

# 天琴座RRab型星视向速度曲线模板\*

张辰千禧<sup>1,2</sup> 黄玥<sup>1,2,3</sup> 刘高潮<sup>1,2†</sup> 房敏<sup>3,4‡</sup> 张鹏<sup>1,2</sup> 刘德剑<sup>1,2</sup> 陈昱晓<sup>1,2</sup>

(1 三峡大学数理学院 宜昌 443002)

(2 三峡大学天文与空间科学中心 宜昌 443002)

(3 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(4 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

**摘要** 天琴座RRab型变星(RRab)作为重要的宇宙距离指示器,其视向速度对于研究银河系的动力学特性具有重要意义.然而,由于RRab的脉动特性,其视向速度不仅包含质心视向速度,还受到脉动速度的影响,这给精确测量带来了挑战.利用郭守敬望远镜中分辨率光谱数据中的Mg Ib线和H $\alpha$ 线,建立了RRab的视向速度曲线模板,旨在提高质心视向速度测量精度.与现有模板的比较分析表明,该视向速度曲线模板在速度估计方面具有高度一致性,基于建立的视向速度曲线模板计算得到的质心视向速度的标准差均小于5 km·s<sup>-1</sup>.建立的视向速度曲线模板适用于从郭守敬望远镜光谱计算RRab的质心视向速度.

**关键词** 恒星: 变星: 天琴座RR型变星, 方法: 数据分析, 技术: 径向速度, 技术: 光谱, 技术: 测光

**中图分类号**: P145; **文献标识码**: A

## 1 引言

天琴座RR型变星(RR Lyrae star, RRL)是处于氢燃烧阶段的年老的小质量脉动变星,位于赫罗图和不稳定带的交叉位置,在银核、厚盘和银晕中都有分布<sup>[1-2]</sup>.RRL根据光变曲线和脉动模式通常分为3种类型:RRab型(处于基模脉动模式且光变曲线不对称)、RRc型(处于一阶泛音脉动模式,光变曲线对称)、RRd型(处于双模脉动模式,占比极少)<sup>[3-4]</sup>.RRL的光变周期短(0.1 ~ 1 d),光变振幅大,易于观测证认,且具有良好的周光关系易于测定距离<sup>[1,5]</sup>.RRL的以上特性使其成为探测银河系结构形成和演化的有力探针之一.

视向速度是探测银河系的子结构、形成与演

化的重要参数之一.然而由于RRL的脉动特点,使得观测到的视向速度不仅包含其本身的视向速度(质心视向速度),还包含了脉动引起星体膨胀收缩的速度<sup>[6]</sup>.如何从观测的视向速度推知其质心视向速度是利用RRL作为探针示踪银河系的运动学、动力学性质的重要一环.

通常有两种方法来获得RRL的质心视向速度.一种是假定在脉动周期内某个特定点(相位为 $0.5 \pm 0.1$ )观测的视向速度约等于其质心视向速度,然而望远镜在队列或服务模式下,刚好在该时间点进行观测非常困难,过于费时费力,不易推广.另一种是建立一个特定的视向速度曲线模板(Radial Velocity Curve Template, RVC),该模板

2025-01-26收到原稿, 2025-03-20收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(U1731108、12403052、12373030),湖北省自然科学基金项目(2023AFB577)资助

† gcliu@ctgu.edu.cn

‡ mfang@pmo.ac.cn

将脉动引起的速度描述为相位的函数, 利用观测的视向速度及相位即可获得其质心视向速度. 该方法普适性强, 易于批量获得较大样本的RRL的质心视向速度.

Oke等<sup>[7]</sup>在1962年首次使用一颗RRab型星(X Ari)构建了基于 $H\gamma$ 线测量的视向速度曲线模板, 但由于它是一颗明亮的RRab型星, 其他较暗的RRab型星的视向速度曲线可能与之不同. Liu<sup>[8]</sup>在1991年利用21颗RRab型星建立了基于金属线的视向速度曲线模板, 并提供了视向速度曲线振幅与V波段光变曲线振幅之间的转换关系. 但由于该模板是基于金属线测量的视向速度, 需要较高分辨率的光谱才能测得较准确的视向速度, 使得这个模板不能被广泛应用. Sesar<sup>[9]</sup>基于对RRab的 $H\alpha$ 、 $H\beta$ 和 $H\gamma$ 线测量的视向速度构建了相应的RVCs, 将质心视向速度测量的不确定性降低了 $15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Braga等<sup>[10]</sup>也在2021年提供了RRab和RRc型星基于3组金属线(Fe、Mg、Na)和4组巴尔默线( $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 $H\gamma$ 和 $H\delta$ )的RVC. 这些RVC的建立, 为获得有质心视向速度测量的大样本提供了便利, 比如Liu等<sup>[1]</sup>利用Sesar<sup>[9]</sup>的模板构建了一个包含位置、质心视向速度(Radial Velocity, RV)和金属丰度的RRL星表, 基于该星表探测了银晕的化学和运动学性质<sup>[11]</sup>、银河系的子结构<sup>[12]</sup>、动力学拖拽结构等<sup>[13]</sup>.

大天区面积多目标光纤光谱望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)中分辨率光谱(Medium Resolution Spectroscopy, MRS)巡天<sup>[14]</sup>包含“时域巡天”和“非时域巡天”两个任务. “时域巡天”的主要目的是研究变星, 每个目标源将在多个观测夜被重复观测. 因此, LAMOST中分辨率光谱巡天将获得大量有重复观测的中高分辨率光谱, 为我们准确测得RRL脉动周期内各个相位点的视向速度从而构建视向速度曲线模板提供了契机. LAMOST光谱巡天已发布了约2000万光谱, 里面包含了很多的RRL的观测光谱, 因此利用LAMOST中分辨率光谱数据构建RRL的RVC, 进而利用其获取大批量的RRL质心视向速度显得很有必要.

Huang等<sup>[15]</sup>在2024年利用LAMOST中分辨光谱建立了RRc的RVC, 本文的工作是利用LAMOST中分辨率巡天数据构建RRab的RVC. 本文结构安排如下: 第2节描述用于构建视向速度曲线模板的RRab型星样本, 包括RRL星表、测光观测数据及光谱数据; 第3节对所选样本星的光变曲线进行分析, 并通过光谱数据计算得出了这些样本星体的视向速度曲线; 在第4节中, 本文首先构建了RRab的视向速度曲线模板, 随后阐述了视向速度振幅与茨威基暂现源设施(Zwicky Transient Facility, ZTF) g波段光度振幅之间的转换关系, 最后对视向速度曲线模板进行了验证; 第5节是全文总结.

## 2 数据

### 2.1 天琴座RR变星星表

Gaia Data Release 3 (DR3)于2020年12月3日发布, 提供了星等小于21 mag的约18亿颗星的3个波段( $G$ 、 $G_{BP}$ 和 $G_{RP}$ )的测光数据和高精度位置、自行和视差信息<sup>[16]</sup>. Clementini等<sup>[4]</sup>于2023年通过专门为分析Gaia中观测到的造父变星和RRL的光变曲线而开发的Cep & RRL管道(Specific Object Study (SOS) Cepheid & RR Lyrae管道)来认证RRL, 提供了一个目前观测到的最大RRL的星表. 该星表一共有270905颗RRL, 包括174947颗RRab型星、93952颗RRc型星以及2006颗RRd型星<sup>[17]</sup>. 本文选择该星表作为最初的RRab样本.

### 2.2 光谱数据

LAMOST是位于中国科学院国家天文台兴隆观测基地的一架大型反射式施密特望远镜, 也称为“郭守敬望远镜”. 该望远镜提供了中分辨率光谱(光谱分辨率 $R \sim 7500$ ), 其观测波长范围分为红蓝两段, 蓝端的波长覆盖范围是4950 Å至5350 Å, 红端的则为6300 Å至6800 Å<sup>[14]</sup>. LAMOST - MRS的光谱巡天项目自2018年9月启动, 旨在利用有月夜的时间进行观测. 与低分辨率光谱(Low Resolution Spectroscopy, LRS)相比, MRS光谱覆盖较小的波长范围. 该项目的时域巡天特色在于对大约

20万颗目标源进行约60次的重复观测, 这在全球范围内尚属首次. 2023年10月7日发布的DR9中分辨率数据集(v2.0版本)包含了6718023条光谱.

### 2.3 测光数据

光变曲线是天文学中记录天体亮度随时间变化的图表, 它通过捕捉天体在不同时间点的光度变化, 为研究天体的物理特性、行为模式及其演化过程提供了重要信息. 光变曲线的应用范围广泛, 包括但不限于识别和分类变星、测量恒星的周期性变化、研究银河系的结构和演化以及作为距离指标来测量宇宙尺度上的距离<sup>[18]</sup>. 本研究利用ZTF望远镜获取样本星的光变曲线, 结合Gaia和全天天体自动超新星巡天项目(All-Sky Automated Survey for Supernovae, ASAS-SN)数据, 提供了g、r、i、G和V波段的光度信息.

ZTF DR15涵盖了海量的观测数据, 其包含了大约727亿个星体的光变曲线. g波段(400 ~ 550 nm)、r波段(550 ~ 700 nm)和i波段(700 ~ 900 nm)的极限星等分别为20.8 mag、20.6 mag和19.9 mag. 该项目的光变曲线数据被用于多种科学目

的, 包括研究瞬变天体的物理特性、变星的分类及统计分析等. 与此同时, Gaia收集的G波段(330 ~ 1050 nm)的测光数据, 其极限星等为20.7 mag, 且在6 mag时会发生饱和现象. 而ASAS-SN在2020年发布了约6100万个星体的V波段(500 ~ 700 nm)光度测量, 其极限星等达到17.5 mag. 鉴于ZTF的g波段具有优良的观测条件和丰富的数据量, 本研究主要利用ZTF的g波段光变曲线开展后续分析.

### 2.4 筛选样本

本文通过交叉匹配Gaia DR3提供的初始样本与LAMOST DR9的光谱数据集, 得到217颗RRab, 共获得2442条单次曝光光谱. 根据先前研究, 我们选择至少有10次单次曝光观测且信噪比大于5的样本星, 最终筛选出22颗符合条件的RRab样本. 这些星在ZTF (g、r、i波段)、Gaia (G波段)和ASAS-SN (V波段)的测光次数( $N_G$ 、 $N_g$ 、 $N_i$ 、 $N_r$ 、 $N_V$ )如表1所示. 由于ZTF在巡天初期主要集中于g、r波段, i波段的数据点数量相对较少. 这些数据为研究RRab的光变特性提供了宝贵的资源.

表 1 测光数据次数  
Table 1 The number of photometric data

ID <sup>a</sup>	ra	dec	$N_G$	$N_g$	$N_i$	$N_r$	$N_V$
689686230645254912	133.240267	23.798379	389	344	59	-	426
1543912168771411584	187.402946	47.821392	959	31	-	-	424
812833491461519488	140.340775	40.854836	590	608	70	836	589
1507677973533087744	213.498117	47.444918	584	1007	273	1218	474
255409438666669824	74.783176	48.357797	380	551	-	746	289
814436815636834944	141.127396	42.304775	499	638	71	880	479
468529087451089024	61.662079	55.499849	526	530	-	-	532
2875539776437822592	0.015215	35.362794	407	109	71	107	454
856816808430505856	164.531029	56.11907	779	-	-	-	362
2580618253555098624	14.392511	7.781491	366	-	95	-	365
657203427346091648	124.14983	18.349513	282	368	54	1140	234
1925406252226143104	355.628409	43.01413	690	639	134	834	589
2552333797966961664	15.63732	5.395007	273	-	-	-	237

表1 续  
Table 1 Continued

ID <sup>a</sup>	ra	dec	$N_G$	$N_g$	$N_i$	$N_r$	$N_v$
3412476521697249664	74.535467	22.349915	470	432	-	603	349
3865505205312251264	161.233462	6.773089	208	545	40	375	274
3379937093550342528	101.207871	24.302704	203	49	-	44	285
408817359720855168	24.842289	53.871902	324	625	54	984	169
409622477114027008	23.876806	55.715118	526	1101	-	1650	235
817516448922753792	140.794149	42.925854	499	601	72	828	176
1510362877849504384	206.999499	49.088644	599	874	218	833	314
3872182230189643904	162.048528	11.812245	200	46	-	68	209
1488671437577394816	222.477905	40.230383	459	2082	489	2193	760

<sup>a</sup> The ID refers to Gaia Source\_ID

### 3 数据预处理

#### 3.1 确定光变曲线的相位和振幅

FLSP<sup>①</sup> (Fast Lomb-Scargle Periodogram)是一种高效的周期性分析工具,适用于不均匀采样的天文时间序列数据,包括恒星光变曲线分析、太阳系外行星凌星信号检测等<sup>[19]</sup>.它利用GPU加速的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)算法,显著提高了大规模数据集的分析效率<sup>[20]</sup>.通过拟合测光数据并寻找最优相位零点( $T_{\max}$ ),研究人员能够准确检测周期性成分,随后将不同时间的观测数据折叠到一个周期内,以获得周期内光变曲线的振幅.基于样本星在不同波段的光变曲线得到的周期、相位零点及振幅详见表2.图1展示了一颗样本星在Gaia的G波段、ASAS-SN的V波段和ZTF的g、r、i波段的光变曲线.本文比较了不同波段的周期和相位零点,发现周期差异( $\Delta$ Period)十分微小( $< 10^{-4}$  d),相位零点差异( $\Delta$ Phase)均在0.1以内,如图2所示.

#### 3.2 视向速度测量

RRL作为脉动变星,其视向速度曲线的形状和振幅(Amp(RV))因观测谱线的不同而异.金属

线和H $\alpha$ 线分别源于恒星大气的不同层次,导致它们在视向速度测量中表现出不同的特性.先前研究显示,不同的巴尔默线的视向速度曲线形状和Amp(RV)是不同的,但是金属线的Amp(RV)在一定不确定性范围内具有一致性<sup>[21]</sup>.鉴于LAMOST-MRS的波长覆盖,本研究选取蓝端Mg Ib三重线和红端H $\alpha$ 线进行视向速度分析.

LAMOST-MRS由于波长覆盖范围较窄,采用了与LAMOST-LRS不同的波长校准方法.研究表明,LAMOST中分辨率光谱的视向速度零点在不同时期会发生变化,其变化机制尚不明确<sup>[21]</sup>.多种因素可能影响LAMOST-MRS的视向速度零点,包括仪器状态、弧灯照射质量、数据处理算法及弧灯与物体照射的非同时性等<sup>[22]</sup>.Zhang等<sup>[21]</sup>在2021年利用LAMOST-MLS DR7数据,对60万颗恒星的380万个单次曝光光谱采用互相关函数法测量视向速度,结合Gaia DR2的视向速度数据,实现了对每次曝光的视向速度零点的确定.因此,本研究首先将样本星与Zhang等<sup>[21]</sup>提供的LAMOST DR9的视向速度零点星表进行交叉匹配,对收集到的光谱进行视向速度零点校正.校正后的归一化光谱如图3所示.此步骤旨在消除视向速度数据中的时变影响,提高数据的准确性和一致性.

<sup>①</sup>用户可访问 <https://docs.astropy.org/en/stable/timeseries/lombscargle.html>获取更多信息.

表 2 不同波段光变曲线得到的样本星的周期、相位零点及振幅  
 Table 2 The period, phase zero point and amplitude of the sample star obtained from the lightcurves of different bands

ID <sup>a</sup>	G band			g band			r band			i band			V band		
	Period/d	$T_{\max}$	Amp	Period/d	$T_{\max}$	Amp	Period/d	$T_{\max}$	Amp	Period/d	$T_{\max}$	Amp	Period/d	$T_{\max}$	Amp
689686230645254912	0.545773	2130.5808	0.85	0.545779	59887.3905	1.19	0.545798	59877.4726	0.69	-	-	-	0.545778	2457379.9147	0.97
1543912168771411584	0.563647	2070.3008	0.78	0.563672	58206.3321	1.12	-	-	-	-	-	-	0.563645	24566820.8379	0.84
812833491461519488	0.578756	1981.7262	0.79	0.578772	59310.2472	0.91	0.578754	59233.3912	0.54	0.578775	59302.2234	0.64	0.578763	2457502.7625	0.77
1507677973533087744	0.458799	2076.4706	1.10	0.458802	58561.3244	1.41	0.458803	58547.4476	0.83	0.458803	60062.3847	0.98	0.45879	2457824.9762	1.16
255409438666669824	0.659225	2211.6840	0.25	0.659217	58210.2060	0.35	0.734178	58434.2326	0.47	0.659223	59419.4755	0.26	0.659211	2457384.7877	0.28
814436815636834944	0.562102	2176.2974	0.76	0.562108	58859.5095	1.00	0.562118	59175.4059	0.61	0.562106	59752.1742	0.71	0.562107	2457035.9751	0.84
468529087451089024	0.368699	2098.5733	0.72	0.368715	59861.4233	1.07	-	-	-	-	-	-	0.351653	2457236.0747	0.07
2875539776437822592	0.706773	2249.9246	0.71	0.706739	59087.3910	0.96	0.706777	59783.4487	0.55	0.706782	59087.4109	0.66	0.706763	2456510.9632	0.75
856816808430505856	0.627292	2223.9758	0.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.627309	2457193.7540	0.46
2580618253555098624	0.734141	2333.4608	0.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.734181	2457967.0412	0.68
657203427346091648	0.660904	2081.7773	0.89	0.660941	58431.4755	1.20	0.660932	59199.4668	0.65	0.660903	59097.5203	0.71	0.660938	2456992.9426	0.98
1925406252226143104	0.616889	1878.5581	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.616906	2458397.7163	0.48
2552333797966961664	0.673517	2342.7183	0.72	0.673557	8440.2370	1.00	0.673565	59538.1325	0.57	0.673551	59538.1325	0.73	0.673548	2457755.7460	0.84
3412476521697249664	0.604708	2396.9284	0.73	0.604635	59199.3542	0.93	-	-	-	0.604643	58721.4974	0.61	0.604706	2457618.0928	0.51
3865505205312251264	0.561941	2137.4978	0.93	0.561956	58969.2125	1.04	0.359423	59202.4416	0.59	0.561951	58781.5442	0.75	0.561940	2457924.5106	0.82
3379937093550342528	0.523645	2100.0272	0.70	0.523645	58906.1391	1.27	-	-	-	0.523537	58833.3161	0.80	0.523657	2457469.7946	0.82
408817359720855168	0.394001	2540.7085	1.09	0.394016	58389.3804	1.50	0.393994	59114.3732	0.94	0.394013	58438.2696	1.13	0.394012	2457046.7270	1.30
409622477114027008	0.443678	2541.4596	0.86	0.443661	58364.2844	1.23	-	-	-	0.443655	60102.4603	0.82	0.443659	2457011.7920	1.03
817516448922753792	0.615702	2087.0110	0.47	0.615674	59542.3036	0.69	0.615726	59215.3926	0.38	0.615673	59752.1742	0.48	0.417169	2457234.0772	0.12
1510362877849504384	0.614158	2434.0899	0.67	0.614120	58588.3037	0.89	0.614136	59685.3112	0.51	0.614131	58977.2371	0.62	0.614115	2457191.8406	0.69
3872182230189643904	0.639932	2136.3189	0.45	0.639922	58941.2490	0.46	-	-	-	0.639908	58493.4696	0.41	0.639889	2457150.7990	0.44
1488671437577394816	0.595073	2335.5576	0.97	0.595069	59080.2026	1.33	0.595080	58561.4713	0.76	0.595074	59775.2008	0.94	0.595078	2457881.7506	1.03

<sup>a</sup> The ID refers to Gaia Source\_ID

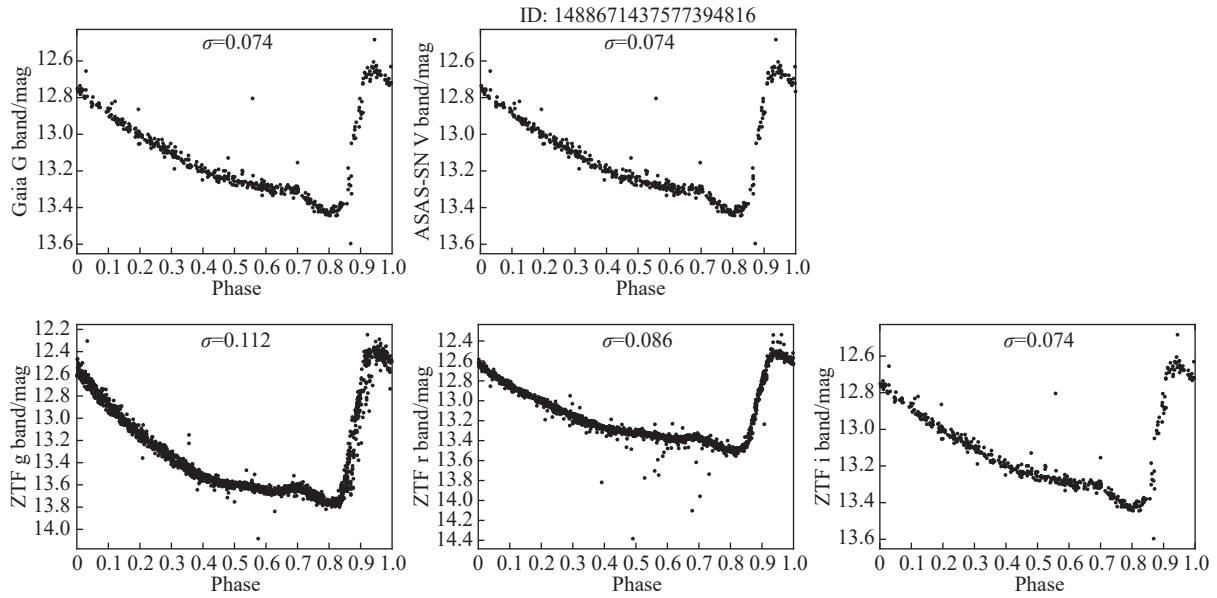


图 1 同一颗星不同波段的光变曲线

Fig. 1 Light curve of different bands from the same source

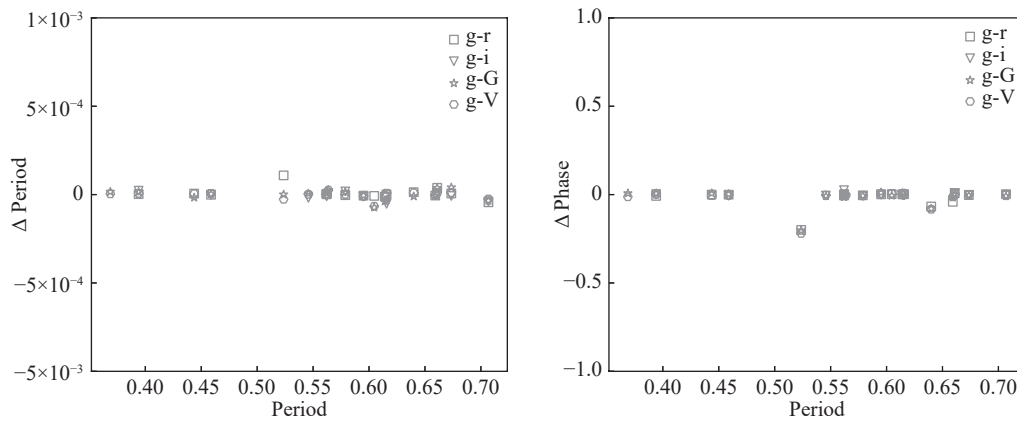


图 2 不同波段利用FLSP计算的周期(左图)和相位零点(右图)相较于ZTF g波段的偏移. 不同形状的点代表g波段与不同波段的数值差值.

Fig. 2 The shift of period (left) and phase zero (right) calculated by FLSP in different bands compared to the ZTF g band. The dots of different shapes represent the numerical differences between the g band and other different bands.

我们采用`laspec.ccf`<sup>[21]</sup>模块测量视向速度. 该模块基于互相关函数(Cross-Correlation Function, CCF)<sup>[23]</sup>来量化两个光谱信号之间的相似性. 在测量过程中, 从目标恒星的光谱集合中选取信噪比最高的光谱作为初始模板, 并将其与样本光谱进行互相关分析. 通过计算输入光谱与初始模板光谱之间的互相关函数, 确定最大相关系数的位置,

该位置直接对应于天体的视向速度. 随后, 对样本星光谱进行波长校正, 叠加平滑后生成一个合成光谱. 该合成光谱随后被用作最终模板. 再次将样本光谱与最终模板光谱进行互相关分析, 得到最终的视向速度.

为评估噪声引起的视向速度不确定性, 从校正后的光谱中减去模板, 计算残差谱的标准差, 假

设噪声呈正态分布, 将噪声加入模板并重新分析得到测量误差. 对每颗星重复1000次, 以其标准差作为测量误差. 此外, 还包括Zhang等<sup>[21]</sup>给出的视向速度零点不确定性. 图4展示了基于ZTF的g波段

段周期折叠得到的视向速度随相位的变化. 对缺少ZTF的g波段数据的样本, 使用Gaia的G波段周期和 $T_{\max}$ . 部分测量值(图4中黑色方框)偏离超过 $5\sigma$ , 故排除在后续视向速度曲线模板构建之外.

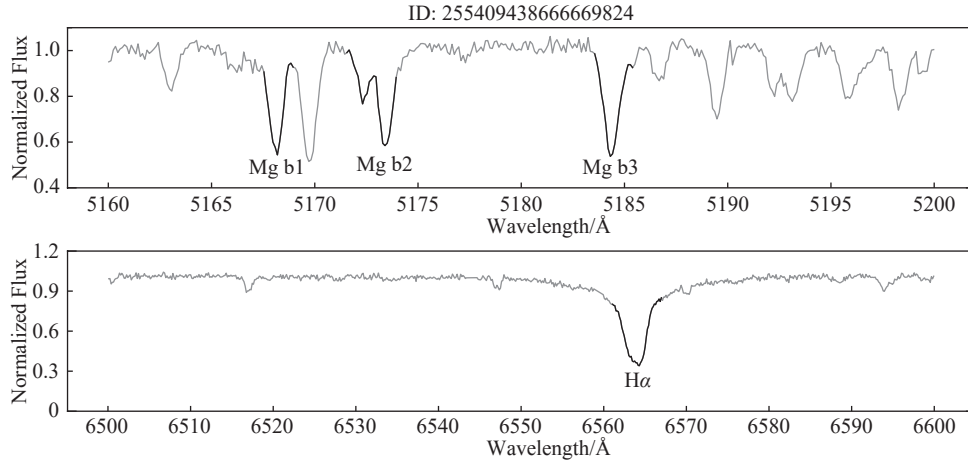


图 3 视向速度零点改正后的归一化光谱

Fig. 3 Normalized spectrum of radial velocity after zero correction

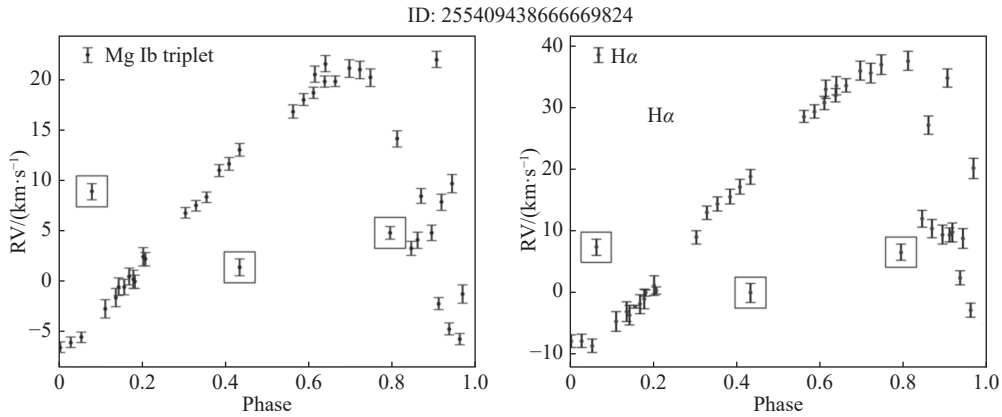


图 4 利用CCF计算的视向速度曲线部分结果展示(黑框框住的点为异常值)

Fig. 4 The partial results of the radial velocity curve calculated by CCF are shown (the points in black box are outliers)

## 4 视向速度曲线模板

### 4.1 建立视向速度曲线模板

建立视向速度曲线模板的目的在于提供一个标准化工具, 通过少量观测即可准确估计RRL的质心视向速度, 从而节省望远镜观测时间并提高

测量精度与可靠性<sup>[9]</sup>.

本研究利用22颗RRab的736条单次曝光谱, 分别采用Mg Ib和H $\alpha$ 线测量视向速度, 构建视向速度曲线模板. 采用高斯周期均匀平滑 (Pre-training with Extracted Gap-sentences for Abstractive Summarization, PEGASUS)函数拟合每颗星的视向速度曲线形状:

$$RV(\varphi) = C_j + B_j \left\{ a_0 + \sum_{i=1}^{n=9} a_i e^{-\frac{\cos[\xi(\phi - \phi_i)]}{\sigma_i}} \right\}, \quad (1)$$

其中,  $RV(\varphi)$ 是某一相位的视向速度,  $B$ 和 $C$ 随样本星变化而变化,  $j$ 对应样本内每颗星,  $a_i$ 对应阶层 $n = 9$ 的拟合系数,  $\phi_i$ 和 $\sigma_i$ 控制高斯函数的平滑程度以及形状, 这3个变量对所有样本星相同,  $i$ 对应函数阶数. 通过程序包EMCEE<sup>[24]</sup>对每个样本星的视向速度曲线执行马尔可夫链蒙特卡罗(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)拟合, 得到拟合后的视向速度曲线并进行归一化处理, 归一化公式如下:

$$RV_{\text{normal}} = \frac{RV - RV_{\varphi=0.5}}{RV_{\text{max}} - RV_{\text{min}}}, \quad (2)$$

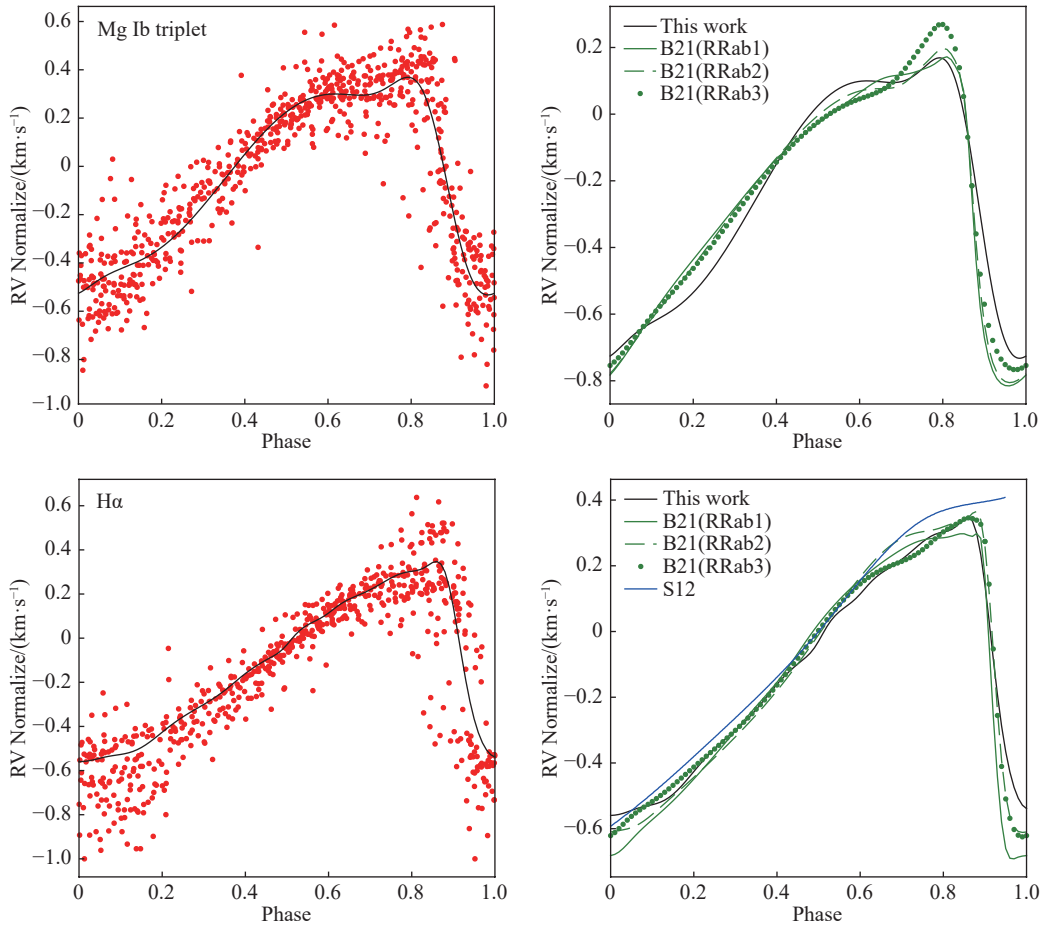


图 5 基于Mg Ib和H $\alpha$ 线建立的天琴座RRab型星的视向速度曲线模板(左)的展示和与已建立模板之间的比较(右)

Fig. 5 The display of the radial velocity curve template of the RRab Lyrae star based on the Mg Ib and H $\alpha$  lines (left) and comparison with the established template (right)

其中,  $RV_{\text{max}}$ 和 $RV_{\text{min}}$ 分别为拟合视向速度曲线的最大值和最小值, 并且将归一化后的曲线零点设置在 $\varphi = 0.5$ . 最终, 基于Mg Ib和H $\alpha$ 线建立的天琴座RRab型星的视向速度曲线模板, 并且与已建立模板之间的比较, 如图5所示. 图5左图展示的是使用PEGASUS函数<sup>[10]</sup>定义归一化后的视向速度曲线的平均形状. 图5右图展示了最佳拟合结果与Sesar<sup>[9]</sup>(以下简称S12)和Braga等<sup>[10]</sup>(以下简称B21)提供的视向速度曲线模板的比较, RRab1 (Period < 0.55 d)、RRab2 (0.55 d < Period < 0.70 d)和RRab3 (Period > 0.70 d)分别是B21基于不同周期的RRab得到的RVC. RVC的PEGASUS参数( $a_i$ 、 $\phi_i$ 和 $\sigma_i$ )和标准差( $\sigma$ )如表3所示.

表 3 RVC的PEGASUS参数和标准差  
Table 3 PEGASUS parameter and standard deviation of RVCs after normalization

Template	$a_0$	$a_1$	$\varphi_1$	$\sigma_1$	$a_2$	$\varphi_2$	$\sigma_2$	$\sigma$
	$a_3$	$\varphi_3$	$\sigma_3$	$a_4$	$\varphi_4$	$\sigma_4$	$a_5$	
	$\varphi_5$	$\sigma_5$	$a_6$	$\varphi_6$	$\sigma_6$	$a_7$	$\varphi_7$	
	$\sigma_7$	$a_8$	$\varphi_8$	$\sigma_8$	$a_9$	$\varphi_9$	$\sigma_9$	
Mg Ib	-2.473	38.396	-0.513	0.362	30.954	0.499	11.448	0.159
	5.584	-2.489	5.612	0.474	-5.654	0.201	-16.699	
	3.162	-2.966	-15.187	2.643	2.254	-39.108	6.485	
	-0.365	7.508	3.508	6.304	-11.734	-0.974	-116.312	
Ha	186.275	-184.789	-318.626	-0.134	-161.149	186.695	-0.422	0.167
	74.929	-15.551	1.245	68.143	-480.303	0.393	108.438	
	87.952	0.265	104.250	256.695	0.465	185.008	234.373	
	0.134	-265.887	99.497	-2.568	-107.906	113.953	-0.265	

## 4.2 振幅转换

### 4.2.1 视向速度振幅与光变曲线振幅之间的转换关系

Liu<sup>[8]</sup>首先发现RRL基于金属线测量的视向速度曲线振幅与V波段光变曲线之间存在显著相关

性. 本研究同样观察到这种相关性. 图6展示了RRab的视向速度曲线振幅与ZTF的g波段光变曲线振幅之间的关系. 通过非加权线性最小二乘法拟合Amp(RV)与Amp(g), 确立了RRab振幅转换关系.

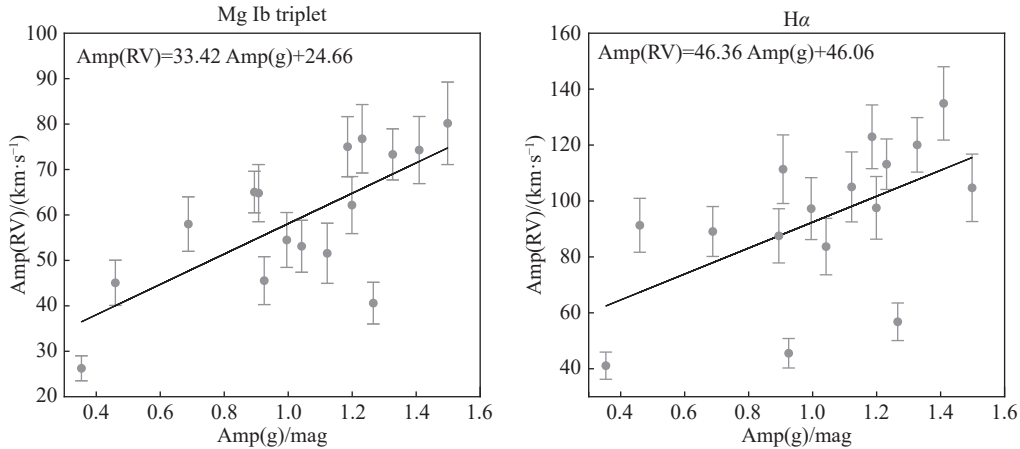


图 6 视向速度振幅与光变曲线振幅之间的转换关系

Fig. 6 The conversion relationship between radial velocity amplitude and light curve amplitude

$$\text{Amp(RV)}_{\text{Mg}} = 33.42\text{Amp(g)} + 24.66, \quad (3)$$

$$\text{Amp(RV)}_{\text{Ha}} = 46.36\text{Amp(g)} + 46.06. \quad (4)$$

### 4.2.2 不同波段光变曲线振幅转换关系

在建立RVC的过程中, 关键步骤包括推导视

向速度曲线振幅与光变曲线振幅之间的转换关系以及模板的建立. 这些工作主要基于ZTF的g波段数据. 为了增强结果的普适性, 我们还对几个大型时域测光巡天如Gaia DR3和ASAS-SN的光变曲线振幅之间的关系进行了转换. 我们将整个Gaia

DR3 RRab星表与ZTF DR15、Gaia DR3和ASAS-SN交叉匹配. 通过这一匹配过程, 在ZTF的g波段获得了19636条RRab型变星的光变曲线, 在ZTF的r波段获得了15954条, 在ZTF的i波段获得了2623条, 在Gaia的G波段获得了60567条, 而在ASAS-SN的V波段获得了18506条.

图7展示了RRab型变星ZTF g波段光变曲线振幅与其他波段(ZTF的r波段和i波段、Gaia G波段、ASAS-SN V波段)光变曲线振幅的关系. 结果表明, 除ASAS-SN的V波段外, 其余波段的光变曲线振幅与ZTF的g波段振幅密切相关, 而ASAS-

SN的V波段与ZTF的g波段之间的关系存在较大弥散. 通过检查ZTF图像发现, 这种现象主要有两个原因: 恒星聚集在过密区域或附近有更亮恒星. 为验证异常值, 绘制了ZTF与Gaia、ASAS-SN星等关系图(见图8), 依据Gaia的G波段星等进行划分(以灰色线表示), 可以发现ASAS-SN的V波段星等更加离散. 在拟合ASAS-SN的V波段光变曲线振幅与其他波段振幅关系时, 我们将异常值( $> 3\sigma$ )进行标记并排除在拟合值以外, 如图7中浅灰色标记点. 最终得到ZTF的g波段光变曲线振幅与其他波段光变曲线振幅的关系:

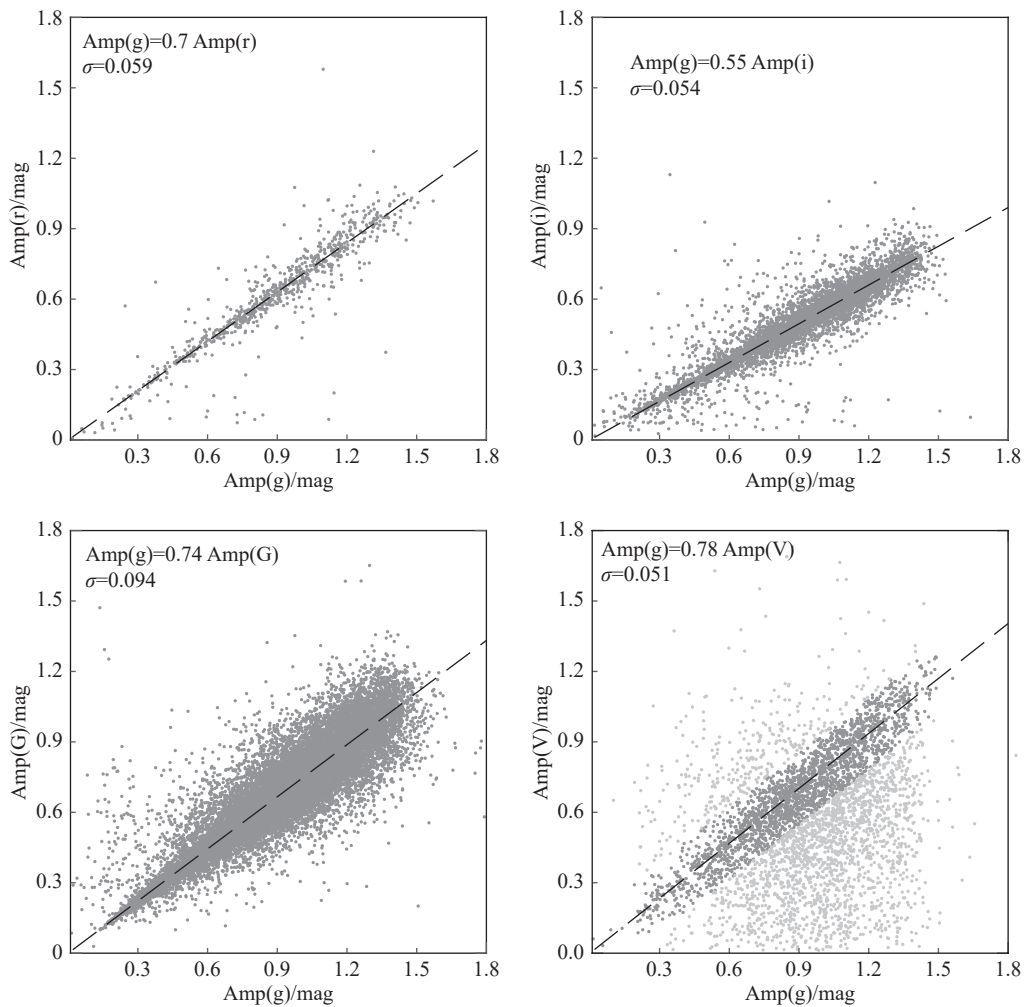


图 7 不同波段光变曲线振幅转换关系

Fig. 7 Amplitude conversion relationship of light curve in different bands

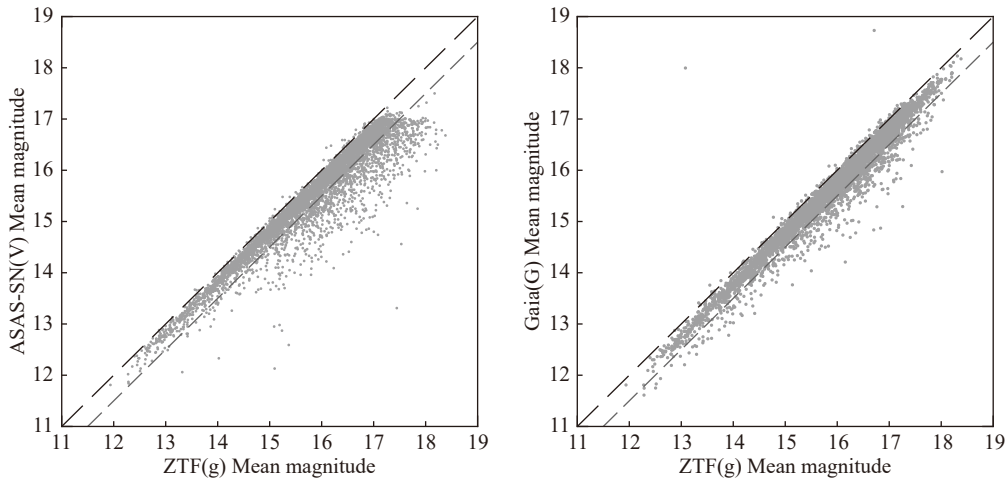


图 8 不同巡天视星等之间的差异

Fig. 8 Differences between different survey apparent magnitudes

$$\text{Amp}(g) = 0.70\text{Amp}(r), \quad (5)$$

$$\text{Amp}(g) = 0.55\text{Amp}(i), \quad (6)$$

$$\text{Amp}(g) = 0.74\text{Amp}(G), \quad (7)$$

$$\text{Amp}(g) = 0.78\text{Amp}(V). \quad (8)$$

### 4.3 应用模板

RRL的视向速度由质心视向速度和恒星脉动速度组成. 关于从观测视向速度曲线推导质心视向速度的方法一直存在争议. Sesar<sup>[9]</sup>建议将相位为0.5时的视向速度值作为质心视向速度, 但Oke等<sup>[7]</sup>的研究表明, RRab星SU Dra在相位0.4时膨胀到最大. 由于光谱中的谱线代表恒星大气中某一特定质量层的速度, 不同谱线的质心视向速度可能对应不同相位处的视向速度. 因此, 本工作假设质心视向速度等于视向速度曲线的平均值以减少偏差.

在具体使用时, 首先需根据目标源的光变曲线确定脉动周期、光变曲线振幅及 $T_{\max}$  (取此时刻作为相位零点). 利用观测光谱的Mg Ib三重线或H $\alpha$ 线获取对应的视向速度并根据光谱观测时间确定相位. 对每一个视向速度测量值, 用视向速度曲线振幅对模板进行缩放, 然后将缩放后的模板与相应相位的测量值匹配, 得到视向速度曲线, 其平均值即为质心视向速度. 如果有多个相位的视向速度测量值, 则对每一个视向速度测量值匹配

一条视向速度曲线, 按前述方法得到一个质心视向速度, 所有质心视向速度的平均值作为该目标源的最终质心视向速度.

### 4.4 验证模板

#### 4.4.1 与B21、S12模板的比较

根据B21, RRab按周期分为RRab1 ( $< 0.55$  d)、RRab2 (0.55–0.70 d)和RRab3 ( $> 0.70$  d). 我们从每类中选取一颗星(V Ind、SX For、AT Ser)作为测试样本, 采用B21计算得到的质心视向速度( $RV^{B21}$ )(见B21提供的表9、表10)作为检验模板准确性的标准. 将待比较的模板应用于每个测量值, 通过拟合的视向速度曲线计算质心视向速度( $RV^{\text{Temp}}$ ), 并用误差传递公式确定其不确定性, 最后利用偏移量 $\Delta RV = RV^{\text{Temp}} - RV^{B21}$ 估计模板精度.

在应用模板时发现, H $\alpha$ 线估计的质心视向速度在0.9 ~ 1.0相位时被高估, 且激波对RRL光谱中氢线和金属线的影响主要发生在0 ~ 0.15和0.85 ~ 1.0阶段. 因此, 在图9中, 将小于0.1和大于0.9相位的视向速度测量值匹配到的视向速度曲线用灰色虚线表示. S12文章提到, 相位大于0.9时, RRL的视向速度快速变化, 影响光谱的模糊度, 故在利用H $\alpha$ 线视向速度曲线模板时,  $\Delta RV$ 的计算不包括0 ~ 0.1和0.9 ~ 1.0相位的测量值.

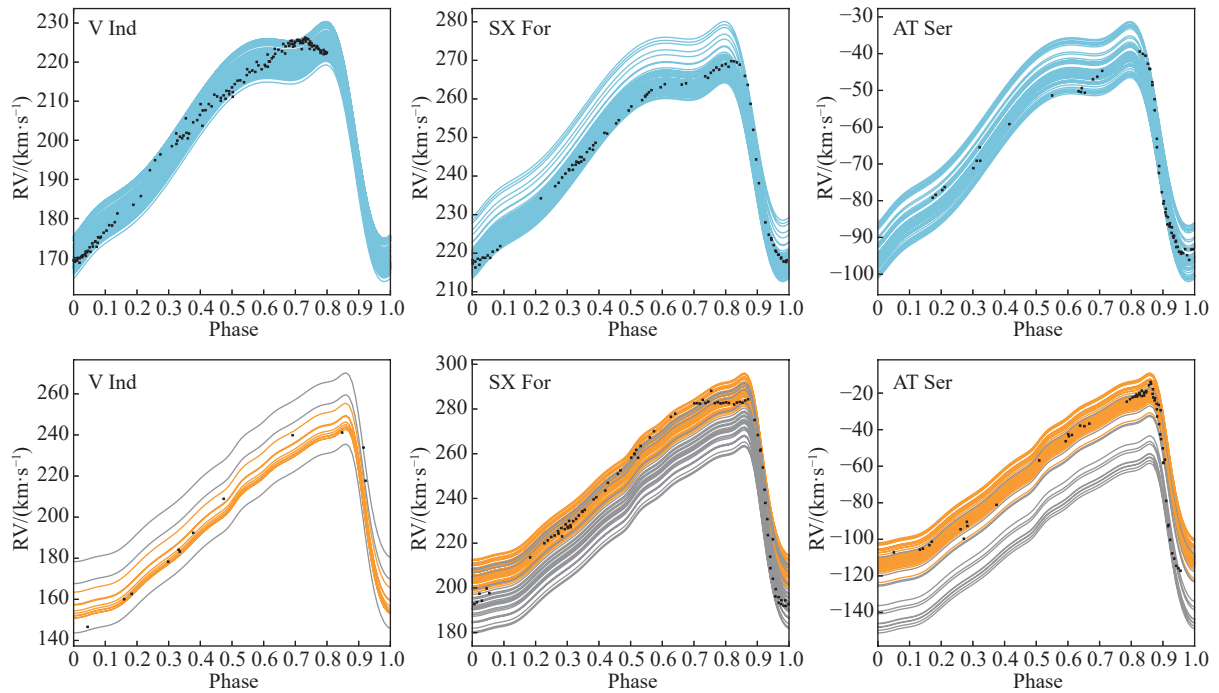


图 9 应用建立的视向速度曲线模板得到的拟合视向速度曲线

Fig. 9 The fitted radial velocity curve is obtained by using the established radial velocity curve template

将S12建立的RRab的 $H\alpha$ 视向速度曲线模板和B21文章中建立的RRab的Mg Ib和 $H\alpha$ 视向速度曲线模板分别应用于测试样本中, 图10展示了应用B21建立的视向速度曲线模板得到的拟合视向速度曲线, 图11展示了应用S12建立的视向速度曲线模板得到的拟合视向速度曲线. 需要注意的是, S12建立的模板基于相位零点为光变曲线的 $T_{\max}$ , 而B21文章中的相位零点锚定在光变曲线上分支上的星等平均值( $T_{\text{mean}}$ ). 为了内部一致性, S12和B21的视向速度曲线模板通过各自的转换方程进行缩放, 而不是使用本文建立的视向速度曲线模板的振幅转换方程. 由于S12给出的 $H\alpha$ 视向速度曲线模板不完整, 仅覆盖相位 $0 \sim 0.948$ 阶段, 因此无法将得到的视向速度曲线的平均值作为质心视向速度, 而是利用S12中提供的相位0.5处对应的视向速度作为质心视向速度. 最后, 将3个模板的结果进行比较, 表4展示了对于3颗样本星使用不同模板计算 $\Delta RV$ 的比较.

与其他模板相比, B21的模板在整个验证中具

有更小的 $\Delta RV$ 中位数和标准差, 这可能是因为数据取自B21文献中建立模板的数据. 此外按照周期将RRab分类得到的模板可能更有利于得到更精确的质心视向速度. 但本文收集到的RRab无论是样本数量还是每颗星的单次曝光谱的数量都不足以进行进一步的分类. 但从结果来看, 本文建立的模板的精度与B21模板的精度是类似的.

#### 4.4.2 实测数据验证

通过对LAMOST DR11发布的中分辨率光谱星表与Gaia DR3中的RRL星表进行交叉匹配, 共获得631颗有效源. 其中, 筛选出至少有一次单次曝光谱信噪比大于5的目标源共计141颗, 图12展示了基于Mg Ib三重线和 $H\alpha$ 线计算的质心视向速度和与文献中提供的样本质心视向速度比较. 如图12左图所示, 基于Mg Ib三重线和 $H\alpha$ 线计算的141颗目标源的质心视向速度表现出高度一致性, 标准差 $\sigma=6.91 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . 图12右图所用数据源自Crestani等<sup>[25]</sup>于2021年提供的球状星团样本和Dambis等<sup>[26]</sup>2017年提供的RRL样本. 首先, 将所有

的样本与ZTF的g波段数据进行交叉匹配以获取测光信息; 对于在ZTF中未被观测到的源, 采用Gaia的G波段光变曲线数据作为补充. 随后, 将球状星团样本与LAMOST DR11中分辨率星表进行交叉匹配, 获取对应的光谱数据, 并依据第3.2节所述方法计算视向速度. 最终, 应用本文构建的视向

速度模板计算得到22颗球状星团和38颗RRab的质心视向速度. 经对比分析, 发现本文计算的质心视向速度与Crestani等<sup>[25]</sup>、Dambis等<sup>[26]</sup>的结果基本一致, 其中本文计算的质心视向速度取基于Mg Ib三重线和H $\alpha$ 线计算结果的均值.

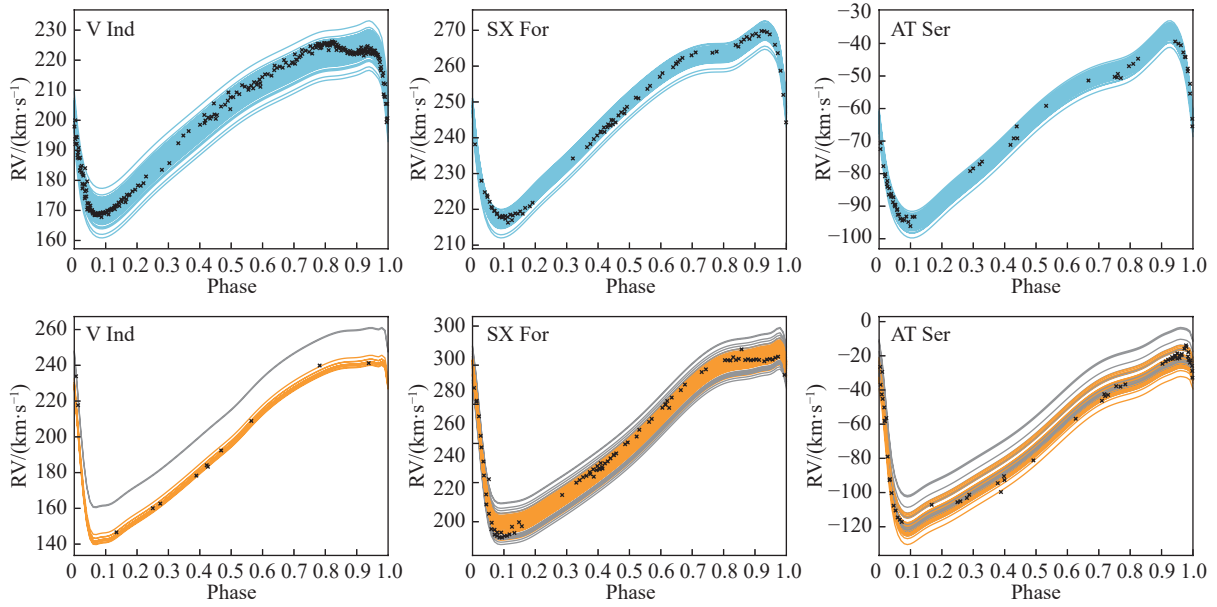


图 10 应用B21建立的视向速度曲线模板得到的拟合视向速度曲线

Fig. 10 The fitting radial velocity curve is obtained by using the radial velocity curve template established by B21

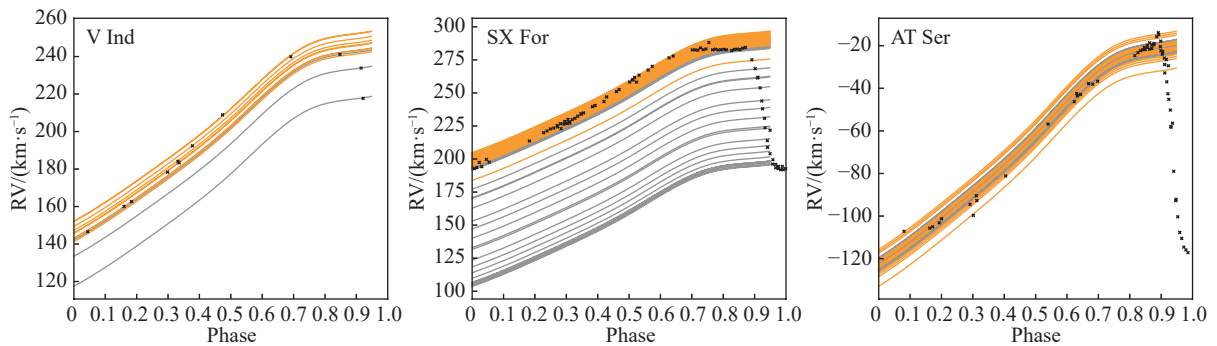


图 11 应用S12建立的视向速度曲线模板得到的拟合视向速度曲线

Fig. 11 The fitting radial velocity curve is obtained by using the radial velocity curve template established by S12

表 4 不同模板误差的比较  
Table 4 Comparison of errors of different templates

Star	$\Delta RV / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$								
	This work			B21			S12		
	Mean	Median	Variance	Mean	Median	Variance	Mean	Median	Variance
Mg Ib									
V Ind	-1.10	-1.98	3.06	-0.03	-0.45	2.45	-	-	-
SX For	0.87	0.57	3.12	0.97	0.78	1.49	-	-	-
AT Ser	1.33	0.94	4.10	0.84	0.98	1.67	-	-	-
H $\alpha$									
V Ind	-2.43	-2.43	3.90	-3.32	-3.51	1.57	6.2	5.82	3.76
SX For	2.01	2.01	3.52	1.57	2.37	2.8	10.1	10.43	3.97
AT Ser	3.90	3.90	4.8	2.24	2.93	3.67	9.9	9.81	3.34

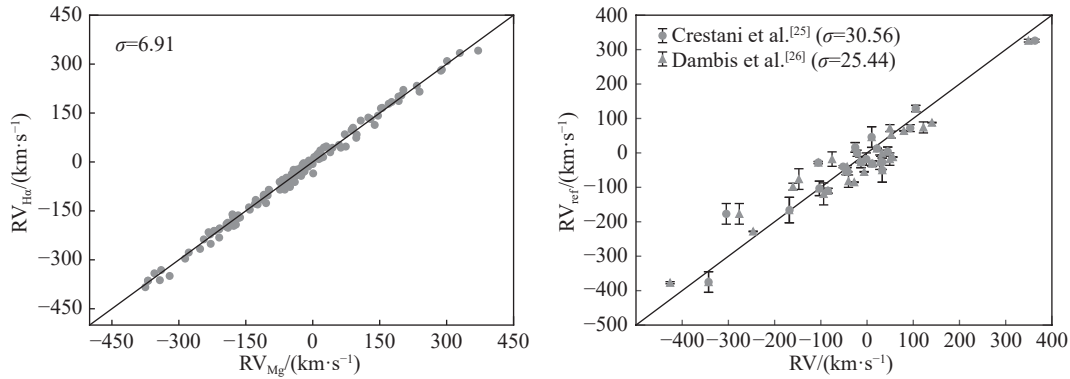


图 12 基于 Mg Ib 三重线和 H $\alpha$  线计算的质心视向速度(左)和与文献中提供的样本质心视向速度比较(右)

Fig. 12 Centroid apparent velocity calculated based on Mg Ib triplet and H $\alpha$  line (left) and compared with sample centroid apparent velocity provided in the literature (right)

## 5 总结

本研究利用 Gaia DR3 和 LAMOST DR9 的数据, 筛选出 22 颗符合条件的 RRab 样本. 通过 FLSP 方法处理样本星的光变曲线, 确定其光变周期和振动模式, 并利用互相关函数 (CCF) 技术基于 Mg Ib 线和 H $\alpha$  线测量样本星的视向速度. 进一步, 利用 22 颗 RRab 的 736 条单次曝光光谱, 构建视向速度曲线模板. 通过与现有模板的比较分析, 本研究的 RVC 在系统速度估计方面具有高度一致性, 标准差均小于  $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 表明模板适用于从 LAMOST 光谱计算 RRab 型变星的质心视向速度.

此外, 通过与 ZTF、Gaia DR3 和 ASAS-SN 测光巡天数据的交叉匹配, 进一步提高了模板的普适性. 随着 LAMOST 巡天的不断开展, 利用该模板将获得越来越多的 RRL 的质心视向速度, 将对利用 RRL 研究银河系运动学、动力学性质产生积极作用.

**致谢** 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高.

## 参考文献

- [1] Liu G C, Huang Y, Zhang H W, et al. *ApJS*, 2020, 247:

- 68
- [2] 吴潮, 胡景耀. 天文学进展, 2006, 24: 308
- [3] Schwarzschild M. *HarCi*, 1940, 437: 1
- [4] Clementini G, Ripepi V, Garofalo A, et al. *A&A*, 2023, 674: A18
- [5] Drake A J, Graham M J, Djorgovski S G, et al. *ApJS*, 2014, 213: 9
- [6] Sesar B, Vivas A K, Duffau S, et al. *ApJ*, 2010, 717: 133
- [7] Oke J B, Giver L P, Searle L. *ApJ*, 1962, 136: 393
- [8] Liu T. *PASP*, 1991, 103: 205
- [9] Sesar B. *ApJ*, 2012, 144: 114
- [10] Braga V F, Crestani J, Fabrizio M, et al. *ApJ*, 2021, 919: 85
- [11] Liu G C, Huang Y, Bird S A, et al. *MNRAS*, 2022, 517: 2787
- [12] Wang F, Zhang H W, Xue X X, et al. *MNRAS*, 2022, 513: 1958
- [13] Cabrera-Garcia J, Beers T C, Huang Y, et al. *MNRAS*, 2024, 527: 8973
- [14] Liu C, Fu J, Shi J, et al. *arXiv*, 2020, arXiv: 2005.07210
- [15] Huang Y, Fang M, Liu G, et al. *RAA*, 2024, 24: 075009
- [16] Elsanhoury W H. *NewA*, 2024, 112: 102258
- [17] Reyes M C, Anderson R I, Johansson L, et al. *A&A*, 2024, 684: A173
- [18] Chen X, Wang S, Deng L, et al. *ApJS*, 2020, 249: 18
- [19] Townsend R H D. *ApJS*, 2010, 191: 247
- [20] Press W H, Rybicki G B. *ApJ*, 1989, 338: 277
- [21] Zhang B, Li J, Yang F, et al. *ApJS*, 2021, 256: 14
- [22] Wang R, Luo A L, Chen J J, et al. *ApJS*, 2019, 244: 27
- [23] Nidever D L, Holtzman J A, Prieto C A, et al. *ApJ*, 2015, 150: 173
- [24] Foreman-Mackey D, Hogg D W, Lang D, et al. *PASP*, 2013, 125: 306
- [25] Crestani J, Braga V F, Fabrizio M, et al. *ApJ*, 2021, 914: 10
- [26] Dambis A, Berdnikov L, Grebel E, et al. *EPJC*, 2017, 152: 02007

## Radial Velocity Curve Template for RRab Lyrae Star

ZHANG Chen-qian-xi<sup>1,2</sup> HUANG Yue<sup>1,2,3</sup> LIU Gao-chao<sup>1,2</sup> FANG Min<sup>3,4</sup> ZHANG Peng<sup>1,2</sup>  
LIU De-jian<sup>1,2</sup> CHEN Yu-xiao<sup>1,2</sup>

(1 College of Mathematics and Physics, China Three Gorges University, Yichang 443002)

(2 Center for Astronomy and Space Science, China Three Gorges University, Yichang 443002)

(3 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(4 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**ABSTRACT** As an important cosmic distance indicator, the RRab Lyrae star (RRab) plays a significant role in studying the dynamical properties of the Milky Way. However, due to the pulsation characteristics of RRab, their radial velocities include not only heliocentric velocities but also pulsation velocities, which poses a challenge for precise measurements. This study utilizes the Mg Ib line and H $\alpha$  line from the medium-resolution spectra in Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST) to establish radial velocity curve templates for RRab, aiming to enhance the precision of heliocentric radial velocity measurements. Comparative analysis with existing templates indicates that the radial velocity curve templates in this study exhibit high consistency in radial velocity estimation, and the standard deviations of the heliocentric radial velocities calculated based on the radial velocity curve templates established in this paper are less than 5 km  $\cdot$  s<sup>-1</sup>. The radial velocity curve templates established in this study are applicable for calculating the heliocentric radial velocities of RRab from the LAMOST spectra.

**Key words** stars: variables: RR Lyrae, methods: data analysis, techniques: radial velocities, techniques: spectroscopic, techniques: photometric