

土壤水探测天线扫描机构设计及精度测量方法

李宁杰 刘 瑞 邴晓斌 钱志鹏 刘明利

(上海航天电子通讯设备研究所, 上海 201109)



摘要: 为了完成土壤水探测的外场挂载试验, 增大土壤水探测被动天线的扫描范围, 设计了一种扫描驱动机构, 并利用三坐标测量仪对其转动精度进行了测量, 此机构能够实现 $20^{\circ} \sim 34^{\circ}$ 范围动态扫描, 定位精度及重复定位精度 $\leq 0.1^{\circ}$, 相关技术指标达到了应用标准, 圆满完成了挂载试验。本文为相关挂载试验扫描驱动机构设计提供了借鉴, 为扫描驱动机构转动精度测量提供了一种测量方法。

关键词: 挂载试验; 扫描驱动机构; 转动精度测量

Design and Precision Measurement Method of Antenna Scanning Structure for Soil Water Detection

Li Ningjie Liu Rui Mang Xiaobin Qian Zhipeng Liu Mingli

(Shanghai Institute of Aerospace Electronic Communication Equipment, Shanghai 201109)

Abstract: A scanning driving mechanism is designed to complete the field mount experiment of soil water detection and increase the scanning range of passive antenna of soil water detection. The rotation accuracy of the system is measured by the CMM. This mechanism can realize dynamic scanning in the range of $20^{\circ} \sim 34^{\circ}$; with positioning accuracy and repeated positioning accuracy of 0.1° . The relevant technical indicators have reached the application standards and successfully completed the mount test. This paper provides a reference for the design of the relevant experimental driving scanning mechanism and a measurement method for the accuracy measurement of the scanning driving mechanism.

Key words: mounting experiment; scanning driving mechanism; rotation accuracy measurement

1 引言

水是最重要的陆地遥感参数, 陆地地表水和土壤水的综合监测对拓展土地、地矿、农业等领域具有重要的意义。国外学者对微波遥感土壤湿度的研究做了大量工作, 20 世纪 70~80 年代以野外车载和航空微波遥感实验为主^[1], 旨在发展微波遥感土壤湿度算法, 并研究其它因子的影响; 90 年代以发展实用的卫星微波遥感土壤湿度为主^[2], 检验以往算法的适用性, 并用于大尺度的土壤湿度制图, 为区域及全球水文模型, 陆面过程模式乃至全球气候模式提供必要的土壤湿度信息。典型微波遥感探测器包括 SMOS^[3]、SMAP^[4]等。

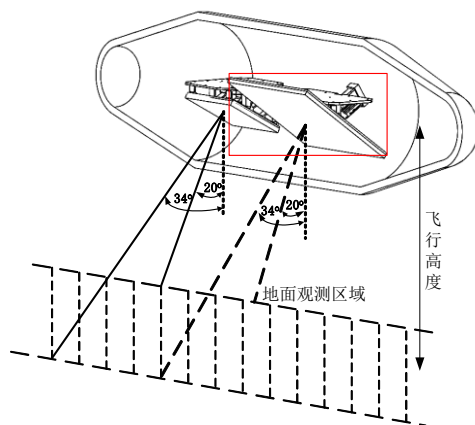


图 1 机载天线安装方案

基金项目: 国家民用空间基础设施中长期发展规划项目 (D010101)。

作者简介: 李宁杰 (1989), 硕士, 机械工程专业; 研究方向: 载荷总体结构设计。

收稿日期: 2019-10-29

频段越低,土壤水探测敏感度越高,因此国内外对土壤水探测均采用频段较低的 L 波段^[5]。为了通过机载观测模拟陆地水资源的微波遥感参数,设计了大型外场试验。在外场试验中为了获得被动遥感更大的对地覆盖面积,设计了带有电动缸的扫描驱动机构,使天线的扫描范围增大,机载天线安装方案如图 1 所示。为了验证得到扫描驱动机构的精度,用三坐标测量仪对其精度进行了测量。

2 扫描驱动机构设计

2.1 扫描驱动机构技术性能指标

根据外场试验的目的和要求,对扫描驱动机构提出了很多高性能的技术指标,如扫描重复指向精度、扫描定位指向重复精度等。扫描驱动机构的主要技术性能指标如表 1 所示,其中,扫描驱动机构的运动范围为 $20^{\circ} \sim 34^{\circ}$; 20° 为扫描初始零位, 27° 为扫描中点位置, 34° 为扫描终止位置,其角度扫描范围如图 2 所示。

表1 扫描驱动机构技术性能指标

技术要素	技术指标
扫描范围/(°)	$20 \sim 34$
扫描指向重复精度/(°)	$\leq 0.1^{\circ}$
扫描定位指向重复精度/(°)	$\leq 0.1^{\circ}$
扫描速度/(°·s ⁻¹)	$1 \sim 4$
负载重量/kg	30
负载重量/V	220
工作环境温度/°C	$-10 \sim +30$
扫描机构最大运动包络/mm	≤ 830 (长) $\times 800$ (宽) $\times 460$ (高)
扫描机构控制器最大包络/mm	≤ 400 (长) $\times 350$ (宽) $\times 300$ (高)

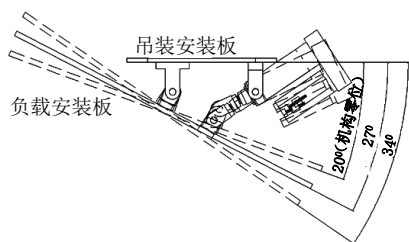


图2 扫描驱动机构角度扫描范围

2.2 扫描驱动机构整体设计

根据扫描驱动机构的设计要求和技术指标,将整个系统划分为两个子系统,分别为:机械摆动部分和控制系统部分,扫描驱动机构的结构整体布局如图 3 所示。机械摆动部分主要由伺服电动缸、吊装安装板、负载安装板、铰链机构组成。其中,吊装安装板和负

载安装板采用铝合金材料,质量轻,结构刚度强;铰链机构采用不锈钢材料,配合紧密,转动间隙小。控制系统主要由上位机、控制柜、角度传感器组成。其中,上位机采用性能稳定的地测设备;控制柜中的 PLC 采用欧姆龙多能性 PLC,伺服驱动器采用 MOTEC 通讯型驱动器;角度传感器采用欧姆龙高精度角度传感器。下文主要对伺服电动缸设计和控制系统设计做详细介绍。

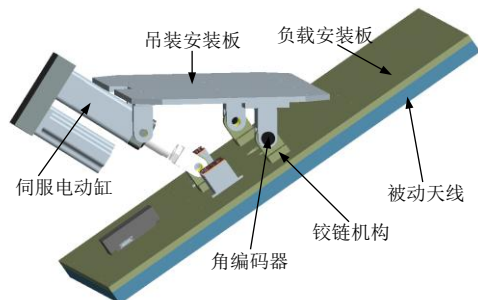


图3 扫描驱动机构整体结构设计

伺服电动缸是由伺服电动机和丝杠组成的一体化产品,伺服电动机通过同步带与丝杠连接,将电机的转动转换为电动缸的直线往返运动^[6]。伺服电动机具有精度高、易控制等优点,通过丝杠可以转化为电动缸的高精度运动,准确的速度、位置和推力。

根据驱动扫描机构的整体结构位置关系,根据运动的实际情况,将吊装安装板、负载安装板和电动缸整体简化为三角形结构来表示相对的位置关系,具体如图 4 所示,顶点 1 表示电动缸与吊装安装板之间的铰链机构,顶点 2 表示电动缸与负载安装板之间的铰链机构,顶点 3 表示吊装安装板与负载安装板之间的铰链机构。

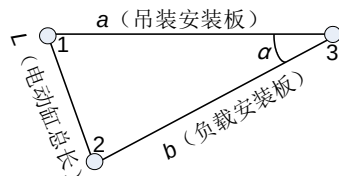


图4 驱动扫描机构简化位置关系

根据驱动扫描机构简化位置关系,由余弦定理可以得到电动缸的总长与扫描角度之间的关系式为:

$$L^2 = a^2 + b^2 - 2 \times a \times b \times \cos \alpha \quad (1)$$

式中: L 为电动缸的总长, α 为驱动机构转动角度。

当驱动扫描机构扫描角度为 20° 时,电动缸伸出

量最小；当驱动扫描机构扫描角度为 34° 时，电动缸伸出量最大，因此可以算出电动缸所需行程：

$$\begin{aligned} L_1 &= \sqrt{a^2 + b^2 - 2 \times a \times b \times \cos \alpha_1} \\ &= \sqrt{200^2 + 135^2 - 2 \times 200 \times 135 \times \cos 20^\circ} \\ &= 86.496 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} L_2 &= \sqrt{a^2 + b^2 - 2 \times a \times b \times \cos \alpha_2} \\ &= \sqrt{200^2 + 135^2 - 2 \times 200 \times 135 \times \cos 34^\circ} \\ &= 116.004 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta L_{\max} = L_2 - L_1 = 116.004 - 86.496 = 29.508 \text{ mm} \quad (4)$$

式中， L_1 为 20° 时，电动缸的总长； L_2 为 34° 时，电动缸的总长； $\Delta L_{\max}$ 为电动缸所需行程。

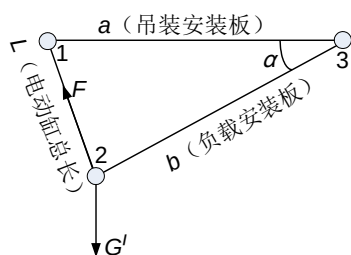


图5 电动缸输出力示意图

被动天线为 10kg ，负载安装板为 10kg ，背面单机重 1kg ，电动缸所需输出力为：

$$F = \frac{2 \times G' \times L_1}{b \times \sin \alpha} \quad (5)$$

式中， F 为电动缸输出力。

表2 伺服电动缸参数表

型号	SEC61-R293
电动缸类型	折返式
外形图号	GJ-2399-D
行程/mm	40
丝杆导程/mm	3 (T 型丝杠)
额定出力/kN	0.3
电动缸额定速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	10 (额定速度内可调)
伺服电机功率/kW	0.4 (220V 交流伺服电机, MOTEC, 带刹车)
伺服电机额定转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	3000
编码器类型	增量式
减速比	1 : 1 (进口高强度同步带)
轴承	NSK
内部防转机构	有
限位开关	有 (两个 NPN 常闭)
安装方式	耳轴+前端铰链
润滑方式	润滑脂

因为挂载样机要整体安装在密封舱内，因此结构设计包络尺寸越小越好。电动缸有直线式、折返式和垂直式三种，考虑到安装空间和运动精度，选用折返式电动缸。结合电动缸所需行程、所需输出额定力，选取型号 SEC61-R293 的电动缸，可以满足设计要求。此型号电动缸重复定位精度为正负 0.05mm ，带自锁功能，采用 MOTEC 高精度伺服电机，具体参数如表 2 所示。

电动缸总长度包括电动缸本体固定长度加上电动缸伸长量，有公式：

$$L = L_0 + \Delta L \quad (6)$$

式中， L_0 为电动缸本体固定长度， ΔL 为电动缸伸长量。

通过式 (1) 和式 (6) 可得，电动缸伸长量与转动角度之间的关系式为：

$$\Delta L = \sqrt{a^2 + b^2 - 2 \times a \times b \times \cos \alpha} - L_0 \quad (7)$$

式中， a 、 b 、 L_0 为已知量，因此可以直接计算电动缸伸长量与转动角度之间的关系。PLC 根据上式可以计算出扫描驱动机构摆动角度与电动缸伸出量之间的关系，从而通过程序控制机构的转动角度。同时，加装在转动轴上的编码器可以实时反馈机构的转动角度，从而进一步保证驱动机构的角度控制精度。

设计完成的控制系统可以实现三个主要的功能：驱动机构可以根据上位机指令进行连续的扫描，转动角度范围和转动速度是可以设置的；驱动机构可以根据上位机指令在某个特定的角度进行定位，实现天线的定角度观测；角编码器可以按照上位机的读取指令反馈驱动机构的扫描角度，由上位机实现实时采集记录扫描驱动机构的转动角度值。

3 扫描驱动机构精度测量

3.1 精度测量方法

利用三坐标测量仪，在被动天线安装板和吊装安装板每块板各取 5 个点，拟合两个平面，得到被动天线安装板和吊装安装板的平面精度，再测量两平面间的夹角，即被动天线的转动角度，得到显示值和实测值，以此判断驱动机构的精度，测量过程如图 6 所示。通过对机械零位 (20°) 的标定，完成机构基准的确定；然后通过对机构 27° 、 34° 的标定，完成机构最终的标定。如果在重复测量中，实测值和编码器值显示不一致，通过软件进行补偿，直至实测值和显示值在误差允许范围内。

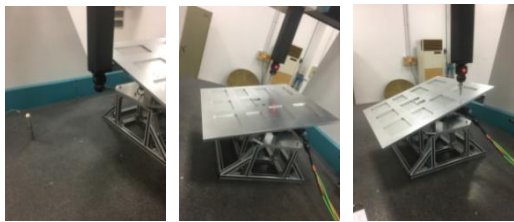


图6 扫描驱动机构精度测量

安装板平面度测量结果：被动天线安装板：0.03mm（技术指标：≤0.2mm）；吊装安装板：0.04mm（技术指标：≤0.2mm）。

3.2 扫描驱动机构精度测量过程及结果

3.2.1 机构零位 20° 的标定

a. 通过控制器调整机构使得被动天线安装板与吊装安装板夹角在 20° 附近，并进一步微调后，三坐标实测值为 19.9967°；此位置标定为机构的机械零位，编码器显示设置为 20°；

b. 控制器关机再开机零位值角度编码器读数为 19.999°；

c. 控制器控制机构往返运动一个周期后返回零位，三坐标的实测值为 19.43950°；此时通过软件补偿回程间隙 0.56050°；三坐标实测值为 19.99960°（主要由电动缸丝杆，铰链，轴承等间隙累积引起）；

d. 机构继续做一个往返运动周期后三坐标实测值为：19.9978°；

e. 误差满足定位精度≤0.1°要求，机构零位 20° 标定完成。

3.2.2 机构 27° 的标定

控制器给予 7° 的角度增量，标定机构的定位角度 27°，进行了 2 次标定，标定值见表 3。

表3 机构定位角度27°标定值 (°)

序号	标定角度	三坐标实测值	角编码器读数
1	27	27.0154	27.020
2	27	26.9817	26.970

结果显示，误差满足定位精度及重复定位精度≤0.1°的要求，机构定位角度 27° 标定完成。

3.2.3 机构 34° 的标定

表4 机构定位角度34°标定值 (°)

序号	标定角度	三坐标实测值	角编码器读数
1	34	34.0508	34.040
2	34	34.0012	33.992

控制器给予 14° 的角度增量，标定机构的定位角度 34°；进行了 2 次标定，标定值见表 4。

结果显示，误差满足定位精度及重复定位精度≤0.1°的要求，机构定位角度 34° 标定完成。

3.2.4 机构角度标定后复测结果

在对控制器进行关机再开机，机构往返运动几个周期后，复测上面的机构角度标定结果，结果见表 5。

表5 机构角度标定后复测结果值 (°)

序号	标定角度	三坐标实测值	编码器读数
1	20（零位）	20.0039	20.000
2	27	26.9850	26.970
3	34	34.0071	33.995
4	27	27.0897	27.110
5	20（零位）	19.9982	20.000

结果显示，在机构返程时，27° 的回程间隙稍大，需要在软件中进行补偿，其他均满足定位精度及重复定位精度≤0.1°的要求。

3.2.5 补偿 27° 回程间隙后复测结果

在控制器软件中对 27° 回程间隙进行补偿后，机构按 34°→27°→20°→27° 的顺序进行扫描，复测结果见表 6。

表6 机构定位角度27°复测结果 (°)

序号	标定角度	三坐标实测值	编码器读数
1	27（34→27）	27.0106	27.020
2	27（20→27）	26.9853	26.970

结果显示，补偿结果满足定位精度及重复定位精度≤0.1°的要求。

3.3 扫描驱动机构验证试验

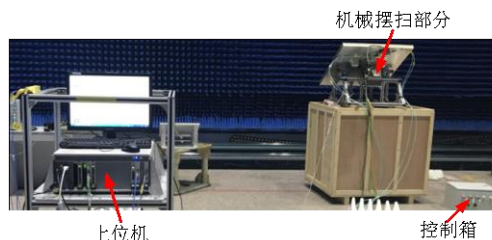


图7 扫描驱动机构的试验系统

为了验证土壤水探测设备的整体性能，在天线暗室搭建了实物样机进行了试验前测试，其中包括了扫描驱动机构的测试试验，整体系统实验如图 7 所示。将吊装安装板安装在铝合金框架上，被动天线安装在负载安装板上，上位机安装在舱内设备框架上，控制箱是直接固定到飞机舱内的。用电缆将电动缸与控制

箱连接,给电动缸传输命令和供电;上位机和控制箱用电线连接,给控制箱传输命令,控制箱直接连接220V 的电源供电;角编码器与上位机直接用电线连接,上位机可以实时观测和记录扫描驱动机构的转动角度。

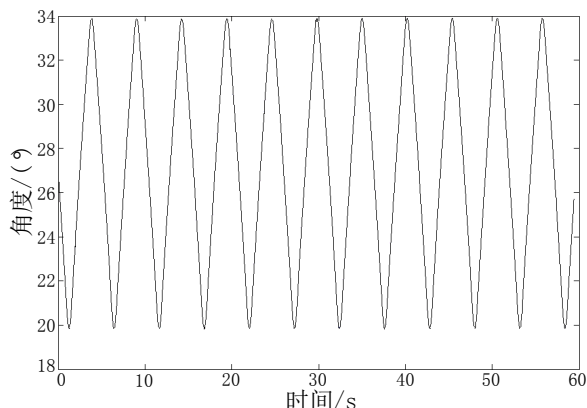


图8 驱动扫描机构转动角度图

上位机通过给控制箱传输指令控制伺服电动缸的运动,同时实时采集电动缸转动角度数据,通过数据处理,将原始数据转化为图的形式,实验结果如图8所示。通过图8可以看出,驱动扫描机构根据预先设计运动方式做周期运动。最小采集数据为 19.905° ;最大为 33.960° ;满足定位精度 $\leq 0.1^{\circ}$ 的要求。观测每个周期的最小角度值皆在 $19.905^{\circ} \sim 20.00^{\circ}$ 之间,每个周期的最大角度值皆在 $33.910^{\circ} \sim 33.960^{\circ}$ 之间,满足重复定位精度 $\leq 0.1^{\circ}$ 的要求。

XX
(上接第18页)

6 结束语

通过分析舱体工艺加工难点,制定了工艺加工流程,提出了应力均化处理技术和低应力工装技术,研究表明:

- 振动时效时间为35min,热时效炉温 120°C ,保温时间10h,能够有效消除和均化内部残余应力;
- 采用压板装夹工件最大变形量达到0.7mm,利用低应力工装辅助装夹最大变形量仅0.3mm;
- 优化了切削加工参数,分析了主切削力对变形量的影响,得出精铣内腔转速为2500r/min,切削速度1500mm/min,切宽10mm,切深2mm。

本研究经过了3个批次的验证,所加工产品均满足技术要求,提高了企业的竞争力与经济效益,为此类大型异形铸造铝合金舱体精密加工提供了参考。

4 结束语

本文设计的土壤水探测被动天线的扫描驱动机构,实现了 $20^{\circ} \sim 34^{\circ}$ 范围运动扫描,定位精度及重复定位精度 $\leq 0.1^{\circ}$;满足探测使用需求,圆满地完成了外场挂载试验,对以后类似的挂载试验具有指导意义,同样适用于其他需要类似机构的场合。所涉及的驱动机构精度测量方法,完成了所设计的扫描驱动机构转动角度精度的准确测量,对驱动机构转动精度测量提供了参考。

参考文献

- 金亚秋. 星载微波SSM/I遥感在中国东北华北农田的辐射特征分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(1): 19~25
- 席家驹, 文军, 田辉, 等. AMSR-E 遥感土壤湿度产品在青藏高原地区的适用性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 194~202
- Reul N, Fournier S, Boutin J, et al. Sea surface salinity observations from space with the SMOS satellite: a new means to monitor the marine branch of the water cycle[J]. Surveys in Geophysics, 2014, 35(3): 681~722
- Panciera R, Walker J P, Jackson T J, et al. The soil moisture active passive experiments (SMAPEX): Toward soil moisture retrieval from the SMAP mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 490~507
- 宋冬生, 赵凯. 利用地基双频段微波辐射计测量土壤湿度[J]. 吉林农业大学学报, 2007, 29(1): 70~73
- 唐英. 电动缸的传动和受力分析[J]. 重型机械科技, 2007, 24(4): 10~14

参考文献

- Ratchev S, Liu S, Huang W. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44:1629~1641
- 胡权威, 乔立红, 张洪伟. 薄壁结构件铣削参数有限元正交优势分析及优化[J]. 机械工程学报, 2013, 49(21): 176~184
- 苏宝玉, 李俊英. 航空复杂薄壁结构件加工技术研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(8): 34~37
- 牛亚洲. 铝合金复杂薄壁结构件精密加工技术研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2016
- 孙国智. 大型复杂薄壁结构件加工变形仿真与控制技术研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2015
- 郭冠宁. 振动时效设备开发及其工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011