DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2022.06.012

# 70 m天线俯仰扇齿组合的加工与安装\*

李东伟<sup>1,2</sup>, 孙懿敏<sup>1,2</sup>, 贺新刚<sup>1,2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第三十九研究所,陕西西安 710065;

2. 陕西省天线与控制技术重点实验室,陕西西安 710065)

摘 要:俯仰扇齿组合是70m天线结构系统的关键部件,其加工与安装的精度直接决定天线俯仰运动的精度,最 终影响天线的指向精度。文中从俯仰扇齿组合施工现场保精度安装需求出发,介绍了俯仰扇齿组合前期生产加 工、检测及预组装的详细工艺策划方案。通过设计合理的工艺检测基准、安装基准、工艺模板及工艺复位工装,解 决了俯仰扇齿组合安装、检测及定位问题,最终安装精度达到了70m天线俯仰扇齿组合的设计精度要求,为70m 天线结构系统现场顺利安装奠定了坚实的基础。

关键词:70 m 天线;俯仰扇齿组合;生产加工;检测基准;预组装

中图分类号:TN82 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2022)06-0060-05

# Manufacturing and Installation of Elevation Gear Combination of 70 m Antenna

LI Dongwei<sup>1,2</sup>, SUN Yimin<sup>1,2</sup>, HE Xingang<sup>1,2</sup>

(1. The 39th Research Institute of CETC, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Antenna and Control Technology, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The elevation gear combination is the key component of the 70 m antenna structure system. Its manufacturing and installation accuracy directly determines the accuracy of the antenna pitch motion and finally affects the pointing accuracy of the antenna. The detailed process planning scheme for the early production, processing, inspection and preassembly of the elevation gear combination is introduced in this paper according to the installation requirements on the construction site of the elevation gear combination. By designing reasonable process inspection benchmark, installation benchmark, process template and process reset tooling, the problems of installation, detection and positioning of elevation gear combination are solved. The final installation accuracy meets the design accuracy requirements of elevation gear combination of 70 m antenna, which lays a solid foundation for the smooth installation of 70 m antenna structure system on site. **Key words:** 70 m antenna; elevation gear combination; production and processing; inspection benchmark; preassembly

# 引 言

70 m天线是目前亚洲地区建成的最大单口径全 可动天线,天线质量为2700 t,主反射面直径为70 m, 高约72 m,相当于一座20多层大楼的高度,建成后为 我国首次火星探测任务以及后续的深空探测任务打下 了坚实的基础<sup>[1-2]</sup>。70 m天线是一台大型轮轨式全 方位可动的超大口径天线,可做方位和俯仰两个方向 的运动,方位工作角度为-1°~360°,俯仰工作角度为 0°~90°,大范围的工作角度确保了天线能接收更广、 更远的信号<sup>[3]</sup>。传统大型转台式天线可以在工厂内

• 60 •

完成整个天线结构系统的预组装及精度测调,外场安装仅通过专用销钉复位就可复现预组装状态,保证天线外场安装精度,而70m大型轮轨式天线外形尺寸大,重量重,焊接工作量大,运输受限,因此其安装只能在外场进行,无法在工厂内完成整个天线结构的预组装。在工厂内只进行部件的生产及预安装,到外场后在检验人员配合下进行现场安装。因此如何高效完成轮轨式天线结构系统的外场安装任务、避免返工及无法安装的问题、提高外场安装教率、规划好外场安装整体工艺路线及保证外场安装精度成为轮轨式天线外场

<sup>\*</sup> 收稿日期:2022-01-23

安装必须要提前策划的重要问题。其中俯仰扇齿组合 是构成70m天线俯仰运动的关键部件,其加工精度和 安装精度直接决定天线俯仰的指向精度,因此需要从 天线结构系统现场安装总规划需求出发,分离出俯仰 扇齿组合的加工和安装精度要求,从而全面做好俯仰 扇齿组合的整体工艺路线策划,确保现场俯仰运动部 分可靠、准确的安装<sup>[4]</sup>。

# 1 结构简介

俯仰扇齿组合是70m天线座架的关键部件,其 结构如图1所示。它由7段箱型环形梁和12根齿弧组 成,左侧4段箱型环形梁安装有12根齿弧,齿弧和环形 梁上共有560个向心连接孔,右侧3个环形梁无齿弧, 整个结构为非对称结构。俯仰扇齿组合的尺寸约为 40m(长)×0.9m(宽)×20m(高),质量约为95t。



图 1 70 m天线座架及俯仰扇齿组合示意图

俯仰扇齿组合的结构特点决定其安装环节不可 调,外场安装的精度完全由每个部件的机加工精度保 证。俯仰扇齿组合外形为40m×20m,这样的大尺寸 部件在外场组装时,一旦加工累计误差过大及未提前 规划设计好外场组装工艺方案,就会出现俯仰扇齿组 合外形尺寸误差超出理论要求、齿弧及环形梁上成百 个孔群错位及各段齿弧接缝齿形误差超出理论要求等 在外场无法解决的问题。这些问题将直接导致现场无 法正常安装,只能将安装零部件运回工厂内重新上机 床加工修复后才能重新组装,这样将极大影响外场的 安装施工进度,增加安装成本。因此,70m天线座架部 分总体安装工艺思路为除俯仰扇齿组合在厂内预组装 外,其余部件均在施工现场在检测仪器配合下安装组 焊<sup>[5]</sup>。俯仰扇齿组合在厂内预组装旨在解决如下关 键问题:1)厂内俯仰扇齿组合预组装和现场其他部件 安装并行进行,预组装时做好现场复位工装,现场通过 复位工装和复位销钉复位,提高现场安装效率。2)俯 仰扇齿组合是组装件,因此预组装可以提前发现加工 的累积误差,避免现场出现因接口不对而无法安装的 情况。3) 避免现场出现齿弧和各环形梁连接的560个 孔群因累计误差错位而无法安装的情况。4)由于天线 俯仰工作范围为0°~90°,俯仰扇齿组合设计为非对 称结构,左侧安装有12根齿弧,总质量为36t,右侧无 齿弧,因此吊装时会出现重心不在整个结构中心的偏 心问题。另外,由于加上12根齿弧吊装,总质量超出了 施工外场最大的2000t履带吊的吊装能力,因此为了 保证吊装安全及考虑吊车的吊装能力,只能在将整个 俯仰部分整体吊装到天线座架上后,再在高空依次安 装单根齿弧。总体安装工艺流程决定了齿弧必须先在 地面和环形梁上完成预组装,这样才能保证在施工现 场高空中准确快速地将每个齿弧安装到位。5)降低现 场窝工的概率。

### 2 总体工艺规划

从施工现场俯仰部分总工艺安装规划思路出发, 工厂内的关键控制点在于俯仰扇齿组合的厂内加工 及预组装。为保证俯仰扇齿组合厂内预组装的顺利进 行,在生产加工前,需提前规划出加工、检测、装配的需 求,从加工阶段开始就将后期装配需要的检测基准等 提前规划在加工环节,站在宏观的角度总体把握整个 俯仰扇齿组合的制造过程。

为了保证俯仰扇齿组合的现场安装精度,厂内预 组装需保证以下关键点:1)俯仰扇齿组合跨距的准确 性;2)各段环形梁上的孔和与之连接的12根分段齿弧 上共560个孔位的准确性;3)如何保证12根齿弧截断 面拼接时接缝缝隙的准确性;4)如何在现场快速定位 及复位俯仰扇齿组合,提高现场安装效率;5)总装时检 测基准的规划。

为了保证上述各关键指标,在工艺规划上从以下 几方面入手:1)为了保证俯仰扇齿组合的跨距,必须选 择能满足加工精度的机床,在加工阶段保证每段环形 梁的夹角及尺寸精度;2)在加工阶段必须严格保证每 个孔位相对基准面的位置精度;3)设计齿弧截断面连 接工艺工装,确保齿弧截断面连接的准确性;4)设计俯 仰扇齿组合定位及复位工装,实现现场快速复位;5)在 加工7段环形梁时,在齿弧连接面的外圆侧面及箱体 上端面做检测基准面及检测基准孔,这样厂内预组装 及现场安装时就有可靠的检测基准点。

## 3 加工与检测基准建立

俯仰扇齿组合总装时的安装精度与零部件的加工 精度和加工中检测基准的设立密切相关。只有控制好 加工阶段的精度和检测基准,才能保证俯仰扇齿组合 总装时的精度<sup>[6]</sup>。

#### 3.1 环形梁的加工要求及检测基准建立

环形梁的结构如图1所示。每段环形梁的结构类 似,加工方法相同,加工的关键点均为保证环形梁的两 个夹角尺寸和外侧弧形面上成百个向心孔的位置精 度,这两个关键尺寸可通过高精度的数控镗床加工来 保证。如果只按照结构图纸加工,则只能符合图纸设 计意图,在部件加工完的检测阶段和总装阶段会出现 一些不便及难测量的问题,这就要求在加工阶段融入 部件及安装检测基准的加工。因此,环形梁的加工重 点为从系统总装角度考虑,在环形梁加工阶段加入工 艺安装检测基准面及基准孔。

环形梁工艺设计重点如下:

1)在环形梁的外圆一侧设计深5 mm、宽7 mm、半 径为*R*<sub>1</sub>的工艺检测基准台阶,如图2所示。此处台阶 外圆为俯仰扇齿组合总装时半径检测基准外圆,能确 保每个环形梁按理论位置安装到位,并能通过此检测 基准检测调整,确保现场总装时俯仰齿弧中心与整个 天线的俯仰轴中心相交于一点。



图 2 环形梁检测基准示意图

2)在环形梁两侧设计2组工艺检测基准孔,每组 3个孔,共6个,为Φ10 mm、深15 mm的盲孔,如图3所 示。加工工艺检测基准孔时要严格控制孔中心的位 置,一个定位尺寸为满足基准台阶面到孔中心的定位 尺寸,另一个定位尺寸是满足环形梁连接面到孔中心 的定位尺寸。此检测基准孔一方面是为了环形梁加工 完成后便于检验人员通过测量各孔与其他孔的相对弦 长检测工件尺寸加工的准确性;另一方面是用于俯仰 扇齿组合总装时检测安装位置的准确性。

3)在加工位于中心的环形梁4时,在其内侧配重 连接平面刻画左右对称的中心线,此线作为装配检测 的中心基准线。

综上所述,通过在环形梁上设计简单的工艺检测 基准面及基准孔,解决了部件的检测和整个俯仰齿弧 安装缺检测基准的难点问题。



图 3 环形梁检测基准孔位置示意图

#### 3.2 齿弧的加工要求及安装工艺基准设计

俯仰扇齿组合中有12根齿弧,每根齿弧的外形如 图4所示。齿弧的尺寸为2.85 m(长)×0.55 m(宽)× 0.35 m(高),质量为3 t。齿弧可以在数控镗铣床上按 传统加工方法来加工,但加工后如何快速准确地进行 检测以及安装时如何保证每两根齿弧接缝缝隙的准确 性是齿弧加工及安装的难点,在工艺设计上必须提前 策划,将系统问题转化到零件加工阶段<sup>[7–8]</sup>。





齿弧工艺设计重点如下:

1)设计如图4所示的齿弧齿形快速检测工艺模 板。与传统检测方法相比,该模板能更直观地检测齿 弧外形的精度。齿弧齿形快速检测工艺模板不应该和 齿弧加工采用同一设备和程序,以免因同一设备和程 序自身的加工误差而产生零件检测误差。本工程齿弧 检测工艺模板采用线切割方法加工,可保证模板的精 度。同时在俯仰扇齿组合总装时也可使用检测模板检 测每两个齿弧缝隙中齿形的准确性。

2)在每根齿弧两端设计如图5所示的工艺台阶面 定位缺口,台阶面上设计有连接孔和定位销孔。加工 销孔时,±0.05 mm的位置精度是安装的关键点,因此 要进行严格控制,使孔的位置精度和齿弧齿形采用同 一个基准加工,以确保最终的齿弧安装精度。

3)设计齿弧连接工艺定位块,定位块的加工关键 为外形尺寸及销孔±0.05 mm的位置精度。定位块的

 $\cdot 62 \cdot$ 

作用是使两段相邻齿弧能够在保证理论缝隙的前提下 快速安装,保证接缝处齿弧的齿形。



图 5 齿弧工艺台阶面

4)12根齿弧通过工艺定位块快速连接成一个整体,其装配安装示意图如图6所示。先通过销孔定位再通过外形尺寸精度控制,确保齿弧安装到位。



图 6 齿弧快速连接装配示意图

综上所述,通过在齿弧上设计高精度工艺安装台 阶面及工艺连接定位块,解决了齿弧简便测量和整个 齿弧快速准确安装的难点。

#### 3.3 总装复位工装的设计

俯仰扇齿组合在厂内完成预装后,必须考虑现场 的快速复位问题。工艺策划中设计了俯仰扇齿组合复 位工装,其结构及安装位置如图7所示。复位工装由 2个焊接件通过销钉及螺栓螺接为一个整体。完成预 装后,在每个环形梁接缝3个面上焊接复位工装,将复 位工装中的2个焊接件分别焊接在两个相邻的环形梁 上。拆开俯仰扇齿组合时拆开每一对复位工装,待现 场安装时通过专用销钉复位工装,重现预装状态。总 装复位工装的设计保证了70m天线施工现场俯仰扇 齿组合的安装效率和装配精度。



图 7 总装复位工装及安装示意图

## 4 装配与检测

俯仰扇齿组合装配与检测的详细流程如下:

1)在场地设定俯仰扇齿组合装配的圆心,并用卷 尺粗定中心环形梁4的位置,使得环形梁4上内侧配重 连接平面到圆心的距离为L,环形梁4的中心与俯仰扇 齿组合装配的圆心左右对称,通过水准仪将环形梁4 基准台阶面调至水平。

2)装配圆心放置经纬仪,转动经纬仪的方位角度, 一直调整到经纬仪方位锁定后,俯仰方向转动时,经纬 仪目镜内十字线与中心环形梁4配重连接面上的工艺 中心十字刻线对齐,记录此位置,它是整个总装的中心 基准。

3)在经纬仪配合下,将其余6个环形梁依次摆放 到理论角度,并将直尺搭在两个环形梁接缝处的基准 台阶外圆面上,粗调,保证所有工艺检测基准台阶面水 平,粗调并用肉眼观察,保证所有工艺检测基准台阶面 在同一外圆上。

4)激光跟踪仪配合精调,使基准台阶外圆半径 误差在±0.5 mm内,基准台阶面的水平度误差在±0.2 mm内。

5)用激光跟踪仪测量俯仰扇齿组合的跨距,跨距 误差控制在±2 mm内。跨距为此次装配的关键指标, 若出现超差,有问题的环形梁必须重新上机床修配。

6)用激光跟踪仪检测图8所示的7根环形梁上端 面(大端面)各Φ10 mm工艺基准孔间的相对弦长尺 寸(以W<sub>12</sub>,W<sub>13</sub>,W<sub>14</sub>,W<sub>15</sub>,W<sub>16</sub>,W<sub>17</sub>,N<sub>12</sub>,N<sub>13</sub>,N<sub>14</sub>, N<sub>15</sub>,N<sub>16</sub>,N<sub>17</sub>表示)并做好记录,此数据为70 m天线 施工现场安装复位检测的依据。



图 8 俯仰扇齿组合基准检测孔检测示意图

7)从环形梁1开始,依次将12根齿弧安装到各环 形梁上。每根齿弧与相邻齿弧连接时,通过工艺台阶 面及工艺定位块的销孔定位,用螺栓连接。相邻齿弧 连接完成后用工艺安装齿弧检测模板检测接缝齿弧齿 形的准确性。12个齿弧连接完后,检查环形梁上的所 有连接孔,保证它们均能和齿弧上对应的连接孔连接, 不存在孔群错位现象,否则需要重新加工问题连接孔。 8)如图7所示,2个复位工装通过销孔及螺孔连接 好后,再分别配焊在相邻的2个环形梁上,每个环形梁 接缝处焊接3对复位工装(共18对)。此安装工序确保 了大型结构件俯仰扇齿组合在施工现场的准确复位。

综上所述,俯仰扇齿组合按照总体工艺规划顺利 完成安装,且各装配指标精度均达到预期要求。这充 分说明前期将整个安装过程所需的工艺基准、检测基 准、工艺安装工装提前规划到前期零部件的加工和检 测阶段起到了事半功倍的作用,提高了现场安装效率 并保证了安装精度。

# 5 结束语

本文根据70m天线结构系统现场俯仰扇齿组合的安装需求,通过前期合理的工艺路线规划、检测基准规划、工艺工装设计及检测方案规划,将现场安装一个重达百吨的部件的关键控制点和极难控制的安装 难点分级划分到俯仰扇齿组合零部件的加工、生产及 预组装中,最终解决了俯仰扇齿组合现场安装及检测 的难点,避免了加工误差对现场施工进度的影响,并且 通过在70m天线外场实际工程中成功的保精度安装 进一步验证了此次俯仰扇齿组合工艺路线总规划的 准确性,对以后更大口径天线的安装具有一定的借鉴 意义。

(上接第55页)

镀镍层较厚,生产效率低,对金刚石/铝复合材料的导 热性能也有一定影响。

建议后续开展降低镀镍层厚度的相关研究。例 如,开发更优的钯活化工艺,可以使金刚石表面和镍镀 层表面具有相同的催化活性和化学镀镍层沉积速度; 对镀镍层进行研磨,去除表面凹坑,在降低镀层厚度的 同时,也可进一步降低镀层的表面粗糙度。

#### 参考文献

- [1] LIN X H, MO S P, MO B Z. Thermal management of high-power LED based on the thermoelectric cooler and nanofluid-cooled microchannel heat sink [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 172: 115165.
- [2] 张眯, 王从香, 牛通, 等. 金刚石/铝在微波功率组件中的 应用研究[J]. 电子机械工程, 2020, 36(4): 53-54.
- [3] 史起源. 金刚石/铝复合材料上镍磷和金镀层的制备及其 焊接可靠性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.

#### 参考文献

- [1] 郭可敬, 王博通, 贺新刚. 70 m天线反射体的安装与测量 [J]. 电子机械工程, 2021, 37(2): 41-44.
- [2] 我国火星探测70m天线整体吊装成功[J].发明与创新 (大科技), 2020(5):57.
- [3] 赵武林, 李燕. 大型天线俯仰架结构 [J]. 电子机械工程, 2018, 34(6): 9-12.
- [4] 李宗春,李广云,冯其强,等.上海天文台Φ65 m射电望远 镜精密安装测量[J].测绘通报,2012(S1): 126-130.
- [5] 朱芳. 复杂零件加工过程质量控制理论与方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [6] 陈曦庆. 浅谈机械加工基准的选择 [J]. 山西焦煤科技, 2010(S1): 14-15, 40.
- [7] 朱万刚. 大型齿轮在位综合测量原理与技术的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2006.
- [8] 柳鹏旭,李强,周江林. 大型齿轮加工方法[J]. 金属加工 (冷加工), 2011(10): 45-46.

**李东伟** 男,1968年生,研究员级高级工程师,主要从事雷达天线结构工艺研究工作。

**孙懿敏** 女,1982年生,高级工程师,主要从事天 线结构设计及工艺研究工作。

**贺新刚** 男,1984年生,高级工程师,主要从事天 线结构设计及工艺研究工作。

- [4] 牛通, 韩宗杰, 张梁娟, 等. 金刚石/铜复合散热材料的制 备和检测[J]. 电子与封装, 2014(2): 9-12.
- [5] 刘东光, 卢海燕, 周明智. 微波组件 Al-Si 封装材料表面改 性工艺研究 [J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(6): 675-678.
- [6] 徐超, 贾成厂, 郭宏, 等. 化学镀镍工艺对金刚石/铜复合 材料表面镀层性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(11): 1500-1506.
- [7] 项东. 金刚石表面化学镀覆技术的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [8] 冯绍彬, 振兴, 胡芳红. 铝基体上浸锌工艺 [J]. 电镀与涂 饰, 2009, 28(4): 32-35.
- [9] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water [J]. Industrial Engineering Chemistry, 1936, 28(8): 988–994.

付银辉 男,1984年生,硕士,主要从事电子封装 材料表面镀覆工艺研究。