

# 光纤旋转连接器的最新发展及其应用

贺正权 李育林 胡宝文 张敏睿 屈恩世 郭小艺

(中国科学院西安光学精密机械研究所信息光子学室, 陕西 西安 710119)

**摘要** 光纤旋转连接器经过近 30 年的发展,技术上已经取得了很大的进步,并趋于成熟。对光纤旋转连接器的主要功能及其最新进展进行了综述,介绍了道威棱镜式、波分复用式和反射镜式 3 类多通道光纤连接器的原理、技术和特点,对 3 类系统进行了比较,列出各类连接器的优缺点。最后对光纤旋转连接器适用场合进行了简要介绍。

**关键词** 光学器件;光纤旋转连接器;道威棱镜;波分复用器;消旋;K 镜

**中图分类号** TN959.6;O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.010007

## Recent Development and Applications of Fiber Optic Rotary Joints

He Zhengquan Li Yulin Hu Baowen Zhang Minrui Qu Enshi Guo Xiaoyi

(Department of Information Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

**Abstract** In recent 30 years, fiber optical rotary joints (FORJ) technology has made great progress. The mainly function and recent development of FORJs are reviewed. The principles and technologies of Dove prism, wave division multiplex (WDM) and K reflective mirror despunning are introduced. Property comparison of the three mentioned technologies are also presented. At last, the potential applications of FORJs are listed.

**Key words** optical devices; fiber optic rotary joint; Dove prism; wavelength division multiplexing; despun; K mirror

**OCIS codes** 230.7020; 230.5480; 230.4040; 060.2310

## 1 引言

旋转连接器是一种可实现两个相对转动的结构部分之间信号传输的系统。最早出现的产品是电旋转连接器,也称(导)电滑环、集流环等。随着连接器传输数据量的增大,传输宽带的提高,电滑环的局限性越来越突出。在有些应用场合,电滑环的性能指标远远达不到使用要求。从 20 世纪 80 年代起,国外就开始研究光纤旋转连接器(FORJ)<sup>[1]</sup>,美国国防部最早开展光纤旋转连接技术的开发研究,于 1989 年公布了舰船用光纤旋转连接头的规范。加拿大 MOOG 公司于 20 世纪 90 年代初,最先推出采用旁轴入射的多通道光纤旋转连接器,目前已推出多种型号的光纤旋转连接器产品,在无人操作车(UGV)上得到应用。德国 Schleifring 公司是世界上最大的电滑环制造商,也先后开发多种光纤旋转连接器,主要应用于无人机(UAV)和石油钻探等领域。美国 Princetel 公司利用波分复用(WDM)技术实现多路光纤信号的耦合,由于 WDM 技术将多路光信号首先采用波分复用技术耦合到一起,最后由一个光通路进行传输,所以使连接器结构更加紧凑,目前最多可达 60 个通道。

从 20 世纪 90 年代起,国内开始了光纤旋转连接器技术的研究<sup>[2,3]</sup>,到 21 世纪初,取得了一些研究成果<sup>[4,5]</sup>。到目前为止,陆续有一些相关产品出现。

本文主要根据光纤旋转连接器的原理结构,对棱镜消旋型、波分复用型和反射镜消旋型等几种光纤旋转连接器进行介绍。由于单通道光纤旋转连接器在实际中应用比较少,所以主要介绍无源多通道型光纤旋转连接器,包括各种连接器的典型应用。

**收稿日期**: 2012-08-13; **收到修改稿日期**: 2012-09-13; **网络出版日期**: 2012-11-16

**基金项目**: 国家自然科学基金(61275086)资助课题。

**作者简介**: 贺正权(1965—),男,硕士,研究员,主要从事光纤技术和光信息处理等方面的研究。

E-mail: zhqhe@opt.ac.cn

## 2 道威棱镜光纤旋转连接器

道威棱镜是一种去掉顶端多余部分的直角棱镜,当光线从棱镜的一端以平行棱镜底面的方向平行入射时,经过两次折射和一次反射后以同样的方向平行射出。图 1 是道威棱镜成像的原理。在图 1(a)中,物体经过道威棱镜后,成的像是上下颠倒(即  $y$  方向发生改变);当棱镜绕光轴旋转  $90^\circ$  后,成的像左右颠倒(即  $x$  方向发生改变),如图 1(b)所示。也就是说,当棱镜绕光轴旋转  $90^\circ$  时,成的像也绕光轴旋转,而且旋转角度为  $180^\circ$ 。所以,如果有一种机械结构能够保证像的旋转角速度是棱镜角速度的 2 倍,则可以实现消旋<sup>[6]</sup>。

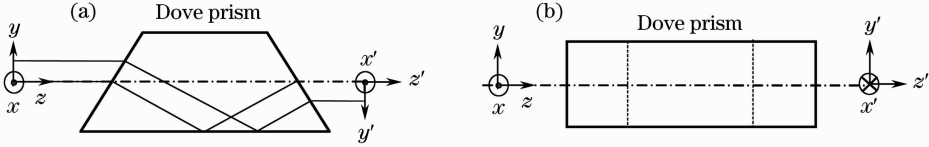


图 1 道威棱镜成像原理

Fig. 1 Imaging principle of Dove prism

在图 2 中,假如入射端光线(如 1 和 3)以角速度  $\omega$  绕转动轴旋转,同时道威棱镜以  $\omega/2$  角速度转动时,出射光线(如 2 和 4)的位置保持不变。当该系统用于图像传输时,在棱镜的特征方向上,出射方向上的像是入射方向上像的倒像,即以右手坐标入射的光,在出射端变为左手坐标系。

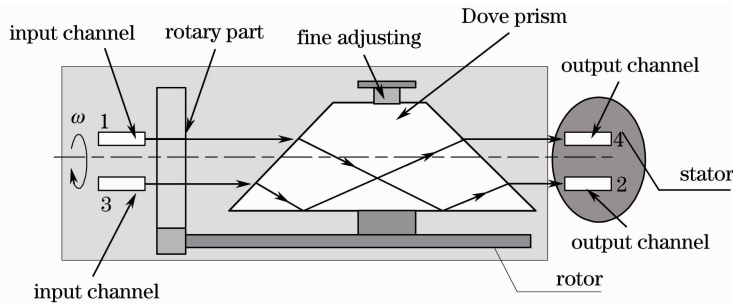


图 2 道威棱镜光纤旋转连接器

Fig. 2 Dove prism FORJ

在光纤旋转连接器中,通常为了提高光传输效率,需要将输入光纤的输出光进行准直,在接收端再通过准直器将光信号会聚到光纤中<sup>[7]</sup>。为了进一步提高光传输效率,拓展连接器功能,优化系统结构,人们提出多种改进方法。

为了实现图像和数据同时传输,李育林等<sup>[8]</sup>提出了一种具有成像功能的多通道光纤旋转连接器,在连接器的中心部分增加了一个成像通道,可用于转子部分图像信号的传输,如图 3(a)所示。成像通道的周围分布不同数量的光纤信号传输通道,用于数据的传输。由于成像系统的图像信号也是通过道威棱镜,所以,同时实现了图像的消旋。

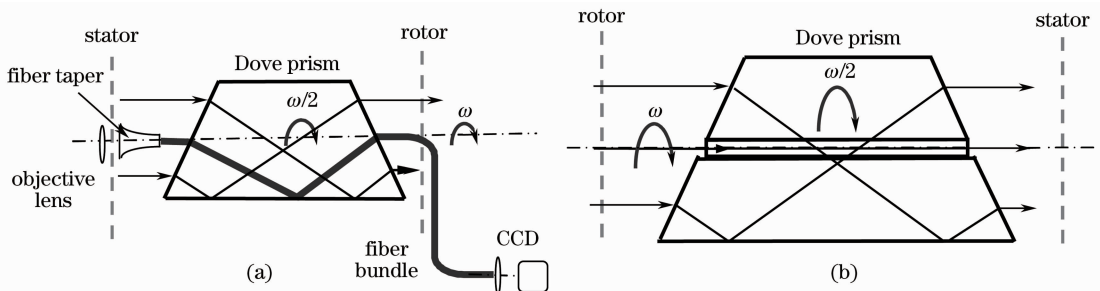


图 3 道威棱镜光纤旋转连接器改进。(a)带成像功能;(b)中心开孔

Fig. 3 Modified Dove prism FORJ. (a) With imaging function; (b) with center hole

法国 Thales 公司 Thomas Merlet 等<sup>[9]</sup>在道威棱镜的几何中心开一小孔(或在几何中心的入射面和出射面处切掉一小块,使光能垂直玻璃表面入射和出射),光在该通道通过时不会发生偏转,因此通过道威棱镜不

会发生损耗,如图 3(b)所示。对于一般的道威棱镜旋转连接器而言,因为存在制造误差,在光学传输路径上容易产生强度和长度的波动,在旋转过程中,棱镜存在的同轴度误差使插入损耗发生变化。当人们需要传输模拟信号时,例如,连续数量的大幅度摆动的信号时,这些干扰将是致命的。如果采用中心孔通道传输,就可以克服这些缺点,同时,其他的通道可以提供给那些对损耗变化不那么敏感的信号使用。

### 3 波分复用光纤旋转连接器

WDM 是同时将多个波长的光在一根光纤中传输,提高了系统的传输容量,支持双向信号传输。利用 WDM 这一技术特性,可构成多通道光纤旋转连接器,实现大容量、低损耗和高速度数据传输<sup>[10,11]</sup>。

采用波分复用技术的多通道光纤旋转连接器的结构如图 4 所示。多束波长分别为  $\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_n$  的光通过耦合隔离器(隔离器主要是防止从另一端反射回来的光束对入射光产生干扰),然后进入波分复用器中,多束光被合成一束光。这束光经过微透镜(如 C-Lens 或 G-Lens)扩束准直后,通过连接器的旋转界面。在出射端,再通过微透镜接收会聚,耦合到输出端的解波分复用器(demultiplexer)中,由解分波复用器将一束光分解成多束光。需要说明的是,在这种对称结构中,光的传输是双向的。在实际应用中,可以将音频信号、视频信号和数据等分别调制到不同的波长上。

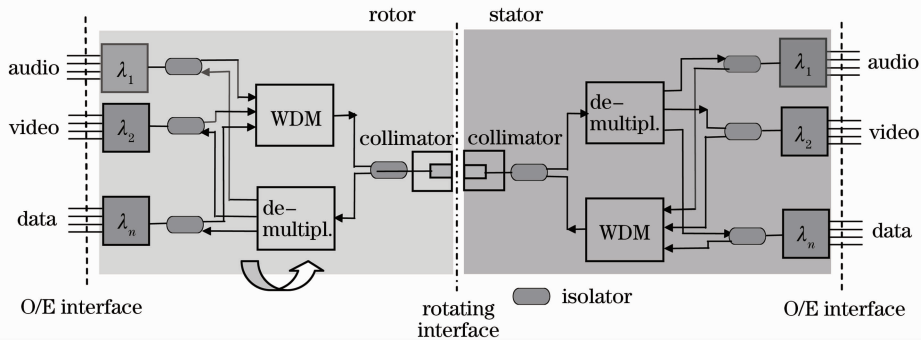


图 4 基于波分复用技术的光纤旋转连接器

Fig. 4 FORJ based on WDM

由于这种结构中,所有光信号都需要通过一对准直器来传输,所以准直器之间的耦合效率对整个系统的性能起到关键的作用。在旋转连接器中,影响耦合器耦合效率的主要因素有离轴偏差、角度偏差和轴向偏差等,在文献[12,13]中,对这些偏差的影响进行了详细的分析和研究。

在多通道光纤旋转连接器中,采用粗波分复用器(CWDM)时,波长最小间隔可达到 20 nm,而采用密集波分复用器(DWDM)时则可以实现的波长间隔为 4 nm。在波长 1310 nm 和 1550 nm 上,插入损耗可达到 2 dB 左右,而且两波长之间,隔离度可达 40 dB。由于 WDM 系统的复用光通路速率可达到 2.5 Gb/s、10 Gb/s 等,而复用光通路的数量可以是 4、8、16、32,甚至更多,因此系统的传输容量可以达到 300~400 Gb/s。

### 4 反射镜消旋光纤旋转连接器

和以上两种技术相比,反射镜旋转扫描方式是利用反射面对光线的反射来实现消旋,在这种系统中,光线在光路中全部通过反射来传输,不需要经过折射进入介质,所以光的损耗和色散极小,而且可以传输大功率光学信号。45°旋转扫描反射镜扫描模式是一种最常用的光机扫描模式,由于它尺寸较小,扫描范围大,在转台信号传输和空间目标扫描等领域有重要和广泛的应用<sup>[14]</sup>。

Moog 公司利用 45°反射镜实现多路光纤信号的传输,如图 5 所示。图中定子是固定不动的,入射光纤的光经过反射镜反射后,进入会聚透镜,然后再通过光纤将光信号传出。反射镜通过磁耦合齿轮与转子连接,当转子转动时,在磁力作用下,保持反射镜不动,从而使光线始终与准直透镜相对。

当 45°扫描镜用于图像传输时,会产生像旋转。由于镜面反射使得物与像的坐标“颠倒”,所以奇数次反射成镜像,而偶数次反射成物象。Trex 公司采用三反射面系统实现消除像偏转<sup>[15]</sup>,因其三面反射镜呈“K”

字排列,故起名“K 镜”,如图 6 所示。

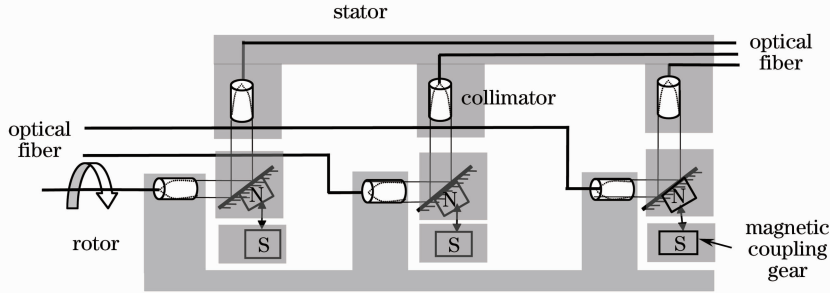


图 5 45°反射镜消旋光纤旋转连接器

Fig. 5 45° reflector despun FORJ

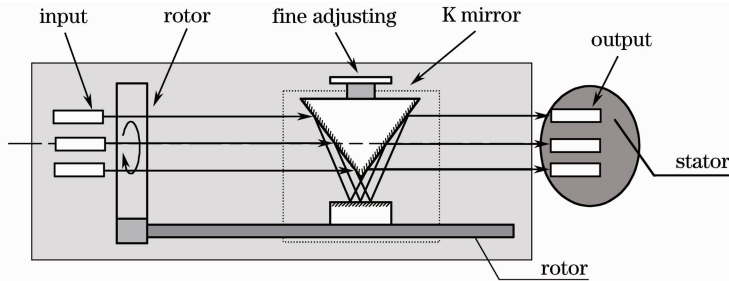


图 6 K 镜消旋光纤连接系统

Fig. 6 K mirror FORJ

郑列华等<sup>[16]</sup>将 K 镜系统应用于海洋卫星水色仪中,实现像消旋。表 1 中对几种光纤旋转连接器的性能进行了对比。

表 1 几种光纤旋转连接器性能对比

Table 1 Specifications of three types of FORJs

FORJ	Dove prism	WDM	Reflective mirror
Channel	2,4,6,8	4,8,12,16,20,32	2,4,8,16,32
Wavelength /nm	850,1310,1550	1310~1560	800~2000
Insert loss /dB	2(max)	3.5(min), 5(max)	<1
Maximum rotation /(r/min)	100	100	100
Dimension	Big	Compact	Bigger
Operation temperature /°C	-10~60	-40~85	-50~100
Life time /turn	10 <sup>8</sup>	2×10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup>

## 5 结束语

随着光纤通信技术的日益成熟,在诸多领域,光纤通信正逐步取代铜(铝)金属线缆通信,甚至出现了所谓“光进铜退”的现象。光纤旋转连接器经过 30 多年的发展,取得了很大的进步,目前在技术上和产品工艺上都已比较成熟,在多数应用领域,如军事武器、能源和工业等,也开始取代电滑环<sup>[17,18]</sup>。

光纤旋转连接器最初也是为了解决在军事设备中活动连接部分信号传输问题而设计的,如雷达天线和基座之间的数据通信,无人驾驶车中瞄准系统和主控系统之间的通信等。由于光纤旋转连接器具有重量轻、结构小等优点,在能源和工业自动化领域也开始得到应用。在石油测井仪连轴中,加入光纤旋转连接器,将测井传感器的信号,通过光纤传输到地面采集控制系统中。

## 参 考 文 献

- 1 W. W. Koch, S. K. Nauman. Proof-of-concept model of a multichannel off-axis passive bidirectional fiber optic rotary joint [C]. *SPIE*, 1988, **931**: 94~97

- 2 Ji Boyan. Fiber optic rotary joint[J]. *Optical Communication*, 1991, (1-2): 74~76  
季伯言. 光纤旋转连接器[J]. 光通信技术, 1991, (1-2): 74~76
- 3 Wang Zhihe. A review of the development of fiber optic connectors abroad[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 1993, (2): 11~18  
王志和. 国外光纤旋转接头现状[J]. 光纤与光缆及其应用技术, 1993, (2): 11~18
- 4 Mei Jinjie, Zhu Guangxi. Fiber optic rotary joint and its applications[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2008, (3): 4~13  
梅进杰, 朱光喜. 光纤旋转接头及其应用[J]. 光纤与光缆及其应用技术, 2008, (3): 4~13
- 5 Jia Dagong, Zhang Yimo, Jing Wencai. Development of passive fiber optic rotary joint[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, **24**(4): 199~202  
贾大功, 张以谟, 井文才. 无源光纤旋转连接器的发展[J]. 仪器仪表学报, 2003, **24**(4): 199~202
- 6 Xu Feng, Zhang Ruiyu, Wang Guangqi *et al.*. Design of novel dual-channel optical rotary joint by using de-rotating prism[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(10): 1836~1840  
徐峰, 张瑞钰, 汪光骥等. 新型棱镜型双通道光纤旋转连接器的设计[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(10): 1836~1840
- 7 G. H. Ames, G. Ferry. Collimator Assembles Fiber Optic Rotary Joint with a Buddle[P]. US Patent 5 442 721. 1995
- 8 Li Yulin, He Zhengquan, Wang Lili *et al.*. Multichannel Fiber Optical Rotary Joints with Imaging Function[P]. Chinese Patent: CN 201110340470.9. 2011  
李育林, 贺正权, 王丽莉等. 具有成像功能的多通道光纤旋转连接器[P]. 中国专利: CN 201110340470.9. 2011
- 9 Thomas Merlet, Morgan Queguiner. Very High Quality Channel for Multi-pathway Optical Rotary Joint[P]. US Patent 7 650 054 B2. 2010
- 10 Jia Dagong, Zhang Yimo, Wang Guanghui *et al.*. Multi-channel fiber optical rotary joint[J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, **39**(6): 129~132  
贾大功, 张以谟, 王光辉等. 多通道光纤旋转连接器[J]. 天津大学学报, 2006, **39**(6): 129~132
- 11 Wang Yuanquan, Fang Wuliang, Tao Li *et al.*. Research of multiple-input multiple-output (MIMO) technique in multimode fiber links[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 100601  
王源泉, 方武良, 陶理等. 多模光纤链路中多输入多输出技术的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(10): 100601
- 12 Jia Dagong, Zhang Yimo, Jing Wenca *et al.*. Effect of GRIN lens misalignment on coupling efficiency of optical signal[J]. *Journal of Optoelectronic & Laser*, 2004, **15**(6): 753~755  
贾大功, 张以谟, 井文才等. 自聚焦透镜的装配误差对接收器系统耦合效率的影响[J]. 光子·激光, 2004, **15**(6): 753~755
- 13 Li Shichun, Hua Dengxin, Song Yuehui *et al.*. Research on micro-lens coupling system of all-fiber raman lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0601001  
李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉等. 全光纤拉曼激光雷达的微透镜耦合系统研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0601001
- 14 Zhang E, Gong Huixing. Research and application of system for offsetting image rotation from 45° rotating scan mirror[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*, 1998, **28**(2): 125~132  
张镨, 龚惠兴. 消除45°旋转扫描反射镜像旋转系统的研究及应用[J]. 红外与毫米波学报, 1998, **28**(2): 125~132
- 15 Edward Davis. Single Mode/Multi Mode and High Power Fiber-optic Rotary Connection Technology[OL]. [www.navysbir.com/08\\_3/30.htm](http://www.navysbir.com/08_3/30.htm), 2012-10-19
- 16 Zheng Liehua, Yin Dayi, Feng Xin. Application for offsetting image rotation "K mirror" in COCTS[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(1): 17~21  
郑列华, 尹达一, 冯鑫. K镜消像旋机构在海洋卫星水色仪中的应用[J]. 红外技术, 2007, **29**(1): 17~21
- 17 Mi Lei, Yao Shengli, Sun Chuandong *et al.*. Development and military application of fiber optic rotary joint[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(6): 1138~1142  
米磊, 姚胜利, 孙传东等. 光纤旋转连接器的发展及其军事应用[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(6): 1138~1142
- 18 Xu Ming, Li Chao. Application of electro-optical composite collector ring in radar system[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2011, **27**(1): 44~46  
徐明, 李超. 光电组合式滑环在雷达系统中的应用[J]. 电子机械工程, 2011, **27**(1): 44~46