_{c1} 、 F_{c2} ,方向垂直于轨道侧面;弯道半径为 r ,轨道倾角为 θ 。计算模型见图7, F_{c1} 、 F_{c2} 为导向轮对轨道侧面的反作用力, L_6 为导向轮受力作用线和轨道面的距离, F_r 为离心力, r 为弯道半径, β 为穿梭车过弯道时前后导向轮之间连线对应的圆心角。在这种工况下,穿梭车可能轨道内侧的前后轮与轨道的接触点连线为倾覆线,发生向内侧的横向倾覆,其抗倾覆稳定性校核计算为

$$v_s = \frac{M_G}{M_Q} = [Mg(L_4 - h \tan \theta) \cos \theta + (F_{c1} + F_{c2}) \cos(\alpha/2) L_6] / [(M \cdot v^2 / r) (h / \cos \theta + (L_4 - h \tan \theta) \sin \theta) + (N_1 + N_3) L_3] \geq 1.5 \quad (6)$$

在穿梭车发生倾翻的瞬间,前后轮的两个反支撑力 N_1 和 N_3 减小到0,其临界抗倾覆稳定性校核计算

为

$$v_s = \frac{M_G}{M_Q} = [Mg(L_4 - h \tan \theta) \cos \theta + (F_{c1} + F_{c2}) \cos(\alpha/2) L_6] / (Mv^2 / r) (h / \cos \theta + (L_4 - h \tan \theta) \sin \theta) \geq 1.1 \quad (7)$$

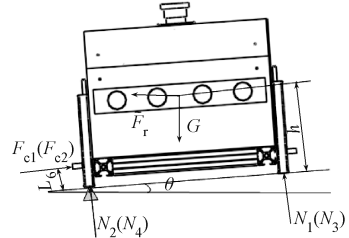


图7 工况3受力分析

Fig. 7 force analysis of condition 3

4 结论

本文分析了穿梭车倾覆稳定性的影响因素,提出了穿梭车在不同工况下的抗倾覆稳定性计算数学模型和公式,从而对穿梭车的抗倾覆稳定性的校核和分析提供了指导意义,研究结论如下:

1) 穿梭车在直线轨道上作业时,无论是加速行驶还是急刹车,其倾覆稳定性皆与穿梭车的加减速速度及穿梭车的重心高度有关,而穿梭车车体的重心高度在设计时就已经确定了,其中的影响因素是运载货物的高度。穿梭车加减速度的数值越小,运载货物的高度越低,穿梭车运行时越稳定,越不容易发生倾翻。

2) 穿梭车在弯道处作业时,其倾覆稳定性与转弯半径、轨道倾角、货物高度、过弯速度等因素有关。穿梭车的转弯半径越大、过弯速度越低、货物高度越低,穿梭车越不容易发生倾翻事故。

3) 本文通过对穿梭车抗倾覆稳定性计算模型的建立,通过合理的理论分析,提出了穿梭车抗倾覆稳定性计算的数学模型和判别依据。针对穿梭车的各个工况,将相应的数值代入判别公式,就能计算出穿梭车的倾覆系数 v_s ,进而可以判断出穿梭车在当前状态下是否有发生倾翻的危险。

4) 根据倾覆系数 v_s 的计算结果,可以发现穿梭车设计中存在的缺点,及时的调整穿梭车的整车布置及结构规划,进而达到最优的设计效果。

参考文献 (References)

[1] 金桂根. 昆船自动化物流系统与装备技术的发展[J]. 物流技术与应用, 2007(11): 69-72.

JIN GuiGen. Development of the automated logistics system and equipment technology of CSTCKM [J]. Logistics & Material Handling, 2007(11): 69-72 (In Chinese).

[2] 魏 兰,孟令广. 自动化物流系统仿真研究及应用[J]. 起重运输机械,2011(1):4-7.
WEI Lan, MENG LingGuang. Simulation research and application of the automated logistics system [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2011(1):4-7(In Chinese).

[3] 聂 峰. 自动化立体仓库穿梭车系统控制方法与优化调度研究 [D]. 太原:太原理工大学,2009:4.
NIE Feng. Research on the rail guided vehicle control system and optimal [D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology, 2009:4(In Chinese).

[4] 许剑梅,楼冬梅,王洁芳. 穿梭车在自动化物流系统中的应用 [J]. 物流技术与应用, 2009(07):95-99.
XU JianMei, LOU DongMei, WANG JieFang. Application of the rail guided vehicle on the automated logistics system [J]. Logistics &Material Handling, 2009(07):95-99(In Chinese).

[5] BS EN 528:2008. Rail dependent storage and retrieval equipment—Safety requirements[S],British, the Standards Policy and Strategy Committee,2008:28.

[6] 胡 敏,杨建国,吴雪邈. 基于 Adams 的有轨导引小车运动学仿真机设计改进[J]. 机械设计与制造, 2012(10):81-83.
HU Min, YANG JianGuo, WU XueTi, et al. Kinematics simulation and design improvement of rail guide vehicle(RGV)based on Adams [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(10):81-83(In Chinese).

[7] S. G. Lee, R. de Souza, E. K. Ong. Simulation modeling of a narrow aisle automated storage and retrieval system (AS/RS) serviced by rail guided vehicles [J]. Computer Integrated Manufacturing,1996(30):241-253.

[8] Amir Kolaei, Subhash Rakheja, Marc J. Richard. Range of applicability of the linear fluid slosh theory for predicting transient lateral slosh and roll stability of tank vehicles[J]. Journal of Sound and Vibration,2014(01):263-282.

[9] A. Carrarini,Reliability based analysis of the crosswind stability of railway vehicles[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1979(04):493-509.

[10] Ashok Kumar, K. P. Pandey, A device to measure dynamic front wheel reaction to safeguard rearward overturning of agricultural tractors[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2012(09):152-158.

[11] 周景成,杨建国,杨晨星. 有轨导引小车的弯道倾覆性分析及其设计改进[J]. 制造业自动化,2013(07):53-56.
ZHOU JingCheng, YANG JianGuo, YANG ChenXing. Simulation on overturning of the shuttle running along a curve and design improvement based on ADAMS [J]. Manufacturing Automation, 2013(07):53-56(In Chinese).

[12] 李永刚. 车辆在弯道处侧滑和倾覆的原因及对策[J]. 公安大学学报, 1995(02):43-45.
LI YongGang. The reason and countermeasures of vehicle sideslip on a bend and overturning [J]. Journal of Chinese People ' s Public Security University, 1995(02):43-45(In Chinese).