

环形拼接太阳望远镜主镜控制系统的频率特性

郭泰^{1,4,5**}, 戴懿纯^{1,4*}, 杨德华³, 王斌^{1,4,5}, 金振宇^{1,2,4***}

¹中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;

²云南省应用天文技术工程实验室, 云南 昆明 650216;

³南京航空航天大学, 江苏 南京 211106;

⁴中国科学院天文大科学研究中心, 北京 100012;

⁵中国科学院大学, 北京 100049

摘要 建立了 8 m 环形拼接太阳望远镜(8-m-RST)的主镜控制系统的数字控制器模型。通过提取系统模型的频率特性参数,获得了采样周期、相对稳定性、积分增益与控制带宽之间的关系。引入脉动风干扰模型,通过仿真验证了主镜系统在平均风速较低的脉动风扰动影响下的性能。研究表明,8-m-RST 的主镜控制系统稳定且控制带宽满足 0.2 Hz 的设计要求,能有效抑制 2 m/s 平均风速的干扰,对 8-m-RST 结构设计的改进、倾斜传感器和控制器的设计都有重要的参考价值。

关键词 光学设计; 主动光学; 拼接镜面; 中国巨型太阳望远镜; 频率特性; 系统建模

中图分类号 TH751

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1122001

Frequency Characteristics of Primary Mirror Control System in Segmented Ring Solar Telescope

Guo Tai^{1,4,5**}, Dai Yichun^{1,4*}, Yang Dehua³, Wang Bin^{1,4,5}, Jin Zhenyu^{1,2,4***}

¹Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China;

²Engineering Laboratory on Applied Astronomy of Yunnan, Kunming, Yunnan 650216, China;

³Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China;

⁴Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

⁵University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The digital controller model of the primary mirror control system in an 8 m segmented ring solar telescope (8-m-RST) is established. The relationships between the sampling period, relative stability, integral gain and the control bandwidth are obtained by means of the extraction of the frequency characteristic parameters from the system model. In addition, with the introduction of a pulsed wind disturbance model, the performance of the primary mirror system under the disturbance of a pulsed wind with a low average speed is tested by simulation. The research results show that, the primary mirror control system in the 8-m-RST is stable and its control width meets the requirement of 0.2 Hz. Moreover, it can effectively suppress the disturbance from a wind with an average speed of $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. These results have important references to the structural improvement and the design of the tilt sensor and the controller in the 8-m-RST.

Key words optical design; active optics; segmented mirror; Chinese giant solar telescope; frequency characteristics; system modeling

OCIS codes 220.1080; 220.1140; 110.6770; 220.4830

1 引 言

为了在 $1 \mu\text{m}$ 的近红外波段观测太阳光球层

0.03" 的太阳超精细结构,我国正计划建造主镜口径达到 8 m 的中国巨型太阳望远镜(CGST)^[1-2]。8 m 环形拼接太阳望远镜(8-m-RST)^[1-2]形式是 CGST

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-05-29; 录用日期: 2018-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(11573068,11303090)

* E-mail: daiyichun@ynao.ac.cn; ** E-mail: guotai@ynao.ac.cn; *** E-mail: kim@ynao.ac.cn

的重要设计方案之一。8-m-RST 用等腰梯形子镜拼接形成一个外径约为 8 m、环宽约为 1 m 的环形抛物面主镜,其有望成为首台拼接式太阳望远镜。

作为含有环形拼接主镜的望远镜,8-m-RST 配备有相应的主镜控制系统^[3-4]。主镜控制系统在控制带宽内高精度地保持主镜的面形。主镜控制系统的带宽和系统扰动的频率成分共同影响望远镜的观测效率。分析 8-m-RST 的主镜系统与扰动的频率特性有助于确定 8-m-RST 主镜控制器的设计指标。

8-m-RST 的主镜控制系统需要同时使用边缘高度差传感器^[5]和子镜倾斜传感器^[6]来实现主镜的主动保持控制。边缘高度差传感器可采用差分电容式边缘传感器,要求达到 5 nm 的测量精度及几十至上百赫兹的采样频率,倾斜传感器探测精度需要达到 0.01"。若基于夏克-哈特曼(S-H)原理实现倾斜探测,要消除湍流的影响,提高测量精度,需要较长的积分时间^[7]。这使得倾斜传感器的采样频率仅为亚赫兹或几赫兹。倾斜传感器的采样频率限制了 8-m-RST 主镜控制系统的采样频率,进而减小 8-m-RST 主镜系统的控制带宽。主镜面型误差源主要包括望远镜跟踪导致的重力变形、温度起伏导致的热变形和风荷载导致的结构变形与振动。其中,为

抑制风荷载对主镜面形的影响,需要更大的控制带宽。风荷载是测试拼接主镜动态特性及确定控制带宽与采样频率的依据。理想状态下 8-m-RST 的动态特性研究表明,作用于主镜系统的平均风速超过 2 m/s 时,8-m-RST 无法达到成像要求^[3]。因此,本文只讨论平均风速不超过 2 m/s 的风荷载。

本文以系统频率特性为重点,基于望远镜结构的模态模型(有限元模型)^[4]与几何模型(准静态模型)^[8-9],建立了传感器和控制器的采样信号与数字控制器模型,提出了针对边缘传感器与倾斜传感器异步采样的仿真方法;基于数字控制器的模型分析了采样周期、积分增益、相对稳定性与控制带宽之间的关系;引入脉动风模型,分析了 8-m-RST 主镜系统的抗风扰性能。

2 8-m-RST 主镜系统及其数字控制器

2.1 主镜系统模型

如图 1(a)所示,8-m-RST 的主镜呈环形,外径约为 8 m,环宽约为 1 m,焦比 $F=1$,由 24 块相同的等腰梯形离轴抛物面镜顺次排列拼接。8-m-RST 是环形格利高里系统,预期在 1~15 μm 波长范围内实现太阳高分辨成像观测,主镜面形的均方根误差需约束在 25 nm 以内。

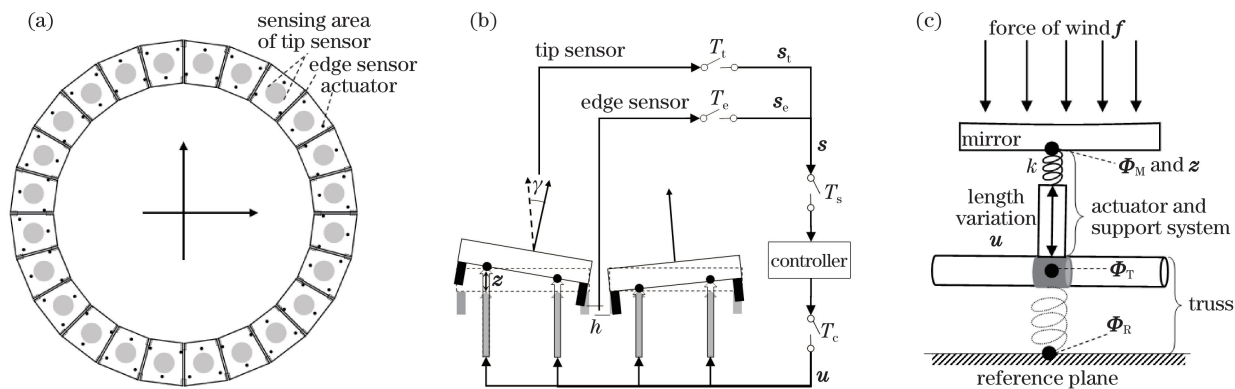


图 1 8-m-RST 的主镜系统示意图。(a)顶视图;(b)传感器、控制器与促动器;(c)子镜、镜室、促动器与桁架
Fig. 1 Schematic of 8-m-RST primary mirror system. (a) Top view; (b) sensor, controller and actuator;
(c) segmented mirror, support system, actuator and truss

具有环形拼接镜面特点的主镜控制系统用来实时保持观测时 8-m-RST 的主镜面形。该系统的主要组成如下。72 组促动器在每块子镜背面呈正三角形排布,促动器两端分别连接桁架和镜室(子镜的支撑结构),用来调节子镜的离面位移;48 组边缘传感器位于拼缝角落,其驱动端和接收端分别固定在拼缝两侧的子镜背面边缘,用来测量子镜拼缝处相对高度差;位于望远镜成像光路的倾斜传感器用于

测量相邻子镜的光学表面相对倾斜;主镜控制系统的控制器接收传感器的读出 s 并输出促动器执行量 u ,通过反馈控制来补偿干扰 f 造成的镜面的离面误差 z ,实现保持子镜相对姿态的目的。

边缘传感器的读出 s_e 和倾斜传感器的读出 s_t 均为采样信号,但二者的物理量、精度和采样频率不同。边缘传感器为差分电容式位移传感器^[10],响应镜面边缘的高度差为 h ,测量精度约为 $h_s=5$ nm,

其采样周期设为 T_c ; 倾斜传感器测量相邻子镜的相对倾斜(由子镜法线夹角 γ 表示), 测量精度为 $\gamma_s = 0.01''$, 其采样周期设为 T_t 。控制器要求两种传感器的采样同步, 同步后的综合采样周期为 T_s 。控制器的输出也是数字信号, 其周期为 T_c 。相关变量的定义为 $\mathbf{s} = \begin{pmatrix} \mathbf{s}_e \\ \mathbf{s}_t \end{pmatrix}$; $\mathbf{s}_e = (\dots h_{m,1} h_{m,2} \dots)^T$; $\mathbf{s}_t =$

$$\frac{h_s}{\gamma_s} (\dots \gamma_m \dots)^T; \mathbf{z} = (\dots z_{m,1} z_{m,2} z_{m,3} \dots)^T;$$

$\mathbf{u} = (\dots u_{m,1} u_{m,2} u_{m,3} \dots)^T$; $\mathbf{f} = (\dots f_{m,1} f_{m,2} f_{m,3} \dots)^T$ 。其中 T 代表求转置; m 为子镜的编号, 取值从 1 至 24; $h_{m,1}$ 与 $h_{m,2}$ 分别为子镜 m 与子镜 $m+1$ 的临边上两组边缘传感器的高度差; γ_m 为子镜 m 与子镜 $m+1$ 的光学表面的法线夹角; 系数 h_s/γ_s 用于匹配两种传感器的精度与量纲; $z_{m,i}$ ($i=1,2,3$) 为子镜 m 的促动器与镜面的连接点的位移量; $u_{m,i}$ 为子镜 m 的三个促动器的执行量。

子镜可视为刚体, 促动器与镜面连接点的位移量与传感器读出之间存在稳定的几何变换关系。该变换关系可用一个常数传递矩阵^[9,11] \mathbf{R} 表示。传感器的读出可以表示为

$$\mathbf{s} = \mathbf{R}\mathbf{z} + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{r}, \quad (1)$$

式中 $\boldsymbol{\eta}$ 为传感器噪声, 体现传感器的随机误差; \mathbf{r} 为传感器的矫正量, 用于对传感器进行定标, 体现传感器的系统误差。定标过程一般采用光学手段调整镜面共相^[12-14], 然后记录传感器的校正值。重点讨论风荷载对主镜系统的影响, 认为传感器是理想的, 即 $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{0}$ 且 \mathbf{r} 恒为 $\mathbf{0}$ 。

图 2 所示为 8-m-RST 指向天顶角 45° 时的有限元模型。对系统的部分结构或参数进行了合理简化^[3]: 子镜有足够刚性, 不会变形; 约束面内位移的侧支撑视为刚体, 避免镜面旋转和面内平移; 促动器与镜室抽象成劲度系数 $k = 1037 \text{ N/mm}$ 的弹簧与长度可变的刚性杆组件; 系统的阻尼比为 $\xi = 0.01$; 主镜-桁架的状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + (\mathbf{B}_f \ \mathbf{B}_u) \begin{pmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{u} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{z} = \mathbf{C}_M \mathbf{x}_M \end{cases} \quad (2)$$

式中参量 $\mathbf{x}_M = \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{pmatrix}$, $\mathbf{A}_M = \begin{pmatrix} \mathbf{O}_{201 \times 201} & \mathbf{I}_{201 \times 201} \\ -\boldsymbol{\Omega}^2 & -2\xi\boldsymbol{\Omega} \end{pmatrix}$, $\mathbf{B}_f = (\mathbf{O}_{72 \times 201} \ -\boldsymbol{\Phi}_M)^T$, $\mathbf{B}_u = k (\mathbf{O}_{72 \times 201} \ \boldsymbol{\Phi}_M - \boldsymbol{\Phi}_T)^T$, $\mathbf{C}_M = (\mathbf{O}_{72 \times 201} \ \boldsymbol{\Phi}_M - \boldsymbol{\Phi}_R)$ 。其中 $\boldsymbol{\Phi} = (\dots \boldsymbol{\phi}_i \dots)$ 为 8-m-RST 主镜-桁架结构的模态矩阵, 包含固有频率最低的 201 个模态向量 $\boldsymbol{\phi}_i$ ($i=1,2,\dots,201$);

$\boldsymbol{\Omega} = \text{diag}(\omega_i)$ 为各模态的固有频率; $\mathbf{q} = (\dots q_i \dots)^T$ 为模态幅度; \mathbf{O} 为零矩阵, \mathbf{I} 为单位矩阵。三组模态矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_M$ 、 $\boldsymbol{\Phi}_T$ 和 $\boldsymbol{\Phi}_R$ 分别对应镜面、桁架和参考面上的点位移。促动器对子镜的作用力为 $k\mathbf{u}$, 图 1(c) 中向上为正方向。

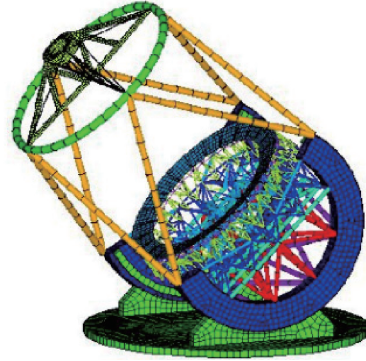


图 2 8-m-RST 的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of 8-m-RST

8-m-RST 主镜系统的主要扰动为望远镜跟踪太阳时由天顶角指向变化导致的重力变形、由望远镜结构温度起伏导致的热变形及由风载荷导致的主镜变形与结构振动。重力变形与热变形的时间频率较低, 易被控制系统预测和补偿。风扰有较高的时间频率成分, 它对主镜的影响与风速及攻角都有关系。风作用于镜面的轴向压力^[15]的表达式为

$$f = 0.5\rho v^2 S \cos^2 \alpha, \quad (3)$$

式中 S 为促动器对应的平均镜面面积, 对于 8-m-RST, 环形镜面的表面积被 72 个促动器平分后得到 $S = 0.3 \text{ m}^2$; α 为风对镜面的攻角, 即风速方向与镜面法向间的夹角, 为了简化分析, 设望远镜指向天顶角 45° 方向(望远镜观测时中间状态的天顶角)且风的方向为水平(常见的近地面风速方向), 故 $\alpha = 45^\circ$; ρ 为当地空气密度, 其与海拔、温度和湿度均有关, 假设望远镜在高原台址的常温环境, 则 $\rho = 0.97 \text{ kg/m}^3$; v 为风速。

脉动风速度场满足达文波特风速谱^[16]。达文波特风速功率谱(PSD)基于实验和测量, 其经验公式为

$$S(f_t) = \frac{K \bar{v}_{10}^2 X^2}{f_t (1 + X^2)^{\frac{4}{3}}}, \quad (4)$$

式中 $X = Lf_t/\bar{v}_{10}$; f_t 为时间频率, 单位为 Hz ; \bar{v}_{10} 为距离地面 10 m 高度的平均风速, 单位为 m/s ; K 为描述表面粗糙度的系数, 取固定值 0.4; $L = 1200 \text{ m}$ 为经验公式的常系数, 具有长度量纲。仿真中使用较低的平均风速 $\bar{v} = 2 \text{ m/s}$ 生成二维脉动风速场 $\tilde{v}(x, y)$, 脉动风可认为是该风速场以平均风速 \bar{v} 吹

向镜面,如图 3 所示。任意时刻的风速场可以表示为 $v(x, y, t) = \bar{v} + \tilde{v}(x + \bar{v}t, y)$, 其中 (x, y) 为二维坐标, t 为时间。

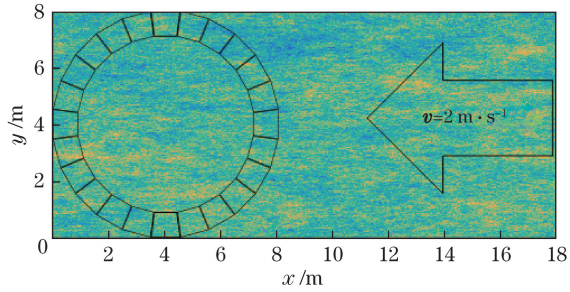


图 3 脉动风速场的示意图

Fig. 3 Schematic of pulsed wind speed field

2.2 主镜控制系统的数字控制器模型

使用已知的传递矩阵 \mathbf{R} 及传感器读出 \mathbf{s} 可估算子镜与促动器连接点的平移误差 $\hat{\mathbf{z}}$ 。 \mathbf{R} 的秩数为 70, 只能利用其伪逆矩阵 $\mathbf{R}^\#$ 估算位移量, 即 $\hat{\mathbf{z}} = \mathbf{R}^\# \mathbf{s}$ 。通过奇异值分解 $\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{V}^T$ (\mathbf{U} 为 96×96 的正交矩阵, \mathbf{A} 为主对角线为 \mathbf{R} 特征值的 96×72 对角矩阵), 得到主镜的控制模式矩阵 $\mathbf{V} = (\dots \mathbf{v}_j \dots)$, 其中 \mathbf{v}_j ($j=1, 2, \dots, 72$ 为主镜模式的编号) 为主镜的控制模式。主镜控制模式的排序依据为控制系统的探测敏感性。每个模式对应一个 \mathbf{R} 的奇异值, 奇异值从大到小排列, 奇异值越大, 系统对相应模式越灵敏。 \mathbf{V} 中存在两个无法探测的模式(相应的奇异值为 0), 分别是 \mathbf{v}_{72} 焦点模式和 \mathbf{v}_{71} 主镜全局轴向平移模式, 如图 4 所示。这两个模式都会引起望远镜离焦, 可以通过望远镜焦点探测与跟踪针对性地解决这两个模式的影响, 简化分析时将忽略这两种模式的影响。

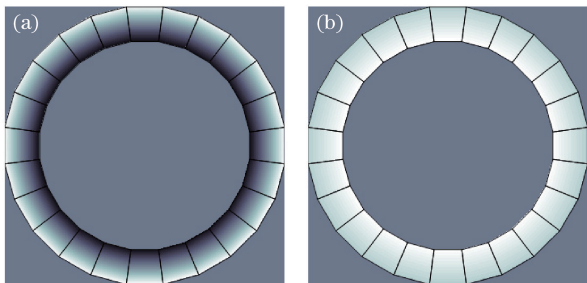


图 4 主镜系统无法探测的两个控制模式。

(a) 焦点模式; (b) 全局轴向平移模式

Fig. 4 Two unobservable control modes of primary mirror system. (a) Focus mode; (b) global axial translation mode

引入主镜模式幅度 $\mathbf{y}_i = (\dots y_{ji} \dots)^T$ 。可利用变换 $\mathbf{y}_z = \mathbf{V}^T \mathbf{z}$ 得到镜面位移误差的模式幅度。

令 $y_{71z} \equiv 0$ 且 $y_{72z} \equiv 0$ 可消除两个无法探测模式的影响。控制器是积分控制器^[17], 可有效消除稳态误差。控制规律可描述为 $\mathbf{u} = -K_1 \int \hat{\mathbf{z}} dt$, 其中 K_1 为积分增益。故控制器的状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_s \mathbf{s} \\ \mathbf{u} = \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c \end{cases}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{x}_c 为控制器的状态变量, 且存在 $\dot{\mathbf{x}}_c = \hat{\mathbf{z}}$; 系数 $\mathbf{A}_c = \mathbf{O}_{72 \times 72}$, $\mathbf{B}_s = \mathbf{R}^\#$, $\mathbf{C}_c = K_1 \mathbf{I}_{72 \times 72}$ 。

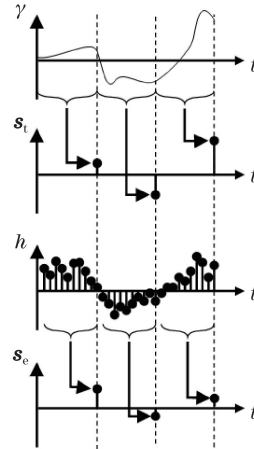


图 5 边缘传感器与倾斜传感器的同步采样示意图

Fig. 5 Schematic of synchronous sampling for edge and tilt sensors

边缘传感器和倾斜传感器存在异步采样问题。为了同步两种传感器的采样周期, 如图 5 所示, 考虑将多次边缘传感器的读出的均值 $\bar{h}_{i,j}$ 作为输入控制器的边缘传感器的读出, 即传感器系统的综合采样周期为 $T_s = T_t$ 。

仿真时使用离散时间系统模型, 边缘传感器的采样周期设定为 $T_e = 0.01$ s, 即采样频率为 100 Hz。该值是边缘传感器的典型采样频率, 且能近似代替连续时间系统的采样频率。控制器的采样周期设定为 $T_c = T_s = T_t$, 与传感器系统的综合采样周期一致。离散化的状态空间模型描述为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_M[(a+1)T_e] = \mathbf{G}_M \mathbf{x}_M(aT_e) + (\mathbf{H}_f \quad \mathbf{H}_u) \begin{bmatrix} \mathbf{f}(aT_e) \\ \mathbf{u}(aT_e) \end{bmatrix} \\ \mathbf{z}(aT_e) = \mathbf{C}_M \mathbf{x}_M(aT_e) \\ \mathbf{x}_C[(b+1)T_t] = \mathbf{G}_C \mathbf{x}_C(bT_t) + \mathbf{H}_s \mathbf{s}(bT_t) \\ \mathbf{u}(bT_t) = \mathbf{C}_C \mathbf{x}_C(bT_t) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 a 和 b 均为整数; 参量 $\mathbf{G}_M = \exp(\mathbf{A}_M T_e)$; 参量 $\mathbf{H}_f = \left[\int_0^{T_e} \exp(\mathbf{A}_M \tau) d\tau \right] \mathbf{B}_f$, 其中 τ 为时间的微分

量; 参量 $H_u = \left[\int_0^{T_e} \exp(A_M \tau) d\tau \right] B_u$; 参量 $G_C = \exp(A_C T_t) = I_{72 \times 72}$; 参量 $H_s = \left[\int_0^{T_t} \exp(A_C \tau) d\tau \right] B_s = T_t B_s$ 。

倾斜传感器用于模拟信号的积分平均过程, 边缘传感器用于数字信号的积分平均过程, 两种积分

过程均可用较高采样频率的数字信号积分近似。当 $aT_e = bT_t$ 时, 传感器的读出可描述为 $s(bT_t) = R \sum_{n=1}^{T_t/T_e} z[(a+n)T_e] \frac{T_t/T_e}{T_t/T_e}$; 输入主镜-桁架系统的促动器执行量用 $u[(a+n)T_e] = u(bT_t) (n=1, 2, \dots, T_t/T_e-1)$ 插值。

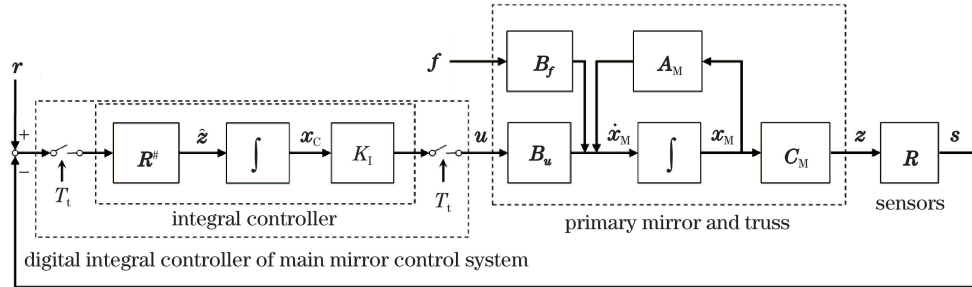


图 6 主镜及其控制系统的模型框图

Fig. 6 Modeling chart of primary mirror and its control system

图 6 所示为(1)、(2)、(5)式所描述的传感器模型、控制器模型与主镜-桁架系统模型以及三者之间的关系。风扰 f 改变了主镜-桁架的振动模态加速度, 进而改变了子镜姿态(位移) z ; 传感器响应子镜的位移, 即传感器的读出 s 随着 z 改变; 控制器利用传感器的读出得到估算的子镜姿态 \hat{z} ; 通过积分控制计算出促动器应有的执行量 u 。

3 8-m-RST 主镜系统的频率特性分析

相对稳定性和控制带宽是衡量主镜系统性能的两个重要指标。衡量系统稳定性的指标包括增益裕度 f_{GM} 和相位裕度 f_{PM} 。这些指标均可通过分析系统的频率特性得到。一般希望系统既稳定可靠又有足够的抗风扰能力, 但两者之间相互制约, 必须进行权衡。望远镜的结构设计和控制器设计均会影响系统的相对稳定性和控制带宽。

采样周期和积分增益是控制系统的两个重要参数, 均会影响系统的频率特性。系统的采样周期受倾斜传感器的采样周期约束, 考虑到倾斜传感器可能实现的采样周期, 将 T_t 分别设置为 0.2, 0.1, 0.05 s, 对系统进行分析, 引入连续时间系统作为参考。其中 $T_t=0.1$ s 接近倾斜传感器目前可能达到的采样周期极限, 将其当作控制系统设计的典型参数进行分析。

主镜-桁架系统是主镜控制系统的控制对象, 它由望远镜的结构设计决定, 约束主镜系统的整体性能。利用(2)式进行仿真, 将促动器的主镜模式 $y_u = V^T u$ 作为输入, 镜面位移的主镜模式 $y_z = V^T z$

作为输出, 画出系统伯德图, 如图 7 所示。由图 7(a) 可知, 模式 1 从输入到输出的增益为 -1.42 dB, 即增益为 0.85; 模式 1 输入到模式 2 输出的增益为 -82.9 dB, 即增益为 7.2×10^{-5} 。两个模式之间的增益相差约 -81.5 dB, 这个值远远小于 1, 说明在准

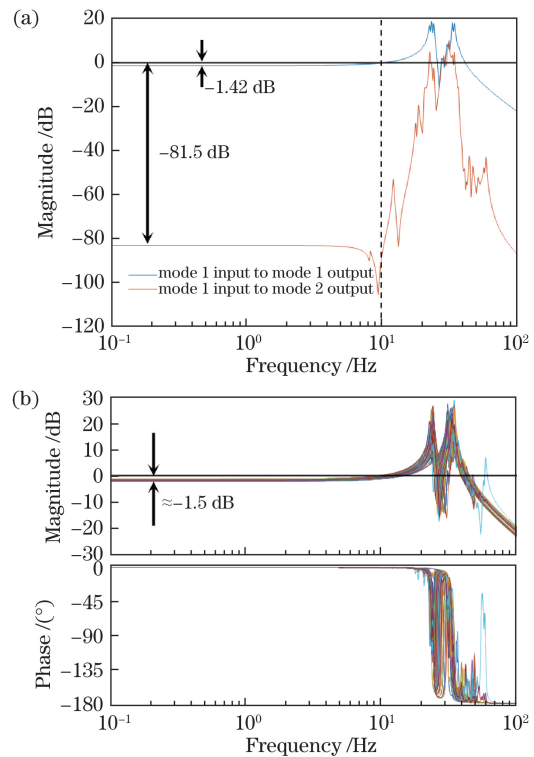


图 7 开环系统的伯德图。(a)输入: 模式 1, 输出: 模式 1、模式 2; (b)72 个模式

Fig. 7 Bode diagram of open-loop system. (a) Input: mode 1, output: mode 1 and mode 2; (b) 72 modes

静态或输入信号的频率低于 10 Hz 的条件下,控制模式之间是相互正交的。若输入信号的频率小于 10 Hz,可将系统分解为若干模式的单输入单输出系统的集合。当输入信号的频率范围为 22~35 Hz 即主镜-桁架的固有频率范围时,两个模式存在明显的耦合,不再满足正交条件。其他模式之间也存在相似的特性。图 7(b)所示为 72 个模式从 y_{ju} 输入到 y_{je} 输出的伯德图,各模式的增益集中在 -1.5 dB 左右,说明系统存在约 15% 的相对稳态误差。图 8 所示为与图 7(a)对应的 8-m-RST 主镜控制系统最敏感的两个控制模式(模式 1 和模式 2)的图样。

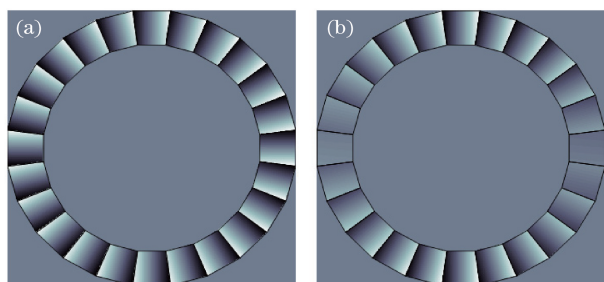


图 8 8-m-RST 主镜控制系统最敏感的两个控制模式。
(a)模式 1;(b)模式 2

Fig. 8 Two most sensitive control modes of primary mirror system in 8-m-RST. (a) Mode 1; (b) mode 2

在分析主镜系统的离散时间模型之前,分析连续时间系统的性能作为参考。使用单位积分增益 $K_1=1$ 对比分析连续时间模型和离散时间模型。图 9(a)所示为连续时间系统的控制闭环输入 $y_r = A^{\#}U^T r$ 到镜面位移 y_z 输出的 70 个可探测模式的

伯德图。可以看出,系统的增益为 0 dB,控制系统闭环消除了控制对象的稳态误差;系统具有低通特性,截止频率即系统的带宽约为 0.13 Hz。图 9(b)所示为 $T_s=0.1$ s 的离散时间系统从 y_r 输入到 y_z 输出的 70 个可探测模式的伯德图。受采样周期的影响,伯德图在 5 Hz 处截断。系统的增益亦为 0 dB,说明离散时间系统也可以有效消除控制对象的稳态误差。离散时间控制系统也具有低通特性,截止频率即系统的带宽约为 0.15 Hz。图 9(c)所示为模式 1 的开环与闭环伯德图。可以看出,在接近采样频率处离散时间系统和连续时间系统存在一定差异,即系统采样对控制带宽存在一定的影响。图 10 所示为与图 9(c)对应的阶跃响应图,可以看出,主镜-桁架系统的阶跃响应存在明显的超调和稳态误差,超调量约为 55%,稳态误差约为 -15%,系统稳定时间约为 1.4 s,但系统的阶跃响应包含复杂的频率成分;连续时间系统将高频部分滤除后几乎消除了超调和震荡过程,但系统的上升时间和稳定时间均更长,其中连续时间系统的稳定时间约为 3.5 s;离散时间系统具有与连续时间系统相似的性质,同样消除了超调量和稳态误差,上升时间约为 3.3 s。图 11(a)、(b)所示分别为相应的连续时间系统和离散时间系统各模式的尼科尔斯图。可以看出,连续时间系统的增益裕度约为 21 dB,相位裕度约为 90° ;离散时间系统的增益裕度约为 16 dB,相位裕度约为 84° ,说明系统采样可能会降低系统的稳定性。

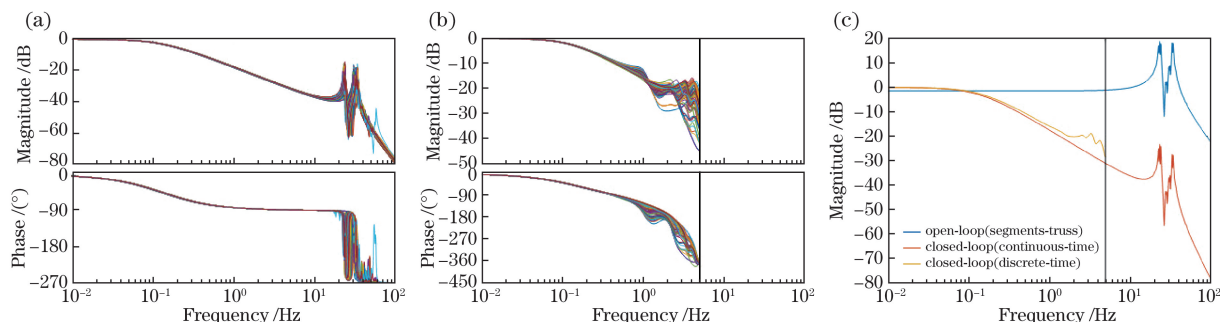


图 9 系统伯德图。(a)连续时间系统;(b)离散时间系统;(c)模式 1 的开环与闭环伯德图
Fig. 9 Bode diagram of system. (a) Continuous time system; (b) discrete time system;
(c) Bode diagrams of open-loop and closed-loop systems for mode 1

8-m-RST 的主镜系统建设完成后,实际系统与模型系统存在偏差,主要体现在模态振型、固有频率和传递矩阵的不确定性。增大控制器的积分增益可增大控制带宽,但也会减小系统的增益裕度,使系统面临潜在的不稳定风险。对于 8-m-RST,系统的相对稳定性应满足增益裕度为 ± 10 dB、相位裕度为

$\pm 45^\circ$ 的矩形域的约束条件^[18]。在保证系统稳健性的前提下应尽可能增大积分增益以增大控制带宽,从而增强系统的抗风扰能力。图 12(a)、(b)、(c)、(d)所示分别为 $K_1=3.3$ 的连续时间系统、 $T_s=0.02$ s 且 $K_1=2.0$ 的离散时间系统、 $T_s=0.1$ s 且 $K_1=1.3$ 的离散时间系统及 $T_s=0.2$ s 且 $K_1=0.70$

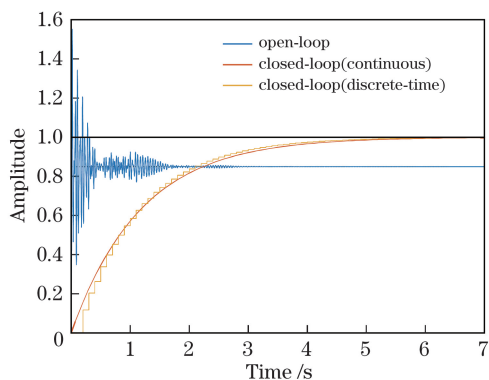


图 10 模式 1 的阶跃响应

Fig. 10 Step response for mode 1

的离散时间系统的可测模式的尼科尔斯图,其中方框即满足相对稳定性条件的矩形域,所有曲线至多只能与该矩形相接而并不穿越该矩形。4 种系统的积分增益和控制带宽见表 1。可以看出,在满足相同的稳定性条件下,控制器的积分增益和系统的控制带宽均随采样周期的减小而增大。对于 8-m-RST,主镜控制系统的带宽应达到 0.2 Hz,以修正准静态扰动(如重力、热形变和平均风扰动)的影响和低平均风速情况下部分频率较低的脉动风影响。系统采样周期为 0.1 s 时恰能满足该带宽设计要求;若系统的采样周期超过 0.1 s 如 $T_s=0.2$ s 时,系统可

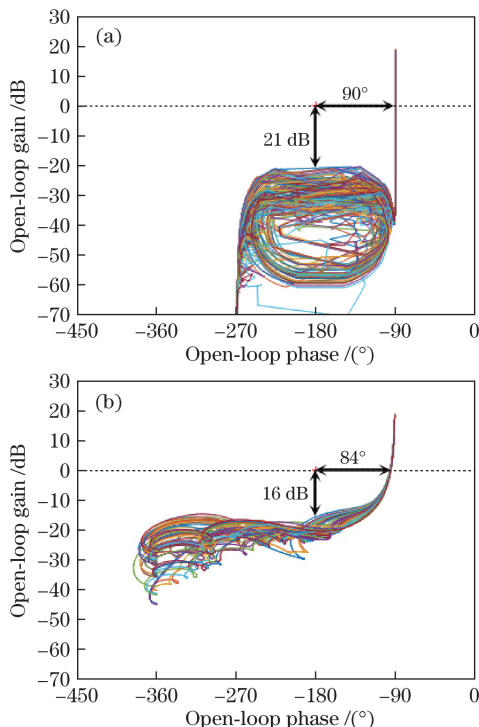


图 11 单位增益系统的尼科尔斯图。(a)连续时间系统;
(b)离散时间系统(采样周期为 0.1 s)

Fig. 11 Nichols chart of unity gain system. (a) Continuous time system; (b) discrete time system (sampling period is 0.1 s)

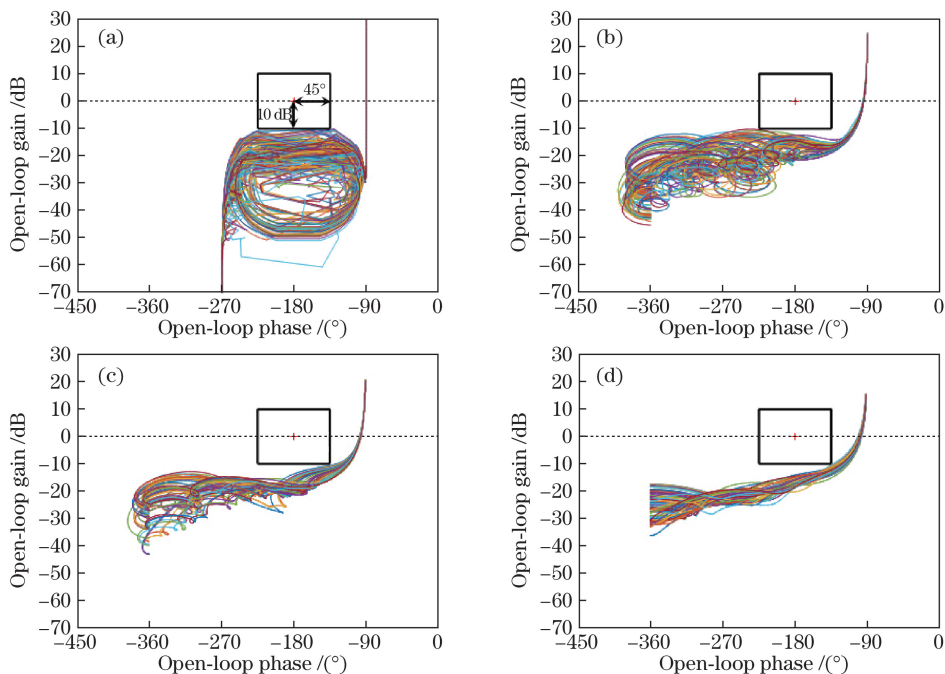


图 12 满足相对稳定性的系统的尼科尔斯图。(a)连续时间系统,积分增益为 3.3;(b)采样时间为 0.05 s,积分增益为 2.0;
(c)采样时间为 0.1 s,积分增益为 1.3;(d)采样时间为 0.2 s,积分增益为 0.71

Fig. 12 Nichols charts of system when relative stability requirement is satisfied. (a) Continuous time system, integral gain of 3.3; (b) sampling time of 0.05 s, integral gain of 2.0; (c) sampling time of 0.1 s, integral gain of 1.3; (d) sampling time of 0.2 s, integral gain of 0.71

不到控制带宽的设计要求;若能将系统的采样周期缩短为 0.05 s,系统的控制带宽可达 0.3 Hz,主镜系统可获得更好的性能。缩短采样周期不能无限提升控制系统的带宽,采用纯积分控制器的系统的控制带宽能达到的理论极限是连续时间系统的 0.46 Hz。采样周期小于 0.05 s 时控制带宽性能的改善十分有限。

表 1 图 12 中 4 种系统的采样周期、积分增益及控制带宽
Table 1 Sampling period, integral gain and control bandwidth for 4 systems in Fig. 12

T_i/s	K_1	Bandwidth /Hz
Continuous	3.3	0.46
0.05	2.0	0.30
0.1	1.3	0.20
0.2	0.71	0.12

4 风荷载对 8-m-RST 主镜系统的影响

风荷载是 8-m-RST 最重要的干扰源之一,分析风荷载对望远镜的影响是检验望远镜动态特性的重要手段。结合第 3 节的分析,选择 $T_i=0.1$ s, $K_1=1.3$ 作为控制器的设计值来分析风荷载对主镜系统的影响。生成一段 $\bar{v}_{10}=2$ m/s 的时长为 2000 s 的脉动风速场 $v(x, y, t)$ 。这段脉动风速场的频谱如图 13 所示,可以看出,此时脉动风的高频成分能量并不高,主要能量集中在频率小于 0.1 Hz 的低频处。

将生成的脉动风速场代入(3)式可得到风荷载的压力信号 $f(t)$,通过 $\ddot{y}_f=V^T f$ 变换得到风荷载的模式信号 $\ddot{y}_f(t)$ 。利用(6)式迭代计算得到镜面位移误差信号 $z(t)$,利用 $y_z=s^T z$ 变换可得到模式的误差信号 $y_z(t)$ 。镜面的均方根误差影响望远镜

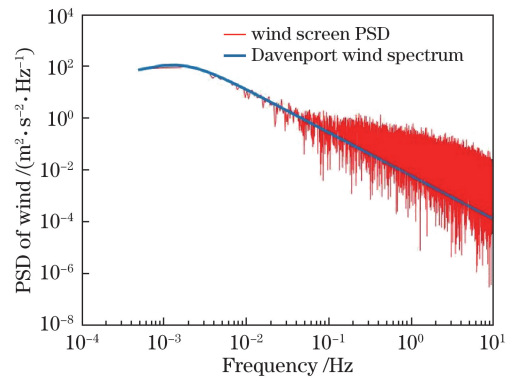


图 13 脉动风速场的频谱

Fig. 13 Spectrum of pulsed wind speed field

的成像质量及观测效率。主镜的均方根误差信号 $\tilde{z}(t)$ 定义为

$$\tilde{z}(t) = \sqrt{\frac{1}{72} \sum_{m=1}^{24} [z_{m,1}^2(t) + z_{m,2}^2(t) + z_{m,3}^2(t)]}。 \quad (7)$$

图 14(a)所示为主镜-桁架系统从 \ddot{y}_f 输入到 y_z 输出的 72 个可探测模式的伯德图。风荷载的压力单位为 N,面形误差或模式误差具有长度量纲,单位为 mm。系统的增益约为 -62 dB,即 1 N 的模式压力会造成约 790 nm 的模式误差,用(3)式计算得到 2 m/s 的风速会造成约 0.2 N 的压力,即可能会造成约 160 nm 的模式误差。图 14(b)所示为主镜系统控制闭环状态的从 \ddot{y}_f 输入到 y_z 输出的 70 个可探测模式的伯德图,可以看出,主镜控制系统闭环后具有低频阻的特性,可有效抑制频率较低的干扰的影响,这个高通滤波器的截止频率与系统的控制的带宽相近,约为 0.2 Hz。图 15 所示为 \ddot{y}_{1f} 输入到 y_{1z} 输出的控制系统开环和控制系统闭环的阶跃响应,可以看出,静态的干扰会造成主镜桁架系统的系统误差,而主镜控制系统可以有效抑制准静态干扰造成的面形误差。

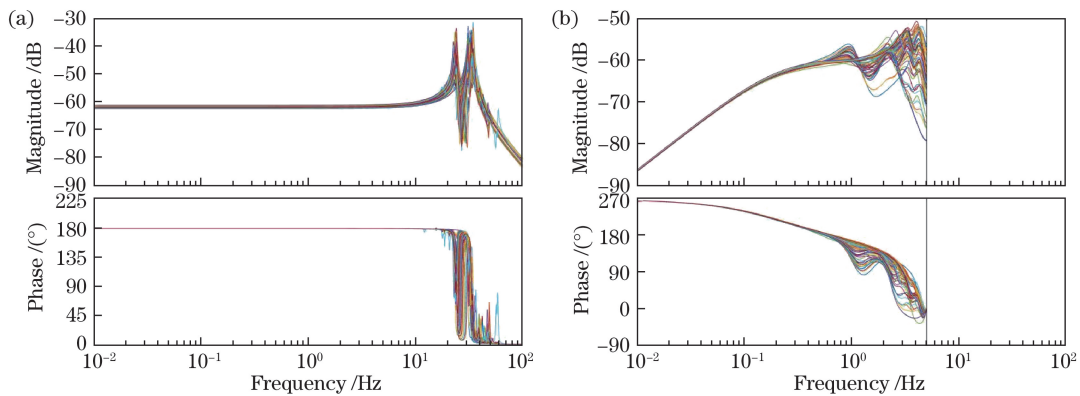


图 14 主镜控制系统扰动输入的伯德图。(a)开环状态;(b)闭环状态

Fig. 14 Bode diagram of disturbance input for primary mirror control system. (a) Open-loop state; (b) closed-loop state

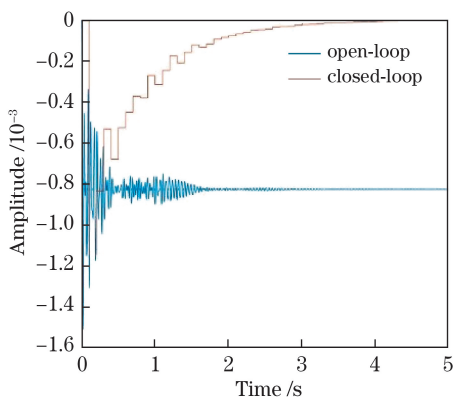


图 15 以模式 1 为例的扰动输入的阶跃响应
Fig. 15 Step response of disturbance input for mode 1 as example

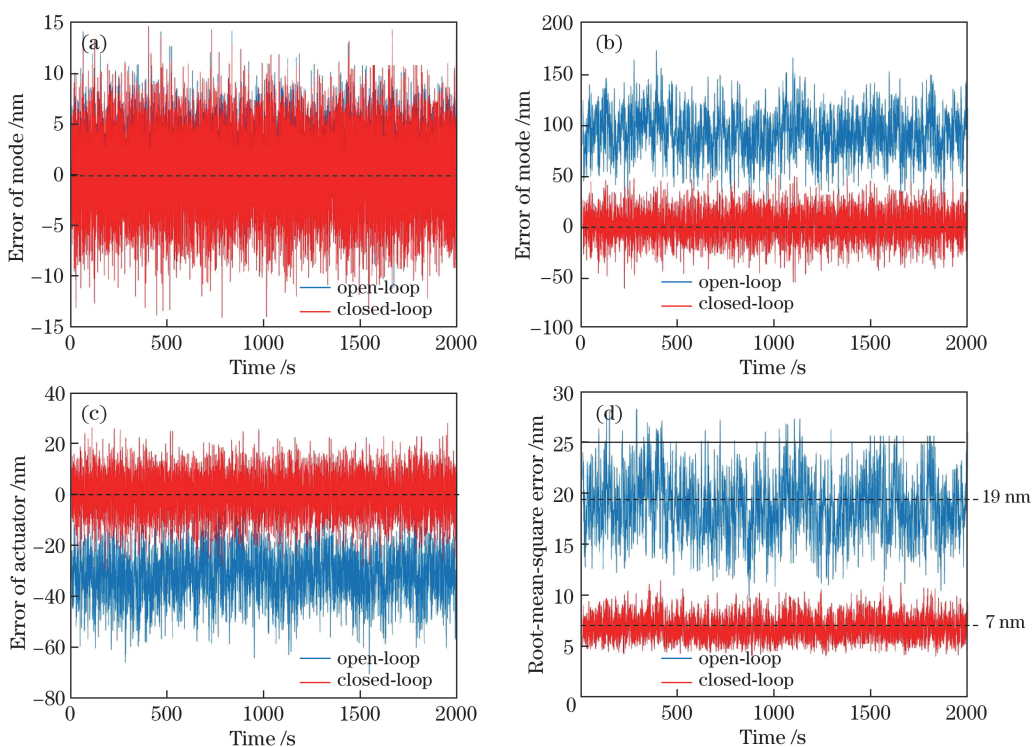


图 16 风扰作用下的误差信号。(a)模式 1 的误差;(b)模式 67 的误差;(c)促动器的误差;(d)促动器的均方根误差
Fig. 16 Error signals under wind disturbance. (a) Error of Mode 1; (b) error of mode 67; (c) error of actuator; (d) RMSE of actuators

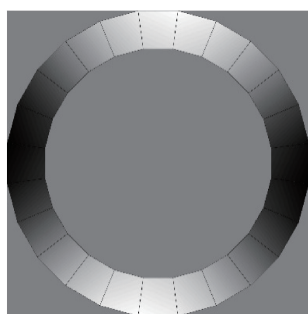


图 17 模式 67
Fig. 17 Mode 67

图 16 所示为 4 个典型信号在系统开环和闭环状态下的误差曲线,图 16(a)~(d)分别对应 $y_{1z}(t)$ 、 $y_{67z}(t)$ 、 $z_{1,1}(t)$ 、 $\bar{z}(t)$,这 4 个信号均去除了前 5 s 的系统零状态响应部分。可以看出,对于空间频率较高的主镜模式如模式 1,风荷载扰动对主镜-桁架系统的误差影响不明显。对于模式 67 这种受风扰影响较大的模式,如图 17 所示,主镜控制系统能有效抑制其误差的低频成分;各镜面点误差存在相似特性,控制系统可有效抑制镜面点的位移误差;主镜控制系统可使主镜的均方根误差在 8-m-RST 所要求的 25 nm 以内,提高了 8-m-RST 的观测效率,其中均方根误差的平均值 $\bar{z}(t)$ 在控制系统开环与闭环状态下分别为 19 nm 和 7 nm。

对图 16 中的 4 组典型信号进行频谱分析得到图 18 所示的频谱曲线。可以看出,控制系统对各模式误差、镜面位移误差和镜面面形误差低于 0.2 Hz 的成分均有较好的抑制效果。空间低频成分如模式 67 的误差比空间高频成分如模式 1 的高三个数量级,说明风扰作用于主镜系统有可能造成比较明显的低阶像差。风扰造成的误差体现出低通特性,误差信号的截止频率处于 0.2~2 Hz。如图 18(c)所示,镜面位移误差信号 $z_{1,1}(t)$ 的截止频率为 1 Hz,若通过结构和控制系统设计将系统的控制带宽提

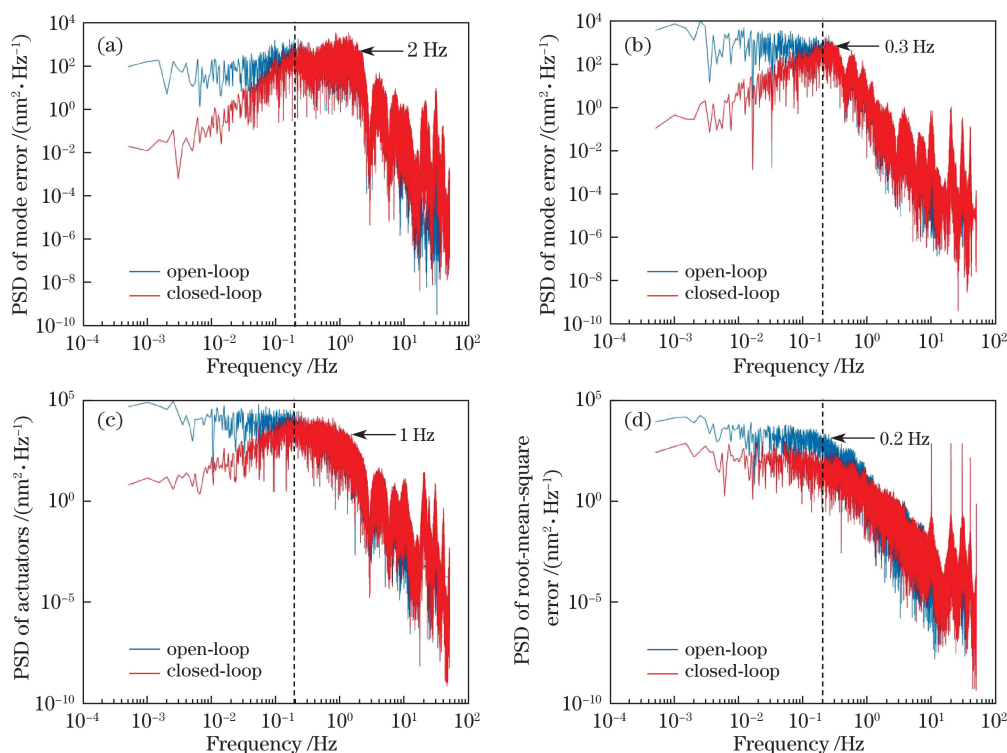


图 18 风扰作用下的误差信号功率谱。(a)模式 1;(b)模式 67;(c)促动器;(d)均方根误差

Fig. 18 Power spectra of error signals under wind disturbance. (a) Mode 1; (b) mode 67; (c) actuator; (d) RMSE

高到 1 Hz,系统能得到更显著的控制效果。由图 18(d)可知,在主镜控制系统的闭环状态下,镜面误差有较强的 10 Hz 及高次谐波成分,这由 10 Hz 控制引起。

5 结 论

考虑 8-m-RST 的主镜系统倾斜传感器采样频率比边缘传感器低的特点,建立了 8-m-RST 主镜控制系统的数字控制模型,仿真分析了主镜控制系统采样频率及积分增益与系统频率特性之间的关系,重点分析了系统的相对稳定性和控制带宽,并以较低平均风速的脉动风场作为主要干扰源,对 8-m-RST 主镜系统的开环与闭环特性进行了仿真。研究结果表明,在现有结构设计方案的前提下,8-m-RST 主镜控制系统的采样频率即倾斜传感器的采样频率应高于 10 Hz,这样才能满足增益裕度为 ± 10 dB、相位裕度为 $\pm 45^\circ$ 及控制带宽为 0.2 Hz 的设计要求;若采样频率达到 20 Hz,可以得到 0.3 Hz 的控制带宽,能有效提升系统的性能;望远镜在平均风速 2 m/s 的脉动风场环境中时,脉动风对主镜-桁架系统的干扰作用在 1 Hz 内比较明显。若能通过结构设计、材料选择和控制器设计将系统的控制带宽增大到 1 Hz 左右,可使 8-m-RST 的主镜系统更好地应对风扰。

参 考 文 献

- [1] Liu Z, Deng Y Y, Jin Z Y, *et al.* Introduction to the Chinese Giant Solar Telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8444: 844405.
 - [2] Liu Z, Jin Z Y, Yuan S, *et al.* The progress of Chinese Giant Solar Telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9145: 914526.
 - [3] Dai Y C, Yang D H, Zago L, *et al.* Dynamic analysis of the active control system for the CGST[J]. Proceedings of SPIE 2012, 8449: 84491A.
 - [4] Dai Y C, Yang D H, Jin Z Y, *et al.* Active control of the Chinese Giant Solar Telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9145: 914550.
 - [5] Shelton C, Mast T, Chanan G, *et al.* Advances in edge sensors for the thirty meter telescope primary mirror[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7012: 701210.
 - [6] Dai Y C, Liu Z, Jin Z Y. Importance of tip sensing for active control system of 30-m RIT primary mirror[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(9): 791-794.
 - [7] Yuan S, Jin Z Y, Li Y Z, *et al.* Effect of atmospheric turbulence on optical tip measurement of active control of ring segmented telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1201005.
- 袁沫, 金振宇, 李银柱, 等. 大气湍流对环形拼接望远镜主动控制中光学倾斜测量的影响[J]. 光学学

- 报, 2012, 32(12): 1201005.
- [8] Dai Y C, Lin J. Modeling and analysis of ring telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8336: 833607.
- [9] Guo T, Dai Y C, Xu F Y, *et al.* Effects of in-plane displacement on primary mirror control of Chinese Giant Solar Telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1222002.
郭泰, 戴懿纯, 许方宇, 等. 子镜面内位移对中国巨型太阳望远镜主镜控制的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1222002.
- [10] Mast T, Chanan G, Nelson J, *et al.* Edge sensor design for the TMT[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 62672S.
- [11] Dai Y C, Liu Z, Jin Z Y, *et al.* Active control of a 30 m ring interferometric telescope primary mirror[J]. Applied Optics, 2009, 48(4): 664-671.
- [12] Yu W H, Li B, Chen M, *et al.* Active control experiment of the segmented primary mirror [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101101.
于文豪, 李斌, 陈莫, 等. 拼接主镜主动控制实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101101.
- [13] Zheng B, Lu P F, Chen Y H, *et al.* Co-phase error detection of segmented mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1112002.
- 郑彬, 陆培芬, 陈永和, 等. 拼接式反射镜共相误差检测 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1112002.
- [14] Meng Y H, Xu S Y, Xu B Q. Method of segmented mirror co-phasing based on dispersed fringe sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911006.
孟玉凰, 徐抒岩, 许博谦. 基于色散条纹传感技术的拼接镜共相方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911006.
- [15] Yang D H, Xu L Z, Xu X Q. Wind disturbance study on large astronomical telescopes[J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 342-346.
杨德华, 徐灵哲, 徐欣圻. 大型光学天文望远镜风载作用分析 [J]. 光学技术, 2009, 35(3): 342-346.
- [16] Zhang X T. Wind load theory and wind resistance handbook for engineering structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990.
张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1990.
- [17] Aubrun J N, Lorell K R, Havas T W, *et al.* Performance analysis of the segment alignment control system for the ten-meter telescope [J]. Automatica, 1988, 24(4): 437-453.
- [18] Sedghi B, Muller M, Bauvir B. Dynamical simulation of E-ELT segmented primary mirror [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8336: 83360D.