

# 电机低速运行“爬行”现象的研究

The research of 'creeping phenomenon' with motor working in low speed

王亮 周宗元

(东南大学机电平台 江苏南京 211189)

**[摘要]** 流速仪检定系统中,由电动机拖动的检定车在低速运行时存在明显的“爬行”现象。本文试对此现象进行简单的分析,并通过模糊PID算法控制调节PWM输出,从而尽可能地消除这一现象,使检定车在低速时具有较高的速度精度。

**[关键词]** 模糊控制, PWM, 车速检测, 检定系统。

**[中图分类号]** TP273.4 **[文献标识码]** B

## 引言

直流电机配PWM控制具有良好的控制特性,被广泛应用在许多电力拖动场合。但是,在低速非线性系统中存在许多不确定的扰动,使系统的控制精度达不到预期的控制要求。以本文课题背景为例,采用直流电机拖动流速仪检定系统中的检定车恒速运行,在速度相对较高时检定车较大的惯性可以抵消较小的摩擦扰动,使速度比较稳定。而在较低速度(0.01m/s~0.02m/s)时检定车就会出现明显的“爬行”现象,使检定车速度出现明显不规则变化,车速参数劣化,直接影响了流速仪检定的准确性。

笔者所在团队受水利部中国东部水利水电检测中心的委托设计智能高效的流速仪检定系统,并对由电机拖动的检定车车速控制进行了重点研究,探讨并努力消除“爬行”现象。

## 1 “爬行”现象探讨

在以往的流速仪检定系统的研制中,检定车在低速运行时(通常在0.01m/s或0.02m/s)会有明显的“爬行现象”。所谓“爬行现象”,是由于整个直流伺服系统中存在非线性的摩擦阻力,致使输入是低速平稳变化的,但系统的输出却是跳动式的变化。在检定系统中,“爬行现象”具体表现为检定车在低速运行时车速忽快忽慢,稳定性较差,系统不能满足验收标准中的车速控制精度。而有些系统即便满足了车速精度(即10s内的平均速度精度满足要求),但车速的不平稳势必带

来流速仪旋转速度的不平稳,这会导致检定结果有较大误差。考虑摩擦力矩的电枢控制式直流伺服电机的力平衡方程为:

$$T_{em} - T_f = J \frac{d\omega}{dt} + b\omega \quad (1)$$

式(1)中,  $T_{em}$  为电机产生的电磁转矩;  $T_f$  为电机输出轴上的摩擦力矩;  $J$  为电机输出轴上的转动惯量;  $b$  为电机输出轴上的阻尼系数;  $\omega$  为电机输出轴的转速。

直流伺服电机的摩擦力分为静摩擦力和动摩擦力,它们各自对应了系统中的静摩擦力矩  $T_0$  和动摩擦力矩  $T_n$ 。当  $\omega = 0$ , 系统的摩擦力矩  $T_f = T_0$ ; 当  $\omega > 0$ , 系统的摩擦力矩  $T_f = T_n$ , 其中  $T_n < T_0$ 。在检定车启动阶段,摩擦力矩会发生突变,所以检定车启动瞬间不平稳。类似于启动过程,由于系统机械结构复杂,检定车行进过程中也会出现动摩擦力矩的突变,这是“爬行现象”的根本原因。

假设车速  $V < V_1$  时,动摩擦力矩  $T_n = T_1$ ;  $V > V_1$  时,  $T_n = T_2$ , 且有  $T_1 > T_2$ 。假定系统的目标输出为  $V_0$ , 由于车速为0,实际输出偏差较大,电机产生较大的电磁转矩  $T_{em}$ , 在克服动摩擦力矩  $T_f$  后产生最终的输出  $T_{em} - T_f$  (此处忽略启动过程中静摩擦力到动摩擦力的突变)。此时  $T_{em}$  不断加大,车速也不断增加,直到到达某个速度点  $V_1$ , 这段过程从图1中的原点到1点。

车速到达  $V_1$  后,由于仍存在速度上的偏差,电磁转矩  $T_{em}$  仍然增大。当车速  $V$  增大到  $V_1$  时,摩擦力矩  $T_f$  产生突变,即从原来的  $T_1$  变为  $T_2$ , 此时

虽然  $T_{em}$  变化连续, 但最终输出  $T_{em} - T_f$  将突变, 导致车速变化率的突变 (车速依然是连续的增加), 出现了“爬行现象”。因为存在控制延时, 车速继续上升, 直至略超过目标速度  $V_0$  时, 偏差开始反向, 此时电磁转矩  $T_{em}$  达到最大值。

图 1 中的 2 点以后, 由于车速超过  $V_0$ , 偏差反向, 电磁转矩  $T_{em}$  下降, 最终输出  $T_{em} - T_f$  也不断减小, 车速平稳减慢, 直到 3 点  $V = V_1$ 。此时摩擦力矩  $T_f$  再次发生突变, 由  $T_2$  变为  $T_1$ , 最终输出  $T_{em} - T_f$  迅速减小, 形成突变, 导致车速变化率突变 (车速依然是连续的减小), 形成车速降低过程中的“爬行现象”。

这种现象在整个调速过程中往复出现, 使得输出轴并不是平稳地按照偏差变化而变化, 而是跳动式的跟踪, 产生了“爬行现象”。实际情况下爬行现象要比图 1 复杂得多, 类似于  $V_1$  的突变点在低速范围内往往不止一个, 而且加速和减速过程中的突变速度点可能不完全相同。

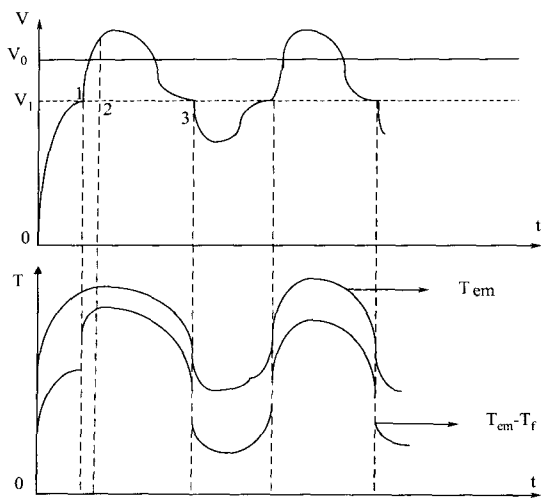


图 1 爬行现象产生的原因

## 2 PWM 输出控制

分析可知, 造成检定车车速忽快忽慢的根本原因, 是整个伺服电机系统中存在摩擦力矩的跳变。一般来说, 遏制这种跳变的方法有以下几种:

1) 改变机械结构, 增加一个补偿阻尼, 这样就可以从根本上消除“爬行现象”。

2) 改变润滑状态, 使摩擦系数的特性改变, 采用防爬行润滑油, 也可以改善“爬行现象”。

3) 如果系统已经存在爬行, 也可以外加一个高频率小振幅的强迫振动, 改善爬行现象。

前两种方法是从改变系统自身结构出发, 使得系统在低速时不存在摩擦力矩的跳变。但通常实现起来代价较高, 甚至是不现实的。

检定车的低速运行控制采用了 PWM 调速方法。PWM 信号中含有丰富的交流分量, 利用其对电机作用产生的微振, 效果等价于对系统的摩擦力矩做补偿, 从而抑制某些速度点上的摩擦力矩之差, 能够实现系统的“动力润滑”, 改善电机的低速性能, 提高系统的精度。用 PWM 驱动直流电机时, 其电枢电压:

$$U_a = \frac{U_i}{U_p} U_c + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos 2n\pi f_r t + B_n \sin 2n\pi f_r t) = pU_c + N(p, t) \quad (2)$$

式 (2) 中,  $U_a$  为最终输出的电枢电压。 $U_i$  为输入控制信号。 $U_p$  为脉宽调制载波信号的幅值。 $U_c$  为功率放大器的电源电压。

电枢电压由直流分量  $U_c$  和交流分量  $N(p, t)$  两部分构成。 $N(p, t)$  包含了无限频谱宽度的交流信号, 交变电流在电枢回路中, 会产生一个附加的高频力矩, 可使电机产生微振, 对系统进行“动力润滑”。只要合理设置 PWM 的频率, 就可以很好地抑制“爬行现象”, 具有很强的灵活性。

## 3 基于模糊 PID 算法的电机控制

针对实际运行时出现的这一问题, 本文采用了模糊 PID (Fuzzy-PID) 算法进行电机控制。此算法综合了 PID 能有效控制稳态误差和模糊控制对不确定对象的强鲁棒性, 突破了各自的局限性, 用模糊控制器在线实时调节 PID 控制参数, 使 PID 控制具有自适应性。实验发现, 一个合适的定量的控制输出量往往已能使检定车接近于目标速度运行, 而且过渡时间仅为 5 ~ 10s, 能够满足用户要求; 而控制的重点是在检定车到达稳态后, 根据扰动情况实施在一定范围内的调节输出, 减小速度误差, 提高控制精度。

在本系统中, 将编码器测得的实际车速与目标速度进行比较, 得到偏差和偏差的变化率, 然后模糊化; 接着根据一定控制规则, 得到模糊化的输出, 并将此输出解模糊作为最终修正量, 用来实时更新 PID 中的参数; 最后根据常规的 PID 控制方法得到最终的输出。图 2 为模糊 PID 控制的系统模型。

综合考虑控制效果和计算代价,  $E$  和  $\Delta E$  以及

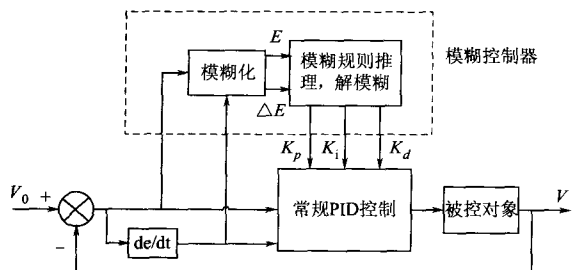


图2 模糊PID控制的系统模型

PID 中的三个参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  采用相同的模糊描述方法。即论域归一化到  $[-6, +6]$ ；划分成 7 个模糊子集进行描述： $\{NL, NM, NS, ZE, PS, PM, PL\}$ ，对应的语言变量意义分别为： $\{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大\}$ 。隶属度函数取三角形分布函数，且是轴对称的，图 3 所示。

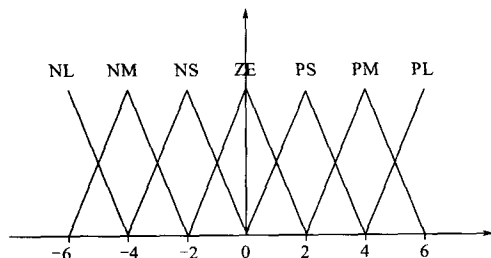


图3 模糊控制中的隶属度函数

在模糊 PID 控制中，模糊推理规则是模糊控制器的关键，一般是根据专家经验给出模糊规则。根据 PID 一般参数调试经验，我们以  $E$  和  $\Delta E$  的不同等级作为输入条件，语言描述类似于“如果偏差很大而偏差的变化速度又很小，则应采用较大的比例系数”、“如果偏差已很小而偏差的变化速度仍很大，则应采用较小的比例系数，甚至采用负的比例系数”等等。推理规则采用“IF A AND B THEN C”的形式，例如：

if  $E = NG$  and  $\Delta E = NG$  then  $\Delta K_p = PB$

这条规则含义为“如果目标速度与给定速度相比的偏差为负大且偏差变化率负大，即实际速度过大、而且还有继续增大的趋势，则应该提高比例系数，尽快抑制这种趋势，消除偏差”。由于  $E$  和  $\Delta E$  分为 7 个模糊子集， $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  就各对应 49 条规则。限于篇幅，本文仅列出  $K_p$  的模糊控制规则表，如表 1 所示。整个推理过程采用 Mamdani 算法，选择“极大与极小”（max-min）运算作为合成运算，求出模糊输出值。解模糊采用重心法，即加权均法。

表 1  $K_p$  的模糊控制规则表

$\begin{matrix} E \\ \Delta E \end{matrix}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PL	PL	PM	PS	ZE	ZE	NS
NS	PL	PM	PS	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NM
PS	PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NL
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NL	NL
PL	ZE	NS	NS	NM	NM	NL	NL

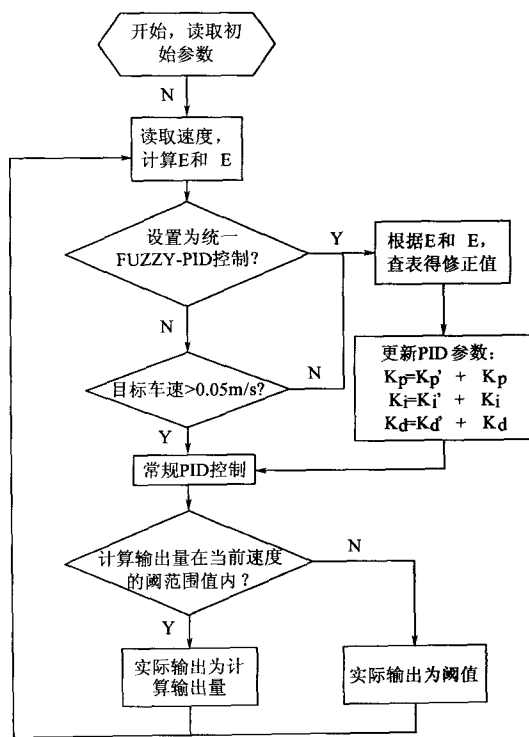


图4 低速电机控制算法流程图

在具体实现中，做了如下改进：

1) 为满足系统的实时性要求，程序中避免了复杂的推理运算，而是事先将各种输入-输出关系建立一个控制查询表，通过查表的方式进行方便高效的模糊 PID 控制。

2) 实验发现，车速在 0.05m/s 以上运行时，普通 PID 控制已能满足精度要求，故当车速大于 0.05m/s 时，系统在默认设置下采用 PID 控制，但保留了模糊 PID 控制的方法供选用。

3) 在调试过程中，发现微分控制对系统性能影响不大，因此  $K_d$  设置较小。

# 基于 MATLAB 的偶极子辐射性能仿真分析

Radiation Performance Simulation Analysis of the Dipole Based on MATLAB

张清泉<sup>1</sup> 吉安平<sup>1</sup> 行小帅<sup>2</sup> 岳 静<sup>2</sup>

(1. 山西师范大学文理学院 山西临汾 041004; 2. 山西师范大学物信学院 山西临汾 041004)

**[摘要]** 研究了直线天线的两种简单分析模型: 无穷小偶极子和有限长偶极子。建立了偶极子辐射强度和方向性系数数学模型。应用 MATLAB 对其性能进行了仿真分析。通过仿真分析比较, 得出了和实际结果相符的结论, 从而为天线的研究提供了有价值的基础理论。

**[关键词]** 有限长偶极子; 数学模型; 仿真

**[中图分类号]** TN965.2 **[文献标识码]** A

## 引言

天线是无线电收发系统的重要组成部分, 它是向空间辐射或者从空间接收电磁波的装置。直线天线不仅构成了众多天线问题的基础, 而且也揭示了一般天线的特性。直线天线可以通过无穷小偶极子和有限长偶极子模型来分析。所谓偶极子是指几何尺寸远小于波长的带电体。一个辐射体可以近似为许多偶极子的组合。

4) 无论对于常规 PID 还是模糊 PID 控制, 对于 0.01 ~ 0.09m/s 每个速度点, 都进行了输出上下阈值的限定, 经过反复实验, 保证了这些阈值既能满足速度精度要求, 也降低了超调的可能性。低速电机控制的算法流程如图 4。

## 4 算法应用结果

利用模糊 PID 算法控制输出量, 同时用 PWM 调压方法去除电机的低速“爬行现象”, 检定车的低速控制精度得到很大改善。图 5 是车速为 0.05m/s 时的检定车实测速度 (纵坐标代表对应的

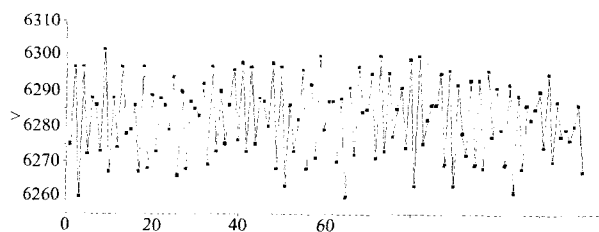


图 5 车速为 0.05m/s 时的实测速度

## 1 无穷小偶极子和有限长偶极子

直线天线有两种简单分析模型: 无穷小偶极子和有限长偶极子。

### 1.1 无穷小偶极子

一根短线段天线就是无穷小偶极子, 它的长度  $L$  远远小于波长  $\lambda$ 。把它沿着  $z$  轴对称放置在  $x-y$  平面, 如图 1 所示。

编码器等效脉冲数)。从图 5 中可以看到检定车的速度十分平稳, 最大值为 6302, 最小值为 6260, 均值为 6282.34, 最大误差不到 4‰, 精度远高于 1% 的设计指标。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. SL/T150-95 直线明槽中转子式流速仪的检定方法 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995
- [2] 姚永熙. 水文仪器与水利水文自动化 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2001: 74 ~ 76
- [3] 南新元, 梁岚珍等. 变频器在流速仪检定车中的应用 [J]. 华北水利水电学院学报, 2001 (4)
- [4] 谢陈跃, 黄学超. 用 MCS-51 系列单片机实现直流力矩电机低速平稳控制 [J]. 广州大学学报 (社会科学版), 1994 (1): 45 ~ 58
- [5] 纪运广, 杨树兴, 钟萍, 刘庆节. PWM 消除直流伺服电机爬行现象的研究 [J]. 战术导弹控制技术, 2000 (2): 29 ~ 32
- [6] 乔维德. 基于模糊 PID 控制的永磁无刷直流电机调速系统 [J]. 江苏电器, 2008 (12): 12 ~ 14