

高动态运动控制优化

CamProfile曲线设计及案例分享

内容概览

间歇运动案例分享——瓶灌装机主传动 加减速

曲线参数计算方法

不同曲线的对比

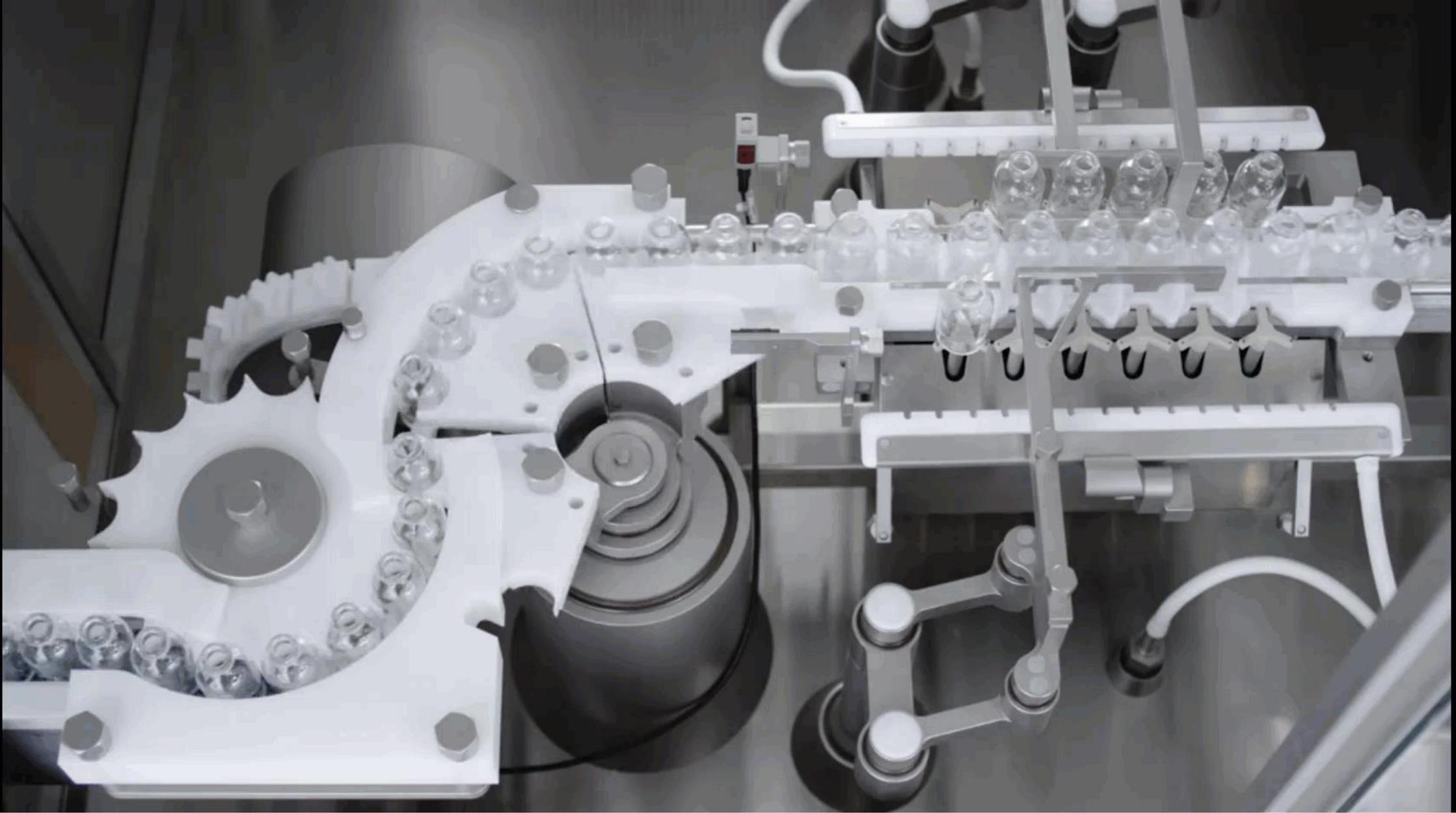
贴标机送标轴运动——徐鹏

前缘送纸机——邱赵煜

贴标机托盘运动曲线——陈辉

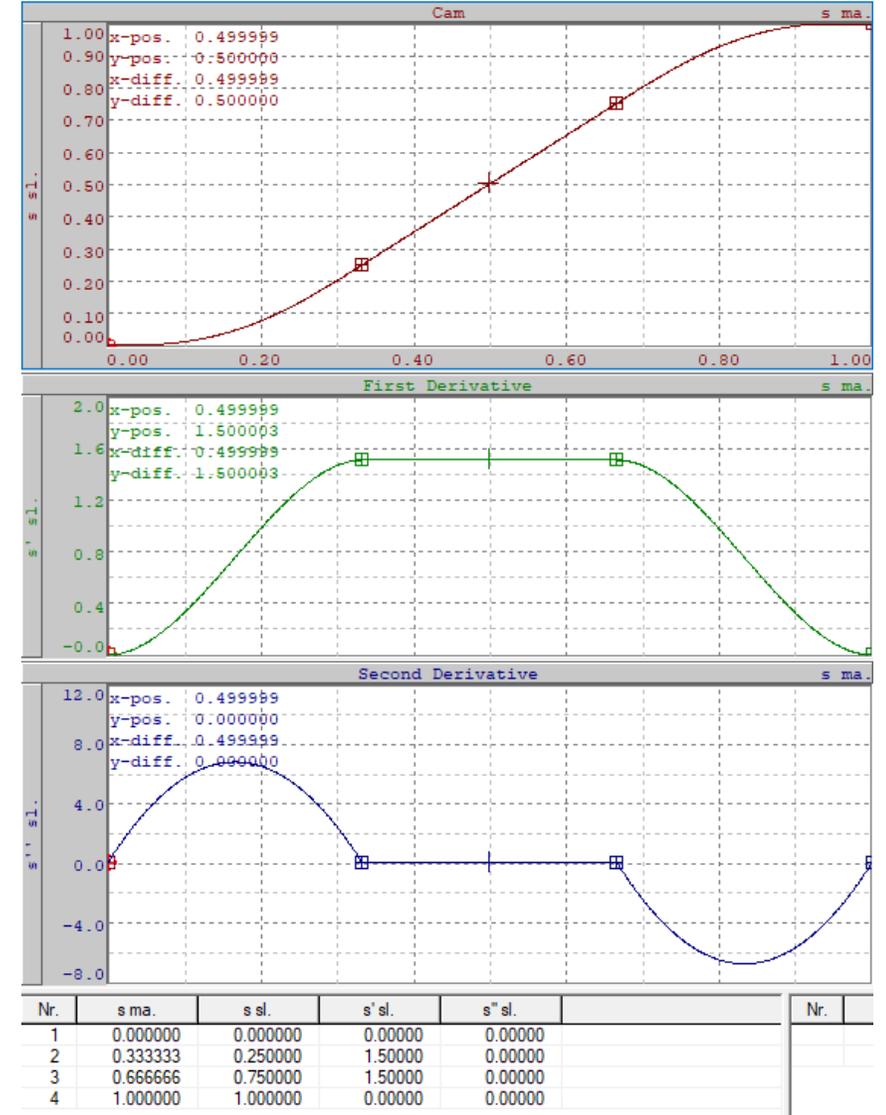
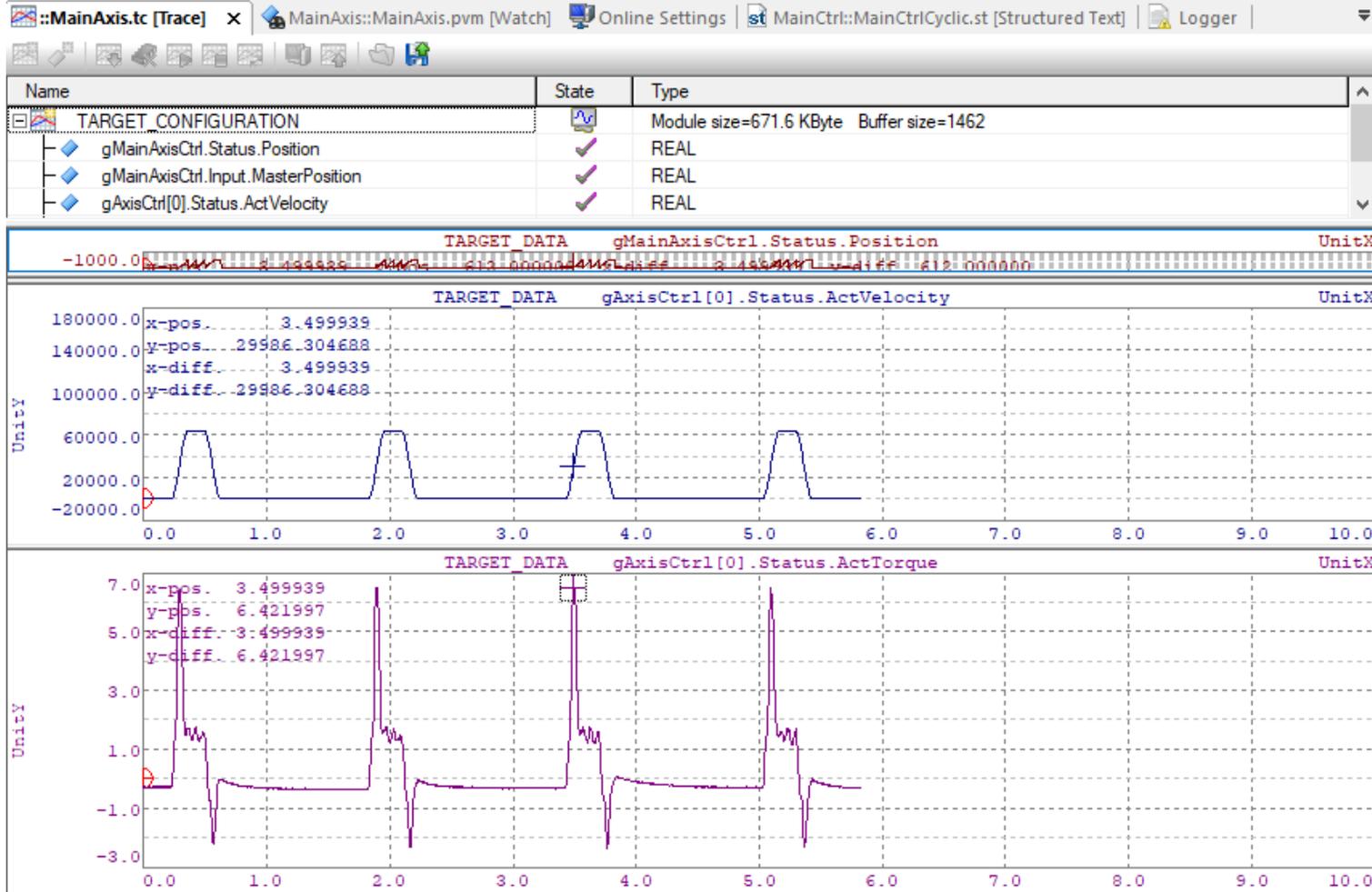
引例

——瓶灌装机主传动



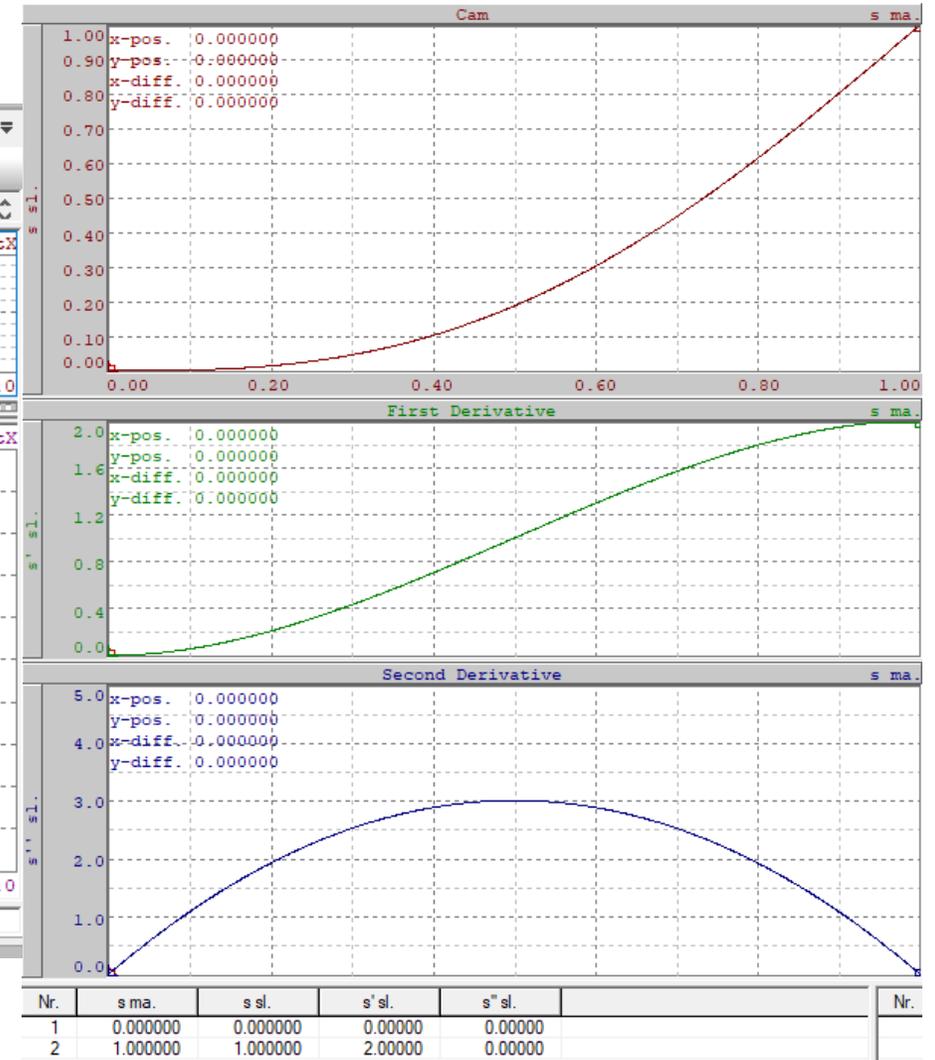
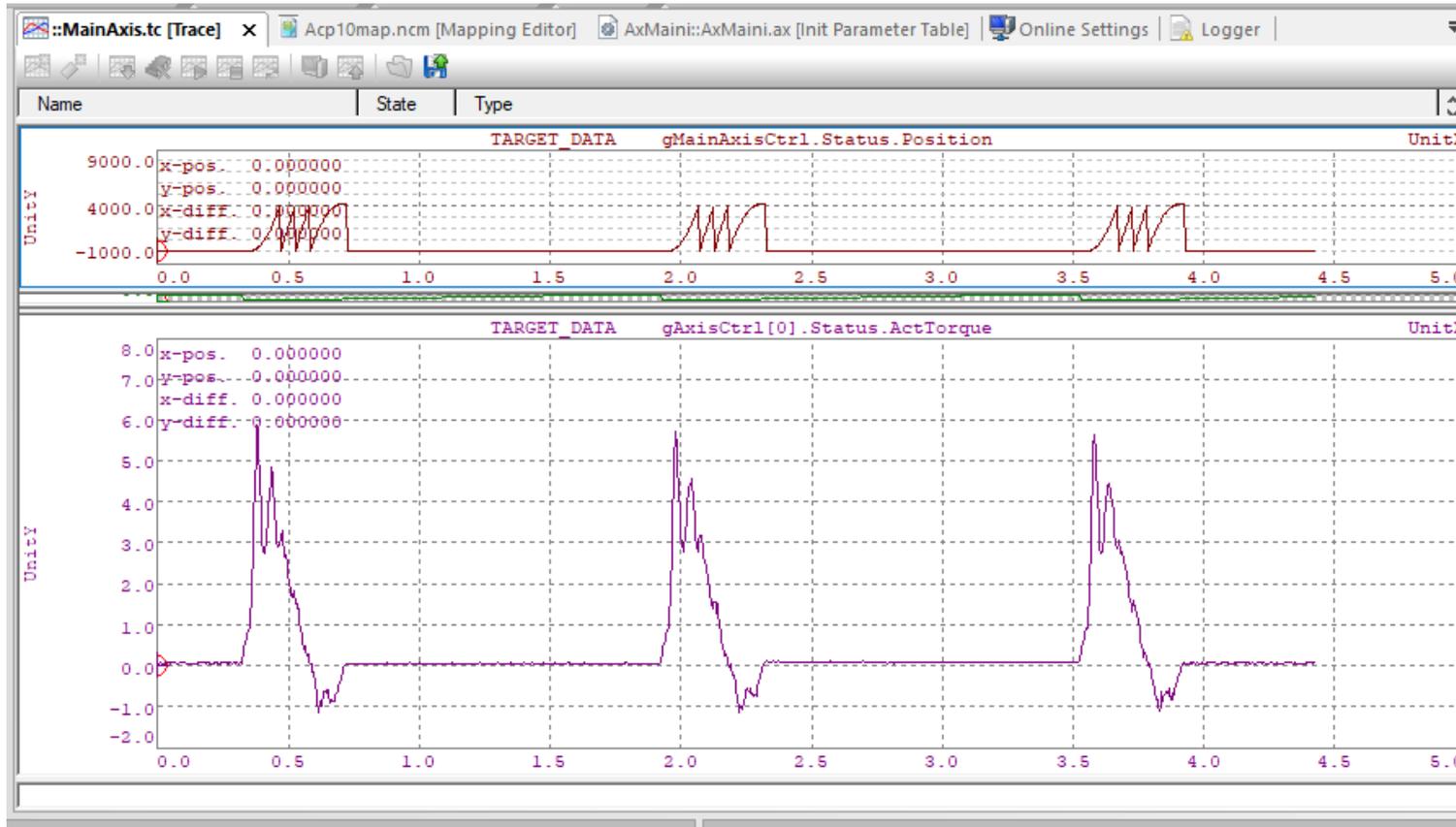
瓶灌装机

150BPM/6.8Nm



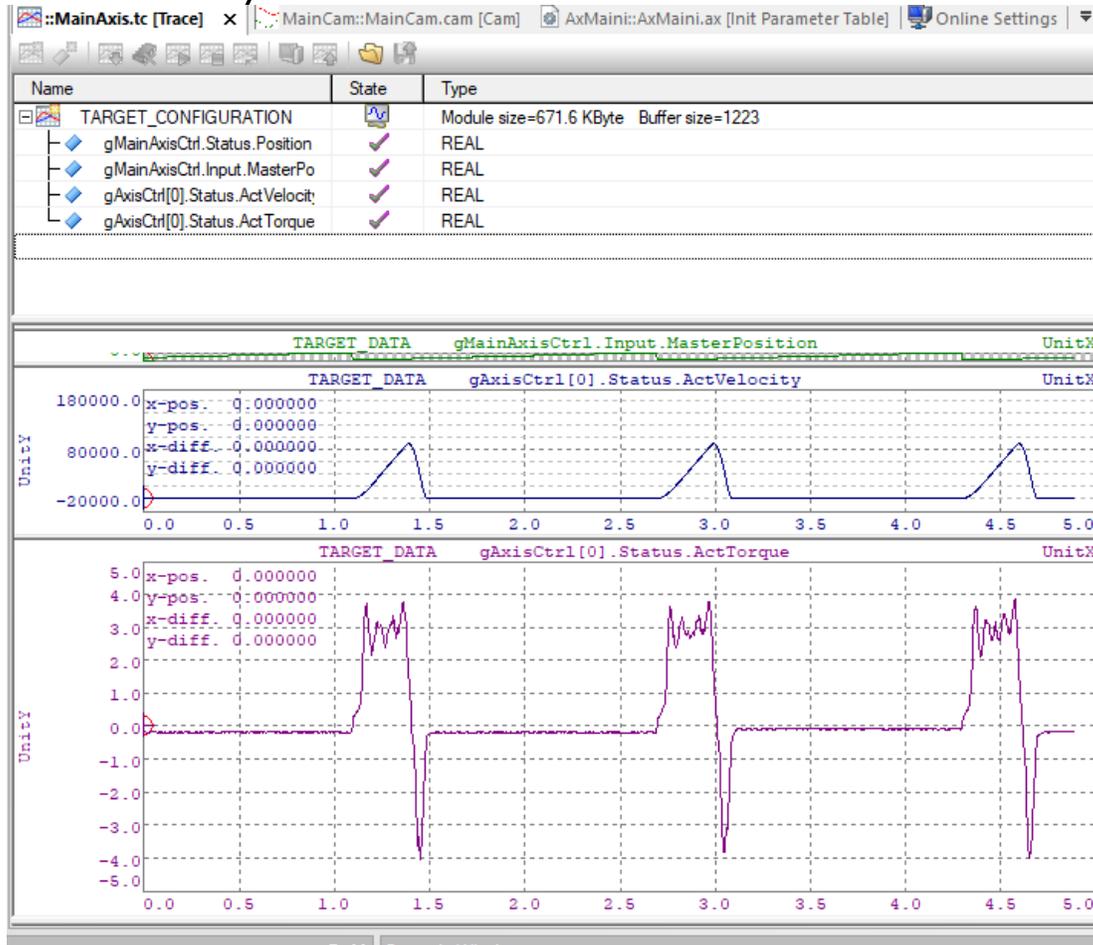
瓶灌装机

150BPM/5.9Nm

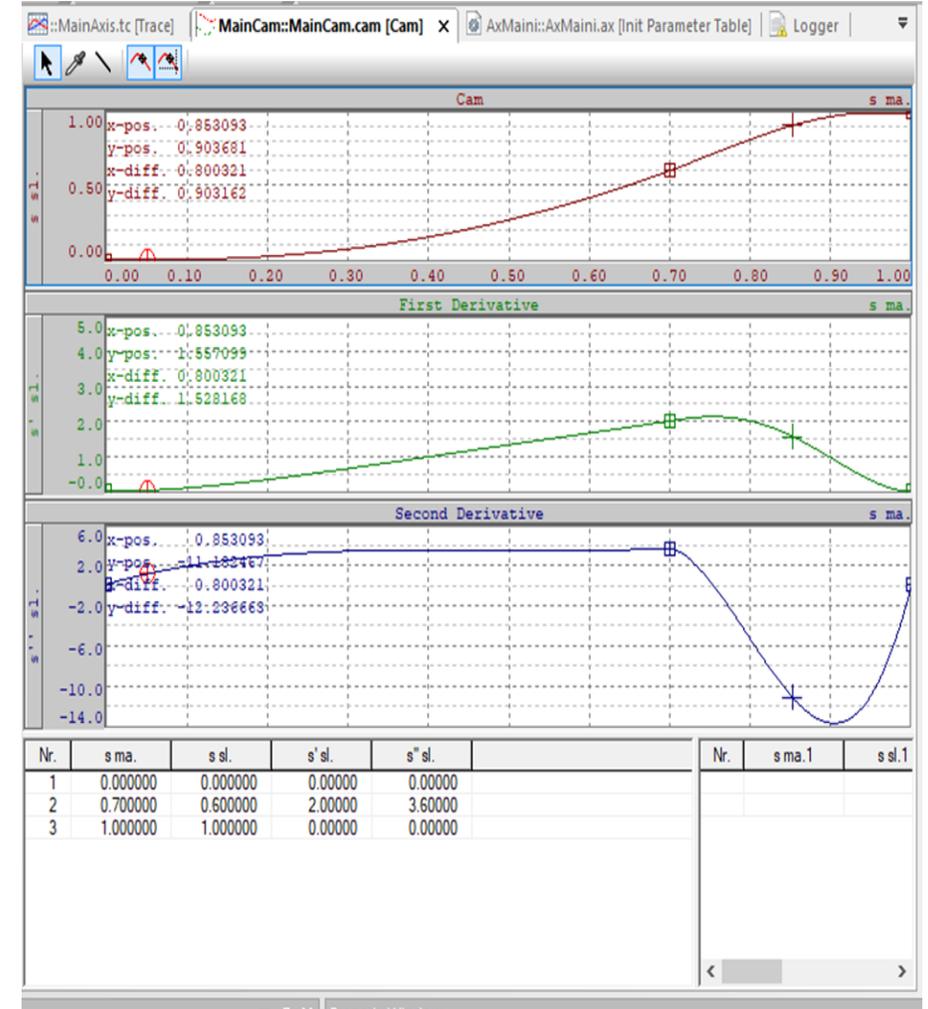


瓶灌装机

150BPM/3.7Nm

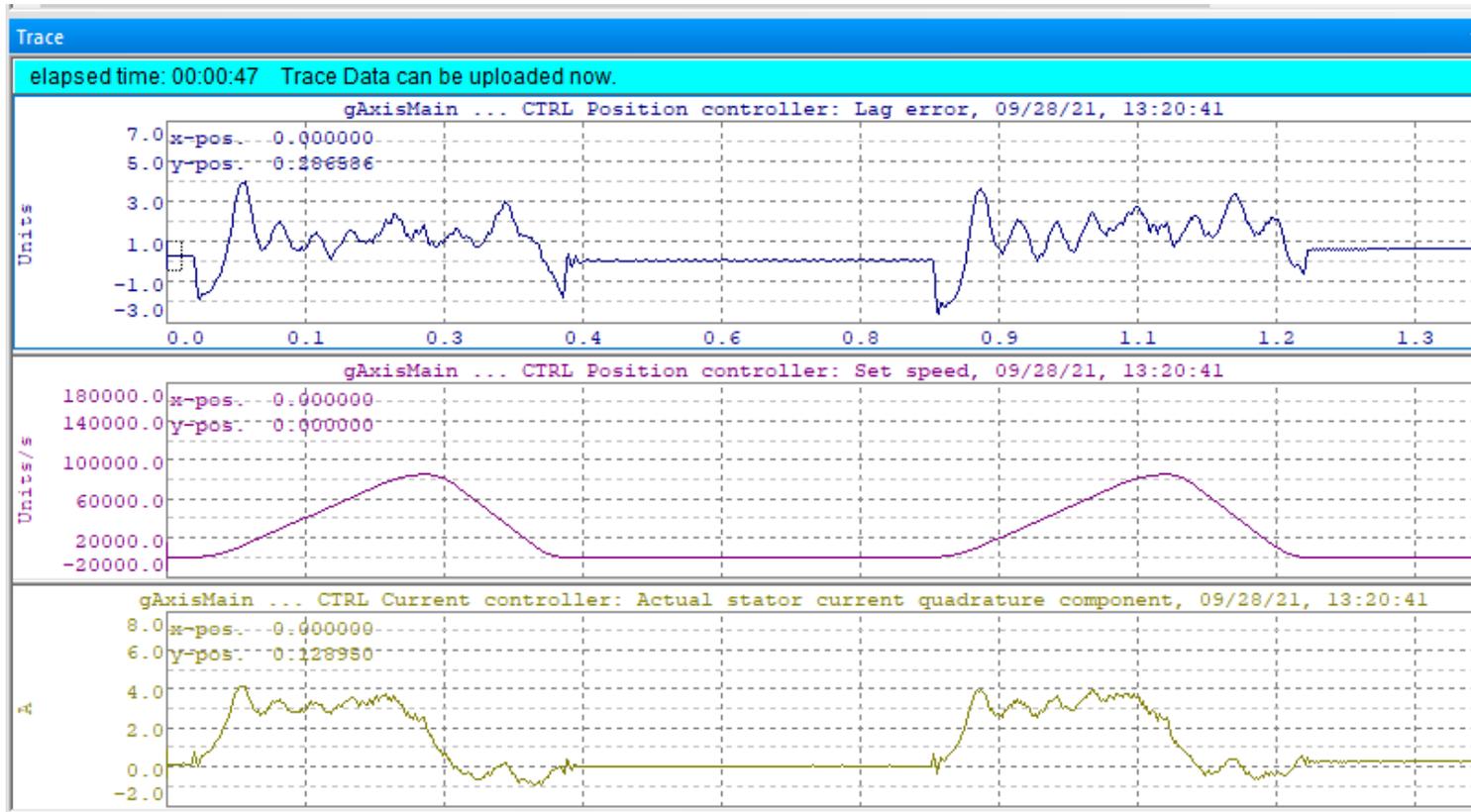


高速下，加速时电流过大

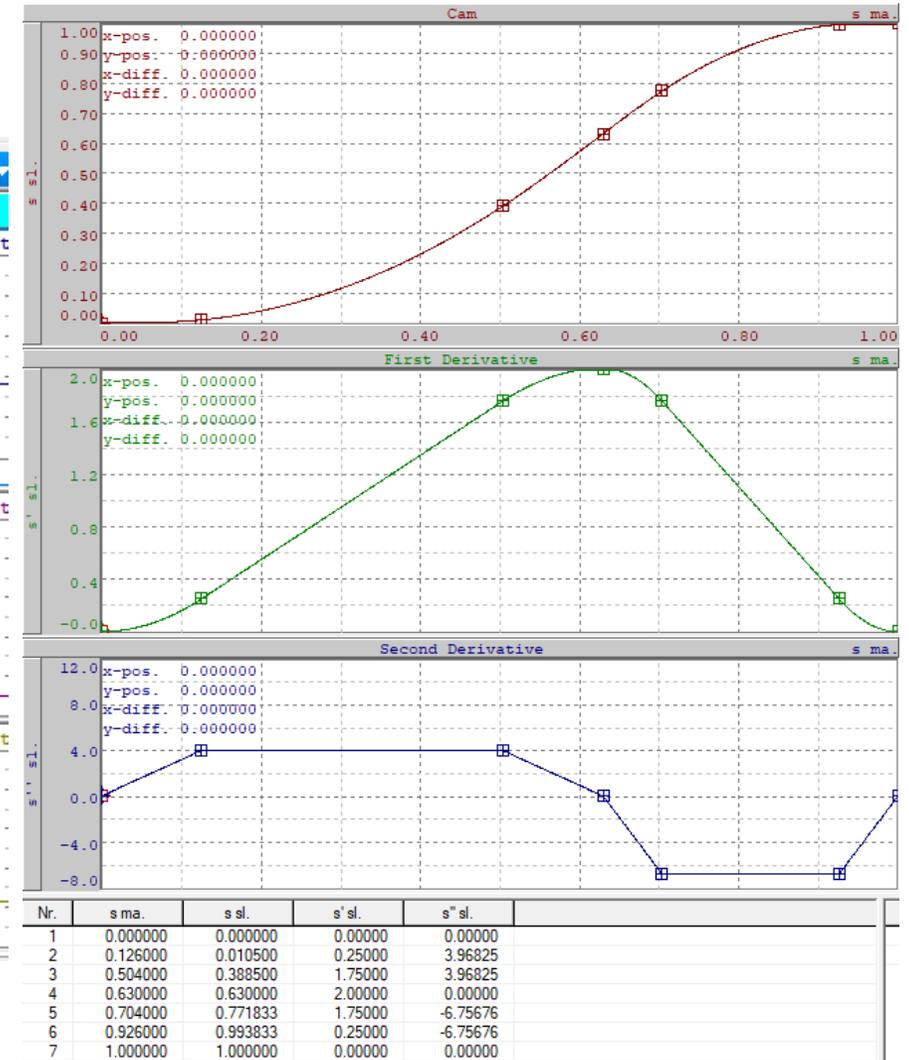


瓶灌装机

280BPM/4.0A/6.6Nm



加速比例63%



分段三次曲线



分段三次曲线 特性

梯形加速曲线

加速完成后速度为2.0



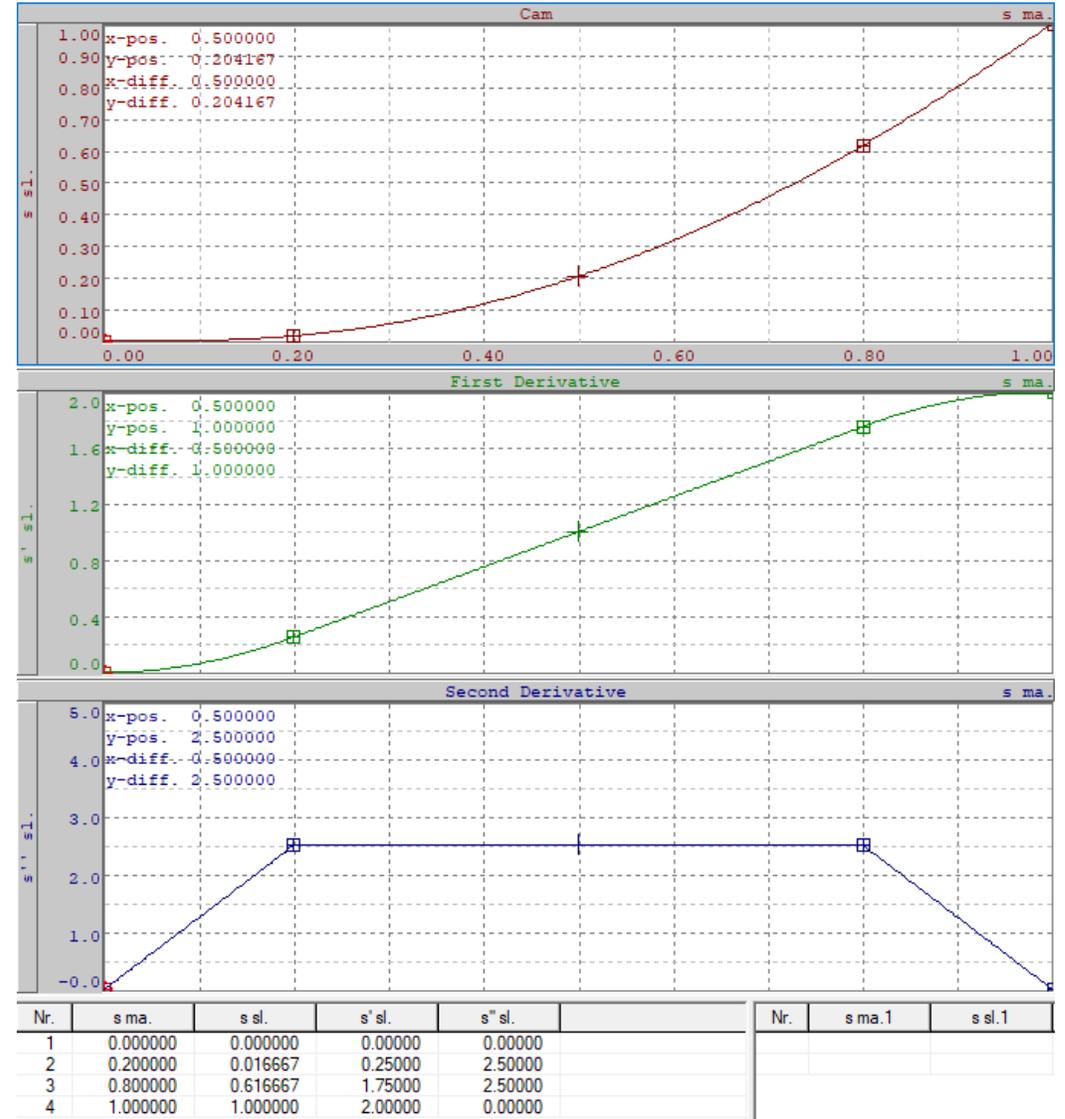
加速度关于 $x=0.5$ 轴对称

速度曲线关于 $x=0.5, v=1.0$ 中心对称

曲线有四个控制点，每个控制点四个参数

(x, y, y', y'') 对曲线有三个约束

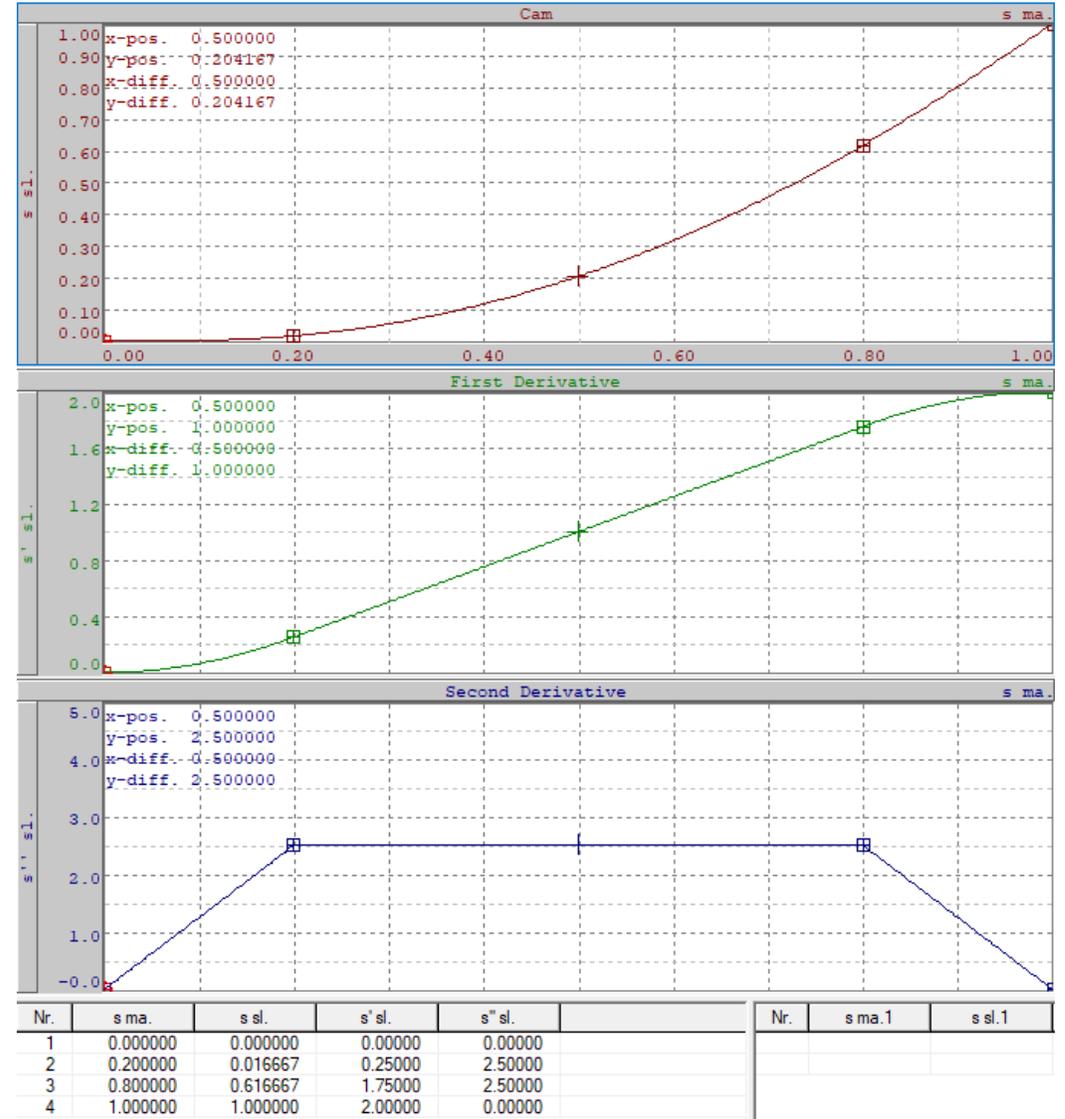
两个点共有六个约束，确定一个5次曲线



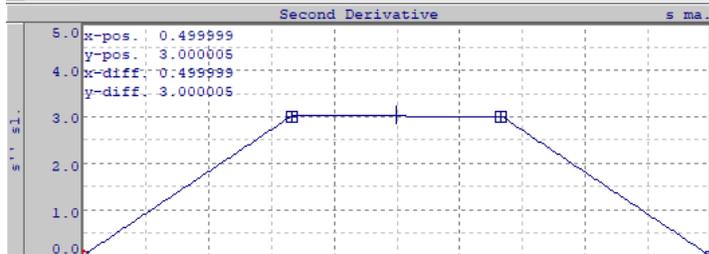
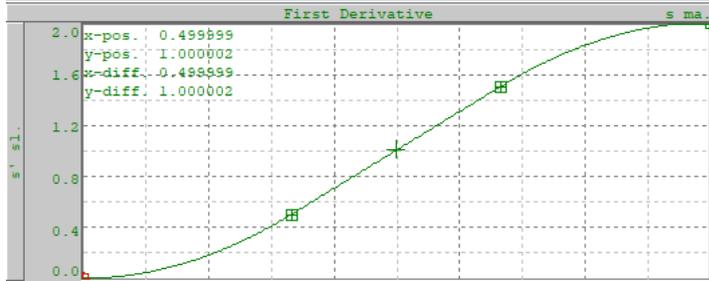
分段三次曲线 参数计算公式

加速度调整段所占的比例 $R_a < 0.5$

x	R_a	$1 - R_a$
y	$\frac{R_a^2}{3(1 - R_a)}$	$\frac{R_a^2}{3(1 - R_a)} + 1 - 2R_a$
y'	$\frac{R_a}{1 - R_a}$	$\frac{2 - 3R_a}{1 - R_a}$
y''	$\frac{2}{1 - R_a}$	$\frac{2}{1 - R_a}$

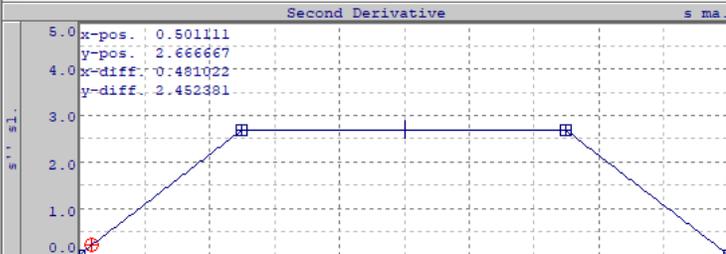
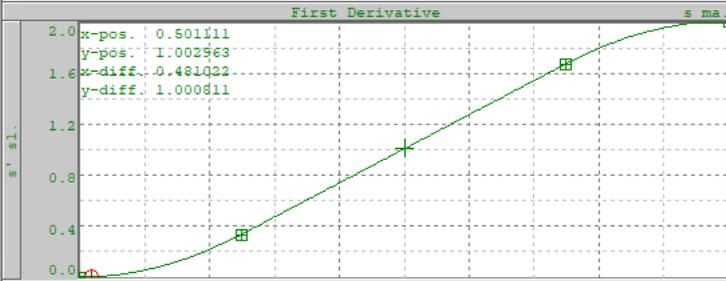
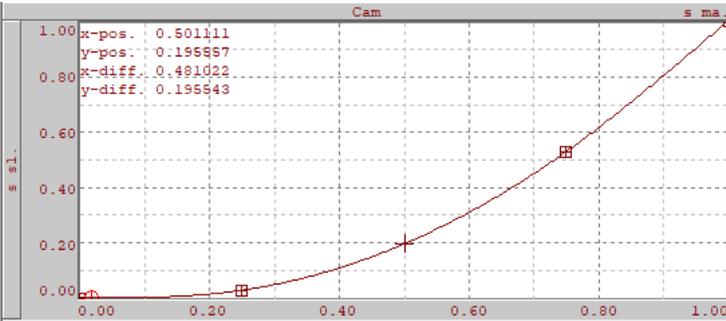


分段三次曲线 实例



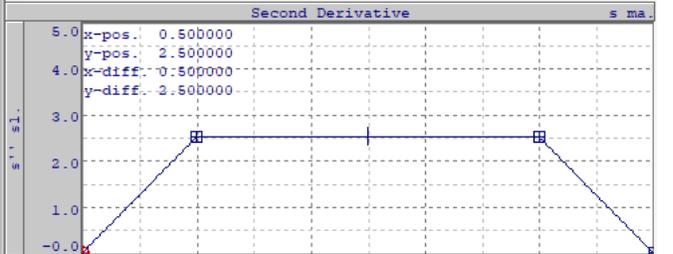
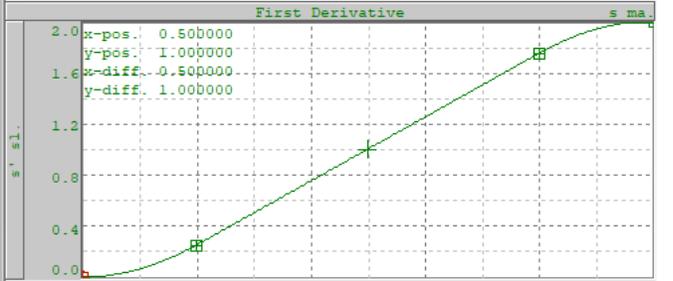
Nr.	s.ma.	s.sl.	s'.sl.	s''.sl.
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.333333	0.055556	0.500000	3.000000
3	0.666666	0.388889	1.500000	3.000000
4	1.000000	1.000000	2.000000	0.000000

$$Ra=1/3 \quad A=3.0$$



Nr.	s.ma.	s.sl.	s'.sl.	s''.sl.
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.250000	0.027778	0.333333	2.666667
3	0.750000	0.527778	1.666667	2.666667
4	1.000000	1.000000	2.000000	0.000000

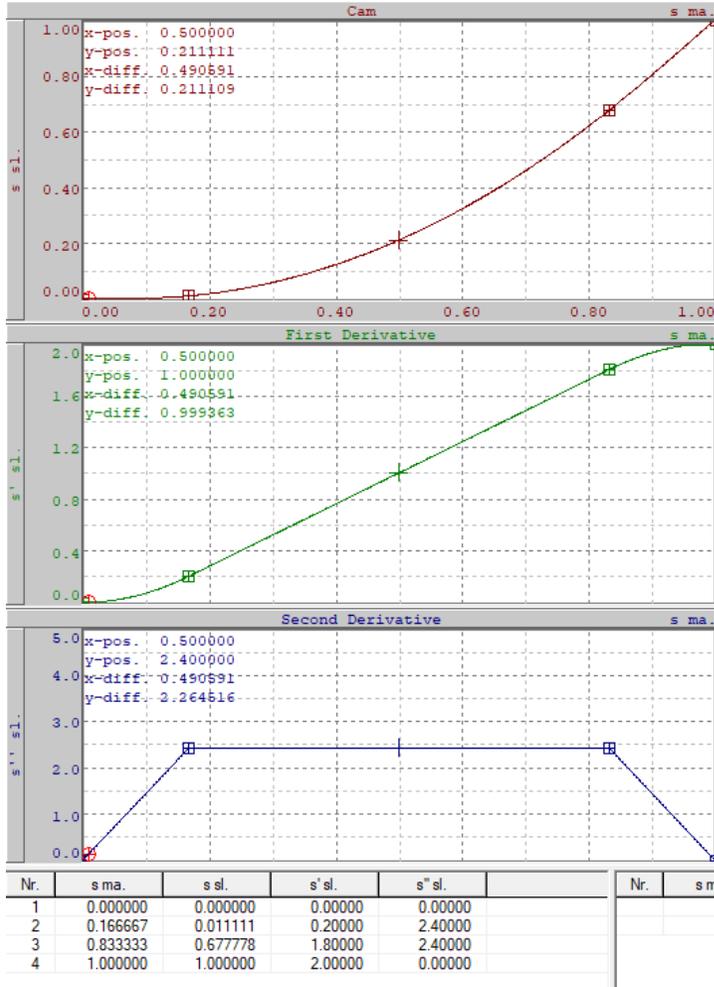
$$Ra=1/4 \quad A=8/3$$



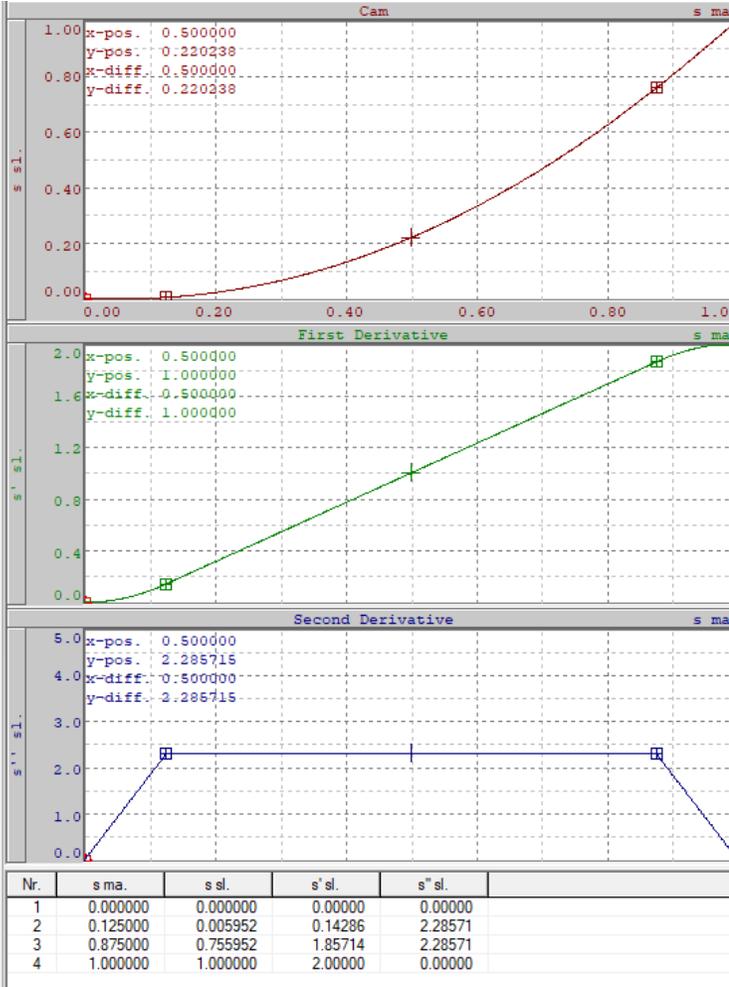
Nr.	s.ma.	s.sl.	s'.sl.	s''.sl.
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.200000	0.016667	0.250000	2.500000
3	0.800000	0.616667	1.750000	2.500000
4	1.000000	1.000000	2.000000	0.000000

$$Ra=1/5 \quad A=2.5$$

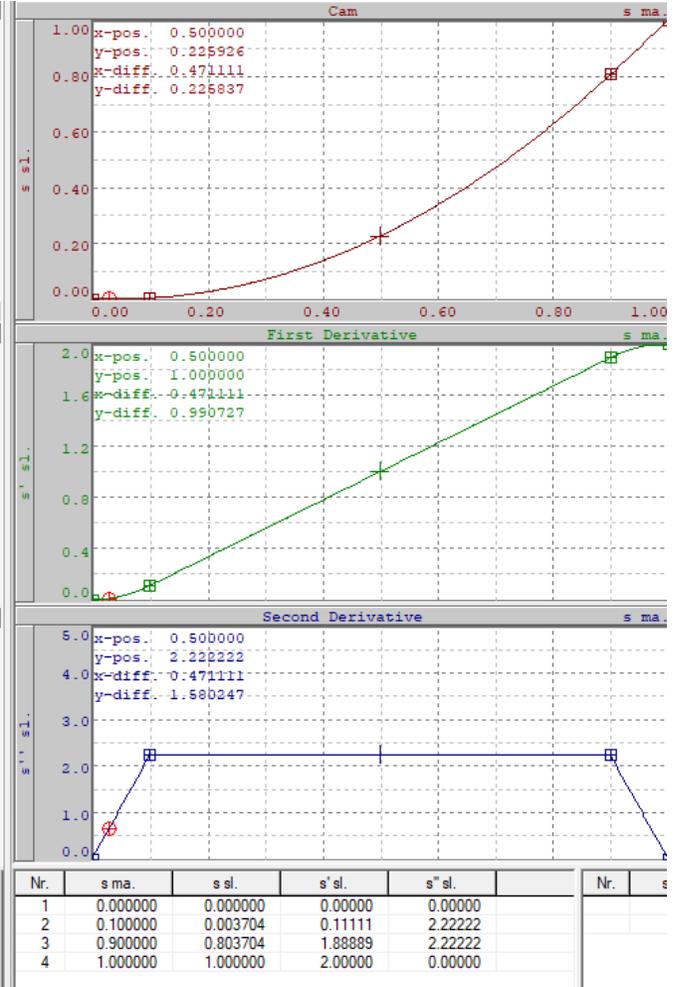
分段三次曲线 实例



$Ra=1/6$ $A=2.4$



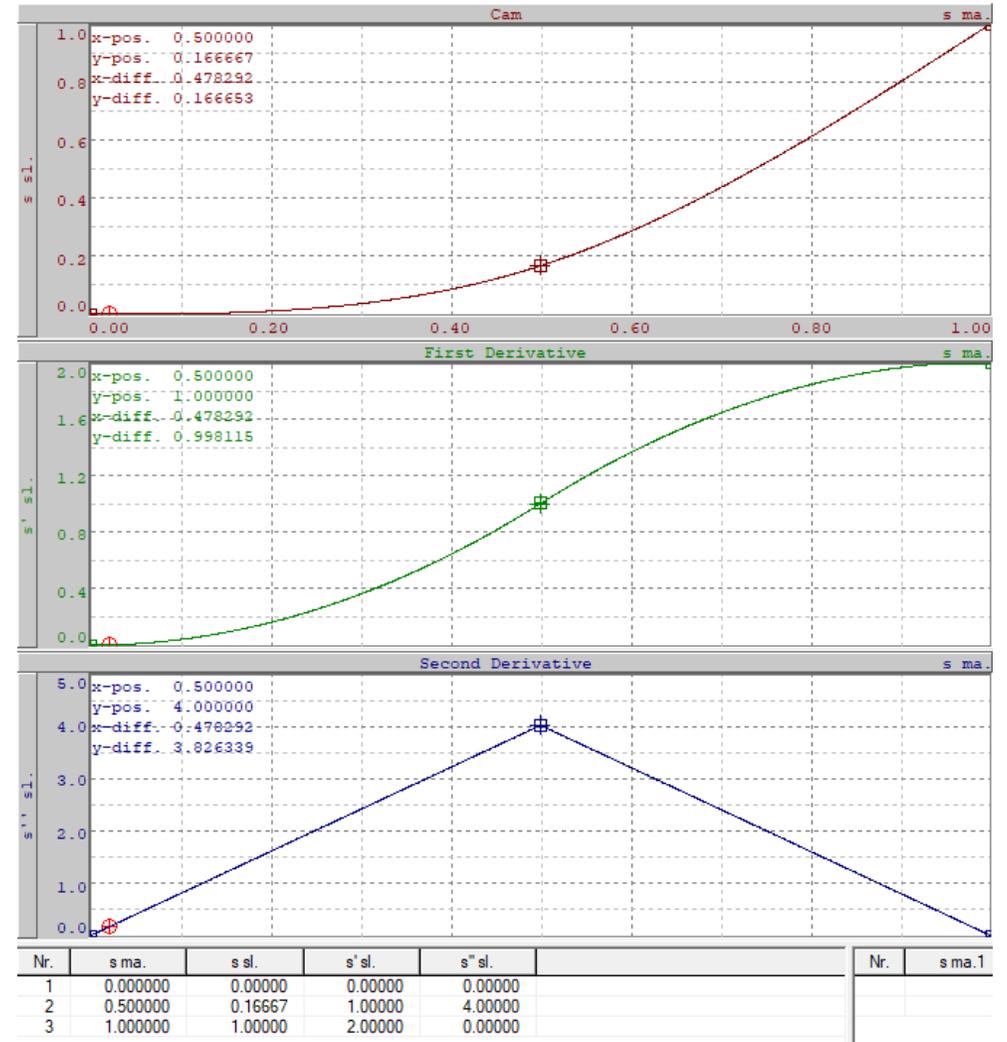
$Ra=1/8$ $A=16/7$



$Ra=1/10$ $A=20/9$

分段三次曲线 实例

Ra=0.5时，曲线与AUTMAT补偿方式的曲线
相同



Ra=0.5 A=4

分段四次曲线



分段四次曲线

特性

加加速曲线为抛物线，过度更平缓

加速完成后速度为2.0

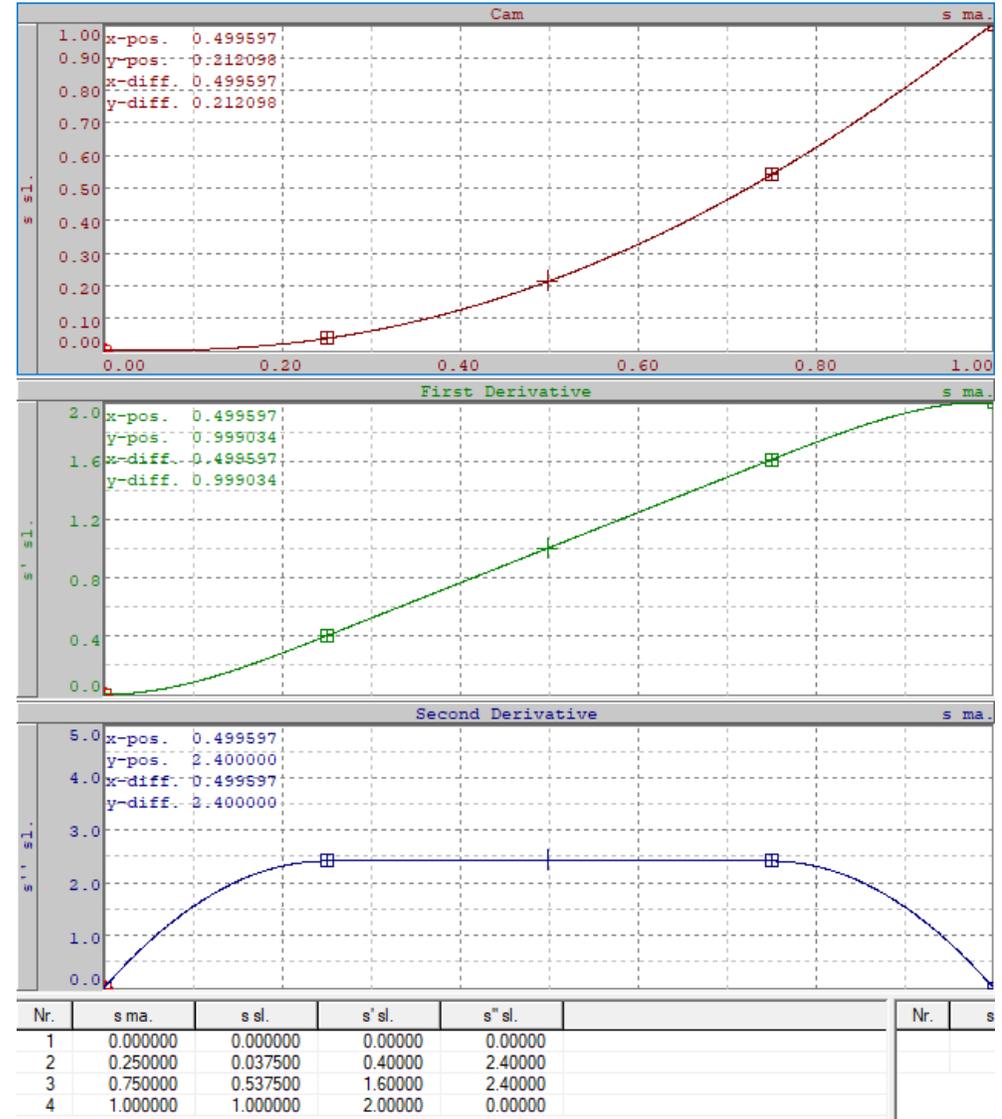
加速度关于 $x=0.5$ 轴对称

速度曲线关于 $x=0.5, v=1.0$ 中心对称

曲线有四个控制点，每个控制点四个参数

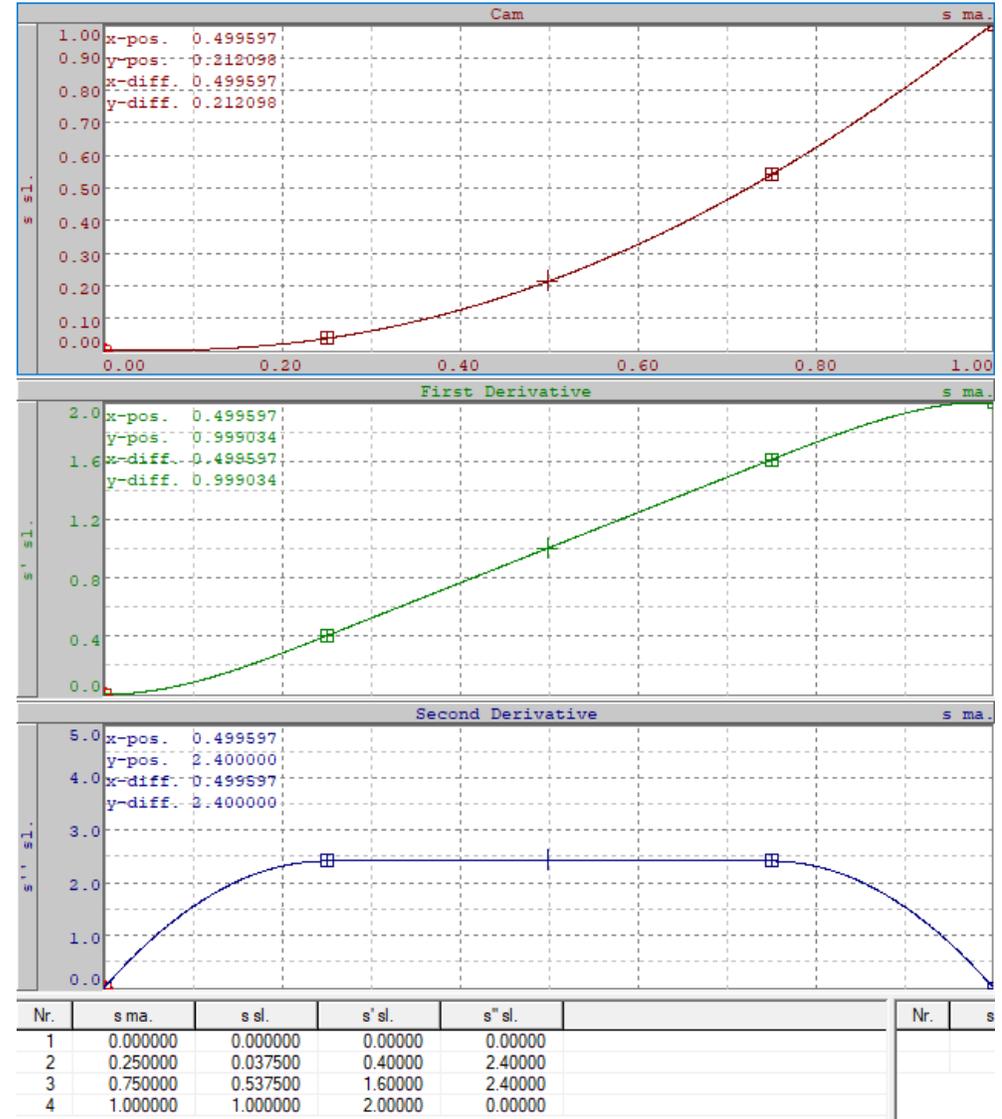
(x, y, y', y'') 对曲线有三个约束

两个点共有六个约束，确定一个5次曲线

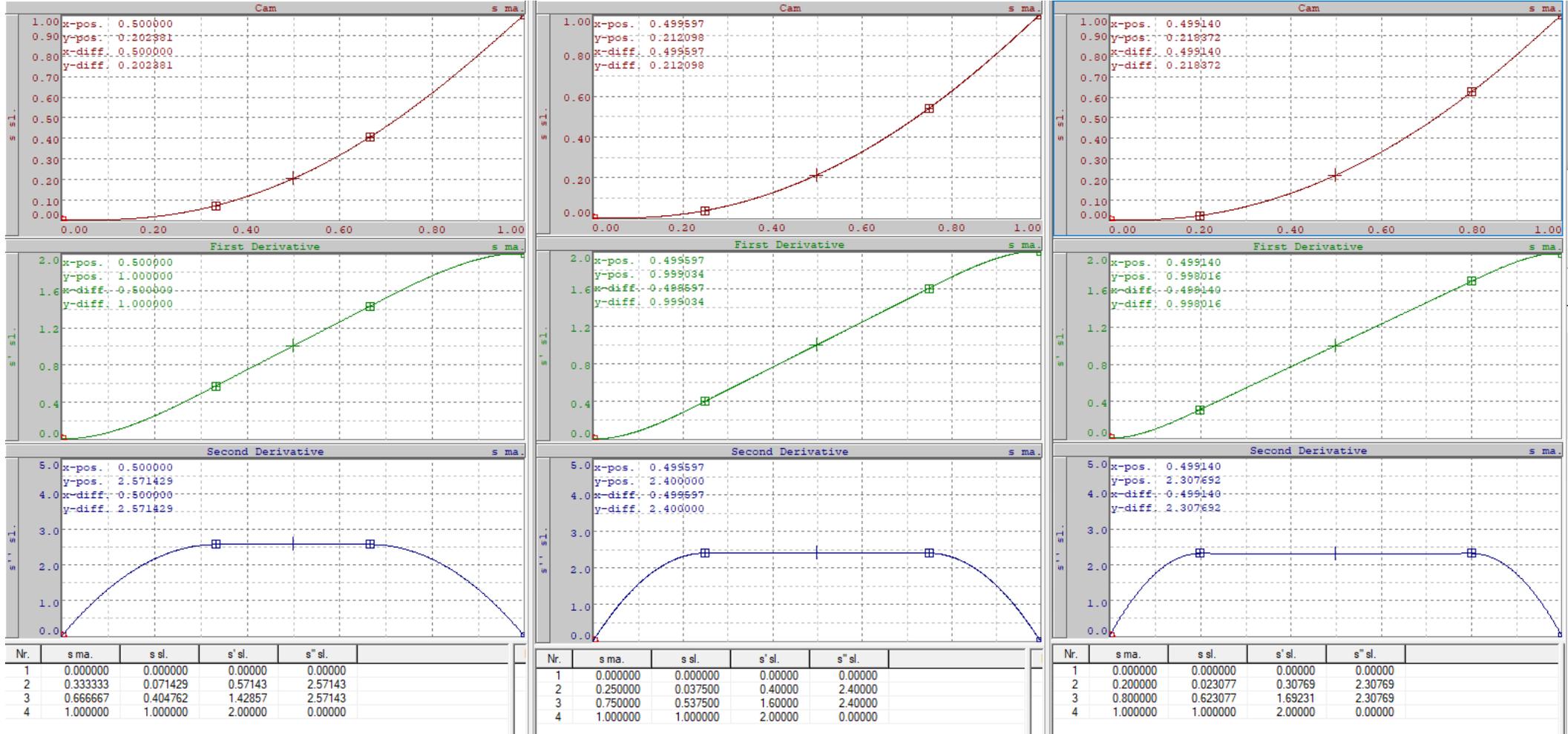


分段四次曲线 参数计算公式

x	R_a	$1 - R_a$
y	$\frac{3R_a^2}{2(3 - 2R_a)}$	$\frac{3R_a^2}{2(3 - 2R_a)} + 1 - 2R_a$
y'	$\frac{4R_a}{3 - 2R_a}$	$\frac{6 - 8R_a}{3 - 2R_a}$
y''	$\frac{6}{3 - 2R_a}$	$\frac{6}{3 - 2R_a}$



分段四次曲线 实例

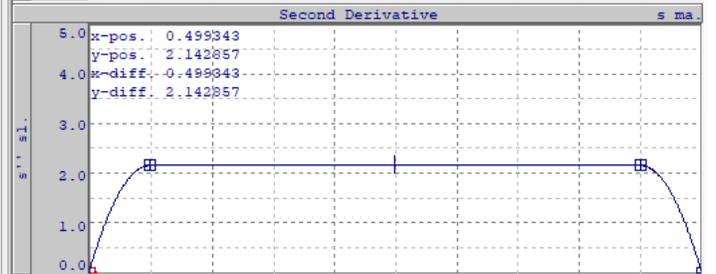
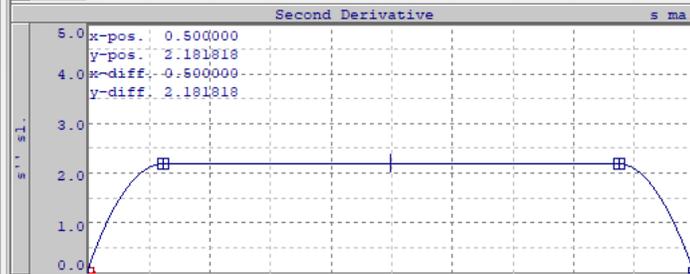
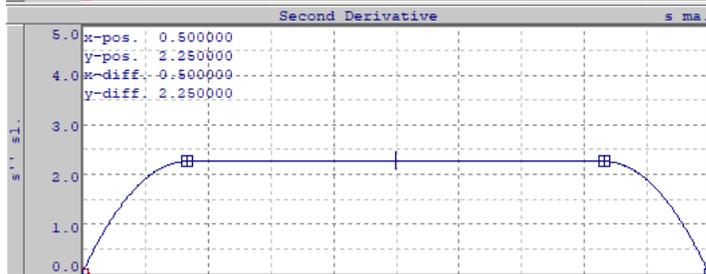
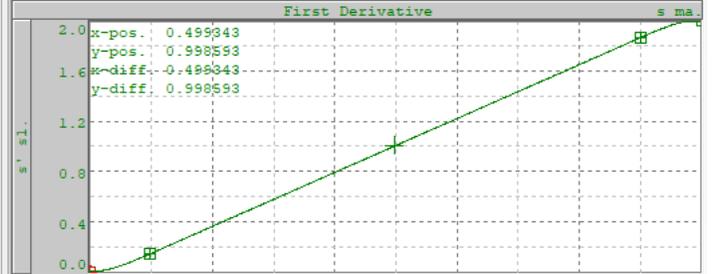
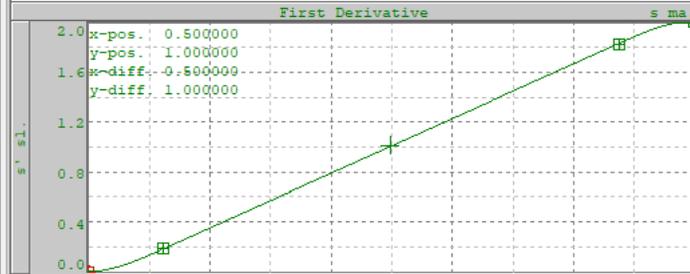
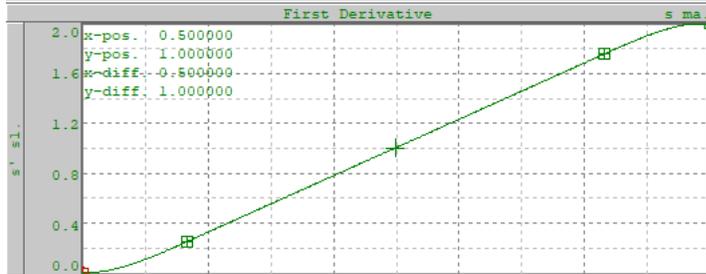
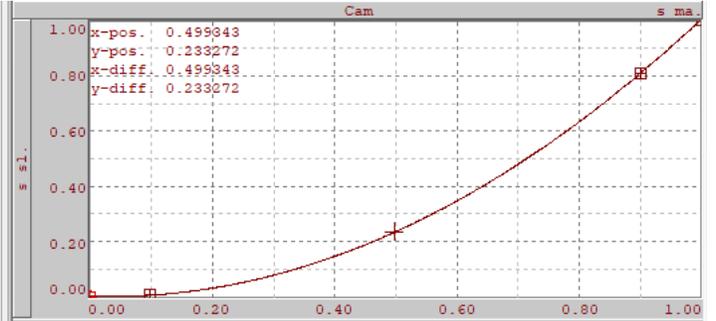
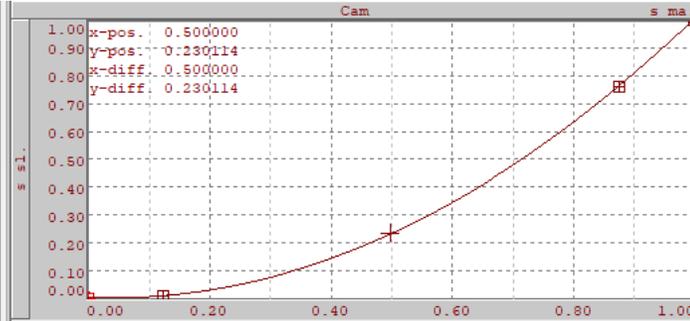
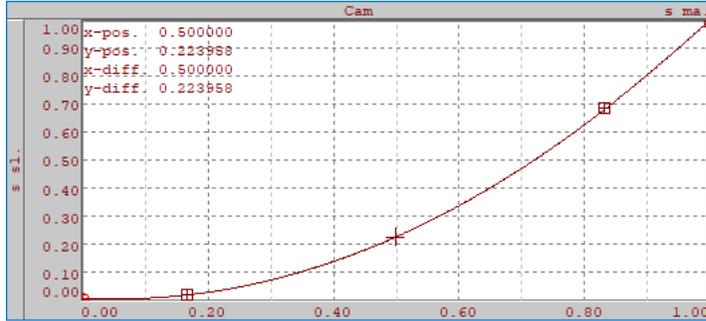


Ra=1/3 A=18/7

Ra=1/4 A=2.4

Ra=1/5 A=30/13

分段四次曲线 实例



Nr.	s ma.	s sl.	s'.sl.	s''.sl.
1	0.000000	0.000000	0.00000	0.00000
2	0.166667	0.015625	0.25000	2.25000
3	0.833333	0.682292	1.75000	2.25000
4	1.000000	1.000000	2.00000	0.00000

Nr.	s ma.	s sl.	s'.sl.	s''.sl.
1	0.000000	0.000000	0.00000	0.00000
2	0.125000	0.008523	0.18182	2.18182
3	0.875000	0.758523	1.81818	2.18182
4	1.000000	1.000000	2.00000	0.00000

Nr.	s ma.	s sl.	s'.sl.	s''.sl.
1	0.000000	0.000000	0.00000	0.00000
2	0.100000	0.005357	0.14286	2.14286
3	0.900000	0.805357	1.85714	2.14286
4	1.000000	1.000000	2.00000	0.00000

$Ra=1/6 \quad A=2.25$

$Ra=1/8 \quad A=24/11$

$Ra=1/10 \quad A=15/7$

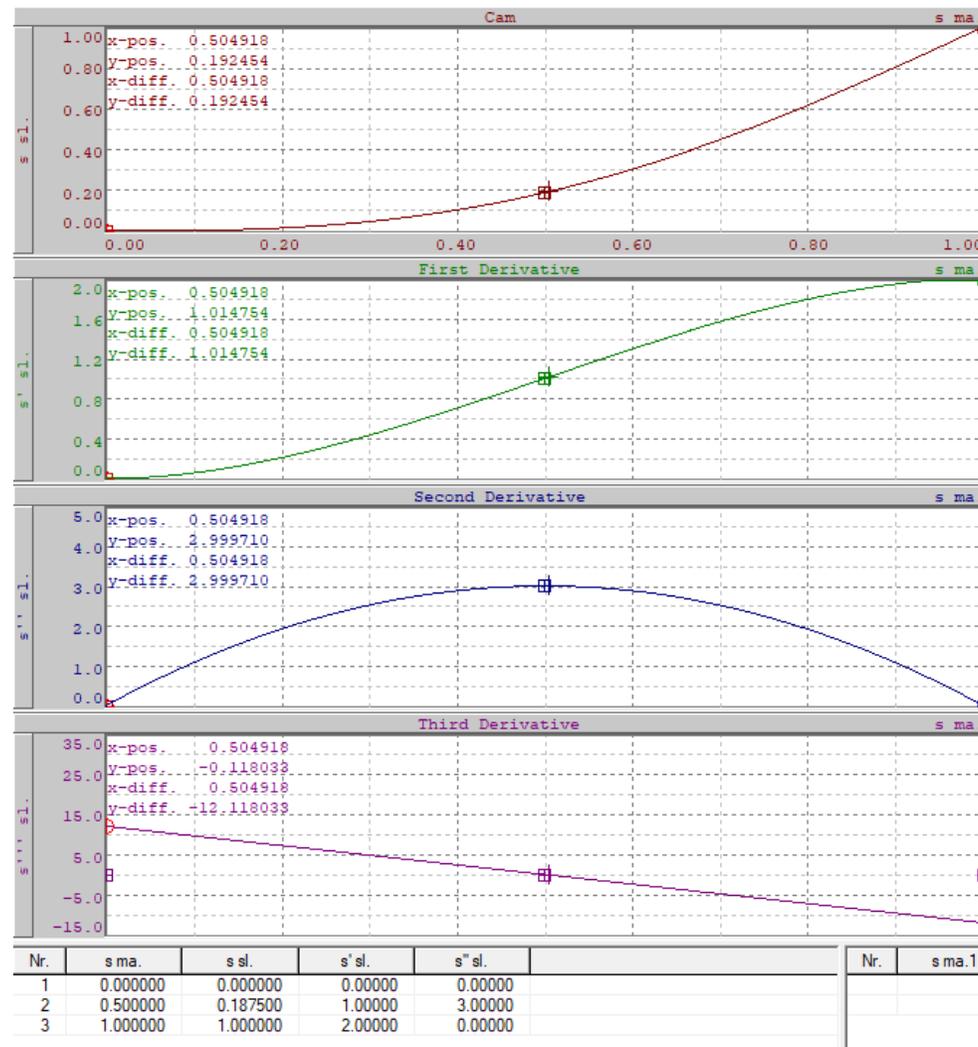
分段四次曲线 实例

Ra=0.5时，曲线与“五次”曲线相同

实际常用的五次曲线只有四次，五次项系数为0

原因是三阶导数必需关于 $x=0.5$ 这一点中心对称，即必需平移0.5后为奇函数

五次曲线的三阶导数为二次曲线，如果平移0.5后为奇函数的话，偶数次系数必为零

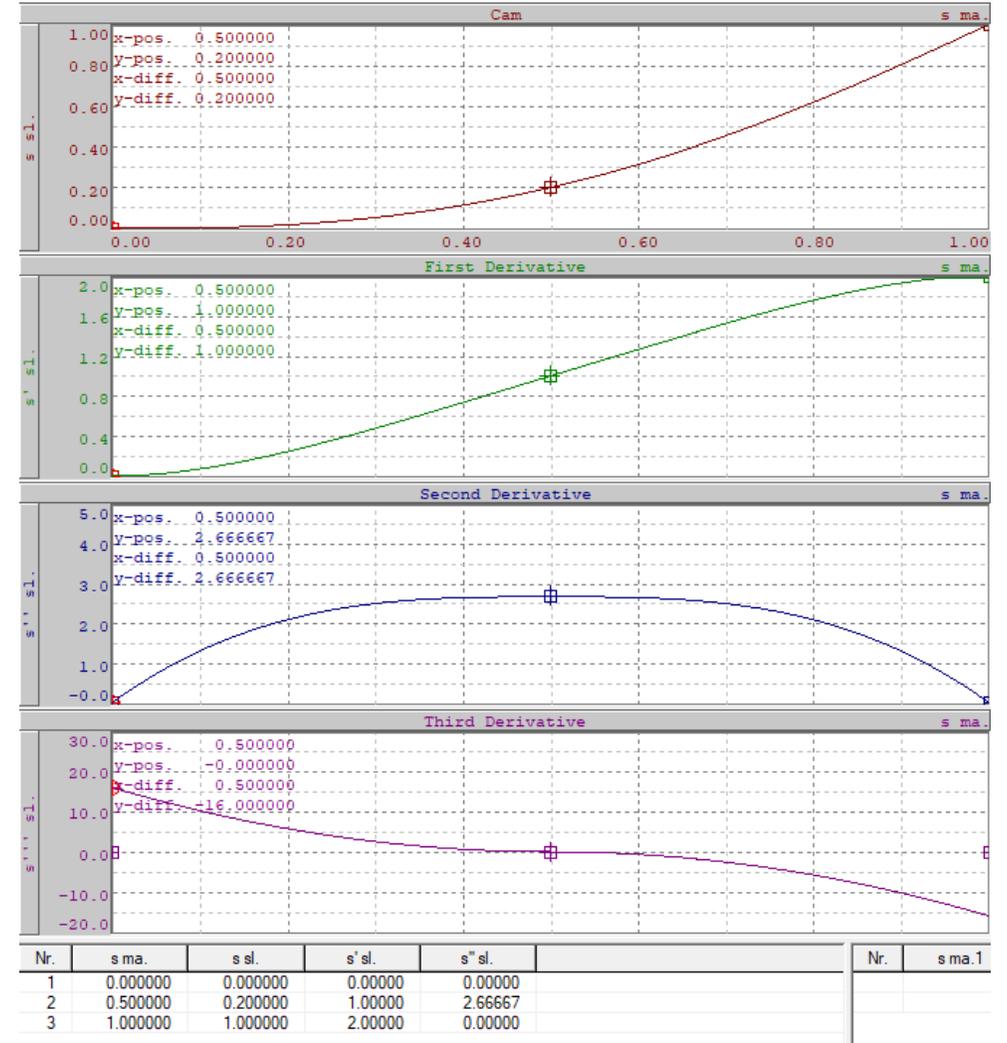


Ra=0.5 A=3

分段四次曲线 真五次曲线

添加一个控制点可以将四次曲线变为分段五次曲线

分段后的三阶导数为分段二次曲线，关于 $x=0.5$ 中心对称



$$Ra=0.5 \quad A=2.6667$$

电流影响



冲击影响

机械冲击

刚性冲击和柔性冲击

刚性冲击

运动过程中速度突变时，加速度为无穷大，作用力也为无穷大（实际因为材料的弹性等原因，作用力不会无穷大），会造成机械零件的损坏。

生活中的应用，敲钉子。

只能用在低速场合。

柔性冲击

运动过程中加速度突变，零部件受力突变，由于零部件之间的间隙等原因，会放大加减速瞬间的作用力，导致零件过早的疲劳损坏。

生活中的实例，汽车过桥时的失重感，人体感觉不舒服。

可以在中低速场合使用。

高速场合不得出现刚性冲击，并尽量避免柔性冲击。

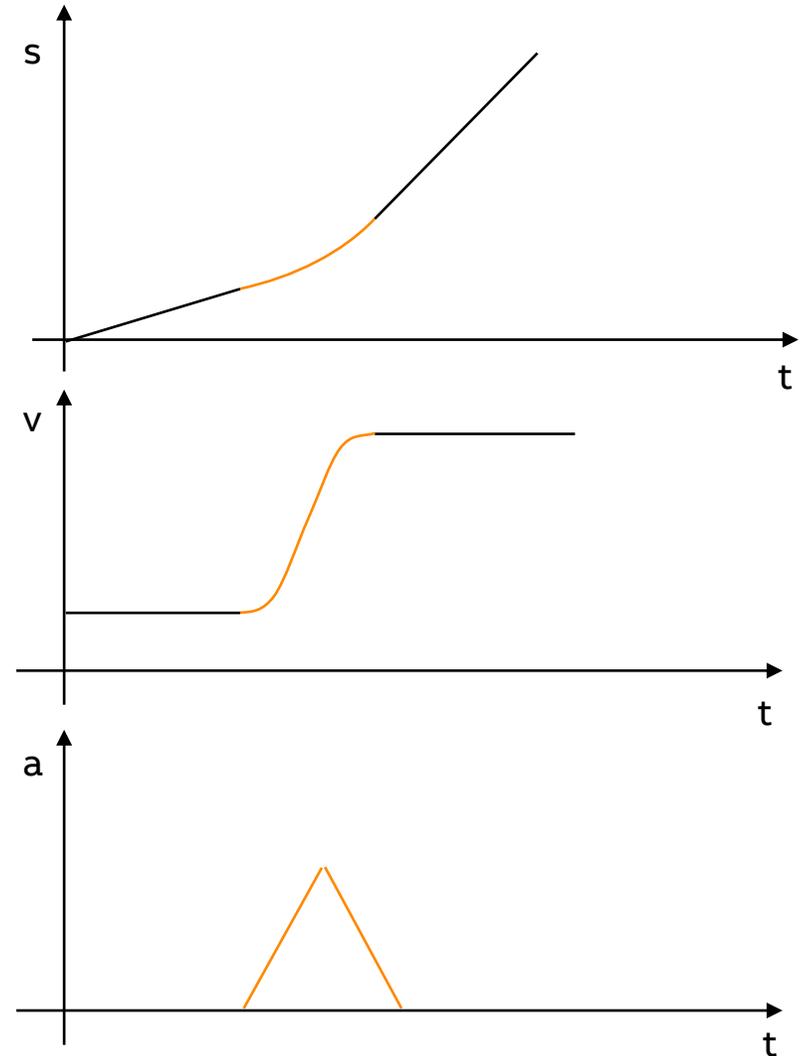
运动曲线规划

机械冲击

凸轮曲线设计时要采用过渡段来连接两个不同速度的曲线，消除刚性冲击。

注意状态跳转导致的柔性冲击。

AUTMAT补偿段的加速度永远是从0开始，并以0结束，不管跳转前的加速度以及补偿结束后曲线的加速度。



加减速规划 对冲击的影响

加加速度 (Jerk) 是加速度的变化率，反映的是力的变化快慢，即柔性冲击的大小

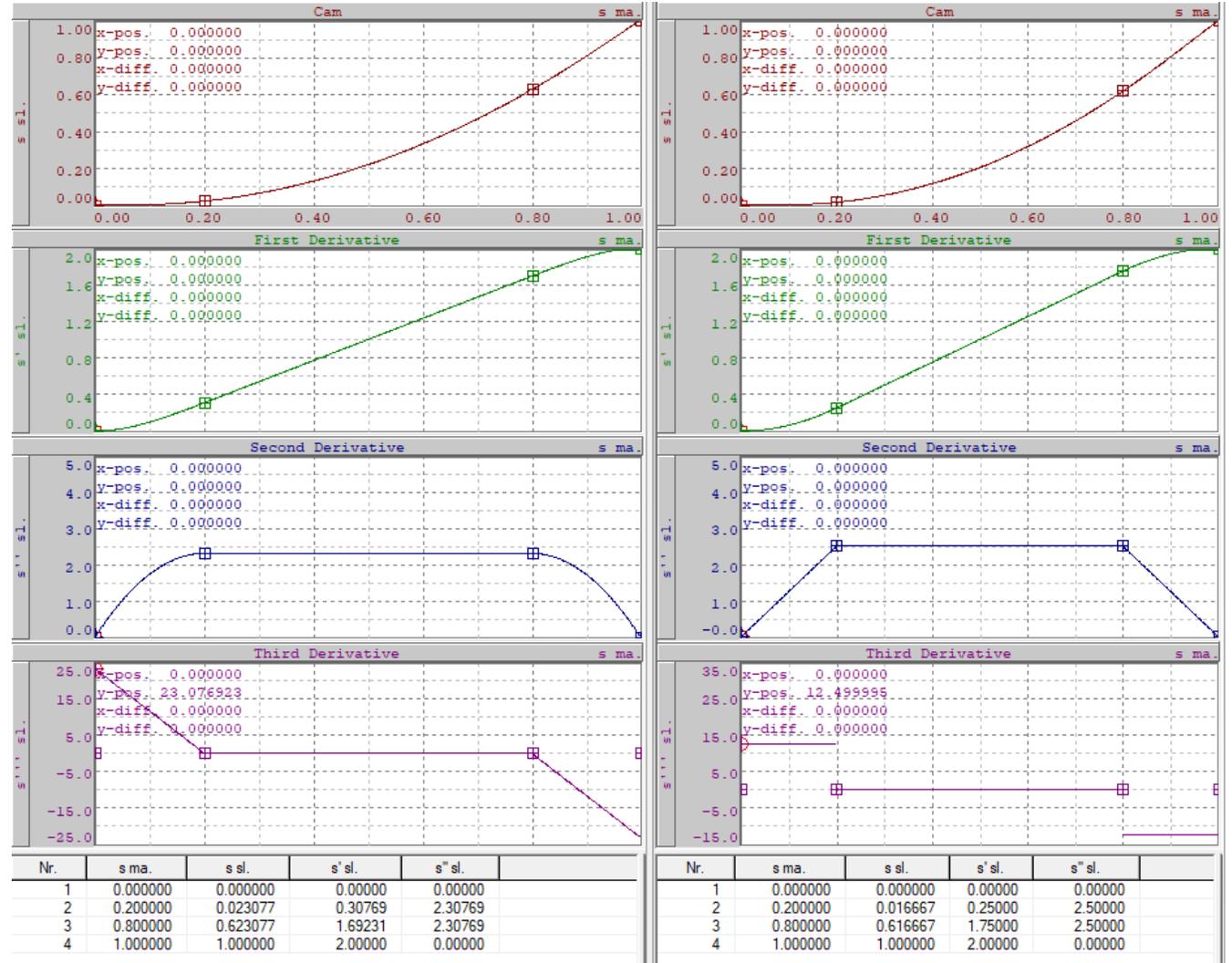
三次曲线加加速度为恒定值

$$J=A/Ra$$

四次曲线加加速度为一条斜线

最大加加速度

$$J=2A/Ra$$





发热影响

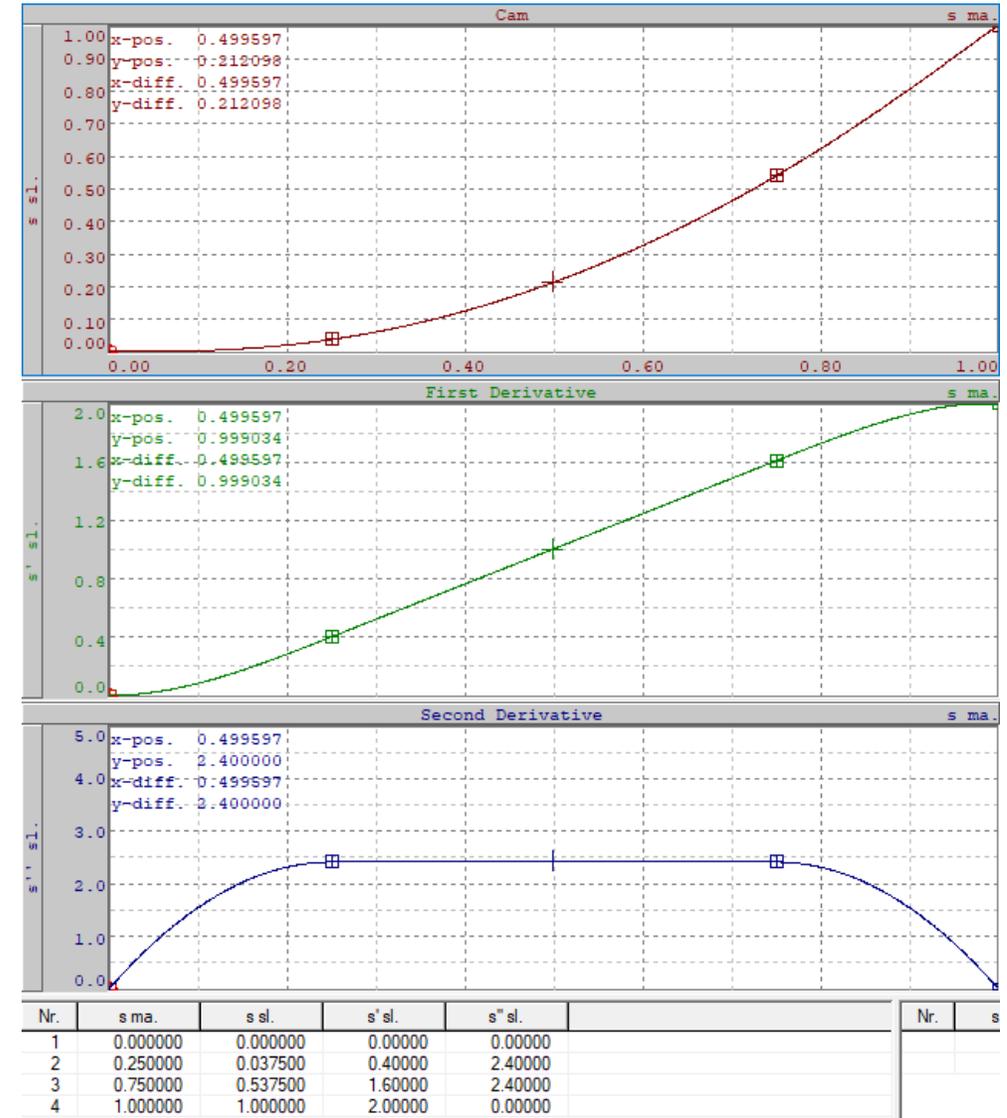
加减速规划

电机发热

电机的发热主要是铜损和铁损两部分：铜损对应的是电流流过电阻的发热，与电流大小有关；铁损对应的是涡流效应，主要与转速有关。

接下来主要分析不同曲线对电机发热的影响，主要考虑电流的热效应

$$Q(t) = \int_0^t RI^2(t)dt$$



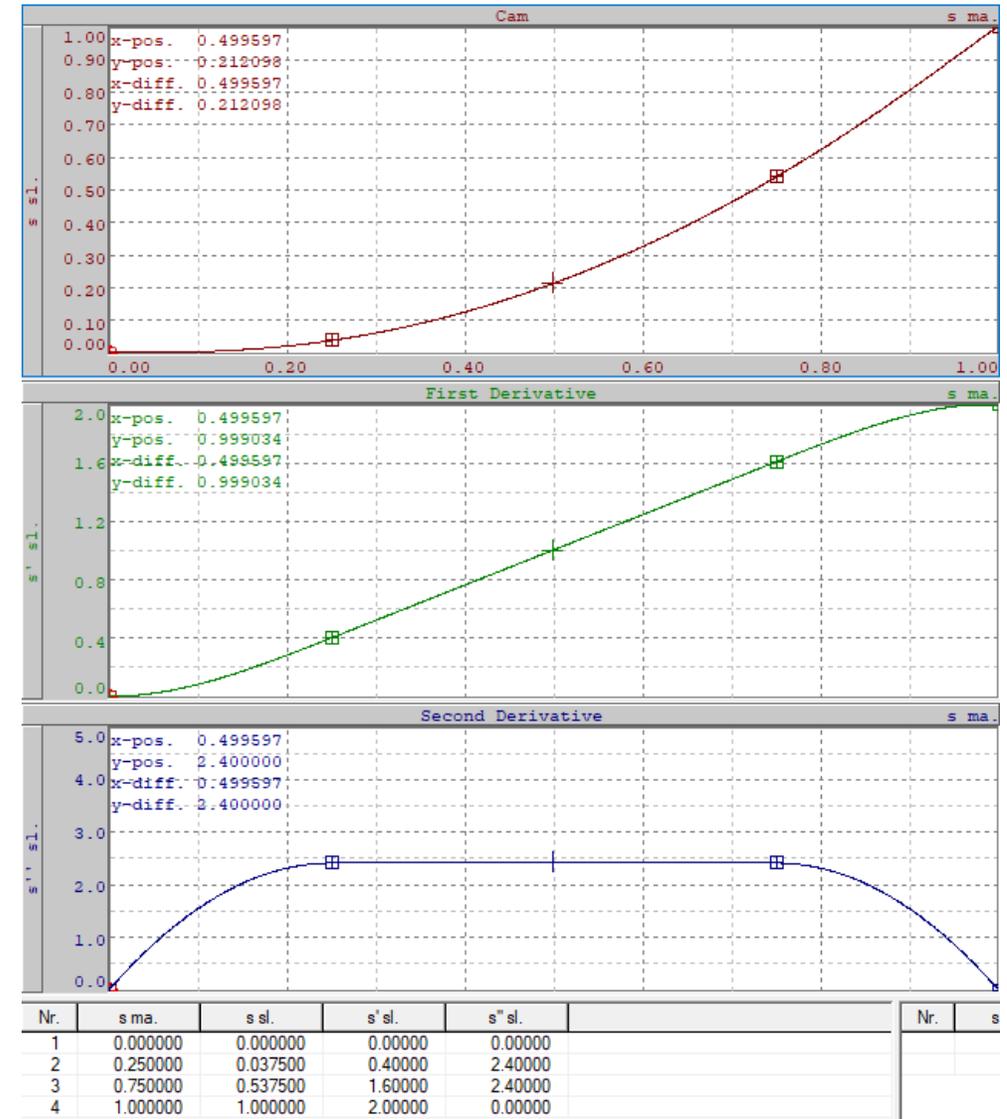
加减速规划 电机发热

$$Q(t) = \int_0^t RI^2(t)dt$$

忽略摩擦力等的影响

电流正比于加速度

$$Q(t) = C \int_0^t a^2(t)dt$$



加减速规划 电机发热

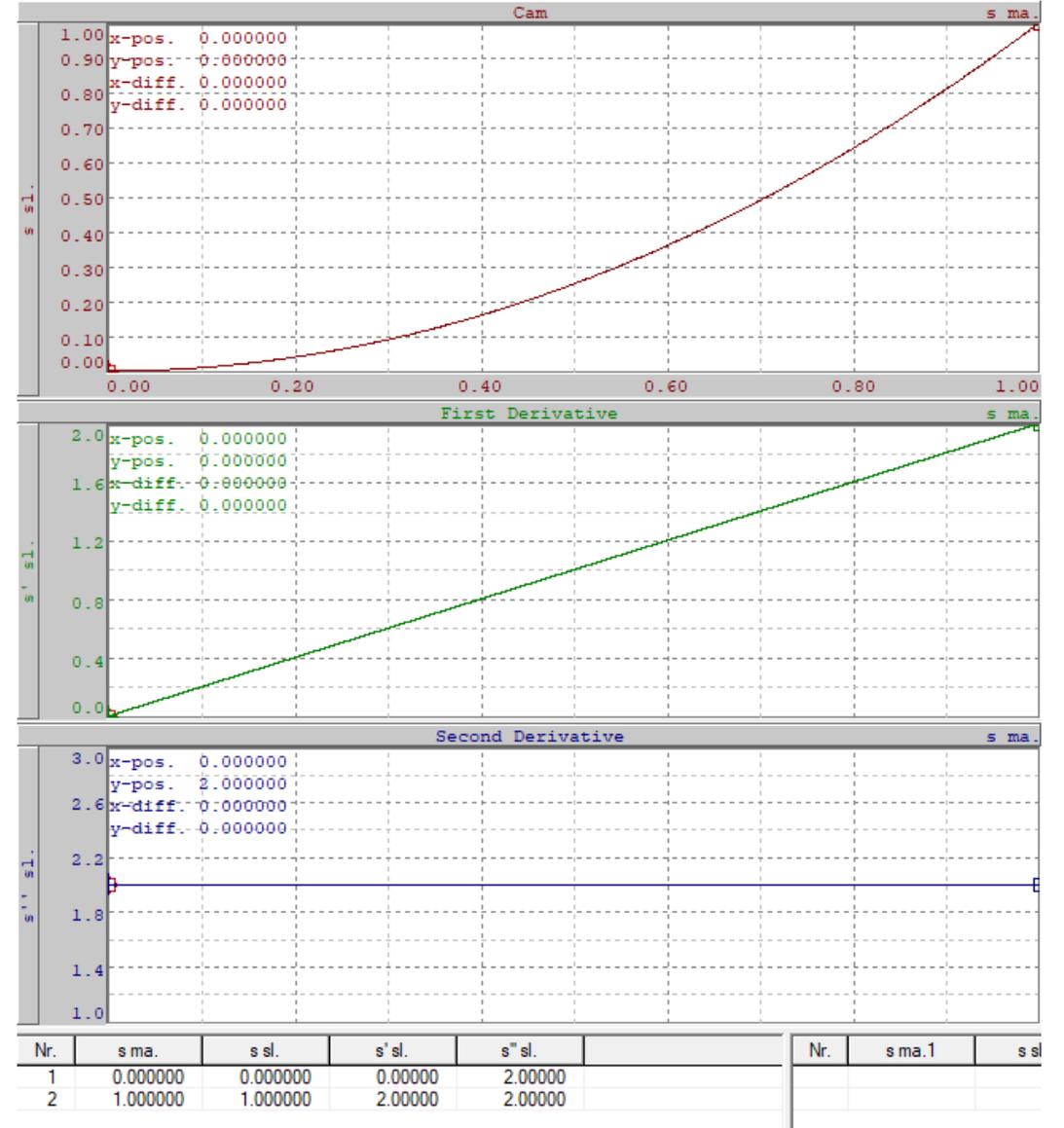
$$Q(t) = C \int_0^t a^2(t) dt$$

对于匀加速曲线

$$a(t) = 2$$

$$Q(1) = 4C$$

以此作为基准发热量，不同曲线的发热量
与该值的比值定义为发热系数 f_H





综合对比



曲线对比

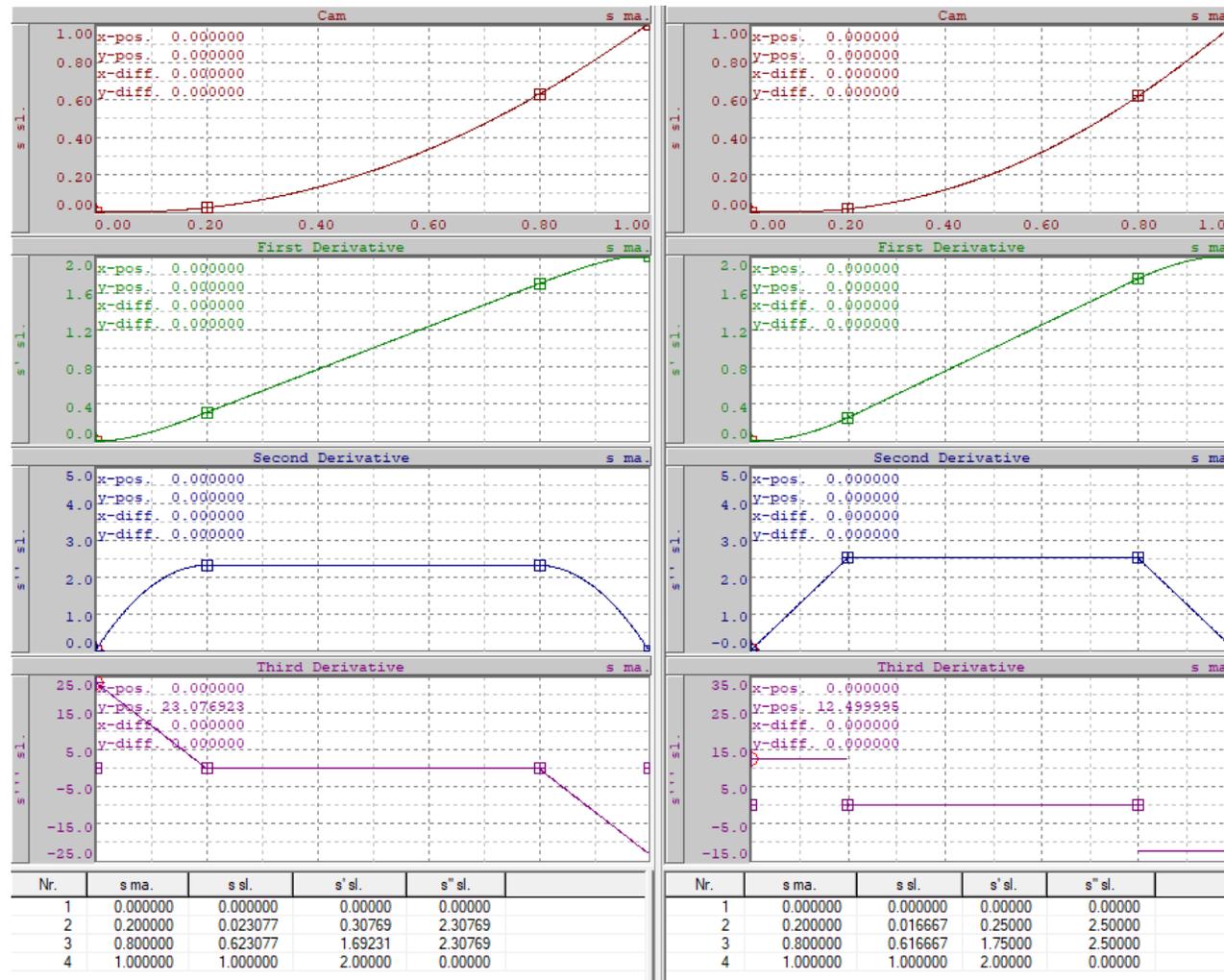
总结

Ra越大，电流越大，发热量越大，冲击越小

相同Ra时

三次曲线电流和发热较大，冲击较小

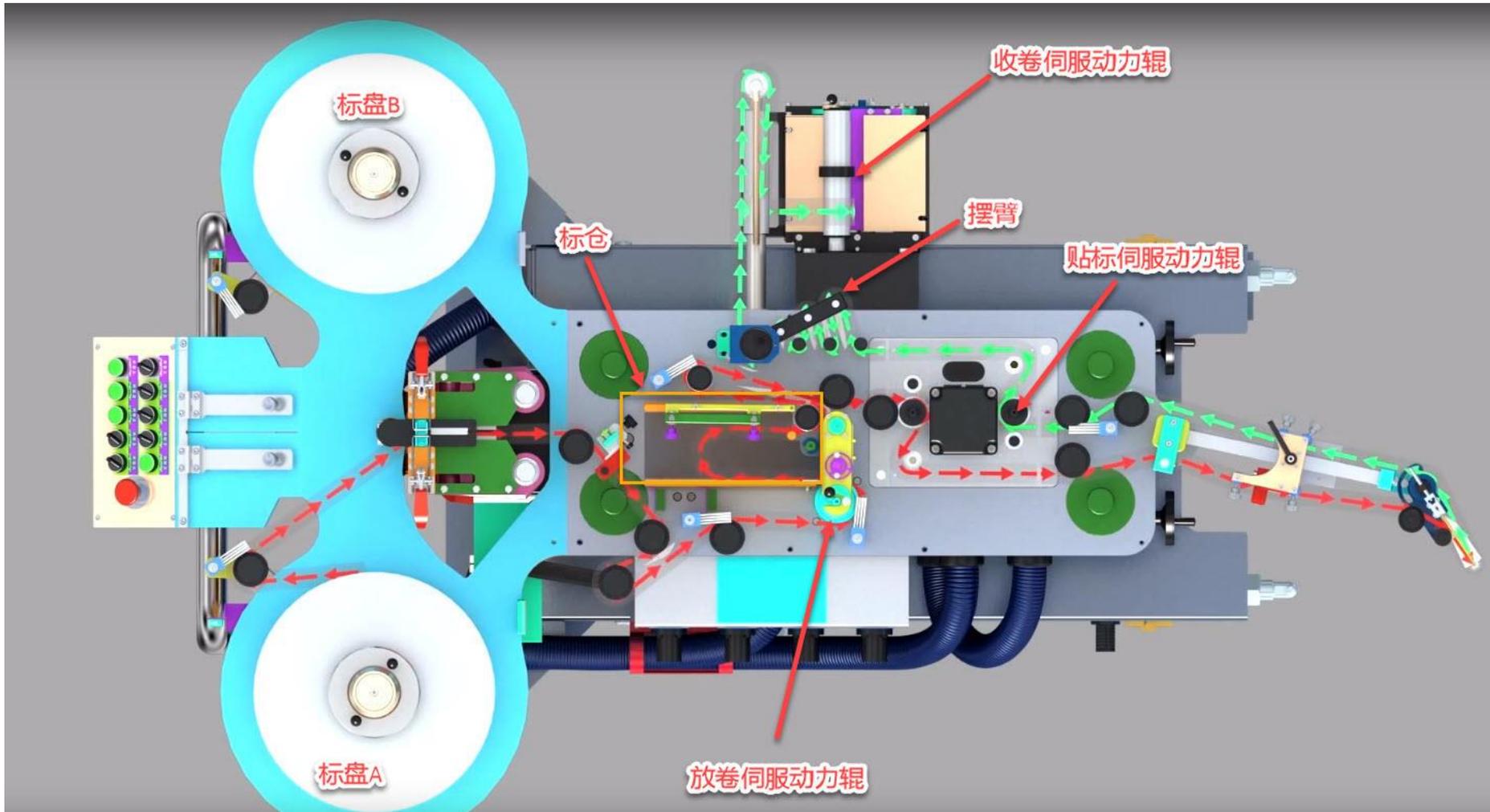
四次曲线电流和发热较小，冲击较大



案例分享

——贴标机送标轴运动

不干胶贴标机 标站结构

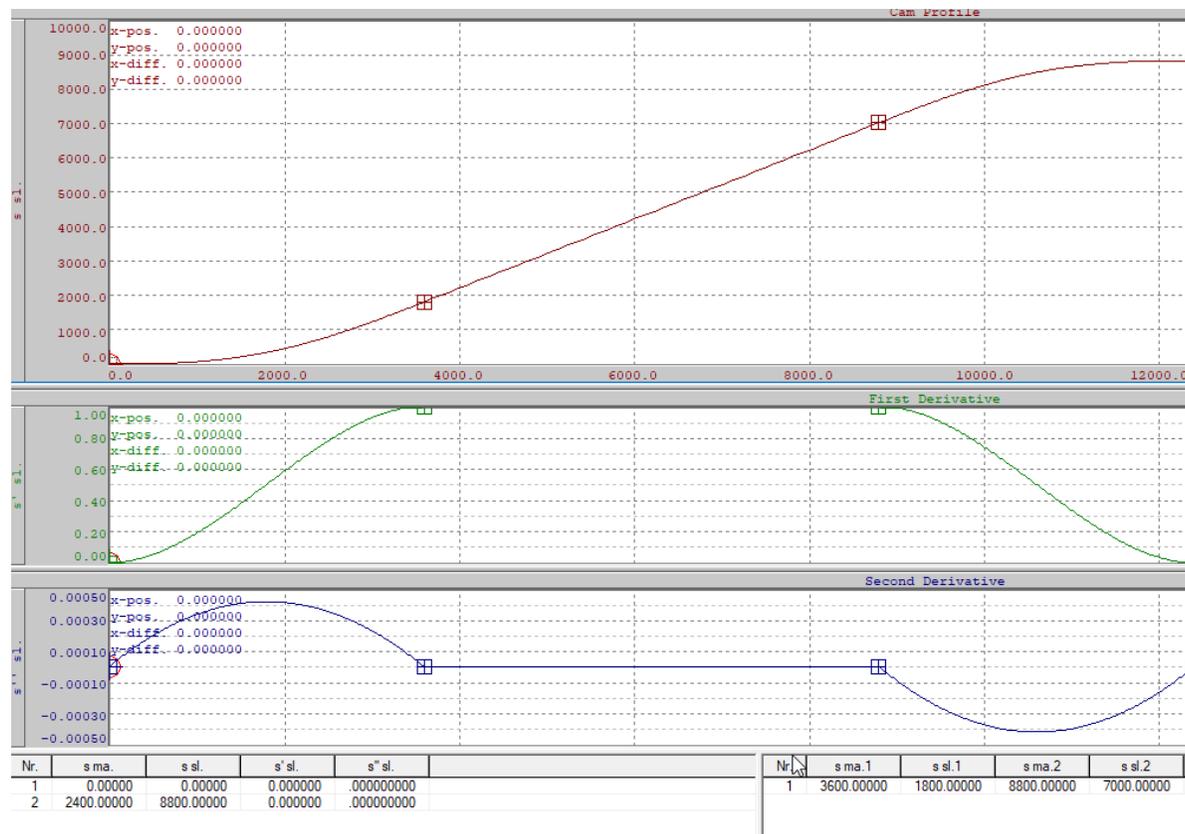
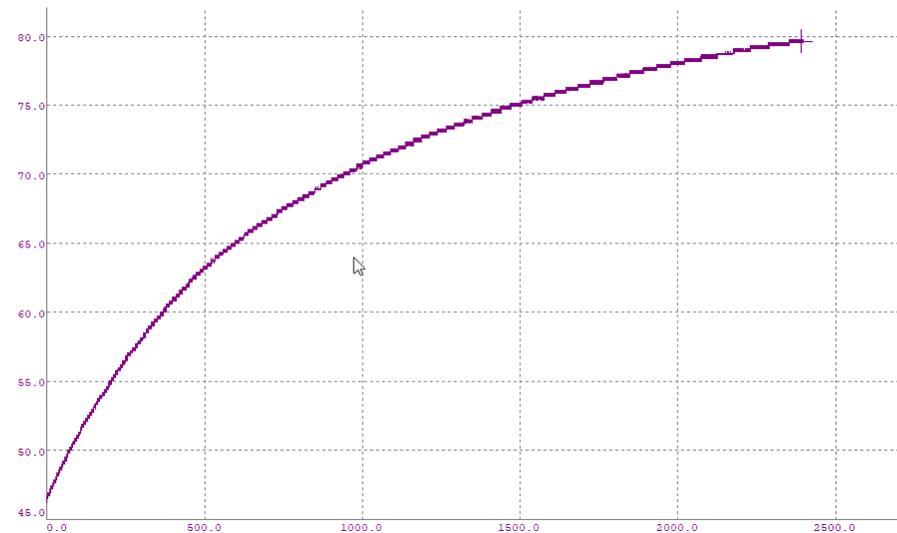
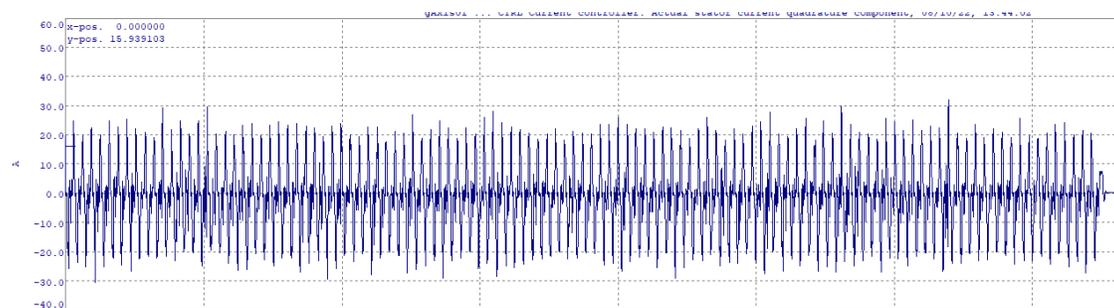


不干胶贴标机

5万5瓶/小时-五次多项式曲线

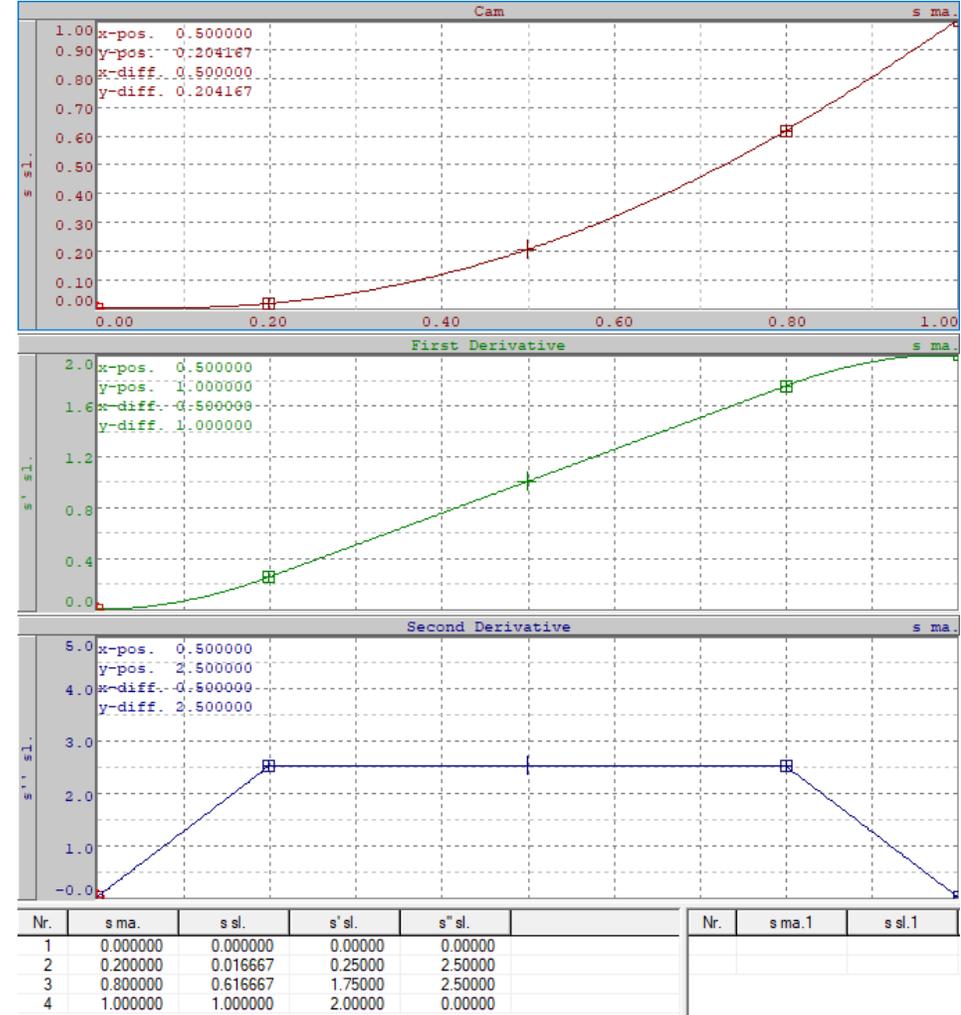
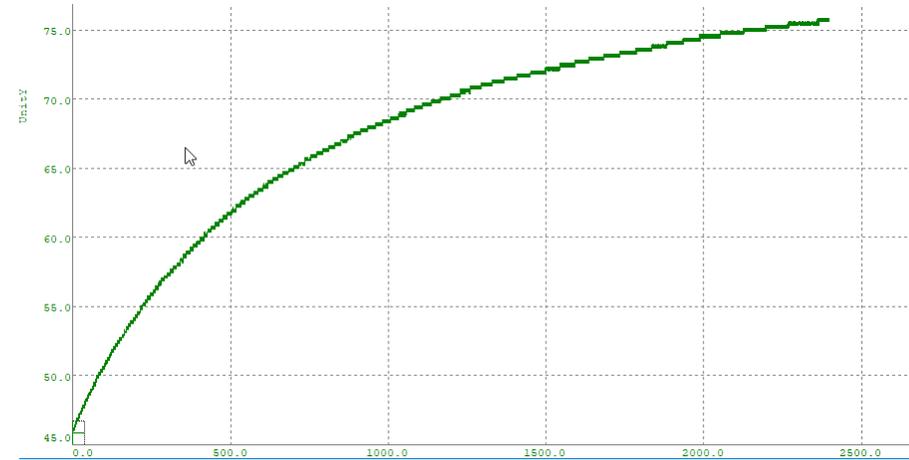
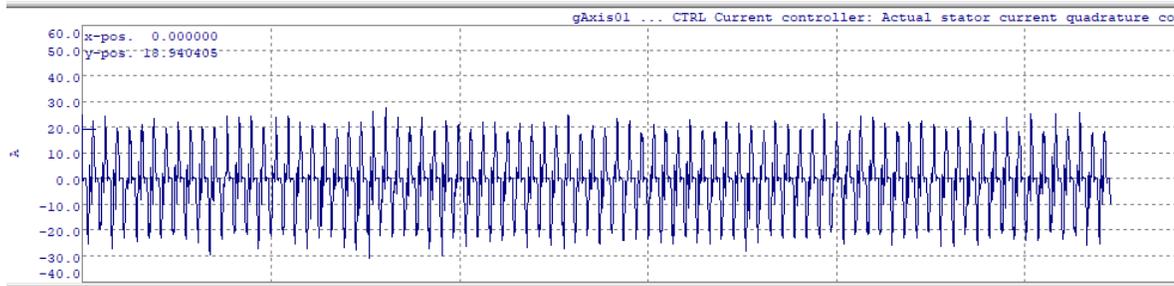
连续运行40分钟，电机最大电流约25A

电机温升为35°C



不干胶贴标机 5万5瓶/小时-多段式曲线

连续运行40分钟，电机最大电流约22A
电机温升为30°C



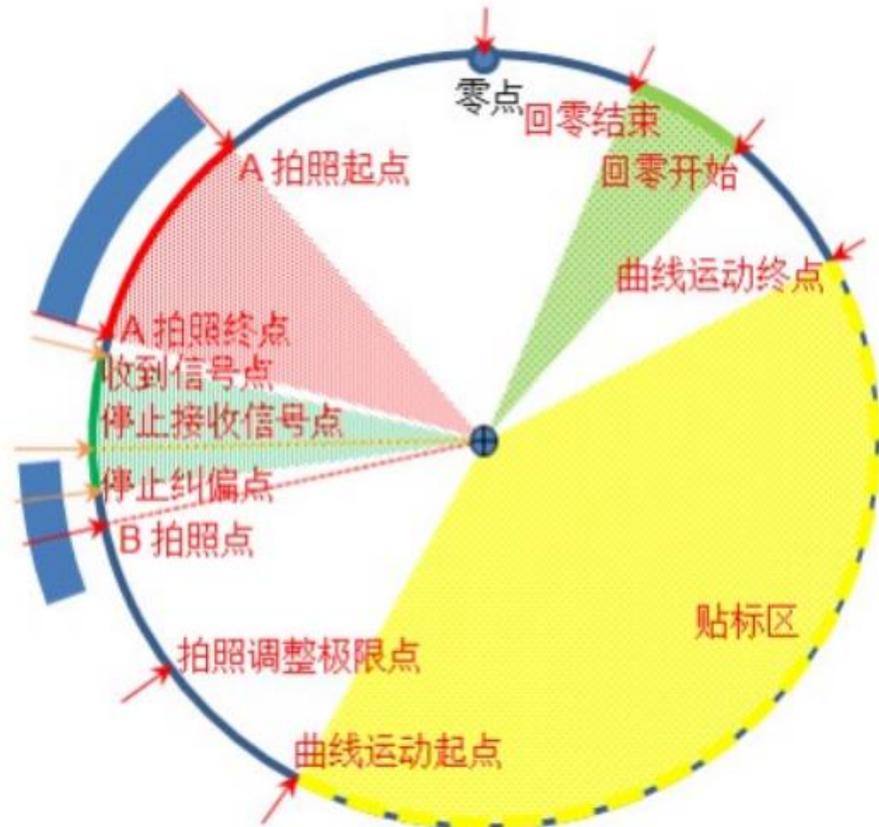


案例分享

——贴标机托盘运动曲线

贴标机

贝加莱托盘 贴标和刷标曲线规划



贴标机

贝加莱托盘 贴标和刷标曲线规划

瓶身定位
托盘曲线
托盘回零

托盘数据监控

⏪
托盘1
⏩

大盘当前角度 0.00 度

托盘大盘角度 0.00 度

托盘实际位置 0.00 度

托盘凸轮状态 0

编号	大盘角度		托盘旋转角度
	开始	结束	
	拍照定位结束末端		140.00 度
0	150.00 度	160.00 度	90.00 度
1	180.00 度	190.00 度	180.00 度
2	200.00 度	220.00 度	-180.00 度
3	300.00 度	310.00 度	90.00 度
4	0.00 度	0.00 度	0.00 度
5	0.00 度	0.00 度	0.00 度
6	0.00 度	0.00 度	0.00 度
7	0.00 度	0.00 度	0.00 度
8	0.00 度	0.00 度	0.00 度
9	0.00 度	0.00 度	0.00 度

说明：
1. 开始角度设为0度时表示曲线结束。

保存

配方管理
主机
不干胶
伺服托盘

```

//定义State5--State13 目前只有9段
LastStateIndex[AxIdx] := 4;
FOR StateIndex := 0 TO 8 BY 1 DO

  AutData[AxIdx].State[StateIndex+5].CamProfileIndex      := 2; //轴控中提前下载的凸轮曲线
  AutData[AxIdx].State[StateIndex+5].MasterCompDistance  := HostKfactor*(gRcpTray.MotionCurve.MasterPos[StateIndex*2+1] - gRcpTray.MotionCurve.MasterPos[StateIndex*2]);
  AutData[AxIdx].State[StateIndex+5].SlaveCompDistance  := 0.0;
  AutData[AxIdx].State[StateIndex+5].CompMode           := ncONLYCOMP_DIRECT;
  AutData[AxIdx].State[StateIndex+5].MasterFactor       := REAL_TO_DINT(HostKfactor*(gRcpTray.MotionCurve.MasterPos[StateIndex*2+2] - gRcpTray.MotionCurve.MasterPos[StateIndex*2]));
  AutData[AxIdx].State[StateIndex+5].SlaveFactor       := REAL_TO_DINT(gRcpTray.MotionCurve.TrayPos[StateIndex*2+1]*UNITS_FACTOR); //托盘旋转角度
  AutData[AxIdx].State[StateIndex+5].Event[0].Type      := ncST_END;
  AutData[AxIdx].State[StateIndex+5].Event[0].Attribute := ncST_END;

  LastStateIndex[AxIdx] := StateIndex+5;
  IF gRcpTray.MotionCurve.MasterPos[StateIndex*2+1+2] = 0 THEN
    AutData[AxIdx].State[StateIndex+5].Event[0].NextState := 14;
  EXIIT;
ELSE
  AutData[AxIdx].State[StateIndex+5].Event[0].NextState := StateIndex+5+1;
END_IF
END_FOR

//定义State14
//大盘运行剩余距离(同时判断是否需要回到机械零位)
MasterRunDisBeforeLastState[AxIdx] := 0;
IF gRcpTray.General.LocationMode=0 THEN
  //有拍照定位时
  FOR StateIndex := 2 TO LastStateIndex[AxIdx] BY 1 DO
    MasterRunDisBeforeLastState[AxIdx] := MasterRunDisBeforeLastState[AxIdx]+(REAL_TO_DINT(AutData[AxIdx].State[StateIndex].MasterCompDistance)+AutData[AxIdx].State[StateIndex].MasterCompDistance);
  END_FOR
END_IF

AutData[AxIdx].State[14].CompMode           := ncOFF;
AutData[AxIdx].State[14].CamProfileIndex    := 16#FFFF;
AutData[AxIdx].State[14].MasterFactor       := ((gFixHost.AxMaster.LoadUnits*gFixCfg.TrayNb)-MasterRunDisBeforeLastState[AxIdx]); //大盘一周剩余距离= (360.0-以运行距离)
AutData[AxIdx].State[14].SlaveFactor       := 0;
//Event0
AutData[AxIdx].State[14].Event[0].Type      := ncST_END;
AutData[AxIdx].State[14].Event[0].Attribute := ncST_END;

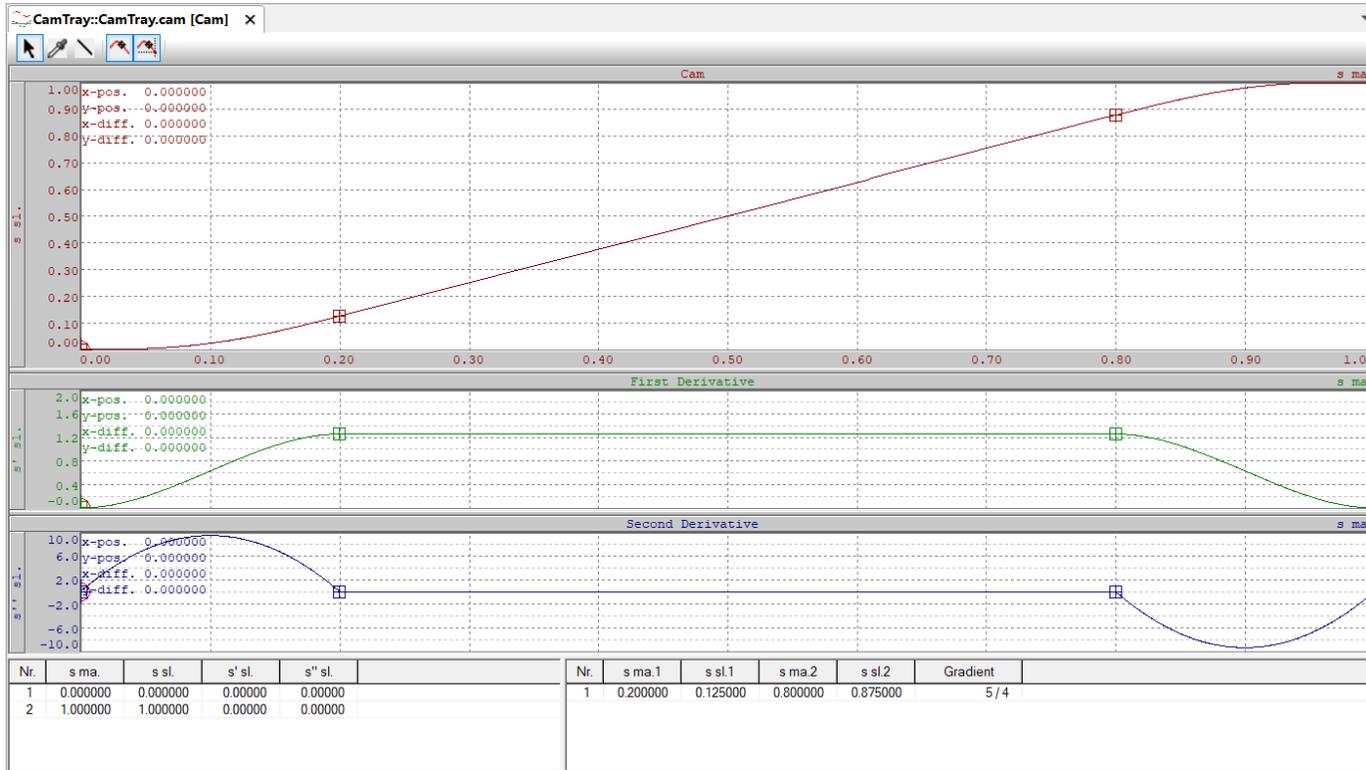
IF (gRcpTray.General.LocationMode=0) THEN
  AutData[AxIdx].State[14].Event[0].NextState := 5;
ELSEIF (gRcpTray.General.LocationMode=1) THEN
  AutData[AxIdx].State[14].Event[0].NextState := 2;
END_IF

```

视觉定位结束后，画面开放了9段定位，每段定位通过0~1曲线拉伸实现；不管托盘怎么转，主轴运行距离必须是大盘一圈360度，闭环；

贴标机

贝加莱托盘 CamEditor默认5阶0~1 曲线



Curve Properties

Curve Properties dialog box showing the 'Type of Curve' section. The '5th Degree Polynomial' option is selected.

Joining Points | Spline Extras | Slave Limits

Type | Acceleration | Jolt | Nodes | Turning Points

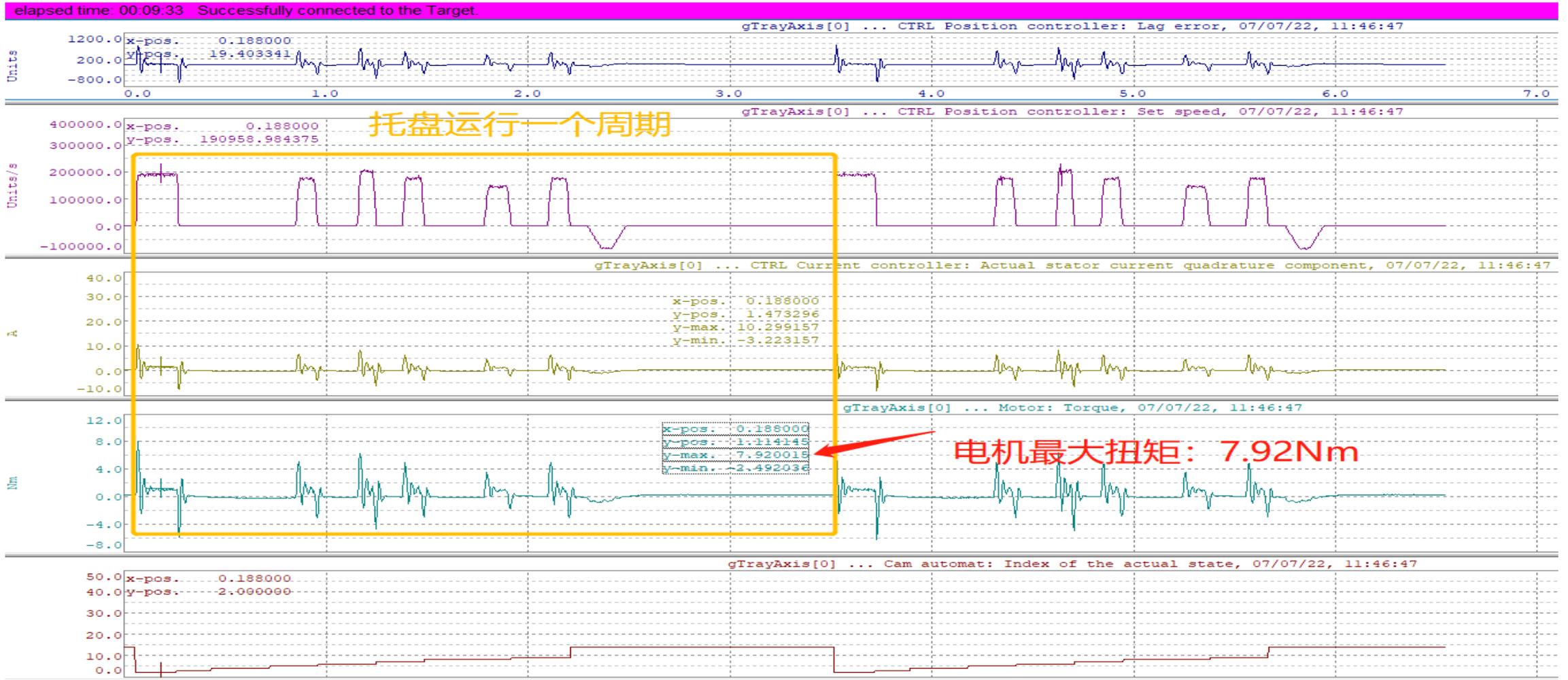
Type of Curve

- 5th Degree Polynomial
- 6th Degree Polynomial
- Symmetric spline with 3 segments
- Spline with 3 segments
- Inclined sine curve
- Modified acceleration trapezium
- Modified sine curve (dwell in dwell)
- Modified sine curve(constant velocity)

轴控中，通过MC_BR_DownloadCamProfileObj_0()提前下载到驱动器中；STATE中调用；

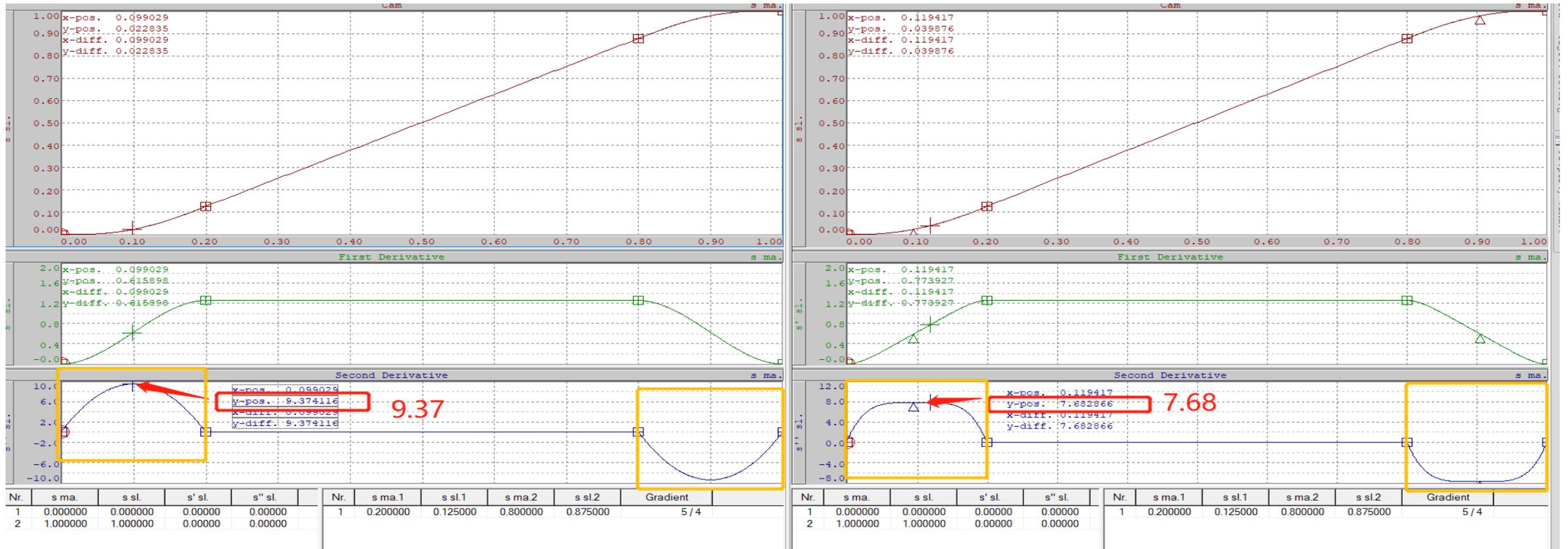
贴标机

贝加莱托盘 5阶0~1 曲线 ~25000 瓶~托盘不带瓶(空载)



贴标机

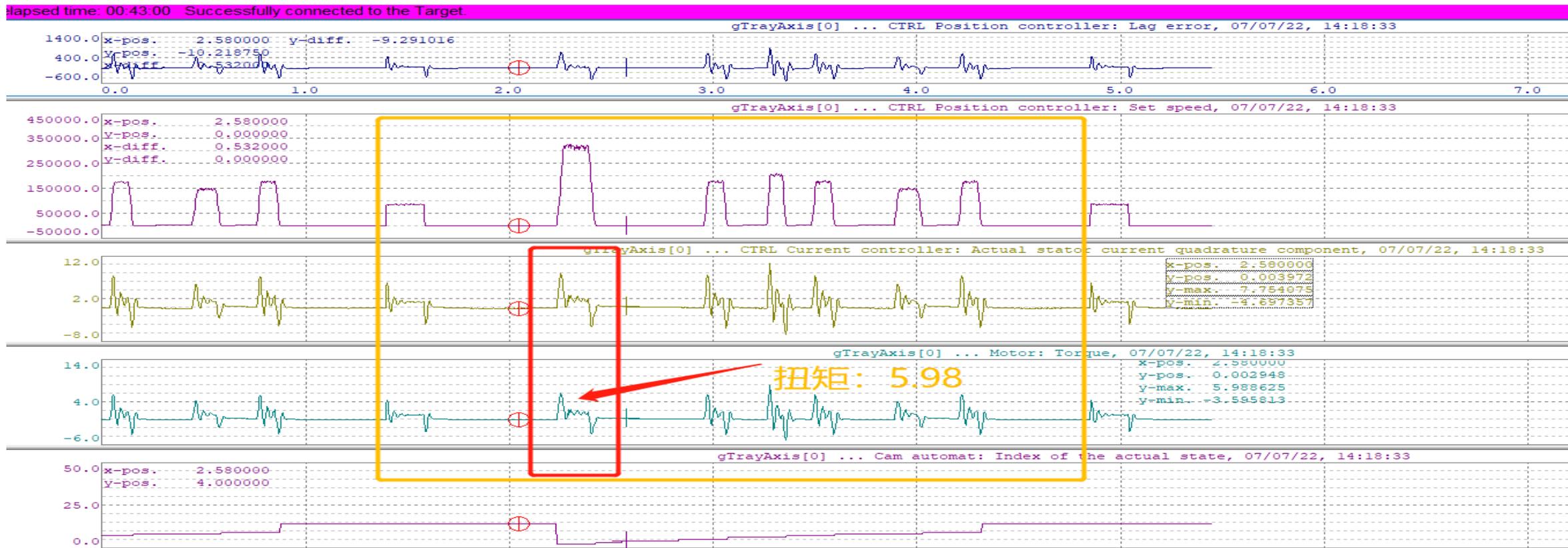
贝加莱托盘 优化后的6阶0~1 CAM曲线



0~1曲线的加速段和减速段，改为6阶手动调整后；曲线中加减速峰值减小；等待实际测试效果如何？

贴标机

贝加莱托盘 优化后的6阶0~1 CAM曲线 25000BPH 空载



可以看到，空载情况下，视觉定位加减速阶段峰值扭矩明显降低；

贴标机

贝加莱托盘 优化后的6阶0~1 CAM曲线 25000BPH 带瓶带载



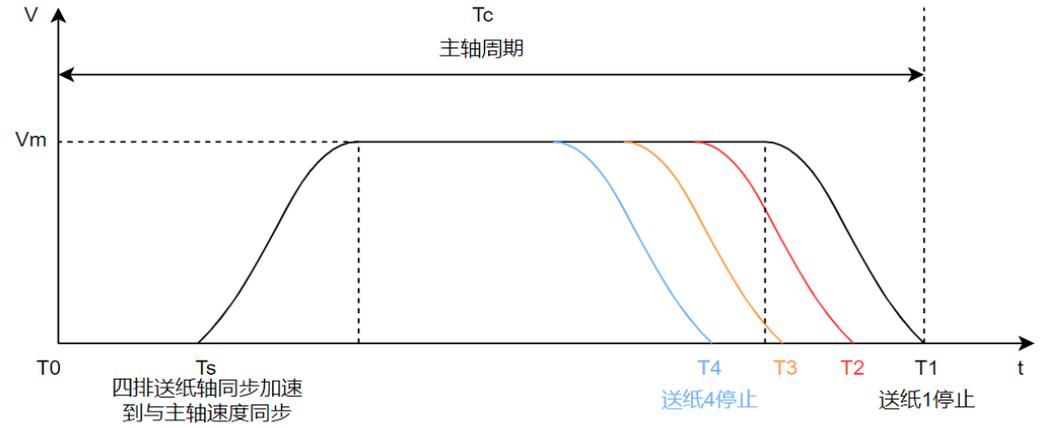
视觉定位过程中，峰值扭矩明显降低；最大扭矩值7.2出现在定位阶段，和HMI设置参数有关系；



案例分享

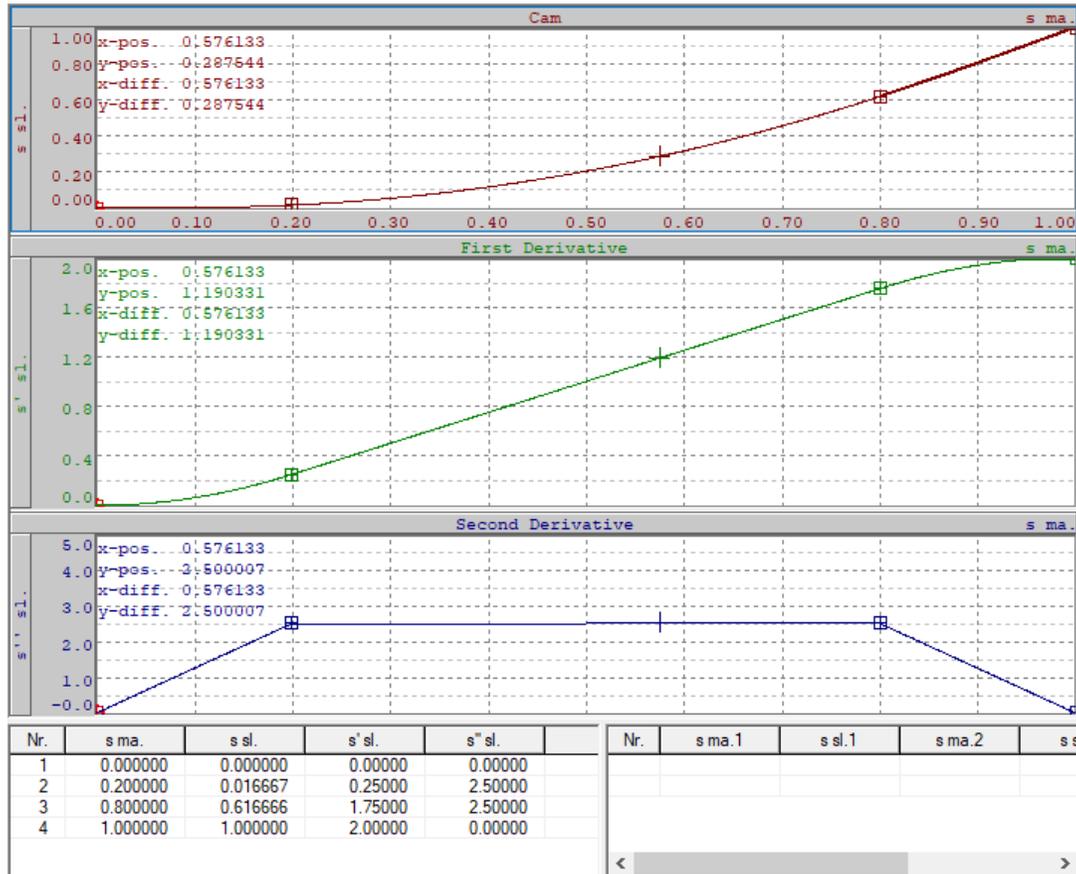
——前缘送纸机

前沿送纸动作简介



送纸电机加减速曲线

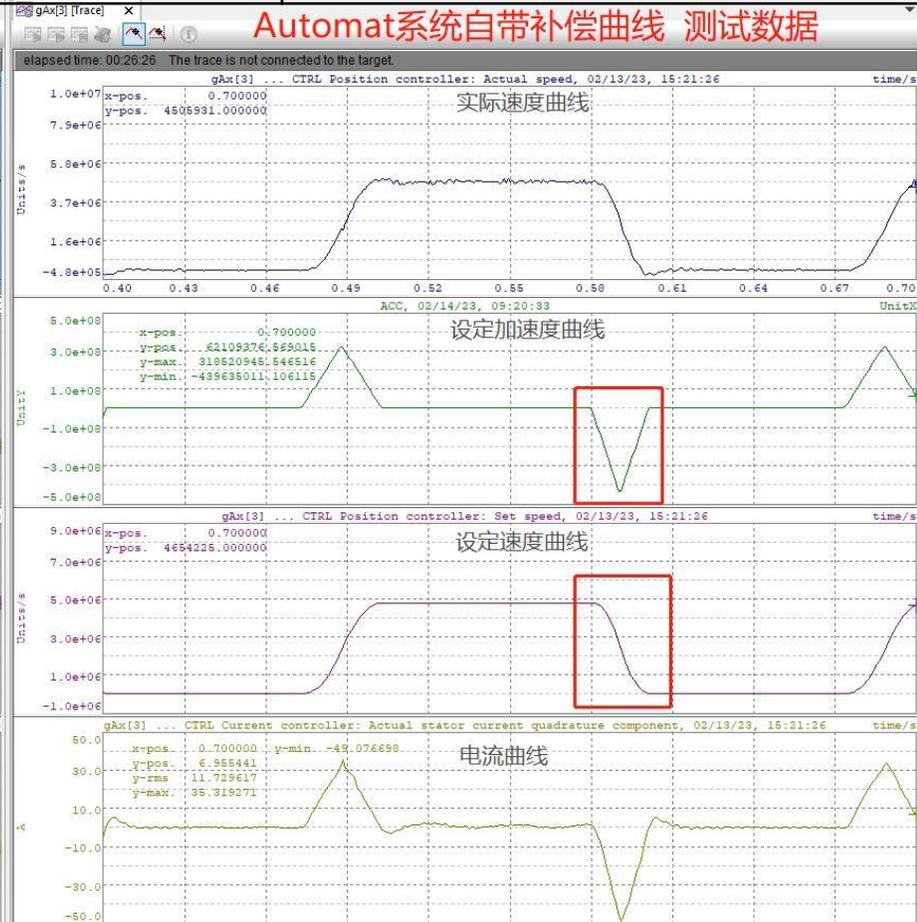
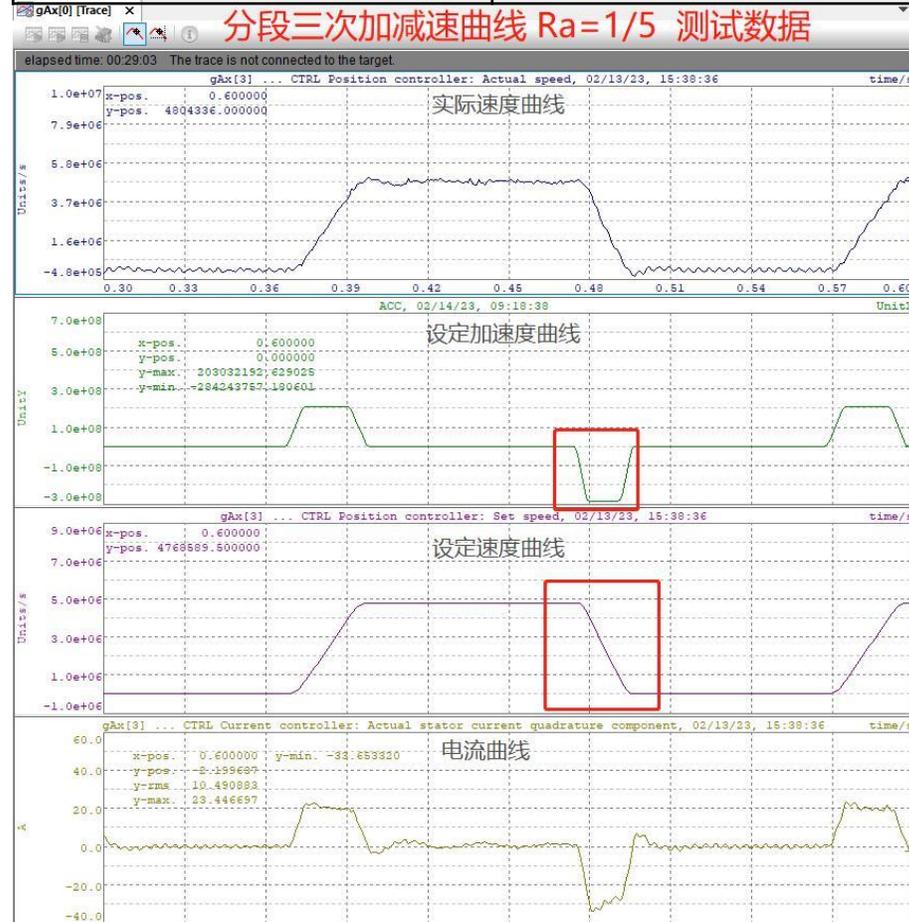
Ra=1/5 A=2.5



送纸电机测试数据对比

300pcs/min

电机额定/峰值电流	三次加减速曲线 RMS平均/峰值电流	Automat补偿曲线 RMS平均/峰值电流
12 A / 36.2A	7.4A / 23.8A	8.3A / 34.7A



B&R



A member of the ABB Group