

激变变星光谱参数测量研究

姜 斌, 赵永健, 王璐瑶, 韦纪宇, 曲美霞*

山东大学(威海)机电与信息工程学院, 山东 威海 264209

摘 要 激变变星是一类特殊而且数量稀少的双星系统, 其主星是一颗白矮星, 伴星通常是一颗充满洛希瓣的光谱型为 G, K 或 M 型的晚型星或矮星。激变变星是一类爆发型的恒星, 对于研究密近双星的演化具有积极的意义。激变变星按照爆发特征和光变特征可以分为很多亚型, 如新星、再发新星、矮新星、类新星和磁激变变星。同时激变变星又是一类周期型的变星, 这些因素都导致其可见光光谱非常复杂。目前对于激变变星的参数测量, 主要通过后续观测来测量其轨道周期、主星和伴星之间的距离等。由于在吸积的过程中, 物质在白矮星的表面累积, 无法直接测量主星的物理参数, 而且激变变星本身是一种暗弱的天体, 实测光谱数量较少, 因此极大限制了对激变变星物理参数的系统研究。目前唯一能够生成激变变星理论光谱的软件是基于光致电离模型的 CLOUDY, 但 CLOUDY 存在采样点过于稀少以及参数太多等问题, 不能作为理想的理论光谱模板。法国 ELODIE 高分辨率的光谱可以作为 M 型恒星光谱参数测量的理论模板。前期工作中, 通过机器学习等方法在美国斯隆巡天和在中国郭守敬望远镜巡天数据中发现了一批激变变星。通过人工筛选, 选择了伴星是 M 型的 407 条实测光谱, 这些光谱大部分是宁静期的矮新星, 光谱的主要特征是巴尔末线系和氢的发射线。再通过与高分辨率的 ELODIE 光谱交叉, 利用 SDSS-casjob 数据库中的 ELODIE 参数, 对激变变星的红端部分进行模板匹配, 系统测量了其伴星的物理参数。为了降低计算量, 对高维的光谱分别通过主分量分析和局部线性嵌入两种方法进行了特征提取和降维。实验结果表明 LLE 方法在邻域大小 15, 维度 59 时达到最高贡献率 94.91%。根据 PCA 和 LLE 的交集, 最终光谱的维度确定为 59。实验中发现激变变星的伴星中 M2 型数量极少, 具体原因需要更多的样本来解释。因为实验中激变变星光谱中, 只有部分有明显的分子带特征, 因此那些在爆发下降阶段或者光谱被吸积盘特征控制的激变变星没有进行参数测量。该实验弥补了激变变星光谱物理参数测量的空白。

关键词 光谱; 参数测量; 激变变星

中图分类号: TP29

文献标识码: R

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)09-2935-05

引 言

激变变星(cataclysmic variable stars, CVs)是一类密近的短周期双星系统, 同时也是一类时变天体。因为数量稀少而且其本身是一类暗弱的天体, 所以最新的激变变星星表^[1-2]收录的数量只有 1 829 颗, 获得认证的只有 1 600 颗, 其中有光谱的 CVs 数量更是低于 1 000。这些都极大限制了对这类天体的研究。在光谱中, CVs 的伴星(通常是 K 型或 M 型主序星)的流量受到吸积盘的极大影响。激变变星的物理参数测量工作目前尚未见系统的研究和报道。

增加激变变星的样本数量主要依赖于巡天项目。郭守敬

望远镜^[3]于 2017 年 12 月 31 日, 发布了包含先导巡天和正式巡天的 LAMOST-DR5 (large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope, LAMOST)数据。

美国斯隆数字巡天(sloan digital sky survey, SDSS)目前正在进行第五期巡天并已经发布了 DR14 (data release)数据^[4]。这些海量的中低分辨率光谱为 CVs 的自动搜索提供了数据源。Jiang 在前期工作中^[5]通过数据挖掘等方法获得了一批 SDSS 和 LAMOST 的激变变星光谱, 其中大部分是宁静期的激变变星。

对 CVs 这类稀少天体的参数进行测量, 需要高分辨率的实测光谱或者理论光谱。目前唯一能够生成类似 CVs 光谱的软件是 CLOUDY^[6]。CLOUDY 通过光致电离模型来模

收稿日期: 2018-07-06, 修订日期: 2018-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(11473019), 山东省自然科学基金项目(ZR2017MA046, ZR2018MA032)资助

作者简介: 姜 斌, 1977 年生, 山东大学(威海)机电与信息工程学院副教授 e-mail: jiangbin@sdu.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: whkunyushan@163.com

拟发射线产生的过程。理论上可以通过设置参数,计算 CLOUDY 模型产生的发射线光谱库作为理论模板,再由实测 CVs 光谱同理论光谱进行模板匹配,得到相似度最高的光谱,并以此理论光谱的参数来近似模拟实测 CVs 光谱的参数。但 CLOUDY 软件只能模拟发射线部分光谱而且采样点太少,并不能作为理想的 CVs 理论光谱。

法国 ELODIE^[7]望远镜的主要目的是利用径向速度法来探测行星外行星,同时也用于 M 矮星(M-Dwarf)的研究。ELODIE 高分辨率的光谱可以作为 M 型恒星光谱参数测量的理论模板。

本文通过 SDSS 的 Casjob^[8]获取 M 型的高信噪比恒星光谱,通过与 ELODIE 数据交叉,获得光谱的物理参数,作为模板。然后将 407 条激变变星进行降维后,再通过模板匹配的方法,获得激变变星伴星(红端部分)的物理参数。

1 实验数据

作为一类变星同时又是双星系统, CVs 的光谱较为复杂。极少数的 CVs 处于爆发或者爆发下降阶段,此时的 CVs 光谱出现吸收特征。绝大多数的 CVs 处于宁静期,光谱见图 1: 光谱中的发射线主要是 Balmer 线系(6 564, 4 862, 4 341 和 4 102 Å)、He I (5 876 Å)和 He II (4 686 Å),从红端部分可以看到明显的 TiO 分子带(6 852, 7 126, 7 672 Å)。图中最下一条光谱为 M 型恒星。

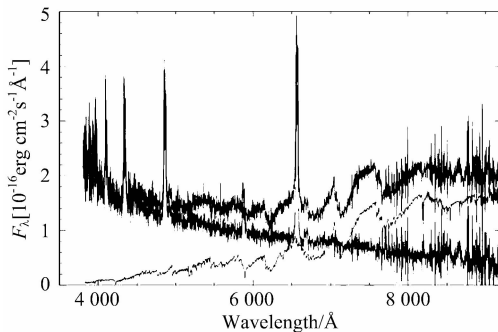


图 1 激变变星光谱图
Fig. 1 Spectrum of CVs

通过对图 1 的 CVs 光谱进行分解,可以看出 CVs 是由白矮星和晚型主序星构成。对前期工作中获取的 CVs 光谱进行筛选,选择出红端有分子带特征的 407 条光谱。光谱只截取 6 000~9 000 Å 的红端部分并作归一化处理。

从 SDSS 的 Casjob 中选择 M 型光谱遵循两个条件:(1)信噪比高于 20;(2)和 ELODIE 数据有交叉。最终满足条件的 M 型光谱共 1 894 条,类型分布比较均匀,见图 2,横轴(M0—M9)为光谱类型。

因为 CVs 光谱主要表现为吸积盘的发射线特征,而且普遍存在信噪比低的问题,红端的分子带部分需要进行降噪处理。CVs 光谱的预处理主要包括对光谱拟合连续谱之后,减去连续谱,将原光谱拉平,见图 3 和图 4。并使用中值滤波将光谱的窄吸收线尽量去除。图中横轴为采样点。

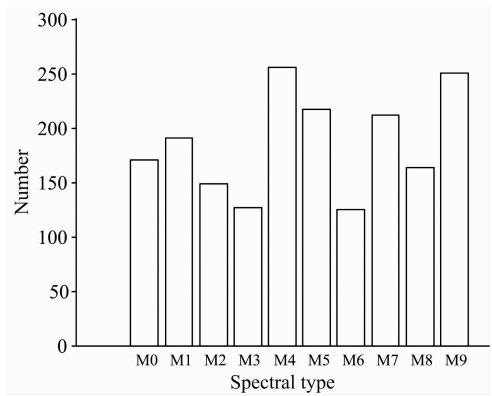


图 2 M 型光谱分布图
Fig. 2 Distribution of M spectra

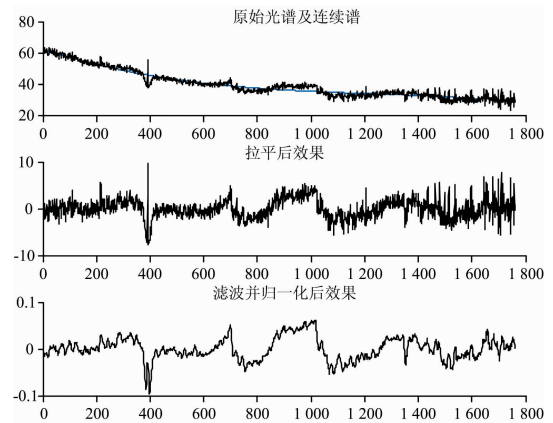


图 3 CV 拟合-拉平-滤波效果图
Fig. 3 Filtered spectrum of CVs

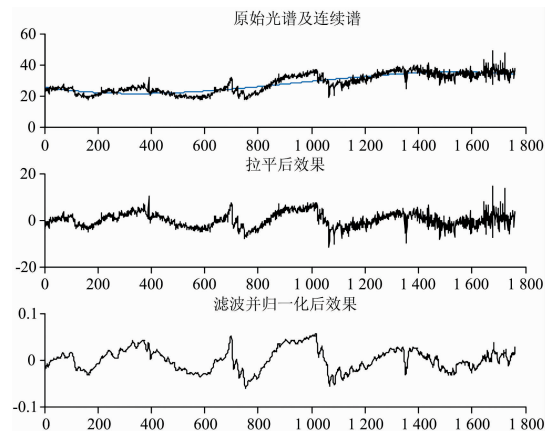


图 4 M 型拟合-拉平-滤波效果图
Fig. 4 Filtered spectrum of M star

2 实验部分

2.1 光谱维度的确定

为了减少模板匹配的计算量,本文将 CVs 和模板的光谱均进行了降维处理。为保证特征提取的客观性,同时使用主分量分析(principle component analysis, PCA)^[9]和局部线

性嵌入(locally linear embedding, LLE)^[10] 2 种方法, 互相约束。

首先根据式(1)计算 PCA 的方差贡献率

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^K \lambda_i}{\sum_{i=1}^L \lambda_i} \quad (1)$$

其中 L 为原始光谱维度, K 为光谱矩阵的前 K 个最大的特征值。PCA 的方差贡献率随着 K 的变化见表 1。

表 1 PCA 方差贡献率

Table 1 Variance contribution rate of PCA

K	$\mu/\%$
20	90.5
28	91.4
36	92.0
47	91.4
60	92.6
78	92.7
100	93.1

从表 1 可见, 方差贡献率随着 K 的增长而变化, 在 $K=60$ 之后增长率降低。

LLE 需要确定每个样本最近的 K 个点, 根据式(2)和式(3)计算表示距离第 i 条光谱最近的第 j 条光谱的权值 W_{ij} 。

$$C_{jk} = (\bar{X}_i - \bar{X}_j^{(i)}) (\bar{X}_i - \bar{X}_k^{(i)}) \quad (2)$$

$$W_{ik} = \frac{\sum_j C_{jk}^{-1}}{\sum_j C_{jk}^{-1}} \quad (3)$$

最后根据式(4), 计算每条光谱 X_i 对应的低维向量 Y_i 。

$$S'(W) = \sum_{i=1}^M \left| Y_i - \sum_{j=1}^M W_{ij} Y_j \right|^2 \quad (4)$$

本文将 LLE 的两个超参数即邻域点数量 K 和最终的维度 d 分别设置初始范围为 14~18 和 20~60, 通过 Grid-Search 方法, 用支持向量机(support vector machine, SVM)进行自训练, 自测试。确定最终的 K 和 d , SVM 准确率随着 K 和 d 变化的结果见图 5。

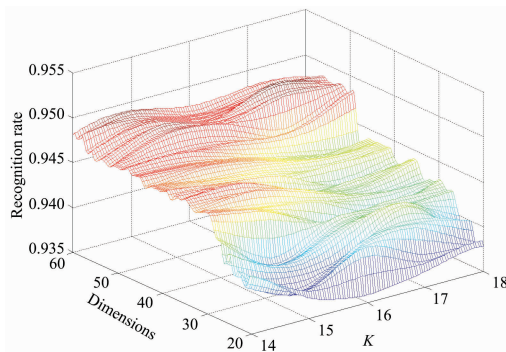


图 5 LLE 准确率等高图

Fig. 5 LLE accuracy contour

实验结果: LLE 方法在邻域大小 15, 维度 59 时达到最高贡献率 94.91%。

根据 PCA 和 LLE 的交集, 最终光谱的维度确定为 59。

3 结果与讨论

对降维后的 CVs 伴星光谱进行模板匹配并统计结果。其伴星的光谱型分布见图 6。从实验结果可以看出, 大部分 CVs 的伴星是 M5 或者 M9, M2 型的伴星数量极少, 而根据图 2, 模板中的 M 型光谱分布比较均匀, 因此需要进一步对该结果进行分析。

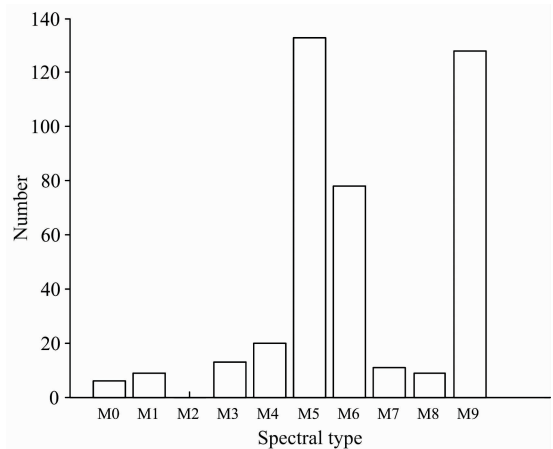


图 6 光谱型分布

Fig. 6 Spectral type distribution of CVs

温度分布见图 7, 数值来自 SDSS-casjob 数据库中的 Elodie 参数。其结果呈现出高斯分布。

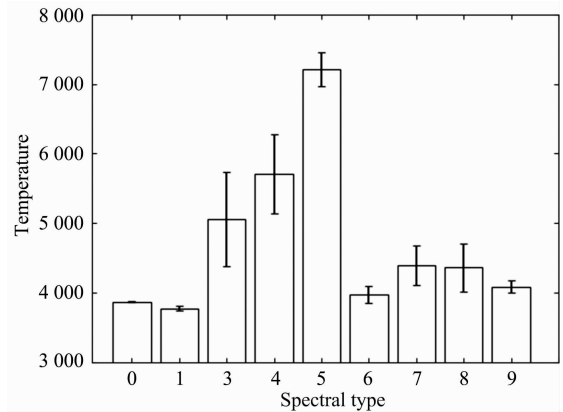


图 7 温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of CVs

重力加速度的分布见图 8。从图中可以看出, 大部分 CVs 伴星是矮星。

元素丰度分布见图 9。

4 结论

CVs 作为一类数量稀少的天体。针对其物理参数测量的实验目前尚未见报道。本文对 CVs 光谱的红端部分进行了模

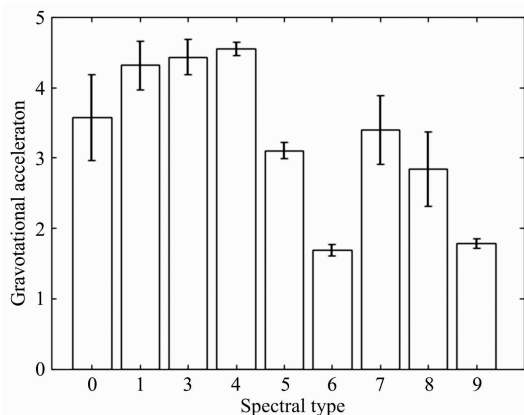


图 8 表面重力分布

Fig. 8 Gravity distribution of CVs

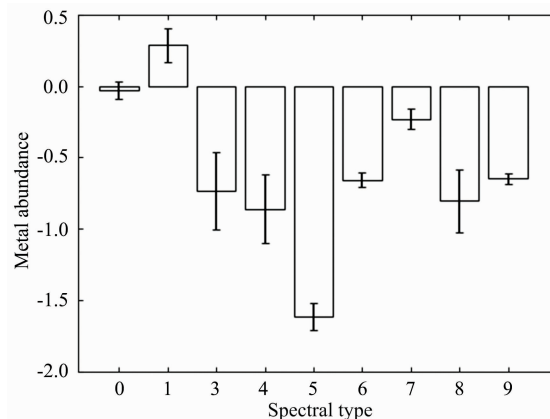


图 9 丰度分布

Fig. 9 Elemental abundance distribution of CVs

板匹配,系统测量了 CVs 伴星的物理参数。因为 CVs 光谱中,只有部分有明显的分子带特征,因此那些在爆发下降阶段或者光谱被吸积盘特征控制的 CVs 没有进行参数测量。实验中发现伴星的中 M2 型的数量极少,是因为选择效应还是其本身的物理机制需要深入探讨。

今后随着郭守敬望远镜的巡天,发现的 CVs 光谱数量将提升一个量级。另外,在后期实验中,我们会增加模板的数量、种类和精度,同时会考虑模板巨星和矮星的区别。这都会大大提高 CVs 物理参数的测量精度。

References

- [1] Jiang Bin, Luo Ali, Zhao Yongheng, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 430(2): 986.
- [2] Wei Peng, Luo Ali, Wang Fengfei, et al. The Astronomical Journal, 2014, 147: 101.
- [3] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. Research in Astron. Astrophys, 2012, 12(9): 1197.
- [4] Law David R, Cherinka Brian, Yan Renbin, et al. The Astronomical Journal, 2016, 152: 83.
- [5] JIANG Bin, LI Zi-xuan, QU Mei-xia, et al(姜 斌, 李紫宣, 曲美霞, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(7): 2275.
- [6] Ferland G, Chatzikos M, Guzmán F, et al. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, 2017, 53: 385.
- [7] Maldonado J, Villaver E. Astronomy & Astrophysics, 2017, 602: A38.
- [8] Ata Metin, Baumgarten Falk, Bautista Julian, et al. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 473(4): 4773.
- [9] Costa Natanael C, Hu Wenjian, Bai Z J, et al. Physical Review B, 2017, 96: 195138.
- [10] Vanderplas Jake, Connolly Andrew. The Astronomical Journal, 2009, 138(5): 1365.

Research on Parameter Measurement of Cataclysmic Variable Stars

JIANG Bin, ZHAO Yong-jian, WANG Lu-yao, WEI Ji-yu, QU Mei-xia*

School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, Shandong University, Weihai, Weihai 264209, China

Abstract Cataclysmic variable star is a kind of special and rare binary system, of which the primary star is a white dwarf and the companion is normally a G, K or M-type late star or dwarf. CVs usually have very large outbursts and have positive significance for the study of the evolution of close binary stars. According to the characteristics of explosion and light variation, CVs can be divided into many subtypes, such as nova, recurrent nova, nova-like stars, dwarf nova and magnetic CVs. As a periodic variable star, the spectra of CVs are very complex. At present, the parameter measurements of CVs focus on the distance and the orbital periodic etc. Since matter accumulates on the surface of a white dwarf during accretion, it is not possible to directly measure the physical parameters of the main star. What is more, CV is a kind of faint celestial body and the number of its spectra is limited. Therefore, the study of the physical parameters of the CVs is greatly restricted. The only software currently capable of generating the spectra of CVs is CLOUDY with a photoionization model. But the number of sampling points of CLOUDY is limited and there are too many parameters. The spectra produced by CLOUDY cannot be used as ideal theoretical template. The high resolu-

tion spectra of ELODIE in France can be used as a theoretical template for measuring the spectral parameters of M-type stars of CVs. In order to compensate the blank of the spectral parameter measurement of CVs, in this paper, spectra with parameters from ELODIE are used as template spectra and 407 SDSS CVs spectra detected by data mining method before are measured by template matching. Most of these spectra are in quiet state and the main characteristic of the spectra are emission lines of Barmer and Helium. In order to reduce the computation, the feature extraction and dimension reduction of high-dimensional spectra are carried out by principal component analysis and local linear embedding. The experimental result shows that the LLE method has a maximum contribution rate of 94.91% with the neighborhood size of 15 and the dimension number of 59. According to the intersection of PCA and LLE, the final dimension of the spectra was determined to be 59. In the experiment, it is found that the number of M2 type companion is limited, and more samples are needed to explain the specific reasons. Because only some of the experimental cataclysmic variable spectra have distinct molecular bands, the spectra in decline stage are ignored. The experiment in this thesis makes up the gap of measurement of physical parameters of the spectra of the CVs.

Keywords Spectra; Parameter measurement; Cataclysmic variable stars

(Received Jul. 6, 2018; accepted Nov. 18, 2018)

* Corresponding author

本 刊 声 明

近期以来,一些不法分子假冒《光谱学与光谱分析》期刊社名义,以虚假网站等形式欺骗广大作者、读者。这些虚假网站公然假冒《光谱学与光谱分析》期刊名义进行大肆的征稿并骗取作者的审稿费和版面费。经部分作者及读者举报,现有关部门已就此介入调查。本刊将通过法律途径向假冒者追究相应的责任,维护本刊权利。

本刊官方网站已正式开通,网址为

<http://www.gpxygpx.com/>

在此郑重声明,本网站为《光谱学与光谱分析》期刊唯一开通运行的官方网站。本刊从未授权任何单位或个人以任何形式(包括网上网下)代理本刊征稿、审稿等项业务。

希望广大读者和作者切实维护好自身的合法权益,防止受骗上当。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2019年3月15日