

汽车主动悬挂控制的研究现状和未来挑战

张玉春, 王良曦, 丛 华
(装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072)

摘要: 主动悬挂系统能提高车辆的乘坐舒适性和操纵性, 得到了广泛的研究和重视. 掌握悬挂控制的研究现状, 可以更好地研究和利用主动悬挂技术. 本文立足现有文献, 依照不同的控制策略, 从七个方面阐述了主动悬挂控制的研究现状, 总结出了尚需解决的非线性悬挂建模、悬挂集成控制、控制系统性能评估等六个基本问题. 文章最后分析了鲁棒控制、自适应控制、智能控制在车辆悬挂控制中的局限性及出现的挑战性课题, 提出了车辆主动悬挂技术的发展方向.

关键词: 主动悬挂; 鲁棒控制; 自适应控制; 智能控制; 研究现状; 挑战

中图分类号: TP13, U461 **文献标识码:** A

Present situation and future challenges for automobile active suspension control

ZHANG Yu-chun, WANG Liang-xi, CONG Hua

(Department of Mechanical Engineering, Armored Force Engineering Academy, Beijing 100072, China)

Abstract: Active suspension system could improve riding quality and provide good performance in handling, it has been gaining increased attentions. It is necessary for technologist to know the development of active suspension system. Basing on current literatures, according to seven diverse control strategies, this paper summarizes the situation of automobile active suspension control, and concludes the existing unsolved six questions, such as nonlinear suspension modeling, integrated control and control system performance evaluation. In the end, limitations and future challenging tasks of robust control, adaptive control and intelligent control in automobile active suspension system were provided. What's more, this paper puts forward future direction for active suspension technology.

Key words: active suspension; robust control; adaptive control; intelligent control; present situation; challenges

1 引言(Introduction)

性能优越的悬挂系统, 是车辆在不同地形条件下具有快速机动性和良好舒适性的重要保证. 传统的地面车辆, 普遍采用被动悬挂系统, 这种悬挂系统只能被动地存储和吸收外界能量, 不能主动适应车辆行驶状况和外界激励的变化, 大大制约了车辆性能的进一步改善. 主动悬挂系统依靠外界供给的能量, 主动产生作用力, 能大大改善车辆的乘坐性能和操纵性能, 引起了国内外的研究和重视.

1955年, 德国 Federspiel-Labrosse 教授首次提出主动悬挂的概念^[1], 随后许多国家的学者以及各大汽车厂家都对其进行了理论和试验研究, 并取得可喜的进步. 1982年, 英国 Lotus 公司首次实现了理论到实践的零突破, 研制了 Lotus 电泳主动悬挂, 随后在瑞典 Volvo 车上安装了这种系统. 1990年, Toyota 在 Celica 上安装了“有限带宽”主动悬挂系统. 1991年, Nissan 公司在 Infinity Q45 上安装了全主动悬挂系统. 1992年, 美军在陆军坦克机动司令部(TACOM)的基础上成立国家机动车中心(NAC), 专门研究军用车辆的主动悬挂技术, 大大促进了主动悬挂技术在军用地面车辆上的应用和开发^[2].

悬挂主动控制的研究已有半个世纪的历史, 目前人们已

提出许多控制方法, 每种方法均有各自的优缺点和适应性. 一般可将悬挂主动控制分为全主动悬挂、半主动悬挂和慢主动悬挂. 全主动悬挂又称宽频带主动悬挂, 它需要的作动器带宽较大, 能在较宽的频带内改善悬挂的性能, 其缺点是耗能大、结构复杂. 半主动悬挂仅需消耗很少的外部能源以提供作用力, 其作动器仅耗散系统的振动能. 因而, 半主动悬挂的特点是耗能少, 但它的控制是不连续的, 只能在有限的频率范围提高悬挂的性能. 慢主动悬挂又称有限带宽主动悬挂, 需要外部能源以提供作用力, 与全主动悬挂不同的是作动器的带宽变小. 这种悬挂只控制 8 Hz 以下的外界激励, 高于 8 Hz 的外界激励则由弹簧、阻尼器构成的被动悬挂控制, 因而慢主动悬挂的弹簧和阻尼器不能取消.

无论哪种主动悬挂, 均需要有效、可靠的控制算法, 只有设计完美的控制系统才能获得主动悬挂的优越性能. 因而, 主动悬挂控制的研究一直是一个非常活跃的领域, 取得的成果也非常突出.

2 主动悬挂系统控制(Active suspension system control)

悬挂系统的主动控制理论, 其发展历程大体可划分为两个阶段^[3]: 第一阶段从 20 世纪 60 年代初到 90 年代初, 理论

上主要为经典的 PID 控制和现代的 LQR/LQG 控制;第二阶段从 20 世纪 90 年代初至今,理论上主要为非线性控制、预测控制、鲁棒控制、自适应控制、智能控制等。到目前为止,主动悬挂控制研究的第一阶段在理论上已经取得比较满意的结果,第二阶段的理论正处于研究和探讨之中,是车辆主动悬挂控制发展的高潮时期。

2.1 最优控制 (Optimal control)

早在上世纪 60 年代,最优控制理论使用在车辆悬挂系统研究中^[4]。线性最优二次型控制 (LQG/LQR) 是主动悬挂设计人员常用的方法。理论上讲, LQG/LQR 控制主动悬挂可以大幅度改善车辆的性能^[5], 且具有足够的幅值和相角稳定裕量。但这种控制方法对模型摄动的鲁棒稳定性有时却很差, 在激励频率大于 60 Hz 时, 系统极易变得不稳定。为此, 人们对 LQG/LQR 控制作了许多改进。Beheshti 等^[6] 考虑到外界扰动的影响, 采用奇异摄动理论, 基于车辆快慢两种模式 (车轮频率和车体振动频率), 提出并设计了一种组合 LQG 控制器。数字仿真结果表明, 组合 LQG 的控制性能和车辆的全状态反馈的控制器具有相当的性能。Lin 等^[7] 基于非线性滤波器理论, 采用 backstepping 方法调节非线性问题, 很好地解决了车辆对软、硬悬挂的不同需求。Doyle 等^[8] 和黄兴惠等^[9] 等用鲁棒最优控制理论设计控制器, 在系统性能略有降低的情况下, 大大提高了系统的稳定性。

2.2 自适应控制 (Adaptive control)

自适应控制是一种实时调节控制器的方法, 主要解决受控对象和环境的数学模型不完全确定时, 如何改变控制器参数或产生某一辅助信号, 使指定的性能指标尽可能接近和保持最优。在众多的自适应控制方法中, 理论较完善、应用较广泛的有模型参考自适应控制 (MRAC) 和自校正控制 (STC)。

Sunwoo 等^[10] 提出了一种以理想天棚阻尼控制为参考模型的自适应控制策略。模拟结果表明, 这种自适应控制在悬挂行程大范围变化时, 系统依然具有良好的性能。Yao Bu 等^[11] 在不确定性模型的基础上, 着重研究悬挂控制力的自适应鲁棒跟踪, 仿真结果表明: 在 5 Hz 以下能获得可靠的鲁棒跟踪力。Chantranuwathana 等^[12,13] 在此基础上认为, 未建模动力学, 尤其是控制信号的一阶延时是造成这种影响的主要原因。他对自适应控制进行适当修改, 包括: a) 对作动器动力学进行建模的 ARC (自适应鲁棒控制); b) 取消作动器动力学的 ARC; c) ARC 参数在线自适应调节。实验结果表明, 对作动器的控制信号加以限定后, 后两种方案比较实用。由于 ARC 需要系统的状态信息, 不可避免地受到量测噪声的影响, Fanping 等^[14] 进一步提出一种理想补偿自适应鲁棒控制 (DCARC) 策略。相对 ARC 而言, DCARC 能大幅度简化控制器的设计。由于这种自适应控制算法的回归量并不直接依靠所测量的状态, 从而减少了量测噪声对控制系统性能的影响, 是目前比较适合工程使用的自适应控制算法。

2.3 天棚阻尼控制 (Sky-hook damping control)

天棚阻尼控制理论是由美国 Karnopp 教授等^[15] 提出的, 在主动和半主动悬挂中获得广泛运用。Sky-hook 原理实际上

将悬挂质量速度的比例量作为反馈作用于悬挂质量。理想的天棚阻尼控制很难取得车辆乘坐舒适性和悬挂动行程的一致平衡, 且在高频时控制效果差。Besinger 和 Kitching 等^[16,17] 提出了一种改进天棚阻尼控制器 (MSD), 利用了被动悬挂在高频激励时的优点, 较好地克服了理想天棚阻尼控制的不足。Li 等^[18] 在天棚阻尼控制中, 采用非线性卡尔曼滤波器消除噪声对车体绝对速度的影响, 进一步提高了天棚阻尼控制器的性能。

2.4 预见控制 (Preview control)

预见控制是根据当前的目标值、未来干扰等来决定当前的控制方法^[19,20]。1990 年, Langlois 等^[21] 在某军用越野车辆的前端, 安装超音速地面高度传感器预测地面形状, 由于未考虑作动器的严重非线性, 实验结果并不理想。该系统在通过高为 50 mm 的鼓包时, 车体加速度均方根值相对于被动悬挂只减少了 15%。Morita^[23] 研究了预见距离对悬挂系统性能的影响。研究结果表明, 预测距离为 1 m 左右合适, 其最佳的预测时间为 30 ms。Kitching 和 Cebon^[17] 针对 1/2 模型, 采用开环预测 (DLP) 方法预测 HIL 车辆模型的未来状态, 通过相位滞后补偿 (PLC) 弥补作动器的响应延时。研究结果表明, 相对于被动悬挂, 采用预先控制的主动悬挂车辆在高速公路、柏油路及碎石路面上, 车体加速度均方根值可分别减少 15.4%、18.2% 和 16.2%。作者进一步认为, 最佳的补偿时间为 20 ms。近年来, 最优预见控制的研究增多。Mianzo 等^[24] 用 LQ 和 H_∞ 方法研究了最优预见控制问题, 结果表明 H_∞ 方法使噪声和扰动对预见控制的影响最小, 比 LQ 预见控制效果要好。

2.5 滑模控制 (Sliding mode control)

滑模控制是变结构控制的一种特殊形式, 具有强的非线性系统处理能力、鲁棒性能以及实现简单等特点。就目前的研究看, 滑模控制的关键是解决好滑动方向和滑动幅度的选取及克服“抖振” (chattering) 问题。

1977 年, 前苏联学者 Utkin^[25] 系统地提出并介绍滑模控制在变结构系统中的应用, 从而使滑模控制理论成为工程研究的重要内容。Yagiz 等^[26] 应用滑模控制理论设计 1/4 车辆主动悬挂系统, 取得了比线性 LQ 控制更优越的性能。Choi 等^[27] 基于整车模型, 把滑模控制理论用到半主动悬挂上, HIL 模拟结果表明, 当车辆参数大幅度变化时, 悬挂系统依然具有较好的性能和稳定性。Choi 等^[27] 基于 Lyapunov 理论, 设计了整车主动悬挂系统的滑模控制器, 该控制器实现了无 chattering。Chen 等^[28] 在遗传算法 (GA) 的基础上, 实现了滑模控制滑动方向智能选取, 再结合模糊逻辑控制 (FLC) 消除了 chattering 现象。这种综合滑模控制、遗传算法及模糊逻辑的 IFSMC 算法克服了这些算法单独使用时的不足, 大大提高了系统的性能和稳定性, 具有一定的研究价值。Yokoyama 等^[29] 不同于上述学者, 他在研究滑模控制时, 接受了模型参考自适应控制的思想, 提出跟随滑模控制算法。一般学者的思路是努力使系统状态处于滑动平面上, 而 Yokoyama 等则是参考一个理想模型, 使实际模型与理想参考模型的差处于滑动平面上。该算法不需要测量控制力, 对于处理非线性系统尤其具有优势。

2.6 智能控制(Intelligent control)

智能控制是一类无需(或仅需尽可能少的)人的干预就能够独立驱动智能机器实现其目标的自动控制。目前,智能控制技术,如人工神经网络技术(ANN)、模糊控制技术(FLC)、遗传算法优化技术等已进入工程化和实用化的时代,在汽车工程中得到了研究和重视。人工神经网络能够对非线性特性进行学习、记忆,能以任意精度反映被学习对象的特征。用ANN学习悬挂的非线性特性可以得到神经汽车模型,无须对汽车的悬挂作线性化处理。模糊逻辑控制是基于模糊推理的一种智能控制方法,能充分利用学科领域的知识,能以较少的规则来表达知识,在技能处理上比较擅长,特别在复杂系统控制问题上,模糊理论更具有突出的优点。从目前研究来看,单独的人工神经网络、模糊逻辑控制和遗传算法优化技术均存在不同程度的不足,在汽车悬挂控制上,很少单独使用,常和它的控制算法结合使用,或者几种智能控制算法集成使用。

Baumal等^[30]详细研究了遗传算法和传统的寻优方法在汽车主动悬挂设计中的优缺点。他认为,GA算法虽然较为复杂,但它可在全局范围内寻找最优解,设计的悬挂具有更好的性能。Buckner等^[31]采用结构化神经网络方法实现了对主动悬挂系统特征参数的智能估计。Peng等^[32]采用DNA编码的遗传算法,对模糊逻辑控制器的规则库优化设计,避免了传统模糊逻辑控制规则的经验化。并且,基于DNA编码的GA算法,有效解决了GA算法搜索速度与种群数目(性能)之间的矛盾。研究表明,这种综合算法具有较大的优势。Hashiyama等^[33]通过遗传算法探讨有无专家知识对模糊逻辑控制器的影响。研究表明,在无专家知识的情况下,采用GA算法可帮助选择逻辑规则;在有专家知识的情况下,GA算法可以更好地调节系统性能。Taylor等^[34]提出一种回归优化模糊控制算法,采用这种算法可以减轻系统性能对参数变化的敏感程度。Yoshimura等^[35]针对1/2主动悬挂,提出LQ和FLC联合控制的方法。LQ以车体加速度作为反馈信号,作为主控制器,FL作为补偿控制器。研究表明,结合LQ的LF控制方法在控制车体加速度方面十分有效。Araujo等^[36]最近提出并研究了分级递阶模糊逻辑控制器的设计方法。仿真结果证明这种控制方法较单纯的FLC,具有更好的性能。

2.7 鲁棒控制(Robust control)

鲁棒控制就是试图描述被控对象模型的不确定性,并估计在某些特定的界限下达到控制目标所留有的裕度。由于车辆主动悬挂所处的环境以及自身的特点,在系统建模时总会引入建模误差,在设计控制时必须考虑各种不同的不确定因素。经典PID具有较好的鲁棒性,它的不足之处是适用单输入单输出(SISO)系统,对车辆主动悬挂这样复杂的系统难以适用。LQG控制适合于多输入多输出(MIMO)系统,不足之处是鲁棒性不足。目前,用于车辆主动悬挂的鲁棒控制方法主要有回路传输回复(LTR)、鲁棒LQG方法、 H_∞ 方法、结构奇异值—— μ 方法以及动态平面控制(DSC)等方法。

Doyle等^[8]应用LTR方法提高LQG控制的鲁棒性,该方

法是基于LQG控制性能与鲁棒性之间的折衷,这种方法过于保守,设计的控制器性能难以达到最优。西班牙Müller^[37]利用 H_∞ 理论,设计了自适应性很强的悬挂控制器。Pui-Chuen等^[38]在其博士论文中,利用DSC方法设计了非线性鲁棒悬挂控制器。美国密执安科技大学R Kashani等应用结构奇异值—— μ 方法对具有参数摄动及高阶不确定性的主动悬挂LQG控制进行鲁棒性分析。

H_∞ 方法设计的缺点是设计出的控制器一般是保守的,而且需要在鲁棒稳定性和性能鲁棒性之间作折衷选择。解决这一问题的途径之一是所谓的 H_2/H_∞ 混合设计方法^[39,40]。日本的Webers等^[41]进一步提出了鲁棒设计的实际难题,基于Lyapunov函数提出鲁棒设计不确定性边界的确定方法。

在国内,也有不少人鲁棒控制进行了专题研究。清华大学的黄兴惠等^[9]、西南交通大学的戴焕云等^[3]、上海交通大学的张志谊^[19]在其博士论文中,均以不同的方法对鲁棒控制进行了详细的研究。

3 主动悬挂控制的总结(Summing-up for active suspension control)

3.1 取得的进步(Progress)

汽车主动悬挂控制的研究成果很多,主要在于:

1) 各国学者和工程人员在解决主动悬挂系统的控制问题,以及使主动悬挂系统走向工程应用等方面作了大量的卓有成效的工作。由于他们的不懈努力,各种不同结构、不同控制算法的主动悬挂系统已经应用到部分高级轿车和个别军用原型车辆上。

2) 获得大量的主动悬挂控制知识,包括:主动悬挂的LOR/LQG控制、自适应控制、滑模控制、智能控制、鲁棒控制等理论,以及这些控制器的设计方法。这些知识对于汽车主动控制技术的发展,甚至对于整个工程领域控制理论的发展和应用,都具有十分重要的意义。

3.2 主动悬挂控制未解决的问题(Unresolved problems for active suspension control)

1) 现有主动悬挂系统的绝大部分控制算法均依赖精确的悬挂模型,而悬挂系统在特定的情况下具有极强的非线性,有些非线性现在也没有好的方法进行建模和处理(如悬挂撞击限位挡块)。针对车辆悬挂系统特有非线性现象的控制算法,一直没能很好解决。

2) 汽车主动悬挂系统是个典型的多输入多输出的复杂系统,对于复杂系统的控制,其重要问题之一是解耦控制和故障时稳定性。目前对车辆主动悬挂系统的解耦控制,除Fu-Cheng博士^[42]采用“地面扰动响应解耦控制器参数化”方法外,尚未见其他的研究成果。故障时稳定性是鲁棒稳定性的重要内容之一,如果MIMO系统的一个控制通道发生故障,使原来的闭环控制系统变成新的控制系统,很可能导致整个系统性能恶化或不稳定,目前这方面的问题也未解决。

3) 主动悬挂系统与车辆底盘其他主动系统的联合控制。车辆各系统的总体性能与车辆各部分的控制功能密切相关,而且各功能子系统之间相互影响、相互制约。例如,如果

侧倾被主动悬挂所控制,那么侧偏响应特性通常会变差.因而,独立的控制系统所得到的性能改善往往不如预料的好.如对整车系统加以联合控制,则可以使各控制功能之间加以协调.同时,联合控制还精简了系统配置,可以对车辆的状态信息及硬件进行共享,提高系统可靠性和降低系统成本.因而主动悬挂系统与车辆其他主动系统进行联合控制是未来的主要研究方向之一,目前对这方面的研究远远不够.

4) 车辆的姿态调节和乘坐舒适性控制是悬挂设计需考虑的两个重要方面,现有研究成果大多根据不同的需要建立不同的数学模型,各自独立进行设计,并认为车辆的总体性能是这些子系统性能之和;或者对数学模型进行分解,然后再组合起来进行控制.能否在建立数学模型时考虑负载干扰,把姿态控制和乘坐控制同时进行设计,而大大简化设计过程,这个问题也未解决.

5) 悬挂系统的性能评估基本上是基于输出变量的 RMS 值,实体建模仿真对于验证设计的悬挂系统及控制器提供了十分有效的方法,同时,验证装有主动悬挂系统的车辆所具有的动力学特性,也是评价悬挂控制好坏的重要手段,它最能为样车设计提供有力的理论依据.此方面的研究,目前尚未见报道.

6) 基于车辆悬挂反馈控制系统的设计自由度和测量变量的选择问题,针对这两个问题,Smith^[43] (1995 年)用 1/4 模型作了较详细的研究,但他未考虑选择不同的变量后系统所具有的鲁棒性能.而对于 1/2 模型和整车模型,由于状态变量多,后一个问题一直没有得到有效的解决.

4 主动悬挂控制的挑战 (Active suspension control challenges)

4.1 鲁棒控制的局限性 (Robust control limitations)

鲁棒控制理论及设计工具,为决定控制策略的鲁棒性以及权衡控制系统的性能提供了极有价值的框架结构.但是,鲁棒控制始终不能克服模型的不确定性和控制系统性能之间的矛盾关系.滑模控制是另一种受工程界关注的鲁棒控制方法,它对系统参数变化的灵敏度低,从理论上讲,能完全排除外界扰动的影响.当前,滑模控制最大的障碍是 chattering 问题,一些学者对此作了深入的研究,但研究表明, chattering 现象的减弱同时牺牲了控制系统对外界扰动和系统参数变化的不敏感性.

汽车悬挂系统参数的不确定性以及外界环境的不确定性,无法用准确的模型进行描绘,且不确定性大小也很难界定,这就使得鲁棒控制的使用受到一定程度的限制.由于越野车辆悬挂系统的外界激励范围广、变化大且悬挂系统常常呈现难以处理的非线性,选择滑模控制不失为一个较好的方法.但在这种情况下,如何克服和利用 chattering 现象以及利用滑模控制的极限刚度(完全屏除外扰的影响)均值得进一步研究.

4.2 自适应控制的挑战 (Adaptive control challenges)

无论采用哪种自适应控制,直接的或间接的、线性的或非线性的、传统的或智能的,都是建立在对过程变化的在线评价上,正确地更新和(或)补偿控制器、自适应控制器的问

题是在线建模、识别、非线性补偿和控制器的调节问题.一般而言,由于悬挂系统在某些条件下的非线性及其作动系统的固有强烈非线性,很难对其进行精确建模,而且在线识别更加困难.缺乏对这些因素的考虑,即便建立精确的模型,进行精确的控制,也不可能取得好的控制效果.因而,需进一步研究适合汽车主动悬挂系统的自适应控制算法,处理好这些问题.

4.3 智能控制的局限性及未来发展 (Intelligent control limitations and future development)

模糊控制并不需要对系统模型的精确描述,它在不确定性系统模型的环境下具有很强的应用价值.模糊控制的核心是一套语言控制规则集,规则库在模糊逻辑控制中起着关键性作用,它决定了控制过程的精度.但传统的模糊控制规则建立在专家或熟练操作人员的知识和实践的基础上,换言之,规则库依赖于人脑,主观形成的规则往往并非最优.神经网络控制需要预先详细描述所需系统的性能,并且提供足够精确的样本数据,这对于汽车主动悬挂系统是难以做到的.并且,神经网络控制学习结果的物理意义并不明显,一旦神经网络控制不能达到预期的控制效果,就较难找到达不到的原因和相应的解决办法.因而这两种智能控制均具有一定的局限性,需要和其他控制方法结合或者两者结合形成模糊神经网络控制方法.可望在汽车上使用的智能控制算法为: Bang-Bang 控制、模糊神经网络控制、基于 LQG 的模糊逻辑控制以及其他组合式智能控制方法.

参考文献 (References):

- [1] FEDERSPIEL-LABROSSE J M. Beitrag zum stadium und zur vervollkommung der aufhangung der fahrzeuge [J]. *ATZ, März*, 1955, 3(2): 57 - 72.
- [2] HOOGERP F B, EILER M K, MACKIE W J. Active suspension in the automotive industry and the military [J]. *SAE J of Commercial Vehicles*, 1996, 105(2): 96 - 101.
- [3] 戴焕云, 沈志云. 车辆主动悬挂的鲁棒控制研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 1999.
(DAI Huanyun, SHEN Zhiyun. *The research on robust control of vehicle active suspension* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1999.)
- [4] KARNOPP D C, TRIKHA A K. Comparative study of optimization techniques for shock and vibration isolation [J]. *J of Engineering for Industry, Trans on ASME, Series B*, 1969, 91(4): 1128 - 1132.
- [5] ELBEHEIRYM E M, KARNOPP D C. Optimal control of vehicle random vibration with constrained suspension deflection [J]. *J of Sound and Vibration*, 1996, 189(5): 547 - 564.
- [6] BEHESHTI M T H, NEMATOLLAHZADEH S M. Design of active suspension control using singular perturbation theory [C]// BERTONI G. *Proc of IFAC 15th Triennial World Congress*. Barcelona, Spain: Pergamon, 2002, 789 - 797.
- [7] LIN J S, IOANNIS K. Nonlinear design of active suspensions [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1997, 17(3): 45 - 49.
- [8] DOYLE J C, STEIN G. Multivariable feedback design concepts for a classic/modern synthesis [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1981, 26(1): 4 - 16.

- [9] 黄兴惠,赵六奇.汽车主动悬架的实验研究及系统鲁棒稳定性分析与设计[D].北京:清华大学,1999.
(HUANG Xinhui, ZHAO Liuqi. *Experimental research of vehicle active suspension and analysis and design of system stability robustness* [D]. Beijing: Tsinghua University, 1999.)
- [10] SUNWOO M, CHEOK K A C, HUANG N T. Model reference adaptive control for vehicle active suspension systems [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1991, 38(3): 217-222.
- [11] YAO BU, TOMIZUKA M. Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form [J]. *Automatica*, 1997, 33(5): 893-900.
- [12] CHANTRANUWATHANA S, PENG Huei. Practical adaptive robust controllers for active suspension [J]. *Dynamic Systems and Control*, 2000, 69(1): 255-262.
- [13] CHANTRANUWATHANA S, PENG Huei. Adaptive robust control for active suspensions [C]. American Automation Control Council. *Proc of American Control Conference*. San Diego, California: Hyatt Regency, 1999: 1702-1706.
- [14] BU Fanping, YAO Bin. Desired compensation adaptive robust control of single rod electro-hydraulic actuator [J/OL]. www: <URL: http://citeser.nj.nec.com/>.
- [15] KARNOPP D, CROSBY M J. Vibration control using semi-active force generators [J]. *J of Engineering for Industry, Trans of the ASME*, 1974, 5(2): 619-626.
- [16] BESINGER F H, CEBON D, COLE D J. Force control of a semi-active damper [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1995, 24(6): 695-723.
- [17] KITCHING K J, CEBON D, COLE D J. An experimental investigation of preview control [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1999, 32(6): 459-478.
- [18] LI Hong, GOODALL R M. Linear and non-linear skyhook damping control laws for active railway suspensions [J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(7): 843-850.
- [19] 张志谊,傅志方.汽车悬挂系统的主动控制研究[D].上海:上海交通大学,1999.
(ZHANG Zhiyi, FU Zhifang. *Active control research on vehicle suspension systems* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 1999.)
- [20] 刘少军,李艳.基于1/2车辆模型主动悬架预先控制方法的研究[J].信息与控制,2000,29(1):6-13.
(LIU Shaojun, LI Yan. Study on anticipated control method pertinent to active suspension based on a half-car model [J]. *Information and Control*, 2000, 29(1): 6-13.)
- [21] LANGLOIS R G, ANDERSON R J, HANNA D M. Implementing preview control on an off-road vehicle with active suspension [C]. // *Proc of the 12th IAVSD Symposium on the Dynamics of Vehicles*. Lyon, France: Swets and Zeitlinger, 1991.
- [22] NAGIRI S. Improvement of ride comfort by preview vehicle suspension system [J]. *SAE Transactions, J of Passenger Cars*, 1992, 101(6): 364-370.
- [23] MORITA T, TANAKA T, KISHIMOTO N. Ride comfort improvement using preview sensor [C]. // *AVEC. Int Symposium on Advanced Vehicle Control*. Yokohama, Japan: SAE of Japan, 1992: 123-129.
- [24] MIANZO L, PENG Huei. LQ and Hinf preview control for a durability simulator [C]. American Automation Control Council. *Proc of American Control Conference*. Albuquerque, New Mexico: IEEE Press, 1997: 699-703.
- [25] UTKIN V I. Variable structure systems with sliding mode [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1977, 22(2): 212-222.
- [26] YAGIZ N, OZBULUR V, INANC N. Sliding mode control of active suspension [C]. // *IEEE, 12th IEEE Int Symposium on Intelligent Control*. Istanbul, Turkey: IEEE Press, 1997: 373-378.
- [27] CHOI S B, CHOI Y T, PARK D W. A sliding mode control of a full-car electrorheological suspension system via hardware in-the-loop simulation [J]. *Trans of the ASME*, 2000, 122(3): 114-121.
- [28] TA-TAU CHEN, TZUU-HSENG S, LI. Integrated fuzzy GA-based simplex sliding-mode control [J]. *Int J of Fuzzy Systems*, 2000, 2(4): 267-277.
- [29] YOKOYAMA M, HEDRICK J K. A model following sliding-mode controller for semi-active suspension systems with MR dampers [C]. // American Automation Control Council. *Proc of American Control Conference*. Virginia: Arlington Press, 2001, 7: 2652-2657.
- [30] BAUMAL A E, MCPHEE J J, CALAMAI P H. Application of genetic algorithms to the design optimization of an active vehicle suspension system [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1998, 7(1): 87-94.
- [31] BUCKNER G D, SCHUETZE K T. Intelligent estimation of system parameters of active vehicle suspension control [J]. *SAE Transactions, J of Passenger Cars*, 1999, 108(6): 1257-1263.
- [32] PENG Xiao, VADAKKEPAT P, TONG HENG. DNA coded GA for the rule base optimization of a fuzzy logic controller [C]. // *IEEE. Proc of the 2001 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Seoul, Korea: IEEE Press, 2001, (2): 1191-1196.
- [33] HASHIYAMA T, SHAOUD A. Fuzzy controllers for semi-active suspension system generated through genetic algorithms [J]. *IEEE Proc-Control Theory and Applications*, 1995, 142(2): 1371-1376.
- [34] TAYLOR J H, SHENG Lan. Recursive optimization procedure for fuzzy-logic controller synthesis [C]. // American Automation Control Council. *Proc of American Control Conference*. Philadelphia: IEEE Press, 1998: 1211-1219.
- [35] YOSHIMURA T, NAKAMINAMI K, KURIMOTO M, et al. Active suspension of passenger cars using linear and fuzzy-logic controls [J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(7): 41-47.
- [36] ARAUJO F M U, YONEYAMA T. Improved vibration suppression via hierarchical fuzzy control [C]. // BERTONIG. *Proc of IFAC 15th Triennial World Congress*. Barcelona, Spain: PERGAMON, 2002: 1321-1330.
- [37] MÜLLER N. *Development of a robust driver model with parameter adaptation* [D]. Universität Karlsruhe, laboratoire d'Automatique de Grenoble, 1996.
- [38] PUI-CHUEN, PATICK YIP. *Robust and adaptive nonlinear control using dynamic surface controller with application to intelligent vehicle highway system* [D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1996.
- [39] GASPAR P, SZASZI I. Mixed H_2/H_∞ control design for active suspension structures [J]. *Periodica Polytechnica in Hungary (in English)*, Series: Transportation, 2000, 28(1/2): 3-16.
- [40] GASPAR P. Model-based H_2/H_∞ control design for uncertain dynamic system [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 56

(3):353-359.

- [41] WEBERS C, ZIMMER U R. Practical trade-offs in robust target following [J/OL]. www: < URL: <http://christfriend.gmd.gr.jp/> > .
- [42] WANG Fu-cheng. *Design and synthesis of active and passive vehicle suspensions* [D]. Cambridge: Queens' College Department of Engineering, University of Cambridge, 2001.
- [43] SMITH M C. Achievable dynamic response for automotive active suspension [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1995, 24(1):1-34.

作者简介:

张玉春 (1977—),男,博士研究生.1998年7月毕业于装甲兵工程学院车辆工程专业,获学士学位;2001年7月,毕业于蚌埠坦克

学院,获指挥自动化专业硕士学位;2001年7月至今,在装甲兵工程学院车辆工程学科攻读博士学位;研究方向为兵器系统与应用工程、自动控制和动力学系统仿真. E-mail: yuchun-zhang@163.com;

王良曦 (1941—),男,教授,博士生导师.1964年10月毕业于装甲兵工程学院,从事车辆试验、论证及理论研究工作.研究方向为兵器系统与应用工程、车辆论证、试验以及计算机仿真. E-mail: Lxwang2000@sohu.com;

丛华 (1966—),男,副教授,博士,硕士生导师.1992年7月,在装甲兵工程学院机电工程专业获硕士学位;1998年4月,获清华大学自动控制专业博士学位;1998年至今,在装甲兵工程学院机械工程系任副教授,机电工程室主任.研究方向为机电一体化控制、系统控制和传感器技术研究.

《全国高等学校自动化专业系列教材》第一批招标教材书目

	编 号	教材名称	学时	本数	说明
本科生教材 (27~29本)					
控制理论与工程 (11~12本)	Auto-2-1-V01 Auto-2-1-V02	自动控制原理	64	2	面向研究型1本 面向应用型1本
	Auto-2-2-V01 Auto-2-2-V02	现代控制理论	48	2	面向研究型1本 面向应用型1本
	Auto-2-3-V01 Auto-2-3-V02	控制理论 CAI 教程	48	1 or 2	不同的风格,两个版本
	Auto-2-4-V01	控制系统分析与设计 ——基于 MATLAB 的方法	48	1	
	Auto-2-5-V01 Auto-2-5-V02	工程控制基础	48	2	面向工程类非控制专业, 不同学时需要
	Auto-2-6-V01 Auto-2-6-V02	控制系统设计	48	2	强调案例分析面向自动控制1本 面向工业自动化1本
	Auto-2-7-V01	自动控制元件	48	1	
	Auto-3-1-V01 Auto-3-1-V02	计算机控制系统	48	2	面向过程控制1本 面向工业自动化1本
控制系统与技术 (11~13本)	Auto-3-2-V02	电子电子技术	48	1	
	Auto-3-3-V01	电力拖动与运动控制系统 或 电机与运动控制系统	64	1	面向自动控制
	Auto-3-4-V01	电机与拖动	48	1	面向工业自动化
	Auto-3-5-V01	运动控制系统	48	1	面向工业自动化
	Auto-3-6-V01	运动体控制系统	48	1	面向航空、航海
	Auto-3-7-V01 Auto-3-7-V02	过程控制系统	48	1 or 2	不同层次,两个版本
	Auto-3-8-V01	系统建模与仿真	48	1	
	Auto-3-9-V01 Auto-3-9-V02	传感器与检测技术	48	1 or 2	不同层次,两个版本, 可扩展至“检测系统”
信号处理与 分析(3本)	Auto-3-10-V01	嵌入式控制系统	48	1	
	Auto-5-1-V01	信号与系统分析	64	1	面向自动控制
	Auto-5-2-V01	信号分析与处理	48	1	面向工业自动化
计算机与网络 (2本)	Auto-5-3-V01	数字信号处理	48	1	
	Auto-6-1-V01	单片机原理与接口技术	48	1	
研究生教材 (5本)	Auto-6-2-V01	计算机网络	48	1	
	Auto()-2-1-V01	最优控制	48	1	
	Auto()-2-2-V01	智能控制基础	48	1	
	Auto()-3-1-V01	多原信息融合理论与应用	48	1	
	Auto()-5-1-V01	图像处理与计算机视觉	48	1	
	Auto()-1-1-V01	专业数学(书名待定)		1	