

自适应光学系统的混合控制方法

王佳英^{1,2,3}, 郭友明^{1,2*}, 孔林^{1,2}, 陈克乐^{1,2,3}, 饶长辉^{1,2**}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 采用全模式线性二次高斯控制时,多阶模式扰动模型的辨识以及高维控制矩阵的计算会导致实时处理机的计算负担加重。基于此,提出一种适用于实际自适应光学系统的混合控制方法。该方法联合最优模式增益积分控制和线性二次高斯控制算法,根据模式中是否含有窄带扰动来选择对应模式的控制策略。以云南抚仙湖观测站 1 m 新真空太阳望远镜中高阶自适应光学系统的实测数据为例,对提出的控制策略进行了验证。结果表明,采用本文提出的混合控制策略,使系统中 95.85% 的扰动得到有效滤除。该控制方法与全模式使用最优模式增益积分控制的方法相比,不同频率的窄带扰动得到明显抑制;该方法与全模式使用线性二次高斯控制的方法相比,扰动模型的辨识所花费的时间缩短了 37.77%,控制运算所花费的时间缩短了 73.8%,有利于扰动的实时校正。

关键词 自适应光学; 最优模式增益积分控制; 线性二次高斯控制; 扰动

中图分类号 O439; TP273+.3 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.230101

Hybrid Control Method for Adaptive Optics System

Wang Jiaying^{1,2,3}, Guo Youming^{1,2*}, Kong Lin^{1,2}, Chen Kele^{1,2,3}, Rao Changhui^{1,2**}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract When using linear quadratic Gaussian (LQG) control on each mode, the higher-order disturbance model not only requires non-negligible identification effort but also leads to the calculations of high-order control matrix, which greatly increases the computational burden of the real-time processor. To address this problem, we propose a hybrid control method for adaptive optics (AO) system, which is feasible from an implementation viewpoint. This method combines the optimal modal gain integral control (OMGI) and LQG control algorithm, and designs the control strategy of the corresponding mode according to whether the mode is affected by narrow-band disturbances. The performances of the proposed control method are evaluated using the on-sky measurement data recorded by the 1-m New Vacuum Solar Telescope (NVST) at Fuxian Solar Observatory (FSO). The results show that 95.85% of disturbances are effectively filtered by the hybrid control method. Compared with the full-OMGI, the narrow-band disturbances at different frequencies are significantly suppressed. And compared with the full-LQG, the execution time of identification procedure is reduced by 37.77% and the control calculation time is reduced by 73.8%, which is more beneficial for the real-time mitigation of disturbance.

Key words adaptive optics; optimized modal gain integrator control; linear quadratic Gaussian control; disturbances

OCIS codes 010.1080; 110.1080; 010.1285

收稿日期: 2020-03-06; 修回日期: 2020-04-19; 录用日期: 2020-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(11733005, 11727805)

* E-mail: ymguoioe@126.com; ** E-mail: chrao@ioe.ac.cn

1 引言

地基天文望远镜高分辨率成像严重受限于波前畸变。自适应光学(AO)系统通过控制波前校正器对波前的扰动进行实时校正,从而补偿图像退化,已经成为现代大口径望远镜的标准化装备^[1-2]。除大气湍流造成的像差外,工作环境的变化以及自适应光学系统本身也会带来像差扰动,其主要包括望远镜跟踪误差以及大气风吹抖动等造成的低频率、慢变化扰动^[3]和由光学平台和器件(如电机、风扇、水冷机等)的结构性谐振造成的高频率窄带振动^[4-5]。这些扰动(包括大气湍流)在时域和频域都表现出时变特性,即扰动的振动幅度、振动频率以及频率分布范围随观测时间的演变,这在很大程度上降低了系统的成像质量^[6]。

积分(PI)控制器由于其控制律简单,计算量小,被广泛地应用于传统自适应光学系统中。然而面对现代天文观测的高分辨成像要求(为获得精确的磁流管结构,太阳望远镜的分辨率要求高达 $0.1'' \sim 0.2''$ ^[7]),经典的PI控制方法因其控制参数固定,不具备自适应性,对时变的扰动不具备预测能力,对窄带扰动不具备最优性^[8],已经不能满足现代大口径天文望远镜的需求。为此,国内外研究学者们分别提出最优模式增益积分器^[9-10](OMGI)、基于神经网络的自学习法^[11]以及双变形镜组合系统^[12]等来提高系统的校正能力。

线性二次高斯(LQG)控制是一种基于状态空间模型的最优控制技术。自1993年LQG控制算法引入至自适应光学系统后^[13],LQG控制算法因其在波前扰动抑制方面的优良性能,现已应用于大型地基天文望远镜系统中,但目前的研究主要集中在对低阶倾斜模式的校正方面^[14-16]。2014年Sivo等^[17]将LQG控制算法应用于高阶模式的扰动抑制研究,并在4.2 m的William Herschel望远镜系统上成功实现了全模式湍流扰动的消减及低阶倾斜窄带扰动的抑制。然而,通过对国内外多个望远镜的测量分析,可知虽然窄带抖动主要存在于低阶倾斜模式中,但是部分高阶模式中也存在窄带扰动^[5,18]。2019年饶长辉团队^[19]对基于LQG控制的多阶高阶模式窄带扰动的抑制进行了室内实验,证明基于LQG控制的扰动抑制器比PI控制器的扰动残余能量少约50%。

为了获得最优的扰动抑制性能,理想的情况是对所有模式的扰动都采用LQG控制算法进行抑

制,但这并不利于实际系统的实现。一方面,由于LQG控制的扰动抑制性能取决于扰动模型是否精确,故实际应用中必须对每一阶扰动的模型参数进行实时在线辨识,这无疑会给系统带来计算负担。另一方面,为了可以对扰动进行实时校正,模型参数的更新周期应尽可能短,这对系统的计算能力提出了更高的要求。由于窄带抖动主要存在于低阶倾斜模式以及部分高阶模式中,为了在有效抑制扰动的同时减小系统的计算压力,除对倾斜镜直接采用LQG控制外,本文针对高阶模式的扰动抑制提出了一种联合OMGI控制与LQG控制的混合控制方法,该方法根据模式中是否含有窄带扰动来选择对应模式的控制策略。在高阶模式中存在窄带扰动的情况下,本文方法既保证了对扰动的有效抑制,又减小了系统的运行负担,整体上提高了自适应光学系统的有效性和实时性。此外,通过对实测数据进行重演仿真,对云南抚仙湖观测站1 m新真空太阳望远镜^[20](New Vacuum Solar Telescope, NVST)的控制策略进行了分析验证。

2 自适应光学高阶校正系统

2.1 控制系统模型

自适应光学系统本质上是一个多人多出的闭环控制系统^[21]。典型的AO系统高阶扰动校正回路控制框图如图1所示,其中 ϕ 是经倾斜镜校正后的扰动, ϕ^{cor} 是经变形镜(DM)产生的波前补偿信号, ϕ^{res} 是补偿后的残余扰动, Y 为由波前传感器(WFS)测量的信号通过波前复原算法转化得到的测量扰动, N 为变形镜的响应矩阵, D 为波前传感器的响应矩阵, G 为控制器传递函数, W 为系统内部噪声信号经波前探测器后的综合信号, U 为变形镜控制电压,整个控制回路存在两个采样时间的延迟。扰动相位统一用其分解后得到的泽尼克(Zernike)模式系数表示,其中Zernike模式阶数为 N_{zer} 。

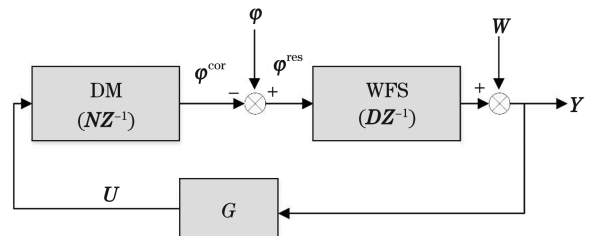


图1 自适应光学系统高阶扰动校正回路控制框图

Fig. 1 Block diagram of high-order disturbance correction loop in AO system

设波前传感器和变形镜可以提供线性瞬时响应(即测量和重构可以直接获得),波前传感器子孔径数为 N_{sub} ,变形镜驱动器个数为 N_{act} ,多通道变形镜 k 时刻的校正过程为

$$\boldsymbol{\varphi}_{k-1}^{\text{cor}} = \mathbf{N}\mathbf{U}_{k-2}, \quad (1)$$

其中, \mathbf{U} 为 $N_{\text{act}} \times 1$ 矩阵, $\boldsymbol{\varphi}^{\text{cor}}$ 为 $N_{\text{zer}} \times 1$ 矩阵, \mathbf{N} 为 $N_{\text{zer}} \times N_{\text{act}}$ 矩阵。波前传感器的测量过程为 $\mathbf{Y}_k = \mathbf{D}\boldsymbol{\varphi}_{k-1}^{\text{res}} + \mathbf{W}_k$, 其中 $\boldsymbol{\varphi}_{k-1}^{\text{res}} = \boldsymbol{\varphi}_{k-1} - \boldsymbol{\varphi}_{k-1}^{\text{cor}}$ 。因此, 测量等式为

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varphi}_{k-1} - \mathbf{N}\mathbf{U}_{k-2}) + \mathbf{W}_k, \quad (2)$$

式中: \mathbf{Y} 为 $N_{\text{zer}} \times 1$ 矩阵; \mathbf{D} 为单位矩阵, 大小为 $N_{\text{zer}} \times N_{\text{zer}}$; \mathbf{W} 为 $N_{\text{zer}} \times 1$ 矩阵。

2.2 最优模式增益积分控制

如前文所述, 扰动的不断变化要求控制器参数能够实时调整, 而控制参数固定或各模式控制参数相同的经典 PI 控制算法无法对变化的高阶模式扰动进行有效校正。经典 PI 控制的传递函数为^[22]

$$G_{\text{PI}} = \frac{b}{1 - az^{-1}}, \quad (3)$$

其中, a 和 b 为控制参数, 一般 $a = 0.99, 0 \leq b \leq 1$ 。多通道 PI 控制表示为^[23]

$$\mathbf{U}_k = a\mathbf{U}_{k-1} + \mathbf{B}^u \mathbf{U}_k^R, \quad (4)$$

式中: \mathbf{B}^u 为驱动器对应的最优增益矩阵, 其对角线元素为各通道对应的最优增益, 大小为 $N_{\text{act}} \times N_{\text{act}}$, 上标 u 表示驱动器; \mathbf{U}^R 为复原电压矩阵, 可通过 $\mathbf{U}_k^R = \mathbf{M}\mathbf{Y}_k$ 获得, 其中 \mathbf{M} 为响应矩阵 \mathbf{N} 的广义逆矩阵, 即

$$\mathbf{M} = (\mathbf{N}^T \mathbf{N})^{-1} \mathbf{N}^T. \quad (5)$$

由(1)、(4)、(5)式可以得出多模式最优增益积分控制器, 据此对校正电压作进一步的计算, 有

$$\boldsymbol{\varphi}_{k+1}^{\text{cor}} = a\boldsymbol{\varphi}_k^{\text{cor}} + \mathbf{B}^m \mathbf{Y}_k, \quad (6)$$

式中: \mathbf{B}^m 为模式对应的最优模式增益矩阵(由递归最小二乘法获得^[22]), 大小为 $N_{\text{zer}} \times N_{\text{zer}}$, 其对角线元素为各模式对应的最优增益值, 上标 m 表示模式; a 取 0.99。

当对所有模式扰动都进行 OMGI 控制, 即全模式的 OMGI 控制(Full-OMGI)时, 仅需对模式最优增益矩阵 \mathbf{B}^m 进行估计就可以直接进行扰动的抑制, 单帧校正仅需进行一次矩阵乘法运算和一次矩阵加法运算。

2.3 线性二次高斯控制

如前文所述, LQG 控制是以获得最小校正残差为目标的最优控制策略, 其本质是根据扰动模型通

过卡尔曼滤波器实时地对动态扰动进行估计和预测, 从而得到最优的校正电压的过程^[14]。因此, 获得最优扰动抑制性能的关键是构建精确的动态扰动模型。

自适应光学系统中, 包括湍流和窄带抖动在内的扰动可以由受迫阻尼振荡等式来描述, 离散化后为自回归二阶模型(AR2)^[15-17]。因这些扰动统计互相独立, 多模式复合扰动可由多个具有不同参数的 AR2 模型联合获得, 即

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varphi}_k = \boldsymbol{\varphi}_k^{\text{tur}} + \boldsymbol{\varphi}_k^{\text{nb}} \\ \boldsymbol{\varphi}_k^{\text{tur}} = \mathbf{A}_1^{\text{tur}} \boldsymbol{\varphi}_{k-1}^{\text{tur}} + \mathbf{A}_2^{\text{tur}} \boldsymbol{\varphi}_{k-2}^{\text{tur}} + \mathbf{v}_k^{\text{tur}}, \\ \boldsymbol{\varphi}_k^{\text{nb}} = \mathbf{A}_1^{\text{nb}} \boldsymbol{\varphi}_{k-1}^{\text{nb}} + \mathbf{A}_2^{\text{nb}} \boldsymbol{\varphi}_{k-2}^{\text{nb}} + \mathbf{v}_k^{\text{nb}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}^{\text{tur}}$ 表示多阶湍流扰动模式, $\mathbf{A}_1^{\text{tur}}$ 和 $\mathbf{A}_2^{\text{tur}}$ 为湍流模型系数矩阵, \mathbf{v}^{tur} 为湍流扰动模型误差, 角标 tur 表示湍流扰动; $\boldsymbol{\varphi}^{\text{nb}}$ 表示受窄带扰动影响的多阶波前模式, \mathbf{A}_1^{nb} 和 \mathbf{A}_2^{nb} 为受窄带扰动影响的波前模型系数, \mathbf{v}^{nb} 为驱动源信号, 角标 nb 表示窄带扰动。结合(2)式和(7)式可得到系统的状态方程为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \\ \mathbf{Y}_k = \mathbf{C}\mathbf{X}_k - \mathbf{D}\mathbf{N}\mathbf{U}_{k-2} + \mathbf{W}_k, \\ \boldsymbol{\varphi}_k = \mathbf{P}\mathbf{X}_k \end{cases} \quad (8)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^{\text{tur}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{A}_2^{\text{tur}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_1^{\text{nb}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{A}_2^{\text{nb}} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 \mathbf{X}_k 表示 k 时刻的扰动状态, $\mathbf{X}_k = [\boldsymbol{\varphi}_k^{\text{tur}}, \boldsymbol{\varphi}_{k-1}^{\text{tur}}, \boldsymbol{\varphi}_k^{\text{nb}}, \boldsymbol{\varphi}_{k-1}^{\text{nb}}]^T$ 。设 N_{nb} 为总的窄带扰动个数, 则矩阵 \mathbf{X} 的大小为 $2(N_{\text{zer}} + N_{\text{nb}}) \times 1$; 矩阵 \mathbf{A} 为表示扰动特性的模型参数矩阵, 可通过辨识算法获得, 大小为 $2(N_{\text{zer}} + N_{\text{nb}}) \times 2(N_{\text{zer}} + N_{\text{nb}})$; 矩阵 \mathbf{V} 为模型误差向量, 可通过对噪声估计获得, 大小为 $2(N_{\text{zer}} + N_{\text{nb}}) \times 1$; 矩阵 \mathbf{C} 为测量矩阵, 大小为 $N_{\text{zer}} \times 2(N_{\text{zer}} + N_{\text{nb}})$; 矩阵 \mathbf{P} 用于将当前扰动从状态向量中提取出来, 大小为 $N_{\text{zer}} \times 2(N_{\text{zer}} + N_{\text{nb}})$; 矩阵 \mathbf{I} 为单位矩阵。具体矩阵的表达见参考文献[17, 19]。

基于卡尔曼滤波的 LQG 的控制机制如下。

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k} = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{H}_\infty (\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_{k|k-1}) =$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{H}_\infty (\mathbf{Y}_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{D}\mathbf{N}\mathbf{U}_{k-2}), \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}_{k|k}, \quad (11)$$

$$\mathbf{U}_k = \mathbf{M}\mathbf{P}\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}, \quad (12)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}_{k|k}$ 为测量后对状态的估计; \mathbf{H}_∞ 为卡尔曼滤波增益, 大小为 $2(N_{\text{zer}} + N_{\text{nb}}) \times N_{\text{zer}}$, 定义为

$H_\infty = \Sigma_\infty C^T (C \Sigma_\infty C^T + \Sigma_w)^{-1}$, 其中 Σ_w 为测量噪声方差矩阵, Σ_∞ 为 Riccati 方程的解, 可离线获得^[24]。将 LQG 表示为 Z 变换形式的传递函数, 即^[17]

$$G_{LQG}(z) = [I - (I - H_\infty C)A]z^{-1} + AH_\infty DNMPz^{-2}]^{-1} AH_\infty. \quad (13)$$

当对所有模式扰动都进行 LQG 控制, 即全模式的 LQG 控制 (Full-LQG) 时, 在执行扰动抑制之前, 需要对各模式的扰动进行模型参数估计, 计算控制参数矩阵。其中, 模型参数的估计包括对各模式中单频率扰动的分离、测量噪声的估计以及模型参数的辨识。此外, 单帧校正最少需要 5 次矩阵乘法和 3 次矩阵加法运算。理论上, 全模式 LQG 的整个控制过程较 PI 控制更加复杂, 单帧运算量较全模式 OMGI 控制也更多。

3 混合控制

由第 2 章的叙述可知, OMGI 控制具有计算量小、控制参数可调整的特点, 可以对时变的扰动进行抑制, 但仍难以对窄带扰动进行有效控制。而 LQG 控制可根据精确的扰动模型实现窄带扰动的最优抑制, 但获得模型参数的辨识过程很大程度上加重了实时处理机的负担。为了有效抑制扰动尤其是窄带扰动, 尽量减小系统的计算压力, 并同时保证系统的有效运行, 提出一种联合 OMGI 控制与 LQG 控制的混合控制方法。在实际系统设计中应用混合控制策略时将引入三个待解决的问题, 即模式控制器选择依据、控制策略执行机制以及控制策略的更新方式。

因为 LQG 控制依赖于精确的扰动控制模型, 需要通过测量数据对扰动模型参数进行估计, 而模式增益积分控制的性能与扰动模型无关。当窄带扰动存在时, 相较 OMGI 控制, LQG 控制可以得到最优的窄带扰动抑制性能。因此, 本研究将高阶模式上是否存在窄带扰动作为控制器选择的依据。受参考文献[16]中对扰动信号进行频谱分离的启发, 依据扰动频谱分离的结果可以判断高阶模式中是否存在窄带抖动。如果高阶模式中存在有效窄带抖动, 则选择 LQG 控制, 如果高阶模式中仅存在低频湍流扰动, 则选择 OMGI 控制。同时, 频谱分离可以为下一步扰动模型参数的辨识提供对应的辨识数据。进行多模式 LQG 控制器设计时需要分离得到的不同模式中的扰动进行模型参数的辨识以及测量噪声方差的估计, 本研究采用的辨识方法为 Levenberg - Marquardt 法, 详情见参考文献[25]。

此外, OMGI 控制中的最优模式增益可通过递归最小二乘法获得。

混合控制仅需对含有窄带扰动的模式进行基于 LQG 控制的扰动抑制, 而对只含有湍流扰动的模式则采用计算量更小的 OMGI 控制, 由此既可以实现对窄带扰动的最优抑制, 还可以一定程度上减小系统的计算压力。混合控制策略的执行机制如下。

1) 通过测量数据计算伪开环 (POL), 这一数据由实测闭环数据和对应 DM 校正波前相加获得。

2) 将扰动信号用前 65 阶 Zernike 模式系数表示, 并通过平均周期图法估计各模式的功率谱密度。

3) 对当前模式扰动进行频谱分离, 判断有无窄带扰动并确定扰动个数:

(1) 若扰动个数大于 1, 则除湍流外包含窄带扰动, 确定扰动模式数, 利用辨识算法进行扰动模型参数辨识并估计测量噪声方差;

(2) 若扰动个数为 1, 则仅包含湍流扰动, 确定扰动模式数, 并进行最优模式增益估计。

4) 对每一阶扰动执行步骤 3), 直到前 65 阶模式都计算完成 (实际系统中并行运行)。

5) 根据步骤 3) 和步骤 4) 得到的不同模式的扰动特性, 即是否受窄带扰动影响, 整合其中受窄带扰动影响的模式控制参数, 设计多模式 LQG 的控制矩阵; 此外, 根据其余仅含有湍流模式对应的最优增益设计多模式 OMGI 控制器。

6) 将多模式 LQG 的控制矩阵和多模式最优增益矩阵加载到实时处理机, 进行全模式的混合控制。

7) 按照一定的时间周期, 循环执行步骤 1)~6)。

通常情况下, 为了确保校正的准确性, 控制算法应保持实时更新。考虑到扰动随时间的变化相对于采样环较缓慢 (通常为几千帧时间尺度), 整个高阶扰动控制过程可在闭环情况下循环进行^[16], 其循环周期的长短需要根据实际测量中扰动变化的快慢以及系统计算能力的强弱来确定 [如 SAXO (SPHERE AO for eXoplanet Observation) 中设更新周期为 1 min^[26], 而 GeMS (Gemini South Multi-Conjugate Adaptive Optics System) 中设更新周期为 30 s^[27]。当进行新周期控制矩阵计算时, 需要重新执行步骤 1)~6), 除了系统的初始状态变为上一周期最后的状态外, 整个控制过程相当于应用新的控制律。将所有与窄带扰动相关的状态置为零, 可以简单有效地实现

控制器间的无起伏转换^[26]。当然这种操作是次优的^[28],更加合理高效的控制器转换方式将会在下一步工作中详细研究。

4 实例验证

混合控制方法理论上既可以实现对窄带扰动的最优抑制,还可以一定程度上减小系统的计算压力。为了对混合控制方法的有效性进行验证,以云南抚仙湖观测站 1 m 新真空太阳望远镜高阶自适应光学系统实测空天数据为例^[18,20],通过对测量数据进行重演仿真,对提出的控制算法进行了验证。整个重演仿真过程在平台 PC Intel Core i7-8550U CPU @ 2.40 GHz 上进行。

4.1 控制系统模型

1 m 新真空太阳望远镜高阶自适应光学系统的高阶校正环由 102 个子孔径的夏克-哈特曼波前传感器、151 个驱动器的变形镜和 1 个实时处理机组成,其中实际参与校正的有效驱动器数为 127,

并于 2015 年采集了 700 组连续数据对(包括闭环残余斜率和变形镜校正电压),每组数据含有 4096 帧数据对,采样频率为 3.4 kHz。伪开环数据由各数据组实测闭环残余扰动与对应 DM 校正波前相加获得。波前测量扰动由前 65 阶 Zernike 多项式复原得到(表示为模式 Z3~Z65),其中前两阶扰动(即倾斜模式 Z1 和 Z2)已经通过精跟踪环进行校正^[18]。

图 2 为通过第 10 个数据组计算出的伪开环数据中受窄带影响的部分高阶扰动模式的功率谱密度(PSD)曲线。从图中可以看出,多阶模式中明显存在频率为 135 Hz 的窄带扰动,部分模式中还存在其他频率的窄带扰动,如模式 Z6 中存在频率为 303 Hz 的窄带扰动,模式 Z8 中存在频率为 293 Hz 的窄带扰动等。与实测闭环残余扰动相比,重演计算的伪开环扰动的低频部分得到了较好的抑制,而高频窄带扰动并没有得到有效校正,这使得系统的控制带宽非常有限,仅能达到采样频率的 1/20^[18]。

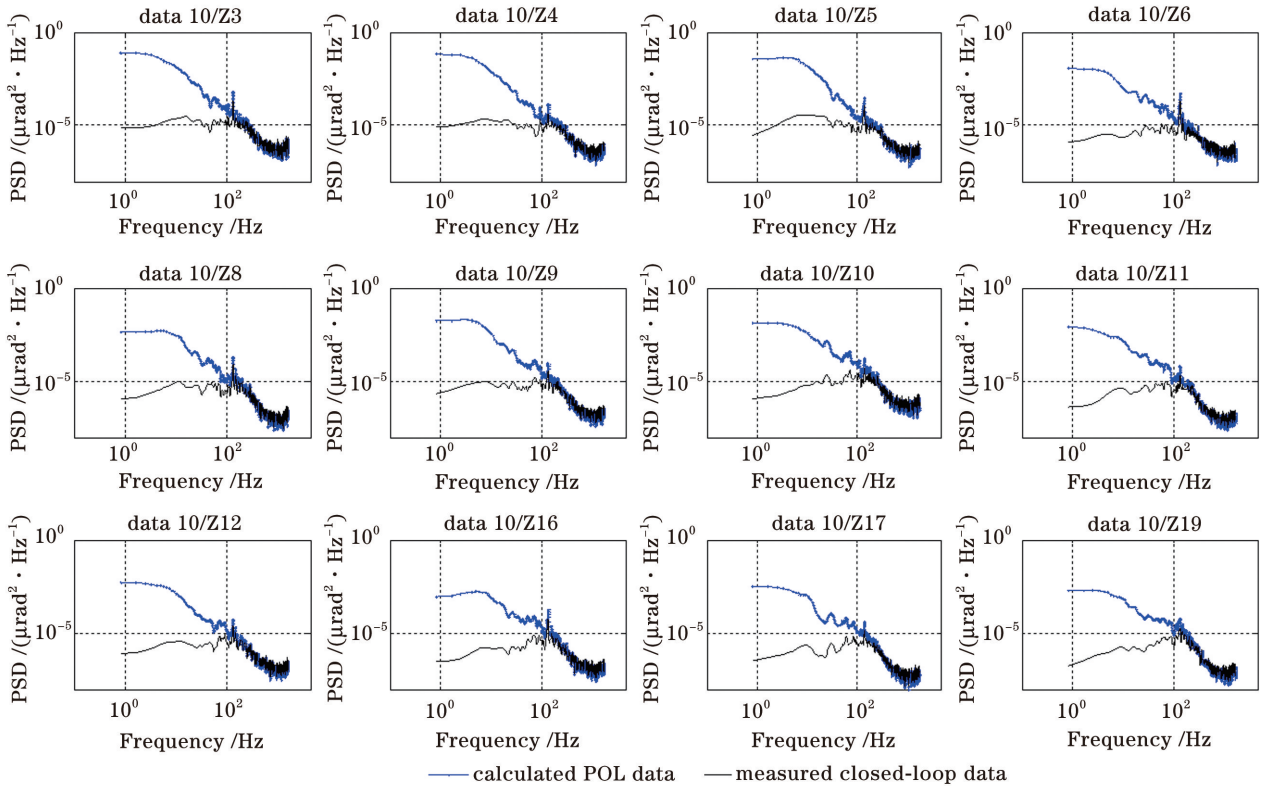


图 2 1 m NVST 中受窄带扰动影响的部分模式功率谱密度图(包括模式 Z3~Z6, Z8~Z12, Z16, Z17, Z19)

Fig. 2 PSD curves of some modes affected by narrow-band disturbances in 1-m NVST, including modes Z3~Z6, Z8~Z12, Z16, Z17, Z19

4.2 控制实现

设计不同模式的控制器前,需要明确不同模式中的扰动特性,即判断模式中是否含有窄带扰动。本研

究通过平均周期图法对扰动的功率谱密度进行估计,并通过频谱分离的方法确定了模式中除湍流外的窄带扰动个数。频谱分离的依据为不同类型的扰动间

统计独立,窄带扰动的幅值明显高于相应频率段的线性插值,具体参见文献[16]。通过对各阶模式的扰动依次执行频谱分离操作,得到除低阶倾斜模式外,系统中受窄带扰动影响的模式数一共有 28 阶,共有 40 个窄带扰动。图 3 展示了部分受窄带扰动影响的

模式对应的频谱图。基于平台 PC Intel Core i7-8550U CPU @ 2.40 GHz 对扰动模式特性进行判断,因每一阶用时都小于 0.1 s,故整个判断过程串行用时不会超过 6.3 s。实际系统平台可实现对多阶模式的并行计算,因此整个判断用时将大大缩短。

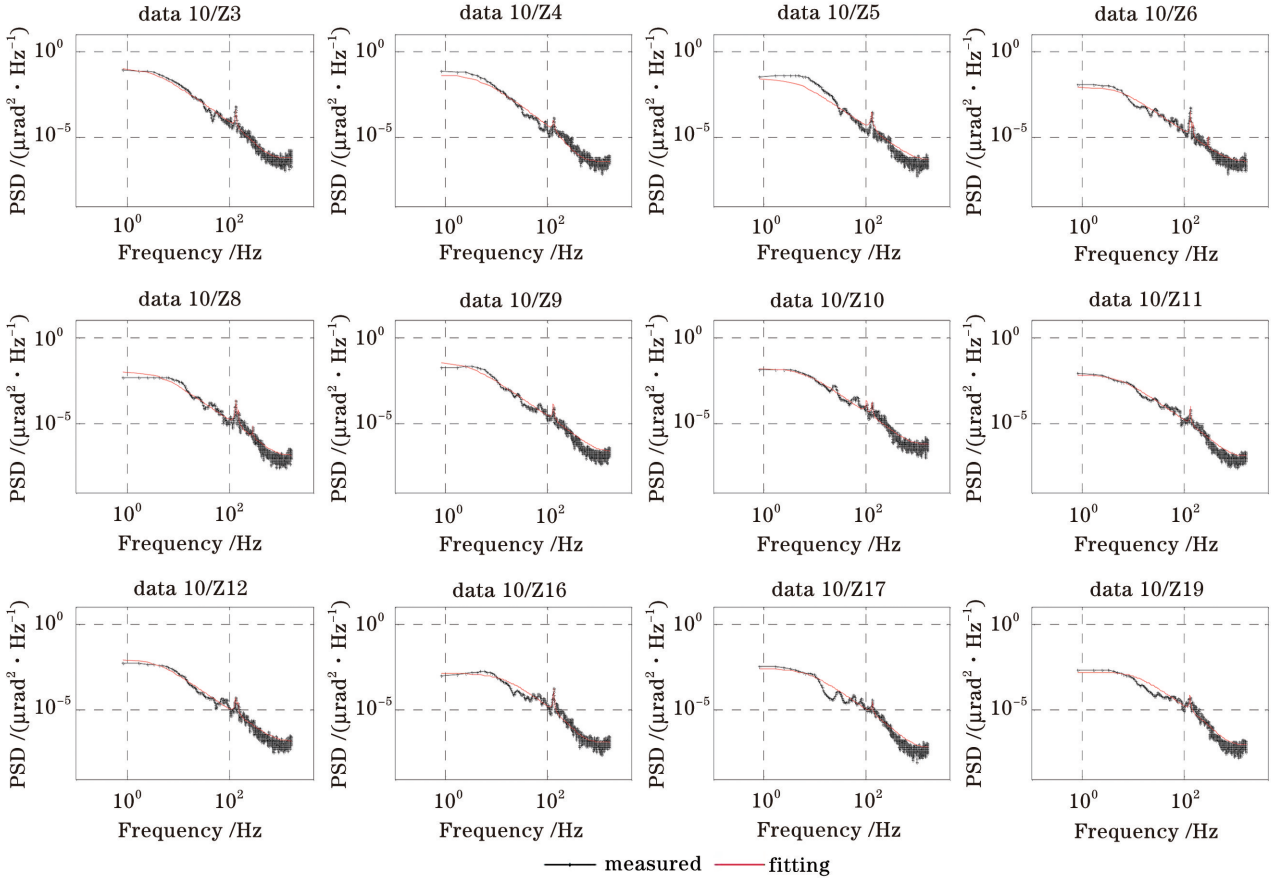


图 3 受窄带扰动影响的多阶模式的频谱拟合结果

Fig. 3 Spectral fitting results about multi-order modes affected by narrow-band perturbations

基于对各个模式扰动特性的分析,可以根据模式中是否含有窄带扰动来分别设计多模式 OMGI 控制(仅含湍流扰动模式)和多模式 LQG 控制(含窄带扰动模式)。为了更好地评估混合控制方法的性能,本研究采用文献[25]提出的 Levenberg-Marquardt 法来对所有的扰动模式进行模型参数的估计,图 3 给出扰动模型的拟合结果。整个扰动模型参数的辨识以及控制参数的整合用时为 142.657 s,其中含窄带扰动的 28 阶模式辨识用时为 84.136 s(受平台限制,所有模式模型参数的辨识过程串行进行,每一阶含窄带扰动的模式辨识用时不超过 4 s,而仅含湍流的模式每一阶用时低于 1.7 s)。此外,在设计多模式 OMGI 控制前,需要对各个模式的最优增益进行估计。本文通过重演测量过程获得了伪开环扰动数据,并采用递归最小二乘

法获得了各个模式对应的最优增益。图 4 为计算得

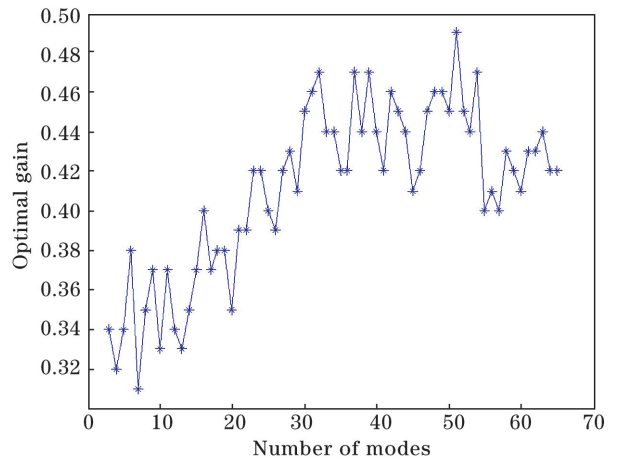


图 4 模式 Z3~Z65 对应的最优增益

Fig. 4 Optimal gain for modes Z3 to Z65

到的各模式对应的最优增益,整个重演计算用时 2.267 s。至此,可以得到全模式 OMGI 控制参数,一共用时 2.267 s;全模式 LQG 控制(包括频谱分离以及模型参数辨识)用时 148.957 s;复合控制(其中有 28 阶模式采用 LQG 控制,35 阶模式采用 OMGI 控制)用时不超过 92.703 s,相较全模式 OMGI 控制计算时间缩短 37.77%。因此,基于仿真平台的控制参数更新周期可设为 100 s。

最后,对提出的混合控制算法基于平台 PC Intel Core i7-8550U CPU @ 2.40 GHz 进行了仿真模拟,并与全模式 LQG 控制及全模式 OMGI 控制进行了对比,结果如图 5~9 所示。整个扰动抑制过程全模式 OMGI 控制用时为 0.014 s,全模式 LQG 控制用时为 3.089 s,本文提出的混合控制用时为 0.808 s。由此可见,控制计算时间缩短 73.84%,很大程度上缓解了实时处理机的计算压力。

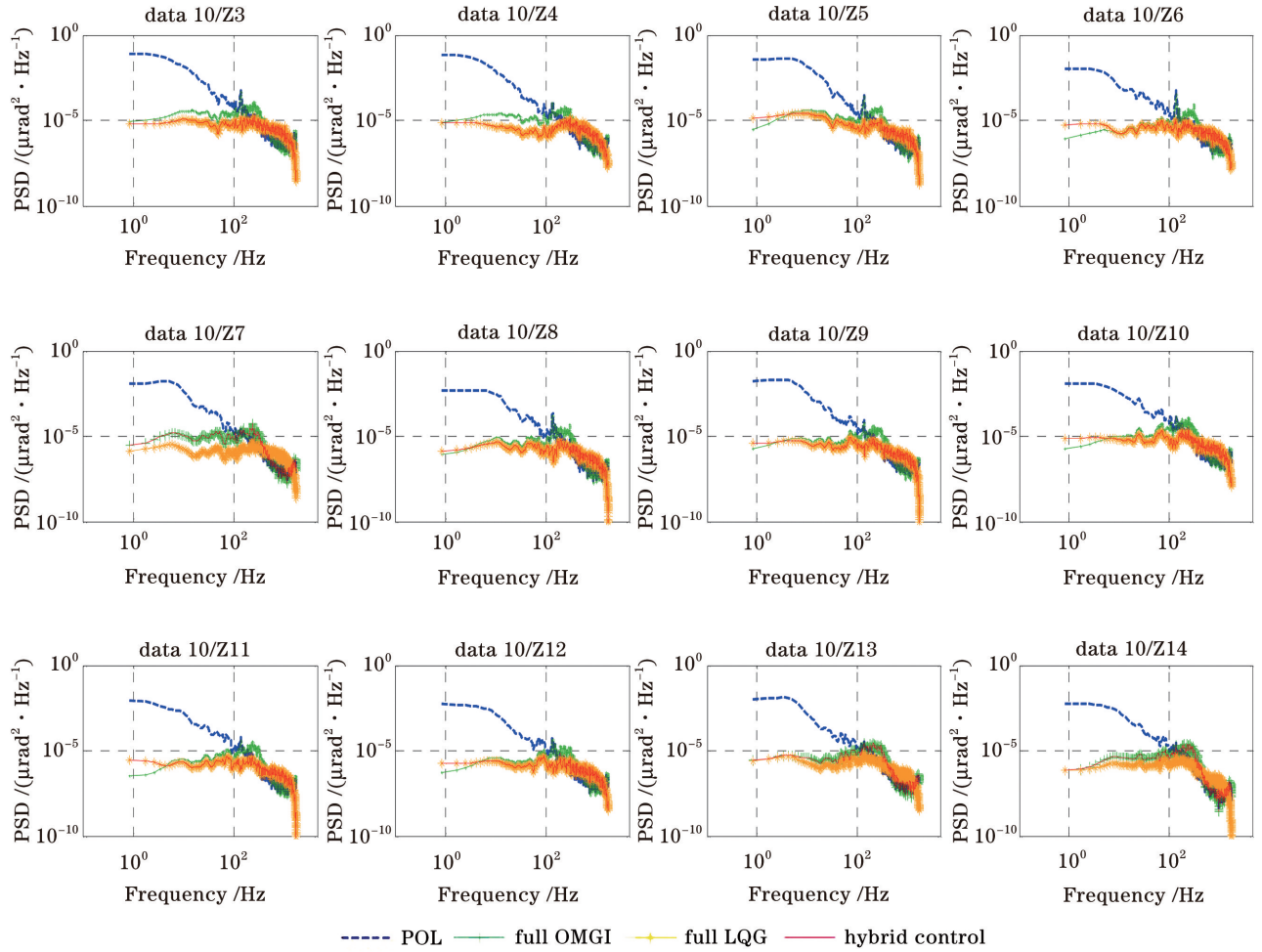


图 5 不同控制方法下模式 Z3~Z14 分别对应的残余扰动的功率谱对比

Fig. 5 PSD curves for POL and residual disturbance on modes Z3 to Z14 using different control methods

图 5 和图 6 分别对应于不同控制策略对不包括倾斜在内的连续 12 阶高阶模式扰动(模式 Z3~Z14)进行抑制后的残余扰动功率谱对比和累积功率谱对比。结果表明,不同控制策略对扰动的抑制有一定的作用。由图 5 可知,当高阶模式中存在窄带扰动时,本文提出的混合控制方法相较全模式 OMGI 控制对窄带扰动有明显的抑制效果,并与全模式 LQG 控制相当。图 6 中的累积功率谱密度进一步验证混合控制方法对扰动抑制的有效性优于全模式 OMGI 控制方法。

图 7~9 分别反映了基于不同控制策略的整体波前扰动(由前 65 阶 Zernike 模式系数表征的整体波前残余扰动)对应的均方根值(RMS)对比、功率谱对比以及累积功率谱对比。由图 7 可知,本文提出的混合控制策略可以明显地抑制高阶扰动,扰动 RMS 值由开环情况下的 $0.314 \mu\text{rad}$ 减小到 $0.064 \mu\text{rad}$,95.85%的扰动得以抑制,优于全模式 OMGI 控制的 $0.085 \mu\text{rad}$,但略逊于全模式 LQG 控制的 $0.045 \mu\text{rad}$ 。此外,从图 8 可以看出,混合控制对频率为 135 Hz 的窄带扰动有明显的抑制作用,

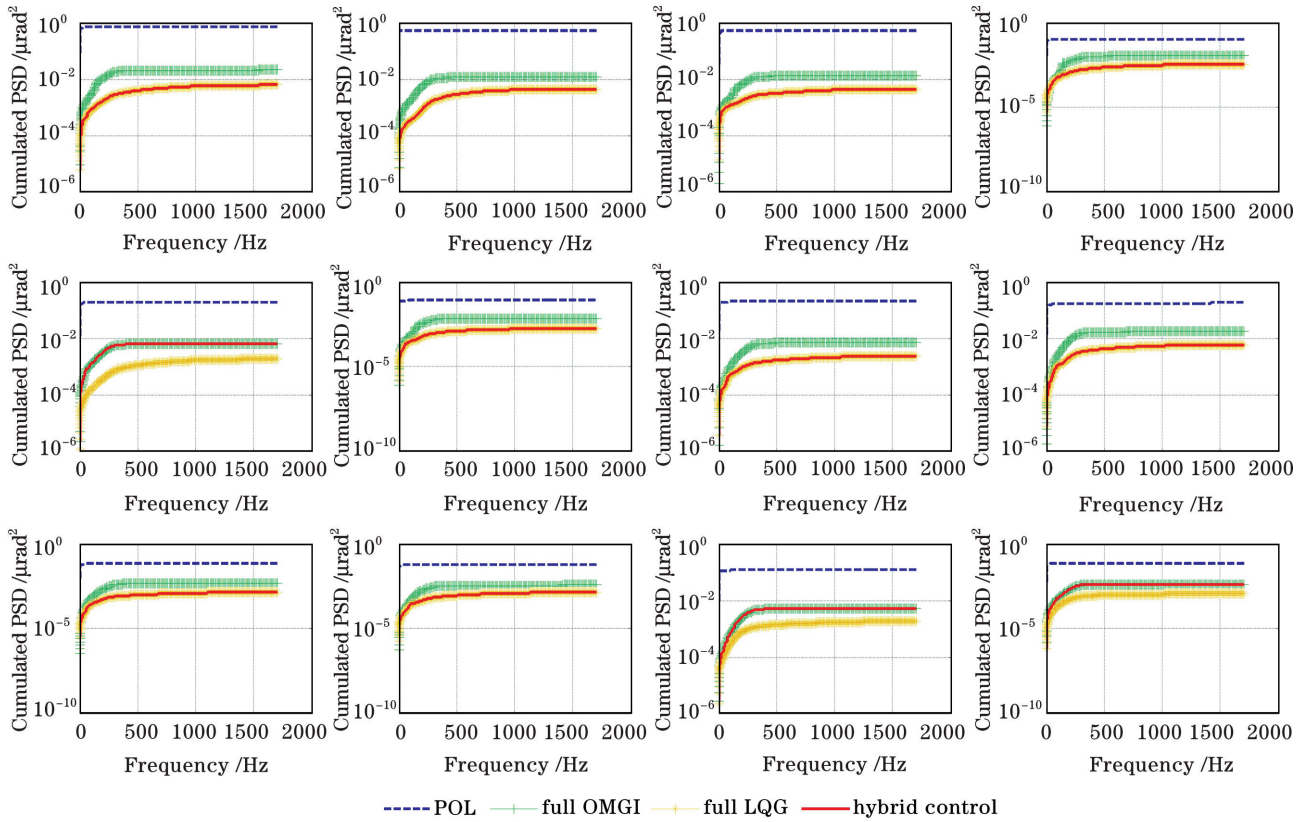


图 6 不同控制方法下模式 Z3~Z14 分别对应的残余扰动的累积功率谱对比

Fig. 6 Cumulated PSD curves for POL and residual disturbance on modes Z3 to Z14 using different control methods

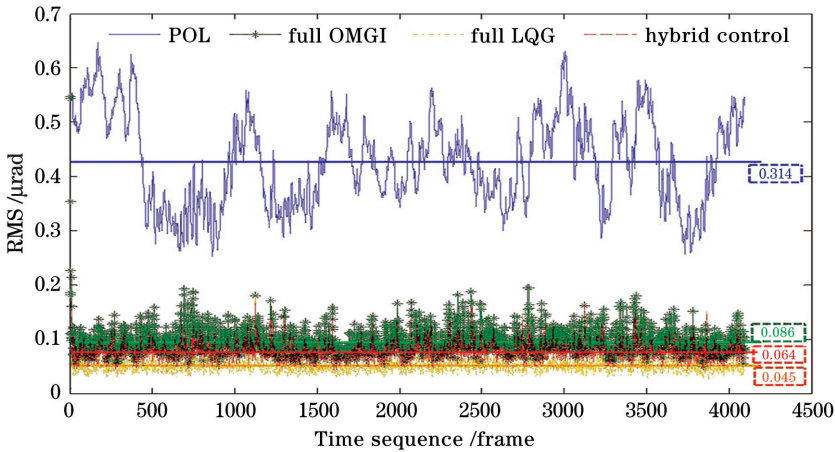


图 7 基于不同控制策略的前 65 阶(低阶倾斜除外)扰动残余波前的 RMS 值对比

Fig. 7 RMS for POL and residual disturbance over the first 65 modes(except for tip and tilt) using different control methods

与全模式 LQG 控制相当。且图 9 表明,本文提出的混合控制方法扰动残余能量比全模式 OMGI 控制方法的扰动残余能量小近一半(残余能量可由累积 PSD 曲线与坐标轴包围的面积近似表示)。

此外,本研究对其他不同时刻的测量数据组重复以上的扰动抑制过程,基于不同控制方法的扰动抑制结果如表 1 所示。由表可知,不同数据组中窄带扰动的影响有所不同,具体表现为测量扰动中含

有的窄带扰动个数 N^d 不同以及受窄带扰动影响的模式数 N^m 不同。相较全模式 OMGI(Full-OMGI)控制,本文提出的混合控制对扰动的抑制效果更优,尤其是对窄带抖动有明显的抑制作用。此外,与全模式 LQG(Full-LQG)对比,本文提出的混合控制方法对模型参数的辨识时间(T_p)有明显减小,节省了大概一半的辨识时间,且控制执行时间(T_c)缩短约 70%。

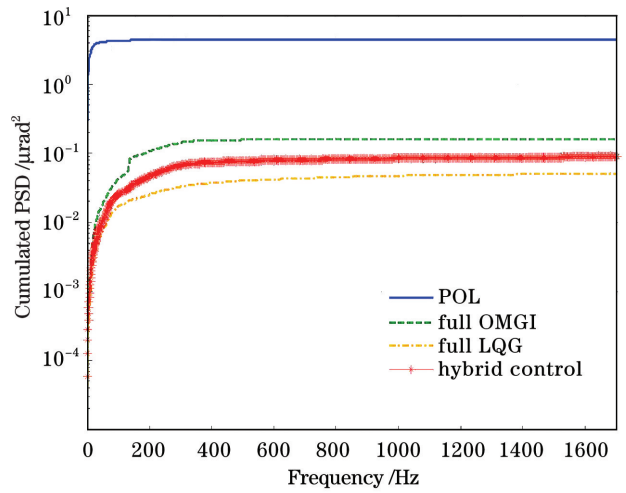
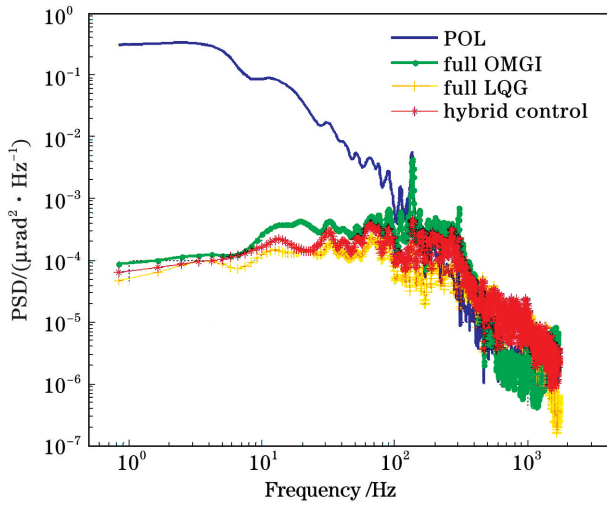


图 8 基于不同控制策略的前 65 阶(低阶倾斜除外) 扰动残余波前的功率谱对比

图 9 基于不同控制策略的前 65 阶(低阶倾斜除外) 扰动残余波前的累积功率谱对比

Fig. 8 PSD curves for POL and residual disturbance over the first 65 modes (except for tip and tilt) using different control methods

Fig. 9 Cumulated PSD curves for POL and residual disturbance over the first 65 modes (except for tip and tilt) using different control methods

表 1 基于不同控制方法的扰动抑制性能对比

Table 1 Comparison of disturbance suppression based on different control methods

Data	N^m	N^d	POL RMS / μrad	RMS / μrad			T_p/s			T_c/s		
				Full- OMGI	Full- LQG	Hybrid control	Full- OMGI	Full- LQG	Hybrid control	Full- OMGI	Full- LQG	Hybrid control
Data 10	28	40	0.314	0.086	0.045	0.064	2.267	148.957	92.703	0.014	3.089	0.808
Data 15	12	16	0.397	0.086	0.045	0.079	2.198	83.251	31.528	0.019	2.916	0.571
Data 25	15	15	0.365	0.100	0.052	0.089	2.220	81.677	33.416	0.015	2.457	0.614
Data 35	16	16	0.365	0.115	0.067	0.086	2.174	79.262	32.614	0.015	2.721	0.687
Data 75	23	28	0.427	0.095	0.051	0.076	2.217	86.596	46.339	0.015	3.823	1.370

结合实验结果可得,本文提出的混合控制方法同时结合了 OMGI 控制和 LQG 控制的优点,既可以对不同模式中的窄带扰动进行有效的抑制,取得优于全模式 OMGI 控制的控制性能,同时较全模式 LQG 控制缩短了对多阶模式扰动的模型估计时间,缩短了模型参数辨识用时与实时处理机控制计算执行时间,更适用于实际的自适应光学系统。

既包含了 LQG 控制对扰动的最优抑制性能,同时也包含了 OMGI 控制算法的计算量小的优点,同时缩短了模型参数辨识用时与实时处理机控制计算执行时间,有助于扰动的实时校正,尤其适用于高阶模式中存在明显窄带扰动但系统计算能力有限的情况。为了进一步评估本文提出的混合控制算法的有效性和可行性,下一步研究将对本文提出的控制算法在实际系统平台下通过并行计算来验证。

5 结 论

参 考 文 献

提出了一种适用于实际自适应光学系统的混合控制策略,该控制方法联合了多模式 OMGI 控制和多模式 LQG 控制,根据高阶模式中是否含有窄带扰动的判断,采取不同的控制策略。以云南抚仙湖观测站 1 m 新真空太阳望远镜高阶自适应光学系统为例,通过重演实测空天数据,对提出的控制算法进行了分析验证。结果表明,本文提出的混合控制

[1] Jiang W H. Overview of adaptive optics development [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 170489.
姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170489.

[2] Rao C H, Zhu L, Zhang L Q, et al. Development of

- solar adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170733.
- 饶长辉, 朱磊, 张兰强, 等. 太阳自适应光学技术进展[J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 170733.
- [3] Tokovinin A. Pendular seismometer for correcting telescope vibrations[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2000, 316(3): 637-641.
- [4] Mayo J W. Mechanical jitter measurement results for large ground-based telescopes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5495: 98-103.
- [5] Kulcsár C, Sivo G, Raynaud H F, et al. Vibrations in AO control: a short analysis of on-sky data around the world [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8447: 84471C.
- [6] Altarac S, Berlioz-Arthaud P, Thiébaud E, et al. Effect of telescope vibrations upon high angular resolution imaging[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2001, 322(1): 141-148.
- [7] Rao C H, Zhu L, Rao X J, et al. Instrument description and performance evaluation of a high-order adaptive optics system for the 1 m new vacuum solar telescope at Fuxian Solar Observatory[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 833(2): 210.
- [8] Lin H Q, Yang P, Kong Q F, et al. Experimental verification of wavefront correction based on linear quadratic Gaussian control [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0705004.
- 林海奇, 杨平, 孔庆峰, 等. 基于线性二次高斯控制的波前校正实验验证[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0705004.
- [9] Gendron E, Lénan P. Astronomical adaptive optics. 1. Modal control optimization [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1994, 291: 337-347.
- [10] Gendron E, Lena P. Astronomical adaptive optics. II. Experimental results of an optimized modal control[J]. *Astronomy & Astrophysics Supplement*, 1995, 111(2): 153.
- [11] Xu Z X, Yang P, Cheng T, et al. Self-learning control model for adaptive optics systems and experimental verification [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0105001.
- [12] Xu Z X, Yang P, Cheng T, et al. Self-learning control model for adaptive optics systems and experimental verification [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0105001.
- 许振兴, 杨平, 程涛, 等. 自适应光学系统的自学习控制模型及其验证[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0105001.
- [13] Cheng T, Liu W J, Yang K J, et al. Decoupling control algorithm based on Laplacian eigenfunction for Woofer-Tweeter adaptive optics system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0905003.
- 程涛, 刘文劲, 杨康健, 等. 基于拉普拉斯本征函数的 Woofer-Tweeter 自适应光学系统解耦控制算法 [J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0905003.
- [14] LeRoux B, Conan J M, Kulcsár C, et al. Optimal control law for classical and multiconjugate adaptive optics[J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2004, 21(7): 1261-1276.
- [15] Petit C, Conan J M, Kulcsár C, et al. First laboratory validation of vibration filtering with LQG control law for adaptive optics [J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 87-97.
- [16] Meimon S, Petit C, Fusco T, et al. Tip-tilt disturbance model identification for Kalman-based control scheme: application to XAO and ELT systems [J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2010, 27(11): A122-A132.
- [17] Sivo G, Kulcsár C, Conan J M, et al. First on-sky SCAO validation of full LQG control with vibration mitigation on the CANARY pathfinder [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23565-23591.
- [18] Rao C H, Zhu L, Rao X J, et al. Second generation solar adaptive optics for 1-m New Vacuum Solar Telescope at the Fuxian Solar Observatory [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(12): 120101.
- [19] Wang J Y, Guo Y M, Kong L, et al. Experimental demonstration of LQG control with disturbance mitigation on multiple modes in adaptive optics system[J]. *Optik*, 2020, 202: 163594.
- [20] Liu Z, Xu J, Gu B Z, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(6): 705-718.
- [21] Li X Y, Jiang W H, Wang C H, et al. Analysis of an adaptive control algorithm used in an adaptive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(3): 283-289.
- 李新阳, 姜文汉, 王春红, 等. 自适应光学系统中的自适应控制算法研究[J]. *光学学报*, 2001, 21(3): 283-289.
- [22] Yan Z J, Li X Y, Rao C H. Multi-channel adaptive control algorithm for closed-loop adaptive optics

- system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0301002.
- 颜召军, 李新阳, 饶长辉. 自适应光学闭环系统实时多路自适应控制算法 [J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0301002.
- [23] Fu Q, Pott J U, Peter D, et al. Experimental study on modified linear quadratic Gaussian control for adaptive optics [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(8): 1610-1619.
- [24] Petit C, Conan J M, Kulcsár C, et al. Linear quadratic Gaussian control for adaptive optics and multiconjugate adaptive optics: experimental and numerical analysis [J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2009, 26(6): 1307-1325.
- [25] Yang K, Yang P, Chen S, et al. Vibration identification based on Levenberg-Marquardt optimization for mitigation in adaptive optics systems [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(11): 2820-2826.
- [26] Petit C, Sauvage J F, Fusco T, et al. Sphere extreme AO control scheme: final performance assessment and on sky validation of the first auto-tuned LQG based operational system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9148: 91480O.
- [27] Juvenal R, Kulcsar C, Raynaud H F, et al. Tip-tilt modelling and control for GeMS: a performance comparison of identification techniques [C] // *Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes 4*, Lake Arrowhead, United States. [S. l.: s. n.], 2015.
- [28] Raynaud H F, Kulcsár C, Juvénal R, et al. The control switching adapter: a practical way to ensure bumpless switching between controllers while AO loop is engaged [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9909: 99094K.