

TIANWEN WANGYUANJING
GAOJINGDU KONGZHI JISHU

天文望远镜

高精度控制技术

董志明 著

TH751
03



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

014008966

TH751
03

国家自然科学基金(10903033)资助

TIANWEN WANGYUANJING
GAOJINGDU KONGZHI JISHU

天文望远镜

高精度控制技术

董志明 著



北航

C1696068

西南交通大学出版社

·成都·

TH751
03

332800310

国家自然科学基金委员会

内容摘要

天文望远镜的孔径向极大化发展,这对驱动控制的精度要求日益提高。本书较全面地介绍了大型天文光学望远镜的驱动系统特点,分析了其面临的各种干扰,应用H无穷控制和滑模变结构控制来抑制干扰提高跟踪精度,进行了MATLAB仿真和实验验证。

图书在版编目(CIP)数据

天文望远镜高精度控制技术 / 董志明著. — 成都:
西南交通大学出版社, 2013.8
ISBN 978-7-5643-2583-1

I. 天… II. ①董… III. ①天文望远镜-精度控制
IV. ①TH751

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第196620号

天文望远镜高精度控制技术

董志明 著

*

责任编辑 张宝华

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行
(四川省成都市金牛区交大路146号 邮政编码: 610031)
发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 148 mm × 210 mm 印张: 3.75

字数: 105千字

2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5643-2583-1

定价: 12.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

大型光学望远镜的跟踪性能直接影响最终成像的质量。对于单个望远镜，增强集光能力直接要求增大口径。望远镜的口径从现有的8m、10m级向未来的30m、50m，甚至100m的极大型发展，口径增大使得望远镜的体积和重量急剧增加。体积的增大将导致更严重的风载，重量的增加将导致更大的转动惯量。超大惯量对于摩擦驱动来说，将易于导致摩擦传动面的滑移现象，而且，超大惯量需要使用更大功率的电机，从而引起更大的电机波动力矩。另外，一般而言，望远镜的跟踪是超低速的变速运动，在系统低速运行时，非线性摩擦转矩将主导系统的动态过程，容易引起系统跟踪时的速度抖动和爬行现象。口径的不断增大将给望远镜带来更强的非线性干扰，从而对机架驱动伺服系统的设计和调试提出了严峻的挑战。

PID控制是目前国内外在望远镜驱动控制中广泛采用的一种控制策略，如Keck、VLT和我国在研的LAMOST望远镜均采用了该控制策略。PID控制采用反复试验的方法来确定控制参数，在望远镜的驱动系统调试阶段需要数以月计的参数整定时间。调试好的系统在驱动负载和外界环境发生改变时往往需要重新调试，将影响望远镜的利用率。可以预见，倘若在未来极大望远镜的驱动系统中仍然采用PID策略，将需要更长的调试和维护时间。更重要的是PID控制策略不能提供最优控制的方法和手段，难以进一步提高望远镜驱动控制的性能，因而难以满足未来的极大望远镜对跟踪精度的要求。

极大望远镜驱动控制系统的特点在于：超大惯量、超低跟踪转速、超高跟踪精度要求和存在大量的非线性干扰。性能指标要求是：对外界干扰的鲁棒性好，实时跟踪时的平稳性好，跟踪精度尽可能

达到最优。控制理论的真正价值体现在它的实际应用上，每种控制理论均有一定的适用范围。因此，必须充分分析被控对象的特点和性能指标要求，以作出合理地选择。

感谢周旺平博士和杨世海博士为本书的研究做出的贡献。本书的出版得到了国家自然科学基金（10903033）资助。

书中难免有不妥之处，敬请批评指正。

作者

2013年2月

目 录

第 1 章 引 言	1
1.1 当代大型天文望远镜	1
1.2 大型望远镜的驱动控制系统	5
1.3 当代大型望远镜驱动系统的主要控制策略	10
第 2 章 光电导星	14
2.1 导星的基本概念	14
2.2 两种典型的光电导星技术	16
第 3 章 驱动控制系统中的主要干扰分析	25
3.1 风载	25
3.2 摩擦传动与摩擦转矩	31
3.3 其他非线性干扰	38
第 4 章 驱动系统的数学模型	40
4.1 LAMOST 驱动控制系统介绍	41
4.2 驱动控制系统的数学模型	44
4.3 驱动控制系统的仿真实现	49
第 5 章 驱动系统的 H 无穷控制	55
5.1 H 无穷鲁棒稳定性理论	56
5.2 H_∞ 范数与 H_∞ 空间	58
5.3 摩擦驱动仿真实验系统数学模型及其不确定性分析	59
5.4 摩擦驱动实验转台鲁棒速度控制器设计	62

5.5	摩擦驱动实验转台鲁棒速度控制器加权函数的选择	64
5.6	H_{∞} 控制器的求解	65
5.7	仿真结果与分析	68
5.8	实验研究	71
第 6 章	驱动系统的滑模变结构控制	83
6.1	传统滑模变结构控制设计	83
6.2	滑模精确微分器设计	88
6.3	驱动系统的高阶滑模控制	93
6.4	总结与讨论	105
参考文献		107

第1章

引言

天文学的研究对象一般都是距离地球十分遥远的星体，而它们发出的光经历漫长的旅途抵达地球时，已经变得十分微弱，为了捕捉这些微弱的光线，必须提高望远镜的集光能力和分辨率。因此，更大口径的光学望远镜成为了天文学家们永恒的追求。

由于遥远太空的星体发出的光到达地球时十分微弱，即使是大大口径的望远镜的光电探测器也需要数小时的曝光时间，以得到有价值的光谱。为克服地球的自转，天文望远镜需要在几个小时的观测时间中跟踪天体，因而提高望远镜驱动系统的跟踪控制精度实现平稳运行至关重要。

1.1 当代大型天文望远镜

自17世纪初荷兰人利伯希（Hans Lippershey）发明望远镜以来的400年间，人们不断制造出更大口径的望远镜用于天文观测。美国天文学家 George Hale 于1948年在加利福尼亚州圣地亚哥的巴洛马山上，建成了当时最大的望远镜，直径达5.08m，灵敏度比原先的望远镜提高了数倍；前苏联在高加索山区建造了一座直径为6m的巨型望远镜。但是由于仪器记录能力的不足，巨型望远镜的建设经历了多年的低谷。随着光电探测器的发明，使记录能力大大增强，

目前大约可记录望远镜接受的光线总量的 70%。于是天文学家又重新寻求建造更大型的望远镜以提高天文观测能力。

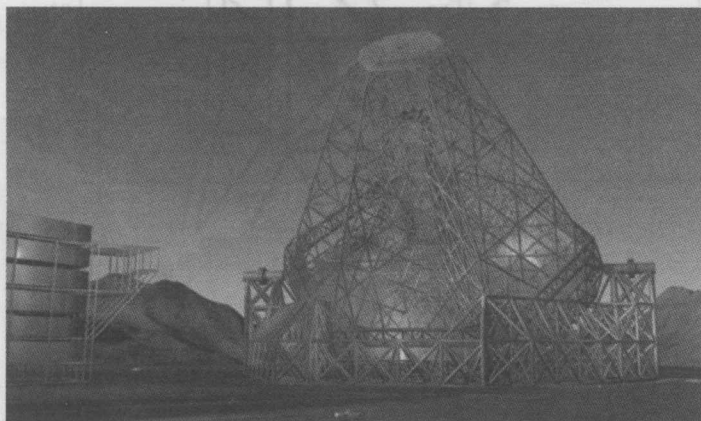
20 世纪 90 年代,掀起了新一轮大型望远镜制造热,如口径 8.2m 的昴星团望远镜、口径 10m 的凯克 I 和凯克 II 望远镜、口径相当于 11m 的分光巡天望远镜等。现在,一批更大口径的望远镜正在筹建中,如 NRAO 的口径达 43m 的望远镜[Ford et al., 2006]、口径 50m 的 LMT 望远镜[Perez-Grovas et al., 2006]、口径 100m 的 OWL[Gilmozzi, 2004]和 Effelsberg [Emde et al., 2004]望远镜(见图 1.1)。这些新的望远镜不仅可以提供像质远胜于哈勃望远镜照出的太空图片,而且能收集到更多的光电信号,对 100 亿年前星系形成时初态恒星和宇宙气体的情况有更多的了解,并能看清楚遥远恒星周围的行星。



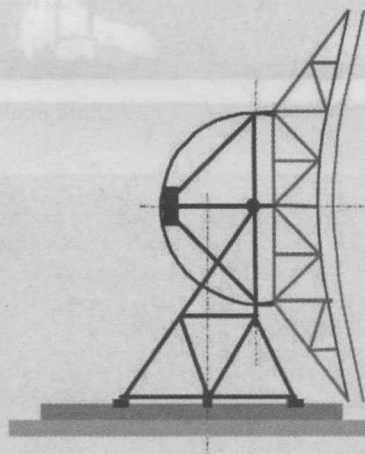
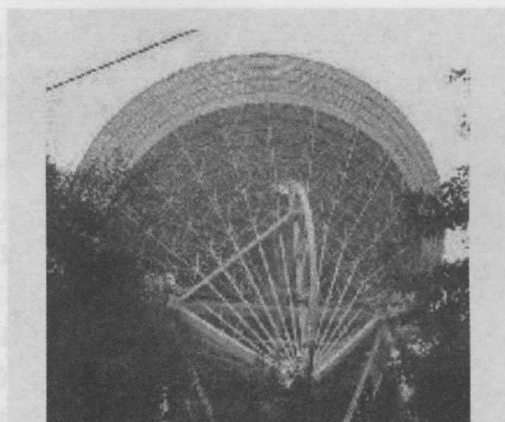
(a) 50m 口径的 LMT 望远镜[Perez-Grovas et al., 2006]



(b) NRAO 的 43m 口径望远镜[Ford et al., 2006]



(c) 100m 口径的 OWL 望远镜[Gilmozzi, 2004]



(d) 100m 口径的 Effelsberg 望远镜 [Emde et al., 2004]

图 1.1 超大型的天文望远镜

图 1.2 给出了当代大型望远镜的灵敏度性能发展趋势曲线。其中, 根据灵敏度要求折算出的理想望远镜等效口径为 $\sqrt{\eta D^2}$, η 和 D 分别表示望远镜的总效率和镜面口径 [Gilmozzi, 2004]。从图中可以看到, 当代大型望远镜的口径随年代迅速增大, 同时对望远镜的灵敏度要求也不断攀升, 理想的口径由望远镜的灵敏度和实际口径

决定。在过去的 50 年，主要是依靠提高光电探测器记录所观测数据的效率来增加望远镜的灵敏度，而现在的光电探测器效率基本接近 100%，在镜面加工能力一定的情况下，只有提高控制精度才有可能进一步增加灵敏度。当灵敏度固定在一定水平后，增加实际口径是提高望远镜观测性能的唯一方法。口径增大使得望远镜的体积和重量增加迅速，将导致更大的转动惯量、更大的负载转矩、更多的风载，需要使用更大功率的电机，从而引起更大的电机波动力矩等一系列线性或非线性的干扰，对望远镜驱动控制系统提出了严峻的挑战。

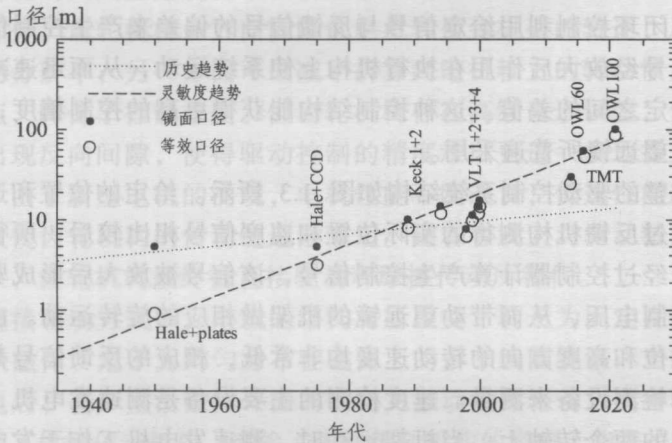


图 1.2 当代大型望远镜的灵敏度趋势

1.2 大型望远镜的驱动控制系统

对于地平式的大型天文望远镜来说，驱动控制系统的主要功能是使所承载的镜面产生方位和高度方向的转动来跟踪要观测的天体。由于距离非常遥远，所观测的天体相对于地球的运行速度极低，通常在角秒/秒级的范围内变化。在这种低速情形下，望远镜的任何

一个微小的速度跳动都会给观测效果带来很大的影响。因此，驱动控制水平是决定望远镜观测性能优劣的重要指标之一。

1.2.1 驱动控制系统构成

不论是折射式还是反射式大型光学望远镜，均需要主镜的移动来对准所观测的天体。主镜通常安装在机架上，机架分方位和高度两轴驱动。因此通常意义上的望远镜驱动指的是对机架的方位和高度两个方向的驱动。其中，驱动的动力由电机提供。就驱动控制本身而言，根据系统中有无反馈可分为开环控制和闭环控制两类控制结构。闭环控制利用给定信号与反馈信号的偏差来产生控制信号，控制信号经放大后作用在执行机构上使系统运动，从而迅速减小输出与给定之间的差值。这种控制结构能获得更高的控制精度，为当代大型望远镜所普遍采用。

完整的驱动控制系统结构如图 1.3 所示。给定的位置和速度信号与经过反馈机构测得的实际位置和速度信号相比较后，所得的偏差信号经过控制器计算产生控制信号，该信号被放大后形成驱动电机的控制电压，从而带动望远镜的机架做相应的旋转运动。由于机架的方位和高度方向的转动速度均非常低，相应的反馈信号都需要专门的检测设备来测量。速度检测的主要设备是测速发电机，安装于机架的两个转轴上，当机架运动时，测速发电机工作于发电状态将所受的机械能转化为电压信号，该信号除以测速发电机的固有输出斜率即为速度反馈值。当代大型望远镜驱动控制系统的位置检测

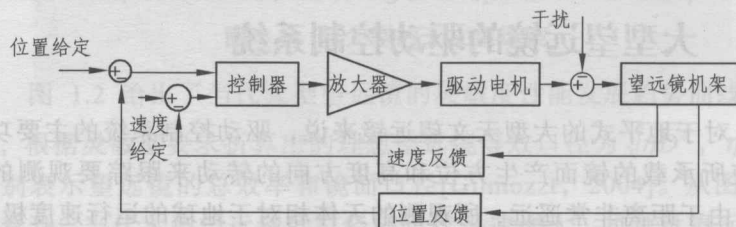


图 1.3 驱动控制系统结构图

大多采用码盘，利用读取码盘上的刻线来计算转动的角位置。通常将其直接安装在两个转轴上以减少因传动链引入的测量误差。为了提高码盘的刻线精度，需要更大的码盘直径，从而产生了带式码盘。这种码盘备有电子细分器，极大地提高了分辨率。8 m 口径的 Gemini 望远镜以及正在研制的 LAMOST 望远镜均采用了带式码盘[徐欣折等，2003]。

1.2.2 大型望远镜的驱动方式

传统的天文望远镜机架驱动通常采用齿轮机构来连接电机与被驱动部分。齿轮机构一方面能降低电机转换到机架的转速，从而提高驱动分辨率；另一方面可以减小折算到电机轴上的转动惯量和负载转矩，降低了控制难度。但齿轮机构存在高频齿形误差，传动时还会出现反向间隙，使得驱动控制的精度难以更进一步地提升。近年来，由于新型电机的涌现，电机性能不断改良，低速性能越来越好，致使齿轮机构的传动链逐渐缩短。随着客观上对驱动精度的更高要求，齿轮机构最终被直接驱动和摩擦传动所替代。

直接驱动方式下，电机的结构有所改变，转子为固定在转轴上的环状磁体，定子为均匀分布在磁体上的多个线圈绕组。当线圈绕组通电后，会产生沿磁体环面的切向力推动磁体转动。这种驱动方式去掉了机械传动机构，消除了中间传动机构的影响，能获得较高的驱动精度，VLT 望远镜的高度和方位均采用了该方式[Erm and Gutierrez, 2000]。但直接驱动相当于将整个转动负载作为转子部分，没有减速过程，从而需要更大输出功率的电机，加大了制造成本。相比之下，摩擦传动同样摒弃了齿轮减速机构，而且摩擦传动能获得几十倍的减速比，可以使用较小功率的电机，降低了制造成本，因而更有优势。Gemini 以及 LAMOST 等望远镜均采用了该传动方式。

摩擦传动的原理如图 1.4 所示。从动的大摩擦轮固定在大望远镜机架的转轴上，驱动电机的转轴与主动轮相连，加力机构提供正压力将主动轮压紧在大摩擦轮上。当电机的端子接收到控制电压后产

生转矩传递到主动轮上,此时由于正压力的作用,将在主、从摩擦轮的接触处产生摩擦力,从而带动大摩擦轮转动。

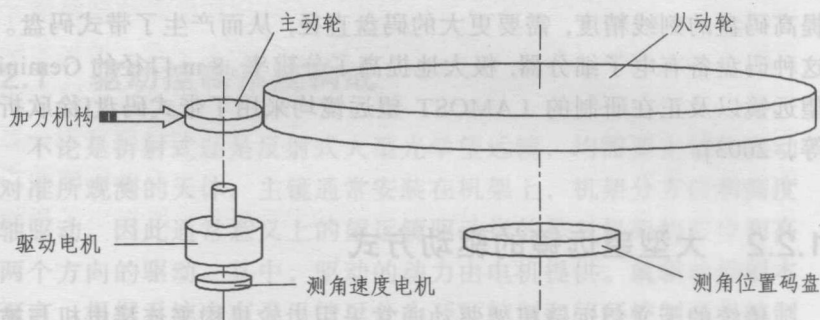


图 1.4 摩擦传动原理图

1.2.3 驱动控制系统中的主要非线性干扰

尽管任何干扰在本质上都是非线性的,但其中的某些部分仍然可以按线性来处理,如风的定常部分对望远镜驱动系统的干扰。这种线性的干扰对系统的动态性能影响较小,一般依靠控制策略本身的鲁棒性就能够将其有效抑制。非线性干扰主要表现为不连续性或随机变化的特点,容易造成驱动系统平稳运行中的速度抖动和爬行现象,从而降低望远镜的观测性能。尤其当系统低速运行时,由于控制信号比较小,非线性干扰的作用变得更加明显。因此,有必要研究驱动系统中存在的非线性干扰,并通过相应的补偿措施来消除非线性干扰的影响以实现高精度的控制目标。

在运动控制系统中,因摩擦传动而引起的摩擦转矩干扰常导致系统性能的衰退,尤其在系统低速运行时,摩擦转矩将主导系统的动态过程[Ciliz and Tomizuka, 2007]。这种对运动系统低速性能的强干扰性与摩擦转矩的非线性特性是分不开的。摩擦学的研究[Altpeter, 1999]指出,摩擦转矩在系统低速时表现为复杂的动态过程:初始阶段为一极值,接着在很短的时间范围内随速度成反比变化,当过了一个临界速度后,摩擦转矩开始随速度的提升而加大。

摩擦转矩的另一个非线性特性表现为它的不连续性，对系统的作用总是与速度方向相反。当速度穿越零点时，摩擦转矩会突然反向，这种极值的跳变势必产生速度抖动或爬行现象。因此，摩擦转矩的这些非线性特性使之成为低速运动控制系统的最主要干扰。为了实现望远镜机架的高精度控制，必须深入研究摩擦传动导致的非线性干扰的本质，并寻找适当的控制策略来抵消这种干扰对驱动控制的影响。

当代大型望远镜存在口径愈来愈大的趋势，所受的风载干扰也随之增大。而风的脉动部分是随时间随机变化的非线性量 [Davenport, 1995]，容易使暴露在风中的镜面结构产生振动，从而影响望远镜的观测性能。类似于脉动风的其他非线性干扰还有驱动电机的力矩波动、模型参数摄动以及测量元件的精度引起的非线性干扰。这些非线性干扰在性质上比较雷同，其作用在望远镜的驱动控制系统中，产生随机的扰动力矩，造成机架转轴位置与速度的跳变，最终导致望远镜观测质量的下降。因此，同样有必要采取措施来克服这些干扰。

1.2.4 驱动控制系统的特点与面临的难题

大型望远镜驱动系统的控制在功能上可分为定位控制和跟踪控制。定位控制是通过手动操作给定指令信号，使望远镜迅速指向要跟踪的天体。此时，系统运行的速度较快。当望远镜指向目标后，通常利用导星系统给定指令信号实现对观测目标的自动跟踪。正常的跟踪速度极低，如 2.5m 口径的 SDSS 望远镜跟踪速度范围为 $0 \sim 45 \text{arcsec/S}$ [Rivetta et al., 2000]。这种极低的运行速度使得相应的控制信号变得非常微弱，而系统中存在的干扰并不随转速降低而减小，甚至出现相反的情形，如摩擦转矩在速度接近零时达到极大值。因此，驱动系统的超低速运行特点使得干扰对系统动态过程的影响加剧。

由上一小节介绍可知，存在较多的非线性干扰是大型望远镜

驱动控制系统的又一显著特点。这些非线性干扰根据自身特点对驱动控制的影响也略有不同，如摩擦转矩为转速的分段连续函数，其对驱动控制的影响是容易在速度过零时产生抖动或爬行现象；而脉动风载、电机波动力矩等非线性干扰则表现为一种随机性，容易导致驱动系统平稳运行中出现随机的跳变。驱动控制系统的另一个显著特点是拥有巨大的转动惯量，该转动惯量与大型望远镜的口径成正比。大的口径需要更多的支撑机构，相应的重量也随之激增，如 Keck 望远镜的方位转动部分重达 270 t [Sirota and Thompson, 1994]，从而导致更大的转动惯量。大的转动惯量对驱动控制系统的影响在于减缓系统的加（或减）速过程。对于传统 PID 控制来说，在系统超低速运行时，当给定信号发生速率变化，控制器根据相应的偏差给出控制信号驱动转轴以消除偏差，由于大转动惯量阻碍了偏差的消除过程，使得给定信号与实际输出的偏差进一步加大，从而控制器将给出更大的控制信号来减小偏差，当偏差为 0 后，系统在大转动惯量的作用下继续保持原来的速度运行，又开始了新一轮的调速过程，这种反复加（减）速的动态过程势必引起爬行现象。通常在控制器中加大增益来改善因大转动惯量引起的爬行现象，但过大的增益容易引起系统动态发生振荡。因此，如何抑制大型望远镜超低速、大转动惯量的驱动系统中存在的非线性干扰，消除系统运行中的抖动和爬行现象，实现高精度的跟踪性能成为控制面临的难题。

1.3 当代大型望远镜驱动系统的主要控制策略

针对大型望远镜驱动系统中存在的干扰，目前国内外所采取的相应控制策略种类繁多，如 PID（Proportional-Integral-Derivative）算法以及极点配置、H 无穷控制、模糊与神经网络等当代先进控制策略。就其本质来说，控制策略对干扰的抑制主要表现在两个方面：一是利用控制器本身的鲁棒性，即对于一定范围内变化的干扰，控制器均能将其对输出的影响压制在很小的范围内以满足控制精度要