

# 预见控制理论及应用研究进展

甄子洋<sup>1</sup>

**摘要** 预见控制因其能够利用已知的未来目标信息或干扰信息来改善控制系统的性能, 在众多实际工程领域得到越来越多的应用, 正日益受到研究者的广泛关注. 本文较全面概述了预见控制理论自 20 世纪 60 年代提出以后的发展状况, 重点概述线性最优预见控制、线性鲁棒预见控制、非线性预见控制等相关理论的研究进展, 并且总结预见控制在车辆主动悬挂系统、机电伺服系统、机器人、飞行器、电网发电系统等领域的应用现状. 最后, 总结了预见控制的研究成果, 探讨了目前存在的主要问题并展望了未来发展方向. 本文的综述旨在通过抛砖引玉, 促进预见控制理论及应用的全面发展.

**关键词** 研究进展, 预见控制, 最优控制, 鲁棒控制, 车辆主动悬挂系统, 机器人, 飞行器

**引用格式** 甄子洋. 预见控制理论及应用研究进展. 自动化学报, 2016, 42(2): 172–188

**DOI** 10.16383/j.aas.2016.c150408

## Research Development in Preview Control Theory and Applications

ZHEN Zi-Yang<sup>1</sup>

**Abstract** Preview control can improve control system performance by utilizing future desired or external disturbance information. Therefore, more and more applications are seen in various real engineering fields, attracting a wide spread attention of researchers. This article comprehensively overviews the preview control research achievement since 1960s, and especially introduces the theoretical research progress of linear optimal preview control, linear robust preview control and nonlinear preview control. Furthermore, the application developments of preview control in vehicle active suspension systems, electromechanical servo systems, robots, aircraft and power generation systems are summarized. Finally, the research achievements of the preview control are summarized, and the main problems in researches are discussed to forecast the future development direction. The author hopes to promote the integrated development of the theory and applications of the preview control.

**Key words** Research development, preview control, optimal control, robust control, vehicle active suspension system, robot, aircraft

**Citation** Zhen Zi-Yang. Research development in preview control theory and applications. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(2): 172–188

现实中有很多问题具有不确定性, 比如天气、生物寿命、比赛结果、股票和汇率等, 我们往往通过预测未来情况来决定当前行为. 然而, 现实中同样有很多问题, 未来信息通常完全或部分已知, 比如车辆行驶路径和视野内路况、飞行器预定飞行航线、机床加工轨迹乃至社会、经济和人生的未来发展预定目标等, 我们常常根据既定目标、已知干扰等未来信息来决定当前行为. 最直接的例子就是, 驾驶员开车时通过观察前面道路信息 (包括目标轨迹、已知路况等), 提前操纵方向盘、油门、刹车, 才能控制汽车平稳、快速行驶, 避免急刹、紧急打方向盘等问题. 这就体

现了预见控制 (Preview control) 的思想, 即结合了根据未来信息实施的超前控制和当前信息实施的反馈控制, 而传统控制通常仅利用当前信息进行反馈控制, 如同驾驶员看着后视镜驾驶, 势必影响动态响应性能.

预见控制的思想最初起源于 20 世纪 60 年代. 美国麻省理工学院著名教授、国际上机器人与远程控制领域的先驱 Sheridan 于 1966 年率先提出预见控制的三种模型<sup>[1]</sup>. 美国学者 Bender 于 1968 年提出了用于车辆悬挂系统的线性最优预见控制<sup>[2]</sup>. 日本学者 Ichikawa 等于 1969 年提出了利用目标值改善系统跟踪性能的预见控制方法<sup>[3]</sup>. 此后经过五十年的发展, 预见控制的设计方法经历了卷积和微分方程法 (1960~1970)、动态规划方法 (1970~1980)、最优与鲁棒控制理论 (1980~2000)、非线性与智能控制理论 (2000~今) 等发展过程, 并在汽车、机器人、飞行器、机电伺服系统、发电系统等领域得到了广泛的应用研究<sup>[4]</sup>.

控制是一种决策, 决策则离不开信息, 预见控制

收稿日期 2015-06-29 录用日期 2015-10-19  
Manuscript received June 29, 2015; accepted October 19, 2015  
国家自然科学基金 (61304223, 61473144), 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (20123218120015) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (61304223, 61473144) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20123218120015)  
本文责任编辑 谢永芳  
Recommended by Associate Editor XIE Yong-Fang  
1. 南京航空航天大学自动化学院 南京 211106  
1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106

是一种未来信息前馈补偿加上当前信息反馈控制的方法. 更准确地说, 预见控制是一种利用已知期望目标和干扰信息来改善系统动态响应, 抑制外界扰动, 提高系统跟踪精度的控制方法, 特别适用于未来控制目标和干扰等信息已知的系统, 尤其对解决非最小相位系统控制问题有其独特的优势<sup>[4]</sup>. 正因为具备这一独特优点, 预见控制理论研究及应用正日益得到国内外研究者的广泛关注.

基于线性二次型 (Linear quadratic, LQ) 理论的预见控制最早是 1970s 提出的, 目前仍是预见控制理论中最重要且应用最广泛的方法, 因此最优预见控制也属于最优控制理论范畴. 最优预见控制与 LQ 最优跟踪控制的相同之处在于都需要利用未来信息, 不同之处在于前者是滚动时域内的局部最优化, 属于在线规划, 而后者是整体时域内的全局最优化, 属于离线规划.

预见控制与工业过程控制领域广泛应用的预测控制既相似又有区别. 相似之处在于它们都是利用了未来信息作为前馈, 都以性能指标最小化为控制目标. 区别之处在于: 1) 前者可以直接利用可预见的系统未来信息, 而后者则是通过预测模型预测系统未来信息; 2) 前者一般假设对象模型已知, 而后者对模型精度要求不高, 有在线校正模型参数功能; 3) 前者一般用全状态反馈控制结构, 而后者更多是输出反馈控制结构; 4) 前者适用于模型已知、动态响应速度要求较快、未来信息已知的系统, 而后者更适用于模型不精确、具有受约束和非线性等特性的系统. 因此, 两者各具优点, 两者结合也具有很好的互补性.

本文目的是将众多研究者在 *IEEE Transactions on Automatic Control*、*Automatica*、*IEEE Conference on Decision and Control*、《自动化学报》等国内外重要期刊和会议上发表的分散成果, 从理论和应用角度进行系统地总结和提炼, 以形成一套较完整的预见控制理论并促进应用的发展. 本文内容如下: 首先从理论角度概述预见控制的发展现状; 其次从应用角度概述预见控制的发展现状; 最后对预见控制的研究进行总结, 并对未来发展方向进行展望.

## 1 预见控制的理论研究进展

下面首先概述对预见控制起到奠基性作用的早期文献成果, 然后重点概述典型预见控制理论研究的发展状况.

### 1.1 早期研究概述

Sheridan 在 1966 年首次探讨了人类智能或人工智能控制器响应的描述和预测方法, 该智能系统

特点在于实际输入为有限预见, 并且连续目标值视为非均匀重要性, 提出了三种预见控制模型: 1) 扩展线性卷积模型; 2) 控制元件被控对象动态过程快速试验模型, 实质上是一种快速迭代预测与实时控制模型; 3) 基于动态规划思想的预见区间最优轨迹迭代计算模型<sup>[1]</sup>. 随后, Bender 于 1968 年应用连续时间维纳滤波原理解决了一类线性预见控制问题, 并应用于车辆悬挂系统<sup>[2]</sup>. 日本国内自 1960s 开始, 对预见控制理论和应用展开了许多研究, Hayase 等将预见信息引入到控制系统中, 提出了最优性能指标下的预见控制方法<sup>[3]</sup>. 然而, 它要求车辆加速度与跟踪轨迹之间的传递函数不稳定, 这在实际中并不可行. Tomizuka 于 1973 年在博士论文中提出了 LQ 最优预见跟踪控制问题, 然而需要建立的增广模型状态维数随着预见步数增加而增加, 使得高维 Riccati 方程求解很困难. 随后他于 1975 年利用动态规划方法解决了连续线性系统的无限预见最优跟踪控制问题, 同年也解决了离散线性系统的无限预见最优跟踪控制问题<sup>[5-6]</sup>. Miller 于 1976 年提出了针对无限预见最优控制问题的有限预见近似最优控制方法<sup>[7]</sup>. Balzer 于 1981 年解决了干扰有限预见下的离散线性系统最优控制问题, 并应用于车辆悬挂系统<sup>[8]</sup>. Katayama 等于 1985~1987 年应用线性二次型积分技术解决了离散线性系统和连续线性系统的最优预见控制问题, 该控制器结构包括带积分状态反馈项和预见前馈项, 并应用于伺服系统<sup>[9-10]</sup>. Sternad 等于 1988 年基于多项式线性二次型高斯 (Linear quadratic Gaussian, LQG) 方法设计干扰可预见的最优前馈控制器以抑制系统扰动, 并首次应用于非最小相位系统<sup>[11]</sup>. 而 Trudnowski 等于 1989 年验证了预见信息在有限整定时间系统中的作用<sup>[12]</sup>.

归纳起来, 早期出现的预见控制主要基于滤波理论<sup>[2]</sup>、状态空间方法<sup>[5-6]</sup>、多项式 LQ 方法<sup>[11, 13]</sup>、矩阵分式 LQ 方法<sup>[14-16]</sup> 等, 通常以 LQ 函数作为性能指标函数, 而文献 [12] 则基于其他的关于输出的函数, 文献 [17] 则以最小  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_\infty$  范数跟踪误差作为性能指标函数. 虽然多数成果是针对单输入单输出 (Single-input single-output, SISO) 系统, 而且往往针对目标值或者干扰值为阶跃函数的情形, 但是早期的研究成果奠定了预见控制在最优控制范畴内的重要地位, 也为 20 世纪 90 年代开始的预见控制理论研究高潮奠定了基础.

### 1.2 线性最优预见控制研究

离散域和连续域的线性最优预见控制理论已比较成熟, 下面概述一些重要的研究成果.

1.2.1 离散域最优预见控制

线性最优预见控制问题的离散域方面, 土谷武士、江上正、廖福成、谭跃钢等在 20 世纪 80 年代开始深入研究<sup>[18-24]</sup>, 提出了离散型线性最优预见控制的三种设计方法<sup>[18]</sup>: 偏微分最优化法、扩大误差系统法和逐次最优化法. 其中, 偏微分最优化法先假设控制律形式再求得性能指标函数的极小点; 扩大误差系统法把最优预见控制问题转化为最优调节问题来求解; 而逐次最优化法则利用最优性原理. 三种方法设计的控制系统结构基本相同, 且理论推导与设计过程都显得比较复杂. 线性最优预见控制系统基于误差系统方程设计, 其基本结构如图 1 所示, 主要由如下四部分组成: 状态反馈器、目标前馈补偿器、干扰前馈补偿器以及积分环节.

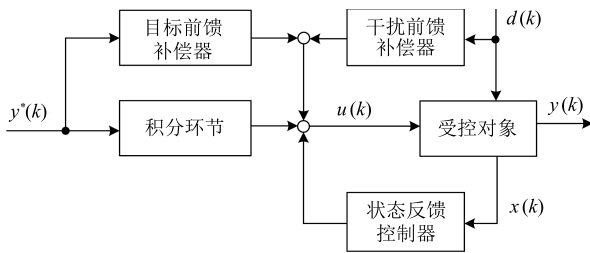


图 1 传统最优预见控制系统

Fig. 1 Traditional optimal preview control system

**定理 1**<sup>[18]</sup>. 离散时间线性定常系统的状态空间模型为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}\mathbf{d}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \quad (2)$$

构造如下误差系统

$$\mathbf{x}(k+1) = \underline{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k) + \underline{\mathbf{B}}\Delta\mathbf{u}(k) + \underline{\mathbf{E}}\Delta\mathbf{d}(k) + \underline{\mathbf{F}}\Delta\mathbf{y}^*(k+1) \quad (3)$$

$$\mathbf{e}(k) = \underline{\mathbf{C}}\mathbf{x}(k) \quad (4)$$

假设未来  $k+1 \sim k+k_f$  时刻的目标值和  $k \sim k+k_f-1$  时刻的干扰值均已知, 定义预见控制 LQ 性能指标函数

$$J = \sum_{j=1}^{k_f} [\|\mathbf{e}(k+j)\|_{Q_e}^2 + \|\Delta\mathbf{u}(k+j-1)\|_{R}^2] \quad (5)$$

式中,  $Q_e, R$  为对称正定权重矩阵,  $k_f$  为预见步数, 基于三种求解方法, 求得最优控制增量序列为

$$\Delta\mathbf{u}(k) = \mathbf{F}_{\underline{\mathbf{x}}}\mathbf{x}(k) + \sum_{j=1}^{k_f} \mathbf{F}_{y^*}(j)\Delta\mathbf{y}^*(k+j) + \sum_{j=1}^{k_f} \mathbf{F}_d(j-1)\Delta\mathbf{d}(k+j-1) \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{F}_{\underline{\mathbf{x}}}$  为状态反馈矩阵,  $\mathbf{F}_{y^*}$  为目标预见前馈矩阵,  $\mathbf{F}_d$  为干扰预见前馈矩阵.

该预见控制系统的特点在于<sup>[18]</sup>: 1) 具有内模原理; 2) 闭环系统极点由反馈项决定, 前馈项用于改善系统的相位特性; 3) 当控制能量权重趋于零时, 性能指标评价渐近趋于零. 随后, 廖福成课题组进一步将最优预见控制推广应用于多重采样离散线性系统<sup>[25-29]</sup>、状态或输入时滞离散线性系统<sup>[28-33]</sup>、离散广义线性系统<sup>[33-34]</sup>. 以上研究采用了扩大误差系统法, 把多重采样系统转化为单一采样系统, 把时滞系统转化为一般系统, 把广义系统的预见控制问题转化为广义系统的最优控制问题, 得以解决.

近年来, 甄子洋、王志胜等提出了一种新的离散时间最优预见控制设计方法: 信息融合估计法<sup>[35-38]</sup>. 信息融合估计主要利用多源信息来估计未知量, 它是信息融合领域的重要理论基础. 控制、估计等都属于决策问题, 利用对象动态方程约束信息、输出测量信息、未来预见信息、二次型性能指标约束信息等有用信息, 基于融合估计理论, 求取控制序列的最优估计, 即为信息融合预见控制. 其基本原理结构如图 2 所示, 主要由两部分组成: 协状态融合滤波器和控制量融合估计器.

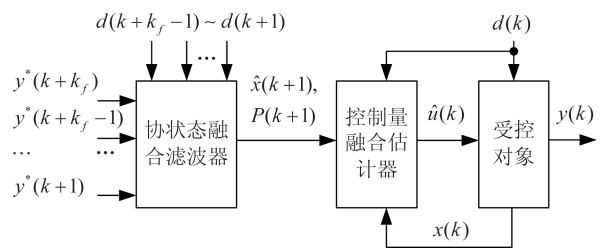


图 2 信息融合预见控制系统 I

Fig. 2 Information fusion preview control system I

**定理 2**<sup>[36]</sup>. 针对离散时间线性系统的 LQ 最优预见控制问题, 基于信息融合估计理论, 求得控制量融合估计为

$$\hat{\mathbf{u}}(k) = [\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P}^{-1}(k+1)\mathbf{B}]^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}^{-1}(k+1) \cdot [\hat{\mathbf{x}}(k+1) - \mathbf{A}\mathbf{x}(k) - \mathbf{E}\mathbf{d}(k)] \quad (7)$$

且协状态融合滤波方程为

$$\hat{\mathbf{x}}(k+j) = P(k+j)A^T[P(k+j+1) + BR^{-1}B^T]^{-1} \cdot [\hat{\mathbf{x}}(k+j+1) - E\mathbf{d}(k+j)] + P(k+j)C^T Q \mathbf{y}^*(k+j) \quad (8)$$

$$P^{-1}(k+j) = C^T Q C + A^T[P(k+j+1) + BR^{-1}B^T]^{-1} A \quad (9)$$

信息融合预见控制经过进一步转化, 可得到传统预见控制类似的结构形式, 如定理 3 和图 3 所示.

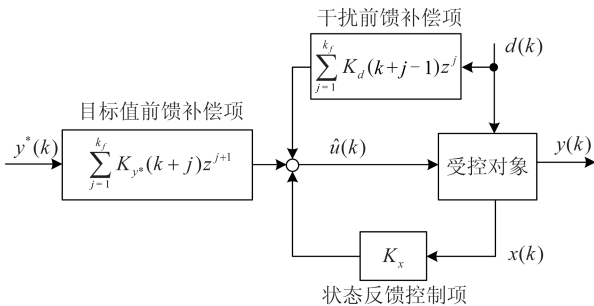


图 3 信息融合预见控制系统 II

Fig. 3 Information fusion preview control system II

**定理 3**<sup>[36]</sup>. 针对上述离散时间线性系统的最优预见控制问题, 得到信息融合预见控制律的另一种形式为

$$\Delta \hat{\mathbf{u}}(k) = K_x \mathbf{x}(k) + \sum_{j=1}^{k_f} K_{y^*}(k+j) \mathbf{y}^*(k+j) + \sum_{j=1}^{k_f} K_d(k+j-1) \mathbf{d}(k+j-1) \quad (10)$$

式中,  $K_x$  为状态反馈矩阵,  $K_{y^*}$  为目标前馈矩阵,  $K_d$  为干扰前馈矩阵.

若把当前参考输入或期望输出当作是未来所有时刻的预见信息, 则信息融合预见控制还可以推广应用于伺服跟踪控制问题<sup>[39]</sup>、解耦控制问题<sup>[40]</sup>、最优调节与跟踪系统问题<sup>[41-43]</sup>, 这也证实了预见控制与最优控制、跟踪控制的同一性.

概括来讲, 信息融合预见控制与传统预见控制的异同之处在于:

1) 前者既可以基于误差系统设计, 也可以基于原系统设计, 后者通常采用误差系统设计. 基于原系统设计的信息融合预见控制因为矩阵维数降低, 使得结构更加简单, 计算量更小.

2) 前者基于信息融合估计理论, 推导过程简便且物理意义明确, 因为它定义了信息量来表征未来预见信息的权重和作用大小, 而后者基于经典数学方法设计, 缺乏清晰的物理概念.

3) 两者的渐近特性具有相同的结论, 即在控制无约束情况下, LQ 最优预见性能指标都趋近于零, 即完全消除干扰的影响, 达到无静差跟踪; 同时, 两者的最优性能指标、状态反馈系数、预见前馈系数以及脉冲转递函数阵的渐近值均相同<sup>[36]</sup>.

实际应用中由于控制量受限的原因, 无静差跟踪往往难以达到. 信息融合预见控制系统的稳态误差是控制矩阵  $K_x, K_{y^*}, K_d$  的函数, 而这些参数又由预见步数  $K_f$  和权重矩阵  $Q, R$  完全确定, 即影响信息融合预见控制的重要参数实质上是  $K_f, Q, R$ . 预见步数的增加能提高控制系统的响应速度, 减小稳态跟踪误差并趋于零, 且在系统动态调节过程中的控制能量要小些<sup>[36]</sup>. 通过对线性系统控制的结果显示, 性能指标函数值随着预见步数的增加单调递减, 直至收敛到定值, 表明随着预见步数的增加, 性能指标迅速减小并趋于定值, 反映了较近未来信息对提高控制性能的作用较大, 而较远的未来信息的作用较小, 最终信息量趋于饱和<sup>[36, 44]</sup>. 因此, 在满足性能要求前提下, 预见步数取较小值即可, 以避免计算量随预见步数的增加而增大. 权重矩阵具有相对关系,  $Q$  越大, 控制精度越高, 但是控制能量消耗越大, 所以它们的选取需要充分考虑控制受限问题, 通常固定一个权重矩阵, 调节另一个权重矩阵, 且都选取为对角矩阵. 因此, 如何选取控制参数  $K_f, Q, R$  使得预见闭环系统的稳态误差为极小的问题, 可定义为预见控制系统设计的逆问题, 可考虑用梯度法或智能优化算法来迭代求解.

1.2.2 连续域最优预见控制

连续时间预见控制系统的结构如图 4 所示, 与全信息控制系统相似, 即都是将外部输入 (包括参考输入、外界干扰) 和系统状态作为控制器的输入, 区别在于前者的外部输入在未来  $h$  时间段内是可预见的, 而且控制器利用了未来所有预见信息. 图 4 中采用了对外部输入延时的等效方式, 避免了时延算子给控制器设计带来的麻烦.

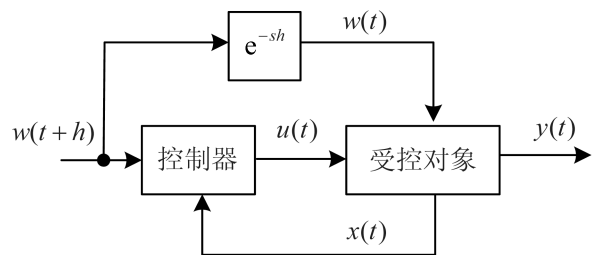


图 4 连续型最优预见控制系统

Fig. 4 Continuous optimal preview control system

设连续时间线性系统状态空间模型为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + B_1\mathbf{w}(t) + B_2\mathbf{u}(t) \quad (11)$$

$$\mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t) + D\mathbf{u}(t) \quad (12)$$

定义无限时域 LQ 性能指标函数

$$J = \int_0^\infty [\mathbf{x}^T(t)Q\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)R\mathbf{u}(t)dt] \quad (13)$$

则通过引入一个预见信息积分补偿器, 与原系统构成一个增广系统, 基于算子 Riccati 方程最小化指标函数, 得到最优控制律为<sup>[45]</sup>

$$\mathbf{u}(t) = -R^{-1}B_2^T[M\mathbf{x}(t) + \int_0^h e^{(A-B_2B_2^TM)^T\beta}MB_1\mathbf{w}(t+\beta)d\beta] \quad (14)$$

式中,  $M$  为代数 Riccati 方程的稳态解,  $h$  为干扰预见时间. 还可以进行初始状态不确定下的最差情况计算分析.

定义表征外部输入  $\mathbf{w}$  与输出  $\mathbf{y}$  之间的  $H_2$  性能函数为

$$\gamma = \sqrt{\int_0^\infty \text{tr}(F^T(t)F(t))dt} \quad (15)$$

式中,  $F(t)$  为系统脉冲响应矩阵. 最小化该函数, 求得如下  $H_2$  预见全信息控制律<sup>[46]</sup>

$$\mathbf{u}(t) = -B_2^T[M\mathbf{x}(t) + \int_0^h e^{(A-B_2B_2^TM)^T\beta}MB_1\mathbf{w}(t+\beta)d\beta] \quad (16)$$

而  $H_2$  函数的极小值与微分 Riccati 方程的稳态解有关. 该控制律包含状态反馈项和预见前馈项, 对比式 (14) 和式 (16) 发现, 文献 [45] 中的控制律比文献 [46] 增加了控制能量加权矩阵  $R$  作为调节参数.

然而, 文献 [45] 和文献 [46] 都是带预见信息的最优调节器问题. 对于连续线性系统  $(A, B, C)$  的最优跟踪控制问题, 定义如下有限时域 LQ 性能指标函数

$$J = \frac{1}{2}\mathbf{e}^T(t_\alpha)\mathbf{e}(t_\alpha) + \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_\alpha} [\mathbf{e}^T(t)Q_e\mathbf{e}(t) + \mathbf{x}^T(t)Q_x\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)Q_u\mathbf{u}(t) + \dot{\mathbf{u}}^T(t)R\dot{\mathbf{u}}(t)] \quad (17)$$

构建一个引入误差信号、预见信号的增广系统, 将最优跟踪问题转化为最优调节问题, 利用极小值原理, 求得最优预见跟踪控制律为<sup>[47]</sup>

$$\mathbf{u}(t) = -f^{-1}(t) \cdot \int_{t_0}^T f(\sigma)R^{-1}[p_{13}^T(\sigma)\mathbf{e}(\sigma) + p_{23}^T(\sigma)\mathbf{x}(\sigma) + [0 \ 0 \ I] \cdot \int_\sigma^{t_\alpha\Lambda(\sigma+h)} \tilde{\Phi}(\sigma, \tau)P(\tau)\bar{D}\dot{\mathbf{y}}^*(\tau)d\tau]d\sigma \quad (18)$$

式中, 相关变量定义参考文献 [47].

文献 [48] 进一步研究了连续线性系统的  $H_2$  前馈干扰抑制问题. 针对含多输入输出时延的连续线性系统的  $H_2$  预见控制问题, 则采用类似方法将其转化为 LQ 问题, 再利用最优性原理来求解<sup>[49]</sup>. 文献 [46]、文献 [48] 和文献 [49] 的共同点在于: 将优化时间区间划分为标准无限时域 LQ 问题和非标准有限时域 LQ 问题, 其中, 无限时域部分等同于最优控制状态反馈项, 有限时域部分采用了极小值原理, 其结果等同于最优控制器的有限脉冲响应部分. 这种分割优化区间的思想来源于基于间隙度量的鲁棒控制理论<sup>[50]</sup>. 然而, 上述方法需要求解一个微分 Riccati 方程, 未能清晰表述预见时间对  $H_2$  性能的影响. 为此, 文献 [51] 提出了针对连续时间系统在单输入、多输入、多预见时间情形下的多种  $H_2$  预见控制算法, 其中多输入多预见时间下的预见控制系统结构分别如图 5 所示<sup>[51]</sup>. 图中,  $\Lambda = \text{diag}\{e^{-sh_1}, \dots, e^{-sh_{n_w}}\}$ .

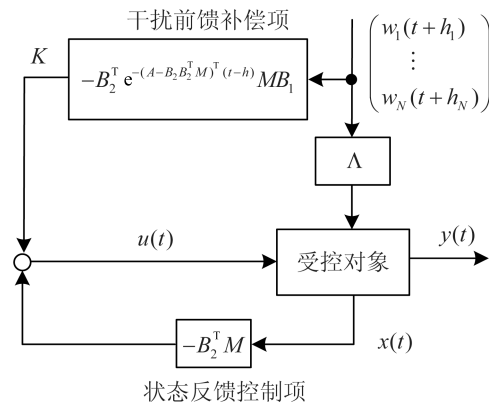


图 5 多输入多预见时间  $H_2$  预见控制系统

Fig. 5 Multiple input multiple preview time  $H_2$  preview control system

文献 [51] 方法相比于文献 [46]、文献 [48] 和文献 [49] 方法, 具有如下优点: 1) 它只需求解 Lyapunov 方程, 比求解 Riccati 方程更加简单, 从而减少了计算量; 2) 它给出了预见信息、预见时间对  $H_2$  性能影响的解析表达式, 并且得到了无限时间预见信息下的最佳性能值; 3) 它还能处理多预见时间情形, 这在其他文献中均未涉及. 上述方法都是解决外界干扰到系统输出之间的  $H_2$  函数最小化问题,  $H_2$  预见调节器实质上是干扰补偿问题, 而未能对  $H_2$  预

见跟踪控制问题进行深入研究. 并且, 可预见干扰形式多为  $\delta$  函数形式.

文献 [46]、文献 [48–49] 研究的问题也被称之为单边模型匹配问题 (One-side model matching problem). 而双边模型匹配问题, 即给定真有理传递函数矩阵  $G_1, G_2, G_3$ , 常数  $h$ , 寻找  $K \in H_\infty$ , 最小化  $H_2$  范数  $\|T\|_2$ , 且

$$T = e^{-sh}G_1 - G_3KG_2 \in H_2 \cap H_\infty \quad (19)$$

当  $G_2 = G_3 = I$  时即为单边模型匹配. 双边模型匹配问题在实际应用中经常遇到, 主动悬挂系统就是一个典型实例. 然而, 近年极少有关于含预见信息的双边模型匹配问题得到研究, 文献 [52] 进行了这方面的首创工作, 并获得了最优解和最佳性能值. 但是该最优解需要求解两个带约束矩阵 Sylvester 方程和两个代数 Riccati 方程, 计算比较困难, 而且 Riccati 方程无法保证有稳定解. 同时, 该方法基于传递函数矩阵设计, 而非基于状态空间模型设计.

非最小相位特性在实际系统中比较常见, 如机器人、飞行器等. 非最小相位零点在系统带宽增大的时候会引起闭环灵敏度函数出现大的峰值, 导致系统带宽受限制、跟踪精度不能任意小. 而仅仅采用反馈控制难以实现完全跟踪, 非因果稳定逆理论给解决这一问题提供了可行方法, 该理论依赖于未来期望轨迹, 由于在线计算量较大导致难以应用. 预见控制能够改善非最小相位零点系统的控制器带宽, 为此, 文献 [53] 和文献 [54] 提出了预见稳定逆 (Preview-based stable-inversion) 方法, 给出了逆输入与未来期望轨迹之间的定量关系, 使稳定逆方法在非最小相位系统中应用变得可行, 也证明了只要有足够的预见时间, 系统跟踪精度能够达到任意小. 然而, 该方法对系统的不确定性和动态变化比较敏感. 而文献 [55] 专门研究了反馈控制下系统跟踪性能的受限问题, 利用最优插值方法 (Optimal interpolation approach) 定量分析了预见控制对改善系统跟踪性能的作用, 从而验证了预见控制在非最小相位系统中的独特优势.

综上所述, 线性最优预见控制的研究成果主要集中在精确建模、状态反馈控制和无约束条件基础上, 如何将其推广应用于模型难以精确建立的情形以及输出反馈控制、状态/输入受约束控制等复杂问题, 是未来值得研究的重要方向.

### 1.3 线性鲁棒预见控制研究

近年来, 线性鲁棒预见控制问题得到深入研究, 尤其是鲁棒  $H_\infty$  预见控制问题. 离散域的鲁棒  $H_\infty$  预见控制问题, 主要采用博弈论方法解决<sup>[56–61]</sup>, 而离散域的鲁棒 LQ 预见控制则主要采用线性矩

阵不等式 (Linear matrix inequality, LMI) 方法解决<sup>[62–63]</sup>. 连续域的鲁棒  $H_\infty$  预见控制有如下几种解法: 1) 博弈论和鞍点方法, 通常需要求解 Riccati 方程<sup>[64–68]</sup>; 2) 函数解析 (Functional-analytic) 法, 它将问题转化为无限维形式加以解决<sup>[69–70]</sup>; 3) Hamilton 矩阵方法, 通常也需要求解 Riccati 方程<sup>[71–75]</sup>; 4) 基于双侧拉普拉斯变换的传递函数方法, 因为预见实质上是一种无限维系统, 将  $H_\infty$  优化预见问题可以转化为因果和有限维  $H_\infty$  优化问题得以解决<sup>[76]</sup>. 且前三种方法都是基于状态空间模型, 第四种方法基于传递函数.

#### 1.3.1 离散域 $H_\infty$ 预见控制

参考输入或期望输出这一目标信号的跟踪问题一直是控制理论的基础问题, 也是应用最为广泛的实际问题. 若要实现最优跟踪, 需要利用目标信号的未来值. 起初  $H_\infty$  跟踪控制只是把目标信号当作扰动, 因此很少关心该信号的作用, 更不会用它的预见信息, 直到提出了针对连续时间线性系统的利用未来参考输入的  $H_\infty$  跟踪控制方法. 受此启发, 文献 [56–57] 将其推广于离散时间线性系统, 并针对已知控制时域内所有目标值、仅仅已知当前目标值、已知预见窗口目标值三种情形, 基于博弈论分别设计了  $H_\infty$  鲁棒跟踪控制器. 上述研究都是针对确定性线性系统, 随后该课题组利用同样方法, 解决了系统参数存在范数有界不确定性的线性时变系统的  $H_\infty$  跟踪控制问题<sup>[58]</sup>. 然而该方法无法应用于参数在不确定区间非一致性分布的情形, 而且它假定参数输入信号是  $L_2$  信号, 也将  $H_\infty$ -Riccati 方程存在半正定解作为前提条件, 显得较为苛刻. 上述前提条件对于追求鲁棒 LQ 性能的离散时间多面体不确定系统则往往是失效的, 因为这类系统采用 LMI 方法分析鲁棒性能, 而 LMI 条件无法转化为 Riccati 方程. 此时, 可以构造增广系统将带积分鲁棒预见跟踪控制问题转化为鲁棒 LQ 调节器问题, 得到的控制器结构也包含预见前馈补偿器、状态反馈控制器和积分环节<sup>[62]</sup>. 随后, 文献 [63] 将该方法应用于带执行器故障的离散时间多面体不确定系统中.

由于系统参数不确定性通常建模为白噪声随机过程, 这在现实中也普遍存在. 增益调度方法在调度参数受到测量噪声污染时也是如此. 文献 [59] 利用文献 [57] 中的博弈论方法, 针对带乘性噪声多变量离散时间线性系统, 就同样的三种不同预见信息模式, 分别设计了状态反馈  $H_\infty$  预见跟踪控制算法.

预见跟踪控制问题本质上可以理解为固定时滞平滑问题 (Fixed-lag smoothing problem) 的对偶问题. 在预见跟踪控制问题中, 预见信息被描述为外部输入的一种延时, 此时全状态包含了系统状态和

预见区间中的外部输入历史值. 而在固定时滞平滑问题中, 预见信息是测量与估计之间的时延. 针对如下离散时间多变量线性系统

$$\mathbf{x}(k+1) = A\mathbf{x}(k) + B_1\mathbf{w}(k-l) + B_2\mathbf{u}(k) \quad (20)$$

$$\mathbf{z}(k) = C\mathbf{x}(k) + D_1\mathbf{w}(k-l) + D_2\mathbf{u}(k) \quad (21)$$

式中,  $l$  为时延. 最优性能指标定义为

$$J = \inf_{\mathbf{u}_k = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k, \check{\mathbf{w}}_k)} \|T_{wz} : \mathbf{w} \mapsto \mathbf{z}\| \quad (22)$$

基于博弈论理论, 可以统一推导出预见跟踪控制问题的控制律计算式和固定时滞平滑问题的状态估计计算式, 从而验证上述  $H_\infty$  预见控制问题与  $H_\infty$  平滑估计问题之间的同一性<sup>[60]</sup>. 同时, 最优解存在的充要条件是与状态维数相同的代数 Riccati 方程有解, 克服了传统方法需要求解高维代数 Riccati 方程且解存在条件是充分而非必要条件的问题.

文献 [61] 研究了一类离散时间广义调节器问题, 如图 6 所示. 图中  $\hat{r}$  为可预见外部输入信息 (如参考输入、干扰),  $w$  为不可预见外部信息. 寻求控制矩阵  $K$  使得最小化  $\|T_{[r' w']' \rightarrow z}\|_{2,\infty}$ , 在设计这类离散时间  $H_\infty$  线性预见控制器时, 通常步骤为: 1) 将其转化为包含预见信息的增广系统广义调节器结构, 于是需要求解增广代数 Riccati 方程; 2) 对 Riccati 方程进行降阶处理, 从而得到次优  $H_\infty$  预见控制器. 该方法的优点在于: 它同时包含可预见外部输入和不可预见外部输入信息, 所求解的代数 Riccati 方程维数与系统状态维数相同, 因计算量大量降低, 容易在工程上实现.

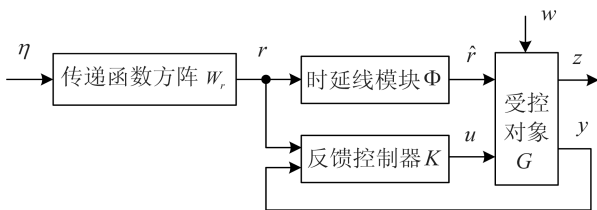


图 6 含预见信息的广义调节器系统

Fig. 6 Generalized regulator system with preview information

### 1.3.2 连续域 $H_\infty$ 预见控制

关于连续域  $H_\infty$  鲁棒控制问题, Shaked 首次提出线性时变系统的  $H_\infty$  预见跟踪问题, 分参考输入信号未来值完全已知、在线可测或者固定时间区间内已知等三种情况, 基于博弈论设计了状态反馈和输出反馈两种预见控制器<sup>[64-66]</sup>. 文献 [67] 也是利用博弈论方法, 推导了连续域  $H_\infty$  预见控制问题完全可解的一个充要条件, 并进一步获得了次优解, 其优点在于不包含病态性方程, 且在预见信息增加时,

获得的解仍是适定的. 连续域预见跟踪控制问题实际也是连续域固定时滞平滑问题的对偶问题, 文献 [67] 解决了连续域  $H_\infty$  固定时滞平滑问题, 在此基础上文献 [68] 给出了连续域预见跟踪问题和固定时滞平滑问题的统一解法, 与文献 [60] 中解决离散域问题的方法相同.

文献 [69-70] 解决了连续时间系统输出反馈  $H_\infty$  预见控制问题, 阐述了无限时域下的可解性及基于标准  $H_\infty$  代数 Riccati 方程的最优解. 然而它实质上属于无预见跟踪控制问题, 不容许某些性能水平下的可稳解.

文献 [71] 利用 Hamiltonian 矩阵方法研究了 LQ 与  $H_\infty$  预见控制问题的统一解法, 算法优点在于能够同时设计反馈、前馈和预见控制环节, 且适用于连续或离散时间系统. 随后, 文献 [72] 引入 Hamiltonian 矩阵, 建立了 Riccati 方程的解析解, 推导出连续时间时滞系统的输出反馈  $H_\infty$  预见控制问题的显式计算式, 但是它要求 Riccati 方程有稳定解. 通过引入 Hamiltonian 矩阵并采用状态空间方法可以放宽上述严格条件, 并且能够用于求解广义时滞  $H_\infty$  预见控制问题<sup>[73]</sup>. 然而, 上述解存在的条件还是比较复杂, 因为它需要计算特征值以保证半正定稳定解. 即使将它用于求解输出反馈  $H_\infty$  预见控制问题, 也会存在这种缺陷<sup>[74]</sup>. 文献 [75] 也是将时滞  $H_\infty$  预见控制问题建立在 Riccati 方程的解析解基础上, 但是可解性取决于超越方程的根, 且控制律中引入了带预测补偿项的积分-微分观测器, 从而克服了上述缺陷, 适用于多输入输出时延的预见控制问题, 甚至也适用于  $H_2$  预见控制问题.

针对存在闭右半复平面零点 (Closed right half complex planes) 的有限时域预见线性跟踪控制系统, 文献 [77] 定量分析了预见控制系统的跟踪灵敏度和  $H_\infty$  鲁棒性能, 验证了预见控制能够使非最小相位系统突破传统反馈控制下的性能指标局限.

综上所述, 线性鲁棒预见控制的研究成果虽然比较丰硕, 但是对具有随机性、不确定性、受扰动、多速率或非最小相位等特点的复杂系统设计鲁棒预见控制器, 是今后有待研究解决的重要问题.

### 1.4 非线性预见控制研究

实际系统基本都是非线性系统. 离散时间非线性控制系统模型一般描述为

$$\mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \quad (23)$$

$$\mathbf{y}(k) = h(\mathbf{x}(k)) \quad (24)$$

针对如下输出跟踪二次型性能指标函数



$$J = \sum_{j=1}^{k_f} [\|\mathbf{y}^*(k+j) - \mathbf{y}(k+j)\|_Q^2 + \|\mathbf{u}(k+j-1)\|_R^2] \quad (25)$$

求解上述非线性最优预见控制问题具有普遍意义. 基于非线性信息融合估计理论, 可以得到最优控制律的隐式表达式, 基于线性化原理, 进而推导获得近似最优预见控制律的显式表达式为<sup>[78-79]</sup>

$$\hat{\mathbf{u}}(k) = [R + f_u^T(k)P^{-1}(k+1)f_u(k)]^{-1}f_u^T(k) \cdot P^{-1}(k+1)[\hat{\mathbf{x}}(k+1) - f(\mathbf{x}(k), \tilde{\mathbf{u}}(k)) + f_u(k)\tilde{\mathbf{u}}(k)] \quad (26)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k+j) = \tilde{\mathbf{x}}(k+j) + P(k+j)f_x^T(k+j) \cdot [P(k+j+1) + f_u(k+j)R^{-1}f_u^T(k+j)]^{-1} \cdot [\hat{\mathbf{x}}(k+j+1) - f(\tilde{\mathbf{x}}(k+j), 0)] + P(k+j) \cdot h_x^T(k+j)Q[\mathbf{y}^*(k+j) - h(\tilde{\mathbf{x}}(k+j))] \quad (27)$$

$$P^{-1}(k+j) = f_x^T(k+j)[P(k+j+1) + f_u(k+j)R^{-1}f_u^T(k+j)]^{-1}f_x(k+j) + h_x^T(k+j)Qh_x(k+j) \quad (28)$$

式中,  $\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{x}}$  为先验值. 为减小线性化带来的估计误差, 将前一次估计值作为当前计算的先验值, 反复迭代进而收敛. 非线性预见控制算法实质上也是把系统所有信息转化为关于控制量的量测信息, 使非线性预见控制问题转化为关于控制量的非线性融合估计问题. 在此基础上, 王志胜等将非线性预见控制拓展应用于时滞非线性系统<sup>[80]</sup> 和带输入饱和欠驱动非线性系统<sup>[81]</sup>.

实际非线性系统总会受到各种扰动影响, 设计鲁棒性强的控制器可以提高系统的抗干扰品质. 通过在性能指标函数中增加有关扰动的约束项, 即带有匹配扰动的非线性系统鲁棒控制问题可以转化为性能指标函数中包含扰动信号约束的最优控制问题, 再基于信息融合估计理论即可解决<sup>[82]</sup>. 对于离散时间非线性系统的鲁棒预见控制问题, 也可以考虑采用这种方法.

解耦控制问题在多变量系统尤其在过程系统中普遍存在. 所谓解耦控制, 就是寻找合适的控制律来消除系统中各控制回路之间的相互耦合作用, 使系统输入和输出之间转化为多个相互独立的单回路. 非线性系统的解耦控制问题可以转化为预见控制问题, 即依次选定主通道和耦合通道, 当只有主通道有信号输入时, 所有耦合通道的输出期望值都为零, 以

此作为系统输出的预见信息, 设计主通道的预见跟踪控制律和所有耦合通道的预见解耦补偿律, 最终对每个通道的控制信号进行综合<sup>[83]</sup>.

对于非线性系统, 上述工作采用了简便且有效的线性化处理办法, 优点在于针对的是一般非线性系统, 缺点在于当系统遇到较大扰动时控制效果难以保证. 精确线性化思想对控制系统本身要求较高, 而韩京清提出的非线性系统直接方法降低了对系统的要求, 但本质上与精确线性化方法相同. 文献 [84] 基于该方法求解了非线性系统的预见控制问题, 然而这里针对的是仿射非线性系统.

综上所述, 非线性预见控制的研究成果比较少, 主要基于线性化模型来设计. 因此, 如何与先进非线性控制 (如 Backstepping 控制、动态逆控制等)、自适应控制以及智能控制理论进行广泛结合, 是预见控制未来发展的重要方向.

## 2 预见控制的理论研究进展

预见控制适用于未来目标信息或干扰信息已知的对象系统, 如车辆主动悬挂系统、火电单元机组、飞行器、机器人、机床伺服系统等.

### 2.1 车辆主动悬挂系统

预见控制在车辆悬挂系统中的应用研究也有 50 年的历史. Bender 首次将道路预见信息加入到主动悬挂控制力中<sup>[2]</sup>. 悬挂系统是车辆在不同路况下具有快速机动性和良好舒适性的重要保证. 车辆悬挂系统主要由弹性元件、减震器和导向机构组成. 悬挂系统按控制力可分为被动、半主动和主动悬挂. 被动悬挂系统只能被动存储和吸收外界能量, 无法主动适应实时变化的路况和外界干扰. 而主动悬挂车辆在各种路况上, 车体加速度能够得到很大程度地减小, 具有较好的减振效果. 具体地说, 最优预见控制应用于主动悬挂系统时, 具有如下优势: 1) 可以弥补因系统能量损失和器件响应滞后引起的减振效果不佳的问题; 2) 能够降低系统的控制能量消耗; 3) 能够减小车体加速度的响应幅值, 提高车体响应速度; 4) 能够很好地抑制系统振动, 使系统获得良好的减振效果<sup>[85-86]</sup>. 总之, 最优预见控制能够降低系统能耗, 降低车体振幅和车轮振幅<sup>[87]</sup>, 且降低车体的浮沉响应、点头响应、侧滚响应<sup>[88]</sup>. 到目前为止, 车辆悬挂系统中预见信息的利用方式主要有如下两种:

1) 前轮前部安装激光传感器, 称之为前瞻预见 (Look-ahead preview)<sup>[89-97]</sup>. 其中文献 [89-92] 分别基于四分之一车、半车和全车模型, 文献 [96-97] 用于半主动悬挂系统, 还采用了随机最优预见控制<sup>[92-94]</sup>、基于谱分解的预见控制<sup>[95]</sup>、 $H_\infty$  预见控制<sup>[97]</sup> 等先进预见控制方法. 然而激光传感器价格比



较昂贵,而且预见信息的可靠性问题直接影响悬挂系统控制器的性能。

2) 将前轮扰动作为后轮预见信息,称之为轴距预见 (Wheelbase preview)<sup>[98-101]</sup>。这种预见信息直接来自于前轮受扰下的响应结果,因此可靠性高,在实际车辆悬挂系统中具有很好的应用前景。

半主动悬挂是一种无源主动悬挂,预见控制的应用原理与主动悬挂系统相似,区别在于主动悬挂系统模型中的控制力替换为可变阻尼系数和悬挂垂向速度<sup>[102-106]</sup>。

综上所述,预见信息不确定下的车辆悬挂控制系统鲁棒性问题,有待进一步研究和改进。

## 2.2 机电伺服系统

现代工业对机械加工精度要求愈来愈高,要求数控机床位置伺服系统具有无超调、快速响应、无稳态静差、强抗扰能力和强鲁棒性等特性,经典控制难以同时满足跟踪性能和鲁棒性能要求。而事先设定的目标轨迹或加工路径是提高机电伺服系统控制精度的重要信息,传统反馈控制是一种延时控制,因此无法有效利用。预见控制充分利用系统未来目标轨迹信息,能够改善机电系统跟踪性能<sup>[107]</sup>。

直线型直流无刷电机构成的位置伺服系统,工作时定子绕组在控制电流作用下产生电磁力推动滑块运动。滑块上外力干扰事先已知,利用最优预见控制可以实现外力干扰补偿<sup>[108]</sup>。当然,也可以将建模误差、参数摄动、外部扰动当作等效输入干扰,构造扰动观测器再设计最优预见控制器,能够提高伺服控制系统的鲁棒性<sup>[109-110]</sup>。采用直线电机的机床进给系统具有比采用旋转电机驱动的机床进给系统更优的性能指标,然而应用中发现电机在加工某些零部件时会发生较大振动和冲击现象,文献<sup>[111]</sup>实验证明基于美国 Turbo PMAC 运动控制核心,利用固有的预见控制功能模块,能够有效抑制电机异常振动和冲击,从而保护电机系统。

三相感应电机即三相异步电机,其磁场定向控制(即矢量控制)系统的输入量为定子角频率和两个空间电压矢量分量,输出量为转子角速率和两个定子空间磁通分量,当转子角频率任意变化时要求定子磁通的幅度保持定常,将期望的转子角速度值和两个定子空间磁通分量值作为预见信息,最优预见控制能够实现转子速度控制、磁场定向控制和定常磁通控制,提高异步电机矢量控制系统的动态响应性能<sup>[112-113]</sup>。

总之,电机伺服系统的应用极为广泛,很有必要研制更多嵌入预见控制功能的运动控制系统。

## 2.3 机器人

随着工业机器人应用领域的迅猛发展,机器人

系统的高精度控制需求越来越强烈。预见控制已经成功应用于工业机械手<sup>[114-115]</sup>、轮椅机器人<sup>[116]</sup>、仿人机器人<sup>[117-120]</sup>等。最优预见控制运用逐次最优化原理,在减小路径或轨迹跟踪误差、抑制机械振动和外界干扰等方面发挥了重要作用。

双足步行机器人 (Biped walking robot) 是一种仿人机器人 (Humanoid robots),可以完成爬楼梯、跑步、跨越障碍等行为。零力矩点 (Zero moment point, ZMP) 是判定仿人机器人动态稳定运动的重要指标,因此 ZMP 控制是步态控制的主要方式,传统上零力矩点方程的解析解不容许任意产生脚步落点和爬坡,而数值解计算量相当大,采用零力矩点的预见控制,可以产生稳定的行走模式,任意脚步落点,且能适应环境变化,实现跨越行走<sup>[117-119]</sup>。目前,双足机器人模型的建立比较精确,包括线性倒立摆模式下的单质点模型、重力补偿倒立摆模式下的双质点模型以及多质点倒立摆模式下的模型,质点数越多则零力矩点方程非线性特性越强,而且多质点模型需要大量离线计算,不适合实时修正轨迹,而基于三质点模型的预见控制方法能够解决机器人的实时轨迹修正问题<sup>[120]</sup>。

多触点运动 (Multi-contact motion) 规划与控制是仿人机器人的关键技术之一。机器人通常要求具有增加额外触点这一仿人功能,比如有时需要手提物体增加平衡性以防止自身坠落,或者有时需要搬运物品。离线多触点规划器产生触点姿态序列,由此预见控制器生成重心动力学运动轨迹,机器人控制器实现运动轨迹跟踪,可以实现三维运动,产生额外作用力执行搬运物品等功能<sup>[121]</sup>。这一领域的未来工作主要在于研究非线性规划与预见控制算法,并实现通用计算图形处理器并行处理,以推广实际产品的应用。

## 2.4 飞行器

预见控制在巡航导弹<sup>[122-123]</sup>、远程导弹<sup>[124]</sup>、空地导弹<sup>[125]</sup>、弹性体导弹<sup>[126]</sup>等飞行器中进行了应用研究。为了提高导弹生存能力,需要尽量贴近各种地形飞行,导弹系统通常具有高阶、非最小相位等动力学特性。传统最优控制和预测控制等方法仅利用当前地形参考信息,控制系统存在输出滞后问题。其实,雷达探测范围内的目标信息和干扰信息是可预见的,飞行轨迹也通常可以事先离线规划,这些预见信息对于地形和轨迹跟踪控制来说尤为重要。若利用目标参考信号和干扰信号的自相关函数信息,则可用于参考信号和干扰信号为任意信号的情况<sup>[122-123]</sup>。然而,最优预见控制对导弹系统受到未知扰动和模型参数不确定下难以保证控制系统的鲁棒性。为此,采用多面体描述模型参数的不确定性,构造增广误

差系统, 基于  $LQ/H_\infty$  最优准则, 利用 LMI 技术设计鲁棒最优预见控制器, 能实现导弹对地形指令的精确跟踪控制<sup>[125]</sup>. 弹性体导弹模型是由刚体模型和弹性振动特性组成,  $H_\infty$  预见控制具有比标准  $H_\infty$  控制更高精度的轨迹跟踪效果和减振效果<sup>[126]</sup>.

无人机 (Unmanned aerial vehicle, UAV) 正处于全球商业化发展的重要时期<sup>[127]</sup>. 无人机飞行控制系统主要实现姿态控制、高度控制、航路控制、速度控制和航向控制等自主飞行模式. 传统无人机飞行控制往往基于当前参考信息来实施控制作用, 如高度差、偏航距等, 控制作用有滞后问题. 当无人机的飞行轨迹被预先确定时, 充分利用飞行轨迹的未来信息, 则能提高飞行轨迹控制品质<sup>[128]</sup>. 基于预见控制的无人机飞行控制系统原理框图如图 7 所示. 为了提高无人机飞行控制系统的抗干扰性能和鲁棒性, 文献 [129] 提出了基于干扰观测器的输出反馈  $H_\infty$  预见控制器.

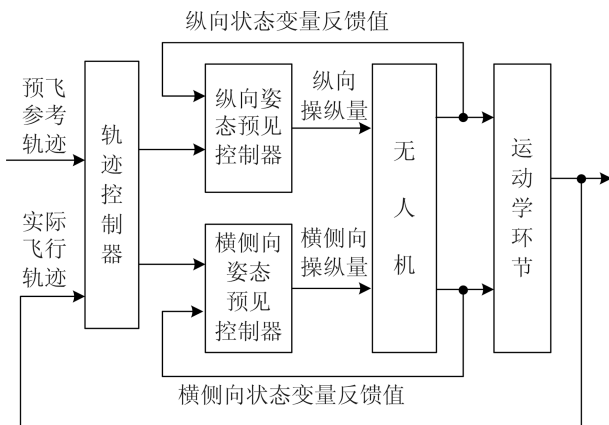


图 7 基于预见控制的无人机飞行控制系统

Fig. 7 Preview control based UAV flight control system

自 20 世纪 80 年代开始, 预见控制在直升机、无人直升机上都进行了应用研究, 主要解决地形跟踪和轨迹控制问题<sup>[54, 130-134]</sup>. 文献 [54] 将预见稳定逆方法用于解决具有非线性非最小相位特性的垂直起降直升机 (Vertical take-off and landing, VTOL) 的跟踪控制问题. 无人直升机通常装有激光雷达用于测距、避障, 能够获得前方地形数据, 这就可以作为预见信息. 建立包含地形预见信息的增广模型, 基于离散线性随机  $LQ$  调节器原理, 设计地形跟踪控制器, 即使在反馈控制器有限带宽情形下, 也能够提高小型模型直升机的地形跟踪性能<sup>[132]</sup>. 当然, 也可以将分段仿射非线性模型先增广为误差系统, 然后进行线性化和离散化处理, 再利用 LMI 技术设计状态反馈  $H_2$  鲁棒最优预见地形跟踪控制器, 提高无人直升机的控制性能<sup>[133-134]</sup>.

由于飞行器的种类很多, 包括有人或无人飞行

器、固定翼或旋翼飞行器、航空或航天飞行器等, 同时飞行模式和任务也很多样, 如有起飞、巡航、着陆、着舰、编队飞行等, 且飞行包线很宽, 如亚音速飞行、超音速飞行、高超音速飞行和近空间飞行等. 因此, 预见控制在各类飞行器中的应用具有很广泛的前景.

## 2.5 电网发电机组

火力发电仍然是当前中国最主要的发电方式. 由于电网峰谷变化大、负荷增减频繁, 火电单元机组呈现多变量、宽范围、快时变等特性, 传统反馈控制存在控制作用滞后问题, 因而难以保证发电机组负荷控制质量. 最优预见控制能够利用负荷指令预见信息, 使负荷控制系统在反馈控制结构基础上增加了预见前馈控制环节, 从而使锅炉燃烧率和汽轮机调门提前动作, 大大改善了机组的负荷跟踪性能<sup>[135]</sup>. 为了便于工程实现, 也可将上述多变量预见控制系统解耦成两个单变量预见控制系统, 基于受控自回归积分滑动平均 (Controlled auto-regressive integrated moving average, CARIMA) 模型设计输出反馈预见控制器<sup>[136]</sup>. 针对基于最优预见控制的发电机组负荷控制系统鲁棒性问题, 可以采用奇异值分解将不同负荷工作点线性模型转换为具有范数限制的参数摄动统一模型, 基于保性能控制折衷处理稳定性和鲁棒性要求, 使鲁棒负荷预见控制器设计归结为求解 LMI 条件约束下的凸优化问题<sup>[137]</sup>. 在此基础上, 文献 [138] 对发电机组负荷区间进行模糊划分, 建立多个结构参数摄动模型, 分别设计鲁棒预见子控制器, 再进行加权融合, 保证各控制器平稳切换且获得良好的全局控制性能.

风力发电是当今发展速度最快的可再生能源, 风力发电机正往大型化方向发展. 风速是可以测量的, 在一定程度上也是可以预见的, 预见控制包含了前馈环节, 可以减小发电机组的疲劳载荷和能耗, 从而延长发电机组寿命<sup>[139-140]</sup>. 利用  $H_\infty$  预见控制器, 可以产生变桨速率范围和预见时间范围下的最大桨距角, 不论是低保真模型<sup>[141]</sup> 和高保真非线性模型<sup>[142-143]</sup>, 都验证了预见信息在风电变桨距控制中的有效作用. 文献 [144] 提出了基于滤波-X 最小均方算法的预见前馈控制方法, 用于超过额定风速下很好地调节风电机组转子速度和降低负荷. 以上方法都是基于离散时间状态增广模型设计的, 预见时间增加时, 计算量会增大. 为此, 直接针对连续时间系统模型, 采用双边  $H_2$  预见控制, 其计算量不依赖于预见时间, 且便于分析系统性能<sup>[145]</sup>.

## 2.6 其他应用

除了上述应用之外, 近年预见控制在如下领域也开展了应用研究: 伺服机构系统的指令跟踪控制, 如电动执行器<sup>[146]</sup>、两级驱动系统<sup>[147-148]</sup>; 多级级联

水箱系统<sup>[149]</sup>; 无人水下航行器的海底地形跟踪控制<sup>[150]</sup>; 有人驾驶汽车的车道保持辅助自动控制系统<sup>[151]</sup>; 宽频扬声器系统驱动控制<sup>[152]</sup>; 离散马尔科夫跳变线性系统跟踪控制<sup>[153]</sup>; 混合动力汽车能量管理<sup>[154]</sup>; 离散时间 Takagi-Sugeno 模糊系统最优跟踪控制<sup>[155]</sup>; 刚体运动跟踪控制<sup>[156]</sup>; 一类滞后状态乘性随机系统跟踪控制<sup>[157]</sup>; 一类连续时间线性无脉冲广义系统跟踪控制<sup>[158]</sup>; 无线网络控制系统丢包补偿<sup>[159]</sup> 等。

### 3 结论及展望

综上所述, 预见控制理论经历了 50 年的发展, 已经在理论与应用方面取得了很大进展。目前, 线性最优预见控制理论的研究已基本成熟且应用最为广泛, 鲁棒预见控制和非线性预见理论的研究也取得了一些重要成果, 基本解决了无约束、模型精确、状态反馈下的线性或非线性系统预见控制问题。此外, 预见控制在车辆、机器人、机电系统中的应用已很广泛, 体现出预见控制在提高实际系统动态响应性能、稳态跟踪精度等方面的独特优势, 并且在飞行器、电力系统等高技术领域也已展现出很大的应用发展潜力。然而, 就目前的研究状况来看, 预见控制理论仍然处于发展和完善阶段, 还存在大量问题有待研究解决, 甚至有不少问题亟待解决, 这正是今后预见控制研究的目标和方向:

1) 对带时滞、时变、不确定、非线性、随机性和受约束等特性的复杂系统的预见跟踪控制与干扰补偿问题, 是今后要重点研究解决的一个理论问题。目前研究最多的是线性时不变系统的预见控制问题, 其理论也比较成熟, 而针对时变系统、不确定系统、非线性系统、时滞系统、随机系统和受约束系统的预见控制问题研究得极少, 事实上这类复杂系统的预见控制、鲁棒控制、非线性控制已经有较广泛的研究, 如何借鉴参考这些研究成果, 对于丰富和发展预见控制理论至为重要。

2) 与其他先进控制方法的结合问题, 也是预见控制未来研究的一个重要方向。预见控制是以最优控制、鲁棒控制为理论基础, 基本上仍然以系统精确模型为基础, 这也是预见控制应用受限的重要原因。为了进一步拓宽其应用范畴, 有必要参考和结合其他先进控制方法, 进行优势互补。比如与预测控制相结合, 可以利用其滚动优化和反馈校正环节, 改善系统模型误差和不可预见外界干扰造成的不良影响, 提高控制系统的鲁棒性<sup>[160-162]</sup>; 预见控制与非线性控制相结合, 能直接基于非线性模型进行设计, 提高非线性系统的控制性能; 同理, 预见控制若能与自适应控制、智能控制结合, 能够减少对系统模型的依赖, 提高鲁棒性和自适应能力。

3) 预见控制的应用问题, 有待更广泛更深入地研究和解决。目前预见控制的应用研究大多数都是基于传统的离散线性最优预见控制理论, 对于已提出的  $H_\infty$  鲁棒预见控制、非线性预见控制等新理论新方法的应用研究报道甚少。同时, 预见控制仅仅在车辆主动悬挂系统、机电伺服系统中的应用得到广泛研究, 当前机器人技术、飞行器技术迅猛发展, 亟需加强预见控制在不同机器人种类、不同航空航天飞行器种类中的应用研究, 势必较大程度地提高当前这类实际系统所能达到的控制性能。此外, 无人汽车、化工系统、国民经济系统、农业自动化系统等实际系统往往都含有预见信息可以利用, 有必要拓展预见控制技术在更多更复杂实际系统中的应用研究。

以上是对预见控制理论和应用研究的一点总结, 旨在吸引更多研究者深入研究预见控制的关键问题, 促进预见控制理论不断完善, 推进预见控制在更多更重大实际系统中的应用发展。

### References

- 1 Sheridan T B. Three models of preview control. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 1966, **HFE-7**(2): 91-102
- 2 Bender E K. Optimum linear preview control with application to vehicle suspension. *Journal of Basic Engineering*, 1968, **90**(2): 213-221
- 3 Hayase M, Ichikawa K. Optimal servosystem utilizing future value of desired function. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 1969, **5**(1): 86-94 (in Japanese)
- 4 Birla N, Swarup A. Optimal preview control: a review. *Optimal Control Applications and Methods*, 2015, **36**(2): 241-268
- 5 Tomizuka M. Optimal continuous finite preview problem. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1975, **20**(3): 362-365
- 6 Tomizuka M, Whitney D E. Optimal discrete finite preview problems (why and how is future information important?). *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1975, **97**(4): 319-325
- 7 Miller R A. On the finite preview problem in manual control. *International Journal of Systems Science*, 1976, **7**(6): 667-672
- 8 Balzer L A. Optimal control with partial preview of disturbances and rate penalties and its application to vehicle suspension. *International Journal of Control*, 1981, **33**(2): 323-345
- 9 Katayama T, Ohki T, Inoue T, Kato T. Design of an optimal controller for a discrete-time system subject to previewable demand. *International Journal of Control*, 1985, **41**(3): 677-699
- 10 Katayama T, Hirono T. Design of an optimal servomechanism with preview action and its dual problem. *International Journal of Control*, 1987, **45**(2): 407-420

- 11 Sternad M, Söderström T. LQG-optimal feedforward regulators. *Automatica*, 1988, **24**: 557–561
- 12 Trudnowski D J, Pierre D A. A performance limit for a finite-settling-time system using a look-ahead control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, **34**(7): 760–763
- 13 Halpern M E. Optimal tracking with previewed commands. *IEE Proceedings D: Control Theory and Applications*, 1991, **138**(3): 237–241
- 14 Mosca E, Zappa G. Matrix fraction solution to the discrete-time LQ stochastic tracking and servo problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, **34**(2): 240–242
- 15 Mosca E, Casavola A, Giarrk L. Minimax LQ stochastic tracking and servo problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1990, **35**(1): 95–97
- 16 Mosca E, Casavola A. Deterministic LQ preview tracking design. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, **40**(7): 1278–1281
- 17 Halpern M E. Preview tracking for discrete-time SISO systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, **39**(3): 589–592
- 18 Tsuchiya Takeshi, Egami Tadashi [Author], Liao Fu-Cheng [Translator]. *Newest Auto Control Technique — Digital Preview Control*. Beijing: Science and Technology Press, 1994.  
(土谷武士, 江上正 [著], 廖福成 [译]. 最新自动控制技术: 数字预见控制. 北京: 科学技术出版社, 1994.)
- 19 Liao Fu-Cheng, Egami Tadashi, Tsuchiya Takeshi, Yu Xin. On general type of digital optimal preview servo system. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1996, **17**(5): 405–417  
(廖福成, 江上正, 土谷武士, 于欣. 一般型数字最优预见伺服系统的设计. 应用数学和力学, 1996, **17**(5): 405–417)
- 20 Liao Fu-Cheng, Tsuchiya Takeshi, Egami Tadashi. To design optimal preview servo systems by using secondary difference of disturbance signal. *Mathematica Applicata*, 1997, **10**(1): 87–91  
(廖福成, 土谷武士, 江上正. 利用干扰信号二阶差分进行最优预见伺服系统设计. 应用数学, 1997, **10**(1): 87–91)
- 21 Yu X, Liao F C, Shi M K. Preview control with imaginary input. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1998, **6**(3): 319–326
- 22 Liao Fu-Cheng, Tsuchiya Takeshi, Egami Tadashi, Yu Xin. Unified handling of optimal preview servo systems and optimal preview FF compensating systems. *Acta Automatica Sinica*, 1998, **24**(5): 640–646  
(廖福成, 土谷武士, 江上正, 于欣. 最优预见伺服系统与最优预见 FF 补偿系统的统一处理. 自动化学报, 1998, **24**(5): 640–646)
- 23 Tan Yue-Gang. Study of synchro-position error optimal feedback and feedforward control. *Control Theory and Applications*, 1997, **14**(4): 526–530  
(谭跃钢. 同步位置差最优反馈与前馈控制的研究. 控制理论与应用, 1997, **14**(4): 526–530)
- 24 Tan Yue-Gang, Liu Feng. Digital optimal preview control of trajectory tracking based on trajectory error area. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, **25**(1): 86–89  
(谭跃钢, 刘峰. 基于面积误差评价的轨迹跟踪数字式最优预见控制. 仪器仪表学报, 2004, **25**(1): 86–89)
- 25 Liao F C, Takaba K, Katayama T, Katsuura J. Design of an optimal preview servomechanism for discrete-time systems in a multirate setting. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, Series B: Applications and Algorithms*, 2003, **10**(5): 727–744
- 26 Liao Fu-Cheng, Liu He-Ping. Design of an optimal preview controller for a kind of discrete-time systems. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, **29**(5): 542–547  
(廖福成, 刘贺平. 多重采样离散时间系统的最优预见伺服控制器设计. 北京科技大学学报, 2007, **29**(5): 542–547)
- 27 Liao F C, Tomizuka M, Cao M J, Wang D. Optimal preview control for discrete-time descriptor causal systems in a multirate setting. *International Journal of Control*, 2013, **86**(5): 844–854
- 28 Liao Fu-Cheng, Liu He-Ping. Design of an optimal preview controller for a kind of discrete-time system with time-delay. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, **30**(4): 452–460  
(廖福成, 刘贺平. 带有状态时滞的多采样率线性离散时间系统的最优预见控制器设计. 北京科技大学学报, 2008, **30**(4): 452–460)
- 29 Shi Qian-Song, Liao Fu-Cheng. Design of an optimal preview controller for linear discrete-time multirate systems with state-delay. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, **33**(3): 363–375  
(石千松, 廖福成. 具有多采样率及状态时滞的线性离散时间系统的预见控制. 北京科技大学学报, 2011, **33**(3): 363–375)
- 30 Xu Yu-Jie, Liao Fu-Cheng. Design of the optimum preview controller for a class of state-delay systems. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2006, **28**(4): 403–408  
(徐玉洁, 廖福成. 一类状态时滞系统的最优预见控制器设计. 北京科技大学学报, 2006, **28**(4): 403–408)
- 31 Liao Fu-Cheng, Xu Yu-Jie. Design of an optimal preview controller for time-varying discrete-time systems with state time-delay. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2012, **34**(2): 211–216  
(廖福成, 徐玉洁. 状态时滞时变离散时间系统的最优预见控制器设计. 北京科技大学学报, 2012, **34**(2): 211–216)
- 32 Xu Yu-Jie, Liao Fu-Cheng. Preview control for a class of time-varying discrete systems with input time-delay. *Control and Decision*, 2013, **28**(3): 466–470  
(徐玉洁, 廖福成. 一类具有输入时滞的时变离散系统的预见控制. 控制与决策, 2013, **28**(3): 466–470)
- 33 Cao M J, Liao F C. Design of an optimal preview controller for linear discrete-time descriptor systems with state delay. *International Journal of Systems Science*, 2015, **46**(5): 932–943
- 34 Liao Fu-Cheng, Zhang Zhi-Gang, Zhang Ying. Reduced order of the Riccati equation and optimal preview control of singular systems. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, **31**(4): 520–524  
(廖福成, 张志刚, 张莹. Riccati 方程的降阶与广义系统的最优预见控制. 北京科技大学学报, 2009, **31**(4): 520–524)
- 35 Wang Zhi-Sheng, Wang Dao-Bo. Optimal control with ideal control strategy and expected trajectory. *Control and Decision*, 2006, **21**(1): 100–103  
(王志胜, 王道波. 含理想控制策略和期望轨道的最优控制. 控制与决策, 2006, **21**(1): 100–103)

- 36 Zhen Zi-Yang, Wang Zhi-Sheng, Wang Dao-Bo. Information fusion estimation based preview control for discrete linear system. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(2): 347–352  
(甄子洋, 王志胜, 王道波. 基于信息融合估计的离散线性系统预见控制. *自动化学报*, 2010, **36**(2): 347–352)
- 37 Zhen Zi-Yang, Wang Zhi-Sheng, Wang Dao-Bo. Optimal preview tracking control based on information fusion in error system. *Control Theory and Applications*, 2009, **26**(4): 425–428  
(甄子洋, 王志胜, 王道波. 基于误差系统的信息融合最优预见跟踪控制. *控制理论与应用*, 2009, **26**(4): 425–428)
- 38 Wang Zhi-Sheng, Jiang Bin, Zhen Zi-Yang. *Fusion Estimation and Fusion Control*. Beijing: Science Press, 2009.  
(王志胜, 姜斌, 甄子洋. 融合估计与融合控制. 北京: 科学出版社, 2009.)
- 39 Zhen Zi-Yang, Wang Zhi-Sheng, Wang Dao-Bo. Discrete system optimal tracking control based on information fusion estimation. *Control and Decision*, 2009, **24**(1): 81–85  
(甄子洋, 王志胜, 王道波. 基于信息融合估计的离散系统最优跟踪控制. *控制与决策*, 2009, **24**(1): 81–85)
- 40 Zhen Zi-Yang, Wang Dao-Bo, Wang Zhi-Sheng. Information fusion decoupling control method for time-delayed multivariable process. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2010, **31**(3): 549–552  
(甄子洋, 王道波, 王志胜. 时滞多变量过程信息融合解耦控制. *小型微型计算机系统*, 2010, **31**(3): 549–552)
- 41 Zhen Z Y, Wang Z S, Zhou H. Information fusion based solving method for linear quadratic optimal control problem. In: Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Control and Automation. Christchurch, New Zealand: IEEE, 2009. 727–731
- 42 Zhen Zi-Yang, Wang Zhi-Sheng, Wang Dao-Bo. Discrete linear information fusion optimal tracking control. *Control and Decision*, 2009, **24**(6): 869–873, 878  
(甄子洋, 王志胜, 王道波. 离散线性信息融合最优跟踪控制. *控制与决策*, 2009, **24**(6): 869–873, 878)
- 43 Zhen Zi-Yang, Jiang Ju, Wang Zhi-Sheng, Wang Xin-Hua. Finite-time information fusion for linear quadratic optimal control. *Control Theory and Applications*, 2012, **29**(2): 172–176  
(甄子洋, 江驹, 王志胜, 王新华. 有限时间信息融合线性二次型最优控制. *控制理论与应用*, 2012, **29**(2): 172–176)
- 44 Li Dong-Mei, Hu Zhen-Kun, Hu Heng-Zhang. Optimal preview control of linear discrete systems. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2002, **26**(3): 284–289  
(李冬梅, 胡振坤, 胡恒章. 线性离散系统的最优预见控制. *南京理工大学学报*, 2002, **26**(3): 284–289)
- 45 Kojima A, Ishijima S. LQ preview synthesis: optimal control and worst case analysis. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, **44**(2): 352–357
- 46 Kojima A.  $H_2$  performance on preview feedforward action. In: Proceedings of the 16th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems. Leuven, Belgium, 2004. 1–5
- 47 Liao F C, Xu Y J, Wu J. Novel approach to preview control for a class of continuous-time systems. *Journal of Control Science and Engineering*, 2015, **2015**: Article ID 745137
- 48 Marro G, Zattoni E.  $H_2$ -optimal rejection with preview in the continuous-time domain. *Automatica*, 2005, **41**(5): 815–821
- 49 Moelja A A, Meinsma G.  $H_2$ -optimal control of systems with multiple I/O delays: time domain approach. *Automatica*, 2005, **41**(7): 1229–1238
- 50 Tadmor G. Robust control in the gap: a state-space solution in the presence of a single input delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, **42**(9): 1330–1335
- 51 Moelja A A, Meinsma G.  $H_2$  control of preview systems. *Automatica*, 2006, **42**(6): 945–952
- 52 Kristalny M, Mirkin L. On the  $H_2$  two-sided model matching problem with preview. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(1): 204–209
- 53 Zou Q Z. Optimal preview-based stable-inversion for output tracking of nonminimum-phase linear systems. *Automatica*, 2009, **45**(1): 230–237
- 54 Zou Q Z, Devasia S. Precision preview-based stable-inversion for nonlinear nonminimum-phase systems: the VTOL example. *Automatica*, 2007, **43**(1): 117–127
- 55 Chen J, Ren Z, Hara S, Qin L. Optimal tracking performance: preview control and exponential signals. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, **46**(10): 1647–1653
- 56 Cohen A, Shaked U. Linear discrete-time  $H_\infty$ -optimal tracking with preview. In: Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, USA: IEEE, 1995, **3**: 2555–2561
- 57 Cohen A, Shaked U. Linear discrete-time  $H_\infty$ -optimal tracking with preview. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, **42**(2): 270–276
- 58 Cohen A, Shaked U. Robust discrete-time  $H_\infty$  optimal tracking with preview. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1998, **8**(1): 29–37
- 59 Gershon E, Limebeer D J N, Shaked U, Yaesh I. Stochastic  $H_\infty$  tracking with preview for state-multiplicative systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, **49**(11): 2061–2068
- 60 Tadmor G, Mirkin L.  $H_\infty$  control and estimation with preview-part II: fixed-size ARE solutions in discrete time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(1): 29–40
- 61 Hazell A, Limebeer D J N. An efficient algorithm for discrete-time  $H_\infty$  preview control. *Automatica*, 2008, **44**(9): 2441–2448
- 62 Takaba K. Robust servomechanism with preview action for polytopic uncertain systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2000, **10**(2): 101–111
- 63 Liao F, Wang J L, Yang G H. LMI-based reliable robust preview tracking control against actuator faults. In: Proceedings of the 2001 American Control Conference. Arlington, VA: IEEE, 2001, **2**: 1047–1052
- 64 Shaked U, de Souza C E. Continuous-time tracking problems in an  $H_\infty$  setting: a game theory approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, **40**(5): 841–852

- 65 Gershon E, Shaked U, Yaesh I.  $H_\infty$  tracking of linear continuous-time systems with stochastic uncertainties and preview. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2004, **14**(7): 607–626
- 66 de Souza C E, Shaked U, Fu M. Robust  $H_\infty$  tracking: a game theory approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1995, **5**(3): 223–238
- 67 Mirkin L. On the  $H_\infty$  fixed-lag smoothing: how to exploit the information preview. *Automatica*, 2003, **39**(8): 1495–1504
- 68 Tadmor G, Mirkin L.  $H_\infty$  control and estimation with preview-part I: matrix ARE solutions in continuous time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(1): 19–28
- 69 Kojima A, Ishijima S.  $H_\infty$  preview tracking in output feedback setting. In: Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control. Phoenix, Arizona, USA: IEEE, 1999. 3162–3164
- 70 Kojima A, Ishijima S.  $H_\infty$  preview control in infinite-horizon time setting. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 1999, **35**(1): 77–84
- 71 Mianzo L, Peng H. A unified Hamiltonian approach for LQ and  $H_\infty$  preview control algorithms. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1999, **121**(3): 365–369
- 72 Kojima A, Ishijima S.  $H_\infty$  performance of preview control systems. *Automatica*, 2003, **39**(4): 693–701
- 73 Kojima A, Ishijima S. Formulas on preview and delayed  $H_\infty$  control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(12): 1920–1937
- 74 Kojima A. Generalized preview and delayed  $H_\infty$  control: output feedback case. In: Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision Control. Seville, Spain: IEEE, 2005. 5770–5775
- 75 Kojima A.  $H_\infty$  controller design for preview and delayed systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, **60**(2): 404–419
- 76 Katoh H.  $H_\infty$ -optimal preview controller and its performance limit. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, **49**(11): 2011–2017
- 77 Middleton R H, Chen J, Freudenberg J S. Tracking sensitivity and achievable  $H_\infty$  performance in preview control. *Automatica*, 2004, **40**(8): 1297–1306
- 78 Wang Z S, Wang D B, Zhen Z Y. Primary exploration of nonlinear information fusion control theory. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2007, **50**(5): 686–696
- 79 Wang Zhi-Sheng. Information fusion optimal preview control for nonlinear discrete system. *Control and Decision*, 2008, **23**(4): 397–402  
(王志胜. 非线性离散系统的信息融合最优预见控制. 控制与决策, 2008, **23**(4): 397–402)
- 80 Wang Zhi-Sheng. Optimal control for time-delayed nonlinear discrete system based on IFE method. *Control Theory and Applications*, 2008, **25**(3): 538–542  
(王志胜. 时滞非线性离散动态系统最优控制的信息融合估计方法. 控制理论与应用, 2008, **25**(3): 538–542)
- 81 Hu Zhou, Wang Zhi-Sheng, Zhen Zi-Yang. Nonlinear information fusion control for underactuated cranes with input saturation. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(7): 1522–1527  
(胡洲, 王志胜, 甄子洋. 带输入饱和的欠驱动吊车非线性信息融合控制. 自动化学报, 2014, **40**(7): 1522–1527)
- 82 Hu Zhou, Wang Zhi-Sheng. Robust information fusion control for a class of nonlinear discrete-time systems. *Information and Control*, 2014, **43**(5): 578–582  
(胡洲, 王志胜. 一类非线性离散系统的鲁棒信息融合控制. 信息与控制, 2014, **43**(5): 578–582)
- 83 Zhen Z Y, Jiang J, Wang Z S, Wang X H. Information fusion based decoupling control for multivariable nonlinear system. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, **2015**: Article ID 361581
- 84 Liao Fu-Cheng, Ren Zhen-Qin. Design of a preview controller for nonlinear systems based on the control system directly method. *Control and Decision*, 2013, **28**(11): 1679–1684  
(廖福成, 任祯琴. 基于控制系统直接方法的非线性系统预见控制器设计. 控制与决策, 2013, **28**(11): 1679–1684)
- 85 Tomizuka M. “Optimal linear preview control with application to vehicle suspension” — revisited. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1976, **98**(3): 309–315
- 86 Prokop G, Sharp R S. Performance enhancement of limited-bandwidth active automotive suspensions by road preview. *IEE Proceedings — Control Theory and Applications*, 1995, **142**(2): 140–148
- 87 Liu Shao-Jun, Zhong Jue, Guo Shu-Juan, Suematu Yoshikazo. Design of optimal preview control and its application to active control suspension. *Journal of Central South University of Technology*, 1997, **28**(2): 174–177  
(刘少军, 钟掘, 郭淑娟, 末松良一. 最优预见控制设计及其在汽车主动悬架控制中的应用. 中南工业大学学报, 1997, **28**(2): 174–177)
- 88 Zhu Hao, Liu Shao-Jun, Qiu Xian-Yan. Optimum-preview control model of rail vehicle active suspension. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2005, **5**(3): 8–13  
(朱浩, 刘少军, 邱显焱. 车辆主动悬挂最优预见控制模型. 交通运输工程学报, 2005, **5**(3): 8–13)
- 89 Hać A. Optimal linear preview control of active vehicle suspension. *Vehicle System Dynamics*, 1992, **21**(1): 167–195
- 90 Marzbanrad J, Ahmadi G, Hojjat Y, Zohoor H. Optimal active control of vehicle suspension system including time delay and preview for rough roads. *Journal of Vibration and Control*, 2002, **8**(7): 967–991
- 91 Marzbanrad J, Hojjat Y, Zohoor H, Nikravesh S K. Optimal preview control design of an active suspension based on a full car model. *Scientia Iranica*, 2003, **10**: 23–36
- 92 Marzbanrad J, Ahmadi G, Zohoor H, Hojjat Y. Stochastic optimal preview control of a vehicle suspension. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, **275**(3–5): 973–990
- 93 Roh H S, Park Y. Stochastic optimal preview control of an active vehicle suspension. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, **220**(2): 313–330
- 94 Elmadany M, Abduljabbar Z, Foda M. Optimal preview control of active suspensions with integral constraint. *Journal of Vibration and Control*, 2003, **9**(12): 1377–1400

- 95 Thompson A G, Davis B R. Computation of the RMS state variables and control forces in a half-car model with preview active suspension using spectral decomposition methods. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, **285**(3): 571–583
- 96 Rao L V V, Narayanan S. Preview control of random response of a half-car vehicle model traversing rough road. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, **310**(1–2): 352–365
- 97 Prabakar R S, Sujatha C, Narayanan S. Optimal semi-active preview control response of a half car vehicle model with magnetorheological damper. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, **326**(3–5): 400–420
- 98 Yu F, Zhang J W, Crolla D A. A study of a Kalman filter active vehicle suspension system using correlation of front and rear wheel road inputs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2000, **214**(5): 493–502
- 99 Xie Z C, Wong P K, Huang X Z, Wong H C. Design of an active vehicle suspension based on an enhanced PID control with wheelbase preview and tuning using genetic algorithm. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 2012, **33**: 103–112
- 100 Zhang X, Zhang J W. Performance analysis of limited bandwidth active suspension with preview based on a discrete time model. *WSEAS Transactions on Systems*, 2010, **9**(8): 834–843
- 101 Li P S, Lam J, Cheung K C. Multi-objective control for active vehicle suspension with wheelbase preview. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, **333**(21): 5269–5282
- 102 Hać A, Youn I. Optimal semi-active suspension with preview based on a quarter car model. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1992, **114**(1): 84–92
- 103 Hać A, Youn I. Optimal design of active and semi-active suspensions including time delays and preview. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1993, **115**(4): 498–508
- 104 Soliman A, Da C. Preview control of a semi-active suspension system. *International Journal of Vehicle Design*, 1996, **17**(4): 384–396
- 105 Gordon T J, Sharp R S. On improving the performance of automotive semi-active suspension systems through road preview. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, **217**(1): 163–182
- 106 Xie Z C, Wong P K, Zhao J, Xu T, Wong K I, Wong H C. A noise-insensitive semi-active air suspension for heavy-duty vehicles with an integrated fuzzy-wheelbase preview control. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, **2013**: Article ID 121953
- 107 Wu Hai, Xu Jin-Xue, Yu Xi-Chun, Xu Xin-He. Iterative learning preview control for CNC machine tools servomechanism. *Control and Decision*, 1998, **13**(S1): 479–483  
(吴海, 徐进学, 于锡纯, 徐心和. CNC 机床伺服系统的学习预见控制研究. *控制与决策*, 1998, **13**(增刊): 479–483)
- 108 Tan Yue-Gang. A preview compensating algorithm of external-disturbances of the position servo system. *Control Theory and Applications*, 1997, **14**(1): 122–126  
(谭跃钢. 位置伺服系统外干扰的一种预见补偿算法. *控制理论与应用*, 1997, **14**(1): 122–126)
- 109 Huang Shi-Tao, Feng Zhi-Jing. Digital preview controller design for precision linear servo device. *Machine Tool and Hydraulics*, 2007, **35**(3): 25–27  
(黄世涛, 冯之敬. 精密直线伺服装置数字预见控制器设计. *机床与液压*, 2007, **35**(3): 25–27)
- 110 Egami T, Tsuchiya T. Disturbance suppression control with preview action of linear DC brushless motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1995, **42**(5): 494–500
- 111 Li Li-Na, Sun Hong-Chang, A Man, Dai Yi, Niu Zhi-Gang. Method study and failure analysis on impact and vibration of linear servo motor based on preview control function. *Machine Tool and Hydraulics*, 2011, **39**(17): 135–137  
(李丽娜, 孙宏昌, 阿曼, 戴怡, 牛志刚. 基于预见控制功能的直线伺服电机冲击振动故障分析与对策研究. *机床与液压*, 2011, **39**(17): 135–137)
- 112 Negm M M, Mantawy A H, Shwehdi M H. A global ANN algorithm for induction motor based on optimal preview control theory. In: *Proceedings of the 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference*. Bologna, Italy: IEEE, 2003, **2**: 1–7
- 113 Negm M M, Bakhashwain J M, Shwehdi M H. Speed control of a three-phase induction motor based on robust optimal preview control theory. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, **21**(1): 77–84
- 114 Tsuchiya T, Shinada K, Abe S, Egami T. Robot trajectory control by preview control and adaptive control. In: *Proceedings of the 1988 IEEE Workshop on Intelligent Robots*. Tokyo, Japan: IEEE, 1988. 125–130
- 115 Zhang Xiao-Mei, Wang Zhan-Lin. Research of preview control method on robot. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1996, **22**(1): 21–26  
(张晓梅, 王占林. 机器人预见控制方法的研究. *北京航空航天大学学报*, 1996, **22**(1): 21–26)
- 116 Kadakkal V, Cook G. Use of a preview control scheme with knowledge of future trajectory information for a lane tracking controller on a wheeled mobile robot. In: *Proceedings of the 34th Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics*. Orlando, FL: IEEE, 2008. 1692–1697
- 117 Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, Fujiwara K, Harada K, Yokoi K, Hirukawa H. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Taipei, China: IEEE, 2003, **2**: 1620–1626
- 118 Nishiwaki K, Kagami S. High frequency walking pattern generation based on preview control of ZMP. In: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Orlando, FL: IEEE, 2007. 2667–2672
- 119 Nishiwaki K, Kagami S. Simultaneous planning of CoM and ZMP based on the preview control method for on-line walking control. In: *Proceedings of the 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. Bled, Slovenia: IEEE, 2011. 745–751
- 120 Shimmyo S, Sato T, Ohnishi K. Biped walking pattern generation by using preview control based on three-mass model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, **60**(11): 5137–5147



- 121 Audren H, Vaillant J, Kheddar A, Escande A, Kaneko K, Yoshida E. Model preview control in multi-contact motion-application to a humanoid robot. In: Proceedings of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, IL, USA: IEEE, 2014. 4030–4035
- 122 Li Dong-Mei, Hu Heng-Zhang. General optimal finite preview control and its application to terrain following system. *Control and Decision*, 2001, **16**(S1): 652–656 (李冬梅, 胡恒章. 一般型最优有限预见控制及其在地形跟踪中的应用研究. *控制与决策*, 2001, **16**(S1): 652–656)
- 123 Li D M, Zhou D, Hu Z K, Hu H Z. Optimal preview control applied to terrain following flight. In: Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2001. 211–216
- 124 Song Jian-Mei, Chen Su-Fang. Terrain-following controller by robust optimal preview servo method for a certain long-range missile. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2005, **25**(8): 663–666 (宋建梅, 陈素芳. 远程导弹鲁棒最优预见伺服地形跟踪控制器设计. *北京理工大学学报*, 2005, **25**(8): 663–666)
- 125 Farooq A, Limebeer D J N. Path following of optimal trajectories using preview control. In: Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference. Seville, Spain: IEEE, 2005. 2787–2792
- 126 Wang Y, Zhu Z T, Zhang L, Peng C. Preview tracking control of flexible missile. In: Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai, China: IEEE, 2011. 4503–4508
- 127 Pu H Z, Zhen Z Y, Xia M. Flight control system of unmanned aerial vehicle. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, **32**(1): 1–8
- 128 Zhen Z Y, Wang D B, Kang Q. UAV flight trajectory control based on information fusion control method. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Networking, Sensing and Control. Chicago, IL: IEEE, 2010. 337–341
- 129 Tokutake H, Okada S, Sunada S. Disturbance preview controller and its application to a small UAV. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2012, **55**(1): 76–78
- 130 Hess R A, Chan K. Preview control pilot model for near-earth maneuvering helicopter flight. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1988, **11**(2): 146–152
- 131 Hazawa K, Shin J, Fujiwara D, Igarashi K, Fernando D, Nonami K. Autonomous flight control of hobby-class small unmanned helicopter: trajectory following control by using preview control considering heading direction. In: Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sendai, Japan: IEEE, 2004, **1**: 754–760
- 132 Liborio G, Paulino N, Cunha R, Silvestre C, Ribeiro M I. Terrain following preview controller for model-scale helicopters. In: Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics. Coimbra, Portugal, 2003. 1227–1232
- 133 Paulino N, Silvestre C, Cunha R. Affine parameter-dependent preview control for rotorcraft terrain following flight. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, **29**(6): 1350–1359
- 134 Cunha R, Antunes D J G T, Gomes P, Silvestre C J. A path-following preview controller for autonomous air vehicles. In: Proceedings of the 2006 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Keystone, Colorado: AIAA, 2006, **6715**: 1–21
- 135 Shen Jiong, Jin Lin, Chen Lai-Jiu. Simulating study on load preview control system of a thermal power unit. *Proceedings of the CSEE*, 1999, **19**(3): 14–17, 54 (沈炯, 金林, 陈来九. 火电单元机组负荷最优预见控制系统仿真研究. *中国电机工程学报*, 1999, **19**(3): 14–17, 54)
- 136 Li Yi-Guo, Shen Jiong, Wang Pei-Hong, Han Yu, Lv Zhen-Zhong. Load preview control method of thermal power unit based on unidirectional decoupling. *Power Engineering*, 2004, **24**(5): 664–668 (李益国, 沈炯, 王培红, 韩宇, 吕震中. 基于单向解耦的火电机组负荷最优预见控制方法. *动力工程*, 2004, **24**(5): 664–668)
- 137 Li Yi-Guo, Shen Jiong, Lv Zhen-Zhong. A study on robust load preview control method via LMI. *Proceedings of the CSEE*, 2003, **23**(12): 213–217 (李益国, 沈炯, 吕震中. 基于 LMI 的鲁棒负荷预见控制方法. *中国电机工程学报*, 2003, **23**(12): 213–217)
- 138 Li Yi-Guo, Shen Jiong, Xue Jing-Yan, Lv Zhen-Zhong. Multi-model robust forecast control of thermal power plant loads. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2004, **19**(2): 186–190 (李益国, 沈炯, 薛景岩, 吕震中. 火电机组负荷多模型鲁棒预见控制方法. *热能动力工程*, 2004, **19**(2): 186–190)
- 139 Laks J H, Pao L Y, Wright A D. Control of wind turbines: past, present, and future. In: Proceedings of the 2009 American Control Conference. Saint Louis, MO: IEEE, 2009. 2096–2103
- 140 Dunne F, Pao L Y, Wright A D, Jonkman B, Kelley N, Simley E. Adding feedforward blade pitch control for load mitigation in wind turbines: non-causal series expansion, preview control, and optimized FIR filter methods. In: Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace. Orlando, Florida, USA: AIAA, 2011. 1–17
- 141 Laks J, Pao L Y, Wright A, Kelley N, Jonkman B. Blade pitch control with preview wind measurements. In: Proceedings of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace. Orlando, Florida, USA: AIAA, 2010. 1–24
- 142 Ozdemir A A, Seiler P, Balas G J. Design tradeoffs of wind turbine preview control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **21**(4): 1143–1154
- 143 Laks J, Pao L, Wright A, Kelley N, Jonkman B. The use of preview wind measurements for blade pitch control. *Mechatronics*, 2011, **21**(4): 668–681
- 144 Wang N, Johnson K E, Wright A D. FX-RLS-based feedforward control for LIDAR-enabled wind turbine load mitigation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(5): 1212–1222
- 145 Kristalny M, Madjidian D, Knudsen T. On using wind speed preview to reduce wind turbine tower oscillations. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **21**(4): 1191–1198
- 146 Mianzo L, Peng H. Output feedback  $H_\infty$  preview control of an electromechanical valve actuator. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, **15**(3): 428–437

- 147 Salton A T, Chen Z Y, Zheng J C, Fu M Y. Preview control of dual-stage actuator systems for superfast transition time. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, **16**(4): 758–763
- 148 Wang L, Zheng J C, Fu M Y. Optimal preview control of a dual-stage actuator system for triangular reference tracking. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, **22**(6): 2408–2416
- 149 Wang D, Aida K. Research on fuzzy I-PD preview control for nonlinear system. *JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements, and Manufacturing*, 2003, **46**(3): 1042–1050
- 150 Silvestre C, Cunha R, Paulino N, Pascoal A. A bottom-following preview controller for autonomous underwater vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, **17**(2): 257–266
- 151 Saleh L, Chevrel P, Claveau F, Lafay J F, Mars F. Shared steering control between a driver and an automation: stability in the presence of driver behavior uncertainty. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, **14**(2): 974–983
- 152 Hosokawa T, Mori Y. Design of preview sliding mode control for an wideband speaker system. In: Proceedings of the 2008 SICE Annual Conference. Tokyo, Japan: IEEE, 2008. 2345–2348
- 153 Running K D, Martins N C. Optimal preview control of Markovian jump linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, **54**(9): 2260–2266
- 154 Zhang C, Vahidi A. Route preview in energy management of plug-in hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(2): 546–553
- 155 Zhang H, Shi Y, Mu B X. Optimal  $H_\infty$ -based linear-quadratic regulator tracking control for discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems with preview actions. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2013, **135**(4): 044501
- 156 Cole M O T, Wongratanaphisan T. Optimal LQ feedforward tracking with preview: practical design for rigid body motion control. *Control Engineering Practice*, 2014, **26**: 41–50
- 157 Gershon E, Shaked U.  $H_\infty$  preview tracking control of retarded state-multiplicative stochastic systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014, **24**(15): 2119–2135
- 158 Liao F C, Ren Z Q, Tomizuka M, Wu J. Preview control for impulse-free continuous-time descriptor systems. *International Journal of Control*, 2015, **88**(6): 1142–1149
- 159 Zhang W L, Bae J, Tomizuka M. Modified preview control for a wireless tracking control system with packet loss. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, **20**(1): 299–307
- 160 Wu Hai, Zong Ming, Yu Xi-Cun, Xu Xin-He. Preview predictive control for a class of following systems. *Control Theory and Applications*, 2001, **18**(4): 534–538 (吴海, 宗鸣, 于锡存, 徐心和. 一类跟踪系统的预见预测控制算法的研究. 控制理论与应用, 2001, **18**(4): 534–538)
- 161 Ordys A W, Tomizuka M, Grimble M J. State-space dynamic performance preview-predictive controller. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2007, **129**(2): 144–153
- 162 de Bruyne S, van der Auweraer H, Anthonis J, Desmet W, Swevers J. Preview control of a constrained hydraulic active suspension system. In: Proceedings of the 51st IEEE Annual Conference on Decision and Control. Maui, HI: IEEE, 2012. 4400–4405



甄子洋 博士, 南京航空航天大学自动化学院副教授. 主要研究方向为预见控制, 智能与自适应控制, 无人机/舰载机/高超声速飞行器飞行控制, 多无人机协同控制与决策研究.

E-mail: zhenziyang@nuaa.edu.cn

(ZHEN Zi-Yang Ph. D., associate professor at the College of Automation

Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interest covers preview control, intelligent and adaptive control, UAV/carrier-based aircraft/hypersonic aircraft flight control, and multi-UAV cooperative control and decision.)