

# 发电机传动轴承的异常振动谱特征提取算法

陈运胜

(广州华立科技职业学院 广州 511325)

**摘要:**对发电机传动轴承的异常振动特征的准确提取是实现机械运行状态检测和发电机动轴疲劳损伤预测的基础。当前对发电机传动轴承的异常振动的特征提取采用功率谱密度特征提取方法,由于功率谱密度特征具有非高斯性,对交变温度下发电机传动轴承异常振动的跟随性不好。提出一种基于 Hilbert 变换的发电机传动轴承的异常振动谱特征提取算法。建立一个多参量的发电机传动轴承动力学模型,进行轴承的振动分析模型构建,采用经验模态分解和 Hilbert 谱提取方法把发电机异常振动进行多分量分解,提取发电机传动轴承的异常振动的 Hilbert 谱特征,计算接触轴承所产生的轴承力的响应幅值和时间滞后值,实现对振动特征的横向、扭转的定位和检测。以此为基础优化传动系统的结构和动力学参数,进行齿轮的啮合异常修正。仿真结果表明,该方法稳定可靠、性能优越,提高了发电机传动轴承的状态监测和损伤预测能力。

**关键词:**发电机;传动轴承;特征提取;损伤预测

**中图分类号:** TH134 TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.30

## Abnormal vibration spectrum feature extraction algorithm for generator drive bearing

Chen Yunsheng

(Guangzhou Huali Science and Technology Vocational College, Guangzhou 511325, China)

**Abstract:** The accurate extraction of the abnormal vibration characteristics of generator drive bearing is the basis of realizing the mechanical running state detection and prediction of the fatigue damage of motor bearing. At present, the feature extraction method of the abnormal vibration of generator drive bearing is obtained by using the method of power spectrum density feature extraction. Because of the characteristic of power spectral density, the following performance is not good for the abnormal vibration of generator bearing transmission bearing under the alternating temperature. An abnormal vibration spectrum feature extraction algorithm based on Hilbert transform for generator bearing is proposed. The dynamic model of a multi parameter generator is established, and the vibration analysis model of bearing is built. The abnormal vibration of generator is decomposed by empirical mode decomposition and Hilbert spectrum. The Hilbert spectrum of the abnormal vibration of generator is extracted. Based on the structure and dynamic parameters of the drive system, the gear mesh modification is carried out. Simulation results show that the method is stable, reliable, and performance is superior, and the state monitoring and damage prediction ability of generator is improved.

**Keywords:** generator; transmission bearing; feature extraction; damage prediction

### 1 引言

发电机的零部件组成较多,结构件布局复杂,各部件配合协作是有效保障发电机稳定可靠运行的基础。发电机是将其他形式的能源转换成电能的机械设备,常见的发电机主要有水轮机、汽轮机、柴油机等。各种形式的发电机都是通过传动轴承将机械能传给发电机,通过适当的导磁和导电材料构建传动轴承的磁路和电路,在活塞上行的

挤压下,推动活塞下行进行做功,实现能量转换,发电机在工农业生产、国防、科技和生活等领域具有重要的基础意义。在发电机运行过程中,传动轴承由于不同摩擦齿轮啮合刚度作用导致异常振动,齿轮几何偏心的静态传递误差导致对转子-轴承传动系统出疲劳损伤,对发电机传动轴承的异常振动特征的准确提取,可以实现对发电机传动轴承的状态监测和疲劳损伤预测<sup>[1]</sup>。

传动轴承是发电机传动系的核心部件,将水流、气流,

燃料燃烧通过齿轮箱传动转换为机械能,传动轴承在振动过程中具有丰富的非线性动力学特征。发电机传动轴承的异常振动分为弯曲振动、扭转振动和轴向振动,通过对发电机传动轴承的非线性动力学分析和异常特征提取,实现对发电机机械状态测试和检测<sup>[2-3]</sup>。当前方法中,对发电机传动轴承的异常振动的特征提取采用功率谱密度特征提取方法,由于功率谱密度特征具有非高斯性,对交变温度下发电机传动轴承异常振动的跟随性能不好<sup>[4-6]</sup>。对此,本文提出一种基于 Hilbert 变换的发电机传动轴承的异常振动谱特征提取算法。首先建立一个多参量的发电机传动轴承动力学模型,在此基础上进行轴承的振动分析模型构建,采用经验模态分解和 Hilbert 谱提取方法把发电机异常振动进行多分量分解,提取发电机传动轴承的异常振动的 Hilbert 谱特征,以此为基础优化传动系统的结构和动力学参数,进行齿轮的啮合异常修正,提高发电机传动轴承的状态监测能力。

## 2 发电机传动轴承系统模型

### 2.1 多参量的发电机传动轴承动力学模型

为了实现对发电机传动轴承的异常振动谱特征提取,实现发电机的状态有效监测,需要首先进行发电机传动轴承系统的动力学模型构建,考虑发电机传动轴承的输入/输出参量模型,进行电机传动轴承的耦合动力学分析,本文研究的发电机结构如图 1 所示。



图 1 发电机结构

建立发电机的齿轮-转子-轴承传动系统,建立固定坐标系  $Ox_3y_3z_3$ 、发电机传动轴承的体坐标系  $Ox_1y_1z_1$ 、旋转中心坐标系  $Ox_2y_2z_2$ ,在发电机传动轴承动力学模型构建中,轴承的固定坐标系  $Ox_3y_3z_3$  下的轴承处的当量质心为坐标系原点  $O$ 。选取传动速度矢量  $V$  为  $Ox_3$  轴,动齿轮的偏心量  $Oy_3$  轴与  $Ox_3$  轴垂直,且位于径向纵向对称面内,波动幅值的方向向上为正; $Oz_3$  轴垂直于  $Ox_3y_3$  平面,其方向按右手定则确定<sup>[7]</sup>。在发电机传动轴承的体坐标系  $Ox_1y_1z_1$  内,齿轮间的啮合力通过从动轮固连。滚动轴承的质心为坐标原点  $O$ ,  $Ox_1$  指向头部,与中心连线和垂直方向纵轴重合; $Oy_1$  向上为正,在接触球轴承纵向对称平面内,  $Oz_1$  按右手定则确定,  $Oy_2$  轴在一个铅垂平面内,且这个平面包含速度矢量。

以给出的电机轴承传动系统的结构模型为基础,在上述坐标系下,进行轴承振动的动力学分析,发电机传动质心坐标系  $Axyz$ ,主、从动齿轮的绕体坐标系各轴的转动惯量为  $J_z$ ,啮合传动方程组为:

$$m \frac{dV}{dt} = P \cos \alpha - X - mg \sin \theta \quad (1)$$

$$mV \frac{d\theta}{dt} = P \sin \alpha + Y - mg \cos \theta \quad (2)$$

$$J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x)\omega_y\omega_x + J_{xy}(\omega_y^2 - \omega_x^2) = M_z \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \cos \theta \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为保持架的角速度,传动轴承质心的速度矢量 ( $Ox_3$  轴)在纵向对称面  $Ox_1y_1$  上的投影与轴承内外圈  $Ox_1$  轴之间的夹角,若  $Ox_1$  轴位于轴承内外圈半径上方时  $\alpha$  为正,反之则为负;  $x, y$  为质心位置;  $\omega_x, \omega_y$  为滚动轴承的内圈在绕体坐标系  $Ox_1, Oy_1$  轴的角速度;  $\delta_z$  为转动角度偏角;  $e_1$  为控制系统误差;  $\theta$  为从动齿轮水平倾角,速度矢量 ( $Ox_2$  轴)与轴承座的夹角;  $\vartheta$  为转动角度,轴承滚动在纵轴 ( $Ox_1$  轴)与水平面 ( $Ox_1y_1$  平面)间的夹角;通过上述分析,构建多参量的发电机传动轴承动力学模型,以此为基础进行异常振动分析和特征提取。

### 2.2 发电机传动轴承的振动分析模型构建

在上述构建的发电机传动轴承动力学模型基础上,进行发电机传动轴承的振动分析模型构建,构建发电机传动轴承能量模糊规则方程为:

$$H_{rc} = \frac{M}{16\pi\mu_0 h^3} (1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta) \quad (5)$$

利用模糊约束能量分析方法建立主、从动齿轮水平垂直和轴向的振动幅度分析数学模型,在模糊集控制范围内,沿接触角方向取  $\sin \theta_p = \theta_p$ ,  $\cos \theta_p = 1$ ,设定离心力和陀螺力矩的约束控制条件:

$$c_a \sin \gamma_i = c_\gamma \sin \alpha \quad (6)$$

$$c_a \sin \gamma_i = c_\gamma \sin \alpha \quad (7)$$

计算接触轴承所产生的轴承力的响应幅值和时间滞后值,从而有效补偿测量误差,实现对振动特征的横向、扭转的定位和检测。本文对发电机传动轴承的系统作如下说明:假设  $f_x(X, t), f_\theta(X, t)$  分别是横向、扭转振动特征的有界函数,令异常振动作用下的李雅普洛夫函数为:

$$V_3 = V_2 + \frac{\lambda_1 \zeta_1^2}{2} + \frac{\lambda_2 \zeta_2^2}{2} + \frac{\delta^2}{2\epsilon_1 \delta} \quad (8)$$

对主动轴斜齿轮的振动力求导有:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + \lambda_1 \zeta_1 e_1 + \lambda_2 \zeta_2 e_2 - \frac{\delta \dot{\delta}}{\epsilon_1 \delta} \quad (9)$$

其中,自适应律为:

$$\dot{\delta} = \epsilon_1 \alpha V^2 e_2 \quad (10)$$

构建发电机传动轴承的振动分析模型,分析发电机传动轴承初始内、外圈沟道曲率,进行异常振动特征提取。

### 3 异常振动谱特征提取实现

在上述进行系统结构分析和振动力学模型构建的基础上,进行发电机传动轴承的异常振动谱特征提取。对发电机传动轴承的异常振动特征的准确提取是实现机械运行状态检测和发电机传动轴承疲劳损伤预测的基础。当前对发电机传动轴承的异常振动的特征提取采用功率谱密度特征提取方法,由于功率谱密度特征具有非高斯性,对交变温度下发电机传动轴承异常振动的跟随性能不好<sup>[8]</sup>。为了克服传统方法的弊端,本文提出一种基于 Hilbert 变换的发电机传动轴承的异常振动谱特征提取算法。首先进行振动信号采集,分析发电机传动轴承的异常振动信号采集和生成模型设计。假设  $T$  表示振动源,  $S_1, S_2, S_3, S_4$  分别表示 4 个振动信号传感器,信号采集结构如图 2 所示。

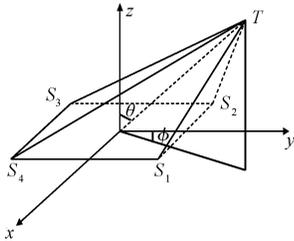


图 2 发电机传动轴承的异常振动信号传感器布置

基于平面正方形阵定位原理<sup>[9]</sup>,得到  $n$  维随机变量  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 发电机传动轴承振动信号联合特征函数为:

$$\Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = E\{\exp[j(\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n)]\} \quad (11)$$

假设检测目标为点振动源,振动点  $T$  产生的振动源以球面波形式传播,得到发电机传动轴承的异常振动信号的幅度和频率分别表示为:

$$m_k = E[x^k] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k f(x) dx \quad (12)$$

$$\mu_k = E[(x - \eta)^k] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \eta)^k f(x) dx \quad (13)$$

采用经验模态分解和 Hilbert 谱提取方法把发电机异常振动进行多分量分解<sup>[10]</sup>,得到发电机传动轴承的异常振动信号模型为:

$$x(n) = s(n) + v(n) = \sum_{i=1}^l A_i \cos(\omega_i n + \varphi_i) + \sum_{j=0}^{\infty} h(j) w(n-j) \quad (14)$$

对每个 IMF 用 Hilbert-Huang 变换进行谱特征提取,得到谱特征提取的系统模型为:

$$s(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_m(k)]^T \quad (15)$$

本文提出采用双线性变换法分析频谱特征,  $s$  域和  $z$  域上的双线性关系描述为:

$$s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}, z = \frac{1 + \frac{T}{2}s}{1 - \frac{T}{2}s} \quad (16)$$

假设  $d_{ij}$  表示振动传感器  $S_i$  与  $S_j$  间的传动行程差,  $\tau_{ij}$  表示各个振动传感器的之间的时延,  $C$  为发电机传动轴承的异常振动声波传播速度,其中:  $1 \leq i, j \leq 4$ , 发电机异常振动信号的能量密度谱<sup>[11-13]</sup>, 得到传动行程差与时延之间的关系可以表示为:

$$\begin{cases} d_{21} = TS_2 - TS_1 = \tau_{21}C \\ d_{31} = TS_3 - TS_1 = \tau_{31}C \\ d_{41} = TS_4 - TS_1 = \tau_{41}C \end{cases} \quad (17)$$

假设测向误差与方位角  $\varphi$ 、俯仰角  $\theta$ 、振动传感器间距  $D$ , 主动轴右轴承和从动轴左轴的异常振动谱特征提取结果通过对上述求偏微分方程得到,发电机的传动轴承在异常振动下的 Hilbert 谱吸收系数为:

$$\alpha_\eta = \omega \sqrt{\frac{\rho_0}{K_s}} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \omega^2 H^2} - 1}{2(1 + \omega^2 H^2)}} \quad (18)$$

式中:  $K_s$  为内圈沟道曲率中心轨迹绝热体积弹性系数;  $\omega$  为频率;  $\eta$  为发电机的传动轴承的热黏度。各个振动传感器的坐标可表示为  $S_1(D/2, D/2, 0)$ ,  $S_2(-D/2, D/2, 0)$ ,  $S_3(-D/2, -D/2, 0)$ ,  $S_4(D/2, -D/2, 0)$ , 通过构建在各个振动传感器上的幅频变换,对发电机传动轴承的异常振动信号的采集数据进行重构,其估计函数分别为  $\hat{f}_x(X, t)$ ,  $\hat{f}_\theta(X, t)$  且有如下关系:

$$f_x(X, t) = \hat{f}_x(X, t) + \Delta f_x(X, t) \quad (19)$$

$$f_\theta(X, t) = \hat{f}_\theta(X, t) + \Delta f_\theta(X, t) \quad (20)$$

啮合力作用下传动轴承的磨损元素同时满足:

$$|\Delta f_x(X, t)| \leq F_x(X, t) \quad |\Delta f_\theta(X, t)| \leq F_\theta(X, t) \quad (21)$$

考虑不平衡力,通过输入端和主动轴左轴承约束控制,得到跟踪误差:

$$e_1 = \vartheta - \vartheta_r \quad (22)$$

可见,通过上述算法改进设计,实现了对发电机主动轴异常振动的谱特征提取,输入端和主动轴左轴承约束控制跟踪误差收敛到零。

### 4 仿真实验与性能分析

为了测试本文算法在实现发电机传统轴承异常振动谱特征提取,提高机械状态监测准确性方面的性能,进行仿真实验,实验建立在某大型发电机平台上,使用本实验室研制的 TED2014 发电机传动轴承振动信号采集系统进行机械振动数据的原始信息采集,在发电机 5 种工况模式下测试传动轴承的振动性能,信号采样频率为 60 kHz,参数设定  $V = 8, W = 2$ ,给单个轴承异常振动信号的子载波数为 32 和 256,延时 5 个采样点,信噪比为 -10 dB,选取权值个数  $M = 20$ ,步长  $\mu = 0.005$ ,根据上述仿真环境和参数设定,得到原始的发电机传动轴承的振动信号采集结果如图 3 所示。

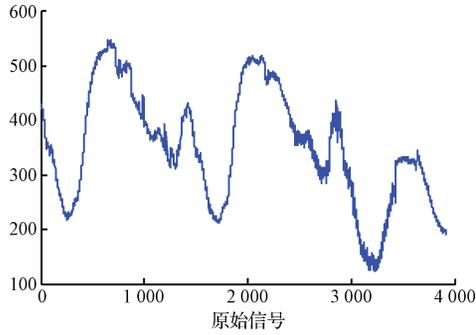


图3 传动轴承振动信号采集结果

图3中,主动齿轮的外部激振频率成分  $f_t(\omega/(2\pi)) = 159$  Hz,组合频率成分  $f_2 - f_1$  (25 Hz),相对应轴承的转频  $f_2, f_1$  振动响应为两转频幅值差,以此为基础,采用经验模态分解和 Hilbert 谱提取方法把发电机异常振动进行多分量分解,提取发电机传动轴承的异常振动的 Hilbert 谱特征,得到谱特征提取结果如图4所示。

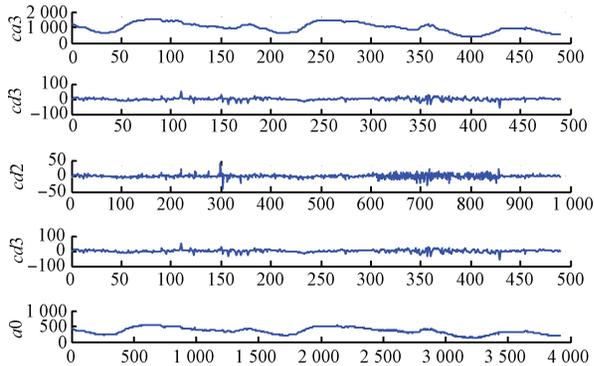


图4 发电机传动轴承的异常振动的 Hilbert 谱特征

从图4可见,采用本文方法能有效反应出发电机传动轴承的异常振动谐波成分变化特征,进行振动信号的预畸变趋化关联分析,以此为基础优化传动系统的结构和动力学参数,进行齿轮的啮合异常修正,得到修正结果如图5所示。

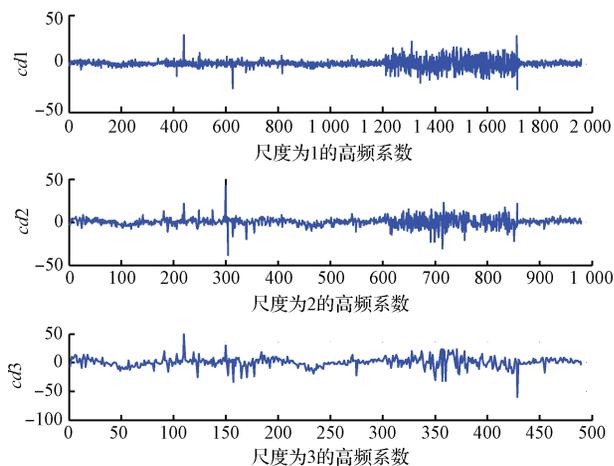


图5 发电机传动轴承啮合异常修正结果

从图5可见,采用本文方法进行发电机传动轴承啮合异常修正,通过 Hilbert 谱特征能有效避免交变温度和轴承游隙的影响。随着偏心量的增大,横向和轴向振动得到修正,提高了发电机传动轴承运行的稳定性和可靠性。

## 5 结论

对发电机传动轴承的异常振动特征的准确提取是实现机械运行状态检测和发电机动轴承疲劳损伤预测的基础。当前对发电机传动轴承的异常振动的特征提取采用功率谱密度特征提取方法,由于功率谱密度特征具有非高斯性,对交变温度下发电机传动轴承异常振动的跟随性能不好。提出一种基于 Hilbert 变换的发电机传动轴承的异常振动谱特征提取算法。首先建立一个多参量的发电机传动轴承动力学模型,在此基础上进行轴承的振动分析模型构建,采用经验模态分解和 Hilbert 谱提取方法把发电机异常振动进行多分量分解,提取发电机传动轴承的异常振动的 Hilbert 谱特征,以此为基础优化传动系统的结构和动力学参数,进行齿轮的啮合异常修正,提高发电机传动轴承的状态监测能力。

## 参考文献

- [1] 闫清东,穆洪斌,魏巍,等. 双循环圆液力缓速器叶形参数优化设计[J]. 兵工学报, 2015, 36(3): 385-390.
- [2] 李鹏,马建军,李文强,等. 一类不确定非线性系统的改进积分型滑模控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(10): 1463-1472.
- [3] STAN C, CRISTESCU C P, DIMITRIU D G. Analysis of the intermittent behavior in a low-temperature discharge plasma by recurrence plot quantification[J]. Physics of Plasmas, 2010, 17(4): 1-6.
- [4] 陈捷,陈克安,孙进才. 基于多重分形的舰船噪声特征提取[J]. 西北工业大学学报, 2000, 18(2): 241-244.
- [5] 冯松,毛军红,谢友柏. 齿面磨损对齿轮啮合刚度影响的计算与分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(15): 27-32.
- [6] 王庆,张以都. 二级圆柱斜齿轮系统耦合动态响应分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10): 87-91.
- [7] AN S L, JIN W H. Prediction of maximum unbalance responses of a gear-coupled two-shaft rotor-bearing system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3-5): 507-523.
- [8] 任朝晖,谢吉祥,周世华,等. 斜齿轮-转子-轴承弯扭轴耦合振动特性分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(15): 75-89.

(下转第38页)

## 参考文献

- [1] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [2] 郭丹瑞, 林晓焕, 单星, 等. 基于 DSP 的无刷直流电机控制系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(2): 98-101.
- [3] 刘志明, 陈黎, 李清军, 等. 基于电机电力矩波动抑制的电流反馈法[J]. 微计算机信息, 2010, 26(31): 108-109.
- [4] 陈建, 王伟国, 张振东, 等. 基于 DSP+FPGA 的直流伺服电机电流环[J]. 化工自动化及仪表, 2015, 43(2): 181-186.
- [5] 朱剑波. 无刷直流电机控制系统的仿真与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12): 25-30.
- [6] 朱俊杰, 栗梅, 陈程, 等. 无刷直流电机反电势过零检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 441-447.
- [7] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统-运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [8] 杨汉华. 永磁无刷直流电机 PI 调速器的研究[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(12): 56-58.
- [9] 刘陵顺, 高艳丽, 张树团, 等. TMS320F28335 DSP 原理及开发编程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011.
- [10] 郑静, 渠慎丰. 小功率伺服无刷直流电机驱动器设计[J]. 电子测量技术, 2006, 29(3): 130-132.
- [11] 段继岗. 伺服系统电流环数字化设计与实现[J]. 现代导航, 2013, 6(3): 225-229.
- [12] 胡松涛. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社, 2007.

## 作者简介

张立文, 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 中国科学院长春光机所研究实习员, 主要研究方向为光电测控设备伺服控制系统。

E-mail: zhangliwen1987@sina.com

(上接第 23 页)

- [9] 郜浩冬, 张以都. 含摩擦的汇流传动齿轮非线性动力学分析[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(4): 737-743.
- [10] 郭静波, 谭博, 蔡雄. 基于反相双峰指数模型的微弱瞬态极低频信号的估计与检测[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1682-1691.
- [11] 张冀, 徐科军. 自动生成转速参考曲线的电动执行器定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1222-1234.
- [12] 黄朝, 许鑫, 刘敦歌, 等. 基于多传感器的微弱磁异常信号提取方法研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10): 91-95.
- [13] 郭太平, 裘进浩, 程军, 等. 高频电磁涡流检测系统及实验研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 4-9.

## 作者简介

陈运胜, 1982 年出生, 男, 海南乐东县人, 本科, 讲师, 主要研究方向为机械工程、自动控制。

E-mail: chen\_ys1982@163.com