

太阳帆板定向驱动机构的研制

赵明晶 张承嘉 高云国 周瑞岩

摘要：本文主要阐述太阳帆板定向驱动机构的设计计算与性能实验。内容包括：传动系统设计，参数选择，力矩与转动惯量的计算，材料与润滑的选择，力学实验与空间性能实验及其实验结果。

一、前 言

太阳帆板定向驱动机构是人造地球卫星上利用太阳能的供电系统。它与一般的固定式太阳能电池相比，能驱动太阳帆板始终对正太阳，因而可提高比功率 1.5 倍，可减少 60% 的帆板面积，是目前国外最为流行的卫星供电系统。国外在七十年代初就已开始启用，国内至今尚未采用。本文阐述的定向驱动机构是按照 1978 年日本发射的 *DSCS-III* 通信卫星上的结构形式设计的，并作为样机研制的。样机的外观如图 1 所示。该机构由步进电机驱动，通过谐波减速器、齿轮副和输出轴带动帆板旋转。在输出轴的另一端设有导电环用以传递功率和信号。由于它工作在宇宙空间，因此该机构采用了钛合金、铝合金、铬镍钼钢、不锈钢轴承等材料 and 镀金、镀铱等固体涂层来防止冷焊和保持真空润滑。该机构经过力学实验和 500h 的 10^{-7} Torr 的高真空性能实验表明，性能良好可靠，其振动强度、加速度过载、冲击过载、真空冷热浸、真空冷热浸交替以及高真空运转等性能均已达到指标要求。

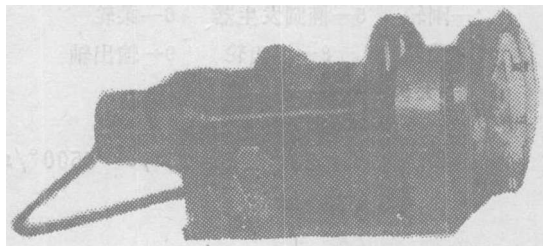


图 1 太阳帆板定向驱动机构的外观

二、技术指标

轨道高度： $H = 724\text{km}$
 帆板角速度： $\omega_0 = 3.636^\circ/\text{min}$
 帆板角加速度： $\epsilon_0 = 1^\circ/\text{s}^2$
 输出力矩： $M_0 = 300\text{kgf}\cdot\text{cm}$
 总传动比： $i_T = 1237.5$
 谐波传动比： $i_H = 120$
 帆板面积： $A_s = 8\text{m}^2$
 帆板重量： $P_s = 60\text{kgf}$

机构重量: $P_m = 15\text{kgf}$
 工作温度: $T_w = -65^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$
 真空度: $V = 10^{-7}\text{Torr}$
 工作寿命: $L_w = 8000\text{h}$

三、传动系统设计

传动系统如图2所示。步进电机1通过十字联轴节带动输入轴3和椭圆发生器5一起旋转。在椭圆发生器5的作用下迫使柔轮6与刚轮4进行啮合，并使柔轮6获得减速，此后，

通过轴7、小齿轮8、大齿轮10和输出轴9带动导电环11和太阳帆板旋转。传动系统的设计计算如下；柔轮、刚轮与齿轮副的参数列于表1。

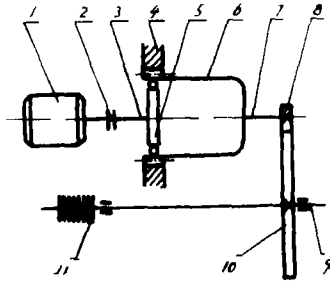


图2 太阳帆板定向驱动机构传动原理图

- 1—步进电机 2—联轴节 3—输入轴
- 4—刚轮 5—椭圆发生器 6—柔轮
- 7—柔轮轴 8—小齿轮 9—输出轴
- 10—大齿轮 11—导电环

表1 柔轮刚轮与齿轮副的参数

	柔轮	刚轮	小齿轮	大齿轮
齿数 Z	240	242	16	165
模数 m	0.3	0.3	1.25	1.25
压力角 α	30°	30°	20°	20°
变位系数 x	—	—	+0.4	-0.4
齿宽 b	10	10	16	16
分圆直径 d	72	72.6	20	206.25

$$\omega_i = f \cdot \delta = 50 \times 1.5 = 75^\circ/\text{s} = 4500^\circ/\text{min}$$

$$\omega_o = 3.636^\circ/\text{min}$$

$$i_T = \frac{\omega_i}{\omega_o} = \frac{4500}{3.636} = 1237.5$$

$$i_T = i_H \cdot i_a = 120 \times 10.3125 = 1237.5$$

$$i_H = \frac{Z_H}{Z_H - Z_a} = \frac{240}{240 - 242} = -120$$

$$i_a = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{165}{16} = 10.3125$$

$$Z_H = 240$$

$$Z_a = 242$$

$$Z_1 = 16$$

$$Z_2 = 165$$

式中 ω_i ——电机轴输入角速度

ω_o ——输出轴角速度

f ——步进电机工作频率, $f = 50\text{Hz}$

δ ——步进电机步距角, $\delta = 1.5^\circ$

- i_T ——总传动比
- i_H ——谐波减速器传动比
- i_G ——齿轮副传动比
- Z_R ——柔轮齿数
- Z_G ——刚轮齿数
- Z_1 ——小齿轮齿数
- Z_2 ——大齿轮齿数

四、转动惯量计算

转动惯量的计算参见图3，其中帆板的转动惯量是作为薄板来计算的。

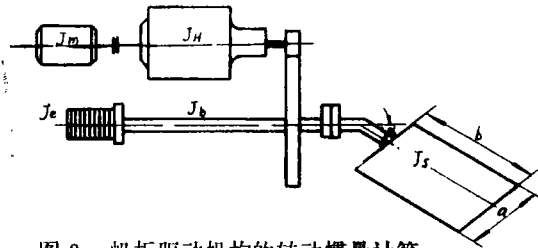


图3 帆板驱动机构的转动惯量计算

$$J = J_m + \frac{J_H}{\eta_H i_H^2} + \frac{J_e + J_b + J_s}{\eta_H \eta_G i_T^2}$$

$$J_s = \frac{P_s}{12g} (\alpha^2 \cos^2 \alpha + 4b^2 \sin^2 \alpha)$$

- 式中
- J ——折算到电机轴的总转动惯量
 - J_m ——电机轴自身转动惯量， $J_m = 0.0025 \text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$
 - J_H ——谐波减速器转动惯量， $J_H = 16.3 \text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$
 - J_e ——导电环转动惯量， $J_e = 0.04 \text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$
 - J_b ——输出轴转动惯量， $J_b = 0.4 \text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$
 - J_s ——帆板绕输出轴的转动惯量
 - η_H ——谐波减速器传动效率， $\eta_H = 0.8$
 - η_G ——齿轮副传动效率， $\eta_G = 0.98$
 - P_s ——帆板重量， $P_s = 60 \text{kgf}$
 - g ——重力加速度， $g = 980 \text{cm/s}^2$
 - a ——帆板宽度， $a = 200 \text{cm}$
 - b ——帆板长度， $b = 400 \text{cm}$
 - α ——帆板对输出轴倾角， $\alpha = 30^\circ$

代入 $J_s = \frac{60}{12 \times 980} (200^2 \cos^2 30^\circ + 4 \times 400^2 \sin^2 30^\circ) = 969.38 \text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$

$$J = 0.0025 + \frac{16.3}{0.8 \times 120^2} + \frac{0.04 + 0.4 + 969.38}{0.8 \times 0.98 \times 1237.5^2} = 0.0047 \text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$$

五、力矩计算

$$M_0 = M_i i_T$$

$$M_i = M_J + M_f$$

$$M_J = J \varepsilon_0 i_T$$

$$M_f = M_{f1} + \frac{M_{f2}}{\eta_B i_H} + \frac{M_{f3}}{\eta_B \eta_O i_T}$$

$$M_{f1} = P_1 f_R R_1$$

$$M_{f2} = P_2 f R_2$$

$$M_{f3} = (P_3 + P_4) f_R R_3$$

式中

M_0 ——输出轴力矩

M_i ——输入轴力矩

M_J ——输入轴惯性力矩

M_f ——输入轴摩擦力矩

M_{f1} ——输入轴自身摩擦力矩

M_{f2} ——柔轮轴自身摩擦力矩

M_{f3} ——输出轴自身摩擦力矩

P_1 ——输入轴重量, $P_1 = 0.3 \text{ kgf}$

P_2 ——柔轮轴重量, $P_2 = 0.68 \text{ kgf}$

P_3 ——输出轴重量, $P_3 = 5.0 \text{ kgf}$

R_1 ——发生器柔性轴承半径, $R_1 = 3.1 \text{ cm}$

R_2 ——刚轮分度圆半径, $R_2 = 3.6 \text{ cm}$

R_3 ——输出轴轴承半径, $R_3 = 5.0 \text{ cm}$

f_R ——真空中滚动摩擦系数, $f_R = 0.1$

f ——真空中滑动摩擦系数, $f = 0.3$

代入

$$M_{f1} = 0.3 \times 0.1 \times 3.1 = 0.093 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$M_{f2} = 0.68 \times 0.3 \times 3.6 = 0.734 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$M_{f3} = (5 + 60) \times 0.1 \times 5 = 32.50 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$M_f = 0.093 + \frac{0.734}{0.8 \times 120} + \frac{32.50}{0.8 \times 0.98 \times 1237.5} = 0.134 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$M_J = 0.0047 \times 1 \times 1237.5 \times \frac{2\pi}{360^\circ} = 0.102 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$M_i = 0.102 + 0.134 = 0.236 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$M_0 = 0.236 \times 1237.5 = 292 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

六、电机参数选择

根据输入轴力矩 M_i 选择 75 BF003 型真空用步进电机, 其参数如下:

相 数: 3 相

步 距: $1.5^\circ/3^\circ$
 频 率: 1250Hz
 额定转矩: 9kgf·cm
 重 量: 1.6kgf
 转动惯量: $2.5gf \cdot cm \cdot s^2$
 功 率: 55W

七、输出轴角加速度计算

$$\varepsilon_m = \frac{M_m - M_f}{J} = \frac{9 - 0.134}{0.0047} \times \frac{360}{2\pi} = 108082/s^2$$

$$\varepsilon'_0 = \frac{\varepsilon_m}{i_T} = \frac{108082}{1237.5} = 87.3^\circ/s^2$$

式中 ε_m ——电机轴角加速度
 ε'_0 ——输出轴实际角加速度
 M_m ——电机输出转矩

八、材料与润滑的选择

对于空间传动机构来说, 由于其工作环境具有高真空、大气腐蚀和温差大等特点, 因此在材料选择方面应当使之具有比重小、强度大、膨胀系数小、性能稳定、不产生冷焊等性能。此外, 也可采用淬火、喷丸、镀金、镀银、镀铬或在材料中掺入石墨、二硫化钼等处理方法来满足空间传动的要求。在润滑方面可以采用硅油、硅脂、炭化物涂层或石墨、二硫化钼、聚酰亚胺等固体干膜和自润滑复合材料 ($WS_2 + C_0 + Ag$) 等^[1, 4]。根据上述原则, 笔者在设计中采用了钛合金、铝合金、铬镍钼钢和不锈钢轴承钢等材料。

表 2 列出了主要零件的材料及其处理方法^[1, 4]。

表2 主要零件的材料及其处理方法

零件名称	材 料	处 理 方 法	润 滑 方 式	零件名称	材 料	处 理 方 法	润 滑 方 式
小 齿 轮	40CrNiMo	淬 火 喷 丸	硅 脂	输 入 轴	1Cr18Ni9Ti		
大 齿 轮	38CrMoAl	离 子 氮 化	硅 脂	输 出 轴	Tc4		
柔 轮	35CrMnSi	调 质 R_c30	硅 脂	壳 体	ZL201	时 效 处 理	
刚 轮	40CrNiMo	调 质 R_c32	硅 脂	螺 钉	Tc4		
轴 承 环	9Cr18	淬 火 冷 处 理	轨 道 镀 金	弹 簧 垫 圈	65Mn	镀 锌	
钢 球	9Cr18	淬 火 冷 处 理		轴 套	LY12	阳 极 化 处 理	
保 持 器	聚 砷						

九、性能实验

1. 实验规范

力学实验规范列于表3；空间性能实验规范列于表4。

表3 力学实验规范

振 动 强 度	振 幅	10~20Hz	15~42Hz	42~200Hz	200~2000Hz
	方 向	1 mm	1 mm	7g	10g
	时 间	轴 向	X、Y、Z	X、Y、Z	X、Y、Z
		半循环 5min 对数扫描			
加 速 度 过 载	最大加速度	轴 向		径 向 与 切 向	
	时 间 次 数	15g 3min 正向1次		2g 3min 正反向各1次	
冲 击 过 载	冲击加速度	10g			
	冲击波形 时 间 次 数	半正弦波 10 ⁻² s 2次			

表4 空间性能实验规范

真 空 冷 热 浸 与 冷 焊		真 空 热 浸	真 空 冷 浸	真 空 冷 焊
	温 度	70℃	-60℃	常 温
	时 间	72h	48h	60min
	真 空 度	10 ⁻⁶ Torr	10 ⁻⁶ Torr	10 ⁻⁶ Torr
真 空 交 冷 热 变	温 度 范 围	-65℃~70℃		
	时 间	120h		
	交 变 速 度	0.4°/min		
	真 空 度	10 ⁻⁶ Torr		
寿 命 实 验	温 度	常 温		
	时 间	500h		
	真 空 度	10 ⁻⁶ Torr		

2. 力学性能实验

力学性能实验包括振动强度、冲击过载和加速度过载实验。振动强度实验是在D-1000型电动式振动台上进行的。振动台由BK公司的正弦振动信号发生器推动。振动台的振动由加速度传感器和振动测试仪测量。测得的振动频率为100Hz、500Hz和1500Hz。

冲击过载实验是在冲击试验台上进行的。由凸轮机构提升试验台进行半正弦波冲击。冲击加速度由加速度传感器和振动测试仪测量。

加速度过载实验是在离心试验机上进行的，将驱动机构置于试验机的转臂上，半径为1.12m，开动试验机后借离心机的高速回转获得加速度过载。离心机的转速为109rpm。

按照表3规范进行实验，结果列于表5。

3. 空间性能实验

空间性能实验包括真空冷热浸、真空冷热浸交替、真空冷焊和真空寿命实验。实验是在超高真空高低温可调真空罐中进行的。实验装置如图4所示。驱动机构置于罐中以3.636°/min的角速度旋转，借机械泵和扩散泵使罐中获得 10^{-7} Torr真空度。罐中温度由热沉的 F_{11} 控制，低温用制冷系统的 F_{13} 冷却 F_{11} ，高温用电炉加热 F_{11} 。温度变化范围为-65℃~70℃。按照表4规范进行实验，结果列于表5。

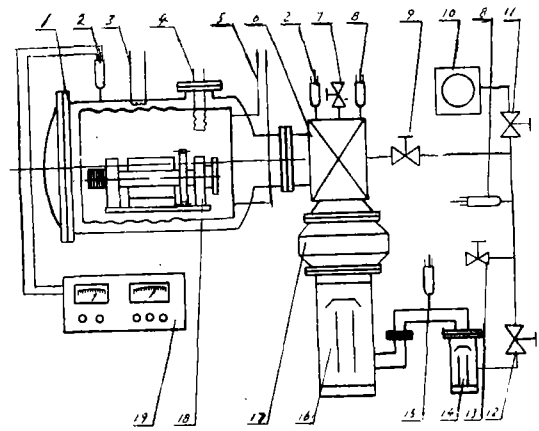


图4 帆板驱动机构的空间性能实验

- 1—真空罐 2—B-A规 3—铂电阻 4—钛升华器 5—热沉 6—超高真空阀 7—放气阀 8—热偶计管 9—超高真空阀 10—机械泵 11—电磁放气阀 12—碟阀 13—放气阀 14—小扩散泵 15—电离计 16—扩散泵 17—液氮 18—帆板驱动机构 19—超高真空计

表5 帆板驱动机构的性能实验结果

序	实验项目	技术指标	实验结果
1	输出轴角速度	$\omega_0 = 3.636^\circ/\text{min}$	$\omega_0 = 3.636^\circ/\text{min}$ (可调)
2	输出轴力矩	$M_0 = 300\text{kgf}\cdot\text{cm}$	$M_0 = 7600\text{kgf}\cdot\text{cm}$
3	机构重量	$P_m = 15\text{kgf}$	$P_m = 16.5\text{kgf}$
4	工作温度	$T_w = -65^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$	$T_w = -65^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$
5	真空度	$V = 10^{-8} \sim 10^{-9}\text{Torr}$	$V = 10^{-7}\text{Torr}$
6	振动强度	200~2000Hz 10g XYZ方向各5min	通过
7	冲击过载	40g 10^{-2} s XYZ方向各2次	通过
8	加速度过载	X方向15g 3min YZ方向2g 3min	通过
9	真空热浸	70℃ 10^{-8}Torr 48h	通过
10	真空冷浸	-65℃ 10^{-8}Torr 48h	通过
11	真空冷热浸交替	-65℃~70℃ 10^{-8}Torr 120h	通过
12	真空冷焊	10^{-8}Torr 60min	10^{-7}Torr 未见冷焊
13	真空寿命	$L_w = 8000\text{h}$	$L_w = 500\text{h}$ 工作正常

参 考 文 献

- [1] H. S. Rauschenbach, Solar Cell Array Design Handbook, 1980, 359~362
- [2] 宇宙空间における潤滑問題小研究会, 昭和52年度, 东京大学宇航所
- [3] 赵明晶, 定向太阳帆板的运动学分析, 光学机械, 1982, No6
- [4] 赵明晶, 国外定向太阳帆板的进展, 国外光机动态, 1983, No4

Investigation of Orientation Mechanism for Solar Cell Array

Zhao Mingjing Zhang Chengjia Gao Yunguo Zhou Ruiyan

Abstract

This paper describes the design calculation and the performance experiment of the orientation mechanism. It includes the design of the drive system, the parameter selection, the calculation of torque and inertia moment, the selection of material and lubrication. Moreover, there are mechanical experiment, space simulation and its data in this paper.