

基于自由活塞斯特林发电系统的位置检测方法

李春宇 黄玉平 郑再平 王移川

(中国航天科技集团公司第一研究院十八所 北京 100076)

摘要: 自由活塞式斯特林直线电机发电系统因具有高效、长时间在轨、应用能源广泛等性能而得到广泛关注。位置检测方式在自由活塞式斯特林直线电机发电系统中占有重要的地位,可以从中分析发动机设计的合理性与系统工作的稳定性。为了获得自由活塞式斯特林直线电机发电系统由自启动的电动状态到发电状态的动态过程,并为了减小系统的体积、提高系统的密封性,设计了一种基于无位置检测的压力波测试方法。该方法采用一种新型的压力波传感器,配合适当的供电、调理、采集电路,可以实时检测到发动机动子的位置,进而实现发电系统的控制。

关键词: 压力波传感器;位置检测;斯特林发电

中图分类号: TP206 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Testing method design of based on free piston Stirling engine power generation system

Li Chunyu Huang Yuping Zheng Zaiping Wang Yichuan

(The 18th Institute, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Free piston stirling engine linear motor power generation system earns widespread attracts for the possession of properties as high-efficiency, long term on track and broad application resource. Position detection plays an important part on the Free Piston Stirling Engine Linear Motor Power Generation System, from which the rationality and stability of the motor design working system can be analyzed. To acquire the dynamic procedure from the starting power-driven status to the power generating status of Free Piston Stirling Engine Linear Motor Power Generation System, and to decrease the system volume and improve the leakproofness, a pressure wave testing method based on sensorless position detection was designed. This method makes use of a new pressure wave sensor, accompanied with appropriate power-supply, conditioning and acquisition circuit, it detects the position of the engine's active cell in real time, thus to realize the control of the power generating system.

Keywords: pressure wave sensor; position detection; Stirling engine power generation system

1 引言

自由活塞式斯特林直线电机发电系统的控制驱动器是系统的一个重要组成部分,有着至关重要的作用。首先,在系统启动时,控制驱动器通过实时精确检测计算动子位移达到启动的目的。其次,启动后,根据工况,调节动子的位移以保证系统运行^[1-2]。常用的位置检测方式如 LVDT 传感器、无位置传感器等^[3]都不能满足系统对更为严苛的体积、密封性的要求^[4]。本设计采用压力波传感器配合适当的采集电路及抗高过载存储模块实现位置的检测功能,以达到通过控制行程确保系统稳定运行的目的。

2 压力波动检测方式

2.1 检测原理

发电系统运行气体波动经过压力波传感器产生敏感信

号,经过滤波、信号调理、模数转化为数字量,传递给控制器进行分析控制。其原理如图 1 所示,为发电系统的综合考虑,供电电源采用 $\pm 12\text{ V}$,并且是由系统发电经过电源模块变换而得。同理, $2\sim 20\text{ mA}$ 恒流源是由系统发电经电源模块(LM7805)变换成的 5 V 直流电源变化所得,用来驱动压力波传感器。传感器输出的信号经过低通滤波,差分输入以及 1.5 V 正向偏置的加法电路,变化成 $0\sim 3\text{ V}$ 的模拟信号,经过模数转换送回到控制器。

2.2 电路设计及试验结构

2.2.1 放大电路

本部分采用的是差分放大电路与正向加法电压偏置电路组成,解决了传感器负向信号调理与不同地隔离的问题。该差分放大电路是双电源供电,该双电源是由电源模块变换所得,使用简单、成本低,维护性好^[5]。如图 2 所示。

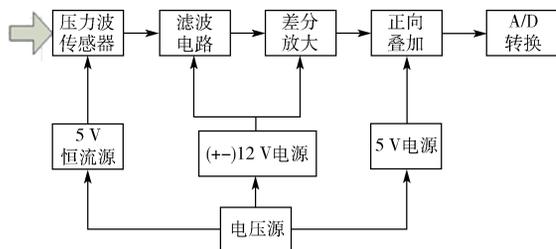


图 1 检测原理

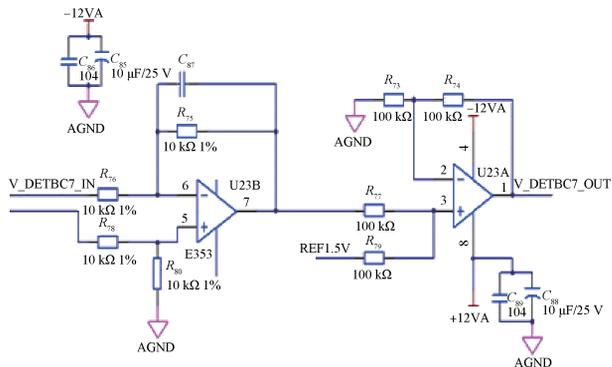


图 2 放大调理电路

运放的电源脚接到正负电源,正向偏置 1.5 V 是由发电系统所得的电压变换分压而来,可以通过调节分压电阻改变幅值,在差分运放的负向输入与输出之间加入电容,有效起到防止自激现象并起到一定的隔离滤波用,如下式:

$$V_7 = -V_{\text{DETECT_IN}} \quad (1)$$

式中: $V_{\text{DETECT_IN}}$ 的范围是 $-1.5 \sim 1.5$ V,运放的 5 脚输入端接地。并且可以通过调节 $R75/R76$ 的值来适应不同传感器的不同输入,适用性和实验性都较强。当 $R76 = R75$ 时,差分运放为同倍放大,当 $R5 = 2R76$ 时,差分运放的输出为输入的 2 倍,其曲线为图 3 所示^[6]。

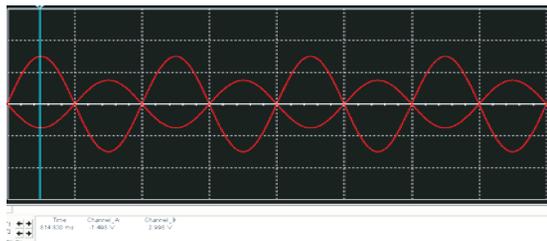


图 3 同倍、双倍差分输出曲线

后端正向加法电路将差分信号所得的 ± 1.5 V 的电压变换成 $0 \sim 3$ V,其公式为:

$$V_{\text{DETECT_OUT}} = \text{REF}1.5 + V_7 \quad (2)$$

并可通过调节 $R73/R74$ 的值来调整其放大倍数。当 $R77 = R79, R73 = R74$,得到正向偏置电路输出图形为:

由差分放大器输出曲线可以看到通过调整增益倍数,来有效获得目标电压要求,达到了预期的目的。

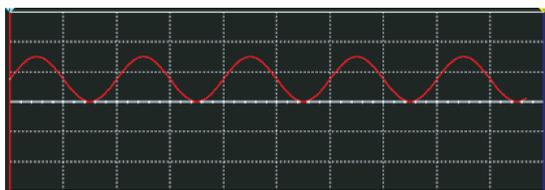


图 4 正向偏置电路输出曲线

2.2.2 滤波电路设计

根据本发电系统的实际设计以及 PCB 压力波传感器参数选择考虑,滤波器设计采用的是有源低通滤波器,即用 R、C 和运算放大器组成。根据需求选取是巴特沃斯(ButterWorth)滤波器(最大平坦度特性),这种滤波器的幅频特性在直至衰减 3 dB 的截止频率处几乎是完全平坦的,过渡带以中等速度下降,下降率为 $-6 \times n(\text{dB})/\text{倍频程}$,其中 n 为滤波器的阶数。这是一个在非特殊要求下有良好适用性的一般性滤波器。考虑到后级的差分运放,因此将该滤波器的阶数选为 2,并由于系统运行的频率要求,因此选用为低通滤波器^[7-8]。

参数设计,因为信号调理后数据采集部分采集频率和压力波传感器自身使用压力范围的限制,并综合考虑系统压力波动信号的特点,将低通滤波器的截止频率设计在 300 K。根据 2 阶巴特沃斯(ButterWorth)高通滤波器的截止频率计算公式为:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3)$$

根据式(3)验算,取 $R_1 = R_2 = 5.1 \text{ k}\Omega, C_1 = C_2 = 100 \text{ pF}$ 设计电路满足需求。

2.2.3 恒流源设计

根据压力波传感器的参数指标,设计该横流电源电路。设计要求的恒流源在 $2 \sim 20 \text{ mA}$ 直流供电,通过 LM7805 变换出 5 V 电源实现恒流源的设计,LM7805 输出的 2 脚与 3 脚压降是 5 V,并在其中串联一个 $1 \sim 2.5 \text{ k}\Omega$ 的电阻,通过改变电流值改变电流值通过连接传感器的 IPCI+、IPCI-驱动传感器,满足要求^[9],其原理如图 5 所示。

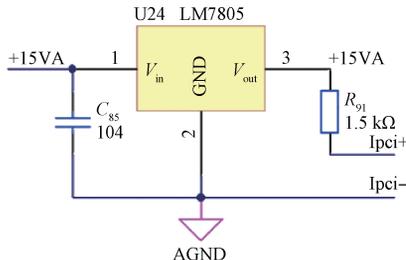


图 5 恒流源原理

2.2.4 电压源设计

鉴于系统的实现原理,电压源有三个重要作用。首先,在系统启动阶段为系统提供启动能量;然后,在系统正常发电状

态时可以吸收系统释放的多余能量并存储;最后,在其他阶段利用其吸收和释放能量的原理为系统正常运动提供保证。

根据上述功能,采用 DC-DC 变换连接蓄电池与电机系统的结构,并此 DC-DC 变换时双向的,并蓄电池经不同电源模块变换出不同电压为系统其他应用如 DSP、恒流源、驱动芯片、DC 变换等结构供电,其结构如图 6 所示^[10-11],经实验验证,DC-DC 功效可行并且效率在 90% 以上,满足要求。

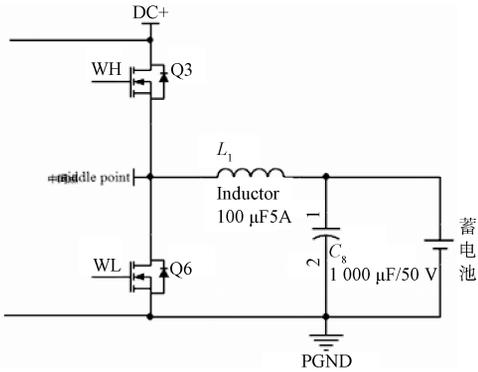


图 6 电压源原理

3 实验结果分析

针对该系统进行验证、电路调试及动态校准等试验,试验中采用压力波发生器作为信号源。由于该系统是一个谐振系统并且理想的波形是正弦波,因此采用压力波发生器产生频率为 110 Hz,幅值在 1.5 V 的正弦波。并通过红外位置检测装置对位置检测进行动态校准,与理论计算值基本相符,其结果参数如表 1 所示。

表 1 动子位移与电压、频率关系

频率/ Hz	输入电 压/V	输入电 流/A	副绕组 电压/V	幅值/ mm
52	1	0.28	0.102	0.250 0
	2	0.17	0.156	0.530 0
	3	0.25	0.211	0.751 0
	4	0.35	0.238	1.058 0
	5	0.44		1.265 0
51	5	0.41	0.348	0.992 0
	6	0.49	0.466	1.156 0
	7	0.58	0.500	1.227 0
	8	0.68	0.560	1.368 0
	9	0.81	0.608	1.468 0
50	9	0.73	0.564	1.567 0
	10	0.84	0.694	1.785 0
	11	0.98	0.734	1.898 0
49	12	1.04	0.808	2.297 0
48	13	1.13	0.892	2.511 0
47	14	1.27	0.908	3.025 0
	15	1.4	1.024	3.252 0

利用系统硬件及采用 DSPTMSF2809 为控制芯片进行电动实验,电机启动过程的电压、电流以及行程波形分别如图 7~9 所示。从图中可以看出电机在 0.2 s 内即可达到稳定状态并该检测方式测得的动子位移与电压关系正确。

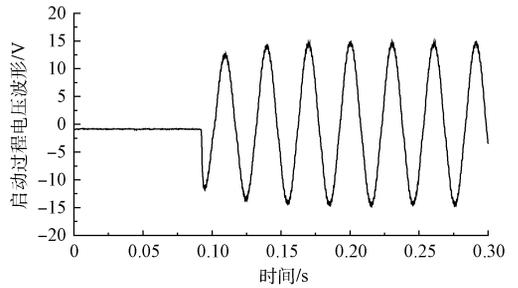


图 7 启动过程电压波形

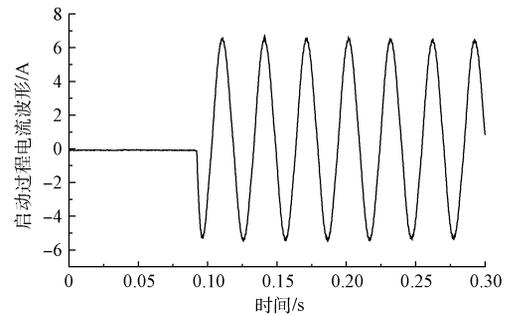


图 8 启动过程电流波形

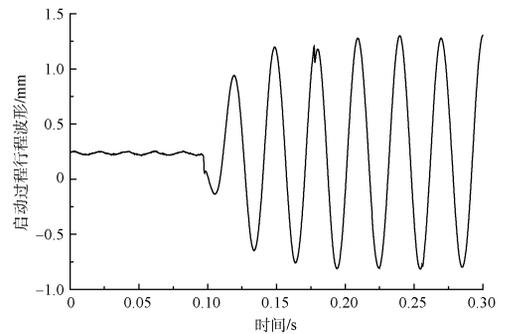


图 9 启动过程动子位移波形

4 结 论

基于自由活塞式斯特林直线电机发电系统的压力波动位置检测方式设计成功记录了该系统由静止到稳定运行的启动过程的动态位置曲线,与以往位置检测方式相比较,该方法具有良好的相应特性,能真实的反应电动、发电两个过程的实时压力波动过程,该方法避免了热敏电阻等因系统温度变化引起的数据变化,并达到比其他同级应用线性传感器更加轻小型、密封性更好的目的。试验数据对分析系统设计的合理性及工作的稳定性发挥了重要作用。

参考文献

- [1] 张海林. 斯特林直线发电机控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [2] 龚泉熔. 自由活塞式斯特林永磁直线发电机控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [3] 张凯, 董菲, 赵吉文. 基于图像熵的直线电机定子位置精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2821-2827.
- [4] 汪定国, 王怡苹. 一种高精度铂电阻温度测量方法[J]. 电子测量技术, 2012, 35(11): 104-107.
- [5] 梁杰. ICP 传感器的单电源信号调理电路设计[J]. DCS 与自动化仪表, 2013(11): 66-69.
- [6] 王翠珍, 唐金元, 纪明霞, 邵红. 基于 Multisim10.0 的非线性电路分析方法仿真研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 66-69.
- [7] 贾兴中, 焦新泉, 侯卓. 一种低频脉动压力随弹检测方法设计[J]. 创意与实践, 2010, 25(4): 54-56.
- [8] 汪伟, 徐科军, 方敏. 一种气体超声波流量计信号处理方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1365-1373.
- [9] 丁志杰, 吕明召, 赵志伟. 压控恒流源的动态性能研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(9): 6-9.
- [10] 秦奋, 赵强, 苏成利. 电动汽车无线充电系统仿真与设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(7): 45-48.
- [11] 郭旭东, 申群太, 韩华. 一种离网型风力发电系统的平衡控制策略[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1886-1893.

作者简介

李春宇, 硕士研究生在读, 主要研究方向为空间电源、控制驱动等。

E-mail: 328852456@qq.com

黄玉平, 研究员, 主要研究方向为航天伺服技术。

郑再平, 高级工程师, 主要研究方向为空间电源。

王移川, 高级工程师, 主要研究方向为大功率电源变换。

(上接第 132 页)

- [8] 谢青. 脑卒中的康复治疗现状[J]. 内科理论与实践, 2012, 7(2): 86-90.
- [9] 乐趣, 屈云. 脑卒中后偏瘫侧手部运动功能康复技术进展[J]. 中国康复医学杂志, 2012, 27(11): 1084-1086.
- [10] 张伟昆. 测试性分析与评估体系的研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5): 38-42.

作者简介

易荣武, 东南大学仪器科学与工程学院在读硕士, 主要研究方向为机器人传感与智能测控系统、康复医疗机器人技术等。

王爱民, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器人传感与控制技术、力触觉人机交互与虚拟现实技术、康复机器人技术等。

(上接第 136 页)

- [4] BURROUGHS C J, DRESSELHAUS P D, RUFENACHT A, et al. NIST 10 V programmable Josephson voltage standard system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(7): 2482-2488.
- [5] 荣锋, 苗长云, 徐伟. 仪表着陆系统信号监视仪的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(9): 872-877.
- [6] RUFENACHT A, HOWE L A, FOX A E, et al. Cryocooled 10 V programmable Josephson voltage standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 64(6): 1477-1482.
- [7] 鲁云峰, 赵建亭, 贺青, 等. 基于低温电流比较仪的微弱电流精密测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2812-2817.
- [8] MULLER F, SCHELLER T, WENDISCH R, et al. NbSi barrier junctions tuned for metrological applications up to 70 GHz: 20 V arrays for programmable Josephson voltage standards[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 1101005-1101005.
- [9] CHEN S F, AMAGAI Y, MARUYAMA M, et al. Uncertainty evaluation of sampling measurement system using AC-programmable Josephson voltage standard[C]. Proceedings of CPEM, 2014: 258-259.
- [10] 魏晓璞. 电压波动和闪变的检测与分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [11] 李新春, 张庆江, 高念. 基于 IP 核的便携式综合电子测量仪的设计与实现[J]. 激光杂志, 2015(1): 135-139.

作者简介

千承辉(通讯作者), 1975 年出生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为传感器与智能仪器。

E-mail: qianch@jlu.edu.cn