

龙门起重机的点对点控制：平整度和 IDA-PBC 组合策略

Faruk Kazi , Ravi Banavar , Romeo Ortega , N. S. Manjarekar

摘要- 在龙门起重机行业中，一种普遍的控制方法是使用基于微分平面概念的开环策略来跟踪轨迹。通过选择合适的轨迹来实现点对点控制。为了应对干扰和不确定性，我们在环路中添加了一个额定反馈控制器。我们通过结合平整度概念和 IDA-PBC 技术，实现了点对点传输的目标，并抑制了沿轨迹的摆动。搬运装满液体的容器等应用需要这种准静态轨迹。起初，使用基于平坦度的控制法则来遵循所需的轨迹，将系统转移到最终状态的邻近区域。然后，开启 IDA-PBC 控制法则，实现系统的稳健稳定。

关键词- 平坦性、IDA-PBC、整体性约束、有线机器人

图 1. 高架龙门起重机

孟买理工学院系统与控制工程研 究 生
farukkazi@iitb.ac.in

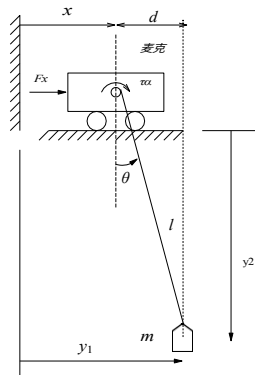
孟买理工学院系统与控制工程教授 ba- navar@iitb.ac.in
是 与 Supelec、 伊维特河畔吉夫 法国 或-
tega@lss.supelec.fr

孟买理工学院系统与控制工程研究生 ns-
manjarekar@iitb.ac.in

ISBN 978-3-9524173-8-6

I. 引言

图 1 所示的示意图代表了一种在二维空间运行的机械装置。其目的是按照指定轨迹将有效载荷从任何给定的初始配置移动到所需配置。这里有两个致动器--一个是线性致动器，用于驱动小车；另一个是旋转致动器，用于驱动绞盘。为便于研究，我们做出如下假设：



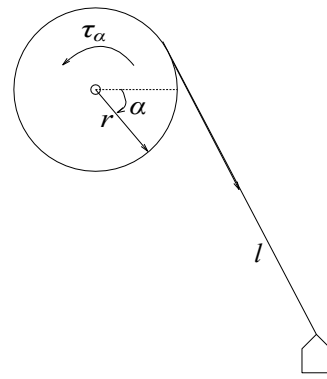


图 2. 滑轮和电缆示意图

- 1) 电缆无质量、无弹性
- 2) 小车和绞盘上的耗散力可以忽略不计
- 3) 绞盘与缆绳的接触点不会发生滑动。

假设 1 简化了动态模型，考虑到有效载荷和推车的惯性相对较大，这是一个可行的假设。假设 2 用于模拟建模。假设 3 是滑轮装置的自然理想化。最后一点意见：一个更普遍的机构将涉及小车的两个平移运动和有效载荷的球摆运动。一些研究人员已经研究了桥式起重机系统的控制问题，以实现有效载荷的精确定位和最小摆动。Fang 等人[1]利用简单的比例-派生（PD）控制器对桥式起重机系统进行非线性调节，非线性控制器增加了平面龙门架位置与有效载荷之间的耦合。Weiping 等人在文献[2]中研究了具有双摆动力学特性的桥式起重机。还有一些研究人员提出了根据这些系统的差分平面特性合成的控制器，以实现指定轨迹[3]、[4]。扁平系统通过一种被称为内生反馈的特殊类型与线性系统等价。

对于这类系统，控制输入和所有内部变量都可以用测量输出来表示。

过去十年来，非线性环境下的机械系统控制备受关注。在已开发的技术中，IDA-PBC 方法是一种通用且前景广阔的技术。该方法的理念是合成一个控制器，使闭环系统稳定在所需的平衡点上，并赋予该控制器一定的控制能力。

在被动性的基础上，通过修改能量函数和增加阻尼，可以获得闭环响应特性。然而，对于一般的轨迹跟踪问题，我们需要将能量函数修改为时变函数，而这种时变性质一般会破坏被动性。因此，轨迹跟踪控制问题

使用基于被动性的方法进行分析是很困难的，迄今为止还没有进行过研究。目前只有一些初步结果文献 [5]、[6]。

在 [7] 和 [8] 中，基于被动性的互联和阻尼分配控制技术被用于稳定欠驱动机械系统。经典球梁系统的渐近稳定和一个

新型惯性轮摆通过一种新的闭环惯性矩阵的参数化。受控拉格朗日和 IDA-PBC 的匹配条件在 [9] 中进行了讨论。IDA-PBC 方法是

扩展到欠驱动机械系统类别 [10] 中的运动学约束条件。它还引入了受约束流形上的简化匹配方程，并与 [11] 和 [12] 中提出的针对欠驱动机械系统广义匹配方程的受控拉格朗日策略密切相关。文献 [13] 介绍了利用 IDA-PBC 对以滑轮动力学为模型的龙门起重机系统进行稳定化，从而实现整体约束。在 [14] 中，Kenji Fujimoto 等人提出了一种以哈密顿框架描述的非全局系统的渐近稳定程序。然后利用广义典型变换将这些系统转换为具有指定结构矩阵的典型形式。在 [15] 中，Sorensen 等人提出了用标准汉密尔顿公式增加运动学输入的方法。这些输入改变了机械系统的内部结构，但不会改变系统的总能量。

在本文中，我们的目标是双重的。我们希望在实现点对点传输的同时，尽量减少沿途的电缆摆动。我们结合使用平面度和 IDA-PBC 技术来解决这个问题。本文的结构如下：第二节介绍起重机的动态模型。在第三节中，系统被证明是扁平的。这将导致系统反转，然后用于推导前馈控制法。第四节简要介绍了应用于此类系统的 IDA-PBC 理论。在这一节中，我们还讨论了用于龙门起重机在平衡附近稳健稳定的 IDA-PBC 控制器设计。第五节讨论了模拟和结果。第六节是本文

其中， $\theta \in S^1$ 表示有效载荷绕垂直轴的角度， $x \in \mathbb{R}$ 表示龙门架沿 X 共轴的位置， $l \in \mathbb{R}$ 表示缆线长度， α 表示滑轮旋转的角度（相对于绞盘上的固定半径矢量测量）。控制 $u \in \mathbb{R}^2$ 定义为

$$u = [F_x \quad \tau_\alpha]^T \quad (1)$$

其中 F_x 表示作用在小车上的控制力输入， τ_α 表示作用在绞盘上的扭矩。需要注意的是，绞盘的旋转动作转化为缆绳的缠绕/松开动作。滑轮上的无滑动约束意味着

$$r\dot{\alpha} = \dot{l} \quad (2)$$

其中 r 是滑轮的半径，见图 2。我们还有两个假设的结束语。

II. 动态模型

在本节中，我们将建立桥式起重机系统的动态模型。所考虑的系统如图 1 所示。配置变量为

$$q = [\theta \quad x \quad \alpha \quad l]^T$$

- 与小车长度相比，滑轮的半径较小
- 电缆的最小长度为 l_0 。

控制目标是将有效载荷从任意位置 $q_i = [\theta_i \ x_i \ \alpha_i \ l_i]^T$ 移动到指定的理想位置 $q_D = [0 \ x_D \ \alpha_D \ l_D]^T$ ，而负载坐标为

$$y = [y \ y]_1 \quad (3) \quad 2^T$$

在垂直面上跟踪预期轨迹 $y(t)$ 。需要注意的是，由于没有滑移约束，预期滑轮角度 α_D 可以用预期电缆长度 l_D 和初始电缆长度 l_0 来表示。

A. 减少配置维度

我们从系统的欧拉-拉格朗日公式开始。系统的拉格朗日为

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - V(q) \quad (4)$$

其中

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_c + m & ml \cos \theta & 0 & 0 \\ ml \cos \theta & (M_c + m) & 0 & m \sin \theta \\ 0 & 0 & I_p & 0 \\ 0 & m \sin \theta & 0 & m \end{bmatrix},$$

$$V(q) = -mgl \cos \theta,$$

其中， M_c 是小车的质量， m 是有效载荷的质量， I_p 是滑轮绕其旋转轴的惯性矩。速度层面的约束条件可进一步写为

$$(0 \ 0 \ -r \ 1) \dot{q} = 0.$$

我们可以看到，编码分布 $(0 \ 0 \ -r \ 1)$ 表示为 $\nabla h(q)$ ，其中 $h(q) = l - r\alpha$ 。这个一维向量约束的性质显然是可积分的，并将构型流形的维数降为 3。从问题的物理学角度来看， $l(t) - r\alpha(t) = l_0$ 。

要在缩小的流形上写出系统拉格朗日，我们首先要进行坐标的线性变换

as $\tilde{q} = Aq$ where $q = \begin{bmatrix} \theta & x & \alpha & l \end{bmatrix}^T$ and $\tilde{q} = \begin{bmatrix} \theta & x & \alpha & l - r\alpha \end{bmatrix}^T$ 和

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & r & 1 \end{bmatrix}$$

新坐标下的拉格朗日为

$$L(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) = \frac{1}{2} (\dot{\tilde{q}}^T M(\tilde{q}) \dot{\tilde{q}} - V(\tilde{q})) \quad (5)$$

惯性矩阵变为

$$\begin{aligned} \tilde{M}(\tilde{q}) &= A^{-T} M(q) A^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} m_0 & m_0 \cos \theta & 0 & 0 \\ m_0 \cos \theta & m + M_c & m \sin \theta & mr \sin \theta \\ 0 & m \sin \theta & m & mr \\ 0 & m \sin \theta & mr & m \end{bmatrix} \end{aligned}$$

在低维流形 ($l - r\alpha = l_0$) 上, 使用配置变量为

$$\tilde{q} = \begin{bmatrix} \theta \\ x \\ \alpha \end{bmatrix}$$

得到惯性矩阵

$$\tilde{M}_r(\tilde{q}) = \begin{bmatrix} m_0 & m_0 \cos \theta & 0 \\ m_0 \cos \theta & m + M_c & mr \sin \theta \\ 0 & m \sin \theta & mr^2 + I_p \end{bmatrix}$$

势能 $V(\tilde{q}) = -mgl_0 \cos \theta$ 表示

系统在新坐标下的势能。其中, 哈密顿 \tilde{H} 表示为

$$\tilde{H}(\tilde{q}, \tilde{p}) = \frac{1}{2} \tilde{p}^T \tilde{M}^{-1}(\tilde{q}) \tilde{p} + V(\tilde{q}) \quad (6)$$

现在, 我们将起重机在缩小人字模上的动力学特性表

述如下

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

III. 利用平面度进行轨迹跟踪

如果满足以下条件, 则称控制系统为 (差分) 平坦系统

: [3]

1) 存在一个有限的变量集 $y = (y_1, \dots, y_m)$ 是相互独立的, 即

没有任何微分方程相关

2) y_i 's 是系统变量的微分函数。

即系统变量 (状态和输入) 及其有限数量导数的函数

3) 任何系统变量都是

y_i 's

这里, $y = (y_1, \dots, y_m)$ 被称为 平面或线性化输出。它

的分量数等于

输入通道

命题 3.1: 在新的共振频率下的简化系统

嘈杂声 $r = [\theta \ x \ \alpha]^T$ 其动态变化由 (7) 得出

和约束条件 $(y_1 - x)^2 + y_2^2 - l^2 = 0$ 是平的, 有

$y = [y_1 \ y_2]^T$ 作为平面输出。

证明为了证明系统的平坦性, 我们必须证明控制输入

$u = [F_x \ \tau]^T$ 以及所有的

状态可以用控制输出 y 及其有限个时间导数来表示。

这可以分两步完成:

首先, 起重机的动力表示为

$$m\ddot{y}_1 = -T \sin \theta \quad (9)$$

$$m\ddot{y}_2 = -T \cos \theta + mg \quad (10)$$

其中 T 表示电缆张力。电缆张力 T

从 (10) 中可以提取出

$$T = \frac{(g - \ddot{y}_2)}{\cos \theta} \quad (11)$$

请注意, 对于正拉力的电缆, 我们需要 \ddot{y}_2 为

用 (11) 求解 (10) 可得 y 的微分函数为

如下所

$$\ddot{y}_1 = (g - \ddot{y}_2) \sin \theta$$

示:

$$\frac{ml}{\theta} \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{ml_0}{\theta} \cos \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} + m \sin \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} + m \sin \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -ml \frac{y_2^2 - l}{(12)} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -mr \cos \theta \dot{\theta} \\ ml_0 \sin \theta \dot{\theta} & 0 & mr \cos \theta \dot{\theta} \\ mr \cos \theta \dot{\theta} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{x} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} mgl_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

为便于记述，这些缩减流形上的欧拉-拉格朗日方程可以用以下形式表示：

$$G(q)u = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + \mathcal{W}(q) \quad (8)$$

其中 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 表示离心力和科里奥利力。注意， $M(q) - 2C(q, \dot{q})$ 是倾斜对称的
这与力 $C(q, \dot{q})\dot{q}$
不要对系统进行操作。

$$\theta = \arctan \frac{d}{y_2} = \arctan \frac{y_1}{(y_2 - g)} \quad (14)$$

$$x = y_1 - d = y_1 + \frac{y_1 \ddot{y}_2}{(g - \ddot{y}_2)} \quad (15)$$

$$l = \frac{(\frac{y_1 \ddot{y}_2}{g - \ddot{y}_2})^2 + y_2^2}{(16)}$$

$$\alpha = \frac{l - l_0}{r} \quad (17)$$

第二步, 控制输入 u 取自无滑移约束条件下的起重动力学参数 (7), 即 $\dot{r} = 0$, 并对 (13)-(17) 进行微分, 即得、

$$u = \psi(y, \dot{y}, \ddot{y}, y^{(3)}, y^{(4)}) \quad (18)$$

因此, 我们已经证明了所考虑的系统是平坦的。

A. 基于平坦度的前馈控制

可以利用所考虑系统的平坦性来解决轨迹跟踪控制的系统反演问题。示意图如图 3 所示。微分参数化 (13)-(17) 和

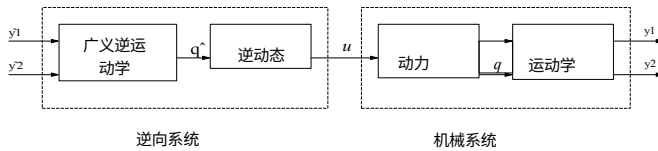


图 3. 基于平面度的前馈控制

(18) 可以离线计算合适的参考轨迹。然后利用前馈控制法计算给定输出函数 $y(t)$ 的控制力 $u(t)$, 直至四阶时间导数。根据图 3, 前馈控制包括两个步骤:

- 广义逆运动学利用 (13)-(17) 计算起重机坐标 \hat{q} 的参考值及其时间导数 $\dot{\hat{q}}$ 和 $\ddot{\hat{q}}$
- 逆动力学得出控制力 $u(t)$ 通过 (18)。

我们使用基于平整度的控制使我们接近所需的最终位置, 然后切换到根据 IDA-PBC 原理设计的稳定反馈控制法。

IV. 龙门吊的稳定使用

开发协会-建设和平委员会方法

IDA-PBC 方法的基本理念是分配一个哈密顿系统的闭环动力学, 该系统的特征是哈密顿 $H(q, p) = \frac{1}{2} p^T M^{-1}(q) p + V(q)$ 和动态

$$\begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I_n \\ -I_0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nabla_q H \\ \nabla_p H \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ G(q) \end{pmatrix} u. \quad (19)$$

to a desired Hamiltonian system characterized by the triple (M_d, J_2, V_d) standing for the desired inertia matrix, a skew-symmetric matrix and a desired potential energy respectively and the desired dynamics

$$\begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & M M^{-1}_d \\ -M M J^{-1}_d & 2(q, p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nabla_q H_d \\ \nabla_p H_d \end{pmatrix}.$$

产生两个 PDE

$$\begin{aligned} G^\perp \{ \nabla_q (p^T M^{-1} p) \\ - M M^{-1} \nabla (p^T M^{-1} p) + J M^{-1} p \} &= 0 \quad (20) \\ g^\perp \{ \nabla_v - m m^{-1} \nabla^2 v \} &= 0 \quad (21) \end{aligned}$$

其解法产生了控制规律。更多详情, 请读者参阅 [8]。

控制输入可自然分解为两个项

$$u = u_{es}(q, p) + u_{di}(q, p) \quad (22)$$

其中第一项用于实现能量整形, 第二项用于注入阻尼。PDE 产生的能量整形项为

$$u_q = (G^T G)^{-1} g^T (\nabla h - m m^{-1} \nabla h + J M^{-1} p) \quad (23)$$

阻尼注入项的计算公式为

$$u_{di} = -K G_v^T \nabla H_{pd} \quad (24)$$

其中 $K_v = K_v^T > 0$ 。我们将要求 V_d 在 q_* 处有一个孤立的最小值, 即

$$q_* = \arg \min V_d(q) \quad (25)$$

关于理想闭环动态的渐近稳定性和吸引力域的估计结果, 可参见 [8]。

A. 求解势能 PDE

势能整形的目的是在闭环势函数 V_d 中自由分配平衡点, 它是 (21) 的解。开环系统的势能函数为 $V = mg(l-r) \cos \theta$, m 为正常数, $(l-r) = l_0$ 为常数, 可进行适当的坐标变换。如果我们不修改互联矩阵, 就可以恢复著名的 PBC 势能整形程序。如果 $M_d = M$, $J_2 = 0$, 则控制器方程 (23) 简化为

$$u_{es} = (g^T g) g^{-1T} (\nabla v_q \nabla v)_{q,d} \quad (26)$$

这是我们熟悉的势能整形控制。使用 $G^\perp = (1 \ 0 \ 0)$ 势能 PDE (21) 的形式为

$$\nabla_{q_1} v - \nabla v_{q_1 d} = 0 \quad (27)$$

解得

The resulting equality

$$= \begin{pmatrix} 0 & I_n \\ -I_n & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nabla_q H \\ \nabla_p H \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ G(q) \end{pmatrix} \quad \text{用途}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & M M^{-1}_d \\ -M M J_d^{-1} & 2(q, p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nabla_q H_d \\ \nabla_p H_d \end{pmatrix}.$$

$$V_d = -mg(l - r) \cos \theta + \Phi(q_2, q_3).$$

ThD12.4

请注意， Φ 的选择受以下条件制约

(25). 为此，必要条件 $\nabla V_{qd}(q_*) = 0$ 是

当且仅当 $\nabla \Phi(q_*) = 0$ 时才满足，而充♦♦条件 $\nabla^2 V_d(q_*) > 0$ 将成立，条件是 $\nabla V(q) > 0$ 。

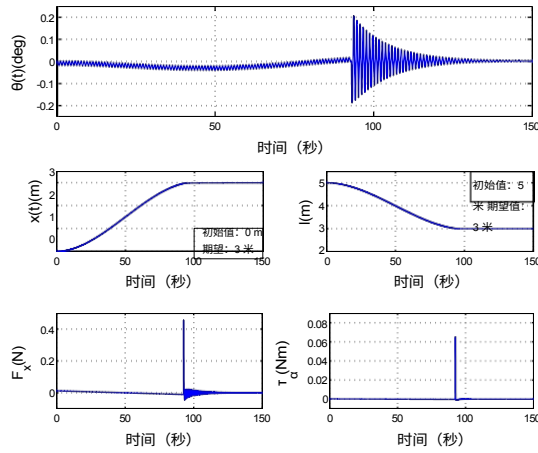


图 4.平整度和 IDA-PBC 组合策略的模拟结果：

在所需推车位置的 90 % 处切换

q_* 为正 [8]。在本例中，我们选择 Φ 为二次函数，从而得到

$$V_d(q) = -mg(l-r)\cos\theta + \frac{K_{p1}}{2}(q_2 - q_*)^2 + \frac{K_{p1}}{2}(q_3 - q_{3*})^2 \quad (28)$$

其中， $(0, q_{2*}, q_{3*})$ 表示均衡配置

和 $K_{pi} > 0, i = 1, 2$ 作为调节参数。为了计算最终的控制规律，我们首先要确定

能量整形项 u_{es} 来自 (26)，在这种情况下，其形式为

$$u_{es} = \frac{K_{p1}}{2}(q_{2*} - q_2)^2 + \frac{K_{p2}}{2}(q_{3*} - q_3)^2$$

通过阻尼注入项 (24) 完成控制器设计，得出

$$\begin{aligned} u_{di} &= -K G_v^T \dot{q} \\ &= -\frac{K_a \dot{q}_2 + K_b \dot{q}_3}{K_b \dot{q}_2 + K_c \dot{q}_3} \end{aligned} \quad (29)$$

调谐参数的作用有一个明确的解释，即 K_p 是位置的比例增益，因为它包含了随 q 线性增长的多个项，而 K_v 则沿指定的速度方向注入阻尼， $K_p, k_v > 0$ 。

V. 模拟和结果

为验证前文所述结果，我们进行了模拟计算。系

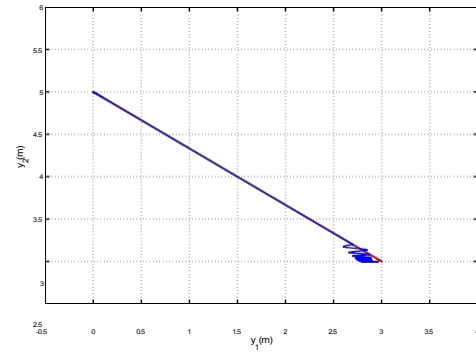


图. 使用平整度和 IDA-PBC 组合策略进行轨迹跟踪

轨迹时间就像另一个调整参数，可用于优化性能。然后，基于平整度的控制法则用于决定作用在小车和绞盘上的控制力。控制器从基于平整度的控制法切换到 IDA-PBC 控制法是在达到所需的平衡点附近。我们选择 $0.9x_D$ 作为切换条件，其中 x_D 是 de-

所需的小车位置。基于 IDA-PBC 的控制器的主要任务是将起重机系统稳健地稳定在其位置上。所需的位置。阻尼注入矩阵取值为

为以下形式 $K = \begin{bmatrix} K_a & K_b \\ K & K_{bc} \end{bmatrix}$ 对于

模拟中的调整参数选为

$k_a = 50, k_b = 4, k_c = 0.6, k_{px} = 15, k_{pa} = 0.1$ 。

图 4 说明了平面度和轨迹跟踪采用的 IDA-PBC 方法

问题。在切换瞬间，我们观察到 F_x 和 τ_a 的突然变化。这是一个值得关注的问题，我们目前正在解决这个问题。这种峰值会

也会对致动器造成伤害。图 5 显示了轨迹跟踪情况，其中 IDA-PBC 控制器负责稳健稳定。

统参数取为 $M_c = 6$ 千克， $m = 1$ 千克，滑轮半径 $r = 0.03$ 米，初始电缆长度 $l_0 = 0.35$ 米，而滑轮质量取为 4 千克，用于计算其旋转轴的转动惯量。

离线理想轨迹计算采用的是立方多项式，其形式为 $y_d(t) = at^3 + bt^2 + ct + d$ ，其中 a, b, c, d 是经过适当选择的常数。这里假定轨迹两端的速度为零。初始位置

和最终位置分别为 $y(t_i) = [0 \ 5]^T m$ 和 $y(t_f) = [3 \ 3]^T m$ 。

我们结合了两种非线性控制技术--平整度控制和基于 IDA-PBC 的控制，解决了龙门起重机的点对点控制问题，同时使摆动最小化。我们利用系统的平整度特性，根据离线计算的轨迹来计算控制输入。由于基于平坦度的前馈控制策略具有开环性质，因此本身缺乏鲁棒性，因此我们采用 IDA-PBC 作为补充，以解决轨迹跟踪和稳定问题。目前的策略在过渡期间缺乏平滑性，这方面的研究正在进行中。我们还建议比较 (1) 平稳 PI 控制法和 (2) 平稳 IDA-PBC 控制法，看看哪种技术在鲁棒性和性能方面更胜一筹。

在建模方面，许多早期的尝试都考虑了使用固定缆线长度的系统，就像小车上的简摆一样。在这里，我们

我们将电缆长度视为变量，这与现实中的起重机系统密切相关。我们还在滑轮/缆绳模型中引入了无滑动约束，作为整体工程学约束，并提出了一种坐标变换方法，将流形降到更低的维度。这样就无需使用缆索导向系统来测量缆索长度，而且由于无法直接影响缆索张力，因此可以直接计算作用在绞盘上的扭矩。未来的努力方向是从基于平面度的控制器顺利过渡到 IDA-PBC。

参考资料

- [1] Y.Fang, W. E. Dixon, D. M. Dawson, and E. Zergeroglu, "Nonlinear Coupling Control Laws for an Underactuated Overhead Crane System," *IEEE Trans. on Mechatronics*, vol. 8, no.3, pp.
- [2] D.Liu, W. Guo, J. Yi, and D. Zhao, "Passivity-Based-Control for a Class of Underactuated Mechanical Systems," in *Proceedings of the 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*, (Chengdu, China), pp.
- [3] M.Fliess, J. Levine, P. Martins, and P. Rouchon, "Flatness and defect of non-linear systems: introductory and examples," *International Journal of Control*, vol. 61, no. 6, pp.
- [4] T.T. Maier 和 C. Woernle, "缆索悬挂机械手的动力学与控制", 《动态系统中的非线性问题-理论与应用》第 9th 次德日研讨会 (德国 Straelen), 2000 年。
- [5] K.K. Fujimoto, K. Sakurama, and T. Sugie, "Trajectory tracking control of port-controlled Hamiltonian systems via generalized canonical transformations," *Automatica*, vol. 39, no. 12, pp. 2069, 2003.
- [6] K.Fujimoto, K. Sakurama, and T. Sugie, "Trajectory tracking control of the port-controlled Hamiltonian systems and its application to a magnetic levitation system," in *Proceedings of the Conference on Decision & Control*, (Orlando, Florida), pp.
- [7] F.Gomez-Estern, R. Ortega, F. R. Rubio, and J. Aracil, "Stabilization of a Class of Underactuated Mechanical Systems via Total Energy Shaping," in *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, (Orlando, Florida USA), pp.
- [8] R.Ortega, M. W. Spong, F. Gomez-Estern, and G. Blankenstein, "Stabilization of a Class of Underactuated Mechanical Systems via Interconnection and Damping Assignment," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 47, no. 8, pp.
- [9] G. Blankenstein, R. Ortega, and A. J. van der Schaft, "The matching conditions of controlled Lagrangians and IDA-passivity based control," *International Journal of Control*, vol. 75, no. 9, pp.
- [10] G. Blankenstein, "Matching and Stabilization of constrained Systems," in *Proceedings of the Mathematical Theory of Networks and Systems*, (Notre Dame, Indiana), 2002.
- [11] J. Hamberg, "Simplified Conditions for Matching and for Generalized Matching in the Theory of Controlled Lagrangians," in *Proceedings of the American Control Conference*, (Chicago, Illinois), pp.3918-3923, 2000.
- [12] J. Hamberg, "General Matching Conditions in the Theory of Controlled Lagrangians," in *Proceedings of the Conference on Decision & Control*, (Phoenix, Arizona USA), pp.

- [13] R.Banavar, F. Kazi, R. Ortega, and N. Manjarekar, "The IDA-PBC Methodology Applied to a Gantry Crane," in *Proceedings of the Mathematical Theory of Networks and Systems*, (Kyoto, Japan), 2006.
- [14] K.Fujimoto, "Stabilization of a class of Hamiltonian systems with non holonomic constraints and its experimental evaluation," in *Proceedings of the Conference on Decision & Control*, (Phoenix, Arizona USA), pp.
- [15] M.J. Sorensen、J. D. Bentsen、P. Andersen 和 T. S. Pedersen , "Asymptotic Stabilization of Non-Holonomic Port-Controlled Hamiltonian Systems" , in *Proc. of the 5th IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV)*, (葡萄牙里斯本) , 2004.