

文章编号: 1000-8055(2010)03-0675-06

基于无线激光通信的转子参数遥测方法研究

刘冬冬, 张天宏, 马坚刚

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了满足航空发动机转子、直升机旋翼等旋转部件动态参数的高速实时采集需求, 提出了一种基于无线激光通信的旋转部件非接触参数遥测方法, 并给出了基于该方法的参数遥测系统总体方案. 重点研究了光电数据传输通道中发射激光器的信号驱动、光电探测器的信号放大及串行/解串器等关键电路的设计方法. 设计了理论最大传输速率达 622 Mb/s 的无线激光通信收发模块, 并测试了收发模块的实际性能. 最后, 研制了参数遥测试验样机, 该样机在旋转状态下的数据传输率达 300 Mb/s, 满足航空发动机转子的动态参数遥测要求.

关 键 词: 航空发动机; 参数遥测系统; 光电数据传输通道; 数据传输试验; 串行/解串器 (SER/DES)
中图分类号: V212.72 **文献标识码:** A

Study on parameter telemetry for rotary machine based on free space optical communication

LIU Dong-dong, ZHANG Tian-hong, MA Jian-gang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to deal with the high-speed real-time data acquisition problem in the dynamic parameter telemetry for aero-engine rotor, helicopter rotor wing and other rotary machines, a novel non-contact parameter telemetry method for rotary machine based on free space optical communication was proposed, and the overall scheme of parameter telemetry system based on this method was given. The key circuits such as laser diode driver, photodetector amplifier, serializer/deserializer of the photoelectric data transmission channel were designed. As a result, a free space optical communication transceiver of a theoretical maximum transmission rate of 622 Mb/s was designed, and the actual performance was tested. A parameter telemetry experimental prototype was developed. Data transmission rate of the prototype is reach up to 300 Mb/s in rotational state, which satisfy the requirements of dynamic parameter telemetry for aero-engine rotor.

Key words: aero-engine; parameter telemetry system; data transmission experiment; photoelectric data transmission channel; serializer/deserializer (SER/DES)

在航空发动机转子部件性能研究过程中, 需要测量温度、压力、疲劳应变等诸多参数^[1-2], 准确、实时的获得这些参数对于发动机转子的性能研究具有重要意义. 国外大型航空发动机

公司, 如 Pratt-Whitney, General Electric, Rolls-Royce 等, 采用先进的参数遥测系统, 对发动机转子部件特性进行了全面而细致的试验研究, 从而使其在先进性能发动机的研制能力上保持

收稿日期: 2009-03-03; 修订日期: 2009-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(9140A1706 H K02)

作者简介: 刘冬冬(1983-), 男, 陕西西安人, 博士生, 主要从事航空发动机测试与控制技术研究.

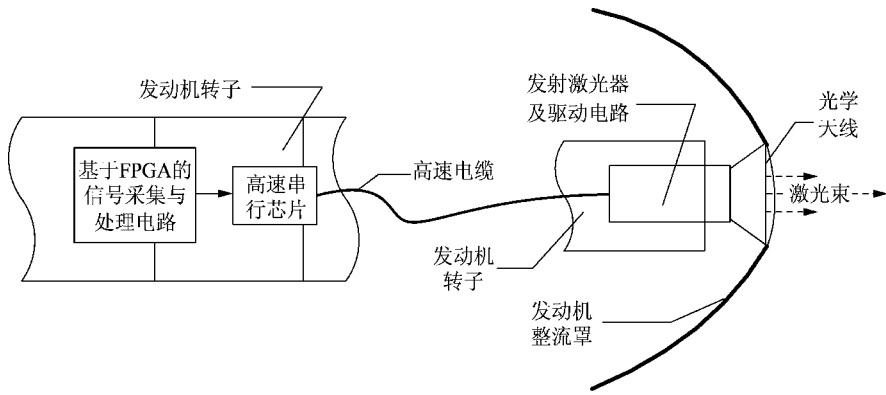


图 2 参数遥测系统发射端

Fig. 2 Transmitter of parameter telemetry system

2 光电数据传输通道研究^[11-13]

2.1 发射激光器及其驱动电路

如图 2 所示,激光通信的发射端包括:高速串行芯片、驱动电路及发射激光器。发射端将数字信号转换为光信号,被转换的数字信号是经过串行芯片编码的串行码流。低功率的激光器件一般采用强度直接调制的方法,如图 3 所示。

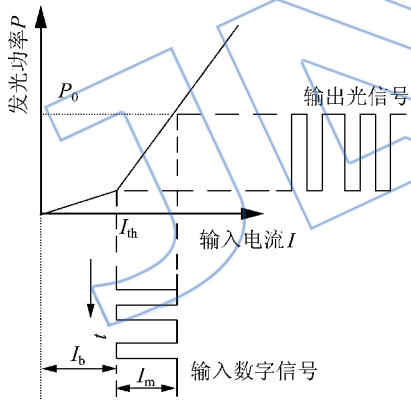


图 3 激光二极管 P-I 特性图

Fig. 3 P-I characteristic graph of laser diode

目前,有三种类型的激光器可供无线激光通信选择:CO₂ 气体激光器、泵浦激光器及半导体激光器。其中,半导体激光器具有体积小、质量轻、光电转换效率高等优点,可以直接调制,适合于发动机转子参数遥测系统。在高速激光通信中,普遍使用的半导体激光器是激光二极管 LD (laser diode)。图 3 为 LD 的 P-I 特性图,图中 P₀ 为额定发光功率, I_{th} 为阈值电流。当输入电流超过阈值电流时激光器开始发光,其发射功率随着输入电信号的变化而变化。商用的 LD 内部一般都集成一个光电探测器,该探测器的输出电流称为暗电

流,通过监测暗电流可以获得 LD 当前的实际发射功率。

低速传输时 LD 的驱动电路可以采用三极管等分立元器件构建,但当传输速率达到几百 Mb/s 时,由于晶体管的电荷沉积效应及高速电路对电源完整性、信号完整性的严格要求,一般采用专用芯片构建驱动电路。由于 LD 的 I_{th} 和 P₀ 会随着温度的变化而变化,专用芯片内部会集成自动功率控制 APC (automatic power control) 电路。APC 根据 LD 的暗电流调整偏置电流 I_b 和调制电流 I_m,保持 LD 的发光功率恒定。

2.2 光电探测器及其放大电路

如图 4 所示,激光通信的接收端包括光电探测器、偏压控制、前置放大器、主放大器、均衡器、自动增益控制器 AGC (automatic gain control) 以及判决器和时钟提取电路等。在高速激光通信系统中,判决和时钟提取由专用解串芯片完成。

光电探测器的主要功能是将调制过的光信号转换成电信号,激光通信系统中的光电探测器主要为 PIN (positive intrinsic negativ) 型和雪崩型光电探测器。其中 PIN 型光电探测器响应时间短、工作电压低、具有较好的光电转线性度,适合于发动机转子参数遥测系统。

由于光电探测器输出的电流信号通常比较小,必须经前置放大器放大。前置放大器的噪声和等效输入阻抗 r₀ 直接影响载噪比,需选用高等效输入阻抗和低噪声的放大器作为前置放大器,其输出一般为 mV 量级。前置放大芯片一般选用 GaAs MESFET,它不仅具有低的噪声和高的灵敏度,而且还可采用峰值检波处理,使前置放大器的饱和光功率达到所需要的标准。目前,很多商用的 PIN 型光电探测器内部都集成了前置放大器,

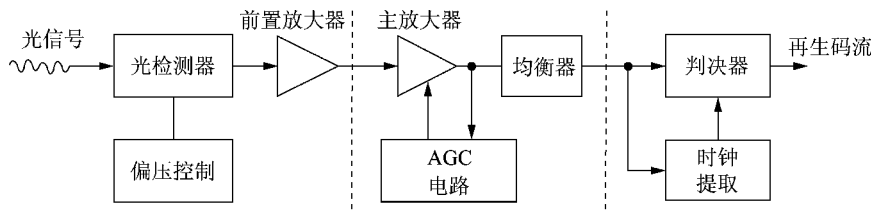


图 4 激光通信接收端功能框图

Fig. 4 Function diagram of laser communication receiver

并带有 AGC 电路,具有非常高的可靠性和灵敏度.

主放大器一般是多级放大器,其作用是提供足够的增益,并实现自动增益控制,以使输入的光信号在一定范围内变化时,输出电信号保持恒定,在高速通信应用中一般采用专用芯片来构建主放大器.

3 串行/解串器^[7]

串行/解串器 (serializer/deserializer, SER/DES) 是一种时分多路复用的点对点通信技术,它是激光通信系统必不可少的组成部分,包括发射端的串行器和接收端的解串器.串行器主要由输

入数据寄存器、并串移位寄存器、锁相环 PLL (phase-locked loop) 电路、时序控制电路等部分组成,如图 5 (a) 所示.解串器则由串并移位寄存器、时钟恢复电路、时序控制电路、输出数据寄存器等部分组成,如图 5 (b) 所示.在发射端多路低速并行数据被串行器转换成高速串行码流调制到激光载波中,在接收端高速串行数据被解串器恢复为低速并行数据.串行/解串器有增强系统抗噪声和抗干扰的能力,并能克服时钟偏移的影响.在低速传输时,可以采用 FPGA 设计串行/解串器,但当传输速度达到几百 Mb/s 时,在接收端提取同步时钟将非常困难,这时需采用专用芯片.现在很多高端 FPGA 内部集成了串行/解串器硬核.

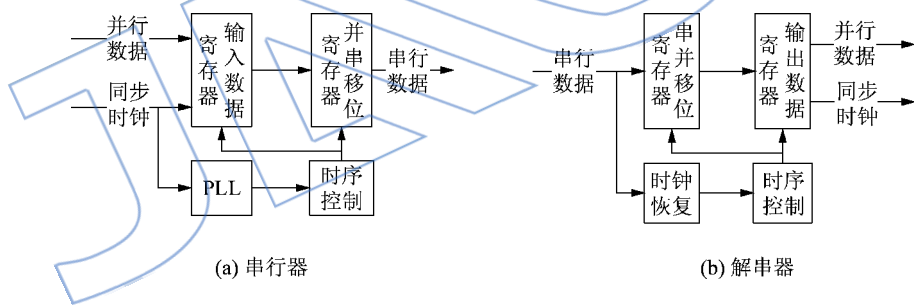


图 5 串行/解串器功能框图

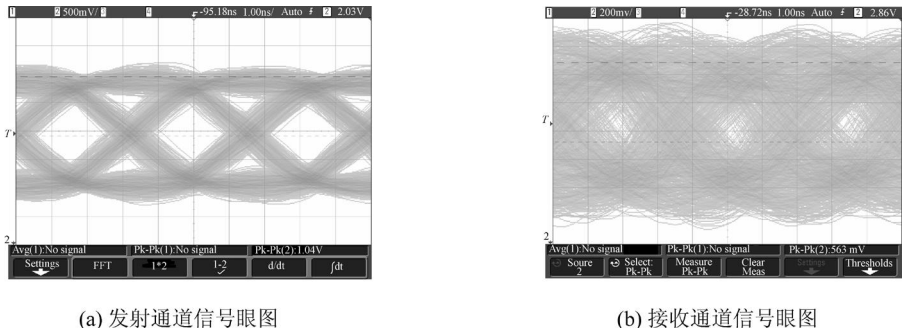
Fig. 5 Function diagram of SERDES

4 光电数据传输通道性能测试与分析

本文采用奥雷光电公司的 ATO-01001 型 LD, MAXIM 公司的 LD 驱动电路 MAX3668 及主放大器 MAX3762, VTERA 公司的 PIN 型光电探测器 VPD-P015-1923 (内部集成前置放大器), 及安捷伦公司的串行/解串器 HDMP-1032 A/1034 A 设计了理论最大通信速率为 622 Mb/s 的无线激光通信收发模块.为了保证信号完整性和电源完整性,本文采用 4 层 PCB (printed circuit board) 布线, PECL (positive emitter coupled logic) 差分回路的单端阻抗控制为 50Ω,并设计了

终端匹配电阻.但由于实际 PCB 布线不够精确,以及差分线路上的电阻、电容及接插件等分立元器件导致的差分线特征阻抗不连续等因素,当传输速率超过 500 Mb/s 时误码率过大,接收端的解串器无法对串行数据解串.图 6 (a) 为当传输速率为 300 Mb/s 时在 MAX3668 的差分输入管脚附近测得信号眼图,由于缺乏高速示波器和高速探头,这里测到眼图张的不开、线条较粗,但能判断出位速率,实际的信号质量应好于所测到的.图 6 (b) 为在同样条件下 MAX3762 差分输出管脚附近测得的信号眼图,与发射端的眼图对比接收端眼图质量要差的多.分析认为这主要是光信号经过收发光学天线后的色散导致的,因为色散会使

脉冲信号展宽,导致码间串扰.



(a) 发射通道信号眼图 (b) 接收通道信号眼图

图 6 光电数据传输通道信号眼图

Fig. 6 Signal eye diagram of photoelectric data transmission channel

5 数据传输试验

基于前面设计的无线激光通信收发模块设计了参数遥测试验样机,图 7 为样机的结构框图.为了模拟发动机转轴的转动,参数遥测发射端安装在直流电机带动的转轴上,光学收发天线均为简易的聚光透镜.样机中的光纤通信发射模块为武汉启晟科技公司的 NM3444,其设计通信速率为 622 Mb/s,接口电平为 PECL,光纤选用与光纤通信发射模块配套的单模光纤,光纤通信接收模块为与 NM3444 配套的 NM5444. 试验时,安装在转轴上的发射端以 1 500 r/min 的速度旋转,数据传输距离为 2 m. 遥测数据为发射端 FPGA 内部产生的频率为 1 MHz 正弦波数据.正弦波每个周期由 15 个点组成,每个点的分辨率为 16 位.在这种情况下有效数据量达 240 Mb/s(HDMP-1032A 的编码效率为 0.8,因此光电数据传输通道中的

实际传输速率为 300 Mb/s),这么快的数据很难实时上传到计算机.为了实时的观测遥测数据,试验中采用了 FPGA 开发软件 Quartus II 内部集成的 Signal Tap II,它将逻辑分析仪嵌入到 FPGA 内部,能实时捕获 FPGA 内部的高速数据流,并通过 JTAG(joint test action group)接口上传到 Quartus II 软件中显示.图 8 为试验结果,其中 test1_data 为按照接收的数据重构的正弦波,Rx-clk1 为解串芯片恢复出来的时钟信号,频率为 15 MHz.由于 FPGA 内部的存储单元容量有限,只能捕获很短时间内的数据,图 8 只捕获了 4.5 μs 内产生的遥测数据.

由于条件限制,本文没有在航空发动机上进行参数遥测试验,试验转速只有 1 500 r/min;真实发动机对参数遥测装置的尺寸及安装位置有诸多限制,额定转速超过 10 000 r/min.但目前已有的基于无线电数据传输的航空发动机转子参数遥测

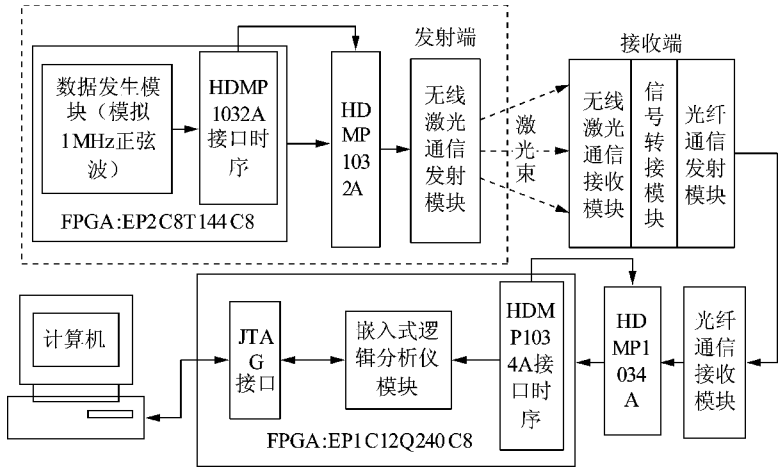


图 7 参数遥测试验样机功能框图

Fig. 7 Function diagram of parameter telemetry experimental prototype

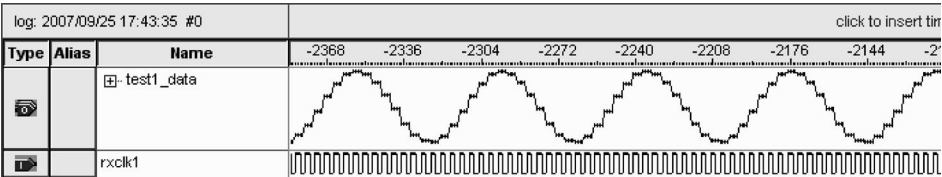


图 8 试验结果

Fig.8 Experimental result

装置,能在转速为 10 000 r/min 的工况下进行参数遥测,而光电数据传输模块相对无线电数据传输模块体积更小、质量更轻、功耗更低、寿命更长、抗干扰能力更强.因此,基于无线激光通信的转子参数遥测装置能够适应航空发动机的高速旋转工况,传输速率可以达 300 Mb/s,可为压气机、涡轮的部件特性研究提供更多有价值的遥测数据.

6 结 论

本文提出了一种基于无线激光通信的转子参数遥测方法,设计了理论最大传输速率达 622 Mb/s 的无线激光通信收发模块.基于该收发模块设计了参数遥测试验样机,在转速为 1500 r/min 的旋转工况下开展了速率为 300 Mb/s 的非接触光电数据传输试验,验证并分析了这种方法的工程可行性.将点对点的高速无线激光通信技术引入到航空发动机等转子的非接触参数遥测装置中,极大的提高了遥测数据的传输速率,可为压气机、涡轮的部件特性研究提供更多有价值的遥测数据.此外,本文研究的光电数据传输通道的试验有效数据传输速率达到了 240 Mb/s,这使得对航空发动机内部进行图像遥测成为可能.

参考文献:

[1] Simon D L, Gang S, Hunter G W, et al. Sensor needs for control and health management of intelligent aircraft engines[R]. NASA/ TM-2004-2132202.

[2] 袁巍, 陆亚均, 周盛, 等. 数据采集技术述在叶轮机械实验中的应用[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3) : 402-407.

YUAN Wei, LU Yajun, ZHOU Sheng, et al. An application of data acquisition technique to turbo machinery experiments[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3) : 402-407. (in Chinese)

[3] Greener D. Intelligent pressure measurement for turbo machinery application[R]. ASME 96- GT-101, 1996.

[4] Grzybowski R, Foyt G, Atkinson W, et al. Microwave blade tip clearance measurement system[R]. ASME96- GT-2,

1996.

[5] Huhner J P, Hubner J P, Abbitt J D, et al. Pressure measurement on rotating machinery using lifeline imaging of pressure sensitive paint[R]. AIAA 96-2934, 1996.

[6] 卞春江, 张天宏, 邓志伟. 面向旋转构件的高速无线数据采集系统[J]. 传感器技术, 2004, 23(11) : 53-55.

BIAN Chunjiang, ZHANG Tianhong, DENG Zhiwei. High-speed wireless data acquisition system for revolving component[J]. Journal of Transducer Technology, 2004, 23(11) : 53-55. (in Chinese)

[7] 严后选. 旋转部件无线遥测系统的若干关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

YAN Houxuan. Research on wireless telemetry system for rotary machine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)

[8] 严后选, 张天宏, 孙健国. 航空发动机转子参数遥测中 FIR 编解码器设计[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3) : 495-499.

YAN Houxuan, ZHANG Tianhong, SUN Jianguo. Design of codec for FIR used in the telemetry of aeroengine rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3) : 495-499. (in Chinese)

[9] 严后选, 张天宏, 孙健国. 近距离红外无线数据通信技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004, 12(4) : 404-415.

YAN Houxuan, ZHANG Tianhong, SUN Jianguo. A survey of wireless infrared data communication[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12(4) : 407-416. (in Chinese)

[10] Jeong M C, Lee J S, Kim S Y, et al. 8 ×10 Gb/s terrestrial optical free space transmission over 3.4 km using an optical repeater[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(1) : 171-173.

[11] 王佳, 俞信. 自由空间光通信技术的研究现状和发展方向综述[J]. 光学技术, 2005, 31(2) : 259-265.

WANG Jia, YU Xin. Free-space optical communication's current situation and development trend[J]. Optical Techniqu, 2005, 31(2) : 259-265. (in Chinese)

[12] 张宝富, 谭笑, 蒋慧娟. 光纤通信系统原理与试验教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

[13] Hong K J. Wide-band and scalable equivalent circuit model for multiple quantum well laser diodes[D]. America: Georgia Institute of Technology, 2005.