

文章编号 1004-924X(2009)03-0603-06

# 大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化

张 雷<sup>1</sup>, 贾学志<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了提高空间相机主支撑结构的刚度, 减轻结构质量, 根据大型离轴三反空间相机的特点, 研究了其主支撑结构的形式。应用 Rayleigh 法推导了桁架式主支撑结构的基频计算公式, 分析了桁架杆间夹角对其基频的影响, 并以此为基础研究了其优化方法和优化过程。优化设计了某预研空间相机的桁架式主支撑结构并对其结构特性进行了分析。分析结果表明, 设计的主支撑机构的质量减轻了 22 kg, 基频可达 146 Hz, 表明本研究对大型离轴三反空间相机主支撑结构的设计具有参考价值。该研究结果已成功应用于某预研相机的样机研制中。

**关键词:** 空间相机; 桁架式主支撑结构; 刚度分析; 优化设计

**中图分类号:** V475.2 **文献标识码:** A

## Design and optimization of trussed supporting structure for off-axis three-mirror reflective space camera

ZHANG Lei<sup>1</sup>, JIA Xue-zhi<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** An optical supporting structure is studied to improve its structure stiffness and reduce the structure mass to meet the requirement of space camera. A formula to calculate fundamental frequency is proposed using Rayleigh method, and the influences of the angles between trusses on fundamental frequency are analyzed. Then, the optimization method and process are studied. Based on the analysis above, an optical supporting structure with high stiffness for a pre-research space camera is designed. The analysis results indicate that the mass of designed optical supporting structure has been reduced by 22 kg and its fundamental frequency is 146 Hz, which shows that above analysis has a certain instructional significance for the design of optical supporting structures in high-resolution off-axis three-mirror reflective space cameras.

**Key words:** space camera; trussed supporting structure; stiffness analysis; optimization design

## 1 引言

大型离轴三反光学系统的长焦距、大视场和结构非对称性等特点,给研制过程中的结构设计、系统装调等工作带来了相当大的困难。因此,设计高比刚度的主支撑结构,满足光学系统的成像要求,是此类相机研制过程中的关键技术之一。国内文献对离轴三反空间相机的研究主要集中在光学系统方面,针对主支撑结构的研究尚不多见。本文对高分辨离轴三反空间相机主支撑结构进行了研究,提出了适于此类相机的主支撑结构形式,并基于 Rayleigh 法研究了影响桁架式主支撑结构基频的因素<sup>[1-5]</sup>。根据以上研究,设计了某预研空间相机的主支撑结构,该结构具有比刚度高、质量小、整体结构紧凑等优点。

## 2 大型离轴三反空间相机主支撑结构的设计

目前,空间相机可采用的主支撑结构有薄壁式及桁架式两种。大型离轴三反空间相机的焦距较长、体积较大,整体桁架式结构应作为其主支撑结构的首选<sup>[4-5]</sup>。国外的大中型空间光学相机也常采用桁架式结构,如哈勃望远镜和 SPOT 相机。根据光学系统的特点,此类相机的主支撑结构主要由前框架、桁架和后框架组成,如图 1 所示。前后框架是各反射镜组件的安装基准,还将作为调焦结构和星上其它精密设备的安装平台。

为满足以上承载要求,前框架和后框架必须具有特别优良的力学特性,并提供精密的机械接口,而桁架作为前、后框架的联接部件,在主支撑结构中有着极其重要的作用。前后框架采用高强度的加强筋与薄壁组合的框架式结构,可以很好地满足系统要求,在设计上难度并不是很大,因此,高比刚度、稳定的桁架结构是主支撑研究工作中的重点。根据光学系统结构的特点,合理设计主支撑结构,可以把桁架各杆件受到的弯曲载荷很好地转化为拉压载荷,满足光学系统成像对主支撑结构的刚度、稳定性等要求。

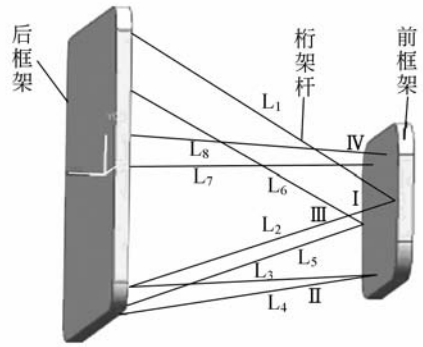


图 1 离轴三反空间相机主支撑结构

Fig. 1 Supporting structure for high-resolution off-axis three-mirror reflective space camera

## 3 桁架式主支撑结构的基频分析

### 3.1 Rayleigh 法基本原理

Rayleigh 法是由 Rayleigh 基于动能和势能的分析给出的确定系统基频的近似方法,适用于求第一自振频率<sup>[6-7]</sup>。瑞利法求结构基频的依据是能量守恒原理,即一个无阻尼的弹性体系自由振动时,它在任意时刻的总能量保持不变,即机械能 = 应变能 ( $U$ ) + 动能 ( $T$ ) = 常数,所以应变能 ( $U$ ) 和动能 ( $T$ ) 的最大值相等,即  $T_{\max} = U_{\max}$ 。假设振动的位移为  $\phi(x, y, z, t)$  (其中  $t$  为时间,  $x, y$  和  $z$  为空间坐标),用挠度函数  $\Phi(x, y, z)$  表征振型,令:

$$\phi = \Phi \sin \omega t, \quad (1)$$

则系统的动能  $T$  和应变能  $U$  可分别表示为:

$$U = \bar{U}(\Phi) \sin^2 \omega t, \quad (2)$$

$$T = \omega^2 \bar{T}(\Phi) \cos^2 \omega t, \quad (3)$$

于是:

$$\omega^2 = \bar{U}(\Phi) / \bar{T}(\Phi), \quad (4)$$

式中:  $\omega$  为圆频率,  $\bar{U}(\Phi)$  和  $\bar{T}(\Phi)$  均为  $\Phi$  的函数。

正确使用 Rayleigh 法的关键是选择与振型较接近的假设振型函数,所选择的位移函数与主振型越相符,求得的一阶的值就越精确。Rayleigh 已证明:把任意假设振型函数代入上式求得值等于或大于系统基本固有模态的实际的圆频率。在实际的工程任务中,通过简化分析,可以得到基频的估计值,尽快找到提高结构基频的方法。假设振型函数应满足边界条件,通常选择结构在

自重作用下的弹性曲线作为假设挠度函数,则应变能可用重力所做的功来代替。

### 3.2 桁架式主支撑结构在重力作用下的变形求解

图 1 中的桁架结构可以描述为由 3 个三角形 I、II、III 和一个梯形 IV 组成的空间结构,包括杆件  $L_1 \sim L_8$ ,用后框架固定描述与卫星安装的边界条件。通过对主支撑结构的初步分析,发现主支撑结构的动态刚度条件比结构强度条件难满足;而在动态刚度中,在 X、Y 向的刚度又最难满足,这主要是由于结构沿 Z 轴较长造成的。并且,在前几阶振型中,前后框架的自身弯曲、扭转等变形相对各桁架杆的变形都很小,基本可以忽略。因此,在分析中应首先求解主支撑结构在 X 和 Y 向重力作用下的变形,并以此变形为假设振型函数。

桁架式支撑结构中桁架杆之间的空间拓扑关系和在分析过程中所采用的坐标系如图 2 所示,在变形分析中主要有以下简化假设:

- (a)前后框架为刚体;
- (b)各桁架杆的截面尺寸相等,材料相同且为各向同性;
- (c)桁架结构主要承受拉压作用,简化为二力杆;
- (d)三角形 II 和梯形 IV 与 XOZ 面基本平行,在理论分析时忽略其与 XOZ 面的夹角;
- (e)忽略各杆质量,把前框架及其载荷作为集中质量  $m$  考虑。

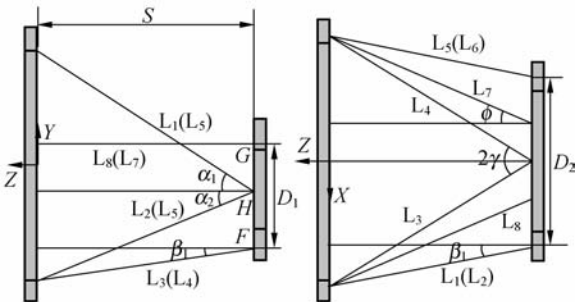


图 2 桁架杆的拓扑关系示意图

Fig.2 Topological relations of the trusses

在以上假设条件下,主支撑结构在 X 和 Y 向重力作用下的变形求解可简化为求解其在 X 和 Y 向集中力  $mg$  作用下的变形,而此类结构在集中力作用下的变形主要为剪切变形。由空间二

杆结构理论分别推导出前框架在 X 和 Y 向重力作用下的变形  $\delta_x$  和  $\delta_y$  的计算公式如下:

$$\delta_x = \frac{mgS}{2EA} \left( \frac{1}{\sin^2 r \cos r + \sin^2 \varphi \cos \varphi} \right), \quad (5)$$

$$\delta_y = \frac{mgS}{2EA \cos \beta_1} \left( \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} \right), \quad (6)$$

式中:  $S$  为前后框架的间距;  $E$  为杆件材料的弹性模量;  $A$  为杆件的截面积;  $\gamma$  为  $L_3$  与  $L_4$  的夹角的一半;  $\varphi$  为  $L_7$ 、 $L_8$  与 Z 轴夹角;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为在三角形 I 内,  $L_1$  和  $L_2$  分别与其顶点  $H$  到另一边的垂线的夹角;  $\beta_1$  为三角形 I 和 III 与 YOZ 面的夹角。

### 3.3 桁架式主支撑结构的基频计算与分析

在 x 轴与 y 轴方向重力作用下,结构的应变能  $U_x$  和  $U_y$  分别为:

$$U_x = mg\delta_x = \frac{m^2 g^2 S}{2EA} \left( \frac{1}{\sin^2 r \cos r + \sin^2 \varphi \cos \varphi} \right), \quad (7)$$

$$U_y = mg\delta_y = \frac{m^2 g^2 S}{2EA \cos \beta_1} \left( \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} \right). \quad (8)$$

在 x 轴与 y 轴方向重力作用过程中,结构的动能最大值  $T_x$  和  $T_y$  分别为:

$$T_x = \frac{1}{2} \omega_x^2 m \delta_x^2, \quad (9)$$

$$T_y = \frac{1}{2} \omega_y^2 m \delta_y^2. \quad (10)$$

根据 Rayleigh 法基本原理:

$$U_x = T_x, \quad (11)$$

$$U_y = T_y, \quad (12)$$

解式(11)和(12)组成的方程组,得到桁架式主支撑结构在向 X 和 Y 向基频的表达式分别为:

$$\omega_x = k_{ax} \sqrt{\sin^2 r \cos r + \sin^2 \varphi \cos \varphi}, \quad (13)$$

$$\omega_y = k_{ay} \sqrt{\frac{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)}}, \quad (14)$$

式中:  $k_{ax} = \sqrt{2EA/mS}/2\pi$ ,  $k_{ay} = \sqrt{2EA \cos \beta_1/mS}/2\pi$ , 依据式(13)和(14),绘制  $\omega_x/k_{ax}$  随  $r$  和  $\varphi$  变化曲线如图 3 所示,  $\omega_y/k_{ay}$  随  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的变化曲线如图 4 所示。由图 3 和图 4 可知:在满足相机质量和外形尺寸等要求条件下,在杆间夹角较小时,增大  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,可提高结构在 Y 向的基频;增大  $\varphi$  和  $r$ ,可提高结构在 X 向的基频。

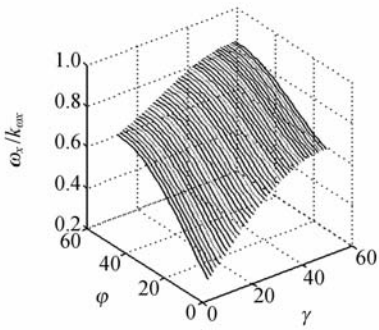


图 3  $\omega_x/k_{ax}$  随  $r$  和  $\varphi$  的变化曲线  
Fig. 3 Curve of  $\omega_x/k_{ax}$  vs  $r$  and  $\varphi$

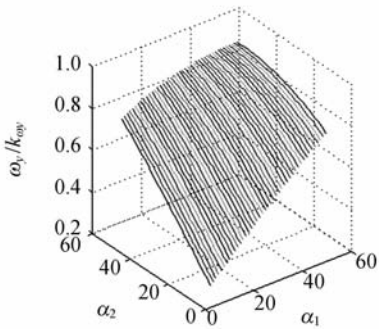


图 4  $\omega_y/k_{ay}$  随  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的变化曲线  
Fig. 4 Curve of  $\omega_y/k_{ay}$  vs  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$

## 4 桁架式主支撑结构的优化

本文对桁架式主支撑结构的拓扑优化是以最大基频为目标,以桁架杆之间的夹角为设计变量,以质量和尺寸满足任务要求为约束条件进行的,主要采用理论推导与 MATLAB 数值计算相结合的研究方法。由式(13)和图 3 可知,在  $0^\circ \leq r \leq 50^\circ, 0^\circ \leq \varphi \leq 50^\circ$  时,  $\omega_x$  随  $r$  和  $\varphi$  的增大而增大,即:

$$\omega_x \rightarrow \max \cong \begin{cases} S \rightarrow \min \\ r \rightarrow \max \\ \varphi \rightarrow \max \end{cases} \quad (15)$$

因此,提高  $r$  和  $\varphi$ ,减小  $S$  就可以提高  $\omega_x$ 。由图 2 可知:增大  $h_2$  ( $h_2$  为  $L_1$  与  $L_2$  后端点在  $x$  轴方向的距离)或减小  $S$  都可以增大  $r$ ,而  $\varphi$  的选取还要考虑避免遮光。

由图 2 可知:

$$\alpha_2 = \arctan \left( \frac{h_1}{S} - \tan \alpha_1 \right), \quad (16)$$

式中:  $h_1$  为  $L_1$  与  $L_2$  后端点在  $y$  轴方向的距离。把式(16)代入(14)中得:

$$\omega_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2EA \cos \beta_1 \sin^2 \left[ \alpha_1 + \arctan \left( \frac{h_1}{S} - \tan \alpha_1 \right) \right]}{mS \left\{ \cos \alpha_1 + \cos \left[ \arctan \left( \frac{h_1}{S} - \tan \alpha_1 \right) \right] \right\}}} \quad (17)$$

由式 17 和图 4 可知:减小  $\beta_1$  可以提高  $\omega_y$ ,在  $h_1/S$  确定的情况下,  $\omega_y$  为  $\alpha_1$  的函数。图 5 为在不同  $h_1/S$  时,  $\omega_y/k_{ay}$  随  $\alpha_1$  的变化曲线。

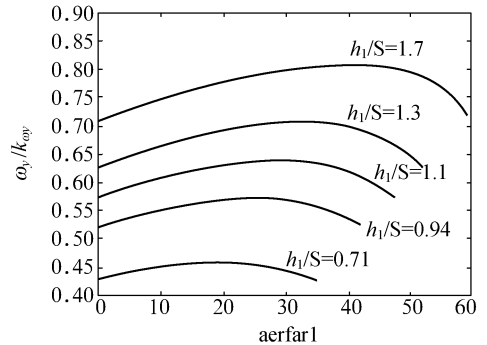


图 5 不同  $h_1/S$  时,  $\omega_y/k_{ay}$  随  $\alpha_1$  的变化曲线  
Fig. 5 Curves of  $\omega_y/k_{ay}$  vs  $\alpha_1$  at different  $h_1/S$

由图 5 可知:在  $\alpha_1$  较小时,增大  $h_1$  或减小  $S$  都有利于提高  $\omega_y$ 。

## 5 设计与优化实例

### 5.1 实例的设计约束条件与原方案

某预研离轴三反空间相机样机的主支撑结构设计约束条件如下:

- (1) 主次镜间距达到 1.56 m;
- (2) 尺寸  $< 1.65 \text{ m} \times 1.9 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ ;
- (3) 其各反射镜组件的质量见表 1;
- (4) 样机一阶频率要求  $> 120 \text{ Hz}$ ;
- (5) 镜头支撑结构总质量  $< 200 \text{ kg}$ 。

表 1 某预研相机各反射镜组件的质量分布

Tab. 1 Mass distribution of reflector subassemblies for a pre-research space camera

	主镜组件	次镜组件	三镜组件	折叠镜组件
质量(kg)	148.5	7.3	99.3	44.2

样机主支撑结构的原方案采用了整体桁架结

构和碳纤维复合材料,质量为 218 kg,其中前后框架分别为 30.2 kg 和 133.4 kg,1 阶频率为 116 Hz。经分析,原方案存在 X 向与 Y 向刚度相差很大,前后框架的薄壁太厚等缺点。

## 5.2 实例方案的优化设计

在对设计方案优化中,着重考虑了通过优化各杆之间的夹角和减轻前后框架的质量来提高结构的刚度<sup>[6-8]</sup>。根据上节分析,首先初步确定了相机结构的主要尺寸参数有: $S$  为 1 570 mm、 $h_1$  为 1 470 mm、 $h_2$  为 1 700 mm、 $D_1$  为 660 mm、 $D_2$  为 1 160 mm,桁架杆的内径为 80 mm,外径为 100 mm。

由  $S$ 、 $h_1$ 、 $h_2$  和次镜处的光线确定了  $r$  为  $28.43^\circ$ 、 $\varphi$  为  $20.85^\circ$ ;由  $h_2$  和  $D_2$  确定了  $\beta_1$  为  $9.76^\circ$ ;由  $S$ 、 $h_1$  和  $D_1$  确定  $\alpha_1$  可能变化范围为: $27.29^\circ \leq \alpha_1 \leq 43.11^\circ$ ;

把  $h_1/S=0.9393$  代入式(17)中, $\omega_y$  随  $\alpha_1$  的变化曲线如图 5 所示,此时  $\omega_y$  的理论极大值在  $\alpha_1=26^\circ$  附近,但此时不符合  $\alpha_1$  的可能变化范围。在保证不挡光、各桁架杆不干涉的情况下,确定  $\alpha_1$  为  $29.53^\circ$ 、 $\alpha_2$  为  $20.3^\circ$ 。把以上数据带入式(13)和(14)中得: $\omega_x=169$  Hz, $\omega_y=170$  Hz。

## 5.3 实例新方案的分析

新的主支撑结构的方案如图 6 所示,其质量为 196 kg。以固定后框架上的 6 点为约束,对新方案进行了模态分析,结果表明:其 1 阶和 2 阶固有频率分别达到 146 Hz 和 152 Hz,其 1 阶和 2 阶振型分别为在前框架 Y 向和 X 向的平动,其中 1 阶振型如图 7 所示。

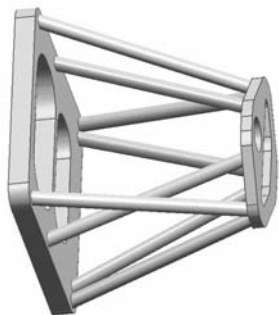


图 6 某预研相机主支撑结构

Fig. 6 Supporting structure of a pre-research space camera

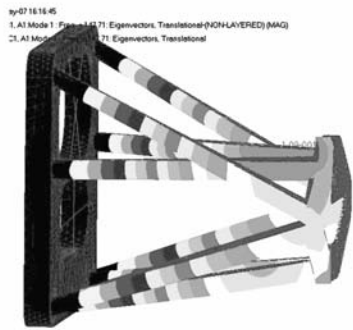


图 7 某预研相机主支撑结构的一阶模态

Fig. 7 First-order mode shape of supporting structure

与有限元分析结果相比, $\omega_x$  与  $\omega_y$  理论计算值的误差分别为 16.4% 和 11.1%,可以作为方案初步设计的参考。分析了造成误差较大的主要原因如下:

(1)理论计算中完全忽略了桁架杆的质量;

(2)理论分析时假设前框架为绝对刚体,而实际上前框架存在很大的柔度;

(3)进行理论推导时假设的振型函数与实际有些差别,相当于增加了结构约束,提高了系统的刚度。

## 6 结 论

桁架式主支撑结构具有诸多优点,特别适合大型空间相机,并越来越被空间相机结构研究人员重视。本文主要针对大型离轴三反空间相机桁架式主支撑结构的设计与优化展开探索性研究,重点研究了采用 Rayleigh 法对该类结构进行基频分析和以最大基频为目标的结构优化方法,并将研究成果应用到某预研相机主支撑结构的设计与改进中。对该相机主支撑结构的分析结果表明:新方案不但结构质量减轻了 22 kg,基频也提高了 30 Hz,达到了提高结构刚度,减轻质量的目的,满足了任务要求,为项目的工程实施提供了积极的、有价值的参考数据。文中研究和分析结果对大型离轴三反空间相机主支撑结构的设计有一定的指导意义,并可以作为其它类型相机主支撑结构设计的参考。

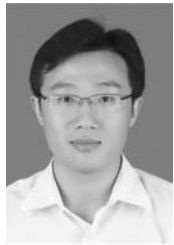
## 参考文献:

- [1] KEITH B, DOYLE. Design of optical structures for maximum fundamental frequency [J]. *SPIE*, 1993, 1998:50-59.
- [2] PRESSEL P. Generic telescope truss [J]. *SPIE*, 1991, 1532:50-56.
- [3] WADE R, FELL B. Structural analysis and active flexure compensation of the high resolution optical spectrograph for the gemini south telescope [J]. *SPIE*, 1998, 3355: 307-314.
- [4] PEARLMAN J, SEGAL C, LIAO L, *et al.*. Development and operations of the EO-1 hyperion imaging spectrometer [J]. *SPIE*, 2004, 4135:243-252.
- [5] FORMAN S E. EO-1 advanced land imager (ALI) technology transfer forum [R]. 2001, 9.
- [6] 胡企千, 刘梅. 空间太阳望远镜镜筒桁架的优化 [J].

光学精密工程, 2003, 11(2):151-156.

- HU Q Q, LIU M. Optimization of tube truss of space telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2):151-156. (in Chinese)
- [7] 陈志平, 陈志远, 杨世模. 空间太阳望远镜主桁架的模态分析与试验 [J]. 光电工程, 2004, 31(12):1-3.  
CHEN ZH P, CHEN ZH Y, YANG SH M. Modal analysis and experiment on the main truss of space solar telescope [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(12):1-3. (in Chinese)
- [8] 陈荣利, 樊学武. 高分辨率 TDICCD 相机轻量化技术 [J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(2):20-24.  
CHEN R L, FAN X W. Lightweightening technology for high resolution TDICCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(2):20-24. (in Chinese)

## 作者简介:



张雷 (1982—), 男, 山东菏泽人, 博士, 助理研究员, 研究方向为光学仪器设计与分析。Email: zhangleisong@tom.com



贾学志 (1980—), 男, 河北唐山人, 博士研究生, 主要从事空间相机整体结构的研究。E-mail: xuezhi0817@163.com

## ● 下期预告

## 基于改进 Paik 型 Boltzmann 机的图像复原

张煜东, 吴乐南

(东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

图像复原可以看作是一个极小化问题, 传统的 Boltzmann 机方法不仅容易陷入局部最小点, 而且收敛速度慢。为解决上述问题, 改进传统 Boltzmann 机: 首先将 Paik 算法与 Boltzmann 机结合; 其次为了加快速度, 将串行模式推广到并行模式; 第三为了增加计算精度, 使用了亚单位步长增进技术; 最后为折中收敛速度与收敛精度这一对矛盾, 采用了自适应步长策略。对于算法的每一处改进均有详细的理论验证、收敛性分析和残差变化讨论。实验表明, 该方法能够收敛到全局最优, 复原结果的峰值信噪比高于文献 [7] 提出的改进 Boltzmann 机 0.5~0.8 dB, 且收敛速度仅有其 1/3。因此本文提出的改进 Paik 型 Boltzmann 机对图像复原是有效的。