

# 大惯量质子治疗旋转机架定位控制技术

孙恺文, 龚时华, 蔡俊琼

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 旋转机架是质子放疗设备的重要组成部分,其主要特点是质量大、尺寸大、转动惯量大,运行时需要保证机架平稳加减速启停及精准定位。针对旋转机架的定位控制需求,对控制系统的硬件、软件部分进行了选型、设计,研究了系统的控制模型,并进行了参数整定,开发了一套基于PLC的质子治疗旋转机架定位控制系统。现场试验结果表明:开发的质子治疗旋转机架定位控制系统能够保证旋转机架在 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 角度范围、转速 $1 \text{ r/min}$ 的条件下,角度定位精度达到 $0.011^{\circ}$ ,满足质子放疗设备的工作要求。

**关键词:** 质子放疗设备;大惯量负载;旋转机架;定位控制

**中图分类号:** TM28    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24023

## Positioning Control Technology of Large Inertia Gantry for Proton Radiotherapy

SUN Kaiwen, GONG Shihua, CAI Junqiong

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** Gantry is an important part of proton radiotherapy equipment. Its main features are its large mass, large size and large moment of inertia. It is necessary to ensure the smooth acceleration and deceleration and precise positioning of the gantry. In response to the positioning control requirements of the gantry, the hardware and software parts of the control system were selected and designed, the control model of the system was studied, the parameters were adjusted, and a PLC-based proton therapy gantry positioning control system was developed. Field test results show that the developed proton therapy gantry positioning control system can ensure that the gantry has an angular positioning accuracy of  $0.011^{\circ}$  under the conditions of an angle range of  $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$  and a rotation speed of  $1 \text{ r/min}$ , which satisfies the work requirements for proton radiotherapy equipment.

**Key words:** proton radiotherapy equipment; large inertia load; gantry; positioning control

质子放疗因其良好的布拉格峰(Bragg peak)剂量分布特性,被认为是最精准的无创治疗癌症方法之一<sup>[1]</sup>。旋转机架是质子放疗设备的重要组成部分,其主要功能是对质子放疗设备各个部件进行承重,并旋转至一定角度实现质子束对肿瘤特定角度的照射<sup>[2]</sup>。作为治疗终端的关键部件,它对质子放疗的精度和效率有非常重要的影响。质子治疗旋转机架的主要特点是质量大、尺寸大、转动惯量大,因此对电机选型与运动控制系统设计有更高的要求。目前,针对大惯量负载的控制问题,文献[3]提出了增加间隙补偿器,并引入速度、加速度负反馈的控制方法,解决了大惯量负载下控制系统抖动的问题。文献[4]综述了

多电机协同驱动的控制结构与控制算法,并展望了多电机驱动大惯量系统的研究方向与发展趋势。文献[5]通过仿真和工程试验对比了传统控制方法和复合控制方法,结果表明复合控制能显著提高系统的动态性能与定位精度。

本文针对质子放疗设备旋转机架的定位控制技术开展研究,为保证其定位精度和运动性能,并考虑到多运动模式以及系统可靠性要求,开发了一套基于PLC的质子治疗旋转机架定位控制系统,对其硬件、软件部分进行了选型、设计,研究其运动控制模型,并进行了参数的整定,最后通过质子治疗旋转机架的现场试验验证了该定位控制系统能够满足放疗过程中的控制要求。

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0105306);湖北省重点研发计划项目(2021BCD005)

**作者简介:** 孙恺文(1998—),男,硕士,Email: kevin\_sun101@hust.edu.cn

**通讯作者:** 龚时华(1968—),男,博士,教授,Email: gongshihua1@mail.hust.edu.cn

## 1 需求分析

质子治疗旋转机架结构如图1所示,机架上主要连接有偏转磁铁、治疗头和配重。设备在进行放疗时,一般从多个角度对肿瘤组织进行放射,各角度放射剂量总和达到所需剂量即可,这样皮肤和肿瘤之间的正常组织细胞只需接受较低的放射量,大大降低放疗给患者带来的额外伤害<sup>[6]</sup>。

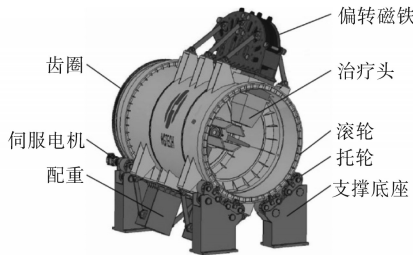


图1 旋转机架结构图

Fig.1 The structure of the gantry

因此,旋转机架首先需要能够在 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围旋转,而且静态时还要平衡因负载不均衡引起的偏心力矩,以保证质子束能从各个角度对肿瘤进行照射。对于大惯量负载的系统,旋转机架转速要能够达到 $0.1 \sim 1 \text{ r/min}$ ,以缩短角度调整时间,因为治疗时间越长,病灶位置的不确定性会越高。旋转机架的角度定位精度应达到 $0.1^{\circ}$ ,以实现治疗头质子束对肿瘤的精准入射,保证质子治疗的效果。旋转机架的运动控制性能需求如表1所示。

表1 旋转机架的运动控制性能需求

Tab.1 The motion control performance requirements of the gantry

参数	性能需求
旋转角度范围	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
转速要求	$0.1 \sim 1 \text{ r/min}$
角度定位精度	$0.1^{\circ}$

## 2 定位控制系统设计

### 2.1 电机选型

质子放疗设备旋转机架定位控制系统的突出特点是负载端转动惯量特别大,旋转机架以及偏转磁铁和配重的总转动惯量 $J$ 约为 $2.18 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,要保证负载端平稳加减速启停以及精准定位具有一定挑战性。而且由于偏转磁铁一侧的重量和配重一侧的重量有差异,因此即使在断电情况下,电机也必须平衡因负载偏心而产生的偏心力矩,防止旋转机架自行转动造成严重事故,即电机必须具有抱闸功能。因此,选用合适

的交流伺服电机提供足够的转矩和功率,对旋转机架的运动控制十分重要。

伺服电机作为执行部件,固定在基座上,通过谐波减速箱与旋转机架齿轮连接,谐波减速箱减速比 $i_1$ 为88,齿轮传动减速比 $i_2$ 为13,系统总减速比 $i$ 为1 144。电机端最大转速 $n_1$ 为

$$n_1 = n_2 \times i = 1 \text{ r/min} \times 1\,144 = 1\,144 \text{ r/min} \quad (1)$$

式中: $n_2$ 为旋转机架端的最大转速。

设定旋转机架最快在1 s内达到最大转速1 r/min,即旋转机架端角加速度 $\alpha_2$ 为 $0.105 \text{ rad/s}^2$ ,则电机端的等效瞬时最大转矩 $T_1$ 为

$$T_1 = \frac{J \times \alpha_2}{i} = \frac{2.18 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \times 0.105 \text{ rad/s}^2}{1\,144} = 200 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2)$$

因此,电机需要的功率 $P$ 为

$$P = \frac{T_1 \times n_1}{9\,550} = \frac{200 \text{ N} \cdot \text{m} \times 1\,144 \text{ r/min}}{9\,550} = 23.96 \text{ kW} \quad (3)$$

考虑到旋转机架定位控制系统安全性、可靠性以及过载能力等需求,选用的电机主要参数如下:额定功率31 kW,额定转矩257 N·m,额定电流69 A,额定转速1 150 r/min,功率因数0.89,效率0.921,转动惯量 $0.232 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,质量230 kg,具有抱闸功能。

经验证,所选电机的功率、转矩和转速等参数均满足旋转机架定位控制系统的要求。

在电机编码器方面,考虑到对于角度需要有记忆功能,选用带EnDat接口的绝对值编码器,分辨率为8 192步/转,共4 096转。其中,电机8 192步/转对应于旋转机架分辨率 $3.8 \times 10^{-5}^{\circ}$ ,远超 $0.1^{\circ}$ 的精度要求。4 096转对应于旋转机架约3.6转,也可以满足旋转机架 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 的角度范围要求。

### 2.2 硬件配置

为了实现旋转机架的定位控制,控制系统采用“上位工控机+PLC控制器+伺服驱动器+交流伺服电机”的数控结构。其中,工控机主要提供人机接口、参数设置、数据显示和故障诊断等功能<sup>[7]</sup>,其与PLC控制器之间采用以太网连接实现双向数据通信。PLC控制器根据上位机发出的运动指令通过IO模块输出脉冲和方向信号,驱动器通过接收的脉冲频率和数量来控制伺服电机运行的速度和角度,伺服电机上的编码器将角度、速度信息反馈到驱动模块,并在HMI面板上实时显示<sup>[8]</sup>。定位控制系统的硬件配置结构如图2所示。

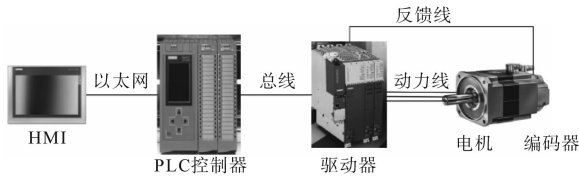


图2 硬件配置结构图

Fig.2 The structure of hardware configuration

2.3 软件设计

控制系统的软件部分主要由PLC程序和人机交互界面组成。其中PLC程序首先要能实现电机上电、使能以及报警诊断等功能,其次还需实现旋转机架连续转动和增量转动的运动模式。

人机界面则用于方便工程人员对旋转机架的控制,主要分为显示区、操作区和设置区。1)显示区:用于实时显示旋转机架的实际角度和速度,并显示当前的运动模式以及报警的错误代码。2)操作区:用于实现连续或增量运动模式的切换,操作旋转机架正转或反转,以及系统的报警诊断。3)设置区:用于进行参数设置,主要包括运动速度以及增量角度的设定。

3 控制模型与参数整定

3.1 控制模型

在前述控制系统中,PLC控制器除了逻辑控制功能外,还具备运动控制功能,并构成旋转机架定位控制位置环,其采用了带有速度前馈的比例控制调节器,输出速度指令给驱动器;驱动器负责速度环控制,采用了PI负反馈控制调节器,输出电流信号到电流环。定位控制系统框图如图3所示。图3中, $K_{pp}$ 为位置环比例增益, $K_{vp}$ 为速度环比例增益, $T_{vi}$ 为速度环积分时间参数, $K_{vf}$ 为速度前馈参数, $G_i(s)$ 为电流回路传递函数, $K_t$ 为电磁转矩系数,将电流环输出信号转换为驱动力矩, $J_s$ 为电机轴等效转动惯量,等于滚筒等效转动惯量加电机轴转动惯量。

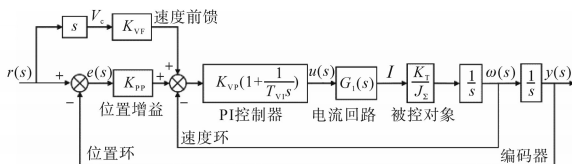


图3 定位控制系统框图

Fig.3 The block diagram of positioning control system

电流环的输入信号为

$$u(s) = \{ [r(s) - y(s)] K_{pp} + r(s) K_{vf} s - \omega(s) \} K_{vp} \frac{T_{vi} s + 1}{T_{vi} s} \quad (4)$$

式中: $r(s)$ 为上位机发出的位置指令; $\omega(s)$ 为电机速度反馈信号; $y(s)$ 为电机实际位置反馈信号,由编码器测出。

对于大惯量伺服系统,电流环带宽远高于速度环、位置环,说明其响应速度也远高于速度环与位置环,而且其参数由驱动器内部自整定完成,因此可近似认为电流环没有延时和衰减,即可将电流环 $G_i(s)$ 近似等效为“1”。因此,定位控制系统的传递函数为

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{K_{vf} K_{vp} s^2 + (\frac{K_{vf} K_{vp}}{T_{vi}} + K_{vp} K_{pp}) s + \frac{K_{pp} K_{vp}}{T_{vi}}}{\frac{J_s}{K_t} s^3 + K_{vp} s^2 + (\frac{K_{vp}}{T_{vi}} + K_{vp} K_{pp}) s + \frac{K_{pp} K_{vp}}{T_{vi}}} \quad (5)$$

带有速度前馈的P/PI控制系统通过上位机发出的位置指令实现旋转机架精确定位时,P控制用于快速地减小位置误差,其在固定扰动下会存在稳态误差,但避免了位置超调;速度前馈不损害控制系统的稳定性,且可以提高系统对速度指令信号的响应速度,同时还可减小由外界阻尼引入的跟随误差,提高控制系统的准确性<sup>[9]</sup>;PI控制中,比例增益起主导作用,用于快速减小速度误差,同时会存在稳态误差;积分增益则可以消除稳态误差,因为只要存在稳态误差,积分值就会逐渐积累,积分调节就会进行,直至消除静差<sup>[10]</sup>。

旋转机架定位控制系统的性能与控制参数的设定密切相关,因此还需进行参数整定以确定合适的前馈、反馈控制参数,提高系统的动态响应性能和控制精度,进而提高旋转机架的定位精度。

3.2 参数整定

由于旋转机架及其负载的模型十分复杂,很难建立精确的数学模型,而且参数整定过程中,需结合现场系统实际响应的情况以保证控制性能最优,同时还需考虑旋转机架大惯量特点带来的安全问题。因此,现场直接根据旋转机架的响应情况来确定不同参数对控制系统性能的影响,并以此进行参数整定。

由于前馈的引入不影响控制系统的稳定性,因此参数整定过程中总体采取先反馈后前馈的调试顺序。内环参数的整定不必考虑外环,因此在反馈回路相关参数的整定时,先调试内部速度环,再调试外部位置环<sup>[11]</sup>。

首先调试反馈回路控制参数,为了使系统获

得较大带宽、加快动态响应速度以及增强抗负载扰动能力,应在不影响系统稳定性的前提下尽可能增大速度环比例增益  $K_{VP}$ ,同时减小速度环积分时间  $T_{VI}$ 以加快积分调节速度和减小静差。接下来在旋转机架不振动的情况下,提高位置环比例增益  $K_{PP}$ 。

然后调试速度前馈参数,速度前馈增益越大,系统的动态响应性能越好,但系统的速度超调量会增大。因此,应在速度超调量较小的情况下,尽可能增大速度前馈参数  $K_{VF}$  [12]。

此外,还需对控制系统加减速过程进行速度规划,即确定最大加速度。由于旋转机架的转动惯量太大,在加减速过程中若加速度设置过大,快速启停的旋转机架会对托轮产生巨大的反作用力。该反作用力可能会使基座发生剧烈晃动,给设备带来安全风险,而且还会影响质子治疗设备的精度,给放疗过程带来误差。因此,应在不引起基座晃动的前提下,适当增大电机的最大加速度。整定后的参数如下:速度环比例增益  $K_{VP} = 77.6959 \text{ N}\cdot\text{ms}/\text{rad}$ ,速度环积分时间  $T_{VI} = 10 \text{ ms}$ ,位置环比例增益  $K_{PP} = 10/\text{s}$ ,速度前馈参数  $K_{VF} = 100\%$ ,电机轴最大加速度  $= 450^\circ/\text{s}^2$ 。

#### 4 试验验证

质子放疗设备旋转机架现场图如图4所示,旋转机架运动范围可以覆盖  $-180^\circ \sim 180^\circ$ 。



图4 旋转机架现场图

Fig.4 The diagram of the gantry

经验证,旋转机架转速能达到  $0.1 \sim 1 \text{ r}/\text{min}$ ,且自由可调。取质子放疗过程中常用转速  $1 \text{ r}/\text{min}$ 为设定速度,即  $6^\circ/\text{s}$ ,测得旋转机架速度与速度误差如图5所示。由图5可以看出,旋转机架能达到  $6^\circ/\text{s}$ 的速度,且全程速度误差控制在  $0.01^\circ/\text{s}$ 以内,跟踪性能较好,验证了定位控制系统可以达到旋转机架运动速度的要求。

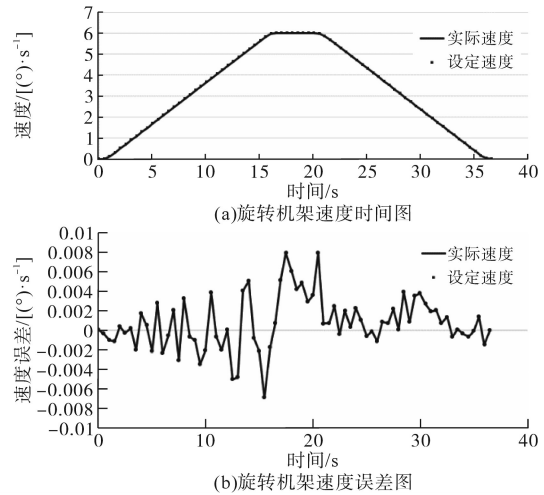


图5 旋转机架速度与速度误差图

Fig.5 The velocity and velocity error of the gantry

定位精度方面,将旋转机架分别以  $90^\circ, 0^\circ$ 和  $-90^\circ$ 位置为基准,来回旋转  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 和  $20^\circ$ 角位移,测量相邻点弦长值,对比理论弦长值得到角度定位误差数据如表2所示。

表2 角度定位误差表

Tab.2 The table of angle positioning error

位移角度	$0^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$	
机架位置 $90^\circ$ 定位误差/ $^\circ$	逆时针	0.000 0	-0.000 2	0.000 5	0.002 0	0.001 2
	顺时针	0.000 0	-0.001 0	-0.001 2	0.000 5	0.003 0
机架位置 $0^\circ$ 定位误差/ $^\circ$	逆时针	0.000 0	0.000 2	0.000 0	-0.000 6	-0.001 6
	顺时针	0.000 0	0.000 5	-0.001 6	0.000 1	-0.000 2
机架位置 $-90^\circ$ 定位误差/ $^\circ$	逆时针	0.000 0	-0.000 2	0.002 7	0.002 0	-0.000 5
	顺时针	0.000 0	0.000 9	0.002 0	0.004 2	0.000 1
平均误差 $X_j/^\circ$	0.000 0	0.000 0	0.000 4	0.001 4	0.000 3	
3倍标准偏差 $3S_j/^\circ$	0.000 0	0.001 9	0.005 1	0.005 2	0.004 8	
$X_j+3S_j/^\circ$	0.000 0	0.001 9	0.005 5	0.006 6	0.005 1	
$X_j-3S_j/^\circ$	0.000 0	-0.001 9	-0.004 7	-0.003 8	-0.004 5	

旋转机架以  $90^\circ, 0^\circ$ 和  $-90^\circ$ 为基准,逆、顺时针旋转的角度定位误差如图6所示。由图6可以看出,旋转机架位于  $0^\circ$ 时,角度定位误差在  $-0.002^\circ \sim 0.001^\circ$ 范围,而旋转机架位于  $\pm 90^\circ$ 时,角度定位误差为  $-0.002^\circ \sim 0.005^\circ$ ,大于前者。这是因为旋转机架位于  $\pm 90^\circ$ 位置时偏心力矩最大,对定位系统准确性的影响也最大。但即便如此,定位误差也远在定位精度要求  $0.1^\circ$ 之下。经计算可得旋转机架角度定位精度为

$$\begin{aligned}
 A &= (X_j + 3S_j)_{\max} - (X_j - 3S_j)_{\min} \\
 &= 0.0066 - (-0.0047) \\
 &= 0.0113^\circ \quad (6)
 \end{aligned}$$

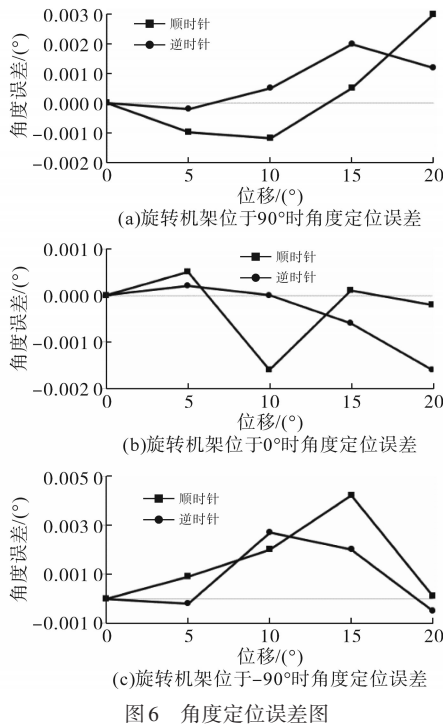


图6 角度定位误差图

Fig.6 The diagram of angel positioning error

验证了旋转机架角度定位精度可以达到质子治疗入射角度 $0.1^\circ$ 的精度要求。

## 5 结论

本文针对质子放疗设备旋转机架的定位控制问题,开发了一套基于PLC的质子治疗旋转机架定位控制系统,最后通过现场试验验证了在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 角度范围、转速 $1 \text{ r/min}$ 的条件下,设备的定位精度可以达到 $0.0113^\circ$ ,即本文开发的旋转机架定位控制系统能够满足质子放疗设备的工作要求。

### 参考文献

- [1] 陈奥特,刘旭,王健,等. HUST-PTF 质子治疗装置能量选择段真空设计与仿真[J]. 核技术,2019,42(12):62-67.  
CHEN Aote, LIU Xu, WANG Jian, et al. Design and simulation of vacuum system in energy selection section for HUST-PTF[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(12):62-67.
- [2] 谷鹏飞. 质子治疗旋转机架研究现状及前景[J]. 科技资讯, 2018,16(33):221-222.  
GU Pengfei. Research status and prospect of rotating gantry for proton therapy[J]. Science & Technology Information, 2018, 16(33):221-222.
- [3] 张新华,黄建,张兆凯,等. 大惯量下电动伺服机构非线性特性与控制方法研究[J]. 导航定位与授时,2017,4(2):41-47.  
ZHANG Xinhua, HUANG Jian, ZHANG Zhaokai, et al. Research on nonlinear factor characteristics and control method

- on large inertia electromechanical actuator servo mechanism[J]. Navigation Positioning & Timing, 2017, 4(2):41-47.
- [4] 杨春雨,孟凡仪,许一鸣,等. 大惯量负载多电机驱动系统协调控制方法综述[J]. 电机与控制应用,2019,46(3):1-7.  
YANG Chunyu, MENG Fanyi, XU Yiming, et al. Coordinated control methods for multi-motor drive systems of large inertia load: a survey[J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(3):1-7.
- [5] 郭绪猛. 大惯量天线伺服跟踪复合控制技术[J]. 电机与控制应用,2020,47(8):52-56,74.  
GUO Xumeng. Servo tracking technology based on compound control of large inertia antenna[J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(8):52-56,74.
- [6] 刘旭. 用于质子治疗的旋转机架束流运输线设计[D]. 武汉:华中科技大学,2018.  
LIU Xu. Design of the gantry beamline for a proton therapy facility[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [7] 龚时华,郑忠香,王平江,等. 十轴六联动双光束激光焊接及其跟踪控制技术[J]. 航空制造技术,2018,61(11):34-39,47.  
GONG Shihua, ZHENG Zhongxiang, WANG Pingjiang, et al. Control technology for dual-beam laser welding and seam tracking with ten-axis six-linkage CNC[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(11):34-39,47.
- [8] 孙洁,王兴楠,孙晔,等. 基于PLC的工业云平台控制系统设计[J]. 电气传动,2020,50(7):69-73.  
SUN Jie, WANG Xingnan, SUN Ye, et al. Design of industrial cloud platform control system based on PLC[J]. Electric Drive, 2020, 50(7):69-73.
- [9] 曾卓,龚时华,鹿怀庆,等. 摆臂高频往复旋转定位控制参数整定[J]. 电气自动化,2019,41(2):83-85.  
ZENG Zhuo, GONG Shihua, LU Huaqing, et al. Setting of positioning control parameters for the swing arm in high-frequency progressive rotation[J]. Electrical Automation, 2019, 41(2):83-85.
- [10] ELLIS George. 控制系统设计指南[M]. 北京:电子工业出版社,2006:73-78.  
ELLIS George. Control system design guide[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006:73-78.
- [11] 关欣,李叶松. 永磁同步电机伺服系统PI参数整定[J]. 电气传动,2016,46(8):26-30.  
GUAN Xin, LI Yesong. Tuning method for PI parameters of permanent magnet synchronous motor servo system[J]. Electric Drive, 2016, 46(8):26-30.
- [12] 曾卓. 摆臂高频往复旋转定位控制参数整定[D]. 武汉:华中科技大学,2018.  
ZENG Zhuo. Parameter setting of high frequency reciprocating rotation positioning control for swing arm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.

收稿日期:2021-10-14  
修改稿日期:2022-03-08