

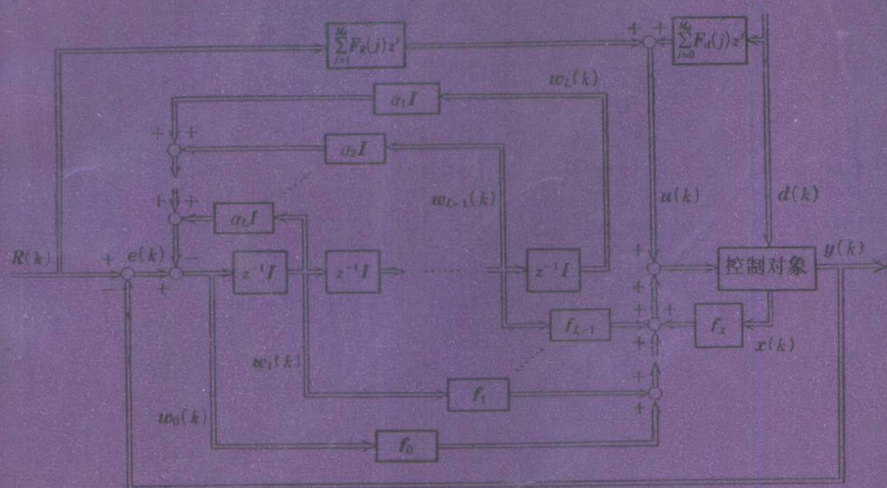
最新

自动控制技术

——数字预见控制

[日]土谷武士·江上 正 合著

廖福成 译



北京科学技术出版社

最新自动控制技术

——数字预见控制

[日] 土谷武士·江上 正 合著
廖福成 译

BBDP 3/01

北京科学技术出版社

(京) 新登字 207 号

图书在版编目 (CIP) 数据

最新自动控制技术: 数字预见控制/ (日) 土谷武士, 江上正著; 廖福成译. —北京: 北京科学技术出版社, 1994. 11

ISBN 7-5304-1601-4

I. 最… I. ①土…②江…③廖… II. 自动控制-数字控制-技术 IV. TP273

デジタル予見制御

土谷武士・江上 正 合著

産業図書株式会社

1992年12月10日初版

Takeshi Tsuchiya

© 1992

Tadashi Egami

本书根据与日本产业图书株式会社的出版协议出版

北京科学技术出版社出版

(北京西直门南大街16号)

邮政编码 100035

各地新华书店经销

河北三河市腾飞胶印厂

850×1168毫米 32开本 6.5印张 170千字

1994年11月第一版 1994年11月第一次印刷

印数1—2000册

定价: 7.30元

内 容 简 介

提高自动控制技术的控制精度和控制效果，使自动控制高精度化，这是当今控制工程中的一个重要问题。本书所论述的数字预见控制技术，利用机床、机械手、汽车等自动控制中的未来目标值未来干扰等未来信息，通过组成数字最优预见控制系统，明显地提高了控制精度和控制效果。书中分别阐述了这一控制方法的理论、计算，以及在线性直流无刷电机、电力转换器、机械手、机床、汽车悬架装置等自动控制中的应用。本书也是目前这一领域的第一本著作。

本书可供机电领域和控制工程方面的广大工程技术人员阅读，也可作为大专院校自动控制专业师生的参考书。

译 者 的 话

本书系统地总结了包括作者在内的许多学者在数字预见控制方面的研究成果，论述严谨，并有若干应用的例子，是一本研究预见控制的较好的入门书。据译者所知，这也是迄今为止关于预见控制的第一本专著。因此，译者产生了把本书介绍给国内读者的想法。

本书的翻译是在神奈川大学工学部江上研究室进行的。江上正先生提供了各种必要的条件，土谷武士先生也曾约见译者过问此书的翻译。江上正先生与同室大学院生佐佐木秀明、木间政保多次与译者讨论书中的一些细节。这些都是保证准确表达作者原意的前提。对原书中若干印刷错误及个别推导错误，都在与江上正先生讨论后作了改正。如仍有误译之处，欢迎读者批评指正。

在本书出版之际，译者谨向土谷武士先生、江上正先生及佐佐木秀明、木间政保表示感谢。

廖福成

1993. 9. 1

于神奈川大学江上研究室

序 言

——为中文版而作

伺服系统通常不利用未来信息。但在机器人、机床等机电领域中，可以利用未来目标值等未来信息的情况是很多的。在这种时候，如何利用未来信息，利用它们会有什么效果？给出这方面的一些处理线索，使读者对利用这些信息的所谓预见控制感兴趣，这就是写作本书的动机。据我们所知，本书是这一领域的第一本著作。把这本书不仅介绍给日本读者而且也介绍给中国读者，这对我们来说是非常高兴的事。希望本书对中国的控制工程及机电领域的发展有所贡献。

本书中文版之所以能够出版，是因为作为译者的北京科技大学廖福成先生对本书内容极感兴趣，并为介绍给中国读者做了许多工作。另外，产业图书株式会社米田忠史先生也给予了帮助。在此一并致谢。

土谷武士

江上 正

前 言

在日常生活中，我们常根据未来情况决定目前怎么做。例如，今天好像要下雨所以带着伞出门，道路好像很拥挤所以早点出发等就是这样的例子。在这种时候，我们实际上对未来情况不很清楚，所说的“好像……”只是根据经验或周围情况对未来做出的推测。天气预报以及对赛马结果、股票、汇率的推测在可信性方面也存在一些问题，道理是一样的。与此性质不同的是驾驶汽车的情况，驾驶员看着前边的道路驾驶汽车，他对未来情况是完全知道的。就是说，他是在能看见前边道路是否为弯道，是否有凹凸不平之处的情况下驾驶汽车，因此他清楚地知道即将到达的前方的道路情况。在机器人、机床等的路径跟踪控制中情况也是这样。

所以，根据未来状况决定当前行动有两种情况。本书把后一种即对未来完全知道的情形叫“预见”，并讨论这种场合恰当地利用未来信息的“预见控制”。前边提到的驾驶汽车的例子中，驾驶员边观察前方道路状况边驾驶汽车，从控制论角度讲，前边道路的弯曲情况等信息相当于控制系统目标值的未来值，而前边路面的凹凸信息对姿态控制来说相当于干扰。所以通常驾驶汽车不仅根据当前目标值，而且还根据未来目标值及未来干扰来决定当前的控制方案，这样的控制可称之为预见控制。这个例子通过日常生活中驾驶汽车时利用未来信息进行预见控制这一实例，充分说明了预见控制的有效性。当然，在不能利用未来目标值及未来干扰等信息时，仅用当前信息进行反馈控制也能实现对目标值的跟踪，并克服干扰的影响。但若利用未来信息，则可能使控制性能大大改善。

在控制论领域，正面引入人类所具有的不明确判断机能及学习机能的模糊控制、神经网络等，已经以家电产品为中心得到了广泛应用。可以说，预见控制是把人类通常所具有的预见未来情况决定当前行动的功能引入到控制领域的结果。在控制论领域引入这种预见的思考方法可能并不新鲜，但在实用的数字控制领域中，在如何最恰当地利用未来信息，以及利用了未来信息后究竟有多大价值方面最近取得了许多理论上的进展，引人注目。

本书专门讨论这种预见控制。迄今为止，在总结预见控制研究成果方面还没有见到专著。本书以基于最优控制理论的数字最优预见伺服系统的结构及它的性质为中心，同时叙述了从这个想法发展下去的其它预见控制，也介绍了最优预见控制在机电领域中的应用。如果通过本书能使读者对利用预见的有效性有一些理解，使读者在能够利用未来信息的时候考虑使用这种方法，我们就觉得很荣幸了。另外，书中可能有因著者想法的错误而导致的错误，希望专家及同行们批评指正。

本书假定读者对控制理论已有初步的了解。但初学者若与其它控制论书籍一并学习也是可以学懂的。

新潟大学工学部爱田一雄先生平时与著者进行过各种讨论，特别是对第五章内容给予了全面指导，在此，我们表示深深的谢意。本书的第四、六、七章包括了从北海道大学工学部松下昭彦先生开始，直到北海道大学工学部及神奈川大学工学部的著者的研究室的历届研究生的研究成果，也在此表示感谢。产业图书株式会社的米田忠史先生对本书的出版给予了许多帮助。若没有他的帮助，可能本书还没有面世，在此也表示由衷的感谢。

土谷武士

江上正

1992年10月

目 录

第一章 什么是预见控制	(1)
§ 1-1 预见的意义	(1)
§ 1-2 迄今为止的研究	(3)
§ 1-3 预见控制的应用	(5)
1-3-1 汽车的驾驶	(5)
1-3-2 车体主动悬架装置	(6)
1-3-3 组合物体的振动控制	(7)
1-3-4 机床、机器人等的路径控制	(8)
1-3-5 轧机的控制	(8)
1-3-6 电力转换器	(9)
§ 1-4 预见控制的性质	(9)
1-4-1 控制系统结构图	(10)
1-4-2 频率特性	(10)
1-4-3 未来信息的有效性	(11)
1-4-4 极限性能	(12)
§ 1-5 本书的结构	(13)
第二章 利用误差系统的数字最优伺服系统	(15)
§ 2-1 数字最优调节问题	(16)
§ 2-2 数字最优 I 型伺服系统	(19)
2-2-1 误差系统的推导	(20)
2-2-2 最优 I 型伺服系统 (全状态反馈控制系统)	(24)
2-2-3 输入滞后时间的补偿	(25)
§ 2-3 一般型数字最优伺服系统	(28)
§ 2-4 数字最优伺服系统的扩充	(32)

第三章 数字最优预见伺服系统	(34)
§ 3-1 最优预见伺服系统	(35)
3-1-1 依据偏微分最优化法的解法	(38)
3-1-2 依据扩大误差系统的解法	(44)
3-1-3 依据逐次最优化法的解法	(48)
§ 3-2 最优预见伺服系统的基本性质	(56)
3-2-1 控制系统的结构	(56)
3-2-2 过渡响应	(57)
3-2-3 频率特性	(59)
3-2-4 评价函数值的讨论	(60)
§ 3-3 数字最优预见前馈补偿系统	(62)
§ 3-4 依据目标值成形的最优预见伺服系统	(64)
§ 3-5 一般型数字最优预见伺服系统	(68)
第四章 最优预见伺服系统的渐近特性	(70)
§ 4-1 最优伺服系统与最优预见伺服系统的特性	(70)
4-1-1 没有输入时间滞后后的情形	(70)
4-1-2 考虑输入时间滞后后的情形	(72)
§ 4-2 最优伺服系统与最优预见伺服系统的渐近特性 I —— 不考虑输入时间滞后后的场合	(74)
4-2-1 研究渐近特性的准备	(74)
4-2-2 最优伺服系统与最优预见伺服系统的渐近特性	(80)
§ 4-3 最优伺服系统与最优预见伺服系统的渐近特性 II —— 考虑输入时间滞后后的场合	(84)
第五章 一般化预测控制 (GPC) 与最优预见伺服系统的关系	(93)
§ 5-1 利用 CARIMA 模型的最优预见伺服系统的	

设计	(95)
5-1-1 问题的提出	(95)
5-1-2 最优预见伺服系统的结构	(97)
5-1-3 最优预见伺服系统的动态鲁棒性	(100)
5-1-4 评价函数(5-5) 式的意义	(102)
§ 5-2 利用最优化原理的一般化预测控制(GPC) 的 设计	(103)
5-2-1 $M = NU$ 时	(104)
5-2-2 $M \neq NU$ 时	(104)
§ 5-3 最优预见伺服系统的特点 (与一般化预测 控制 (GPC) 系统比较)	(107)
§ 5-4 最优预见伺服系统的数值仿真	(108)
第六章 预见控制系统的扩展	(112)
§ 6-1 基于偏差系统的最优预见伺服系统	(112)
6-1-1 依据偏微分最优化法的解法	(115)
6-1-2 依据扩大偏差系统法的解法	(119)
§ 6-2 基于传递函数的预见伺服系统	(122)
6-2-1 补偿器 $F_1(z^{-1})$ 的设计	(123)
6-2-2 含预见作用的补偿器 $F_2(z)$ 的设计	(124)
§ 6-3 依据面积误差评价的预见伺服系统	(127)
§ 6-4 解耦预见伺服系统	(133)
6-4-1 没有预见时的最优伺服系统与解耦伺服系统的关系 ..	(133)
6-4-2 最优预见伺服系统与解耦预见伺服系统的关系	(140)
6-4-3 解耦预见伺服系统的特性与最优预见伺服系统的 渐近特性	(142)
6-4-4 最优预见伺服系统的设计方法	(146)
§ 6-5 频率依存最优预见伺服系统	(146)
6-5-1 频率依存最优伺服系统	(147)

6-5-2	频率依存最优预见伺服系统	(151)
§ 6-6	对非线性系统的数字预见控制	(157)
6-6-1	数字加速度控制	(157)
6-6-2	数字非线性预见控制	(159)
第七章	预见控制应用举例	(161)
§ 7-1	对线性直流无刷电机位置控制的应用	(161)
7-1-1	线性直流无刷电机系统	(161)
7-1-2	线性直流无刷电机的最优预见控制	(163)
7-1-3	线性直流无刷电机的预见、抑制干扰控制	(169)
7-1-4	利用线性直流无刷电机的线性 X-Y 工作台的路径 控制	(172)
§ 7-2	对 PWM 电力转换器的应用	(175)
§ 7-3	对机器人机械手 (面积误差评价预见控制) 的 应用	(180)
§ 7-4	对机床路径控制的应用	(183)
§ 7-5	对车体主动悬架装置的应用	(184)
参考文献	(189)
后记	(195)

第一章 什么是预见控制

§ 1-1 预见的意义

所谓控制即是“为使对象满足一定要求而对其施加一定的操作”。为了达到这个目的，通常是用反馈控制或顺序控制等方法使对象尽可能按希望的那样动作。这方面已经有了种种控制理论，例如大家所熟知的 PID 控制、最优调节系统、顺序控制等都是实用的方法。

另一方面，根据这样的控制方法，要提高控制系统的性能，例如其尽快达到目标，就需要对对象加上大而强烈的作用力，结果呢，要求对象能快速地动作。这不仅要求有很大能量，而且需要准备有很高性能的驱动装置（调节器）。考试前夜通宵学习、临阵磨枪是一个很好的例子。在那种情况下，如果事先定好目标提前若干天开始不间断的努力，则不需到时拼命也能达到目的。当然，对人类这样掌握了多种能力的控制对象来说，前面这种简单的讨论可能并不恰当，但作为一种思考方法是可以理解的。

上面说到的拼命学习一夜的考生若有很大的瞬间发挥能力，则有可能达到目标。若考生能力并不特别强，则即使通宵拼命也可能达不到目标。

汽车的驾驶是同一原理。若汽车的引擎能量和刹车性能都是无限大，则即使在 U 形弯道前也不需减速。然而显然除了程度的差别外，各种汽车的上述性能都有一个界限，所以在驶上弯道前总要适当减速以保证曲线运动的顺利。

我们在日常生活中，常有想知道未来情况或先估计再行动的情形。

* 难道不能预测赛马获胜者吗？

- * 明天下雨吗？气温会是多少？
- * 台风的移动路线是什么？会造成什么影响？
- * 地震、火山爆发能预先知道吗？
- * 股票价格是上升还是下降？
- * 日元的汇率会如何变化？
- * 未来社会会怎样？
- * 自己还能活多少年？

实际上我们非常想知道这些。为什么呢？因为如果我们能知道它们，我们就能事先处理，从而使受害程度降到最小，也可能对达到某些目的有用。

平常我们出差或旅行，总是先根据飞机或火车时刻表，在脑子里定好自己的时间计划，并先了解对方的风土人情，再开始行动。这是因为或者要制定适合自己体力的日程表，或者必须按时参加会议，或者必须带足必要的费用。这些全都说明了“先调查后行动”的必要性。

再举一例。驾驶汽车时，我们必须看着前方行驶。夜间行车则必须开灯。如果夜间不看前方驾驶汽车，那就只有等汽车跑出了马路，或落到了凹凸不平处再采取措施补救。其结果只能是汽车速度明显降低或不得不停止前进。这大概是表明“先看未来再行动”的重要性的一个好例子。

若完全知道了将来的情况，人生恐怕就没意义了。但我们若对某个对象有一个目标，又期待着通过尽可能少的努力就能达到这一目标，做这种努力就是当然的事了。

据上所述，可以说先看未来再行动有以下价值：

①对对象可以提前施行操作，所以可以通过平均的操作来达到目的，瞬间的能量需求较少。

②因为参考未来信息，所以可以从长远眼光来判断目前行动的对错，可以做出不合理成分尽可能少的决定。

③可以做出时间延迟尽可能少的判断及行动。

在利用未来信息方面，人们常运用下面这些说法。这表明了未来信息对于人们采取合适行动的必要性。

- * 要有长远眼光
- * 前馈的构想
- * 先取得信息
- * 抓住并控制机遇

综上所述，利用未来信息对我们非常有益。我们把了解这样的未来情况称为预见未来或预测未来。这里，预见 (preview) 与预测 (prediction) 的不同之处可以这样考虑：所谓预见，就像我们以上所讲的那样，是指对目标值及干扰信号的未来情况完全知道。预测则是指不完全清楚目标值及干扰信号或控制系统输出的未来值时，采取一定的方法来推测它们。由于根据预测来决定控制的实施，而预测值未必很准确，所以控制结果不见得理想。前述驾驶汽车前方路面的情况就可以预见；而天气预报，股市，赛马，汇率等的推测都是根据过去经验或周围情况来做判断，在准确性方面有不足之处，即为预测。本书叙述在对未来情况完全知道的情况下，如何利用那些情况实施控制。此外，我们还对预测控制 (predictive control) 中模型预测控制 (model predictive control) 与预见控制 (preview control) 间的关系感兴趣，这些将在第五章中论述。

§ 1-2 迄今为止的研究

人类在驾驶汽车时，预见动作或在有些场合预测机能在起着作用。汽车的操向模型等早就考虑引进了预见作用^(1~3)。在控制系统设计中引入预见、预测机能并进行理论考察的有市川⁽⁴⁾的研究。

预见控制最初的想法，就是不仅注意过去及现在的目标值，而且注意未来的目标值，使目标值与受控量间的偏差整体地最小。所以就自然地把其归入了使横贯全控制期间的某一评价函数取最小

值的最优控制理论 (optimal control theory) 的框架之中。事实上可以认为预见控制理论是最优跟踪控制问题的新的出发点。这种想法如图 1-1 所示。控制的目的是使图中斜线部分面积最小。因

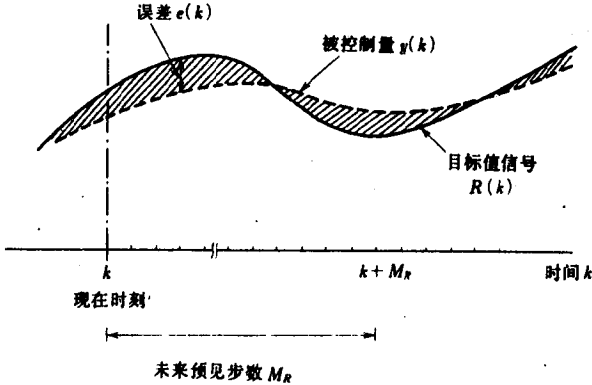


图 1-1 预见控制的概念

为控制对象一般都包含动态项，所以当前时刻施加上的控制输入并不能立即在被控制量（输出）上表现出来，而是有一些延迟。所以，了解未来如何要求，即目标值信号及干扰信号如何变化，对确定现在的控制输入自然就是极为重要的信息了。这是预见控制最根本的出发点。

早势、市川^[6]从这个观点出发研究了最优跟踪控制问题的预见控制。他们研究了最优跟踪控制系统的性质，弄清了利用目标值的未来值可以大幅度改善跟踪性能，以及并不需要知道目标值的直到无限的未来值而只须知道到适当的一个未来时刻为止的有限个未来值就足够了。随后，文献〔6~8〕及〔9~19〕分别研究了与此相关的连续时间系统及离散时间系统的问题。

其后，通过对未来信息的利用和与（最优）伺服系统构造法的结合，使得对干扰及参数变化的处理成为可能，而且可以在通

常伺服系统结构的范畴内研究预见控制。到此，预见控制成了真正实用的控制方法。

§ 1-3 预见控制的应用

本书既要讨论与预见控制有关的理论，又要叙述预见控制的应用。在这里首先讨论一下预见控制可能用在什么地方。

1-3-1 汽车的驾驶

驾驶汽车是反馈控制的一个例子。人们常用图 1-2 来说明汽车的驾驶情况。该图表示的是要求汽车达到某个希望的速度的控制方法。要求汽车行驶时不脱离道路所允许的范围的控制不用这个图表示，而用图 1-3 更合适些，即通过控制操纵杆使汽车不超出道路允许的范围。在这种情况下机械地进行汽车是否在道路允许范围的判断比较困难，所以由人操纵操纵杆。现在的问题不是以人为主体进行控制还是以机械为主体进行控制。如果该图中没有用粗线表示的部分，根据最基本的控制即反馈控制的观点，这时驾驶员是在只知道当前路面的情况下进行操作。从日常生活经验可知，若这样做则几乎不能进行真正的驾驶。即粗线表示的道路未来信息是应该利用的相当重要的信息。

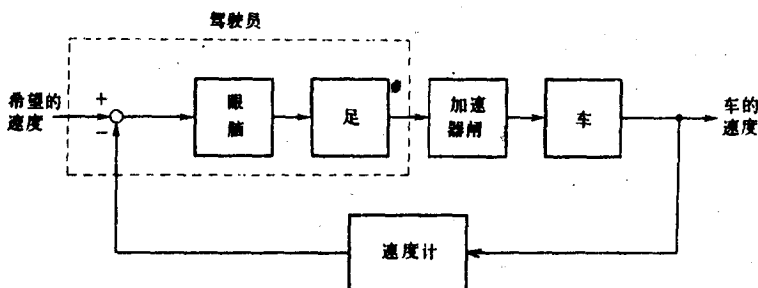


图 1-2 汽车的速度控制