

文章编号 1004-924X(2008)12-2441-06

机载光电稳定平台框架结构工程分析

甘至宏¹, 张 葆¹, 撒芃芃^{1,2}

(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:对机载光电稳定平台结构设计特性进行了阐述,说明机械谐振频率对设备性能的重要性,指出加支撑筋和减重孔是提高机械谐振频率的有效手段。此外,在结构布局上尽量紧凑,使质量大的零件靠近回转轴线以减小转动惯量,也有利于机械谐振频率的提高。以某光电稳定平台框架基座为例,通过计算分析,得到直观的图示结果,能较全面地看到在一定外力作用下,零件中应力、应变、变形、安全系数的分布情况,据此找出薄弱环节和冗余部分,有的放矢地改进设计。实例结果验证了分析的可指导性和重要性。

关键词:机载平台; 工程分析; 机械谐振频率

中图分类号:V243.5 **文献标识码:**A

Engineering analysis of airborne optoelectronic platform frame structure

GAN Zhi-hong¹, ZHANG Bao¹, HAN Peng-peng^{1,2}(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: The structural design characteristics of airborne optoelectronic steady platform are elaborated, and the importance of mechanical resonance frequency to equipment performance is explained. Then, it is pointed out that adding support rod and bore can effectively raise the mechanical resonance frequency. Furthermore, the structural configuration is designed as compact as possible to make the big mass components approach to the rotation axis to reduce the rotor inertia, which offers an advantage in the enhancement of mechanical resonance. An optoelectronic steady platform frame is taken as the example under certain external force, the direct-viewing graphical representation result can be obtained through the computation analysis, so that the distributed situations of the stress, strain, distortion and safety coefficient for components can be given comprehensively. According to the weak link and the redundant part, the design is improved, and the example results show the guidance and importance of the engineering analysis.

Key words: airborne platform; engineering analysis; mechanical resonance frequency

1 引言

机载设备光电平台是提高战机性能指标的有效手段,无论是在无人机上还是有人机上,结构重量的减少,就意味着有效载荷、飞行速度、飞行距离的增加,设计人员都以结构刚度好、体积小、质量轻为结构设计所追求的目标。多数情况下,设计产生于渐变,而非产生于大变革,以往的设计多是先参考国内外同类产品,再根据具体的光电载荷形式做类比设计^[1]。在设计时经常要考虑在使用环境中零件会不会断裂,变形如何,变形多少,是否可以使用较少材料而又不影响其使用性能等问题。这都是工程分析必须解决的问题。

长期以来,机械设备的分析与计算一直沿用材料力学、理论力学和弹性力学所提供的公式来进行。由于有许多简化条件,因而计算精度很低。为了保证设备的安全可靠运行,常采用加大安全系数的方法,结果使结构尺寸加大,浪费材料,有时还会造成结构性能的降低。

现代产品正朝着高效、高速、高精度、低成本、节省资源、高性能等方面发展,传统的计算分析方法远远无法满足要求。20 年代以来,伴随着计算机技术的发展,出现了计算机辅助工程分析(Computer Aided Engineering, CAE)这一新兴学科。采用 CAE 技术,即使进行复杂的工程分析也无须做很多简化,并且计算速度快、精度高。

常见的工程分析包括:对质量、体积、惯性力矩、强度等的计算分析;对产品的运动精度,动、静态特征等的性能分析;对产品的应力、变形等的结构分析。主要表现为以下几个方面:

(1)在产品的工作原理、工作性能、结构已经确定的条件下,通过 CAE 技术给出产品的最大效能;

(2)在产品工作原理不变的前提下,借助于 CAE 计算,分析、指导、修改产品结构中某些部分,以期得到更加优良的性能;

(3)对新开发的产品进行仿真分析,验证预期的功能,及时发现设计中的缺陷,使新产品更加有效、可靠。

在 CAE 技术中,有限元法(Finite Element Method, FEM)是其中运用最成功,最广泛的一种

数值方法,由于它的多功能性,占据了工程分析的主要软件市场^[2]。

随着计算机应用的发展,CAD/CAE/CAM 技术已普及到科室课题组,许多大型机械设计软件中内嵌有结构分析功能,从而不必做烦琐的计算即可分析所设计的机械结构。设计人员可根据工作中的实际情况,给计算机输入合适的指令,而计算机就可按预定的程序进行大量精细的计算,计算是计算机的特长,分析是人的特长,设计人员应力图让计算机去做它能做好的事,而充分发挥人脑的优势。

2 有限元分析

机载光电稳定平台结构设计应力求解决两个问题:(1)尽量提高光学系统的稳定精度,使光学系统偏移量最小。(2)使稳定平台结构的谐振频率最大,以适应速度回路带宽要求,确保光电稳定平台动态响应与控制系统的跟踪和定位能力满足要求^[3]。

2.1 机械谐振频率分析

通常机械传动装置都具有一个谐振频率,有的不只一个谐振频率,如果谐振频率小于系统的带宽,在某些谐振频率下还可能会损坏精密的光电传感器及合轴系。

如果部件的固有频率恰好与信号频率相同,结果可以使振动扩大,使作用到部件中的载荷力加大。这个扩大也可以继续传递到任一配对的部件,结果是形成一振动系统,从而对系统的动态性能产生较大影响,甚至使系统不稳定。

如果接近固有频率,可以使产品振动,尽管振动可以不损害系统强度,但会给用户带来不便。

实际上这些信号可以来自外界,如风或其他,某一邻近的引擎机械系统的震动。

分析表明,弹性变形与机械装置的结构、尺寸、材料和受力情况有关。结构转动惯量较大,系统通频带较宽,系统运动过程中传动轴将产生弹性扭转变形,其传递特性将出现较高的谐振峰,形成机械谐振。从系统特性分析,弹性变形引起的执行轴转角和负载转角之间机械谐振传递特性为一个二阶振荡环节,可表示为:

$$G(S) = \frac{J_L}{K_L} S^2 + \frac{D_L}{K_L} S + 1 = T_L^2 S^2 + 2\zeta T_L S + 1,$$

其中, J_L 为负载转动惯量, K_L 为弹性系数, D_L 为阻尼系数, $T_L = \sqrt{J_L/K_L}$ 为机械谐振周期, $\zeta = D_L/2\sqrt{J_L K_L}$ 为相对阻尼比。

$$\text{则机械谐振频率: } \omega_n = \frac{1}{T_L} = \sqrt{\frac{K_L}{J_L}}.$$

机械谐振频率主要由机械结构刚度、弹性系数和转动惯量决定。机械谐振实际上是机电耦合相互作用的结果,解决机械谐振问题需要从机械结构设计和伺服控制系统设计两方面共同考虑。因此,机械设计时要着重提高框架和驱动装置的刚度,系统的刚度越差,机械谐振频率就越低,反之亦然^[4]。一般而言,高刚度的实现必定导致重量的增加,但由于机载光电稳定平台重量限制严格,结构重量的减少,就意味着有效载荷、飞行速度、飞行距离的增加,所以不能无限制地增加重量。再者,在结构布局上尽量紧凑,使质量大的零件靠近回转轴线以减小转动惯量。转动惯量是指包括伺服机械结构的转动部分及其负载的合成转动惯量,它是系统设计的基本原始参数,是进行机械设计和电气选型的依据。利用三维 CAD 软件的工程分析很容易获得这些物理特性值。

2.2 分析方法思路

有限元方法的基本思想是将结构离散化,用有限个容易分析的单元来表示复杂的对象,单元之间通过有限个节点相互连接,然后根据变形协调条件综合求解。由于单元的数目是有限的,节点的数目也是有限的,所以称为有限元法。这种方法灵活性很大,只要改变单元的数目,就可以使解的精确度改变,得到与真实情况无限接近的解^[5-6]。

借助软件,设计人员将零件二维平面图转化成三维结构件图,然后给计算机输入设计零件的材料属性、载荷、支撑和约束,并确定分析类型,再选择好网格划分形式等必要条件,执行求解操作,计算机就会按结构力学的有限元法计算,以数据、图表、图形的方式输出较直观的结果,使我们能较全面看到在一定外力作用下,零件中应力、应变、变形、安全系数等的分布情况。应力是由于施加载荷而使材料处于的一种状态;强度是材料的一种性能,它是材料承受应力能力的量度或是材料承载容量;由载荷引起的应力除以有效强度其值为安全系数。

对结果的分析 and 据此做出判断,并做出对结

构件的改进措施是计算机无法自动完成的,这要由设计人员执行,基本的原则是使关键部位应力、应变不要集中,变形在允许范围内,安全系数满足设计要求,直至进一步使零件的固有频率满足设计要求。由对机载光电稳定平台结构设计特性的分析知,提高刚度和减少转动惯量都可提高谐振频率,在零件适当处增减材料,使形成加强筋和减重孔是行之有效的手段。另外改换高比刚度,比强度的材料也是手段之一。

3 基于 UG 的结构分析

3.1 分析对象

对某光电稳定平台框架结构用 UG 软件进行了分析,工作中取得了较满意的结果。

该光电稳定平台任务指标要求质量不大于 50 kg,样机设计时由于外协外购件的不可确定因数和没有仔细进行工程分析,局部区域安全系数有些件过大,有些件偏小,结果平台重 61.5 kg,必须减重至少 11.5 kg。减重改进设计时对各结构件进行了较详细的分析和优化,结果平台总体减重约 12 kg,而关键结构件安全系数还有所增加,现以基座为例说明。

3.2 分析及改进

图 1 是光电稳定平台框架结构基座的静态分析图,从中可见基座四角和筋板根部应力集中,应变较大,支角钉孔一带安全系数最小显示为 18。而基座边框和底板应力,应变值过小,安全系数过高。

样机在实验期间,出现过四角忘加减震器而装入包装箱运输,在包装箱摔裂的情况下,支角有的断裂了。

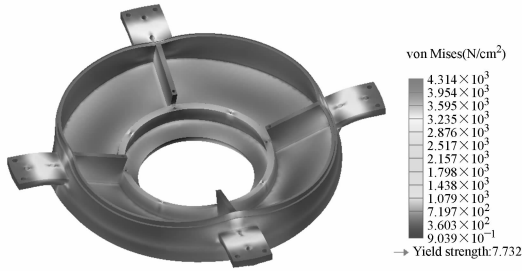
所以,应加强四角支板的强度,提高其安全系数,而为了更好地减少零件的转动惯量,提高其谐振频率,又需尽量减少远离回转中心处的质量;底面中心孔处是负载支撑面,需增加其强度和刚度,但不应增加过多总质量。

根据以上结果分析和减重要求,做了如下改进:

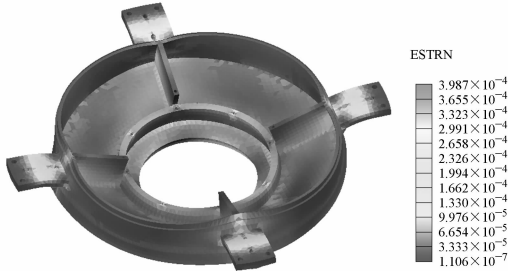
四角支板加网格状筋和双侧筋;底板增加筋数并局部减薄;边框变为筋板形式,适当的地方变为凹台。

图 2 是改进后的静态分析图,从中可看到应

模型名称: 基座-2
 算例名称: 2
 图解类型: 静态 应力 图解1(-von Mises-)
 变形比例: 568.216



模型名称: 基座-2
 算例名称: 2
 图解类型: 静态应变 图解1(-等量-)
 变形比例: 568.216



模型名称: 基座-2
 算例名称: 2
 图解类型: 静态位移 图解1(-合位移-)
 变形比例: 568.216



模型名称: 基座-2
 算例名称: 2
 图解类型: 设计检查 图解1(-安全系数-)
 准则: 最大 von Mises应力
 安全系数分布: 最小安全系数=18

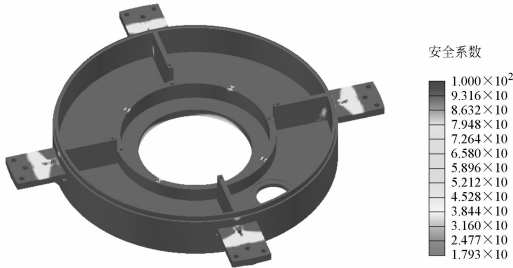


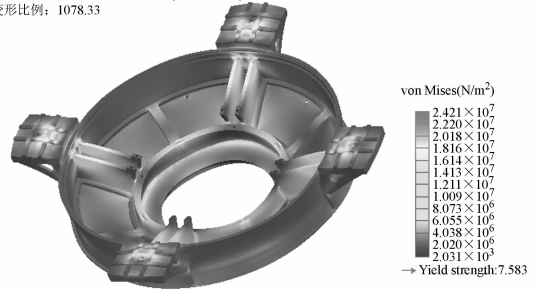
图 1 改进前的静态分析图

Fig. 1 Static state analysis diagram before improvement

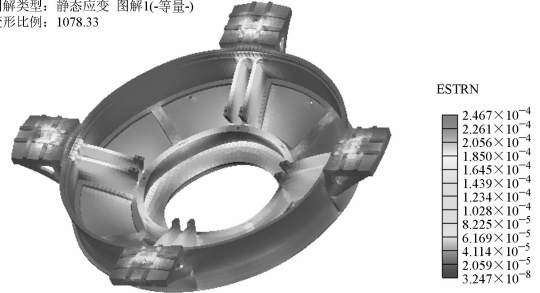
力应变的均匀性有所改变,并且最小安全系数增加显示为 31。

从改进前后的位移图看出,改后相同外力作

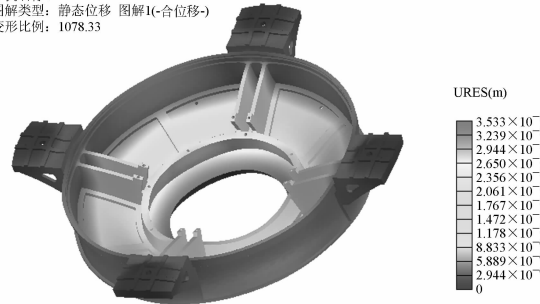
模型名称: 基座-9
 算例名称: 2
 图解类型: 静态 应力 图解1(-von Mises-)
 变形比例: 1078.33



模型名称: 基座-9
 算例名称: z
 图解类型: 静态应变 图解1(-等量-)
 变形比例: 1078.33



模型名称: 基座-9
 算例名称: z
 图解类型: 静态位移 图解1(-合位移-)
 变形比例: 1078.33



模型名称: 基座-9
 算例名称: z
 图解类型: 设计检查 图解1(-安全系数-)
 准则: 最大 von Mises应力
 安全系数分布: 最小安全系数=31

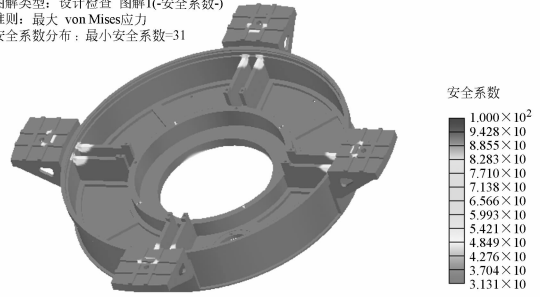


图 2 改进后的静态分析图

Fig. 2 Static state analysis diagram after improvement

用下位移减小,相同外力作用下位移小则刚度好。可见改进后结构刚度提高了。

表 1 和表 2 是改进前后框架的有限元模态分析结果,可见改进后框架固有频率前几阶的值略变大。

表 1 改进前模态分析结果

Tab. 1 Results of mode analysis before improvement

模式清单		
频率数	Hz	s
1	642.07	0.001 557 5
2	762.56	0.001 311 4
3	1 192.7	0.000 838 41
4	1 301.9	0.000 768 09
5	1 456.2	0.000 686 71

表 2 改进后模态分析结果

Tab. 2 Results of mode analysis after improvement

模式清单		
频率数	Hz	s
1	729.58	0.001 370 7
2	771.87	0.001 295 6
3	1 358.5	0.000 736 09
4	1 590	0.000 628 93
5	1 659.5	0.000 602 59

同理,对光电平台的其它铸件进行分析,减重结果见表 3。

表 3 减重结果

Tab. 3 Results of decreasing weightness

零件名称	原质量(kg)	改进后质量(kg)	差值(kg)
基座	1.734	1.522	0.212
外方位框架	6.792	4.547	2.245
外俯仰框架	2.566	2.236	0.33
前罩	0.934	0.664	0.279
后罩	1.102	0.743	0.359
内方位框架	1.627	1.330	0.297
内俯仰框架	2.053	1.311	0.742

可见铸件共减重 4.464 kg。

另外,还对部分结构件改换了材料,表 4 是机载设备结构件常用材料性能参数。

选用材料是一个需要综合考虑的问题,主要原则是要求重量轻,足够的断裂韧性;具有良好的环境稳定性,加工性和经济性等。将非承重件侧罩和上罩由铸件改为薄壁碳纤维件,减轻了约 1.8 kg。

再者由于结构件和外购件导电环等的减轻导致配平件减轻,最终平台共减重约 12.8 kg,较好

地完成了减重任务。

表 4 常用材料性能参数

Tab. 4 Performance parameters of materials in common use

材料名称	密度 ρ (g/cm ³)	拉伸强度 σ_b (MPa)	弹性模量 E (MPa)	比强度 σ_b/ρ (MN·m/g)	比刚度 E/ρ (MN·m/g)
钢	7.8	1 009	205 800	129.4	26 385
铝	2.8	460	73 500	164	26 250
钛	4.5	941	111 720	209	24 827
玻璃钢	2.0	1 039	39 200	520	19 600
碳纤维(高强)	1.45	1 470	137 200	1 014	94 621
碳纤维(高模)	1.6	1 049	235 200	656	147 000
碳纤维	2.1	1 352	205 800	644	98 000

4 实验结果对比

利用 UG 软件中的有限元工具,对平台中体积大,重要的结构件进行工程分析后,取得较好的仿真结果,又在环境实验站的振动工作台上对其力学性能进行了进一步的检验对比。

图 3 是改进前后的平台外观照片。

图 4 是改进后的平台做振动实验时的振动曲线图。

由图可见改进后平台的谐振点值都较高,工作中平台的机械谐振频率远高于陀螺带宽,因此这次减重改进设计不仅完成减重要求,还使平台整机满足谐振频率的要求,平台结构件减重是成功的。



(a)改进前 (b)改进后
(a)Before improvement (b)After improvement

图 3 改进前后的平台外观照片

Fig. 3 Photos of platform fore-and-aft improvement

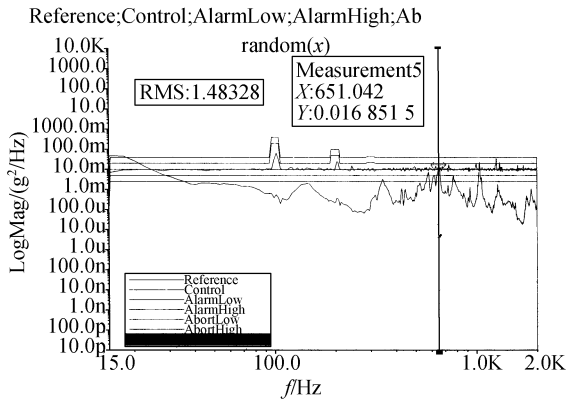


图 4 改进后平台振动曲线图

Fig. 4 Vibration curve of platform after improvement

5 结 论

创建数学模型和离散化有限元模型会产生不可避免的误差:形成数学模型会导致建模误差,即

理想化误差;离散数学模型会带来离散误差;求解过程会产生数值误差。

另外由于各种软件的计算精度有所不同,有限元法计算时各种边界条件确定的不同等,都可能导致计算结果的不同和偏差,分析只能作为参考,需经实践验证,但毕竟提供了根据,使设计能有的放矢,能以多快好省的原则搞好设计。

本文以某光电稳定平台框架基座为例,描述了分析过程,通过较直观的图示结果,能较全面看到在一定外力作用下,零件中应力、应变、变形、安全系数等的分布情况,据此找出薄弱环节和冗余部分,有目的地根据地进行改进设计。实例结果说明光电稳定平台框架结构工程分析是十分必要和可行的,它大大缩短了设计周期,取得了较好的效益。

该光电稳定平台经过减重改进设计后,其有效载荷比明显增加,在国内处于较高水平,已批产二十多台套提供部队装备。

参考文献:

- [1] 陈集丰. 导弹、航天器结构分析与设计[M]. 西安:西安工业大学出版社,1995.
CHEN J F. *Guided Missile, the Aerospace Machine Structure Analysis and Design*[M]. Xi'an: Xi'an Industrial University Press, 1995. (in Chinese)
- [2] 马东升,胡祐德,张莉松. 伺服系统原理与设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,1999.
MA D SH, HU Y D, ZHANG L S. *Design and Principle of Servo Control*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999. (in Chinese)
- [3] 姬伟,李奇,杨海峰. 精密光电跟踪转台的设计与伺服控制[J]. 光电工程,2006,33(3):11-16.
JI W, LI Q, YANG H F. Design and servo control for precision opto-electronic tracking turntable[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2006,33(3):11-16. (in Chinese)
- [4] 姬伟. 陀螺稳定光电跟踪平台伺服控制系统研究[D]. 南京:东南大学,2006.
JI W. *Servocontrol system research of top stable optoelectronic platform follow the terrace*[D]. Nanjing:South-east University. (in Chinese)
- [5] 江洪. SolidWorks 有限元分析实例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
JIANG H. *SolidWorks Example Analyze Based on FEM Analytical*[M]. Beijing: Machine Industrial Press, 2006. (in Chinese)
- [6] 李庆祥,王东生,李玉和. 现代精密仪器设计[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
LI Q X, WANG D SH, LI Y H. *Modern Precision Instrument Design*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:甘至宏(1963—),男,上海人,副研究员,主要从事光电仪器结构设计方面的研究。E-mail: gangzhihong1017@sina.com

张 葆(1966—),男,吉林磐石人,研究员,工学博士,博士生导师,主要从事航空光电成像技术方面的研究。E-mail: cleresky@vip.sina.com

撤芃芃(1977—),女,山西永济人,研究生,助理研究员,主要从事光电仪器的总体设计、精密仪器设计等方面的研究。E-mail: cuihanpengpeng@sina.com