

# 基于幅频自校准的高精度 LVDT 模拟器设计

何宴辉<sup>1</sup>, 汪理虎<sup>2</sup>, 刘涛<sup>3</sup>

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109; 2. 上海航天技术研究院, 上海 201109;

3. 中国商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108)

**摘要:** 电路模拟 LVDT 传感器在航空发动机测试中有着广泛的应用, 相对于机械传感器其降低了使用难度和维护费用; 传统模拟器由于电路中变压器的影响, 仿真精度较差导致系统测试准确性降低, 研制高精度 LVDT 模拟器存在着较大的工程需求; 文章从 LVDT 传感器工作原理出发, 基于乘法型 DAC 芯片实现了电路合成模拟 LVDT 传感器; 同时在模拟器中设计自动校准单元, 利用离线拟合并存储到 FPGA 中的模板曲线对不同通道进行在线校准, 消除了变压器幅频响应的影响, 提高了模拟器在宽频率范围内的仿真精度; 文章通过理论推导证明了模板曲线的有效性, 通过测试数据验证了该模拟器在 0.36~10 kHz 范围内可达到优于 0.1% 的设计精度; 该模拟器能够逼真模拟 LVDT 传感器的电气行为, 已成功应用于某型号发动机控制系统的地面仿真测试平台中, 达到了预期效果。

**关键词:** LVDT 模拟器; 校准; 幅频响应

## Design of High Accuracy LVDT Simulator Based on Amplitude-frequency Calibration

He Yanhui<sup>1</sup>, Wang Lihu<sup>2</sup>, Liu Tao<sup>3</sup>

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;

3. AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

**Abstract:** Electronically simulated LVDT sensor is widely used in the aviation engine test field, which lowered use difficulty and maintenance charge relative to mechanical sensor. Conventional simulator's poor accuracy lowered the test accuracy because of transformers. So there are big engineering requirements in designing high-accuracy LVDT simulator. From LVDT simulator's working principles, the paper realized to simulate LVDT sensor based on multiplying DAC chips. Simultaneously we designed auto-calibration unit and utilized fitting template curve to on-line calibration stored in FPGA, which eliminated the impact of amplitude-frequency response and increased simulation accuracy in wide frequency range. The validity of the template curve was proved by theoretical deduction. The excelled 0.1% design accuracy in 0.36~10 kHz range was verified by test data. The simulator can simulate LVDT sensor's electrical character, which has been used successfully in some aircraft engine control system simulation test platform, achieving expected effect.

**Keywords:** LVDT simulator; calibration; amplitude-frequency response

## 0 引言

LVDT 传感器 (linear variable differential transformer), 即线性可变差动变压器, 是一种机械—电信号传感器, 具有结构简单、动态特性好、精度高、可靠性高等优点。LVDT 传感器由一个初级线圈和两个反向串联的次级线圈以及铁芯组成, 铁芯可在一定的线性范围内自由移动, 通过铁芯的移动将被测位移量转换为传感器互感的变化, 使次级线圈感应电压也产生相应变化<sup>[1]</sup>。LVDT 传感器在航空发动机控制系统等多个行业中被用作精密的位移检测部件。但在发动机的仿真测试等应用场合, 如果使用真实的 LVDT 传感器, 其运行和校准需要配备复杂的位移运动机构, 增加了使用难度和维护费用, 所以使用电路合成方法来模拟 LVDT 传感器是自动化测试与仿真技术中的一个发展方向。

LVDT 模拟器实现中一般需要进行通道间或激励与响应间的电气隔离, 变压器是不可或缺的部件, 众所周知, 变压器

存在幅频响应, 其变换信号幅值会随频率而改变, 导致传统 LVDT 模拟器只能在某一固定频率点上保证设计精度, 为克服上述问题, 本文基于乘法型 DAC 并结合一种幅频自校准方法, 实现了 0.36 kHz~10 kHz 宽频率范围内 LVDT 模拟器 0.1% 的输出仿真精度。

## 1 系统构成及工作原理

LVDT 工作时, 外部对传感器提供激励信号  $p = A * \sin(\omega t)$ , 则响应信号为  $s_1 = k * A * \frac{x}{x_0} * \sin(\omega t)$ , 和  $s_2 = k * A * \frac{(x_0 - x)}{x_0} * \sin(\omega t)$ , 其中  $x$  表示位置信号, 取值  $0 \sim x_0$ ,  $k$  是 LVDT 的变压比。根据 LVDT 传感器激励与响应公式, 采用乘法器即可实现模拟 LVDT 传感器的功能, 乘法器的一项为欲设定的位置信息, 另一项为激励信号, 输出相当于位置信息与激励信号的乘积。另外使用中对于 LVDT 模拟器仿真精度具有 0.1% 的要求, 所以必须配置自校准电路以消除电路误差, 同时为了保证仿真信号质量, 输入和输出以及各个通道之间必须进行电气隔离方式。模拟器系统构成原理如图 1。

收稿日期: 2016-01-18; 修回日期: 2016-02-24。

作者简介: 何宴辉(1978-), 男, 河北冀州人, 高级工程师, 主要从事导弹上电子设备及相关测试技术方向的研究。

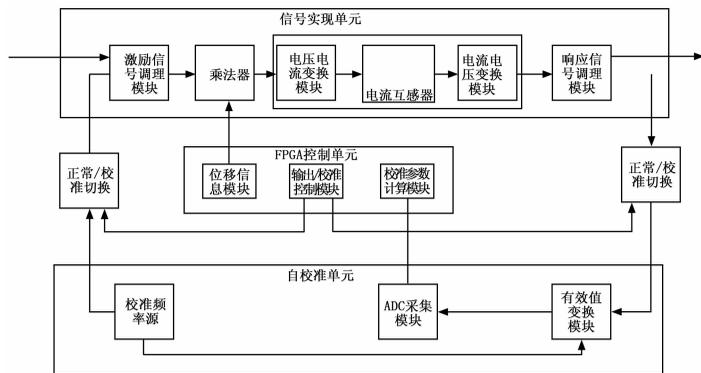


图 1 模拟器系统原理图

模拟器主要由 LVDT 信号实现单元, 自校准单元以及 FPGA 控制单元组成, 其中 LVDT 信号实现单元是 LVDT 功能模拟通道, 用于根据激励输出响应信号, 包含激励信号调理模块、乘法器模块、响应信号调理模块等。自校准单元包括校准频率源、模拟/校准的切换控制电路和信号采集模块, 用于实现 LVDT 模拟器各通道的自动在线校准, 保证仿真精度。FPGA 控制单元主要完成 LVDT 位置信号到乘法器输入的变换, 校准算法实现以及和上位机通信等功能, 如在 FPGA 中可以利用 USB IP 核实现 USB 接口的 LVDT 模拟器等。

外部提供的激励信号经过激励信号调理模块转换为单端信号后, 进入乘法器模块, FPGA 控制单元根据需要的模拟位置信息, 将位置数据转换为乘法器的一项输入, 与激励信号相乘产生需要的 A 相、B 相电压信号, 同时为了实现 LVDT 信号通道间以及激励与响应的隔离引入电流互感器进行隔离, 变压器输出的弱信号经过输出信号调理电路成为模拟器的输出。为保证模拟器精度, 模拟器在出厂时必须进行校准, 必要时用户也可以自行进行校准, 上位计算机通过 FPGA 单元控制继电器将模拟器切换至校准状态, 校准时模拟器自动产生一个标准频率信号, 该信号同时输入校准单元的有效值变换模块和待校准通道信号实现单元内的激励模块, 如图 1。将乘法器模块设置到 1 倍放大输出状态, 经响应信号调理模块和有效值转换模块变换后, 交流信号变为直流信号。FPGA 单元将上述两个不同途径获得的直流信号进行比较, 可得到此通道的误差校准参数, 然后将该参数在 FPGA 的配置芯片内进行存储, 正常使用时 FPGA 控制单元自动按照这个参数对设定的位移参数进行校准。

## 2 信号实现单元设计

信号实现单元是 LVDT 模拟功能的实现部分, 通过上位机向模拟器注入期望的位置信息, 经过解算后, 模拟器根据位置信息和输入的激励信号输出期望的响应值。

激励信号调理模块和响应信号调理模块均为放大器调理电路, 其中激励调理模块将模拟器外部提供的差分激励信号转换为单端信号, 同时进行阻抗变换, 以增强模拟器对外部输入信号的适应性。响应信号调理模块通过单端到差分的转换提高输出信号的共模抑制比并实现输出信号阻抗变换, 并通过在输出端设计防浪涌二极管等保护措施, 增强 LVDT 模拟器的可靠性<sup>[2]</sup>。

乘法器模块是实现 LVDT 模拟器的核心电路, 乘法器在工程中有两种实现方式, 第一种是采用专门的模拟乘法器芯片

实现, 如 AD734 等, 根据模拟乘法器的输出公式, 该类器件比较适合于两项模拟量相乘的情况, 而 LVDT 模拟器中预设的位置信息一般为数字量, 所以还要经过一级模数转换才能实现功能, 会导致 LVDT 模拟器成本提高、精度下降。另一种是采用乘法型 DAC, 该类器件的激励与响应关系为  $V_{out} = \frac{D}{2^n} V_{REF}$ , 其中  $D$  为 DAC 的数字量输入,  $V_{REF}$  为 DAC 的基准输入。由上可知, 乘法型 DAC 能够完成外加基准电压和数字设置增益之积形式的输出, 即它可以将高分辨率数字增益施加到可变频率的模拟信号上, 比较适合用来模拟 LVDT 传感器。本设计中采用乘法型 DAC 芯片 DAC5545 来实现乘法器功能, 该芯片的乘法运算带宽为 10 MHz, 转换精度为 16 bit, 可满足使用要求, 应用时将模拟器的输入激励信号作为乘法型 DAC 的  $V_{REF}$ , 预设的位置信息作为 DAC 的数字输入  $D$ 。

LVDT 传感器作为变压器的一种, 它的初级激励信号和次级响应信号是完全隔离的, LVDT 模拟器工作的测试环境中, 为增加系统抗干扰能力和模拟真实环境, LVDT 模拟器的信号线与电源地线及各个通道间一般都是电气隔离的, 为此在模拟器实现过程中需要采用变压器实现激励与响应、各通道间的电气隔离。一般的变压器非线性较差, 为了达到较好的设计精度, 本文采用毫安级的精密电流互感器实现电气隔离, 变压器隔离电路如图 2 所示。

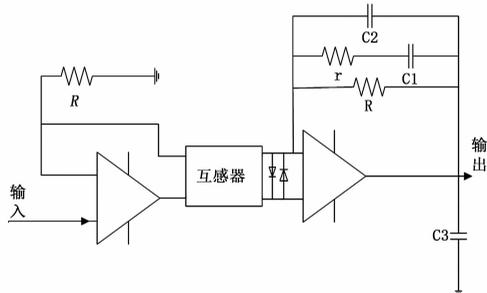


图 2 变压器隔离电路

电流互感器系数为 1:1, 额定输入电流和额定输出电流均为 2 mA, 乘法器的输出信号为电压信号, 利用压流转换电路实现电压到电流的变换, 其变换公式为  $i = V_i / R'$ , 电流信号由变压器的初级线圈等比例传输到次级线圈, 因 LVDT 模拟器的输出要求为电压信号, 所以在互感器后级需要设计流压转换电路实现电流到电压信号的变换, 其输出公式为  $V_o = -i \cdot R$ ,  $i$  为互感器中的电流。在应用中结合模拟器输出需要实现最高 2 倍变压比的需求, 将  $R$  选取为  $R = 2R'$ , 可知  $V_o = 2V_i$ , 在工程中  $R$  的值可按照  $V_o / 0.002$  进行选取, 电容  $C1$  及可调电阻  $r$  用来补偿相位, 建议  $C1$  取约为  $65/R$  ( $\mu F$ ),  $r$  选取为 200 K $\Omega$ 。电容  $C2$  和  $C3$  取 400 至 1 000 pF, 用来去耦和滤波, 两个反接的二极管可保护运算放大器, 使用性能较好的运算放大器, 更容易达到较高的精度和较好的稳定性。

## 3 自校准单元设计

工程应用中, LVDT 模拟器的精度对使用至关重要, 应用中需要根据情况进行校准以满足使用要求。校准分为自动校准和外部校准两种, 显然自动校准具有更广泛的应用性, 如发动机测试系统应用中就需要 LVDT 模拟器在不连接外部激励时实现自校准。根据图 1 可知, LVDT 模拟器的主要误差来源包

括：激励和响应信号调理模块的线性误差、乘法器的转换误差、变压器模块的线性放大误差及频率响应非线性误差、校准电路中有有效值转换模块和 ADC 采集模块的固定误差。

为消除上述误差的影响，设计如图 1 的校准电路以保证各通道的仿真精度。在模拟器上设计一个校准激励源，该校准源可以产生一个标准的 3 kHz 的正弦波信号，当 LVDT 模拟器处于校准状态下，继电器开关由正常模式切换至校准模式，LVDT 模拟器的输入接入自动校准电路中，由板载的校准源来驱动待校准的 LVDT 通道，同时该校准源的信号也经过有效值转换模块和 ADC 采集模块被转换为固定的数字量。板载校准源信号经过待校准的 LVDT 通道实现信号转换后输出到自动校准电路中，同时设置校准通道的放大倍数为 1，响应信号经过同样的有效值转换模块和 ADC 模块转换为数字量，如实现校准只要将两个数字量做比值即可完成。

根据原理框图及校准原理，输入与输出的关系如下：

$$Out = K_1 \cdot K_2 \cdot K(f) \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot In \quad (1)$$

校准时  $In$  为模拟器的校准源激励， $Out$  为校准源经过待校准的 LVDT 通道后的响应。 $K_1$  为乘法型 DAC 的变换参数，它的值是模拟器位置信息的反映，通过调节  $K_1$ ，模拟器可以模拟不同位置，它的值受 DAC 的输入数字量控制，在校准时该参数为固定值，即  $1/2$ 。 $K_2$  为乘法型 DAC 的转换误差，对于每一个固定的 DAC， $K_2$  的值是固定的，该参数由 DAC 器件保证，由于设计中使用了高精度 DAC，该误差可忽略不计。 $K(f)$  为精密电流互感器的放大倍数，设计中采用的是 1:1 的电流互感器，其标称值为 1，工程实际中  $K(f)$  为频率的函数，其放大倍数会跟随频率变化。 $K_3$  为变压器两端电压—电流变换和电流—电压变换系数，其标称值为 2，其值由图 2 中匹配电阻  $R$  和  $R'$  决定，根据电阻特性，可知该误差为线性误差。 $K_4$  为校准模块中有有效值转换模块和 ADC 采集模块的固定误差系数，由校准原理和公式 (1) 知，激励和响应信号都经过了有效值转换模块和 ADC 采集模块，即采集到的校准源信号中也包含该误差，所以该部分引入的固定误差会在校准中会自动抵消。由上述可知：

$$D_{out} \approx \frac{1}{2} K(f) \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \frac{D_m}{K_4} = K(f) \cdot K \cdot D_m \quad (2)$$

其中， $D_{out}$ 、 $D_m$  为激励和响应所对应的数字量。

如不考虑变压器的频率响应，即将  $K(f)$  作为常数，按照公式 (2)，在进行通道校准时，将  $D_{out}$  与  $D_m$  做比值即可得到该通道的校准参数。但实际上绝大部分变压器  $K(f)$  与频率是相关的，它是频率的函数，如图 3。

可见如不考虑变压器的频率响应，当 LVDT 模拟器工作在 6 kHz 频率下，如采用在 3 kHz 得到的校准参数将会引入较大的误差，模拟器的精度会受到影响，若考虑变压器的频率响应，则必须在多个频率点下进行校准拟合，实现起来较为困难，因此必须对校准方法加以改进，以保证一定频率范围内模拟器的仿真精度。

首先根据工程实际，假设变压器的一致性较强，即所有通道变压器的频率响应基本一致，工程实际中也的确如此。任意选取一路通道，如 Ch1\_A。根据式 (2)，得到

$$D_{out} = K(f) \cdot K_A \cdot D_m \quad (3)$$

对 Ch1\_A 通道，首先将继电器开关切换至外部输入模式，从模拟器外部施加不同频率的正弦信号，对该激励信号的

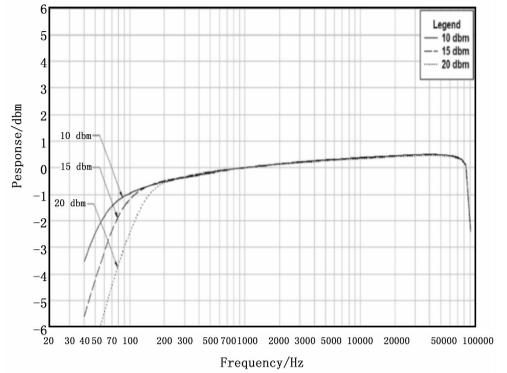


图 3 变压器频响曲线

处理方式同板载频率源，根据测量数据可拟合成包含频率响应的二次曲线：

$$K(f) \cdot K_A = af^2 + bf + c \quad (4)$$

当外部激励信号的频率  $f = 3$  kHz 时，输出与输入的比值为  $K(3k)$ 、 $K_A$ ，根据式 (4)：

$$\begin{aligned} \frac{K(f) \cdot K_A}{K(3k) \cdot K_A} &= (af^2 + bf + c) \cdot \frac{1}{K(3k) \cdot K_A} \\ \Rightarrow \frac{K(f)}{K(3k)} &= af^2 + bf + c = K'(f) \end{aligned} \quad (5)$$

其中： $af^2 + bf + c$  为由式 (4) 得到的不同频率下 Ch1\_A 通道的拟合曲线， $K(3k)$ 、 $K_A$  为 Ch1\_A 通道在 3 KHz 频率下的校准系数，在板载的 FPGA 模块中存储  $K'(f)$  曲线，这条曲线将作为校准其他通道的模板曲线。

完成上述工作后，我们选取 Ch1\_B 通道进行校准。假设两个通道的变压器为同一批次，频响曲线是基本一致的，均为  $K(f)$ ，由式 (3) 和式 (5) 知：

$$\begin{aligned} D_{out} &= K(f) \cdot K_B \cdot D_m = \frac{K(f)}{k(3k)} \cdot k(3k) \cdot K_B \cdot D_m \\ &= K'(f) \cdot K(3k) \cdot K_B \cdot D_m \end{aligned} \quad (6)$$

其中： $K'(f)$  为已知的模板曲线， $K(3k)$ 、 $K_B$  为 Ch1\_B 通道在 3 kHz 下变换系数，是可以自动测量得到的值，从而实现 Ch1\_B 通道的校准。依次类推，可以得到其他通道的校准公式。

可见采用此校准方法，只需要在模拟器出厂前，由厂家施加一次不同频率的激励信号，得到一个模板拟合曲线，用户便可以根据模板曲线实现 LVDT 模拟器在不同频率下的自动校准。

#### 4 LVDT 模拟器性能测试

完成 LVDT 模拟器的电路设计后，对模拟器进行了电路测试，以验证模拟器性能。根据设计原理，模拟器的位置信息是通过乘法型 DAC 的数字量参数反映的，在设计中通过上位机软件将欲模拟的位置信息写入模拟器 FPGA 内的 FIFO 存储区，然后由 FPGA 控制单元将该数据周期性连续控制乘法型 DAC 输出的信号幅度，即将 0~1 位置信息转换为 0~0xFFFF 间 16 bit 数字量。进行测试前，先对模拟器进行自校准，分为两种情况，一种是只对幅值进行校准，不考虑变压器的幅频响应，另外一种是按照文中所述方法考虑变压器的幅频响应进行幅频校准。使用信号发生器向模拟器输入正弦波信号，信号幅值、频率可调。通过上位机控制模拟 0, 0.5, 1 等位置信息，测量模拟器的 A 路输出，测试结果如表 1。

表 1 LVDT 模拟器测试表激励信号

激励信号(V)	位置信息	幅值校准		幅频校准	
		输出/V (有效值)	精度 (FS)	输出/V (有效值)	精度 (FS)
6.36 (360 Hz)	0	0.032	0.6%	0.005	0.08%
	0.5	3.152	0.4%	3.174	0.07%
	1	6.325	0.6%	6.351	0.08%
6.36 (3 KHz)	0	0.007	0.11%	0.005	0.08%
	0.5	3.172	0.12%	3.176	0.07%
	1	6.350	0.16%	6.356	0.07%
6.36 (8 KHz)	0	0.025	0.4%	0.006	0.09%
	0.5	3.213	0.5%	3.187	0.08%
	1	6.384	0.3%	6.368	0.06%

可知, 在 3 kHz 下, 两种校准方法都可以达到所需的精度要求, 当模拟器的频率发生变化时, 必须使用幅频自校准方法才可以实现 0.1% 的精度要求。

### 5 结论

本文提出的 LVDT 模拟器自校准方法, 克服了原有模拟

(上接第 267 页)

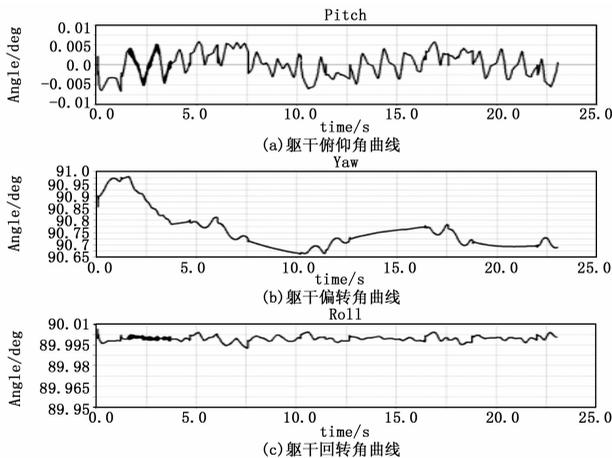


图 17 躯干的姿态角曲线

械腿的工作空间选择最大步长。然而, 该方法还存在局限性, 即最大步长的精度取决于矩阵的维数。另外, 迈腿顺序为标准顺序, 即前右脚, 左左脚, 左前脚, 右后脚。后续工作可针对维数的选择及迈腿顺序对步态规划的影响展开深入的研究。

### 参考文献:

[1] Yibin L, Bin L, Jiuhong R, et al. Research of mammal bionic quadruped robots: a review [A]. IEEE 5th international conference on robotics, Automation and Mechatronics (RAM 2011), September 17-19, 2011 [C]. Qingdao, China. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2011; 166-171.

[2] Marc Raibert, Kevin Blanespoor. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot [A]. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) [C]. 2008, 17 (1): PART 1.

[3] Dimitris Pongas, Michael Mistry, Stefan Schaal. A robust quadruped walking gait for traversing rough terrain [A]. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Roma, Italy, April 2007, 10-14.

[4] 鄂明成, 刘 虎, 张秀丽, 等. 一种粗糙地形下四足仿生机器人

器中变压器幅频响应的影响, 实现了 0.36~10 kHz 频率范围 0.1% 的模拟精度, 该模拟器还具有控制方便, 接口灵活等特点, 该模拟器产品已经成功应用在某型号国产航空发动机的控制系统测试仿真试验台中, 运行良好, 表明其具有较强的应用价值, 期望能对国产航空发动机进行全面有效的测试验证。

### 参考文献:

[1] 李 稷, 李 玲 LVDT 传感器仿真电路的设计与研究 [J]. 仪表技术, 2011, 9: 67-70.

[2] 刘 涛, 张大鹏 一种用于发动机仿真平台的线性可变差动变压器模拟器的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (3): 956-958.

[3] 罗旗舞, 黎福海 基于 FPGA 双通道高速数据采集系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (11): 2656-2658.

[4] Six (6) LVDT/RVDT Stimulus Channels [R]. North Atlantic, 2009.

[5] 吴朝华, 黄月芳, 赵砚博 基于 PXI 总线的高精度 LVDT/RVDT 标准信号源的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (8): 2317-2320.

[6] 的柔顺步态 [J]. 机器人, 2014, 36 (5): 584-591.

[5] Raibert M. Legged robots that balance [M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1997: 58-80.

[6] Pratt J, Chew C M, Torres A, et al. Virtual model control: an intuitive approach for bipedal locomotion [J]. International Journal of Robotics Research, 2001, 20 (2): 129-143.

[7] Tran D T, Koo IM, Moon H, Et AL. Motion control of a quadruped robot in unknown rough terrains using 3dspring damper leg model [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, USA; IEEE, 2012: 4931-4936.

[8] Havoutis I, Semini C, Buchli J, et al. Quadrupedal trotting with active compliance [A]. IEEE International Conference on Mechatronics [C]. Piscataway, USA; IEEE, 2013: 610-616.

[9] Kan Yoneda, S Hirose. Dynamic and static fusion gait of a quadruped walking vehicle on a winding path [A]. Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Nice, France, May, 1992.

[10] S Hirose, Yasushi Fukuda, Kan Yoneda. Quadruped walking robots at tokyo institute of technology design, analysis and gait control methods [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2009, 16 (2): 104-114.

[11] Mostafa Ajalloeian \*, Sebastien Gay. Modular Control of Limit Cycle Locomotion over Unperceived Rough Terrain [A]. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) [C]. Tokyo, Japan. November, 2013, 3-7.

[12] Shaoping Bai K H. Low. A new free gait generation for quadrupeds based on primary/secondary gait [A]. International Conference on Robotics & Automation [C]. Detroit. Michigan. 1999. pp. 1371-1376.

[13] 王恒升. 四足机器人躯干重心稳定的变步长行走研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 31 (12): 339-345.

[14] 刘冠初, 熊静琪, 乔 林. 四足机器人自由步态规划建模与算法实现 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49 (6).

[15] 王新杰, 李培根, 陈学东, 等. 四足步行机器人动力学模型及脚力分配的研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2005, 32 (12): 12-15.