

# 深海海底光缆敷设施工余量控制的原理 和控制软件的应用

江伟,邵振宇,栗之炜

(中国海底电缆建设有限公司 上海 200041)

**摘要:**为解决深海有中继海底光缆项目技术难题,中国海底电缆建设有限公司开发了海底光缆敷设施工控制软件,填补我国相关领域的空白。文章介绍海底光缆敷设施工余量控制的原理和控制软件的操作流程:海底光缆余量包括区域余量、底部余量和释放余量,余量控制是海底光缆敷设施工中最关键的核心技术环节,应用控制软件可极大地降低计算量和提高计算精确度,并可通过在施工中不断调整计划,从而极大地提高施工质量,具有传统人工计算不可比拟的优势。

**关键词:**海底光缆;光缆敷设;余量控制;海洋工程;网络通信工程

**中图分类号:** TN913.33; TM757.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-9857(2018)08-0090-05

## The Principle of Slack Control in Submarine Cable Laying in Deep Sea and Application of Control Software

JIANG Wei, SHAO Zhenyu, LI Zhiwei

(China Submarine Cable Construction Co., Ltd, Shanghai 200041, China)

**Abstract:** In order to solve the technical problems in the deep ocean submarine cable laying with repeaters, China Submarine Cable Construction Company has composed the slack control software to fill the blank of relevant fields in China. This paper introduced the construction principle of submarine optical cable system in deep-sea laying and operation procedure of the control software. The slack in cable laying includes area slack, bottom slack and ship slack. Slack control is the most critical core technologies in submarine cable laying. Using slack control software will greatly decrease manual computation, improve the accuracy of calculation and will greatly improve the quality of construction by continually adjust plans during construction. It has incomparable advantages to traditional manual computation.

**Key words:** Submarine cable, Optical cable laying, Slack control, Ocean engineering, Network communication engineering

世界各国的互联网是国家级计算机网络,须采用相应通道将其连接,从而形成与人类生活密不可分的全球性的国际互联网。国际通信系统采用的网络连接手段主要包括陆地光缆、海底光缆和卫星等,其中海底光缆可有效地解决陆地光缆和卫星易受外界因素干扰和传输效率低的问题,是当今国际互联网的“高速公路”。

跨洋国际海底光缆的建设须涉及深海海底光缆敷设,此类施工技术基本被相关强国垄断。为建设网络强国和加快建设海洋强国,针对深海有中继海底光缆项目技术难题,中国海底电缆建设有限公司在总结深海海底光缆敷设施工原理的基础上开发控制软件,突破相关技术“瓶颈”和国外技术垄断,填补我国深海长距离有中继海底光缆自主施工的空白。

1 余量控制原理

深海海底光缆敷设施工过程中须将海底光缆完全贴合在海床上,同时中继器和接头盒等海中设备也要精确地敷设在设计路由时确定的“平坦”海床上。由于海底地形起伏不平,海底 2 点间的曲线距离大于海底光缆路由上相应 2 点间的直线距离,即海底光缆长度大于其路由长度。因此,深海海底光缆敷设施工一般采用余量控制模式<sup>[1]</sup>。

根据系统设计的要求,海底光缆在生产时通常在每 2 个中继器之间有 3% 的区域余量,然而不同中继段的海底地形复杂多变,有些起伏非常剧烈,为使敷设的海底光缆均匀地“贴”在海床上,须经施工前的精确计算和施工中的精确控制。

余量在施工前根据海底地形、海况和海底光缆参数预先设计,施工时按照拟定的余量敷设。余量的控制及其精度是衡量工程质量的重要指标之一:余量过小会使海底光缆产生底部张力,从而出现悬空等问题;余量过大会使海底光缆在海底“打小圈”,导致光纤衰耗。因此,余量控制是深海海底光缆敷设施工中最关键的核心技术环节,余量控制的结果直接影响海底光缆的使用寿命<sup>[2]</sup>。

1.1 海底光缆余量

余量是为满足海底光缆和路由的长度差而需多敷设的海底光缆长度的百分比,通常的计算公

式为:

海底光缆敷设总余量= 
$$\frac{\text{海底光缆长度}-\text{路由长度}}{\text{路由长度}} \times 100\%$$

1.1.1 区域余量

海底光缆敷设如图 1 所示。

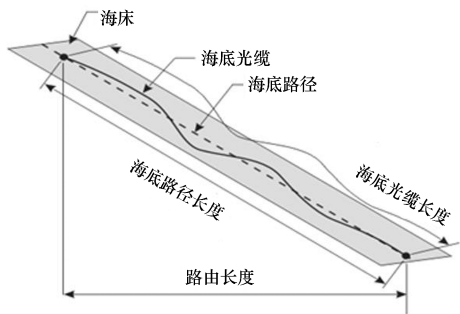


图 1 海底光缆敷设

区域余量由海底光缆长度和路由长度决定,计算公式为:

区域余量= 
$$\frac{\text{海底光缆长度}}{\text{路由长度}} - 1$$

每个大区域的余量即每个中继段的区域余量由海底光缆长度决定,通常每段约为 3%。而每个中继段海底光缆长度近 100 km,海床的起伏在如此长的距离中不可能平稳和规律,如按照平均 3% 的区域余量敷设不可能满足施工精度要求,在坡度剧烈变化的海底甚至不能顺利完成敷设。因此,一般在施工前将海底坡度比较平均的区域分成小区段,通过人工计算恒定的区域余量,区段越小,余量控制越精确。但人工计算有其局限性:①所有数据都在施工前计算完成,施工过程中必须按照严格设计执行,一旦出现变化,后期必须重新计算;②在海底地形变化剧烈区域或施工船加(减)速区域,计算量很大,计算频次和重新计算的成本很高。

传统的人工计算已无法满足施工精度要求,而应用控制软件辅助计算即可较容易地解决这个问题。控制软件在导入带有区域余量的海底光缆路由位置表和水深数据后,可自由设定区段的分割,在海底地形变化剧烈区域或施工船加(减)速区域,可设置很短的区段,通过调整每个区段的底部余量来匹配该大区域的设计余量,随后通过设定的底部

余量调整适合的释放余量,施工精度不会因海底地形或施工船速度的变化而降低。

1.1.2 底部余量

底部余量由海底光缆长度和海床底部长度决定,计算公式为:

$$\text{底部余量} = \frac{\text{海底光缆长度}}{\text{海床底部长度}} - 1$$

为使海底光缆紧密贴合海床且有一定的底部余量,海底光缆长度须大于海床底部长度,因此前期的路由调查工作十分重要。

海底光缆敷设施工的目标是将底部余量控制在很小的正值(由于海底坡度起伏,底部余量一定小于区域余量),这样既能保证海底光缆与海床的紧密贴合,又能最大限度地节约海底光缆。应用控制软件计算可基于底部余量的调整来匹配设计的区域余量。

1.1.3 释放余量

释放余量的计算公式为:

$$\text{释放余量} = \frac{\text{敷设海底光缆速度} - \text{施工船速度}}{\text{施工船速度}}$$

释放余量是最直接的控制参数,在施工中须根据地形、缆型和船速不断调整释放余量,使底部余量与预想值相匹配。

1.2 余量控制的实现机制

1.2.1 必要条件

实现精确的余量控制须具备 4 个条件:①根据海底光缆路由的水深、海底地形、底部余量和施工船速度,计算释放余量;②根据海底光缆的直径、水中重量和拖拽系数(可通过水动力常数换算得出),计算海底光缆的下沉速度,从而根据预设的底部余量推导释放余量;③通过卫星定位导入海底光缆入水点的实时位置,根据经、纬度的变化实时计算施工船的速度和方向;④根据海底光缆实时长度计算布缆速度,再根据海底地形、海底光缆参数、施工船速度和海底光缆实时长度计算海底光缆的水中形状和触底点等。

这些必要条件都是人工计算无法精确实现的,须应用控制软件计算。

1.2.2 匀速状态下释放余量的改变

匀速状态是当海底光缆入水角和施工船速度

都达到稳定数值后,施工船和海底光缆的状态,其与海底光缆入水角、施工船速度和海底光缆参数有关。由于海底光缆由海面沉入海底需要时间,施工船并不是在海底地形变化点的正上方马上改变释放余量,而是经过一段时间再改变。

当海底光缆触底点到达海底下坡的顶端时,应适当增加释放余量,以保证其底部余量足够。当水深增加时,由于海底光缆比在浅水区有更多的“悬空”部分,其张力会增加,并与水深成线性变化。若此时释放余量不足,会使本该触底的海底光缆“悬空”,从而使其张力大于理论值,因此应提高敷设速度(图 2)。

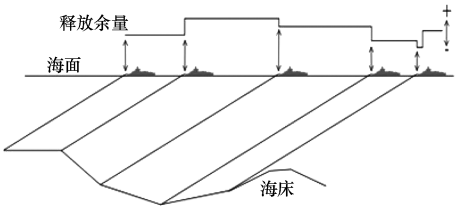


图 2 海底下坡敷设光缆

当海底地形为上坡时,应适当减少释放余量,以避免海底光缆堆积。尤其要注意的是,当海底光缆的入水角小于上坡的倾斜角时,如施工船不减速,无论如何控制释放余量,也不能使海底光缆完全贴合海床,即出现海底光缆“悬空”的现象(图 3)。

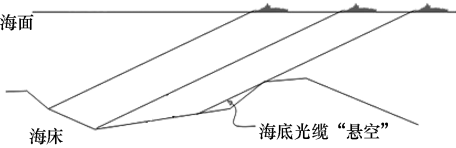


图 3 海底上坡敷设光缆

影响海底光缆入水角的因素在于其参数和施工船速度,船速越高入水角越小,因此上坡时施工船应减速至合适值,同时通过控制释放余量来完成施工目标。

海底光缆触底点的确定、施工船减速的时机和数值、施工船减速后加速的时机以及上、下坡释放余量的变化等都需要精确的计算。由于海底地形复杂多变,人工计算只能考虑起伏较大的坡段,考虑每个细小坡度变化点的计算量是巨大的,也是不

可能实现的。

1.2.3 变速状态下释放余量的改变

在施工过程中,施工船的加、减速不可避免。施工船从匀速状态下减速再加速,在保持底部余量为定值的条件下,释放余量必须改变。

施工船从快速匀速,减速到接近静止的匀速,又加速到快速匀速时,海底光缆的形状变化如图 4 所示。

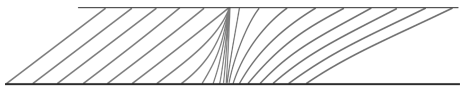


图 4 海底光缆的形状随施工船速度的变化

由图 4 可以看出,海底光缆的入水角随施工船速度的降低而变大,此时需极大地增加释放余量。由于施工船已减速而海底光缆触底点前进的速度还没来得及降低,海底光缆的瞬时速度可能是施工船速度的几倍,如此时释放余量不够,即会出现底部张力过大的情况。施工船速度提高时,为避免海底光缆堆积,释放余量会出现负值,这是正常现象。

施工船每次加、减速都需有规划的计算,施工船速度可以很快降低,但布缆机减速需要更长的时间。此外,在施工过程中,天气变化和突发状况等都会让施工船意外地加、减速,须不断修正海底光缆上缆标和计长器的误差,才能避免误差累积至不可控的状态。每次修正都需调整底部余量的敷设策略,而每次策略调整都会改变后续施工计划,如果仍然强行执行既定计划,则很难保证施工质量。然而每次改变施工计划都会产生巨大的人工计算成本,面对不断的微调,不断改变施工计划是不切实际的,因此通常是当误差积累到某个临界值后再进行一次重新计算。但施工船意外的加、减速是不可能精确计算的,因此传统的做法在细节上很难保证施工质量。

控制软件应运而生。通过应用控制软件,可根据海底地形、海底光缆参数、施工船速度、海底光缆长度和洋流情况等计算合适的释放余量,并能根据敷设的实际情况精确定位海底光缆的触底点;尤其是在施工船速度变化或海底坡度剧烈变化时,可根据海底光缆长度计算合适的释放余量以及根据施

工船速度计算布缆速度,并能通过 3D 模拟直观显示(图 4)。在精细化施工计划的同时,在发生意外变化时,应用控制软件可实时地重新计算,不但大大减少人工计算量,而且大大提高施工质量。

1.3 转向点的控制

海底光缆路由上不可避免地存在转向点,施工船在转向点如完全按照海底光缆路由方向航行,海底光缆的实际触底点会出现一定的偏移,且偏移量会随着水深的增加而增大。而控制软件具有预判机制,在接近转向点时会根据设计的船速勾勒出海底光缆实际触底点的位置,可通过调整航向和航速等数据,使控制软件预判各种情况下的触底点,可在施工船未到达转向点时即合理规划航行路线和速度,使海底光缆的实际触底点更加接近路由。

2 控制软件的操作流程

2.1 前期工作

应用控制软件的前期工作主要包括 3 个步骤。

(1)导入路由调查数据,这样控制软件才能根据海底地形控制释放余量,路由调查数据应覆盖海底光缆路由线路左右各 50 m 的宽度。

(2)导入整个施工线路的海底光缆路由位置表,必要的数据包括关键点位的经、纬度坐标,海底光缆缆型参数,海中设备(如中继器、接头盒和均衡器等)参数以及海中设备对应位置的海底光缆长度。

(3)根据转向点、海底地形变化大的点和默认海底光缆缆型,计算初始敷设计划。此时需考虑海中设备(如中继器)的布放速度,应根据经验制订粗略的提前减速计划(此步骤可省略,但为较精确地计算工期,建议保留执行)。

2.2 敷设工作

深海海底光缆敷设施工的全部工作都基于前期导入的海底光缆路由位置表,因此该步骤是重中之重,一定要反复检查。

控制软件的核心在于其计算功能。最初软件会根据粗略的初始敷设计划导入指令,需要说明的是,这个指令不宜直接套用,因为此时起点登陆使用的海底光缆长度和施工船的位置都可能与理想值有差异,需通过控制软件重新计算,即通过软件的预判机制计算一段时间后海底光缆的状态(包括



底部余量和张力等),以辅助判断。

此后,通过不断调整底部余量,使控制软件计算与理想值相对应的布缆速度。调整底部余量的目的是匹配制造海底光缆时设定的区域余量。在施工过程中,施工船需在必要时加速或减速,为使底部余量保持稳定,须控制释放余量。

需要注意的是,在布放接头盒和中继器时,应将海底光缆的入水角调到很大至几乎垂直,并降低施工船速度。这是因为在布放中继器或接头盒时,海底光缆速度会很慢,如果此时海底光缆的入水角很小,即使施工船速度和海底光缆速度相同或保持一定的释放余量,也会不可避免地产生底部张力。在施工过程中,还需关注海底光缆长度与计长器的误差,发现误差须及时修正,一旦出现较大的累积误差,将导致中继器定位不准和登陆长度不可控等问题。

此外,控制软件还支持对施工过程的实时监控,并以此调整施工计划,与传统的施工前计划但施工中无法调整相比,具有巨大的优势。

3 结语

余量控制是深海海底光缆敷设施工中最关键的核心技术环节。本研究介绍深海海底光缆敷设余量控制的原理和方法,通过应用控制软件解决余量控制和海中设备定位等问题。应用控制软件计算的精确度远高于人工计算,可极大地提高施工质量,并极大地降低海底光缆敷设施工难度。

参考文献

[1] 董秀春.海底光缆敷设余量设计[J].海缆技术,2010(1):40—46.  
[2] 叶银灿,姜新民,潘国富,等.海底光缆工程[M].北京:海洋出版社,2015.



(上接第 89 页内容)

参考文献

[1] 张震,唐伟,段康泓,等.海洋石油天然气管道保护条例立法问题探究[J].海洋开发与管理,2015,32(9):40—44.  
[2] 詹燕民,李毅,朱友生.海底管道电缆管理及预警系统研究与应用[J].工程勘察,2015(8):68—73.  
[3] 严天赦,孟宪阔,孟祥勇.交叉海底管道探测方法研究[J].港口技术,2017,54(3):108—112.  
[4] 卢燕,潘婷.电缆探测技术在平台周边海底管道的研究[J].科技创新导报,2017(15):58—59.  
[5] 马平,刘晓建.海底管道交越光电缆软体排铺设后的工程测量[J].施工技术,2012,41(增刊):369—371.

[6] 谭萌,王金磊,杨丽芬,等.基于 World Wind Java 的海底电缆管道业务管理信息系统设计与实现[J].海岸工程,2015,34(2):81—88.  
[7] 郑春生.胜利埕岛油田海底电力电缆故障类型与原因分析[J].事故分析与预防,2016,16(2):6—10.  
[8] 赵会群,孙晶.一种 SOA 软件系统可信性评价方法研究[J].计算机学报,2010,33(11):2202—2210.  
[9] PANE E S, SARNO R. Capability maturity model integration (CMMI) for optimizing object-oriented analysis and design (OOAD)[J]. Procedia Computer Science, 2015, 72: 40—48.  
[10] 刘亮,霍剑青,郭玉刚,等.基于 MVC 的通用型模式的设计与实现[J].中国科学技术大学学报,2010,40(6):635—639.