

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.02.012

雷达旋转传输组合系统模块化设计*

刘文科,常 健,赵克俊

(中国电子科技集团公司 第三十八研究所,安徽 合肥 230088)

摘要:针对雷达旋转传输组合系统设计存在的周期长、效率低和通用性差等问题,提出了一种模块化设计方法。分析了基于模块化设计的旋转传输组合系统的主要优点;根据雷达总体技术要求,对功率汇流环、信号汇流环、光铰链和液体旋转关节等功能模块进行了设计,并阐述了模块设计过程中的关键技术;对旋转传输组合系统进行了指标测试。研究结果表明:该旋转传输组合系统各项性能均满足雷达对于电源、信号、光、冷却液等多种介质的旋转传输要求。

关键词:雷达;旋转传输;模块化设计;汇流环

中图分类号:TH122;TN911.7

文献标识码:B

文章编号:1001-4551(2020)02-0172-04

Modular design of the radar rotating transmission combination system

LIU Wen-ke, CHANG Jian, ZHAO Ke-jun

(The 38th Research Institute of China Electronic Science and Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: Aiming at the problems of long period, low efficiency and poor versatility in radar rotating transmission combination system design, the method of modular design was put forward. The main advantages of the rotating transmission combination system based on modular design were analyzed. According to the radar technical requirements, the function modules of the rotating transmission combination system were designed, and key technologies adopted in the process of the module design were expounded. The performance of rotating transmission combination system was tested. The results indicate that all the properties meet the rotating transmission requirements of radar for multi-media such as power, signal, optical, and liquid.

Key words: radar; rotating transmission; modular design; slip ring

0 引 言

雷达是现代军事战争中的重要电子设备^[1]。现代雷达逐渐向大阵面、大数据方向发展,因而对传输功率、传输介质及传输速率均提出了更高要求。雷达旋转传输组合系统,用于实现地面固定设备到阵面转动设备之间,光、电、液等多种介质的旋转可靠传输。

关于雷达光、电、液等介质的旋转传输技术,很多学者已做了相关研究。李超等人^[2]对某雷达功率汇流环设计出现的问题进行了分析;张琳^[3]研究了雷达中频信号汇流环的技术指标特性,提出了对应的解决

方法;马伯渊等人^[4-5]分别对大直径的信号和多功能汇流环进行了研究;何翠平等人^[6-7]研究了雷达信号的光传输技术;王良英等人^[8-9]设计了雷达液体旋转关节。但是上述研究,对功率汇流环、信号汇流环、光滑环以及液体旋转关节等旋转传输组合系统的关键组成部件,主要采用单独定制设计,存在研制周期长、效率低、通用性差等问题,难以满足现阶段产品批量大、时间紧需求。

针对以上问题,本文提出旋转传输组合系统的模块化设计方法,并结合典型实例,对雷达旋转传输组合系统的模块设计及其关键技术进行阐述。

收稿日期:2019-05-17

基金项目:国家基础科研计划资助项目(JCKY2016210C007)

作者简介:刘文科(1986-),男,河南安阳人,博士,高级工程师,主要从事雷达旋转传输技术方面的研究。Email:kevinliu921@163.com

1 模块化设计概述

本文所述的模块化设计是指通用性模块的组合设计^[10]。

旋转传输组合系统主要由光铰链、信号汇流环、功率汇流环及液体旋转关节等组成,分别完成设备间的光信号、电信号、电源以及冷却液的旋转传输功能,其工作原理如图1所示。

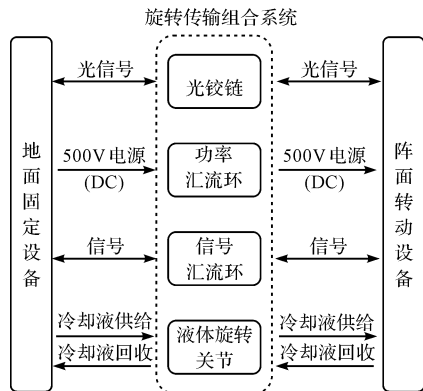


图1 雷达旋转传输组合系统工作原理图

由图1可知:系统的模块化设计就是先将光铰链、功率汇流环、信号汇流环及液体旋转关节等作为模块,按照结构尺寸或技术指标分别开发;然后根据不同型号雷达的实际需求和空间要求进行方案设计,并对功能模块进行选型设计;最终通过组装,形为完整的系统。

2 模块化设计的优点

采用模块化设计的旋转传输组合系统具有以下优点:

(1)由于系统的各组成部分均为通用化模块,可根据雷达产品的不同要求进行模块选型,可显著缩短系统的研发周期;

(2)可减少很多零部件的重复性设计,也可避免设计过程中出现的规格不统一、易出错等问题;

(3)系统使用过程中,当其中的某一功能模块发生故障时,仅需要将该故障模块进行拆卸维修,而不必对系统整体拆卸。

3 旋转传输组合系统设计

根据该雷达总体技术要求,雷达工作过程中需实现地面固定设备到阵面方位转动设备之间电源、信号、光、冷却液等多种介质的旋转可靠传输。

3.1 主要技术要求

(1)电源功率传输。电源传输功率 600 kW;电源工

作电压 500 V/DC;工作电流 ≤ 75 A;绝缘电阻 ≥ 500 M Ω 。

(2)信号传输。信号工作电压 24 V/DC;工作电流 ≤ 1 A;信号通道数 48。

(3)光传输。光传输模式为单模;光通道数为 1;波长为 850 nm ~ 1 650 nm;插入损耗 ≤ 2.0 dB。

(4)冷却液传输。冷却剂类型为 JSFDG-60(乙二醇水溶液);流量 ≤ 75 m³/h;静态耐压 ≥ 2.0 MPa,动态耐压为 1 MPa;工作寿命 $\geq 30\,000$ h(泄漏量不超过 20 ml/h)。

3.2 模块详细设计

3.2.1 功率汇流环

功率汇流环用于固定设备到转动设备之间功率电源的旋转传输,主要由轴、导电环、电刷组合、外壳、底座及导线等组成,其结构示意图如图2所示。

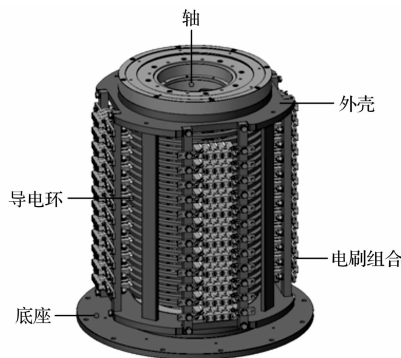


图2 功率汇流环结构示意图

图2中,该功率汇流环电接触摩擦副采用电刷-导电环滑动摩擦形式,其环芯设计成特殊的开放式结构,导电环之间以绝缘柱代替传统的绝缘环,使电刷落粉量的增加不会引起汇流环绝缘性能的下降。电刷设计成刷组形式,每组电刷由 2~4 个电刷组成,均匀分布安装在汇流环外壳上,与导电环接触。

根据技术要求,该雷达总传输功率约为 600 kW,电压为 500 V/DC,按 16 个通道进行设计,则汇流环每一电源通道需传输的电流为 75 A。

每一电源通道选用一组电刷,包含 4 个同等规格电刷,电刷规格为 22 mm × 15 mm × 6 mm(长 × 宽 × 高),与导电环接触面积可按此近似取值。通道的载流量计算公式为:

$$I = N \times S \times J \quad (1)$$

式中: I — 汇流环通道载流量; S — 电接触副接触面积; J — 电刷电流密度, A/mm²; N — 电刷数量。

此处, $S = 90$ mm²; J 取值为 0.3; N 取值为 4。则该功率汇流环单一通道的载流量为 108 A > 75 A。由此可见,计算结果满足指标要求。

3.2.2 信号汇流环

信号汇流环用于固定设备到转动设备之间中低频

信号的旋转传输,主要由轴、导电环、绝缘环、刷丝组合、轴承、外壳、底座及导线等组成,其结构示意图如图 3 所示。

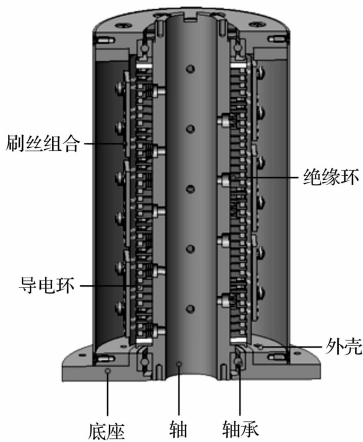


图 3 信号汇流环结构示意图

图 3 中,信号汇流环依靠金属刷丝和导电环之间的电接触摩擦来实现电信号的旋转传输。刷丝选用耐磨性能好的金基合金丝材料,导电环选用具有较强耐腐蚀能力的铝青铜材料,并在接触表面镀涂贵金属合金,以提高导电性和耐磨性要求。

3.2.3 光铰链

光铰链用于光缆连接中光纤信号的旋转传输。本研究选用 FK1000 单模单通道无水峰光铰链,示意图如图 4 所示。

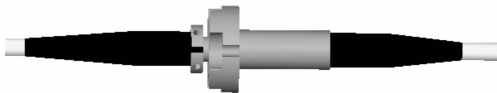


图 4 光铰链结构示意图

该光铰链的主要性能参数如表 1 所示。

表 1 光铰链主要性能参数

型号	工作波长/nm	光纤传输模式	插入损耗/dB	插入损耗旋转变化/dB	机械寿命/r	接口形式
FK1000	850 ~ 1 650	单模	2	1	1×10^7	ST

3.2.4 液体旋转关节

液体旋转关节为雷达阵面电子设备冷却系统提供冷却液,主要由进口、出口、回进口、回出口、轴承、油封、密封圈等组成,示意图如图 5 所示。

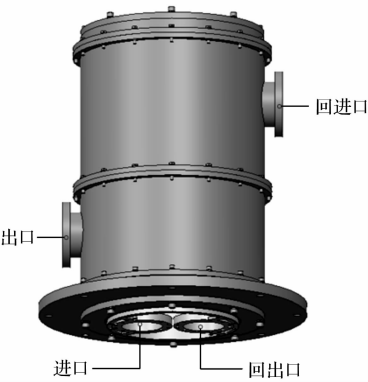


图 5 液体旋转关节结构示意图

图 5 中,液体旋转关节包含转动和固定部分,出口和回进口都在转动部分上;进口和回出口都在固定部分上。转动部分两通道采用上、下叠加的轴向排布式结构,固定部分两通道之间的间隙用来走线。为减小旋转过程中的径向偏摆,液体旋转关节的上、下端采用双轴承对称分布。

液体旋转关节的主体材料选用 316 L 不锈钢,同时焊接部位均采用氩弧焊。液体旋转关节管道的流量计算公式为:

$$Q = S \times V \tag{2}$$

式中: Q —流量, m^3/s ; S —管道面积, m^2 ; V —流速, m/s 。

已知该液体旋转关节进液口的管径为 $\Phi 120 \text{ mm}$,出液口管径为 $\Phi 120 \text{ mm}$,流速为 $2 \text{ m}/\text{s}$,计算可得 $S = 11.31 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,流量 $Q = 81.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。由于技术要求为 $75 \text{ m}^3/\text{h}$,可见设计流量完全能够满足要求。

3.3 模块设计关键技术

3.3.1 汇流环高性能电接触摩擦副设计

功率汇流环通过电刷和导电环的滑动电接触来实现电源功率的旋转传输^[11-13],其主要电气性能指标均反映在电接触摩擦副上,即导电环与电刷的材料的选择上,要求材料电阻率小,同时两种材料硬度要匹配、磨损量小,采用高性能电接触摩擦副,以及特殊结构的环芯设计;导电环由贵金属或铜基金属合金制造,电刷由石墨基材料或其他贵金属合金制造;导电环选用铝青铜材料,并在表面镀银;电刷选用磨损量小的碳纤维银石墨材料(JF390-1),其主要技术性能指标如表 2 所示。

表 2 JF390-1 主要技术性能指标

材料	成分	硬度/(HV10/30)	抗弯强度/MPa	电阻率/ $(\mu\Omega \cdot \text{m})$	电流密度/ $(\text{A} \cdot \text{mm}^{-2})$	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
JF390-1	6% 石墨 3% 碳纤维	12 ~ 18	69	0.080 7	0.3	6.4

3.3.2 大电流模拟加载试验

为了验证功率汇流环的电流承载能力,本研究对跑合完成的功率汇流环进行大电流模拟加载试验^[14]。

该模拟加载试验设备最大加载电流 $5\,000 \text{ A}$;功率汇流环的工作电流为 75 A ,按照其 1.3 倍约 98 A 的加载电流进行试验。试验结果表明,功率汇流环各电源通道

工作状态正常,未发生打火、冒烟等异常现象。

3.3.3 大流量液体旋转关节机械密封设计

由于该雷达的传输功率大、热耗高,如何保证在大流量液体旋转传输过程中无泄漏是液体旋转关节设计的难点。本研究在动密封位置采用机械密封^[15],密封摩擦副材料为石墨和碳化硅材料;弹性元件采用哈氏合金,辅助密封圈及其他静密封圈材料采用硅橡胶材料。经实际验证,液体旋转关节使用过程中无明显漏液等问题。

3.4 模块组装

本研究将4个模块通过部分过渡连接件进行组装集成,最终成为一套完整的旋转传输组合系统,其结构示意图如图6所示。

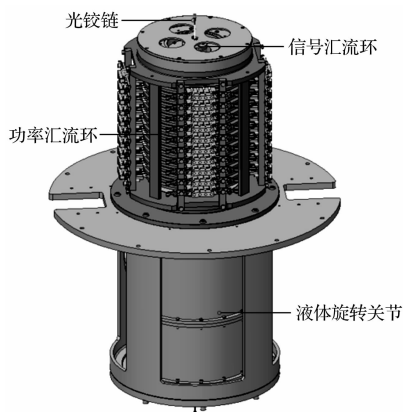


图6 旋转传输组合系统结构示意图

本文将该旋转传输组合系统装入雷达转台内部,并对其工作过程中的主要性能指标进行了测试,结果表明,该系统的各项性能均满足雷达总体要求,实现了雷达工作过程中地面固定设备到阵面转动设备之间电源、信号、光、冷却液等多介质的旋转传输。

3.5 成效分析

目前,功率汇流环目前已研发了8通道、12通道、16通道、20通道、24通道以及30通道等多种规格;信号汇流环已研发了12通道、24通道、36通道和48通道等多种规格;光铰链研发出单模单通道、单模多通道和多模多通道等形式;液体旋转关节目前已研发了单通道、双通道和四通道等结构形式,管径包括 $\varphi 20$ 、 $\varphi 25$ 、 $\varphi 32$ 、 $\varphi 51$ 、 $\varphi 70$ 以及 $\varphi 80$ 等多种规格。基于模块化设计所研发的旋转传输组合系统现已成功应用于多型号雷达产品。

4 结束语

本文提出了模块化设计方法,分析了雷达旋转传

输组合系统模块化设计的优点,结合某雷达产品实例,详细论述了旋转传输组合系统的模块设计及采用的关键技术,并对基于模块化设计的旋转传输组合系统进行了指标测试。

研究表明,该旋转传输组合系统各项性能均满足雷达对于电源、信号、光、冷却液等多种介质的旋转传输要求。

参考文献(References):

- [1] 平丽浩,黄普庆,张润逵,等. 雷达结构与工艺[M]. 北京:电子工业出版社,1994.
- [2] 李超,朱涵一. 功率汇流环的设计及应用[J]. 电子机械工程,2005,21(5):41-43.
- [3] 张琳. 中频信号汇流环的研究[J]. 火控雷达技术,2013,42(1):98-101.
- [4] 马伯渊,郑会利. 大直径中频信号汇流环的研究[J]. 西安电子科技大学学报,2001,28(5):584-587.
- [5] 马伯渊,赵克. 大直径多功能汇流环的结构设计特点[J]. 机械设计与制造,2002(4):87-88.
- [6] 何翠平,聂杨,席虹标,等. 雷达信号的光汇流环传输技术[J]. 光通信技术,2006,30(5):31-32.
- [7] WALLINGTON J R. Optical techniques for signal distribution in phased arrays[J]. *The GEC Journal of Research*, 1984,2(2):66-73.
- [8] 王良英. 旋转关节-水铰链的研制[J]. 电子机械工程,2004,20(3):27-28.
- [9] 董好志,关堂新,许越宁. 液体旋转关节的设计[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报,2012,11(2):23-25.
- [10] 童时中. 模块化原理设计方法及应用[M]. 北京:中国标准出版社,2000.
- [11] 张武. 汇流环接触问题分析[J]. 火控雷达技术,2009,38(3):78-82.
- [12] SANTORO C, HAYES R, HERMAN J. Brushless slip ring for high power transmission[C]. AIAA SPACE 2009 Conference&Exposition, Pasadena: AIAA, 2009.
- [13] ZHANG Jian-chun, MA Xiao-bing, CHENG Bo, et al. Storage life modeling and analysis for contacting slip ring based on physics of failure[J]. *IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2017,7(12):1969-1980.
- [14] 吴旭涛,艾绍贵,樊益平,等. LGJQ-400型导线过载能力的现场试验研究[J]. 宁夏电力,2009(4):36-39.
- [15] 付平,常德功. 密封设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

刘文科,常健,赵克俊. 雷达旋转传输组合系统模块化设计[J]. 机电工程,2020,37(2):172-175.

LIU Wen-ke, CHANG Jian, ZHAO Ke-jun. Modular design of the radar rotating transmission combination system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(2):172-175.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>