

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.03.07

TM65m 天线悬挂式俯仰驱动结构 健康监测

付 丽^{1,2,3}, 张一凡⁴, 耿旭光⁴, 张亚林⁴, 虞林峰¹, 赵均红⁴,
孙庆余⁴, 蒋甬斌¹, 孙云霞¹, 凌权宝¹, 范庆元¹, 刘庆会¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 行星科学重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院 射电天文重点实验室, 南京 210008; 4. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 介绍了天线悬挂式俯仰驱动的结构形式、特点及受力情况。建立了结构健康监测系统, 包括结构测量系统、电流监测系统、温度监测系统和声音识别系统, 并对俯仰驱动结构进行了全面的健康分析, 由测量的齿轮的径跳和端跳、电机的电流、轴承的温度及识别的声音等参数, 参照评估标准, 认为结构目前处于健康状态。

关键词: 天线; 俯仰驱动系统; 健康监测; 安全评估

中图分类号: P111; TU317 **文献标识码:** A

1 引 言

天马望远镜 (TM65m) 坐落在上海松江佘山天文基地, 可工作于 L、S、C、X、Ku、K、Ka 和 Q 等 8 个频段, 最高跟踪指向精度 $3''^{[1]}$ 。TM65m 主要由天馈、机械结构和伺服监控三大分系统组成。俯仰旋转驱动结构是机械结构分系统的重要组成部分, 其主要功能为实现俯仰大齿轮沿着既定轨道进行旋转。俯仰旋转驱动结构主要包括俯仰大齿轮和与之啮合的小齿轮 (含驱动箱体)。小齿轮根据其连接方式可分为固定式和悬挂式, 前者固定在天线平台上, 俯仰大齿轮旋转过程中可能发生的径、侧向偏摆和扭转, 会产生偏差和齿轮接触率过大等问题; 后者悬挂于俯仰大齿轮上, 具有实时适应和协调俯仰驱动箱体摆动的优点, 同时设置双电机消除, 保证了结构的稳定性和高指向精度^[2]。

目前, 悬挂式俯仰驱动结构已广泛应用在国外天线上, 如美国 20 世纪 60 年代的深空网

收稿日期: 2015-11-12; 修回日期: 2016-05-12

资助项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (08DZ1160100); 中国科学院知识创新工程重大项目 (KJCX-YW-18); 国家自然科学基金 (Y347201001); 天文专项基金 (高精度测量和控制)

通讯作者: 付丽, fuli@shao.ac.cn

64 m 天线、美国 GBT (Green Bank Telescope) 100 m 天线和意大利 SRT (Sardinia Radio Telescope) 64 m 天线;国内北京密云 50 m 天线和 TM65m 天线也采用了悬挂式俯仰驱动结构。俯仰旋转驱动结构运行状况是影响天线指向精度的主要环节之一,如果其自适应调整功能出现问题,不仅会降低指向精度,同时俯仰结构也将会出现损伤甚至破坏。在 20 世纪 80 年代,美国深空网的天线曾出现过奇怪的齿轮磨损问题^[3]。因此,对俯仰旋转驱动结构各个环节进行实时健康监测是保证其正常运行的必要手段,具有非常重要的意义。目前,国内很少有大型天线结构健康监测的报道,哈尔滨工业大学的金晓飞^[4]和王化杰^[5]等研究设计了 FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope) 反射面结构健康监测系统,大部分功能已在 30 m 缩尺模型结构实验中成功应用,但其是针对反射面的结构及受力特点建立的健康监测系统,与本文的俯仰驱动结构的监测系统区别较大。

本文以 TM65m 天线为研究对象,首先介绍悬挂式俯仰驱动的结构形式及双电机消除;然后阐述各结构健康监测系统的组成原理;最后基于建立的系统对结构进行安全评估。建立较全面的俯仰驱动结构健康监测系统,为在建和拟建的大型天线提供参考。

2 悬挂式俯仰驱动结构

TM65m 天线俯仰驱动结构及其安装位置如图 1 所示,俯仰驱动结构通过 4 个挂轮悬挂于俯仰大齿轮齿板上,啮合齿隙由机械加工及安装调整保证,驱动箱通过连接梁和关节轴承连接在天线座架二层平台上。当天线俯仰转动时,水平和垂直关节轴承可实时适应和协调因俯仰大齿轮安装和制造误差引起的俯仰驱动箱体的摆动。

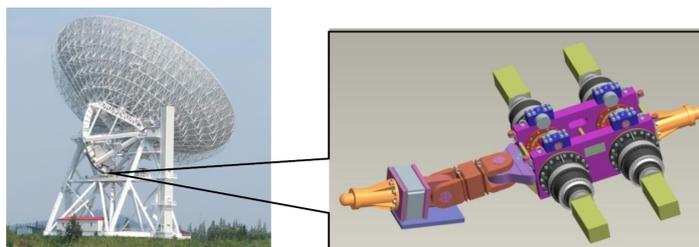


图 1 俯仰驱动结构安装位置及三维图

在 20 世纪 70 年代,JPL 的 Menninger^[6]针对 26m 天线进行了在驱动器上施加力矩偏置进行消除的研究。目前,此技术已很成熟,在射电望远镜和齿轮传动光学望远镜 VST^[7]、SST^[8]上已广泛应用。TM65m 天线俯仰结构采用 4 个电机驱动,两个电机为一组,在驱动器上施加力矩偏置进行消除,然后通过多电机控制器对各消除组合进行控制,抑制差速振荡,使其速度均衡。在天线更换和跟踪观测目标时,双电机消除的特点为:在望远镜快动更换观测目标时两只电机同向驱动提供大力矩,但不能消除齿轮间隙,精度低;在跟踪观测时两只电机反向驱动,一只主驱动一只提供反向力矩,力矩较小,能够消除齿轮间隙,得到高的跟踪精度。

3 结构健康监测系统

天线的俯仰驱动结构长期处于持续往复运动状态,可能产生电机、齿轮和轴承损坏等现象,远程控制室与天线相距较远,需建立结构健康监测系统,实时对结构性能进行监测和评估,以便及时提出相应维护措施。TM65m 天线俯仰驱动结构健康监测系统包括结构测量系统、电流监测系统、温度监测系统和声音识别系统。

3.1 结构测量系统

结构测量系统由游标卡尺、千分表、计算机和数据采集软件 (Mahr) 等组成。每隔半年,利用游标卡尺结合铅丝测量齿隙,千分表、计算机及软件测量齿轮的径跳和端跳、连接梁的左右和上下偏摆角度。如果偏摆角度在 $\pm 2^\circ$ 内,齿隙在 0.6~1.2 mm 范围内,认为满足要求。

利用千分表、数据采集软件和计算机进行 3 组测量:(1) 齿轮的径跳和端跳。首先清洗齿轮齿条内圆弧面和侧面的油泥及其他附着物,然后将千分表安装在磁性卡座上,卡座通过支架固定在天线二层平台上,最后将 2 个千分表探头同时垂直压在齿条两侧的内圆弧面上(挂轮接触面),重置使表读数置零;俯仰以 $0.3^\circ/\text{s}$ 的速度由低到高仰角旋转 ($5^\circ\sim 88^\circ$),再由高到低仰角旋转,数据采集软件每秒记录一个数据,根据读数绘制齿轮的径跳曲线。(2) 类似地,将 2 个千分表探头同时垂直压在齿条两侧的端面上,测量齿轮的端跳。(3) 将 2 个千分表的探头分别垂直压在连接梁支耳下表面和侧面,转动天线俯仰,读取 2 个千分表数值,得到连接梁的上下和左右位移,测量千分表的测试探头到转轴的距离,计算连接梁的偏摆角度。

采用压铅丝法测量驱动齿轮轴齿轮和俯仰大齿轮轮齿啮合齿隙,测量时将 17 号长度约 50 cm 的软铅丝粘在齿轮上,然后以 $0.3^\circ/\text{s}$ 的速度旋转俯仰齿轮,经挤压后的软铅丝变扁,用游标尺测量一个齿的两侧铅丝厚度值,相加为齿轮的啮合间隙值。

3.2 电流监测系统

电流监测系统是由伺服监控分系统中的天线驱动控制单元实时记录天文观测时不同方位俯仰变化对应的电流,当俯仰单电机电流超过 68 A 或电流突变超过 20 A,需及时进行检查和维护。

天线驱动控制单元 (DCU) 由多电机控制器、直流驱动器、直流伺服电机 (含测速机和失电制动器) 和人机界面等组成。俯仰驱动器均采用力矩偏置的方式以消除传动链的齿隙。多电机控制器选用可编程控制器,通过 CAN 总线实现对多台直流驱动器的集中监控,数字化总线可以很好地控制多路驱动器协调工作,还可以大大提升驱动系统的可靠性和调速性能。同时多电机控制器与控保单元联合完成驱动系统的安全保护功能。天线驱动控制单元具有可独立操作的人机界面,可以本地控制天线以速度模式运动,并实时显示各电机电流。天线俯仰驱动单元工作原理框图如图 2 所示。

除了通过人机界面直接监测电流外,提出了基于电机电流的接触应力间接测量技术,通过实时记录天线不同俯仰角下的电机电流反算驱动力矩,进而计算切向力和轮齿接触应力,判断是否小于许用接触应力,评估结构的安全性。

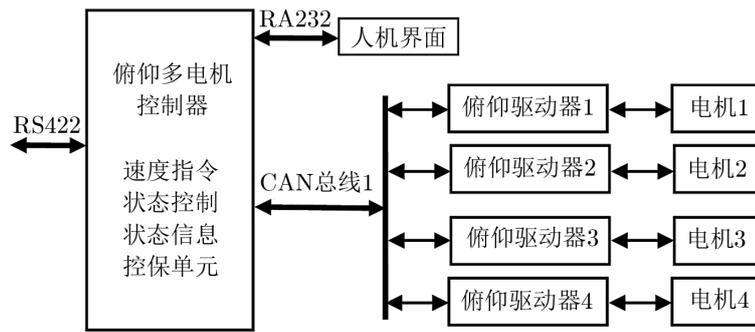


图 2 俯仰驱动单元工作原理框图

基于行星减速器的相关参数, 结合记录的电机电流计算驱动力矩, 表述为:

$$M = 0.85 \cdot I_A \cdot I_E \cdot i_1 \cdot i_2 \quad (1)$$

式中, I_A 为电机电流常数, I_E 为电机驱动电流, i_1 为末级减速比, i_2 为减速器速比。

由驱动力矩可计算大齿轮所受的切向力, 具体为:

$$F_T = \frac{F_C}{\cos \phi} = \left(\frac{M}{R} \right) / \cos \phi \quad (2)$$

式中, F_T 为切向力, F_C 为圆周力, R 为分度圆半径, ϕ 为压力角。

最终, 得接触应力为:

$$\sigma = 0.798 \sqrt{\frac{wE(1+1/\rho)}{d(1-\gamma)^2 \sin 2\phi}} \quad (3)$$

式中, $w = F_T/l$, l 为齿轮宽, E 为弹性模量, γ 为泊松比, d 为分度圆直径, ρ 为大小齿轮分度圆直径比。

3.3 温度监测系统

在俯仰驱动结构上共安装 6 个温度传感器, 其中 4 个传感器用于长期实时记录轴承温度, 2 个传感器的测量值作为参考温度。传感器的选取需充分考虑精度和对系统复杂程度的影响等因素, 安装的位置应该既有相同照射和风速条件, 又能准确反映测量目标的真实温度, 具体位置如图 3 所示, 传感器通过垫片压在结构上, 并使用胶封闭隔绝空气。当轴承温度与参考温度温差超过 2°C 时, 需现场检查, 并结合其它 3 个监测系统判断轴承是否损坏。



图 3 温度传感器安装位置示意图

温度监测系统由温度传感器、主节点控制器、电源、工控机和电缆等组成。图 4 为监测系统原理框图, 该系统采用分级分布式网络架构, 传感器共用 1 个主节点控制器, 每个主节点

控制器通过拨码开关设置一个地址，每个控制器最多管理 19 个监测点 (不够 19 可空缺)，每个监测点在主节点有固定的地址编址。主节点控制器以单片机为控制核心，对监测点采用轮询的方式，逐点查询每点的温度，传输方式是 1820 专用 I²C 总线接口。主节点控制器的采集与上报按固定周期轮询，上报信息处理计算机，采用 CAN 总线接口。电源主要功能是为主节点控制器和温度传感器提供直流电能，电源输入 220 V，输出 +5 V 直流电。每个电源可以为 5 个节点控制器和它所带的温度传感器提供 5 V 直流电能。温度传感器的核心是 DS18B20 数字式温度传感器，其与外部的接口为单总线方式，即数据的输入、输出及同步均由同一根线完成，非常便于组建传感器网络。其温度测量范围为 -55°C~125°C，在 -10°C~80°C 范围内精度为 ±0.5°C，输出的温度值可编程为 9~12 位，单 5 V 供电。

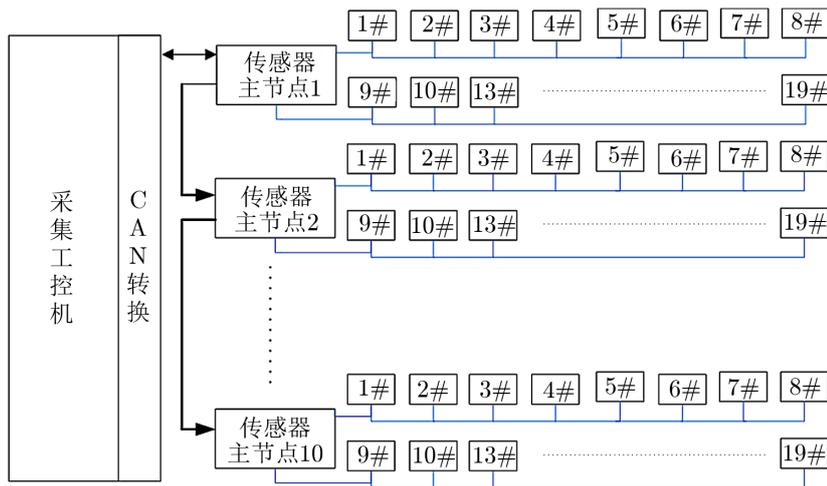


图 4 温度监测系统原理框图

3.4 声音识别系统

TM65m 天线结构上共安装了 10 个拾音器 (见图 5)，分别位于馈源舱、副面、压缩机房、方位、俯仰电机等需要重点监听的部位。其中用于监听俯仰驱动结构的 2 个拾音器被分别安装在 2 个减速机罩子下面 (见图 6)。拾音器通过三芯屏蔽线与馈源舱和远程房的两个网络录音盒连接，然后再连接到内网交换机，由此，位于观测室的计算机便可以通过内网访问任意位置的拾音器，并通过音响实时地播放采集的声音，同时 10 路音频也被记录存储在计算机中，可以进行回放。

4 TM65m 天线俯仰驱动结构健康监测

建立的 4 套监测系统已成功应用在 TM65m 天线的俯仰驱动结构上，下面详细介绍每个系统的结构安全评估结果。

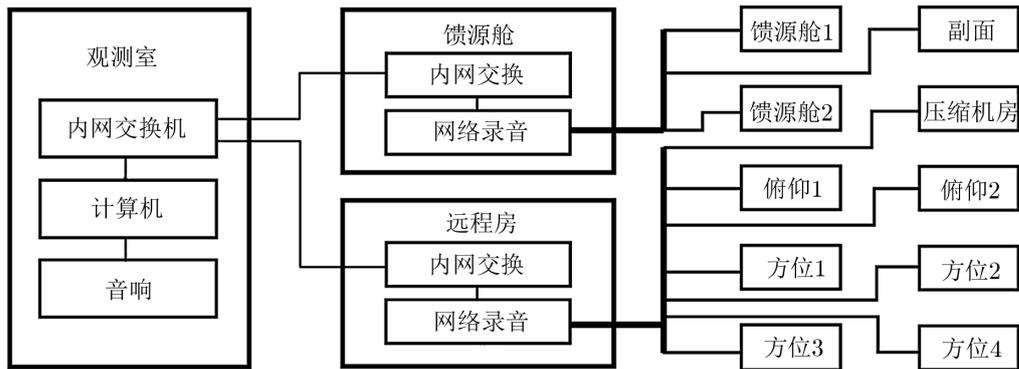


图 5 声音识别系统原理框图



图 6 拾音器位置和型号

4.1 结构测量系统

俯仰大齿轮直径 28 m, 模数 25 mm, 由轮幅和齿条组成, 齿条工作范围约 110° , 全齿分为 22 段, 通过顶、拉螺栓将其与轮幅连接。图 7 为天线由低俯仰旋转至高俯仰角时测量的齿轮径跳和端跳。径跳曲线的每一小段的突变为 22 段齿的拼接误差所致, $1/4$ 周期的 \sin 曲线变化反映了偏心误差。端跳曲线的小段突变亦为拼接误差, 图示的端跳曲线反映了大齿轮在旋转过程中发生了微小的摆动, 摆到最大位置后回摆, 最终摆回到初始位置。径跳和端跳的测量结果显示水平和垂直关节轴承起到了微调的作用, 并没有发生卡死现象。同时表明悬挂式结构实时适应和协调了因俯仰大齿轮安装和制造误差引起的俯仰驱动箱体的摆动, 大小齿轮及大齿轮和箱体间并没有发生冲击和碰撞, 结构运行正常。

利用千分表测量连接梁上下和左右位移, 结合测试探头到转轴的距离, 计算得连接梁左右偏摆角为 0.783° , 上下偏摆角为 1.642° , 均满足 $\pm 2^\circ$ 的技术要求。

另外, 采用压铅丝法测量了俯仰角 15° 、 30° 、 60° 和 80° 时齿轮的齿隙, 测量结果显示最小齿隙为 0.9 mm, 最大齿隙为 1.2 mm。由测量结果可知, 大小齿轮不会发生干涉问题, 当齿隙为 1.2 mm 时, 引起的指向误差为 $0.3''$ 。

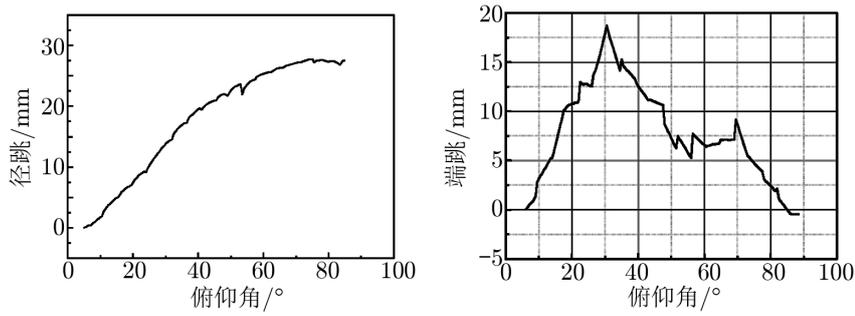


图7 齿轮径跳和端跳

4.2 电流监测系统

2015年4月10日14:00—15:30, 东北风、微风, 温度 $10\sim 17^{\circ}\text{C}$, 天线方位 155° , 俯仰以 $0.05^{\circ}/\text{s}$ 的速度由 5° 旋转到 88° , 然后再由 88° 旋转到 5° 。获得不同俯仰角下电机总电流, 如图8所示。由图8可知: 俯仰由低仰角旋转到高仰角驱动电机的总电流小于由高仰角旋转到低仰角的电流, 符合天线俯仰头轻脚重的设计原则; 且电流突变小于 20 A 。人机界面显示的4个电机的电流均小于 68 A 。取最大总电流 76 A , 由公式(1)—(3)计算接触应力为 55 MPa , 小于许用接触应力。因此, 由电机电流突变、单电机最大电流及轮齿接触应力的数据判断, 大齿轮处于安全状态。

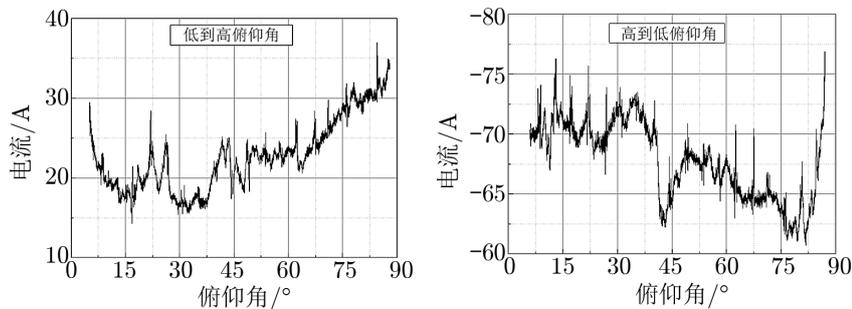


图8 不同俯仰角下电机总电流

4.3 温度监测系统

对2015年7月4日16:40—17:30一次扫描(俯仰的运动轨迹为由 88° 旋转到 12°)的数据进行分析。扫描过程中, 观测室里显示器上实时显示各测点的温度。同时, 该数据被记录在存储器中, 分析记录的4个轴承的温度随时间和俯仰角而变化, 关系如图9所示。轴承温度与参考温度接近, 温差小于 2°C 。由此可作为轴承正常工作的一个判据。

4.4 声音识别系统

在观测过程中, 观测室的音响实时播放俯仰驱动结构旋转过程中发出的声音, 同时计算机也对音频信息进行记录存储, 目前观测过程中没有发现异响。

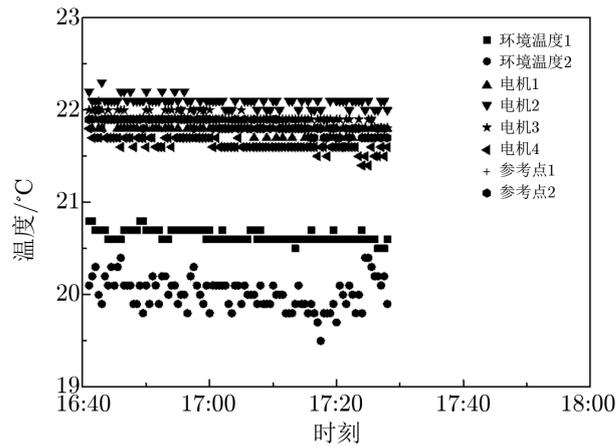


图9 不同时刻、不同俯仰角下轴承温度

5 结 论

TM65m 天线拥有较完整的大齿轮及俯仰驱动结构的健康监测系统。大小齿轮间的齿隙为 0.9~1.2 mm, 不存在干涉, 最大齿隙引起的指向误差为 0.3"。俯仰大齿轮存在制造误差(拼接误差)和安装误差(偏心误差), 悬挂式俯仰驱动结构中的水平和垂直关节轴承能够实时适应和协调因俯仰大齿轮安装和制造误差引起的俯仰驱动箱体的摆动, 且测量的连接梁的上下和左右偏摆角分别为 1.642° 和 0.783°, 满足技术要求。俯仰由低仰角旋转到高仰角时的总电流为 14~37 A, 由高仰角旋转到低仰角时的总电流为 -76 ~ -61 A, 符合天线俯仰头轻脚重的设计原则。脉动风引起的电机电流突变小于 20 A。电机总电流最大值对应的轮齿接触应力为 55 MPa, 小于许用接触应力。温度和声音的监测结果也表明结构安全。因此, 我们认为大齿轮及俯仰驱动结构目前工作正常, 处于安全状态, 能够保证结构的稳定性和高指向精度。未来进一步的工作是安装激光传感器实时监测俯仰大齿轮的径跳和端跳及连接梁的左右和上下偏摆; 另外, 建立预警系统, 实时预报 4 个系统的监测结果, 超出预警值时发出预警信号。

致 谢

感谢中国科学上海天文台射电科学与技术研究室的观测工程师对本工作的支持, 同时感谢中国科学院南京天文光学技术研究所的顾伯忠研究员和李国平研究员提出的宝贵意见。

参考文献:

- [1] SHEN Z Q. ATITC, 2015: 2
- [2] Mc G H D. TDA Progress Report 42-80, 1984: 146
- [3] Mc G H D. TDA Progress Report 42-81, 1985: 117
- [4] 范峰, 金晓飞, 王化杰, 等. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(12): 1
- [5] 王化杰. 硕士论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 2

- [6] Menninger F. Deep Space Network Progress Report, 1971, 3: 245
[7] Mancini D. SPIE- Large Ground-based Telescopes, 2003: 389
[8] Robert H H, Felix C M B, Aswin P L J, et al. SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2006: 627315

The Health Monitoring System of Elevation Drive Suspension of the TM65m Antenna

FU Li^{1,2,3}, ZHANG Yi-fan⁴, GENG Xu-guang⁴, ZHANG Ya-lin⁴,
YU Lin-feng¹, ZHAO Jun-hong⁴, SUN Qing-yu⁴, JIANG Yong-bin¹,
SUN Yun-xia¹, LING Quan-bao¹, FAN Qing-yuan¹, LIU Qing-hui¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Key Laboratory of Radio Astronomy Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: The structural form, characteristics and forced conditions of antenna's suspended elevation drive are introduced. The structure health monitoring systems which include structure measuring system, current monitoring system, temperature monitoring system and voice recognition system were established. The health analysis was performed based on these systems. The gaps between the bull gear and pinion were obtained by the structure measuring system, which is from 0.9 to 1.2 mm. Accordingly, the pointing error is 0.3 arc-second induced by the largest gap. The up-down and left-right pivot angles are 1.642 and 0.783 degree respectively. They all satisfy the technical requirements. Additionally, the results of current monitoring system show the current of motor is less than 68 A and the jump of current is less than 20 A when the elevation rotated from 5 to 88 degree. Simultaneously, the monitoring results of temperature and voice also show the structure is safety. As a result, we think the bull gear and elevation drive structure work normally at present. The further work is that the laser sensors will be installed to constantly monitor the variation of bull gear and connected beam. Moreover, the warming system will be established to forecast the monitoring results when they exceed the warming limit. The established health monitoring system of elevation drive structure offers references for the proposed large-scale antenna.

Key words: antenna; elevation drive system; health monitoring; safe assessment