

基于TESS数据的早型食双星HD190967、 HD35921、HD228854和HD100213轨道周期 变化的分析研究*

张玉豪¹ 刘进忠^{2†} 刘荷蕾^{1‡} 吕国梁² 张余²

(1 新疆大学物理科学与技术学院 乌鲁木齐 830046)

(2 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

摘要 HD190967、HD35921、HD228854和HD100213都是O型或B型的早型双星, 轨道周期分别为6.519 d、4.0024 d、1.8855 d和1.3872 d, 它们都属于长周期双星. 这类双星数目少, 且难以获得完整的光变曲线. TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)空间望远镜的长时标、短曝光和高精度光度测量为这4颗源提供了优质的数据. 利用从TESS获取的光极小时刻和历史数据, 对这4颗早型双星的轨道周期进行了分析研究. 研究表明4颗源的轨道周期都有长期增加的趋势, HD228854和HD100213的轨道周期除了长期增加外还叠加了正弦变化. 分析发现HD190967、HD228854和HD100213这3颗恒星轨道周期增加的原因是伴星与主星间的物质交流造成的, HD35921轨道周期增加的原因是主星星风损失. 目前HD228854和HD100213的轨道周期正弦变化比较合理的解释是由于第三天体影响导致的光时轨道效应.

关键词 双星; 掩食; 技术: 测光, 恒星: 早型星, 方法: 数据分析

中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

早型星是光谱型为O、B和A型的恒星, 它们具有质量大、温度高、光度强的特征^[1], 同时也是中子星、超新星、黑洞等致密天体的前身星^[2-3]. 早型星相对于中小质量恒星有演化速度快、寿命短和数量少等特点^[4-5]. 大质量早型星有很强的星风, 并且部分大质量恒星会以超新星爆发方式结束生命, 这能补充周围气体云中的物质, 在这些气体云中会形成新一代恒星^[6], 并推动了星系的化学演化^[7].

在早型星中双星比例非常高, 56%的O型恒星可能是双星^[8]. 双星的演化受到伴星的影响, 与单星的演化有很大的不同^[9]. 在双星系统中, 质量较大的主星会随着演化而膨胀, 超出洛希瓣的范围, 从而与质量较小的伴星发生物质交流^[10]. 质量较大的主星可能会失去其大部分包层和原始质量, 而较小的伴星则会增加质量和角动量, 这会激发其内部的混合过程, 并改变其演化轨迹^[11]. 目前的研究表明, 超过70%的大质量恒星将与伴星发生物质交流或并合, 从而产生一些特殊现象, 如X射线双星

2023-05-06收到原稿, 2023-08-21收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U2031204)、中国科学院西部之光项目(2022-XBQNXZ-013)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01E86)、新疆维吾尔自治区天山英才培养计划(2023TSYCCX0101)资助

[†]liujinzh@xao.ac.cn

[‡]heleiliu@xju.edu.cn

和伽马射线暴等现象^[8]. 主星的演化阶段影响了双星系统的演化性质和物质交流过程. 根据主星的不同核燃烧阶段, 双星的演化可分为3种情况: Case A (主星中心氢燃烧时发生物质转移), Case B (主星氢壳层燃烧时发生物质转移)和Case C (主星中心氢燃烧时发生物质转移)^[12].

双星系统中的主星与伴星相互绕行时, 由于轨道平面与观测视线接近平行, 当一颗恒星从另一颗恒星前面经过, 遮挡了部分或全部的光线, 造成双星系统的光度发生周期性的变化, 周期性变化所需的时间即为轨道周期. 1979年Hartigan等^[13]对HD190967进行测光观测得到其轨道周期为6.519 d. 1968年Mayer^[14]对HD35921进行测光观测得到其轨道周期为4.0024 d. 1964年Landolt^[15]对HD228854进行测光观测得到其轨道周期为1.8855 d. 1928年Oosterhoff^[16]对HD100213进行测光观测得到其轨道周期为1.3872 d. TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)空间望远镜对于这4颗源都拍摄了长时标、短曝光和高精度的光变曲线.

目前对轨道周期变化研究的主流方式为O-C分析. 对掩食双星进行测光观测, 获得其光变曲线中的光极小时刻值 O (Observed), 同时可以通过双星的历元公式计算出理论上的光极小时刻值 C (Calculated). 光极小时刻的观测值 O 与理论值 C 之差, 即O-C曲线^[17]. 通过测光观测, 对双星的极小时刻长期积累, 在O-C曲线中就可以得出双星轨道周期变化. 如果O-C曲线随时间的变化是规律的, 且这种规律变化不是由误差造成的, 就可以去探寻这种规律变化背后的物理现象, 例如: 双星之间的质量传递、系统角动量的损失、系统中另一个天体的存在等^[18]. 2016年Zasche等^[19]使用位于智利La Silla天文台的丹麦1.54 m望远镜, 首次对大麦哲伦云中的8个早型双星进行测光观测, 并通过O-C曲线分析, 去研究其轨道周期变化, 结果发现这8颗双星系统都可能存在第三天体. 所以对早型双星进行O-C曲线分析, 能更好地了解早型双星轨道变化的物理机制.

HD190967、HD35921、HD228854和HD100213是光谱型为O型和B型的早型双星, 同时它们也是早型双星中为数不多有磁场测量的恒星. Nazé等^[20]

使用来自欧南台ESPaDOnS (Echelle Spectropolarimetric Device for the Observation of Stars)和Narval (High-Resolution Echelle Spectropolarimeter)这两台望远镜对这4颗源进行偏振观测, 得到相应径向磁场 B_z , 其结果列在表1. 表1中也列出了前人对这4颗恒星的轨道周期(P_{orb})、质量(M)、半径(R)、光度(L)和有效温度(T)测量.

本工作使用了历史上和来自TESS的光极小时刻数据对HD190967、HD35921、HD228854和HD100213这4颗源进行轨道周期分析. 第2节介绍了TESS数据和相应的处理, 并给出从TESS获取的光极小时刻; 第3节对HD190967、HD35921、HD228854和HD100213进行轨道周期分析; 第4节讨论导致这4颗源轨道周期变化的物理机制; 第5节对工作进行总结.

2 数据获取和预处理

TESS是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的高精度光度空间任务^[25]. TESS望远镜于2018年4月18日发射, 旨在搜索在其主恒星前方凌日的系外行星. 在过去几年中, TESS对北半球和南半球进行观测, 每个半球被分成13个扇区. 每个扇区由TESS的4台摄像机观测约27 d. TESS拍摄策略为1800 s (2018年和2019年)或600 s (2020年至今)一张完整扇区图像(Full Frame Image, FFI)以及120 s或20 s的一张特定区域观察目标的图像(Target Pixel File, FT-P). 虽然TESS巡天的主要科学目标是发现和描述系外行星, 但它的数据也对更广泛的科学领域有着重要帮助. TESS巡天在每个扇区观测时长为27 d, 其数据有助于研究具有长时标(小于13 d)轨道周期的双星系统^[26].

本文TESS数据来源于MAST (The Mikulski Archive for Space Telescopes)¹数据库. MAST是NASA的一个网上数据存档和服务中心, 提供对多个太空望远镜的观测数据访问和分析. 从MAST数据库下载HD190967、HD35921、HD228854和HD100213的TESS测光数据, 并绘制这4颗源光变曲线展示在图1.

¹<https://archive.stsci.edu/index.html>

表 1 HD190967、HD35921、HD228854和HD100213的物理参数
Table 1 Physical parameters of the HD190967, HD35921, HD228854 and HD100213

Parameter	HD190967	HD35921	HD228854	HD100213
P_{orb}/d	6.519	4.0024	1.8855	1.3872
$M_1/M_{\odot}$	24.7 (7)	25.5	27.9 (5)	23.5 (8)
$M_2/M_{\odot}$	13.7 (7)	14.0	20.8 (4)	15.3 (4)
$R_1/R_{\odot}$	16.3 (3)	16.1	9.7 (2)	7.48 (8)
$R_2/R_{\odot}$	7.8 (2)	12.6	8.5 (2)	6.15 (7)
$\lg(L_1/L_{\odot})$	4.54	5.33	5.152 (20)	4.8 (2)
$\lg(L_2/L_{\odot})$	4.66	5.13	4.954 (19)	4.5 (2)
T_1/K	30000	31000	36254	35000
T_2/K	20340	31150	37048 (270)	31366 (16)
B_z/Gs^{a}	74	-14	27	34
References	[21]	[22]	[23]	[24]

^a Parameters source Nazé et al.^[20]

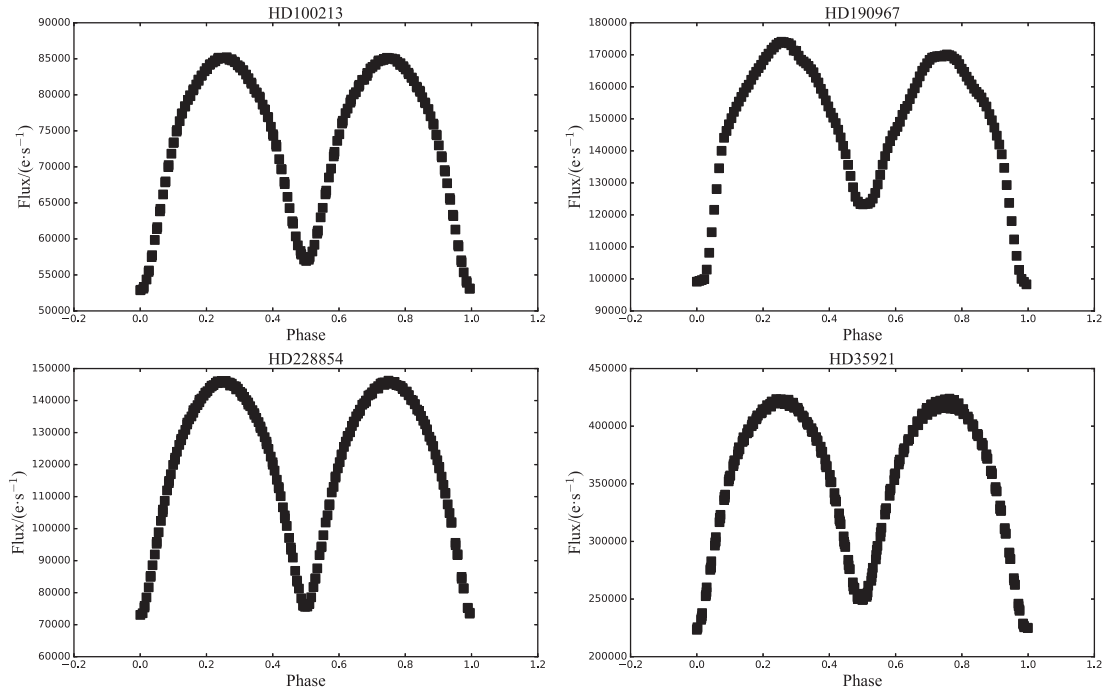


图 1 TESS拍摄的HD190967、HD35921、HD228854和HD100213的光变曲线

Fig.1 The light curves of HD190967, HD35921, HD228854 and HD100213 observed by TESS

TESS巡天记录时间格式BJD (Barycentric Julian Day)是以太阳质心为参考系的儒略日. 为了从TESS光曲线中获取光极小时刻, 本文将TESS数据通过使用线性星历公式:

$$\text{BJD} = \text{BJD}_0 + P_{\text{orb}}E, \quad (1)$$

将TESS数据确定在一个周期的时间区域中, 这里BJD₀是参考时间, E 为圈数, P_{orb} 为轨道周期. 在

每个时间区域中, 使用最小二乘法拟合光变曲线, 把拟合光变曲线得到的极小值作为光极小时刻. 为了与历史上的光极小时刻保持一致, 使用在线转换工具²将时间格式由BJD转换为HJD (Heliocentric Julian Date). 从TESS数据中获取HD190967、HD35921、HD228854和HD100213的主光极小时刻值和误差列在表2中.

表 2 HD190967、HD35921、HD228854和HD100213的光极小时刻
Table 2 Light minimum of the HD190967, HD35921, HD228854 and HD100213

HD190967 (HJD)	HD35921 (HJD)	HD228854 (HJD)	HD100213 (HJD)	
2458687.15422 (5)	2458817.77180 (5)	2458684.97724 (5)	2458570.60220 (5)	2459308.63665 (6)
2458693.68262 (5)	2458821.77157 (5)	2458686.86318 (4)	2458571.98947 (4)	2459310.02367 (4)
2458700.17692 (5)	2458825.77881 (6)	2458688.74826 (5)	2458573.37676 (6)	2459311.41110 (3)
2458706.71662 (4)	2458829.78040 (5)	2458690.63378 (6)	2458574.76404 (4)	2459312.79822 (4)
2458706.77622 (5)	2458833.78122 (4)	2458692.51951 (3)	2458576.15142 (5)	2459314.18573 (5)
2458713.23522 (5)	2458837.79055 (5)	2458694.40515 (4)	2458577.53858 (5)	2459315.57301 (5)
2458719.76122 (5)	2459478.18365 (5)	2458696.29036 (5)	2458578.92599 (3)	2459316.96030 (2)
2458726.26762 (4)	2459482.18659 (4)	2458698.17618 (4)	2458580.31320 (3)	2459318.34763 (3)
2458732.78662 (6)	2459490.18939 (4)	2458700.06203 (5)	2458581.70048 (4)	2459321.12230 (4)
2459423.89122 (5)	2459494.18914 (5)	2458701.94702 (6)	2458583.08767 (8)	2459322.50954 (3)
2459430.44642 (3)	2459498.19008 (4)	2458703.83230 (3)	2458584.47502 (5)	2459323.89677 (3)
2459436.94422 (5)	2459502.19734 (5)	2458705.71833 (4)	2458585.86225 (5)	2459325.28410 (3)
2459443.48722 (6)	2459506.19416 (6)	2458707.60392 (5)	2458587.24959 (4)	2459326.67123 (5)
2459775.96222 (4)	2459510.20002 (6)	2458709.48933 (6)	2458588.63692 (4)	2459328.05848 (4)
2459789.00022 (3)	2459514.19952 (5)	2459420.32567 (3)	2458590.02401 (3)	2459329.44585 (3)
2459795.53322 (5)	2459518.20742 (6)	2459422.21240 (4)	2458591.41154 (4)	2459330.83300 (4)
2459802.01122 (5)	2459522.20943 (5)	2459424.09778 (5)	2458592.79872 (5)	2459332.22043 (4)
2459808.55522 (3)	2459526.21765 (5)	2459425.98354 (6)	2458594.18592 (2)	2459334.99489 (5)
2459815.05722 (4)	2459530.22234 (6)	2459427.86950 (6)	2458595.57341 (5)	2459336.38216 (3)
2459821.58922 (5)	2459534.21924 (5)	2459429.75546 (5)	2458596.96085 (4)	2459337.76942 (4)
	2459542.21735 (5)	2459431.64061 (3)	2458598.34797 (5)	2459339.15671 (6)
	2459546.22728 (3)	2459435.41059 (4)	2458599.73530 (5)	2459340.54398 (4)
	2459550.22834 (6)	2459437.29708 (5)	2458601.12251 (4)	2459341.93143 (4)
		2459439.18299 (4)	2458602.50956 (4)	2459343.31875 (5)

²<http://www.physics.sfasu.edu/astro/javascript/hjd.html>

表2 续

Table 2 Continued

HD190967 (HJD)	HD35921 (HJD)	HD228854 (HJD)	HD100213 (HJD)
		2459442.95419 (3)	2458605.28434 (5) 2459346.09301 (4)
		2459444.83970 (4)	2458606.67150 (6) 2459347.48044 (4)
		2459797.43285 (4)	2458608.05877 (3) 2459348.86775 (5)
		2459801.20396 (4)	2458610.83350 (4) 2459351.64237 (4)
		2459803.08890 (5)	2458612.22064 (5) 2459353.02968 (5)
		2459806.86074 (4)	2458614.99528 (6) 2459358.57870 (5)
		2459808.74610 (4)	2458616.38266 (4) 2459359.96582 (3)
		2459812.51634 (5)	2458617.77009 (4)
		2459814.40192 (5)	2458619.15734 (3)

3 HD190967、HD35921、HD22-8854和HD100213轨道周期变化

本文利用TESS空间望远镜获取的光极小时刻, 结合HD190967、HD35921、HD228854和HD100213历史上的光极小时刻数据, 进行了分析. 所有光极小时刻数据按照误差大小分为两类: 一类是目视(visual, vis)和照相(photographic, pg)的光极小时刻, 另一类是TESS光极小时刻、光电(photoelectric, pe)和CCD的极小值. 在数据分析中, 给目视和照相的极小时刻赋予1的权重, 给光电、CCD和来自TESS的极小时刻赋予8的权重.

3.1 HD190967轨道周期变化

Petrie^[27]将HD190967的主星光谱类型确定为O9.5V, 伴星的光谱类型定为B1. Kumsiashvili等^[28]的研究认为HD190967是处在Case A末期或Case B早期阶段. Djurašević等^[21]于2009年重新分析了Abastumani天文台在1964至1967年观测到的HD190967光变曲线, 得出在轨道倾角为87.9°时, 双星的质量分别为24.7 $M_{\odot}$ 和13.7 $M_{\odot}$, 主星和伴星的半径分别为16.3 $R_{\odot}$ 和7.8 $R_{\odot}$.

TESS以120 s的曝光时间观测HD190967这颗恒星, 观测时间跨度从BJD2458687到BJD2459821,

覆盖了14、15、41、54、55这5个扇区, 共获得20个新的光极小时刻, 具体见表2. 由历元公式:

$$\text{Min. I} = 2416361.107 + 6.519E, \quad (2)$$

计算了每个光极小时刻的理论值 C , 并与TESS和历史观测的光极小时刻做差, 得到HD190967的O-C曲线, 其中Min.I为计算出的光极小时刻理论值. 图2显示了O-C曲线及其去除长期增长抛物线后的残差. 从图2中可以看出, O-C曲线最佳拟合为抛物线. 把(2)式更新为以下历元公式:

$$\begin{aligned} \text{Min.I} = & 2416361.0948(0.0018) + \\ & 6.518492(0.000001)E + \\ & 1.1256(0.002) \times 10^{-7}E^2. \end{aligned} \quad (3)$$

根据图2中O-C的总体趋势和历元(3)式, 可以看出HD190967的轨道周期在长期增加, 增加速率为 $dP_{\text{orb}}/dt = 6.303(0.008) \times 10^{-6} \text{ d} \cdot \text{yr}^{-1}$, 相当于每100 yr增加54 s.

3.2 HD35921轨道周期变化

Mayer^[14]于1968年发现了HD35921, 并确定其轨道周期为4.0026 d. Sota等^[29]将其主星的光谱类型定为O9.5 III, 伴星的光谱类型定为O9 III. 1972

年Hall等^[30]认为HD35921是分离双星, 但1982年Popper^[31]对HD35921进行了光谱观测研究, 证实其为相接双星. Andersen等^[32]研究认为HD35921

处于Case A物质交流阶段. 2013年Mayer等^[22]对HD35921的观测研究得出, 双星的质量分别为 $25.5 M_{\odot}$ 和 $14 M_{\odot}$, 半径分别为 $16.1 R_{\odot}$ 和 $12.6 R_{\odot}$.

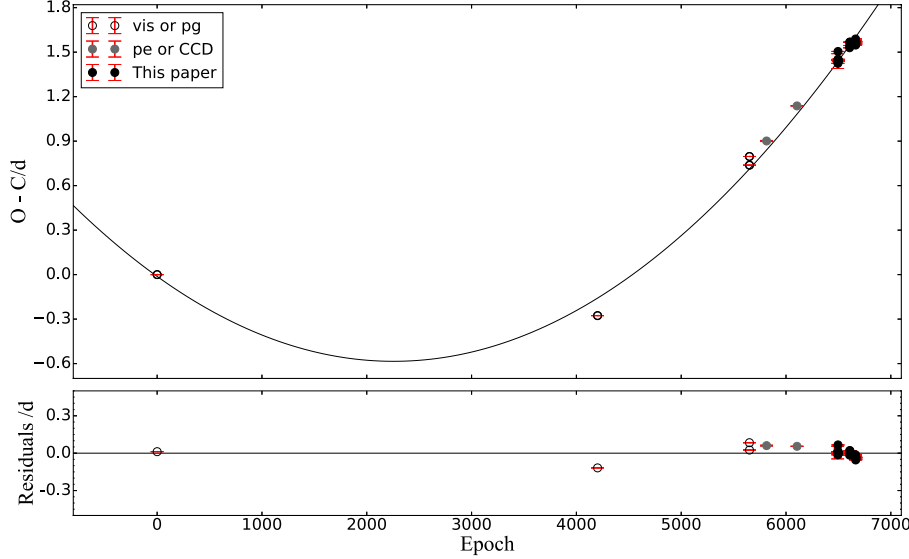


图2 HD190967的O-C图. 黑点表示来自TESS的极小值时刻, 灰点表示光电(pe)或CCD的极小值时刻, 空心点表示目视(vis)或照相(pg)的极小值时刻.

Fig. 2 The O-C diagram of HD190967. Black dots represent moments from TESS minima, gray dots represent photoelectric (pe) or CCD minima, and hollow dots represent visual (vis) or photographic (pg) minima.

TESS以120 s的曝光时间观测HD35921这颗恒星, 观测时间跨度从BJD2458817到BJD2459550, 覆盖了19、43、44、54、45这5个扇区, 共获得23个新的光极小时刻, 具体见表2. 由历元公式:

$$\text{Min. I} = 2439061.4646 + 4.0024E, \quad (4)$$

计算了每个光极小时刻的理论值 C , 并与TESS和历史观测的光极小时刻做差, 得到HD35921的O-C曲线. 图3显示了O-C曲线及其去除长期增长抛物线后的残差. 从图3中可以看出, O-C曲线最佳拟合为抛物线. 把(4)式更新为以下历元公式:

$$\begin{aligned} \text{Min. I} = & 2439061.5728(0.00003) + \\ & 4.002343(0.000005)E + \\ & 8.2201(0.0003) \times 10^{-10}E^2. \end{aligned} \quad (5)$$

根据图3中O-C的总体趋势和历元(5)式, 可以看出HD35921的轨道周期在长期增加, 增加速率为

$dP_{\text{orb}}/dt = 7.496(0.005) \times 10^{-8} \text{ d} \cdot \text{yr}^{-1}$, 相当于每100 yr增加0.65 s.

3.3 HD228854轨道周期变化

HD228854是第1个被发现的大质量相接双星, 轨道周期为 1.8855 d ^[33]. Popper^[34]将其主星的光谱类型定为O7.3, 伴星的光谱类型定为O7.7. 由于HD228854发现早, 且轨道周期较短, 对其进行研究的光学观测较多, Landolt^[35]第1个对HD228854进行轨道周期分析. 随后Koch等^[36]的研究指出HD228854的轨道周期存在变化. Qian等^[37]对HD228854进行O-C分析研究, 得出轨道周期变化是由双星之间物质转移和第三天体的影响造成的, 并判定HD228854处在Case A物质交流阶段. 2012年Yaşarsoy等^[38]对其观测研究得出双星的质量分别为 $27.9 M_{\odot}$ 和 $20.8 M_{\odot}$, 半径分别为 $9.7 R_{\odot}$ 和 $8.5 R_{\odot}$.

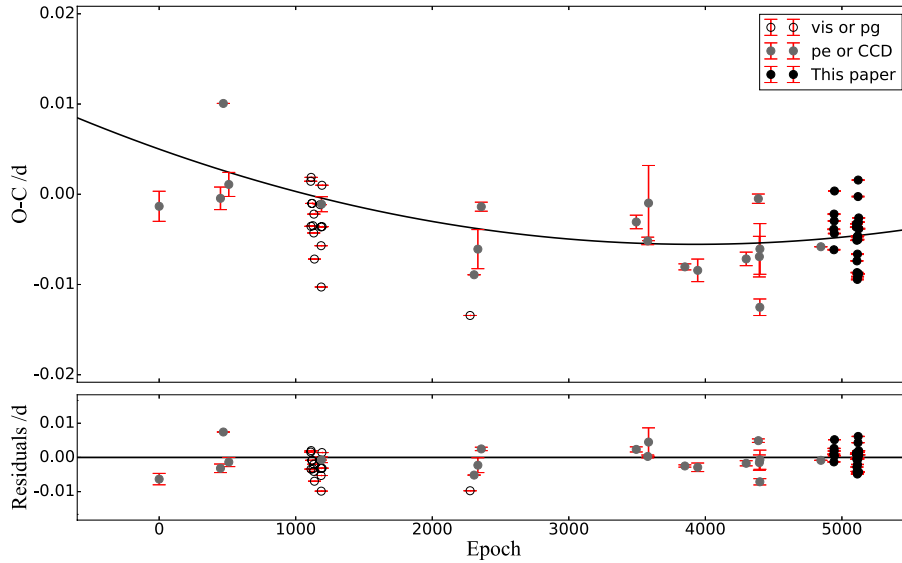


图3 HD35921的O-C图. 黑点表示来自TESS的极小值时刻, 灰点表示光电(pe)或CCD的极小值时刻, 空心点表示目视(vis)或照相(pg)的极小值时刻.

Fig. 3 The O-C diagram of HD35921. Black dots represent moments from TESS minima, gray dots represent photoelectric (pe) or CCD minima, and hollow dots represent visual (vis) or photographic (pg) minima.

TESS以120 s的曝光时间, 观测HD228854这颗恒星, 观测时间跨度从BJD2458684到BJD2459823, 覆盖了14、41、55这3个扇区, 共获得33个新的光极小时刻, 见表2. 由历元公式:

$$\text{Min. I} = 2436814.8024 + 1.8855E, \quad (6)$$

计算了每个光极小时刻的理论值 C , 并与TESS和历史观测的光极小时刻相减, 得到HD228854的O-C曲线. 图4展示了O-C曲线, 其中(O-C)₁图的红色拟合线反映了极小时刻变化的总体趋势, 黑色拟合线则显示了极小时刻的增长趋势, 此线为最佳拟合, 这表明HD228854轨道周期在长期增加. 去掉长期增加的抛物线部分, 得到了残差(O-C)₂曲线, 并绘制在图4的(O-C)₂图中. 从(O-C)₂图可以明显看出, (O-C)₂曲线有一个正弦振荡的形态. 图4的Residuals图是剔除正弦振荡后的残差. 把(6)式更新为以下历元公式:

$$\begin{aligned} \text{Min. I} = & 2436814.76347(0.00001) + \\ & 1.885515322(0.00000008)E + \\ & 9.421(0.002) \times 10^{-10}E^2 + \end{aligned}$$

$$0.01582(0.00042) \times \sin[0^\circ.0383E + 99^\circ.69(0.08)], \quad (7)$$

根据历元(7)式和图4 (O-C)₁曲线, 得出HD228854轨道周期在长期增加, 增加速率为 $dP_{\text{orb}}/dt = 1.823(0.002) \times 10^{-7} \text{ d} \cdot \text{yr}^{-1}$, 相当于每100 yr增加1.575 s, 同时(7)式和图4的(O-C)₂也揭示了HD-228854轨道周期存在一个振幅 $A = 0.01582 \text{ d}$, 周期 $P_3 = 48.5 \text{ yr}$ 的正弦变化.

3.4 HD100213轨道周期变化

HD100213为一颗早型相接双星, 1928年Oosterhoff^[16]首先发现其存在光变, 其轨道周期为1.3872 d. Qian等^[37]对HD100213进行轨道周期研究, 得出其轨道周期变化是由双星之间物质转移和第三天体的影响造成的. Penny等^[39]认为HD100213目前处于非常缓慢的Case A物质交流阶段. Terrell等^[24]对HD100213进行了测光和分光观测研究, 确定了主星的光谱类型为O7.5, 伴星的光谱类型定为O9.5, 并且得出双星的质量分别为 $23.5 M_\odot$ 和 $15.3 M_\odot$, 半径分别为 $7.48 R_\odot$ 和 $6.15 R_\odot$.

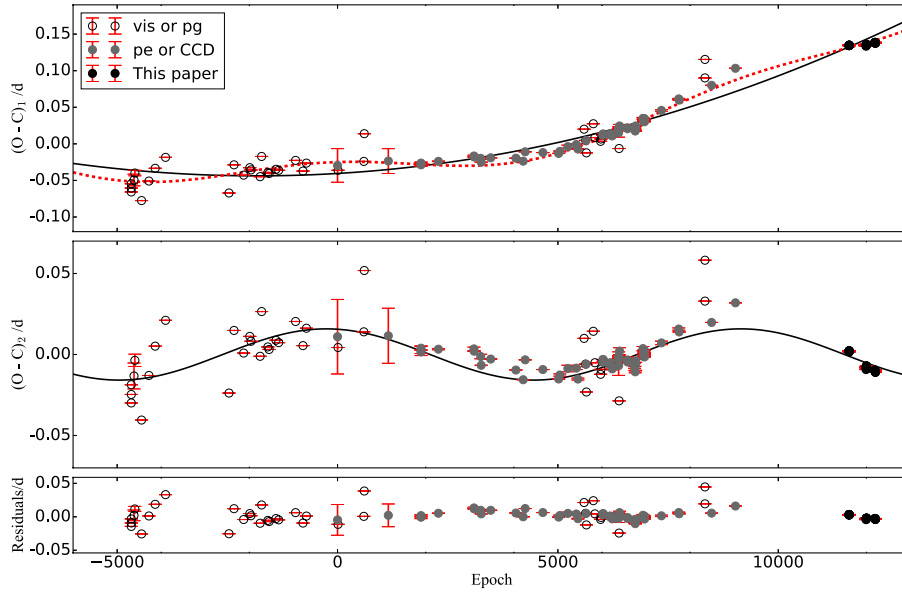


图 4 HD228854 的 O-C 图. 黑点表示来自 TESS 的极小值时刻, 灰点表示光电 (pe) 或 CCD 的极小值时刻, 空心点表示目视 (vis) 或照相 (pg) 的极小值时刻.

Fig. 4 The O-C diagram of HD228854. Black dots represent moments from TESS minima, gray dots represent photoelectric (pe) or CCD minima, and hollow dots represent visual (vis) or photographic (pg) minima.

TESS 以 120 s 的曝光时间观测了 HD100213 这颗恒星, 观测时间跨度从 BJD2458570 到 BJD2459359, 覆盖了 10、11、37、38 这 4 个扇区, 共获得 64 个新的光极小时刻, 展示在表 2 中. 由历元公式:

$$\text{Min. I} = 2441669.3255 + 1.3872E, \quad (8)$$

计算了每个光极小时刻的理论值 C , 并与 TESS 和历史观测的光极小时刻相减, 得到 HD100213 的 O-C 曲线. 图 5 展示了 O-C 曲线, 其中上图 $(O-C)_1$ 的红色拟合线反映了极小时刻变化的总体趋势, 黑色拟合线则显示了极小时刻的增长趋势, 此线为最佳拟合, 这表明 HD100213 轨道周期在长期增加. 去掉长期增加的抛物线部分, 得到了残差 $(O-C)_2$ 曲线, 并绘制在图 5 的 $(O-C)_2$ 图中. 从 $(O-C)_2$ 图可以明显看出, $(O-C)_2$ 曲线有一个正弦振荡的形态. 图 5 的 Residuals 图是剔除正弦振荡后的残差. 把 (8) 式更新为以下历元公式:

$$\begin{aligned} \text{Min. I} = & 2441669.3297215(0.000001) + \\ & 1.38727995(0.00000002)E + \\ & 3.401(0.004) \times 10^{-10}E^2 + \end{aligned}$$

$$0.01783(0.00003) \times \sin[0.0227E + 44.95(0.08)], \quad (9)$$

根据历元 (9) 式和图 5 $(O-C)_1$ 曲线, 得出 HD100213 轨道周期在长期增加, 增加速率为 $dP_{\text{orb}}/dt = 8.946(0.003) \times 10^{-8} \text{ d} \cdot \text{yr}^{-1}$, 相当于每 100 yr 增加 0.77 s, 同时 (9) 式和图 5 的 $(O-C)_2$ 曲线也揭示了 HD100213 轨道周期存在一个振幅 $A = 0.01783 \text{ d}$, 周期为 $P_3 = 60.27 \text{ yr}$ 的正弦变化.

4 讨论

4.1 时标

为了对比所获物理参数之间的差异, 本文引入时标这个物理量进行讨论. 计算了 4 颗源轨道周期变化的特征时标 $\tau_P = P_{\text{orb}}/\dot{P}_{\text{orb}}$. 通过以下公式来计算伴星的核时标 (τ_N) 和热时标 (τ_{Th})^[37]:

$$\tau_{\text{Th}} = 2 \times 10^7 M_2^2 / L_2 R_2, \quad (10)$$

$$\tau_N = 10^{10} M_2 / L_2, \quad (11)$$

其中 L_2 、 M_2 和 R_2 分别代表伴星的光度、质量和半

径. 表3记录了计算出的 τ_N 、 τ_{Th} 和 τ_P 及其误差. 通过表3可以看出 τ_N 和轨道周期变化时间 τ_P 较为接近. 可以看出HD35921、HD228854和HD100213轨道周期变化时标是大于核时标, HD190967轨道周期变

化时标略小于核时标. 这一结果表明, 这4颗恒星轨道周期变化需要较长的时间. 对于4颗恒星轨道周期长期增长, 可能是由于伴星向主星转移物质造成的, 或者是由于主星的星风物质损失造成的.

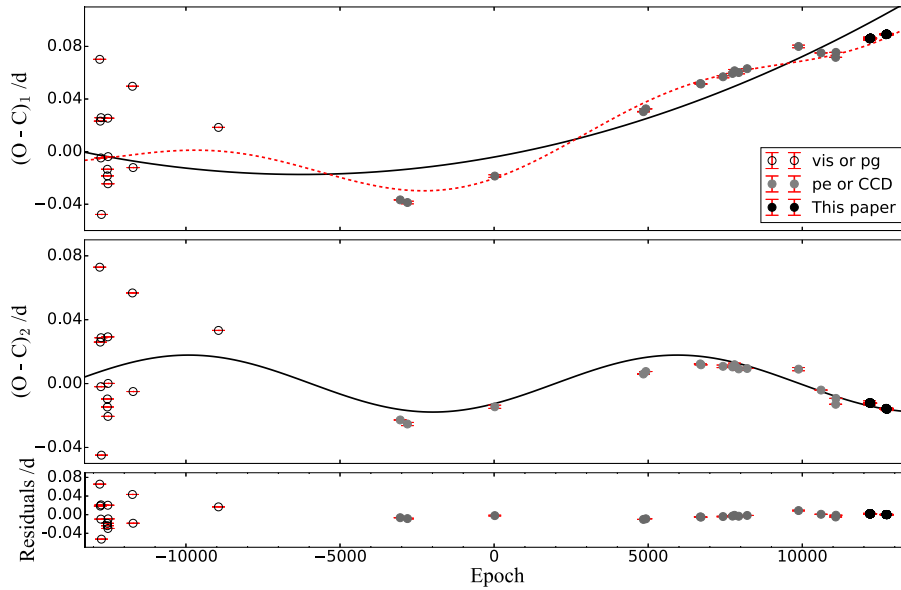


图5 HD100213的O-C图. 黑点表示来自TESS的极小值时刻, 灰点表示光电(pe)或CCD的极小值时刻, 空心点表示目视(vis)或照相(pg)的极小值时刻.

Fig. 5 The O-C diagram of HD100213. Black dots represent moments from TESS minima, gray dots represent photoelectric (pe) or CCD minima, and hollow dots represent visual (vis) or photographic (pg) minima.

表3 HD190967、HD35921、HD228854和HD100213时标参数

Table 3 The time scale of HD190967, HD35921, HD228854, and HD100213

Parameter	HD190967	HD35921	HD228854	HD100213
P_{orb}/d	6.518492(1)	4.002343(5)	1.885515322(8)	1.38727995(2)
τ_{Th}/yr	1.052×10^4	2.306×10^3	$7.722(3) \times 10^3$	$2.407(5) \times 10^4$
τ_N/yr	2.997×10^6	1.038×10^6	$2.334(4) \times 10^6$	$4.838(6) \times 10^6$
τ_P/yr	$1.034(7) \times 10^6$	$5.339(2) \times 10^7$	$1.031(3) \times 10^7$	$1.551(5) \times 10^7$

4.2 物质转移

HD190967、HD35921、HD228854和HD100213轨道周期都在长期增加, 且处在Case A或早期Case B的缓慢传质阶段. 轨道周期长期增长的原因, 可能是质量较小的伴星向质量较大的主星传递质量而引起的. 本文计算了4颗早型双星的物质转移速率

$\dot{M}_N = M_2/\tau_N$. 在双星系统质量守恒前提下, 将 $\dot{M}_N$ 代入下列公式^[37]:

$$\frac{\dot{P}_N}{P_{orb}} = 3\dot{M}_N \left(\frac{1}{M_2} - \frac{1}{M_1} \right), \quad (12)$$

计算出由伴星向主星传递物质导致的周期变化率 $\dot{P}_N$.

4.3 主星物质损失

HD190967、HD35921、HD228854和HD100213这4颗恒星皆为大质量早型星, 因此星风导致主星的物质损失, 也有可能是造成轨道周期长期增长的原因. 1988年De Jager等^[40]给出早型星星风损失的半经验公式:

$$\begin{aligned} \lg[\dot{M}_{\text{Jager}}/(M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1})] \\ = 1.24 \lg(L/L_{\odot}) + 0.16 \lg(M/M_{\odot}) + \\ 0.81 \lg(R/R_{\odot}) - 14.02. \end{aligned} \quad (13)$$

使用(13)式计算出由星风导致的主星物质损失速率 $\lg \dot{M}_{\text{Jager}}$ 列在表3中. 2000年Vink等^[41]推导出早型星星风损失公式:

$$\begin{aligned} \lg \dot{M}_{\text{Vink}} = -6.697(0.061) + \\ 2.194(0.021) \lg(L_1/10^5 L_{\odot}) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1.313(0.046) \lg(M_1/30 M_{\odot}) - \\ 1.226(0.037) \lg\left(\frac{v_{\infty}/v_{\text{esc}}}{2.0}\right) + \\ 0.933(0.064) \lg(T_1/40000\text{K}) - \\ 10.92(0.90) \{\lg(T_1/40000\text{K})\}^2, \end{aligned} \quad (14)$$

M_1 、 L_1 和 T_1 分别代表主星的质量、光度和有效温度, 从Vink等^[41]的文章得出 $v_{\infty}/v_{\text{esc}} = 2.6$. 使用(14)式计算出由星风导致的主星物质损失速率 $\lg \dot{M}_{\text{Vink}}$ 列在表3中. 用以下公式:

$$\frac{\dot{P}_{\text{Jager/Vink}}}{P_{\text{orb}}} = -\frac{2\dot{M}_{\text{Jager/Vink}}}{M_1 + M_2}, \quad (15)$$

计算出由两种方法得到主星星风物质损失导致的轨道周期增长速率 $\dot{P}_{\text{Jager}}$ 和 $\dot{P}_{\text{Vink}}$ 列于表4中, 可以看出 $\dot{P}_{\text{Jager}}$ 和 $\dot{P}_{\text{Vink}}$ 差别并不大. 同时表4也记录了 $\dot{M}_{\text{N}}$ 、 $\lg \dot{M}_{\text{Jager}}$ 、 $\lg \dot{M}_{\text{Vink}}$ 和 $\dot{P}_{\text{OCfit}}$ 以及误差.

表 4 HD190967、HD35921、HD228854和HD100213的物质转移速率和周期变化速率
Table 4 The mass transfer rates and period variation rates of HD190967, HD35921, HD228854, and HD100213

Parameter	HD190967	HD35921	HD228854	HD100213
$\dot{M}_{\text{N}}/(M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1})$	$4.571(2) \times 10^{-6}$	1.348×10^{-5}	$8.911(3) \times 10^{-6}$	$3.162(2) \times 10^{-6}$
$\lg[\dot{M}_{\text{Jager}}/(M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1})]$	-7.18567	-6.2082	-6.6034(3)	-7.1408(5)
$\lg[\dot{M}_{\text{Vink}}/(M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1})]$	-8.02211	-6.2571	-6.5103	-7.2271
$\dot{P}_{\text{N}}/(\text{d} \cdot \text{yr}^{-1})$	$2.843(3) \times 10^{-6}$	5.213×10^{-6}	$6.167(6) \times 10^{-7}$	$3.001(3) \times 10^{-7}$
$\dot{P}_{\text{Jager}}/(\text{d} \cdot \text{yr}^{-1})$	2.213×10^{-8}	1.2547×10^{-7}	$1.9298(2) \times 10^{-8}$	$5.1706(5) \times 10^{-9}$
$\dot{P}_{\text{Vink}}/(\text{d} \cdot \text{yr}^{-1})$	3.226×10^{-9}	1.121×10^{-7}	2.391×10^{-8}	4.239×10^{-9}
$\dot{P}_{\text{OCfit}}/(\text{d} \cdot \text{yr}^{-1})$	$6.303(8) \times 10^{-6}$	$7.496(5) \times 10^{-8}$	$1.823(2) \times 10^{-7}$	$8.946(3) \times 10^{-8}$

从表4中可以看出HD190967、HD228854和HD100213这3颗恒星的 $\dot{P}_{\text{N}}$ 和 $\dot{P}_{\text{OCfit}}$ 较为接近, HD35921、HD228854和HD100213由伴星向主星传递物质导致的周期变化率 $\dot{P}_{\text{N}}$ 要大于本工作分析获得轨道周期变化率 $\dot{P}_{\text{OCfit}}$, 而HD190967由伴星向主星传递物质导致的周期变化率 $\dot{P}_{\text{N}}$ 要小于本工作分析获得轨道周期变化率 $\dot{P}_{\text{OCfit}}$; 同时也可以得出HD190967、HD228854和HD100213由主星物质损失导致的轨道周期变化率要小于本工作获得轨

道周期变化率, 而HD35921由主星物质损失导致的轨道周期变化率要大于本工作获得轨道周期变化率.

HD190967、HD228854和HD100213由伴星向主星传递物质导致的轨道周期变化率 $\dot{P}_{\text{N}}$ 相较于 $\dot{P}_{\text{Jager}}$ 和 $\dot{P}_{\text{Vink}}$ 更接近本工作分析获得轨道周期变化率 $\dot{P}_{\text{OCfit}}$. 这说明对于HD190967、HD228854和HD100213轨道周期增长变化的原因更多的是由于伴星向主星传递物质导致的, 主星物质损失对其

轨道周期变化影响较小. 而HD35921的 $\dot{P}_N$ 要比本工作分析得来的轨道周期变化率 $\dot{P}_{\text{OCft}}$ 大两个数量级, 从主星物质损失得来的 $\dot{P}_{\text{Jager}}$ 和 $\dot{P}_{\text{Vink}}$ 较为接近 $\dot{P}_{\text{OCft}}$. 因此HD35921轨道周期的长期增长可能是主星物质损失导致的.

4.4 HD228854和HD100213轨道周期正弦变化

从图4和图5可以看出HD228854和HD100213轨道周期除了长期增长变化外, 还存在着正弦变化. Qian等^[37]认为HD228854和HD100213轨道周期正弦变化是由于不可见的第三天体的存在而引起的. 假设第三天体以圆形轨道绕双星系统运行, 双星系统质心与三星系统质心之间的距离可以用 $a'_{12} \sin i'$ 来表示, 其中以 a'_{12} 为双星绕公共质心的轨道半径, 并使用以下公式来计算:

$$a'_{12} \sin i' = Ac, \quad (16)$$

其中 A 为双星轨道周期正弦变化的振幅, c 为光速, i' 为第三天体的轨道倾角. 得出HD228854和HD100213的 $a'_{12} \sin i'$ 分别为2.7412 (0.0728) au和3.0895 (0.0005) au. 使用以下方程:

$$f(m) = \frac{4\pi^2}{GP^2} \times (a'_{12} \sin i')^3. \quad (17)$$

计算出HD228854和HD100213相应的质量函数 $f(m)$. 公式中 G 为引力常数, P_3 为第三天体的绕转周期. 同时第三天体的质量 M_3 和轨道倾角 i' 满足以下公式:

$$f(m) = \frac{(M_3 \sin i')^3}{(M_1 + M_2 + M_3)^2}. \quad (18)$$

因此可以计算出不同轨道倾角 i' 下的第三天体质量, 使用以下公式可以计算出不同倾角 i' 对应的第三天体到系统质心距离 A_3 :

$$A_3 = \frac{(M_1 + M_2)}{M_3} a'_{12}. \quad (19)$$

表5记录了轨道倾角在30°、50°、70°和90°下的第三天体质量 M_3 和第三天体到系统质心的距

离 A_3 , 图6绘制出其变化趋势. 从图6和表5可以得出HD228854和HD100213第三天体最小质量分别为 $2.851M_\odot$ 和 $2.934M_\odot$, 此时第三天体距离系统质心分别为46.820 au和50.072 au.

表 5 HD228854和HD100213第三天体物理参数
Table 5 Physical parameters of the third body in the HD228854 and HD100213 binary systems

Parameters	HD228854	HD100213
A/d	0.01582	0.01783
P_3/d	48.5	60.27
$a'_{12} \sin i' / \text{au}$	2.7412	3.0895
$f(m)/M_\odot$	0.0087169	0.008081
$M_3 (i' = 30^\circ) / M_\odot$	5.926	4.985
$M_3 (i' = 50^\circ) / M_\odot$	3.765	3.163
$M_3 (i' = 70^\circ) / M_\odot$	3.041	2.554
$M_3 (i' = 90^\circ) / M_\odot$	2.851	2.934
$A_3 (i' = 30^\circ) / \text{au}$	93.648	48.093
$A_3 (i' = 50^\circ) / \text{au}$	61.125	49.472
$A_3 (i' = 70^\circ) / \text{au}$	49.829	49.947
$A_3 (i' = 90^\circ) / \text{au}$	46.820	50.072

目前磁活动周机制也可以解释轨道周期正弦变化, 该理论认为主星或伴星的内部磁活动会改变角动量在对流层内外壳层之间的分布, 使得自转速度和椭率发生变化, 从而导致双星间的引力也会发生微小变化, 进而影响双星系统的轨道周期. 但目前此理论适合去解释有晚型星存在的双星, 并不适用于解释早型双星轨道周期变化^[37]. 2008年Yuan等^[42]提出磁耦合模型, 用于解释双星轨道周期正弦性变化. 双星系统中, 当恒星间距离极近时, 会产生相互磁化的效应, 并在双星之间形成磁场. 他们推测双星中伴星的磁轴像太阳的磁轴一样会发生反转的现象, 导致双星间的磁场发生变化, 进而影响双星系统的轨道周期, 使之出现微小的波动. HD228854和HD100213都被观测到存在磁场, 磁耦

合模型或许可以用来解释HD228854和HD100213轨道周期的周期性变化. 但实际研究发现, 通过磁耦合模型计算出的磁场要远远大于表1中列出的实际观测的磁场, 同时有磁场存在的HD190967和HD35921轨道周期分析中并未发现轨道周期存在

正弦变化, 这表明讨论磁场对轨道周期影响是一个非常复杂的科学问题. 因此在目前的理论框架中对于HD228854和HD100213的轨道周期正弦变化较合理的解释是不可见的第三天体的存在而引起的光时轨道效应.

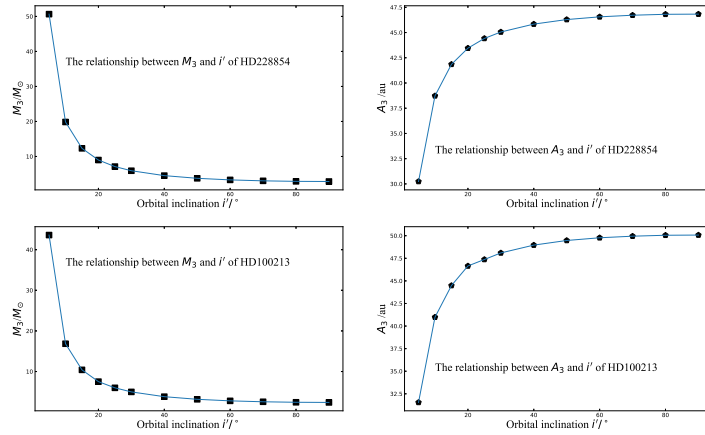


图 6 HD228854和HD100213系统中, 第三天体的质量 M_3 与倾角 i' 关系和第三天体到系统质心距离 A_3 与 i' 关系.

Fig. 6 The relationship between the mass M_3 of the third body and its inclination i' , as well as the relationship between the distance A_3 of the third body to the system barycenter and i' in the HD228854 and HD100213 systems.

5 总结

本文使用来自TESS观测的数据研究了HD190967、HD35921、HD228854和HD100213轨道周期变化. 通过分析发现这4颗恒星轨道周期都在长期增长, 其中HD190967、HD228854和HD100213轨道周期长期增长原因更多的是由于伴星向主星转移物质导致的, 主星物质损失造成的轨道周期变化对这3颗恒星影响较小. 而HD35921的轨道周期长期增长变化是由于主星

物质损失导致的. HD228854和HD100213的轨道周期除了长期增长外, 还叠加了正弦变化. 在当前理论中由第三天体的存在而引起的光时轨道效应能较好地解释这种轨道周期变化. 目前基于磁场而提出的轨道周期变化理论, 并不能很好地解释观测到轨道周期变化. 早型双星形成条件复杂, 且演化速度快, 导致早型双星数目少, 同时目前观测条件也限制了对早型双星数据获取, 这些原因造成了当前对于早型双星中一些现象了解较少. 所以对于早型双星观测研究有助于我们去了解早型双星.

参考文献

- [1] Panagia N. A.J., 1973, 78: 929
- [2] Langer N, C Schürmann, Stoll K, et al. A&A, 2020, 638: A39
- [3] Han Z, Ge H, Chen X, et al. RAA, 2020, 20: 161
- [4] Torres G, Andersen J, Giménez A. A&ARv, 2010, 18: 67
- [5] Kroupa P, Weidner C. ApJ, 2003, 598: 1076
- [6] Chiappini C, Frischknecht U, Meynet G, et al. Nature, 2011, 472: 454
- [7] de Rossi M E, Tissera P B, Pedrosa S E. A&A, 2010, 519: A89
- [8] Sana H, de Mink S E, de Koter A, et al. Science, 2012, 337: 444
- [9] Claeys J S W, de Mink S E, Pols O R, et al. A&A, 2011, 528: A131
- [10] Podsiadlowski P, Joss P C, Hsu J J L. ApJ, 1992, 391: 246

- [11] Brott I, de Mink S E, Cantiello M, et al. A&A, 2011, 530: A115
- [12] Lamers H J, Levesque E M. Understanding Stellar Evolution. Bristol: IoP Publishing, 2017: 305
- [13] Hartigan P, Binzel R P. IBVS, 1979, 1684: 1
- [14] Mayer P. PASP, 1968, 80: 81
- [15] Landolt A U. ApJ, 1964, 140: 1494
- [16] Oosterhoff P T. BAIN, 1928, 4: 183
- [17] Rovithis-Livaniou H. Galaxies, 2020, 8: 78
- [18] Sterken C. Proceedings of ASP Conference Series, 2005, 335: 3
- [19] Zasche P, Wolf M, Vraštil J, et al. A&A, 2016, 590: A85
- [20] Nazé Y, Neiner C, Grunhut J, et al. MNRAS, 2017, 467: 501
- [21] Djurašević G, Vince I, Khruzina T S, et al. MNRAS, 2009, 396: 1553
- [22] Mayer P, Drechsel H, Harmanec P, et al. A&A, 2013, 559: A22
- [23] Abdul-Masih M, Sana H, Hawcroft C, et al. A&A, 2021, 651: A96
- [24] Terrell D, Munari U, Zwitter T, et al. AJ, 2003, 126: 2988
- [25] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. JATIS, 2014, 9143: 914320
- [26] Prša A, Kochoska A, Conroy K E, et al. ApJS, 2022, 258: 16
- [27] Petrie R M. MNRAS, 1956, 116: 195
- [28] Kumsiashvili M I, Kochiashvili N T, Djurašević G. Astrophysics, 2005, 48: 44
- [29] Sota A, Maíz Apellániz J, Walborn N R, et al. ApJS, 2011, 193: 24
- [30] Hall D S, Heiser A M. PASP, 1972, 84: 33
- [31] Popper D M. ApJ, 1982, 262: 641
- [32] Andersen J, Batten A H, Hilditch R W. A&A, 1974, 31: 1
- [33] Popper D M. ApJ, 1978, 220: L11
- [34] Popper D M. ARA&A, 1980, 18: 115
- [35] Landolt A U. PASP, 1975, 87: 409
- [36] Koch R H, Siah M J, Fanelli M N. PASP, 1979, 91: 474
- [37] Qian S B, Yuan J Z, Liu L, et al. MNRAS, 2007, 380: 1599
- [38] Yaşarsoy B, Yakut K. AJ, 2012, 145: 9
- [39] Penny L R, Ouzts C, Gies D R. AJ, 2008, 681: 554
- [40] De Jager C, Nieuwenhuijzen H, Van Der Hucht K A. A&AS, 1988, 72: 259
- [41] Vink J S, de Koter A, Lamers H J. A&A, 2000, 362: 295
- [42] Yuan J, Qian S. ApJ, 2008, 669: L93

Orbital Period Variations of Early-Type Eclipsing Binaries HD190967, HD35921, HD228854 and HD100213: A TESS Data Analysis

ZHANG Yu-hao¹ LIU Jin-zhong² LIU He-lei¹ LV Guo-liang² ZHANG Yu²

(1 School of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046)

(2 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

ABSTRACT HD190967, HD35921, HD228854, and HD100213 are early-type O or B binaries with orbital periods of 6.519 days, 4.0024 days, 1.8855 days, and 1.3872 days, respectively. They belong to the category of long-period binaries, which are rare and difficult to obtain complete light curves. The TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) space telescope provides high-quality data for these four sources with its long-term, short-exposure, and high-precision photometric measurements. In this paper, we use the light extremum times obtained from TESS and historical data to analyze and study the orbital periods of these four early-type binaries. The results show that the orbital periods of all four sources are increasing in the long term, and HD228854 and HD100213 also exhibit sinusoidal variations in addition to the long-term increase. We find that the orbital period increase of HD190967, HD228854, and HD100213 is caused by mass transfer from the secondary star to the primary star, while the orbital period increase of HD35921 is caused by mass loss from the stellar wind of the primary star. The most reasonable explanation for the orbital period sinusoidal variations of HD228854 and HD100213 is the light-travel time orbit effect due to the presence of a third body.

Key words binaries: eclipsing, techniques: photometric, stars: early-type, methods: data analysis