

多缆地震船拖体的阻力及横向姿态预测

韦成龙, 关晓春

国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075

摘要: 目前有关阻力及空间状态的理论计算和模型试验基本上针对单个水下拖体, 而对多缆地震船各类拖体的综合受力和姿态则较少受到关注。为方便施工团队在海上快速预测拖体的状态, 在国内外学者对水下拖体的流体阻力研究基础上, 分析多缆地震船水下拖体的结构和流体阻力特征, 提出简化的阻力计算及横向姿态预测方法。文章以常用的多缆地震船拖体配置为例, 得到的估算结果与实际的作业状态较为吻合, 证实了该方法的有效性。

关键词: 勘探船; 拖体; 拖缆; 阻力; 姿态预测

中图分类号: P715.3; P738.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2015)02-0071-05

Estimation on the resistance and horizontal stance of towed objects of multi-streamer seismic survey vessels

WEI Cheng-long, GUAN Xiao-chun

Ministry of Land and Resources (MLR) Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

Abstract: At present, theoretical calculation and model test about resistance and space state basically focus on a single underwater towed body, while the comprehensive resistance and stance of towed objects of multi-streamer seismic survey vessels are less concerned. For the convenience of the operators to predict the state of towed bodies in the sea quickly, the structure of multi-streamer seismic survey vessels for towed objects and the character of fluid resistance are analyzed on the basis of existing research on the fluid resistance of underwater towed objects. A simplified way to calculate the resistance and to estimate the horizontal stance is presented. This paper takes the configuration of common towed objects as an example, and the difference between estimation result and actual working status is within the permitted scope. The effectiveness of the proposed method is confirmed.

Key words: survey vessel; towed object; towed cable; resistance; stance estimation

海洋多缆地震施工中, 地震船拖曳多个气枪阵列、多条信号接收拖缆。气枪阵列、拖缆上吊挂各类辅助设备, 如气枪阵列上的浮体、气枪托板, 拖缆上的扩展器、头部浮标、罗盘、声学水鸟、尾标等。我们将气枪阵列、接收拖缆及其吊挂的辅助设备统称为拖体, 所有拖体形成一个庞大复杂的水下网络。

合理估算地震船拖航中的拖体阻力, 进而推算船舶所需要的拖航力, 对船舶的设计建造具有指导作用。预测拖体姿态, 对提高施工安全性、地震船作业能力、海上作业效率具有重要的意义(孙宝善等, 2000)。

本文分析了多缆地震船水下拖体的流体力学特征, 提出了阻力估算方法, 便于对水下拖体的阻力和横向姿态进行预测, 为设计部署和方案决策提供依据, 同时也为估算船舶拖航力、提高海上拖航安全提供参考。

1 拖体及流体阻力特征

海水对运动物体的阻力主要有黏滞阻力、压差阻力和兴波阻力。当海面存在较大涌浪时, 还需考虑波浪对运动物体的阻力作用。

多缆地震船各类拖体的位置布设见图 1。其中,

收稿日期: 2014-04-23; 修订日期: 2014-07-24。孙淑杰编辑

基金项目: 国土资源部海底矿产资源重点实验室资助项目(GZH201200508)

作者简介: 韦成龙(1976~), 男, 高级工程师, 硕士, 从事海洋地球物理探测与采集技术研究。E-mail: wchl@hyd.z.cn

通信作者: 关晓春。E-mail: g63x03ch@sina.com

信号接收电缆为柔性长圆柱状的等浮拖缆,可在水中保持一定的深度,与海平面平行;为控制纵向深度及横向位置,拖缆上安装罗盘及横向水鸟,通过改变水翼角来控制拖缆的纵向升降和横向移动。每条拖缆

头部安装导向器,尾部安装 GPS 定位尾标。两侧的拖缆扩展器用于产生横向拖力,使得多条电缆展布到预定位置。震源包括浮体、气枪及其附属物件,浮体呈圆柱形,气枪及其附属物件为规则特定形状。

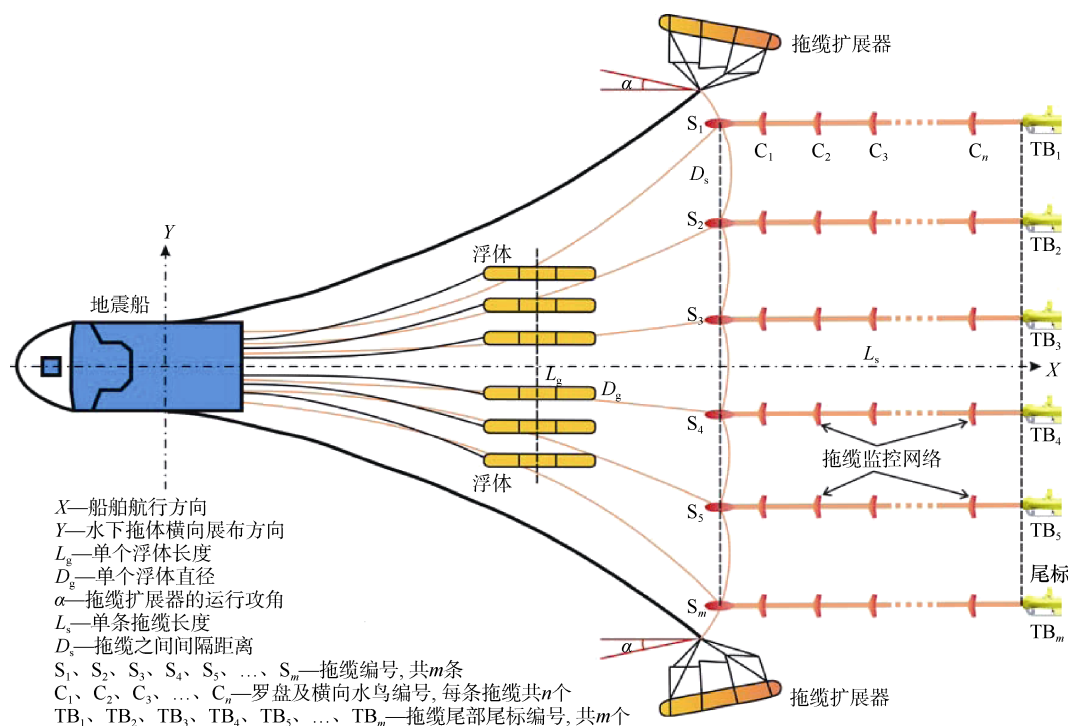


图 1 多缆地震船拖体横向空间形态

Fig. 1 Multi-streamer seismic survey vessel towing object configuration in a plane view

拖航作业时,拖体在海水中的深度及形态可通过拖体的重力分布(如配重块的配置)、深度绳的长度、深度控制器的布置来进行调节。相对而言,拖体在海面的姿态受拖船速度、海流、扩展器横向控制能力、拖体阻力、拖船振荡运动和速度波动、低频波浪运动等因素的控制,运动状态较复杂。以下讨论各类拖体在海面的流体阻力特征和阻力估算方法。

1.1 等浮拖缆

研究表明,拖缆的阻力系数、材质密度、截面形状等都是影响拖缆运动的重要参数(Ortloff et al, 1969; Dowling, 1988; Ersdal, 2004)。等浮拖缆沉放于

海水中一定深度,随着拖船移动,主要受到黏滞阻力作用。相关文献均对拖缆的稳态受力方程进行了研究,得到比较一致的结果(张小卿, 2009; 张维竞等, 2009; 李光明等, 2011; 张亮等, 2013)。作为估算,不考虑电缆弯矩作用等因素,等浮拖缆在水平方向上的受力平衡如图 2 所示(坐标原点 O 位于每条拖缆头部)。

设拖缆微元长度为 dl , 拖船航速与海流速度的合成速度方向必与拖缆微元轴向平行, 拖船速度为 V_b , 方向平行于 X 轴, 海流速度为 V_w , 与 X 轴正向夹角为 β , 拖缆微元与 X 轴正向夹角为 α 。要达到

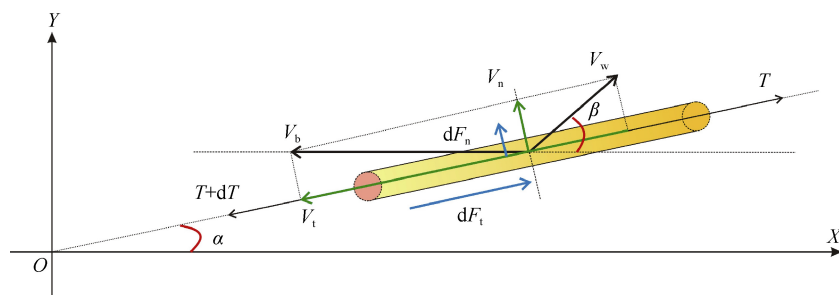


图 2 拖缆微元受力分析图

Fig. 2 Diagram of towing cable differential elements of force

拖缆微元法向力的平衡, V_b 和 V_w 在拖缆微元法向上的分速度需相等, 此时相当于拖缆微元在法向上处于相对静止, 法向黏压阻力 $dF_n=0$; 在拖缆微元轴向上, 张力 T 的增量大小与切向阻力 dF_t 相等, 即 $dT=dF_t$ 。可列出速度及夹角的关系式。

$$V_n = V_b \sin \alpha - V_w \sin(\beta - \alpha) = 0 \quad (1)$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{V_w \sin \beta}{V_b + V_w \cos \beta} \right) \quad (2)$$

$$V_t = V_b \cos \alpha + V_w \cos(\beta - \alpha) \quad (3)$$

其中 V_n 、 V_t 分别为拖缆法向、切向相对速度。

估算等浮拖缆受到黏滞的阻力, 关键在于阻力系数的确定。对于水流与柔性圆柱体成任意夹角的阻力系数目前尚未得到一致公认的结果, 主要问题在于雷诺数范围的确定(王春杰, 2011)。

在拖缆法向上, 拖缆与海水的相对速度为拖船速度与海流速度在该方向上的分量速度, 一般海流速度在 $0.6 \sim 1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据雷诺数公式 $\text{Re} = Ud / \eta$, 其中 U 为相对速度, d 为拖缆直径, η 为海水黏性系数, 在 20°C 时取 1.007×10^{-6} , 如果拖缆直径为 0.06 m , 可知 $\text{Re} = 0.59 \times 10^5$ 。根据霍曼实验结果可知, 在拖缆法向上, 周围的边界层流动处于层流状态, 拖缆上所受的阻力主要为黏压阻力, 阻力系数与雷诺数关系不大, 地震拖缆所受的拖缆阻力与流速的平方成正比。对于法向雷诺数 $100 < \text{Re}_d < 10^5$ (Re_d 为与拖缆直径 d 有关的雷诺数), 法向阻力系数 C_n 1.2 (王春杰, 2011)。

在拖缆切向上, 表面摩擦阻力和黏压阻力为其主要阻力成分。拖缆切向阻力与拖缆的雷诺数、攻角、长度直径比、表面粗糙度以及抖动有密切关系。典型工况下, 航速 5 节, 约 $2.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 切向雷诺数 $\text{Re}_l = Ul / \eta = 2.6 \times 10^6$ (l 为拖缆长度, Re_l 为与拖缆长度 l 有关的雷诺数)。根据 Hoerner(1965)给出的光滑圆柱体受轴向流作用时的切向阻力系数经验公式, 切向阻力系数 C_t 与雷诺数和圆柱体的长径比有关(王春杰, 2011)。

$$C_t = \frac{0.455}{(\log_{10} \text{Re}_l)^{2.58}} + 0.0016 \frac{l}{d \text{Re}_l^{0.4}}, \quad 10^6 < \text{Re}_l < 10^9$$

可算出 $C_t = 3.8 \times 10^{-3}$ 。拖缆微元的黏压阻力可参考流体阻力经验公式(王飞, 2007):

$$dF_n = -0.5 C_n \rho d V_n^2 \times dl \quad (4)$$

$$dF_t = -0.5 C_t \rho \pi d V_t^2 \times dl \quad (5)$$

其中 dF_n 、 dF_t 分别为拖缆微元法向、切向黏压阻力, C_n 、 C_t 分别为拖缆微元法向、切向阻力系数, dl 为拖

缆微元长度。

1.2 浮体

浮体包括拖缆头部导向器、尾部定位尾标、横向扩展器和气枪浮体。浮体一般设计为流线型, 迎水面为圆形或椭圆形。因浮体出露水面较低, 排水体积小, 兴波阻力可忽略, 运动中主要受到压差阻力、黏滞阻力、波浪阻力的作用。浮体阻力 F_{float} 可以归纳为:

$$F_{\text{float}} = F_{\text{pd}} + F_{\text{vr}} + F_{\text{wf}} \quad (6)$$

$$F_{\text{pd}} = -0.5 \rho C_f S_f V_{\text{re}}^2 \quad (7)$$

$$F_{\text{vr}} = -0.5 \rho C_t \pi D_g L_g V_{\text{re}}^2 \quad (8)$$

$$F_{\text{wf}} = -0.5 \rho C_w D_g L_g |u| u \quad (9)$$

其中 F_{pd} 、 F_{vr} 、 F_{wf} 分别为浮体在 X 轴水平方向受到的压差阻力、黏滞阻力和波浪阻力, ρ 为海水密度。海水压差阻力系数 $C_f = 0.112$ (李树成 等, 2007), S_f 为浮体在垂直于运动方向上的投影面积, V_{re} 为拖船与海流的合成速度; 波浪阻力 F_{wf} 可由莫里森方程的阻力项得出(冯铁城, 1996), 其中 C_w 为波浪速度力系数, 对于圆柱形结构物, 一般取 $C_w = 1.2$ (李占, 2008), D_g 、 L_g 分别为浮体的直径和长度, $u = u(t)$ 为海水质点速度, 线性化后的波浪阻力可以表示为(马汝建, 1993):

$$F_{\text{wf}}(t) = 0.5 \sqrt{8} \pi \rho C_w D_g L_g \sigma_m u(t) \quad (10)$$

其中 σ_m 为海水质点速度的均方根值, 可见波浪阻力是时变的(王言英, 2004; 程婷婷 等, 2010)。

1.3 缆源拖体

除了等浮拖缆和浮体, 拖体包括等浮拖缆上的深度控制罗盘、横向舵鸟, 震源上的气枪、托板等。这类拖体一般沉放于水下 $5 \sim 15 \text{ m}$, 受波浪影响小。因作用目的不同, 拖体外形有异, 其受到的阻力主要为压差阻力和黏滞阻力, 计算方法与等浮拖缆和浮体相应的阻力估算相同。浮体与缆源拖体的水下状态见图 3, 其中罗盘鸟、横向舵鸟的运动方向阻力分别来自于不同水翼角产生的纵向升力、横向偏移力在 X 轴方向的分力, 通过查阅升力与水翼角关系曲线资料可以获得(张辉, 2009; 苗建明, 2010), 这里不再赘述。

2 拖体阻力及横向姿态预测

利用以上方法, 可以根据地震船航行速度及海流和波浪条件, 对拖体总阻力进行估算。表 1 为设定的多缆地震船拖体物理参数, 在波浪均方根速度 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 常规作业航速 5 节工况下, 海流与 X 轴夹角

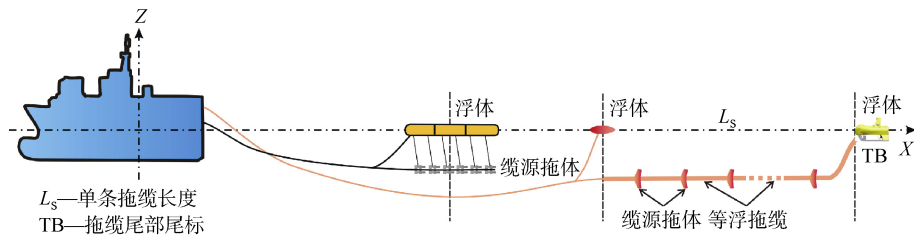


图3 多缆地震船拖体纵向空间形态

Fig. 3 Multi-streamer seismic survey vessel towing object configuration in the vertical direction

为 0° 时表示其与航行方向相反, 为顶流状态。如南海冬季的西南向海流, 最大流速可达 3 节 ($1.54\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 为此分别估算海流流速为 0、0.5、1、1.5、2 节时拖体总阻力, 其随海流的变化如图 4。

表1 多缆地震船拖体物理参数

Tab. 1 Physical parameters for a multi-streamer seismic survey vessel towing object

拖体	配置
单拖缆长度/m	6500
拖缆数/条	6
缆间距/m	100
到船尾最近距离/m	500
拖缆直径/m	0.06
拖缆头部导向器/个	6
拖缆尾标/个	6
拖缆横向扩展器/个	2(5000kg \times 2)
气枪浮体/m	6 \times 16
气枪浮体直径/m	1.10
深度控制器数/个	24 \times 6
横向舵鸟数/个	10 \times 6
气枪数量/支	72
等浮拖缆前导段/m	6 \times 600 ($4.7\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)
气枪震源炮缆/m	6 \times 350 ($6.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)

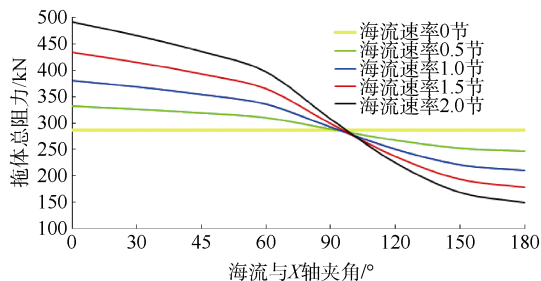


图4 拖体总阻力随海流变化曲线(船速 5 节)

Fig. 4 Relationship between towing object total resistance change and current (vessel speed: 5 knots)

由估算结果可知, 在航速保持稳定情况下, 海流速率和方向对拖体阻力值的变化影响明显。如夹角为 0° 时(顶流状态), 海流流速每增加 0.5 节, 拖

体总阻力增加 45~58kN; 夹角为 180° 时(顺流状态), 海流流速每增加 0.5 节, 拖体总阻力减少 28~40kN。结果还显示, 海流方向与 X 轴交角较大时($90^\circ \sim 110^\circ$), 海流流速大小对拖体总阻力变化的影响较小, 如交角为 100° 时, 在不同海流流速下拖体总阻力近似相等。

随着海流与 X 轴夹角的增大, 其对拖体横向姿态的影响逐渐加大, 同时, 影响的强度随着海流速率的增加而增加, 如图 5。当海流为 0.5 节时, 拖体羽角(拖体偏离 X 轴的平均角度)在海流与 X 轴夹角约为 95° 时达到最大, 当海流为 2.0 节时, 拖体羽角在 115° 时达到最大, 这说明在旁顺(海流与 X 轴夹角在 $100^\circ \sim 145^\circ$ 之间)工况下, 拖体姿态比旁顶(海流与 X 轴夹角在 $30^\circ \sim 75^\circ$ 之间)工况下更容易受到影响, 该结果与实际情况是相符的。

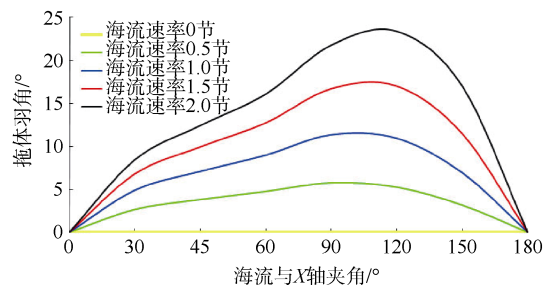


图5 拖体羽角随海流变化曲线(航速 5 节)

Fig. 5 Relationship between towing object feather change and current (vessel speed: 5 knots)

以上计算仅考虑拖体在横向上的阻力及姿态, 而在估算地震船对拖体的拖航力时, 还需要考虑拖体纵向上的姿态, 如水下拖体重量在垂向上形成的剩余质量力(负浮力)会改变其纵向上的姿态, 形成附加阻力(鲁通, 2009), 从而使得地震船拖航力增加。如根据表 1 参数估算, 当海流速度 2 节、夹角为 0° (顶流)时, 要保持 5 节作业船速, 拖航力需达到 552kN。

3 讨论与结论

为了在一定拖行速度下保持稳定的横向空间姿态, 需要对三维地震船水下拖体网络制定特定的增

加阻力和减小阻力的网络配置措施。如为了有效提供对多条拖缆的横向升力,拖缆扩展器设计成带有浮体的叶栅型升力组件;为了减小拖航阻力,头部导向器、气枪浮体等拖体的外形设计成流线型,可以有效地减少压差阻力和兴波阻力。

本文将水下拖体分为等浮拖缆、浮体、缆源拖体 3 类,分析其在横向上的阻力特征,运用简化的计算方法,对拖体阻力和横向姿态进行了预测,所计算的阻力值与海上同一拖体配置在相同工况下的实际阻力值差异约为 4%,可以满足工程要求。

本文将海况的影响简化为良好海况下的波浪均方根速度,实际中,在恶劣海况下,波浪速度会增大,由公式(10)可知,拖体受到的波浪阻力与波浪

速度成正比,这也是导致多缆地震船在恶劣海况下不能继续施工的一个原因。

在多缆地震船的设计及建造中,利用以上估算方法,可以获得在较为恶劣海况下拖体的最大阻力和横向姿态,对于多缆地震船的吨位、主机功率等性能需求具有很好的参考作用。如本文所估算的六缆地震船,拖体最大阻力可达 552kN,国内外这类船舶一般需达到 5000~6000 总吨,主机功率需达到 9000kW 左右(考虑冗余及应急情况);国内逐步变为常规作业用途的 12 缆地震船,拖体最大阻力可达 905kN,船舶一般需达到 13000~14000 总吨,主机功率需达到 15000kW 左右。以上估算结果与实际地震船的性能需求是比较吻合的。

参考文献

- 程婷婷, 罗均, 唐智杰, 等. 2010. 二阶波浪力的仿真计算[J]. 机电工程, 27(12): 121-123.
- 冯铁城. 1996. 浮筒的波浪力计算[J]. 海洋工程, 14(3): 36-40.
- 李光明, 杨飞, 朱学康. 2011. 水下拖缆稳态运动特性计算方法及应用分析[J]. 舰船科学技术, 33(8): 3-10.
- 李树成, 张昆山, 黄祥科. 2007. 浮筒的海上拖带计算[G]//第四届中国国际救援论坛论文集. 北京: 海洋出版社: 128-132.
- 李占. 2008. 小尺度水平柱体在水波与内波场中的受力模拟[D]. 天津: 天津大学: 46.
- 鲁通. 2009. 拖轮海上拖带航行拖力分析计算[J]. 江苏船舶, 26(5): 14-15.
- 马汝建. 1993. 波浪阻力线性化的能量法[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 17(6): 63-66.
- 苗建明. 2010. 海上地震拖缆自动定深器建模及仿真研究[J]. 自动化博览, (6): 72-74.
- 孙宝善, 王日新, 高士奇. 2000. 物探船拖缆姿态及拉力预报[J]. 海洋工程, 18(3): 71-74.
- 王春杰. 2011. 横向流作用下海洋地震拖缆姿态控制研究[D]. 上海: 上海交通大学: 14-16.
- 王飞. 2007. 海洋勘探拖曳系统运动仿真及控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学: 109.
- 王言英. 2004. 波浪中浮体运动与遭遇荷载计算研究[J]. 大连理工大学学报, 44(3): 313-319.
- 张辉. 2009. 海洋地震勘探拖曳系统动态运动分析及控制算法优化探讨[J]. 海洋开发与管理, 26(8): 110-113.
- 张亮, 张维竞, 刘涛. 2013. 地震拖缆的复模态振动主动控制[J]. 海洋工程, 31(1): 49-53.
- 张维竞, 张小卿, 陈峻. 2009. 基于嵌入式水鸟的海洋地震拖缆运动状态仿真研究[J]. 海洋工程, 27(4): 81-86.
- 张小卿. 2009. 基于嵌入式水鸟的海上地震拖缆运动控制与仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学: 12-24.
- DOWLING A P. 1988. The dynamics of towed flexible cylinders part 1 Neutrally Buoyant Elements[J]. Fluid Mech, 187: 507-532.
- ERSDAL S. 2004. An experimental study of hydrodynamic forces on cylinders and cables in near axial flow[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology: 127-128.
- HOERNER S F. 1965. Fluid-dynamic drag: Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance[M]. Brick Town, New Jersey: Hoerner Fluid Dynamics: 118-121.
- ORTLOFF C R, IVES J. 1969. On the dynamic motion of a thin flexible cylinder in a viscous stream[J]. Fluid Mech, 38(4): 713-720.