

基于色彩模糊理论的3D打印机喷头运动控制研究

李海霞

(山东工程职业技术大学 山东 济南 250200)

摘要: 3D打印机喷头在实际喷射过程中存在感知冗余,在控制喷头运动过程中,导致喷头最终的运动位置点偏离设定的目标位置,针对该问题,研究基于色彩模糊理论的3D打印机喷头运动控制过程。在规定的喷头喷射范围内,利用色彩模糊理论控制喷头喷射空间,并使用色彩相似度控制给定的喷射阈值,以喷射图层的数量作为控制变量,控制感知冗余产生的干扰,构造喷头的动力学运动数值关系,模态分析3D打印机喷头运动状态,采用D-H方法处理空间范围内的简化模型,逆变处理空间范围的各项参数,实现3D打印机喷头运动控制。搭建3D打印机测试平台,构建喷头运动色彩模糊集矩阵,准备基于并联结构的运动控制方法、基于振动特性的运动控制方法以及所设计的运动控制方法参与测试,测试结果表明:所设计的喷头运动控制方法能够控制喷头运动至设定的原始状态,运动控制效果最佳。

关键词: 色彩模糊理论; 3D打印机喷头; 运动控制; 感知冗余; 色彩相似度; 简化模型

0 引言

从概念上来看,模糊理论能够反应客观事务的本质,并将抽象的事务提取出来并加以概括,外延形成特定的处理范围。随着色彩管理技术的发展,在色彩空间处理过程中引入模糊理论成为了当下的研究重点。3D打印机是一种快速成形的机器,以数字模型中的文件作为处理基础,整理粉末状金属或是其他粘合材料,构建形成新的物体。作为输出制作材料的重要出口,打印机喷头运动控制是决定打印物体形状的重要决定要素,为此,以色彩模糊理论作为支持,设计3D打印机喷头运动控制方法。

国外研究3D打印技术较早,最初打印机结构采用两个相互垂直的水平轴作为打印支撑,并在底部配置上百个喷嘴,通过调整水平轴的角度来控制打印喷头的运动。国内研究3D打印技术起步较晚,多数打印机结构以三轴龙门式作为处理核心,并充分利用混合材料的粘性质,打印形成结构坚固的打印物体。综合国内外的研究应用成果来看,不同的3D打印机结构存在不同的运动控制方式,且打印机的喷头旋转角度较为固定,控制喷头的独立轴有着固定的移动方向,在实际应用过程中往往会产生与设定运动控制状态发生偏差的情况,针对该应用问题,设计基于色彩模糊理论的3D打印机喷头运动控制方法,改善现有运动控制方法中的不足。

1 基于色彩模糊理论的3D打印机喷头运动控制

1.1 利用色彩模糊理论控制喷头喷射空间

3D打印机构造形成的喷射物体存在均匀的颜色空间,在规定的喷头喷射范围内,利用模糊理论将喷头的喷射空间量化为色彩轴,并采用色彩随机处理不同喷射图层之间的感知色差,数值关系可表示为:

$$J = \frac{N(H_1 - H_2)}{D_j} \quad (1)$$

上述数值关系中,J表示喷射图层的感知色差系数,N表示3D打印机喷射的次数, H_1 、 H_2 分别表示打印机的喷射距离, D_j 表示打印机的感知阈值。在3D打印机的临近喷射区域内设置两个模糊分析点,并采用平方距离标定模糊分析点的感

知系数,数值关系可表示为:

$$\phi = \frac{J}{N \times D_e} \quad (2)$$

其中, ϕ 表示标定的喷射感知系数, D_e 表示给定的平方阈值,其余参数含义不变。为了控制喷射过程产生的感知冗余,利用喷射图层形成的色彩相似度控制给定的喷射阈值,以喷射图层的数量作为控制变量,标记喷射空间的色彩模糊算子,设置的控制变量阈值可计算表示为:

$$d = \sqrt{\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2}{\phi}} \quad (3)$$

其中,d表示设置的控制变量阈值,(x,y,z)表示喷射点在当前图层内形成的色彩rgb数值,(a,b,c)表示下一个喷射周期产生的色彩rgb数值,其余参数含义不变。由上述处理过程可知,喷射图层内含有大量的喷头信息,为了统一信息内喷头信息的量纲,设置模糊聚类的加权指数,并构造喷头喷射空间的决策边界,形成区间范围的模糊控制范围,并以该模糊控制范围作为处理对象,模态分析喷头的运动状态。

1.2 模态分析3D打印机喷头运动状态

在上述模糊控制的范围内,以控制范围作为数值控制,构造喷头的动力学运动数值关系,数值关系可表示为:

$$[M] = \frac{[C] + [K]}{\{x'\}} \quad (4)$$

上述数值关系中,[M]表示3D打印机喷头结构的质量矩阵,[C]表示喷头结构的阻尼矩阵,[K]表示物体的刚度矩阵, $\{x'\}$ 表示喷射物体的运动矢量。在喷头运动过程中,喷射材料之间形成接触面渗透,形成的接触面渗透过程如图1所示。

根据上述喷射接触形成的接触面结构,不考虑喷头结构在运动过程中产生的阻尼以及惯性,设置喷头运行状态的运动极限状态约束,数值关系可表示为:

$$[s] = \frac{[K] + [M]}{\{x''\}} \quad (5)$$

上述数值关系中,[S]表示设定的极限约束状态, $\{x''\}$ 表示喷头做自由振动时的简谐方程,其余参数含义不变。结合

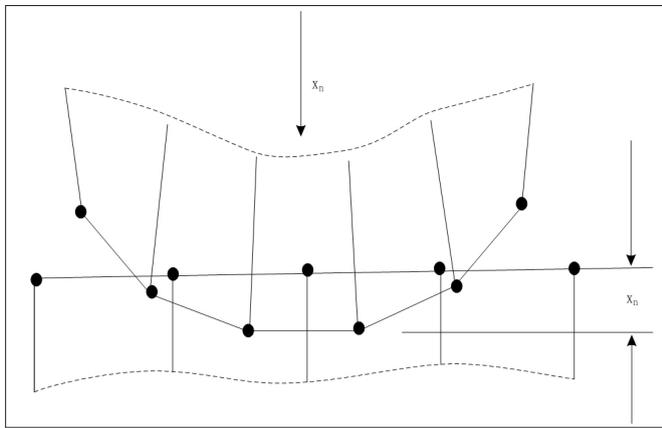


图1 喷头喷射形成的接触面结构

喷头的运行频率，将上述到达运动极限状态的函数关系处理为多个阶次，并按照标定的频率将其处理为模态方程，对应固定阶次的固有频率，形成的数值关系可表示为：

$$M_T = \sqrt{\frac{[K]}{2\pi[M]}} \quad (6)$$

其中， M_T 表示特定阶次固有频率下的模态方程，其余参数含义不变。在上述的模态频率条件内，确定喷头运动状态的激励参与系数，进而得到反映喷头振型的比例因子，结合喷头不同的喷射指令，在整理运动过程中产生的激励响应，在不同数值大小的比例因子上配置固定的参与系数、模态系数以及模态参数的有效量。此时，按照打印机喷头运动过程，模态数值关系形成的基本运动参数可表示为：

$$\begin{cases} A_i = S_u c_i \\ A_j = \frac{S_u c_i}{w_i} \\ A_n = \frac{S_a}{\gamma_i} \end{cases} \quad (7)$$

其中， A_i 表示模态条件下喷头运动频谱值， A_j 表示喷头运动速度谱值， A_n 表示喷头运动过程产生的加速度频谱参数， S_u 表示打印机形成物体的有效质量， C_i 表示打印机量化位移， W_i 表示模态系数的参与系数， S_a 表示运动模态的有效组合参数， γ_i 表示喷头运动谐振系数。模态分析 3D 打印机喷头运动状态后，设定 3D 打印机喷头运动控制过程。

1.3 实现 3D 打印机喷头运动控制

使用上述模态化处理的喷头运动参数，在实现喷头运动控制时，采用 D-H 方法处理空间范围内的简化模型，处理的简化模型如图 2 所示。

在上图设定的数值简化模型内，引入喷头连杆长度、扭角以及偏距参数，根据 D-H 方法内建立的坐标奇次项，构建喷头运动过程中产生的坐标变换，数值关系可表示为：

其中， T_i 表示喷头运动过程产生的坐标变换函数， S_i 表示连杆的扭角， λ_i 表示连杆的偏距参数， d_i 表示喷头连杆长度，其余参数含义不变。随机给定上述打印机关节转角一定的数

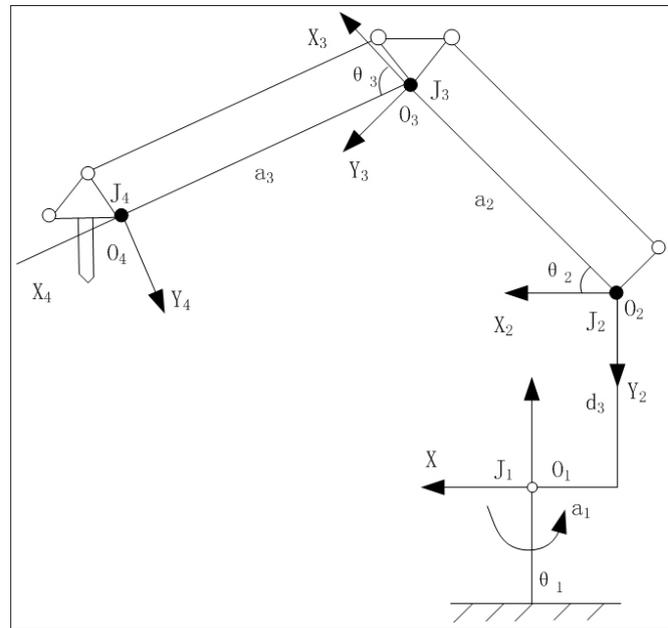


图2 3D 打印机喷头运动学数值简化模型

$$T_i = \begin{bmatrix} c_i & \lambda S_u & \kappa_i & S a c_i \\ s_i & -\lambda_i & -c_i & d_i \\ 0 & \lambda_i & \gamma_i & w_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

值关系，并标定不同的关节角度，采用代数法逆变换喷头运动过程中的坐标变换，在打印机喷头的初始运动坐标以及初始坐标之间，设定一个联合数值关系，并采用 Matlab 编程处理上述处理过程，当编写程序成功输出位姿状态时，通过变换逆变处理过程，实现对打印机喷头的运动控制。综合上述分析处理过程，最终完成对基于色彩模糊理论的 3D 打印机喷头运动控制过程的分析。

2 运动控制测试

2.1 搭建 3D 打印机测试平台

选定型号为 SLA600 SE 的 3D 打印机作为处理对象，打印机的产品参数如表 1 所示。

整理上表内的打印机运行参数，控制测试平台内采用反射式红外距离传感器实时测定喷头的运动距离，并采用型号与基本性能一致的传感器固定在 3D 打印机的轴上，设定红外光束的采样间隔为 500ms，并转化喷头的运动距离转化为电压模拟量。在打印机本体部分样机的分样机的腰部放置在极限位置，控制打印机本体部分样机的分样机的腰部处于极限位置，此时打印机的大臂与打印机的本体部分小臂间呈 50° 夹角，控制 3D 打印机的原点位姿的初始关节角度坐标为 (0°，135°，-115°)，通过执行上位机软件的运动 3000 运行不同的喷射任务，设定打印机的喷头运动区域，喷头运动区域如图 3 所示。

根据上图设定的喷头喷射区域，按照喷射区域的设置的内向偏置，构建喷头运动模糊集矩阵。

2.2 构建喷头运动色彩模糊集矩阵

表 1 3D 打印机运行参数

| 序号 | 参数名称 | 参数详情 |
|----|---------|-----------------------------|
| 1 | 激光类型 | 脉冲、固态激光器 |
| 2 | 波长 | 350.4nm |
| 3 | 涂铺方式 | 自动真空吸附涂铺 |
| 4 | 制作厚度 | 0.05 ~ 0.2mm |
| 5 | 容积 | 203L |
| 6 | 树脂槽加热方式 | 硅胶板电热丝加热 |
| 7 | 工作电源 | 200 ~ 240VAC 50/60Hz 单相 12A |
| 8 | 垂直精度 | ±0.002mm |
| 9 | 定位精度 | ±0.01mm |
| 10 | 操作软件 | JGSLA3D |
| 11 | 光斑 | 直径名义值 0.12 ~ 0.5mm |
| 12 | 扫描速度 | 6 ~ 12m/s |

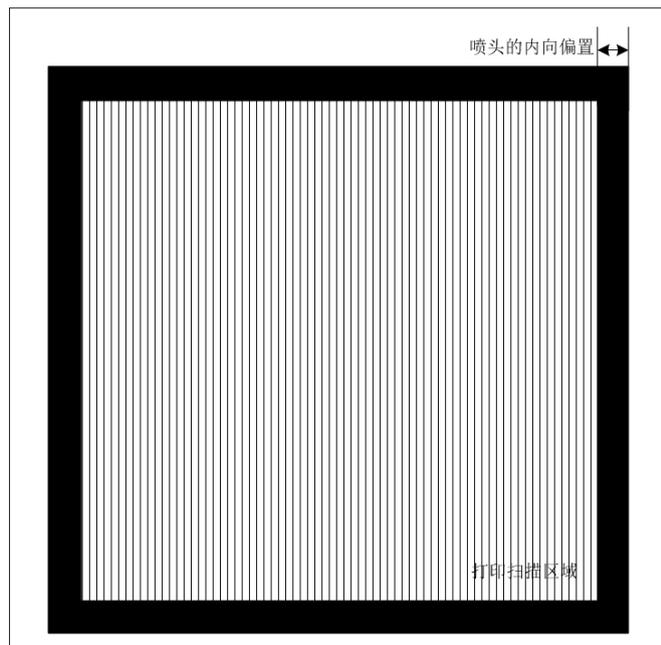


图 3 3D 打印机喷头的喷射区域

参照 3D 打印机喷头在喷射扫描区域中的运动轨迹，以初始姿态点作为数值处理对象，设置色彩模拟生成因子，数值关系可表示为：

$$\varphi(x) = \frac{1 - N(\mu)}{g(l)} \quad (9)$$

上述数值关系中， $\varphi(x)$ 表示设置的色彩模拟生成因子， $N(\mu)$ 表示色彩模糊尺度， $g(l)$ 表示构造增函数。随机选定模拟生成因子的求取系数，并引用 Gamma 函数定义喷头运动形状以及运动位置参数，各部分数值参数数值关系可表示为：

$$f(x) = \frac{(x-\mu)\exp\left(-\frac{x-\mu}{\beta}\right)}{\beta^\gamma} \quad (10)$$

其中， $f(x)$ 表示喷头运行参数形成的 Gamma 函数， μ 表示喷头的位置参数， β 表示喷头喷射尺度参数， γ 表示喷头的喷射形状参数。在上述喷射参数的控制下，控制打印机的喷射喷头与喷射区域配准，形成的配准过程可表示为：

$$I = -\frac{\log p(x)}{I(x,y,z)} \quad (11)$$

其中， I 表示配准参数， $p(x)$ 表示喷射点的配准函数， $I(x,y,z)$ 表示喷射区域的初始喷射点。按照上述喷射处理过程，设定喷头控制的犹豫度，重构喷头喷射的处理区域，形成喷射基本参数的融合过程，数值关系可表示为：

$$I_F(x,y,z) = \begin{cases} I_1(i,j), & \text{index} I \geq \beta \\ I_2(i,j), & \text{index} I < \beta \end{cases} \quad (12)$$

上述数值关系中， $I_F(x,y,z)$ 表示运动姿态的末尾坐标， $I_1(i,j)$ 、 $I_2(i,j)$ 表示不同喷射角度形成的色彩模糊度，其余参数含义不变。根据构建的喷头运动模糊集矩阵，标定打印机喷头的喷射参数，准备基于并联结构的运动控制方法、基于振动特性的运动控制方法以及所设计的运动控制方法参与测试，选定相同的处理指标，对比三种运动控制方法的性能。

2.3 测试结果及分析

控制上述打印机本体机的运行参数为模糊矩阵处理输出的基本参数，并控制打印机本体样机结构先运动到与地面平行的位置，控制打印机小臂到达极限位置，同时保持打印机本体大臂持续向上抬起，保持各部分结构稳定后，采用体积为 2L 的矿泉水模拟打印机的喷射喷头，控制打印机的手臂上升至一定的高度后，停止本体结构各个驱动结构的运动，打印机本体样机的负载能力结果如图 4 所示。

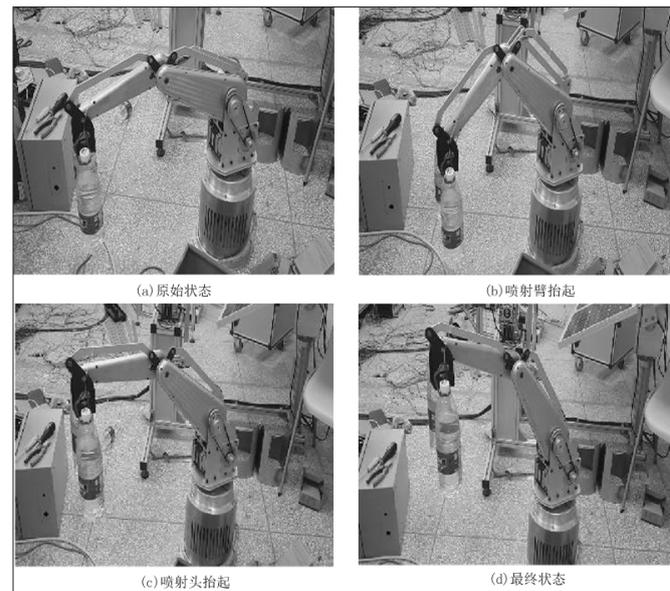


图 4 喷头的运行负载及颜色感知能力

根据喷头的运行负载能力调试结果可知，设计的运动控制过程能够感知到带有颜色封皮的矿泉水瓶，在控制喷头运行时，能够及时感知带有颜色的运动区域，颜色感知能力较强。调试打印机本体样机与喷头为初始位姿态，控制打印机主体按照程序命令运行喷射运动。在回到原点运动过程当中，可知打印机本体样机的喷射头运动到各个方向的极限位置，保持喷射运动过程中各轴向的稳定，并始终保持喷头与地面保持垂直。在三种运动控制方法影响下，定义表示运行负载能力的原始状态作为处理原始状态，整理三种喷头运动控制方

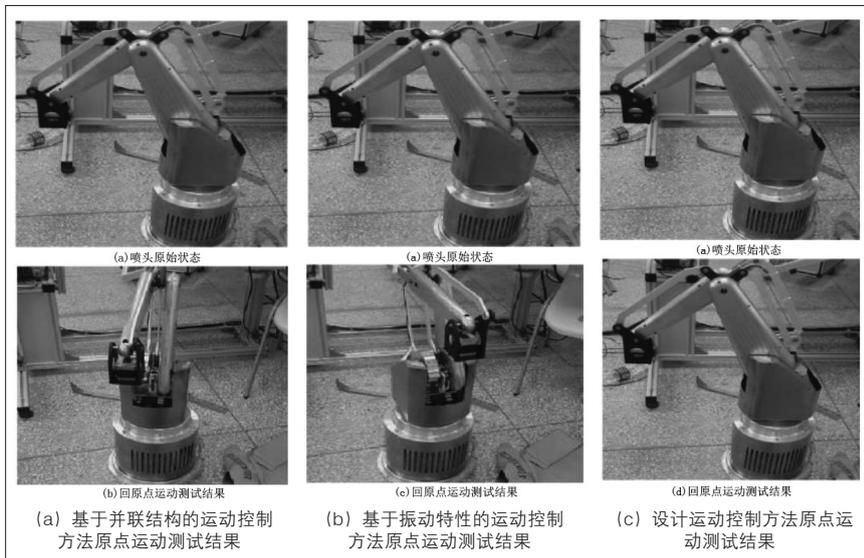


图 5 三种运动控制方法原点运动测试结果

法控制喷头运动回原点的运动测试，测试结果如图 5 所示。

在支持 3D 打印机喷头运动的程序内，运行三种喷头运动控制方法的控制程序，控制打印机喷头从原始运动起点复位至原始起点。根据上图整理得到的复位测试结果，基于并联结构的运动控制方法并未回归到打印机喷头的原始位置，该种运动控制方法的控制效果较差。基于振动特性的运动控制方法控制的喷头回归至原始位置，但最终喷头偏离了设定喷头运行位置，该种喷头运动控制方法的控制能力较强，但测点标定的能力较弱。所设计的喷头运动控制方法能够控制喷头运动至设定的原始状态，与两种参与测试的喷头运动控制方法相比，所设计的运动控制方法控制效果最佳。

(上接第 66 页)

取消了光杆及盘根装置，有效杜绝了因盘根盒漏油和光杆断喷油等等隐患，极大的清洁了井口环境，由于取消了地面机械传动装置，正常生产过程中低噪音、无污染，极大提升了作业过程的环保效率。

(3) 改进后的井下泵效率显著提升：根据地面工作控制的输出频率，可完成油井泵的低冲程生产，选用无杆提升方式，无杆加长，加载的速率会更快，泵效率更高。

(4) 综合生产过程的节能环保效果显著：消除了升降杆立柱和冲程损坏造成的故障能耗，启动电流仅为额定电压的 110% ~ 150%，解决了为实现运行必须引起的“大马拉小车”难题。低产液井（5 吨以下）能耗较基础抽油泵能耗均值有效降低 30% 以上，中低产液井（5 ~ 10 吨）能耗降低 25% 以上。

(5) 彻底规避了偏磨断脱现象：由于选用了无杆举升方式，取消了传统的井下抽油杆，无杆举升更适合定向井、气井等独特的井眼运动轨迹的日常生产，从源头上彻底解决了油井偏磨、抽油杆疲劳开裂等问题。潜油柱塞泵系统举升工艺技术在试验的 NB35-3-B01 井、QK18-1-5D 井均取得了较好的实用效果，基本具备了现场大规模使用的标准，可以大规模进

3 结语

综合 3D 打印机喷头的功能与性质，以色彩模糊理论作为算法支持，设计 3D 打印机喷头运动控制过程。通过设定原点复位测试，在相同的测试平台内，测试得到运动控制过程的性能。结合测试结果可知，设计的喷头运动控制过程能够有效控制喷头运动。在未来运动控制工作中，希望所设计的喷头运动控制方法能够为研究工作提供支持。

参考文献：

[1] 马玉琼,王铁成,郑红伟,等.FDM 多喷头 3D 打印机结构设计及运动研究[J]. 机床与液压,2019,47(08):29-32.
 [2] 裴未迟,张雪静,纪宏超,等.3D 打印机喷头及工作台振动响应特性分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(11):4330-4337.

[3] 张俊,池长城,汤腾飞,等.五自由度混联 3D 打印机设计与运动学分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(10):2822-2833.

[4] 高阳,方成刚,蒋贤辉.水泥 3D 打印喷头中浆体的流动分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(03):420-426.

[5] 欧攀,刘泽阳,高汉麟,等.基于柔性材料的双喷头 3D 打印技术研究[J]. 工具技术,2019,53(05):24-28.

基金项目：本文系山东工程职业技术大学校内基金项目“基于三维软件熔融成型工艺参数影响快速原型产品质量表面研究”研究成果，(课题编号:kw2201904)。

作者简介：李海霞(1982.11-)，女，汉族，山东济宁人，硕士研究生，副教授，研究方向：快速制造。

行推广应用。

参考文献：

[1] 钱坤,胡文瑞,孙延安,等.电潜往复泵举升工艺优化研究与应用[J]. 油气藏评价与开发,2019,9(01):56-60.

[2] 黄晓东,姚满仓,雷德荣,等.投捞式电动潜油往复泵研制及现场试验[J]. 钻采工艺,2018,041(002):82-84.

[3] 那志强.井下电潜式往复泵举升系统的井筒温度场分布研究[J]. 内蒙古石油化工,2011(14):133-135.

[4] 赵磊,杨学云,曲占庆,等.井下电潜式往复泵举升系统设计[J]. 石油矿场机械,2008,37(002):37-39.

[5] 雷德荣,姚满仓.国内首次可投捞式电动潜油往复泵深抽技术成功应用[J]. 新疆石油科技,2016,03(v.26;No.100):6-6.

[6] 于德亮,齐维贵,邓盛川,等.基于支持向量机沉没度预测的潜油泵冲次优化研究[J]. 中国电机工程学报,31(27):7.

[7] 汪方式,杨松,葛静涛.电动潜油往复泵在中低产液量煤层气 L 型井的应用探讨[J]. 石化技术,27(12):3.

作者简介：郭太勤(1965.12-)，男，汉族，四川人，大专，工程师，研究方向：电潜泵新型技术。