

# 桥式起重机精准定位在线轨迹规划方法设计及应用

何 博, 方勇纯<sup>†</sup>, 刘海亮, 孙 宁

(南开大学 机器人与信息自动化研究所, 天津 300350)

**摘要:** 针对工业桥式起重机的异步电机难以准确跟踪给定轨迹, 从而导致离线轨迹规划算法定位误差很大的问题, 论文提出一种基于相平面分析的在线轨迹规划算法. 这种方法利用激光测距仪采集位置信息, 在起重机运行过程中, 根据台车与目标位置的距离来优化轨迹不同阶段的运行时间, 并实时调整台车轨迹的有关参数, 以实现台车精准定位的目标. 实验结果表明, 这种方法可以很好地兼顾负载快速消摆与台车准确定位两方面的要求, 有利于提升桥式起重机的运送效率. 论文将这种在线轨迹规划方法成功应用于标准 32 t 工业桥式起重机, 并取得了良好的运行效果.

**关键词:** 起重机; 在线轨迹规划; 精准定位

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Precise positioning online trajectory planner design and application for overhead cranes

HE Bo, FANG Yong-chun<sup>†</sup>, LIU Hai-liang, SUN Ning

(Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** For an industrial overhead crane, it is usually very difficult for its asynchronous motors to track the planned trajectories exactly, which results in large positioning errors when employing an off-line trajectory planner on the system. Motivated to solve this problem, this paper proposes an on-line trajectory-planning method based on phase plane analysis. To achieve the objective of precise positioning, the parameters of the constructed trajectory are updated based on the trolley's position measured by laser rangefinders when the overhead crane is under operation, and the operating time for different stages of the trajectory are optimized according to the distance between the trolley and the target position. Experimental results show that this method simultaneously achieves the requirements of rapid swing elimination and precise positioning of the trolley, improving operating efficiency of overhead cranes. The designed trajectory planner is successfully applied to a standard 32 tons industrial overhead crane and achieves satisfactory performance.

**Key words:** crane; online trajectory planning; precise positioning

### 1 引言(Introduction)

桥式起重机是一种重要的运输工具, 它广泛应用于港口、工业生产等工作场合, 其运送效率作为一项核心指标受到许多研究人员的关注, 而负载消摆及台车定位性能在很大程度上决定了桥式起重机的运送效率.

在很多工业生产中, 对起重机定位精度提出了较高的要求, 如核燃料运送起重机甚至要求达到毫米级的定位精度. 为了实现准确定位的目标, 需要采用相应的测量传感单元来获取台车的准确位置. 由于成本

等方面的原因, 编码器累加定位是现在工业桥式起重机上最常见的定位方法, 例如, 西门子公司生产的 S7-300 系列可编程逻辑控制器(programmable logic control, PLC)集成了专用于编码器累加的模块, 应用非常方便, 然而当出现打滑等现象时, 这种方法会导致较大的定位误差. 文献[1]采用条码定位系统, 即在运行轨道上安装条码, 通过激光探头解析条码来实现绝对认址, 并将其应用于罩式退火炉桥式起重机的追踪定位. 文献[2]对起重机的运行特性进行了优化, 并将其与位置比例-积分-微分(proportion-integral-deri-

收稿日期: 2016-05-12; 录用日期: 2016-08-10.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: fangyc@nankai.edu.cn; Tel.: +86 22-85358689.

本文责任编辑: 谭民.

国家杰出青年科学基金项目(61325017), 国家科技支撑计划项目(2013BAF07B03)资助.

National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (61325017) and National Science and Technology Pillar Program of China (2013BAF07B03)

vative, PID)控制器相结合,实现了核废料库桥式起重机的定位。除此之外,部分桥式起重机采用齿轮齿条实现定位<sup>[3]</sup>,即铺设与轨道平行的齿条,根据齿轮走过的齿数测量距离来确定台车的位移。文献[4]通过在吊钩上方安装摄像头,采集图像并通过定向编码匹配方法获得吊钩的实际位置,在此基础上,可以进而实现对吊钩的直接定位。

值得指出的是,尽管以上方法较好地实现了台车的准确定位,但它们均未能考虑运送过程中的消摆问题,而负载的摆动不仅会降低运送效率,还会导致安全隐患,因此,负载防摆成为评价起重机性能的一项重要指标,并在近年来得到了广泛关注。对于防摆问题,首先需要对起重机的动态特性进行深入分析,在此基础上,设计相应的控制算法来消除负载的摆动。现有的消摆控制策略可以分为反馈控制及开环控制两类,其中,反馈控制需要借助于多类传感器来实时测量系统状态,导致整套起重机的成本较高,因此在实际工程中,通常选择简便易行的开环控制方式。输入整形是一种典型的开环控制方法<sup>[5]</sup>,广泛应用于桥式起重机的控制。Singhose在文献[6]中首次提出Extra-Insensitive(EI)输入整形器,并在文献[7]中进行了进一步扩展。此后,很多专家将输入整形方法应用于起重机平台<sup>[8-9]</sup>及机械臂模型<sup>[10]</sup>,均取得了良好的效果。

对于桥式起重机而言,轨迹规划是一类常用的抑制负载摆动的开环控制方法,近年来得到了广泛关注。在文献[11]中,方勇纯等人提出了一种自适应轨迹规划方法,对于所构造的轨迹,他们通过设计一种自适应控制器使台车沿着规划好的轨迹运动。考虑到工作场景中存在的各种障碍物,文献[12]提出了一种轨迹规划的控制方法,这种方法可以使台车避开场景中的障碍物。对于桥式起重机系统,文献[13]采用最优控制方法规划出一条能耗最小的运行轨迹。文献[14]对桥式起重机的动态模型进行了简化,在此基础上设计的控制器可以通过水平运动抑制臂式起重机负载的摆动。近几年来,孙宁等人在桥式起重机轨迹规划方面进行了深入研究,他们分别采用几何分析、迭代学习等方法来规划桥式起重机的轨迹<sup>[15-17]</sup>。对于使用伺服电机的实验室小型桥式起重机测试平台,上述方法可以取得较好的控制效果。然而,实际工业桥式起重机通常使用异步变频电机,尽管近年来对其控制性能进行了持续优化<sup>[18-19]</sup>,依然难以达到伺服电机的控制精度,从而致使台车无法精确跟踪规划好的轨迹,并最终导致台车的定位精度较低。

针对桥式起重机的轨迹规划问题,本文基于相平面分析方法,并充分考虑实际异步变频电机的特性,提出了一种可实现台车精准定位,并有效抑制负载摆动的在线轨迹规划算法。具体而言,针对工业桥式起

重机无法实时跟踪给定轨迹、低速段特性差、打滑等问题,对基于相平面分析的轨迹规划方法进行了改进,将减速段细分为两级,并根据激光测距仪数据对台车轨迹的参数进行在线更新,最终较好地实现了台车精准定位与负载消摆两方面的要求。论文将所设计的在线轨迹规划方法应用于标准32 t桥式起重机,测试结果表明其定位误差小于5 mm,负载摆角始终位于1°之内,具有很好的实际应用前景。

## 2 工业起重机运行特性分析 (Analysis of industry overhead crane operating properties)

对于实验室小型起重机测试平台而言,由于采用的伺服电机控制精度较高,且能实时跟踪期望轨迹,因此通过离线规划的三段式轨迹可以取得良好的控制效果<sup>[20]</sup>,但将这种离线三段式轨迹应用于工业桥式起重机时,由于异步电机特性相对较差,系统出现较大的定位误差,难以达到预期的控制性能,故此需测试工业异步电机的特性并提出针对性算法以提高定位精度。

具体而言,针对工业现场的桥式起重机,为了提高其控制性能,需要根据其实际特性来重新规划台车的运行轨迹。为此,作者对工业桥式起重机的特性进行了大量测试与分析,结果表明,工业桥式起重机在运行过程中有以下特性: 1) 系统响应速度较慢,存在明显的滞后效应; 2) 制动后向前滑行的距离难以有效控制; 3) 异步电机低速段特性较差; 4) 在运行过程中有较明显的打滑现象。

具体而言,工业起重机采用的异步电机惯性较大,其响应曲线明显滞后于给定的控制命令。以本文研究的32 t桥式起重机为例,其采用的西门子9 kW异步变频电机的响应曲线如图1所示,其中实线为期望跟踪的轨迹,虚线为电机的实际转速,可以看出在加速过程中期望值与电机实际转速之间存在较为明显的滞后。进一步的定量测试表明两者存在100 ms~200 ms的延时,此延时随着负载质量的增加逐渐增大。由于拐点的存在,导致两条曲线并不完全平行,在这种情况下,即使在规划期望轨迹时考虑这种滞后效应,提前进行补偿也无法保证两条曲线完全重合,因此需要通过反馈方式在线调整轨迹的相关参数,以降低台车的定位误差。

由于存在滞后效应,根据实际运送目标规划的期望轨迹无法保证台车到达并刚好停止在目标位置。针对这个问题,在规划轨迹时需要在减速过程中提前从某个特定速度开始进行制动,为此需要建立制动前运动速度与滑行距离之间的关系。由于工业起重机的导轨光滑性较差,难以通过理论分析建立两者之间的解析模型,故此通过将实验数据表格与插值相结合的方式来建立两者之间的关联。对于本文研究的32 t级桥

式起重机,表1所示为通过典型实验数据建立的“速度 $v_b$ -制动距离 $d_b$ ”表格,当台车的速度不在该表格之内时,其滑行距离可以通过插值方式获得.

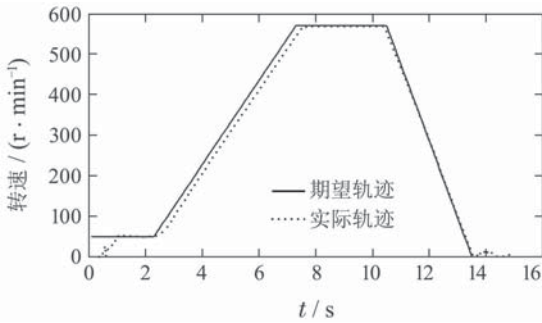


图1 电机跟踪给定轨迹特性

Fig. 1 Motor tracking performance for a preset trajectory

需要指出的是,由于制动通常从低速段开始,因此表格1中仅仅记录了低速段的数据.当台车速度过低,例如本文研究的工业起重机低于0.08 m/s时,系统会发生震颤,致使货物剧烈摆动,严重降低起重机运行的安全性,因此在规划台车轨迹时应使系统避开该速度区间.

表1 制动时速度与制动距离的关系

Table 1 Relationship between initial braking velocity and braking distance

$v_b$	$d_b$
0.15	0.03
0.12	0.024
0.1	0.02
0.08	0.017

由于成本等方面的原因,工业起重机选用的异步电机通常低速段特性较差.图2所示为特定转速下典型工业起重机异步电机的实际加减速曲线,由下至上分别对应40 r/min, 60 r/min, 80 r/min, 100 r/min,由图2可知,当电机在低速段加减速时,波动较大,特性很不稳定,因此在进行轨迹规划时不能使电机工作在过低的转速.

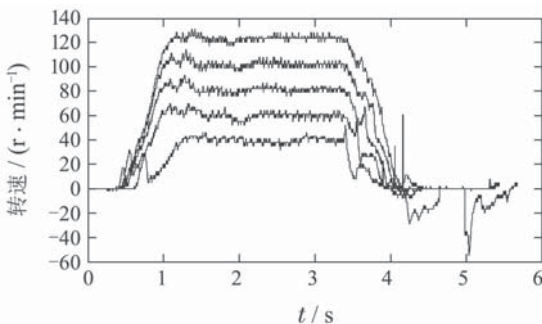


图2 电机低速段特性

Fig. 2 Low-speed behavior of a typical asynchronous motor

除此之外,起重机运行过程中经常出现打滑现象,此时通过编码器获得的信息无法准确衡量台车的实际运行距离,而需要其它额外的传感器,如视觉、激光等来测量其数值,以获得准确的反馈信息,最终实现台车的精准定位控制.

### 3 考虑起重机特性的在线轨迹规划方法(Online trajectory-planning method consider overhead crane properties)

经过分析可知,二维桥式起重机的动力学模型可以表示为<sup>[21]</sup>

$$(M + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F, \quad (1)$$

$$ml^2\ddot{\theta} + ml\ddot{x} \cos \theta + mgl \sin \theta = 0, \quad (2)$$

式中: $M$ 和 $m$ 分别代表台车及负载质量, $x(t)$ 表示台车位置, $\theta(t)$ 为负载摆角, $l$ 代表吊绳长度, $F(t)$ 表示电机作用在台车上的驱动力.根据文献[20]所提出的基于相平面分析的轨迹规划方法,设台车以恒定加速度 $a$ 匀加速运动,则式(1)-(2)经过数学处理可推导出如下方程:

$$[\theta(t) + \frac{a}{g}]^2 + [\frac{\dot{\theta}(t)}{\omega}]^2 = [\theta(t_0) + \frac{a}{g}]^2 + [\frac{\dot{\theta}(t_0)}{\omega}]^2, \quad (3)$$

式中: $\omega = \sqrt{g/l}$ 表示负载摆动频率, $\dot{\theta}(t)$ 为摆角的角加速度, $\theta(t_0)$ 与 $\dot{\theta}(t_0)$ 分别表示初始摆角及初始角速度.若以 $\theta(t)$ , $\dot{\theta}(t)/\omega$ 分别作为横、纵坐标轴,则方程(3)表示以 $[-a/g, 0]$ 为圆心,以

$$R = \sqrt{[\theta(t_0) + \frac{a}{g}]^2 + [\frac{\dot{\theta}(t_0)}{\omega}]^2}$$

为半径的圆.针对桥式起重机的具体运行特点,考虑两种情形:

1)  $a \neq 0$ , 系统状态 $\theta(t)$ , $\dot{\theta}(t)/\omega$ 沿着以 $[-a/g, 0]$ 为圆心,

$$R = \sqrt{[\theta(t_0) + \frac{a}{g}]^2 + [\frac{\dot{\theta}(t_0)}{\omega}]^2}$$

为半径的圆,以角速度 $\omega$ 顺时针旋转.

2)  $a = 0$ , 系统状态 $\theta(t)$ , $\dot{\theta}(t)/\omega$ 沿着以 $[0, 0]$ 为圆心,

$$R = \sqrt{[\theta(t_0) + \frac{a}{g}]^2 + [\frac{\dot{\theta}(t_0)}{\omega}]^2}$$

为半径的圆,以角速度 $\omega$ 顺时针旋转.当 $\theta(t_0)$ , $\dot{\theta}(t_0)/\omega$ 均为0时, $R = 0$ ,系统状态 $\theta(t)$ , $\dot{\theta}(t)/\omega$ 停留在原点 $[0, 0]$ .

基于上述分析可以离线构造出三段式轨迹,并对其参数进行优化<sup>[20]</sup>.然而,对于工业桥式起重机,由于存在以上所分析的特性,很难实时跟踪这种三段式

轨迹, 并且在运行过程中经常出现打滑等现象, 难以满足台车准确定位的要求。

考虑到有效消摆与准确定位台车两方面的要求, 并综合分析起重机异步电机的实际特性, 本文提出一种可以精确定位台车的在线轨迹规划方法, 其主要思路如下: 首先, 为了有效处理打滑现象以实现精准定位, 本文通过激光传感器获取台车的当前位置信息, 并利用该位置信息在线调整所规划出的轨迹的参数, 最终使台车较好地达到目标位置; 其次, 由于电机低速段特性不稳定, 且电机制动后需继续向前运行一段距离, 若采用传统的三段式轨迹, 即使在减速段检测到台车即将到达目标位置时实施制动, 也很难保证它刚好停止在目标位置. 针对以上问题, 本文采用一种分级制动策略, 即先将台车减速到较低的速度, 稳定运行一段时间后再进行制动, 并根据表1所建立的“速度-制动距离”关系提前规划出制动距离的补偿量, 使系统实现精准定位. 对于这种分级制动策略, 需要根据定位精度与运送效率等方面的要求, 并分析系统的实际特性来综合优化台车的制动速度. 实验测试表明, 当制动速度设定较快时, 虽然运送效率较高, 但定位结果的不确定性增大, 定位误差也随之上升, 无法满足精准定位的要求. 而制动速度设定过低, 除了降低运送效率之外, 同时由于电机低速段特性较差, 系统会发生震颤, 加剧负载摆动, 影响其安全性能. 因此, 本文在进行大量实验的基础上, 根据表1中的数据来确定低速段的速度 $v_{\min}$ , 以及与之相对应的制动距离. 另一方面, 为了实现负载快速消摆的目标, 作者将通过相平面分析来选择轨迹中的有关参数, 使负载的摆角始终保持在一个很小的范围。

综上所述, 基于所提出的分级制动方案, 本文规划的五段式台车轨迹如下:

$$\begin{cases} a_0 t, & 0 < t \leq t_1, \\ v_{\max}, & t_1 < t \leq t_1 + t_2, \\ v_{\max} - a_0 t, & t_1 + t_2 < t \leq t_1 + t_2 + t_3, \\ v_{\min}, & t_1 + t_2 + t_3 < t \leq t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \\ v_{\min} - a_0 t, & t_1 + t_2 + t_3 + t_4 < t \leq t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, \end{cases} \quad (4)$$

其速度随时间的变化曲线如图3所示, 图中虚线所示即为通常的三段式轨迹. 接下来, 本文将采用相平面分析方法来确定轨迹中的各个参数, 以实现防摆的目标. 具体而言, 对于以上所构造的五段式轨迹, 对于第1, 第3和第5阶段, 将根据系统特性离线计算其相应的运行时间 $t_1, t_3$ 和 $t_5$ ; 而对于第2阶段和第4阶段, 则根据激光数据来判断何时切换进入下阶段, 即决定图3中的切换点 $P$ 点和 $Q$ 点的时刻, 这样通过激光测量数据来在线调整这两个阶段的运行时间, 以实现台车

精准定位的要求。

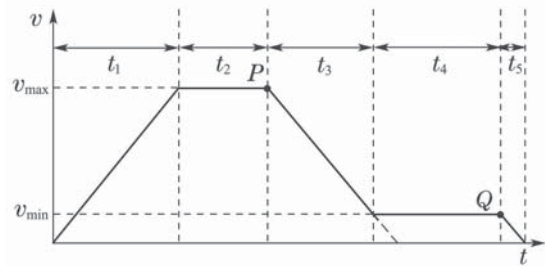


图 3 在线轨迹规划速度曲线

Fig. 3 Velocity curve of online planned trajectory

负载初始处于静止状态, 系统状态停留于图4中所示原点 $O$ , 即

$$\theta(t_0) = 0, \quad \dot{\theta}(t_0) = 0, \quad (5)$$

随后台车按照图3的五段式轨迹开始运行. 第1阶段为加速阶段, 台车以加速度 $a_0$ 加速运行. 根据相平面分析可知, 为了使系统在加速阶段之后负载摆角仍为0, 需要使其沿圆 $O_1$ 以角速度 $\omega$ 顺时针旋转一周回到原点 $O$ (见图4), 因此加速段的运行时间应选择为

$$t_1 = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (6)$$

考虑运送效率方面的要求, 经过这个加速段之后, 系统应达到其允许的最大速度 $v_{\max}$ , 据此, 可调整变频器参数, 使系统的加速度为

$$a_0 = \frac{v_{\max}}{t_1}, \quad (7)$$

在这个阶段, 台车运行的距离可计算如下:

$$s_1 = \frac{1}{2} a_0 t_1^2. \quad (8)$$

第2阶段为快速匀速段, 台车以最大速度 $v_{\max}$ 运动. 在图4所示的相平面上, 此阶段系统做匀速运动, 其加速度为零, 根据相平面分析可知, 系统状态停留在原点 $O$ , 此过程负载无摆动. 对于本阶段, 将根据激光传感器实时测量的台车位置来判断何时切换进入第3阶段, 具体方法将在随后描述。

第3阶段为减速段, 台车从最大速度 $v_{\max}$ 开始, 以加速度 $-a_0$ 做减速运行, 直到速度降低为设定的低速 $v_{\min}$ ,  $v_{\min}$ 的取值根据电机的具体特性(见表1)选择决定. 基于以上分析, 可知本阶段的运行时间 $t_3$ 为

$$t_3 = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{a_0}. \quad (9)$$

在如图4所示的相平面上, 本阶段系统状态从原点开始, 沿圆 $O_2$ 顺时针旋转大半个圆周至点 $A$ , 此过程台车运行距离可计算如下:

$$s_3 = v_{\min} t_3 + \frac{1}{2} a_0 t_3^2. \quad (10)$$

第4阶段为低速匀速段, 台车以速度 $v_{\min}$ 运行时间 $t_4$ , 此时系统状态在相平面上以原点 $O$ 为圆心, 以



$$R = \sqrt{[\theta(t_0) + \frac{a_0}{g}]^2 + [\frac{\dot{\theta}(t_0)}{\omega}]^2}$$

为半径旋转. 为了使系统无残余摆动, 在第5阶段结束之后, 其状态应回到原点. 另一方面, 由于第3阶段和第5阶段均以 $-a_0$ 做减速运动, 因此这两个阶段在相平面上可以构成一个完整的圆周. 基于以上分析可知, 在第4阶段系统状态也应该旋转整周, 即从点A出发旋转一周回到点A. 根据以上分析, 理想条件下, 应选择 $t_4 = t_1$ , 对应的台车运动距离则为 $s_4 = v_{min}t_1$ . 这样, 系统状态可完整旋转一周回到A点, 此时进入第5阶段即为第3阶段的延长线, 系统最终回到原点, 无残余摆动. 然而, 由于异步电机低速段性能较差, 实际运行效果表明这种方法难以保证台车的定位精度. 因此, 为了提高定位精度, 在本阶段引入激光传感器数据, 根据它实时计算台车当前位置与目标位置的距离, 一旦该距离达到或小于根据电机特性设定的制动距离 $s_5$ , 则将系统切换进入第5阶段, 使其开始进行制动, 以保证定位精度. 在实际工作条件下, 由于各类不确定因素的影响, 采用以上切换机制时, 本阶段运行时间 $t_4$ 和第1阶段的时间 $t_1$ 不完全一致, 此时在相平面上, 系统状态将旋转到点A附近.

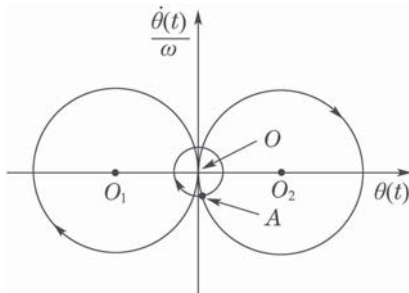


图4 基于相平面分析的实际起重机系统的轨迹规划

Fig. 4 Phase plane analysis based trajectory planning for a practical crane system

第5阶段为制动段, 在本阶段, 由于变频器的控制作用, 台车以加速度 $-a_0$ 减速运行直至停止, 系统状态由点A附近沿圆 $O_2$ 顺时针旋转至原点O附近, 系统摆角趋近于0, 实现了快速消摆. 如前所述, 第2阶段快速匀速段的运行时间 $t_2$ 需要通过激光数据在线调整, 并决定何时切换进入第3阶段, 具体方法如下: 首先, 定义理论减速距离 $s$ 为第3, 4, 5三个阶段台车的运行距离之和:

$$s = s_3 + s_4 + s_5, \tag{11}$$

上式中, 减速段距离 $s_3$ 由式(10)给出, 而制动距离 $s_5$ 可以利用 $v_{min}$ , 通过表1计算得到. 对于第4阶段的运行距离 $s_4$ , 选择其理想状态下的取值, 即 $s_4 = v_{min}t_1$ 来进行计算. 在匀速段, 根据激光数据来实时计算台车当前位置与目标位置的距离, 一旦这个距离达到或小于理论减速距离 $s$ 时, 即将系统切换至第3个阶段.

#### 4 实验测试与应用(Experiment and application)

本文实验平台如图5所示, 为天津起重设备有限公司制造的标准32 t桥式起重机. 以大车电机为例, 变频器设定为通过接收脉冲频率控制电机转速, 考虑减速比, 电机转速1500 r/min对应台车速度1 m/s. 脉冲信号由控制板通过光耦电路输出到变频器脉冲序列接收端子.

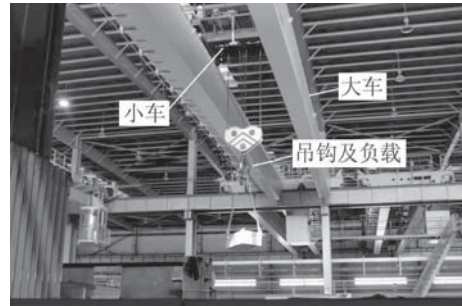


图5 实验平台

Fig. 5 Experimental platform

图6为本实验平台自动规划流程, 在每一个控制周期内均对传感器信息进行更新, 同时根据上位机命令或传感器信息确定系统运行状态, 若台车满足安全运行条件且上位机命令台车以轨迹规划方式运行时, 使用本文所设计算法实现台车的定位及消摆.

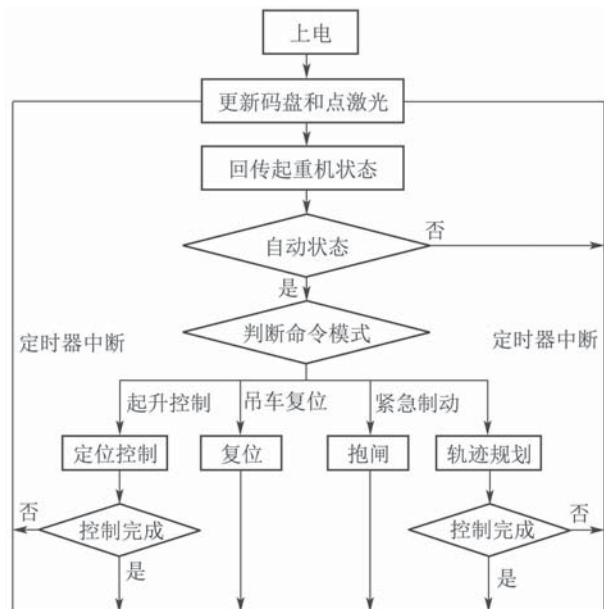


图6 实验平台自动规划流程

Fig. 6 Automatic planning process of the experimental platform

在本实验平台中, 吊钩位置由激光测距仪及台车相关尺寸确定. 如图7所示, 大车与小车激光测距仪均安装于大车车架上, 通过安装反光板得到更精确的位置信息, 大车激光测距仪对应的反光板安装于厂房侧

壁, 小车激光测距仪对应的反光板则安装于小车一侧, 保证在台车运行过程中激光测距仪信号始终位于反光板上. 以大车运行导轨与墙壁的交点为原点建立如图7所示坐标系, 通过测量台车相关尺寸及激光测距仪数据可确定吊钩在此坐标系内的坐标, 完成对吊钩当前位置以及目标位置的测量.

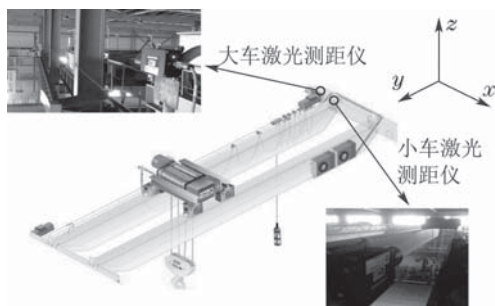


图 7 实验平台自动规划流程

Fig. 7 Automatic planning process of the experimental platform

吊绳长度 $l$ 由安装于起升电机上的绝对编码器数据测量, 由此可以计算得到负载摆动频率, 并进一步得到加速段的时间 $t_1 = 2\pi\sqrt{l/g}$ .

经现场测试, 当 $v_{\min}$ 为0.1 m/s时, 定位效果最佳, 高于此速度定位误差不确定性增大, 低于此速度台车出现震颤, 此时制动距离 $s_5 = 0.02$  m.

实验过程中绳长 $l = 4$  m, 负载质量2 t, 运行距离 $d = 8$  m,  $v_{\max} = 1$  m/s,  $a_0 = 0.25$  m/s<sup>2</sup>. 根据以上参数, 应用本文所提出的轨迹规划方法, 可确定各个阶段的运行时间如下:

$$t_1 = 4 \text{ s}, t_3 = 3.6 \text{ s}, t_5 = 0.4 \text{ s}. \quad (12)$$

此外, 由于打滑与滞后等因素的影响, 高速匀速段运行时间 $t_2$ 需根据实际运行状态在线调整, 激光测距仪测量台车与目标位置距离2.4 m时开始减速. 低速匀速段运行时间 $t_4$ 理论值等于4 s, 当台车与目标位置距离为0.02 m时进入制动阶段, 据此获得的运行时间与4 s稍有不同, 此时不能完全保证台车停止时摆角刚好为0, 但其摆角在很小的范围内.

经过实验测试结果表明: 本文提出的轨迹规划算法可使台车定位误差小于5 mm, 且负载的摆角小于1°, 具有良好的性能.

为了进一步评估本文所提出的轨迹规划方法的性能, 作者对其进行了对比性测试, 将这种方法分别与工业上普遍采用的PID控制算法, 以及通常的轨迹规划方法进行了对比性实验, 并对实验结果进行了分析.

首先选择常用的PID控制算法来进行对比性实验. 为了保证相同的测试条件, 选择运送距离为4 m, 且要求定位精度达到5 mm. 为此, 对PID控制算法的参数进行了充分调整, 使其能满足定位精度方面的要求. 图8-9展示了两种方法的对比性实验结果, 图中浅色

虚线代表PID算法的结果, 而深色实线则刻画了本文轨迹规划方法的运行结果. 图8给出了系统运行过程中的速度曲线, 从图8可以看出, 两种方法均在16 s左右使台车到达目标位置, 因此在满足定位精度的前提下, 两种方法的运行时间相当. 图9给出了两种方法的负载摆角曲线, 从图9可以看出, 本文提出的在线轨迹规划方法的摆角远小于PID控制方法.

根据图8-9所示实验结果可知, 在保证同样的定位精度时, 本文方法与PID方法运送时间相当, 但其消摆能力明显好于PID方法.

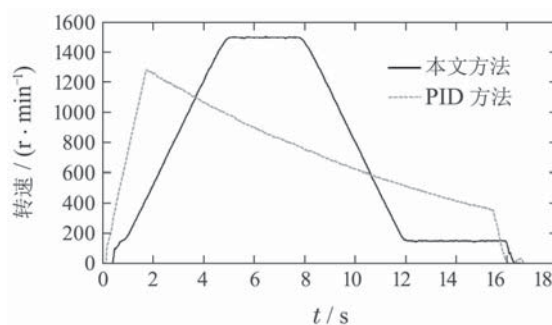


图 8 在线轨迹规划与PID方法速度曲线

Fig. 8 Velocity curves of online trajectory planner and PID control method

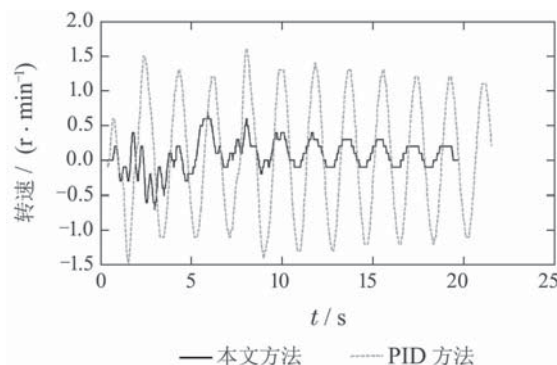


图 9 在线轨迹规划与PID方法摆角曲线

Fig. 9 Vibration curves of online trajectory planner and PID control method

进一步, 作者将本文提出的在线轨迹规划方法与通常采用的三段式离线规划方法进行了对比.

作者选择运送距离分别为6 m和8 m两种情况开展对比性实验研究, 每种情况均进行3次实验, 得到的定位效果如表2所示. 从表2可以看出, 对于本文所提出的轨迹规划方法, 其定位误差 $e_1$ 均在5 mm之内, 而离线规划方法由于难以处理打滑等问题, 致使其定位误差 $e_2$ 较大, 无法满足精准定位的要求.

完成系统测试之后, 将所设计的在线轨迹规划方法在天津起重设备有限公司生产的32 t桥式起重机上进行了长时间运行, 结果表明其运行平稳, 运送效率高, 负载摆角小, 具有很好的实际应用前景.

表2 在线与离线轨迹规划定位误差对比

Table 2 Comparison of positioning errors of online and offline trajectory planning

行程/m	$e_1/m$	$e_2/m$
6	0.002	0.165
	0.004	0.120
	0.003	0.138
8	0.005	0.131
	0.003	0.095
	0.005	0.118

## 5 结论(Conclusions)

本文在考虑工业桥式起重机变频异步电机特性的基础上,提出了一种在线轨迹规划方法,较好地实现了台车准确定位控制与负载消摆两方面的要求.具体而言,考虑到异步变频电机低速段特性相对较差的特点,这种轨迹规划方法采用分级制动策略来提高定位精度.同时,利用激光传感器数据在线调整轨迹中的参数,以实现台车的精确定位控制.另一方面,为了实现消摆的要求,通过相平面分析来优化分段式轨迹中的相关参数,确保运行过程中负载的摆角始终保持在较小的范围.文中将这种方法应用于32 t级工业桥式起重机,并通过实验结果很好地验证了这种在线轨迹规划方法的优良性能.后续研究将在已有工作的基础上,大量测试起重机系统的运行特性,尽量减少低速匀速段的耗时,以进一步提高运送效率.

## 参考文献(References):

- [1] LI J F, LI T, LENG J W, et al. A novel positioning system of overhead crane [C] // *International Conference on Electrical and Control Engineer*. Tianjin: IEEE, 2010.
- [2] ZHANG Mao, CUI Huanxing, LI Jing, et al. Accurate positioning and anti-sway for the nuclear waste self-control crane [J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2014(5): 60 – 62.  
(张冒, 崔焕星, 李靖, 等. 核废料数控起重机精确定位与消摆研究 [J]. *机械设计与制造*, 2014(5): 60 – 62.)
- [3] JIN Liangbin. Research on overhead cranes mechanical property of rolling automatic transportation equipment [J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2014, 43(3): 19 – 22.  
(金梁斌. 辊压自动化传输设备桥式起重机吊架力学特性研究 [J]. *机电工程技术*, 2014, 43(3): 19 – 22.)
- [4] NARA S, TAKAHASHI S. Visual feedback tracking with laser to moving crane hook [J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2006, 18(6): 795 – 802.
- [5] VAUGHAN J, YANO A, SINGHOSE W. Comparison of robust input shapers [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 315(4/5): 797 – 815.
- [6] SINGHOSE W, SEERING W, SINGER N. Residual vibration reduction using vector diagrams to generate shaped inputs [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1994, 116(2): 654 – 659.
- [7] SINGHOSE W, PORTER L, SINGER N. Vibration reduction using multi-hump extra-insensitive input shapers [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Seattle: IEEE, 1995.
- [8] SINGHOSE W, KIM D. Manipulation with tower cranes exhibiting double-pendulum oscillations [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Roma: IEEE, 2007.
- [9] SINGHOSE W, VAUGHAN J. Reducing vibration by digital filtering and input shaping [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2011, 19(6): 1410 – 1420.
- [10] MATTHEW O, THEERAPHONG W. A direct method of adaptive FIR input shaping for motion control with zero residual vibration [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(1): 316 – 327.
- [11] FANG Y C, MA B J, WANG P C, et al. A motion planning-based adaptive control method for an underactuated crane system [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2012, 20(1): 166 – 173.
- [12] BLAJER W, KOLODZIEJCZYK K. Motion planning and control of gantry cranes in cluttered work environment [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2007, 1(5): 1370 – 1379.
- [13] WU Z, XIA X H. Optimal motion planning for overhead cranes [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2014, 8(17): 1833 – 1842.
- [14] UCHIYAMA N, OUYANG H, SANO S. Simple rotary crane dynamics modeling and open-loop control for residual load sway suppression by only horizontal boom motion [J]. *Mechatronics*, 2013, 23(8): 1223 – 1236.
- [15] SUN N, FANG Y C, ZHANG Y D, et al. A novel kinematic coupling-based trajectory planning method for overhead cranes [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(1): 166 – 173.
- [16] SUN N, FANG Y C. An efficient online trajectory generating method for underactuated crane systems [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014, 24(11): 1653 – 1663.
- [17] SUN Ning, FANG Yongchun, QIAN Yuzhe. Motion planning for cranes with double pendulum effects subject to state constraints [J]. *Control Theory and Applications*, 2014, 31(7): 974 – 980.  
(孙宁, 方勇纯, 钱彧哲. 带有状态约束的双摆效应吊车轨迹规划 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(7): 974 – 980.)
- [18] CHEN Wei, YANG Rongfeng, WANG Gaolin, et al. Very low speed performance research of novel voltage vector control method for IM [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(15): 99 – 105.  
(陈伟, 杨荣峰, 王高林, 等. 新型电压矢量控制算法极低速性能研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(15): 99 – 105.)
- [19] YAN Junfeng, WANG Xiaolin, LIAO Qixin. A correction method for rotor field orientation of induction machine based on torque observation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(17): 4517 – 4523.  
(燕俊峰, 王晓琳, 廖启新. 一种利用转矩观测修正异步电机转子磁场定向的方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(17): 4517 – 4523.)
- [20] SUN N, FANG Y C, ZHANG X B, et al. Transportation task-oriented trajectory planning for underactuated overhead cranes using geometric analysis [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2012, 6(10): 1410 – 1423.
- [21] MA Bojun, FANG Yongchun, LIU Xianen, et al. Modeling and simulation platform for 3D overhead crane [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(12): 3798 – 3803.  
(马博军, 方勇纯, 刘先恩, 等. 三维桥式吊车建模与仿真平台设计 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(12): 3798 – 3803.)

## 作者简介:

何博 (1990–), 男, 博士, 主要研究方向为欠驱动系统控制算法, E-mail: hebowf1990@126.com;

方勇纯 (1973–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能机器人与非线性控制, E-mail: fangyc@nankai.edu.cn;

刘海亮 (1990–), 男, 硕士, 主要研究方向为硬件电路设计、DSP与FPGA程序开发, E-mail: liuhailiang0128@126.com;

孙宁 (1988–), 男, 讲师, 主要研究方向为陆地、船用起重机自动控制、非线性控制与其在机电系统中的应用, E-mail: sunn@nankai.edu.cn.