

文章编号: 1672-8785(2018)05-0025-06

30 K 脉管预冷 CFD 仿真研究

杨 森^{1,2} 刘碧强^{1,2} 蒋珍华^{1,2} 吴亦农^{1*}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 针对一台 U 型一级斯特林二级脉管混合制冷机, 分析了一级冷量对二级脉管预冷对制冷机整机性能的影响。制冷机一级制冷温度为 80 K, 二级制冷温度为 30 K, 通过将一级冷指和脉管热桥连接, 利用一级提供的冷量对脉管进行了预冷。通过计算流体力学(Computer Fluid Dynamics, CFD)仿真研究了脉管预冷对脉管内部温度场和速度场的影响。研究发现, 对脉管进行预冷会改变脉管工作时的内部温度分布, 对二级制冷能力有巨大影响。在不采用一级冷量对脉管中段进行预冷时, 制冷机以二级 0.7W@30 K 和一级 7W@80 K 同时进行冷量输出, 压缩机输入 PV 功为 133 W; 通过热桥将一级冷端换热器与二级脉管中段连接后, 保持输入 PV 功为 133 W, 输出冷量变为二级 1.2W@30K 和一级 6W@80K 同时进行冷量输出。研究发现, U 型一级斯特林二级脉管混合制冷机采用中段脉管预冷可大大提高二级的制冷能力。

关键词: 两级混合制冷机; 脉管预冷; CFD

中图分类号: TB651 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.05.005

CFD Simulation Study of Precooling of a Pulse Tube at 30 K

YANG Sen^{1,2}, LIU Bi-qiang^{1,2}, JIANG Zhen-hua^{1,2}, WU Yi-nong^{1*}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Aiming at the precooling of the pulse tube of a U-type hybrid cryocooler with a one-stage Stirling and a two-stage pulse tube, the influence factors on the cryocooler are studied. When the cooling temperature of the second stage is 30 K, the first stage cold finger is connected to the pulse tube via a heat bridge and the cooling capacity provided by the first stage is used to precool the pulse tube. The influence of pulse tube precooling on the temperature field and velocity field in the pulse tube is studied by a Fluent software. It is found that precooling may change the internal temperature distribution of the pulse tube and has a great influence on the cooling capacity of the second stage. Without the precooling of the pulse tube by the cooling capacity provided by the first stage, the cryocooler outputs its cooling capacity with its second stage of 0.7 W@30 K and its first stage of 7 W@80 K at the same time and the input PV power of the compressor is 133 W. After the first stage cold heat exchanger is connected to the middle part of the second stage vessel via a heat bridge, the input PV power of 133 W is maintained and the output cooling capacity of the second stage and that of the first

收稿日期: 2018-03-23

作者简介: 杨森(1990-), 男, 陕西西安人, 博士生, 主要从事低温机械制冷机的分析和设计工作。

E-mail: yangsen7890@126.com

stage are changed to 1, 2 W@ 30 K and 6 W@ 80 K respectively at the same time. It is found that the precooling of the middle section of the pulse tube can greatly improve the two-stage cooling capacity of the U-type hybrid cryocooler.

Key words: two-stage hybrid cryocooler; precooling of pulse tube; CFD

0 引言

随着空间红外技术的发展,对红外探测器性能的要求也越来越高。为了提高探测器的精度,空间红外探测器经常采用低温制冷技术对光学系统及相关支撑部件进行冷却。

脉管制冷机(Pulse Tube Refrigerator, PTR)由于没有常规回热式制冷机的低温运动部件,具有结构简单、可靠性高、振动小、寿命长等优点,在抗电磁干扰、降低振动和延长寿命等方面有特别明显的优势。其应用遍及航空航天、军事、低温电子学、低温医学、气象、气体液化等诸多领域,主要用来为红外探测器件和超导应用等提供其必需的低温冷源。美国 NGAS 公司研制的脉管制冷机已成功应用于空间用多光谱热像仪、大气红外探测器(Atmospheric Infrared Sounder, AIRS)等探测器,并且已经成功在轨运行十年以上。

使用低温红外探测器可以使宇宙探测和天文观测的精度变得更高,但更高的成像像素敏感度和像素密度也给低温红外探测器的冷却系统提出了更高的要求。随着深空探测的发展,探测器要求的工作温度越来越低,一些探测器需要被冷却至液氢温区甚至液氮温区。例如空间毫米波甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)阵列接收机需要被冷却至 30 K 及以下温度才能正常工作,并且低温红外探测器往往需要同时冷却光学平面和焦平面,所以一般需要制冷机能在两个或者更多的温区提供冷量。例如,在航天领域,35 K 温区一般须与 80 K 温区结合使用。这些深空探测项目推动了长寿命、高效空间应用深低温制冷机的发展。对于工作温度低于 30 K 的脉管制冷机,通常采用两级结构。近 30 年来,欧美国家在航天探测相关领域的技术进步有力

地推动了低温制冷技术的发展,使低温红外探测器在航天探测领域得到了广泛应用。

单级脉管制冷机的高效工作温区一般不低于 50 K。对于更低的温区,通常需要采用外界冷源预冷的方式使脉管制冷机在更低的温度下提供冷量。根据冷源的不同和制冷机预冷位置的不同,制冷机预冷的方式分为多种类型。

2015 年,中科院理化所刘思学等采用液氮对脉管制冷机的热端进行预冷,在 180 W 电功输入条件下,获得了 675 mW@20K 的制冷性能^[1]。

2016 年,韩国科学技术研究院的 Jiho Park 等采用液氮对压缩机进行预冷^[2],使制冷机获得了更低的无负载温度(38.5 K)。

2017 年,中科院上海技术物理研究所蒋燕阳等对两级同轴型脉管制冷机回热器与脉管壁换热的影响进行了分析并开展了相关实验^[3]。结果表明,由于同轴型制冷机回热器与脉管之间存在热交换,对脉管预冷可使得两级同轴型脉管制冷机的性能优于同条件下的直线型脉管制冷机。

本研究针对一台 U 型二级脉管制冷机,其中一级采用斯特林结构,制冷温度为 80 K,二级采用常温惯性管和气库进行调相,制冷温度为 30 K。将一级冷指和脉管热桥连接后,利用一级提供的冷量对脉管进行预冷。通过第一级冷量对脉管进行预冷的方式能提高二级脉管制冷机的制冷能力。

热动力学模型可以很好地对脉管制冷机内部发生的能量交换进行分析,但这些模型简单,没有充分考虑流量和传热的细节。用多维瞬态计算流体力学方法建立脉管制冷机的多维瞬态模型,可以很好地揭示脉管预冷对脉管内部流动和换热造成的影响。本研究通过建立 U

型一级斯特林二级脉管整机 CFD 仿真模型, 研究了脉管预冷对制冷机性能的影响机理。

1 理论分析

本研究针对一台 U 型一级斯特林二级脉管混合制冷机。将斯特林制冷机作为第一级, 第二级采用 U 型脉管制冷机结构。脉管冷热端的温度分别为 30 K 和 300 K, 一级换热器通过热桥和脉管中段进行热连接。制冷机的结构如图 1 所示。

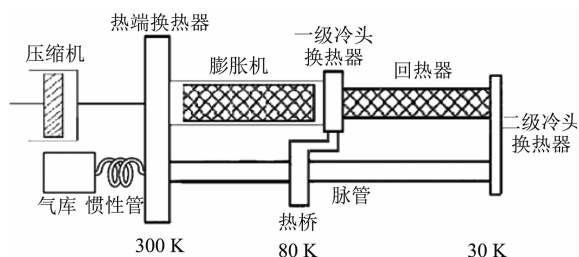


图 1 制冷机结构简图

U 型布置的回热器通过热桥与脉管间进行热连接, 建立一级冷头和脉管中段的热交换。一级冷头的工作温度为 80 K, 脉管的一端为 30 K, 另一端为 300 K。当冷头通过热桥和脉管的不同位置进行热连接时, 热交换的情况并不相同。因此需要运用热力学第一定律来分析不同的热交换条件对脉管的工作状态造成的影响。

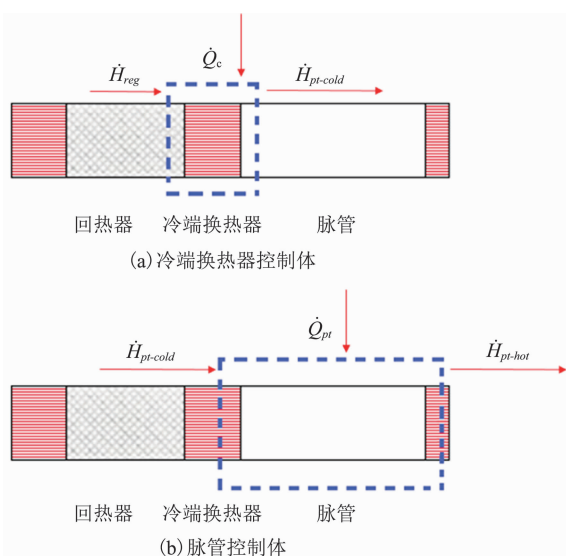


图 2 脉管冷指控制体

图 2(a)为冷端换热器控制体, 由热力学第一定律可得:

$$\Delta H = \dot{H}_{pt-cold} - \dot{H}_{reg} = \dot{Q}_c - \dot{W}_{CHX} \quad (1)$$

式中, $\dot{H}_{pt-cold}$ 为脉管冷端时均焓流, $\dot{H}_{reg}$ 为回热器冷端时均焓流, $\dot{Q}_c$ 为冷端换热量(即制冷量), $\dot{W}_{CHX}$ 为换热器控制体对外做的时均功。由于换热器控制体的对外时均功为零, 则式(1)可表示为

$$\dot{Q}_c = \dot{H}_{pt-cold} - \dot{H}_{reg} \quad (2)$$

脉管制冷机的实际制冷量可简单表达为脉管与回热器冷端的时均焓流之差。类似地, 图 2(b)中脉冲管控制体的热力学第一定律可表达为

$$\dot{H}_{pt-hot} - \dot{H}_{pt-cold} = \dot{Q}_{pt} \quad (3)$$

式中, $\dot{H}_{pt-hot}$ 为脉管热端的时均焓流, $\dot{Q}_{pt}$ 为脉管从外界的吸热量。综合式(2)、式(3), 可进一步将脉管冷指制冷量表达为

$$\dot{Q}_c = \dot{H}_{pt-hot} - \dot{H}_{reg} - \dot{Q}_{pt} \quad (4)$$

因此, 对于 U 型一级斯特林二级脉管混合制冷机, 通过在一级冷指和脉管中段建立热桥连接, 用一级冷量对脉管进行预冷, 使得 $\dot{Q}_{pt}$ 为负值, 可以达到增大 $\dot{Q}_c$ 的目的。

2 整机模型搭建

本研究中利用 Fluent 软件对 U 型一级斯特林二级脉管混合制冷机进行二维轴对称简化整机建模, 其中第一级采用斯特林制冷机, 中间换热器工作在 80 K 温区; 第二级采用 U 型脉管制冷机结构布置, 利用一级提供冷量对脉管进行预冷, 惯性管和气库工作在 300 K。

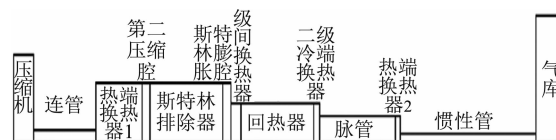


图 3 仿真模型结构

带有功回收装置的脉管制冷机的结构如图 3 所示。

本次研究中利用 Fluent 软件对带有功回收装置的脉管制冷机进行数字化建模。研究中使用 $k-\omega$ 模型, 工质气体采用理想气体状态

方程,其导热率、比热容为温度的函数。

本文采用可压缩 SIMPLEC 程序处理压力与速度的耦合关系。充气压力为 2.4 MPa,工作频率为 40 Hz。

使用动网格对压缩机的压缩腔等体积变化进行仿真,并使用用户自定义函数(User Defined Function, UDF)功能实现压缩机活塞和斯特林排除器的速度为时间的函数。压缩机活塞和斯特林排除器之间存在相位差 θ , 其方程为

$$V_{compressor} = V_{amp} \cdot \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

$$V_{displacer} = V'_{amp} \cdot \sin(2\pi ft + \theta) \quad (6)$$

对于回热器,采用非热平衡多孔介质模型进行仿真,其中阻力系数方程为

$$s_i = - \left\{ \frac{\mu}{a} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right\} \quad (7)$$

3 计算结果与分析

通过 U 型一级斯特林二级脉管混合制冷机整机仿真,对其工作过程进行了细致研究。仿真结果表明,当压缩机的扫气量为 6.36 cc,压缩活塞和功回收活塞保持 73° 相位差,且不采用一级冷量对脉管中段进行预冷时,使二级 $0.7\text{W}@30\text{K}$ 和一级 $7\text{W}@80\text{K}$ 同时进行冷量输出,压缩机输入 PV 功为 133 W。将一级与二级脉管距离冷端 60 mm 处进行热桥连接后,保持输入 PV 功为 133 W,输出冷量变为二级 $1.2\text{W}@30\text{K}$ 和一级 $6\text{W}@80\text{K}$ 同时进行冷量输出。

3.1 制冷机温度分布

当压缩机的扫气量为 6.36 cc,压缩活塞和功回收活塞保持 73° 相位差,且一级与二级脉管距离冷端 60 mm 处进行热桥连接时,制冷机内部温度场的分布如图 4 所示。

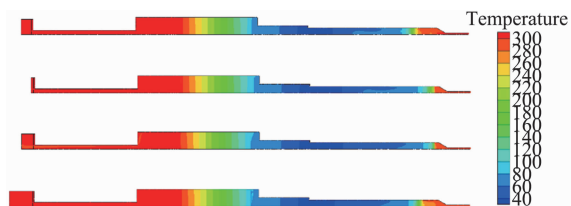


图 4 脉管预冷时脉管内部的温度云图

图 4 展示了脉管制冷机压缩机、换热器、回热器以及脉管内部温度场在一个制冷循环过程中不同时刻的分布状态。脉管冷热端的温度跨度为 30 K 到 300 K。脉管冷端有一部分气团在冷头换热器狭缝和脉管之间不断往复运动,这部分气体不断地和冷头换热器进行热交换;同时这部分气体进入脉管,和脉管内的气体进行热交换。这部分气体的热交换状况与制冷机冷量有紧密的联系。

3.2 脉管内的温度分布

为研究脉管预冷对脉管内气体工质工作情况的影响,对脉管不进行预冷和在 60 mm 处进行预冷两种工况分别进行了分析。

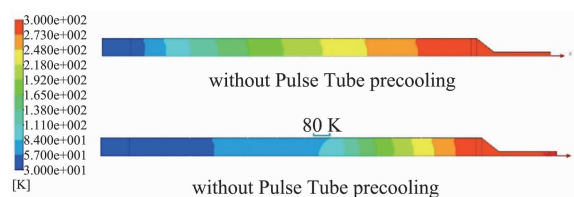


图 5 脉管预冷对脉管内部温度分布的影响

在不对脉管进行预冷和在 60 mm 处进行预冷两种工况条件下,压缩机处于平衡位置时的温度分布如图 5 所示。

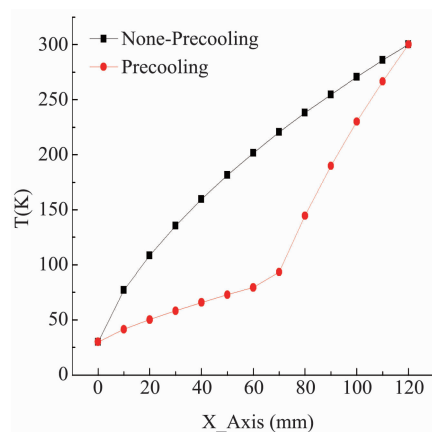


图 6 轴向时均温度分布

CFD 仿真研究发现,脉管预冷极大地改变了脉管内温度分布情况,改善了脉管冷端沿长度方向的温度梯度,从而减少了脉管冷端的焓流损失,提高了二级制冷效率。

3.3 制冷机的性能与预冷的关系

通过用 U 型一级斯特林二级脉管混合制

冷机的一级冷头对脉管进行预冷, 可以提高二级冷头的制冷能力。但这种做法消耗了一级产生的冷量, 因此必须有一个最优预冷位置, 才能高效地同时满足两个不同温区的冷量需求。

将第一级与脉管轴向的不同位置桥接, 对脉管不同位置进行预冷, 保持输入 PV 功为 133 W 不变, 压缩机和斯特林膨胀机的相位保持为 78° 。

将 $rCOP = Q_{c1} \frac{T_h - T_{c1}}{T_{c1}} + Q_{c2} \frac{T_h - T_{c2}}{T_{c2}} / W$ 定

义为总比卡诺效率。其中, Q_{c1} 为一级冷量, Q_{c2} 为二级冷量, T_{c1} 为一级工作温度, T_{c2} 为二级工作温度, T_h 为环境温度。

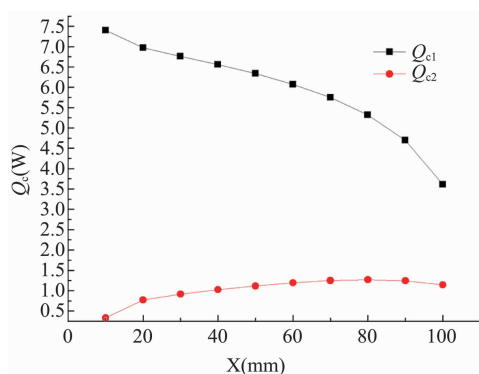


图 7 制冷量与预冷位置的关系

仿真研究发现, 预冷位置的选取对脉管预冷效果的影响很大。U 型一级斯特林二级脉管混合制冷机中脉管的温度跨度为 30 K 到 300 K, 而一级冷头的工作温度为 80 K。因此, 不进行热桥连接时, 在脉管的 30 K 至 80 K 温度段, 若通过热桥将一级冷头与此段脉管进行热连接, 脉管对外进行冷量输出, 反而会进一步降低二级冷指的性能。将一级冷头与脉管的 80 K 至 300 K 温度段进行热桥连接时, 一级冷头会对脉管输出冷量, 通过消耗一级制冷量对脉管进行预冷。

如图 8 所示, 当输入 PV 功为 133 W 且不采用一级冷量对脉管中段进行预冷时, U 型一级斯特林二级脉管混合制冷机以 $0.7 \text{ W}@30 \text{ K}$ 并 $7 \text{ W}@80 \text{ K}$ 同时进行冷量输出, 此时的总比

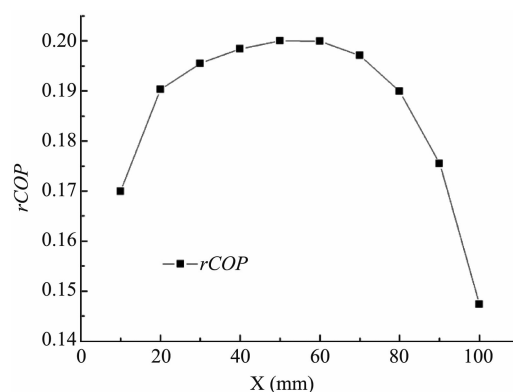


图 8 系统效率与遇冷位置的关系

卡诺效率为 19.22%。将一级冷头与二级脉管在 60 mm 处进行热桥连接后, 保持输入 PV 功为 133 W, 输出冷量变为 $1.2 \text{ W}@30 \text{ K}$ 和 $6 \text{ W}@80 \text{ K}$ 同时进行冷量输出, 此时的总比卡诺效率为 20.46%。

4 结论

开展了 U 型一级斯特林两级脉管混合制冷机第二级冷指整机仿真和脉管 CFD 仿真研究。研究表明, U 型一级斯特林两级脉管混合制冷机具有同时在两个温区输出冷量的能力; 脉管不同位置的预冷能对两级输出冷量产生很大影响。通过合理布置脉管预冷位置可以提高整机的总比卡诺效率。

(1) 深低温脉管结构中, 通过第一级对第二级脉管预冷, 可以在损失一定的一级冷量的情况下大幅提高二级的制冷能力, 同时这种结构具有体积小、机构简单、无运动部件的优点。

(2) 通过改变脉管预冷的位置, 可以对第一级和第二级两个不同温区冷头的冷量输出进行调整, 从而更好地满足空间深低温红外探测器的不同冷量需求。

(3) 多维瞬态数值计算方法可以很好地揭示脉管制冷机运行时内部流体速度、压力、温度的变化。从流体力学的角度揭示了脉管预冷影响脉管制冷机性能的机理, 可为深低温脉管制冷机的优化设计提供帮助。

此研究结果将有助于 U 型一级斯特林两级脉管混合制冷机结构的设计优化。

参考文献

- [1] 刘思学,陈六彪,郭嘉,等. 12 K 预冷型高频脉冲管制冷机 [J]. 低温与超导, 2015, **43**(12): 6-9.
- [2] Jiho P, Junseok K, Jeongmin C, et al. Stirling-type Pulse Tube Refrigerator (PTR) with Cold Com-

pression: Cold Compressor, Colder Expander [J]. *Cryogenics*, 2016, **74**: 66-72.

- [3] 蒋燕阳,蒋珍华,朱海峰,等. 两级同轴型脉管制冷机回热器与脉管壁换热影响的模拟与实验 [J]. 低温工程, 2017, **28**(3): 43-48.

(上接第 7 页)

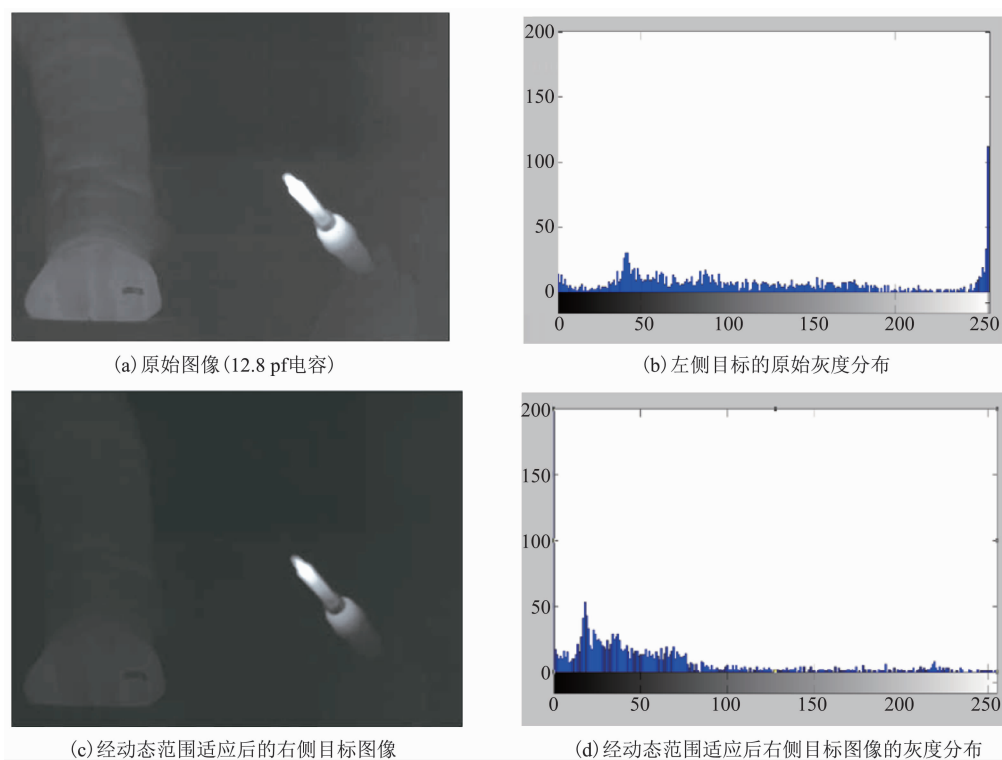


图 11 右侧目标的动态范围适应过程

- Scene-based Techniques [C]. *SPIE*. 1990, **1308**: 224-233.
- [6] Tomasi C. Bilateral Filtering for Gray and Color Image [C]. Bombay: 6th International Conference on Computer Vision, 1998.
- [7] 施立原. 面列阵焦平面探测器的多点定标非均

匀性校正算法及其实现 [J]. 红外, 2002, **23** (8): 24-29.

- [8] 李朝. 非制冷红外探测器的低噪声成像电路研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2015.