

基于切换控制的智能车控制

王明顺, 沈谋全

东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004

E-mail: wangmingshun@ise.neu.edu.cn

摘要: 针对智能车行驶路径的多样性、使用单一控制器不能很好地完成智能车行驶任务的难点, 提出了将切换控制技术应用于智能车控制系统的控制方法。将智能车行驶路径的多样性作为切换控制的条件, 使用类极点配置方法, 得到了切换控制律的理论基础。通过将该切换控制规律应用于第一届“飞思卡尔”杯全国智能车邀请赛的“东北大学二队”的智能车控制系统并取得了良好的控制效果, 从而证明了该方法的可行性与有效性。

关键词: 切换控制, 智能车, 行驶路径, 切换控制律

Intelligent Car Control Based on Switching Control

WANG Ming-Shun, SHEN Mou-Quan

College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, 110004

E-mail: wangmingshun@ise.neu.edu.cn

Abstract: Aiming at the diversity of the intelligence car driving path and the difficulty of using single controller that can't complete the driving mission nicely, put forward a switching control method that applied into intelligence car control system. take the diversity of the intelligence car driving path as the switching condition, use the ananoy method of pole placement and get the theory basis of the switching control rule. Intelligence car control system of northeast university II applied this switching control rule to the first Freescale cup of national intelligence car contest and got the good control effect, proved the feasibility and validity of this method.

Key Words: switching control, intelligence car, driving path, switching control rule

1 引言(Instructions)

因单模型控制器在某些场合缺乏灵活性,特别是随着工况的变化,使得系统模型不确定,不能很好的满足控制系统的要求。因此,有关于复杂控制的切换控制理论的研究正方兴未艾。建立在切换控制系统基础之上的切换控制是针对控制系统多模型而设计的,能够满足控制系统的多工况要求,并且因切换控制[2-8]在处理多模型控制系统时具有能够到达稳定性、能够改善暂态响应的优良品质的特点,使得将切换控制应用于实际控制系统的期望值越来越高。研究者在积极进行理论研究的同时,也正积极探索将成熟、实用的切换控制理论与实际系统相结合,从而能够更好满足真实、复杂的控制系统对先进控制理论的需求。

到目前为止,有关于切换控制分析和设计的方法有公共Lyapunov函数方法、多Lyapunov函数方法和类Lyapunov函数方法等[1]。这些方法丰富了有关于切换控制的理论研究,但是有关于将这些切换控制理论应用于实际控制系统的案例却不多见。

随着汽车电子技术的迅猛发展,智能车的研究也进入了一个崭新的时期。为了充分发挥高校在智能车研究中领头军的作用,教育部委托全国自动化委员会主办了第一届“飞思卡尔”杯全国智能车邀请赛。该比赛在某种程度上体现了对先进控制理论的要求。从决赛赛道的复杂性来看,有长直线、短直线、大半圆曲线、小半圆曲线与S形曲线等不同的引导线形。由于智能车在行驶过程中,这些线形交替出现,使得赛道对智能车来说具有不确定性,从而增加了智能车高速行驶的复杂度,特别是当智能车处于线形过渡区域,如果不能很好地控制智能车的速度,将会使得智能车冲出跑道,自然也就失去了争取行驶时间最短的一次机会。

针对智能车控制系统这一复杂的被控对象来说,其控制的复杂性体现在智能车要实现在不同路径条件下的安全、快速行驶。通常情况下,研究者选择使用速度 V 恒定的随动控制方案。这种控制方案虽然能够顺利的完成行驶任务,却是以牺牲行驶时间为代价,使得该方法在实际使用中具有局限性,特别是在对智能车行驶时间有特殊要求的场合。

本文提出了类极点配置方法[9-11]用于求取切换控制律的理论模型,并以2006年第一届“飞思卡尔”杯全国智能车邀请赛的赛道为研究对象,以智能车行驶的时间最短为控制目标,依据智能车行驶路径的复

此项工作得到辽宁省自然科学基金项目“基于支持向量机电气电子系统故障诊断及预测新方法研究”,编号: 20062033

杂性,讨论了在不同路径条件下切换控制律的理论模型的具体化、实用化。通过选择路径识别结果作为切换控制的切换条件,从而实现了智能车能够在不同条件下实现其控制器参数与当前路径相适应,保证智能车的最佳行驶性能。通过将基于切换控制策略的智能车参加第一届“飞思卡尔”杯全国智能车邀请赛的预赛和决赛,并取得了在112支参赛队伍中位居第十名的成绩,证明了切换控制方案在本智能车控制系统中的可行性与有效性。

2 理论基础(Theory Foundation)

切换系统是指由一族连续时间子系统以及安排在这些子系统之间的切换控制律所构成的系统。因此,对切换控制而言,切换条件与切换控制律是进行切换控制的核心问题。根据应用对象的特点,这里选用类极点配置方法作为切换控制律选择的理论基础,而在实际系统中,通过具体应用对象构造切换控制条件及其相应的控制律。

对于一个被控对象通常有:

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u \quad (1)$$

式中,为 $x \in R^n$, $f(x, t)$ 维列向量函数, $g(x, t)$ 为 $n \times m$ 矩阵。

设计 (1) 的切换面方程为:

$$s = C^T x \quad (s \in R^m) \quad (2)$$

当 $s = 0$ 时的等效切换控制律 u_{eq} 满足:

$$s = C^T x = C^T f(x, t) + C^T g(x, t)u_{eq} = 0 \quad (3)$$

解 (3) 式可得:

$$u_{eq} = (C^T g(x, t))^{-1} C^T f(x, t) \quad (4)$$

至此,我们得到了在被控对象为一般情形下的切换控制律的解。受状态重构方法的启发,可引用系统状态重构的思想作为本系统的控制律来求取其理论模型。

设被控对象的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (5)$$

其中 $x \in R^n$ 为被控对象的状态向量, A 、 B 、 C 为系统矩阵, u 为系统的输入, y 为系统输出。

对系统(5)而言,对增广矩阵 (A, B) 要求能控,对增广矩阵 (A, C) 要求能观。在满足此条件下,我们进行该系统的状态重构。

由观测器重构的被控对象的参考模型为

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_0 = A_0 \bar{x}_0 + B_0 u_0 \\ \bar{y}_0 = C_0 \bar{x}_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\bar{x}_0 \in R^n$ 为状态向量, A_0 、 B_0 、 C_0 为系统矩阵, u_0 为系统参考输入, \bar{y}_0 为系统输出。

在假设 $C = C_0$ 的条件下,取状态误差 ΔE 与输出误差 如式(7)所示:

$$\begin{cases} \Delta E = y - \bar{y}_0 \\ E = x - \bar{x}_0 \end{cases} \quad (7)$$

结合所得的 ΔE 与 E , 取切换面的方程为:

$$S = f(E, \Delta E) = C_E E + C_{\Delta E} \int \Delta E d\tau \quad (8)$$

则取 $S = 0$ 时的解作为满足切换条件下切换控制律的解,从而建立了切换控制律与状态误差及输出误差之间的关系,为获得较好的控制器性能奠定了基础。

针对于本文的应用对象,从考虑系统实时性的角度出发,在具体应用中进行简化,以求得最为有效的控制方式。其中,观测器的状态重构是根据切换条件下的路径形式给出,具体的实现方案在实际应用部分进行详细讨论。

以上是有关于稳定条件下切换控制律的求取,但是切换控制过程中还需考虑在过渡区域的平滑性,衡量切换效果的好坏的一项重要指标就是切换控制的抖振问题。这里在理论上提出一种准滑动模式作为解决抖振问题的一种方法。

所谓准滑动模式[12],就是将系统的运动轨迹限制在理想滑动模式的某一 Δ 邻域内的模式。在上述讨论中,我们求取切换控制律时是使 $s \neq 0$ 且 $s = 0$,而在考虑到切换的过渡区域时,需要将其设定为 $|s| > \Delta$ 且 $s = 0$,这样就使得在切换面上形成了一个 Δ 邻域的边界层,从而保证了在 Δ 邻域内连续变结构控制。

3 应用实例(Application)

为了更好的理解切换系统在实际应用中的优良性能,这里引入一个实例,该实例是基于2006年第一届“飞思卡尔”杯全国智能车邀请赛。这个实例从实际应用的角度出发,将有关于切换控制方面的理论加以简单化,以期通过简单的方式将切换控制应用于实际控制对象。下面针对2006年第一届“飞思卡尔”杯全国智能车邀请赛的决赛赛道,对参赛受控智能车采用的切换控制方案进行分析。

2006年第一届“飞思卡尔”杯全国智能车邀请赛的决赛赛道总长大约为58米。在这58米的赛道上,引导线的线形形式具有多样化,如长直线、短直线、大半圆曲线、小半圆曲线和S形曲线等,其赛道布局错综复杂。着在某种程度上来说是对智能车智能化水平的检验,从而也对智能车的控制策略与方案也提出了更高的要求。考虑到切换控制受切换条件的影响,而路径识别结果正具备这一特性,可以作为切换控制的进入条件,从而切换控制被优选为本智能车的控制灵魂。在已知路径识别结果的前提下,下面就不同线形

情况下,如何使用切换控制策略进行分析。这里先给出构成整个控制系统的控制框图,以期增加对该智能车使用切换控制方法的理解。

从图1中可以看出,智能车路径识别结果作为切换控制的决策器,以满足在不同条件下控制器参数的改变和给定系统的期望输出。

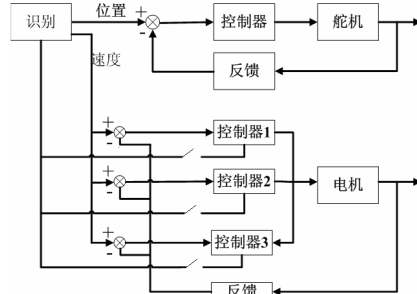


图1 智能车切换控制框图

Fig1 switching control frame of intelligent car

该智能车的路径识别方法采用单目摄像机方式,由于该路径识别方法较为复杂,这里就不再加以深述。东北大学二队的智能车外观图如图2所示。

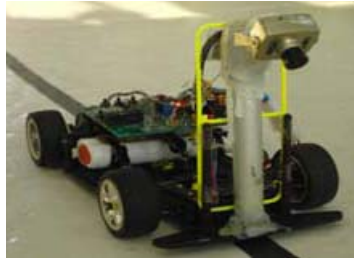


图2 智能车外观图

Fig2 outside drawing of intelligent car

在本智能车控制系统中,舵机转向控制与驱动电机的速度控制是衡量整个智能车控制系统性能的重要指标。因此,结合赛道路径的多样性,形成了智能车控制系统的多种控制策略。下面从智能车的舵机转向控制与驱动电机控制两部分对切换控制的进入条件及控制方法进行讨论。

由于在理论基础部分我们已经讨论了式(7)和(8),下面对其在具体应用对象中的使用进行分析。

现假设我们已知路径的识别结果,并已知通过识别所得到的车道中心线,通过选取车道中心线上最远点、中间点与最近点进行差值处理,以此差值作为切换控制的进入条件。这个差值由式(9)得到:

$$\begin{cases} \Delta e_1 = \text{最远点} - \text{中间点} \\ \Delta e_2 = \text{中间点} - \text{最近点} \end{cases} \quad (9)$$

满足切换的进入条件要求与必须同时成立,切换动作才能进行。其中与的符号所反应的是智能车所识别的引导线的趋势,它将其作为舵机转向的控制

信息。由于智能车的行驶路径在某种程度上来说是三种基本线形的组合,即直线、半圆曲线与S形曲线,从共性出发,这里只针对这三种线形进行讨论。切换条件可由式(10)决定。

$$\text{切换结果} = \begin{cases} \text{直线} & |\Delta e_1| \leq a \text{ 且 } |\Delta e_2| \leq a \\ \text{半圆曲线} & a \leq |\Delta e_1| \leq b \text{ 且 } a \leq |\Delta e_2| \leq b \\ \text{S形曲线} & |\Delta e_1| \geq b \text{ 且 } |\Delta e_2| \geq b \end{cases} \quad (10)$$

根据上述关系式,下面就舵机控制部分的切换进行讨论。

3.1 舵机控制 (Rudder Control)

舵机是智能车转向控制中极为关键部分,对其控制的好坏直接影响智能车是否能够实现安全行驶。根据舵机的机械特性,在其工作区内遵循线性规律,使得可以使用比例控制方案进行,比例系数的选择依据(10)中的识别结果进行,具体如下。

$$k = \begin{cases} k_1 & |\Delta e_1| \leq a \text{ 且 } |\Delta e_2| \leq a \\ k_2 & a \leq |\Delta e_1| \leq b \text{ 且 } a \leq |\Delta e_2| \leq b \\ k_3 & |\Delta e_1| \geq b \text{ 且 } |\Delta e_2| \geq b \end{cases} \quad (11)$$

而控制的依据是根据当前时刻的中轴线偏差,据此,形成了舵机转向控制方式

$$f(\Delta e) = k_i * \Delta e + b \quad (i=1,2,3) \quad (12)$$

这里的b表示舵机处于平衡位置时的PWM输出。

从(3)、(4)与(5)所形成的切换控制算法可以看出,如果上述三种情况下的线形进行细化处理,那么依据切换条件的细化阈值,可以使舵机能够满足不同条件下的路径条件下的转向控制,从而实现引导线跟随动作。

3.2 驱动电机控制 (Driven Motor Control)

驱动电机作为该智能车行驶的动力源泉,对其控制的好坏直接影响智能车系统的动力性能,通过使用切换控制策略的控制方案来实现智能车电机的可靠与快速控制。

由于本智能车的微处理器单元是Freescall公司的HCS12DG128B 16位单片机,其包含128K字节的Flash EEPROM, 8K字节的RAM, 2K字节的EEPROM, 2个异步串行通信接口(SCI),2个串行外围接口(SPI), 1个8通道的输入捕捉/输出比较(IC/OC)增强型捕捉定时器, 2个8通道、10位转换精度的模数转换器(ADC), 1个8通道的脉冲调制器(PWM)等。该单片机内部具有集成PLL锁相环,可以提高系统时钟的工作频率。为了满足路径检测精度的要求,我们使用了该单片机的PLL锁相功能,系统的外部晶振为16MHz,经过倍频处理后,系统时钟为48MHz,总线时钟为24MHz。由于微处理器的AD采集速度与系统时钟之间的关系,在某种程度限制了系统时钟,特别是采用基于图像传感器的路径识别方案的单一微

处理器条件下,为了及时处理视频采集数据,以实现识别的实时性,使得不易采用较为复杂的驱动电机控制器结构,为此选择PID控制器。由于增量式PID控制器具有简单与在处理数据时只需占用较少的微处理器资源的优良品质,这里使用增量式PID控制器,其形式如下所示。

$$\begin{cases} \Delta U = K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \\ U(k) = U(k-1) + \Delta U \end{cases} \quad (13)$$

其中 K_p 、 K_i 与 K_d 的选择依据路径的识别结果。

由于在前面已经讨论了有关于路径识别结果的结论,这里直接使用已经得到的结论(10)作为选择 K_p 、 K_i 与 K_d 的依据,其选择方法具体如下。

$$f(K_p, K_i, K_d) = \begin{cases} f(K_{p1}, K_{i1}, K_{d1}) & |\Delta e_1| \leq a \text{ 且 } |\Delta e_2| \leq a \\ f(K_{p2}, K_{i2}, K_{d2}) & a \leq |\Delta e_1| \leq b \text{ 且 } a \leq |\Delta e_2| \leq b \\ f(K_{p3}, K_{i3}, K_{d3}) & |\Delta e_1| \geq b \text{ 且 } |\Delta e_2| \geq b \end{cases} \quad (14)$$

在获得控制器参数的同时,通过路径识别结果,需要设定与控制器相适应的期望运行速度,以使得在实现最佳速度控制。

$$\text{期望速度} = \begin{cases} \text{直线速度} & |\Delta e_1| \leq a \text{ 且 } |\Delta e_2| \leq a \\ \text{半圆曲线速度} & a \leq |\Delta e_1| \leq b \text{ 且 } a \leq |\Delta e_2| \leq b \\ \text{S形曲线速度} & |\Delta e_1| \geq b \text{ 且 } |\Delta e_2| \geq b \end{cases} \quad (15)$$

根据上述讨论结果,可以得到不同路径条件下控制器参数与期望运行速度。基于此,可以将切换条件进行细化,可以得到由基本线形所衍生的其它赛道情形,从而能更好的实现速度变换控制。

4 结论(Conclusion)

将类极点配置法作为切换控制律求取的理论基础,并将此结论作为后续讨论的模型。结合2006年第一届“飞思卡尔”杯全国智能车邀请赛的赛道信息,将切换控制的控制思想贯穿于整个智能车的控制过程。通过分析赛道的线形特性,将其作为切换控制的切换条件,从而使得切换控制的进入条件成立。通过灵活使用极点配置的简化形式,从而使得在特定处理器条件下仍可以满足系统控制的实时性。东北大学二队将基于切换控制策略的智能车控制系统应用于第一届“飞思卡尔”杯全国智能车邀请赛并从112个参赛队中脱颖而出,从而证明了切换控制方案较其他控制方案具有较好的优良品质。

参考文献(Reference)

- [1] 陈松林,姚郁,张瑞.线性切换系统基于观测器的切换镇定[J].吉林大学学报(工学版),2006,1(36):87-91.
- [2] 孙希明,付俊,孙洪飞,赵军.一类切换线性中立时滞系统稳定性的分析[J].中国电机工程学报,2005,23(25):42-46.
- [3] 孙希明,齐丽,赵军.一类不确定线性系统的混杂状态反馈保成本控制[J].控制与决策,2005,20(4):421-425.
- [4] 张长学,武玉强,宗广灯.一类单输入线性切换系统的可镇定性研究[J].控制与决策,2006,7(21):759-762.
- [5] 王建,张珩.一类线性MIMO离散系统的切换控制方法[J].控制与决策,2004,1(19):81-84.
- [6] Mingjun Zhang, Tzyh-Jong Tarn. A switching control strategy for nonlinear dynamic systems[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003(1):1476-1481.
- [7] Prandini M. A self-optimizing switching control scheme for uncertain ARMAX systems[C]. CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005:2853-2858.
- [8] Franco E, Saccone S, Parisini T. Stable multi-model switching control of a class of nonlinear systems[C]. American Control Conference, 2004(2):1873-1878.
- [9] Chow J H. A pole-placement design approach for systems with multiple operating conditions[C]. Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control, 1988(2):1272-1277.
- [10] Chang B C, Yousuff A. Pole placement and the observer-based controller parameterization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1990(35): 726-729.
- [11] Rosenthal J, Ravi M S. Dynamic pole placement and the connection to geometry[C]. Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control, 1992(1):179-180.
- [12] Shtessel Y B, Raznopolov O A, Ozerov L A. Sliding mode control of multiple modular DC-to-DC power converters[C]. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications, 1996:685-690.