

管片拼装机回转系统齿轮啮合动力学分析*

李 杰, 马 超, 张 斌, 黄元俊

(石家庄铁道大学机械工程学院 石家庄, 050043)

摘要 为了研究管片拼装机回转系统齿轮啮合的动力学特性,以管片拼装机小齿轮-大齿圈的传动系统为研究对象,采用集中参数法建立了考虑齿面摩擦的六自由度直齿轮动力学模型,依据管片拼装机实际工况参数,利用 Runge-Kutta 方法分析了管片拼装机回转系统在空载和负载两种工况下小齿轮和大齿圈的振动位移情况,对管片拼装机回转系统进行了振动测试,验证了模型及求解的正确性,并提出了可以通过增大管片拼装机回转系统刚度来减小振动的方法。研究结果对管片拼装机回转系统的减振和降噪处理,以及提高管片拼装机回转系统的精度有重要的理论和实用价值。

关键词 管片拼装机; 回转系统; 齿轮啮合; 动力学
中图分类号 TH128

引 言

管片拼装机作为盾构机的关键部件之一,承担着将预制混凝土管片拼装、衬砌和保护已开挖隧道的关键性作用。管片拼装机在工作过程中负载力矩随着拼装位置的不同而呈现较大的变化,且拼装过程存在较大的振动、冲击和噪声,对管片的拼装质量有较大影响,而管片拼装质量差会导致管片破碎、错台等现象发生^[1-6]。因此,管片拼装机回转系统齿轮啮合的动力学研究对提高管片拼装机的拼装精度、保证管片拼装质量、降低其振动和噪声以及提高管片拼装机的施工效率和稳定性具有重要意义。

近年来,国内外学者针对管片拼装机的动态性能和齿轮啮合动力学等问题开展了许多研究。在管片拼装机的动态性能方面,程永亮等^[7]利用多体动力学软件研究了管片拼装机工作过程中托梁和扼架的静力学性能,并进行了现场测试。夏毅敏等^[8]利用多体动力学仿真软件研究了管片拼装机在拼装不同位置管片时的动力学性能,得到了举重钳-扼架的动态载荷与相应特性,对扼架最大受力情况进行了有限元分析,并现场测试得到了验证。孙伟等^[9]提出了一种基于蓄能器回路变速积分的管片拼装电液控制系统,采用 AMESim 软件建立了管片拼装机电液回转系统的仿真模型,并进行了实验验证。刘金

刚等^[10-11]在理论方面建立了管片拼装机回转系统起步过程的数学模型,并对起步工况进行了软件模拟,得到了该过程的敏感参数,利用正交实验方法得出了最佳参数组合,进行了实车实验;研究了模糊控制对管片拼装机起步工况的补偿作用。孙志超等^[12]在 AMESim 软件中建立了管片拼装机部分液压系统的仿真模型,分析了液压系统的动态特性。这些研究在管片拼装机的整体结构性能和电液驱动系统方面取得了一定的成果,但管片拼装机回转驱动系统中的齿轮传动对拼装质量的影响没有涉及。在齿轮啮合特性方面,Aedersson^[13]研究了接触比对直齿圆柱齿轮动态响应的影响。Choi 等^[14]用传递函数的方法研究了齿轮传动系统转子-轴承耦合的振动特性。王峰等^[15]提出一种考虑轮齿接触和齿轮轴扭转变形的齿轮啮合刚度的计算方法,仿真计算表明该方法能够较为准确地求得齿轮的啮合刚度。王成等^[16]在综合考虑变啮合刚度激励、误差激励和啮入冲击激励的基础上,利用集中参数模型的方法研究了人字齿轮的动力学模型,得到了系统的振动响应和动态特性,为人字齿轮的动态设计奠定了基础。张靖等^[17]在考虑时变啮合刚度的基础上,研究了齿面粗糙度对齿轮啮合特性的影响,并利用试验台对 A 型齿轮进行了实验分析。石照耀等^[18]在综合考虑时变啮合刚度、误差激励的基础上,提出一种单、双齿啮合的动力学模型,得到了该模型的高

* 河北省高等学校科学技术研究重点资助项目(ZD2018018);河北省自然科学基金资助项目(E2019210275)
收稿日期:2019-01-03;修回日期:2019-06-21

精度数值解,研究结果对直齿轮的设计及动态特性分析有重要的力量价值。Kim等^[19]提出了一种考虑齿面摩擦和噪声的齿轮啮合动力学模型,该模型表明齿轮啮合的噪声随啮合速度和表面粗糙度的增加而增加,为齿面微观形态对齿轮噪声影响的研究有重要意义。Radzimovsky等^[20]研究了齿轮在低、中、高速情况下的传动效率,并进行了实验验证。Liu等^[21]研究了齿面摩擦对齿轮副动态响应的影响。由齿轮啮合特性的研究现状可以看出,齿轮传动的动力学特性直接影响系统的振动响应和噪声等^[22],由于管片拼装机在现场施工过程中环境复杂,工况恶劣,对齿轮啮合的动力学特性影响因素众多,振动信号实测困难,导致管片拼装机回转系统齿轮啮合的动力学特性的相关研究较少,而回转系统齿轮啮合的振动严重影响管片拼装机运行的稳定性和拼装精度。因此,笔者在上述研究的基础上,开展管片拼装机回转系统的齿轮啮合动力学特性研究,建立了考虑齿面摩擦的管片拼装机回转系统齿轮啮合动力学模型,用Runge-Kutta法研究在时变载荷下小齿轮和大齿圈的振动规律,对管片拼装机回转系统的减振和降噪处理提供理论依据,同时为管片拼装机回转系统的设计提供指导。

1 管片拼装机回转系统动力学模型的建立

1.1 管片拼装机回转系统等效力学模型的建立

管片拼装机的回转系统主要由液压马达、减速器、小齿轮、大齿圈和回转支撑等零件组成,液压马达与减速器构成一个整体,共同驱动小齿轮,通过小齿轮与大齿圈的啮合,将液压马达输出的动力传递至回转支撑,驱动回转支撑进行周向回转,实现管片圆周方向的定位,其结构如图1所示。在实际施工中,管片拼装机回转系统的负载随时间实时变化,回转角度完全是由手动控制,控制精度低且效率低下。因此,笔者建立了考虑齿面摩擦的管片拼装机回转系统小齿轮-大齿圈的耦合型动力学模型,如图2所示。

图2中, $k_{px}, k_{py}, k_{gx}, k_{gy}$ 分别为小齿轮和大齿圈的支撑刚度; $c_{px}, c_{py}, c_{gx}, c_{gy}$ 分别为小齿轮和大齿圈的支撑阻尼; T_p 和 T_g 分别为输入转矩和负载转矩; k_m 和 c_m 分别为小齿轮和大齿圈的啮合阻尼。

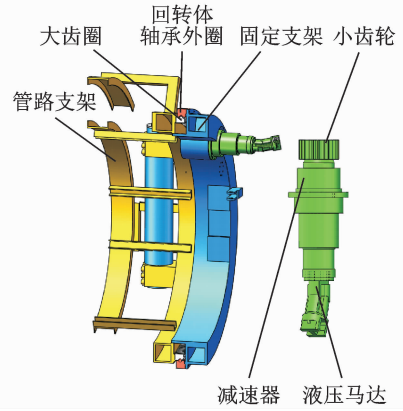


图1 管片拼装机回转系统实体模型

Fig. 1 Solid model of rotary system of segment assembly machine

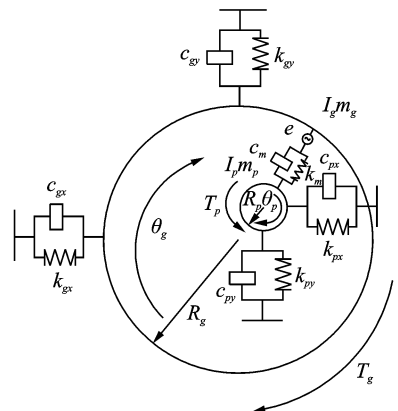


图2 管片拼装机回转系统动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of rotary system of segment assembly Machine

1.2 管片拼装机回转系统动力学数学模型的建立

管片拼装机回转系统的动力学模型包含6个自由度,分别是小齿轮沿 x, y 方向的移动自由度、绕小齿轮中心的扭转自由度和大齿圈沿 x, y 方向的移动自由度和绕大齿圈中心的扭转自由度。为简化计算,对小齿轮和大齿圈做如下假设:a.小齿轮和大齿圈标准安装,且任一轮齿上的啮合刚度和啮合阻尼等参数相同;b.任意啮合轮齿上的摩擦因数相等且为常数;c.小齿轮和大齿圈的支撑刚度和啮合阻尼相同;d.只考虑啮合齿面的滑动摩擦,忽略滚动摩擦。

设定管片拼装机6个自由度的振动位移分别为 $x_p, y_p, \theta_p, x_g, y_g, \theta_g$,将其列为矩阵形式为

$$\delta = [x_p, y_p, \theta_p, x_g, y_g, \theta_g]^T \quad (1)$$

小齿轮与大齿圈的轮齿动态啮合力为

$$F_p = k_m (y_p + R_p \theta_p - y_g + R_g \theta_g) +$$

$$c_m(\dot{y}_p + \dot{R}_p\theta_p - \dot{y}_g + R_g\dot{\theta}_g) \quad (2)$$

小齿轮与大齿圈的齿面摩擦力能够近似表示为

$$F_f = \lambda f F_p \quad (3)$$

其中: f 为小齿轮与大齿圈啮合时候的等效摩擦因数; λ 为摩擦力方向系数。

由此可得该管片拼装机回转系统的动力学的数学方程为

$$\begin{cases} m_p \ddot{x}_p + c_{px} \dot{x}_p + k_{px} x_p = F_f \\ m_p \ddot{y}_p + c_{py} \dot{y}_p + k_{py} y_p = -F_p \\ I_p \ddot{\theta}_p = -F_p R_p - T_p + F_f (R_p \tan\beta - H) \\ m_g \ddot{x}_g + c_{gx} \dot{x}_g + k_{gx} x_g = -F_f \\ m_g \ddot{y}_g + c_{gy} \dot{y}_g + k_{gy} y_g = F_p \\ I_g \ddot{\theta}_g = -F_p R_g - T_g + F_f (R_g \tan\beta - H) \end{cases} \quad (4)$$

2 管片拼装机回转系统动力学分析

2.1 管片拼装机回转系统负载的确定

管片拼装机回转系统的外部载荷主要来源于带动管片回转的扭矩。管片拼装机在回转过程中,提升油缸锁死,微调系统不进行对管片姿态的调整,因此可以将大齿圈、回转架、提升油缸、微调平台、微调油缸以及管片等看成一个整体进行分析。图 3 为管片拼装机回转系统受力情况。

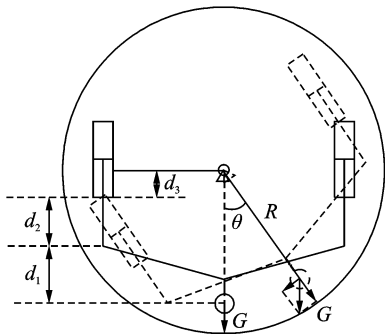


图 3 管片拼装机回转系统受力示意图

Fig. 3 Force sketch of rotary system of segment assembly machine

由图 3 可知,管片回转所受到的阻力矩为

$$T_g = GR \sin\theta \quad (5)$$

其中: $R=d_1+d_2+d_3$; G 为参与回转部分部件的重力,包括管片的重量和平台的重量。

2.2 管片拼装机回转系统动力学仿真分析

通过 Matlab 软件编程对管片拼装机回转系统的动力学方程进行求解,分别得到空载和负载两种不同工况下小齿轮和大齿圈的振动特性。在仿真分析的过程中,大齿圈的质量和转动惯量将管片拼装机的机架、微调平台以及提升油缸等参与回转的零部件考虑在内,得到空载和负载情况下回转系统的动力学仿真参数,如表 1 所示。

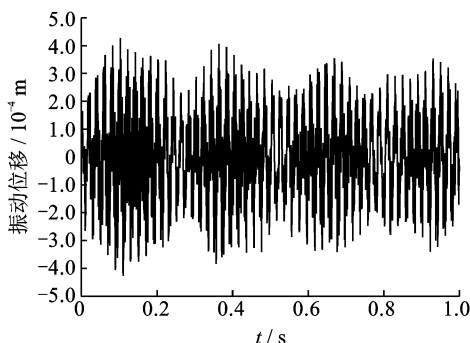
表 1 管片拼装机回转系统动力学仿真参数

Tab. 1 Dynamic simulation parameters of rotary system of segment assembly machine

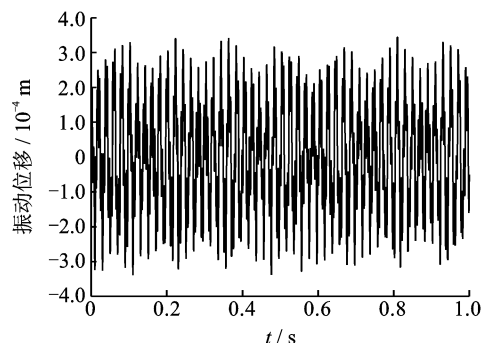
参数/单位	小齿轮	大齿圈
齿数	16	259
压力角/deg	20	20
模数/mm	12	12
齿宽/mm	100	100
质量/kg	25	1 000
转动半径/mm	96	1 554
转动惯量/(kg · mm ²)	2.3 × 10 ⁵	1.41 × 10 ⁹
齿面粗糙度	0.3	0.3
转速/(r · min ⁻¹)	25	1.5
轴承阻尼/(Ns · mm ⁻¹)	4.86 × 10 ³	6.16 × 10 ³
轴承刚度/(N · mm ⁻¹)	3.5 × 10 ⁹	3.5 × 10 ⁹

依照表 1 中的动力学仿真参数,对所建立的动力学方程进行仿真。图 4 为空载工况下小齿轮和大齿圈的振动位移。图 5 为空载状态下水平和竖直位移频谱图。

综合图 4,5 可以看出,空载情况下,小齿轮的振动位移周期性较为明显,但振动情况十分复杂,大齿圈的振动存在一定的规律性;小齿轮水平位移的频



(a) 小齿轮水平方向的位移
(a) Displacement of pinion in horizontal direction



(b) 小齿轮竖直方向的位移
(b) Vertical displacement of pinion

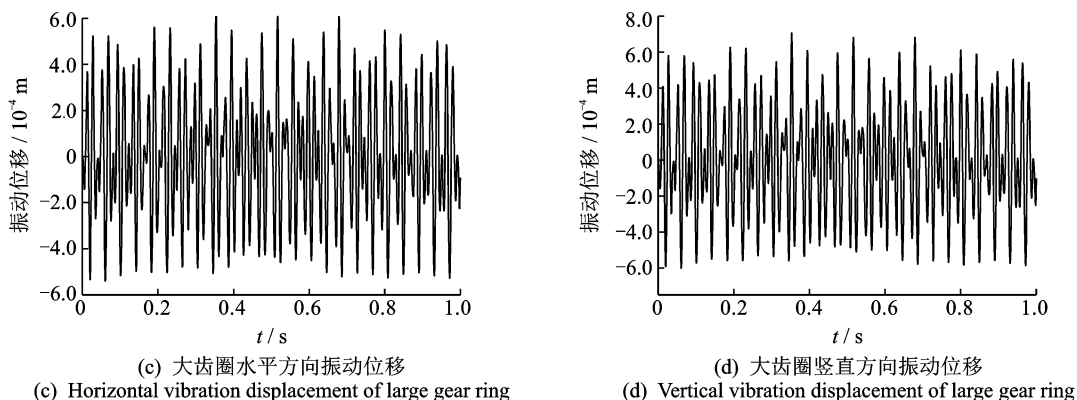


图4 管片拼装机空载情况下小齿轮与大齿圈的振动位移

Fig. 4 Vibration displacement of small gear and big gear ring of pipe assembly machine under no load

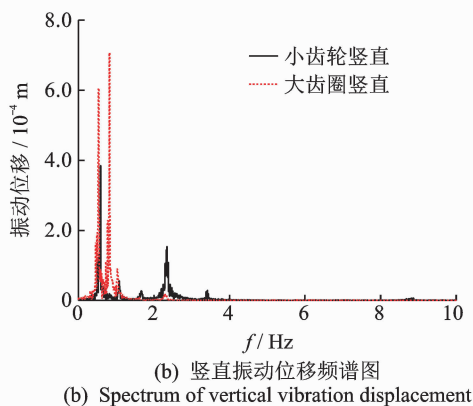
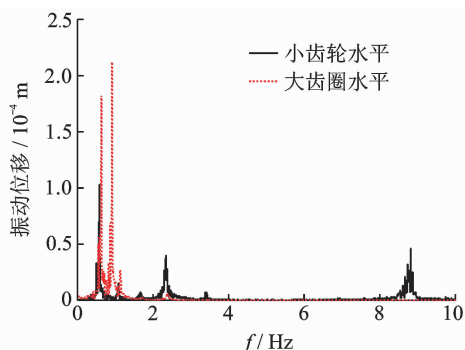


图5 空载状态下水平和竖直位移频谱图

Fig. 5 Spectrum of horizontal and vertical displacements under no-load condition

率有3个,分别为0.5,2.4和8.2 Hz,振动幅值为0.4 mm,而大齿圈水平位移的频率则为2个,分别为0.5 Hz和0.8 Hz,振动幅值约为0.5 mm;小齿圈竖直位移的频率有2个,分别为0.5 Hz和2.2 Hz,振动幅值约为0.33 mm;大齿圈的竖直振动位移频率为0.5 Hz和0.8 Hz,振动幅值约为0.6 mm。小齿轮和大齿圈在水平和竖直方向的振动有共振现象存在。

负载情况下小齿轮与大齿圈的振动位移和频谱分析如图6,7所示。

综合图6,7可以得出,小齿轮水平方向的振动仍旧存在明显的周期性,但变得更加复杂,而大齿圈则存在更为明显的规律性;负载情况下,小齿轮的水平振动频率集中在0.4,2.3和8.8 Hz,大齿圈的振动频率集中在0.4和0.5 Hz;小齿轮的竖直方向振动频率为0.4和2.3 Hz,而大齿圈的竖直振动频率集中在0.4和0.5 Hz,存在共振现象。

从图4~7可以看出,负载情况下大齿圈的转动惯量和负载扭矩均有明显增加,导致小齿轮和大齿圈的振动位移略小于空载情况下的振动位移;空载和负载的振动频率变化不大,这主要是由小齿轮和大齿圈的啮合频率决定的。

3 实验测试

3.1 实验方案

为了验证管片拼装机回转系统在不同工况下的动力学特性,在某型管片拼装机上进行了实验测试。空载和负载两种工况下均将管片拼装机的转速设定为1.5 r/min。在此期间,利用8通道24位YSV8008动态信号采集仪进行信号的采集,管片拼装机的小齿轮和大齿圈被机架密封,直接对小齿轮和大齿圈进行信号的采集十分不便,但大齿圈和机架固定在一起,两者的振动情况一致,因此选择采集机架的振动信号进行分析,分别将3个单轴加速度传感器布置在管片拼装机的机架上,采集管片拼装机机架在水平和竖直方向以及沿轴线方向的振动信号。图8为振动测试现场情况。

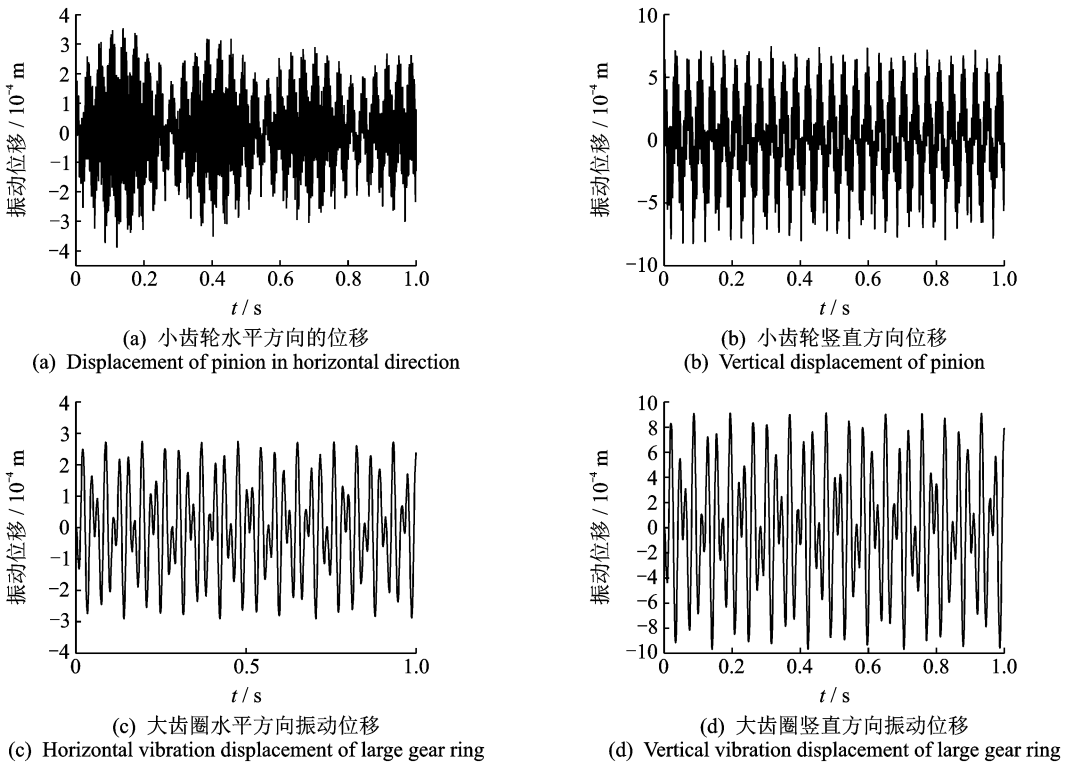
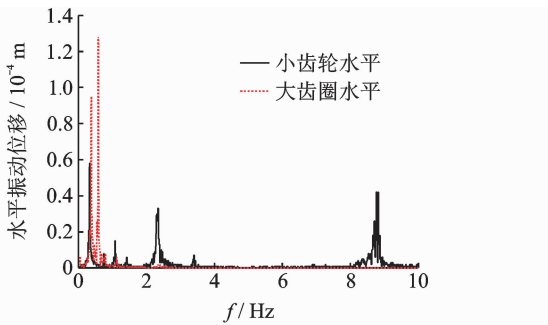
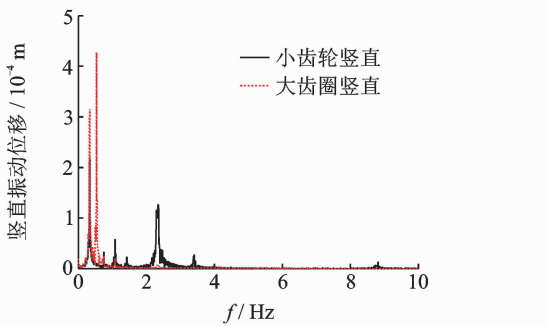


图 6 管片拼装机负载情况下小齿轮与大齿圈的振动位移

Fig. 6 Vibration displacement of small gear and large gear ring under the load of pipe assembly machine



(a) Frequency spectrum analysis of horizontal vibration displacement



(b) Frequency spectrum analysis of vertical vibration displacement

图 7 管片拼装机负载情况下小齿轮与大齿圈的振动位移频谱分析

Fig. 7 Frequency spectrum analysis of vibration displacement of small gear and large gear ring under the load of pipe assembly machine



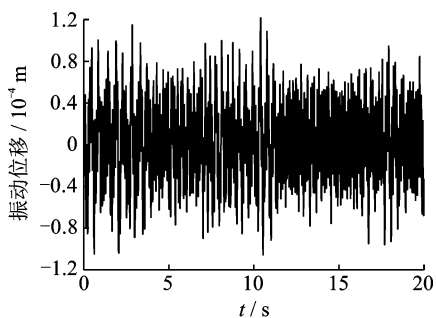
图 8 振动测试现场

Fig. 8 Vibration test site

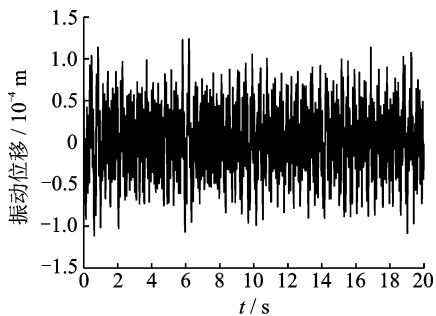
3.2 测试结果

动态采集仪采集到的为加速度信号,对加速度信号进行一系列的积分变换,得到相应的位移信号,空载情况下管片拼装机机架的位移信号如图 9 所示。对应的频谱图见图 10。负载情况下机架的位移信号如图 11 所示。对应的频谱图如图 12 所示。

由图 9,10 可以看出,空载情况下,管片拼装机机架的振动相对比较散乱,且水平方向的振动和竖直方向的振动相差不大,最大振动位移约为 0.1 mm,振动频率主要集中在 20 Hz 处。空载情况下,由于没有管片的存在,机架在旋转过程中的转动惯量小,阻力矩较小,提升系统可能存在提升油缸没有锁紧而出现振动,且在测试现场存在一定干扰,因此振动情况比较复杂。仿真时,大齿圈的水平方向

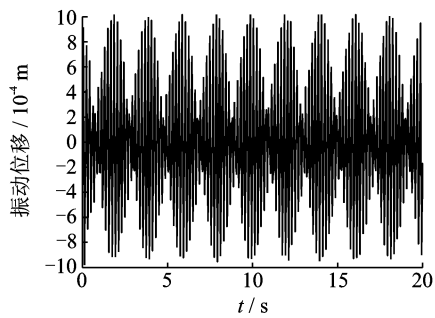


(a) 水平方向振动位移
(a) Horizontal vibration displacement

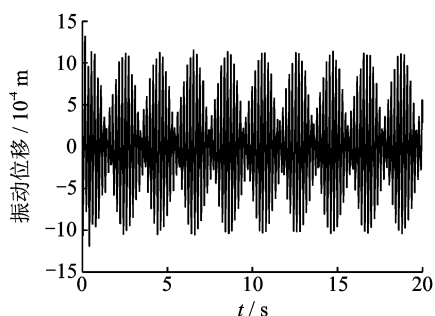


(b) 竖直方向振动位移
(b) Vertical vibration displacement

图9 管片拼装机空载情况下机架竖直方向测试结果
Fig. 9 Vertical direction test result of pipe assembly machine frame under no-load conditions



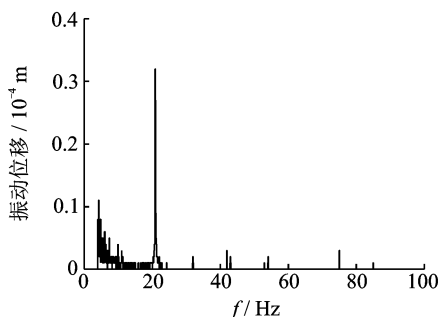
(a) 管片拼装机水平机架位移
(a) Displacement of horizontal frame of segment assembling machine



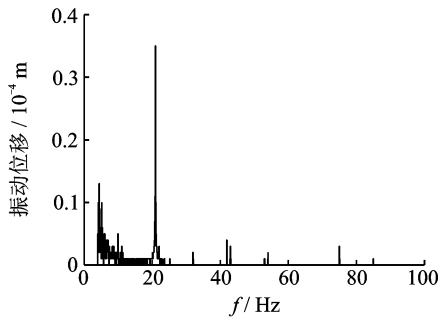
(b) 管片拼装机竖机架位移
(b) Displacement of vertical frame of segment assembling machine

图11 管片拼装机负载情况下机架测试结果

Fig. 11 Test results of rack of segment assembler under load condition



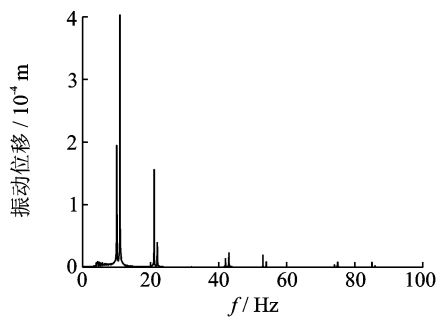
(a) 管片拼装机机架水平位移频谱图
(a) Spectrum of horizontal displacement of segment assembling machine frame



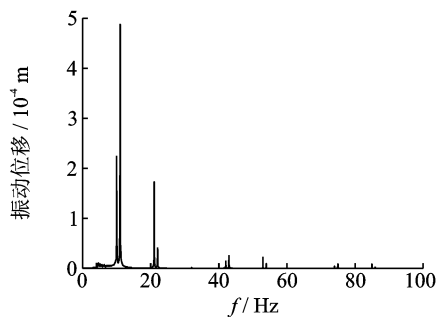
(b) 管片拼装机机架竖直位移频谱图
(b) Spectrum of vertical displacement of segment assembling machine frame

图10 管片拼装机空载情况下机架位移频谱

Fig. 10 Frequency spectrum of frame displacement of segment assembler under no-load condition



(a) 管片拼装机机架水平位移频谱
(a) Spectrum of horizontal displacement of segment assembling machine frame



(b) 管片拼装机机架竖直位移频谱
(b) Spectrum of vertical displacement of segment assembling machine frame

图12 管片拼装机负载情况下机架位移频谱

Fig. 12 Frequency spectrum of rack displacement of segment assembler under load

上最大振动位移为 0.54 mm, 竖直方向上最大振动位移为 0.71 mm, 与实验测试结果相一致。

由图 11, 12 可以看出, 负载情况下, 管片拼装机机架的转动惯量明显增大, 且阻力矩远大于空载情况, 提升系统由于管片的存在而锁紧, 因此管片拼装机机架的振动呈现明显的周期性。机架的水平方向最大位移幅值约为 1 mm, 竖直方向最大位移幅值约为 1.5 mm, 振动频率集中在 10 Hz 处。在仿真中, 大齿圈的水平位移幅值为 0.25 mm, 竖直位移幅值为 0.8 mm, 与测试结果相差不大, 验证了理论模型的正确性。由于对管片拼装精度的要求为管片之间的缝隙最大不超过 2 mm, 回转系统齿轮啮合的振动对管片拼装的精度影响较大, 可以通过提高齿轮啮合刚度的方法来抑制管片拼装机回转系统的振动, 保证管片的安装精度。

4 结 论

1) 利用集中参数模型建立了考虑齿面摩擦的 6 自由度的管片拼装机回转系统振动模型, 采用龙格库塔法(Runge-Kutta)计算了管片拼装机在工作过程中空载和负载两种不同工况下小齿轮和大齿圈的振动位移情况。其中, 空载情况下, 小齿轮的水平 and 竖直位移幅值分别为 0.4 mm 和 0.33 mm, 大齿圈的水平 and 竖直位移幅值分别为 0.5 mm 和 0.6 mm; 负载情况下, 小齿轮的水平 and 竖直位移幅值分别为 0.32 mm 和 0.65 mm, 大齿圈的水平 and 竖直位移幅值为 0.25 mm 和 0.8 mm, 小齿轮和大齿圈在啮合过程中存在共振现象。

2) 对管片拼装机回转系统进行实验测试, 得到了机架在水平方向和竖直方向的加速度, 通过积分变换得到了相应的振动速度和位移。空载情况下, 机架的水平 and 竖直位移均为 0.1 mm; 负载情况下, 机架的水平 and 竖直位移分别为 1 mm 和 1.5 mm, 与动力学仿真结果相一致。

3) 管片拼装机回转系统齿轮啮合的振动误差对回转系统的拼装精度影响较大。为了减小齿轮啮合对管片拼装精度的影响, 可以通过增大系统刚度的方法抑振, 系统刚度越大系统越稳定, 振动幅度越小, 为管片拼装机的设计及进一步研究管片拼装机回转系统的动力学特性以及为管片拼装机回转系统的减振降噪、提高拼装精度提供了依据。

状[J]. 矿山机械, 2014, 42(4): 1-6.

ZHANG Bi, ZHAO Haifeng, YANG Tao, et al. Research status of segment erector in shield tunneling machine at home and abroad [J]. Mining & Processing Equipment, 2014, 42(4): 1-6. (in Chinese)

- [2] 朱术林, 康学超. 管片拼装机比例阀控液压马达系统特性研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(20): 86-90.
ZHU Shulin, KANG Xuechao. Study on proportional valve controlling hydraulic motor system of segment erector [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(20): 86-90. (in Chinese)
- [3] 彭雄斌, 龚国芳, 陈馈, 等. 管片拼装机提升缸模糊 PID 同步控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(11): 2002-2008.
PENG Xiongbin, GONG Guofang, CHEN Kui, et al. Synchronization fuzzy PID control of lifting hydraulic cylinders for segment erector [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(11): 2002-2008. (in Chinese)
- [4] 杨旭, 龚国芳, 杨华勇, 等. 管片拼装试验台回转电液控制系统设计及试验分析[J]. 工程设计学报, 2014, 21(2): 180-184, 197.
YANG Xu, GONG Guofang, YANG Huayong, et al. Design and test analysis of rotary electric-hydraulic control system for a segment assembly test bed [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2014, 21(2): 180-184, 197. (in Chinese)
- [5] WU C, LIU X J, WANG L P, et al. Dimension optimization of an orientation fine-tuning manipulator for segment assembly robots in shield tunneling machines [J]. Automation in Construction, 2011, 2(20): 353-359.
- [6] WANG L T, SUN W, GONG G F, et al. Electro-hydraulic control of high-speed segment erection processes [J]. Automation in Construction, 2017, 73: 67-77.
- [7] 程永亮, 夏毅敏, 胡兴怀, 等. 泥水盾构管片拼装机力学特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(11): 1798-1803.
CHENG Yongliang, XIA Yimin, HU Xinghuai, et al. Mechanical characteristics analysis of segment erector for slurry shield [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(11): 1798-1803. (in Chinese)
- [8] 夏毅敏, 胡兴怀, 梅勇兵, 等. $\Phi 6.28\text{m}$ 盾构管片拼装的机扼架的力学特性[J]. 机械设计与研究, 2012, 28(6): 118-120, 123.
XIA Yimin, HU Xinghuai, MEI Yongbing, et al. Mechanics property analysis for segment erector yolk of $\Phi 6.28\text{m}$ shield tunneling machine [J]. Machine De-

参 考 文 献

[1] 张碧, 赵海峰, 杨涛, 等. 盾构管片拼装机国内外研究现

- sign and Research, 2012, 28(6):118-120, 123. (in Chinese)
- [9] 孙伟,杜家楠,王林涛,等.盾构管片拼装机电液系统高速-低冲击控制方法[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(10):1948-1958,1966.
SUN Wei, DU Jianan, WANG Lintao, et al. High speed and low impact control method for electric-hydraulic system of segment erector in tunnel boring machine[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(10):1948-1958, 1966. (in Chinese)
- [10] 刘金刚,周晓群,王凯,等.影响管片拼装机起步工作特性的敏感结构参数分析及优化[J].机械设计与研究,2017,33(3):192-196.
LIU Jingang, ZHOU Xiaqun, WANG Kai, et al. Sensitive structure parameters analysis and optimization influenced by segment erector starting characteristics[J]. Machine Design and Research, 2017, 33(3): 192-196. (in Chinese)
- [11] 刘金刚,王凯,廖金军.抑制管片拼装机起步冲击的模糊控制算法研究[J].机械科学与技术,2017,36(2):286-291.
LIU Jingang, WANG Kai, LIAO Jinjun. Study on fuzzy control algorithm for restraining starting impact of segment erector [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(2): 286-291. (in Chinese)
- [12] 孙志超,黄晓华.基于AMESim盾构管片拼装系统的建模与仿真[J].机床与液压,2013,41(13):144-146.
SUN Zhichao, HUANG Xiaohua. Modeling and simulation of segment erector system for shield tunnel machine based on AMESim [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013,41(13): 144-146. (in Chinese)
- [13] ANDERSSON A. An analytical study of the effect of the contact ratio on the spur gear dynamic response [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2000, 122(12): 509-514.
- [14] CHOI S T, MAU S Y. Dynamic analysis of geared rotor-bearing systems by the transfer matrix method [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2001, 123(12): 562-568.
- [15] 王峰,方宗德,李声晋.斜齿轮动力学建模中啮合刚度处理与对比验证[J].振动与冲击,2014,33(6):13-17.
WANG Feng, FANG Zongde, LI Shengjin. Treatment and contrast verification of meshing stiffness in dynamic model of helical gear [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6):13-17. (in Chinese)
- [16] 王成,高常青,崔焕勇.基于啮合特性的人字齿轮动力学建模与分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(8):3019-3024.
WANG Cheng, GAO Changqing, CUI Huanyong. Dynamic modeling and analysis of double helical gears based on meshing characters [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(8): 3019-3024. (in Chinese)
- [17] 张靖,陈兵奎,康传章,等.计及齿面摩擦的直齿轮动力学分析[J].振动与冲击,2012,31(21):126-132.
ZHANG Jing, CHEN Bingkui, KANG Chuazhang, et al. Dynamic analysis for spur gears considering friction effect[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 126-132. (in Chinese)
- [18] 石照耀,康焱,林家春.基于齿轮副整体误差的齿轮动力学模型及其动态特性[J].机械工程学报,2010,46(17):55-61.
SHI Zhaoyao, KANG Yan, LIN Jiachun. Comprehensive dynamics model and dynamic response analysis of a spur gear pair based on gear pair integrated error [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(17): 55-61. (in Chinese)
- [19] KIM S, SINGH R. Gear surface roughness induced noise prediction based on a linear time-varying model with sliding friction [J]. Journal of Vibration and Control, 2007, 13(7): 1045-1063.
- [20] RADZIMPVSKY E, MIRAREFI A. Dynamic behavior of gear systems and variation of coefficient of friction and efficiency during the engagement cycle [J]. Department of Mechanical and Industrial Engineering, 1975,97(4):1274-1280.
- [21] LIU G, PARKER R G. Impact of tooth friction and its bending effect on gear dynamics [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320(4):1039-1063.
- [22] 李润方,王建军.齿轮系统动力学[M].北京:科学出版社,1997:154-188.



第一作者简介:李杰,男,1979年6月生,博士,副教授。主要研究方向为盾构施工与数字化设计。曾发表《复合地层下盾构掘进速度模型的建立与优化》(《现代隧道技术》2017年第54卷第3期)等论文。

E-mail: lijdoc@126.com