

基于 CAM 的 LAMOST 光纤单元结构误差仿真分析

冯新宇¹ 顾永刚² 翟超

中国科学技术大学工程科学学院 合肥 230027

摘要: LAMOST 天文望远镜要求直径 1.75 m 球冠状焦面板上的 4000 个光纤定位单元能够快速准确地对准 4000 个星体目标进行观察, 其定位精度要求高。但单元偏心轴处齿轮啮合传动、轴与轴承存在的间隙等, 都会导致光纤定位发生偏离, 影响光纤的精确定位。本文利用 Solidworks 和 ADAMS 对单元偏心轴处齿轮传动仿真, 对轴与轴承间隙的不同大小用正交试验方法设计 9 组对比仿真试验。研究结果表明: 偏心轴处齿轮最大窜动量在许可范围, 且对单元定位精度影响不大; 单元轴间隙整体误差范围在 $-0.06\text{deg/sec} \sim 0.2\text{deg/sec}$, 可使光纤定位单元的定位精度变差甚至不能满足观测要求。以上分析研究为将来新一代高精度定位单元的设计提供一定的理论依据。

关键词: LAMOST; 定位精度; 光纤单元; 齿轮啮合误差; 轴间隙误差; ADAMS

Structural Error Simulation Analysis of LAMOST Fiber Units

Abstract: LAMOST requires fast and accurate alignment of 4000 optical fiber units on a 1.75m-diameter convex focal plane to simultaneously observe 4000 targets, and the positioning accuracy of the unit is very demanding. However, the gear meshing transmission at the eccentric shaft of the unit, the clearance between the shaft and the bearing, etc., can cause the movement of the actual mechanism and the ideal mechanism during the positioning operation of the optical fiber to deviate, and affect the precise positioning of the optical fiber. In this paper, the virtual prototype ADAMS is used to simulate the gear transmission at the eccentric shaft of the unit, and nine groups of comparative simulation tests are designed using the orthogonal test method for different sizes of shaft and bearing clearance. The results of the study show that: The maximum turbulence of the gear at the eccentric shaft is within the allowable range, and the influence on the positioning accuracy of the unit is not significant; The overall error range of the unit shaft clearance is $-0.06\text{ deg/sec} \sim 0.2\text{ deg/sec}$, it can make the positioning accuracy of the optical fiber positioning unit worse or even fail to meet the observation requirements. The above analysis and research provide a certain theoretical basis for the design of a new generation of high-precision positioning units in the future.

Keywords: LAMOST; positioning accuracy; fiber unit simulation; shaft clearance error; ADAMS

第一作者: 冯新宇 (1991.7-), 女, 硕士, fxinyulf@mail.ustc.edu.cn, 主要从事机械仿真分析。

通信作者: 顾永刚 (1983.3-), 男, 高级工程师, 主要从事光学测量技术、精密机械设计等

基金项目: 下一代光纤定位关键技术研究 (U1331201)

1 前言

LAMOST (Large sky area multi-object fiber spectroscopy telescope) 是一台兼备大视场和大口径的卧式反射施密特天文望远镜, 安装有 4000 个光纤定位单元, 光纤的精确定位是 LAMOST 项目中一项关键性技术^[1-2]。为了保证焦面上的每一根光纤的入射端都准确地对准天体的像, 光纤的定位误差必须在 $40\text{ }\mu\text{m}$ 范围内。在实际应用中, 由于各种误差源的存在, 包括坐标计算误差、加工误差、装配误差等, 都会影响光纤的定位精度。研究分析光纤定位的影响因素, 对提高光纤的定位精度具有重要的理论和实际的意义。

单元偏心轴处齿轮啮合传动、消除弹簧等设计^[3]可能会对定位精度引起较大误差。单元中心轴和偏心轴在转动过程中, 必然与轴承存在间隙, 使实际机构与理想机构的运动发生偏离, 影响光纤的精确定位。因此本文以第一代光纤定位单元为研究对象, 基于虚拟样机技术, 分别对光纤单元偏心轴处齿轮传动和轴与轴承配合间隙对光纤单元定位精度的影响。

2 单元的建模与仿真

2.1 光纤单元建模

双回转光纤定位单元的结构如图 1 所示。定位单元由两个臂长相等的中心回转轴和偏心回转轴组成, 两轴均由电机经齿轮减速驱动。其中中心轴的行程是 $0\sim 360^\circ$, 偏心轴的行程是 $0\sim 180^\circ$, 光纤装夹于偏心回转轴的端部, 通过两个回转轴的组合运动可将安装在单元上的光纤定位到单元观测区域内的任意位置^[4]。

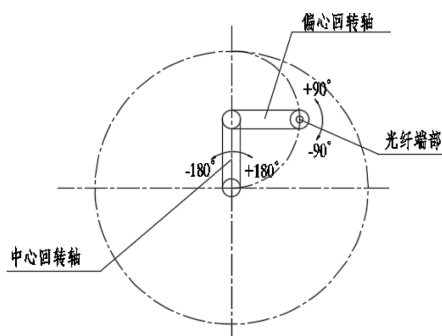


图 1 双回转定位单元结构示意图

利用 Solidworks 建立光纤单元的三维模型, 如图 2 所示。位于偏心轴处的两级齿轮传动机构, 如图 3 所示。齿轮传动精度主要由传动误差和回程误差决定。光纤单元中偏心回转

轴采用扭簧消除、中心回转轴采用摩擦消除, 并采用单向传动定位方式, 因此光纤定位单元回程误差对定位精度影响不大, 此处主要讨论传动误差。

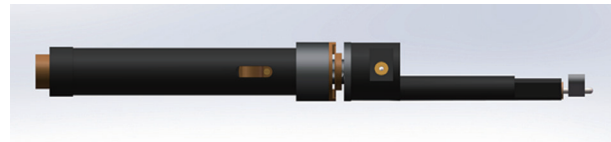


图 2 光纤单元三维模型

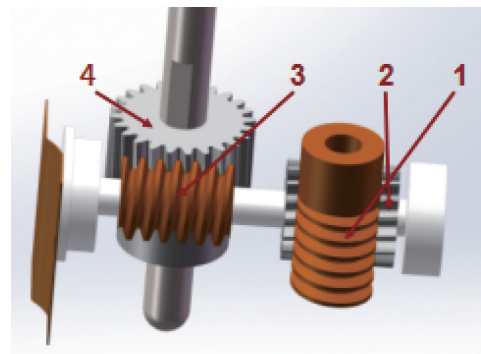


图 3 偏心轴处齿轮传动系统

2.2 机构误差数学模型

首先, 根据光纤定位单元的实际工作过程, 建立如图 4 所示的坐标系, 其中 O 点为光纤定位单元的中心回转坐标, P 点为光纤末端坐标。由图示中的几何关系可知, P 点的位置坐标可由机构的相关参数表示, 表达式为:

$$\varphi_p = f(x_0, y_0, r_1, r_2, \alpha_1, \alpha_2) \quad (2.1)$$

进一步简化为:

$$\varphi_p = f(X_j), \quad j=1, 2, \dots, 6 \quad (2.2)$$

式中: x_0, y_0 为光纤定位单元的中心回转坐标;

r_1 为中心回转轴的轴长;

r_2 为偏心回转轴的轴长;

α_1 为中心回转轴步进电机驱动角;

α_2 为偏心回转轴步进电机驱动角。

考虑到光纤定位单元在制造、装配过程中不可避免的存在偏差, 造成构件的实际尺寸参数与理想参数之间出现误差, 即机构误差。当机构存在误差 ΔX_j 时, (2.2) 式可写作:

$$\varphi_p = f(X_j + \Delta X_j) \quad (2.3)$$

假定误差 ΔX_j 相互独立, 因此将式 (2.1) 在 $X=X_j$ 处按照泰勒级数展开, 由于 ΔX_j 对于 X 来说是很小的, 因此

二阶及以上阶数的微分部分忽略不计, 展开后可得:

$$\varphi_p = f(X_j) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial X_j} \cdot \Delta X_j \quad (2.4)$$

式中: φ_p 为 P 点的实际位置, $f(X_j)$ 为 P 点的理想位置, 从而得到 P 点的位置误差为:

$$\Delta \varphi_p = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial X_j} \cdot \Delta X_j \quad (2.5)$$

式中: 偏导数 $\frac{\partial f}{\partial X_j}$ 为误差传递函数; ΔX_j 为第 j 个原始误差, $\frac{\partial f}{\partial X_j} \cdot \Delta X_j$ 为第 j 个原始误差引起的 P 点的局部定位误差。因此, 式 (2.5) 的含义是 P 点的定位误差为机构中所有构件局部误差的综合。

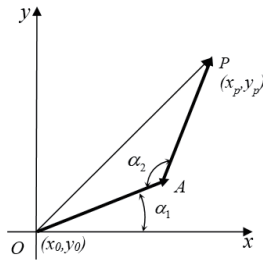


图 4 P 点位置示意图

如图 4 所示, 根据矢量法 P 点的坐标可表示为:

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AP} \quad (2.6)$$

由此可得, 光纤末端的坐标可由机构的相关参数表达, 其表达式为:

$$\begin{aligned} x_p &= x_0 + r_1 \cdot \cos(\alpha_1) - r_2 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \\ y_p &= y_0 + r_1 \cdot \sin(\alpha_1) + r_2 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_1) \end{aligned} \quad (2.7)$$

由全微分定理可得:

$$\begin{aligned} dx_p &= \frac{\partial x_p}{\partial x_0} \cdot dx_0 + \frac{\partial x_p}{\partial y_0} \cdot dy_0 + \frac{\partial x_p}{\partial r_1} \cdot dr_1 + \frac{\partial x_p}{\partial r_2} \cdot dr_2 + \frac{\partial x_p}{\partial \alpha_1} \cdot d\alpha_1 + \frac{\partial x_p}{\partial \alpha_2} \cdot d\alpha_2 \\ dy_p &= \frac{\partial y_p}{\partial x_0} \cdot dx_0 + \frac{\partial y_p}{\partial y_0} \cdot dy_0 + \frac{\partial y_p}{\partial r_1} \cdot dr_1 + \frac{\partial y_p}{\partial r_2} \cdot dr_2 + \frac{\partial y_p}{\partial \alpha_1} \cdot d\alpha_1 + \frac{\partial y_p}{\partial \alpha_2} \cdot d\alpha_2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

由于 $\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta r_1, \Delta \alpha_1$ 都很小, 因此, 我们可以用 dx_p 和 dy_p 来近似代替 Δx_p 和 Δy_p , 同时 $\Delta x_0 \approx dx_0$, $\Delta y_0 \approx dy_0$, $\Delta r_0 \approx dr_0$, $\Delta r_1 \approx dr_1$, $\Delta \alpha_0 \approx d\alpha_0$, $\Delta \alpha_1 \approx d\alpha_1$, 带入式 (2.8) 可得:

$$\begin{aligned} \Delta x_p &= \frac{\partial x_p}{\partial x_0} \cdot \Delta x_0 + \frac{\partial x_p}{\partial y_0} \cdot \Delta y_0 + \frac{\partial x_p}{\partial r_1} \cdot \Delta r_1 + \frac{\partial x_p}{\partial r_2} \cdot \Delta r_2 + \frac{\partial x_p}{\partial \alpha_1} \cdot \Delta \alpha_1 + \frac{\partial x_p}{\partial \alpha_2} \cdot \Delta \alpha_2 \\ \Delta y_p &= \frac{\partial y_p}{\partial x_0} \cdot \Delta x_0 + \frac{\partial y_p}{\partial y_0} \cdot \Delta y_0 + \frac{\partial y_p}{\partial r_1} \cdot \Delta r_1 + \frac{\partial y_p}{\partial r_2} \cdot \Delta r_2 + \frac{\partial y_p}{\partial \alpha_1} \cdot \Delta \alpha_1 + \frac{\partial y_p}{\partial \alpha_2} \cdot \Delta \alpha_2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

由此可得式 (2.9) 与式 (2.5) 相一致, 进一步整理为矩阵形式可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos(\alpha_1) & -\cos(\alpha_2 - \alpha_1) & -r_1 \cdot \sin(\alpha_1) + r_2 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_1) & -r_2 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_1) \\ 0 & 1 & \sin(\alpha_1) & \sin(\alpha_2 - \alpha_1) & r_1 \cdot \cos(\alpha_1) - r_2 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1) & r_2 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \Delta \alpha_1 \\ \Delta \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

简化为:

$$E = T \cdot \delta \quad (2.11)$$

其中: E 为 P 点的定位误差, T 为总的误差传递矩阵, δ 为原始误差。

那么 P 点总的定位误差为:

$$\sigma = \sqrt{\Delta x_p^2 + \Delta y_p^2} \quad (2.12)$$

2.3 偏心轴处齿轮传动

偏心轴处两级齿轮传动采用了斜齿轮传动, 三维模型导入 ADAMS 后对结构进行约束设置、材料选择、驱动及接触等设置。齿轮两两啮合间需设置接触力, 在 ADAMS/Solver 中定义接触力更多的是采用冲击函数法 (Impact)^[5], 接触力实际上相当于一个弹簧阻尼器产生的力。冲击函数模型求得法向接触力 F_n 公式如下:

$$F_n = k \cdot g^e + c \cdot \frac{dg}{dt} \quad (2.13)$$

式中, k ——接触刚度;

g ——两接触物体的瞬时穿透量;

e ——作用力指数;

c ——阻尼系数。

通过计算可得: $E_{12}=E_{34}=0.95 \times 10^6 \text{N/mm}$, 两对齿轮的刚度系数分别为 $K_{12}=7.355 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, $K_{34}=7.966 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, $d_{12}=9.58 \times 10^{-4} \text{mm}$, $d_{34}=8.7 \times 10^{-4} \text{mm}$ 。作用力指数 $e=2.2$, 阻尼系数 $C_{\max}=10 \text{Ns/mm}$ 。

根据以上数值完成接触设置后, 即可开始仿真计算和相关的后处理。

为模拟电动机在启动时的实际特点, 保证施加转速时不至发生突变, 此处采取阶跃函数, 使转速在 0.2s 的时间内从 0 增加到 384deg/s, 即 step(time, 0, 0, 0.2, 384d)。仿真后可得中心轴、偏心轴处各个齿轮和光纤架的角速度曲线图, 如图 5、6 所示。

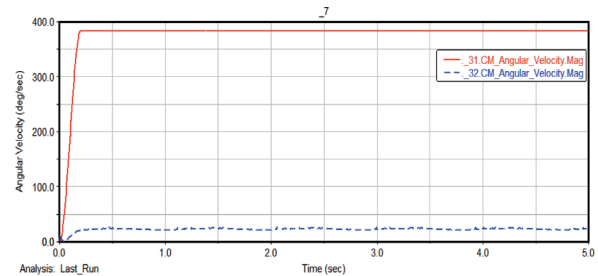


图 5 偏心轴处齿轮 1 转速图 (红), 偏心轴处齿轮 2、3 转速图 (蓝)

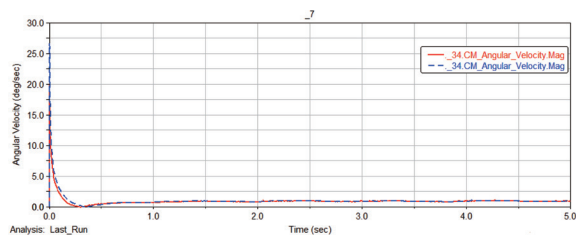


图 6 偏心轴末端齿轮 4、光纤支架转速图(红)，
加大负载后末端齿轮转速图(蓝)

因 ADAMS 仿真结果数据中存在粗大误差，对粗大误差进行剔除后，所得结果如表 1 所示。其中理论值为实际齿轮副的传动比。

表 1 转速仿真与理论值比较

零件	理论值(deg/s)	仿真值(deg/s)	误差
齿轮 1	384	383.999	≈ 0
齿轮 2、3	24	23.994	0.25%
末齿轮 4、光纤支架	1	1.009	0.9%

由以上数据可知：

(1) 两级齿轮转速在 0.2s 内从 0 逐渐加速到均值，0.2s 后趋于稳定。

(2) 第一级输出转速平均值为 23.994，除去少数粗大误差，仿真数值在 21 ~ 26 之间波动，误差为 0.25%，第二级输出转速平均值为 1.009，并在 0.8 ~ 1.2 之间波动，误差为 0.9%。

(3) 在末端加大一倍负载，由对比图 6 可得负载的增加会加大各级转速的波动，齿轮受力增大，从而引起的角度误差。

2.4 轴与轴承配合间隙仿真

对光纤单元运动过程中不同轴和轴承间隙大小的影响，我们设计 9 组对比试验，根据仿真实验数据来总结中心轴和偏心轴处间隙的大小对整体传动比的影响。间隙大小设置及所得误差值如表 2 所示。

通过传动比误差结果比较可得：随着中心轴和偏心轴处间隙的变化，间隙误差值的整体趋势是增大的，误差值整体在 0 ~ 0.1891deg/sec 之间。误差曲线的波动出现在 3、4 组，第 6、7 组的误差值也趋于平缓，通过进行对比可得：当偏心轴间隙一定时，误差值随中心轴间隙（4 μm，12 μm，20 μm）的变化不断增大，当中心轴间隙一定，误差值随偏心轴间隙（2 μm，6 μm，10 μm）的变化也如上所述。末

表 2 中心轴、偏心轴处间隙大小引起的末端齿轮传动比误差

序号	中心轴处间隙大小 (μm)	偏心轴处间隙大小 (μm)	末端齿轮转速理论值为 1 (deg/sec)	误差值
0	0	0	0.9999 ≈ 1	——
1	4	2	0.9405	-0.0595
2	4	6	1.0591	+0.0591
3	4	10	1.1166	+0.1166
4	12	2	1.0983	+0.0983
5	12	6	1.1294	+0.1294
6	12	10	1.1418	+0.1418
7	20	2	1.1481	+0.1481
8	20	6	1.1682	+0.1682
9	20	10	1.1891	+0.1891

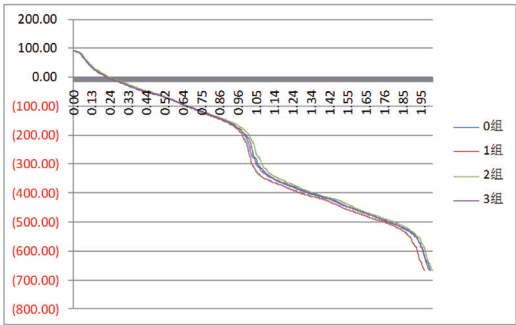


图 7 末端齿轮转动角度

端齿轮转动角度结果比较如图 7 所示，在转动一周时误差值明显。

3. 结论

本文运用 Solidworks 和 ADAMS 对光纤单元进行建模仿真，可以得到如下结论。

(1) 偏心轴处齿轮传动仿真结果显示，两级齿轮输出转速平均值波动较小。

平均值接近理想传动比值，且误差均 ≤ 0.9%。随着末端负载增大，各级齿轮转速的波动和齿轮受力也随之增大，从而引起角度误差。

(2) 通过模拟中心轴与偏心轴处轴与轴承的间隙接触，由 9 组不同大小间隙的仿真结果可得，随着间隙的增大，光纤末端的轨迹与理论轨迹偏差也越来越大，转动角度误差也随之增大。因此，在设计过程中，为了保证定位精度的要求，尽可能地减小轴与轴承的配合配合间隙，最好采用精度较高的滚动轴承。

智能制造的国际实践及中国机会

李洁

电子工业出版社工业技术出版分社

近年来，世界制造业主要国家都陆续发布了智能制造相关的战略和政策，美国再工业化战略的主要方向就是布局智能制造关键技术，推动软件和互联网技术优势反哺制造业，促进制造业智能化和数字化发展。德国则聚焦于制造过程和生产装备的智慧发展，工业 4.0 已经渐渐演变为全球战略，相关的协作框架和技术平台也不断完善。

中国适时推出《中国制造 2025》战略，并将智能制造作为战略的主攻方向，在战略出台后，智能制造专项也快速跟进，成为《中国制造 2025》的第一个落地专项。与此同时，日本、韩国和英国等国家也摩拳擦掌，不甘落后，以期在智能制造价值链上占据有利地位。

除了政府，一些制造业领先企业也纷纷加快转型，力图成为智能制造的主导者，其中实力最雄厚，战线最长的就是通用电气（GE）和西门子（Siemens）两家企业。

这两家企业对智能制造展开了系统性全价值链布局，且都是软件开发和硬件制造兼长。在这一轮变革中它们紧抓智能制造这条主线，致力于主导核心技术标准，构建产业技术生态。

稍有不同的是通用电气仍然代表了美国范式，强调用强大的信息通讯技术反哺制造业，所以工业互联网的概念成为美国智能制造的代表；而西门子则是德国制造的典型，更多聚焦制造环节，所以提到西门子智能制造的典型，关键词更多指向安贝格工厂、成都工厂。

我们也可以看到两家的战略布局有明显的差别，西门子更多的布局是生产端，“偏硬一点”，比如在成都建设的智能工厂，而通用电气的布局更侧重服务端，“偏软一点”，比如在航空领域利用智能产品来提供远程运维等智能服务。

个人认为，智能制造将会被制造业大国所引领、由装备制造业巨头来主导，智能制造的重心落在制造，不掌握核心技术、熟悉制造的过程，智能化则无从谈起，没有强大的制造实体，智能化则是空中楼阁。

有的国家，像韩国和英国，他们最多只能是参加、补充或者是在局部领先，有的国家，像印度等发展中国家，他们只能处于跟随地位，因为产业规模小，水平低。如果不出意外，德国和美国会占据智能制造的引领地位，在技术标准和游戏规则上掌握话语权，最终构建系统性竞争力。日本会力争在

(3) 以上内容是在一定的假设基础上的理论分析研究，对于实际应用中光纤定位精度的提高还需要进行进一步的实验研究。

参考文献

- [1] 邢晓正, 胡红专, 褚家如. LAMOST 光纤定位技术 [J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(6): 596-600.
- [2] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. The large sky area multi-

object fiber spectroscopic telescope (LAMOST)[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12(9): 1197.

- [3] 李为民, 邢晓正, 俞巧云, 等. LAMOST 光纤定位单元定位精度检测技术研究 [J]. 光学技术, 2001, 27(2): 165-166.
- [4] 胡红专, 李为民, 翟超, 等. LAMOST 双回转光纤定位单元的零定位装置 [J]. 机械设计, 2001, 18(12): 24-25.
- [5] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014. 