

# 基于西门子PLC的S曲线的实现与应用

郑剑,康宁,展鹏,吴绍坤,张敬东

(天津电气科学研究院有限公司,天津 300180)

**摘要:**从工程实际应用出发,在西门子可编程控制器(PLC)中封装速度给定积分器程序块,用来取代变频器中的速度给定功能,既有效地提高了控制编程的灵活性,又降低了变频器的运算负担。该程序块采用SCL语言编写,兼容性强,可方便移植到其他PLC中使用。程序块引脚参数设计简单实用,适用于多工况控制,性价比高,具有良好的参考和实用价值。

**关键词:**给定积分器;程序块;可编程控制器;实用

**中图分类号:**TM28

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21034

## Realization and Application of S-shaped Curve Based on Siemens PLC

ZHENG Jian, KANG Ning, ZHAN Peng, WU Shaokun, ZHANG Jingdong

(Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China)

**Abstract:** Based on the practical engineering application, a program block of speed setting integrator was packaged in Siemens PLC to replace the speed setting function in frequency converter, which could not only improve the flexibility of control programming effectively, but also could reduce the computing burden of frequency converter. The program block is written with SCL language, and it is with strong compatibility and can be easily transplanted to other PLCs. The pin parameters of the program block are designed simply and practically, and it can be adapted to multi-operating condition control, which is cost-effective and owns good reference and practical value.

**Key words:** given integrator; program block; programmable logic controller (PLC); practicability

在变频器驱动电机来拖动被控对象的应用中,变频器中的速度给定通常需要经过给定积分器后再使用。这样在速度发生阶跃变化时,可以减小电机对拖动设备的瞬时冲击、延长设备的使用寿命。

近年来,随着可编程控制器(PLC)运算速率的提升,在用PLC控制变频器拖动被控对象时,工程人员逐渐开始将给定积分器的功能放在PLC中实现。这样既可以提高控制编程的灵活性,也可以降低传动装置的运算负担。

本文以西门子S7-1500 PLC为例,介绍给定积分器的实现方法。由于阶跃速度给定经过给定积分器后的输出曲线为S型曲线,下文将给定积分器简称为S曲线积分器。

## 1 S曲线的实现

### 1.1 数学表达式

S曲线加减速过程示意图如图1所示<sup>[1]</sup>。

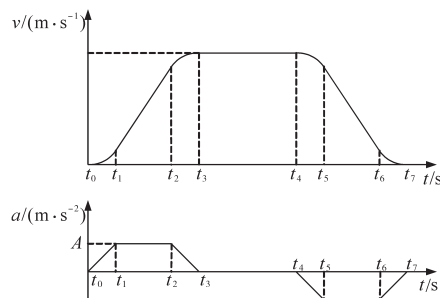


图1 S曲线加减速过程示意图

Fig.1 Schematic for the acceleration and deceleration process of S-shaped curve

**基金项目:**中国机械设备工程股份有限公司科技成果转化项目(CMEC-KJZH-2018-02)

**作者简介:**郑剑(1987—),男,硕士,工程师,Email:aidy Zheng@163.com

由图1可知,S曲线分为起始圆弧段( $t_0-t_1$ 或 $t_4-t_5$ )、匀加速段( $t_1-t_2$ 或 $t_5-t_6$ )和终止圆弧段( $t_2-t_3$ 或 $t_6-t_7$ )。其中起始圆弧和终止圆弧段为变加速过程;匀加速段为恒加速过程。S曲线减速过程与加速过程类似,下面只描述加速过程的表达式。

加速度  $a(t)$  表达式如下:

$$a(t) = \begin{cases} J(t-t_0) & t_0 \leq t < t_1 \\ A & t_1 \leq t < t_2 \\ A - J(t-t_2) & t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$J(t) = \begin{cases} J & t_0 \leq t < t_1 \\ 0 & t_1 \leq t < t_2 \\ -J & t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $J$ 为加速度的变化率; $A$ 为匀加速段的加速度。

速度  $v(t)$  表达式如下:

$$v(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} J t^2 & t_0 \leq t < t_1 \\ \frac{1}{2} J t_1^2 + A(t-t_1) & t_1 \leq t < t_2 \\ \frac{1}{2} J t_1^2 + A(t_2-t_1) + A(t-t_2) - \frac{1}{2} J(t-t_2)^2 & t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (3)$$

PLC为离散控制器,需要将连续方程式(2)、式(3)转化为差分方程后使用。式(3)的微分形式为  $dv(t) = a(t)dt$ ,离散化得到下式:

$$v(n) = v(n-1) + a(n) [t(n) - t(n-1)] \quad (4)$$

设置  $T_A$  为PLC扫描周期,则有:

$$v(n) = v(n-1) + a(n) \times T_A \quad (5)$$

同理公式(1)离散化结果如下:

$$a(n) = a(n-1) + J(n) \times T_A \quad (6)$$

### 1.2 S曲线程序块引脚规划

为方便程序的移植,这里采用SCL语言编写S曲线程序块。程序块需在固定周期中断任务中调用。扫描周期  $T_A$  通过输入引脚手动输入或采用系统RUNTIME块处理得到。

图2为S曲线程序块结构图。图2中,采用工程技术人员习惯使用的加减速时间和圆弧时间作为描述S曲线运行过程的输入引脚。其中TU为加速时间  $T_U$  输入引脚,TD为减速时间  $T_D$  输入引脚,TRU为加速时的圆弧时间  $T_{RU}$  输入引脚,TRD为减速时的圆弧时间  $T_{RD}$  输入引脚,NRM为速度标么值  $N_{RM}$  输入引脚,LU和LL分别为速度输出的上限值  $L_U$  和下限值  $L_L$  输入引脚。

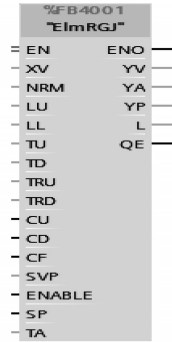


图2 S曲线程序块结构图

Fig.2 Structure for the program block of S-shaped curve

根据工程应用需要,S曲线程序块有几种模式可选择,按优先级从高到低的顺序依次为ENABLE,S,CF,CU,CD模式。其中ENABLE=1为程序块使能;S=1为将速度输出  $Y_V$  置为输入速度  $X_V$ ;CF=1为输出  $Y_V$  对设定  $X_V$  积分;CU=1为输出  $Y_V$  对  $L_U$  积分;CD=1为输出  $Y_V$  对  $L_L$  积分。

输出引脚主要有速度输出YV、加速度输出YA、最小停车距离L、运行距离YP及程序块故障输出QF输出引脚。

### 1.3 S曲线编程实现

S曲线程序块编程步骤如下:

1)判断输入参数的合法性。

2)根据  $T_U, T_D, T_{RU}, T_{RD}$  的输入值计算加速度和加速度的斜率。当  $T_U=0$  或  $T_D=0$  时,加速过程或减速过程完全为圆弧过程,即文献[2]中的五段S曲线,加速度曲线为三角形;当  $T_{RU}=0$  或  $T_{RD}=0$  时,为匀加速或匀减速过程,即文献[3]中梯形速度曲线,加速度曲线为矩形。

3)根据模式输出,选择积分速度输入。

4)根据速度和加速度方向,选择  $A$  和  $J$ ,伪代码如表1所示。

表1 加速度选择伪代码

Tab.1 Pseudocode of accelerated speed selection

Algorithm 1:

```

1:  $A_U := N_{RM} / (T_U + T_{RU}); //$ 升速时加速度
2:  $R_U := A_U / T_{RU}; //$ 升速时加速度的加速度
3:  $A_D := N_{RM} / (T_D + T_{RD}); //$ 降速时加速度
4:  $R_D := A_D / T_{RD}; //$ 降速时加速度的加速度
5: IF ( $dV >= 0$ ) THEN //正向加速 or 反向减速 or 匀速
6:    $A := A_U;$ 
7:    $J := R_U;$ 
8: ELSE //正向减速 or 反向加速
9:    $A := A_D;$ 
10:   $J := R_D;$ 
11: END_IF;
12:  $A_{up} := A; //$ 加速度上限
13:  $A_{dn} := -1.0 * A; //$ 加速度下限
    
```

5)加速度限幅:加速度上限值 $A_{up}=A$ ,加速度下限值 $A_{dn}=-A$ 。

6)判断终止圆弧拐点:速度变化过程中,实时计算起始圆弧速度累计变化量 $dV_j=|A| \cdot \Delta t$  (2J)。以 $Y_V-X_V=dV_j$ 作为终止圆弧的起点,可以确保起始圆弧与终止圆弧对称。计算过程伪代码如表2所示。

表2 圆弧拐点判断伪代码

Tab.2 Pseudocode of arc inflection point judgment

```

Algorithm 2:
1:dVj=|A|*Δt(2J);//起始圆弧速度变化量
2:IF e_V<dVj THEN//圆弧拐点判断
3:  NEG:=TRUE;
4:ELSE
5:  NEG := FALSE;
6:END_IF;
7:IF e_V=0.0 THEN
8:  A_INC:=0.0;//匀速
9:ELSEIF NEG=FALSE THEN
10:  A_INC:=J;//加速度累加
11:  ELSE
12:  A_INC:=-1*J;//加速度累减
13:END_IF;
    
```

7)按照式(6),每个扫描周期对加速度进行更新。加速度到达限幅时,停止更新。

8)按照式(5),每个扫描周期对速度更新。速度到达限幅时,停止更新。

9)计算并输出加速度:

$$Y_A = dv/dt = (Y_V - Y_{V\_old})/T_A$$

式中: $Y_{V\_old}$ 为上周期的 $Y_V$ 输出。

10)计算最短停车距离 $L$ 和运行距离 $Y_P$ 。

在S7-1500 PLC中完成S曲线程序块的编写,封装的程序块如图2所示。在PLC中以5ms扫描周期调用程序块,采用ibaPAD软件进行曲线记录,采样周期为10ms。

程序块S曲线阶跃输入响应曲线如图3所示,其中V1\_OUT为速度输出曲线,YA1为加速度曲线。

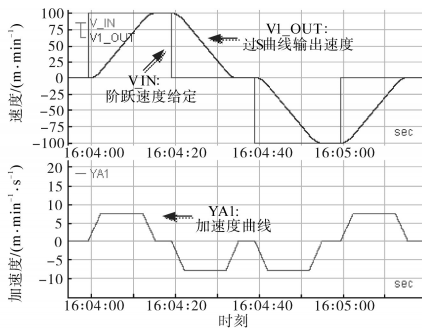


图3 S曲线阶跃输入响应

Fig.3 Step input response of S-shaped curve

## 2 S曲线的应用

### 2.1 动态惯量补偿

用电机拖动如张力辊、卷取机等刚体做旋转运动时,在加、减速过程中,为确保被控对象对速度给定的跟随性能,需要按下式对旋转的控制对象进行惯量补偿:

$$M = I \cdot a_\omega = I \cdot a_v / r \quad (7)$$

其中

$$a_\omega = d\omega/dt$$

$$a_v = dv/dt$$

式中: $M$ 为需要补偿的转矩, $N \cdot m$ ;  $I$ 为转动惯量, $kg \cdot m^2$ ,可以根据实际拖动对象的形状和材质直接积分计算得到; $a_\omega$ 为角加速度, $rad/s^2$ ;  $a_v$ 为线加速度, $m/s^2$ ;  $r$ 为转动半径, $m$ ;  $\omega$ 为角速度, $rad/s$ ;  $v$ 为线速度, $m/s$ 。

实际工程项目中,通常按照实际生产工艺要求对拖动对象进行加、减速运动测试,再根据实测转矩的百分数折算惯量补偿值。

图4为现场某张力辊从45 m/min加速到190 m/min的速度、电机额定转矩百分比曲线。其中转矩曲线中位置①和位置③分别为低速和高速时的摩擦转矩,位置②和位置①的差值为需要补偿的加速转矩 $M_{nor}$ 。

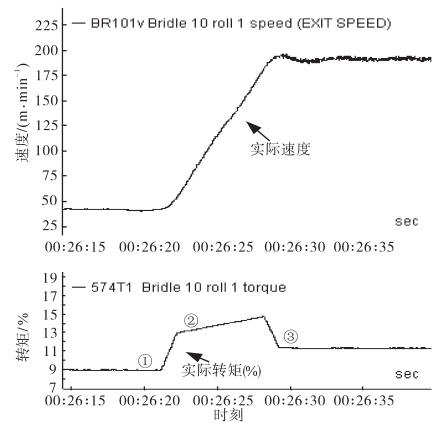


图4 速度、转矩曲线

Fig.4 Curves of the speed and torque

生产运行过程中按照下式进行动态惯量补偿:

$$M = M_{nor} \cdot YA/YA_{nor} \cdot M_e \quad (8)$$

式中: $YA_{nor}$ 为惯量测量时的加速度; $YA$ 为生产时S曲线程序块输出的实际加速度; $M_e$ 为电机额定转矩。

在惯量测量时,应进行多点多次测量,取平均值应用。

## 2.2 S曲线串联

S曲线的串联广泛应用于工程项目中。例如在连续带钢处理线中,出口段速度给定为工艺段S曲线输出速度叠加冲、放套速度,出口段速度相当于两级S曲线串联。这里,采用两个S7-1500 PLC进行试验。PLC1中运行 $S_1$ 曲线,PLC2中运行两个加减速参数相同的曲线 $S_2$ 和 $S_{12}$ 。同时给 $S_1$ 和 $S_2$ 阶跃速度输入,将 $S_1$ 输出速度 $V1\_OUT$ 通过以太网通信传输给PLC2,作为 $S_{12}$ 曲线的速度输入。下面讨论不同斜率S曲线的输出响应特性。

$T_{U1} < T_{U2}$  串联曲线如图5所示。高斜率 $S_1$ 曲线串联低斜率 $S_{12}$ 曲线,即加速时间 $T_{U1} < T_{U2}$ 时,串联后的输出响应与单独调用 $S_2$ 曲线的效果一致。由图5可知, $S_1$ 曲线的加速时间 $T_{U1}=5$  s,圆弧时间 $T_{RU1}=1$  s, $S_2$ 和 $S_{12}$ 曲线的加速时间 $T_{U2}=10$  s,圆弧时间 $T_{RU2}=1$  s。串联后 $S_{12}$ 的速度输出曲线 $V12\_OUT$ 与 $S_2$ 输出曲线 $V2\_OUT$ 重合,串联后 $S_{12}$ 的加速度 $YA_{12}$ 与 $S_2$ 的加速度 $YA_2$ 相等。

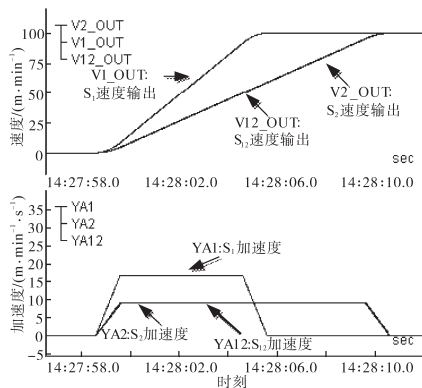


图5  $T_{U1} < T_{U2}$  串联曲线

Fig.5 Series connection curves with  $T_{U1} < T_{U2}$

低斜率 $S_1$ 曲线串联高斜率 $S_{12}$ 曲线时,即加速时间 $T_{U1} > T_{U2}$ 时。由于 $S_{12}$ 的速度和加速度受到 $S_1$ 的加速度限制, $S_{12}$ 始终处于变加速过程。串联后的速度输出曲线 $V12\_OUT$ 跟随低加速度 $S_1$ 曲线的速度输出,但加速度 $YA_{12}$ 与 $S_1$ 、 $S_{12}$ 曲线的加速度变化率 $J_1$ 、 $J_2$ 的大小有关。 $J_2$ 相对 $J_1$ 越大时, $S_{12}$ 的圆弧时间越短, $S_{12}$ 的输出速度曲线 $V12\_OUT$ 对 $S_2$ 的输出曲线 $V2\_OUT$ 跟随性越好,但加速度 $YA_{12}$ 以 $YA_2$ 为基准线波动越明显。

图6为 $J_1 < J_2$ 时积分器串联的响应曲线,其中 $T_{U1}=10$  s, $T_{RU1}=1$  s, $T_{U2}=5$  s, $T_{RU2}=0.1$  s。当 $J_2$ 相对 $J_1$ 越小时, $S_{12}$ 的圆弧时间越长, $V12\_OUT$ 滞后 $V2\_OUT$ 越多,但 $YA_{12}$ 曲线相对平滑。图7为 $J_1 > J_2$ 时积分器串联的响应曲线,其中 $T_{U1}=10$  s, $T_{RU1}=1$  s, $T_{U2}=5$  s,

$T_{RU2}=1$  s。由于圆弧时间越短,加减速过程对设备的瞬时冲击越大,工程应用中应根据设备的承受能力选择合适的 $J_1$ 、 $J_2$ 值以满足生产工艺要求。

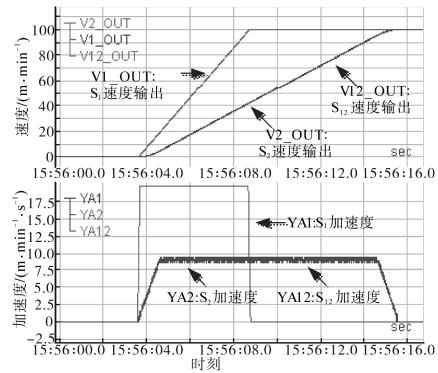


图6  $J_1 < J_2$  串联曲线

Fig.6 Series connection curves with  $J_1 < J_2$

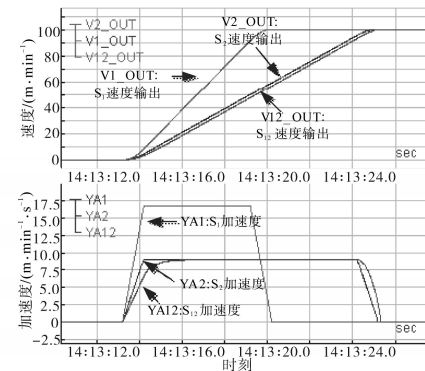


图7  $J_1 > J_2$  串联曲线

Fig.7 Series connection curves with  $J_1 > J_2$

## 2.3 定位停车

工程项目中,经常需要准确定位停车。这就需要知道S曲线从当前速度按照给定斜率降到零速需要运行的距离 $L$ 。程序块按照下式计算停车距离:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (9)$$

其中

$$L_3 = (J \times T_{RD}^3) / 6$$

$$L_2 = [J \times T_{RD} \times TD \times (T_{RD} + TD)] / 2$$

$$L_1 = J \times T_{RD}^2 \times (T_U + 1) / 2$$

当 $N_{RM}$ 单位为m/s时,输出 $L$ 单位为m;当 $N_{RM}$ 单位为m/min时,输出 $L$ 除以60后单位为m。

$L$ 为按照S曲线斜率至少需要预留的停车距离。多级S曲线串联应用时,取最长单级S曲线的停车距离 $L$ 做定位控制。定位时从 $L+d_L$ 的位置开始启动定位停车程序, $d_L$ 为停车余量。给定速度 $V$ 按下式计算:

(下转第80页)



参考文献

[1] 高立艾,霍利民,黄丽华,等. 基于贝叶斯网络时序模拟的含微网配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7):2033-2040.

[2] 谢荣彬,夏关荣,李江涛,等. 基于EMTP-ATP的风力发电电机雷电电磁暂态特性分析[J]. 电力大数据, 2019, 22(8): 60-66.

[3] 李生民,何欢欢,胡丁尹. 基于PSCAD的双馈风力发电系统DTC策略研究[J]. 电气传动, 2013, 43(4):61-65.

[4] 王晓蔚,石振刚,杨潇,等. 基于PSASP的短路计算分析[J]. 电气传动自动化, 2010, 32(2):57-60.

[5] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究[J]. 电网技术, 2002, 24(12):1-4.

[6] 马培蓓,吴进华,纪军,等. dSPACE实时仿真平台软件环境及应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4):667-670.

[7] Patrick W. Rapid manufacturing and rapid tooling for metal

parts gain support[J]. Manufacturing Engineering, 2003, 131(5):30-63.

[8] Oh S J, Yoo C H, Chung I Y, et al. Hardware-in-the-loop simulation of distributed intelligent energy management system for microgrids[J]. Energies, 2013, 6(7):3263-3283.

[9] Avedillo M J, Quintana J M, Roldan H P. Increased logic functionality of clocked series-connected RTDS[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2006, 5(5):606-611.

[10] 汤涌. 电力系统全过程动态(机电暂态与中长期动态过程)仿真技术与软件研究[D]. 北京:中国电力科学研究院, 2002.

[11] Jeon J H, Kim J Y, Kim H M, et al. Development of hardware in-the-loop simulation system for testing operation and control functions of microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12):2919-2929.

收稿日期:2019-09-10

修改稿日期:2019-09-24

(上接第72页)

$$V = V_0 \times \frac{L + d_L - L_{act}}{L + d_L} \times k \quad (10)$$

式中:  $V_0$  为降速前的初始速度;  $L_{act}$  为停车程序启动后运行的距离, 可由程序块输出 YP 处理得到;  $k$  为比例调节系数, 用于根据生产工艺要求做变比例调节。

### 3 结论

文中 S 曲线程序块以加速时间和圆弧时间作为输入参数, 符合工程应用习惯。程序块输出实时加速度值和最短停车距离, 方便使用者根据工艺要求进行惯量补偿和定位停车控制。此外, 程序块以 SCL 编程实现, 可以方便地移植到其它支持 SCL 语言的 PLC 中, 也可以编译成 STL 语言后,

移植到支持 STL 的 PLC 中。目前, 该 S 曲线程序块已在多款 PLC 中用于平整机、轧机、连续退火等生产线的速度、张力控制, 并取得良好的效果, 具有较好的参考和实用价值。

参考文献

[1] 朱晓春, 屈波, 孙来业, 等. S 曲线加减速控制方法研究[J]. 智能控制技术, 2006, 35(23):38-40.

[2] 郑仲谦, 王兴飞, 李松, 等. 基于加减速时间控制的 S 形速度规划新算法研究[J]. 2014, 31(4):425-430.

[3] 陈宝罗, 胡鹏飞. 加减速算法分析及优化软件的设计[J]. 电子元器件应用, 2008, 10(5):74-77.

收稿日期:2019-10-22

修改稿日期:2019-11-12