

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.01.08

相接双星 LP UMa 轨道周期变化 研究的新进展

李迎港^{1,2}, 郑捷³, 陈天禄^{1,2}, 江林巧⁴, 鲍华^{1,2}, 索南达吉^{1,2}, 许超^{1,2}

(1. 西藏大学 宇宙线教育部重点实验室, 拉萨 850000; 2. 西藏大学 理学院 物理系, 拉萨 850000;
3. 中国科学院 国家天文台 光学天文重点实验室, 北京 100101; 4. 乐山师范学院 数理学院 物理系, 乐山
614000)

摘要: LP UMa 是一颗 g 波段亮度为 13.34 mag 的 W UMa 型相接双星, 1997 年首次被观测到, 至今已有超过 25 a 的观测时间跨度, 近 400 条极小时刻记录。多年来有数位研究者使用不同的数据和方法对其进行了研究, 得出了不同的结论。自 2022 年 12 月—2023 年 12 月, 对接双星 LP UMa 进行了 8 次观测, 得到了 11 个极小时刻; 同时从 TESS 数据库和 AAVSO 数据库中分别收集 130 和 35 个极小时刻, 以及来自文献的 214 个极小时刻。基于这 390 个极小时刻重新研究了 LP UMa 的轨道周期变化, 修正了之前作者关于该系统的轨道周期正在迅速增加和两子星之间存在快速的物质转移的结论。研究表明, LP UMa 轨道周期的快速增加其实是周期性变化的一部分, 很可能是第三天体的光时轨道效应引起了该系统 $O-C$ 曲线的周期性变化, 并算出第三天体的周期约为 41.7 a, 轨道偏心率约为 0.070 1, 证实了 LP UMa 很可能也是一个存在第三天体的晚型相接双星系统。

关键词: 双星; LP UMa; $O-C$; 第三天体; 光时轨道效应

中图分类号: P153

文献标识码: A

1 引 言

LP UMa (GSC 03822-01056) 位于大熊座 (Ursa Major), 其 $\alpha_{J2000}=10^{\text{h}} 33^{\text{m}} 57.79^{\text{s}}$, $\delta_{J2000}=+58^{\circ} 52' 15.55''$, g 波段星等约为 13.34 mag。LP UMa 最早由 Martin^[1] 与 Bíró^[2] 在观测类新星变星 DW UMa 时发现。最初, Martin 基于单波段观测数据认为它是一颗盾牌座 δ 型变星。随后 Bíró 通过 V 和 R 两个波段的观测, 首次发现了其光变曲线存在两个不

收稿日期: 2024-03-27; 修回日期: 2024-04-25

资助项目: 西藏大学研究生“高水平人才培养计划”(2021-GSP-S039), 西藏大学中央财政支持地方高校改革发展资金(00060858, 00060867-01, 00061082)

通讯作者: 郑捷, jiezheng@nao.cas.cn; 陈天禄, chentl@utibet.edu.cn

同的极小值,通过对光变曲线的分析,Biró 推断 LP UMa 为天琴座 β 型双星。2003 年,Csizmadia 等人^[3]首次给出了 LP UMa 的 V 和 R_c 两个波段完整的光变曲线,其光变曲线表现出正 O'Connell 效应,基于该光变曲线,使用 1998 年版的 Wilson-Devinney (W-D) 程序,他们对光变曲线进行了解轨分析。由于没有光谱信息,无法直接确定质量比,他们使用 q 搜索法,即比较不同质量比 q 下光变曲线拟合得到的残差来确定 q 值,发现质量比 $q = 0.885$ 时拟合残差最小。使用此质量比做初始值,进一步分析表明,LP UMa 是一个大质量比 ($q = 0.886$) 深度过相接系统 (相接度 $f = 0.57$),两子星表面的温度差高达 1 045 K。Csizmadia 等人同时给出了含第三光和无第三光模型解,含第三光模型中第三光对总光度的贡献高达 57% 左右。Csizmadia 等人还对 LP UMa 的轨道周期变化进行了分析,结果表明 LP UMa 的轨道周期正在以每世纪 11.6 s 的速率快速增加;他们认为 LP UMa 轨道周期的快速增加可能是由第三天体引起的光时轨道效应,也可能是由于两子星之间存在物质转移。2014 年,Vinod 等人^[4]对 LP UMa 进行了 B, V, R, I 四个波段的观测,采用与 Csizmadia 等人相同的质量比,对其光变曲线进行解轨分析,得到的结果表明 LP UMa 的相接度只有 14% 左右,两子星之间的温度差约为 873 K,第三光对光变曲线的贡献约为 45%,这与 Csizmadia 等人的结果有较大差异,但 Vinod 等人对此未作出任何解释。此外,Vinod 等人也对 LP UMa 的轨道周期进行了分析,结果表明 LP UMa 的轨道周期正在以每世纪 10.8 s 的速率快速增加。2013 年 1 月 11 日,Liao 等人^[5]利用中国科学院国家天文台兴隆观测站 85 cm 望远镜对 LP UMa 进行了观测,得到更加平滑和连续的 V, R, I 三个波段光变曲线。基于此数据,他们使用第四版 W-D 程序对 LP UMa 进行分析,同样使用 q 搜索法,但他们发现 $q = 0.8$ 附近的拟合残差最小,并且子星上存在热斑的解无法收敛。使用 $q = 0.8$ 作为初始值的测光结果表明,LP UMa 是一颗不同寻常的深度相接双星,相接度为 $(66.6 \pm 3.1)\%$,质量比高达 0.823 ± 0.003 ,两子星温差为 700 K,第三光的贡献高达 61% 左右,轨道周期每世纪增加 10.21 s,结果与 Csizmadia 等人的相差不大。Guo 等人^[6]在 2015 年 2 月用山东大学威海天文台的 1 m 望远镜观测了 LP UMa 完整的 B, V, R, I 光变数据,同样使用第四版的 W-D 程序及 q 搜索法,发现 $q = 0.3$ 时拟合残差获得了最小值,使用 $q = 0.3$ 作为初始值确定了主子星上有热斑的方案,却得到了与前人完全不同的结果:LP UMa 的相接度为 7.9%,质量比仅为 0.331,子星间的温差仅有 100 K 左右,且光变曲线解中没有第三光的贡献。Guo 等人结合前人的极小时刻重新分析了 LP UMa 的轨道周期变化,认为 LP UMa 的轨道周期在长期快速增加 (每世纪增加 9.32 s) 的基础上还存在一个 14.84 a 的周期性的变化。从 LP UMa 被发现以来,虽然很多研究者都对其进行了观测研究,但不同的研究者使用不同的数据和分析方法,分别给出了不同的研究结论。

本文在前人研究的基础上,利用 LP UMa 新的测光数据和凌星法系外行星搜寻卫星 (Transiting Exoplanet Survey telescope, TESS) 及美国变星观测者协会 (American Association of Variable Star Observers, AAVSO) 对 LP UMa 的观测数据,给出 LP UMa 新的光极小时刻数据,对 LP UMa 的轨道周期变化进行详细研究。第 2 章介绍研究中使用的数据来源;第 3 章分析 LP UMa 的轨道周期,对其周期变化进行解释,并计算出 LP UMa 中存在的第三天体轨道信息;另外还对西藏大学 80 cm 望远镜的性能进行了检测。

2 观测结果

2.1 地基光学望远镜观测

2022 年 12 月—2023 年 12 月, 我们使用国家天文台兴隆观测站^[7]的 85 cm 望远镜和 60 cm 望远镜对 LP UMa 开展 7 次观测, 详细的观测记录见表 1。两者的 CCD 相机和滤光片均放置在主焦点位置。在同一视场内, 选择目标附近两颗稳定的恒星 TYC 3822-646-1 ($\alpha_{J2000}=10^{\text{h}} 34^{\text{min}} 55.24^{\text{s}}$, $\delta_{J2000}=+58^{\circ} 55' 49.51''$) 和 TYC 3822-772-1 ($\alpha_{J2000}=10^{\text{h}} 34^{\text{min}} 47.25^{\text{s}}$, $\delta_{J2000}=+58^{\circ} 50' 01.27''$) 分别作为比较星和检验星。在 2023 年 12 月 9 日晚的观测中, 除了使用国家天文台兴隆观测站的望远镜, 我们还使用西藏大学的 80 cm 光学望远镜同时对该目标进行了观测, 观测记录也列在表 1 中。80 cm 光学望远镜位于西藏大学纳金校区 14 号教学楼楼顶, 于 2023 年 5 月份安装完成, 在其卡塞格林焦点位置放置 CCD 相机和滤光片。所有观测获得的图像均使用郑捷和江林巧^[8]的程序进行了处理, 并得到了光变曲线。图 1 展示了 2023 年 3 月 25 日观测处理后的光变曲线。并使用最小二乘法对光变曲线极值附近的点进行了抛物线拟合, 用蒙特卡洛方法, 对观测数据的时间、星等进行随机误差叠加, 并拟合得到各参数, 最后以参数的均值和标准差作为最终结果求得的光极小时刻及误差列于附表 A1 中。

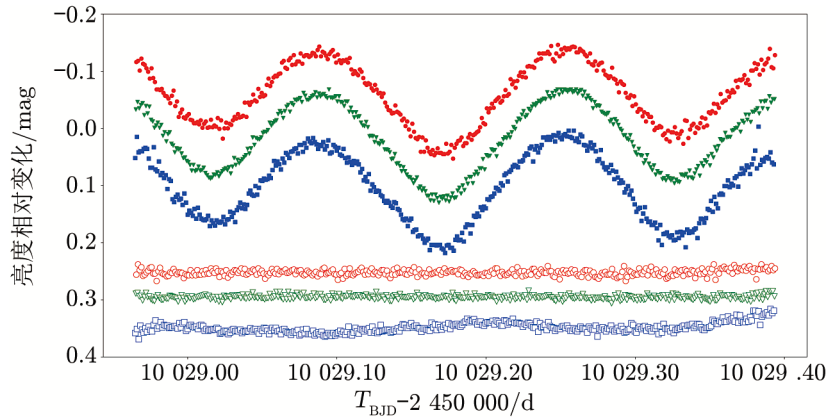
表 1 地基光学望远镜对 LP UMa 的观测记录

观测时间 (MJD)/d	望远镜	滤光片-曝光时间/s
59 917.756 1–59 917.918 7	XL60	V-30
59 918.673 5–59 918.925 4	XL60	V-30
60 011.765 6–60 011.899 6	XL85	V-10; R-10
60 028.464 1–60 028.892 8	XL60	V-30; R-20; I-15
60 029.462 5–60 029.895 6	XL60	V-30; R-20; I-15
60 287.762 3–60 287.928 3	XL85	V-30
60 304.719 8–60 304.933 8	XL85	V-30; R-25
60 287.787 9–60 288.001 3	TU80	V-20; R-20

注: XL60 和 XL85 分别代表国家天文台兴隆观测站的 60 cm 和 85 cm 望远镜, TU80 代表西藏大学 80 cm 望远镜。

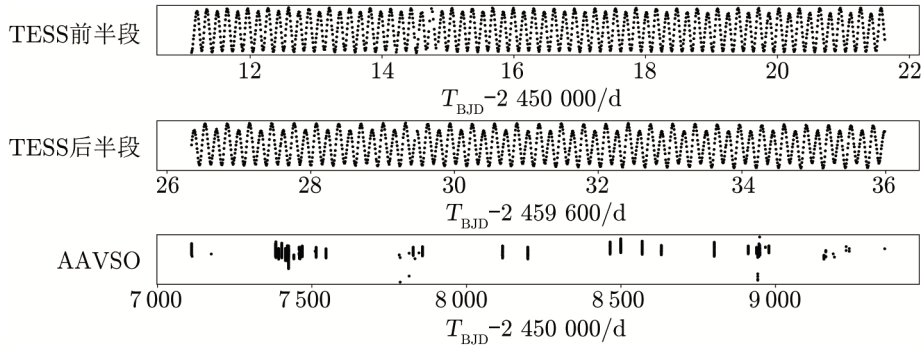
2.2 TESS 和 AAVSO 数据

为了获得更多的观测数据, 我们还对国内外各类时域巡天数据库进行了搜寻, 发现 TESS 任务和 AAVSO 的数据库中有 LP UMa 的观测数据, 分别从 Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST)^[9]和 AAVSO 网站^[10]下载了 LP UMa 的光变曲线数据, 如图 2 所示, 图中横坐标时间为 BJD。我们也利用最小二乘法对图 2 所示的 TESS 和 AAVSO 的光变曲线极值附近的点进行了抛物线拟合, 分别得到 130 个和 33 个新的极小时刻及对应的误差, 结果也列在附表 A1 中。



注：实心图形为 LP UMa 光变曲线，空心图形为比较星和检验星的差值。红、绿、蓝分别代表 I, R, V 波段。

图 1 2023 年 3 月 25 日兴隆 60 cm 望远镜的观测结果



注：TESS 的数据中间有约 25 d 空白，故分两部分展示。由于 AAVSO 数据时间跨度大，只展示了数据的时间分布，未展示光变曲线的细节

图 2 TESS 和 AAVSO 对 LP UMa 的观测数据^[9, 10]

3 轨道周期分析

3.1 线性历元研究历史

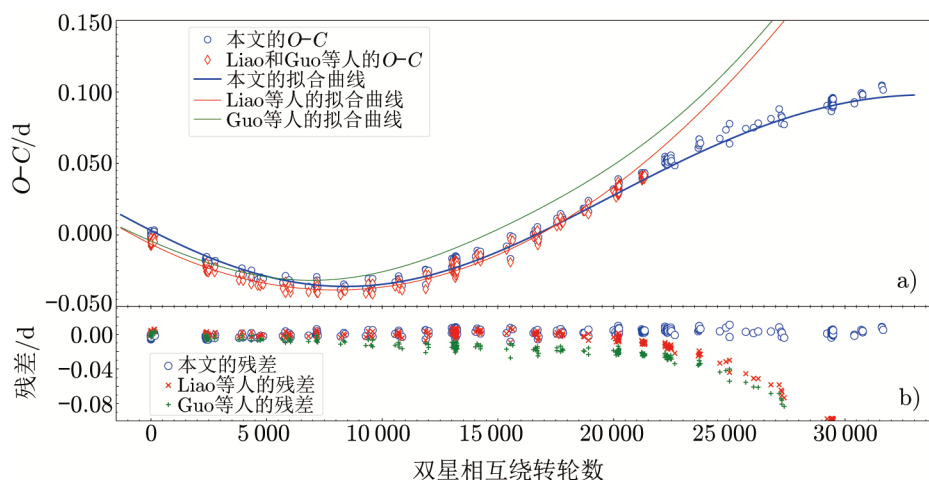
首次给出 LP UMa 线性历元公式的是 Bíró^[2]。1997 年 2 月，基于连续 4 个夜晚对 DW UMa 的 V 和 R 两个波段观测数据，Bíró 给出了 LP UMa 的线性历元公式： $\text{Min}(HJD) = 2\,450\,495.522\,2 (\pm 0.000\,3) + 0.309\,95 (\pm 0.000\,1) \text{Epoch}$ ，其中， $\text{Min}(HJD)$ 表示换算成日心儒略日的极小时刻， Epoch 表示圈数。该公式的一次项系数（即双星系统的轨道周期）与后来的研究结果差异较大。随后，Csizmadia 等人^[3]基于 45 个极小值时刻数据，给出线性历元公式： $\text{Min}(HJD) = 2\,450\,495.518\,9 + 0.309\,892\text{Epoch}$ ，这个轨道周期与后来的研究结果相近但偏小。2014 年，Vinod 等人^[4]发表了对 LP UMa 的研究，并基于 118 条极小时刻记录，推导出线性历元公式为： $\text{Min}(HJD) = 2\,455\,311.181\,94 (\pm 0.021\,1) +$

0.309 898 0 ($\pm 0.000\ 000\ 1$) *Epoch*, 该周期比 Csizmadia 等人的结果稍大。2015 年, Liao 等人^[5]使用与 Vinod 等人相同的轨道周期, 采用新的历元起点, 因此 Liao 等人的线性历元公式为: $\text{Min}(HJD) = 2\ 450\ 495.526 + 0.309\ 898\text{Epoch}$, Guo 等人^[6]则使用了与 Liao 等人完全相同的线性历元公式。

3.2 $O - C$ 图像的构建

$O - C$ 表示观测的极小时刻 (O 值) 与理论计算的极小时刻 (C 值) 之差, 对长时间跨度 $O - C$ 的值分析, 能反映出双星轨道周期的变化。为了对 LP UMa 的轨道周期进行全面的分析, 除了我们自己的观测数据和巡天测光数据拟合获得的光极小时刻, 我们还收集了前人发表的光极小时刻, 也列于附表之中。因此, 我们获得了时间跨度超过 25 a 共 390 个光极小时刻数据, 这些数据使我们可以对 LP UMa 的轨道周期变化进行详细的研究。

我们采用与 Liao 等人^[5]和 Guo 等人^[6]相同的线性历元公式计算了 LP UMa 的 $O - C$ 值, 结果见图 3。为了方便进行对比分析, 我们将 Liao 等人和 Guo 等人的结果也绘于同一图中。由图 3 可见, 相比于 Liao 等人和 Guo 等人的结果, LP UMa 的 $O - C$ 值近几年增速明显变慢, 并出现极大值趋势, 此时已无法用前人研究的抛物线来拟合 $O - C$ 图像, 而类似正弦的周期性曲线可以很好地拟合这种变化, 这表明此前研究发现的抛物线趋势很可能是周期性变化的一部分。最早 Csizmadia 等人^[3]对此做出过讨论, 但是由于当时的光极小数据时间跨度太小, 以至于还没有表现出周期性变化的趋势, 因此他们只能通过快速的轨道周期增加率来推测这可能是周期性变化的一部分, 而无法进行周期性变化的研究。



注: a) 为不同线性历元公式得出的 $O - C$ 及不同研究 $O - C$ 的拟合曲线; b) 为不同研究对 $O - C$ 的拟合残差。Liao 等人^[5]和 Guo 等人^[6]均使用相同的线性历元公式, 因此两次研究的 $O - C$ 相同, 但二者对 $O - C$ 的拟合公式不同, 因此拟合的曲线不一致, 导致拟合后的残差 (图 b)) 也有所差异。

图 3 Liao 等人和 Guo 等人与本次研究的结果对比

导致相接双星的 $O - C$ 曲线呈现周期性变化的原因很多, 比如拱线运动、周期性的磁活动、第三天体引起的光时轨道效应等^[31]。由于拱线运动仅出现在椭圆轨道的双星系统中,

且主次极小表现出的周期性变化在位相上相差 180° ，而 LP UMa 的轨道周期只有 0.31 d 左右，强大的潮汐相互作用会使其轨道圆化，且图 1 中的主次极小表现出完全相同的周期性变化趋势。因此，LP UMa 的 $O - C$ 曲线表现出的周期性变化不能用拱线运动来解释。考虑到前人对 LP UMa 解轨分析中均有第三天体存在的可能，所以我们更倾向于认为 LP UMa 的 $O - C$ 曲线周期性的变化由第三天体的光时轨道效应所引起，即在 LP UMa 的系统中，除了两颗子星，还有一个与该双星存在物理联系的第三天体。由于第三天体与双星距离远大于两子星之间的距离，因而不会破坏双星系统的结构。实质上第三天体与双星系统的质心可以看成是一个二体系统，在相互引力的作用下，双星系统和第三天体都要绕它们的公共质心作椭圆轨道运动，造成双星系统的光到达地球的时刻发生周期性的变化，因此观测上系统 $O - C$ 曲线也表现出周期性的变化。

3.3 LP UMa 的光时轨道效应

在相接双星中，第三天体的发现率很高^[32-34]。对于第三天体存在导致的光时轨道效应，可根据测光数据计算出第三天体的轨道参数，Irwin^[35]给出了如下理论计算公式：

$$O - C = A \left[\frac{1 - e^2}{1 + e \cos \nu} \sin(\nu + \omega) + e \sin \omega \right], \quad (1)$$

$$A = \frac{a \sin i}{2.59 \times 10^{10}}, \quad (2)$$

其中， e 为轨道偏心率， ω 为近星点经度， ν 为真近点角， A 为以 d 为单位的半振幅（与 $O - C$ 的单位保持一致）， a 为以 km 为单位的轨道半长轴。公式 (1) 中不显含时间，为了方便计算，需要将式 (1) 写为时间 t 或平近点角 M ($M = M_0 + kt$) 的显函数。真近点角与平近点角可通过偏近点角 E 联系起来，三者关系如下：

$$\tan \frac{\nu}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E}{2}, \quad (3)$$

$$M = E - e \sin E. \quad (4)$$

我们采用杨远贵的方法^[36]，利用 L-M 算法和式 (1) 对 LP UMa 的 $O - C$ 作非线性最小二乘法拟合，得到了第三天体的光时轨道效应参数 A 、 e 、 ω 、 T_0 、 P_3 、 $a_{12} \sin i$ ，结果列于表 2。图 3 的蓝色实线是我们用第三天体的光时轨道效应拟合的理论曲线，作为对比，我们将 Liao 等人和 Guo 等人的拟合曲线分别用红色实线和绿色实线标在同一幅图中。显然，蓝色曲线对整个 $O - C$ 的拟合好很多。因此，第三天体的光时轨道效应可能就是 LP UMa 的 $O - C$ 曲线存在变化的原因。

4 总结与展望

自 2000 年以来，有多位研究者对 LP UMa 进行了研究，发现其光变曲线极小时刻的 $O - C$ 曲线存在变化。由于前人所用的数据时间跨度不够长，他们都用抛物线拟合了 $O - C$

表 2 LP UMa 中第三天体的轨道参数

轨道参数	值	单位
A	$0.067\,0 \pm 0.000\,1$	d
e	$0.070\,1 \pm 0.000\,1$	/
P_3	$41.698\,0 \pm 0.028\,7$	a
$T_{0,\text{BJD}}$	$2\,450\,522.1 \pm 1\,694.3$	d
ω	$244.364\,3 \pm 0.137\,6$	($^\circ$)
$a_{12} \sin i$	$11.599\,7 \pm 0.173\,1$	AU

注: A 为光时轨道效应的半振幅, e 为第三天体轨道的偏心率, P_3 为第三天体的轨道周期, $T_{0,\text{BJD}}$ 为食双星经过椭圆轨道的近星点时刻, ω 为从交升点算起的近星点经度, $a_{12} \sin i$ 为轨道半长轴 a 与倾角 i 正弦的乘积。

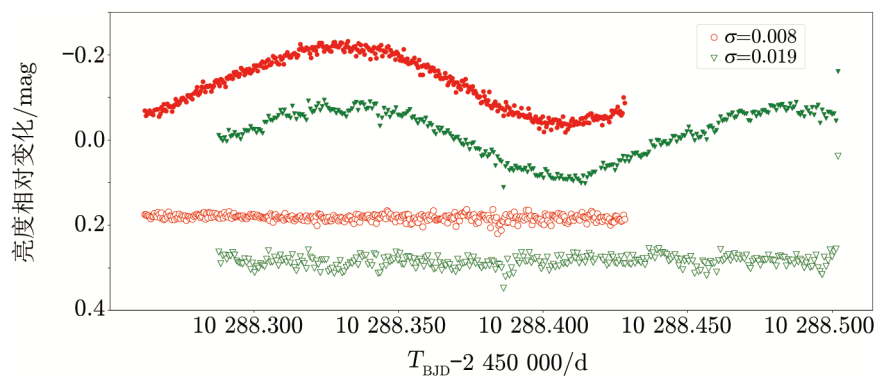
图像, 得出 LP UMa 系统具有高轨道增加率和高物质转移率的结论。本文基于最新的地基望远镜测光观测数据、空间望远镜测光巡天数据以及前人文献发表的数据, 获得近 400 个极小时刻。对 LP UMa 的轨道周期进行了重新分析, 得出了与此前研究完全不同的结论, 即该系统的 $O-C$ 曲线存在周期性变化而不是开口向上的抛物线变化。修正了前人基于抛物线做出的高轨道增加率和两子星之间高物质转移率的结论, 基本确定了 LP UMa 的 $O-C$ 变化是由其中第三天体的存在导致的, 并利用 Irwin 的理论公式和杨远贵的计算方法, 得出 LP UMa 中第三天体的轨道参数。

众所周知, W UMa 型相接双星的形成至今是双星物理研究领域尚未解决的难题。作为一类晚型相接双星系统, 其子星的演化时标非常长, 且磁星风引起的角动量损失的时标也非常长, 因此, 子星很难通过自身的演化或磁星风引起的角动量损失机制演化达到相接状态。近年来, 许多研究者提出晚型相接双星很可能都是三星系统, 因为第三天体在相接双星的形成早期动力学相互作用时或形成后的演化中带走了大量角动量, 大大加速了晚型相接双星的形成与演化。本文通过对 LP UMa 的轨道周期进行研究表明, LP UMa 很可能存在近距离的伴星天体, 再次证明了第三天体广泛存在于 W UMa 型相接双星系统中。

此外, 本文还测试了西藏大学新投入使用的 80 cm 光学望远镜在测光观测工作中的性能。2023 年 12 月 9 日, 80 cm 光学望远镜的观测结果拟合出的极小时刻与同一时间兴隆观测站 85 cm 望远镜的观测结果相当。图 4 为 2023 年 12 月 9 日兴隆站 85 cm 望远镜与西藏大学 80 cm 望远镜在 V 波段对 LP UMa 的观测结果对比, 两台望远镜对其极小时刻的观测几乎一致, 此外, 两台望远镜对 LP UMa 的观测起止时间有所不同, 这主要由河北承德兴隆县与西藏拉萨城关区两地理位置差异所导致。结果说明西藏大学的 80 cm 望远镜能可靠地完成此类观测任务; 西藏大学 80 cm 光学望远镜的投入使用, 能更好地挖掘西藏的光学天文潜力, 为中国天文事业添砖加瓦。

致谢

感谢兴隆 85 cm/60 cm 望远镜全体工作人员的支持, 感谢西藏大学 80 cm 光学望远镜



注：实心图形为 LP UMa 的光变曲线，空心图形为比较星和检验星的差值，并计算了差值的标准差。红、绿分别代表 XL85 和 TU80 的观测结果。

图 4 TU80 和 XL85 对 LP UMa 的观测结果对比

全体人员的支持。本文部分工作得到中国科学院光学天文重点实验室开放课题资助。

参考文献：

- [1] Martin B E. IBVS, 2000, 4880: 1
- [2] Bíró I B. IBVS, 2000, 4929: 1
- [3] Csizmadia S, Bíró I B, Borkovits T. A&A, 2003, 403(2): 637
- [4] Vinod P, Pandey J C, Patel M K, et al. Ap&SS, 2014, 353: 575
- [5] Liao W P, Qian S B, Zhao E G, et al. PASJ, 2015, 67(3): 48
- [6] Guo D F, Li K, Hu S M, et al. New Astronomy, 2016, 44: 29
- [7] <http://www.xinglong-naoc.cn/>, 2024
- [8] 郑捷, 江林巧. 天文研究与技术, 2023, 20(01): 83
- [9] <https://archive.stsci.edu/>, 2024
- [10] <https://www.aavso.org/>, 2024
- [11] Bíró I B, Borkovits T. IBVS, 2000, 4967: 3
- [12] Paschke A, Brat L. Open Eur J Variable Stars, 2006, 23: 13
- [13] Borkovits T, Bíró I B, Kovacs T. IBVS, 2001, 5206: 2
- [14] Borkovits T, Bíró I B, Hegedüs T, et al. IBVS, 2002, 5313: 3
- [15] Borkovits T, Bíró I B, Csizmadia S, et al. IBVS, 2004, 5579: 2
- [16] Borkovits T, Bíró I B, Hegedüs T, et al. IBVS, 2003, 5434:3
- [17] Bíró I B, Borkovits T. IBVS, 2006, 5684: 3
- [18] Bíró I B, Borkovits T. IBVS, 2007, 5753: 3
- [19] Hubscher J, Paschke A, Walter F. IBVS, 2006, 5731: 20
- [20] Hubscher J, Steinbach H, Walter F. IBVS, 2009, 5874: 8
- [21] Borkovits T, Van C P, Lampens P, et al. IBVS, 2011, 5835: 4
- [22] Kazuo N. VSOLJ, 2009, 0048: 8
- [23] Hubscher J, Lehmann P B, Monninger G, et al. IBVS, 2010, 5918: 11
- [24] Nelson R H. IBVS, 2010, 5929: 3
- [25] Borkovits T, Bíró I B, Hegedüs T, et al. IBVS, 2011, 5979: 3

- [26] Hubscher J, Monninger G. IBVS, 2011, 5959: 9
 [27] Hoňková K, Juryšek J, Lehký M, et al. OEJV, 2013, 160: 141
 [28] Zasche P, Uhlar R, Kucakova H, et al. IBVS, 2011, 6007: 9
 [29] Hubscher J, Lehmann P B, Walter F. IBVS, 2012, 6010: 15
 [30] 江林巧. 博士论文, 云南: 中国科学院云南天文台, 2015
 [31] 余云霞. 博士论文, 湖南: 湘潭大学, 2016
 [32] Pribulla T, Rucinski S M. AJ, 2006, 131(6): 2986
 [33] D'Angelo C, van Kerkwijk M H, Rucinski S M. AJ, 2006, 132: 650
 [34] Rucinski S M, Pribulla T, van Kerkwijk M H. AJ, 2007, 134: 2353
 [35] Irwin J B. ApJ, 1952, 116: 211
 [36] 杨远贵. 中国科学: G辑, 2009, 4: 4

附录 A

表 A1 本研究中所用极小时刻数据

极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献	极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献	极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献
50 495.522 6	0.000 4	I	[11]	55 311.182 7	0.010 0	II	[4]	59 612.816 4	0.000 4	I	[9]
50 495.523 1	0.000 6	I	[11]	55 312.252 3	0.010 0	I	[4]	59 612.973 3	0.000 3	II	[9]
50 495.675 7	0.001 0	II	[11]	55 342.171 8	0.010 0	II	[4]	59 613.126 7	0.000 5	I	[9]
50 495.678 7	0.001 0	II	[11]	55 679.183 5	0.010 0	I	[4]	59 613.284 0	0.000 3	II	[9]
50 496.602 7	0.002 0	II	[11]	55 621.392 2	0.000 3	II	[27]	59 613.436 8	0.000 2	I	[9]
50 496.605 7	0.001 0	II	[11]	55 642.622 5	0.000 4	I	[27]	59 613.593 6	0.000 4	II	[9]
50 496.759 7	0.000 2	I	[11]	55 644.327 6	0.000 3	II	[28]	59 613.747 3	0.000 5	I	[9]
50 496.759 9	0.000 3	I	[11]	55 650.368 9	0.000 7	I	[29]	59 613.903 0	0.000 4	II	[9]
50 497.688 8	0.000 7	I	[11]	55 669.429 0	0.001 0	II	[27]	59 614.056 7	0.000 4	I	[9]
50 497.689 8	0.000 8	I	[11]	55 669.582 6	0.001 0	I	[27]	59 614.213 7	0.000 2	II	[9]
50 498.464 0	0.000 9	II	[11]	55 674.389 7	0.001 4	II	[29]	59 614.366 5	0.000 2	I	[9]
50 498.467 8	0.000 7	II	[11]	55 688.483 6	0.002 3	I	[29]	59 614.521 9	0.000 3	II	[9]
50 498.619 3	0.000 4	I	[11]	55 933.313 1	0.000 2	I	[5]	59 614.676 7	0.000 3	I	[9]
50 498.619 8	0.000 2	I	[11]	55 935.329 8	0.000 3	II	[5]	59 614.832 3	0.000 2	II	[9]
50 499.704 7	0.000 3	II	[11]	55 984.290 7	0.000 3	II	[27]	59 614.986 2	0.000 2	I	[9]
50 500.633 4	0.000 8	II	[11]	55 984.452 8	0.000 6	I	[27]	59 615.143 1	0.000 3	II	[9]
50 539.530 7	0.002 0	I	[11]	56 002.422 9	0.010 0	I	[29]	59 615.296 3	0.000 3	I	[9]
50 540.459 4	0.000 5	I	[11]	56 011.101 6	0.000 4	I	[5]	59 615.452 8	0.000 3	II	[9]
50 547.584 8	0.000 8	I	[11]	56 015.128 8	0.000 5	I	[5]	59 615.606 3	0.000 4	I	[9]
51 228.412 7	0.000 5	I	[11]	56 290.326 1	0.000 5	I	[5]	59 615.763 1	0.000 3	II	[9]
51 228.568 5	0.000 1	II	[11]	56 304.271 6	0.000 3	I	[5]	59 615.915 8	0.000 3	I	[9]
51 236.469 9	0.000 0	I	[11]	56 356.486 2	0.000 3	II	[27]	59 616.072 8	0.000 3	II	[9]
51 236.626 0	0.000 3	II	[11]	56 356.649 7	0.000 3	I	[27]	59 616.226 9	0.000 2	I	[9]
51 237.399 2	0.000 4	I	[11]	56 692.587 5	0.000 5	I	[27]	59 616.382 1	0.000 4	II	[9]
51 237.555 4	0.000 2	II	[11]	56 718.462 1	0.000 8	II	[27]	59 616.536 0	0.000 3	I	[9]

(续表)

极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献	极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献	极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献
51 238.332 2	0.000 6	I	[11]	56 728.375 6	0.010 0	II	[12]	59 616.691 8	0.000 3	II	[9]
51 238.480 7	0.010 0	II	[11]	56 753.635 2	0.000 2	I	[6]	59 616.846 0	0.000 3	I	[9]
51 242.357 3	0.000 2	I	[11]	56 754.564 7	0.000 3	I	[6]	59 617.002 7	0.000 4	II	[9]
51 242.515 1	0.000 2	II	[11]	56 754.722 2	0.000 2	II	[6]	59 617.156 0	0.000 4	I	[9]
51 250.413 2	0.000 5	I	[11]	56 754.875 9	0.000 2	I	[6]	59 617.312 1	0.000 2	II	[9]
51 250.566 7	0.010 0	II	[11]	56 755.494 7	0.000 2	I	[6]	59 617.465 6	0.000 2	I	[9]
51 262.345 7	0.001 0	II	[11]	56 755.657 8	0.000 3	II	[6]	59 617.622 2	0.000 3	II	[9]
51 262.499 7	0.001 0	I	[11]	56 755.804 2	0.000 4	I	[6]	59 617.775 9	0.000 4	I	[9]
51 263.427 8	0.000 1	I	[11]	56 755.961 6	0.000 2	II	[6]	59 617.932 4	0.000 3	II	[9]
51 271.950 7	0.010 0	II	[12]	56 756.427 5	0.000 2	I	[6]	59 618.085 3	0.000 4	I	[9]
51 349.423 7	0.001 0	II	[11]	56 756.581 8	0.000 2	II	[6]	59 618.242 5	0.000 2	II	[9]
51 356.400 9	0.000 5	I	[11]	56 757.511 7	0.000 5	II	[6]	59 618.395 6	0.000 7	I	[9]
51 675.430 7	0.000 8	II	[11]	56 758.750 8	0.000 2	II	[6]	59 618.551 8	0.000 2	II	[9]
51 715.411 7	0.010 0	II	[11]	56 758.904 2	0.000 2	I	[6]	59 618.705 1	0.000 2	I	[9]
51 731.367 9	0.000 2	I	[13]	56 759.522 9	0.000 7	I	[6]	59 618.861 9	0.000 3	II	[9]
51 840.603 6	0.000 3	II	[13]	56 760.453 7	0.000 2	I	[6]	59 619.014 8	0.000 2	I	[9]
51 842.624 3	0.000 8	I	[13]	56 760.612 4	0.000 3	II	[6]	59 619.171 9	0.000 3	II	[9]
51 925.360 7	0.001 0	I	[13]	56 760.764 2	0.000 2	I	[6]	59 619.324 1	0.000 4	I	[9]
51 958.363 5	0.000 3	II	[13]	56 760.921 5	0.000 3	II	[6]	59 619.482 5	0.000 3	II	[9]
51 967.508 5	0.000 4	I	[13]	56 761.386 3	0.000 3	I	[6]	59 619.635 0	0.000 5	I	[9]
52 000.356 7	0.000 5	I	[13]	56 761.541 7	0.000 4	II	[6]	59 619.791 3	0.000 3	II	[9]
52 263.457 4	0.000 2	I	[14]	56 761.693 7	0.000 2	I	[6]	59 619.944 2	0.000 3	I	[9]
52 298.480 7	0.001 0	I	[14]	56 761.851 0	0.000 2	II	[6]	59 620.101 6	0.000 3	II	[9]
52 298.626 7	0.001 0	II	[14]	56 762.004 4	0.000 5	I	[6]	59 620.254 0	0.000 3	I	[9]
52 345.423 9	0.000 8	II	[15]	56 762.470 9	0.000 4	II	[6]	59 620.411 8	0.000 4	II	[9]
52 345.582 2	0.000 4	I	[15]	56 763.553 0	0.000 2	I	[6]	59 620.564 2	0.000 3	I	[9]
52 347.439 4	0.000 1	I	[14]	56 764.482 3	0.000 2	I	[6]	59 620.721 3	0.000 5	II	[9]
52 347.595 7	0.000 5	II	[14]	56 764.640 7	0.000 3	II	[6]	59 620.874 0	0.000 3	I	[9]
52 366.340 8	0.000 2	I	[14]	56 765.412 7	0.000 2	I	[6]	59 621.031 7	0.000 4	II	[9]
52 366.497 7	0.001 0	II	[14]	56 765.572 3	0.000 2	II	[6]	59 621.183 4	0.000 4	I	[9]
52 607.595 7	0.001 0	II	[16]	56 766.501 4	0.000 2	II	[6]	59 621.341 1	0.000 3	II	[9]
52 709.398 7	0.000 3	I	[16]	57 070.364 7	0.000 6	I	[12]	59 621.493 0	0.000 2	I	[9]
52 716.376 7	0.010 0	II	[16]	57 077.178 7	0.000 4	I	[6]	59 626.451 1	0.000 3	I	[9]
52 716.526 5	0.000 8	I	[16]	57 077.335 4	0.000 3	II	[6]	59 626.610 1	0.000 7	II	[9]
52 721.332 7	0.000 6	II	[16]	57 081.828 3	0.000 3	I	[6]	59 626.762 0	0.000 3	I	[9]
52 721.483 5	0.000 1	I	[16]	57 082.757 6	0.000 2	I	[6]	59 626.920 1	0.000 2	II	[9]
52 724.429 1	0.010 0	II	[16]	57 082.913 7	0.000 2	II	[6]	59 627.071 4	0.000 3	I	[9]
52 730.470 5	0.000 3	I	[16]	57 083.068 0	0.000 4	I	[6]	59 627.230 3	0.000 2	II	[9]
53 036.648 3	0.000 4	I	[17]	57 083.843 6	0.000 2	II	[6]	59 627.380 8	0.000 2	I	[9]
53 080.501 9	0.000 3	II	[18]	57 092.830 2	0.000 5	II	[6]	59 627.539 3	0.000 3	II	[9]

(续表)

极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献	极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献	极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献
53 095.375 7	0.001 0	II	[15]	57 096.703 9	0.000 1	I	[6]	59 627.690 8	0.000 2	I	[9]
53 375.521 9	0.000 5	II	[17]	57 096.859 3	0.000 2	II	[6]	59 627.849 8	0.000 3	II	[9]
53 407.448 2	0.000 9	II	[19]	57 102.591 2	0.000 6	I	[6]	59 628.001 5	0.000 2	I	[9]
53 443.546 1	0.000 7	I	[18]	57 109.720 5	0.000 2	I	[6]	59 628.159 5	0.000 2	II	[9]
53 451.448 0	0.000 4	II	[18]	57 109.875 7	0.000 5	II	[6]	59 628.311 6	0.000 4	I	[9]
53 465.391 7	0.003 0	II	[17]	57 110.649 2	0.000 3	I	[6]	59 628.469 3	0.000 4	II	[9]
53 465.555 2	0.002 5	I	[17]	57 110.650 7	0.000 8	I	[10]	59 628.621 1	0.000 3	I	[9]
53 767.393 8	0.002 0	I	[18]	57 110.804 6	0.000 3	II	[6]	59 628.779 4	0.000 3	II	[9]
53 814.346 5	0.001 1	II	[19]	57 110.805 2	0.000 4	II	[10]	59 628.930 8	0.000 2	I	[9]
53 815.584 2	0.000 4	II	[18]	57 382.438 8	0.001 1	I	[10]	59 629.089 1	0.000 2	II	[9]
53 819.455 3	0.000 2	I	[18]	57 382.597 5	0.000 7	II	[10]	59 629.241 0	0.000 2	I	[9]
53 822.401 9	0.000 3	II	[18]	57 383.369 1	0.001 3	I	[10]	59 629.399 4	0.000 3	II	[9]
53 861.444 3	0.000 4	II	[18]	57 383.525 4	0.000 7	II	[10]	59 629.550 8	0.000 3	I	[9]
54 173.523 1	0.001 5	II	[20]	57 402.428 5	0.000 9	II	[10]	59 629.710 2	0.000 3	II	[9]
54 176.457 4	0.000 8	I	[21]	57 402.584 6	0.000 9	I	[10]	59 629.860 6	0.000 2	I	[9]
54 176.621 8	0.001 0	II	[21]	57 402.738 5	0.000 8	II	[10]	59 630.019 0	0.000 3	II	[9]
54 214.425 3	0.000 8	II	[21]	57 410.328 2	0.000 9	I	[12]	59 630.170 7	0.000 3	I	[9]
54 214.584 8	0.001 0	I	[21]	57 410.485 4	0.000 7	II	[12]	59 630.328 0	0.000 4	II	[9]
54 527.274 6	0.010 0	I	[22]	57 414.516 5	0.000 3	II	[10]	59 630.480 5	0.000 3	I	[9]
54 528.054 2	0.010 0	II	[22]	57 419.473 8	0.000 2	II	[10]	59 630.639 1	0.000 2	II	[9]
54 544.477 6	0.000 5	II	[21]	57 420.559 3	0.000 1	I	[10]	59 630.790 5	0.000 2	I	[9]
54 544.629 8	0.001 0	I	[21]	57 420.709 4	0.000 6	II	[10]	59 630.948 5	0.000 5	II	[9]
54 547.110 9	0.010 0	I	[22]	57 422.571 9	0.000 2	II	[10]	59 631.100 1	0.000 2	I	[9]
54 552.065 7	0.010 0	I	[22]	57 422.727 8	0.000 2	I	[10]	59 631.259 0	0.000 3	II	[9]
54 552.226 2	0.010 0	II	[22]	57 423.502 0	0.000 1	II	[10]	59 631.410 6	0.000 4	I	[9]
54 554.082 7	0.010 0	II	[22]	57 423.658 3	0.000 1	I	[10]	59 631.569 2	0.000 4	II	[9]
54 561.052 6	0.010 0	I	[22]	57 424.585 8	0.000 2	I	[10]	59 631.720 2	0.000 3	I	[9]
54 572.049 1	0.010 0	II	[22]	57 453.716 8	0.010 0	I	[12]	59 631.878 4	0.000 3	II	[9]
54 572.674 1	0.000 4	II	[6]	57 460.692 8	0.000 2	II	[10]	59 632.029 2	0.000 2	I	[9]
54 572.830 5	0.000 6	I	[6]	57 462.706 0	0.000 5	I	[10]	59 632.188 1	0.000 4	II	[9]
54 573.603 1	0.000 3	II	[6]	57 468.746 2	0.002 8	II	[10]	59 632.338 5	0.000 3	I	[9]
54 573.760 4	0.000 4	I	[6]	57 513.678 1	0.078 3	II	[10]	59 632.498 0	0.000 3	II	[9]
54 574.689 4	0.000 3	I	[6]	57 827.927 1	0.001 3	II	[10]	59 632.649 7	0.000 3	I	[9]
54 575.619 3	0.000 2	I	[6]	57 839.395 0	0.010 0	II	[12]	59 632.808 5	0.000 5	II	[9]
54 575.772 4	0.000 4	II	[6]	57 839.555 5	0.010 0	I	[12]	59 632.959 2	0.000 2	I	[9]
54 576.084 9	0.010 0	II	[22]	57 840.326 0	0.000 8	II	[12]	59 633.117 8	0.000 4	II	[9]
54 576.703 6	0.000 6	II	[6]	57 840.485 1	0.000 6	I	[12]	59 633.269 9	0.000 8	I	[9]
54 577.949 6	0.010 0	II	[22]	57 857.836 7	0.001 0	I	[10]	59 633.427 9	0.000 3	II	[9]
54 578.105 0	0.010 0	I	[22]	58 116.914 7	0.025 8	I	[10]	59 633.579 5	0.000 3	I	[9]
54 578.719 5	0.000 2	I	[6]	58 198.733 9	0.005 2	I	[10]	59 633.737 8	0.000 3	II	[9]

(续表)

极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献	极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献	极小时刻 BJD-2400000	误差	极小 类型	参考 文献
54 579.030 4	0.010 0	I	[22]	58 247.378 2	0.010 0	I	[12]	59 633.889 8	0.000 4	I	[9]
54 579.801 4	0.000 4	II	[6]	58 247.546 2	0.010 0	II	[12]	59 634.048 3	0.000 2	II	[9]
54 581.037 8	0.010 0	II	[22]	58 464.937 3	0.028 4	I	[10]	59 634.199 0	0.000 3	I	[9]
54 581.661 5	0.000 3	II	[6]	58 568.753 8	0.001 7	I	[10]	59 634.356 9	0.000 4	II	[9]
54 581.815 4	0.000 7	I	[6]	58 630.736 6	0.003 1	I	[10]	59 634.510 0	0.000 5	I	[9]
54 582.750 2	0.000 3	I	[6]	58 801.957 5	0.016 8	II	[10]	59 634.667 2	0.000 4	II	[9]
54 583.993 2	0.010 0	I	[22]	58 911.824 1	0.004 1	I	[10]	59 634.819 1	0.000 2	I	[9]
54 584.759 9	0.000 5	II	[6]	58 938.780 7	0.013 7	I	[10]	59 634.977 7	0.000 8	II	[9]
54 586.619 8	0.000 3	II	[6]	58 946.676 5	0.001 7	II	[10]	59 635.129 4	0.000 3	I	[9]
54 586.777 5	0.000 4	I	[6]	58 948.696 3	0.001 8	I	[10]	59 635.287 0	0.000 5	II	[9]
54 587.091 4	0.010 0	I	[22]	58 978.751 3	0.001 6	I	[10]	59 635.438 5	0.000 3	I	[9]
54 587.707 8	0.000 4	I	[6]	59 553.935 5	0.000 3	I	[12]	59 635.596 7	0.000 3	II	[9]
54 591.736 3	0.000 3	I	[6]	59 611.106 8	0.004 1	II	[9]	59 635.748 7	0.000 3	I	[9]
54 592.665 3	0.000 4	I	[6]	59 611.267 6	0.000 3	I	[9]	59 635.907 3	0.000 4	II	[9]
54 592.979 3	0.010 0	I	[22]	59 611.424 3	0.000 4	II	[9]	59 918.378 3	0.000 6	I	—
54 594.676 1	0.000 3	II	[6]	59 611.576 9	0.000 3	I	[9]	59 919.306 8	0.000 4	I	—
54 595.456 2	0.001 1	I	[20]	59 611.734 0	0.000 4	II	[9]	60 012.283 8	0.000 3	I	—
54 598.705 2	0.000 4	II	[6]	59 611.887 5	0.000 2	I	[9]	60 029.017 4	0.001 2	I	—
54 844.461 7	0.001 5	II	[23]	59 612.040 6	0.010 0	II	[12]	60 029.170 2	0.000 5	II	—
54 866.314 6	0.003 1	I	[23]	59 612.043 6	0.000 2	II	[9]	60 029.327 4	0.000 7	I	—
54 884.751 3	0.000 3	II	[24]	59 612.197 2	0.000 4	I	[9]	60 030.099 4	0.001 0	II	—
54 910.317 7	0.001 3	I	[25]	59 612.200 9	0.010 0	I	[12]	60 030.256 7	0.000 6	I	—
54 910.469 3	0.001 1	II	[25]	59 612.353 8	0.000 3	II	[9]	60 288.408 4	0.000 3	I	—
54 910.629 4	0.001 5	I	[25]	59 612.506 6	0.000 7	I	[9]	60 288.406 9	0.000 1	I	—
55 260.352 2	0.001 1	II	[26]	59 612.663 3	0.000 2	II	[9]	60 305.293 6	0.000 1	II	—

Progress of the Research on the Orbital Period Variation of the Contact Binary LP UMa

LI Yinggang^{1,2}, ZHENG Jie³, CHEN Tianlu^{1,2}, JIANG Linqiao⁴,
BAO Hua^{1,2}, Suonan-Daji^{1,2}, XU Chao^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Cosmic Rays (Tibet University), Ministry of Education, Lhasa 850000, China; 2. Department of Physics, College of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China; 3. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. College of Mathematics and Physics, Leshan Normal University, Leshan 614000, China)

Abstract: LP UMa is a W UMa type binary star with a brightness of 13.34 mag in the g-band. It has been observed for over 25 years since its first observation in 1997, with nearly 400 records of minimum moments. Over the years, multiple researchers have used different data and methods to study it, and have come to different research conclusions. Eight new observations have been done for the contact binary LP UMa by ground-based optical telescopes from December 2022 to December 2023, resulting in 11 determined times of light minimum in this paper. 130 and 35 times of light minimum were derived from the TESS database and the American Association of Variable Stars Observers (AAVSO) database respectively, with an additional 214 minimum moments from literatures. Based on the total of 390 minimum moments mentioned above, the orbital period change of LP UMa was restudied, revising the previous conclusion that the rapid increase in the orbital period of the system is due to rapid material transfer between the binary stars. This research indicates that the rapid increase in the orbital period of LP UMa is actually part of the periodic variation, most likely caused by the optical time orbit effect of a third celestial body. We calculated that the period of the third celestial body is about 41.7 years, and the orbital eccentricity is about 0.070 1, confirming that LP UMa is highly likely a late-type connected binary system with a third celestial body.

Key words: binary; LP UMa; $O - C$; third body; light travel time effect