

望远镜传动系统设计

薛俊荪

南京天文仪器研制中心, 210042

概述

多通道太阳望远镜是一台多功能的太阳望远镜。其主镜筒的通光口径为60厘米, 原磁场望远镜的镜筒为35厘米。另配备数只大小不一的镜筒, 组合起来则相当于一台口径为1米的望远镜。

对传动系统的基本要求是: 传动平稳, 工作可靠, 结构稳定。其要求参数如下:

1、赤经驱动	快动:	$100^{\circ} / \text{分}$
	微动:	$2' / \text{分}$
	恒动:	$15' / \text{分}$
	慢动1:	$0.5^{\circ} / \text{分}$
	慢动2:	$6^{\circ} / \text{分}$
2、赤纬驱动	快动:	$30^{\circ} / \text{分}$
	微动:	$2' / \text{分}$
	慢动1:	$0.5^{\circ} / \text{分}$
	慢动2:	$1^{\circ} / \text{分}$

3、镜筒与导行镜的反向同步运动

当光电导行镜工作时, 其主镜筒必须与赤经、赤纬的慢动做反向同步运动。以便于在望远镜观测日面上不同的区域时, 光电导行镜始终对准太阳中心。

一、传动系统的设计

1、驱动系统机构的布局及安排

根据总体方案设计的要求(望远镜的特点, 机架选型, 初步概算, 各结构的布局) 现将驱动系统机构的布局及安排见图1。

2、赤经传动

按设计任务书要求, 赤经传动系统采用经典式的多电机驱动。即用多只电机串级减速, 并叠加差动机构的原理, 来满足不同驱动速度的要求, 且互不干涉。赤经系统的传动链如图2。

恒动电机M4采用90TZ5C磁滞同步电机, 功率为45W, 转速 $n=3000r \cdot P \cdot m$, 额定同步转矩 $1470g \cdot cm$ 。

慢微动电机M2采用110/70S-CZ2, 直流伺服—测速机组, 功率为85W, 转速 $n=3600r \cdot p \cdot m$, 负载转矩 $2300g \cdot cm$, 额定电压24V。

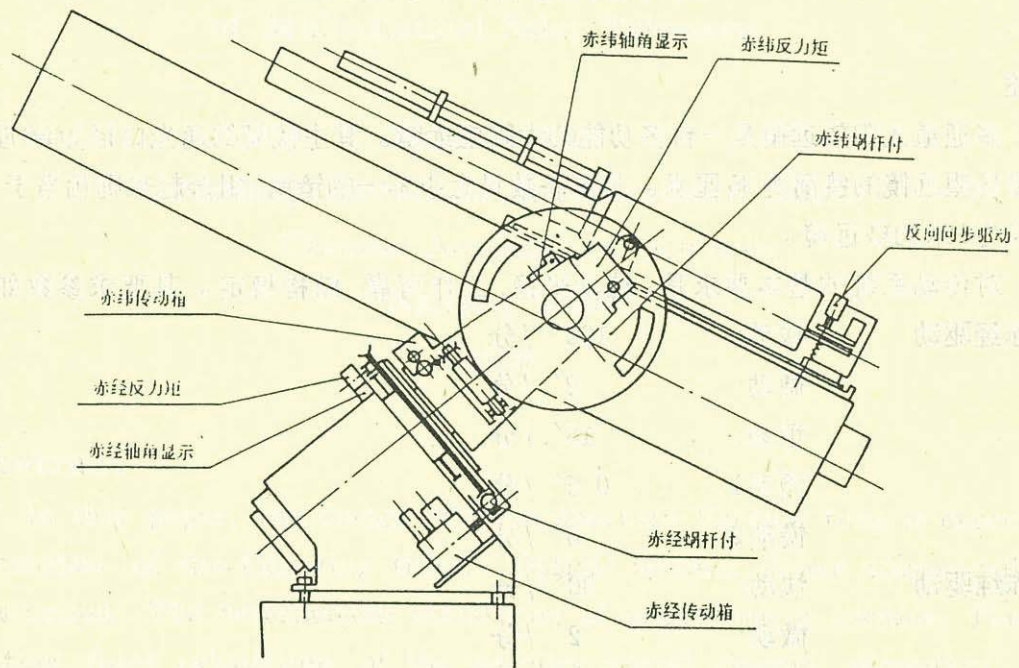


图1 望远镜驱动系统的布局

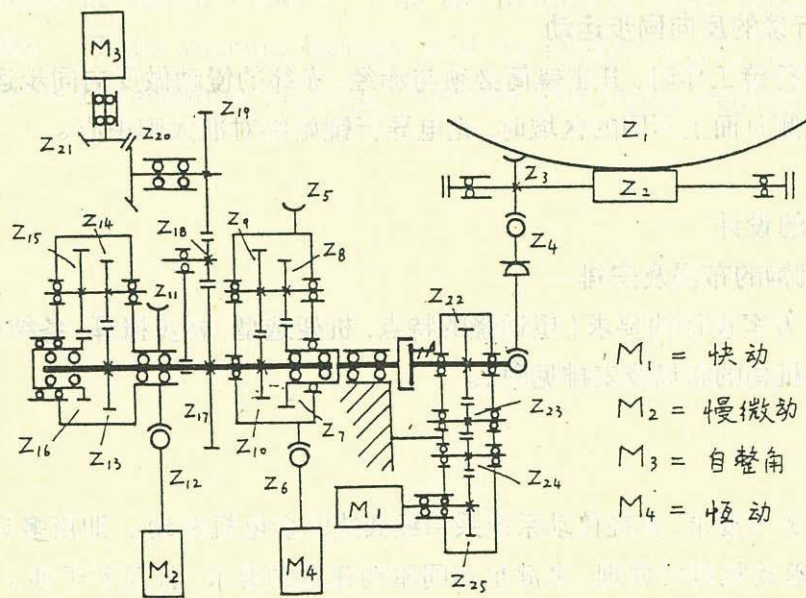


图2 赤经传动系链

快动电机 M1 采用 110SZ03 直流伺服电机, 功率为 200W, 转速 $n = 3000r \cdot p \cdot m$, 负载转矩 $6500g \cdot cm$, 额定电压 110V。在慢微动速度中, 有三档速率, 慢动 $1 = 0.5^\circ / 分$, 慢动 $2 = 6^\circ / 分$, 微动 $= 2' / 分$ 。设计传动链的速比 $i = 216000$, 即达 $n_{慢2} = 6^\circ / 分$ 。然采用的电机为直流伺服—测速机组, 额定电压为 24V。这样, 就可便于分档控制。慢动 1 的 $0.5^\circ / 分$ 正好是 $6^\circ / 分$ 的 $1/12$, 即 $n_{电机} = 300r \cdot p \cdot m$, 电压 2V。微动的 $2' / 分$ 正好是 $6^\circ / 分$ 的 $1/180$, 即 $n_{电机} = 20r \cdot p \cdot m$, 电压为 133mV。

其快动传动链的速比 $i = 10800$, 即达 $n_{快} = 100^\circ / 分$ 。恒动传动链的速比 $i = 4320000$, 即达 $n_{恒} = 15' / 分$ 。自整角发送机 M3 采用 90ZLF003 力矩式自整角发送机, 整步比力矩 $85g \cdot cm/1^\circ$, 速比 $i = 19000$ 。

鉴于望远镜的口径相当于 1.2 米, 因此, 赤经大蜗轮的直径亦按 1.2 米考虑。安放在叉臂与机座之间, 联接在极轴上, 采用浮动蜗杆架结构, 以保证啮合性能。浮动蜗杆架借用机座的极轴孔四周的平面, 实现径向、侧向定位。在蜗杆架的端面利用弹簧、球头杆机构, 进行侧向定位。当外负载荷超过额定荷值时, 蜗杆可做轴向位移 (且沿着蜗轮边缘做周边运动), 以保护精密蜗轮。为确保安全, 并设有限位装置, 采用微动行程开关实现。赤经传动箱体安排在机座内。出轴使用万向联轴节与末级蜗杆架的小蜗杆付蜗杆连接, 以保证上述运动之要求。

3、赤纬传动

赤纬传动为保证工艺上的同一性, 机构基本上与赤经传动系统大致相同。其赤纬系统传动链如图 3。

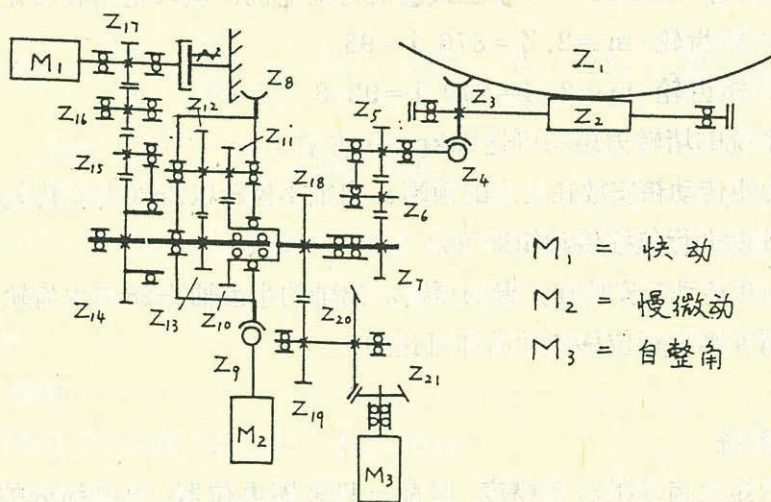


图 3 赤纬传动系链

快动电机 M1 采用 905Z53 直流伺服电机, 功率为 150W, 转速 $n = 3000r \cdot p \cdot m$, 负载转矩 $4900g \cdot cm$, 额定电压 110V。

慢微动电机 M2 采用 110/70S-CZ2 直流伺服—测速机组, 功率为 85W, 转速 $n = 3600r$

· p · m, 负载转矩 $2300\text{g} \cdot \text{cm}$, 额定电压 24V 。

在慢微动速度中, 有三档速率: 慢动 $1 = 0.5^\circ / \text{分}$, 慢动 $2 = 1^\circ / \text{分}$, 微动 $= 2' / \text{分}$ 。设计传动链的速比 $i = 1296000$ 。即达 $n_{\text{慢}2} = 1^\circ / \text{分}$, 然直流伺服—测速机组的额定电压为 24V 。这样, 便于分档控制。慢动 1 的 $0.5^\circ / \text{分}$ 正好是 $1^\circ / \text{分}$ 的 $1/2$, 即 $n_{\text{电机}} = 1800\text{r} \cdot \text{p} \cdot \text{m}$, 电压 12V 。微动的 $2' / \text{分}$ 正好是 $1^\circ / \text{分}$ 的 $1/30$, 即 $n_{\text{电机}} = 120\text{r} \cdot \text{p} \cdot \text{m}$, 电压 800mv 。

其快动传动链的速比 $i = 36000$, 即达 $n_{\text{快}} = 30^\circ / \text{分}$ 。

自整角发送机 M3 采用 90ZLF003 力矩式自整角发送机, 整步比力矩 $85\text{g} \cdot \text{cm}/1^\circ$, 速比 $i = 19810.7527$ 。

赤纬大蜗轮亦采用赤经大蜗轮的同等参数。按太阳望远镜的工作原理, 在赤纬的工作范围只要满足 $\pm 23^\circ 5'$ 的转动就可以。这样, 从刚性考虑, 叉臂就可做短些。然镜筒还是较庞大的, 为使驱动刚度增强, 赤纬大蜗轮采取以中心孔与赤纬轴定位, 以接近蜗轮的轮缘处设计两只定位过桥架, 跨过叉臂直接与镜筒连接。这样就大大的增加了赤纬驱动刚度。驱动蜗杆仍采用浮动蜗杆架结构。传动箱直接固定在叉臂的前下端(即东南端), 蜗杆架在调整好啮合后与叉臂为刚性连接。经过实践证明, 即使叉臂有些微变形, 也不影响其传动精度。

4、反力矩系统

为使传动平稳、消除蜗轮付间隙、增加仪器的扭转刚度, 赤经、赤纬驱动都备有反力矩系统。其结构是在赤经、赤纬大蜗轮的背面叠放一只大齿轮, 以反力矩传动箱驱动。反力矩电机为 SYL-30 永磁式直流力矩电机。其峰值堵转转矩为 $30\text{kg} \cdot \text{cm}$ 。

赤经反力矩齿轮: $m = 2, Z = 376, i = 93$

赤纬反力矩齿轮: $m = 2, Z = 270, i = 92.8$

反力矩系统的堵转力矩均可达 $28\text{kg} \cdot \text{m}$ 左右。

赤经反力矩传动箱安放在机座的顶端。出轴小齿轮以 $Z = 36$ 与大齿轮 $Z = 376$ 啮合。调整啮合精度以平行位移传动箱即可。

赤纬反力矩传动箱安放在叉臂的顶端。出轴的小齿轴 $Z = 26$ 与大齿轮 $Z = 270$ 啮合。其调整啮合精度则平行位移传动箱即可达到。

5、轴角显示系统

利用反力矩大齿轮的分齿精度, 匹配一只多圈电位器, 用电细分的办法, 在控制台上亦可显示赤经、赤纬轴的轴角位置。其精度为角分级。对于太阳望远镜的粗定位来说是完全足够的了。选用电位器为 $W \times 5 - 11$ 多圈线绕电位器(10转) $12\text{K} \pm 5\%$ 。

赤经显示之电位器出轴小齿轮 $Z = 25$, 亦得到电位器一转 $= 24^\circ$ 的轴角转角。赤纬显示的电位器出轴小齿轮 $Z = 18$, 亦可得到电位器一转 $= 24^\circ$ 的轴角转角。这样, 在电控上可采用同一性的细分法, 则可完全满足望远镜的要求。

6. 镜筒与导行镜的反向同步

为达到反向的同步转动, 导行镜安放在主镜筒上, 并有一小叉臂基座。于是, 镜筒可作赤纬方向反平行于天赤道方向的两维运动。它们的驱动是利用一对同望远镜的赤经和赤纬慢动相耦合的自整角机实现。当光电导行系统工作时, 揷动慢动的按钮, 导行镜筒便作反向的同步转动, 导行镜光轴相对主镜筒光轴偏移, 然仍保证其对中于太阳像。在这样装置中, 赤纬方向的速度值是完全对应相同的, 但在赤经方向, 由于导行镜是相对于主镜筒转动, 一般情况下, 在天球上画出一个与赤道面平行的小圆。这只有当春分和秋分时才对应相同, 在夏至和冬至日相差最大。运转速度的速比差 $1/2(1+\cos 23^\circ 27')$ 。 $\omega_{\text{赤纬}} = 0.958704$ 。即 $\omega_{\text{赤纬}} = 1$, 则 $\omega_{\text{赤经}} = 0.958704$ 。

按以上原理之要求, 在赤经、赤纬的传动箱内, 各设计配置一只自整角发送机 90ZLF003, 通过适当的速比与慢动级相连。达到在慢动 $1=0.5^\circ/\text{分}$ 时同步工作。其赤经用自整角发送机的速比 $i=19000$ 。赤纬用自整角发送机的速比 $i=19810.7527$ 。并在导行镜的基座上, 即光电导行镜尾端设置一套装有自整角接收机 90ZLJ002 的驱动箱。自整角发送机与自整角接收机完全耦合。其驱动箱输出为直线运动。传动系统的设计, 与丝杆作力点与小叉臂的中心距有关, 并要考虑输出力矩。其自整角机的输出比力矩为 $85\text{g}\cdot\text{cm}/1^\circ$, 因此, 必须进行机械放大, 增大速比来满足力矩要求。

二、传动系统的计算

一) 赤经系统:

1、传动链计算

$$n_{\text{恒}} = 120\pi \cdot n \left(1 - \frac{z_{10}}{z_9} \cdot \frac{z_8}{z_7}\right) \cdot \frac{z_6}{z_5} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_2}{z_1} = 15' / \text{分}$$

$$n_{\text{微慢}} = 2\pi \cdot n \left(1 - \frac{z_{16}}{z_{15}} \cdot \frac{z_{14}}{z_{13}}\right) \cdot \frac{z_{12}}{z_{11}} \cdot \frac{z_{10}}{z_9} \cdot \frac{z_8}{z_7} \cdot \frac{z_6}{z_5} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_2}{z_1} = 6^\circ / \text{分}$$

$$n_{\text{快}} = 2\pi \cdot n \cdot \frac{z_{25}}{z_{24}} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_2}{z_1} = 100^\circ / \text{分}$$

慢动 $1=0.5^\circ/\text{分}$ 与 $6^\circ/\text{分}$ 差 12 倍, 微动 $=2'/\text{分}$ 与 $6^\circ/\text{分}$ 差 180 倍, 用电控细分档可达到。

2、末级蜗杆付

大蜗杆付参数:

大蜗轮: $M=3, Z_1=360, \alpha=20^\circ, df_1=1080$

大蜗杆: $M=3, Z_2=1, q=24, \alpha=20^\circ$

$$\lambda = 2^\circ 23' 9.4'', df_2=72$$

小蜗杆付参数:

小蜗轮: $M=1.75, Z_3=40, \alpha=20^\circ, df_3=70$

小蜗杆: $M=1.75, Z_4=2, q=14, \alpha=20^\circ$

$$\lambda = 8^\circ 7' 48.37'', df_4=24.5$$

3、自整角发送机速比: $i=19000$

按与慢动 $0.5^\circ/\text{分}$ 速率匹配, 反算自整角机的速度为 $n_{\text{自}} = 26.38r \cdot p \cdot m$

(二) 赤纬系统

1、传动链计算

$$n_{\text{快}} = 2\pi \cdot n \cdot \frac{z_{17}}{z_{14}} \cdot \frac{z_{13}}{z_{12}} \cdot \frac{z_{11}}{z_{10}} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_2}{z_1} = 30^\circ/\text{分}$$

$$n_{\text{微慢}} = 2\pi \cdot n \cdot \left(1 - \frac{z_{13}}{z_{12}} \cdot \frac{z_{11}}{z_{10}}\right) \cdot \frac{z_9}{z_8} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_2}{z_1} = 1^\circ/\text{分}$$

慢动 $1=0.5^\circ/\text{分}$ 与 $1^\circ/\text{分}$ 差2倍, 微动 $=2'/\text{分}$ 与 $1^\circ/\text{分}$ 差30倍, 用电控细分档即可达到。

2、末级蜗杆付

其参数与赤经传动之末级蜗杆付参数相同。

3、自整角发送机速比: $i=19810.75269$

按与慢动 $0.5^\circ/\text{分}$ 速率匹配, 反算自整角机的速度为 $n_{\text{自}} = 27.41r \cdot p \cdot m$

(三) 末级传动付的有关计算

根据总体方案的设计考虑, 提供的望远镜载荷力矩如下:

赤经: $M_{\text{风荷}} = 6.2\text{kgm}$

$M_{\text{摩擦}} = 4.2\text{kgm}$

$M_{\text{惯性}} = 8.7\text{kgm}$ (2秒钟达快动 $120^\circ/\text{分}$)

$M_{\text{反力矩}} = 14\text{kgm}$

赤纬: $M_{\text{风荷}} = 23.5\text{kgm}$

$M_{\text{摩擦}} = 1.3\text{kgm}$

$M_{\text{惯性}} = 5.3\text{kgm}$ (0.2秒钟达慢动 $7.5^\circ/\text{分}$)

$M_{\text{反力矩}} = 30\text{kgm}$

其总阻力矩 $M_{\text{总阻力矩}} = M_{\text{风荷}} + M_{\text{摩擦}} + M_{\text{惯性}} + M_{\text{反力矩}}$

$M_{\text{总极轴}} = 33.1\text{kgm}$

$M_{\text{总纬轴}} = 60.1\text{kgm}$

1、蜗轮付的强度计算:

现蜗轮付的参数为: $m=3, Z_2=360, Z_1=1, df_1=72$

$df_2=1080, q=24, \lambda=2^\circ 23' 9.4''$

蜗轮的材料: QT60-2球墨铸铁, $E=1.6 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$

蜗杆的材料: 40Cr $E_2=2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$

其综合弹性模量

$$E = \frac{2E_1E_2}{E_1+E_2} = 1.8 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$$

其强度计算过程从略, 计算结果见蜗轮强度计算总表。

2. 赤经大蜗轮付的精度考虑

因太阳自身运动的不均匀性及蒙气差影响, 将机械传动精度做的太高是没有多大的意义。只要取得相应的精度就可以了。不必要进行苛求。

按一年中太阳运动不均匀性, 引入的平均误差为

$$\overline{\Delta t} = 8'' . 2 / \text{小时}, \quad \overline{\Delta \delta} = 37'' / \text{小时}$$

所以 $\Delta_1 = \sqrt{\overline{\Delta t}^2 + \overline{\Delta \delta}^2} = 37'' 89 / \text{小时} = 3'' 16/5 \text{分钟}$ 。

而蒙气差造成的运动偏差平均值(从蒙气差影响表中查出)

$$\Delta t' = \frac{d(\overline{\Delta t})}{dT} = 2'' 89/5 \text{分钟}$$

$$\Delta \delta' = \frac{d(\overline{\Delta \delta})}{dT} = 1'' 32/5 \text{分钟}$$

所以: $\Delta_2 = \sqrt{(\Delta t')^2 + (\Delta \delta')^2} = 3'' 17/5 \text{分钟}$

综合均方根误差

$$\Delta_1' = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} = 4'' 48 / 5 \text{分钟}$$

设大蜗轮付传动误差引入的跟踪误差为 $4'' / 5 \text{分钟}$ 。

小蜗轮付累积误差引入的跟踪误差为 $2'' / 5 \text{分钟}$ 。

则传动误差为

$$\Delta_2' = \sqrt{4_1^2 + 4_2^2} = 4'' 47/5 \text{分钟}$$

即与太阳运动的不均匀性和蒙气差的影响所引起的误差 $\Delta_1' = 4'' 48/5 \text{分钟}$ 几乎一致。

而总的对于太阳的精确跟踪精度 $1''$ 则依靠光电导行来解决, 是完全可以的

现取大蜗轮的参数为:

$$M=3, Z_2=360 \quad Z_1=1$$

则蜗轮每转过一齿所需的时间为

$$t = \frac{24 \times 36}{360} = 4 \text{分钟/每齿}$$

而 $4'' / 5 \text{分钟}$ 对应的传动误差(即传动周期误差的公差)

$$\delta_t = \frac{4'' \times 360}{206265} \times 1000 = 6.98 \mu$$

根据机械工业部标准(JB162-60)规定, 大蜗轮付的精度接近于4级精度, (4级精

度的传动周期误差 $\delta_{\tau}=6\mu$), 因此, 我们将赤经蜗轮付的短周期误差的精度定为4级精度, (或可稍低些) 而累积误差定为5级精度就可以满足了。

对于赤纬蜗轮付的精度可低些, 但是考虑到两套传动付的工艺同一性, 精度就取得与赤经相同。小蜗轮付的精度, 经分析采用5级精度就可以了。其它各种齿轮、蜗轮的精度, 因在前级, 考虑到传动系统的误差, 刚度及装配等诸种因素的影响, 将分别定为6-7级精度, 这样基本上可以满足驱动精度的总要求。

三、结论

本望远镜于1990年10月安装在北京天文台怀柔太阳物理观测站, 经过调试, 望远镜运转正常。

其赤经传动箱、赤纬传动箱, 运转基本无噪声, 电机电流在0.3-0.6A。在平衡调试过程中, 赤经、赤纬蜗杆脱开方便、迅速, 复位可靠。

经过几年的试观测, 本驱动系统已满足设计要求, 机械传动平稳, 工作可靠, 精度达设计要求。

蜗轮强度计算总表

项目名称		符号	单位	赤 径	赤 纬
风荷力矩		M _{风荷}	kgM	6.2	23.5
摩擦力矩		M _{摩擦}		4.2	1.3
惯性力矩		M _{惯性}		8.7	5.3
反力矩		M _{反力矩}		14	30
总阻力矩		M _总		33.1	60.1
接触点上曲率半径		ρ	cm	10.8	10.8
接触线长度		L _p		7.78	7.78
园 周 力		P	kg	61.29	111.29
单位接触载荷		q	kg/cm	7.87	14.7
接触应力		σ	kg/cm ²	166	223.85
有风荷时园周力		P _风	kg	11.48	43.5
无风荷时园周力		P _{无风}		25.9	55.5
风荷与反力矩同向力		P _{同向荷}		37.4	99
接 触 变 形	有风荷时	$\delta_{。风}$	cm	9×10^{-6}	3.21×10^{-5}
	无风荷时	$\delta_{。无风}$		1.96×10^{-5}	4×10^{-5}
	同向荷时	$\delta_{。同向荷}$		2.78×10^{-5}	6.99×10^{-5}
变 形 角	有风荷时	Q _风	"角 秒	0" .03	0" .12
	无风荷时	Q _{无风}		0" .07	0" .15
	同向荷时	Q _{风向荷}		0" .103	0" .26

注：1、载荷力矩（风荷、摩擦、惯性、反力）均由胡企千提供计算数据。

2、惯性力矩 赤径：8.7kgm（2秒钟达快动120°/分）

赤纬：5.3kgm（0.2秒钟达快动7.5°/分）。