

文章编号: 1672-8785(2014)08-0027-05

空间光学相机结构中的机械结合面模型分析

赵海平 何 欣 田富湘

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘 要: 机械结合面是影响结构动力学特性的重要因素, 但在空间相机结构设计和分析中却很少应用。着重研究了两种螺栓结合面模型的动力学特性。首先, 基于弹簧-阻尼单元模型和虚拟材料模型理论, 建立了试验件的两种模型, 并确定模型的参数。弹簧-阻尼单元参数采用理论和实验结合的方法确定, 虚拟材料模型的参数根据模型理论公式确定。然后, 通过有限元计算, 对比分析了两种模型在有限元情况下的试验件模态。最后比较了两种模型动力学特性的优缺点。结果表明, 弹簧-阻尼单元模型的振动与实际模态情况较吻合, 虚拟材料模型的低阶固有频率值与实际模态情况较吻合。结果为结合面动力学模型在空间相机结构分析中的应用提供了依据。

关键词: 空间相机结构; 机械结合面; 弹簧-阻尼单元模型; 虚拟材料模型

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.08.006

Analysis of Mechanical Joint Model of Space Camera Structure

ZHAO Hai-ping, HE Xin, TIAN Fu-xiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Although the mechanical joint face plays an important role in the field of structural dynamics, few applications of it are found in the design and analysis of space camera structures. The dynamics of two kinds of bolt joint face models are studied mainly. First, two kinds of sample models are established and their parameters are determined according to the spring-damp joint model and the virtual material model theory. The parameters of the spring-damp joint model are determined by combining theory with practice while the parameters of the virtual material model are determined according to the model theoretical formulas. Then, the sample modality of two kinds of models under the finite element condition is compared and analyzed through finite element calculation. Finally, the advantages and disadvantages of two kinds of model dynamics are compared. The result shows that for the spring-damp joint model, the vibration mode fits well with the actual mode while for the virtual material model, the low order natural frequency value fits well with the actual modality. It provides the basis for the application of joint face dynamics models in the analysis of space camera structures.

Key words: space camera structure; mechanical joint; spring-damp model; virtual material model

收稿日期: 2014-06-19

基金项目: 中国科学院第三期创新工程资助项目 (074Z3JN70)

作者简介: 赵海平 (1985-), 男, 山西朔州人, 硕士, 主要研究方向为空间光学相机结构设计分析。

E-mail: zhaohp2065@163.com

0 引言

空间光学相机的结构系统主要用于实现光学系统及其它系统各零部件的支撑和固定。相机结构需要足够的强度和刚度,以实现与卫星的机械接口,满足卫星总体对相机结构系统的力学要求。

结构静、动力学特性是衡量相机结构力学性能的主要指标。目前,针对空间相机结构的特殊工作环境,在设计和加工过程中,人们一般通过多次热真空循环试验去除结构局部应力,以保证设计的强度要求。在装调过程中,则通过模拟相机在轨工作的微重力状态克服静态变形的影响^[1]。因此,空间相机结构的设计和分析主要针对相机结构的动力学特性展开。

影响机械系统动力学的因素包括结构材料、机械拓扑结构以及部件间的连接特性。在结构材料方面,比刚度高的钛合金、碳纤维复合材料在国内外相机设计中已获得成熟应用。为了满足卫星总体对相机载荷质量、尺寸及力学特性的要求,相机结构的设计工作主要针对各个部件的拓扑结构和尺寸参数进行。在设计和优化中,使用大型有限元软件(如 MSC Patran 专业分析软件)对多种结构设计方案进行分析对比。

然而,结构动力学特性不仅受拓扑结构和尺寸参数的制约,还受部件间连接特性的影响。在机械学中,由部件间的连接部位及连接件组成的连接称为结合面。结合面在力学上表现出一定的刚度特性和阻尼特性。对静、动刚度要求高的大型机械结构如机床设备,其主要部件的结合面柔度占结构总柔度的 50% 以上。自上世纪 60 年代开始,国内外学者针对机械结合面的静、动特性展开了深入的理论和应用研究。结合面的静态特性受结合面面压、材料、加工方法、结合表面粗糙度和结合面上的静载荷等因素的影响。结合面的静刚度与结合面的面压成近似指数关系^[2]。在实际应用中,结合面的静态特性可用有限个非线性弹簧来代替^[3]。影响结合面动态特性的因素还包括结合面的动载荷和振动频率等^[4]。在工程应用中,反映结合面动态特性的适用模型有弹簧-阻尼单元模型和虚拟材料模型两种理论模型^[5]。

目前,在空间光学相机的结构设计中,人们很少考虑结合面对结构动力学特性的影响。在有限元分析中,部件间的装配关系一般采用对应位置单元节点 6 自由度固结的方式,有限元结构分析结果与实际结构的动态特性偏差很大。

本文针对空间相机主体结构中常用的螺栓连接结合面,首先建立表征螺栓连接面的结构模型,并推导两种机械结合面的动力学模型公式;然后分析确定模型中的未知参数,分别对上述模型进行动力学分析;最后,对比分析结果,提出更有效的相机结构分析方法。

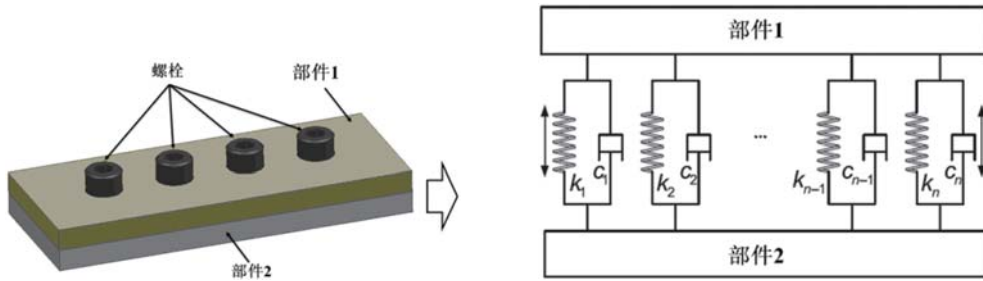
1 物理模型

根据机械动力学,结合面分为固定结合面、半固定结合面及运动结合面三类^[6]。固定结合面包括螺栓连接和铆钉连接等;半运动结合面包括摩擦离合器连接;运动结合面包括导轨连接和齿轮啮合连接等。在空间光学相机结构系统中,螺栓连接是相机结构部件间的主要结合面形式。因此,本文专门针对螺栓结合面的两种理论模型进行分析。

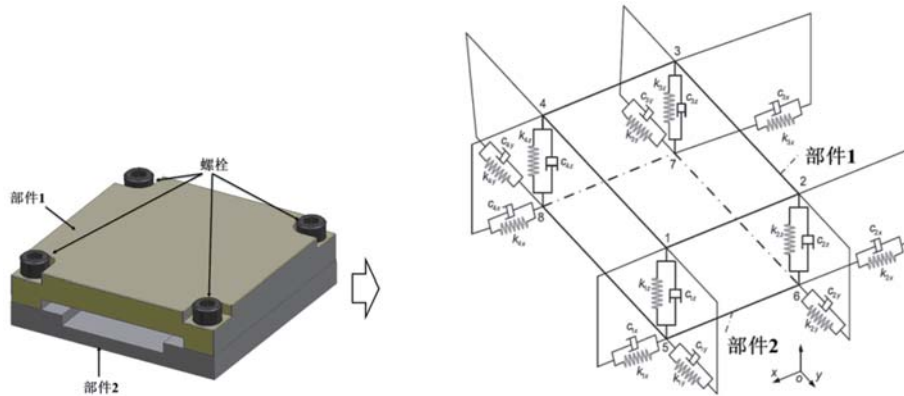
1.1 弹簧-阻尼单元模型

在预紧力作用下,螺栓结合面在动力学上表现出一定的刚度特性和阻尼特性。因此基于结合面动力学的研究结果,螺栓结合面可以等效为螺栓连接处连接两部件的一组弹簧-阻尼单元,如图 1 所示。

图 1(b) 有 4 组 X 向弹簧-阻尼单元,其模型参数分别为 k_{1x} 、 k_{2x} 、 k_{3x} 、 k_{4x} 、 c_{1x} 、 c_{2x} 、 c_{3x} 、 c_{4x} ; 4 组 Y 向弹簧-阻尼单元的模型参数分别为 k_{1y} 、 k_{2y} 、 k_{3y} 、 k_{4y} 、 c_{1y} 、 c_{2y} 、 c_{3y} 、 c_{4y} ; 4 组 Z 向弹簧-阻尼单元的模型参数分别为 k_{1z} 、 k_{2z} 、 k_{3z} 、 k_{4z} 、 c_{1z} 、 c_{2z} 、 c_{3z} 、 c_{4z} 。建立弹簧-阻尼单元模型的关键是识别上述各刚度值和阻尼值。识别的方法有理论法、试验法及理论和实验相结合法。为了有效反映结构的低阶模态,本文采用理论与试验相结合的方法识别上述刚度和阻尼参数。首先通过模态测试实验获得试验件的真实低阶模态 ζ ,然后使用有限元方法分析不同刚度值和阻尼值下理论模型的低阶模态,确定准确的模型参数值。



(a) 单自由度弹簧-阻尼单元



(b) 三自由度弹簧-阻尼单元

图 1 弹簧-阻尼单元模型的示意图

弹簧-阻尼单元模型可表示为

$$\zeta = f(\vec{M}, \vec{K}, \vec{C}, \vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4, \vec{c}_1, \vec{c}_2, \vec{c}_3, \vec{c}_4) \quad (1)$$

式中, ζ 为模型的低阶固有频率, $\vec{M}$ 为部件的质量矩阵, $\vec{K}$ 为部件的刚度矩阵, $\vec{C}$ 为部件的阻尼矩阵, k_{1x} 、 k_{2x} 、 k_{3x} 、 k_{4x} 为 4 个螺栓位置处的刚度矩阵, c_{1x} 、 c_{2x} 、 c_{3x} 、 c_{4x} 分别为 4 个螺栓位置处的阻尼矩阵。

1.2 虚拟材料模型

对于螺栓结合面来说, 弹簧-阻尼单元模型方法有以下缺点: (1) 模型参数不能用于其他型号螺栓以及不同预紧力和不同加工面的情况, 通用性差; (2) 没有考虑螺栓之间的耦合关系。

结合面中的虚拟材料模型将螺栓结合面等效为一层虚拟材料, 因此可将影响结合面动态特性的参数转化为虚拟材料的弹性模量、密度及泊松比等材料参数。

虚拟材料模型的参数的计算公式为 [6]

$$E(A_r > A_{rc}) = \frac{2D\psi^{1-0.5D}}{3\pi^2} E' G^{D-1} a_L^{0.5D} (a_c^{-0.5} - a_L^{-0.5}) \quad (2)$$

$$\mu = \frac{(1 + \mu')E^*}{G_x^*} - 1 \quad (3)$$

$$\rho = \frac{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2}{d} = \frac{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2}{d_1 + d_2} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \mu^2}{E_1} + \frac{1 - \mu^2}{E_2}, \quad a_L = \frac{2 - D}{D} \psi^{0.5D-1} A$$

$$a_c = \frac{G^2}{0.5K\phi^{\frac{2}{D-1}}}, \quad \mu' = \frac{E'}{2G'} - 1$$

$$E^* = \frac{E}{E'}, \quad G' = \frac{2 - \mu_1}{G_1} + \frac{2 - \mu_2}{G_2}$$

式中, D 为分形维数; ψ 为由分形维数决定的参数; E' 为当量弹性模量; G 为分形粗糙度参数; a_L 为微凸体的最大接触面积; a_c 为微凸体的临界接触面积; μ' 为当量泊松比; E^* 为无量纲的虚拟材料弹性模量; G_x^* 为无量纲的虚拟材料的剪切模量; ρ_1 和 ρ_2 是结合面表面两材料的密度; d_1 和 d_2 为两配合表面的实体厚度。

2 模型参数识别及有限元分析

2.1 弹簧-阻尼单元模型分析

对试验件进行模态测试，测试试验件的低阶模态见表 1。

模型试验件的 CAD 模型及有限元模型如图 2 所示。

表 1 试验件的前三阶固有频率

	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
低阶固有频率值 (Hz)	2987.8	3440.5	3629.0

为了简化模型计算，作如下假设：(1) 假设 Y 向和 Z 向的切向刚度值相同；(2) 阻尼主要影

响机械结构的振幅，因此假设各向阻尼值为恒值。试验件弹簧-阻尼单元模型的第 1 阶固有频率与模型参数的关系见表 2。

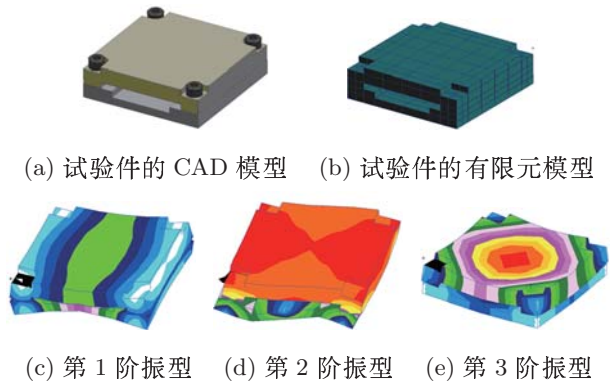


图 2 试验件弹簧-阻尼单元模型的有限元建模及分析

表 2 模型在不同弹簧刚度参数下的第一阶固有模态

		Y 向和 Z 向刚度 k_{1y}/k_{1z}				
		$5 \times 10^9 \text{ kN/m}$	$1 \times 10^{10} \text{ kN/m}$	$5 \times 10^{10} \text{ kN/m}$	$1 \times 10^{11} \text{ kN/m}$	$5 \times 10^{11} \text{ kN/m}$
X 向 刚度 k_x	$5 \times 10^9 \text{ kN/m}$	827.6Hz	955.2Hz	967.3Hz	1097.7Hz	1394.1Hz
	$1 \times 10^{10} \text{ kN/m}$	2301.0Hz	2369.4Hz	2406.8Hz	2678.4Hz	2876.5Hz
	$5 \times 10^{10} \text{ kN/m}$	2733.8Hz	2866.8Hz	2875.9Hz	2897.0Hz	2955.0Hz
	$1 \times 10^{11} \text{ kN/m}$	2959.5Hz	3027.1Hz	3248.5Hz	3299.1Hz	3387.4Hz
	$5 \times 10^{11} \text{ kN/m}$	3397.6Hz	3489.4Hz	3457.4Hz	3558.4Hz	3851.6Hz

由以上分析可知，弹簧-阻尼单元模型中，随着各向刚度值的增加，模型的低阶固有频率增加；符合试验件第 1 阶频率的模型参数有多个解。由图 2 可知，弹簧-阻尼单元模型的振型与试验件的模态测试实验振型吻合。

2.2 虚拟材料模型的有限元分析

根据虚拟材料的参数公式，模型的参数计算见表 3。

表 3 虚拟材料的参数

螺栓预紧力矩 $T(\text{N} \cdot \text{m})$	$E(\text{GPa})$	μ	$\rho(\text{kg/m}^3)$
12	0.481	0.24	7298

建立的虚拟材料有限模型如图 3 所示，模型模态计算结果见图 3 及表 4。

由以上分析可知，虚拟材料的模型特点决定了参数结果有唯一解，且模型前 3 阶固有频率与试验件的固有频率结果吻合。

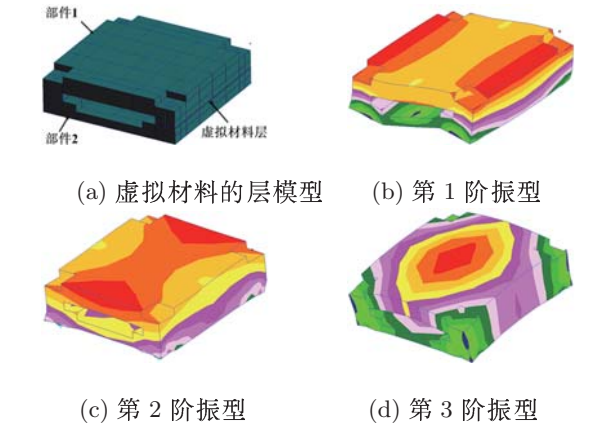


图 3 试验件虚拟材料层的有限元模型分析

表 4 试验件虚拟材料模型前 3 阶固有频率

	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
固有频率值 (Hz)	2797.4	3578.0	3481.9
模型与模态试验频率误差	6.8%	4.0%	4.2%

3 总结

对空间相机结构中常见的螺栓结合面进行了理论和有限元分析。与试验件的结果相比, 弹簧-阻尼单元模型参数的解不唯一, 但模型的低阶振型与试验件的实际振型较吻合。虚拟材料模型参数的解在螺栓预紧力一定的情况下唯一, 固有频率值与试验件的实际结果较吻合, 但振型存在较大偏差。在实际分析中, 可分别设计两种模型, 并对其进行有限元分析。通过弹簧-阻尼单元选择优化多种设计方案中的振型选择, 并通过虚拟材料模型选择多种设计方案的低阶固有频率范围。

参考文献

- [1] 陈世平, 杨秉新, 王怀义, 等. 空间相机设计与试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [2] Dolbey M P, Bell R. The Contact Stiffness of Joints at Low Apparent Interface Pressure [C]. In: *Annals of CIRP*, 1970.
- [3] 张学良. 机械结合面动态特性及应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- [4] 苏铁熊, 杨世文, 崔志琴, 等. 复杂结构结合部动力学仿真模型研究 [J]. *华北工学院学报*, 2001, **22**(3): 218-222.
- [5] 王世军, 黄玉美. 机床整机特性的有限元分析方法 [J]. *机床与液压*, 2005(3): 20-22.
- [6] Hong L, Tian B L, Liu H Q, et al. A New Method of Virtual Material Hypothesis-based Dynamic Modeling on Fixed Joint Interface in Machine Tools [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011 (51): 239-249.
- [7] Morin F J. Oxides Which Show a Metal-to-insulator Transition at the Neel Temperature [J]. *Physical Review Letters*, 1959, **3**(1), 34-36.
- [8] Zylbersztejn A, Mott N F. Metal-insulator Transition in Vanadium Dioxide [J]. *Physical Review B*, 1974, **11**(11): 4383-4395.
- [9] Chen C H, Yi X J, Zhang J, et al. Micromachined Uncooled IR Bolometer Linear Array Using VO₂ Thin Films [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **22**(1), 53-58.
- [10] Soltani M, Chaker M, Haddad E, et al. 1×2 Optical Switch Devices Based on Semiconductor-to-metallic Phase Transition Characteristics of VO₂ Smart Coatings [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(5): 1052-1056.
- [11] Chen S H, Ma H, Yi X J. Smart VO₂ Thin Film for Protection of Sensitive Infrared Detectors from Strong Laser Radiation [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, **115**: 28-31.
- [12] Kazuhiro K, Pung K S, Hidehumi O. Study on Thermochromic VO₂ Films Grown on ZnO-Coated Glass Substrates for "Smart Windows" [J]. *The Japan Society of Applied Physics*, 2003, **42**(10): 6523-6531.
- [13] Babulanam S M, Eriksson T S, Niklasson G A, et al. Thermochromic VO₂ Films for Energy-efficient Windows [J]. *Solar Energy Materials*, 1987, **16**(5): 347-363.
- [14] Jin P, Nakao S, Tanemura S. Tungsten Doping into Vanadium Dioxide Thermochromic Films by High-energy Ion Implantation and Thermal Annealing [J]. *Thin Solid Films*, 1998, **324**: 151-158.
- [15] Balu R, Ashrit P V. Near-zero IR transmission in the Metal-insulator Transition of VO₂ Thin Films [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**: 021904.
- [16] 王利霞, 李建平, 何秀丽. 二氧化钒薄膜的低温制备及其性能研究 [J]. *中国材料进展*, 2006, **55**(6): 2846-2851.
- [17] Shi J Q, Zhou S X, You B, et al. Preparation and Thermochromic Property of Tungsten-doped Vanadium Dioxide Particles [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, **91**(19): 1856-1862.
- [18] Pan M, Zhong H M, Wang S W, et al. First-principle Study on the Chromium Doping Effect on the Crystal Structure of Metallic VO₂ [J]. *Chemical Physics Letters*, 2004, **398**(4-6), 304-307.
- [19] Sobhan M A. Thermochromism of Sputter Deposited W_xV_{1-x}O₂ Films [J]. *Solar Energy Material and Solar Cells*, 1996, **44**: 451-455.
- [20] Pan M, Liu J, Zhong H M, et al. Raman Study of the Phase Transition in VO₂ Thin Films [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, **268**: 178-183.
- [21] Pan M, Zhong H M, Wang S W, et al. Properties of VO₂ Thin Film Prepared with Precursor VO(acac)₂ [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, **265**: 121-126.
- [22] 潘梅, 钟红梅, 王少伟, 等. 氧含量对 VO_{2-x} 晶格特性和结构相变影响的研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(2): 93-96.
- [23] 刘星星. 常温磁控溅射制备二氧化钒薄膜研究 [J]. *红外*, 2014, **35**(7): 24-28.

(上接第 26 页)

参考文献

- [1] Morin F J. Oxides Which Show a Metal-to-insulator Transition at the Neel Temperature [J]. *Physical Review Letters*, 1959, **3**(1), 34-36.
- [2] Zylbersztejn A, Mott N F. Metal-insulator Transition in Vanadium Dioxide [J]. *Physical Review B*, 1974, **11**(11): 4383-4395.
- [3] Chen C H, Yi X J, Zhang J, et al. Micromachined Uncooled IR Bolometer Linear Array Using VO₂ Thin Films [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **22**(1), 53-58.
- [4] Soltani M, Chaker M, Haddad E, et al. 1×2 Optical Switch Devices Based on Semiconductor-to-metallic Phase Transition Characteristics of VO₂ Smart Coatings [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(5): 1052-1056.
- [5] Chen S H, Ma H, Yi X J. Smart VO₂ Thin Film for Protection of Sensitive Infrared Detectors from Strong Laser Radiation [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, **115**: 28-31.
- [6] Kazuhiro K, Pung K S, Hidehumi O. Study on Thermochromic VO₂ Films Grown on ZnO-Coated Glass Substrates for "Smart Windows" [J]. *The Japan Society of Applied Physics*, 2003, **42**(10): 6523-6531.
- [7] Babulanam S M, Eriksson T S, Niklasson G A, et al. Thermochromic VO₂ Films for Energy-efficient Windows [J]. *Solar Energy Materials*, 1987, **16**(5): 347-363.
- [8] Jin P, Nakao S, Tanemura S. Tungsten Doping into Vanadium Dioxide Thermochromic Films by High-energy Ion Implantation and Thermal Annealing [J]. *Thin Solid Films*, 1998, **324**: 151-158.
- [9] Balu R, Ashrit P V. Near-zero IR transmission in the Metal-insulator Transition of VO₂ Thin Films [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**: 021904.
- [10] 王利霞, 李建平, 何秀丽. 二氧化钒薄膜的低温制备及其性能研究 [J]. *中国材料进展*, 2006, **55**(6): 2846-2851.
- [11] Shi J Q, Zhou S X, You B, et al. Preparation and Thermochromic Property of Tungsten-doped Vanadium Dioxide Particles [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, **91**(19): 1856-1862.
- [12] Pan M, Zhong H M, Wang S W, et al. First-principle Study on the Chromium Doping Effect on the Crystal Structure of Metallic VO₂ [J]. *Chemical Physics Letters*, 2004, **398**(4-6), 304-307.
- [13] Sobhan M A. Thermochromism of Sputter Deposited W_xV_{1-x}O₂ Films [J]. *Solar Energy Material and Solar Cells*, 1996, **44**: 451-455.
- [14] Pan M, Liu J, Zhong H M, et al. Raman Study of the Phase Transition in VO₂ Thin Films [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, **268**: 178-183.
- [15] Pan M, Zhong H M, Wang S W, et al. Properties of VO₂ Thin Film Prepared with Precursor VO(acac)₂ [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, **265**: 121-126.
- [16] 潘梅, 钟红梅, 王少伟, 等. 氧含量对 VO_{2-x} 晶格特性和结构相变影响的研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(2): 93-96.
- [17] 刘星星. 常温磁控溅射制备二氧化钒薄膜研究 [J]. *红外*, 2014, **35**(7): 24-28.