# 非线性预测控制模型方法综述

**摘要：**预测控制(MPC)算法经历了30余年的发展，展现出强大的生命力。近年来，非线性MPC已逐渐成为 MPC研究的热点。非线性系统多样性给非线性MPC研究造成了困难。主要体现在模型选取、能量函数求解和非 线性算法等诸多方面。非线性MPC以非线性模型为基础。这也是非线性MPC区别于线性MPC的根本因素。论 文针对非线性预测模型进行了总结和评述。

**关键词：**非线性系统；预测控制；预测模型；线性化

## 0引言

20世纪70年代以来，随着对工业过程控制要求不断提高，人们力图寻找对过程模型精度要求不高而同样能实现高质量过程控制的方法。在这种需求背景下，预测控制逐渐发展起来。预测控制最初 由Richalet和Cutler提出[1]，它最大程度地迎合了工业过程控制的实际需求，控制综合效果好，一经提出即在工业控制领域获得了较快应用。随着计算机技术的飞速发展，预测控制的应用领域也迅速扩展到包括航空、航天在内的众多工程领域。预测控制算法具有三大本质特征[2,3]：预测模型，滚动优化和反馈校正。它最大的特点是不断滚 动的局部优化，使模型失配、畸变、干扰等引起的 不确定性及时得到弥补，从而得到较好的动态控制性能。正因如此，预测控制可推广到有约束条件、大迟延、非最小相位以及非线性等过程，其强大的 生命力受到控制界的极大关注。

预测控制技术发展至今，不仅在实际应用中取得了良好效果，而且在理论上也取得了突飞猛进的进展。最初的基于线性模型预测控制算法(MAC、DMC、GPC)已经相当成熟。近年来，非线性MPC (NLMPC)已成为预测控制研究的热点。针对的研究对象是有扰动、有摄动和有约束的非线性过程控制。 非线性MPC研究的困难主要体现在模型选取、能量函数求解和非线性算法等诸多方面。其中，非线性模型是非线性MPC的基础，也是非线性MPC区别于线性MPC的根本因素。论文针对非线性预 测模型进行了总结和评述。

## 1非线性预测模型的类型

随着预测控制理论的不断发展，预测模型的概念不断拓展，现在所谓的模型已不能狭义地理解为过程的数学模型，关键只在于模型的预测功能[5]。 不过，非线性预测模型仍具有非线性函数的本质特征。在类型上，非线性预测模型主要可分为机理模型和实验模型。

**1.1机理模型**

机理模型是根据被控对象的质量、能量和动量守恒及构造关系等物理或化学特性所建立的微分方程模型。建立机理模型不需要很多的过程数据，因此，当被控对象工作在特性变化迅速而不容易获取过程数据时，机理建模就是较好的选择：但建立机理模型需要对被控对象有透彻的了解，不同的对象特性不同，机理建模方法每次应用于不同对象或对象特性变化时，都需要新做大量的工作。特别是系统复杂、关联因素多的情况下，要建立机理模型往往难度较大。

另外，用严格的机理建模方法得到的通常都是高阶模型，而这些高阶模型会给后续的控制器、估计器的设计以及在线计算带来难度。对于非线性模型预测控制理论研究主要是基于机理模型，其算法的原理也同样遵循预测控制的原理，即预测模型、滚动优化和反馈校正，只是模型的描述没有普遍性。在实际系统中，由于难以获得确的机理模型，因此很多情况下采用混合建模方法，即通过将机理模型和经验模型相结合得到系统的函数模型。

**1.2实验模型**

在大多数的实际应用中，我们缺乏对被控对象的精确了解，因此很难进行机理建模，此时就只能建立实验模型。实验建模是一种利用系统的动态过程数据进行建模的方法，描述的是系统输入和输出之间的关系。因为过程数据都是以离散时刻为基准，因而离散时间模型更能自然地反映数据中包含的系统信息。

实验建模所使用的模型结构灵活多样，但可以归纳为几大类：阶跃响应模型和脉冲响应模型等非参数模型。状态空间模型，以及囊括多种特殊形式模型的输入，输出模型(例如：自回归滑动平均模型、 Hammerstein模型、Wiener模型、Volterra模型、多项式ARMAX模型、神经网络模型、模糊模型等)。实验建模，除了要选择模型的结构形式，还包括输入序列设计、噪声建模、参数估计和模型校验等重要环节。相对于机理建模，实验建模有以下优点： 1)不需要对过程有过于详细的了解； 2)容易限制模型的复杂度； 3)当过程参数变化或运行范围变化时，可以较容易地通过过程数据重新建模，或通过自适应的方法对模型进行在线修正。

## 2非线性预测模型的具体形式

在实际使用中．非线性预测模型的具体表现形式多种多样。

**2.1线性化模型**

线性化模型即通过线性化方法将非线性模型线性化处理后，按照线性系统滚动优化设计预测控制器，而在模型预测部分一般仍采用非线性模型。模型线性化后会产生一定的预测误差，可用在线辨识的方法来修正线性化模型。基于线性化模型的非线性MPC算法计算简单、 实时性好，但也有不足之处。例如，在非线性 QDMC中，尽管每个采样时刻都可以采用新的线性化模型，但系统动态信息的丢失是难免的，而在线更换模型，又很难保证每个采样时刻优化问题的可行性。在线优化过程中，操作区域的划分与多少。以及切换点的选择将直接影响算法的实时性及控制性能。

**2.2特殊输入/输出模型**

如果可以获取非线性系统的输入输出数据，则可以用特殊的输入，输出模型来描述系统，建立输入，输出模型，如Volterra模型、Hammerstein模型、Wiener模型、自回归滑动平均模型、广义 Hammerstein模型、多项式ARMAX模型、Laguerre模型等。Volterra模型即非线性脉冲响应模型射。描述系统动态的精度取决于所取Voltcrra序列的阶次，但高阶次的Volterra序列需要大量的实验来获取 Voltcrra系数Hammerstein模型描述的是一类可分为静态非 线性和动态线性的系统，这类模型结构简单，可用于描述具有幂函数、死区、开关等非线性的过程。选择合适的性能指标，采用Hammerstein模型预测，可将控制问题分解为线性模型的动态优化问题和非线性模型的静态求根问题。 Wiener模型也可描述一类能进行动态线性和静态非线性分离的系统，不同的是Wiener模型的线性动态环节在非线性静态增益的前面。其他几类输入，输出关系模型也各有特点。

**2.3分段线性化模型**

在非线性系统的分析与设计中，线性化技术发挥了重要作用，但对于具有大范围、强耦合的非线性系统，利用在一个平衡点附近展开得到的线性化模型不能反映非线性系统在大范隔的动、静态特性，有时其控制品质甚至稳定性都难以保证。此时就可以建立分段线性化模型。 段线性化模型是通过采用多模型方法得到的非线性系统的线性化多模型表示。

多模型方法的思想是一种变参数线性系统、非线性系统的常用方法，在参数估计、离散时间随机 系统控制、自适应控制等领域获得了广泛研究与应用。其基本思路是，在不同的平衡点附近用不同的线性模型描述非线性对象，在整个工作范围内用多个线性化模型来逼近非线性过程，最后通过多个线 性模型的协调控制，实现大范围、强耦合非线性系统的控制。 在使用多模型方法时，如何使用多个线性化模 型在不同动态范围内逼近非线性过程，同时又保证线性化模型围绕系统平衡点附近展开，是建立和成功运用非线性系统线性化多模型表示的关键。

常用两种方法：一是根据期望的参数轨迹，搜索确定平衡点(或操作点)的位置和数量；二是对设定值或参数轨迹分段趋近。分段线性化模型应用时，一般还同时将非线性设定值分解后得到适合于非线性系统线性化多模型表示的相应多模型参考轨迹。分段线性化模型在描 述系统方面比线性化模型精确，又可简化非线性优化问题，降低计算难度，有较广泛的应用前景。

**2.4 智能模型**

智能模型如模糊模型、神经网络模型，描述的也是系统的输入输出之间关系，可以逼近许多非线性系统。

1. 模糊模型

Zadeh(1965)提出用模糊逻辑系统来模拟人类对输入，输出空间之间的非线性映射关系的理解。模糊模型可同时利用定量和定性的系统信息，在实际应用巾可将人类对系统的先验知识直接用来影响模型的结构和参数，且参数和结构有较明确的物理含义。最常用的模糊模型形式包括：Mamdani模型、模糊关系模型、T-S模型。

1. 神经网络模型

利用神经网络根据实际被控对象的输入输出数据。通过学习和训练来逼近非线性系统，是描述非线性系统的一种有效的方法。不过因为利用神经网络进行多步预测还没有直接有效的方法，影响了神经网络模型的更深入应用。模糊模型和神经网络模型的不足之处，主要表 现在多步预测缺乏有效的方法；理论分析(如模型收敛性和闭环稳定性等)较为困难。

**2.5其他综合性模型**

在非线性预测控制中，除上述模型外，还有多种综合性的模型。比如：将人工神经网络模型与多变量线性ARX模型相结合构成的集成模型；连续离散混合控制输入的混杂模型等等。

## 3非线性建模带来的问题

无论采用哪种预测模型，即使是线性化模型，非线性预测控制的滚动优化过程都面临求解非线性能量函数这一难题，这是系统非线性带来的最大问题。首先，由于要采用非线性规划(NLP)需要递归计算，不可避免存在大量的计算，因而对于实际控制系统，其实时性很难保证；其次，在非线性预测控制中，常采用局部优化来解决计算量这一难题，因而就无法保障系统的全局优化；第三，针对不同系统，算法收敛性和闭环的稳定性都很难得到证明。

## 4结论

非线性预测控制与线性预测控制相比较，理论上并没有出现突破性的成果。前者基本上沿用了后者的思想，只是在模型的选取、能量函数的求解和非线性算法等方面有一些进展，而这正是非线性系统多样性所造成的困难。不过正因如此，随着非线性预测控制应用需求的日益迫切，包括非线性预测建模在内的非线性预测控制理论和技术必将更快速、更深入地发展下去。

## 参考文献

[l] RICHALET J，RAULT A．Model predictive heuristic control application to industrial process[J]．Automatic，1978，14(1)：413-428．

[2] 舒迪前．预测控制系统及其应用[M]．北京：机械工业出版社，2016．

[3] 席裕庚．预测控制[M]．北京：国防工业出版社，1993．

[4] 徐祖华．模型预测控制理论及应用研究[D]．杭州：浙江大学，2014．

[5] MORARI M，LEE H．Model predictive control：past，present and future[J]．Computers and Chemical Engineering，1999.23：667.682．

[6] 施建洪，徐胜红，禹继顺．基于模糊理论的碟形飞行器复合控制分配策略．海军航空工程学院学报，2005，20(5)：513-516．

[7] 许超，陈治纲，邵惠鹤．预测控制技术及应用发展综述[J]．化工自动化及仪表，2002，29(3)：l—10．

[8] CULTER C R，MORSHEDI A，HAYDEL J．An industrial perspective on advanced controi [C] AIChE Annual Meeting，Washington，D．C．2013

[9] 陈宗海，放志诠．复杂化工过程实时动态仿真的建模策略[J]．计算机仿真，2017，14(4)：49—52．

[10] 陈虹，刘志远，解小华．非线性模型预测控制的现状与问题[J]．控制与决策，2001，16(4)：385-391．

[11] GARCIA C E，MORSHEDI A M．QuadraticProgramming Solution of Dynamic Matrix Control(QDMC)[J]．Chem．Eng．Commun．1986，46：73-87．

[12] DOYLE F J，OGUNNAIKE B A，PEARSON R K．Nonlinear model·-based control using second·-orderVolterra models[J]．Automatica,1995，31(5)：697-714．