

海底静力触探贯入速度的前馈补偿控制^①

陈 奇^② 徐 行 吴 衡 于彦江 万 芃

(国土资源部广州海洋地质调查局 广州 510760)

摘 要 针对海底静力触探(CPT)贯入速度控制目标为 $2\text{cm/s} \pm 10\%$ 的技术要求,建立了贯入速度的仿真控制模型,并以地层阻力的抽象仿真模型为干扰激励源对海底 CPT 系统进行了仿真分析;针对仿真中传统 PID 控制策略无法消除大幅值斜坡干扰所导致的静态误差的分析结果,利用 CPT 测试的本质即是采集地层阻力这一特点,提出了将 CPT 所采集的锥尖阻力和侧壁摩擦力的合力作为前馈控制的输入量的前馈补偿控制方案,仿真分析与现场试验均证明此方案达到了预期的控制目标,保证了 2008 年 9 月在南海万山群岛海域开展海底数据采集的顺利有效进行。

关键词 海底静力触探(CPT), 贯入速度, 仿真模型, 前馈补偿

0 引 言

静力触探又称锥探 (cone penetration testing, CPT), 是利用一根安装了若干传感器的圆锥形探头在土体中以准静力匀速贯入时所采集的各项应力数据来实时、连续地反映土质变化特征的一项原位测试方法。CPT 有陆地 CPT, 也有海底 CPT, 与陆地 CPT 相比, 海底 CPT 系统在将探头贯入到海底土体中时需要多项辅助装置的配合。本课题研制了一个井下式海底 CPT 系统, 它主要包括: (1) 工作于钻杆管内的触探执行机构——管内锥探总成; (2) 坐落于海床面的触探稳固机构——海底基座; (3) 设置于甲板与海底的触探数据采集装置——探头及其数据采集仪; (4) 安装于甲板测控计算机的处理软件——测控系统软件与数据分析评价软件。辅助装置则包括: 承载船、船载海洋钻机及钻杆、承载电缆及绞车等^[1]。

CPT 的行业规范中要求探头必须以“准静力匀速”的方式贯入到待测土体中, 贯入速度的不稳定将会对土体力学特征参数的真实采集造成严重干扰, 并且在数据后处理的资料解释方面也会间接地产生不利影响, 因此使贯入速度达到一定的控制精度是开展 CPT 测试的必要前提^[1]。在开展海底 CPT 技术的科研探索中, 考虑到我国海底 CPT 技术的不成

熟, 并结合国内外 CPT 机理研究及现场试验的现有经验结论, 将 CPT 贯入速度的控制目标定为 $2\text{cm/s} \pm 10\%$, 其控制精度与目前实行的陆地行业标准相当, 以便于更好地开展海底 CPT 的数据采集、机理探讨与数据解释工作。

管内锥探总成作为将探头贯入海底土体的执行机构, 其实质为一套电液比例速度控制系统, 采用传统的比例积分微分 (PID) 控制策略在无负载时贯入速度虽可满足控制目标的要求, 但在实际操作中受土体力学性质和液压系统固有特性的影响, 贯入速度存在一定程度的静态误差, 以及上升时间较长 (一般 $2 \sim 5\text{s}$)、偶尔瞬间突变 (误差偶尔超过 10%) 等问题, 贯入速度的不稳定成为整套 CPT 系统进行海上数据采集的瓶颈问题, 因此在已有海底 CPT 硬件平台基础上开展贯入速度仿真模型研究并实施相应的控制策略是解决上述问题的有效途径^[2,3]。基于这种考虑, 本文从速度控制模型和系统仿真分析入手, 提出了干扰前馈补偿的控制方案, 该方案在系统仿真和现场试验中达到了预期的控制效果。

1 贯入装置的硬件组成及数学模型

1.1 贯入装置的硬件组成

图 1 所示为贯入速度控制硬件系统组成框图, 其中速度设定由微处理器编程时写入, 也可以通过

① 863 计划 (2001AA602024) 和广州海洋地质调查局局控课题 (GZJK200606) 资助项目。

② 男, 1981 年生, 博士, 工程师; 研究方向: 海洋技术装备与岩土机电工程; 联系人, E-mail: qenchi@126.com (收稿日期: 2009-11-16)

甲板测控系统的 PC 机程序修改。微处理器应用系统为控制算法的载体,并负责数字量与模拟量的相互转化。比例放大器将微处理器应用系统输出的控制信号进行处理、放大以驱动比例调速阀,通过比例调速阀阀芯的动作控制液压系统进入伺服液压缸单

位时间的体积(流量),从而获得一定的贯入速度。检测电路采集伺服油缸位移传感器输出的信号,作为主反馈输入至微处理器应用系统。伺服液压缸上所加负载主要为探头与探杆在贯入土体时的土体反作用力。

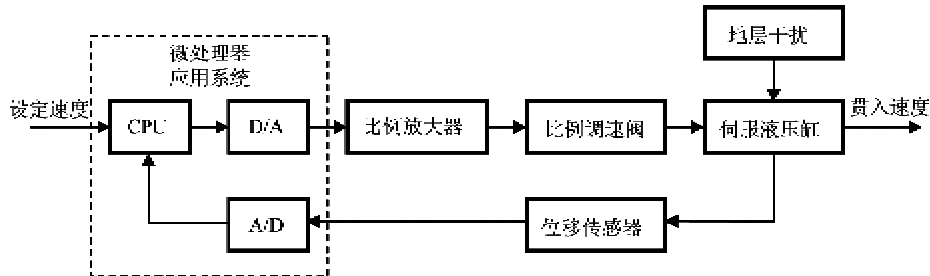
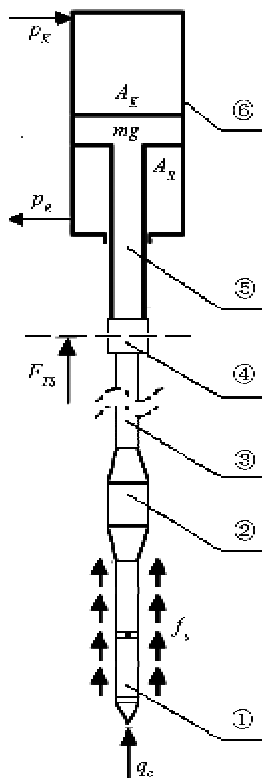


图 1 贯入速度控制硬件系统组成框图

1.2 液压缸-负载环节力学方程的建立

图 2 为液压缸与负载的受力示意图。通常情况下,当活塞杆竖直向下运动时所建立的力学方程为^[4,5]



①-探头;②-扩孔器;③-探杆;④-探杆接头;⑤-活塞杆;⑥-液压缸

图 2 液压缸与负载的受力示意图

$$p_K A_K - p_R A_R + mg = m \frac{dv}{dt} + Bv + F_{TS} \quad (1)$$

式中:

p_K ——液压缸无杆腔油液压力;

A_K ——液压缸无杆腔活塞面积;

p_R ——液压缸有杆腔油液压力;

A_R ——液压缸有杆腔活塞面积;

m ——活塞和惯性负载的质量;

g ——重力加速度;

v ——活塞(探头)运动速度;

t ——时间;

B ——黏性阻尼系数;

F_{TS} ——外界干扰的等效阻力。

实际工作中伺服液压缸以土体对探头和探杆的反作用力为主要负载,其力学方程应该结合 CPT 的特点来建立。在建立贯入速度控制模型时将土体当作惯性负载显然是不合理的,因为土体显然没有跟随探头一起移动,而在基于弹性负载系统建立的力学平衡微分方程中往往以 Kx (其中 K 为负载弹簧刚度, x 为位移量)代替 F_{TS} 作为负载力。虽然这个 K 值与液压系统和伸缩弹簧的 K 值具有相同的物理含义,但是在土体中它却随地层的变化是一个十分难以确定的参数,CPT 中土体负载弹簧刚度与作用面积、变形总体积和土力学诸多相关参数密切联系,而且不同土体(地层)的各个参数显然不同,因此以一个常数 K 乘以位移 x 的结果作为土体的负载力不具有代表性。另一方面,CPT 的目的就是为了确定包括这个类似 K 值在内的许多土力学参数,而如果完全确定好这个变化着的 K 值后进行静力触探,则测试本身也就失去了意义。

由 CPT 的原理和图 2 可以看出,整个贯入系统的负载主要来自两个方面:一是作为惯性负载的装置本身,包括活塞杆、探杆接头、探杆、扩孔器和探头,它们与活塞杆刚性联接,在工作时和活塞杆一起运动,这部分负载在力学方程里可以用 mg 表示;二

是地层阻力 F_{TS} , 主要表现在探头和扩孔器的端阻力以及探头、扩孔器和探杆的侧阻力, 而探头的端阻力(锥尖阻力) q_c 和侧阻力(侧壁摩擦力) f_s 正好为静力触探所采集的参数^[6], 这两个参数可近似反映土体的反作用力 F_L , 至于土体作用在扩孔器和探杆上的力则可以在 F_L 基础上乘以一个调整系数 m , 以 mF_L 替换力平衡微分方程中的 F_{TS} , 则可以使得数学模型的建立更加真实。

1.3 地层干扰的抽象仿真模型分析

由土力学和实际的地层分析可知, 地层干扰作为负载可以抽象成以下几种数学模型:

(1) 阶跃函数: 在两种地层的分界面土体的力学性质发生突变, 突变后在另外一个基准值上做缓慢变化。整个突变过程时间较短(约 1~3s), 变化量很大(可高达几十 kN), 对贯入速度控制系统可视为阶跃信号。

(2) 脉冲函数: 当贯入过程中探头遇到碎石等较硬的大颗粒干扰物时, 锥尖阻力会突然增大, 但随着探头的继续贯入, 锥尖阻力又恢复到干扰物以前的

基准值做缓慢变化, 整个突变过程时间很短(约 1~3s), 变化量很大(可高达几十 kN), 对贯入速度控制系统可视为脉冲信号。

(3) 斜坡函数: 当探头在单一地层仅随深度的增加而移动时, 地层的力学性质随深度的增加仅发生缓慢变化, 整个变化过程时间很长(可超过 50s), 变化量较大(1m 的变化量一般在 10kN), 对贯入速度控制系统可视为斜坡信号。

(4) 正弦函数: 根据傅立叶分析可知, 以上任何一种信号都可以分解为若干个正弦信号的组合, 因此在测试和分析干扰信号对整个贯入速度控制系统的影响时, 正弦信号是一个必不可少的信号源。

1.4 贯入装置的仿真数学模型建立

贯入装置中各个环节的数学模型, 除液压缸-负载环节外, 均与常规的液压速度控制系统相差无异, 具体的硬件参数与模型建立过程可参阅文献^[1,2]的相关章节, 在此不再详述。最终建立的贯入装置仿真数学模型结构框图如图 3 所示。

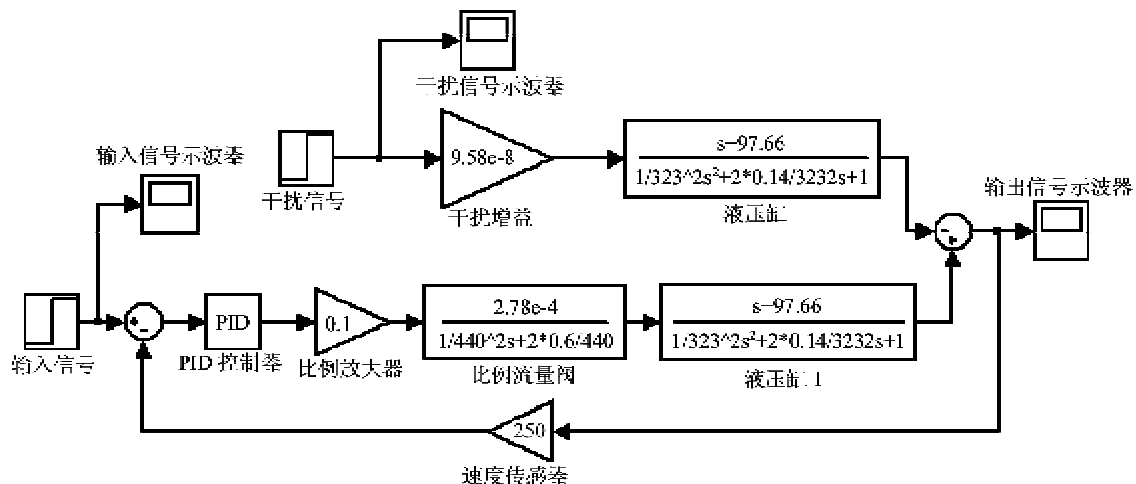


图3 贯入装置的仿真数学模型结构框图

2 基于 Simulink 的贯入速度仿真分析

2.1 无负载时的系统稳定性分析

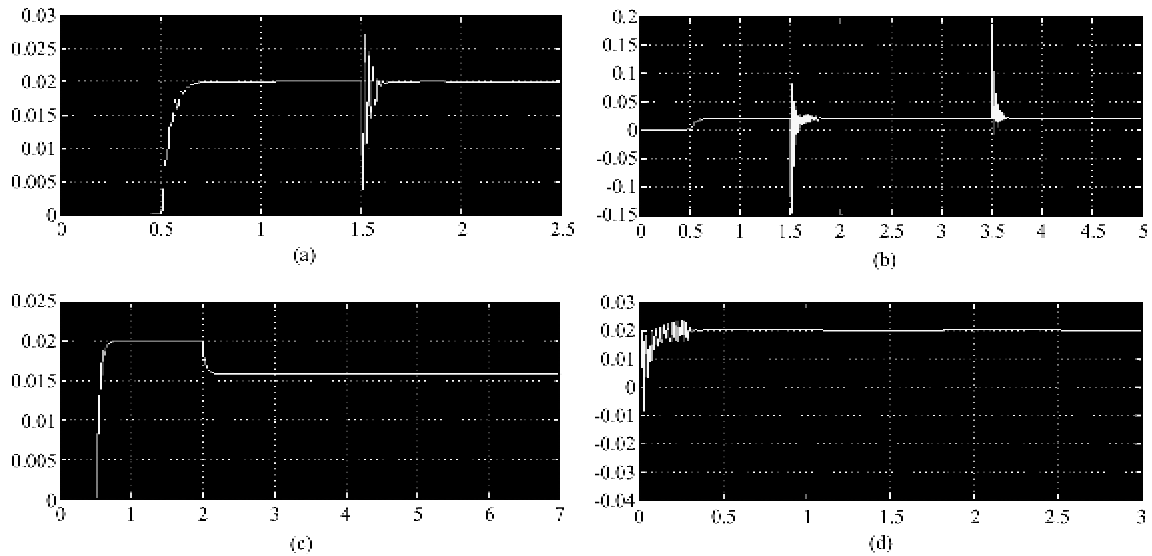
贯入装置在无负载情况下为一个反馈控制系统, 若没有 PID 控制环节整个系统为一个不稳定系统, 根据系统传递函数方框图(图 3)及开环传递函数表达式在 Simulink 中绘制的奈奎斯特曲线或零极点图可以简单地作出判断; 而当编辑 PID 控制器中的比例-积分-微分环节的系数进行反复的仿真调

试, 可以得到一系列十分理想的控制曲线^[7]。

2.2 地层负载对贯入速度的影响分析

为了分析出地层负载对贯入速度的影响, 将 4 种地层干扰的抽象仿真模型作为 F_{TS} 加载到图 3 中, 可以在 Simulink 的输出信号示波器得到图 4 的一组相应曲线。

从以上 4 组加载干扰信号后的系统响应曲线可以看出: 幅值较大的阶跃干扰和脉冲干扰会使系统在干扰加载瞬间产生振荡, 但一般可以在 0.3s 内恢复稳定状态, 这说明 PID 控制策略发挥了应有的控



(a) 1.5s 处加载 5kN 阶跃干扰信号的响应曲线; (b) 1.5s 处加载 5kN, 持续 2s 脉冲干扰信号的响应曲线;
(c) 2s 处加载 50kN, 持续 5s 斜坡信号的响应曲线; (d) 启动时加载偏置 1kN, 峰值 400N, 周期为 1.5s 正弦干扰信号的响应曲线

图 4 加载 5000N 脉冲干扰信号的响应曲线

制效果;当加载正弦干扰信号时,系统只是在速度上升过程中产生振荡,并有一定的超调,而速度达到稳定后也基本没有较大影响,却这种在系统启动之初就出现正弦干扰的地层阻力的几率较小;当加载较大幅值的斜坡干扰信号时,贯入速度会出现明显的静态误差,且误差值并没有任何减小的迹象,这种速度变化对静力触探的数据采集具有较大影响。

3 引入干扰前馈补偿的仿真分析设计

基于地层负载对贯入速度的影响分析,在制定贯入速度控制策略时应重点补偿较大幅值的斜坡干扰对贯入速度的影响。然而这种地层阻力的低频强扰动仅仅靠提高系统的开环增益、提高系统型别、选择合适的系统带宽等措施都很难获得高性能的控制效果,相反,如果能够对这种低频强扰动进行量测并实施干扰前馈补偿将会容易地减小乃至消除稳态误差,抑制几乎所有的可量测扰动。在这里,CPT 对待测土体的力学性质进行测试的本质创造了以地层阻力为前馈参量的干扰前馈补偿的可行性^[6],如 2.2 节中对图 2 的分析,地层阻力 F_{TS} 可以用 CPT 所采集的锥尖阻力与侧壁摩擦力的合力 F_L 乘以一个调整系数 m 进行替换,因此将静力触探参数作为干扰前馈的输入量与先前的反馈控制相结合实现了复合控制。

设 $G_n(s)$ 为干扰前馈补偿的传递函数,使扰动

$F_{TS}(s)$ 经过 $G_n(s)$ 后对系统输出产生补偿作用,以抵消扰动 $F_{TS}(s)$ 通过液压缸环节之后对输出的影响,因此只要恰当选择 $G_n(s)$ 即可实现对贯入速度的前馈补偿^[8]。

由图 3 可知,扰动 $F_{TS}(s)$ 作用下对系统输出的影响(无控制信号输入)为

$$C_{TS}(s) = \frac{-9.58 \times 10^{-8}(s + 96.77)}{\frac{s^2}{323^2} + \frac{2 \times 0.14}{323}s + 1} F_{TS}(s) \quad (2)$$

而引入干扰前馈后对系统输出的影响为

$$C_n(s) = G_n(s) \cdot \frac{0.1 \times 2.78 \times 10^{-4} \times 321}{(\frac{s^2}{440^2} + \frac{2 \times 0.6}{440}s + 1)(\frac{s^2}{323^2} + \frac{2 \times 0.14}{323}s + 1)} \cdot F_{TS}(s) \quad (3)$$

按照不变性原理,令 $C_{TS}(s) = C_n(s)$ 则可以利用前馈补偿抵消可量测干扰对系统的影响,由此求得的干扰前馈环节的传递函数为

$$G_n(s) = 5.165 \times 10^{-11}s^3 + 3.23 \times 10^{-8}s^2 + 1.267 \times 10^{-5}s + 9.766 \times 10^{-4} \quad (4)$$

由于 $G_n(s)$ 的分子次数高于分母次数,不便于编程或物理实现,而且 s 高次项的系数均十分小,因此可以采用近似全补偿的方法予以处理,将 $G_n(s)$ 按照系数最大的比例项进行近似简化,取 $G_n(s) = 1 \times 10^{-3} (\approx 9.766 \times 10^{-4})$,可以得到针对斜坡干扰的前馈补偿特性曲线如图 6(a) 所示,其中加载时间

与图 4(c)相同。

图 5(a)已经达到较为理想的补偿效果,但由于加载幅值较大,仍然存在瞬间振荡和静态误差,稍微调整 $G_n(s) = 1.05 \times 10^{-3}$,可以得到在相同条件下

的前馈补偿特性曲线,如图 5(b)所示。这是因为在式(4)作简化时对 s 非零次项的忽略引起的,适当增加作为 $G_n(s)$ 比例系数的值即可达到理想的效果。

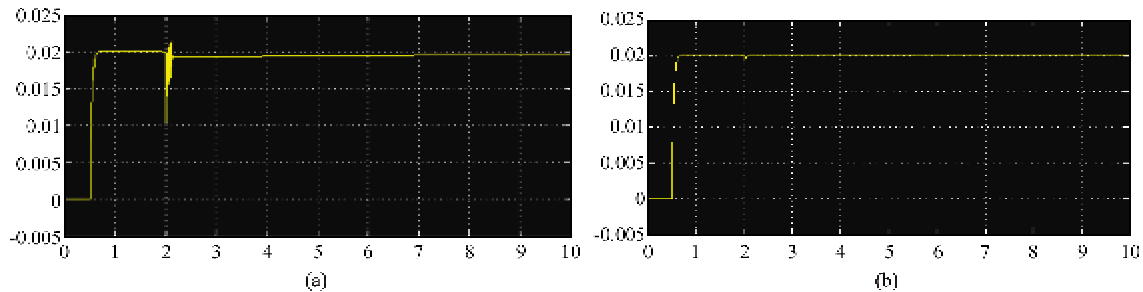


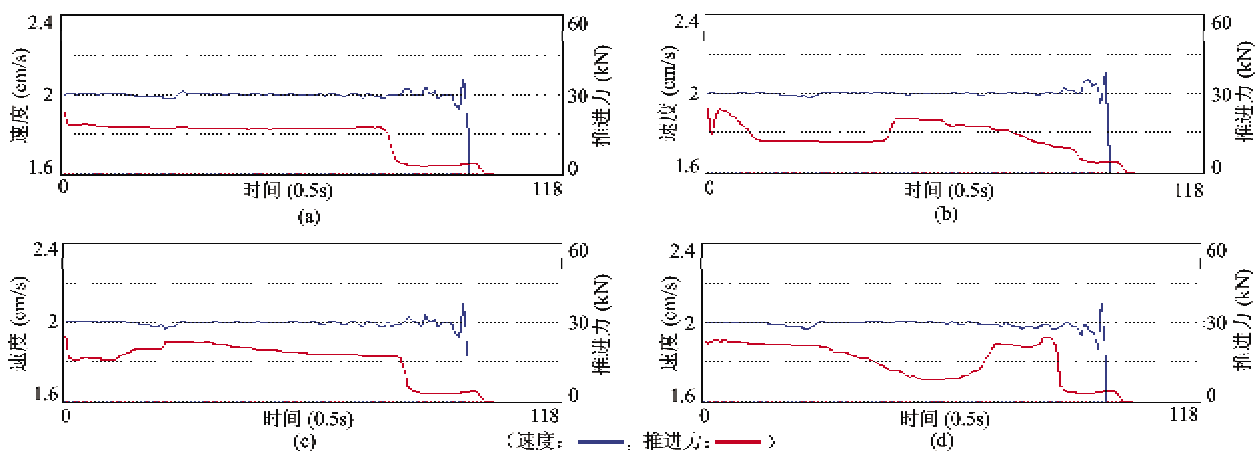
图 5 针对斜坡干扰的前馈补偿特性曲线

4 现场试验及分析

由于仿真模型建立之初提取的传递函数与控制模型忽略了许多次要因素,这些次要因素虽不会对整个系统的控制策略构成影响,但在一定程度上足以改变 PID 的整定参数和前馈补偿的传函参数。现场调试时直接面对贯入速度控制系统的软硬件以及所处的工况环境,其参数需要在仿真结果的基础上结合大量的试验经验来确定。因此,现场调试方案采用微处理器应用系统实现正常的速度检测与 PID 控制以及干扰前馈控制,而具体的 PID 整定参数与前馈控制的传函则参数则由甲板 PC 机通过人机交互界面设定与修改,微处理器应用系统与甲板 PC 机采用工业现场总线联接,以便于在水下环境中进行远程监控和调试。

图 6 所示为现场试验中 4 组有代表性的速度-负载曲线,其中(a)、(b)、(c)、(d)中红色曲线代表地层负载(推进力)的波动,包括了阶跃、斜坡和混合干扰等多种可能的实际工况;蓝色曲线则代表实际的贯入速度。从图中可以看出,负载的任何变化都几乎没有对贯入速度产生影响,贯入速度在启动贯入的瞬间有轻微振荡,但均在 $2 \sim 3\text{s}$ 内未予以消除,贯入速度整体被控制在 $2 \pm 10\%$ 的范围,达到了预期的控制目标。

2008 年 9 月,广州海洋地质调查局“奋斗五号”船在南海万山群岛海域进行了自行研制的海底 CPT 系统海试,成功完成了 3 个海底触探孔位的数据采集工作,累计触探深度 54.8m ,贯入速度基本被控制在 $2\text{cm/s} \pm 10\%$ 范围内,达到了预期的试验目的。



(a) (编号 2008-03-05-15-06-38):阶跃干扰特性曲线;(b) (编号 2008-03-05-15-00-41):斜坡干扰特性曲线;
(c) (编号 2008-03-05-15-07-59):阶跃与斜坡复合干扰特性曲线;(d) (编号 2008-03-05-15-00-42):复杂干扰条件下的特性曲线

图 6 现场试验中地层干扰情况下的速度与负载曲线

5 结 论

从仿真试验和现场实测结果的比较可以得到以下结论:

(1)所建立的海底 CPT 贯入速度控制模型,其仿真结果和现场试验情况一致,说明所建模型准确、合理。仿真中提取的地层阻力抽象模型可以反应实际的地层阻力对贯入速度控制系统的影响。

(2)在 Simulink 系统中的仿真结果显示,传统 PID 控制策略只要选择合适的 PID 控制参数可以对贯入速度实施有效控制,但却无法消除大幅值斜坡干扰所带来的影响。

(3)利用 CPT 的本质即是采集地层力学性质的特点,将探头所采集的锥尖阻力与侧壁摩擦力的合力作为前馈控制的输入量,可消除大幅值斜坡干扰的影响。

(4)现场试验的成功表明基于 PID 控制和干扰

前馈控制的复合控制策略获得了理想的控制效果。

参考文献

- [1] 陈奇,石要红,潘毅等.基于 Downhole 工艺的海底静力触探及其设备研制.海洋工程,2007,11:73-75
- [2] 陈奇.海底静力触探若干关键技术研究:[博士学位论文].武汉:中国地质大学,2008
- [3] 石要红.海底土体静力触探关键技术研究:[硕士学位论文].青岛:中国海洋大学,2005
- [4] 王占林.液压伺服控制.北京:北京航空学院出版社,1987. 232-234
- [5] 许益民.电液比例控制系统分析与设计.北京:机械工业出版社,2005.44-67, 200-241
- [6] 孟高头.土体原位测试机理方法及其工程应用.北京:地质出版社,1997. 6,53
- [7] 王占林.近代电气液压伺服控制.北京:北京航空航天大学出版社,2005. 176-179
- [8] 刘金琨.先进 PID 控制 MATLAB 仿真.北京:电子工业出版社,2004. 1-10, 23-36

Research on control of thrust speed of offshore CPT by feed-forward compensation

Chen Qi, Xu Xing, Wu Heng, Yu Yanjiang, Wan Peng

(Guangzhou Marine Geological Survey, the Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510760)

Abstract

Aiming at the technical requirement of the thrust speed of ($2\text{cm/s} \pm 10\%$) when offshore performing the cone penetration testing (CPT), the paper sets up the simulation control model of thrust speed, and realizes the CPT system simulation based on the abstract simulation model of resistance disturbance sources. As the simulation result shows that the traditional PID control strategy could not eliminate the steady state error caused by large amplitude ramp disturbance, the paper makes use of the nature characteristic that CPT is collect stratum resistance, and brings forward a feed-forward compensation control method, which uses the resultant force of the cone tip resistance and the sleeve friction as the input parameter. The simulation analysis and field tests proved that the method achieved the desired control target, and so guaranteed the seabed data collection smoothly and effectively in the Wanshan waters of the South China Sea in September 2008.

Key words: offshore cone penetration testing (CPT), thrust speed, simulation model, feed-forward compensation