

电潜泵基本特性概述

B. L. Wilson
Oil Dynamics Inc.,

宋福印 译
贾映萱 校

摘 要

本文面向负责为已知油井条件选择合适电潜泵的现场工程师。文中把对电潜泵提出的一些要求作了图示,并表明了泵的主要设计参数是如何影响泵的工作特性的。通过了解选泵的基本概念,工程师还可以了解并预测油井条件变化时泵特性的变化。为了使泵接近于最优工况,本文还将对改变已安装电潜泵工作特性的方法进行讨论,并将根据这些技术对泵的影响评价这些方法。

一、引 言

在电潜泵的应用中,对泵的要求由两个变量确定——原油入井流动特性及油管 and 地面设备的流动特性。为了确定泵在所受负荷下的特性曲线,必须考虑以下四项主要特性参数:单级设计、级数、工作转速和所泵液体的特性。熟悉这些因素对于选择泵组并使之在最佳效率下工作是十分重要的,而且还将有助于在油井条件变化时评选其它替代泵。

为了了解对泵组所提出的要求,使用电潜泵系统的图示方法,对泵的负载进行直观表达将会有所裨益。

泵组工作在两条曲线之间,即原油入井流动特性曲线及油管 and 地面设备的流动特性曲线(图1)。

原油入井流动特性用一条以产量为x轴,井底压力为y轴的曲线表达。该曲线表示产量随井底压力的变化而增减的情况。在把斜率定义为采油指数的情况下,该曲线可以是一条直线。或者,它也可以是根据油井的实际试井数据得出的一条曲线,也可以是如Vogel所提出的那种表达方式⁽¹⁾。

油管 and 地面设备的流动特性曲线表示使液体流出油管并通过地面设备所需的压力。这一曲线可以由地面要求的条件与油管内的举升和摩擦损失相结合而绘出,也可以与一个垂向流相关曲线相结合而绘出⁽²⁾。

如果以上这两条曲线恰好在所希望的产量上相交,则油井将在此产量下自喷,而不需要使用抽油泵;反之,这两条曲线之间的差值即为泵的负载。

二、机 械 设 计

机械设计(physical design)参数是指泵的每级结构。每一种机械设计都被作为一种模

型或型式，并用一个数字代表，此数字为其处于最佳效率点（BEP）时的排量。

为了帮助工程师选泵以满足泵负载的要求，泵的制造厂出版了泵级特性曲线（图2）。这些曲线表示某一具体机械设计模型的典型特性。图中包括了三个不同的参数，它们都是产量的函数：泵级将产生的举升（压头，米）、操作泵所需要的输入轴功率以及定义为输出水马力比输入轴功率的效率。图中也包括了转速、级数以及试泵液体。

泵不能在其特性曲线上的任意一点满意地工作。制造厂印有每种泵型的工作范围。泵型设计使其工作范围有所重叠，以便使泵制造厂对于一定的套管尺寸可具有几种泵型以满足实际生产的需要。图3是为某一套管直径所设计的泵系列中一些泵的压头—排量曲线。

三、级 数

电潜泵是多级的，在某些情况下甚至达到几百级。除了高粘度液体或有大量自由气进入泵内这些情况之外，认为泵的各级均在其特性曲线上的同一点工作。这样，泵产生的总压头以及所需要的总输入马力则成为其级数的倍数。

$$\text{总压头} = \text{压头/每级} \times \text{级数} \quad (1)$$

$$\text{所需总马力} = \text{马力/每级} \times \text{级数} \quad (2)$$

图4表示级数对于泵的压头—排量曲线的影响。

四、工 作 转 速

泵的工作转速取决于电动机的电特性以及驱动电动机的电源频率。对于受载适当的电动机而言，其转速直接与驱动频率成函数关系。在频率60赫兹下以3,500转/分工作的电动机，其在50赫兹下的工作转速为：

$$50/60 \times (3500) = 2917 \text{ 转/分} \quad (3)$$

转速对泵的影响受下列三个密切相关的定律支配：

- (1) 排量是转速的直接函数；
- (2) 压头是转速平方的函数；
- (3) 所需输入功率是转速三次方的函数。

制造出的大多数泵都是用60赫兹电源进行原始试验的（3,500转/分）。在任何其它驱动频率下，凭借相关定律就有可能得到精确的特性曲线。对于需要一定功率在给定排量下产生给定压头的单泵级而言，其在50赫兹（2,916转/分）下的相关点应为：

$$\text{排量}_{50} = \left(\frac{50 \text{ 赫兹}}{60 \text{ 赫兹}} \right) \times \text{排量}_{60} \quad (4)$$

$$\text{压头}_{50} = \left(\frac{50 \text{ 赫兹}}{60 \text{ 赫兹}} \right)^2 \times \text{压头}_{60} \quad (5)$$

$$\text{输入功率}_{50} = \left(\frac{50 \text{ 赫兹}}{60 \text{ 赫兹}} \right)^3 \times \text{输入功率}_{60} \quad (6)$$

应用这些相关定律，可以从60赫兹原始数据中得出50赫兹的工作曲线。图5表示一个泵级的变速特性曲线。图中绘出了几种驱动频率时的压头—排量曲线。为了清楚起见，图中

只给出了一个驱动频率的效率曲线和输入马力曲线。

五、流 体 特 性

流体特性可影响泵的性能。绘制泵的输出曲线时使用压头而不使用压力，是因为不管流体的密度如何，泵均要产生相同的压头。但对于输入功率却并非如此，输入功率是流体密度的函数：

$$\text{输入功率}_{(\text{流体})} = \frac{\text{密度}_{(\text{流体})}}{\text{密度}_{(\text{水})}} \times \text{输入功率}_{(\text{水})} \quad (7)$$

对于不同密度的液体，泵的特性曲线如图 6 所示。

对于流体的粘度也必须予以考虑，因为粘度的影响是必然存在的。为了帮助合理选泵，制造厂提供有各型泵级的粘度修正系数。粘度修正系数意在表示曲线上最佳效率点的移动以及所需输入功率的变化。图 7 为从粘度修正系数得到的近似粘度曲线^[3]。

原油开采几乎总是有一定数量的伴生天然气。在泵的吸入口，流体内的自由气会降低泵的工作性能。自由气的存在，降低了流体的毛体积密度，减少了一个泵级能将轴功率转变成水马力的数值。当液气混物流经泵时，压力增高，使气体回溶到液体内。流体的毛体积随着气体的被溶入而减少。流体毛体积的这种变化意味着，在泵的较下一端的每一级气体都受到压缩，因而每一级都是在特性曲线的不同点上工作的。

一项保守的估计是：在发现主要性能降低以前，泵可以在其吸入口吸收占流体总体积 10% 的自由气体。在含有更多气体的情况下，制造厂可以提供气体分离装置，分离出混入流体中的部分气体^[4]。

六、泵 的 选 择

在泵特性的四个参数中（机械设计、级数、工作转速、流体特性），工程师通常必须考虑的变量只是泵级的类型和级数。

合理选泵所需的全部必要数据均包括在三条曲线内——原油入井流动特性曲线、油管 and 地面设备的流动特性曲线以及泵的特性曲线。为了进行图解说明，必须把其中两条曲线加以组合并把它表达在第三条曲线上。把原油入井流动特性曲线同泵的特性曲线叠加，然后把它们绘制到油管和地面设备的流动特性曲线上，这样得到的曲线的价值有限。把入井流动特性曲线同油管和地面设备的流动特性曲线叠加，然后绘制到泵特性曲线上，这样可以表明泵的工作情况，但对于所研究的每一种不同尺寸的泵型要分别制图。

最广泛采用的方法是把油管和地面设备的流动特性曲线同泵的特性曲线叠加，然后绘制到入井流动特性曲线上。这样可以把许多不同的泵表达在一张图上，并可以指出油井条件变化时整个系统的工作情况。

图 8 表示原油入井流动特性曲线以及为特定套管尺寸选出的四个候选泵型的有效工作范围。有效工作范围取自泵的特性曲线或制造厂的产品目录数据。可依据对比油井的计划产量和泵的工作范围选择泵型。如果计划产量在两台泵工作范围的重叠区域内，则必须作出应该使用哪台泵的决定。采用的一种方法是选择效率最佳流量较小的泵型。这是以这种泵将产生

较小的内部推力并因而具有较长的工作寿命的假设为基础的。需要注意的是，所选择的工作范围应使泵在该范围内具有足够长的寿命。其它因素，例如泵组的费用和工作效率，也应予以评审。

在泵型选定之后，必须确定所需的级数。图9为一口井的入井流动特性曲线以及代表4台泵的4条曲线。泵曲线是由油管 and 地面设备的特性曲线与所选泵型的特性曲线综合而成的，每台泵都具有各自不同的级数。级数应根据制造厂可以提供的泵的尺寸进行选择。泵曲线位于泵的最小和最大推荐排量之间。根据这一点，以及根据油井的计划产量，即可选出合适的泵。

这种方法还有另一个优点，即可以显示油井条件变化时系统的工作特性。图10表示一口油井的原始设计，另有一条曲线表明产量的下降。根据这条曲线，可以找出系统对于新的入井流动特性的反应，并且如果有必要重新选择泵的尺寸，可据此确定修正措施。

七、改变已安装泵的工作特性

如果泵组的初始选择不正确或者油井条件发生了变化，立即对泵系统进行重新选择并不总是可行的。有几项技术可以用来改变已安装泵的工作特性。它们是：改变地面压力、改变泵速或使泵周期生产。其中每一种方法均可以采用与本文前面所用的大致相同的图解形式加以表达。这种图解法可以直观表达对整个泵系统的影响。

八、地 面 压 力

地面设备所必需的压力是油管流动条件的一个组成部分。如果地面压力可以改变，则泵的总特性曲线和油管特性曲线也将发生移动。图11表示油井的原始入井流动特性曲线以及为该井绘制的泵和油管的特性曲线。图中还包括第二条表示产量下降的入井流动特性曲线，以及第二条泵和油管的特性曲线，这条泵和油管的特性曲线是为了保持泵的正常 work 而提高地面压力后，由第一条曲线得出的。增加地面压力，使泵和油管的特性曲线上移，在这种情况下，允许泵继续工作，但产量下降；相反，如果降低地面压力，会使泵和油管的特性曲线下移，并可在油井的入井流动特性所限定的范围内增加产量。这种方法的主要缺点之一，是并不总是能够随意地改变地面的压力条件。改变地面条件会改变泵的负载，但并不能改变泵本身的能力。这种方法的危险在于迫使泵超出其能力范围工作。改变地面压力，不能改变泵的最大和最小工作范围。泵必须保持在此范围内工作。

九、改 变 泵 速

只有改变电源频率才能实现泵速的改变。这在泵组由一台发电机供电或使用变速驱动装置的情况下是可能的。图12为一原始入井流动特性曲线及最初使用的50赫兹电源驱动的泵和油管的特性曲线。第二条入井流动特性曲线表示产量的降低。图12中还包括40赫兹和60赫兹时泵及油管的特性曲线。曲线表明，如果有可能调节泵速，则可以改变泵的工作特性以适应油井条件。改变泵速会改变泵的排量、有效工作范围以及泵所需要的输入功率。泵在不同频

率下工作时，其工作特性和所需功率由相关定律确定。当转速增加时，所需输入功率亦增加，并与转速的三次方成函数关系。电动机的输出功率直接随转速增加。当频率变低时，电动机的输出功率与泵所需要的输入功率之间的差值趋向于使电动机欠载，而当频率高于原始的设计频率时，又趋向于使电动机过载。因为大多数电潜泵装置都没有发电机组和变速驱动装置，所以，用改变频率来改变系统工作特性的方法可能是行不通的。

十、使泵周期（间歇）生产

使泵组周期生产可改变系统的工作特性。图13是根据液面和流量与时间的对应关系所确定的一口井的周期生产情况。在进行周期生产过程中，泵的产液量高于地层供油量，液面下降直至最低点。此时停泵，随着地层产液进入套管的环形空间而使液面回升。在液面上升到最高点后，泵再启动并重新生产。可以用液面传感器或时间继电器控制周期生产。

当泵的尺寸过大时，周期生产是一种自然现象。当流入井内的油流减少或泵的尺寸选错时，液面会下降直至泵丧失所需的吸入压力。发电机控制箱内的欠载保护器感受到这一现象后，关闭泵组，接通自动再启动时间继电器。在时间继电器的调定时间到达后，泵组被启动并重新生产。

分析周期生产的电潜泵系统并不那么简单^[5]。它包括假设一个拟稳态入井流动特性曲线。图14意在表明泵的周期生产，采用的形式与前面的图形大致相同。代表自动再启动时间继电器的几个调定值的曲线被绘制在假定的入井流动特性曲线上。时间继电器曲线是通过求解入井流动特性、泵的特性以及油管 and 地面设备的流动特性的组合方程而得出的。图14中的第二套曲线用于把时间继电器的调定值转变成每天周期生产次数。这一套曲线是为一台特定的泵而作的。改变任何参数都需要从初始开始重作分析。入井流动特性曲线和时间继电器曲线的交点所代表的流量是系统的日平均产量。通过泵的实际流量随时间而变，且必须对之进行校核以确保泵组仍然在有效工作区内运行。地层的流量也是随时间而变的。地层对于此随时间而变的流量的反应可能会使假设的入井流动曲线失效。

每天周期生产次数作为系统疲劳的指示参数是很有用的。反复地再启动会造成不利影响^[6]，影响的大小与本文并未包括的许多因素有关。除了每天周期生产次数外，其中的某些因素是电缆的电压降、主电力系统的电压偏低、泵的惯性以及泵组的设计安全系数等。

十一、结 束 语

本文试图对电潜泵工作特性的基础作一概述。了解这些原理对于工程师合理选泵将会有指导意义。文中有意避免了严密的逐步的数学运算过程。这些数学运算过程可以在其它出版物中找到^[2,7]。本文也没有包括电动机、电缆以及有关地面设备的选择。

参 考 文 献

1. Vogel, J.V.: "Inflow Performance Relationship for Solution Gas Drive Wells," J. Pet. Tech. (Jan. 1968) 83-93.
2. Brown, K.E., et al.: The Technology of Artificial Lift Methods, Penwell Publishing Co., Tulsa, Ok (1977).
3. Hydraulics Institutes Standards for Centrifugal, Rotary and Reciprocating Pumps, 14th ed. (1983), Hydraulic Institute, Cleveland, Oh.
4. Lea, J.F. and Bearden, J.L.: "Effects of Gaseous Fluids on Submersible Pump Performance," SPE Paper 9218 was presented at 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Dallas, Tx, Sept. 21-24, 1980.
5. Wilson, B.L.: "Evaluating Cycling of Electrical Submersible Pumps," presented at SPE Gulf Coast Section 2nd Annual ESP Roundtable, Houston, Tx, April 5, 1984.
6. Neely, A.B. and Patterson, M.M.: "Soft Start of Submersible Pumped Oil Wells," paper SPE 11042 presented at the 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, New Orleans, La, Sept. 26-29, 1982.
7. "Sizing and Selection of Electrical Submersible Pumps", API RP11u. First Ed. June 20, 1984, American Petroleum Institute, Dallas, Tx
8. Alcock, D.N.: "Application of Variable Frequency Drives to Deep Well Submersible Pumps," Petroleum Engineer International (March, 1980).

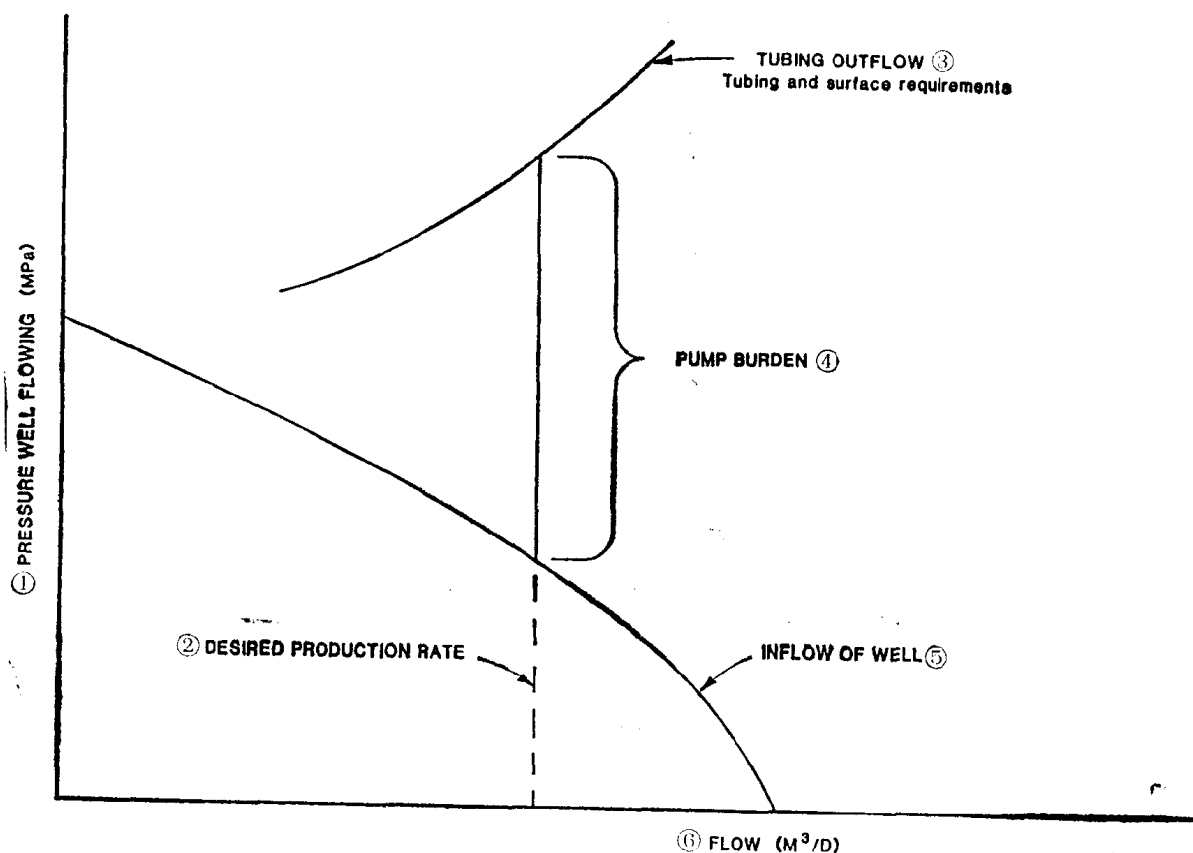


图 1 泵的负载

①油井的流动压力，兆帕；②希望的产量；③油管流量，油管和地面设备的流动特性曲线；④泵负载；⑤油井的原油流入量；⑥产量，米³/天

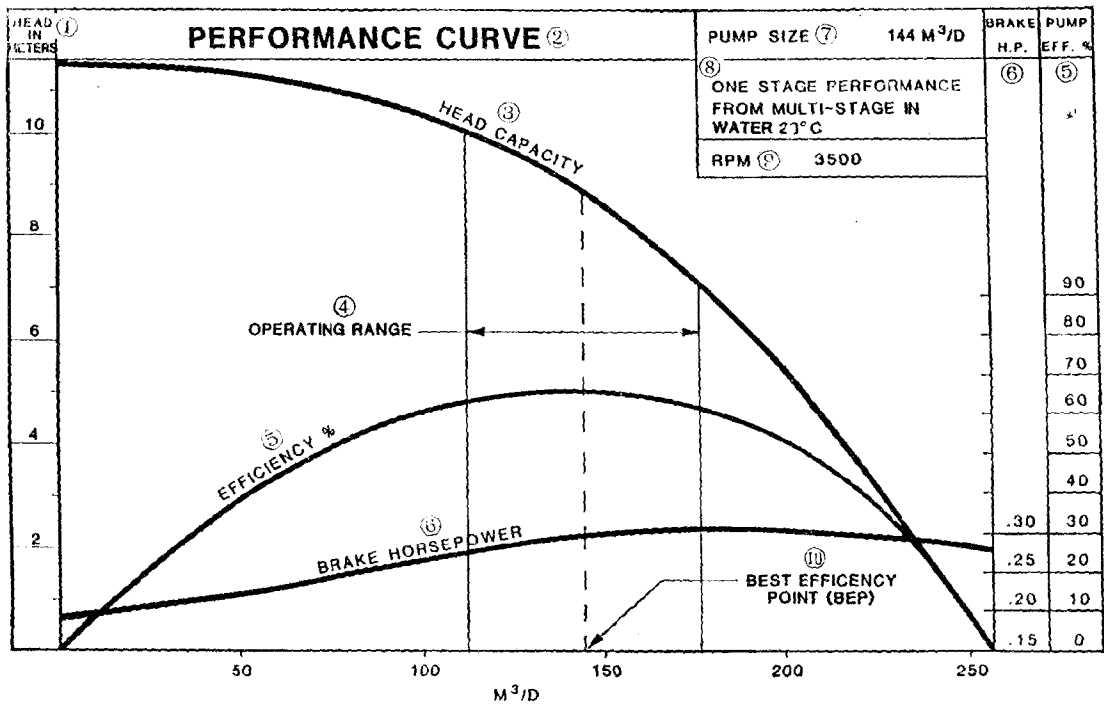


图 2 泵的特性曲线

①压头，米；②特性曲线；③压头—排量；④工作范围；⑤效率；⑥制动马力；⑦泵规格；⑧在水温 20°C 时从多级中得到的单级特性；⑨转/分；⑩最佳效率点

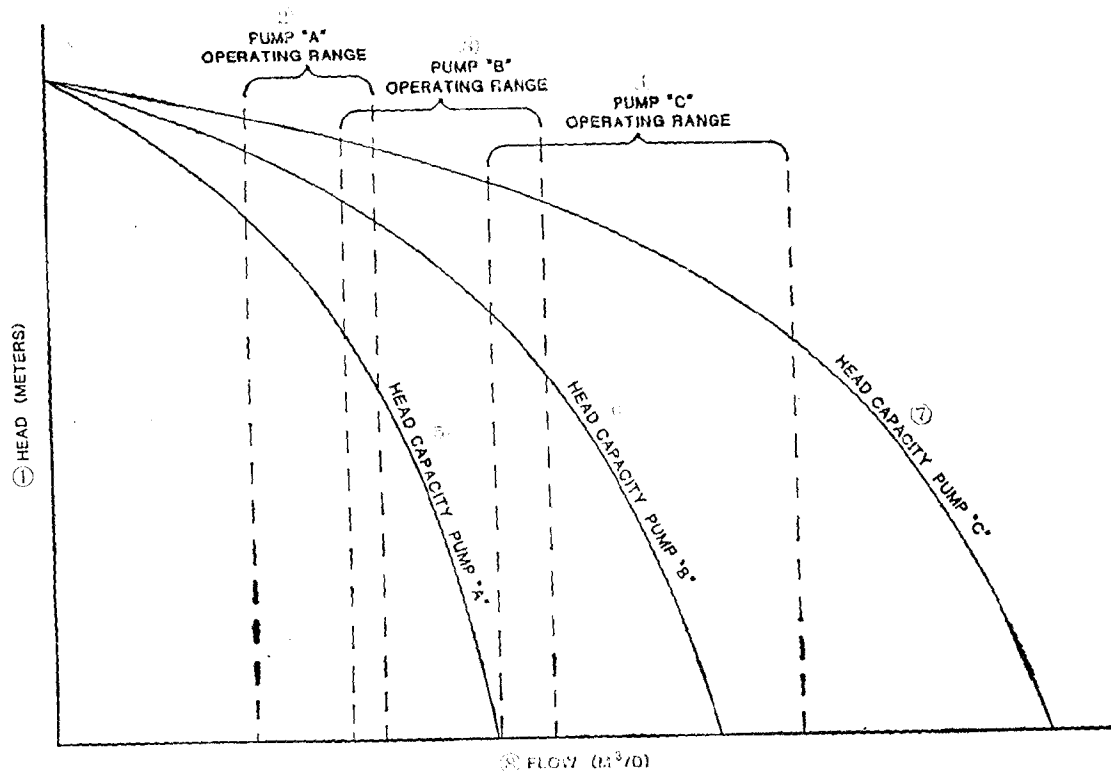


图 3 某一泵系列的特性和范围

①压头，米；②“A”泵工作范围；③“B”泵工作范围；④“C”泵工作范围；⑤“A”泵压头—排量曲线；⑥“B”泵压头—排量曲线；⑦“C”泵压头—排量曲线；⑧产量，米³/天

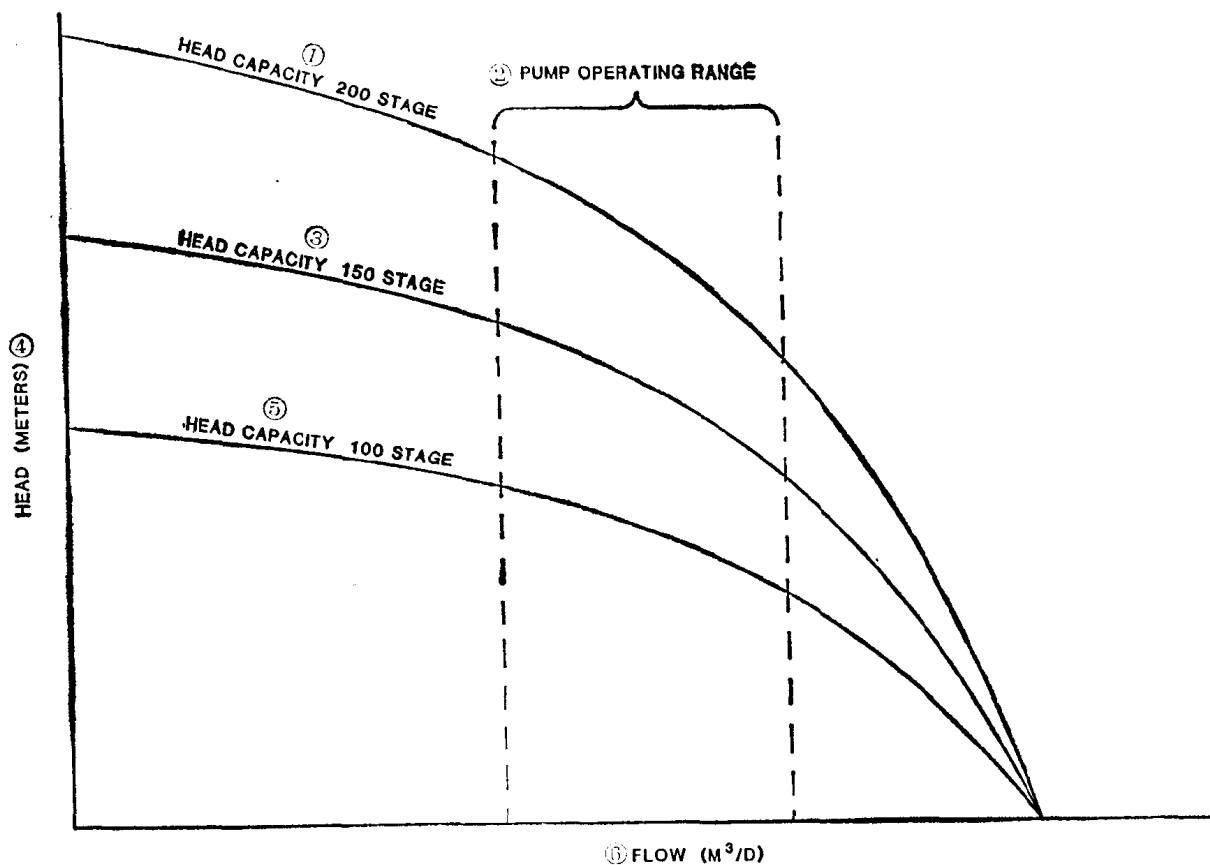


图 4 几种不同级数的泵的特性曲线

①压头—排量, 200级; ②泵的工作范围; ③压头—排量, 150级; ④压头, 米; ⑤压头—排量, 100级;
⑥产量, 米³/天

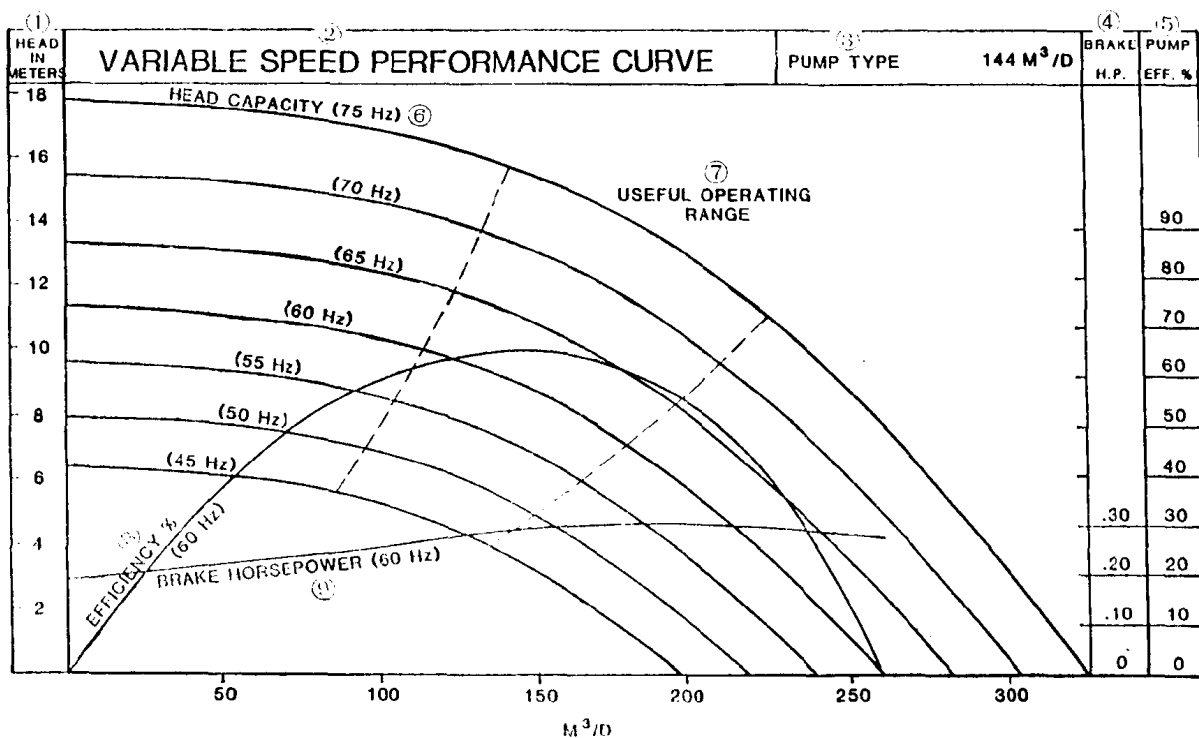


图 5 不同转速下泵的特性

①压头, 米; ②变速特性曲线; ③泵型; ④制动马力; ⑤泵效; ⑥压头排量(75赫兹); ⑦有效工作范围;
⑧效率; ⑨制动马力(60赫兹)

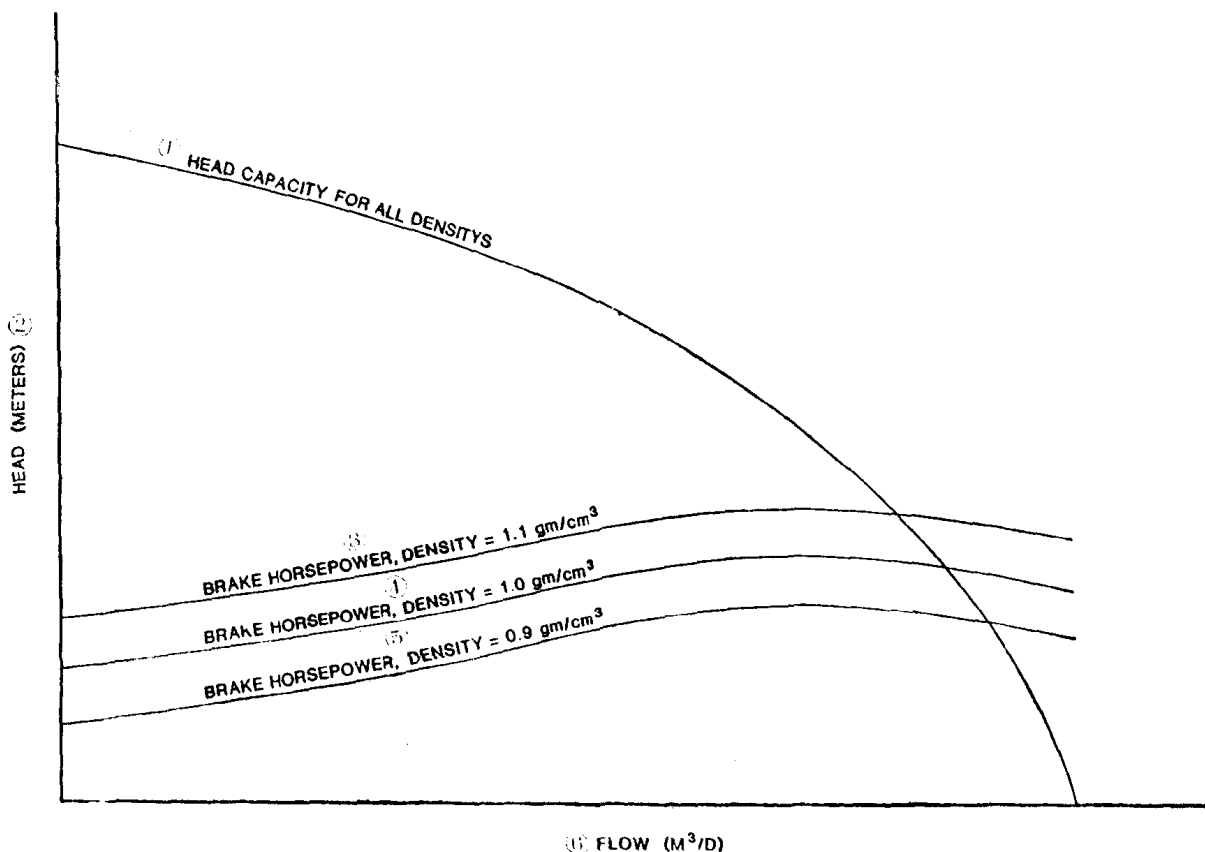


图 6 不同液体密度下泵的特性

①各种密度下的压头—排量；②压头，米；③制动马力，密度=1.1克/厘米³；④制动马力，密度=1.0克/厘米³；
⑤制动马力，密度=0.9克/厘米³；⑥产量，米³/天

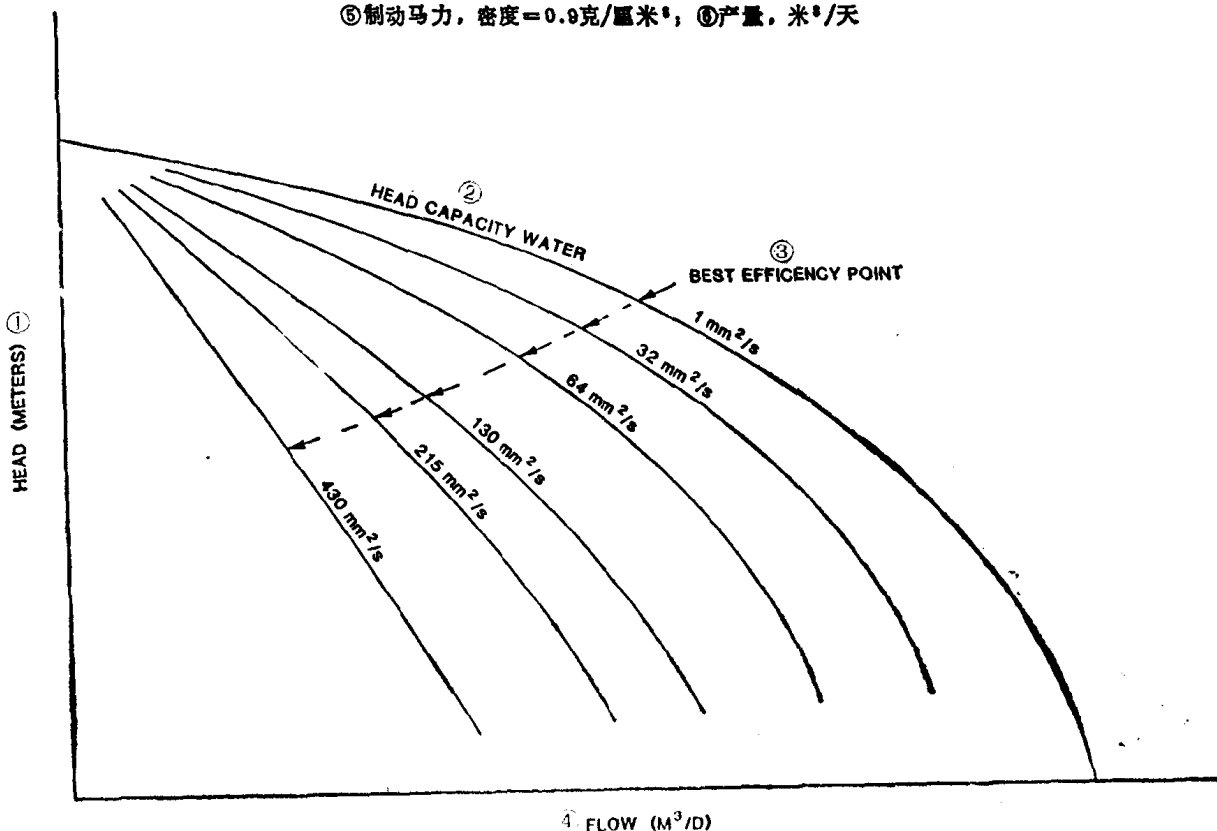


图 7 不同粘度下泵的特性

①压头，米；②压头—排量(水)；③最佳效率点；④产量，米³/天

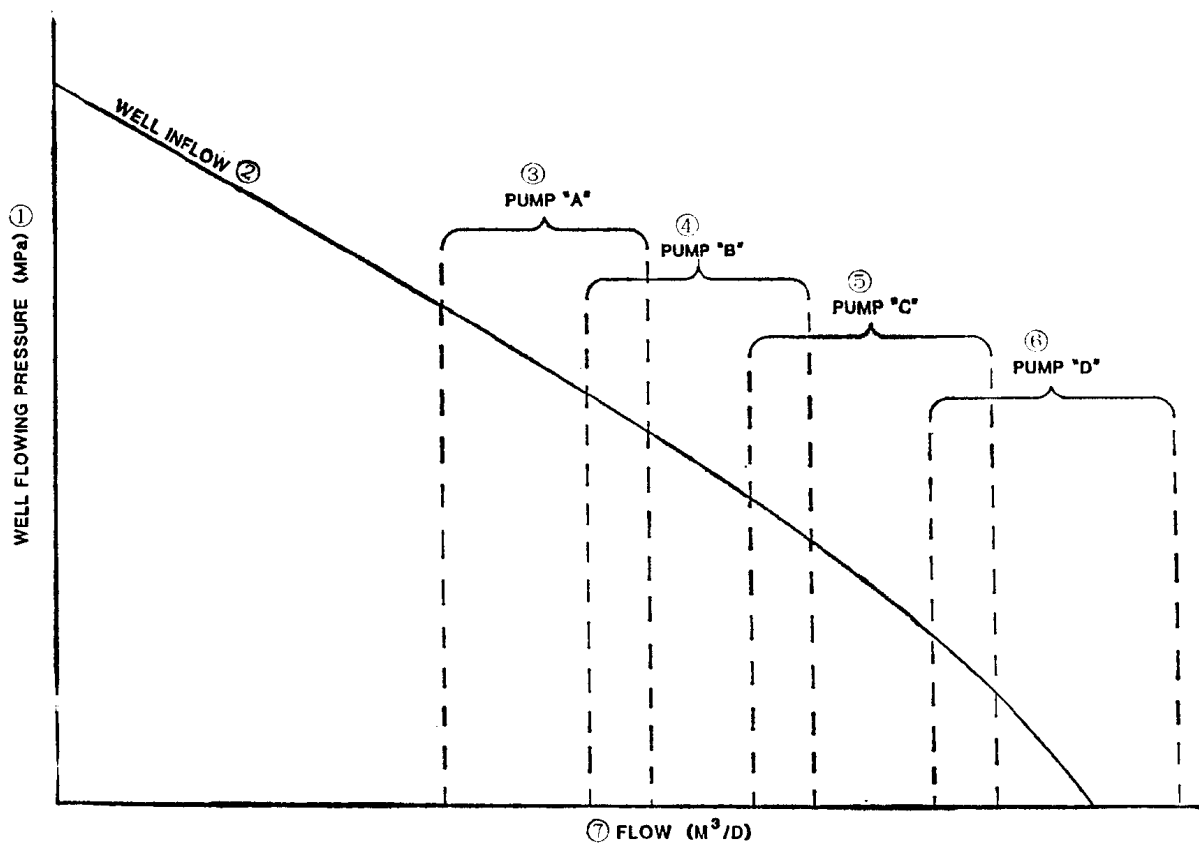


图 8 入井流动特性曲线及候选泵型

①井底流动压力,兆帕; ②入井流动特性曲线; ③泵“A”; ④泵“B”; ⑤泵“C”;
⑥泵“D”; ⑦产量,米³/天

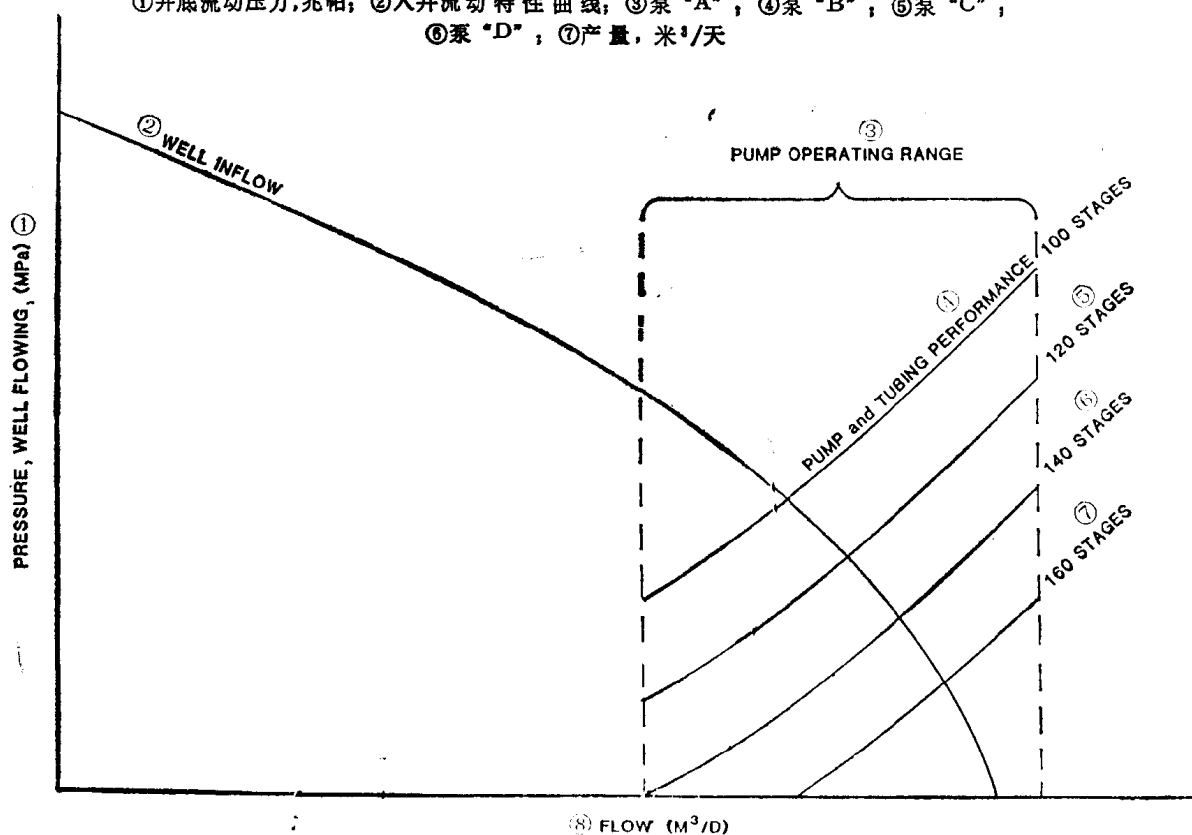


图 9 级数对系统特性的影响

①井底流动压力,兆帕; ②入井流动特性曲线; ③泵的工作范围; ④泵和油管的特性曲线, 100 级; ⑤120 级;
⑥140 级; ⑦160 级; ⑧产量,米³/天

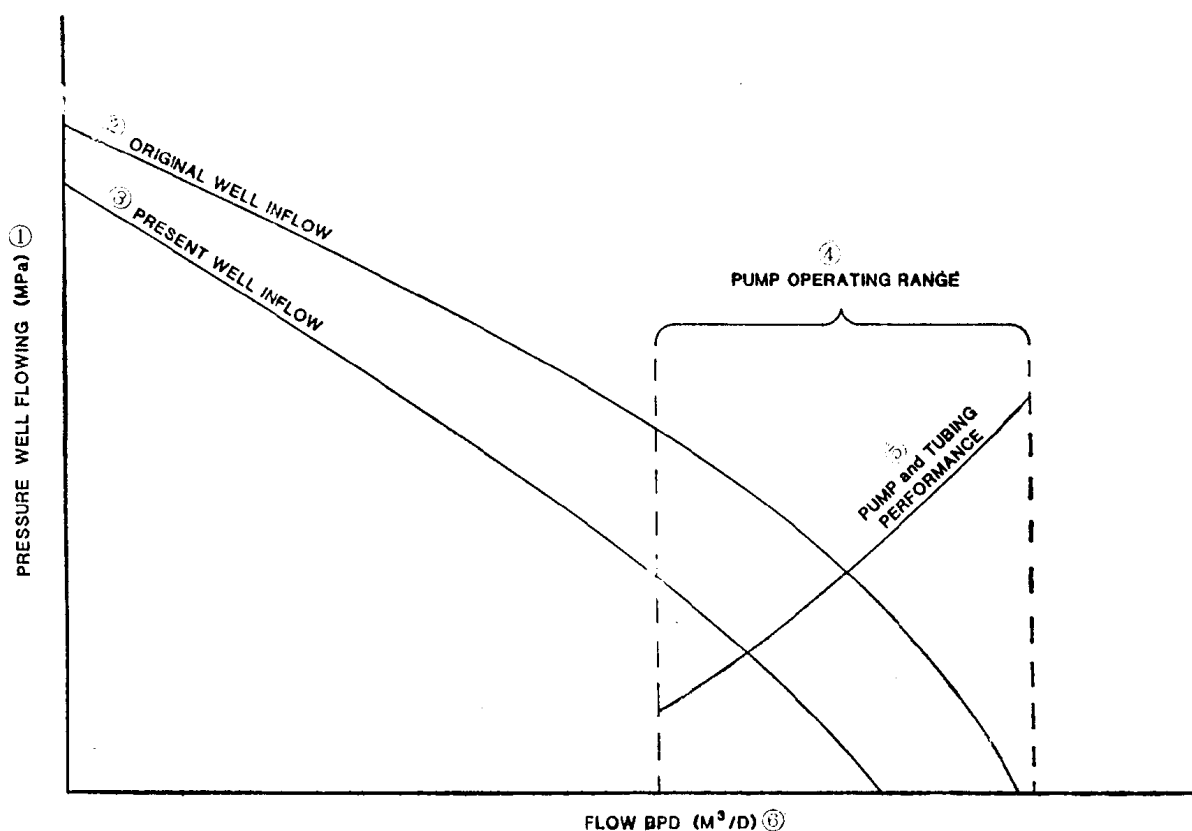


图 10 系统的特性及原油流入量的降低

①井底流动压力，兆帕；②原始的原油入井流动特性曲线；③现在的原油入井流动特性曲线；④泵的工作范围；
⑤泵和油管的特性；⑥产量，桶/天(米³/天)

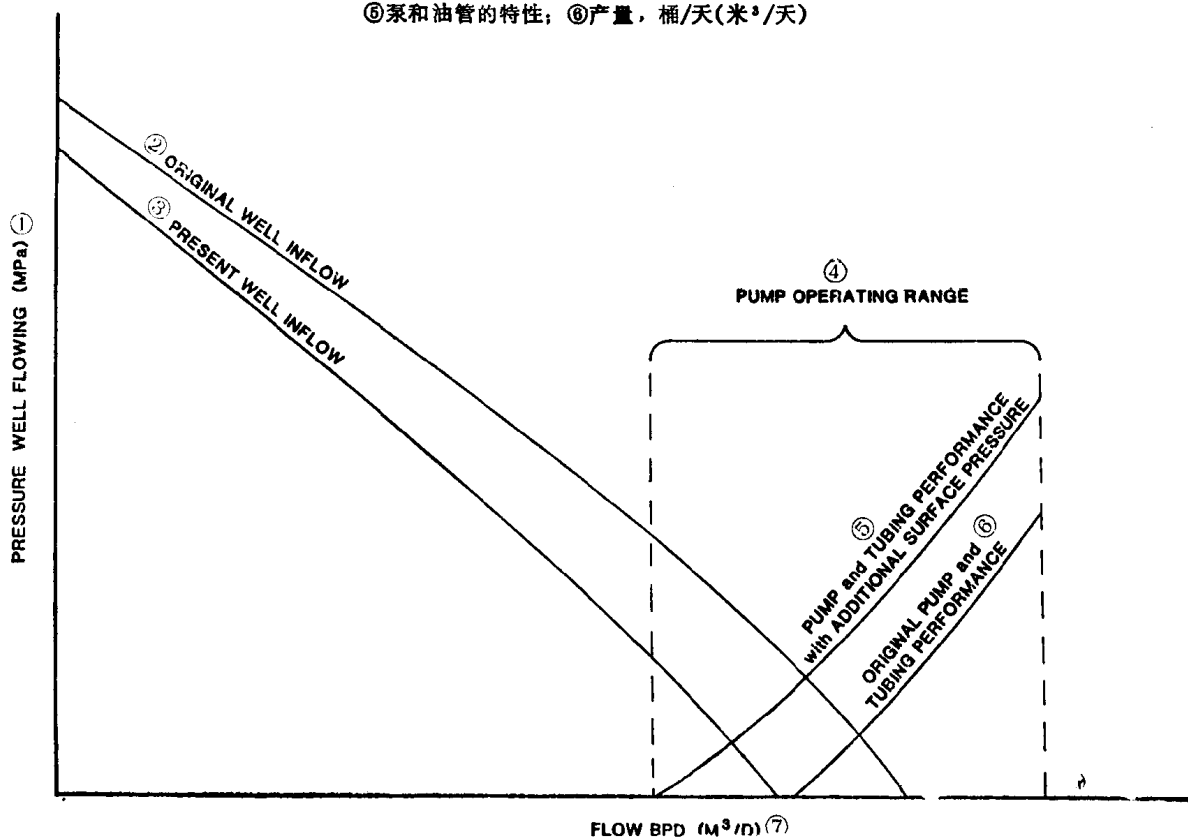


图 11 改变地面压力对系统的影响

①井底流动压力，兆帕；②油井的原始入井流动特性曲线；③油井现在的入井流动特性曲线；④泵的工作范围；
⑤增加地面压力时泵和油管的特性曲线；⑥原来的泵和油管的特性曲线；⑦产量，桶/天(米³/天)

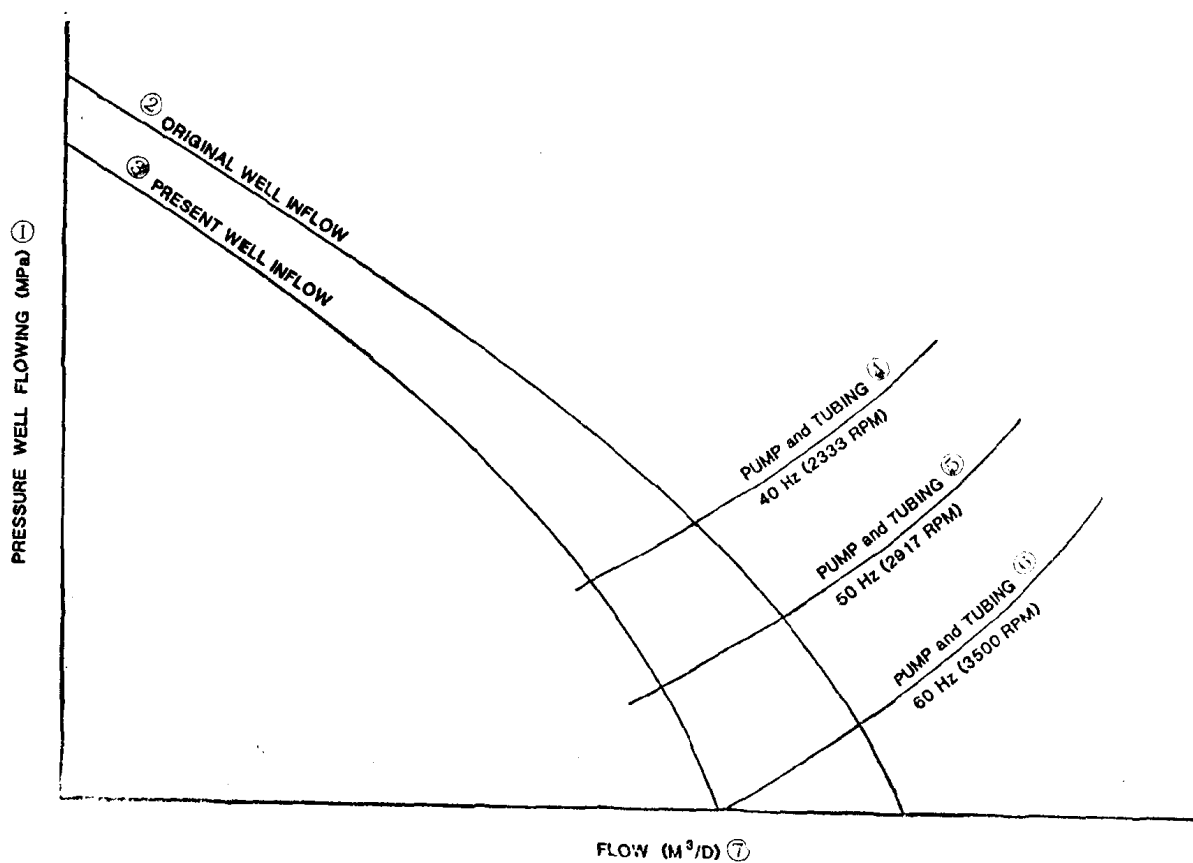


图 12 改变泵速对系统的影响

①井底流动压力，兆帕；②原始的入井流动特性曲线；③现在的入井流动特性曲线；④泵和油管，40赫兹(2,333转/分)；⑤泵和油管，50赫兹(2,917转/分)；⑥泵和油管，60赫兹(3,500转/分)；⑦产量，米³/天

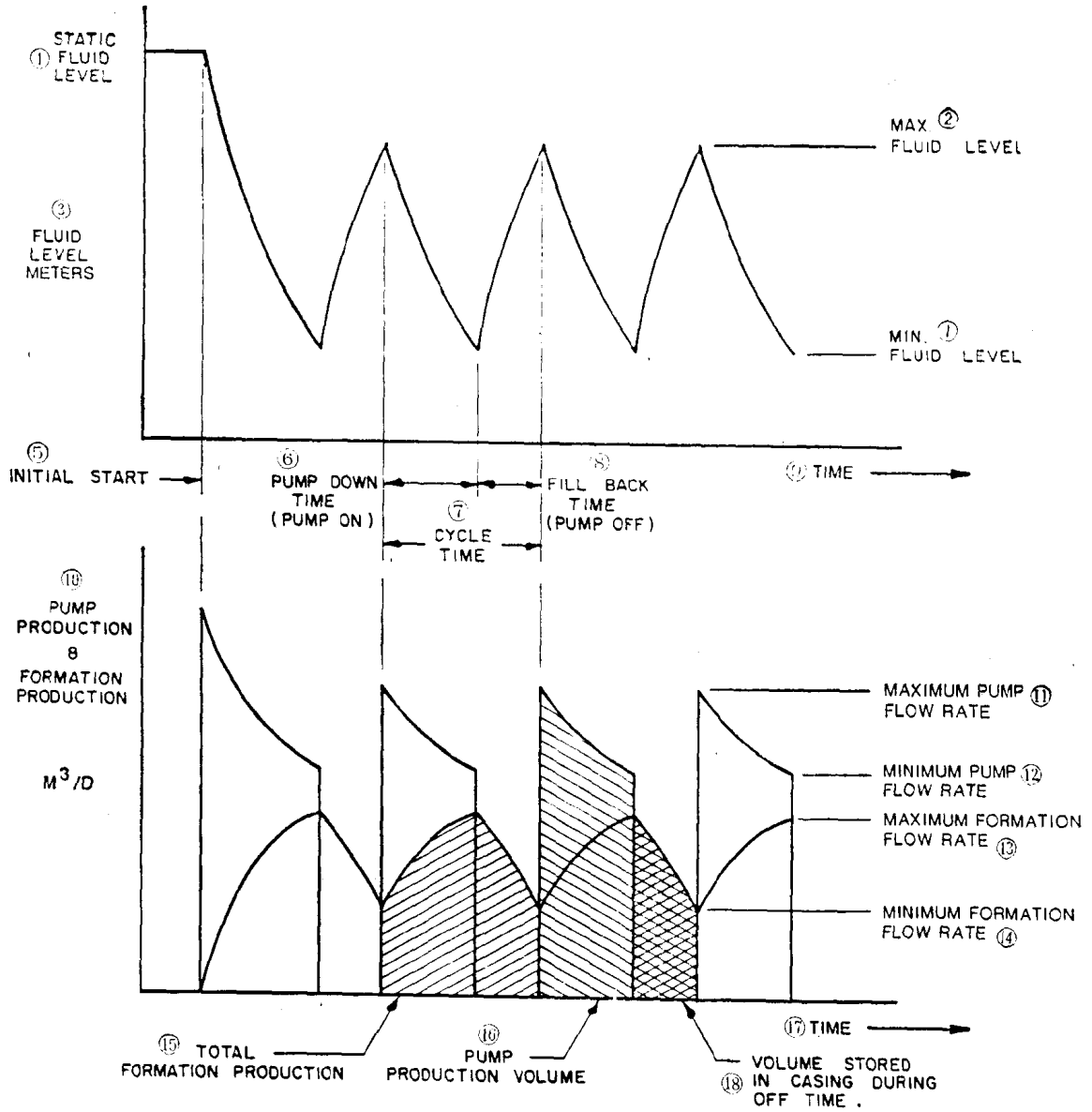


图 13 周期生产

①静液面；②最高液面；③液面，米；④最低液面；⑤初始开泵；⑥泵液及液面下降时间(泵运转)；⑦周期时间；⑧液面恢复时间(泵停止运转)；⑨时间；⑩泵的产量和地层产量，米³/天；⑪泵的最大产量；⑫泵的最小产量；⑬地层的最大产量；⑭地层的最小产量；⑮地层的总产量；⑯泵生产的体积；⑰时间；⑱停泵期间储存在套管内的体积

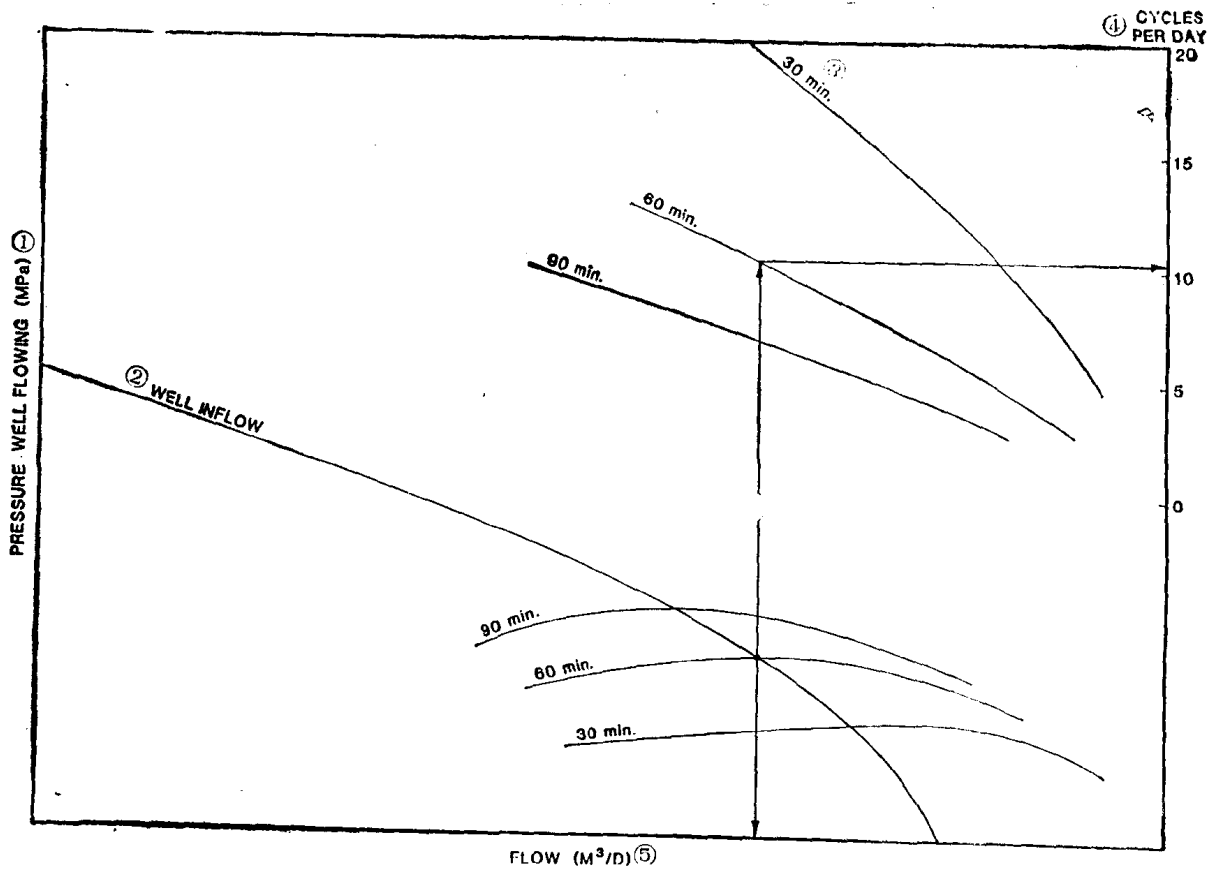


图 14 循环对系统的影响

①井底流动压力，兆帕；②入井流动特性曲线；③分钟；④周期生产次数/天；⑤产量，米³/天