

直流电机起动的变分与能效仿真

岳志明

(酒泉职业技术学院 机电工程系, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 为了提升直流电动机起动效率, 对其起动进行变分, 得到唯一的转速下凹抛物线极值轨线。通过仿真比较, 验证此为最低能效的轨线。故而考虑其他几种起动轨线以寻找出能效最优的轨线, 尤其是与变分极值轨线相对偶的凸抛物线轨线, 经仿真验证其为高能效轨线。另外经仿真验证, 恒定高电流的简单起动方法也可以进一步提升效率。

关键词: 直流电动机; 变分法; 起动轨线; 能效

中图分类号: TM 33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)08-0055-04

Variational and Energy Efficiency Simulation of DC Motor Starting

YUE Zhiming

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Jiuquan Vocational Technical College, Jiuquan 735000, China)

Abstract: In order to improve the energy efficiency of DC motor starting, the unique rotational speed extremum trajectory in the shape of concave parabola was obtained by using variational method. Simulation verified that the energy efficiency extremum of this was the lowest. To find the optimal energy efficiency trajectory, several other starting trajectories were considered, especially the convex parabola trajectory relative to the variational extremum trajectory, which was proved to have a higher energy efficiency. The simulation also proved that the simple starting method with a constant high current could further improve the energy efficiency of DC motor starting.

Key words: DC motor; variational method; start trajectory; energy efficiency

0 引言

直流电动机的主要优点是起动和调速性能好、过载能力大、易于控制, 能适应各种机械负载特性的需要; 主要缺点是效率低、能耗大。其常应用于操作特别频繁、要求调速范围大而且要求平滑调速的生产机械^[1]。对于短时工作制直流电机, 频繁的起动变速, 能效是生产成本需要考虑的问题之一。对直流电机效率的已有研究主要是: 对于电磁弹射用直线永磁无刷直流电机仿真分析表明, 电压、电感、负载质量和换相位置均能影响动态发射性能。对于某一固定结构存在最佳的电压、转子质量和换相位置匹配, 根据转子末速度的不同输出需求, 实施相应的提前换相控制方法, 能够使能量转换效率达

到最大^[2]。无刷直流电机直接转矩控制系统比双闭环系统在换相时刻的转矩脉动明显减少, 从而使电机运行时的效率得到提高^[3]。以水下使用的永磁直流电机为例, 考察电机在 20 ~ 80 °C 范围内效率的下降情况^[4], 得出热导参数随直流电动机几何尺寸变化的规律^[5]。本文受直流电机起动变分轨线启发, 寻求直流电机的高能效起动轨线, 并通过仿真验证其有效性。

1 他励直流电动机各物理量间的关系

他励直流电动机电路图如图 1 所示。有 2 个独立的电路: 电枢回路和励磁回路。

他励直流电动机各物理量间的基本关系式如下:

电枢电压为

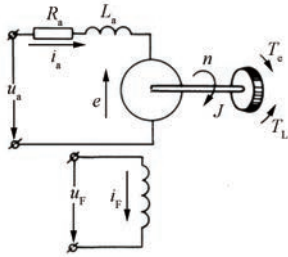


图1 他励直流电动机电路图

$$u_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e \quad (1)$$

式中: i_a ——电枢电流;

R_a ——电枢电阻;

L_a ——电枢漏磁电感;

e ——反电动势。

考虑到直流电机电枢漏感 L_a 一般较小, 设 $L_a=0$, 故有:

$$u_a = i_a R_a + e \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = K_T \Phi i_a \quad (3)$$

式中: K_T ——转矩常数;

Φ ——气隙磁通。

运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中: T_L ——负载转矩;

J ——转动惯量;

ω ——转速。

反电动势方程为

$$e = K_e \Phi n \quad (5)$$

式中: K_e ——电磁常数。

将 $J = mr^2 = \frac{GD^2}{4g}$ (G 为重力; D 为回转直径;

$GD^2 = [GD^2]$ 为飞轮力矩; $g = 9.8 \text{ m/s}^2$) 及 $\omega = \frac{2\pi}{60}n$ 代入式(4), 有:

$$T_e - T_L = J_C \frac{dn}{dt} \quad (6)$$

其中: 转动惯量 $J_C = \frac{2\pi}{60} \frac{GD^2}{4g} = \frac{GD^2}{375} = \frac{1}{K}GD^2$, $K = 375 \text{ m} \cdot \text{r}/(\text{s} \cdot \text{min})$ 。

2 直流电机起动的变分及轨线

设目标函数为

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \psi(t) dt = \int_{t_0}^{t_f} \frac{u_a i_a}{T_L n} dt \quad (7)$$

设 T_L 为常数, 固定边界条件 n_{t_0}, n_{t_f} , 求 J 为极大值时的轨线 $n \cdot (t)$ 。

将式(2)、式(3)、式(5)、式(6)代入式(7), 有:

$$\begin{aligned} J &= \int_{t_0}^{t_f} \eta_0(t) dt = \int_{t_0}^{t_f} \frac{u_a i_a}{T_L n} dt = \\ &= \frac{1}{T_L} \int_{t_0}^{t_f} \left(\frac{R_a i_a^2}{n} + K_e \Phi i_a \right) dt = \\ &= \frac{1}{T_L} \int_{t_0}^{t_f} \left[\frac{R_a J_C^2}{(K_T \Phi)^2} \frac{(n')^2}{n} + \frac{J_C}{K_T \Phi} \left(\frac{2R_a}{K_T \Phi} T_L + K_e \Phi \right) n' + \right. \\ &\quad \left. \frac{T_L}{K_T \Phi} \left(\frac{2R_a J_C}{K_T \Phi} + K_e \Phi \right) \right] dt = \\ &= \frac{1}{T_L} \int_{t_0}^{t_f} [A \frac{(n')^2}{n} + B n' + C] dt \quad (8) \end{aligned}$$

式中: A, B, C 为常数, $A = \frac{R_a J_C^2}{(K_T \Phi)^2}, B =$

$$\frac{J_C}{K_T \Phi} \left(\frac{2R_a}{K_T \Phi} T_L + K_e \Phi \right), C = \frac{T_L}{K_T \Phi} \left(\frac{2R_a J_C}{K_T \Phi} + K_e \Phi \right)。$$

故可取 $\psi(t) = \frac{1}{T_L} [A \frac{(n')^2}{n} + B n' + C]$ 。泛

函 $\delta J=0$ 的横截条件和欧拉-拉格朗日微分方程分别为^[6]

$$\delta n \frac{\partial \psi}{\partial n'} = 0 \text{ (对于 } t_0, t_f \text{ 时)} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \psi}{\partial n'} \right) = 0 \quad (10)$$

由于固定边界条件, 所以 $\delta n=0$, 则式(9)成立。考虑式(10), 有:

$$-A \frac{(n')^2}{n^2} - \left[2A \frac{n''}{n} - 2A \frac{(n')^2}{n^2} \right] = 0 \quad (11)$$

即:

$$-2 \frac{n''}{n} + \frac{(n')^2}{n^2} = 0, \quad 2nn'' = (n')^2 \quad (12)$$

得 $n^* = \frac{1}{4}(c_1 t + c_2)^2$, 其中: c_1, c_2 为常数, 取

决于初始状态 n_{t_0}, n_{t_f} 。结合直流电机为线性系

统,故此抛物轨线为唯一的变分极值轨线。

考虑实例仿真,取他励直流电机参数: $P_N = 29 \text{ kW}$, $U_N = 440 \text{ V}$, $I_N = 76 \text{ A}$, $n_N = 1\ 000 \text{ r/min}$, $R_a = 0.377\ 1 \ \Omega$, $K_e \Phi = 0.411$, $K_T \Phi = 3.925$, $T_L = 217 \text{ N}\cdot\text{m}$, $J_C = 0.069\ 3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。因此直流电机有方程:

$$u_a = 0.377i_a + 0.411n \quad (13)$$

$$3.925i_a - 217 = 0.069\ 3n' \quad (14)$$

3 起动能效仿真比较

取起动时间 2 s , 电机效率设为 $\eta = \frac{T_L \omega}{u_a i_a} = 217 \frac{2\pi n}{60 u_a i_a}$, 对 4 种起动轨线进行能效仿真比较。

(1) 变分轨线起动方式。取 $n = 250 t^2$, 则分别由式(9)、式(10)得:

$$i_a = \frac{1}{3.925}(0.069\ 3n' + 217) \quad (15)$$

$$u_a = 0.377i_a + 0.411n \quad (16)$$

考虑到使能效积分最大化的寻找思路,取以下 3 种轨线进行进一步仿真比较与验证。

(2) 线性转速轨线起动方式。取 $n_1 = 500t$, 解微分方程式(9)、式(10)可得:

$$i_{a1} = \frac{1}{3.925}(0.0693\ n' + 217) = 63.626\ 8 \quad (17)$$

$$u_{a1} = 0.377i_a + 0.411n = 205.5t + 23.911\ 9 \quad (18)$$

(3) 上凸转速轨线起动方式。取 $n_2 = 1\ 000 \cdot \sin\left(\frac{1}{4} \cdot 3.141\ 5t\right)$, 解微分方程式(9)、式(10)得:

$$i_{a2} = (0.069\ 3n'_2 + 217)/3.925 = [0.069\ 3 \times 785.375 \cdot \cos(3.141\ 5 \cdot t/4) + 217]/3.925 \quad (19)$$

$$u_{a2} = 0.377i_{a2} + 0.411n_2 \quad (20)$$

(4) 与变分极值轨线相对偶的抛物上凸轨线起动方式。取 $n_4 = 1\ 000 - 250(2 - t)^2 = 250t(4 - t)$, 解微分方程式(9)、式(10)得:

$$i_{a4} = (0.069\ 3n'_4 + 217)/3.925 = 72.942\ 7 - 8.828t \quad (21)$$

$$u_{a4} = 0.377i_{a4} + 0.411n_4 \quad (22)$$

对以上 4 种起动方式仿真,电机的转速、电

压、电流、效率轨线结果比较如图 2 所示。

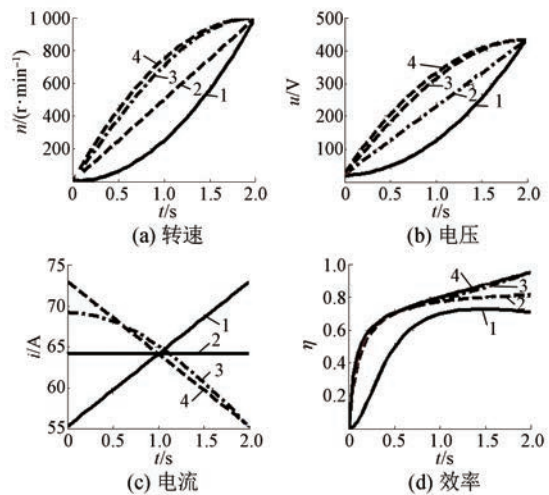


图 2 4 种轨线仿真结果比较

由图 2 可见,在所有考虑的 4 种轨线中,起动能效以变分转速轨线最低,线性转速轨线和正弦上凸转速轨线较好,与变分极值轨线相对偶的凸抛物上轨线最佳。

进一步考虑使效率-时间积分最大化的能效最优寻找思路,直接缩减对偶凸抛物上轨线起动时间,由 2 s 可至 0.85 s 、 0.425 s ,并考虑采用恒定最大初始电流(恒转矩)的简单起动方法且缩减起动时间至 0.15 s ,进行仿真比较。电机转速、电压、电流及效率轨线的结果如图 3 所示。

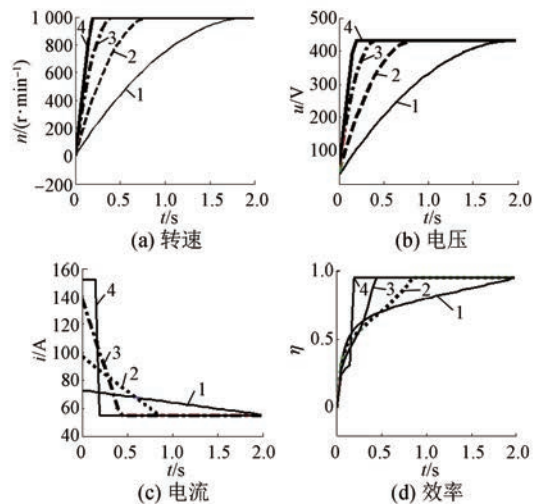


图 3 不同起动时间下的对偶上凸抛物线仿真结果

对以上所有起动法进行效率-时间积分并取其 2 s 的平均值进行比较,如图 4 所示。其中

第 1~4 点对应 4 种起动轨线的均值,第 4~6 点对应偶上凸抛物起动的各个起动时间 2、0.85、0.425 s 的均值,而第 7 点对应最大恒流 0.15 s 起动的积分 2 s 均值。

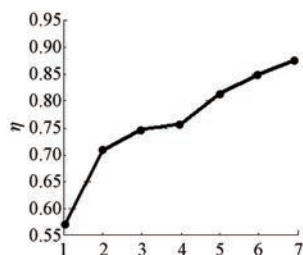


图 4 效率-时间积分 2 s 平均值比较

4 结 语

(1) 利用变分法所得下凹抛物型转速轨线能效最低。

(2) 对偶上凸抛物转速轨线为高效起动轨线,需要较大的初始电流和线性后降特性。起动结束后的电流为负载平衡电流。

(3) 缩减起动时间、提高电流初值的起动方式可以提升效率-时间积分。

(4) 采用初始高恒电流(转矩)的起动方式,可以提升效率-时间积分,达到节能的目的,同时提高生产效率。

(5) 实际应用中需考虑机械、电气冲击特性、去磁效应限制。

【参 考 文 献】

- [1] 中国航空规划设计研究总院有限公司.工业与民用供配电设计手册:下册[M].4版.北京:中国电力出版社,2016.
- [2] 李会来,李小民,李治源.直线永磁无刷直流电机能量转换效率研究[J].微电机,2015,48(4): 10.
- [3] 王伟.直流无刷电机控制系统输出效率优化方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
- [4] 阎璐,胡欲立.温度升高对永磁直流电机效率的影响[J].微电机,2007,40(3): 58.
- [5] 韩光鲜,王宗培,程智.小容量无刷直流电动机的热阻及连续功率[J].微电机,2002,35(5): 3.
- [6] 蒋慰孙.系统控制:下册[M].上海:华东化工学院出版社,1988.

收稿日期: 2019-04-04

(上接第 23 页)

- [4] 潘森林,高瑾.永磁同步电机无速度传感器控制技术综述[J].微电机,2018,51(3): 62.
- [5] 吴春秋,刘骁暘.基于滑模观测器的永磁同步电机无速度传感器控制[J].电机与控制应用,2018,45(10): 34.
- [6] BISHEIMER G, SONNAILLON M O, DE ANGELO C H, et al. Full speed range permanent magnet synchronous motor control without mechanical sensors [J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(1): 35.
- [7] 王斌,王跃,王兆安.无速度传感器的永磁同步电机无差拍直接转矩控制方法[J].电机与控制学报, 2014,18(6): 42.
- [8] 滕青芳,柏建勇,朱建国,等.基于滑模模型参考自

适应观测器的无速度传感器三相永磁同步电机模型预测转矩控制[J].控制理论与应用, 2015, 32(2): 150.

- [9] 刘培刚,刘国林,吴鹏坤.一种改进磁链计算模型分析[J].变频器世界,2009(8): 56.
- [10] 徐建英,刘贺平.PMSM 的高精度感应电势状态观测器与位置估计[J].北京科技大学学报,2007,29(5): 537.
- [11] 赵信杰,李锐华,胡波,等.无速度传感器的永磁同步电机滑模控制[J].电机与控制应用, 2012, 39(1): 22.
- [12] 王成元,夏加宽,孙宜标.现代电机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2009.

收稿日期: 2019-04-01