DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.330 中图分类号：TM341 文献标志码：A

惯性储能脉冲电源驱动系统末端速度闭环控制

张 颖[1,2,3]，王又珑[1,2,3]

(1.中国科学院电工研究所中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室，北京 100190；2.中国科学院大学，北京 100049；3.齐鲁中科电工先进电磁驱动技术研究院，济南 250013)

摘要：电磁推进装置具有精确控制电枢末端速度的需求。提出1种基于惯性储能脉冲电源系统的电枢末端速度闭环控制策略，通过检测导轨关键位置的电枢速度，并调整脉冲发电机阵列后续触发的脉冲发电机台数，控制实际的电枢末端速度。仿真表明，在期望的电枢末端速度为850 m/s时，不进行闭环调节，若脉冲发电机的励磁电流和负载的电枢质量同时产生2%的扰动，则末端速度相对误差为0.376%；使用该闭环系统后初速误差可减小到0.020%。

关键词：脉冲电源；脉冲发电机；触发策略；闭环控制

Closed-loop Control of Armature End-of-rail Velocity Based on Inertial Energy Storage Pulsed Power Drive System

ZHANG Ying[1,2,3], WANG Youlong[1,2,3]

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Electrical Engineering and Advanced Electromagnetic Drive Technology, Qilu Zhongke, Jinan 250013, China)

Abstract: The electromagnetic propulsion unit requires precise control of the armature end-of-rail velocity. A closed-loop control strategy for the armature end-of-rail velocity is proposed based on an inertial energy storage pulsed power supply system. Under this strategy, the actual armature end-of-rail velocity is controlled by detecting the armature velocity at the key position of the guiderail and adjusting the number of triggered pulsed alternators in the pulsed alternator array. Simulation results show that when the desired armature end-of-rail velocity is 850 m/s and if the field current of the pulsed alternator and the armature mass of load simultaneously change in the perturbation of 2%, the relative error of the armature end-of-rail velocity will be 0.376% without closed-loop regulation. However, the armature end-of-rail velocity error can be reduced to 0.020% after using the closed-loop control strategy.

Keywords: Pulsed power supply; pulsed alternator; trigger strategy; closed-loop control

超高速电磁推进装置中，由金属电枢在2个平行的金属导轨之间向前滑动。当电枢和导轨构成的电路中通过电流时，电枢在洛伦兹力的作用下沿导轨加速。可以通过调节导轨电流的幅值来灵活调节和精确控制初速[1-2]。基于空芯补偿脉冲发电机ACPA(air-core compensated pulsed alternator)的惯性储能脉冲电源是脉冲功率电源中比较有发展潜力的电源[3-4]，它具有储能密度和功率密度大、工作寿命长等优点。ACPA 可以为推进装置提供能量，在较短时间(ms量级)提供极高的能量(MJ量级)[5-6]。

目前，有一些可行的方法来实现开环速度控制。如 Mallick 等[7]将脉冲发电机等效成直流电源

收稿日期：2023-06-25；**修回日期：**2023-07-13；**录用日期：**2023-07-20；**网络首发日期：**2023-12-06

基金项目：中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划资助项目(YSBR-045)

This work is supported by the CAS Project for Young Scientists in Basic Research under the grant YSBR-045

模型，通过仔细选择多相脉冲发电机放电整流桥的每个晶闸管的触发角度，控制导轨电流脉冲的形状，从而控制电枢末端速度，若将电枢的运动等效为按期望末端速度进行的匀加速运动，则需要得到平顶波的导轨电流；文献[8]定性分析了脉冲发电机相电流波形的变化规律，提出了在 0° 触发第一相电流、90° 触发最后一相电流的优化方法，然而这种方法得到的电流波形与期望平顶波之间误差很大；文献[9]用遗传算法优化了两相补偿脉冲发电机 CPA(core compensated pulsed alternator)的电流波形，使其接近平顶波；Cui 等[10-11]通过分析模块个数与末端动能之间的关系，研究了基于期望电枢末端速度的模块化电源的匹配设计方法；Li 等[12]提出了 1 种新的空芯脉冲发电机控制电路拓扑结构和柔性波形调理策略，使脉冲电流和电枢末端速度的优化调节更具灵活性；文献[13]提出了多模块电源的集中式和分布式的触发放电策略，以得到理想的末端速度；Zhou 等[14]提出了 1 种电容组脉冲电源供电的分布式导轨设计方案，并仿真得到了合适的触发顺序。

然而，基于惯性储能的脉冲电源系统，关于电枢末端速度的闭环控制研究尚少。本文提出了 1 种基于惯性储能脉冲电源系统的电枢末端速度闭环控制策略，将电枢的运动等效为按期望末端速度进行的匀加速运动，并将其视为期望状态。在电枢处于不同的位置点时，分别触发脉冲发电机机组。在电枢运动过程中，通过调整最后一组脉冲发电机的触发台数，来减小末端处实际速度和预触发方案预期速度之间的误差，从而实现电枢末端速度的闭环控制。

1　惯性储能脉冲电源驱动系统模型

为了在数值计算软件中对惯性储能脉冲电源驱动系统进行研究，有必要先建立该系统的数学模型。如图 1 所示，整个系统包括基于脉冲发电机的惯性储能的脉冲电源和推进装置负载 2 部分。

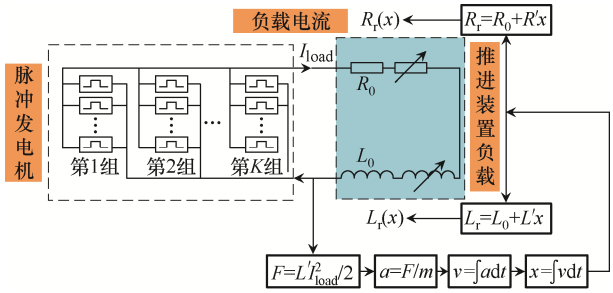


图 1　惯性储能脉冲电源驱动系统等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of inertial energy storage pulsed power drive system

八相 ACPA 样机的横截面结构如图 2 所示。图 3 为脉冲发电机对负载放电的电路原理图，励磁绕组通入种子电流，在电枢绕组上产生感应电流并通过自励整流桥流回励磁绕组，通过建立正反馈过程，励磁电流指数增长，当达到额定励磁电流时，断开

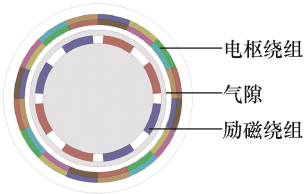
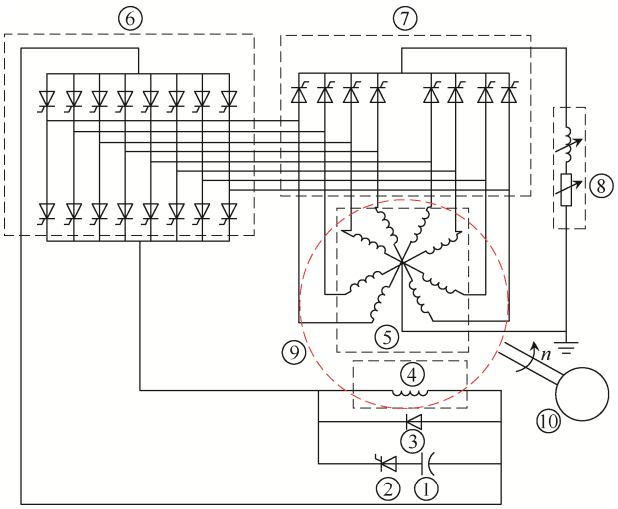


图 2　八相 ACPA 样机横截面结构示意

Fig. 2 Schematic of cross-section of eight-phase ACPA prototype



①起励电容器 ②起励开关 ③续流二级管 ④励磁绕组
⑤电枢绕组 ⑥自励整流器 ⑦放电整流器 ⑧轨道负载
⑨空心脉冲发电机 ⑩拖动电机

图 3　八相 ACPA 放电等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of eight-phase ACPA during discharge process

自励整流桥，电枢绕组上的电流通过放电整流桥依次对负载放电。

1.1 脉冲发电机模型

假设空载气隙磁场沿圆周呈正弦分布，电枢绕组均匀分布，短路放电采用半波整流，则脉冲发电机的磁链方程可以表示为

$$\boldsymbol{\psi} = \boldsymbol{LI} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\psi} = [\psi_{\mathrm{a}} \quad \psi_{\mathrm{b}} \quad \psi_{\mathrm{c}} \quad \psi_{\mathrm{d}} \quad \psi_{\mathrm{e}} \quad \psi_{\mathrm{f}} \quad \psi_{\mathrm{g}} \quad \psi_{\mathrm{h}} \quad \psi_{\mathrm{ex}}]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{I} = [-i_{\mathrm{a}} \quad -i_{\mathrm{b}} \quad -i_{\mathrm{c}} \quad -i_{\mathrm{d}} \quad -i_{\mathrm{e}} \quad -i_{\mathrm{f}} \quad -i_{\mathrm{g}} \quad -i_{\mathrm{h}} \quad i_{\mathrm{ex}}]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} L_{\mathrm{l}} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{14} & M_{13} & M_{12} & M_{\mathrm{aex}} \\ M_{12} & L_{\mathrm{l}} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{14} & M_{13} & M_{\mathrm{bex}} \\ M_{13} & M_{12} & L_{\mathrm{l}} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{14} & M_{\mathrm{cex}} \\ M_{14} & M_{13} & M_{12} & L_{\mathrm{l}} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{\mathrm{dex}} \\ M_{15} & M_{14} & M_{13} & M_{12} & L_{\mathrm{l}} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{\mathrm{eex}} \\ M_{14} & M_{15} & M_{14} & M_{13} & M_{12} & L_{\mathrm{l}} & M_{12} & M_{13} & M_{\mathrm{fex}} \\ M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{14} & M_{13} & M_{12} & L_{\mathrm{l}} & M_{12} & M_{\mathrm{gex}} \\ M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{14} & M_{13} & M_{12} & L_{\mathrm{l}} & M_{\mathrm{hex}} \\ M_{\mathrm{aex}} & M_{\mathrm{bex}} & M_{\mathrm{cex}} & M_{\mathrm{dex}} & M_{\mathrm{eex}} & M_{\mathrm{fex}} & M_{\mathrm{gex}} & M_{\mathrm{hex}} & L_{\mathrm{ex}} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{\psi}$ 为磁链矩阵；$\boldsymbol{I}$ 为电流矩阵；$\boldsymbol{L}$ 为电感矩阵；ψ_k 为 k 相电枢磁链，$k = \mathrm{a,b,c,d,e,f,g,h}$；$\psi_{\mathrm{ex}}$ 为励磁绕组磁链；i_k 为 k 相电枢电流；i_{ex} 为励磁绕组电流；L_{l} 为电枢绕组的自感；M_{12} 为相邻两相即相位差 45° 的电枢绕组之间的互感；M_{13} 为相隔 1 相即相位差 90° 的电枢绕组之间的互感；M_{14} 为相隔 2 相即相位差 135° 的电枢绕组之间的互感；M_{15} 为相隔 3 相即相位差 180° 的电枢绕组之间的互感；L_{ex} 为励磁绕组的自感；$M_{k\mathrm{ex}}$ 为 k 相电枢绕组和励磁绕组之间的互感，其表达式为

$$\begin{cases} M_{\mathrm{aex}} = M\cos\theta \\ M_{\mathrm{bex}} = M\cos(\theta - 2\pi/8) \\ M_{\mathrm{cex}} = M\cos(\theta - 2\times 2\pi/8) \\ M_{\mathrm{dex}} = M\cos(\theta - 3\times 2\pi/8) \\ M_{\mathrm{eex}} = M\cos(\theta - 4\times 2\pi/8) \\ M_{\mathrm{fex}} = M\cos(\theta - 5\times 2\pi/8) \\ M_{\mathrm{gex}} = M\cos(\theta - 6\times 2\pi/8) \\ M_{\mathrm{hex}} = M\cos(\theta - 7\times 2\pi/8) \end{cases} \tag{5}$$

式中：M 为励磁绕组和电枢绕组之间的最大互感值；θ 为电角度。

根据法拉第电磁感应定律和基尔霍夫电流定律可知，脉冲发电机电压方程表达式为

$$\boldsymbol{u} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}}{\mathrm{d}t} + \boldsymbol{RI} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{u}$ 为电压矩阵；$\boldsymbol{R}$ 为电阻矩阵。

$$\boldsymbol{u} = [u_{\mathrm{a}} \quad u_{\mathrm{b}} \quad u_{\mathrm{c}} \quad u_{\mathrm{d}} \quad u_{\mathrm{e}} \quad u_{\mathrm{f}} \quad u_{\mathrm{g}} \quad u_{\mathrm{h}} \quad u_{\mathrm{ex}}]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} r_{\mathrm{l}}\boldsymbol{I}_{8\times 8} & 0 \\ 0 & r_{\mathrm{ex}} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：u_k 为 k 相电枢电压；r_k 为 k 相电枢电阻；r_{l} 为电枢绕组的电阻；$\boldsymbol{I}_{8\times 8}$ 为 8 阶单位矩阵。

在放电过程中，转速会发生变化，产生较大转矩，可以通过磁场能量 W 计算，即

$$W = \frac{1}{2}\boldsymbol{I}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{LI} \tag{9}$$

电磁转矩为

$$T_{\mathrm{em}} = \frac{p}{2}\boldsymbol{I}^{\mathrm{T}}\frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial \theta}\boldsymbol{I} \tag{10}$$

式中，p 为极对数。

电角加速度 α 为

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} = \frac{p}{2}\frac{(T_{\mathrm{L}} - T_0 - T_{\mathrm{em}})}{J} \tag{11}$$

式中：J 为转子的转动惯量；T_{L} 为拖动电机提供的驱动转矩；T_0 为空载转矩。

选取状态变量为 $\boldsymbol{I}$，由式(1)、式(6)、式(10)和式(11)组成完整的状态方程组，可以完整描述 1 台脉冲发电机的电磁和运动过程。

本文以八相四极空芯脉冲发电机为研究对象，该电机的主要参数见表 1。

1.2 负载模型

电磁推进装置由导轨和可滑动的接触电枢组成，推进物放置于电枢前端。驱动推进物时，电流从导轨的一侧流入，经电枢从另一侧导轨流回，导轨中产生的磁场与电枢电流相互作用，在电枢中产生向前的安培力，推动电枢和前端的负载加速运动，最终在导轨末端达到极高速度。

表 1　脉冲发电机基本参数

Tab. 1 Basic parameters of pulsed alternator

参数	数值
转速/(r·min^{-1})	10 000
恒定励磁电流/kA	45
励磁绕组自感 L_{ex}/mH	1.631 9
电枢绕组自感 L_1/μH	9.182 5
最大互感 M/μH	47.449 3
相邻两相电枢绕组互感 M_{12}/μH	2.619 1
相隔 1 相电枢绕组互感 M_{13}/μH	0.042 7
相隔 2 相电枢绕组互感 M_{14}/μH	−2.536 2
相隔 3 相电枢绕组互感 M_{15}/μH	−6.098 7
电枢绕组电阻 R_1/mΩ	0.582
励磁绕组电阻 R_f/mΩ	142.300

为了将负载的动力学特性与电源等效电路的动态特性结合起来，进行以下分析。理想情况下，导轨负载的能量 W_r 为该系统储存的磁能与电枢动能之和，其表达式为

$$W_r=\frac{1}{2}L_r i^2+\frac{1}{2}mv^2 \tag{12}$$

式中：i 为流经导轨的电流；m 为电枢的质量；v 为电枢的移动速度；L_r 为导轨负载的电感。导轨负载可以等效成电感和电阻随位移线性变化的运动负载，其建模为

$$\begin{cases}R_r=R_0+R'x\\ L_r=L_0+L'x\end{cases} \tag{13}$$

式中：R_0 和 L_0 分别为负载的初始电阻和初始电感；R' 和 L' 分别为负载电阻梯度和电感梯度；x 为电枢的位移；R_r 为导轨负载的电阻。

此外，脉冲电源需要提供的功率为

$$P=iu=i\frac{\mathrm{d}(L_r i)}{\mathrm{d}t} \tag{14}$$

假设不考虑摩擦、风阻和腐蚀的理想状况，导轨负载的能量变化率 $\mathrm{d}W_r/\mathrm{d}t$ 与功率 P 相等，表达式简化为

$$L_r i\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+\frac{1}{2}i^2\frac{\mathrm{d}L_r}{\mathrm{d}t}+mva=iL_r\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+i\frac{\mathrm{d}L_r}{\mathrm{d}t} \tag{15}$$

式中，a 为电枢加速度。作用在电枢上的电磁推力 F 及电枢加速度可求解为

$$F=ma=\frac{1}{2}L'i^2 \tag{16}$$

$$a=\frac{L'i^2}{2m} \tag{17}$$

为了简化分析，假设电枢的初始位移和速度均为 0，则速度和位移的表达式为

$$v=\frac{L'}{2m}\int_0^t i\tau^2\mathrm{d}\tau \tag{18}$$

$$x=\int_0^t v\mathrm{d}t=\frac{L'}{2m}\int_0^t\int_0^t i\tau^2\mathrm{d}\tau\mathrm{d}\tau \tag{19}$$

式中，τ 为时间。

1.3　系统建模

本文使用 MATLAB 平台基于脉冲发电机模型和负载模型建立了脉冲发电机驱动负载的联合仿真模型，便于快速计算和优化，图 4 为 6 台脉冲发电机驱动负载的系统仿真模型。根据式(19)，电枢位移 x 的模型如图 5 所示。该模型监测导轨电流，计算电枢的速度和位移。负载的具体参数见表 2。

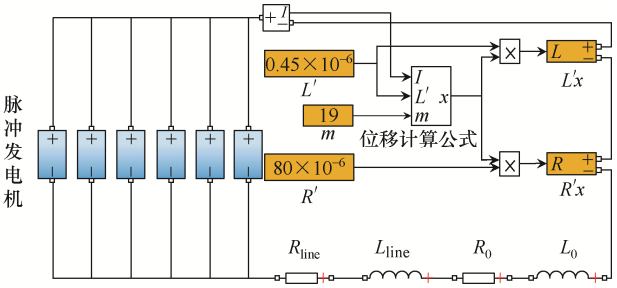


图 4　脉冲电源驱动系统模型

Fig. 4 Model of pulsed power drive system

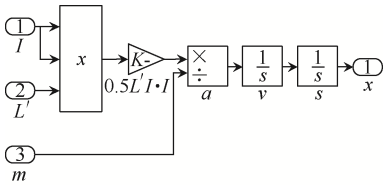


图 5　电枢的速度和位移计算模型

Fig. 5 Calculation model of velocity and displacement of armature

表 2　导轨和电枢构成的负载系统基本参数

Tab. 2 Basic parameters of load system consisting of guide rail and armature

参数	数值
初始电阻 R_0/mΩ	0.4
初始自感 L_0/μH	0.25
电阻梯度 R'/(μΩ·m^{-1})	80
电感梯度 L'/(μΩ·m^{-1})	0.45
质量 m/kg	19

2 闭环末端速度控制系统

闭环末端速度控制系统的设计思想为:(1)确定预计算的触发策略。根据期望的末端速度，将电枢的运动等效为按期望末端速度进行的匀加速运动，并将其视为期望状态。在导轨上等距设置 2 个触发点，分别触发脉冲发电机机组，通过改变每组脉冲发电机的台数，来减小末端处实际速度和预期速度之间的误差，从而获得预计算的触发策略。(2)实际推进过程中的末端速度闭环控制。推进过程中，在固定位置检测电枢速度。由于电枢的运动状态可以等效为匀加速运动，因此计算出等效实际加速度，并根据检测到的速度和计算出的等效实际加速度估计实际末端速度。该系统固定触发位置，根据估计的末端速度误差调整最后一组脉冲电源的触发台数。n 为最后脉冲电源组的调整数，取值范围为[−8, 8]之间的整数。n 为负表示减少最后一组的脉冲发电机台数，n 为正表示增加最后一组的脉冲发电机台数。

以期望的电枢末端速度 850 m/s 为例，分析该系统的运行过程。

2.1 预计算的触发策略

2.1.1 计算理想的加速度

根据给定的期望末端速度，计算电枢的匀加速直线运动。理想运动过程中，预期的理想加速度计算公式为

$$z=\frac{1}{2}at^2 \tag{20}$$

$$v=at \tag{21}$$

$$z=vt \tag{22}$$

式中，z 为导轨长度。假设导轨长度为 6 m，则得到预期的理想加速度为 60 km/s^2。

2.1.2 确定预计算的触发策略

设定 3 组脉冲发电机组在 z_0(0 m) 、z_1(2 m) 、z_2(4 m) 处分别触发。根据各触发点实际速度与预期速度的相对误差最小原则，得到各组脉冲发电机的台数。第一个脉冲发电机组的脉冲发电机台数从 1 开始逐渐增加。图 6~图 8 分别为脉冲发电机台数为 4、5、6 时的 z-v 波形图。

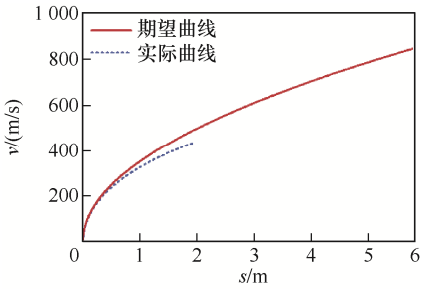


图 6 z-v 曲线(第一组脉冲发电机台数为 4)

Fig. 6 Curves of z vs v (number of pulsed alternators is 4 in the first group)

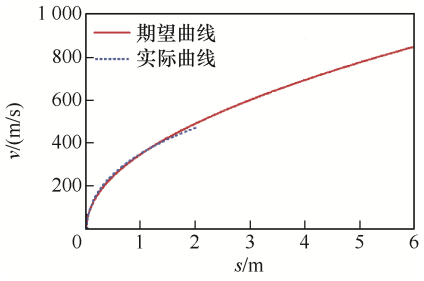


图 7 z-v 曲线(第一组脉冲发电机台数为 5)

Fig. 7 Curves of z vs v (number of pulsed alternators is 5 in the first group)

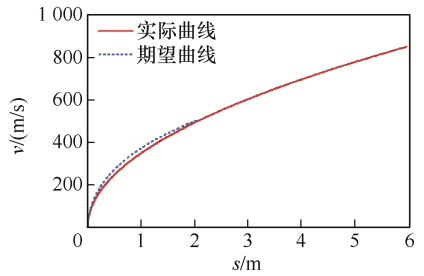


图 8 z-v 曲线(第一组脉冲发电机台数为 6)

Fig. 8 Curves of z vs v (number of pulsed alternators is 6 in the first group)

当台数为 4 时，在 2 m 处，实际速度小于预期速度，两者的相对误差为−11.07%，如图 6 所示。当台数为 5 时，相对误差减小为−3.81%，如图 7 所示。当台数为 6 时，相对误差减小为 1.59%，如图 8 所示。当台数为 6 时，相对误差最小。因此，第一组脉冲发电机组选择触发 6 台脉冲发电机。其余机组使用相同的方法确定触发策略。

完整的触发策略见表 3，完整的 z-v 波形如图 9 所示。最后得到的末端速度为 850.2 m/s，与期望速

度相对误差为 0.02%。

表 3　预计算的触发策略

Tab. 3 Trigger strategy for precomputation

组别	触发时间/ms	触发台数
z_0 / t_0	0	6
z_1 / t_1	8.22	6
z_2 / t_2	11.58	8

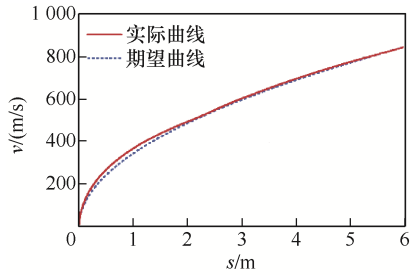


图 9　*z*-*v* 曲线对比

Fig. 9 Comparison of *z*-*v* curve

2.2　基于中途速度检测的末端速度闭环控制方案

电枢运动过程中，在固定位置检测电枢速度。由于电枢运动状态等效为匀加速运动，因此根据检测到的速度和计算出的实际加速度重新估计了电枢末端速度。该系统固定触发位置，调整最后一个脉冲发电机组的台数。k_v 为最后一个脉冲发电机组台数增加 1 或减少 1 时的末端速度变化。因此，调整后的初速 v_d 为 $v_{est}+nk_v$，v_{est} 为估计初速，则 n 的计算公式为

$$n=\text{round}\left(\frac{v_d-v_{est}}{k_v}\right) \tag{23}$$

k_v 可以用数值模拟结果来计算。在 MATLAB 中使用第 2 节所示的模型对上述示例进行仿真，当 n 从−8 到 8 变化时，末端速度的变化趋势如图 10 所示，表明 n 与 v 的关系为近似线性关系。线性拟合得到的斜率为 0.998 7 m/s，本文取 k_v=1 m/s。将以上过程归纳成流程图，如图 11 所示。

仿真过程的速度检测示意如图 12 所示，仅在 z_1 处检测到电枢速度。得到检测速度 v_1 后，可计算等效加速度 a 为

$$a=\frac{v_1^2}{2z_1} \tag{24}$$

估计初速 v_{est} 为

$$v_{est}=\sqrt{v_1^2+2a(z_3-z_1)} \tag{25}$$

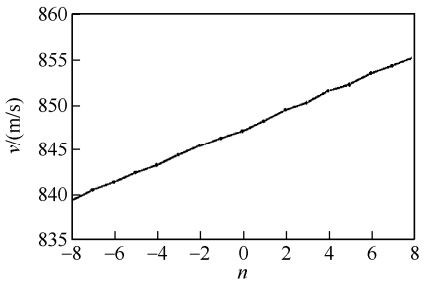


图 10　仿真中末端速度随 *n* 变化曲线

Fig. 10 Curve of *v* changing with *n* in simulation

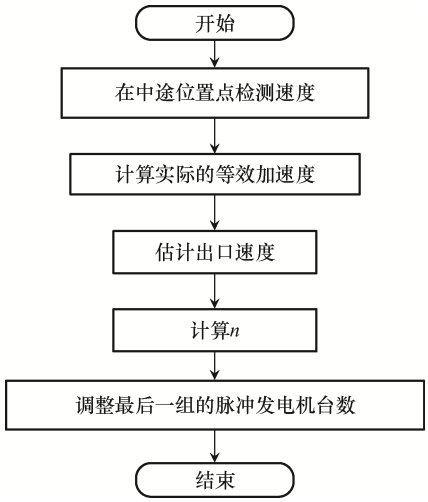


图 11　闭环控制流程

Fig. 11 Flow chart of closed-loop control

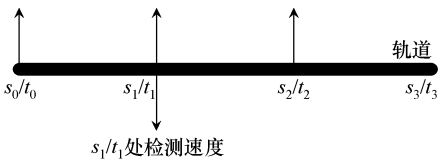


图 12　速度检测示意

Fig. 12 Schematic of velocity detection

从第一组到最后一组的预计算触发数分别为 6、6、8。因此，最后一个脉冲发电机组的台数将从 8 调整为 8+n。

2.3　速度检测方法

采用激光遮断法检测电枢的速度，如图 13 所示，当电枢经过导轨速度检测点附近的 2 处激光发射器时，依次将光路的激光信号遮断，遮断时光电转换后的输出电流依次降为 0。经过测量 2 个光电脉冲信号下降前沿的时间间隔 T，并根据已知的激光发射点间距 l，计算电枢的近似速度。

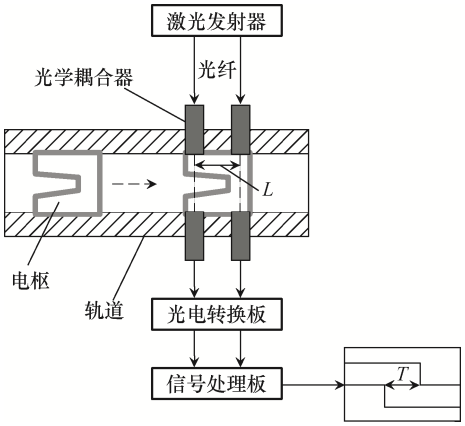


图 13 激光遮断法测速原理

Fig. 13 Principle of speed measurement using laser blocking method

2.4 案例与比较

假设脉冲发电机励磁电流、电枢质量同时受到 2% 的干扰，带来电枢末端速度的误差，进行模拟仿真，得到调整前后负载电流和负载速度的对比曲线如图 14 和图 15 所示。将第三组的脉冲发电机台数从 8 台调整为 5 台后，末端速度从 853.2 m/s 调整为 850.2 m/s。

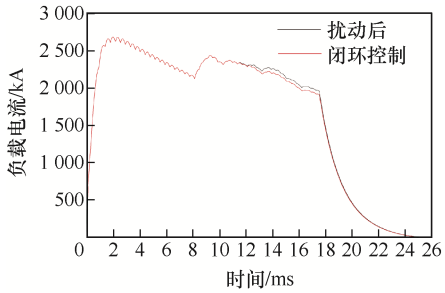
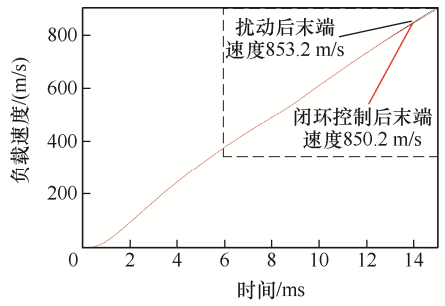


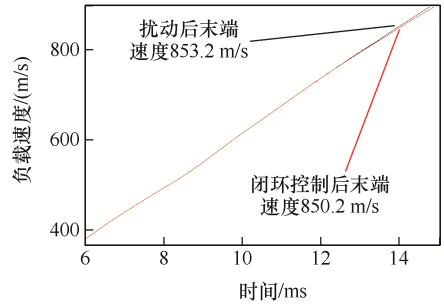
图 14 调整前后负载电流曲线

Fig. 14 Load current curve before and after adjustment

前后初速的误差对比见表 4。可以看出末端速度误差 δ 由调整前的 0.376%降为 0.020%，调整前的末端速度误差明显大于调整后的末端速度误差，表明末端速度闭环控制系统能有效地控制末端速度。



(a) 负载速度曲线



(b) 图(a)局部放大

图 15 调整前后负载速度曲线

Fig. 15 Load velocity curve before and after adjustment

表 4 末端速度误差对比

Tab. 4 Comparison of end-of-rail velocity error

误差类型	Δv /(m·s^{-1})	δ / %
调整前	3.2	0.376
调整后	0.2	0.020

3 结语

本研究提出 1 种末端速度闭环控制系统。在推进过程中检测电枢速度，并调整最后一组脉冲发电机组的触发台数，实现末端速度的实时控制。在仿真案例中，励磁电流和电枢质量同时产生 2%的扰动，使用末端速度闭环控制系统依然可以将初速误差控制在 0.1%以内。在实际实验中，还需要考虑实现速度控制系统的时间可行性。由于响应时间主要包括速度检测、数据向上传输、计算、数据向下传输和控制器响应，考虑到各部件的响应时间，总共可以在100 μs 内实现。从速度检测到触发最后一组脉冲发电机组的时间是 ms 级的，远远大于系统的响应时间。因此，从技术上讲，所讨论的末端速度闭环控制算法是可实现的。

参考文献：

[1] McNab I R. Large-scale pulsed power opportunities and challenges [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(5): 1118-1127.

[2] Bernardes J S, Stumborg M F, Jean T E. Analysis of a

capacitor-based pulsed-power system for driving long-range electromagnetic guns [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 486-490.

[3] 高梁, 李贞晓, 栗保明. 改进型补偿脉冲发电机电流成形分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1116-1120.
Gao Liang, Li Zhenxiao, Li Baoming. Analysis on the current formation of an improved compensated pulsed alternator [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1116-1120. (in Chinese)

[4] Wu Shaopeng, Zhao Weiduo, Wang Shaofei, et al. Overview of pulsed alternators [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1078-1085.

[5] Murthy S K, Weldon W F. A single element multiphase compulsator powered railgun system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(1): 145-154.

[6] McNab I R. Pulsed power options for large EM launchers [C]// 2014 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology. La Jolla, CA, USA, 2014: 1-11.

[7] Mallick J A, Crawford M. Determining pulsed alternator thyristor converter firing angles to produce a desired launcher current [C]// 2004 12th Symposium on Electromagnetic Launch Technology. Snowbird, UT, USA, 2005: 233-236.

[8] Tang Lei, Yu Kexun, Xie Xianfei, et al. Discharge process of the multiphase air-core compulsator-based railgun systems [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(3): 273-280.

[9] Tao Xuefeng, Liu Kun, Wang Haoze. Modeling of an air-core compulsator and the pulse shaping using optimization algorithm [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 611-618.

[10] Cui Shumei, Wang Shaofei, Wu Shaopeng, et al. Research of a modular pulsed alternator power system [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1406-1413.

[11] Cui Shumei, Wang Shaofei, Wu Shaopeng, et al. Design and analysis of a modular pulsed alternator power system for driving 32-MJ muzzle energy railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1128-1133.

[12] Li Xiyuan, Wu Shaopeng, Cui Shumei, et al. A flexible waveform conditioning strategy of an air-core pulsed alternator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1398-1404.

[13] 李茜元. 模块化惯性储能脉冲电源控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Li Xiyuan. Research on the control technology of modular inertial energy storage pulsed power supply [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)

[14] Zhou Yuan, Yan Ping, Sun Yaohong, et al. Design of a distributed-energy-store railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 230-234.



张颖

作者简介：

张颖(1993—　)，女，博士研究生。研究方向：脉冲发电技术。E-mail：zhangying421@mail.iee.ac.cn。

王又珑(1982—　)，男，通信作者，博士，研究员。研究方向：脉冲发电技术。E-mail：wyl@mail.iee.ac.cn。

(责任编辑：郭凯凯)