

惯性约束核聚变并联靶定位系统热分析

冯 斌^{1,2} 刘彦武¹ 贾怀庭² 王礼权² 杨 慧¹ 吕志伟¹

(¹ 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150080
² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 并联靶定位系统是一种新结构型式的惯性约束核聚变(ICF)靶定位系统。在并联靶定位系统工作原理及热传递路径分析基础上建立了系统热平衡方程,对热源进行了理论分析和实验测试,确定了热源输出功率及温度。在此基础上,对并联靶定位机构进行了热分析,获得关键部位温度,为并联靶定位系统结构设计及精度分析提供了理论依据。

关键词 惯性约束核聚变;并联;定位;热分析

中图分类号 TP242.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0602007

Thermal Analysis on Inertial Confinement Fusion Parallel Target Positioning System

Feng Bin^{1,2} Liu Yanwu¹ Jia Huaiting² Wang Liquan² Yang Hui¹ Lü Zhiwei¹

(¹ School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China
² Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The parallel target positioning system is a new type of target positioning system used in the inertial confinement fusion (ICF). The heat balance equation of the system is established based on analysis of principle of parallel target positioning system and heat transfer path. By analyzing the heat source in theory and experiment, heat output power and temperature are determined. The temperature of the key parts of parallel target positioning mechanism is gotten by thermal analysis, which provides a theoretical basis for the design and accuracy analysis of the parallel target positioning system.

Key words inertial confinement fusion; parallel; positioning; thermal analysis

OCIS codes 350.2660; 000.2170; 000.6850; 120.6810

1 引 言

在惯性约束核聚变(ICF)装置运行过程中,需要通过靶支撑定位系统将靶定位到直径为数米的真空靶室中心附近的一个很小范围内,靶支撑定位装置有 6 维精密调整自由度,且在较长悬臂工作状态下,三维平动运动定位精度达到微米级,三维转动自由度定位精度达到角分级^[1],并联靶定位系统是近几年发展出的一种新型靶定位系统,得到了广泛应用^[1-2]。

并联靶定位系统工作于真空靶室,前端与负载相连,后端通过机构与靶室相连并支撑,为室温状态,内部 6 个步进电机线圈产生热量,导致温升,不平衡热量将会在并联机构各部件中传递引起温度变化。并联机构属于高精度定位机构,热传递将会引起其结构的热形变^[3-5],从而影响靶点定位精度及位置稳定性^[6-8]。首先建立了系统热平衡方程,并对热源进行了分析及实验测试,在此基础上对各关键部件进行热分析及温度计算。

收稿日期: 2013-10-15; **收到修改稿日期**: 2013-12-28

作者简介: 冯 斌(1976—),男,博士研究生,主要从事惯性约束聚变靶场系统方面的研究。

E-mail: fengbincaep@163.com

导师简介: 吕志伟(1961—),男,博士,教授,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: zw-lu@sohu.com

2 并联靶定位系统热平衡方程

6 自由度并联靶定位系统原理简图如图 1 所示,主要由动平台、定平台、两平台之间的 6 个支链以及驱动装置组成。为了降低所占空间锥角,机器人采用 6-PTRT 结构形式,以 6 个下铰链点沿 Z 轴平移运动 $V_i(i=1, 2, \dots, 6)$ 作为主动运动。

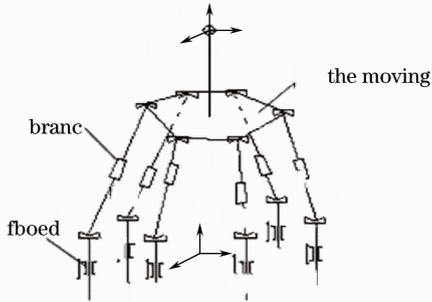


图 1 并联机器人结构图

Fig. 1 Schematic diagram of parallel robot

工作时,靶定位系统动作时间短,大部分时间步进电机只通入电流而不输出转矩。因为线圈中一直通入电流,电机线圈产生热量 Q_A 成为并联机构的热源,通过热辐射、热传导传达到其他部位。热量传递的路径为^[9]

1) 线圈产生热量有 2 条传递路径:一部分通过

热辐射传递到电机内壁 Q_{xn} ,再通过热传导使外壁升温。另一部分通过外伸轴导热 Q_{xz} ,从连接件和传动件传递到定平台端部。

2) 电机外壳上的热量传递:一部分是电机外壳和定平台内壁的热辐射 Q_{mz} ,另一部分是从电机端部向外界空间的热辐射 Q_{mk} 。

3) 定平台热量传递有 5 条路径:向安装基座的热辐射 Q_{zt} ,向动平台辐射的热量 Q_{zs} ,向安装基座在靶室上的支撑和运动机构的热传导 Q_{zj} ,向靶室内壁的辐射热量 Q_{zb} ,通过 6 个连杆传导的热量 Q_{zg} 。

根据热传递路径可列出如下热平衡方程:

$$Q_A = Q_{xn} + Q_{xz}, \quad (1)$$

$$Q_{xn} = Q_{mz} + Q_{mk}, \quad (2)$$

$$Q_{xz} + Q_{mz} = Q_z = Q_{zt} + Q_{zs} + Q_{zj} + Q_{zb} + Q_{zg}, \quad (3)$$

(1)式是电机线圈热平衡方程;(2)式是电机外壳热平衡方程;(3)式是定平台的热平衡方程。联立以上 3 式,得到总热平衡方程如下:

$$Q_A = Q_{zt} + Q_{zs} + Q_{zj} + Q_{zb} + Q_{zg} + Q_{mk}. \quad (4)$$

6 自由度并联机构的定平台、安装基座、动平台采用铝合金,真空步进电机和连杆采用不锈钢,材料参数如表 1 所示。

表 1 材料物性参数表

Table 1 Material parameters

Material	Thermal conductivity / (W/m · k)	Specific heat / (J/kg · °C)	Density / (kg/m ³)	Emissivity	Modulus /Pa	Poisson ratio	Efficient of expansion/(k ⁻¹)
Stainless steel	49.8	460	7850	0.08	2×10 ¹¹	0.3	1.0×10 ⁻⁵
Aluminum	236	902	2700	0.05	7×10 ¹⁰	0.33	2.16×10 ⁻⁵

3 热源分析

6 自由度并联靶定位系统工作于真空靶室内,实验室环境恒温,其主要热源为电机生热,热传递过程主要为辐射和传导。选用的步进电机额定相电流为 2.5 A,相电阻为 0.5Ω,减速比为 6:1。可承受温度范围为 -10 °C ~ 200 °C,假设工作时线圈温度为 150 °C,即 $T_L=423$ K。电机外壳为不锈钢材质,内径为 34 mm,外径为 42 mm,长度为 73 mm。电机大部分时间仅通入电流而不执行动作,故其生热量 Q_m 可认为仅有线圈发热,生热电流为半电流,即 1.25 A。单个电机的生热功率 $Q_m = I^2 \cdot R_a = 0.78$ W。

并联机构采用 6 个步进电机进行驱动,总生热功率 $Q_A = 6Q_m = 4.68$ W。

3.1 线圈到电机壳体内壁的热辐射

根据斯特潘-波尔兹曼定律,两个灰体之间的辐射热量 Q_{12} 为^[10]

$$Q_{12} = \epsilon_s A \sigma \phi (T_1^4 - T_2^4), \quad (5)$$

式中 ϵ_s 为系统发射率, σ 为斯特潘-波尔兹曼常数, A 为辐射面积, ϕ 为辐射角系数, T_1 、 T_2 为物体温度。

线圈产生热量 Q_m 中, Q_{xn} 是通过线圈与电机内壁间辐射的热量, Q_{xz} 是通过电机轴传导到定平台的热量。若电机内表面温度为 $T_1=320$ K,由(5)式可计算得 $Q'_{xn}=0.761$ W。

由此可知机壳和线圈间辐射热量占绝大部分,机壳内壁的实际温度大于 300 K,取线圈向电机机壳辐射热量为 $Q_{xn}=0.702$ W。通过外伸轴向定平台传递的热量为 $Q_{xs}=10\% \times Q_m=0.078$ W。将修

正的参数 $Q_{xn}=0.702\text{ W}$ 代入(5)式,得电机内壁温度 $T_{nm}=332.12\text{ K}$ 。

3.2 电机内壁到外壁温差

两固体之间的传导热功率 Q 符合傅里叶定律^[10-11]:

$$Q = \lambda A \Delta T / \Delta n, \quad (6)$$

式中 λ 为导热系数, A 为传热面积, T 为温度, n 为传热距离。将电机机壳厚度、表面积、传导热 Q_{xn} , 内壁温度带入(6)式,可得内壁和外壁的温差 $\Delta T = 7 \times 10^{-3}\text{ K}$,可知电机内外壳温度基本相等, $T_{mw} = 332.12\text{ K}$ 。

3.3 电机温度测试

使用红外测温仪测量电机机壳外表面温升,在 340 min 时间长度内,每隔 10 min 测量一次数据,直至电机温度上升不明显,达到热平衡为止,测得电机温升时间曲线如图 2 所示。图 2 中,虚线是时间与温度的点线图,实线是利用最小二乘法拟合的曲线。

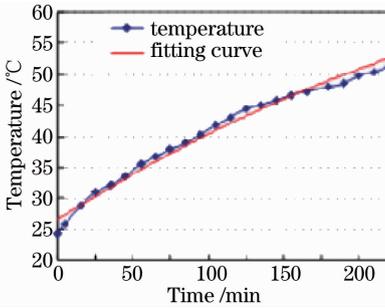


图 2 电机机壳温升时间曲线

Fig. 2 Motor shell temperature-time curve

通过分析温升时间曲线知,电机温升在前 120 min 内上升速率较快,后 220 min 内上升速率相对较低,稳定时电机机壳温度约为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2.2 节中电机机壳外壁的理论计算温度为 332.12 K ,即 $59.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过对比,实验与计算结果相差不大于 3 K ,因此认定理论计算结果可信,可作为后续计算输入条件。

4 并联靶定位系统热分析

4.1 电机和定平台底部传热

并联靶定位系统受电机外壳辐射及电机轴端热传导影响产生温度变化。电机的壳体外表面和端面向外界辐射热量 Q_{mz} ,与表面积成正比,于是有

$$Q_{mz}/Q_{mk} = A_m/A_t, \quad (7)$$

式中 Q_{mz} 为单个电机向定平台辐射的热量; Q_{mk} 为电机两端向周围空间内的辐射热量; A_m 为电机壳体外表面积; A_t 为电机两端面积。

由(2)式,(7)式及 Q_{xn} 可解得: $Q_{mz} = 0.545\text{ W}$, $Q_{mk} = 0.157\text{ W}$ 。

6 个电机辐射到定平台上的总热量为: $Q_{Mz} = 6Q_{mz} = 3.27\text{ W}$ 。

将定平台内表面和电机外壳之间的辐射热 Q_{Mz} ,电机外表面温度及辐射传热参数带入(5)式,解得定平台内表面温度: $T_{bn} = 298.64\text{ K}$ 。

电机输出轴到并联机构定平台传热模型可简化为:输出轴热阻 R_w ,减速热阻 R_x ,连接热阻 R_s ,传动热阻 R_g ,后两个热阻先并联,再与前者串联。电机线圈产生的部分热量作为热源通过合成热阻 R_1 传导到定平台底部,如图 3 所示。

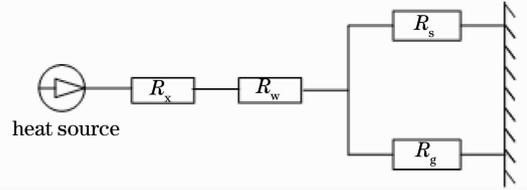


图 3 电机到主支座底部的热路图

Fig. 3 Heat map of motor to main bearing bottom

合成热阻可表示为

$$R_1 = (R_w + R_x) + R_g // R_s, \quad (8)$$

式中“+”表示热阻串联关系,“//”表示热阻并联关系,根据各部分材料及结构参数可计算出 $R_1 = 33.63\text{ K/W}$ 。

电机输出轴与定平台底部的温差为

$$\Delta T = Q_{xz} R_1, \quad (9)$$

将相应参数带入(9)式,得 $\Delta T = 2.623\text{ K}$ 。

于是,得到并联底部温度为 $T_b = T_{mw} - \Delta T = 329.49\text{ K}$ 。

4.2 定平台热分析及温度求解

定平台内壁到外壁、底部到端部都是通过热传导来实现热量传递的,通过选取沿径向和轴向在顶部中间层温度的平均值来等效端部温度。

将径向热传导热功率 Q_{Mz} 、定平台内表面积、径向厚度及材料参数带入(6)式,解得径向温差为 0.003 K ,可知定平台径向温差很小,基本等温,可知单独径向传热时顶部中间层温度为 $T_{jn} = T_{bn} = 298.64\text{ K}$ 。

将轴向热传导功率 $Q_{zz} = 6Q_{xz} = 0.468\text{ W}$ 、截面积、长度及材料参数带入(6)式,解得轴向温差为 0.003 K ,可知定平台轴向温差很小,也基本等温,于是单独轴向传热时顶部中间层温度为 $T_{zz} = T_b = 329.49\text{ K}$ 。

综合径向及轴向温度,定平台温度 $T_{top} =$

$$(T_{jz} + T_{zz})/2 = 314.06 \text{ K}.$$

4.3 定平台温度求解

假设动平台设定为室温,将定平台温度 T_{top} 、定平台温度及热辐射参数代入(5)式,解得定平台向动平台辐射热功率 $Q'_{\text{zd}} = 0.057 \text{ W}$,有 $Q'_{\text{zd}} = 1.5\% Q_z$,因为动平台下表面的实际温度高于室温,所以取辐射到动平台的热量 $Q_{\text{zd}} = 1\% \times Q_z = 0.03738 \text{ W}$ 。同理,可计算出定平台向靶室内表面的热辐射 $Q_{\text{zb}} = 60\% \times Q_z = 2.2428 \text{ W}$,向安装基座传导热 $Q_{\text{zj}} = 15\% \times Q_z = 0.5607 \text{ W}$ 。

将以上计算结果代入定平台热平衡方程(3)式,可得到经过连杆传导的热量 $Q_{\text{zg}} = 4.32\% \times Q_z = 0.164 \text{ W}$ 。

只考虑辐射传热时,将定平台向动平台辐射热 Q_{zd} 、定平台顶部温度 T_{top} 及热辐射参数代入(5)式,得动平台下表面温度 $T_{\text{sl}} = 305.10 \text{ K}$ 。

根据支链结构、尺寸参数及材料参数,计算得单个支链的传导热阻 $R_c = 11.335 \text{ K/W}$,因系统有6个支链并联,所以总热阻

$$R_\lambda = R_c/6 = 1.893 \text{ K/W}. \quad (10)$$

只考虑传导传热时,连杆底部到顶部的温差 $\Delta T_g = Q_{\text{zg}} R_\lambda = 0.305 \text{ K}$,连杆底部与定平台顶部接触,两者温度相同,则连杆顶部温度为

$$T_{\text{gt}} = T_{\text{top}} - \Delta T_g = 313.757 \text{ K}. \quad (11)$$

连杆顶部与动平台下表面接触,温度相同,由(10),(11)式可计算出动平台下表面温度 $T_{\text{dx}} = (T_{\text{dl}} + T_{\text{db}})/2 = 309.429 \text{ K}$ 。

动平台下表面到上表面只有热传导作用,由于动平台在传热方向面积大、厚度薄,因此热极小,上下表面温差也将很小,可以认为定平台温度 $T_{\text{dx}} = 309.429 \text{ K}$ 。

5 结 论

建立了ICF并联式靶定位系统热平衡方程,对热源输出功率及表面温度进行了理论计算,并通过实验对计算结果的正确性进行了验证,测试结果表明热源分析结果可信。以热源分析结果为输入,利用传热学理论对靶定位系统关键部件进行了热分析,获取了各部件温度,为系统设计及精度分析提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 Sun Lining, Liu Yanwu, Qu Dongsheng, *et al.*. ICF target positioning robot system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8): 1303-1307.
- 2 孙立宁, 刘彦武, 曲东升, 等. ICF靶支撑定位系统研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(8): 1303-1307.
- 3 Yanwu Liu, Lining Sun, Dongsheng Qu, *et al.*. Design of ICF target positioning robot system[C]. Industrial Electronics and Applications, 2007. 1286-1291.
- 4 Shi Jinfeng, Wu Qingwen, Zhang Jianping, *et al.*. Thermal-optical analysis for optical window of high-altitude and high-speed aerial camera[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0422004.
- 5 石进峰, 吴清文, 张建萍, 等. 高空高速航空相机光学窗口的热光学分析[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0422004.
- 6 Xu Rongwei, Liu Liren, Liu Hongzhan, *et al.*. Support schemes and thermal deformation analysis of large-aperture interferometer mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 809-815.
- 7 徐荣伟, 刘立人, 刘宏展, 等. 大型干涉仪镜子的支承设计与温度变形分析[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 809-815.
- 8 Liu Haiqiang, Guo Zhen, Wang Shiyu, *et al.*. Research on thermal contact conductance using multi-piece heatsink to hold crystal and dissipate heat in solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502006.
- 9 刘海强, 过 振, 王石语, 等. 固体激光器中多块热沉夹持晶体散热时接触热导研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502006.
- 10 Zhang Junwei, Feng Bin, Zhou Yi, *et al.*. Finite element analysis on ambient thermal stability of large aperture optical element[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8): 1295-1298.
- 11 张军伟, 冯 斌, 周 忆, 等. 大口径光学元件环境热稳定性的有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(8): 1295-1298.
- 12 Xu Yuanli, Wu Wenkai, Chen Xueqian, *et al.*. Structural systemic stability design of inertial confinement fusion facility target area[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(10): 1485-1487.
- 13 徐元利, 吴文凯, 陈学前, 等. ICF装置靶场结构总体稳定性设计[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1485-1487.
- 14 Zhang Junwei, Zhou Hai, Zhou Yi, *et al.*. Structure stability index allocation theory and measurement of laser prototype facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1129-1133.
- 15 张军伟, 周 海, 周 忆, 等. 激光原型装置结构稳定性指标划分理论及检测[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(7): 1129-1133.
- 16 Huang Huanming, Feng Huihua, Su Chenguang, *et al.*. Thermal analysis and experiment verification of high vacuum multilayer insulated cryogenic vessel[J]. Cryogenics, 2011, 197(1): 57-60.
- 17 黄欢明, 冯慧华, 苏晨光, 等. 高真空多层绝热低温容器整体热分析及试验验证[J]. 低温工程, 2011, 197(1): 57-60.
- 18 Yang Shiming, Tao Wenshuan. Heat Transfer[M]. 4th ed. Beijing: High Education Press, 2006.
- 19 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第四版, 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 20 Li Huanhuan, Li Shiguang, Ma Xiuhua, *et al.*. Modeling and experimental study at thermal effect of high power bounce-pumped slab amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0302008.
- 21 李环环, 李世光, 马秀华, 等. 高功率Bounce板条放大器链路热补偿仿真及实验验证[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302008.

栏目编辑: 宋梅梅