

基于刚度匹配的光电转塔减振设计研究

刘健, 何磊, 赵克军

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 针对某光电转塔在实验过程中出现实际减振频率大幅低于设计减振频率的问题, 研究了转塔和减振器刚度耦合对减振系统的影响。经过分析研究, 提出了基于刚度匹配的减振设计方法, 对该光电转塔进行了改进设计, 经过再次试验验证, 证明该方法具有良好的减振效果。

关键词: 光电转塔; 刚度匹配; 减振设计; 固有频率

中图分类号: V241.02; TB123 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)03-0095-05

Vibration Isolation Design of Electric-Optic Turret Based on Stiffness Matching

LIU Jian, HE Lei, ZHAO Ke-jun

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: In the engineering test of an electric-optic turret, it was found the system's inherent frequencies were distinctly lower than the designed ones. To explain this phenomenon, the stiffness coupling between the electric-optic turret and the vibration isolator was analyzed. Further more, a new design method of vibration reduction based on stiffness matching was proposed, and was applied in the improved design of the turret. The subsequent tests proved the effectiveness of this method.

Key words: electric-optic turret; stiffness matching; vibration isolation design; inherent frequency

0 引言

安装在运输机、直升机、无人机等平台上的光电转塔, 通常配有可见光、红外、激光等任务载荷, 用以实现对地侦察、照射、引导等功能。光电转塔工作过程中, 载机的振动会影响其工作性能, 因此, 降低载机振动的影响对光电转塔的性能提升具有重要的作用。在大量的工程应用中, 降低载机振动影响的方法有电子稳像、光学稳像、减振设计等, 其中减振设计应用最为广泛。

光电转塔减振设计研究工作主要集中在多级减振设计^[1]、减振系统布局^[2]和减振器设计^[3-5]等方面, 但缺乏对减振系统中负载、减振器、基座之间的刚度匹配关系的研究。有研究者指出, 在减振设计时应综合考虑设备框架刚度和减振器刚度的综合效应^[6-7], 但未对减振系统中负载、减振器、基座之间的刚度匹配关系进行深入研究。不考虑系统刚度匹配关系时, 容易出现频率“漂移”现象, 即系统实际频率低于预期减振

频率, 从而降低减振效果甚至发生放大。

国内外主要对汽车、轨道车辆、机床、发动机等对象进行了刚度匹配研究^[8-11], 大多采用仿真与实验的方法, 少有涉及减振设计中的频率“漂移”现象及刚度匹配问题。

本文针对某光电转塔减振设计中出现的实际频率大幅低于设计频率的问题, 考虑了转塔和减振器之间的刚度耦合效应, 通过理论分析, 提出了基于刚度匹配的减振设计方法。最后, 利用该方法对光电转塔减振设计进行改进, 经过测试验证, 改进设计取得了良好的效果。

1 问题描述

图1所示的某光电转塔安装在运输机平台上, 载机振动条件为宽带随机振动叠加窄带随机振动, 窄带随机振动中心频率为: 11 Hz, 22 Hz, 44 Hz, 66 Hz, 窄带宽度为中心频率的 $\pm 5\%$ 。光电转塔采用稳定平台减振方案, 设计减振频率 31 Hz。

该光电转塔在振动试验中抖动剧烈, 图像模糊, 性能尚不及未安装减振器时的状态。经排查, 该光电转

收稿日期: 2015-04-13

修回日期: 2015-04-24

作者简介: 刘健(1983—), 男, 重庆梁平人, 硕士, 工程师, 研究方向为光电系统仿真。

塔减振效果未达到预期的主要原因是发生了共振。水平方向 0.5g 扫频结果显示,转塔实际频率大幅低于设计频率(本文称之为频率“漂移”),在 21.6 Hz 有一个明显的振动响应峰(如图 2 所示),与 22 Hz 的窄带随机振动激励频率重合,导致共振。

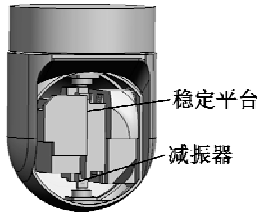


图 1 光电转塔模型

Fig. 1 Model of electric-optic turret

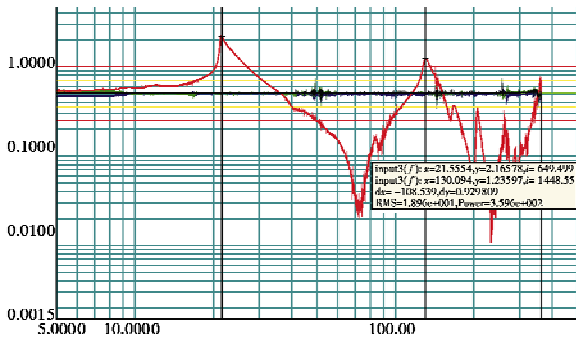


图 2 水平方向 0.5g 正弦扫频测试结果

Fig. 2 Swept-sine(0.5g) result in horizontal direction

2 原因分析

如果将光电转塔和减振器等效为弹簧,整个减振系统则相当于两个弹簧串联,串联后的系统刚度必然低于每个弹簧的刚度,从而导致实际频率低于设计频率。

2.1 减振系统理论模型

对于任何一个实际对象来说,都具有无限自由度,通常需要简化为有限自由度系统。本文只考虑给定振动方向(例如 X 方向)上的情况,且只考虑在该振动方向上的频率最低的模态,将其简化为单自由度系统。

首先,对光电转塔不安装减振器的情况进行等效,抽象物理模型如图 3a 所示;然后,将光电转塔安装减振器的情况进行等效,抽象物理模型如图 3b 所示。

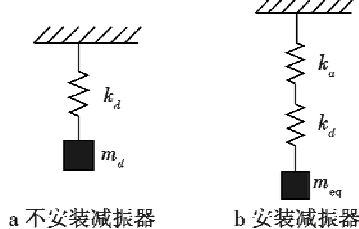


图 3 光电转塔的等效模型

Fig. 3 Equivalence model of electric-optic turret

图中: k_d 为转塔等效刚度; m_d 为转塔质量; k_a 为减振器刚度; m_{eq} 为系统等效质量。系统刚度 k_{sys} 为 k_a 与 k_d 串联后的等效刚度,则有

$$k_{sys}^{-1} = k_d^{-1} + k_a^{-1} \quad (1)$$

为了更直观地表现 k_d 对 k_{sys} 的影响,以 k_d/k_a 为横坐标, k_{sys}/k_a 为纵坐标作图,二者的关系如图 4 所示。从图 4 中可以看出:1) 转塔等效刚度使得系统刚度小于减振器刚度;2) 只有当 k_d 是 k_a 的数十倍时, k_{sys} 才较为接近 k_a 。

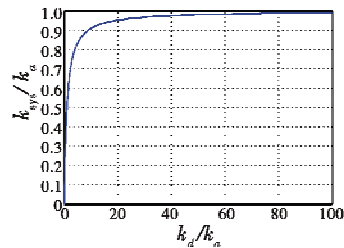


图 4 转塔自身刚度对系统刚度的影响

Fig. 4 Turret's equivalence stiffness vs the system's stiffness

刚度是不便于测量的量,而质量和频率是易于测量的量,将式(1)转换为用质量和频率表达的形式,即

$$(m_{eq} f_{sys}^2)^{-1} = (m_d f_d^2)^{-1} + (m_a f_a^2)^{-1} \quad (2)$$

式中: f_{sys} 为光电转塔带减振器的减振系统频率; f_d 为光电转塔不带减振器的频率; m_a 为减振器负载质量; f_a 为减振器设计频率。

光电转塔常用的减振形式通常有整体减振和稳定平台减振两种。

2.2 光电转塔整体减振分析

光电转塔整体减振方案中, $m_{sys} = m_d = m_a$, 于是有

$$(f_{sys}^2)^{-1} = (f_d^2)^{-1} + (f_a^2)^{-1} \quad (3)$$

令: $\lambda_{sys} = f_{sys}/f_a$, $\lambda_d = f_d/f_a$, 则有

$$\lambda_{sys} = \sqrt{\lambda_d^2 / (\lambda_d^2 + 1)} \quad (4)$$

由式(4)得出 λ_{sys} 与 λ_d 的关系如图 5 所示。

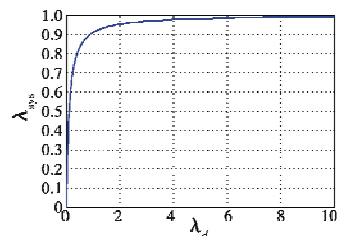


图 5 整体减振频率关系图

Fig. 5 The relationship between frequencies in the overall vibration isolation scheme

2.3 光电转塔稳定平台减振方案分析

稳定平台减振方案中: m_d 为光电转塔整体质量; m_a 为稳定平台质量; m_{sys} 采用稳定平台质量。

$$(m_{sys} f_{sys}^2)^{-1} = (m_d f_d^2)^{-1} + (m_a f_a^2)^{-1} \quad (5)$$

令： $c_m = m_d/m_a$ ，则式(5)可表达为

$$\lambda_{sys} = \sqrt{c_m \lambda_d^2 / (c_m \lambda_d^2 + 1)} \quad (6)$$

当 $c_m = 1.5, 2, 3$ 时， λ_{sys} 与 λ_d 的关系如图6所示。

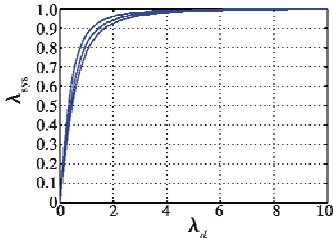


图6 稳定平台减振频率关系图($c_m = 1.5, 2, 3$)

Fig.6 The relationship between frequencies in scheme of stabilizing platform vibration isolation ($c_m = 1.5, 2, 3$)

3 光电转塔减振改进设计

3.1 基于刚度匹配的光电转塔减振设计方法

前述分析表明，转塔与减振器之间刚度耦合效应使得实际频率低于设计频率。因此有必要考虑刚度耦合效应，开展基于刚度匹配的减振设计。

基于刚度匹配的减振设计基本步骤如下：1) 采用常规减振设计方法选择减振频率；2) 计算或测试系统的实际频率(也可采用模拟件测试其频率)；3) 评估频率“漂移”的影响，首先是关注减振系统频率是否接近激励频率，然后是减振效果。如果减振系统频率远离激励频率，减振效果良好，则说明减振设计是合理的，设计结束；如果减振系统频率与激励频率接近，减振效果未达到要求，则需要改进设计。

改进设计后需要重新计算减振系统频率并评估减振效果是否满足要求，如果满足要求则设计结束。否则，重复以上步骤1)~3)。

以上步骤中，最核心的就是如何对减振系统进行改进设计，下面对其详细说明。

由图5和图6可知，当转塔自身频率高于设计频率2~3倍时，转塔与减振器之间刚度匹配情况较好，减振系统实际频率基本接近设计频率，可以达到设计频率的90%以上。

因此，改进设计时需要调整设计频率或者调整转塔频率。在给定尺寸和重量约束条件下，转塔刚度(频率)难以有成倍的变化，多数情况需要调整设计频率。设计频率应尽量不大于转塔频率的1/3~1/2。

除此之外，改进设计还必须满足光电转塔减振设计的以下要求：

- 1) 实际频率远离正弦振动激励频率或窄带随机振动激励频率；
- 2) 实际频率在伺服控制带宽内，以使减振器带来的振动能被伺服系统衰减^[7]；

3) 实际频率不能过低，避免减振器有较大的相对位移影响成像质量。

光电转塔减振系统的实际频率可根据式(4)或式(6)进行预估，也可采用仿真计算或实测的办法进行验证。高效准确的仿真计算是指导多方案选择与评估的重要手段。

3.2 转塔减振系统原始设计分析

采用有限元仿真和实测的方法对原始设计光电转塔进行模态分析。测试状态去除了盖板，转塔有限元建模时与测试状态保持一致，有限元模型及坐标系如图7所示，其中，Z为垂向，X和Y为水平方向。

对无减振器状态的光电转塔进行仿真分析，转塔在X、Y、Z方向的模态频率分别为42 Hz、36.3 Hz和65 Hz。原始减振设计状态的模态频率如表1所示。

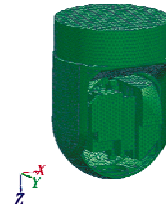


图7 光电转塔有限元模型

Fig.7 Finite element model of the electric-optic turret

表1 转塔减振频率(原始设计)

Table 1 Vibration-reduction frequency of the electric-optic turret (original design) Hz

方向	设计减振频率	仿真减振频率	实测减振频率
X	31	22.5	22.7
Y	31	21.5	21.6
Z	31	28.9	29.0

3.3 改进设计

对比表1和3.2节中的模态频率可知，设计减振频率31 Hz与转塔水平方向的模态频率很接近，必然发生明显的频率“漂移”。为了解决频率“漂移”的问题，需要调整减振设计频率，使漂移达到足够小，并且使实际的频率满足光电转塔减振设计要求。本文采用仿真计算对各种可能的减振设计方案进行评估，然后从中选出最优减振方案。

该光电转塔自身最低频率36.3 Hz，如果需要将频率“漂移”降低到足够小，则设计减振频率最好要低于转塔自身频率的1/3即12 Hz。这里考虑两种典型的可能方案，减振设计频率分别调整为12 Hz和6 Hz。12 Hz方案存在的问题是实际减振频率与11 Hz的窄带随机振动激励太接近(如表2所示)，仍没有解决共振的问题。减振设计频率调整到12 Hz附近(例如9~14 Hz)时存在的问题与此类似。6 Hz方案能够有效避开11 Hz窄带随机振动激励频率，但频率过低，减振器相对位移大，

故不予采用。

因此,略微放宽频率“漂移”限制,允许设计减振频率可以在转塔自身频率的 1/2 范围内。这时,需要在 18 Hz 附近选择较为合适的减振频率,使得实际减振频率在 11 Hz 窄带随机振动和 22 Hz 窄带随机振动之间折中的位置。这里主要考虑了 16 Hz,17 Hz 和 18 Hz 3 个减振方案,其中 17 Hz 减振方案更优(如表 2 所示),因此选定减振设计频率 17 Hz。

表 2 改进设计方案对比

Table 2 Contrast of different improved design schemes

设计减振频率	仿真减振频率		
	X 方向	Y 方向	Z 方向
6	5.9	5.9	6.0
12	11.4	10.9	11.9
16	14.6	13.6	15.7
17	15.2	15.0	16.7
18	16.0	15.2	17.5

改进设计后,转塔固有频率如表 3 所示,水平方向 1g 正弦扫频曲线如图 8 所示。对比图 2 和图 8 可知,光电转塔改进后振动响应得到了大幅降低,减振效果取得了明显改善。改进设计后的光电转塔经受住了 3 个方向振动试验考核,图像清晰稳定,说明改进设计方法有效。

表 3 转塔减振频率(改进设计)

Table 3 Vibration-reduction frequency of the electric-optic turret (improved design)

方向	设计减振频率	仿真减振频率	实测减振频率
X	17	15.2	15.2
Y	17	15.0	15.1
Z	17	16.7	16.6

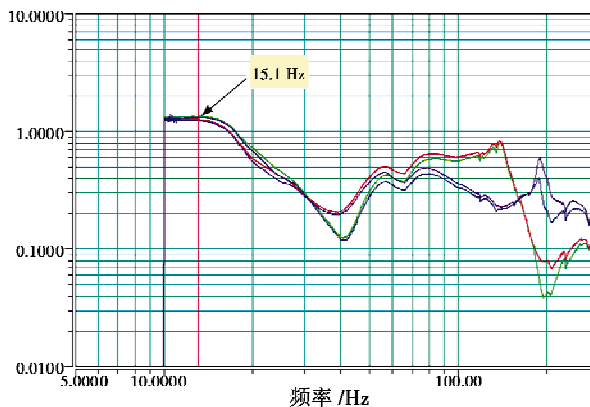


图 8 改进后水平方向 1g 正弦扫频测试结果

Fig. 8 Swept-sine(1g) result of the improved design in horizontal direction

4 结论

通过上述对改进后的光电转塔振动测试结果的分析,证明了基于刚度匹配的光电转塔减振设计方法能够

有效避免实际减振频率大幅低于设计频率的情况,从而保证良好的减振效果,并对其他相关类型机载产品减振设计也具有一定的指导意义。

本文在转塔与减振器刚度耦合效应的理论推导过程中,稳定平台减振方案的等效质量根据工程经验采用了稳定平台的质量,但其理论依据还有待进行更深入的理论分析与试验对比。

参考文献

- [1] 王平,王伟,丁金伟. 机载光电侦察平台复合减振设计[J]. 光学精密工程,2011(1):83-89. (WANG P, WANG W, DING J W. Vibration damping design for airborne electro-optical surveillance platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2011(1):83-89.)
- [2] 甘至宏. 光电吊舱内框架减振系统设计[J]. 光学精密工程,2010(9):2036-2043. (GAN Z H. Design of inner frame vibration absorbing system for optoelectronic pod[J]. Optics and Precision Engineering, 2010(9):2036-2043.)
- [3] 刘树峰,白鸿柏,李冬伟. 光电平台新型隔振机构设计[J]. 机械设计,2012,29(2):16-19. (LIU S F, BAI H B, LI D W. Design of a novel damping mechanism for the opto-electronic platform[J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(2):16-19.)
- [4] 刘树峰,白鸿柏,李玉龙. 金属橡胶光电吊舱的减振器设计研究[J]. 新技术新工艺,2011(3):87-89. (LIU S F, BAI H B, LI Y L. Design and analysis of damper for opto-electronic pod[J]. New Technology & New Process, 2011(3):87-89.)
- [5] 李玉龙,何忠波,白鸿柏. 新型光电吊舱无角位移减振器设计[J]. 机械科学与技术,2012,31(4):568-571. (LI Y L, HE Z B, BAI H B. A new design of non-angular shock absorber for optoelectronic pod[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(4):568-571.)
- [6] 杨少康. 机载光电稳定平台减振技术应用研究[D]. 西安:西安工业大学,2013. (YANG S K. Application research of vibration damping technology on the airborne photoelectric stabilized platform[D]. Xi'an:Xi'an Technological University, 2013.)
- [7] 张卫国,陶忠,孟立庄. 两轴四框架结构光电稳瞄吊舱减振器谐振频率计算与试验[J]. 应用光学,2009,29(1):24-26. (ZHANG W G, TAO Z, MENG L Z. Resonant frequency calculation and test for damper of two axes four-gimbal EO pod[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 29

- (1):24-26.)
- [8] PANG H, YAN H, FANG Z D. Stiffness matching and ride comfort optimization of heavy vehicle's suspension based on ADAMS[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011 (44):1734-1738.)
- [9] 吴波,王增全,谭建松. 刚度匹配对柴油机机体组载荷响应影响[J]. 机械设计与制造, 2014(2):109-112. (WU B, WANG Z Q, TAN J S. Study on the influence of stiffness matching on diesel cylinder block assembly components load response[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(2):109-112.)
- [10] 徐锡江. 减振型双块式无砟轨道合理刚度匹配研究[J]. 路基工程, 2013(3):49-53. (XU X J. Study on reasonable stiffness matching for vibration-reduction double-block ballastless track[J]. Subgrade Engineering, 2013(3):49-53.)
- [11] 刘海涛,王磊,赵万华. 考虑模态特性的高速机床进给系统刚度匹配研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(1):90-95. (LIU H T, WANG L, ZHAO W H. Stiffness matching design for feed system of high-speed machine tool considering modal characteristics[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(1):90-95.)
-
- (上接第91页)
- [9] 吴志华. 基于星敏感器/陀螺组合定姿系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011. (WU Z H. Research on attitude determination based on star sensor/gyro integrated system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [10] 周海银,王炯琦,潘晓刚,等. 卫星状态融合估计理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2013:222-241. (ZHOU H Y, WANG J Q, PAN X G, et al. Fusion theory and methods for satellite estimation[M]. Beijing: Science Press, 2013:222-241.)
- [11] 刘一武,陈义庆. 星敏感器测量模型及其在卫星姿态确定系统中的应用[J]. 宇航学报, 2003, 24(2):162-167. (LIU Y W, CHEN Y Q. Star-sensor measurement model and its application to the spacecraft attitude determination system[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(2):162-167.)
- [12] 宋亮. 星敏感器陀螺姿态确定系统在轨标定研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011. (SONG L. Research on in-orbit calibration methods for star tracker-gyro attitude determination system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [13] 杨峰,周宗锡,刘曙光. 基于星敏感器/光纤陀螺的卫星定姿算法[J]. 控制工程, 2006, 13(4):374-376. (YANG F, ZHOU Z X, LIU S G. Satellite attitude determination algorithm based on star-sensor and FOG[J]. Control Engineering of China, 2006, 13(4):374-376.)
-
- (上接第94页)

参考文献

- [1] 赖延清,蒋良兴,田忠良,等. 液晶显示器用偏光片[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(7):46-51. (LAI Y Q, JIANG L X, TIAN Z L, et al. Polarizer used for liquid crystal display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(7):46-51.)
- [2] 李红芳,王玉合,杨钟. TFT-LCD用偏光片的研究与进展[J]. 合成技术及应用, 2013, 28(3):19-24. (LI H F, WANG Y H, YANG Z. Progress in R&D of polarizing film used in TFT-LCD[J]. Synthetic Technology and Application, 2013, 28(3):19-24.)
- [3] 徐世颖. 浅谈 TFT-LCD 产品用偏光片技术与发展趋势[J]. 现代显示, 2010(9):25-31. (XU S Y. The technology and it's trends of TFT-LCD polarizer[J]. Advanced Display, 2010(9):25-31.)
- [4] 赵金虎. LCD 偏光片贴片工艺技术研究[J]. 现代显示, 2012(8):43-46. (ZHAO J H. Research of LCD polarizer attaching technology[J]. Advanced Display, 2012(8):43-46.)
- [5] 彭艳. LCD 的偏光片工艺技术[J]. 现代显示, 2005, 52(5):58-61. (PENG Y. The craft and technology of polarizing film of LCD[J]. Advanced Display, 2005, 52(5):58-61.)
- [6] 刘杰,李东熙,金炯昊,等. 关于 TFT-LCD 中一种偏光片相关不良的研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(6):872-876. (LIU J, LI D X, JIN J T, et al. Defect related to polarizer in TFT-LCD[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2013, 28(6):872-876.)
- [7] CHEN Y K, LIN M H, HUANG K F, et al. Analysis of the light leakage phenomenon at corners of LCD panel[J]. Symposium Digest of Technical Papers, 2009, 40(1):1438-1441.