

DOI: 10.7652/xjtub201305016

数控机床进给系统模态参数的自激振辨识方法

赵飞¹, 梅雪松^{1,2}, 姜歌东^{1,2}, 陶涛¹, 邢铭宗¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为实现数控机床模态参数的现场辨识,提出了数控机床进给系统模态参数的快速自激辨识方法。利用 G 代码小线段编程方法,实现了数控机床进给系统振动的激励,并通过内置传感器信号(光栅、编码器、电流)采集了进给系统的振动信息。采用 ARMA 模型的响应信号模态参数辨识方法分析内置传感器信息,得到了进给系统轴向和扭转振动的模态参数。试验表明,所提出的模态参数辨识方法可使激振过程更为方便,采用的内置传感器信号减少了对传感器布置的限制,从而提高了现场试验模态的效率,可以比较准确地辨识出进给系统的一阶固有频率。

关键词: 内置传感器; ARMA 模型; 模态参数辨识

中图分类号: TG502.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)05-0088-05

Research on the Self-Excitation and Identification Method of Modal Parameter of Feed System of Numerical Control Machine Tool

ZHAO Fei¹, MEI Xuesong^{1,2}, JIANG Gedong^{1,2}, TAO Tao¹, XING Mingzong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To implement the modal test conveniently in industry scene, a self-excitation and identification method is proposed following built-in sensor signal test technology and autoregressive moving average model (ARMA) parameter identification. The vibration of feed system is evoked by the planning the trajectory of motion using small step G code programming method, the response information is contained in the built in signal, and ARMA serves to identify parameter based on the response signal. The experiment results show that the proposed method simplifies the experiment process, reduces the sensor layout restrictions, and identifies the first modal frequency accurately.

Keywords: built-in sensor; ARMA model; modal parameter identification

数控机床进给系统的动态特性是机床加工精度、表面质量以及生产效率的重要影响因素之一。数控机床伺服进给系统的位置精度受到伺服控制系统带宽的限制,而伺服控制系统的带宽又受制于进给系统机械结构的共振特性^[1],进给系统的刚度、速度、加速度等动态特性与其结构形式、支撑方式等具有强相关性^[2],因此获取进给系统结构的模态参数,

是对系统进行调整优化的重要环节。Kim 等指出,系统的运动特性不仅受控制器的限制,而且还受进给系统结构特性的影响^[3]。受材料特性、装配结合面等因素的影响,进给系统结构动力学特性(固有频率、刚度、阻尼)通常与设计有较大出入,为获取进给系统的实际动力学特性参数,需对其进行现场测试和辨识。

收稿日期: 2012-10-25。 作者简介: 赵飞(1983—),男,博士生;梅雪松(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2011CB706805);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1172)。

网络出版时间: 2013-03-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130315.1137.008.html>

近年来,兴起了对工况模态(OMA)测试技术的研究^[4],最早的工况模态分析方法,是采用输出响应功率谱代替频响函数的单自由度峰值的拾取方法,由于该方法要求被测对象的各阶模态区分度较高,并且有较大的模态阻尼,因此应用受到限制。Magalhaes 等结合桥梁工况模态分析,详细阐述了工况模态参数辨识的方法与步骤^[5]。Casquero 等通过规划电机运动,实现了进给系统的激励,完成了进给系统动力学参数的辨识^[6]。Kamalzadeh 对两端装有编码器的滚珠丝杆进行运动激励,实现了滚珠丝杆轴向与扭转模态参数的辨识,并与分析模态参数进行了对比,取得了较为一致的结果^[7]。Zaghibani 等通过 ARMA 模型,分析数控机床进给系统切削过程中的振动信号,辨识进给系统的模态参数,实现了数控机床切削稳定性的分析^[8]。魏要强等对数控机床床身进行了激励的研究,同时利用加速度传感器进行合理布置拾取振动信号,采用响应信号的模态辨识算法(随机减量法、峰值拾取法等)对模态参数进行辨识,获得了较好的效果^[9-10]。上述研究为进行进给系统自激振辨识提供了技术依据。

本文利用进给系统来控制环节内置传感器信号,在无外部激励及传感器的条件下,结合相应的运动轨迹规划方法,对进给系统实施有效激励,并基于内置传感器信号,对进给系统模态参数辨识的方法进行了研究。

1 基于输出响应的参数辨识方法

假设系统的平稳随机振动响应为 $x(t)$,以采样频率 f_s 对 $x(t)$ 进行采样,得到时间序列样本 x_i ,引入时移算子 D ,并定义 $D^j x_i = x_{i-j}$,则系统的 AR-MA 模型为

$$x_i = \frac{\Phi(D)}{\Phi(D)} a_i \quad (1)$$

$$\Phi(D) = (1 - \phi_1 D - \phi_2 D^2 - \cdots - \phi_p D^p)$$

$$\theta(D) = (1 - \theta_1 D - \theta_2 D^2 - \cdots - \theta_q D^q)$$

式中: $\phi_i (i=1,2,\cdots,p)$ 为自回归系数; $\theta_j (j=1,2,\cdots,q)$ 为滑动平均系数; p 为自回归部分模型的阶次; q 为滑动平均部分模型的阶次; a_i 为模型的残差,并且满足正态分布。

为了辨识系统的模态参数,需要估计自回归系数和滑动平均系数,即估计 ARMA 模型的参数。本文采用时序理论建模方法,对 ARMA 模型的参数进行辨识,系统响应序列的自相关函数为

$$\rho_k = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x_i x_{i-k} \quad (2)$$

式中: N 为采样点数; k 为延迟系数。根据文献^[11]的相关理论可得

$$\Phi(D)\rho_k = 0; \quad k = q+1, q+2, \cdots, q+p \quad (3)$$

对不同的 k 值可得

$$P\Phi = Q \quad (4)$$

其中

$$P = \begin{bmatrix} \rho_q & \rho_{q-1} & \cdots & \rho_{q+1-p} \\ \rho_{q+1} & \rho_q & \cdots & \rho_{q+2-p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{q+p-1} & \rho_{q+p-2} & \cdots & \rho_{q+p-p} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Phi = (\phi_1, \phi_2, \cdots, \phi_p)^T \quad (6)$$

$$Q = (\rho_{q+1}, \rho_{q+2}, \cdots, \rho_{q+p})^T \quad (7)$$

式中: P 为非对称矩阵,称作系数矩阵; Φ 为自回归系数矩阵。式(4)的最小二乘解为

$$\Phi = [P^T P]^{-1} P^T Q \quad (8)$$

由式(8)得到 ϕ_i ,由文献^[11]可知

$$\sum_{k=0}^q R_{y,k} \left(\frac{1}{\eta_i}\right)^k = 0, \quad R_{y,k} = E \left[\sum_{i=0}^p \phi_i x_{t-i} \sum_{j=0}^p \phi_j x_{t-k-j} \right] \quad (9)$$

式中: η_i 为一元 q 次方程的根; E 为数学期望。式(9)为关于 $1/\eta_i$ 的一元 q 次方程,可解出 q 个根,即 $1/\eta_j (j=1,2,\cdots,q)$,将 η_j 带入式(1)得

$$\theta(D) = \prod_{j=1}^q (1 - \eta_j D) = 1 - \sum_{j=1}^q \theta_j D^j \quad (10)$$

按照 ARMA 模型计算残差,即

$$a_i = x_i - \phi_1 x_{i-1} - \phi_2 x_{i-2} - \cdots - \phi_p x_{i-p} + \theta_1 a_{i-1} + \theta_2 a_{i-2} + \cdots + \theta_q a_{i-q} \quad (11)$$

估计出 ARMA 模型的参数后,就可以利用所建立的模型进行模态参数辨识。先根据结构的平稳随机响应信号建立 ARMA 模型,再由模型参数和模型的有关特性函数计算模态参数。

按 ARMA 模型的参数估计方法,可以估计出 ϕ_i ,由 $\phi_i (i=1,2,\cdots,p)$ 组成的自回归多项式为

$$\phi(R_i) = 1 - \phi_1 R_i^1 - \phi_2 R_i^2 - \cdots - \phi_p R_i^p \quad (12)$$

$$\phi(R_i) = 0$$

求解式(12),令模型的特征值

$$\mu_i = 1/R_i; \quad \text{Re}(\lambda_i) = -f_s \ln |\mu_i| \quad (13)$$

$$\text{Im}(\lambda_i) = f_s \arccos \text{Re}(\mu_i) ((\text{Re}(\mu_i))^2 + (\text{Im}(\mu_i))^2)^{-1/2} \quad (14)$$

式中: λ_i 为特征根。模态固有频率、阻尼比分别为

$$f_i = \frac{1}{2\pi} ((\text{Re}(\lambda_i))^2 + (\text{Im}(\lambda_i))^2)^{-1/2} \quad (15)$$

$$\zeta_i = \text{Re}(\lambda_i) ((\text{Re}(\lambda_i))^2 + (\text{Im}(\lambda_i))^2)^{-1/2} \quad (16)$$

2 进给系统运动的自激励方法

传统的模态激励方法是使用力锤或者激振器对被激励对象施加一定的力,从而实现激励。数控机床进给系统由伺服电机、丝杆螺母副和工作台等组成,丝杆螺母副之间为可动联接,当伺服电机控制丝杆旋转时,工作台及螺母会产生跟随运动并对进给系统产生冲击。通过合理选择伺服电机的控制方法及其合理的路径规划,可使丝杆和工作台间的作用力满足激振力的要求。

根据以上分析,基于进给系统自身运动的激励可以分为单次冲击和连续运动激励。单次冲击激励类似于力锤的锤击激励,但由于受到伺服电机可提供的瞬时最大力矩的限制,且丝杆螺母副间的间隙较小,从而使得冲击力的幅值不能达到很大,限制了单次冲击的作用,因此通过合理规划设计进给系统的运动轨迹,使其产生连续激励力的方式,从而对进给系统产生有效激励。

开放式运动控制器,具有位置、速度及扭矩控制模式。在扭矩模式下,可以方便地控制电机的输出扭矩,使扭矩按照方波、三角波、锯齿波、正弦波、余弦波等信号方式变化。在速度模式下,通过控制电机的输出速度,可使速度按照方波、三角波、锯齿波、正弦波、余弦波等方式变化。

通过规划进给系统运动,利用数控系统 G 代码小线段编程方法,可以实现进给系统的伪随机激励,如图 1 所示。采用小线段编程方法可使进给系统产生类似随机运动,来触发换向时的冲击,但编程较为复杂,并受大型机床工作台质量及加速过程的影响,冲击力较小,因此小线段编程较适用于具有高加速度能力的数控机床进给系统。通过组合 G 代码小线段编程插补指令,使进给系统产生正弦往复运动,触发换向阶段的冲击,这是实现进给系统运动激励

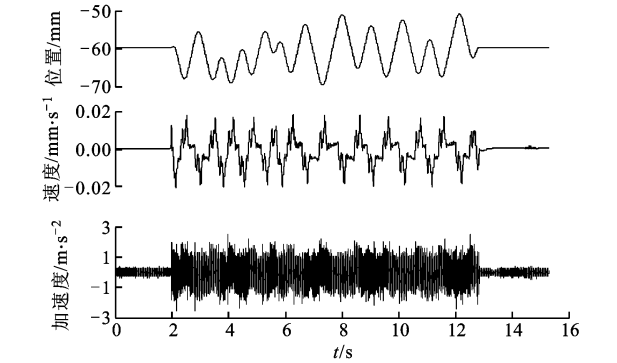


图 1 数控机床进给系统 G 代码小线段编程激励信号

的另一种方式。与小线段编程相比,圆插补指令编程较为方便,通过试验对比,小线段编程和 G 代码小线段编程都是实现进给系统运动激励较好的方式。在本文所设计的进给系统动态特性测试试验台上进行激励试验时发现,该试验系统中的激励信号周期($T=25\text{ ms}$)是一个临界周期,即在激励信号周期小于 25 ms 时较容易实现运动激励,而周期大于 25 ms 时则无法实现运动激励。

3 内置传感器信号的辨识试验

3.1 试验装置

为验证本文所提方法的有效性,对进给系统特性测试试验台进行了试验测试。该试验台采用交流伺服电机直连滚珠丝杆的结构形式,控制系统采用开放式的运动控制结构,上位机控制指令通过 GT400-SV 控制卡、AD 转换接口实现运动控制。电机驱动采用安川 ΣV 型交流伺服电机,其额定功率为 750 W ,额定转矩为 $2.39\text{ N}\cdot\text{m}$,瞬时最大转矩为 $8.36\text{ N}\cdot\text{m}$,额定转速为 $3\,000\text{ r/min}$,最高转速为 $6\,000\text{ r/min}$ 。通过模拟量监视接口 CN5,可以检测电机的扭矩值。采用 THK 公司生产的滚珠丝杆,直径为 36 mm ,导程为 6 mm ,丝杆全长为 630 mm 。工作台丝杆螺母副轴向刚度 K_{bn} 、轴承轴向刚度 K_b 、联轴器扭转刚度 K_c 、电机转动惯量 J_m 、工作台质量 m_t 等参数如表 1 所示。

滚珠丝杆两端装有旋转编码器,编码器的型号为 ECN113,线数为 $2\,048$ 线,用于测量滚珠丝杆传动过程中两端的转动角度。试验台底座安装有开放式光栅,光栅精度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,电机输出端装有 HBM 公司生产的扭矩传感器,型号为 TW20N,测量精度为 0.1% 。

表 1 伺服进给系统试验台的主要参数

$K_{bn}/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	4.01×10^8
$K_b/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	1.0×10^8
$K_c/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$	8 400
$J_m/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	1.57×10^{-4}
m_t/kg	17.25

3.2 辨识试验

为验证本文所提出的基于内置传感器信号的进给系统自激励模态参数的辨识方法,在进给系统试验台上进行了自激励模态参数辨识试验。试验过程中,控制伺服电机带动工作台实现高频正弦轨迹运

动,对进给系统施加激励,正弦激振频率设定为 100 Hz。在激励过程中,同时对电流信号、光栅信号、编码器信号进行采集,采集设备采用了本文开发的数控机床动态特性测试分析系统。为了验证内置传感器信号辨识的有效性,在工作台轴向安装了加速度传感器,使用力锤激励的方式对进给系统轴向进行激励,对采集到的信号进行频响分析,并与内置传感器信号分析结果进行了对比。加速度传感器采用 Kistler 公司的压电加速度计,型号为 8702B100M1,每个 g 下的灵敏度为 50 mV,量程为 $\pm 100g$,频率范围为 0.5~10 kHz。加速度传感器信号利用东华 DH5927 动态信号测试系统进行同步采集。在进行运动激励和力锤激励时,采样频率均设为 5 kHz,获取的进给系统内置传感器信号如图 2 所示。在图 2 中,由进给系统内置传感器获得的响应信号为位置信号,经过微分运算可得到速度及加速度信号。试验过程中同时采集了进给系统的伺服电机电流信号,以获得进给系统的力矩信号。

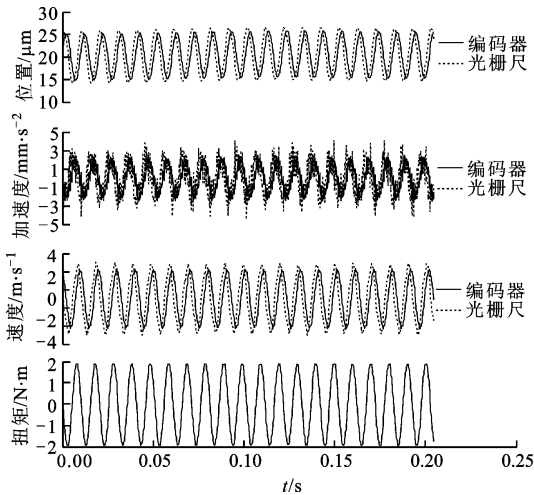


图 2 运动激励的内置传感器信号

4 结果分析

采用 ARMA 模型分析内置传感器信号获取的扭转振动信号(编码器信号),并作出稳态频率。为验证 ARMA 模型的模态频率辨识结果,在试验过程中,测试数据(电流信号,编码器信号)同时采用 PolyMAX 算法进行拟合,得到的拟合频响曲线与稳态频率见图 3。由图 3 中的频响曲线可知,辨识结果中存在着 4 阶频率成分,分别为 297.9、1 495、880 和 1 089 Hz。由图 3 可知,1 089 Hz 的频率成分最为清晰,其次为 297.9 Hz,而其他 2 个频率成分的稳态频率线在 20 阶左右仍比较杂乱,表明

495、880 Hz 附近受到了虚假模态频率的干扰。

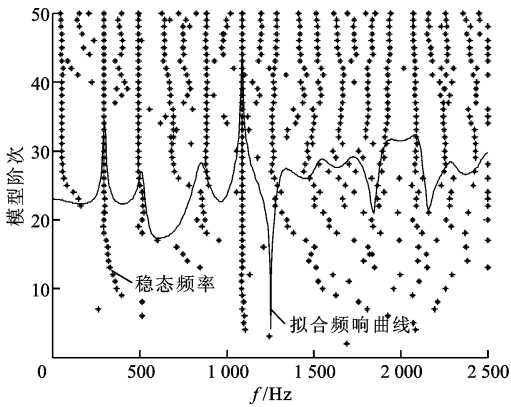


图 3 扭转模态的稳态频率及拟合频响曲线

采用同样的方法,分析试验过程中内置传感器信号获取的轴向振动信号(光栅信号,电流信号),基于 ARMA 模型分析建立轴向振动稳态图,利用 PolyMAX 方法拟合频响曲线,结果如图 4 所示。利用稳态频率可判定辨识出的两阶频率分别为 296.3 和 1 089 Hz,以及位于频响曲线 509、800 Hz 附近的频率。由于稳态图上的辨识结果在低阶次区域较为杂乱,因此被认为是干扰模态频率。

为验证运动激励及基于 ARMA 模型的辨识结果的正确性,本文对力锤激励的轴向振动信号(力锤、加速度信号)采用同样的方法进行分析,结果如图 5 所示。图中频响拟合曲线和稳态线均在频率点 297.2、1 497 Hz 出现了较为清晰的共振频率特征。对比 2 种辨识结果可知,被测试系统轴向振动的一阶模态在 297 Hz 附近,根据扭转模态的频率范围判断,被测试验台的一阶扭转模态频率应为 1 089 Hz。

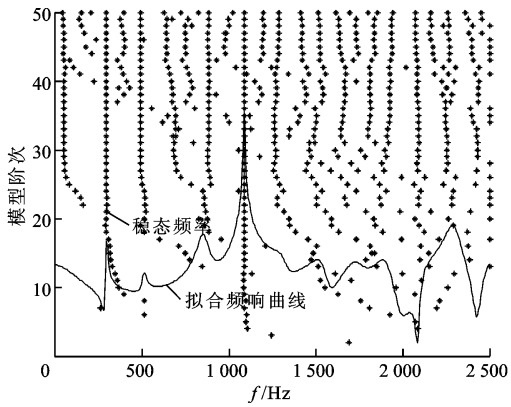


图 4 轴向模态的稳态频率及拟合频响曲线

对比图 3、图 4 与图 5 可知,在力锤激励条件下,利用 ARMA 模型辨识的稳态频率最为清晰,干扰成分较少,而运动激励条件下对稳态图的干扰则

较多。整理不同激励方式下对轴向和扭转模态频率的辨识结果,如表 2 所示。由表 2 及以上分析可知,利用 ARMA 模型的响应模态参数辨识方法分析运动激励过程中进给系统的内置传感器信号,可以获得较为准确的一阶轴向模态及扭转模态频率。在采用运动激励时,扭转振动和轴向振动会出现模态耦合现象,使轴向振动和扭转振动的一阶频率均出现在 2 种信号的辨识结果中,这是由编码器和光栅尺信号的相关性造成的,但在运动激励条件下的辨识结果仍可分辨出轴向模态和扭转模态的一阶频率成分。同时,结合经验可在一幅图上分辨出一阶轴向模态频率和一阶扭转模态频率。

表 2 不同激励方式的 ARMA 模型一阶固有频率辨识结果

激励方式	轴向模态频率/Hz	扭转模态频率/Hz
运动	296.3	1 089
力锤	297.2	无

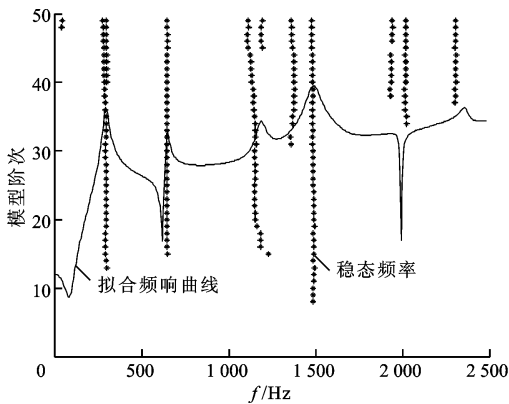


图 5 轴向模态的稳态频率及拟合频响曲线(力锤激励)

5 结 论

根据实验与理论研究,基于运动激励方法和内置传感器信号分析方法,本文提出了基于内置传感器信号 ARMA 模型分析的进给系统模态参数自激振辨识方法。通过 G 代码小线段编程方法对数控机床进给系统实施振动激励,利用 ARMA 模型的响应信号模态参数辨识方法,分析了振动过程中的内置传感器信号(光栅、编码器、电流),同时得到了进给系统的轴向和扭转振动模态参数。将运动激励结果与力锤激励结果相对比,两者具有较高的一致性。通过试验证明,本文提出的模态参数辨识方法可使激振过程更为方便,利用内置传感器信号进行

分析,不仅减少了传感器布置的限制,而且提高了现场试验模态分析的效率,可以比较准确地辨识进给系统的一阶固有频率。

参考文献:

[1] ERKORKMAZ K, KAMALZADEH A. High bandwidth control of ball screw drives [J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 2006, 55(1): 393-398.

[2] DADALAU A, MOTTAHEDI M, GROH K, et al. Parametric modeling of ball screw spindles [J]. Production Engineering, 2010, 4(6): 625-634.

[3] KIM M, CHUNG S. A systematic approach to design high-performance feed drive systems [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(12/13): 1421-1435.

[4] CHAUHAN S. Parameter estimation and signal processing techniques for operational modal analysis [D]. Cincinnati, USA: University of Cincinnati, 2008.

[5] MAGALHAES F, CUNHA A. Explaining operational modal analysis with data from an arch bridge [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(5): 1431-1450.

[6] CASQUERO A, HECKER R. Parameter identification of a feed drive for high speed machine tools [J]. ABCM Symposium Series in Mechatronics, 2010(4): 546-552.

[7] KAMALZADEH A. Precision control of high speed ball screw drives [D]. Waterloo, USA: University of Waterloo, 2008.

[8] ZAGHBANI I, SONGMENE V. Estimation of machine-tool dynamic parameters during machining operation through operational modal analysis [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(12/13): 947-957.

[9] 魏要强, 李斌, 毛宽民, 等. 数控机床运行激励试验模态分析 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(6): 79-82.

WEI Yaoqiang, LI Bing, MAO Kuanmin. Movement exciting-based experimental modal analysis of NC machine tools [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(6): 79-82.

[10] 魏要强. 基于空运行激励的数控机床结构试验模态分析新方法 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.

[11] 杨叔子, 吴雅. 时间序列分析的工程应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 23-51.

(编辑 管咏梅)