

J-T 制冷器管路对稳定平台的干扰力矩分析

王春生^{1,2}, 宁汝新¹, 刘检华¹, 尚 炜¹

(1. 北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081; 2. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:在对作用于稳定平台上的各种干扰力矩进行综合分析的基础上,对 J-T 制冷器供气管路所引起干扰力矩的特性进行了详细分析,并提出了计算公式和减小此项干扰力矩的有效措施。

关键词:稳定平台;干扰力矩;J-T 制冷器;红外成像导引头;虚拟装配

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

Analysis of Disturbance Torque on Stabilized Platform Caused by J-T Cryocooler's Air-feed Tube

WANG Chun-sheng^{1,2}, NING Ru-xin¹, LIU Jian-hua¹, SHANG Wei¹

(1. School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In the missiles which adopt IR imaging guidance system, J-T cryocooler is often used with the virtues of rapid performance and low cost. However, the air feed tube of J-T cryocooler causes disturbance torque which is exerted on the stabilized platform and then reduces the homing precision. In this paper, all kinds of the disturbance torques exerted on the platform are briefly analyzed first. Then, characteristics of the disturbance torque caused by the elastic air-feed tube are studied, and the calculating formulae are given. Based on the analysis above, practical methods are proposed in order to effectively reduce this disturbance torque.

Key words: stabilized platform; disturbance torque; J-T cryocooler; IR image seeker; virtual assembly

1 引言

红外成像制导具有精度高、隐蔽性好、昼/夜工作等优点,已经成为精确制导领域研究的热点^[1]。在制导用红外成像系统的研发过程中,存在着一些特殊技术问题,J-T 制冷器供气管路对稳定平台的干扰就是其中之一。

制导用红外成像系统通常安装在导引头稳定平台上,随平台一起在方位和俯仰两个方向上做扫描运动,以搜索、捕获目标。系统多采用 J-T 制冷器,其供气管路一端随平台运动,另一端固定于弹上气瓶。对稳定平台而言,系统可等效为一弹簧负载,在平台转动不同角度时对其产生大小不同的干扰力矩。同时,在红外成像导引头伺服系统中,还存在着由于摩擦和质量不平衡而引起的干扰力矩。这些干

扰力矩的存在,严重影响了稳定平台的精度和稳定性。

本文将对作用于稳定平台上的各种干扰力矩进行综合分析,并重点对 J-T 制冷器供气管路所引起的干扰力矩进行分析和计算,介绍干扰力矩的测量手段和减小干扰力矩的措施。

2 平台干扰力矩综合分析

稳定平台主要完成对成像系统的空间稳定、伺服控制等功能。对于采用陀螺稳定平台的凝视红外成像导引头,其系统框图如图 1 所示。

图中内回路为稳定控制回路,它起到隔离弹体

作者简介:王春生(1974-),男,在读博士生,高级工程师,研究方向为数字化设计与制造。E-mail:w_chunsheng2003@163.com
收稿日期:2008-09-18 **修订日期:**2008-11-03

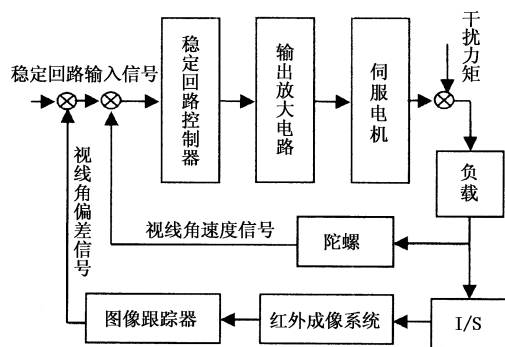


图1 稳定平台系统框图

扰动的作用,同时也是实现视场搜索和稳定跟踪的基础。外回路为跟踪回路,红外成像系统摄取的红外图像进入该回路,经过图像处理,输出对目标的视线角偏差(视线与弹目连线的偏差),即为平台稳定控制回路的输入,该信号引起稳定回路的负反馈,带动红外成像系统向减小视线角偏差的方向运动,从而实现红外成像系统视线始终指向目标。与红外成像系统一同固连在稳定平台上的陀螺仪输出的视线角速度信号将作为导引头输出信号^[2]。在此系统中,耦合到平台台体上的干扰力矩将对控制系统造成影响,引起制导误差。

在稳定平台中,影响较大的干扰力矩主要有三种:摩擦力矩 M_F 、质量不平衡力矩 M_B 和弹性力矩 M_S ^[3]。

摩擦力矩 M_F 是由轴系摩擦引起的。根据稳定平台机械结构,轴系摩擦主要存在于框架轴承、电机轴承、电位器轴承、力矩电机定子与转子之间、力矩电机转子与电刷之间以及电位器与其转动轴之间。摩擦力矩可由下式计算:

$$M_F = -\mu N R \text{Sign}(\omega) \quad (1)$$

式中, μ 为滑动摩擦系数; N 为平台对支持表面正压力; R 为摩擦力力臂; Sign 为符号函数; ω 为平台角速度。

质量不平衡力矩 M_B 是由平台及其上负载的质量分布相对于转动中心不平衡而引起的,可由下式计算:

$$M_B = Mgr \cos(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

式中, M 为平台质量; r 为形心与质心之间距离; α 为形心与质心之间连线与水平线夹角。

弹性力矩 M_S 主要是由平台上各负载引出导线的弹性约束造成。主要有:电源线、陀螺信号线、红外成像系统信号线、电机驱动电缆、角度传感器引线等,可由下式计算:

$$M_S = K_m \theta \quad (3)$$

式中, K_m 为弹性系数; θ 为平台转角。

在平台转动的每一个角位置上,电机所要克服的干扰力矩 M_D 是该处摩擦力矩 M_F 、质量不平衡力矩 M_B 和弹性力矩 M_S 综合作用的结果,即:

$$M_D = M_F + M_B + M_S \quad (4)$$

3 制冷管路干扰力矩分析

为了提高红外成像系统的探测能力,红外焦平面探测器需制冷到特定的低温条件下工作。凝视红外成像制导导弹上所用制冷器主要采用气体膨胀制冷的原理,典型产品有 J-T 制冷器与斯特林循环制冷器两大类。J-T 制冷器具有结构紧凑、体积小、质量轻、启动快、成本低等优点,所以其在红外成像制导导弹中得到了广泛的应用^[4]。

J-T 制冷器是利用高压气体的节流降温效应制冷的,因此系统中需包含高压气源及供气管路。供气管路为薄壁金属管,其一端连接于制冷器,并随平台运动,另一端固定于弹上气瓶。当平台运动时,管路受其牵引,相应产生变形并对平台施加反作用力矩,在平台转动不同角度时,所施加的反作用力矩也不同。为减小此影响并防止管路在运动过程中受损,需将其特定部位盘成螺旋状,如图2所示。

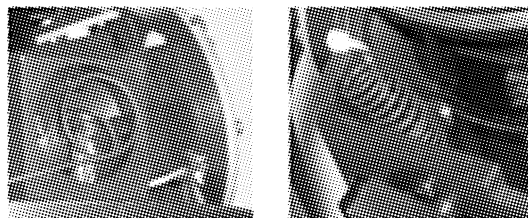


图2 盘成螺旋状的管路

对于稳定平台而言,盘成螺旋状的管路可等效为弹簧负载。以一种两轴凝视红外成像导引头为例,如图3所示,由正交的方位、俯仰框组成,采用速率陀螺稳定方式,直流力矩电机驱动。平台内环组件通过轴承与外环框架相连接,外环组件通过外环伺服电机与导引头本体相连接。管路对平台的干扰力矩即为弹簧弹力相对于平台转轴的作用力矩。

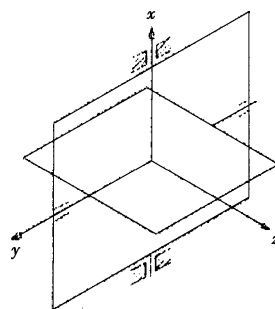


图3 稳定平台示意图

图2中所示的两种盘绕方式可分别等效为蜗卷弹簧和圆柱弹簧。蜗卷弹簧分析如图4所示。按弹簧受力-变形公式进行分析^[5],对于蜗卷弹簧,其干扰力矩可由下式计算:

$$M_w = \frac{EI}{L}\theta \quad (5)$$

式中, E 为管路弹性模量; I 为管路截面惯性矩; L 为蜗卷弹簧有效长度; θ 为平台转角。

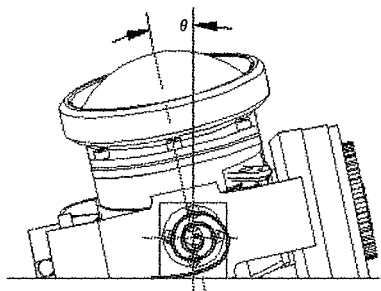


图4 蜗卷弹簧分析

对于圆柱弹簧,其干扰力矩可由下式计算:

$$M_c = \frac{GD_2}{8C_n^4} L^2 \tan\theta \quad (6)$$

式中, G 为管路剪切模量; D_2 为弹簧中径; C 为旋绕比, $C = D_2/d$; d 为管路材料直径; n 为弹簧工作圈数; L 为弹簧中心线到转动轴距离; θ 为平台转角。圆柱弹簧分析如图5所示。

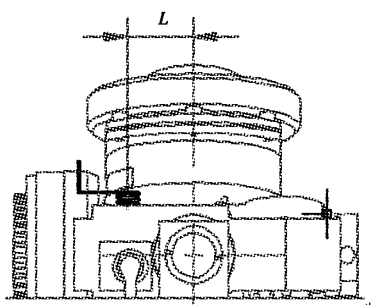


图5 圆柱弹簧分析

该项干扰力矩属于弹性干扰力矩(M_s),与平台转角有关,在平台运动的过程中不断变化,不能通过配平或施加静态偏置来解决,对稳定平台的控制非常不利。

4 现有工作方式存在的问题

4.1 管路布局设计

管路布局设计的结果直接决定了干扰力矩的大小,若固定点或自由长度选择不合理,就会制约管路的运动,加大干扰力矩。同时,也加大了管路本身受损的可能性。

J-T 制冷器供气管路的布局设计和装配过程

如下:首先制作1:1的实物样机,设计师在实物样机上用铅丝进行实地测量,产生管路走向的三维空间形状,以此为依据确定管路长度及弯曲形态;按铅丝模型制作管路之后进行安装,在安装过程中检验可装配性;最后驱动平台转动检查连接、固定是否合理,与其他结构件是否干涉,还要分别测量管路安装前后电机的运行参数,以判断干扰程度,若超出允许值则必须重新选择管路走向和固定点位置。由于难以对工作状态下的运动轨迹和干扰力矩进行预测,以上过程需经多次反复才能得到满足要求的方案,必要时还需对上游环节进行修改。

这一过程主要存在以下问题:

- 1) 现场模拟试装,靠实物样件传递设计信息,设计手段落后;
- 2) 缺少对工作状态下的运动变形和干扰力矩预测,在装配中发现问题后导致设计更改,影响产品的研制周期;
- 3) 设计过程不规范,导致实际产品中管路装配的一致性差,可维护性差,可靠性难以保证。

总之,传统的布局设计是经验设计,存在盲目性和风险性,亟待改进。

4.2 管路干扰力矩测量

现有干扰力矩的测量方式为间接法测量,即通过检测力矩电机的电流信号获得干扰力矩的信息。在安装管路之前先对平台及其负载进行配平,并测量电机启动时以及运动过程中的电学参数。安装管路后,再次测量相关的电学参数,二者相比较并对应电机的力矩特性曲线,即可判断管路干扰的程度。

这一测量方式所得到的是综合性的结果,包含了摩擦力矩 M_F 、质量不平衡力矩 M_B 的作用结果,无法对管路的影响进行定量分析,也无法与公式(5)、式(6)的计算结果相对应。

5 减小干扰力矩的措施

5.1 设计方法的改进

如图6所示,采用虚拟装配技术在设计前期获得合理的布局方案,并在完整装配体内进行运动与受力分析。

采用该方法可做到:

- 1) 综合考虑装配空间的制约、结构件的装配以及管路的走向与固定方案,可视化地判断各种装配工艺方案的优劣。

(下转第289页)

5 结束语

本文在工程化定性分析和分类思想的指导下,基于提出的交点判断和点矢量位置判断准则,给出了获得最优发射机动决策方案的具体过程和步骤,并利用 Matlab 语言设计了动态寻优仿真系统。通过仿真分析表明,本文给出的方法较好地解决了舰艇末端防御反舰导弹过程中烟幕的布放和舰艇机动方向的最优化问题。但在基于工程化考虑的同时,也忽略了一些问题,比如烟幕的形成过程和扩散过程等^[4],如果将这些因素考虑进来,仿真结果将会更加接近真实战场环境下烟幕布放和舰艇机动的作战效果。

(上接第 279 页)

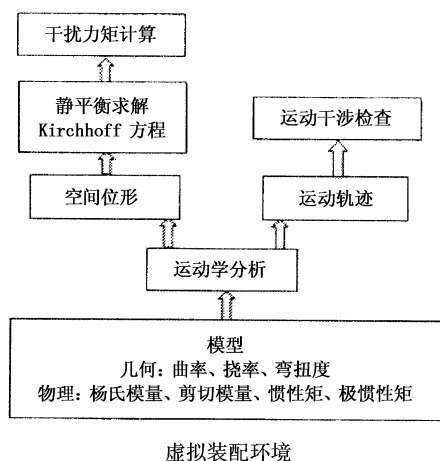


图6 管路虚拟装配分析

2)以虚拟样机代替实物样机,以虚拟装配过程代替实际试装过程,可缩短研制周期、降低研制风险及成本并可对更多的布局方案进行试验,从中选择最优的方案。

3)以运动变形与力矩分析结果为基础,将管路的布局设计由经验性设计转为科学的、可预知的设计。

5.2 测量方法的改进

为了对管路的影响进行定量分析,应直接对管路在运动过程中的变形与应变进行测量,可采用如图7所示的非接触光学测量方式进行。

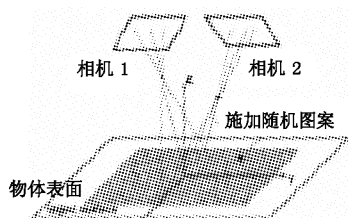


图7 测量原理

参考文献:

- [1] 高东华. 舰艇电子对抗作战指挥[M]. 北京:海潮出版社,2002.
- [2] 高东华. 舰艇电子对抗战术[M]. 北京:解放军出版社,2004.
- [3] 高东华,张祥林. 舰载烟幕干扰对抗激光制导反舰导弹的战术研究[J]. 激光与红外, 2005, 35(6): 427-429.
- [4] 姜宁,胡维礼,马颖,等. 舰艇电子对抗系统的仿真研究[J]. 系统工程与电子技术,2001,23(4):91-93.

通过两支高速 CCD 摄像机以及专门的图形匹配算法,根据三角测量原理确定管路表面各点的三维坐标,实现全场的、非接触式的三维变形和应变的测量。

将以上两项措施结合起来,用以改进 J-T 制冷器供气管路的布局设计与装配过程,可有效地将干扰力矩控制在允许的范围内。

6 结论

J-T 制冷器供气管路对凝视红外成像导引头稳定平台产生干扰力矩,该项干扰的存在影响了稳定平台的控制精度。本文在对其进行详细分析的基础上,提出应在研发前期引入虚拟装配技术设计管路布局方案,结合管路变形与应变的直接测量技术,从源头上解决此问题。

参考文献:

- [1] 王春生,喻松林,高山. 一种精确制导用凝视红外成像系统设计[J]. 激光与红外,2007,37(4):332-334.
- [2] 张盈华,万中南. 红外凝视成像导引头随动系统误差分析[J]. 红外与激光工程,2006,35(1):25-30.
- [3] 武强,纪明. 光电稳定/跟踪平台的干扰力矩自动化检测识别[J]. 应用光学,2001,22(3):41-44.
- [4] 王三煜. 制冷器在导弹系统中的应用[J]. 红外技术,2005,9,27(5):399-402.
- [5] 张英会. 弹簧[M]. 北京:机械工业出版社,1980.
- [6] J C L'eon, U Gandiaga, D Dupont. Modeling flexible parts for virtual reality assembly simulations which interact with their environment [C]// IEEE Int. Conf. on Shape Modeling and Applications, May, 2001, 7(11): 335-344.