

一种海底电缆捆绑绕包机的研制

包善军¹,董益军¹,张志刚¹,丁兆冈¹,陶海成²,王浩²

(1. 国网浙江省电力有限公司 舟山供电公司, 浙江 舟山 316000;

2. 必维(天津)安全技术有限公司, 天津 300061)

摘要:针对大直径高压直流海底电缆并列敷设时人工捆绑效率低、质量差的问题,从改变原有的捆绑方式出发,研制了一种海底电缆捆绑绕包机。考虑海底电缆捆绑绕包机的适应性和扩展性,采用模块化设计的方法,进行海底电缆捆绑绕包机的结构设计。目前已研制出海底电缆捆绑绕包机样机并进行了海上试验,试验结果表明:该设备能够实现同步敷设两条海底电缆时的自动绕包,提高了敷设效率,降低了施工人员的劳动强度。

关键词:海底电缆;捆绑施工;绕包机

中图分类号:TM205 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19815

Development of a Binding and Winding Machine for Submarine Power Cables

BAO Shanjun¹, DONG Yijun¹, ZHANG Zhigang¹, DING Zhaogang¹, TAO Haicheng², WANG Hao²

(1. Zhoushan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.,

Zhoushan 316000, Zhejiang, China; 2. Bureau Veritas (Tianjin)

Safety Technology Co., Ltd., Tianjin 300061, China)

Abstract: The diameter of HVDC submarine power cable is very large which leads to the low efficiency and poor quality of manual bundling when laying two submarine power cables simultaneously. A submarine power cable bundling machine was developed from changing the mode of original bundling mode. Considering the adaptability and extensibility, modular design was used to the structure design of the submarine power cable bundling machine. A prototype of the bundling machine was manufactured, and sea trial was carried out. The trial result shows that the machine can achieve automatic bundling when laying two submarine power cables, improve the laying efficiency, reduce the labor intensity simultaneously.

Key words: submarine power cable; bundling installation; bundling machine

高压直流海底电缆在海洋开发、长距离输电、跨区域组网过程中承担着重要作用^[1],施工时一般采用两条电缆捆绑的方式敷设^[2],该施工方式能够减少工作量,降低项目成本,缩短海缆施工的工期,但施工时需要在海缆入水前相互靠拢,用捆绑带对其进行捆绑,然后同时敷设埋地。若在施工时采用人工捆绑方式,则捆绑效率低下,且不能保证捆绑质量,因此开展了海缆捆绑绕包机相关研究,并研制了海缆捆绑绕包机样机,用于高压直流海缆捆绑式施工。

1 理论分析

海缆捆绑绕包机主要用于两根海底电缆同步

敷设时的捆绑式绕包,其原理是在海缆敷设的同时,装有捆绑绕包线或绕包带的绕包装置以一定转速沿中心线回转从而完成绕包功能^[3]。本文以±500 kV直流海底电缆为例对海缆捆绑施工装备进行研究,海缆外径193.8 mm,单位重量90 kg/m。

1.1 绕包节距分析

海底电缆绕包节距,即单根捆绑带沿电缆旋转一周前进的距离^[4]。考虑到捆绑的目的是防止海缆各自分开放入海底,同时不影响海缆敷设时的弯曲刚度,且要便于以后单条海缆维修,因此捆绑节距不宜过小;但捆绑节距过大将使绕包带所受拉力大于其最大抗拉强度,导致捆绑后的海缆散开,影响海缆敷设后的埋设施工,因此捆绑

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211ZS1600NQ)

作者简介:包善军(1972—),男,硕士,工程师,Email:3112165270@qq.com

节距也不宜过大。参考目前海缆捆绑施工项目经验,单条捆绑带的绕包节距为2~4倍海缆直径,为了不影响海缆敷设时的弯曲刚度,宜采用间隙绕包方式。

1.2 绕包转速分析

海缆敷设速度一般为20~30 m/min,不同敷设速度下不同绕包节距所需绕包机转速如表1所示。

表1 不同绕包节距所需绕包机转速
Tab.1 Rotating speed of bundling machine for different bundling pitch

绕包节距/m	绕包机转速/(r·min ⁻¹)	
	敷设速度 20 m/min	敷设速度 30 m/min
0.4	50.0	75.0
0.8	25.0	37.5
1.0	20.0	30.0

由表1可见在敷设速度为30 m/min时,如果需要绕包节距为0.4 m,则绕包机转速需要达到75 r/min,考虑2倍系数,绕包机设计最大转速取为150 r/min,且绕包转速需在一定范围内可调,以满足敷设工艺绕包节距的要求。

1.3 传动功率分析

1.3.1 理论传动功率

绕包机包带盘采用双盘Φ=800 mm,最大带盘张力F=300 N,最大转速V=150 r/min。带盘最外侧所在回转直径为D=2 120 mm=2.12 m。

理论旋转功率:

$$P_i = F \times D \times V / 9\ 550$$

$$= 300 \times 2.12 \times 150 / 9\ 550 = 9.989\ \text{kW}$$

1.3.2 传动效率

齿轮减速器传动效率η₁=0.92;同步齿形带传动效率:η₂=0.80;轴承传动效率:η₃=0.90;总传动效率:η=η₁×η₂×η₃=0.92×0.80×0.90=0.662 4;实际所需传动功率:P=P_i/η=9.989/0.662 4=15.08 kW。

考虑到交流变频电机在低速时不能满功率输出,所以选用电机功率P=18.5 kW。

1.3.3 传动速度

按施工时绕包最大转速要求n_{max}=150 r/min计算。电机转速:n₁=1 500 r/min;齿轮减速器速比:V₁=1/3;同步带传动速比:V₂=Z₁/Z₂=64/214;实际转速:n_{max}=n₁×V₁×V₂=1 500×1/3×64/214≈150 r/min。能够满足施工工艺要求。

1.4 捆绑带受力分析

为了保证捆绑后的海缆在敷设过程中不散

开,需要保证捆绑带能够承受足够的张力,因此需要对捆绑带受力进行分析,以便确定捆绑带的参数。

作业条件:

- 1) 环境温度:-20~45℃
- 2) 相对湿度:95%
- 3) 水深:150 m
- 4) 作业风速:6级
- 5) 海流速度:1.54 m/s(3节)
- 6) 波浪高度:1.5 m

计算时考虑最不利情况下捆绑带受力。根据Morison公式^[5],海缆沿流向所受的水动力为

$$q = q_D + q_I = C_D \rho \frac{D}{2} |u|u + C_M \rho \pi \frac{D^4}{4} \dot{u} \quad (1)$$

式中:q_D为海缆所受的拖曳力;q_I为海缆所受的惯性力;C_D为黏性阻力系数,它与雷诺数R_e相关,在R_e=1 000~20 000范围内,近似取C_D=1;C_M为惯性力系数;D为海缆直径;ρ为海水密度,u为来流速度;đ为流体加速度。

海缆在海面附近所受波浪力和海流力最大,同时考虑海缆加速度,计算得到该处单位长度海缆捆绑带受力为225.92 N,不同捆绑节距时单条捆绑带受力如表2所示。

表2 捆绑带受力

Tab.2 Force of bundling tape

单条捆绑带节距/m	单条捆绑带受力/N
0.4	23.77
0.8	54.39
1.0	73.73

目前有两种捆绑胶带供备选,如表3所示。

表3 捆绑带参数

Tab.3 Parameters of bundling tape

参数	带宽/mm	厚度/mm	抗拉强度/N	粘着力/N
胶带1	48	0.16	≥1 000	≥20
胶带2	48	0.16	≥700	≥16

HG/T 3949—2016《美纹纸压敏胶黏带》中规定拉伸强度≥3 000 N/m^[6],换算成宽度48 mm时的拉伸力为144 N。两种捆绑胶带均能满足要求。

2 捆绑绕包机设计

2.1 设备功能

海缆捆绑绕包机整体结构设计采用两盘切

线式对称绕包形式,卧式水平结构布置,左进右出(右手机)。主传动部分由变频电机减速器通过同步带驱动中心轴转动,中心轴带动绕包装置沿中心线回转从而完成绕包功能。

绕包捆扎密度可根据海缆的现场敷设速度通过调节电机转速进行调节。整个回转体采用气包式刹车盘装置实施制动,停车制动与整条生产线联动。带盘部分结构采用切线式,两组带盘通过回转体上的支撑上下前后可调节。张力部分采用机械摩擦形式,通过机械张力反馈可实现包带从满盘至空盘的恒张力放带,放带张力可手动调节,可以实现捆绑张力恒定。

2.2 设备参数

根据设计要求和理论分析确定的海缆捆绑式绕包机主要参数如下:

- 1) 包带盘尺寸: $\Phi 800 \times \Phi 80$ mm
- 2) 带盘数量:2盘
- 3) 包带张力:1 000~3 000 N
- 4) 过线孔径: $\Phi 600$ mm
- 5) 转动体转速:150 r/min(最大)
- 6) 包带节距:无极可调
- 7) 包带厚度:0.16 mm
- 8) 包带宽度:48 mm
- 9) 包带材料:高强度纤维带
- 10) 电机功率:18.5 kW(AC)
- 11) 中心高度:1 000~1 200 mm 可调

2.3 设备组成

2.3.1 捆绑绕包机主机

捆绑绕包机的绕包头采用整体焊接框架箱体,中心高度为1 000~1 200 mm,可通过底部4组升降调节系统根据现场情况任意调节。

转动部分由变频电机通过同步带带动中心主轴传动部分实施转动,转动速度根据现场海缆直径、包带节距、包带宽度及海缆运动速度通过变频调速装置进行增、减速调节跟踪,根据现场情况达到捆扎密度要求。

刹车部分考虑到绕包旋转体直径大、转速高,在实施正常停车和紧急停车过程中有一定的惯性,所以在中心旋转主轴背面配有盘式制动轮,通过气包式刹车装置实施制动,与整机控制部分实施联动,正常停车8 s,紧急停车3 s。

带盘部分结构采用切线式,两组带盘可通过回转体上的支撑上下前后调节、可根据带宽来调节切带角度。

张力部分采用机械摩擦形式,在带盘中心部位设置张力摩擦盘,由专用摩擦带通过弹簧压力实施调节,实现张力,在高速运转时带上张力始终保持稳定,达到捆绑紧实的目的。绕包机可实现无限长度绕包,当一个包带盘用完后,断带保护自动停车,人工换上新的包带盘,提高工作效率^[7]。

海缆捆绑绕包机布置如图1所示。

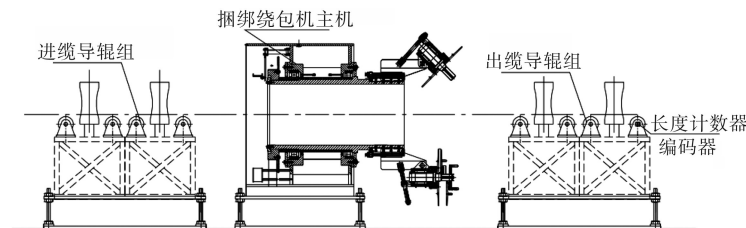


图1 海缆捆绑绕包机布置图

Fig.1 The layout of the submarine power cable bundling machine

2.3.2 进出缆滚轮式托架

进出缆滚轮式托架整体底架采用矩形方管焊接,受力为1 000 kg,底部采用4组滑轮带定位锁紧功能。滚动轮安装在平台表面,表面采用镀铬处理,防止线缆划伤。表面采用4组滚轮,两侧面采用8组防侧滑立式滚轮,可以根据电缆直径任意调节宽度,进缆口可调成喇叭型,使两根海缆通过托架进入模口时自然成形,便于捆绑。

2.3.3 主调速系统

主调速装置通过西门子S7-200-2BD PLC,以RS485通讯与FC302变频器连接来控制变频电机的转动速度和转动力矩,调节绕包带的节距,可以避免用模拟量和数字量组合的方式控制变频器时模拟量在数模或模数转换过程中的精度损失,且绕包机节距的可调范围更大。

通过安装在出缆导辊组中的编码器实时采集海缆敷设线速度,绕包机根据实时线速度和设

定的节距,通过PLC计算出FC302变频器的转速,由通讯系统传输到相应的变频器,调节绕包转速与敷设速度的比例,从而保持绕包带节距稳定,以达到敷设工艺要求。

调速装置考虑到敷设启动前的低速调节直到正常速度过程中的低频正常运转,此功能由低速运转到高速运转中有稳定力矩作用,在大张力的情况下保持很大的张力转矩,此调速系统能保证低速大转矩运转功能,具有正、反转调速功能。

主调速系统电路图如图2所示。

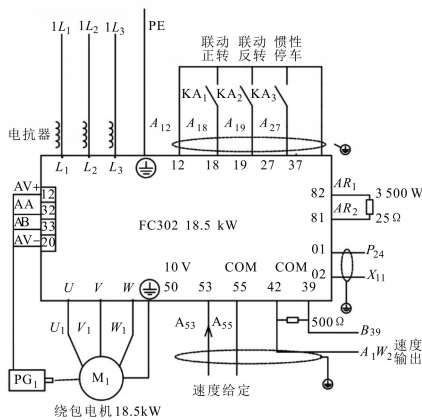


图2 主调速系统电路图

Fig.2 Circuit diagram of main speed control system

2.3.4 整机控制智能电脑系统

整机采用西门子PLC智能模块集中采集数据统一协调控制运行^[8],采用触摸屏作为人机操作界面。根据海缆捆绑绕包工艺流程,设计了系

统控制软件,其流程图如图3所示。

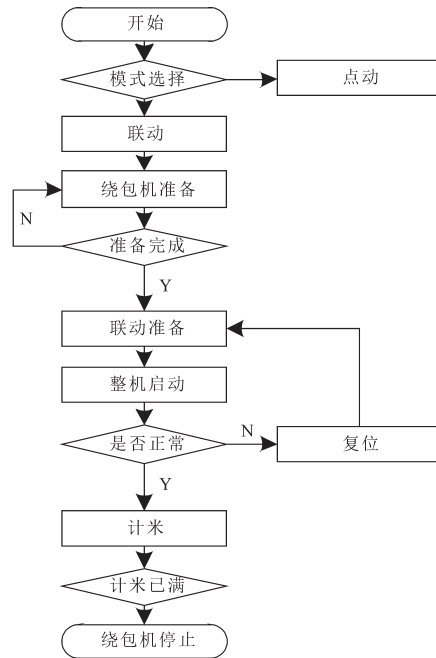


图3 软件控制流程图

Fig.3 Software control flow chart

整机具有点动、联动功能。点动模式下,长按操作面板上的本控点动按钮,绕包机正常启动,主机启动指示灯亮,按停止按钮正常停机。联动模式下按下启动按钮,绕包机组进入准备状态,等待整机启动命令,准备就绪后,长按启动按钮,海缆转盘、绕包机启动运行,直至计米已满,绕包机降速停机。整机控制智能电脑系统电路图如图4所示。

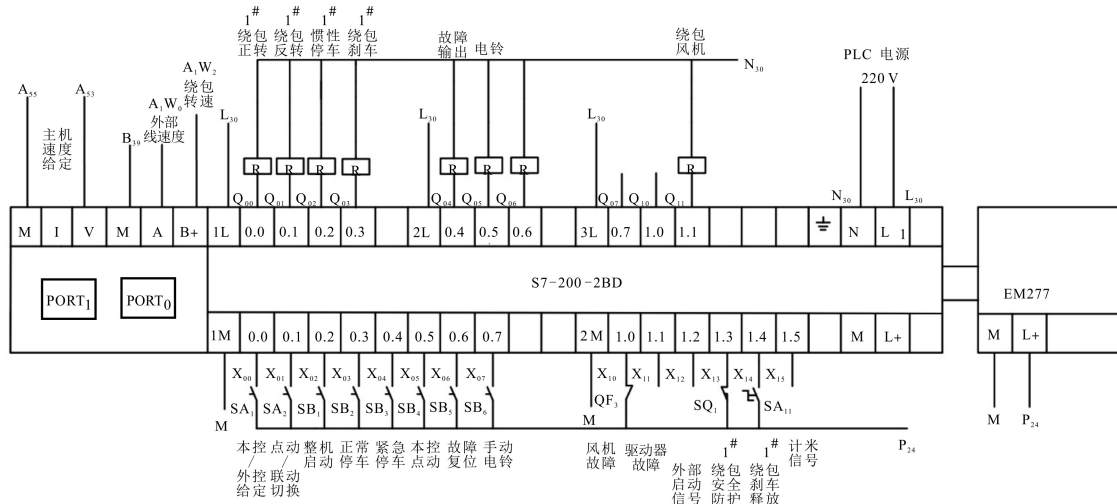


图4 控制系统电路图

Fig.4 Circuit diagram of control system

各工作区设立故障报警^[9]、设备运行示意动态图显示转速、米数、时间等各种参数,具有工艺参数记忆功能,在相同规格电缆的使用情况下,可从历史菜单调出工艺参数,无需反复设定。

PLC智能模块具有通讯及以太网接口,可与敷设工程的中央操作室连接并交换数据,实施远程监控、采集现场数据。

2.3.5 安全防护装置

钢性防护网采用厚壁方管制成固定式框架,由1 mm的冲压网板实施封隔,实现绕包机的半封闭状态,使人机隔离,安全可靠。

考虑到该机在海上作业,周围环境复杂且受环境因素影响较大,设备操作空间小且设备密度大,钢性防护网的防护范围有限,所以增加红外线隔离防护装置,在绕包旋转体的可控范围之内形成防护光网(光网范围可根据实际场地调整),任何人员或物体触碰光网会引起设备的紧急停车,此装置与智能控制系统联网,启停时自动开关提高设备安全防护功能。

3 样机试制与海上试验

根据理论分析和捆绑绕包机设计进行了海缆捆绑绕包机样机的试制。

依据《海洋仪器海上试验规范》^[10]对海缆捆绑绕包机样机进行了海上试验,试验时气温26~34℃,风力3~4级。试验结果表明本海缆捆绑绕包机能够实现海缆并列敷设时的自动绕包,大大提高了海缆捆绑绕包效率;海缆捆绑时所需工作人员由6~8人降低至1~2人,节省了人力、物力,并且降低了工作人员的劳动强度;捆绑绕包机可实现海缆连续捆绑绕包,提高了捆绑质量。

但在海试过程中,变频电机在低频段的速度与频率不成比例,在绕包机刚启动时转矩较大,电机的转速和频率线性不好,绕包节距稳定性较差,现场通过对绕包机启动时的转速特性进行测量,然后通过程序进行速度补偿,对绕包机启动时的转速进行校准,使绕包机转速从低频到高频转换过程中保持良好的线性关系,从而保证海缆捆绑绕包节距稳定,保证绕包质量满足海缆敷设工艺要求。

4 结论

本文从改变原有海缆并列施工捆绑模式出

发,采用模块化设计方法,对海缆捆绑绕包机进行了理论分析和结构设计。目前已制造出国内首台海缆捆绑绕包机样机并进行了海上试验,试验使用效果良好。

1)本海缆捆绑绕包机适用最大单根电缆直径达到250 mm,设备中心高度可在1 000~1 200 mm之间无级调节,适用范围广;

2)绕包机仅需1~2人操作,提高了海缆捆绑绕包效率,节省了人力、物力,并且降低了工作人员的劳动强度;

3)绕包机可实现无限长度绕包,当一个包带盘用完后,断带保护自动停车,人工换上新的包带盘,提高了工作效率;

4)绕包带采用自带粘性的聚脂类包带材料,以保证发生断带或完带时已绕包完成的部分不会松带。

参考文献

- [1] Ventikos NP. Submarine Power Cables: Laying Procedure, the Fleet and Reliability Analysis[J]. Journal of Marine Engineering and Technology, 2013, 12(1): 13-26.
- [2] Worzyk Thomas. Submarine Power Cables Design, Installation, Repair, Environmental Aspects[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [3] Stern E, Nash-Neptune RTS J, Schoeniger C, et al. The Neptune Regional Transmission System 500 kV HVDC Project [R]. B4-118, Paris: CIGRE, 2008: 4-5.
- [4] 龚永超,何旭涛,孙建生,等. 高压海底电力电缆铠装的设计和选型[J]. 电线电缆, 2011, 39(5): 19-22.
- [5] 刘世龙. 浅水/深水管道路铺设安装力学相关问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. HG/T 3949—2016. 美纹纸压敏胶黏带[S]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [7] 毕佳,孙文斌. 一种新型的电缆绕包设备[J]. 中国科技信息. 2017, 28(21): 63-64.
- [8] Kim Yong-Seok, Yang Soon-Yong. Development of an Automatic Vegetable Bundling Machine Using Thermal Bonding [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 22(23): 3366-3373.
- [9] IX-CEN. EN ISO 13849—1—2015. Safety of Machinery — Safety-Related Parts of Control Systems—Part 1: General Principles for Design[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2015.
- [10] 国家海洋局. HY/T 141—2011. 海洋仪器海上试验规范[S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.

收稿日期: 2018-12-28

修改稿日期: 2019-02-19