

注：国家自然科学基金资助项目（No. 61571053）

摘要：为了解决航天航空中角度传感器达到恒温较慢、适应温变环境能力差的问题，设计并制作了一种可以实现快速测量的小型恒温控制系统。本文通过对恒温室结构要求的介绍以及结构模型的建立，且经过设计分析、计算，选定了制作恒温室所需的材料并得到了角度传感器工作在不同温度时快速达到恒温所需的时间。实验结果表明，本系统可以实现快速测量的恒温，也可以达到较好的控温效果，并且具有功率小、体积小、结构简单、操作和控制方法简便、成本低、可靠性强等特点。

关键词：角度传感器；温变环境；快速测量；恒温控制

中图分类号：TP273 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2020)10-0028-05

收稿日期：2020-9-25

基于恒温控制的角度传感器设计

郭郑岩¹ 高国伟¹ 潘宏生²

1. 北京信息科技大学传感器重点实验室，北京 100101；2. 北京国科舰航传感技术有限公司，北京 100101

一、引言

随着角度传感器角度精度的不断提高，应用变得更加广泛，角度传感器被应用到更为恶劣、复杂的环境当中，尤其是复杂的温度环境。

惯性仪表广泛应用在航天、航空、航海等诸多领域，惯性仪表的误差是引起惯性系统误差的主要因素，要提高系统的精度就不可避免的要对仪表误差源和误差特性进行深入的分析、研究，以寻求适当的方法来消除或减小误差。在各种误差中，温度变化引起加速度计输出的漂移^[1-2]是主要误差来源之一。

目前角度传感器测量精度可达到1'，已属于高精度测量设备，设备启动后一般需预热0.5h~1h后进行高精度测量。通过采用温度补偿^[3-4]的方法，角度传感器在工作温度范围内可以保证精确度1'，但传感器仍需处于温度较稳定的工作环境中，且进行精确地测量需要提前预热。为了缩短数据正常输出时间，尽快让角度传感器达到温度平衡点，通常采取以下两点措施：

1、缩短预热时间：通过减少测量元器件散热量，提高测量元器件之间的导热性，通过加快热平衡建立速度来缩短预热时间；

2、提高适应快速温变能力：通过降低测量元器件与外界之间的导热性来减缓测量元器件随温度变化的速度，提高传感器对快速温变的抵抗能力。

两种措施都具有一定的效果。但由于导热、隔热设计使得生产变得复杂，周期加长很多。同时导热和隔热性能的不一致型使得预热时间、抗快速温变能力有较大的离散性。

为了使角度传感器可以快速工作于温变环境并且降低其预热时间，本文提出了使用恒温室为角度传感器的测量提供良好且稳定的温度环境。

二、恒温系统的结构设计

1、技术指标要求

设计结构时首先要考虑技术要求，具体要求如下：

(1) 测量范围：-10°~+10°；

(2) 测量误差：工作温度情况下，传感器水平角度范围内误差应不大于0.008°；

(3) 电源电压：24VDC（±10%）（传感器带电源隔离）；

(4) 工作温度：-40℃~60℃；

(5) 总重量：小于 5kg；

(6) 从上电开始到数据正常输出时间不超过 10min；

(7) 允许外界最大温度变化速度为 $10^{\circ}/h$ 。

从技术要求中可看出，角度传感器测量范围为 $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$ ，该要求是水平角度传感器基本要求；传感器工作温度设定为 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ ，此要求为恒温室的设计计算提供了明确的基础。可以得出，根据技术要求，角度传感器的工作范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim60^{\circ}\text{C}$ ，恒温室的加热和散热系统的设计都要依据该数据来完成。另外，要求角度传感器从上电开始到数据正常输出整个过程的时间不超过 10min，且重量要小于 5kg，这就限制了角度传感器做恒温设计时的总体结构。

综上所述，由于对工作温度、测量误差的要求，限制了系统的加热和散热系统的设计以及角度传感器的选择；质量轻且达到快速测量等要求决定了结构材料的选择以及系统整体结构的设计。

2、方案设计

通过以上要求分析，设计出了一个加热型恒温室，主要原理是通过加热器件，即将电能转换成热能以达到升温；然后再通过热量向外散出达到降温，这样便保证了传感器始终可以稳定地工作在恒温状态。那么这就要求恒温室的所有恒温点必须高于所有的正常工作温度，即按照上面技术指标的要求传感器的工作温度范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim60^{\circ}\text{C}$ ，则恒温箱的恒温点要设置高于 60°C ，比如 70°C 等。

加热型恒温室（小型恒温室）结构规划：

(1) 角度传感器和测温装置均放置于恒温室内部，与外部接口为供电和数字接口；

(2) 高导热、绝缘材料填充到恒温室的空隙内；

(3) 恒温室加热需分区、独立可控，以便使恒温室内部温度更加均衡；

(4) 加工薄壳罩。此壳具有导热、导电等特性，作为恒温室的主支撑框架，并保证恒温室内部温度均衡；（如试验后，证明恒温室不会产生电磁干扰，可以不具备导磁性。）

(5) 加热装置采用柔性 PCB，柔性 PCB 加上电阻，贴在薄壳罩的外表面；

(6) 隔热层置于整个恒温室外，做保温处理。

根据需求中预热要求可知，恒温室设计结构时可考虑以下因素：

(1) 恒温室体积设计越小，所用材料的比热容越小（升温需要的能量少），其预热的时间就越短；

(2) 选用高导热材料来做导热，所使用的材料导热性越好，室内恒温的建立速度越快，其所需预热时间就越短；

(3) 恒温室与外界隔热性越好，恒温室加热功率越小，其体积做的越小。

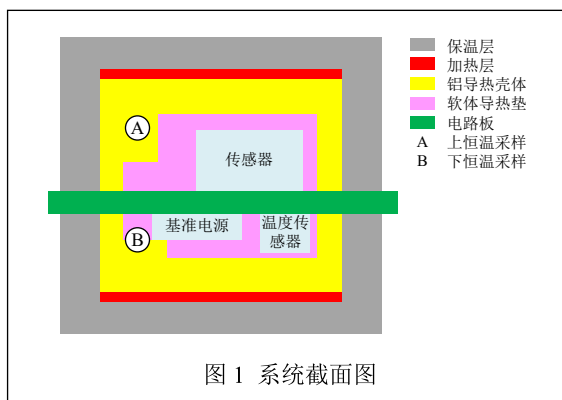
(4) 温度稳定性需要达到 1°C 以内（根据传感器的性能确定的参数）。

通过设计一个良好的恒温室结构，再使用合理的控制算法，便可保证测量元器件工作于一个恒定的温度环境。

3、系统结构整体设计

结构整体设计主要为两大部分：腔体内部的加热系统和外围的保温层，其中加热系统用于给整个恒温室提供热量，以便达到室内角度传感器的所需温度；保温层部分负责保温，保证最大限度地减少室内能量的散失。其中，恒温系统截面图如图 1 所示。

根据技术要求，恒温室需要做得较小，这就对恒温室的整体结构设计定下了基调，因此只在上下两层装有加热层，即恒温室加热分为上下两个独立区，这样可达到更有效地控制，使室内温度更加地均衡。另外，恒温室内部空隙处要填充高导热的材料，因为材料导热性能越好，传热速度越快，达到所需工作温度的时间就越短，效率也就越高。而且，整个恒温室需要与外



界隔热处理，要求保温层保温效果要好。

基于以上原则，可选出合适的导热材料。作为填充缝隙导热材料，绝缘软体硅胶垫效果最佳，它能用于更好的导热。目前，国内一般导热硅胶垫片的导热系数为 $0.8\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})\sim 10\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 之间。这里选用的是 LC 导热硅胶片，导热系数为 $6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ，LC 系列是高性能导热材料，设计用于满足 LED 灯饰（PCB 板与铝基板，铝基板和外壳之间）降低工作温度的导热作用。LC 系列本身固有粘性、柔软、良好的压缩性能以及具有优良的热传导率。连同其低热阻及较高性价比的特点广泛用于光电行业，例如 LED、背光源模组等。它具有高可靠性、可压缩性强、柔软兼有弹性、高导热率、天然粘性，无需额外表面额粘合，满足 ROHS 及 UL 的环境要求等性能优势，因此选用 LC 导热硅胶垫完全满足要求。

导热壳体现在市场上用的最多的是铝，导热比较稳定。铝型材以纯铝或是铝合金为原材料，进过熔炼、切割、挤压等工艺能形成不同截面形状的金属面板，而后在经过一系列表面处理工艺就可铸成表面精致、性能优越稳定的外壳，之所以选择其作为导热材料，主要取决于其以下特点：

(1) 质量轻，铝型材的密度只有 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，约为钢和铜密度 ($7.85\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $8.9\text{g}/\text{cm}^3$) 的三分之一。因此同等体积下的铝型材的质量更轻，而根据技术要求，总质量要求不超过 5kg ，因此铝更适合做导热外壳；

(2) 导热性能好，铝的导热系数为 $204\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ，传热速度快，成本也较低；

(3) 无磁性，其壳要确保无磁性，为了避免干扰信号的传递；

由于恒温室内温度 (70°C) 高于周围环境温度 ($-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$)，则必然会有热量向外散出，因此，保温隔热材料的选取是影响保持恒温、节能的一个关键因素。保温材料如果保温效果不好，将会造成大量的能量损失，则不能满足要求。

这就要求必须要做好系统的保温隔热，其最关键的是对保温材料的选取。综合考虑，满足要求且常用的保温材料为挤塑板 (XPS)。挤塑板是由聚苯乙烯树脂及发泡剂、阻燃剂、色母粒等其它添加剂经挤压

过程制造出的绝热制品，它拥有细腻均匀的表层及闭孔式蜂窝结构^[5]。蜂窝状结构，互相紧密连接。选它做保温，主要是其具有以下性能：

(1) 优良的保温隔热性

导热系数低，其导热系数为 $0.025\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ，远远低于其他的保温材料。实践证明， 20mm 厚的 XPS 保温效果相当于 50mm 厚的 EPS、 120mm 厚的水泥珍珠岩，因此是保温的极佳之选。

(2) 质地轻、使用方便

挤塑板具有轻质、高强度的特性，便于切割、运输，且不易破损、安装方便。

(3) 稳定性、防腐性好，耐热性能好

具有优异的防腐蚀性、防老化性、保温性，在长期使用下不老化、不分解、不产生有害物质，且在高温环境下依然能够保持性能稳定。根据有关资料介绍，挤塑保温板使用寿命在 60 年左右，仍能保持优异的性能。

三、系统建模与计算

1、模型假设与建立

在实验过程中，由于加热元器件导致加热层高温，恒温室内其它物质吸热，温度上升。该过程伴随着复杂的热传导和对流传热现象。为分析方便起见，对此模型进行如下假设：恒温室内充满物质；假设室内导热物质以及保温隔热材料等介质各向同性；忽略间隙间空气的热对流；假设内部所填充的物质与保温层之间是紧密贴合，彼此之间不存在对流、辐射等现象；不考虑外界辐射升温效应，外界空气流速接近于 $0\text{m}/\text{s}$ ，下面建立模型：

此时，则只有室内的加热系统给系统输入热量，但由于保温并不是理想状况，因此必然会有一小部分热量向外散失，因此两者之间就会产生一个差值，可得方程：

$$Q_1 = \int_0^t (P - P_o) dt \quad (1)$$

其中， Q_1 —热量，(J)；

t —恒温箱内加热系统的工作时间，(s)；

P —恒温箱内加热系统所输出的功率，(W)；

P_o —传导散热量, (W)。

热传导是一个物体的不同部位或者相互接触的不同物体间由于存在温度差引起的温度相互交换。因此,在保温层由于热传导的存在必须考虑系统的散热,其遵循傅里叶定律:

$$P_o = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{L} \quad (2)$$

其中, λ —导热系数, W/(m·°C)

A —导体横截面积, (m²);

T_{in} —恒温箱内温度传感器所测得的温度, 也可称之为末温;

T_{out} —恒温箱外部环境的温度;

$T_{in}-T_{out}$ —传热路径两端温差, (°C);

L —材料厚度, (m)。

经过一段时间 t 后, 恒温室内部的温度 T_0 升至温度 T_m , 其所需要的热量为:

$$Q_2 = K \cdot (T_m - T_0) \quad (3)$$

其中, Q_2 —热量, (J);

T_0 —初始温度, 即恒温箱在 $t=0$ 时刻的温度;

$T_m - T_0$ —经过工作 t 时间后的温度变化, (°C);

K —一个固定系数, 由恒温室内部的组成及结构决定, 在恒温室制作完成后就被确定。

根据系统的能量守恒定律可建立起模型, 得如下方程:

$$Q_1 = Q_2 \quad (4)$$

$$\text{即} \int_0^t (P - \lambda \cdot A \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{L}) dt = K \cdot (T_m - T_0) \quad (5)$$

式(5)的左半部分表示恒温室内热量的输入与散热之间的差值, 是经过一段时间 Δt 的积分, 此时在 t 时间内留在室内的热量; 而式子的右半部分则表示室内由温度 T_0 经过时间 Δt 升到温度 T_m 整体所需要的热量。

2、实验的计算

利用实验数据进行计算

角度传感器的工作温度范围在 -40°C ~ 60°C, 恒温箱温度设定值为 70°C, 保温材料的导热系数为 0.025W/°C, 加热时间为 5min~10min, 且经实验测得 K 值大约为 7.7J/°C。当角度传感器工作在 -40°C 时, 请

问恒温箱加热系统的输入功率为多少?

由于恒温室做好以后其大小已经确定, 长为 26mm, 宽为 23mm, 高为 21mm, 其中保温层厚度为 5mm, 则利用上述所建立模型公式计算如下:

其中散热表面积为:

$$A = (26 \times 23 + 26 \times 21 + 23 \times 21) \times 2 \times 10^{-6} = 3.254 \times 10^{-3} \text{m}^2 \quad (6)$$

情况 1: 要求 5min 时达到恒温点, 则有:

(1) 传感器工作在 -40°C 时, 其散热功率为:

$$P_{o1} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{L} = 0.025 \times 3.254 \times 10^{-3} \times \frac{(70 - (-40))}{5 \times 10^{-3}} = 1.790 \text{W} \quad (7)$$

再将 $K=7.7\text{J}/^\circ\text{C}$ 带入式(7), 可求得输入功率:

$$P_1 = \frac{7.7 \times (70 - (-40))}{300} + P_{o1} = 2.823 + 1.790 = 4.613 \text{W} \quad (8)$$

所以求得恒温室加热系统的输入功率约为 5W。

(2) 传感器工作在 20°C 时, 其散热功率为:

$$P_{o2} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{L} = 0.025 \times 3.254 \times 10^{-3} \times \frac{70 - 20}{5 \times 10^{-3}} = 0.814 \text{W} \quad (9)$$

同理, 可求得输入功率:

$$P_2 = \frac{7.7 \times (70 - 20)}{300} + P_{o2} = 1.283 + 0.814 = 2.097 \text{W} \quad (10)$$

即这时恒温室加热系统的输入功率约为 2.1W。

(3) 传感器工作在 60°C 时, 其散热功率为:

$$P_{o3} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{L} = 0.025 \times 3.254 \times 10^{-3} \times \frac{70 - 60}{5 \times 10^{-3}} = 0.163 \text{W} \quad (11)$$

同理, 其输入功率为:

$$P_3 = \frac{7.7 \times (70 - 60)}{300} + P_{o3} = 0.257 + 0.163 = 0.420 \text{W} \quad (12)$$

即这时恒温室加热系统的输入功率约为 0.5W。

情况 2: 10min 时达到稳定工作时的温度, 同理, 可得:

(4) 工作在 -40°C 时, 其输入功率为:

$$P_4 = \frac{7.7 \times (70 - (-40))}{600} + P_{o4} = 1.412 + 1.790 = 3.202 \text{W} \quad (13)$$

这时求得, 恒温室加热系统的输入功率约为 3.3W。

(5) 工作在 20℃时, 其输入功率为:

$$P_5 = \frac{7.7 \times (70 - 20)}{600} + P_{o5} = 0.642 + 0.814 = 1.456W \quad (14)$$

这时求得, 恒温室加热系统的输入功率约为 1.5W。

(6) 工作在 60℃时, 其输入功率为:

$$P_6 = \frac{7.7 \times (70 - 60)}{600} + P_{o6} = 0.128 + 0.163 = 0.291W \quad (15)$$

这时求得, 恒温室加热系统的输入功率约为 0.3W;

由此可看出, 如果在 5min~10min 的情况下达到稳定, 加热系统的输入功率最小约为 0.3W, 最大约为 5W。考虑到保温效果不可能完全达到理想的状态, 为了提高温度稳定速度, 设计时需要留出 2 倍余量, 即输入功率最小约为 0.6W, 最大约为 10W。

经过实验, 可得恒温箱的控温实验结果, 如图 2 所示。设定值为 70℃时, 系统启动后箱内温度在 10min 以内即可达到稳定, 并且一直维持在设定值, 且稳态时温度波动在 1℃ 以内。

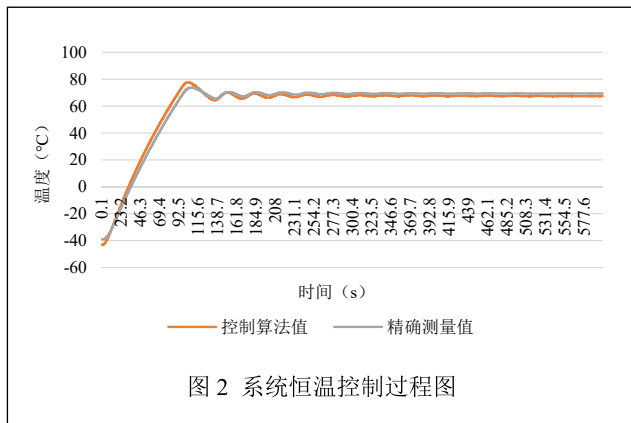


图 2 系统恒温控制过程图

四、结论

实验结果表明, 给角度传感器外加上一个恒温室进行恒温测量的设计方案是可行的, 并且该系统运行可靠, 控制效果较理想。该系统具有结构简单、体积小、控制方法简便等特点。

参考文献

[1] 吴艳, 郑学理, 曾志强, 等. 倾角传感器温度特性研究 [J]. 电子测量技术, 2012, 35(10): 8-12.
 [2] 周庆飞, 徐明龙. 具有温度自补偿功能的高分辨力倾角传感器的设计 [J]. 传感器与微系统, 2012, 31(1): 107-110.

[3] 于娜, 刘志远, 赵佳龙. 倾角传感器的温度补偿研究 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33(10): 14-16.

[4] 龚中良, 刘寒霜. 硅电容式高精度双轴倾角传感器温度漂移补偿研究 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38(07): 43-45.

[5] 潘文学, 王友贵. XPS 板外墙外保温技术性能及应用 [J]. 建筑技术, 2006, (10): 736-739.

Design of Angle Sensor Based on Constant Temperature Control

GUO Zheng-yan¹, GAO Guo-wei¹, PAN Hong-sheng²

(1. Key Laboratory of Sensors, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China; 2. Beijing GKsens Co., Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: In order to solve the problem that the angle sensor is slow to reach a constant temperature and poor ability to adapt to the temperature change environment in aerospace, a small constant temperature control system that can realize rapid measurement is designed and produced. In this paper, through the introduction of the structural requirements of the constant temperature chamber and the establishment of the structural model, and after design analysis and calculation, the materials needed to make the constant temperature chamber are selected and the time required for the angle sensor to quickly reach the constant temperature when working at different temperatures is obtained. The experimental results show that the system can achieve rapid constant temperature measurement, and can also achieve better temperature control effects, and has the characteristics of small power, small size, simple structure, simple operation and control methods, low cost, and strong reliability.

Key words: angle sensor; temperature change environment; fast measurement; constant temperature control

作者简介

郭郑岩: 北京信息科技大学传感器重点实验室, 硕士, 研究方向为新型传感器及系统。

通讯地址: 北京市北四环中路 35 号

邮编: 100101 邮箱: 1227325021@qq.com

高国伟: 北京信息科技大学传感器重点实验室, 博士, 研究方向为新型传感器及系统。

潘宏生: 北京国科航传感技术有限公司, 工程师, 硕士, 主要从事倾角传感器的设计与研发。