

文章编号: 1000-8349(2007)04-0364-11

# 天文光学望远镜轴系驱动方式发展概述

王国民

(中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

**摘要:** 该文首先介绍了已投入使用的 2.5 米口径以上的 25 架地平式光学望远镜和 11 架赤道式光学望远镜轴系驱动方式, 并概述了天文光学望远镜轴系驱动及其相关技术的发展过程; 然后对目前国际上在研的 6 架大型光学望远镜和预研的 10 架极大光学望远镜轴系所采用的驱动形式进行了归类; 最后分析了未来极大光学望远镜轴系驱动的发展趋势和与之相关的研究内容。

**关键词:** 望远镜驱动; 齿轮传动; 摩擦传动; 直接驱动

**中图分类号:** P111.2      **文献标识码:** A

## 1 引 言

天文光学望远镜是大型高精密仪器。综合应用当代的光学、精密机械和精密控制的最新技术和成果。它是天文学家用来观测天空星体、探索宇宙奥秘的重要设备。高性能的天文望远镜除了要有好的光学系统, 还要有稳定、高精度的传动系统, 使望远镜作补偿地球自转时对所观测天体进行精密跟踪, 把望远镜焦点上像斑能量保持在比较集中的状态。这样才能取得更多更好的有关被观测目标的信息。因此, 平滑、稳定和高精度的传动系统对天文望远镜显得非常重要, 也是高性能天文望远镜研制过程中十分关注的问题。可行性、可靠性、可维护性和性价比是传动系统研究中首先要考虑的几个问题。天文望远镜常用的传动方式主要有蜗轮蜗杆传动、齿轮传动、摩擦传动和电机直接驱动。每一种传动方式有其自身的优点、缺点和适用环境, 但这些优点和缺点也会随着新型材料、加工技术、控制技术和经济发展而发生变化。如很早就有的摩擦传动, 一般认为不能获得很高的传动精度, 但随着控制技术和高性能反馈元器件的发展, 在 Keck、Gemini 等大型天文望远镜上得到了很好的传动性能<sup>[1,2]</sup>。再如随着工业加工技术、电机技术和社会经济的发展, 8 米级天文望远镜采用了圆弧型直线电机直接驱动, 且获得了很高的传动性能(如 8.2 米 VLT<sup>[3,4]</sup> 和 Subaru<sup>[5]</sup>)。本文首先概括了国际上已投入使用的 2.5 米口径以上天文光学望远镜的轴系驱动方式, 分析了天文光学望远镜轴系驱动的发展过程。随后, 结合目前国际上在研的大型天文光学望远镜项目和预研的极大天文光学望远镜项目

收稿日期: 2007-01-15; 修回日期: 2007-03-16

基金项目: 国家重大科学工程项目 (0983)

所采用的轴系驱动方式, 分析了未来极大光学望远镜轴系驱动方式的发展趋势和与之相关的一些有待研究的内容, 为未来选择极大天文光学望远镜轴系驱动方式提供参考。

## 2 2.5 米口径以上光学望远镜轴系驱动方式介绍

### 2.1 赤道式光学望远镜轴系驱动方式介绍

表 1 列出了 2.5 米口径以上赤道式光学望远镜的轴系驱动方式。从 1918 年到 20 世纪 70 年代初, 赤道式光学望远镜赤径轴和赤纬轴的驱动以蜗轮蜗杆传动为主。从 20 世纪 70 年代初的 4 米 Victor Blanco 开始, 齿轮传动被应用到大型光学望远镜, 取代了原来的蜗轮蜗杆传动。在 20 世纪的整个 70 年代, 几架大的光学望远镜都采用了齿轮传动。

表 1 国际上赤道式光学望远镜轴系驱动

口径 /m	望远镜名称	研制年份	赤径轴驱动	赤纬轴驱动
5.0	Hale [6]	1949 年	蜗轮蜗杆	蜗轮蜗杆
4.0	Victor Blanco [7]	1974 年	齿轮传动	齿轮传动
3.9	AAT(Anglo-Australian Telescope) [8]	1975 年	齿轮传动	齿轮传动
3.8	Mayall [8]	1973 年	蜗轮蜗杆 (后改为齿轮)	蜗轮蜗杆 (后改为齿轮)
3.6	3.6(ESO) [9]	1977 年	齿轮传动	齿轮传动
3.6	CFHT [10]	1979 年	齿轮传动	齿轮传动
3.0	Shane [11]	1959 年	蜗轮蜗杆	蜗轮蜗杆
3.0	IRTF [12]	1979 年	齿轮传动	齿轮传动
2.7	Harlan Smith [13]	1968 年	蜗轮蜗杆	蜗轮蜗杆
2.54	Hooker [14]	1918 年	蜗轮蜗杆	蜗轮蜗杆
2.5	INT(Isaac Newton Telescope) [15]	1984 年	蜗轮蜗杆	滚珠丝杆

蜗轮蜗杆传动较大的一个优点是在相对较小的空间内就能获得较大的传动比, 这样传动系统的刚性较好。如用在赤道式望远镜上, 电机恒速驱动, 用开环控制就能获得较高的传动精度。这是当时赤道式望远镜采用蜗轮蜗杆传动的一个主要原因。但是蜗轮的尺寸难以做得很大, 且大尺寸蜗轮精度较难得到保证。另外, 由于天文望远镜的转动质量一般较大, 常常使蜗轮部分 (包括望远镜转轴系统) 的惯量和与其相啮合的蜗杆部分的惯量难以匹配 [16]。在望远镜转动被制动时, 蜗杆副的不可逆转的特性会产生很大的冲击力, 若采取在蜗杆轴上加质量 (飞轮) 的办法来匹配惯量消除冲击, 不仅需加许多质量, 而且会使望远镜伺服系统的机电时间常数增大, 加长了起、制动时间, 也降低了伺服控制的能力。对于控制精度要求越来越高的现代天文光学望远镜, 蜗轮蜗杆传动显得越来越不适应。

齿轮传动与蜗轮蜗杆传动类似, 都属于啮合传动。同样存在反向间隙、高频齿形误差、较高的齿面接触应力等问题。但在 20 世纪 70 年代初, 发展了一种双电机消隙驱动方式 [17]。双电机消隙驱动系统采用两套完全相同的控制电路, 其两套功放电路分别供给两台相同的直流

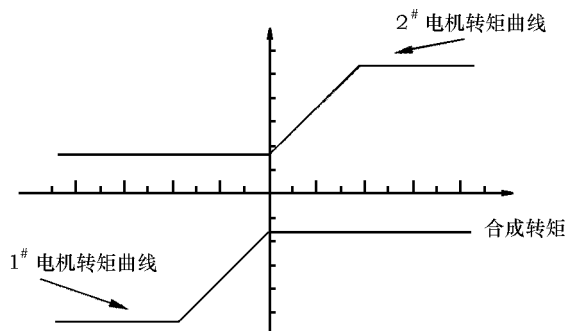


图1 双电机消隙力矩分配曲线图

电机。两台电机分别连接到两个相同的小齿轮上，小齿轮啮合到最后的大齿轮，通过控制两只电机的力矩的适当分配，利用不同形式的偏置方法可以得到两只电机的不同力矩的分配曲线，从而保证大齿轮在换向时不会在齿轮的齿隙中来回游动。两只电机的力矩分配关系如图1所示。

当望远镜控制系统单方向输出力矩时，传动系统的力矩传递方向不变，这时不存在间隙问题。只有在望远镜控制系统变换力矩传递方向时，间隙问题才凸现出来。实际消隙控制是在系统力矩输出为零的区域附近对两个电机施加一个足以克服间隙的力矩偏置，使得这一力矩范围内两个电机实施消隙驱动，而越过这个区域后，两个电机则协同出力<sup>[18]</sup>。这一方法使齿轮传动在天文望远镜上迅速得到应用，几乎是当时大型望远镜驱动设计的一种模式。相继有十多台3米以上的望远镜采用了这种方法<sup>[19]</sup>，如美国基特峰国立天文台381厘米反射望远镜(1973年)、英澳天文台3.9米AAT望远镜(1975年)、欧南台3.6米望远镜(1977年)、智利托洛洛山美国美洲际天文台381厘米AURA望远镜(1977年)、英纳凯亚天文台NASA 3米红外望远镜(1979年)、美国帕洛玛山天文台447厘米MMT地平式望远镜(1979年)以及澳大利亚3米新技术望远镜(1985年)。南京天文光学技术研究所为西班牙安达露西亚天体物理所(IAA)研制的1.5米、0.9米望远镜(1989年)<sup>[20]</sup>，以及国家天文台的2.16米望远镜(1989年)也采用了双电机消间隙驱动<sup>[21]</sup>。

## 2.2 地平式光学望远镜轴系驱动方式介绍

表2给出了2.5米口径以上所有地平式光学望远镜轴系驱动方式。6米BAT(Bolshoi Teleskop Azimutalnyi)望远镜是世界上第一架地平式大型天文望远镜<sup>[22]</sup>，前苏联于1976年建成，其方位轴和高度轴均采用了传统的蜗轮蜗杆传动。除此之外，表2中的其他望远镜选择了齿轮传动、摩擦传动和直接驱动。至此，蜗轮蜗杆传动已经退出了大型天文光学望远镜的驱动领域。齿轮传动中双电机驱动，两只直流电动机各用一套独立的直流电流供电，如果电机、放大器等环节特性不对称，会造成两只电机的电流可能相差很多。这样，不但达不到消间隙的目的，反而影响了传动的平稳性和传动精度。另外齿轮传动在轮齿上有很大的局部接触应力，存在齿形误差、齿轮加工误差、安装偏心等不确定误差源。且高精度的大尺寸齿轮难加工，加工成本高。另外，从20世纪80年代开始，地平式结构成为主流，取代了原来的赤道式结构。望远镜的跟踪不再是恒速且跟踪精度越来越高。这些因素综合在一起，再加上工业制造技术和控制技术的发展，天文光学望远镜轴系驱动方式又得到了很大的发展。在这一阶段，古老的摩擦传动被广泛用到了天文望远镜上作为轴系驱动方式。摩擦传动这种传动方式非常适合于天文望远镜的轴系驱动。尤其应用在大型天文望远镜上其优点更加明显，首先是天文望远镜工作时其转动速度很低，运行加速度也很小，而这正是摩擦传动最佳的工作状态；其次，大型望远镜的被驱动盘直径很大，一般在10m左右，这样不需要中间减速器就可以获得较大的传动比。天文望远镜上通常采用外圆滚动摩擦传动，由主动轮和从动轮组成传动副，

从动轮直接与望远镜被驱动轴同轴安装。主动轮由驱动电机驱动并在加压装置的作用下压紧从动轮, 通过主动轮和从动轮接触表面间的摩擦力来传递运动。与蜗轮蜗杆传动、齿轮传动相比, 摩擦传动主要的优点是没有反向空回、没有齿形高频误差、大尺寸高精度的加工易于实现(与同级别的蜗轮、齿轮相比)和性价比高。在上面 25 架 2.5 米口径以上的地平式望远镜方位轴和高度轴驱动中(共计  $25 \times 2 = 50$  个), 采用摩擦传动方式的最多, 有 19 个, 占 38%。在此后的一段时间里, 摩擦传动占据主流。

表 2 国际上地平式光学望远镜轴系驱动

口径 /m	望远镜名称	研制年份	方位轴驱动	高度轴驱动
10.0	Keck I [1]	1992 年	摩擦传动	摩擦传动
10.0	Keck II [1]	1996 年	摩擦传动	摩擦传动
2×8.4	LBT [23]	2004 年	齿轮传动	齿轮传动
8.2	Subaru [5]	1999 年	直接驱动	直接驱动
8.2	Antu [3]	1998 年	直接传动	直接传动
8.2	Kueyen [3]	1999 年	直接传动	直接传动
8.2	Melipal [3]	2000 年	直接传动	直接传动
8.2	Yepun [3]	2000 年	直接传动	直接传动
8.1	Gemini North [2]	2001 年	摩擦传动	摩擦传动
8.1	Gemini South [2]	2002 年	摩擦传动	摩擦传动
6.5	MMT [24]	1999 年	齿轮传动	摩擦传动
6.5	Walter Baader(Magellan I) [25]	2000 年	摩擦传动	摩擦传动
6.5	Landon Clay(Magellan II) [25]	2001 年	摩擦传动	摩擦传动
6.0	BAT(Bolshoi Teleskop Azimutalnyi) [22,26]	1976 年	蜗轮蜗杆	蜗轮蜗杆
4.2	WHT(William Herschel Telescope) [27]	1987 年	齿轮传动	齿轮传动
4.2	SOAR [28]	2003 年	齿轮传动	直接驱动
3.67	AEOS	1996 年	直接驱动	直接驱动
3.6	TNG [29]	1997 年	齿轮传动	齿轮传动
3.5	NTT [30]	1989 年	齿轮传动	齿轮传动
3.5	ARC [31]	1994 年	摩擦传动	摩擦传动
3.5	WIYN [32]	1994 年	摩擦传动	摩擦传动
3.5	Starfire [33]	1994 年	直接驱动	直接驱动
2.61	VST(VLT Survey Telescope) [34]	2003 年	齿轮传动	齿轮传动
2.56	NOT(Nordic Optical Telescope) [35]	1988 年	齿轮传动	齿轮传动
2.5	SDSS [36]	1998 年	摩擦传动	摩擦传动

摩擦传动虽然克服了蜗轮蜗杆传动和齿轮传动的致命弱点, 但传动刚度差、低速爬行和滑移则是其自身的致命弱点。低速爬行会影响运动稳定性和传动精度。而滑移则会引起观测目标的像在视场中抖动, 严重时像会漂移出视场。对于造价极高、观测时间非常宝贵的天文望远镜而言, 这严重影响了使用效率。鉴于此, 电机直接驱动也在此期间得到了研究和应用。直接驱动没有中间传动环节, 基本不需要维护。由于没有中间摩擦现象, 所以由各种摩擦引起的

爬行问题不存在。且能够得到很高的传动刚度。高传动刚度、少摩擦、易于安装调试、少维护和弱非线性特性是直接驱动的主要特点。其中高传动刚度非常重要,因为它直接影响到望远镜的动态性能。对于中小型的望远镜,可用传统的旋转电机直接与望远镜旋转轴同轴安装,如1994年建成的3.5米Starfire<sup>[34]</sup>和1996年建成的3.67米AEOS。这两架望远镜主要用于军方对低轨目标进行跟踪,速度和加速度较大。但对于大型天文望远镜而言,传统的大力矩低转速的旋转电机由于极数多、直径大、电刷多,产生的摩擦力矩和惯量大,使控制系统成为严重的非线性,不易实现低速高精度跟踪。20世纪末21世纪初,针对天文望远镜传动的特点,研制开发了适用于大型天文望远镜的带有一点弯曲的直线电机,即圆弧型直线电机,如欧洲南方天文台的VLT望远镜<sup>[3]</sup>、日本国家天文台的昴星团望远镜Subaru<sup>[5]</sup>和西班牙的GTC望远镜<sup>[37]</sup>。Subaru和VLT直接驱动的成功,使得大尺寸圆弧型直线电机及其相关技术成为研究的热点。但直接驱动没有像摩擦传动那样迅速得到应用,主要原因是其高昂的研制费用。

### 2.3 国际上在研大型光学望远镜轴系驱动方式介绍

表3列出了国际上目前在研的所有大型天文光学望远镜的轴系驱动方式。在这6架在研的天文光学望远镜项目中,由于LAMOST立项较早,其方位轴和高度轴驱动仍然采用20世纪末很流行的摩擦传动。其余为齿轮传动和直接驱动。从表3中可以看出,摩擦传动经过前一段时间的大规模的应用,它的一些弱点还是不容忽视的。21世纪初的几架大型天文光学望远镜基本放弃了摩擦传动,如VST(2003年齿轮传动 齿轮传动)、SOAR(2003年齿轮传动 直接驱动)、LBT(2004年齿轮传动 齿轮传动)。而大尺寸圆弧型直线电机的研制费用又比较昂贵,在这种情况下,一些望远镜项目又重新选择了齿轮传动。表3中有6个齿轮传动,占50%。在直接驱动中,VertexRSI研制的DCT和VISTA高度轴直接驱动采用的是传统的力矩电机<sup>[41,42]</sup>,10.4米GTC直接驱动采用的是类似于VLT的圆弧型直线电机。

表3 国际上在研大型光学望远镜轴系驱动

口径/m	望远镜名称	拟完成年份	方位轴驱动	高度轴驱动
21.4	GMT(Giant Magellan Telescope) <sup>[38]</sup>	2016年	齿轮传动	齿轮传动
10.4	GTC(Gran Telescope Canarias) <sup>[37]</sup>	2006年	直接驱动	直接驱动
8.0	LSST(Large Synoptic Survey Telescope) <sup>[39]</sup>	2012年	齿轮传动	齿轮传动
4.2	LAMOST <sup>[40]</sup>	2008年	摩擦传动	摩擦传动
4.2	DCT <sup>[41]</sup>	2009年	齿轮传动	直接驱动
3.9	VISTA <sup>[42]</sup>	2007年	齿轮传动	直接驱动

### 2.4 预研极大光学望远镜轴系驱动方式介绍

表4给出了国际上进行预研究的极大光学望远镜轴系驱动方式。其中有些项目由于种种原因已经暂停或几个项目合并成一个预研项目。此表列出的是这些项目曾经所考虑的轴系驱动方式。

目前国际上预研究的极大光学望远镜中,传动方式主要考虑了摩擦传动、齿轮传动和直接驱动。但在几个研究规模较大的项目中,如Euro 50、E-ELT、TMT和GMT,除了GMT

表 4 国际上预研的极大光学望远镜轴系驱动

口径 /m	望远镜名称	拟完成年份	方位轴驱动	高度轴驱动
100	OWL(2005 年终止) <sup>[43]</sup>	2020 年	摩擦传动	摩擦传动
50	EURO50 <sup>[44]</sup>	2014 年	直接驱动	直接驱动
42	E-ELT <sup>[45]</sup>	2016 年	直接驱动	直接驱动
30	TMT <sup>[46]</sup>	2015 年	直接驱动	直接驱动
30	CELT(并入 TMT) <sup>[47]</sup>		齿轮传动	齿轮传动
30	GSMT(并入 TMT) <sup>[48]</sup>		摩擦传动	摩擦传动
20	VLOT(并入 TMT) <sup>[49]</sup>		行星齿轮传动	行星齿轮传动
30	CFGT(中国极大望远镜) <sup>[50]</sup>		摩擦传动	摩擦传动
30	JELT <sup>[51]</sup>		直接驱动	直接驱动
20	GMT <sup>[52]</sup>	2016 年	齿轮传动	齿轮传动

采用类似于 LBT 的齿轮传动, 其余 3 架极大望远镜均采用圆弧型直线电机直接驱动。表 4 中采用摩擦传动的较少, 主要是摩擦传动对于极大光学望远镜而言, 存在以下的一些弱点:

1) 极大望远镜摩擦传动零件的尺寸很大, 加工精度不可能很高, 由诸如表面粗糙度等所引起的弹性滑移不可忽视。

2) 极大望远镜驱动负载很大, 驱动需加的正压力也非常大, 由于安装调试的位置精度不可能绝对理想, 即使存在很小扭转角, 也会产生很大的轴向分力, 会产生严重的“突跳”问题, 另外, 很大的正压力加速磨损, 影响传动精度。

3) 天文望远镜在露天工作, 极大望远镜的承风面积很大。风速的改变、风向的改变和望远镜在跟踪过程中承风面积的改变都会引起相当大的驱动负载的变化。对于传动刚度较差的摩擦传动而言, 很容易引起摩擦副表面的相对滑移。

4) 由摩擦非线性引起的低速爬行影响传动精度。

5) 由于周围的环境污染, 如油汽、灰尘颗粒等的作用, 会引起摩擦轮表面的相互滑移。

任一种传动方式的选择取决于望远镜的跟踪速度、运动加速度、跟踪精度以及需要综合考虑的性价比。随着直接驱动技术的发展和工业加工水平的提高, 直接驱动的成本将有所下降, 使得直接驱动有望在未来极大望远镜中得到广泛应用。

### 3 天文望远镜直接驱动电机介绍

正如前面所述, 天文望远镜上直接驱动有两种形式: 一是用传统的旋转电机直接与负载同轴安装; 二是根据特定的望远镜研制的圆弧型直线电机。两者虽然都称为电机直接驱动, 但却有着较大的区别。本节所说的是后一种直接驱动电机。这种电机虽然在结构上与扁平直线电机有差异, 但从运行原理来看, 它与扁平型直线电机是相似的。特别是当圆弧足够大时, 圆弧上各受力点也就足够大, 以致可以认为初级和次级间作相对直线运动<sup>[53]</sup>。目前国际上大型天文望远镜中应用直接驱动的有西班牙 10.4 米的 GTC、日本 8.2 米 Subaru、欧南台 (ESO)4 架 8.2 米 VLT 和射电望远镜阵 ALMA。这种电机目前还没有标准, 都是根据需要单独研发的。

VLT、GTC 和 ALMA 的直接驱动电机都是由意大利菲仕 (Phase) 公司研发的。日本 Subaru 望远镜的直接驱动电机是由三菱电机公司研发的。图 2 是 VLT 驱动方位轴的双轴向气隙永磁无刷同步直线电机结构图。图 3 是这种电机的立体结构示意图<sup>[54]</sup>。VLT 高度轴也是采用这种电机的直接驱动。但 VLT 圆弧形直线电机的结构与常规的结构不同,主要是为了考虑方位轴和高度轴电线的走线问题,方位轴直线电机把初级线圈作为转子固定于方位转盘,永磁磁钢作为定子固定于基墩<sup>[3]</sup>,高度轴驱动直线电机把初级线圈作为定子固定于机架,把永磁磁钢作为转子与高度轴固联。每个电机上有两个类似于拼接线圈的测速机 A 和 B。

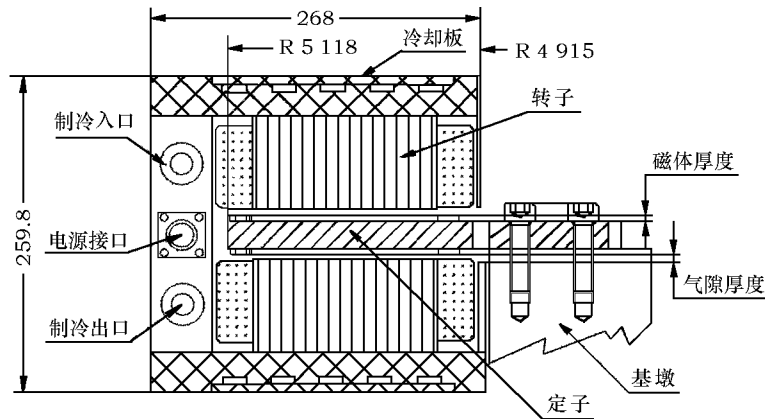


图 2 VLT 方位轴驱动圆弧形直线电机结构图

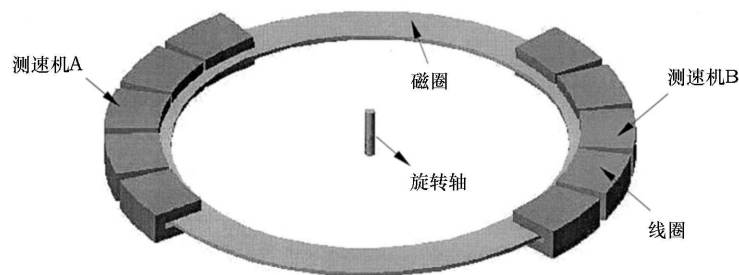


图 3 VLT 方位轴驱动圆弧形直线电机立体示意图

常规的圆弧形直线电机中,一些长度约 1 m 左右的分段磁圈嵌入旋转轴颈构成转子。与磁圈相对布置的线圈安装在望远镜固定支撑上形成定子。线圈绕在定子铁心上,线圈产生的磁通在定子的铁心磁路中闭合。转子磁钢置于定子闭合磁路框内,转子与定子铁心之间存在着磁钢产生的磁场,这个磁场与定子线圈载流导体之间相互作用产生电磁力,使转子产生运动。电机推力的大小正比于线圈电流大小和气隙磁通密度值。沿着圆周方向可以放置几台初级线圈定子。定子与转子之间的空气间隙约几 mm<sup>[16]</sup>。每一个小的直线电机对望远镜形成一个切向的推力,则整圈的切向力合起来就能够推动整台望远镜了。改变定子电流的方向就可以改变转子运动的方向。除了初级的台数可以根据需要作灵活改变之外,每台初级在圆盘次级上的位置也可沿径向作适当的调节,以此来改变输出转矩或旋转速度。为了平衡法向吸力,初级线圈通常

采用双边型结构,如图 3 所示。直接驱动结构上很简单,没有相互接触的摩擦副。所以不存在摩擦和爬行现象,也不需要进行过多的维护。通常适用于低速大转矩负载,对于大型天文望远镜而言,由于其方位底盘的直径很大,作为直线电机的次级时,其经济性将更好<sup>[53]</sup>。

与其他传动形式相比,直接驱动不像蜗轮蜗杆传动、齿轮传动和摩擦传动那样在啮合点有很高的局部压力和局部变形。这样,使刚度比较低的大型天文望远镜获得高刚度成为一种可能。VLT 望远镜由于采用了直接驱动,高度轴最低频率为 8 Hz,如果用传统的齿轮传动,相应频率只有 4.4 Hz,提高了近一倍<sup>[16]</sup>。直接驱动的另一优点是对位置调整精度要求不高,一般在几 mm 即可。而蜗轮蜗杆传动、摩擦传动的调节一般在 0.1 mm 以下。这样,使得望远镜的安装速度加快。另外,由于直接驱动类似于多个线性电机共用一个磁圈,所以,当有个别电机需要维修时,其余电机可以正常工作而不影响望远镜的正常运行。

对于大型天文望远镜而言,目前直接驱动的最大缺点是研制费用高。力矩波动和由齿槽效应引起的非线性问题会影响直接驱动的精度。低速运行的天文望远镜的力矩波动和齿槽效应更加明显。不过,随着技术的发展,现在力矩波动和齿槽效应值平均小于 1%。一只已制成的驱动电机可对力矩波动进行实测并由控制回路进行修正。

## 4 讨论和展望

一架好的天文望远镜离不开性能优秀的轴系跟踪系统,而轴系跟踪系统的性能又与其驱动方式密不可分。本文对目前国际上 2.5 米口径以上天文光学望远镜轴系的驱动方式进行了概括;探讨了望远镜轴系驱动方式的发展历史,并对蜗轮蜗杆传动、齿轮传动、摩擦传动和电机直接驱动的特性进行了分析;得出了圆弧型直线电机直接驱动是未来极大天文光学望远镜轴系驱动的发展趋势。目前直接驱动与其他的驱动形式相比造价较高,但这个价格要全面考虑。在这个价格里面还应该考虑整个驱动系统的安装费用、维护费用,以及拆装难易程度和调试难易程度。更为重要的是:齿轮传动如果齿轮需要维修,则整个望远镜不能工作。但圆弧型直线电机由于采用了多对初级线圈(如图 3 所示),一旦某个直线电机需要维修或更换,只需拆下需要维修的,其余的照常能够维持望远镜的正常工作。这一点对于只能够在有限的时间内进行工作的大型天文望远镜而言意义巨大。随着材料学研究、电机技术、控制技术和加工制造技术的发展,大尺寸圆弧型直线电机的研制费用会有所降低。同时,目前这一类电机还没有工业标准,有望在不久的将来,随着应用的普及,出台相应的标准,使得产品系列化、标准化也将会降低直接驱动的成本。当然,对于中小型望远镜而言,需要综合考虑望远镜大小、望远镜运行速度、运行加速度、负载波动情况、跟踪精度要求、驱动系统的资金等问题,合理选择驱动方式。每一种驱动方式都有其自身的优点、缺点和适用环境,并非一概而论。

### 参考文献:

- [1] Hilton L, William L, Sirota M J, et al. Advanced Technology Optical Telescopes V. Stepp L M, ed. Bellingham: SPIE, 1994: 117-125
- [2] Keith R, Paul E G, Peter H, et al. Advanced Technology Optical Telescopes V. Stepp L M, ed. Bellingham: SPIE, 1994: 376-393



- [3] Erm T, Gutierrez P. Telescope Structures, Enclosures, Controls, Assembly/Integration/Validation, and Commissioning. Thomas A S, Torben A, eds. Bellingham: SPIE, 2000: 490—499
- [4] Venturini M, Vismara A. Phase Motion Control, Las Vegas, USA: Powersystems World, 1996
- [5] Takeshi N, Wataru T, Toshiyuki S, et al. Telescope Control Systems III. Hilton L, ed. Bellingham: SPIE, 1998: 361—366
- [6] Russell W P. Drawings of the 200'' Hale Telescope, <http://members.cox.net/thecosmos/palomar/index.html>, 2002
- [7] Steve Heathcote, Mark Phillips, Refurbishing the Drives on the Blanco 4-m Telescope. <http://www.noao.edu/noao/news/dec95/art22.html>, 1995
- [8] Wallace P T, Steve L. Advanced Technology Optical Telescopes V. Stepp L M, ed. Bellingham: SPIE, 1994: 1129—1140
- [9] Pepe F, Queloz D, Lo Curto G, et al. HARPS User Manual. La Silla Observatory: ESO, 2006: 31
- [10] MK Earthquake workshop. CFHT—the seismometer, [http://www.gemini.edu/science/meetings/20070323\\_mko\\_earthquake/03.07mkoquake-chft.pdf](http://www.gemini.edu/science/meetings/20070323_mko_earthquake/03.07mkoquake-chft.pdf), 2007
- [11] Don I. Shane Telescope, <http://www.irving.org/cgi-bin/xplore.cgi?cglick+shnlev2+A>, 2007
- [12] Denault A, Keske F, Watanabe D. Replacement of the Telescope Control System for the IRTF(TCS3 Project) [http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~tcs3/systems/simtcs3/0611\\_Final\\_Report/Attachment\\_B\\_CDR.pdf](http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~tcs3/systems/simtcs3/0611_Final_Report/Attachment_B_CDR.pdf), 2006
- [13] Smith H J. Quarterly Status Report No4. Austin, Texas: McDonald Observatory, 1965
- [14] ASME Los Angeles Section. ASME. California: Mount Wilson Observatory, 1981
- [15] Javier M. Isaac Newton Telescope Mounting, [http://www.ing.iac.es/PR/int\\_info/intmounting.html](http://www.ing.iac.es/PR/int_info/intmounting.html), 2003
- [16] Bely P Y. The Design and Construction of Large Optical Telescopes. New York: Springer, 2003: 273—278
- [17] 李昌金. 天文仪器与技术, 1988, 1: 46—51
- [18] 吕爱群. 伺服控制, <http://www.servo.hk/detail.asp?id=3667>, 2005: 4
- [19] 王国民. 博士论文. 南京: 南京天文光学技术研究所, 2005: 3
- [20] 陈贤龙. 天文仪器与技术, 1994, 1: 70—74
- [21] 夏立新. 2.16 米天文望远镜工程文集. 苏定强, 潘君骅, 洪斯溢, 等编. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 161—172
- [22] Nizhnii A. Telescopes I've Used-Bolshoi Teleskop Azimutalnyi, <http://www.astr.ua.edu/keel/telescopes/bta.html>, 2000
- [23] David S A, Dan M, Joar G B, et al. Advanced Software and Control for Astronomy. Hilton L, Alan B, eds. Bellingham: SPIE, 2006: 627—643
- [24] Clark D. MMTO Internal Technical Memorandum, #02-2. Arizona: MMT Observatory, 2002
- [25] Steven M G, Carr D M. Advanced Technology Optical Telescopes V. Stepp L M, ed. Bellingham: SPIE, 1994: 414—427
- [26] Drabek S V, Shergin V S. SAO REPORT, 2001-2002. SAO, 2001: 26—27
- [27] Javier M. Isaac Newton Telescope Mounting, [http://www.ing.iac.es/PR/wht\\_info/whtmounting.html](http://www.ing.iac.es/PR/wht_info/whtmounting.html), 2003
- [28] Campbell M F, Reese E O. Large Ground-based Telescopes. Oschmann J M, Stepp L M, eds. Bellingham: SPIE, 2003: 308—316
- [29] Dario M, Enrico C, Pietro S. Acquisition, Tracking and Pointing XI. Masten M K, Stockum L A, eds. Bellingham: SPIE, 1997: 85—95
- [30] Andreolli C, Andreolli M. Hydrostatic Supports for Telescopes: The Experience of 3.5m NTT with a Glance at VLT. Garching: European Southern Observatory (ESO), 1988: 199
- [31] Technical Documents. <http://www.apo.nmsu.edu/Telescopes/techdocs.html>, 2006
- [32] Johns M, Blancol D R. Advanced Technology Optical Telescopes V. Stepp L M, ed. Bellingham: SPIE, 1994: 2—9
- [33] Fugate R Q, Ruane R E, Ellerbroek B L, et al. Advanced Technology Optical Telescopes V. Stepp L M, ed. Bellingham: SPIE, 1994: 481—493
- [34] Dario M. Large Ground-based Telescopes. Oschmann J M, Stepp L M, eds. Bellingham: SPIE, 2003: 389—400

- [35] Arne A. Some properties of the Nordic optical telescope, <http://www.astro.lu.se/Resources/NOT/proptxt.html#17>, 2002
- [36] Gunn J E, Siegmund W A, Mannery E J, et al. *The Astronomical Journal*, 2006, 131: 2332–2359
- [37] Jorge P, Consolacion A, Alfredo O, et al. *Telescope Structures, Enclosures, Controls, Assembly/Integration/Validation, and Commissioning*. Sebring T, Andersen T, eds. Bellingham: SPIE, 2000: 92–103
- [38] Jorge P F, Consolacion A, Alfredo O, et al. *Telescope Structures, Enclosures, Controls, Assembly/Integration/Validation, and Commissioning*. Sebring T A, Torben A, eds. Bellingham: SPIE, 2000: 92–103
- [39] Warren D, Roger A. *Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries*. J. Anthony T, Sidney W, eds. Bellingham: SPIE, 2002: 104–110
- [40] Yao Z Q, Li G P. *Advanced Technology Optical/IR Telescopes VI*. Stepp L M, ed. Bellingham: SPIE, 1998: 560–571
- [41] Porter D S, Sebring T A, Smith B, et al. *Ground-based Telescopes*. Oschmann J M, ed. Bellingham: SPIE, 2004: 172–181
- [42] Paul J, Brian S, Stan H, et al. *Ground-based and Airborne Telescopes*. Stepp L M, ed. Bellingham: SPIE, 2006: 626739
- [43] Enzo B, Franz K, Marchet F B, et al. *Future Giant Telescopes*. Angel R P, Roberto G, eds. Bellingham: SPIE, 2003: 497–508
- [44] Torben A, Arne A, Jaques B, et al. *Future Giant Telescopes*. Angel J R P, Roberto G, eds. Bellingham: SPIE, 2003: 214–225
- [45] Colin Cunningham. *European Extremely Large Telescope Opportunities*, <http://www.pparc.ac.uk/in/Colin-Cunningham.pdf>
- [46] Jerry N, Sanders G H. *Ground-based and Airborne Telescopes*. Stepp L M, ed. Bellingham: SPIE, 2006: 626728–1
- [47] CELT Report Number 34. University of California, California Institute of Technology. 2002
- [48] Simpson G, Heger I, Strawman Structure Design of a 30-m Giant Segmented Mirror Telescope, <http://www.aura-nio.noao.edu/book/index.html>, 2001
- [49] Dennis C. *Telescope structure*, <http://www.hia-ihh.nrc-cnrc.gc.ca/VLOT>, 2006
- [50] Su D Q, Wang Y N, Cui X Q. *Ground-based Telescope*. Oschmann J M, ed. Bellingham: SPIE, 2004: 429–440
- [51] Masanori I, Jelt W. *Ground-based Telescopes*, Oschmann J M Jr, ed. Bellingham: SPIE, 2004: 417–428
- [52] GMT Conceptual Design Report, <http://www.gmto.org/CoDRpublic>, 2006
- [53] 叶云岳. *直线电机技术手册*. 北京: 机械工业出版社, 2003: 40
- [54] Gutierrez P. *Large Ground-based Telescopes*. Oschmann J M, Stepp L M, eds. Bellingham: SPIE, 2003: 325–335

## Review of Drive Style for Astronomical Optical Telescope

WANG Guo-min

(National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Drive systems are indispensable for the astronomical optical telescopes to track the motion of celestial bodies. The main purpose of this paper is to generalize the drive type of the astronomical optical telescopes and to analyse the development trend of drive type to be used in the future telescopes. By summarizing the main axes drive type of 25 alt-azimuth operational telescopes and 11 equatorial operational telescopes in the world, this paper investigated the deve-

lopment history of drive technologies adopted in optical telescope. By analysing the main axles drive style used in the 6 large telescopes under construction and will be adopted for the 10 extremely large telescopes in the future, the preliminary conclusion has been gotten that the direct drive, which was used in VLT and Subaru successfully, will be the main drive type in the future, especially for the ELT. Each drive type has its advantages and deficiencies. Feasibility, reliability, maintainability and cost performance are the main factors to be considered in choosing the drive type. Until the 1970s, worm gear drives are the traditional drive ways to provide the final gear stage for most ground-based telescopes because of its large gear ratio in a single stage and excellent intrinsic accuracy. Moreover, the worm gear is the only type of drive to offer absolute safety against telescope imbalance. But, the poor mechanical efficient, not allowing back driving, high precise install alignment, costly and limited in size are the main factors which affect the use of worm gear in large telescopes. Spur gears avoid the irreversibility problem of the worm gear while maintaining positive control. The helical multi-start gear drive distributes the high loading on the gear's teeth. Friction drive was developed to overcome many of the inherent deficiencies in both worm drives and gear drives, such as periodic error, backlash. But friction drive also has its own inherent weakness, such as slippage and creepage. Direct drive was developed to overcome the above shortcomings for large optical telescopes. This system has the simplest mechanical configuration. It is free from friction and high contact stress and stick-slip effects. A modularity drive section can generally be removed for maintenance while still leaving the telescope completely operational. It is very important for large telescope to decrease the operation cost and enable highest availability. The disadvantages of this system are relatively high cost and alight torque ripple and nonlinearities associated with electromagnetic cogging. But, with the development of material science, servo motor technology, control technology and manufacture technology, the cost of direct drive motor and its control system will be lower and lower in the future. All these make it possible for direct drive to be leading drive type adopted by future optical telescopes.

**Key words:** telescope drive; gear drive; friction drive; direct drive