



## 盐池塑苫系统研究及力矩电机应用性分析

焦志勇, 杨春宏

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 详细分析了盐池塑苫变直径系统在全程协调时,对两收放滚筒及电机的各圈转速、力矩的控制要求. 编写了用于盐池塑苫收放机组选型计算的通用计算程序,从而解决了运动分析和力学分析时繁杂的运算过程. 提出利用力矩电机本身原有的机械特性来实现盐池塑苫系统塑料布的匀速收放.

**关键词:** 浮卷式塑苫; 变直径系统; 匀速; 力矩电机

**中图分类号:** TM359.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6510(2009)06-0060-05

### Research of Combined Plastic Film Collecting and Spreading System in Salt Pond and Application Prospect Analysis of Torque Motor

JIAO Zhi-yong, YANG Chun-hong

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The rotate speed and detail control requirement of the two collecting and spreading rollers was analyzed when the alterable diameter system was carrying out in the whole coordination of plastic film collecting and spreading. The common program was compiled. It can be used for the parameter calculation of plastic film collecting and spreading system. So the intricate calculation in movement and mechanical analysis was predigested. It was proposed that the mechanical features of torque motor can be used to keep plastic film collecting and spreading in constant speed.

**Keywords:** machine assembly for floating axis unit; the varying diameter system; uniform motion; torque motor

近十几年来,塑苫技术在海盐生产中得到了较大发展,成为多雨地区海盐生产的重要设施. 在盐池塑苫系统中,浮卷式以其机械化程度高、使用寿命长等优点而占主导地位. 自1990年开始在我国各大盐场得到了广泛应用<sup>[1]</sup>. 但其也存在不少问题,如电机的间歇运行使系统整体效率较低;手动频繁启停操作导致电机过热;机械传动系统的冲击载荷过大,降低了传动系统及牵引绳的使用寿命;布膜和收绳时难以实现同步.

为了解决上述问题,人们不断对塑苫系统进行研究和改进. 曾经有人提出带超越离合器的塑苫系统<sup>[2]</sup>和带兼容机、可控硅的塑苫系统<sup>[3]</sup>. 2003年产生了由PLC、变频器和大量传感器等组成的电子化控制塑苫系统<sup>[4]</sup>. 前两方案都未能完全解决存在的问题,第三个方案采用电子设备以及复杂的控制电路,由于盐池工

作环境对电子产品影响较大,需要设立严密的额外保障设施,故存在成本及日常维护费用高、出故障后检测维修不方便等问题.

本文提出利用力矩电机本身的机械特性来实现塑苫系统的匀速收放,为解决塑苫系统现存的问题提供了一种全新的方法. 同时详细分析塑苫系统设计选型时的参数以及其理论计算方法,编写了塑苫系统机械特性计算分析的一体化程序.

### 1 技术方案

#### 1.1 设计思路

与普通SJ型盐池塑苫系统相比,本系统将收绳滚筒处普通三相交流电机用三相交流力矩电机取代,在

收稿日期: 2009-06-11; 修回日期: 2009-06-30

基金项目: 天津科技大学自然科学基金资助项目

作者简介: 焦志勇(1958—),男,山东人,副教授,硕士生导师, jzy@tust.edu.cn.

浮卷轴和涡轮蜗杆减速器以及收绳滚筒和收绳滚筒减速器之间,分别布置电磁离合器③和②。具体布置如图1所示。

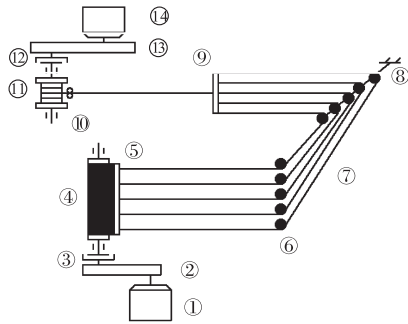


图1 带力矩电机的盐池塑苫系统

Fig.1 Combined plastic film collecting and spreading system with the torque motor in salt pond

### 1.2 动力传递路线

(1)放膜

力矩电机⑭→减速器⑬→电磁离合器⑫→收绳滚筒⑪→主牵引绳⑨→副牵引绳⑦→牵引杠⑤→布膜。

(2)收膜

浮卷轴电机①→减速器②→电磁离合器③→浮卷轴④→收膜。

## 2 系统运动和力学特性分析

### 2.1 匀速放膜收膜时的收绳滚筒和浮卷轴转速分析

#### 2.1.1 浮卷轴匀速收膜运动分析

浮卷轴收膜运动模型如图2所示。

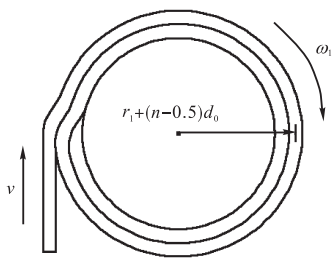


图2 浮卷轴收膜模型

Fig.2 Plastic film collecting mode of floating axis

浮卷轴匀速收薄膜时每一圈的转速计算公式为

$$n_1 = \frac{v \times 1000}{2\pi[r_1 + (n_q - 0.5)d_0]} \quad (1)$$

式中: $n_1$ 为浮卷轴匀速收薄膜时每一圈的转速,r/min; $r_1$ 为浮卷轴半径,mm; $v$ 为收薄膜速度,m/min; $d_0$ 为综合薄膜厚度,mm; $n_q$ 为圈数。

$$d_0 = k \times d \quad (2)$$

式中: $k$ 为褶皱系数,根据实际褶皱率进行选择; $d$ 为薄膜实际厚度,mm。

当浮卷轴收完全部薄膜后,在浮卷轴上缠绕的总圈数 $n_0$ 为

$$n_0 = \frac{-\pi r_1 + \sqrt{(\pi r_1)^2 + 1000d_0L\pi}}{d_0\pi} \quad (3)$$

式中: $L$ 为薄膜总长,m; $n_0$ 为浮卷轴满卷时塑料薄膜总圈数。

#### 2.1.2 收绳滚筒匀速收绳运动分析

收绳滚筒收绳过程示意图如图3所示。

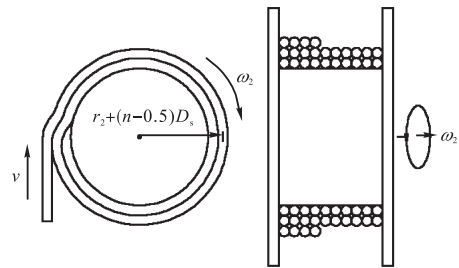


图3 收绳滚筒收绳模型

Fig.3 Rope collecting mode of drum

收绳滚筒匀速收钢丝(塑料)绳时每一层的转速计算公式为

$$n_2 = \frac{v \times 1000}{2\pi[r_2 + (n_c - 0.5)D_s]} \quad (4)$$

式中: $n_2$ 为收绳滚筒匀速收绳时每一层的转速,r/min; $r_2$ 为收绳滚筒半径,mm; $D_s$ 为主牵引绳直径,mm; $n_c$ 为主牵引绳在滚筒上的层数。

收绳滚筒每一层上绕绳的最大圈数

$$n_{2max} = B_s / D_s \quad (5)$$

式中, $B_s$ 为收绳滚筒内侧的宽度,mm。

收完绳后的总圈数 $n_{00}$ 为

$$n_{00} = n_y \frac{B_s}{D_s} + x \quad (6)$$

$$L = 2\pi x [r_2 + \frac{D_s}{2} + (n_y - 1)D_s] +$$

$$2\pi \frac{B_s}{D_s} [(r_2 + \frac{D_s}{2})(n_y - 1) + (n_y - 1)(n_y - 2) \frac{D_s}{2}] \quad (7)$$

式中: $n_y$ 为已收绳的层数; $x$ 为最后一层上卷绳的圈数。

### 2.2 盐池塑苫系统力学分析

#### 2.2.1 塑料薄膜的选择和基本运动阻力计算

系统选用江苏省灌东盐厂生产的盐用PVC塑苫薄膜,其抗拉强度已达到22MPa以上,使用3年后抗拉性能基本不变。

在盐池苫盖过程中,主牵引绳的牵引力为

$$F = F_0 + F_f \quad (8)$$

式中: $F_0$ 为启动时的主要阻力之和,N; $F_f$ 为在盐池苫盖过程中,塑苫系统的运动阻力之和,N.

$$F_0 = F_1 + F_2 + F_3 \quad (9)$$

$$F_f = F_{f1} + F_{f2} + F_{f3} \quad (10)$$

式中: $F_1$ 为克服浮卷轴转动惯量产生的阻力,N; $F_2$ 为初始张力,N; $F_3$ 为浮卷轴两端摩擦矩而产生的阻力,N; $F_{f1}$ 为塑料薄膜在池中的运动阻力,N; $F_{f2}$ 为牵引杠在池中的运动阻力,N; $F_{f3}$ 为挂球在轨道内的运动阻力,N.

刚开始工作与正常工作时的  $F_0$  大小不同. 开始时, $F_0$  包括牵引绳克服浮卷轴滚筒转动惯量的力  $F_1$ 、初始张紧力  $F_2$  和浮卷轴两端摩擦矩而产生的阻力  $F_3$ ; 正常工作时, $F_0$  包括初始张紧力  $F_2$  和浮卷轴两端摩擦矩而产生的阻力  $F_3$ .

克服转动惯量需要的力为

$$F_1 = \left[ \frac{m_1(r_1^2 + r_2^2) \times 10^{-6}}{2} + \frac{m_2(R_1^2 + R_2^2) \times 10^{-6}}{2} \right] \frac{\beta}{R_2} = \left[ \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)L_f \rho \times 10^{-6} \times (r_1^2 + r_2^2) \times 10^{-6}}{2} + \frac{\rho_s B L d \times 10^{-3} \times (R_1^2 + R_2^2) \times 10^{-6}}{2} \right] \frac{\beta}{R_2} \quad (11)$$

式中: $m_1$ 、 $m_2$ 为浮卷轴和塑料薄膜的质量,kg; $r_1$ 、 $r_2$ 为浮卷轴内孔半径和浮卷轴外轴半径,mm; $R_1$ 、 $R_2$ 为塑料薄膜满卷后在浮卷轴上的内外半径,mm; $\beta$ 为启动时浮卷轴的角速度,rad/s<sup>2</sup>; $L_f$ 为浮卷轴总长,m; $\rho$ 为浮卷轴材料密度,kg/m<sup>3</sup>; $\rho_s$ 为塑料薄膜的密度,kg/m<sup>3</sup>; $B$ 为塑料薄膜与卤水接触的宽度(在此取盐池宽度),m.

初始张力为

$$F_2 = K_z \times B \quad (12)$$

式中: $K_z$ 为张力系数,N·m<sup>-1</sup>.

浮卷轴两端因轴承摩擦力矩而产生的阻力为<sup>[9]</sup>

$$F_3 = \frac{\mu P d_z}{2R_x} \delta \quad (13)$$

式中: $\mu$ 为轴承摩擦因数; $P$ 为轴承负荷,N; $d_z$ 为轴承公称内径,mm; $R_x$ 为浮卷轴半径变量,mm; $\delta$ 为因润滑、锈蚀等而产生的摩擦力矩增大系数.

将式(11)、(12)、(13)代入式(9)得到启动时的主要阻力大小为

$$F_0 = \left[ \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)L_f \rho \times 10^{-6} \times (r_1^2 + r_2^2) \times 10^{-6}}{2} + \frac{\rho_s B L d \times 10^{-3} \times (R_1^2 + R_2^2) \times 10^{-6}}{2} \right] \frac{\beta}{R_2} +$$

$$K_z \times B + \frac{\mu P d_z}{2R_x} \delta \quad (14)$$

塑料薄膜在池中的运动速度较低,液流在塑料薄膜下附近产生层流<sup>[4]</sup>附面层,故其运动阻力主要是黏性摩擦阻力为<sup>[5]</sup>

$$F_{f1} = \eta \frac{V}{h} \lambda B X \quad (15)$$

式中: $V$ 为垂流动方向速度,m/s; $h$ 为卤水池水深,m; $\eta$ 为盐池卤水的动力黏度,Pa·s; $\lambda$ 为薄膜水上的褶皱影响黏滞阻力的系数; $X$ 为盐池已布膜长度,m.

由于一般卤水池浓度在 26 ~ 30° Be'之间<sup>[6]</sup>. 文献[7]推荐取  $\eta$  为 0.006 Pa·s. 根据文献[8]得卤水盐池深度一般在 15 ~ 20 cm.

物体形状不易使流体绕流,牵引杠下附面层较早分离,在其后面全部形成旋涡区,压差阻力占主要地位,其值按下式计算<sup>[5]</sup>:

$$F_{f2} = \frac{1}{4} C_d \rho_0 A v^2 \quad (16)$$

式中: $C_d$ 为塑料布在池中匀速运动的压差阻力系数. $\rho_0$ 为卤水密度,g/cm<sup>3</sup>; $A$ 为牵引杠正面与卤水接触面积(包括涌浪接触),m<sup>2</sup>.

吊球在滑道内的运动阻力为

$$F_{f3} = K X \quad (17)$$

式中: $K$ 为轨道上单位长度的摩擦阻力,N·m<sup>-1</sup>.

将式(15)、(16)、(17)代入式(10)得到

$$F_f = \eta \frac{V}{h} \lambda B X + \frac{1}{4} C_d \rho_0 A v^2 + K X \quad (18)$$

### 2.2.2 系统力矩变化关系的研究

通过上述计算分析可推导出收绳滚筒每转一圈,它所需的力矩为

$$M_{(n)} = F \times [r_2 + (n_c - 0.5)D_s] \quad (19)$$

### 2.2.3 塑苫系统一体化程序简介

基于上述原理,笔者编写了“盐池塑苫系统各参数、运动分析及力矩电机选择一体化软件系统”. 根据给定的不同参数,可以快速计算出塑苫系统收放塑料薄膜时,塑料薄膜和主牵引绳在不同时段上的详细受力情况的数据,以及各主要部件的转速和转矩的关系,并绘制出系统的转速-转矩曲线,不必再对每一组数据进行单独计算. 在选型过程中,盐池长度和宽度的变化使选型的数据处于随动状态,直到最终结果输出. 依据结果可以全面掌握系统工作情况,并指导电机的快速选型. 采用该软件绘制某型塑苫系统在匀速布膜时的机械特性曲线,如图4所示.

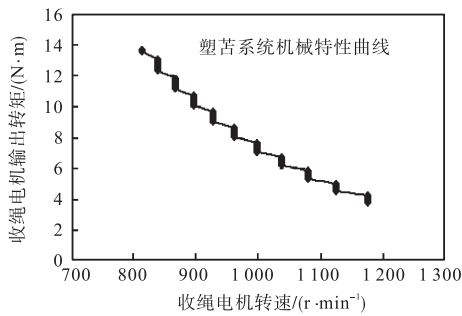


图4 塑苦系统转速-转矩曲线

Fig.4 Torque and rotate speed curved shape of combined plastic film collecting and spreading system

### 3 三相交流力矩电机在塑苦系统中的应用

#### 3.1 应用可行性分析

在盐池塑苦系统中,收绳电机多采用普通三相交流电动机,其机械特性与塑苦系统机械特性对比如图5所示。 $M_m$ 为最大转矩, $n_m$ 为最大转矩对应的转速, $n_0$ 为同步转速。

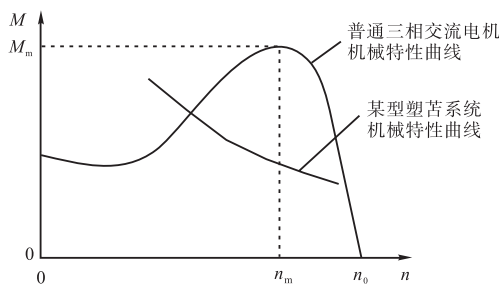


图5 塑苦系统与普通交流电机机械特性曲线对比

Fig.5 Contrast between mechanical features curved shape of combined plastic film collecting and spreading system and mechanical features curved shape of the common three-phase current motor

由图5可知普通三相交流异步电动机显然不能实现塑苦系统的匀速收放膜,若薄膜承受的张力过大还会造成薄膜被撕裂或扯断。

由图4可知,塑苦系统的机械特性较软.可以根据其与电机的推荐应用机械特性曲线的吻合情况进行选型,从而实现系统的匀速收卷.塑苦系统的机械特性与力矩电机的匀速工作区域拟合情况如图6所示, $M_D$ 为力矩电机堵转转矩。

从图6可以看出,两者的拟合情况较好.因此,如果在盐池塑苦系统的收绳装置上采用力矩电机,其本身的机械特性就能很好的符合收绳时的机械特性要求,这样就可以在不添加其他附件的情况下利用力矩电机本身的机械特性来实现塑苦系统的匀速收膜放膜.在某些情况下,塑苦系统机械特性曲线会相对平

坦,此时力矩电机也可以通过改变其工作电压来改变其本身原有的机械特性从而满足系统要求,图7为力矩电机在不同电压下的机械特性曲线。

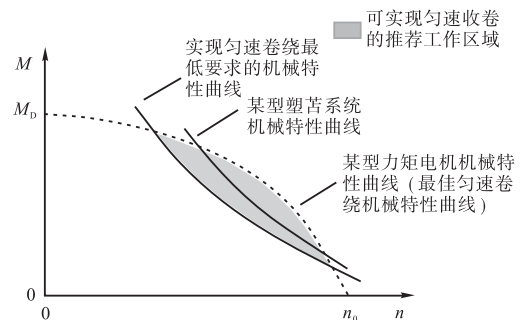


图6 塑苦系统机械特性曲线与力矩电机匀速卷绕工作区域的拟合

Fig.6 Fitness between mechanical features curved shape of combined plastic film collecting and spreading system and the area of uniform rotation of the torque motor

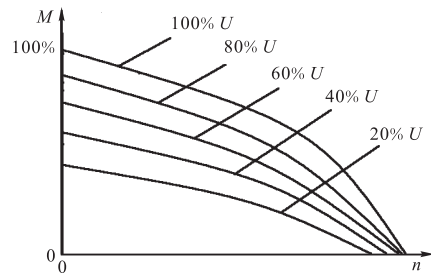


图7 力矩电机在不同电压下的转速-转矩曲线

Fig.7 Torque and rotate speed curved shapes of torque motor in different voltages

另外,由于力矩电机能根据不同负载,迅速的调整转速和驱动转矩,不会像普通三相交流电机那样产生不确定的转矩和转速变化,从而不会产生大的冲击载荷,减少了日常维护成本.而且,力矩电机有良好的堵转性能(不同型号电机能堵转1~20min),当浮卷轴或系统其他部件发生故障而被卡住时,不会因电机电流过大而烧毁电机,而稳定的堵转转矩也不会撕毁薄膜或拉断牵引绳。

#### 3.2 力矩电机选择的参数计算

力矩电机的选型应满足两个条件:一是转速范围和收绳速度相适应,二是电动机的输出转矩应和负载所需转矩相近.最佳输出转矩约为1/2的堵转转矩.在选用力矩电机时,其输出转矩 $M_D$ 应在最大转矩 $M_m$ 的0.2~0.8倍范围内,工作速度在同步转速的0.3~0.7倍区间内。

交流力矩电机的容量确定:

(1)按工艺要求的线速度计算空盘时电机的转速:

$$n_r = \frac{60v \cdot i}{\pi d_2} \quad (20)$$

式中： $i$  为减速箱的减速比。

(2) 计算满盘时电动机的转速：

$$n_s = \frac{60v \cdot i}{\pi d_m} \quad (21)$$

式中： $d_m$  为收绳滚筒满盘时的最大直径，m。

(3) 确定力矩电动机的额定转速范围：

$$\frac{3n_s}{2} \leq n_0 \leq 3n_s \quad (22)$$

(4) 确定电机需要的输出转矩：

在盐池塑苫系统收放薄膜过程中，收绳电动机所需要的输出转矩  $M_G$  包括：

① 张力矩  $M_Z$ 。在盐池塑苫系统收放薄膜过程中，牵引绳承受张力的与薄膜在卤水上运动的黏滞阻力，牵引杠在卤水中运动的压差阻力，薄膜带动浮卷轴运动的运动阻力等有关，这方面的力在整个系统中占主导地位。在力矩电动机的选型时， $M_Z$  在整个电动机输出中占主要成分，应选在收绳装置可能出现的最大扭矩的情况下。

② 空载损失力矩  $M_K$ 。这是传动系统的机械损失，其大小决定于传动变速装置的复杂程度和电动机轴输出功率大小，一般取  $(0.15 \sim 0.20) M_Z$ 。

③ 排绳力矩  $M_P$ 。收绳滚筒在收卷过程中，为使牵引绳在收绳滚筒上排列整齐均匀，在收绳装置中又增设了排绳机构，一般排绳机构不另设单独的排绳电动机，而由收绳电动机驱动，可取  $M_P = 1.2 M_Z$ 。

④ 克服收绳滚筒及卷绕在收绳滚筒上的牵引绳质量的力矩  $M_T$ 。在收放薄膜过程中，这不是收绳电动机的主要力矩，在计算时可以忽略。

⑤ 确定力矩电动机的堵转转矩  $M_D$

力矩电动机所需要的输出转矩（计算值）为  $M_G = M_T + M_K + M_P + M_Z$ 。实际工作中应选力矩电动机输出转矩  $M_S = M_G / 0.85$ ，选用堵转转矩  $M_D = (1.5 \sim 1.8) M_S$ 。

应当指出的是，力矩电动机的堵转转矩不能选得过大，这是因为在塑苫系统的收绳卷绕过程中有以下特点：一是卷径比（收绳滚筒直径和满盘直径之比）小，习惯上卷径比一般为  $1.5 \sim 3$ ；二是从空盘至满盘质量变化不大，但总驱动转矩需要慢慢变大；三是产品对承受张力的要求不像其他行业那样严格。

(5) 确定需要的力矩电机，同时查看系统转速-转矩曲线与力矩电机本身转速-转矩曲线的吻合情况（采

用笔者设计的程序可以快速绘制）。

## 4 结 论

(1) 在理论上对塑苫系统进行了运动分析和力学计算，得出系统的运动受力情况，编写了系统参数分析计算程序，同时绘制出了塑苫系统的机械特性曲线。

(2) 通过对现有塑苫系统机械特性的分析计算，发现其机械特性曲线符合力矩电机的机械特性曲线。在此基础上，提出利用力矩电机本身的机械特性来实现塑苫系统的匀速收放。

(3) 对比以往的塑苫系统，本方案的优点有：取消了大量昂贵的电子设备，也不需要严密的电子防护装置，而三相交流力矩电机的价格也与普通三相交流电机接近，故成本较低；若工作过程中发生故障，如浮卷轴被卡住时，力矩电机具有良好的堵转性能，也能保证力矩电机不被损坏，薄膜不被拉坏，有很好的应用前景。

## 参考文献：

- [1] 白俊永,张树森,穆北凌,等. SJ 型浮卷塑苫收放机的设计及应用[J]. 海湖盐与化工,1997,26(5):9-11.
- [2] 吴敏,李振亮,刘金荣,等. 一种新型浮卷式塑苫装备[J]. 海湖盐与化工,1996,25(3):11-13.
- [3] 刘金荣,刘菊. 一种新型的浮卷式塑苫收放自动控制系统[J]. 海湖盐与化工,2000,29(5):33-36.
- [4] 王子文,段润保,郝力文,等. PLC 用于盐池塑苫系统控制的控制策略研究[J]. 电器传动,2003(5):50-52.
- [5] 周光桐,严宗毅,徐世雄,等. 流体力学(上)[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2000:12-34.
- [6] 王凤娇,吴书君,刘昭武,等. 海盐生产的降水塑苫决策初探[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2008 年会论文集,2008:1288-1295.
- [7] 薛自义. 制盐工业手册[M]. 北京:中国轻工业出版社,1994:122-126.
- [8] 唐娜. 海盐制盐工(初、中级)[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007:81-89,267-294.
- [9] 濮良贵,纪名刚. 机械设计[M]. 7版. 北京:高等教育出版社,2001:271-334.
- [10] 王世定,张成钢,黄岷樵,等. 实用中小型电机手册[M]. 辽宁:辽宁科学技术出版社,1987:440-443.