

一种光纤旋转连接器的设计改进

张 群,钱建国,刘 一

(南京长江电子信息产业集团有限公司, 南京 210038)

摘要: 光纤旋转连接器具有传输容量大、带宽宽、电磁兼容性良好、体积小、质量轻、能耗低和噪声小的优点,在雷达装备上得到大量广泛应用。针对某型光纤旋转连接器在实际使用过程中,有多只出现光路插入损耗变大或光路不通问题,对光纤旋转连接器的支承轴承进行了额定寿命计算,分析了轴承失效的原因。从轴承选型、加大支承轴承间的中心距、缩小转子受力点与支承轴承间的中心距三个方面采取措施对光纤旋转连接器进行了设计改进。改进明显改善了轴承的受力情况,大幅提高了轴承的预期寿命,从而提高了光纤旋转连接器的可靠性。

关键词: 光纤旋转连接器;深沟球轴承;径向载荷;轴承失效;轴承额定寿命计算;设计改进

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7859(2020)02-0080-05

引用格式: 张 群,钱建国,刘 一. 一种光纤旋转连接器的设计改进[J]. 现代雷达, 2020, 42(2): 80-84.

ZHANG Qun, QIAN Jianguo, LIU Yi. Design improvement of fiber optic rotary joint[J]. Modern Radar, 2020, 42(2): 80-84.

Design Improvement of Fiber Optic Rotary Joint

ZHANG Qun, QIAN Jianguo, LIU Yi

(Nanjing Changjiang Electronics Group Co., Ltd., Nanjing 210038, China)

Abstract: Taking advantages of large transferring capacity, wide bandwidth, excellent electromagnetic compatibility, small size, light weight, low energy consumption and small noise, fiber optic rotary joint (FORJ) has been widely used in radar facilities. However, multiple FORJs suffered from increased insertion loss or connection failure in actual use. In order to tackle this issue, rating life of the supporting bearing was evaluated, the reason of premature failure was further analyzed. Several design improvements for FORJ were proposed, including appropriate bearing model specification, lengthened bearing center distance, and narrowed distance to rotor pressure point. These measures could improve the stress condition of bearing, resulting in longer expected life of bearing and better reliability of FORJs.

Key words: fiber optic rotary joint; deep groove ball bearing; radial load; bearing failure; calculation of bearing rating life; design improvement

0 引 言

传统雷达通常使用电汇流环来实现信号或能量从静止平台到旋转平台的传输。电汇流环的体积较大,传输信号的速率较低,容易受到电磁干扰。与电汇流环相比,光纤旋转连接器具有传输容量大、带宽宽、抗电磁干扰能力强、电磁兼容性良好、体积小、质量轻、能耗低和噪声小的优点^[1-3]。光纤旋转连接器是一种将光信号从静止平台不间断传输到旋转平台的光纤器件,又称为光滑环、光纤旋转接头、光铰链等,国外把光纤旋转连接器统称为“纤维光学滑环”。其种类已有 50 多种,按不同的分类方法可分为有源和无源、同轴旋转和非同轴旋转、有中间光学组件和无中间光学组件、单通道和多通道、多模和单模等。目前,我国光纤旋转连接器的生产研制单位有中国电子科技集团公司

第二十三、三十四研究所,上海电控研究所,中航光电科技股份有限公司,飞秒光电科技(西安)有限公司,合肥正阳光电科技有限责任公司,以及天津大学等。光纤旋转连接器已在军用装备上大量广泛应用^[4]。单通道光纤旋转连接器具有成本低、体积小、结构简单等许多优点,采用波分复用技术(WDM)传输的信号量可以扩展到 100 Gbit/s 以上。因此,目前应用最广泛的就是单通道光纤旋转连接器^[5]。

某型地面雷达将电汇流环和单通道光纤旋转连接器结合使用。电汇流环用于天线阵面上大功率电能的传输;采用光纤旋转连接器加波分复用技术的光传输系统则用于低频信号、数字信号、网络信号、射频信号等高速大容量信号的传输^[6-8]。借助光纤旋转连接器加波分复用技术,将光纤从雷达操控端延伸至雷达的天线阵面内,简化了整个雷达信号的传输过程及传输结构^[9]。

该型地面雷达使用的是一款无源单通道单模光纤

旋转连接器,在使用过程中有多只该型光纤旋转连接器出现光路插入损耗变大或光路不通问题。文中针对该问题,对该光纤旋转连接器所用微型深沟球轴承进行了额定寿命计算,分析了轴承失效的原因,并对该型光纤旋转连接器的设计改进情况作了介绍。

1 光纤旋转连接器的使用情况

该型雷达天线转动大盘内旋转部件有大功率电汇流环、水铰链、光纤旋转连接器。大功率电汇流环的外壳、水铰链的定环座壳、光纤旋转连接器的定子均固定在天线座内托架等零件上。大功率电汇流环的转轴通过十字滑块联轴器拨动水铰链动环座,水铰链动环座拨销拨动光纤旋转连接器转子而同步旋转。由于装配链路较长,水铰链动环座的两个拨销与光纤旋转连接器转子拨槽的回转中心可能存在一定的同轴误差,水铰链动环座的两个拨销在转动时可能不能同时作用于光纤旋转连接器转子拨槽。由于光纤旋转连接器转子与定子间存在一定的旋转摩擦力矩,当水铰链动环座的一个拨销作用于光纤旋转连接器转子拨槽时,在运转过程中光纤旋转连接器转子就承受一定的径向载荷。因此,光纤旋转连接器内支承转子的微型深沟球轴承就承受一定的径向载荷。在使用过程中有多只该型光纤旋转连接器出现光信号不畅通的故障。

2 原因分析

对故障件进行检查,发现其插入损耗都变得很大,甚至不通。进一步检查故障件,发现微型深沟球轴承失效,其失效形式主要是接触疲劳失效、磨损失效和游隙变化失效。轴承失效使得光纤旋转连接器的转子和定子偏斜、窜动,造成离轴偏差、角度偏差和轴向偏差而增大了两只光纤准直器的耦合损耗^[10-12],导致光路插入损耗变得很大或者光路不通。

该型光纤旋转连接器由转子、定子、J599/26KB02B1N 插头、光缆四部分组成,外形如图 1 所示。其内部结构如图 2 所示^[13],分别由护套、压接套、转接壳体、外壳体、安装盘、准直器、轴承挡圈、微型深沟球轴承、O 形圈、FS 密封圈、旋转轴、螺钉等零件组成。该结构的优点在于:(1) 光纤旋转连接器的密封性能好;(2) 对准直器尾纤上的护套进行了良好处理,光纤的抗拉能力得到增强。

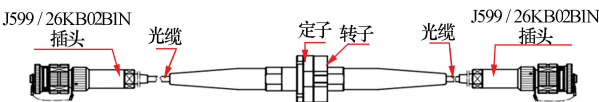


图 1 光纤旋转连接器外形

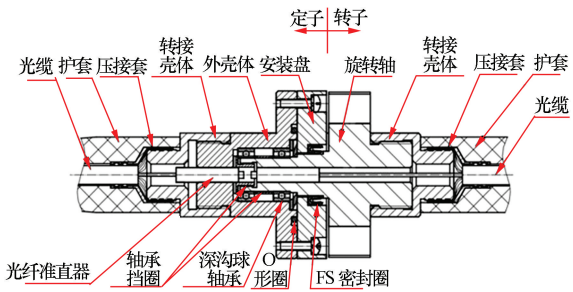


图 2 光纤旋转连接器内部结构

2.1 轴承受力分析

光纤旋转连接器的转子端和定子端是由两只微型深沟球轴承支承连接的。两只微型深沟球轴承型号为 R1810zzs(精度为 P5 级),轴承内径为 $\Phi 7.937\text{ mm}$,外径为 $\Phi 12.7\text{ mm}$,宽度为 3.967 mm ,径向额定动载荷为 542 N ,径向额定静载荷为 276 N 。两轴承之间的中心距为 8.6 mm ,转子受力点距离支承轴承的中心距为 16 mm 。轴承受力情况如图 3 所示。

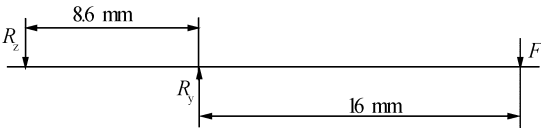


图 3 光纤旋转连接器轴承受力情况

该型光纤旋转连接器的转子与定子间的旋转摩擦力矩指标为小于 $2\text{ N} \cdot \text{m}$,实测 1 只光纤旋转连接器的旋转摩擦力矩 M 约为 $0.3\text{ N} \cdot \text{m}$,拨销与回转中心的距离 r 为 0.016 m 。当拨销与光纤旋转连接器存在一定的同轴度误差时,在旋转过程中可能只有一个拨销拨动光纤旋转连接器的转子,则转子承受的径向力 $F = M / r = 0.3\text{ N} \cdot \text{m} / 0.016\text{ m} = 18.75\text{ N}$;左支承轴承承受的径向力 $R_z = F \times 16 / 8.6 = 18.75\text{ N} \times 16 / 8.6 = 34.88\text{ N}$;右支承轴承承受的径向力 $R_y = F + R_z = 18.75\text{ N} + 34.88\text{ N} = 53.63\text{ N}$ 。

2.2 轴承的额定寿命计算

1) 旋转摩擦力矩为 $0.3\text{ N} \cdot \text{m}$ 时轴承的额定寿命计算

根据 GB/T 6391-2010《滚动轴承 额定动载荷和额定寿命》,向心球轴承的基本额定寿命公式为

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^3 \tag{1}$$

对载荷较大的右支承轴承而言, $F_r = R_y$, 则

$$\begin{aligned} L_{10\text{ h}} &= \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^3 = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C_r}{f_d F_r} \right)^3 = \\ &= \frac{10^6}{60 \times 6} \times \left(\frac{542}{1.2 \times 53.63} \right)^3 = \\ &= 1.659 \times 10^6 (\text{h}) \end{aligned} \tag{2}$$

式中: C_r 为基本径向额定动载荷(N); f_d 为冲击载荷系数,取值 1.2; P_r 为当量动载荷(N); F_r 为径向载荷(N); n 为轴承转速,取值 6 r/min。

由于轴承失效必然导致光纤旋转连接器失效,且无法维修。因此,该轴承额定寿命计算按可靠度为 99% 进行修正。则该轴承的修正额定寿命为

$$\begin{aligned} L_{1m} &= a_1 a_{ISO} L_{10h} = \\ &0.25 \times 0.75 \times 1.659 \times 10^6 = \\ &3.111 \times 10^5 (h) \end{aligned} \tag{3}$$

式中: a_1 为可靠度寿命修正系数,可靠度为 99% 的寿命修正系数为 0.25; a_{ISO} 为基于寿命计算系统方法的寿命修正系数,该轴承转速特别低,采用脂润滑,终身无法进行润滑维护,润滑脂的析油能力较弱,接触处可能在严重贫油的状态下运转,导致润滑不良,所以取值 0.75。

按每天工作 12 h 计算,该轴承可以可靠运行工作约 71 y。

2) 旋转摩擦力矩为 1 N·m 时轴承的额定寿命计算

由于该型光纤旋转连接器的转子与定子间的旋转摩擦力矩指标小于 2 N·m,在批量生产和验收时只是进行定性检测。因此,每只光纤旋转连接器的旋转摩擦力矩无具体的数据。光纤旋转连接器的旋转摩擦力矩实际上应该是离散的,假定光纤旋转连接器的旋转摩擦力矩为 1 N·m,则转子承受的径向力 $F = M / r = 1 \text{ N} \cdot \text{m} / 0.016 \text{ m} = 62.5 \text{ N}$;左支承轴承承受的径向力 $R_z = F \times 16 / 8.6 = 62.5 \text{ N} \times 16 / 8.6 = 116.28 \text{ N}$;右支承轴承承受的径向力 $R_y = F + R_z = 62.5 \text{ N} + 116.28 \text{ N} = 178.78 \text{ N}$ 。且有

$$\begin{cases} L_{10h} = \frac{10^6 \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^3}{60n \left(\frac{C_r}{f_d F_r} \right)^3} = \\ \frac{10^6}{60 \times 6} \times \left(\frac{542}{1.2 \times 178.78} \right)^3 = 4.479 \times 10^4 (h) \\ L_{1m} = a_1 a_{ISO} L_{10h} = \\ 0.25 \times 0.75 \times 4.479 \times 10^4 = 8.398 \times 10^3 (h) \end{cases} \tag{4}$$

按每天工作 12 h 计算,该轴承可以可靠运行工作约 1.9 y。

由以上轴承的修正额定寿命计算结果可知,光纤旋转连接器的旋转摩擦力矩对支承轴承的额定寿命影响非常大。当光纤旋转连接器的旋转摩擦力矩为 0.3 N·m 时,远超预期寿命要求,则该型光纤旋转连接器所用轴承失效应属于过早失效;当光纤旋转连接器的旋转摩擦力矩为 1 N·m 时,远不能满足预期寿命要求,则该型光纤旋转连接器所用轴承失效属于正常失效。

2.3 轴承失效的原因

由于大部分的光纤旋转连接器的旋转摩擦力矩较小,因此重点分析该轴承过早失效的原因。

轴承失效在一般情况下可以从内在因素和外来因素两方面来考虑和着手分析。内在因素主要是指决定轴承质量的设计、制造工艺和材料质量三大要素,即制造质量因素;外来因素主要是指安装调整、使用维护保养及修理等方面是否符合要求,即使用因素^[14]。该型轴承由洛阳轴研科技股份有限公司生产,重点从使用因素方面来考虑、分析轴承过早失效的原因。造成轴承过早失效的原因是多方面的,主要有润滑不良、污染、装配不当、过热、过载、微振磨损、腐蚀等因素^[15-16]。该型光纤旋转连接器密封性能较好,因而污染、腐蚀因素可以排除。该光纤旋转连接器转速为 6 r/min,非常低,所以过热因素可以排除。该光纤旋转连接器与水铰链拨销回转中心的同轴误差有个别的可能较大,当超出其调整范围,光纤旋转连接器支承轴承可能过载,所以有个别的过载因素不能排除。该型光纤旋转连接器为精密机械结构,机械加工精度高,对装配要求较高,所以个别的装配不当因素不能排除。该型光纤旋转连接器采取密封设计,使用过程中无法进行润滑维护,如果微型轴承润滑脂未涂装均匀,润滑脂的析油能力又较弱,接触处可能在严重贫油的状态下运转,在长期使用过程中当润滑不良时会产生严重磨损现象,造成轴承过早失效,所以润滑不良因素不能排除。部分水铰链在运转时动环座(即转子)会存在振动现象,因而会影响光纤旋转连接器的稳定运转而产生微振磨损,也会使轴承过早失效,所以微振磨损因素也不能排除。

综上所述,该型光纤旋转连接器轴承过早失效的原因可能为过载、装配不当、润滑不良、微振磨损。

3 设计改进

3.1 改进思路

该雷达天线转速为 6 r/min,但许多雷达的天线转速高达 60 r/min~80 r/min。当天线转速为 60 r/min 时,该型光纤旋转连接器的轴承可靠运转时间约 7 y(旋转摩擦力矩为 0.3 N·m 时);当天线转速为 80 r/min 时,该轴承可以可靠运转 5 年多(旋转摩擦力矩为 0.3 N·m 时)。若该型光纤旋转连接器用在这样的雷达装备上,则远不能满足雷达整机的预期寿命要求。

针对轴承过早失效的原因,对于雷达整机生产企业,需采取措施消除因系统同轴误差过大而产生的过载因素;对于光纤旋转连接器生产企业,需严格控制轴承润滑脂的灌注,严格控制装配过程,消除装配不当。由于光纤旋转连接器使用期间不能进行润滑维护保

养,以及雷达整机设备上可能存在的振动因素无法消除,唯有提高支承轴承的额定寿命才能真正减小轴承失效的概率。

因此,光纤旋转连接器生产企业对光纤旋转连接器改进的重点放在提高轴承的额定寿命上。一方面,光纤旋转连接器的旋转摩擦力矩对支承轴承的额定寿命影响非常大,旋转摩擦力矩越小,其轴承额定寿命越长。光纤旋转连接器生产企业对旋转摩擦力矩指标进行内控,在生产、验收过程中对旋转摩擦力矩的检测方法进行优化,使旋转摩擦力矩小于 0.3 N·m。另一方面,提高轴承的承载能力,对光纤旋转连接器的内部结构布局进行调整,从而改善轴承的受力情况,这样才能大幅度提高轴承的额定寿命,从而有效减小光纤旋转连接器光路不畅通的故障率。

3.2 改进措施

具体改进措施有:(1)更换轴承型号,采用 618/8 型微型深沟球轴承,该型轴承的承载能力与原英制深沟球轴承相比高 1 倍多。618/8 型深沟球轴承内径为 Φ8 mm,外径为 Φ16 mm,宽度为 4 mm,径向额定动载荷为 1 252 N,径向额定静载荷为 592 N。(2)调整结构布局,加大两支承轴承之间的中心距,由 8.6 mm 增大为 13.4 mm。(3)缩小转子受力点与支承轴承间的中心距,由 16 mm 减小为 12 mm。

针对以上三条措施,适应性更改外壳体、安装盘和旋转轴的形状和尺寸,而保证整个光纤旋转连接器的外形和尺寸不变,从外部看不出任何变化,如图 4 所示。改进后的轴承受力情况如图 5 所示。

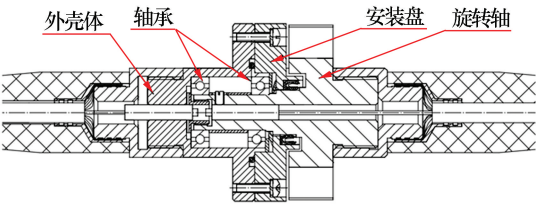


图 4 光纤旋转连接器改进后内部结构

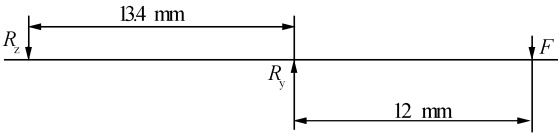


图 5 光纤旋转连接器改进后轴承受力情况

3.3 轴承的额定寿命计算

1) 旋转摩擦力矩为 0.3 N·m 时轴承的额定寿命计算

$$\left\{ \begin{aligned} R_z &= F \times 12/13.4 = 18.75 \text{ N} \times 12/13.4 = 16.79 \text{ N} \\ R_y &= F + R_z = 18.75 \text{ N} + 16.79 \text{ N} = 35.54 \text{ N} \\ L_{10h} &= \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^3 = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C_r}{f_d F_r} \right)^3 = \\ &= \frac{10^6}{60 \times 6} \times \left(\frac{1252}{1.2 \times 35.54} \right)^3 = 7.0277 \times 10^7 (\text{h}) \\ L_{1m} &= a_1 a_{ISO} L_{10h} = \\ &= 0.25 \times 0.75 \times 7.0277 \times 10^7 = 1.318 \times 10^7 (\text{h}) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

2) 旋转摩擦力矩为 1 N·m 时轴承的额定寿命计算

$$\left\{ \begin{aligned} R_z &= F \times 12/13.4 = 62.5 \text{ N} \times 12/13.4 = 55.97 \text{ N} \\ R_y &= F + R_z = 62.5 \text{ N} + 55.97 \text{ N} = 118.47 \text{ N} \\ L_{10h} &= \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^3 = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C_r}{f_d F_r} \right)^3 = \\ &= \frac{10^6}{60 \times 6} \times \left(\frac{1252}{1.2 \times 118.47} \right)^3 = 1.897 \times 10^6 (\text{h}) \\ L_{1m} &= a_1 a_{ISO} L_{10h} = \\ &= 0.25 \times 0.75 \times 1.897 \times 10^6 = 3.557 \times 10^5 (\text{h}) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

由计算结果可知,改进后轴承的受力情况得到明显的改善,轴承的额定寿命提高为原来的 42.36 倍,改进前后对比情况详见表 1。光纤旋转连接器的旋转摩擦力矩为 1 N·m 时,按每天工作 12 h 计算,该轴承仍可以可靠运行工作约 81 y。

表 1 改进情况对比表

项目	轴承型号	轴承径向额定动载荷/N	支承轴承间的中心距/mm	转子受力点与支承轴承间的中心距/mm	旋转摩擦力矩为 0.3 N·m 时,右端轴承额定寿命 L_{1m}/h	旋转摩擦力矩为 1 N·m 时,右端轴承额定寿命 L_{1m}/h	对比结果
改进前	R1810zss	542	8.6	16	3.111×10^5	8.398×10^3	—
改进后	618/8	1 252	13.4	12	1.318×10^7	3.557×10^5	42.36 倍

3.4 验证

该型光纤旋转连接器设计改进后,经过首件生产和首件环境试验考核,各项性能满足规定的指标要求,批量生产工艺流程与原设计一样,没有增加工艺实现

的难度。

4 结束语

光纤旋转连接器生产企业通过对该型光纤旋转连

接器采取更换轴承型号规格,优化调整内部机械结构布局,较好地改善了轴承的受力情况,大幅度提高了轴承的额定寿命。同时,对旋转摩擦力矩指标进行内控,生产过程中严格控制轴承润滑脂的灌注,严格控制装配过程,消除装配不当因素,从而提高了该型光纤旋转连接器的使用寿命和可靠性水平,并取得了良好的实际使用效果。

参考文献

[1] JAMES W S. An overview of fiber optic rotary joint technology and recent advances[J]. IFAC Proceedings, 1998, 31(33): 77-81.

[2] DORSEY G F. Fiber optic rotary joints; a review[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 1982, 5(1): 37-41.

[3] 邬华春. 光纤旋转连接器结构概述[J]. 无线通信, 2018, 8(6): 227-233.

WU Huachun. A summary of structure of fiber optic rotary joint[J]. Hans Journal of Wireless Communications, 2018, 8(6): 227-233.

[4] 季伯言. 光纤旋转连接器[J]. 光通信技术, 1991(Z1): 74-76.

JI Boyan. Fiber optic rotary connector[J]. Optical Communication Technology, 1991(Z1): 74-76.

[5] WEI J Y. Advances in the management and control of optical internet[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(4): 768-785.

[6] 韦金生, 漆先虎, 陈国际. 波分复用技术在雷达信号传输中的应用[J]. 硅谷, 2014(17): 115-116.

WEI Jinsheng, QI Xianhu, CHEN Guoji. Application of wavelength division multiplexing technology in radar signal transmission[J]. Silicon Valley, 2014(17): 115-116.

[7] BRACKETT C A. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 8(6): 948-961.

[8] LEWIS N, MILLER M, RAVITA J, et al. A four channel bidirectional data link using wave-length division multiplexing[J]. Fiber Optic Couplers, Connectors and Splice Technology II, 1986, 574: 47-54.

[9] 张瑞珏, 赵克俊, 康成彬, 等. 雷达系统中 WDM 技术的应用分析[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(4): 33-36.

ZHANG Ruijue, ZHAO Kejun, KANG Chengbin, et al. Analysis on application of WDM technology in radar system

[J]. Fire Control Radar Technology, 2013, 42(4): 33-36.

[10] 贾大功, 张以谟, 井文才, 等. 自聚焦透镜装配误差对光信号耦合效率的影响[J]. 光电子·激光, 2004, 15(6): 753-755.

JIA Dagong, ZHANG Yimo, JING Wencai, et al. Effect of GRIN lens misalignment on coupling efficiency of optical signals[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2004, 15(6): 753-755.

[11] GILSDORF R W, PALAIS J C. Single-mode fiber coupling efficiency with graded-index rod lenses[J]. Applied Optics, 1994, 33(16): 3440-3445.

[12] 胡卫生, 曾庆济. 自聚焦棒透镜准直系统的装配误差引起的附加耦合损耗分析[J]. 中国激光, 1999, 26(3): 221-224.

HU Weisheng, ZENG Qingji. Misalignment induced excess loss in gradient index rod lens collimating systems[J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(3): 221-224.

[13] 程霁站. 单芯光纤旋转连接器: 201859230U[P]. 2010-08-08.

CHENG Jihong. Single-core fiber optic rotary joint: 201859230U[P]. 2010-08-08.

[14] 赵传国. 滚动轴承失效分析概论[J]. 轴承, 1996(1): 39-46.

ZHAO Chuanguo. Introduction to rolling bearing failure analysis[J]. Bearing, 1996(1): 39-46.

[15] UPADHYAY R K, KUMARASWAMIDHAS L A, AZAM M S. Rolling element bearing failure analysis: a case study[J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2013, 1(1): 15-17.

[16] 薛福连. 滚动轴承过早失效问题的解决方法[J]. 轻工机械, 2005(4): 144-145.

XUE Fulian. A method to solve the problem of early deficiencies in rolling bearing[J]. Light Industry Machinery, 2005(4): 144-145.

张 群 男,1970 年生,高级工程师。研究方向为雷达工程。

钱建国 男,1967 年生,高级工程师。研究方向为雷达质量工程。

刘 一 女,1982 年生,高级工程师。研究方向为雷达结构工程。