

天文台圈梁移动台车设计及应用

伍柳毅 韦福堂 邓年春 邹易清 陈立

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

摘要:本文介绍了在贵州天文台射电望远镜FAST主动反射面主体支承结构索网架设工程中,一种能在圆形轨道上移动的特殊锚固装置圈梁移动台车的设计及应用。该移动台车是索网架设工程在圈梁上的锚固装置,它用来锚固施工索道(挂索索道和吊篮索道)以及牵引径向索的钢绞线张拉端反力架,而它们的另一端则锚固在圈梁中心的塔架和猫道V型平台上。该移动台车用固定装置有效的固定在圈梁上,台车采用平面桁架结构体积小重量轻便于在圈梁上移动,也有利于把自身承受的索力有效的转移到了圈梁上,而极大改善了自身的受力状况,台车配有斜坡轨道可让运索车从其上经过,保证了交叉立体作业的安全。

关键词:天文台 FAST 索网 圈梁移动台车 施工索道 有限元分析

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2015.01.006

1 前言

500m口径球面射电望远镜(Five hundred meters Aperture Spherical Telescope,简称FAST)利用贵州独特喀斯特地形条件和极端安静的电波环境,建造一个500m口径球面射电天文望远镜。FAST是我国建造世界第一大单口径射电望远镜,工程处于贵州山区。该项目主动反射面主体支承结构由主索网、下拉索、圈梁和格构柱以及格构柱基础组成,如图1所示。

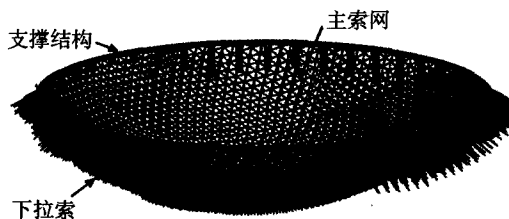
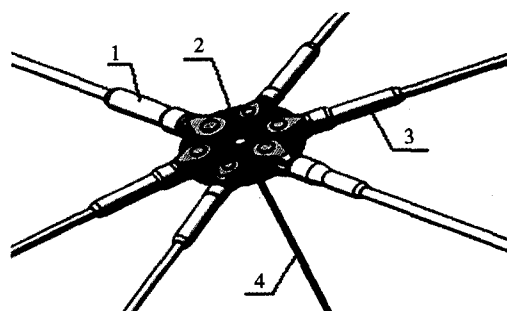


图1 索网整体结构图

在施工过程中,索网安装跨度500m,净高约130m,合计索根数8895根,总重达1570t,面索索网体量、分布广,同时受地形制约,无法进行地面组装或搭设满堂架平台,必须借助圈梁进行空间牵引安装。跨度大、索量多,要求精确度高,使得本工程索网施工繁琐、复杂、工期长,因此必须要精心组织,合理安排。

根据FAST索网安装以及圈梁的实际情况,开发2台轮轨式运索设备在直径500m的圈梁上运输索具以及20台移动台车在直径500m的圈梁上作为空间牵引安装索的固定装置。



1 径向索 2 节点盘 3 横向索 4 下拉索

图2 索网节点连接图

2 索网安装简述

2.1 径向索和横向索安装简述

用挂索导索上的滑车和手拉葫芦吊起第一根拉索的前锚头,牵引钢绞线也通过夹具与第一根拉索连接。牵引钢绞线上端锚固在圈梁移动台车上,用千斤顶牵引。千斤顶张拉牵引钢绞线牵引第一根拉索沿挂索导索向上移动,在第一根拉索后端安装节点盘、下拉索,并连接第二根拉索。重复以上牵引安装过程,直至所有纵向索和下拉索安装完毕,如图3所示。

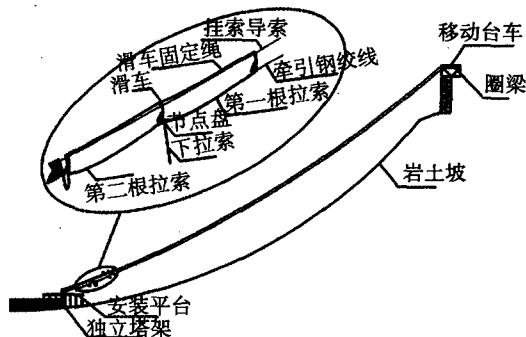


图3 索网径向索安装图

径向索安装完成后,挂索导索上的滑车仅留一个作为横向索滑车,在横向索滑车上安装一个电动葫芦,相邻两条挂索导索组成一组横向索挂索索道。横向索安装过程中,需要采用吊具吊住横向索,圈梁移动台车上的2台卷扬机同步启动牵引滑车向上移动到达横向索安装位置,操作人员乘坐吊篮到达安装位置,操作人员控制电动葫芦将横向索下放至合适的安装位置,通过对讲机指挥卷扬机操作员调整横向索安装位置。将横向索锚具一端与节点盘连接,打入销轴,然后再对接另一端的锚具与节点盘,如图4所示。

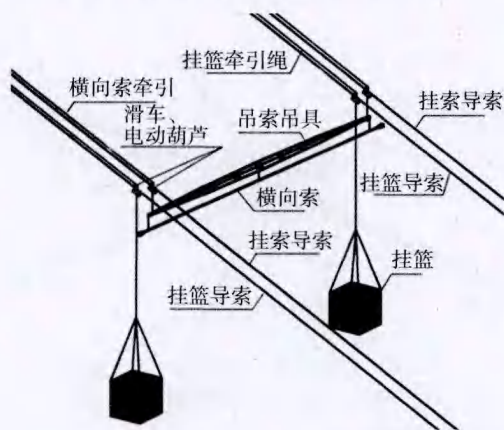


图4 索网横向索安装图

2.2 索网安装步骤简述

(1) 索网分为A、B、C、D、E五大区域+索网中心F区, F区塔基基础施工、支撑胎架搭建、安装独立塔架、安装缆风索, 安装节点盘、面索及下拉索, 安装圈梁顶移动台车、安装施工索道(挂索索道、吊篮索道)、猫道、溜索索道及V区锚固平台, 如图5所示。

(2) 安装A区(同时BCDE区)径向索和横向索, 放松挂索索道和吊篮索道并解除下端锚固, 圈梁移动台车向猫道方向移动一个索段并锚固。将挂索索道和吊篮索道锚固在相邻独立塔架上, 并收紧索道至工作线型, 如图6所示。

(3) 圈梁移动台车向猫道方向移动一个节段并锚固, 索道下端锚固到猫道V区锚固平台上, 收紧索道至工作线型, 如图7所示。

(4) 循环安装V区索网, 直到V区索网合

龙, 拆除临时设施、安装下拉索促动器, 对索网进行张拉, 如图8所示。

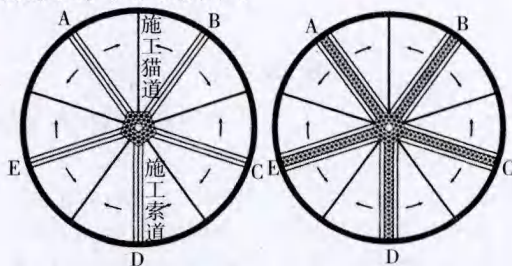


图5 索网架设步骤1

图6 索网架设步骤2

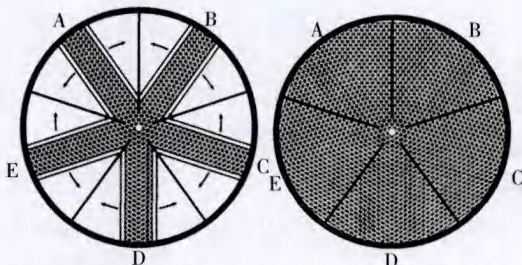


图7 索网架设步骤3

图8 索网架设步骤4

3 天文台圈梁移动台车结构设计

3.1 天文台圈梁移动台车在索网架设中的作用

在索网安装时, 猫道上方设一组溜索导索, 用于单根运输拉索; 猫道两侧各设2组挂索导索和吊篮导索, 挂索导索用于安装纵向索和横向索, 吊篮导索用于运送操作人员。移动台车的作用就是作为挂索导索和吊篮导索在圈梁上的锚固点以及牵引千斤顶的反力架。

图9所示初始位置的吊篮导索和挂索导索上端锚固在圈梁移动台车上, 下端锚固在独立塔架上。导索转移时, 圈梁移动台车向猫道方向对称移动一个挂索节段, 导索下端由塔架锚固转移至猫道的V区锚固平台锚固。V区锚固平台可沿猫道滑移, 圈梁移动台车向猫道方向移动到位后收紧导索, 导索始终呈V型向内收缩, 如图10所示。

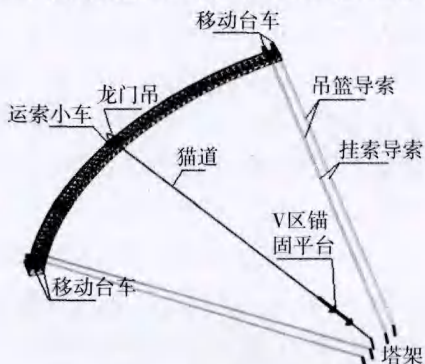


图9 施工导索布置图

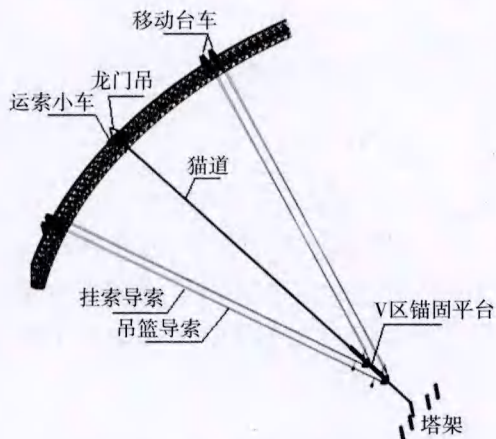


图10 施工导索转移图

3.2 天文台圈梁移动台车结构设计

圈梁移动台车，每个区设4套，合计20套，移动台车为平面桁架结构，采用型钢焊接而成，布置于圈梁上弦轨道上。移动台车三维结构图如图11：

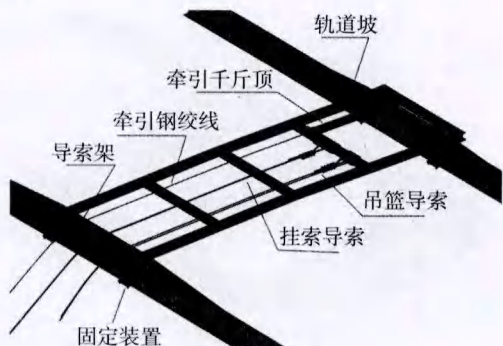


图11 圈梁移动台车结构图

移动台车上设置挂索导索和挂篮导索的钢丝绳锚固点，以及牵引钢绞线的千斤顶张拉端。台车内侧轨道横梁上设置4个通孔，分别为牵引钢绞线通孔，挂篮导索通孔和挂索导索通孔。

移动台车在底盘设置两道圆周轨道，轨道的平面半径250.4m（内轨）+261.4m（外轨），轨道与圈梁轨道在同一水平分度圆上。为使运索小车能够“跨过”移动台车，移动台车轨道与圈梁轨道以轨道坡过度，轨道坡的坡度为5度，可以满足运索小车的爬坡能力。

移动台车为平面桁架结构，在尽量降低高度的要求下，还要考虑跨过圈梁中间球节点，所以台车整体呈拱形。移动台车均采用型钢结构，主体与斜坡采用栓接，主体结构为2道纵梁（径

向），7道横梁（周向），由这些杆件组成框架结构。移动台车内侧横梁上设置托索架和导向轴，能适应不同工况下导索和牵引索的角度变化。

移动台车共设置四个固定装置，每个固定装置通过4根精轧螺纹钢固定。移动台车在工作状态（即牵索状态）通过拧紧精轧螺纹钢的螺母达到固定台车的作用，如图12所示。在非工作状态（施工导索松弛状态，即移动状态）对台车进行移动时，通过滑靴利用上弦杆外侧挡块抗倾覆，设置2套防翻转装置进行固定，如图13所示。

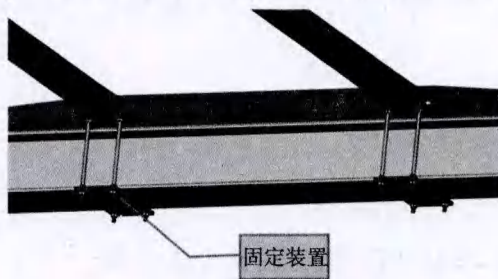


图12 移动台车固定装置

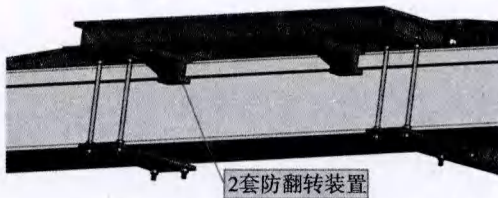


图13 移动台车防翻转装置

在圈梁上需要布置2台卷扬机，一台用于牵引横向索，一台则用于牵引载人吊篮。移动台车可利用滑靴在圈梁轨道上移动，自身不带动力驱动，需要移动时，操作人员通过2台2吨手扳葫芦拖拽。

4 天文台圈梁移动台车计算分析

4.1 移动台车工况简述

圈梁移动台车主要作用是用于在圈梁上锚固挂索导索、挂篮导索，并为牵引钢绞线张拉提供反力架。移动台车在分区线位置开始安装，在施工过程中，随索网安装向猫道线方向移动。如图14所示。移动台车在分区线位置时受力最大，受力方向指向圆心。随着移动台车向猫道线移动，台车受力逐渐减小，受力方向则会与小车指向圆心的线产生最大34度偏角。如图14-16所示。

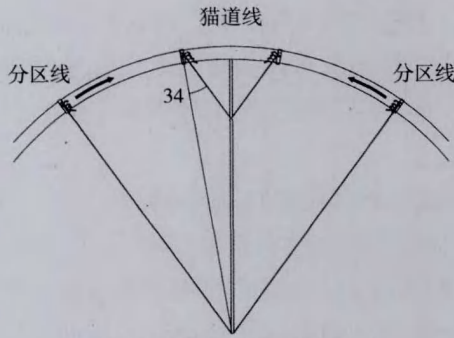


图14 移动台车移动轨迹

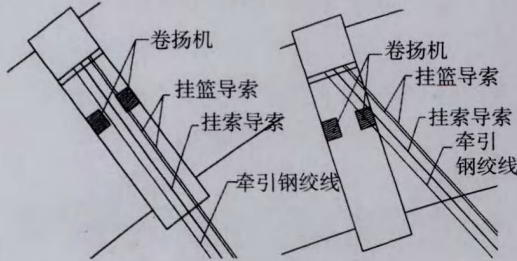


图15 移动台车在分区线位置时

图16 移动台车在猫道附近时

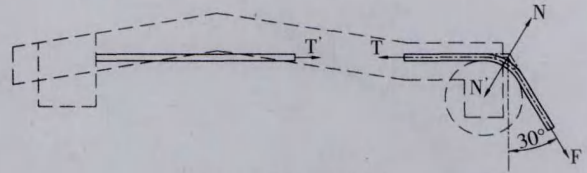


图18 受力侧视图

(2) 移动台车主体结构有限元分析

移动台车主体结构采用低合金高强度结构钢Q345B制造, 加约束如图19, 加载荷如图20、21, 计算结果如图22-26所示。

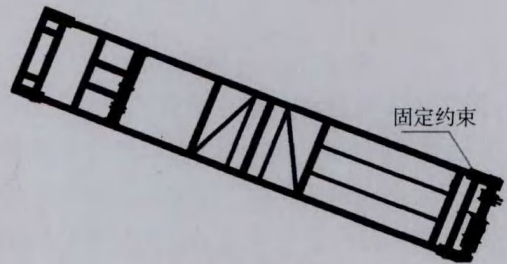


图19 施加约束

4.2 移动台车具体工况计算分析

4.2.1 移动台车位于分区线上

(1) 受力分析

每台圈梁移动台车有1根挂索导索, 1根牵引钢绞线, 2根挂篮导索, 圈梁移动台车位于分区线时受力如图17、18所示。F是索受到的张拉力, 挂索导索F为20t, 牵引钢绞线F为10t, 单根挂篮导索F为1.5t, 对索进行力的平衡计算得到台车对索的支撑力N、台车对索的拉力T和索受到的张拉力F三个力大小相等, 由作用力和反作用力原理可知索对台车的拉力T' 等于台车对索的拉力T, 索对台车的压力N' 等于台车对索的支撑力N, 通过对力的平衡分析把求解到的力施加到移动台车的受力点上进行有限元分析。



图20 施加载荷1

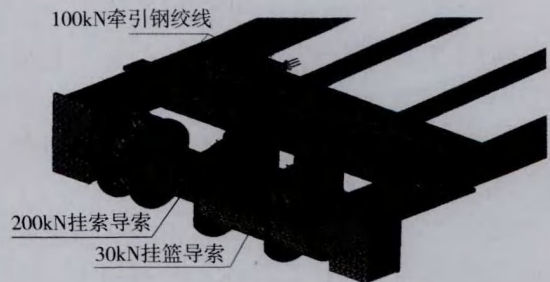


图21 施加载荷2

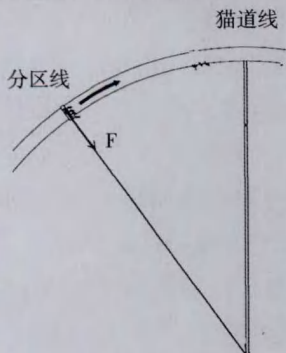


图17 受力俯视图

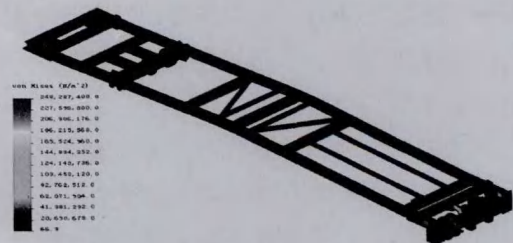


图22 应力分布图1



图23 应力分布图2



图24 应力分布图3

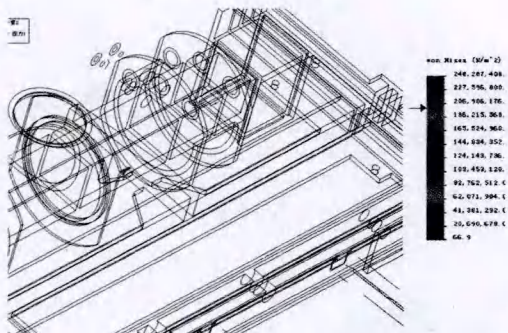


图25 应力在200~240MPa处

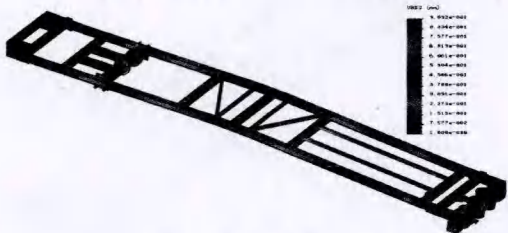


图26 移动台车变形图

4.2.2 移动台车位于分区线和猫道之间

(1) 受力分析

移动台车位于分区线和猫道之间时，台车中心线（中心线通过圈梁中心）与施工导索成 α 角度，施工导索拉力 F 与竖直线成 30° ，受力如图27、28所示， F 是空间力系分解空间力系得 F_1 （沿径向的力）和 F_2 （垂直于径向）。整个索网施工中索的拉力 F 是随着 α 角度的增大而减小的，所以在此工况下可取移动台车在分区线上时的索的拉力 F 为最大计算索力，从图28可以看出

F_2 在 α 角度最大时（ α 角度为 34° ）达到最大，所以可计算得到各个施工导索的 F_2 然后施加到移动台车的有限元计算模型上，通过计算得到挂索导索 F_2 为5.6t，单根挂篮导索 F_2 为0.42t，牵引钢绞线 F_2 为2.8t，从图28可以看出 F_1 在 α 角度最小时（ α 角度为 0° ）即移动台车位于分区线上时最大，所以可计算得到各个施工导索的 F_1 然后施加到移动台车的有限元计算模型上，通过计算得到挂索导索 F_1 为20t，单根挂篮导索 F_1 为1.5t，牵引钢绞线 F_1 为10t。

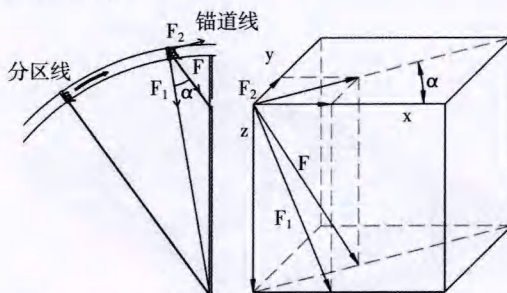


图27 受力俯视图

图28 索力F分解图

如图29所示，对施工导索 F_1 分力进行力的平衡计算得到在此分力方向上台车对索的支撑力 N 、台车对索的拉力 T 和索受到的张拉力 F_1 三个力大小相等，由作用力和反作用力原理可知索对台车的拉力 T' 等于台车对索的拉力 T ，索对台车的压力 N' 等于台车对索的支撑力 N ，通过对力的平衡分析把求解到的力施加到移动台车的受力点上进行有限元分析。

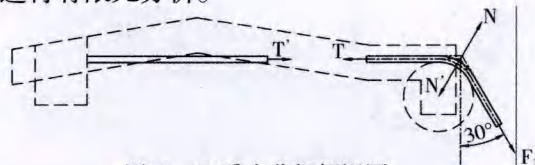


图29 F_1 受力分解侧视图

(2) 移动台车主体结构有限元分析

移动台车主体结构采用低合金高强度结构钢Q345B制造，加约束如图19，加载荷如图30、31、32，计算结果如图33~37所示。

4.3 圈梁移动台车固定装置精轧螺纹钢强度验算

本圈梁移动台车有4个固定装置，一个固定装置有4根25PSB830精轧螺纹钢，圈梁移动台车与圈梁接触位置垫橡胶垫，静摩擦系数0.6，最大水平拉力是330kN

精轧螺纹钢轴向拉力是： $330/0.6 \times 16 \times 0.65$ (不均匀系数) $=53kN$ ，所以单根精轧螺纹钢的轴向拉应力是：

$$\sigma = 53 \times 1000 / (0.785 \times 0.025 \times 0.025) = 108MPa < [\sigma] = 830 \times 0.5 = 415MPa$$

精轧螺纹钢受到总的水平拉力最大是330kN，共有16根精轧螺纹钢，每根受到的力是 $2 \times 330/16 = 41kN$ ，所以单根精轧螺纹钢的剪切应力是：

$$\tau = 41 \times 1000 / (0.785 \times 0.025 \times 0.025 \times 2) = 42MPa < [\tau] = 830 \times 0.3 = 249MPa$$

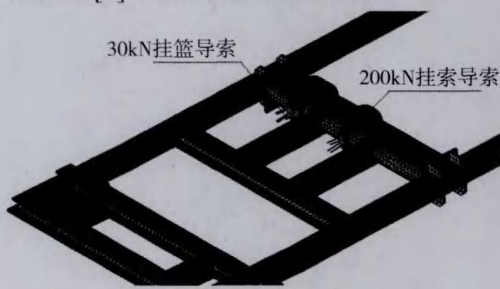


图30 施加载荷1

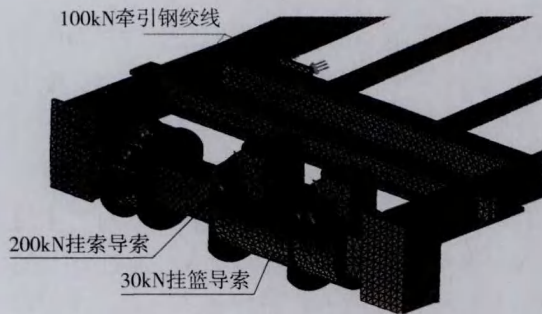


图31 施加载荷2



图32 施加载荷3

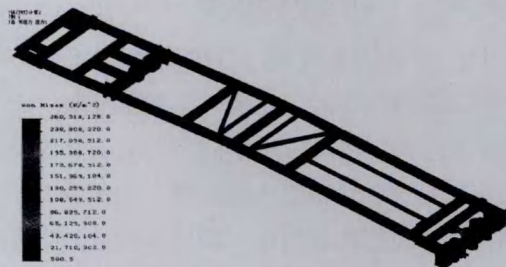


图33 应力分布图



图34 应力分布图

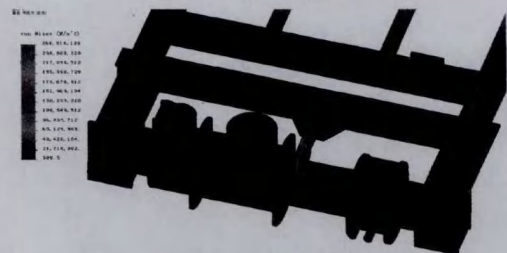


图35 应力分布图

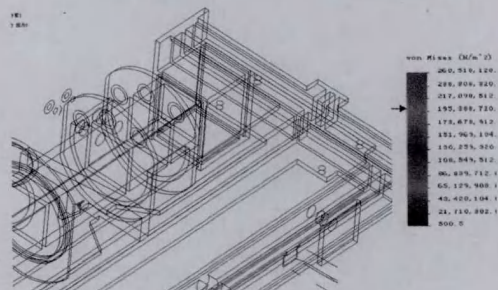


图36 应力在200~260MPa处

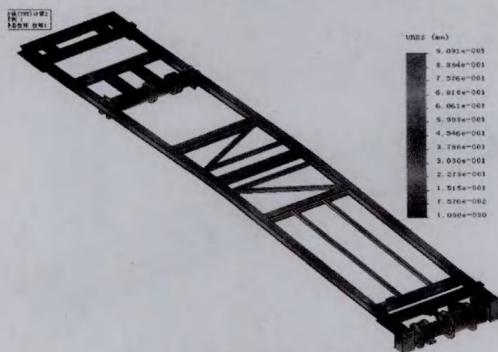


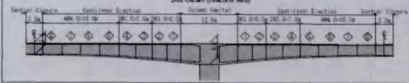
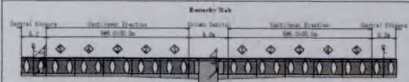
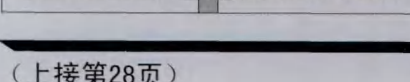
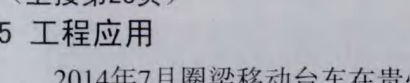
图37 移动台车变形图

4.4 结论

从有限元分析看出主体结构应力整体小于200MPa，只是在主要受力区域由于几何的不连续性存在应力集中现象，从上图应力高于200MPa的应力云图可以看出这部分应力集中的区域很小，由于采用的是Q345B塑性非常好的结构钢，在静载荷作用的情况下可以不考虑对强度降低的影响，从移动台车变形图可知在最大载荷作用下的最大位移是9mm，所以台车整体结构符合强度及刚度设计规范要求。(下转第38页)

4 持续性

蝴蝶型腹板的使用意味着桥梁上混凝土的使用少于普通混凝土腹板的箱梁结构。普通箱梁与蝴蝶腹板箱梁对比如表1所示。资料2中所做的尝试性计算显示桥梁的上部结构减少了186t的二氧化碳排放量(表2)。

Side view A Section		Weight (kg/meter)	Reinforcing steel	Block length
Box Girder (concrete web)	Butterfly Web			
		13300kN (3.05)	25% (0.06)	3.0~4.0m 3000kN
		13800kN (3.01)	23% (0.01)	4.0m 3500kN

(上接第28页)

5 工程应用

2014年7月圈梁移动台车在贵州省山区天文台索网架设工地开始安装并运用到索网架设中,该台车有效的为索网分区架设用施工导索提供锚固及转向。移动台车的斜坡设计能让运索小车顺利的从其上经过,而不影响索网架设的立体作业。图38和图39是已安装固定好在天文台圈梁上的移动台车,图40是利用圈梁移动台车架设好的部分索网。现在索网架设工程正按计划进行中,预计将在2015年上半年完成整个索网架设工程。

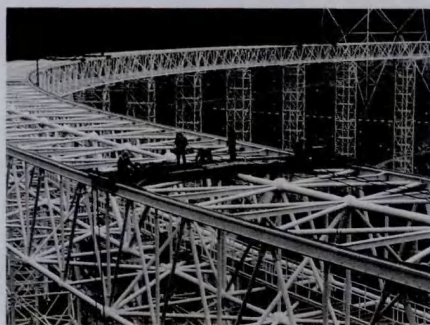


图38 移动台车现场施工图1

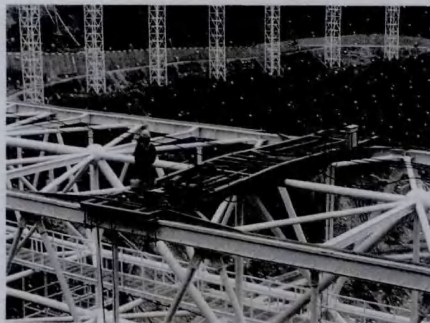


图39 移动台车现场施工图2

表2 二氧化碳释放(上部结构)

	CON(Cast-in-situ)		CON(Precast panel)		Reinforcing steel		Prestressing steel		Total		
	volume	CO ₂	volume	CO ₂	quantity	CO ₂	quantity	CO ₂	CO ₂	ratio	
Box Girder	602m ³	1770.5t	0.0t	0.0t	1247.8t	957.1t	287.3t	379.8t	3107.4t	1.00	
Butterfly Web	5021m ³	1476.2t	532m ³	234.1t	1177.5t	903.2t	232.8t	307.8t	2921.2t	-186.1t	0.94

5 结论

除能减轻主梁的重量,蝴蝶腹板结构由于具有需要更少施工节块数量等优势,对加快施工周期有着实质的贡献。由于上部结构减轻,桥墩和基础也可以按比例缩小。相对于使用传统结构,桥梁对于环境的冲击更小。此外,由于腹板预制板是在工厂以工业生产工艺生产的高质量产品,并且不使用加强钢筋,其维护保养更加容易。该结构使施工成本和维修保养成本都有显著的降低。



图40 安装好的部分索网

6 结论

天文台圈梁移动台车从当初设计成空间桁架结构改进成现在的平面式桁架结构,这不仅节省了大量的材料,而且力学性能也得到极大的改善,有利于运索小车从其上通过使立体交叉作业成为可能,这既降低了工程造价,又保证了工程施工的安全质量。天文台圈梁移动台车成功的运用在索网架设工程中,标志着欧维姆公司对预应力工程中的特种结构件的设计和应用能力又有了质的飞跃,为以后承担更复杂的大型工程打下了坚实的基础。

参考文献

- [1] 哈尔滨工业大学理论力学教研室编. 理论力学[M]. 高等教育出版社, 2002.
- [2] GB/T1591-2008, 低合金高强度结构钢[S].
- [3] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S].
- [4] 龙驭球、包世华 主编. 结构力学[M]. 高等教育出版社, 2000.