



自动化集装箱码头全自动堆垛机轨道系统研究

张连钢^{1,2}, 修方强², 周兆君², 邹子青²

(1. 青岛港国际股份有限公司, 山东 青岛 266500; 2. 青岛新前湾集装箱码头有限责任公司, 山东 青岛 266500)

摘要: 全自动堆垛机轨道系统的主要功能在于引导全自动堆垛机高速运行, 为大车机构提供连续、平顺和阻力较小的良好运行条件, 保证设备平稳运行、精准定位。为了解决轨道基础不均匀沉降以及轨道受到外力产生变形所带来的一系列问题, 结合青岛港自动化码头工程实际情况, 从轨道基础、轨道类型、轨道扣件、轨道基座等4个方面对全自动堆垛机轨道系统进行了研究。结果表明: 为了确保全自动堆垛机可靠运行、高效装卸, 要求轨道基础基本无沉降、轨道和轨道扣件具有较强的承载能力、轨道扣件和基座具有很好的减震缓冲性能。研究结论对自动化集装箱码头全自动堆垛机轨道系统的设计具有参考意义。

关键词: 全自动堆垛机; 高速; 重载; 冲击; 轨道系统

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2019)07-0017-06

Research on track system of automated stacking crane for automated container terminal

ZHANG Lian-gang^{1,2}, XIU Fang-qiang², ZHOU Zhao-jun², ZOU Zi-qing²

(1. Qingdao Port International Co., Ltd., Qingdao, 266500, China;

2. Qingdao New Qianwan Container Terminal Co., Ltd., Qingdao 266500, China)

Abstract: The main function of the track system of the fully automated stacking crane is to guide the high-speed operation of the fully automated stacking crane, so as to provide continuous, smooth and less resistance for the large car mechanism good operating conditions and ensure the smooth operation and accurate positioning of the equipment. In order to solve a series of problems caused by uneven settlement of track foundation and deformation of track caused by external forces, combined with the actual situation of Qingdao Port automation wharf project, this paper studies the track system of automated stacking crane from four aspects: track foundation, track type, track fastener and track base. The results show that in order to ensure the reliable operation and efficient loading and unloading of the fully automated stacking crane, the track foundation is required to have basically no settlement, the track and the track fasteners have strong bearing capacity, and the track fasteners and the base have good damping and buffering performance. The research conclusion has reference significance for the design of track system of automated stacking crane in the automated container terminal.

Keywords: automated stacking crane; high speed; heavy load; shock; track system

智能化和信息技术的快速发展给港口企业带来了机遇与挑战, 如何建设自动化集装箱码头、提高港口作业的智能化与自动化成为港口企业越来越关心的话题。自动化集装箱码头本质即自动化, 是将集装箱码头岸边与堆场之间的运输、堆场内的作业、道口的进出等全过程实现自动化运作的码头^[1], 其堆场主要采用垂直布局、端头作

业模式, 作为自动化码头的堆场设备, 全自动集装箱堆垛机(automated stacking crane 简称 ASC)不仅要完成海陆侧交互区的集装箱装卸, 同时还担负着堆场内集装箱的搬运工作。

传统的轨道吊大车行走机构利用等级为 T5/T6^[2], 主要是人工操作, 为了提高堆场的装卸效率, 目前 ASC 的大车机构利用等级已大幅上升至

收稿日期: 2019-02-27

作者简介: 张连钢(1960—), 男, 研究员, 从事港口设备自动化、智能化等研究。

T8, 成为典型的工作机构^[3], 其大车机构运行速度设计高达 270 m/min, 需要频繁、高速运行^[4], 重载、冲击大, 这一特点要求 ASC 的轨道系统必须具有足够的强度、韧性以及很好的承载、缓冲能力, 从而保证 ASC 的平稳运行、精准定位, 实现高效作业。

然而, 关于 ASC 大车轨道系统的设计、安装等技术要求, 目前行业内尚无明确的规范和标准。因此, 本文结合青岛港自动化码头轨道系统工程实际情况, 针对轨道系统的选型、技术要求、安装标准等进行了研究分析, 以期自动化集装箱堆垛机轨道系统的研究提供借鉴。

1 轨道系统技术要求与设计依据

1.1 轨道系统技术要求

轨道系统一般由轨道基础、轨道、轨道扣件、基座共 4 部分组成。轨道系统作为 ASC 的主要承载部件, 其主要功能在于引导 ASC 高速运行, 承受大车机构在水平、垂直、纵向等不同方向上产生的作用力, 并通过轨道扣件传递到轨道梁上, 为大车机构提供连续、平顺和较小阻力的良好运行条件, 保证 ASC 可靠稳定运行^[5]。其技术要求

包括以下几个方面: 1) 一般采用非连续性明轨铺设; 2) 轨道基础不允许出现不均匀沉降; 3) 轨道强度高、承载能力强, 在任何工况下都能够安全地将载荷传递到基础结构上; 4) 轨道安装应当符合 ISO 12488-1:2005 标准第一等级; 5) 轨道扣件设计应能够抵抗作用于轨道上的垂直力、侧向力、纵向力, 并且具有一定的高度和侧向调整范围; 6) 整套系统具有很好的缓冲减震吸能作用; 7) 整套系统具有很好的免维护性。

1.2 轨道系统设计依据

结合 ASC 轨道系统的技术要求, 以 ASC 载荷和基础沉降量为轨道系统设计的主要依据^[6], 具体内容包括以下 8 个方面: ASC 的最大工作轮压、ASC 运行速度和加速度、ASC 大车车轮直径和间距、ASC 每一支腿的车轮数、ASC 大车导向轮数及导向轮间距、ASC 大车机构工作级别、ASC 的最大侧向力、轨道基础的最大预期垂直沉降量和水平位移量。

2 轨道基础选型

2.1 轨道安装标准

基于 ASC 大车机构运行特点和轨道安装标准, 要求轨道基础不能出现不均匀沉降。

表 1 轨道安装标准

| 项目名称 | 示意图 | 安装及使用后公差值/mm |
|------------------------------|------------|-------------------|
| 轨距(S) | | ±10 轨距为 28 500 |
| 轨道间高度差 | | ±5 |
| 大车轨道全长范围内任意一点起平直线 2 000 mm 内 | | ±5 |
| 轨道顶部直线度 2 000 mm 内 | 轨道顶部沿中心线方向 | ±5 |
| 平面度 | | ≤5 |

2.2 轨道基础

1) 轨枕道渣基础。该结构能够很好地适应不均匀沉降, 造价相对较低, 但是整体性差, 轨道受温差影响变形相对较大, 造成 ASC 运行平稳性差, 使用期尤其是使用前期需要定期进行维修调整, 工作量大、时间长, 严重影响生产。图 1 为国外某码头轨道整体移位。



图 1 道渣基础轨道移位

2) 钢筋混凝土轨道梁基础。该结构的优点是整体性好, 不易沉降, 使用期维护量小、基本免维护, 良好的轨道平整度能够保证 ASC 运行平稳。但是造价相对较高, 施工工艺相对复杂(图 2)。



图 2 混凝土基础轨道

轨道基础的选型需根据码头实际情况, 综合考虑基础条件、投资成本、承载力等多项因素。选择轨枕道渣方式的原因: 一是基础条件特别好; 二是因投资较高无法改变基础沉降。以荷兰 RWG 和 EUROMAX 码头为例, 该港口陆域回填时以大量白砂作为回填料, 保证了地基均匀沉降和承载力, 所以采用了该结构方式; 有的码头则是地基土层深度达 50 m, 若采用桩基混凝土轨道梁基础投资太大。

根据对青岛前湾港区地质勘探分析, 综合考虑 ASC 运行可靠性以及后期使用经济性, 最终选择 PHC 桩基钢筋混凝土梁结构形式作为轨道基

础, 消除不均匀沉降。图 3 所示为钢筋混凝土轨道梁断面。

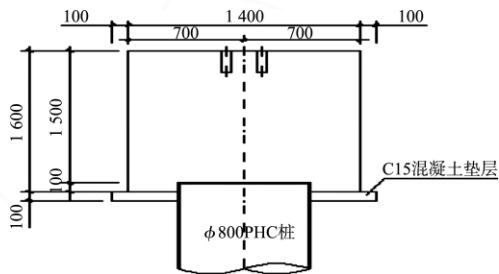


图 3 钢筋混凝土轨道梁断面 (单位: mm)

3 轨道选型

国内常规轨道吊大车轨道一般采用 QU100 型号, 而国内外自动化码头 ASC 一般采用的为 CR73 (日标) 和 MRS87A (德标) 两种型号的轨道。轨道技术参数比较见表 2。

表 2 轨道技术参数比较

| 型号 | 截面尺寸/mm | | | | 截面积/ cm ² | 理论质量/ (kg·m ⁻¹) |
|--------|---------|-------|-------|------|-------------------------|--------------------------------|
| | 轨高 | 顶宽 | 底宽 | 腰宽 | | |
| CR73 | 135.0 | 100.0 | 140.0 | 32.0 | 93.40 | 73.00 |
| MRS87A | 152.4 | 101.6 | 152.4 | 34.9 | 111.30 | 86.80 |
| QU100 | 150.0 | 100.0 | 150.0 | 38.0 | 113.32 | 88.96 |

从表 2 中可以看出, QU100 轨道和其他两种轨道技术参数基本一致, 但是由于其轨顶为凸面, 一般与带有轮缘的车轮搭配使用, 而 ASC 大车轮系采用“无轮缘车轮+水平导向轮”设计, 要求轨道顶面为平面, 与侧面互相垂直, 以增加轮系与轨道的接触面积, 保证运行平稳性, 所以不能采用 QU100 轨道。

CR73 和 MRS87A 两种轨道选型分析如下:

1) 最大负载核算。

ASC 大车运行参数: 大车速度 v 为 270 m/min, 车轮直径 D 为 0.65 m, 由式 (1) 得车轮转速 n 为 132.29 r/min。

$$n = v / (\pi D) \quad (1)$$

进一步, 根据车轮转速查 FEM 表 T.4.2.4.1.4. a 得与车轮有关的系数: $C_1 = 0.77$, $C_{1\max} = 1.25$; 而且 ASC 大车工作级别为 M8, 查 FEM 表 T.9.12. b 得与级别有关的系数, $C_2 = 0.76$, $C_3 = 0.80$, 由表 T.9.12. a 得大车车轮极限比压 $P_L = 7 \text{ N/mm}^2$,

$P_{\max} = 290.9 \text{ kN}$, $P_{\min} = 130.4 \text{ kN}$, 则 ASC 在工作状态时最大载荷:

$$P = (2P_{\max} + P_{\min}) / 3 \quad (2)$$

计算得 $P = 238.1 \text{ kN}$ 。

已知 ASC 在工作状态时最大载荷为 245.9 kN , 且 $r_1 = 6.4 \text{ mm}$, $d_1 = D = 650 \text{ mm}$, 可得轨道所能承受的最大载荷:

$$P_x = C_{1\max} P_L C_2 C_3 d_1 (k - 2r_1) \quad (3)$$

计算得 $P_x = 245.9 \text{ kN}$ 。

所以使用 CR73 时, $P_x = 245.9 \text{ kN} > 238.1 \text{ kN}$; 使用 MRS87A 时, $P_x = 250.7 \text{ kN} > 238.1 \text{ kN}$, 均符合使用要求, 但是 MRS87A 轨道的承载能力更强。

2) 最大下挠度核算(ASC 大车轮位于基座中间位置)。

当 ASC 大车轮位于基座中间位置时, 两者挠度见图 4。

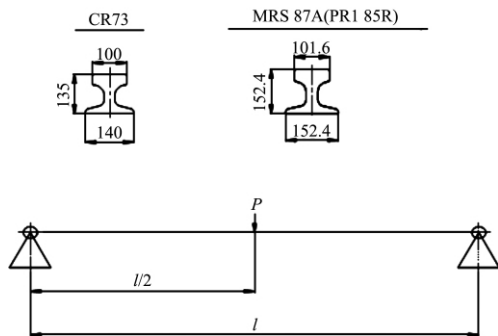


图 4 轨道挠度比较 (单位: mm)

按简支梁中间变形 f_c :

$$f_c = PL^3 / (48EI) \quad (4)$$

式中: $P = 294 \text{ kN}$, $L = 0.6 \text{ m}$, $E = 202 \text{ GPa}$ 。

MRS87A 轨道变形参数: $I = 3\,095 \text{ cm}^4$, 则 $f_c = 0.211\,62 \text{ mm}$ 。

CR73 轨道变形参数: $I = 2\,000 \text{ cm}^4$, 则 $f_c = 0.324\,78 \text{ mm}$ 。

数据研究结果表明, 相比较于 CR73 轨道来说, MRS87A 轨道垂直变形量减小了 34.9% 。MRS87A 的刚性、承载能力、稳定性相比较于 CR73 有很大的优越性, 并且 152.4 mm 的轨高为大车水平导向轮和磁钉的布置提供了足够的空间, 最终选择 MRS87A 轨道。

4 轨道扣件选型

4.1 轨道扣件类型

目前国内外自动化码头在用的轨道扣件主要有以下 3 种形式(图 5): 扣件 a 和 b 应用于钢筋混凝土基础的无砟轨道系统, 主要由上压板、轨下垫板、调整垫板、耦合垫板、锚固螺栓和底板组成^[7]; 扣件 c 应用于道砟轨枕基础的轨道系统, 为铁路行业广泛采用的钢弹条形式的扣件系统。

扣件 c 通过在垂直方向和水平方向调整轨枕基础实现轨道的安装技术要求, 而扣件 a 和扣件 b 则通过调整扣件本身实现轨道的安装技术要求, 所以说对扣件本身的性能要求较高。



a) 扣件a



b) 扣件b



c) 扣件c

图 5 轨道扣件

4.2 选型分析

1) 轨道扣件须具有足够的垂向及侧向调节能力。

考虑到基础的不均匀沉降、土建施工精度、设备运行冲击、轨道热胀冷缩等影响因素,轨道扣件必须具有足够的调节能力,高度方向调节量必须大于基础的不均匀沉降量,水平侧向调节量建议不小于 ± 10 mm。

2) 轨道扣件受力、强度及锁定分析。

轨道承受的垂向力: 最大轮压 310 kN, 动态冲击载荷。

轨道承受的侧向力: 单个车轮侧向力约 30 kN, 水平轮集中载荷 130 kN, 动态冲击载荷。

所以,要计算轨道扣件强度,还应考虑适当的冲击系数(推荐值 1.15~1.25)。轨道扣件在垂直方向上采用螺纹锁定,螺母采用防松自锁螺母,可保证锁定可靠;在水平方向上如果仅靠单个螺母的摩擦力来锁定,当侧向力大于螺母压紧力产生的摩擦力时,压板可能产生侧向滑动,所以需要采用螺纹锁定或锯齿锁定。

由于热胀冷缩,轨道和压板之间会产生较大的相对滑动,随着使用时间的增加压板橡胶鼻容易脱落,所以轨道和压板之间应设置减磨配件,以提高橡胶鼻等缓冲配件的使用寿命^[8]。

3) 轨道扣件需具有缓冲减震性能。

轨道扣件具有良好的缓冲减振性能,可以均匀轮压、减缓集中载荷、弥补轨道和底座支承平面间由于不平而产生的间隙、减缓车轮冲击轨道产生的震动和噪音、避免啃轨。

综合以上分析,最终选择压板接触面积大、侧向具有挡肩和锯齿设计、四级缓冲减振功能的扣件 a。

5 轨道基座

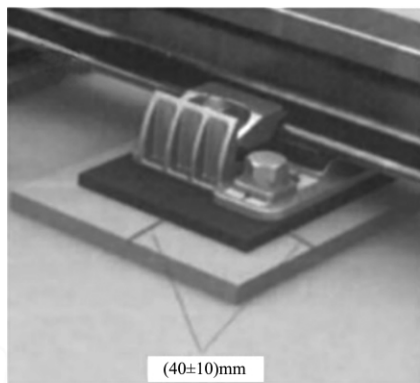
ASC 轨道基座的铺设采用非连续性形式,基座

根据浇注材料不同分为水泥基座和环氧胶泥基座。考虑到 ASC 大车运行特点,基座一般采用环氧胶泥浇筑而成,强度高、抗蠕变性能强、具有优异的钢材附着力、截面积大,能够有效地起到减震缓冲作用(图 6)。

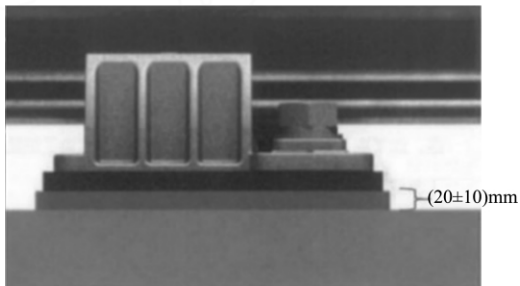


图 6 胶泥基座

胶泥基座的长宽分别比扣件耦合垫板的长宽大 40 mm 左右,高度为 20~30 mm,基座的中心距一般为 600 mm,轨道基座尺寸见图 7,轨道基础布置见图 8。



a) (40±10)mm



b) (20±10)mm

图 7 轨道基座尺寸

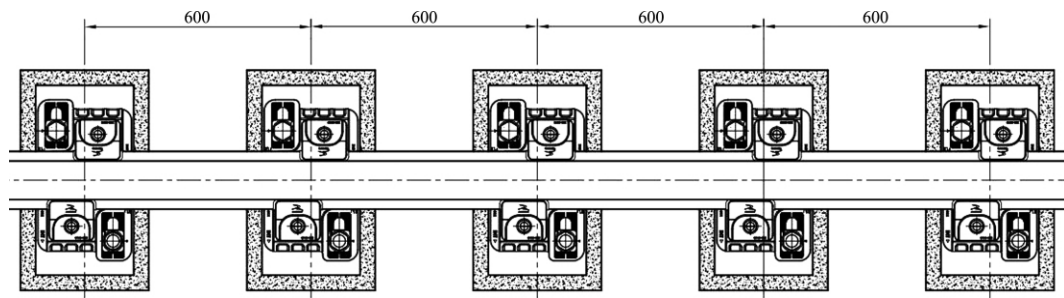


图8 轨道基础布置 (单位: mm)

6 结语

1) 综合考虑 ASC 运行可靠性以及后期使用经济性, 在轨道基础选型上选择 PHC 桩基钢筋混凝土梁结构形式, 能够有效消除不均匀沉降。

2) 通过比较 CR73 和 MRS87A 两种轨道选型, MRS87A 的刚性、承载能力、稳定性相比 CR73 有很大的优越性。

3) 考虑轨道扣件在受力、强度、锁定分析、缓冲减震等方面的性能, 最终选择压板接触面积大、侧向具有挡肩和锯齿设计、四级缓冲减振功能的扣件 a。

4) 环氧胶泥浇筑而成的轨道基座, 强度高、抗蠕变性能强、具有优异的钢材附着力、承载面积大, 能够有效地起到减震缓冲作用, 具有很好的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 丁一, 张琼, 林国龙. 自动化集装箱码头岸桥-堆场作业均衡调度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),

2018, 37(7): 106-112.

- [2] 雷晋生. 自动化轨道起重机偏斜行走侧向力分析[J]. 起重运输机械, 2016(3): 55-57.
- [3] DORNDORF U, SCHNEIDER F. Scheduling automated triple cross-over stacking cranes in a container yard[J]. OR Spectrum, 2010, 32(3): 617-632.
- [4] 王施恩, 何继红, 林浩, 等. 自动化集装箱码头堆场布置新模式[J]. 水运工程, 2016(9): 23-26+45.
- [5] GHAREHGOZLI A H, VERNOOIJ F G, ZAERPOUR N A. A simulation study of the performance of twin automated stacking cranes at a seaport container terminal [J]. European journal of operational research, 2017, 261(1): 108-128.
- [6] 刘广红, 韩时捷, 何继红, 等. 洋山四期全自动集装箱码头设计创新[J]. 水运工程, 2018(6): 189-194.
- [7] 邢树军, 贾俊梅. 浅析港口堆场轨道扣件系统的选型[J]. 港工技术, 2012, 49(4): 38-40+70.
- [8] 周珣, 童希, 邓达宁. 港口工程中大型扣件式支模架的非线性分析及应用[J]. 水道港口, 2018, 39(3): 336-340.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 16 页)

3) 关于高速车道的选择, AGV 起始位置和任务目标位置决定了高速车道的行驶方向, 可缩小车道选择范围; 高速车道上已经规划的路径条数影响着 AGV 的交通状况, 路径规划时应选择交通状况优良的车道; 非完全穿越高速车道的情况下, 应尽量减少高速车道的跨度。

4) 该路径规划方案有利于缩短 AGV 行驶距离, 节约 AGV 行驶时间, 提高 AGV 作业效率, 降低能源消耗。从系统层面能够简化 AGV 路径规划计算, 便于调整 AGV 运行轨迹, 防止交通拥堵

和 AGV 死锁。

参考文献:

- [1] 金祺, 罗勋杰, 韩保爽. 自动化集装箱码头水平运输系统设备选型[J]. 水运工程, 2016(9): 87-90.
- [2] 陈曙权. 厦门远海自动化码头平面布置及设备配置优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [3] 康志敏. 集装箱自动化码头 AGV 路径优化和调度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

(本文编辑 王璁)