

基于正电子湮灭的变结构 γ 光子探测器设计

徐少华,赵敏,姚敏,郭瑞鹏

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 211100)

摘 要:正电子湮灭产生的成对 γ 光子具有511 KeV的能量,通过晶体探测器以及合适的核素标记方式可以实现工业件内部腔体的无损检测。为满足工业被测对象结构多变的要求,设计了一种变结构 γ 光子探测器,可以根据工业件大小调节探测孔径,并实现了晶体探测模块与机架分离,具有成本低、灵活性好的优势。

关键词:正电子;工业;变结构; γ 光子探测器

中图分类号:TB302.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)05-0105-05

Design of Adjustable γ -Photon Detector Based on Positron Annihilation Technology

XU Shaohua, ZHAO Min, YAO Min, GUO Ruipeng

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: A pair of 511KeV γ -photons is generated during a positron annihilation. The detector and suitable labeling can be used for non-destructive testing inside industrial devices. To meet variety of industrial objects, this paper designs an adjustable γ -photon detector, the detection aperture can be changed according to the size of the industrial objects. It also realizes separation of the detector module from the holder, thus reducing the cost and improving flexibility in the industrial field.

Keywords: positron; industry; adjustable; γ -photon detector

0 引言

目前正电子湮灭技术主要包括研究材料微观缺陷、微观结构的正电子湮灭谱学以及用于医疗诊断的PET(positron emission tomography)等^[1]。随着高端制造业的发展,针对精密工业件内腔状态成像的需求越来越迫切。由于正电子湮灭产生的 γ 光子对有很强的穿透能力,受材料及环境因素影响小。将正电子核素标记到合适的载体如液体、气体等介质上,注入设备内腔体,再通过外围的 γ 光子探测系统进行探测,即得到工业环境下的 γ 光子探测设备。

作为一种正电子断层成像技术,工业 γ 光子探测设备与医用PET探测设备具有相同成像机理,但医用PET多为整环结构,一旦搭建完成便无法根据实际需求进行结构调整^[2],其有效视野通常仅占探测孔径的一半左右,造成成本过高且资源过剩的问题。为适应工业件结构多变的特点,可借助核物理仿真软件GATE进行验证,设计了一种结构可变的探测器机架,并通过模块化的晶体探测器搭建出一台旋转式 γ 光子探测器,可根据工业件大小进行探测孔径的调整(图1)。

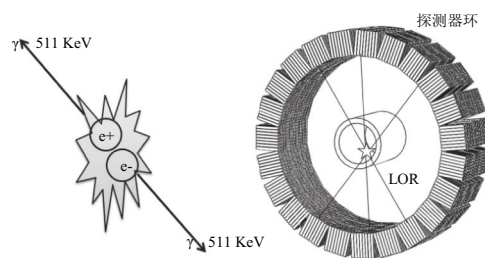


图1 正电子断层成像原理

1 旋转扫描仪检测原理介绍

利用回旋加速器可以产生放射性同位素,放射性同位素在发生 β^+ 衰变后释放出带正电荷的电子,后者在很短运动过程中与物体中的负电子发生湮灭现象,产生2个彼此相背方向且同时射出的 γ 光子,该光子的能量均为511 KeV(图1)。此时放置在物体周围的探测器通过闪烁晶体与光电倍增管,将 γ 光子截获并转换为电信号,通过高速模数转换器等信号处理模块提取 γ 光子的时间、能量与位置信息,经过符合判别后可以得到同一个湮灭事件

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51505220);航空科学基金(2016ZD52036);江苏省青年基金(BK20150746);南京航空航天大学研究生开放基金(kfj20170315;kfj20170316;kfj20170317)

作者简介:徐少华(1993—),男,浙江杭州人,硕士研究生,研究方向为无损检测及核物理仿真技术。

所发出的一对 γ 光子,从而得到响应线的位置,最终通过图像重建算法得到正电子核素在物体内部的分布状况。其重建算法的本质是根据大量的响应线交点可以反推出核素分布的浓度情况。因为核素浓度越高,发生的湮灭事件越多,穿过该区域的响应线(LOR)数目也越多。在探测器环完整的情况下,可以得到整个圆周所有角度的响应线,但是在非整环情况下,会存在一部分角度响应线缺失的情况。因此要想得到整环探测器同样的探测效果,往往需要加入旋转扫描来获取圆周上各个方向的响应线。图2中的非完整环探测器由A、B、C、D 4部分组成,左侧图中LOR2可以被探测到,但是LOR1却会飞出探测器外。右侧图为将探测器旋转一定角度后,能成功探测响应线1,经过多次旋转便可以采集到完整角度的响应线。

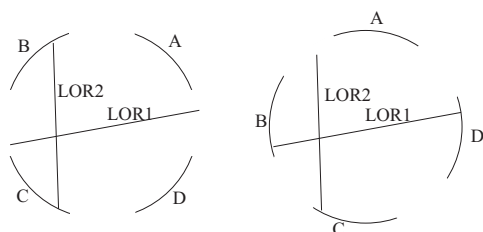


图2 非完整探测器环旋转扫描原理

早期平板式PET、工业CT等较多的检测设备均采用旋转式扫描^[3-4],其优势是可以降低设备成本,同时采集到足够完备的对象数据,不足的是检测结果受旋转台精度影响较大,同时扫描成像的速度将成倍下降。在工业领域,为了满足各类检测对象需求同时降低成本,综合考虑在成像分辨率及扫描时间要求不高的情况下,采用旋转式扫描方式是最佳的选择。

我国最初的旋转扫描PET样机是二分法PET(图3)其原理便是通过少量的探测器及简单的一维运动得到了足够数量的平行投影线^[3]。

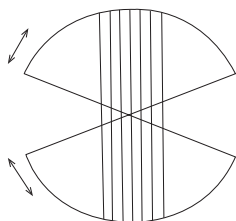


图3 二分法

由于本研究设计的变结构机架最大的特点是探测孔径可调及旋转式扫描,晶体探测器安装后在圆环上可沿径向移动,相较于整环,圆环上的探测器数目将减少。因此为了获取完备的投影线,需要加入旋转扫描来弥补,探测器分布示意图如图4所示。

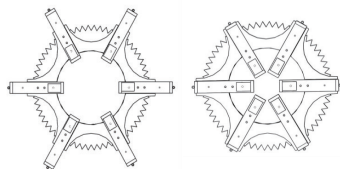


图4 变结构探测器示意图

2 GATE 仿真验证

2.1 GATE 仿真平台介绍

由于探测器设备成本较高,且实验过程存在辐射伤害,相关研究借助计算机软件展开,项目团队目前已在Linux系统上实现专业的 γ 光子成像仿真实验平台——GATE。该平台基于蒙特卡罗模拟,可实现复杂件的结构、材质搭建, γ 光子的激发、探测,探测器的平移、旋转运动及符合事件数据的导出,多项研究已证明蒙特卡罗模拟在正电子断层成像中应用的可靠性^[4-5]。

基于设计的变结构探测器,项目团队在GATE平台建立了响应的探测器模型,并对模型进行了多次等角度旋转,最终将得到的数据进行基于角度修正的图像重建,并且对比了整环(12对)与非完整环(6对)正弦图的主观评估,验证了旋转采集的可行性(图5)。

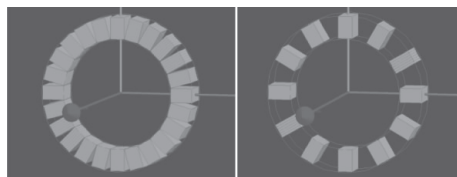


图5 整环与非整环GATE模型

2.2 仿真结果

由于一次实验符合事件往往达到百万数量级,为了便于存储,会将探测到的符合事件响应线以正弦图(sinogram)的形式存储,即将所有的响应线以投影的方式存储在一个二维数组中,数组的值代表了这类响应线的数目,其行下标与列下标则分别表示该响应线在坐标系中的投影角度 θ 与到圆心的距离 r (图6),对于相同的探测系统,正弦图能够反映后续图像重建的正确性。

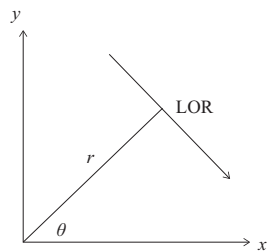


图6 响应线的表示方法

本研究针对上述两种探测器模型进行了数据处理,得到了正弦图。正弦图像素从左往右表示距离 r 依次增加,从上往下 θ 逐渐增加,像素的灰度值表示的是在该 r 和 θ 情况响应线的数目,数目越多,灰度值越大。图7为整环结构下得到的正弦图与重建图,图8为非完整探测器环经过4次等角度旋转后修正得到的正弦图与重建图,可见虽然两者存在一定误差,但旋转扫描已经能够实现检测及定位,若经过一定的校正算法,效果将会大大改善。



图7 整环探测器正弦图(左)与重建图(右)



图8 非整环探测器正弦图(左)与重建图(右)

3 变结构 γ 光子探测器参数设计

3.1 晶体探测器模块参数

设计采用的是成对的晶体探测器模块 Si-BDM 2550 E,前端与探测主体之间采用柔性连接,并且具备飞行时间成像技术,模块化设计使得专用的正电子断层成像仪器搭建更加方便快捷,如图9所示,单个的模块即能够搭建一个很小的迷你型探测系统。本设计采用6个该类模块安装在旋转平台上。模块具体相关技术参数如下:1)电源,DC 12 V;2)功耗,12 W;3)探头数量,2个;4)闪烁体阵列,6×6 LYSO 晶体;5)晶体尺寸为4.2 mm×4.2 mm×20 mm;6)光电转换器为6×6 SiPM 阵列;7)敏感面积=25 mm×25 mm;8)能量分辨率 $\leq 16\%$ @ 511 KeV;9)时间分辨率 ≤ 310 ps。

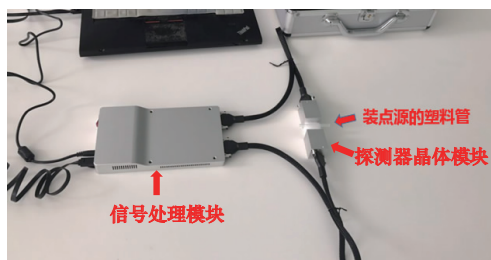


图9 单对晶体探测器模块

3.2 γ 光子探测器性能参数设计

探测器性能参数主要包括采集模式、探测孔径、采集步长、扫描时间以及机械部分参数等,以下将给出详细说明。

1) 正反转采集模式:最大转角 $<90^\circ$,采用正反转采集,且转幅 $<90^\circ$,能够避免线缆缠绕问题,同时完成整个圆周的数据采集。

2) 探测孔径:200 mm~300 mm 可调。考虑到被测对

象为工业件,结构、尺寸多变,为增强探测器灵活性,在探测器环径向安装可移动滑台,行程0~50 mm,定位精度为0.03 mm,初始状态探测孔径为30 cm。当滑台上的晶体沿径向往圆心方向移动时,探测孔径减小,其好处是可以根据被测对象体积相应地调整探测器孔径大小。

3) 采集步长 $\geq 9.5^\circ$,探测器旋转采集步长 θ 是可根据电机控制的。由于本设计中晶体传感器规格已定,且旋转采集方案是让传感器覆盖整个圆周,采集步长定为单个传感器宽度对应的圆心角,在此计算得到最小的步长 $\theta = 2 \tan^{-1}(1.25/15) = 9.5^\circ$ 。

4) 旋转体旋转角定位精度 $\leq 0.2^\circ$,旋转体及驱动齿轮精度等级均为8级。为了保证旋转定位精度,图像重建结果的准确性^[6],通过差补法消除,同时采用光电编码器反馈大齿轮转角,为了保证探测器空间分辨率,设计探测器大齿轮定位精度保证在 0.2° 以内。

5) 单个位置采集时间为1 s。为了在较短时间完成整体扫描过程,并且在每个位置采集时可以获取到一定数量的符合数据,经过多次仿真实验与图像重建效果,拟设计单个位置采集时间在1 s。

6) 旋转角速度为5 r/min~10 r/min ($30^\circ/\text{s} \sim 60^\circ/\text{s}$)。考虑到回转支承质量在30 kg左右,采集过程需要重复启停,因此旋转角速度不宜过大,以保证电机寿命。

7) 加减速时间为200 ms~300 ms。给予电机合理的加速和减速时间,使得转台的起转和停转更加平滑,电机控制角度更为精准,在此根据电机特点,设定加速和减速时间为200 ms~300 ms。

8) 为减少干扰,探测器在旋转过程中关闭数据采集,由于回转台从上一位置转到下一位置的过程中为非静止状态,为了减少此过程接收到 γ 光子对成像的影响,在旋转过程中停止数据采集功能。

9) 完成一次扫描时间 ≤ 31 s,传感器数目越多,扫描时间越短。不考虑载物台轴向运动,完成一次扫描时间与传感器对数成正比。在此考虑扫描时间最长的过程,仅一对探测器时,探测器步长为 9.5° ,需要旋转 $\pm 90^\circ$,采集次数为 $180/9.5 \approx 19$,采集时间为19 s;加减速时间取250 ms,旋转过程时间经过计算约为12 s,因此总的扫描时间为二者之和,约为31 s。

4 硬件结构设计

4.1 探测器硬件系统框架

探测器系统硬件组成部分主要包括晶体传感器模块、光电倍增管、时间同步模块、光电编码器、孔径调节滑台、载物滑台、旋转体——回转支承、驱动齿轮与伺服电机控制模块、探测环支撑架等。

探测器工作前,孔径调节滑台根据需求调整探测孔径,并根据传感器对数和探测孔径自动设定采集步长。旋转采集时,电机控制模块针对驱动齿轮、载物滑台进行控制,与此同时,时间同步器和光电编码器完成对转台单次采集时间段、角度信息进行反馈。传感器获取的符合数据首先通过时间段进行归类,再加入角度信息后上传至重建

工作站,用于图像重建,其硬件系统框架示意图如图 10 所示。

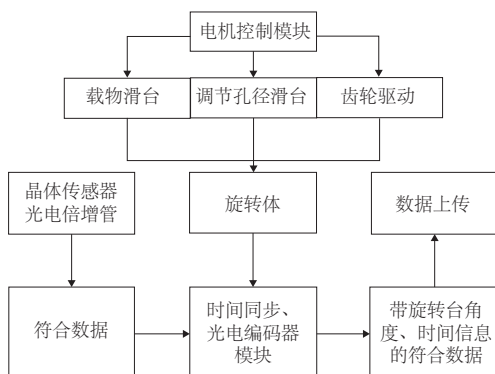


图 10 硬件系统框架示意图

4.2 硬件选型及可行性分析

除晶体传感器模块之外,硬件部分还主要包括支撑底座、旋转体、驱动电机模块、光电编码器及移动滑台,且主体支撑部分采用铝合金材料以减轻质量。

旋转体采用单排四点接触球式回转支承结构(图 11),可以同时承受轴向力、径向力、倾覆力矩^[7]。与传统的回转类产品相比,具有安装简便、易于维护、更大程度上节省安装空间等特点。由于标准的回转体在内径为 30 cm 时质量较大,定制了非标件回转支承,质量控制在 30 kg 左右,内径 300 mm,外径 470 mm,高度 45 mm,采用碳素结构钢,轴向、径向间隙 <0.04 mm,端面跳动 <0.1 mm,齿跳 <0.3 mm。同时配有齿数为 21,模数为 5 的小齿轮作为齿轮传动。

驱动电机采用一体化闭环步进电机,最大输出转矩可达 $2\text{ N}\cdot\text{m}$,最高转速为 2000 r/min 。在设计过程中,需要考虑电机能否满足旋转体启停的加速度要求,考虑仅外齿轮部分旋转,其质量近似为 20 kg ,忽略通孔、齿等,即视作一个圆环并计算其转动惯量。

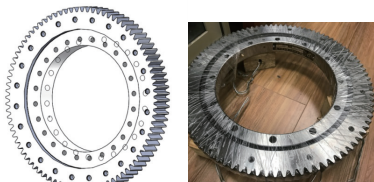


图 11 回转支承

如图 12,将圆环看成许多的薄圆环组成,取一半径为 r ,宽度为 dr ,厚度为 h 的薄圆环,其转动惯量计算如下:

$$dJ = r^2 dm \quad (1)$$

式中: dm 为薄圆环的质量,采用微分方法 $dm = 2\pi rh\rho dr$ 。

$$J = \int_r^R 2\pi h\rho r^3 dr \quad (2)$$

经过式(2)计算得:转动部分的转动惯量约为 $0.895\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

根据 3.2 节的参数要求,选取启停力矩最大的参数进行估算,其中回转支承加减速时间最短为 200 ms ,转速最

高为 10 r/min ,计算得到力矩约为 $4.686\text{ N}\cdot\text{m}$,除此以外还需要考虑转台静摩擦力矩,计算公式如下:

$$M_f = \mu p g D_f \quad (3)$$

式中: μ 为静摩擦系数,此处取 0.006 ; p 为轴承负载,预计在 20 kg 左右; g 为 9.8 m/s^2 , D_f 为公称直径,相应为 0.37 m ;因此 M_f 约为 $0.435\text{ N}\cdot\text{m}$,总的转台启停力矩 M_T 为 $5.121\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

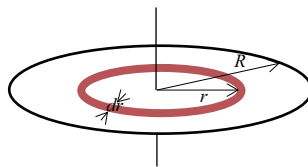


图 12 圆环转动惯量的计算

接下来考虑电机的输出力矩能否达到要求,由于电机的最佳工作转速在 $600\text{ r/min} \sim 1200\text{ r/min}$,目标转速为 10 r/min ,选择减速比为 $1:30$ 的行星齿轮减速机,经计算得到电机转速约需 1300 r/min ,根据电机输出力矩曲线获得此时电机输出力矩约为 $0.3\text{ N}\cdot\text{m}$,经过减速之后等效力矩为 $39.43\text{ N}\cdot\text{m}$,此力矩能够满足要求。

由于绝对编码器在定位方面明显地优于增量式编码器,已经越来越多地应用于工控定位中。本设计中编码器采用 14 位绝对式光电编码器,输出信号为 CAN 总线传输,具有较强的抗干扰能力。另外驱动小滑台采用 42 步进电机驱动,行程 $0 \sim 50\text{ mm}$,定位精度在 0.03 mm 左右,完全满足定位精度要求。

4.3 探测器一体化结构

经过参数设计与硬件选型,最终设计的探测器整体结构如图 13 所示^[8]。

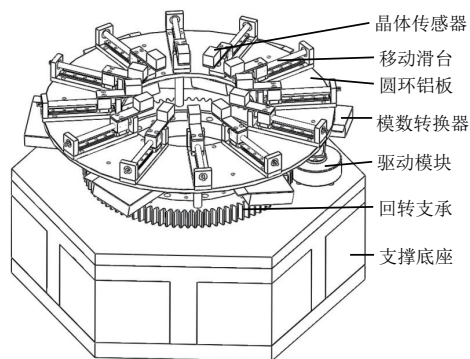


图 13 一体化探测器结构

所设计的工业 γ 探测器一体化结构采用分层装配方式,支撑底座、回转支承、探测器模数转换器、移动滑台及晶体传感器由下至上依次排布,整体尺寸控制在高度 50 cm 、宽度 60 cm 左右,质量约 80 kg ,相较于普通正电子断层成像设备具有灵活、易搬运的特点。为了防止旋转扫描过程中线缆缠绕,将多个模数转换器固定在圆环铝板背部,圆环铝板通过立柱支撑。中空部分最大直径为 30 cm (最大探测孔径),可根据不同检测对象自行安装载物台,并通过螺杆实现上、下位置调整。当被测工业件体积较小

时,通过滑台的径向移动可以减小探测孔径,从而增大采集步长,减少扫描时间。初步设计圆环铝板上最多可分布6对晶体传感器,工作时,回转支承以上部分进行旋转,从而完成所有角度投影线的采集。

5 结语

本文设计了一种变结构 γ 光子探测器,给出了重要参数的计算、硬件选型及可行性分析,并展示了研制的一体化设备样机结构。国内外将正电子成像技术应用于工业领域的相关文献非常少,相较于医用的正电子断层成像设备,工业用变结构探测器具有更好的灵活性与适用性,同时采用少量探测器即可完成成像扫描,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 王少阶,陈志权. 应用正电子谱学[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2009.
- [2] 刘晶晶. 基于全数字 PET 探测器的局部高空间分辨率 PET 成像研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.

- [3] 赵永界,杨永鑫,张勇. PET 探测器和扫描结构的发展[J]. CT 理论与应用研究,2014,6:985-994.
- [4] Conias P, Bertsekas N, Karakatsanis N., et al. Validation of a GATE model for the simulation of the Siemens biograph TM 6 PET scanner[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A,2007,57(1/2):263-266.
- [5] Baghaei, H, Yuxuan Zhang, Hongdi Li, et al. Comparison of a GATE Monte Carlo simulation predictions to the performance of a high-resolution LYSO based dedicated animal PET camera[J]. IEEE,2012,308(1): 2388-2392.
- [6] 张玉杰,潘尚峰,卢超. 工业 CT 旋转扫描台回转精度对成像质量的影响[J]. 无损检测,2016,10:37-41.
- [7] 刘丹丹,刘静,马小军. 大型转盘轴承启动摩擦力矩的试验及分析[J]. 机械研究与应用,2015,6(3):116-117.
- [8] 刘志刚,赵晓燕. 基于 SolidWorks 的高枝花椒采摘器结构设计及运动仿真[J]. 机械制造与自动化,2017,46(2):130-132.

收稿日期:2018-04-20

(上接第 87 页)

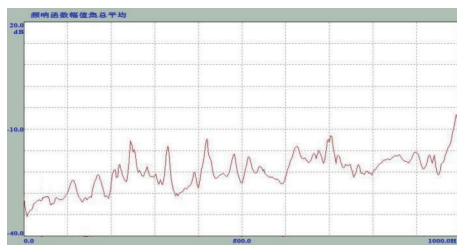


图 5 x 、 y 、 z 方向频响函数集总平均曲线

差异。实验值和建模理论值对比见表 2。从表中可以看出误差基本在 10% 以内,说明了理论建模方法具有一定的准确性。

表 2 进给系统固有频率值

编号	建模理论 计算频率/Hz	实验频 率/Hz	误差/(%)	振型
1	125.23	115.55	8.3	绕 y 轴转动
2	192.09	175.00	9.7	x 向水平振动
3	225.18	219.06	2.8	绕 x 轴转动
4	269.26	254.17	5.9	y 向竖直振动
5	302.81	330.16	8.3	绕 z 轴转动
6	410.02	425.93	3.7	z 向水平振动

3 结语

本文采用建模的方法对影响双驱进给系统固有频率的因素进行分析,得到以下结论:

1) 考虑了进给系统滚动结合面的影响,利用能量法建立了双驱进给系统动力学模型,得到系统质量矩阵和刚

度矩阵,并运用 MATLAB 求解得到前 6 阶固有频率值。

2) 进行模态锤击试验,与建模求解结果对比误差在 10% 以内,验证了模型的正确性。

3) 根据得到的质量矩阵和刚度矩阵,可以对其进行解耦,得到系统参数对固有频率的影响规律。

参考文献:

- [1] Verl S. Correlation between feed velocity and preloading in ball screw drives [J]. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2010,59(1):429-432.
- [2] Neugebauer R, Denkena B, Ewgeneg K. Mechatronicsystems for machine tools[J]. Annals of the CIRP,2007,56(2):657-686.
- [3] 卢秉恒,赵万华,张俊. 高速高加速度下的进给系统机电耦合[J].机械工程学报,2013,49(6):2-10.
- [4] 张会端,谭庆昌,裴永臣. 机床工作台的动力学分析[J]. 机床与液压,2008,36(9):68-71.
- [5] 许向荣. 滚珠丝杠副直线导轨进给单元动态性能研究[D]. 济南:山东大学,2011.
- [6] Vicente D A, Hecker R L, Villegas F J, et al. Modeling and vibration mode analysis of a ball screw drive [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58 (1/2/3/4):257-265.
- [7] 王永强,张承瑞,翟鹏. 滚珠丝杠进给系统轴向一阶固有频率量变规律[J]. 沈阳工业大学学报,2013,35(1):58-62.
- [8] Zhou Y, Peng F Y, Cao X H. Parametersensitivity analysis of axial vibration for lead-screw feed drives with time-varying framework [J]. Mechanics,2011,17(5):523-528.
- [9] 朱坚民,张统超,李孝茹. 基于结合部刚度特性的滚珠丝杠进给系统动态特性分析[J]. 机械工程学报,2015,51(17):72-82.
- [10] 刘海涛,王磊,赵万华. 考虑模态特性的高速机床进给系统刚度匹配研究[J]. 西安交通大学学报,2014,48(1):90-95.

收稿日期:2018-07-18