

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.04.055

索段精密测控与自动连接技术研究

沈亮,李舒扬,詹军海,周墨渊,余豪华,徐庆

(上海宇航系统工程研究所,上海 201109)

摘要:因索网结构中各索段的连接是采用人工连接的方法,不仅工作量巨大、效率低下,而且绳索的力学性能复杂,无法满足网面的高精度要求。研制了一套索段精密测控与自动连接设备,对节点零件安装精度、结构件变形、设备测量精度等因素进行分析和控制,并通过高精度张力电机进行张力加载,实现了索网中各索段长度与张力的高精度控制。实测结果:索段长度最大偏差为 0.06 mm,索段张力最大偏差为 0.18 N。

关键词:索网结构;索段;长度;张力;连接技术

中图分类号:TP273 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)04-0208-04

Research on Technology of Precise Measurement, Control and Automatic Connection of Cable

SHEN Liang, LI Shuyang, ZHAN Junhai, ZHOU Moyuan, YU Haohua, XU Qing

(Shanghai Aerospace System Engineering Reserch Institute, Shanghai 201009, China)

Abstract: The manual connection method of the spare cable in the cable net structure causes not only huge workload and low efficiency, but also failure to meet the high precision requirements by mesh surface due to complex mechanical properties of the rope. To solve the problem, a set of equipment for precise measurement and control and automatic connection of cable is developed. Through the analysis and control of the installation accuracy of the joint parts, the deformation of the structural parts and the measurement accuracy of the equipment, and with the tension being loaded by a high precision tension motor, the length and tension of the cable is accurately controlled. The test results show that the maximum deviation of the measured length of the cable is 0.06 mm, and the maximum measured deviation of tension is 0.18 N.

Keywords: cable net structure; cable; length; tension; connection technology

0 引言

目前,在轨运行的大型可展天线主要为网状反射面天线,其面密度低、收缩比大、精度高、展开可靠性高。索网结构是网状反射面天线的重要组成部分,主要用于支撑天线的反射面使其形成工作所需的曲面形状,一般为抛物面形式。索网结构是一种典型的空问结构,由于其形式多样、跨度大、质量轻、收拢体积小、稳定性高等优点,被广泛应用于建筑^[1-4]和航天^[5-8]等领域。索网结构主要由多个近似于等边三角形的节点和索段组成。

在国内,关于索网结构各索段的连接方法尚处于人工连接阶段,在索网结构的找形设计阶段,根据各索段工作状态时的长度与应力,以找形算法求出索段的预张力和无应力长度^[9],并在索段的无应力状态下进行人工连接。人工连接方法不仅工作量巨大,效率低下,而且由于绳索的力学性能复杂^[10],无法满足网面的高精度要求,严重阻碍了我国大型可展天线的发展。因此,本文研制了一套索段精密测控与自动连接设备,实现索网中各索段长度与张力的精度控制,使各索段在实际工作长度与张力状态下

进行连接,对于提高索网的整体精度和制造效率具有重要意义。

1 索段连接系统设计

索网各节点可靠连接是通过索段在节点零件中穿引回绕后,利用夹套压紧绳索实现的。索段一端的节点零件固定在固定端,另一端固定在可调端,配套拉力传感器及位移传感器实现索段的高精度连接。将长度控制技术、张力加载技术以及索段连接技术实现所需的模块集成,形成总体机械系统。机械系统由位移电机、张力电机、拉力传感器、激光位移传感器、光栅传感器、直线导轨、滚珠丝杠、液压钳头、液压油缸等配套附件和结构件组成,如图 1 所示。

位移电机、滚珠丝杠、直线导轨、光栅传感器、激光位移传感器等组成长度控制模块;张力电机、拉力传感器等组成张力控制模块;液压钳头、液压油缸等组成压接模块。设备工作流程如下:索段准备—索段长度调节—索段张力调节—索段力位混合调节—索段压接—索段(质量)测试—索段剪断。

第一作者简介:沈亮(1986—),男,浙江东阳人,工程师,硕士,研究方向为空间结构机构产品设计。

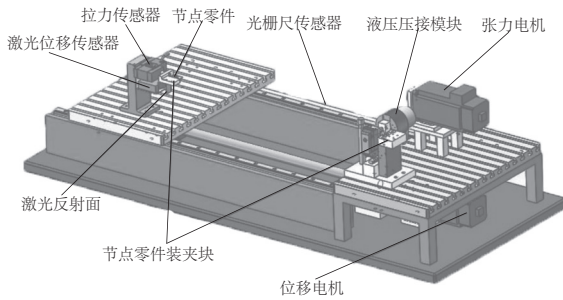


图1 索段连接设备示意图

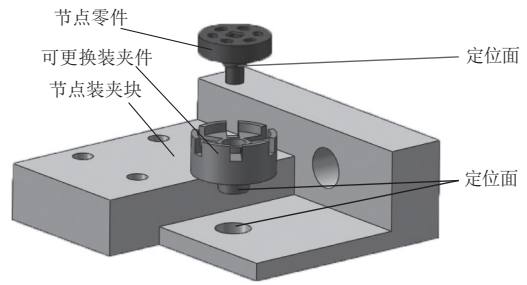


图3 节点零件装夹示意图

2 索段高精度连接技术

2.1 索段长度高精度控制技术

1) 索段长度控制方案

索段长度控制受到节点零件安装精度、结构件变形、设备测量精度等因素的影响,因此需要对节点零件和装夹零件安装精度提出控制要求,对相关安装部位进行有限元分析,得出结构变形量,最后通过索段连接设备实现长度的高精度控制。

如图2所示,利用光栅尺对滚珠丝杠的大范围位移进行测量,利用激光传感器对节点零件的微小变形位移进行测量,可以实现索段长度的精确测量。图中: l_1 为初始状态下节点零件中心到光栅尺起点距离; l_2 为光栅尺测量位移; l_3 为右侧节点零件中心到光栅尺末端距离; l_4 为左侧激光传感器测量位移; l_5 为右侧激光传感器测量位移,则索段实际长度为

$$l = l_1 + l_2 + l_3 - l_4 - l_5 \quad (1)$$

索段长度控制误差为

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 - \Delta l_4 - \Delta l_5 \quad (2)$$

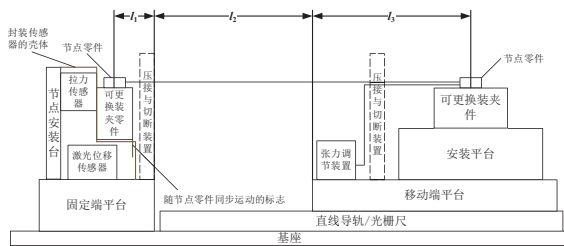


图2 测量原理图

2) 索段长度控制结果

如图3所示,节点零件通过定位面与可更换装夹件完成间隙配合定位,可更换装夹件与节点装夹块通过锥形圆柱和锥形孔完成配合定位。

在索网自动连接设备工作时,节点零件与可更换装夹件需要拆卸及更换,这时节点零件安装误差无法进行标定补偿。如图3所示,节点零件的定位面为圆盘下方的圆柱面,其公差等级为IT5,以此圆柱面中心轴作为节点零件中心线,可更换装夹件的内孔定位面进行铰孔加工,公差等级为IT6,节点零件与可更换装夹件之间为间隙配合,最大间隙为0.015 mm,因此 $\Delta l_1 = \Delta l_3 = (\pm 0.015) \text{ mm}$ 。

张力承载部件在索段连接过程中受到绳索拉力而变形,主要承载部位有节点零件、可更换装夹件、节点装夹块等。节点零件的材料为聚酰亚胺,可更换装夹件和节点装夹块的材料为45#钢。按索网各节点最大载荷180 N对设备张力承载部件进行力学分析,张力测量部件最大变形发生在节点零件受拉孔处,最大位移值为0.08 mm,节点零件安装中心孔处的最大位移为0.03 mm。

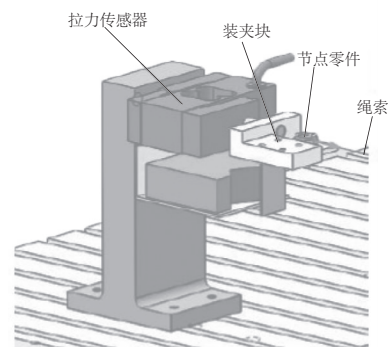
长度测量采用光栅尺和激光位移传感器相结合的方法以保证设备的精确度。设备装配完成后利用激光干涉仪进行高精度误差标定,从而补偿掉不可拆卸零件制造和装配过程中产生的累积误差,提高设备的整体精度。光栅尺和激光位移传感器测量精度分别为0.005 mm和0.002 mm。因此, $\Delta l_2 = (\pm 0.005) \text{ mm}$, $\Delta l_4 = \Delta l_5 = (\pm 0.032) \text{ mm}$ 。

因此 $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 - \Delta l_4 - \Delta l_5 = 0.015 + 0.005 + 0.015 + 0.032 + 0.032 = 0.099 \text{ mm}$,索段长度控制误差为0.099 mm。可见,索段长度可以控制在 $(\pm 0.1) \text{ mm}$ 。

2.2 索段张力高精度加载技术

1) 张力加载方案

索段张力加载采用传感器直接测量的方式进行,即传感器与索段串行连接,从而避免传感器测量方向与张力方向不一致带来的误差。图4为张力控制模块示意图,图4(a)为张力测量端,节点零件放置于节点装夹块上,装夹块水平安装于拉力传感器一端。拉力传感器通过测出装夹块对其水平方向的拉扯力,得出绳索的张力。图4(b)为张力调节端,绳索穿过节点零件并通过导向柱换向,最终连接至张力电机的旋转轴,通过拉力传感器的测量反馈,张力电机做出响应调节,通过收卷线绳对其张力进行控制,最终实现张力加载。



(a) 张力测量端

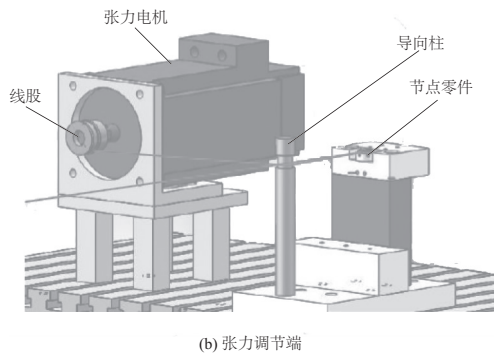


图4 张力控制模块示意图

2) 张力调节精度

张力调节电机编码器分辨率为 20 000, 滚轴半径 $r_1 = 12.5 \text{ mm}$, 索段采用的凯夫拉绳刚度 $k = 10\,000 \sim 20\,000 \text{ N/m}$ 。

因此, 张力调节电机收绳分辨率为

$$\Delta L = \frac{2\pi r_1}{20\,000} = 3.93 \text{ (}\mu\text{m)}$$

张力调节电机张力分辨率最大为

$$\Delta f = k\Delta L = k \frac{2\pi r_1}{20\,000} = 20\,000 \times \frac{2\pi \times 12.5}{20\,000} \times 10^{-3} = 0.079 \text{ (N)}$$

张力调节电机分辨率最大为 0.079 N, 可以实现索段张紧力的高精度加载和控制。

2.3 索段连接技术

索段连接采用铜套压接的方式, 压接机构方案如图 5 所示。液压油缸通过液压油管与分体式液压钳相连, 提供压接动力。将穿引好绳索的铜套卡入铜套安装槽中, 凹槽

高度固定, 确保铜套 z 向位置; 槽口采用限位设计, 确保铜套 x 向位置; 压接钳头对铜套采用了自适应对中挤压技术; 通过对铜套 3 个方向上的限制, 确保每次压接时, 铜套均在同一位置, 压接最终形态一致, 实现锁定索段绳长和张力的作用。

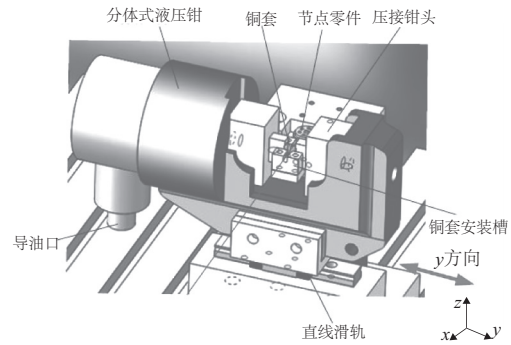


图5 压接模块示意图

3 索段性能测试

通过对位移电机和张力的联合调节, 实现索段长度和张力的协同控制。通过比较设定的长度和张力值与实测值的差值, 验证位移、张力控制模块的性能。该测试对索段的长度和张力的设定 3 种不同的参数组合, 每种组合重复测试 3 次, 具体参数组合与测试数据表如表 1 所示。

从表 1 中可看出, 在制作成功的索段中, 实测索段长度最大偏差为 0.06 mm, 张力最大偏差为 0.18 N, 并且压接前后的张力和长度保持稳定。

表 1 索段性能测试结果

测试次数	序号	压接前		压接后		要求值
		实测张力/N	实测长度/mm	实测张力/N	实测长度/mm	
1	1	39.875	349.980	39.877	349.980	40 N 350 mm
	2	39.882	349.950	39.854	349.940	
	3	40.059	349.950	39.820	349.945	
	最大偏差	0.125	0.050	0.180	0.060	
2	1	79.884	449.970	79.846	450.075	80 N 450 mm
	2	79.935	449.980	79.925	450.015	
	3	79.872	449.990	79.862	449.970	
	最大偏差	0.131	0.030	0.154	0.030	
3	1	119.875	549.980	119.856	550.025	120 N 500 mm
	2	119.861	549.990	119.857	549.950	
	3	120.179	549.990	119.820	550.015	
	最大偏差	0.179	0.020	0.180	0.050	

4 结语

研制了一套索段精密测控与自动连接设备,实现索网中各索段长度与张力的高精度控制。通过对节点零件安装精度、结构件变形、设备测量精度等因素的分析和控制,实现索段长度精确控制。实测索段长度最大偏差为 0.06 mm;通过高精度张力电机对张力进行精准加载,实测索段张力最大偏差为 0.18 N;同时采用液压压接的方式保证了夹套压接前后索段的张力和长度的一致性。

参考文献:

- [1] 王欢欢,刘占省,何建.全柔性空间索网结构分析发展综述[C].聊城:全国现代结构工程学术研讨会,2016.
- [2] 杨庆山,姜忆南.张拉索-膜结构分析与设计[M].北京:科学出版社,2004.
- [3] 夏劲松.索膜结构的构造理论和柔性天线的结构分析[D].杭州:浙江大学,2005.
- [4] 李琴琴.大型索网结构网面形状优化设计[D].西安:西安电子科技大学,2008.
- [5] MURPHEY T. Historical perspectives on the development of deployable reflectors [C]//50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC

Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, California, Reston, Virginia: AIAA, 2009

- [6] HIGUCHI K, ISHIMURA K. A survey of space structures research in Japan [C]//50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, California, Reston, Virginia: AIAA, 2009.
- [7] SEMLER D, TULINTSEFF A, SORRELL R, et al. Design, integration, and deployment of the TerreStar 18-meter reflector [C]//28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC - 2010), Anaheim, California, Reston, Virginia: AIAA, 2010.
- [8] MEGURO A, SHINTATE K, USUI M, et al. Inorbit deployment characteristics of large deployable antenna reflector onboard Engineering Test Satellite VIII [J]. Acta Astronautica, 2009, 65 (9/10): 1306-1316.
- [9] 范叶森,马小飞,李正军,等.绳索长度误差对索网天线网面精度影响的分析方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(8):64-69,83.
- [10] 邢恩振.空间可展结构中绳索动力学研究[D].北京:北京理工大学,2015.

收稿日期:2020-08-31

(上接第 192 页)

- [5] 李伟峰,王磊.船舶机械设备的常见故障及状态监测与诊断技术研究[J].自动化与仪器仪表,2018(6):32-34.
- [6] 陈海军,韦鹏,吕金华,等.电气设备在线振动监测中传感器布置位置的优化研究[J].机械制造与自动化,2019,48(5):193-195,214.
- [7] 赵立英,王敏珍.输电线路杆塔接地状态在线监测技术研究[J].现代电子技术,2019,42(12):100-103,107.
- [8] WANG D, LIANG L, HU J B, et al. Analysis of low-frequency stability in grid-tied DFIGs by nonminimum phase zero identification [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 716-729.
- [9] WANG W Y, STAFFORD G G S, BARNES M, et al. Stability limitation and analytical evaluation of voltage droop controllers for VSC MTDC [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 238-249.
- [10] WANG W Y, BEDDARD A, BARNES M, et al. Analysis of active power control for VSC-HVDC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1978-1988.
- [11] ZHOU J Z, DING H, FAN S T, et al. Impact of short-circuit

ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior? of a VSC-HVDC converter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.

- [12] ARANI M F M, MOHAMED Y A R I. Analysis and performance enhancement of vector-controlled VSC in HVDC links connected to very weak grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 684-693.
- [13] GUO C Y, ZHANG Y, GOLE A M, et al. analysis of dual-infeed hvdc with lcc-hvdc and vsc-hvdc [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1529-1537.
- [14] GUO C Y, LIU W, ZHAO C Y, et al. Small-signal dynamics and control parameters optimization of hybrid multi-infeed HVDC system [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 98: 409-418.
- [15] NI X J, GOLE A M, ZHAO C Y, et al. An improved measure of AC system strength for performance analysis of multi-infeed HVdc systems including VSC and LCC converters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 169-178.

收稿日期:2020-09-28