

GIL 运输专用机具行走机构设计型式研究

韩先才¹,熊织明²,高亚平³,范江波⁴,宋帅⁴,毕涛³,王丹⁴,米勇⁴

(1. 国家电网有限公司,北京 100031; 2. 国家电网公司 交流建设分公司,北京 100052;

3. 江苏省送变电有限公司,江苏 南京 210037; 4. 太原重工股份有限公司,山西 太原 030024)

摘 要:GIL 运输专用机具作为苏通 GIL 综合管廊工程 GIL 设备安装工程的关键施工装备,其行走机构的设计型式将直接决定着整机研制的技术路线。结合苏通 GIL 综合管廊工程的工程特点,通过对轨道式(双轨)、轮胎式(无轨)、轮胎式(单轨)3 种技术方案的深入研究和全面比选,给出了 3 种技术方案的优缺点,得出了选取轨道式(双轨)技术方案作为 GIL 运输专用机具的结论。

关键词:GIL 运输专用机具;行走机构;轨道;车轮

中图分类号:TM7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)04-0176-04

Research on Design Pattern of Special Machinery Travel Mechanism for GIL Transportation

HAN Xiancai¹, XIONG Zhiming², GAO Yaping³, FAN Jiangbo⁴, SONG Shuai⁴, BI Tao³, WANG Dan⁴, MI Yong⁴

(1. State Grid Co., Ltd., Beijing 100031, China;

2. Engineering management department, State Grid Co., Ltd., Beijing 100052, China;

3. Jiangsu Diversion Co., Ltd., Nanjing 210037, China; 4. Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

Abstract: The special transport equipment for GIL transportation is used as the key construction equipment in the GIL equipment installation of the Sutong GIL comprehensive pipe corridor project. Its design directly determines the technical route of the whole machine. In this paper, according to the engineering characteristics of Sutong GIL comprehensive pipe corridor project and through in-depth study and comprehensive comparison of three technical schemes of track type (double track), tyre type (trackless) and tire type (monorail), their advantages and disadvantages are given out, and it comes to the conclusion that the track type (double track) technical scheme can be selected for the special equipment for GIL transportation.

Keywords: special transportation for GIL; moving mechanism; track; wheel

0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated metal-enclosed transmission line, GIL)是一种采用六氟化硫(SF₆)气体或其他惰性气体作为绝缘介质,外壳与导体同轴布置的高电压、大电流、长距离电力传输设备,具有输电容量大、损耗小、运行可靠性高等显著优点,尤其适合作为架空输电方式或电缆送电受限情况下的补充输电技术。

苏通 GIL 综合管廊工程是世界上首次在重要输电通道中采用特高压 GIL 输电技术的项目,建成后将贯穿皖、苏、浙、沪的华东特高压电网使其合环运行。

苏通 GIL 综合管廊全长约 5.6 km,预留运输空间为 4 m×4.75 m(宽×高)。为适应长江底部地层复杂、河势多变的特点,管廊设计有着多种坡度与转角,其最大坡度为 5%。管廊内敷设两回路 1000 kV GIL 线路,单相长度达 5.8 km,6 相总长约 35 km。工程建设期间需将约 2000 段各类 GIL 单元设备由南岸苏州引接站、北岸南通引接站分别运输至管廊内部。GIL 单元单体最大长度约 18 m,最大质量约 5.1 t,运输过程中其加速度要求≤3 g。为便于 GIL 单元设备对接安装,运输机具对 GIL 预就位有着较高的定

位精度要求。同时根据电力施工安全规范要求,管廊内部运输机具的行驶速度≤5 km/h。

苏通 GIL 运输专用机具正是为了适应 GIL 综合管廊工程长距离、大坡度、多变径的作业环境,保证安全、可靠、高效完成 GIL 设备运输及预就位任务而研制的。GIL 运输专用机具长约 22.5 m,设计时速为 5 km/h。考虑到 1000 kV 特高压 GIL 较为苛刻的安装环境要求以及机具在管廊内部需长时间运行,故采用动力锂电池作为动力源,不仅可以实现同时一次运输 3 相 GIL 单元,又可以将已就位的单相 GIL 单元移出和复位。结合苏通 GIL 综合管廊工程特点,综合考虑管廊内部运输空间尺寸、引接站辅助起重机额定载荷、机械结构设计强度等因素,机具创新性地采用前后两个半车设计型式,半车间采用铰接形式。每个半车设计为 4 组车轮,组成半车行走机构。行走机构是机具在管廊内移动的关键机构,其结构型式的选择尤为重要。

基于当前成熟的技术路线,经多方调研、反复讨论、详细设计,最终确立了以轨道式(双轨)方案、轮胎式(无轨)方案、轮胎式(单轨)方案为方向的研究路线,全面开展了机具行走机构设计型式的比选。

1 GIL 运输专用机具行走机构方案

1.1 轨道式(双轨)方案

轨道式(双轨)方案是一种采用轮轨式技术路线的设计方案。此方案要求管廊在全线贯通后,沿管廊中心线敷设 2 根对称钢轨。根据 GIL 运输专用机具整机设计自重及载荷分布分析得出其最大设计轮压为 $\leq 120 \text{ kN}$,同时结合其最高运行速度 5 km/h 的要求,可选取规格为 24 kg/m 以上的钢轨,但综合考虑成熟的轨道施工技术 with 轨道扣件辅材,最终确认采用 50 kg/m 钢轨。依据管廊截面整体设计方案、管廊地面中心线消防通道开孔位置,确定轨道设计轨距为 2 m 。

前、后半车行走机构各设计有 4 个车轮,车轮采用圆柱踏面单轮缘钢制车轮,轮缘位于轨道内侧,如图 1 所示。钢制车轮可长时间连续运行。机具在管廊内行走时,由于轮轨间的相互作用,机具会沿着轨道敷设的既定方向运行。由于轨道敷设精度较高,这样就使得 GIL 运输专用机具完美适应了综合管廊“多变径”的环境要求。

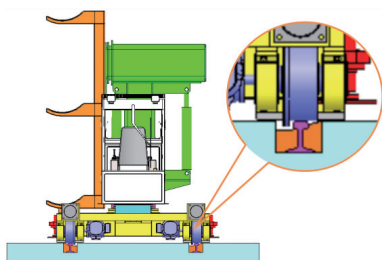


图 1 轨道式(双轨)方案示意图

在轨道式(双轨)方案中,由于钢制车轮结构非常紧凑,故行走机构驱动系统可采用体积相对较大(相比于液压马达而言)的电动机驱动。这种选择是基于整机采用动力锂电池作为动力源,采用电动机驱动,能量传递环节少,效率高,并且可利用电动机制动过程中的能量反馈为动力电池进行充电,增加整机的续航能力。电动机控制采用成熟可靠的变频调速技术,可实现无极调速,且电动机转矩动态响应快,稳速精度高,车辆运行平稳。

行走机构制动系统利用电动机制动运行原理与机械制动原理相结合。在机具以额定车速行走时,采取正常制动措施,系统首先进入电制动减速过程,这一过程中可将车速降低至额定车速的 $6\% \sim 10\%$ 。电制动过程结束后为机械制动停止过程,依靠机械制动器将低速行走的行走机构制动抱死。制动系统采用选用的机械制动器是常闭式、双直流线圈、电磁盘式制动器,通电时依靠电磁力释放,断电时依靠弹簧力制动。制动器结构简单,安全可靠。

1.2 轮胎式(无轨)方案

轮胎式(无轨)方案是一种采用实心橡胶轮胎带油气悬挂系统,外加独立转向技术的设计方案。此方案中,管廊内无需铺设轨道,可有效节省土建施工周期,降低土建施工造价。

前、后车行走机构各设计有 4 个实心橡胶轮组,根据整机设计轮压、最高行走速度以及整机设计尺寸,每个轮组由 2 个实心橡胶轮胎组成,如图 2 所示。

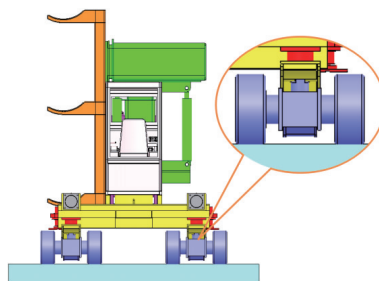


图 2 轮胎式(无轨)方案示意图

根据 GB/T 16622《压配式实心轮胎规格、尺寸与负荷》中的规定:用于间歇作业,单个作业行程最大距离为 2000 m 。若需要更长距离作业或用于翻转机械轮胎时,应与制造厂协商。通过与轮胎制造厂协商,制造厂给出以下运行建议:连续作业 10 km 后需间歇 1 h ,否则将存在爆胎隐患^[1]。

轮胎式(无轨)方案中,由于实心橡胶轮组体积较大,空间上无法满足使用电动机驱动的设计空间,故行走机构驱动系统采用液压传动方式,由液压马达带动行星减速机驱动车轮。液压系统采用闭式系统,闭式液压泵由变频电机驱动,当闭式系统处于制动状态产生能量反馈时,能量可经由变频器传递给动力电池,对电池进行充电,增加整机的续航能力。但相比于轨道式(双轨)方案,轮胎式(无轨)方案的能量传递环节多,相对效率较低。

行走机构制动系统结合了多种制动原理:液压传动制动、气动鼓式制动(行车+驻车)、液压闭式驻车制动等。在正常减速过程中系统会自动降低液压泵的排量,利用液压系统的自身特性降低驱动轮组液压马达的转速,从而达到制动减速的目的。驱动轮组的行星减速机内部还带有常闭式液压制动器,依靠压力打开,弹簧制动,用于在车轮静止时制动使用,是一种驻车制动。从动轮组带有鼓式制动器,采用独立的气动回路控制。鼓式制动器机构简单,结实耐用^[2]。

轮胎式(无轨)方案中运行机构驱动系统的所有轮组都带有转向机构,可实现多种转向模式:

1) 全轮转向模式

前、后车轮转向方向相反,可以实现最小的转弯半径,如图 3 所示。

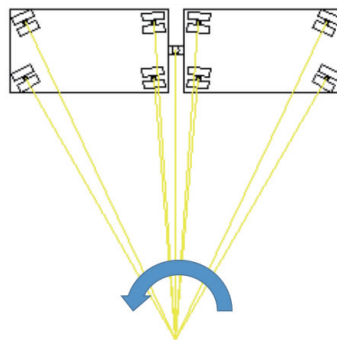


图 3 全轮转向模式示意图

2) 蟹型转向模式

所有车轮具有相同的转向角,可实现车辆侧向移动,如图 4 所示。

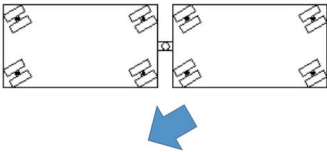


图 4 蟹型转向模式示意图

3) 前轮转向模式

以车架后方为基准进行转向,转向过程机具尾部没有摆动趋势,如图 5 所示。

4) 后轮转向模式

以车架前方为基准进行转向,转向过程机具头部没有摆动趋势,如图 6 所示。

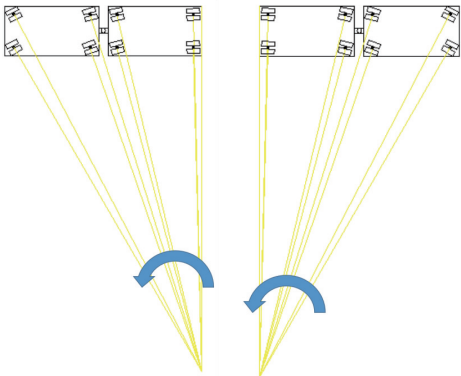


图 5 前轮转向模式示意图

图 6 后轮转向模式示意图

轮胎式(无轨)方案中每个轮组都配有独立的油气悬架。油气悬架以气体作为弹性介质,液体作为传力介质,不但具有良好的缓冲能力,还具有减震作用,同时还可以调节车架高度^[3]。其与配流系统相结合,还能起到多轴载荷平衡、增加整机侧倾刚度、克服制动前倾、调节车架高度和锁死悬架等作用。

1.3 轮胎式(单轨)方案

轮胎式(单轨)方案,是一种采用实心橡胶轮胎+油气悬挂+单轨导向技术路线的设计方案。此方案中,要求管廊初期土建施工时沿管廊中心线预先埋设一根钢轨,且钢轨两侧需要开槽,用于布置导向机构的导向轮。其行走机构的驱动系统、制动系统、悬挂系统均与轮胎式(无轨)方案相同,区别在于轮胎式(单轨)方案中实心橡胶轮组没有独立转向机构,而是利用设置在车架底部的导向机构配合轨道控制机具行进方向。每半车上设置 2 套导向机构,每套导向机构有 2 个水平导向轮,如图 7 所示。

2 方案比选

轨道式(双轨)方案是 3 个方案中结构布置最为紧凑,整体尺寸最小、整机质心最低的设计方案。其运行轨迹固定,能保证 GIL 运输专用机具行走过程中两侧的安全

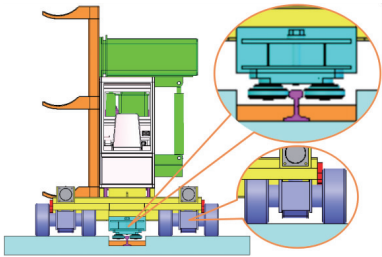


图 7 轮胎式(单轨)方案示意图

距离,有利于防碰撞、防倾覆控制。采用的钢制车轮承载能力强,不必担心轮压过大。驱动系统采用变频控制技术使得加、减速过程平稳,行走定位精度高。但轨道式(双轨)方案需要在管廊全线贯通后敷设双轨轨道,且对轨道敷设精度有要求,总体土建施工周期长,且 GIL 运输专用机具行走过程中的平稳性与轨道敷设精度有着密切关系。

轮胎式(无轨)方案无需在管廊内敷设任何轨道,是 3 个方案中总体土建施工周期最短的设计方案。其采用的实心橡胶轮胎对路面要求较低,适应性好,可避免因地面不平带来的冲击。整机适用范围广,既能在管廊内部使用,也可以在站区内使用。但轮胎式(无轨)方案是 3 个设计方案中系统构成最为复杂,故障率同比最高、整体尺寸最大、整机重心最高的设计方案。其运行轨迹不定,需要靠转向调整两侧安全距离,不利于防碰撞与防倾覆控制。实心橡胶轮胎承载能力比钢制车轮低很多,且不能长时间连续使用。制动平稳程度受限于操作者技术水平与心理素质,是 3 个方案中操作最为复杂的设计方案。

轮胎式(单轨)方案综合了上述 2 个方案优点,同时也继承了 2 个方案的缺点。其采用的橡胶轮对路面要求较低,适应性好,可避免因地面不平带来的冲击;运行轨迹固定,能保证两侧安全距离,有利于防碰撞、防倾覆控制;运行机构操作简单。但此方案要求管廊全线贯通后仍需敷设一根导向轨道,且导向轨道两侧地面需开槽,这样势必影响其他施工车辆运行;系统构成也较为复杂,故障率同比偏高;体积大、重心高;胶轮承载能力同比较低,且不能长时间使用,有爆胎隐患;制动平稳程度受制于操作者技术水平与心理素质。

综上所述,表 1 是对上述 3 种设计方案特点的归纳。

表 1 行走机构方案特点

比选项目	机构方案		
	轨道式(双轨)	轮胎式(无轨)	轮胎式(单轨)
整机尺寸	小	大	小
整机重心	低	高	中
轨道需求	2	无	1
系统构成	简单	复杂	复杂
故障率	低	高	高
操作	简单	复杂	中等
连续运行	可以	每 10 km 需休息 1 h	每 10 km 需休息 1 h
制动效果	平稳可靠	受制于操作人员	受制于操作人员

3 结语

苏通 GIL 综合管廊工程中 GIL 设备运输与预就位过程作业空间受限、作业条件复杂、安全质量要求高,经空间尺寸计算分析,GIL 运输专用机具运行过程中与已安装的 GIL 单元最小水平净空距离仅为 140 mm,且对机具行走机构就位精度要求高,必须采用有轨道的运输方案确保人身和设备安全。

同时根据 GB/T 16622《压配式实心轮胎规格、尺寸与负荷》中规定,压配式实心轮胎“用于间歇作业,单个作业行程最大距离为 2000 m,若需要更长距离作业或用于翻转机械轮胎时,应与制造厂协商”。制造厂提出连续作业 10 km 时应间歇 1 h,否则存在爆裂风险,为满足 GIL 设备运输连续作业要求,专用机具行走机构不宜采用实心轮胎。

轨道式(双轨)方案与轮胎式(单轨)方案相比,整机尺寸小,结构简单可靠;行走机构采用变频驱动技术,更有利于加速度平稳控制。且轨道对地面其他轮式车辆影响小,不影响在管廊地面中部设置消防逃生通道。

综上,考虑到长距离、大坡度、多变径的作业环境与重负荷、高强度、精就位的作业需求,结合 3 种行走机构优缺点,最终选取轨道式(双轨)方案作为苏通 GIL 综合管廊工程 GIL 运输专用机具行走机构的技术方案。

参考文献:

- [1] GB/T16622 压配式实心轮胎、规格、尺寸与负荷[S].
- [2] 汽车工程手册编辑委员会. 汽车工程手册·设计篇[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 陈家瑞.汽车构造(下)[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

收稿日期:2019-04-29

(上接第 136 页)

对称性。从图 8 可以发现,在侧面表面形成一个封闭的类似圆环的区域,该区域中间应力最大,向下外部递减。放大该应力所在区域,最大应力区域呈现不规则的点状及带状分布,且从中间向外围呈现递减态势。

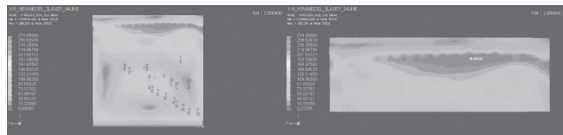


图 8 xz 方向的应力云图

图 9 所示为 yz 方向的应力云图即垂直于焊道的应力云图,呈现出比较规整形态,基本上是左右对称。最大的应力区域在该云图的上方,中下方为环状的应力带。其应力梯度呈现中间较小,周边比较大的整体趋势。

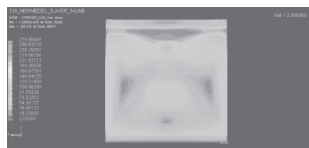


图 9 yz 方向的应力云图

3 结语

利用 Sysweld 软件和 X 射线衍射测定法对激光熔覆后的 In718 合金试件的残余应力进行数值分析与测,得到的主要结论如下:

1) 单道激光应力场数值分析表明:最大应力为 770 MPa,且顶面与垂直面应力分布对称,底面分布呈带状分布。

2) 多道激光熔覆 X 射线衍射残余应力测试,上下表面 x/y 方向平均残余应力值分别为 16.06 MPa/12.15 MPa 和 118.50 MPa/125.10 MPa。其余 4 个侧面的主应力分别为 34.78 MPa、67.58 MPa、34.09 MPa、74.57 MPa。

3) 多道激光熔覆应力数值结果与残余应力测试比较得出:数值模拟最大值为 266 MPa,实际测量值的最大应力为 281.01 MPa,且所有应力值皆>0。其中在 xy 面会出现环状应力区域,而实际测量时也会出现距离中心几乎等距离的环状应力区域。 xz 面形成不规则环形应力区。 yz 方向呈现中间小周边大的整体趋势。

参考文献:

- [1] 林鑫,黄卫东.高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学, 2015(45): 1111-1126.
- [2] 戴晟,左敦稳,方淳,等.激光熔覆 Ni/Ti 复合涂层组织与性能[J]. 机械制造与自动化,2014,43(3):63-65.
- [3] G A Webstreret, A N Ezeilo. Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes [J]. International J Fatigue, 2001, 23(S1): 378-383.
- [4] 许三明,戴腾运,江吉彬,等.不锈钢基体激光熔覆 Ni60A 残余应力研究[J]. 福建工程学院学报, 2016(14): 557-562.
- [5] 许鹏云,刘衍聪,范常峰,等.层间激光扫描对激光多层熔覆的温度场应力场影响机制分析[J]. 热加工工艺, 2013, 42: 167-170.
- [6] 胡木林,谢长生,黄开金.多道搭接激光熔覆层残余应力测试方法研究[J]. 激光技术, 2006(3): 262-264.
- [7] 董晓菲,张冠伟.基于计算机技术 45 钢激光熔覆工艺的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2014, 43(2):139-141.
- [8] 章海峰,黄舒,盛杰,等.激光喷丸 In718 镍基合金残余应力高温松弛及晶粒演变特征[J]. 中国激光, 2016,43: 1-9.

收稿日期:2018-03-16