

[文章编号] 1003—4684(2021)05-0027-05

铰接销轴结构的改进设计

张福祥¹, 吴 雯¹, 李绍安¹, 罗文豹¹, 张文谦²

(1 穆特科技(武汉)股份有限公司, 湖北 武汉 430074; 2 湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 铰接销轴是机械传动系统中重要的连接结构。针对工程机械行业现有铰接销轴设计存在的不足,提出铰接销轴设计必须进行弯曲强度校核,并采用一种改进铰接销轴结构。为了达到优化铰接销轴结构的目的,通过理论计算与有限元计算,分析铰接销轴结构改进前后的剪切强度、弯曲强度和最大应力。结果表明,改进的铰接销轴结构可有效降低铰接销轴的最大弯矩,减小弯曲正应力,提高销轴安全系数,实例中最大弯矩约降低 40%~55%,优化效果十分明显。基于提出的改进结构,对某一款 48 m 混凝土泵车进行设计,减小了销轴轴径,进而减小设备整体结构尺寸,实现整备质量减重 16%,同时结构开裂故障降低了 90%。

[关键词] 铰接销轴; 结构改进; 弯曲正应力; 最大弯矩; 有限元分析

[中图分类号] TP114 [文献标识码] A

在机械结构设计中,铰接用销轴连接是一种常见的机械连接方式。铰接类销轴^[1]通常在连杆机构、油缸或气缸或电动缸间进行铰接,通过驱动执行机构完成各种复杂动作。铰接销轴主要失效形式有弯曲、剪切破坏、疲劳断裂^[2]。

在机械设计手册^[3]中,没有专门针对铰接销轴强度的计算与校核。铰接销轴通常会受到弯剪组合载荷的共同作用。而在销轴设计工作中,一般只采取以下方法对铰接销轴进行静强度校核:其一,核算剪切强度 $\tau=2P/\pi d^2\leqslant\tau_p$, P 为铰接销轴径向负载, d 为销轴直径, τ_p 为销轴的许用剪切应力;其二,基于有限元分析计算^[1,4],对铰接销轴进行静力分析计算,计算应力值 σ 与铰接销轴材料的屈服强度 σ_s 的比值 n_s ,即安全系数,一般保证安全系数 n_s 大于常规设定值即可。然而,在满足上述要求的情况下,实际机械结构仍然连续发生销轴异常断裂现象(图 1)。该销轴在设计时只进行了剪切强度校核。经过材质分析,结合断面形貌,排除了销轴材质和热处理及加工质量问题及疲劳断裂的可能。进行加载分析,该销轴承受弯矩的正应力与机构间结合面承受的剪切应力的共同作用下,正应力大于销轴材质的抗拉强度,安全系数不足,判断为弯曲断裂破坏。因此,在销轴设计计算中,不能只进行剪切强度校核,还必须进行弯曲强度校核。如何通过降低最大弯矩从而降低弯曲正应力已经成为机械铰接销轴设计中

的技术难点。



图 1 销轴断裂截面

本文将建立铰接销轴强度计算模型,基于材料力学基本理论,推导铰接销轴的最大弯矩以及抗弯截面系数,并求解铰接销轴弯曲正应力的校核方法。另外,本文将提出一种改进的铰接销轴结构,通过优化改进铰接销轴的细节结构设计,降低铰接销轴的最大弯矩,有效降低最大弯曲正应力,提高铰接销轴安全系数,保证铰接销轴使用的安全可靠,进一步有效优化减小轴径而全面减小结构尺寸,降低结构整体总重量,达到降低整机负载的目的,实现节能降耗。

1 铰接销轴强度计算模型

1.1 一般铰接销轴结构

一般铰接销轴结构及其受力简化及弯矩图如图 2 所示。根据材料力学基本理论,该销轴最大弯曲正应力

[收稿日期] 2020—10—11

[基金项目] 湖北工业大学博士科研启动基金 BSQD2019008

[第一作者] 张福祥(1964—),男,湖北武汉人,穆特科技(武汉)股份有限公司机械工程师,研究方向为专用机床及自动化,工程机械,自由度平台

$$\sigma_{\max} = M_{\max} / W_z \leq [\sigma]$$

其中, $[\sigma]$ 是许用应力, M_{\max} 是铰接销轴承受的最大弯矩, 按简支梁近似计算, 支撑跨距 $L = L_1 + L_2$, 则

$$M_{\max} = PL/4$$

截面相同时, 最大弯矩 M_{\max} 愈大, σ_{\max} 也就愈大。 d 和 d_0 分别是销轴直径和内孔直径, W_z 为抗弯截面系数, 表示为:

$$W_z = \pi(d^4 - d_0^4)/32d$$

铰接销轴剪切应力 $\tau = P/2A$ 。

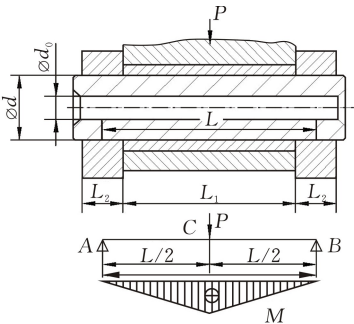


图2 一般销轴结构受力及弯矩

1.2 改进铰接销轴结构

在某些情况下, 传统铰接销轴结构难以满足设计尺寸及强度需求。本文提出了改进铰接销轴结构及其受力简化及弯矩图见图3。

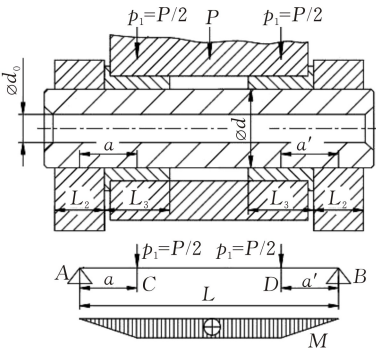


图3 改进后的受力及弯矩

图3中, 最大弯矩 M_{\max} 分布在 $C - D$ 点间, 可以表示为

$$M_{\max} = M_c = M_d = Pa/2$$

其中 $a = (L_2 + L_3)/C$

根据最大弯矩计算方法^[5], 假设轴向间隙为零, 当外载荷在轴套与销轴接触处均匀分布时, $C = 2$; 当轴套与销轴间弹性接触时, $C = 3$ 。

图2为设计的铰接销轴, 中间滑动轴套为贯穿的整体长轴套, 因此按图2所示简支梁及式(2)简化计算铰接销轴最大弯矩 M_{\max} ; 图3为改进后的铰接销轴结构, 原长轴套一分为二, 两端均为带法兰的轴套, 以实现轴套的轴向定位并与铰接销轴中部留有一段长度非接触区间(图中轴套间的空白区域所示)。因此, 按图3所示简支梁及式(5)简化计算

铰接销轴最大弯矩 M_{\max} 。

图4上图为改进前的三角形弯矩图。相比改进前的一般结构, 图4是消除了十字交叉双点划线的剖面线区域而形成了新的弯矩梯形简图, 实现了弯矩最大峰值的消峰处理, 从而具有更小的弯矩。

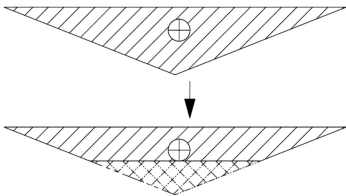


图4 弯矩消峰

2 强度计算分析

2.1 案例1

某连杆机构中一般结构的铰接销, 原设计的一般结构和改进及优化后的铰接销轴结构相关参数在表1中列出, 铰接销轴材料采用调质40Cr钢, 屈服极限 σ_s 为785 MPa, 抗拉强度 σ_b 为980 MPa。

表1 案例1结构改进前后及优化的设计参数

铰接销轴设计参数	改进前	改进后	优化后
载荷 P/kN	140	140	140
轴径 d/mm	70	70	50
轴承外宽度 L_1/mm	95	—	—
支撑宽度 L_2/mm	33.5	33.5	33.5
轴承内宽度 L_3/mm	—	40	40

对案例1载荷在轴套与销轴接触处分别按均匀分布和弹性接触进行最大弯矩、最大正应力、安全系数的计算, 计算结果见表2。

表2 案例1理论计算与有限元分析结果

理论计算	铰接销轴形式	改进前	改进后	优化后
	最大剪切应力/MPa	18.19	18.19	35.65
	最大弯矩/Nm	均匀分布 4.50	2.57	2.57
	弹性接触 4.11	1.72	1.72	
弯曲最大正应力/MPa	均匀分布	133.56	76.39	209.63
	弹性接触	121.95	50.93	139.75
安全系数	均匀分布	7.34	12.83	4.67
	弹性接触	8.04	19.24	7.01
FEM分析	最大应力值/MPa	292.6	259.8	359.5
	安全系数	2.68	3.02	2.18

通过结构改进和优化的铰接销轴, 其最大弯矩值相同, 按均匀分布和弹性接触计算分别下降42.8%和58.2%。相比改进前的一般结构, 改进和优化后铰接销轴结构的弯矩图进行了消峰处理, 从而具有更小的弯矩。改进后和优化后的最大弯曲正应力降低也十分明显。由于改进后弯曲正应力的降低, 可进一步优化将轴径由 $\varphi 70\text{ mm}$ 优化至 $\varphi 50\text{ mm}$, 优化后的最大弯曲正应力和安全系数仍然满

足设计使用要求。

采用三维软件 Solidworks 进行 Simulation 分析。约束固定支撑宽度的轴下半部分半圆面,140 kN 力加载作用在轴承上半部分半圆面上,网格设置为最良好密度、标准网格参数,分析后得到 von Mises 应力云图(图 5),图 5 下部网格部分为网格及约束加载示意图。虽然单元格密度参数等设置不同,最大 Mises 应力有所出入,但结果变化的趋势相差不大。

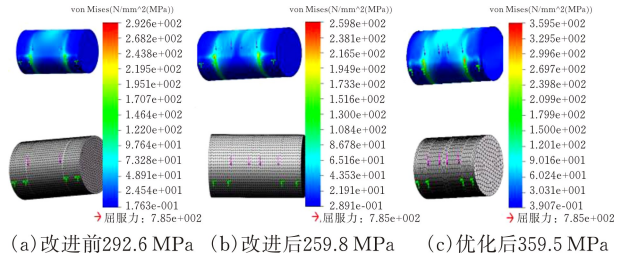


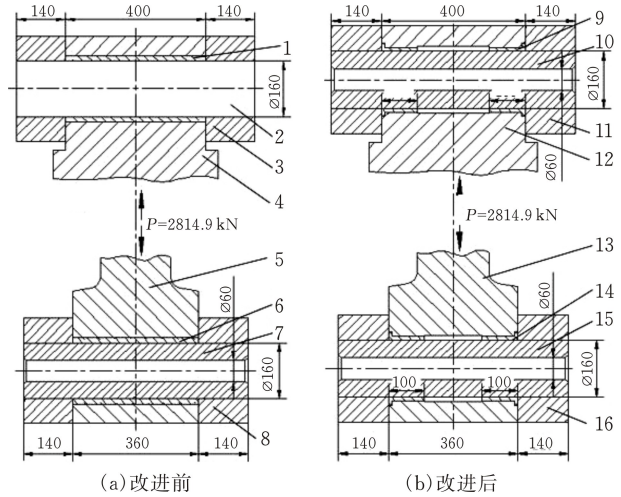
图 5 案例 1 销轴的网格及有限元分析应力云图

3 组设计参数的铰接销轴有限元仿真计算分析结果见表 2。可见,对铰接销轴进行改进后,最大应力降低了 11.2%;而将改进后结构的铰接销轴由 $\varphi 70$ mm 减小至 $\varphi 50$ mm 轴径后,最大应力比一般结构的铰接销轴提高了 22.9%,改进后和再次优化后的安全系数为 2.18~3.02。

2.2 案例 2

针对某连杆机构中油缸前后铰接销轴进行计算分析。缸径 $\varphi 320$ mm,系统额定压力 35 MPa,销轴沿油缸轴线负载即油缸最大推力 2814.9 kN。结构如图 6a 所示,上端为无杆腔端销轴局部结构,下端为有杆腔端销轴局部结构。铰接销轴采用调质 42CrMo 钢,屈服极限 σ_s 为 930 MPa,抗拉强度 σ_b 为 1080 MPa。对于一般销轴结构,两端销轴最大弯矩在轴承中性面上,计算出的弯曲正压力过大。因此,进行如图 6b 所示的改进,将长轴套一分为二、并在轴套外端设置有法兰端,以实现轴套的轴向定位、

以及轴中部留出与轴套间的一段长度非接触区间,其中无杆端铰接销轴增加了 $\varphi 60$ 孔,以便于轴减重并改善轴热处理均匀性。改进前后相关参数在表 3 中列出。



- (a)改进前 (b)改进后
- 1—无杆腔端长轴套;2,10—无杆腔端销轴;
3,11—无杆腔端铰座;4,12—无杆腔端铰接体;
5,13—活塞杆头;6—活塞杆头长轴套;
7,15—活塞杆端销轴;8,16—活塞杆端铰座;
9—活塞杆头短轴套;14—活塞杆头短轴套

表 3 案例 2 改进前后的设计参数

设计参数	无杆端销轴		有杆端销轴	
	改进前	改进后	改进前	改进后
载荷 P/kN	2814.9			
轴径 d/mm	160	160	160	160
轴孔径 d_0/mm	—	60	60	60
轴承外宽度 L_1/mm	400	—	360	—
支撑宽度 L_2/mm	140	140	140	140
轴承内宽度 L_3/mm	—	100	—	100

对案例 2 按载荷在轴套与销轴接触处均匀分布和弹性接触,分别计算出最大弯矩、最大正应力、安全系数。计算结果见表 4。

表 4 案例 2 理论计算与有限元分析结果

铰接销轴形式			无杆端销轴		有杆端销轴	
			改进前	改进后	改进前	改进后
理论 计算	最大剪切应/MPa		70	81.46	81.46	81.46
	最大弯矩/Nm	均匀分布	380.01	168.89	351.86	168.89
		弹性接触	347.17	112.60	319.02	112.60
	最大弯曲正应/MPa	均匀分布	945.01	428.48	875.01	428.48
		弹性接触	863.34	285.65	793.34	280.00
	安全系数	均匀分布	1.14	2.52	1.23	2.52
弹性接触		1.25	3.78	1.36	3.86	
FEM 分析	最大应力值/MPa		482.8	356.9	474.8	453.6
	安全系数		1.93	2.61	1.96	2.05

从表 4 可知,改进后铰接销轴的最大弯矩值下降均超过 50%。显然,最大弯曲正应力值下降幅度

均超过 50%,安全系数提高超过 100%。

采用三维软件 Solidworks 进行仿真分析,得到

有限元计算最大正应力结果(表 4)。

从表 4 可知,改进前的销轴单纯只做有限元分析和剪切强度校核,似乎能够满足设计使用要求;而通过弯曲强度校核结果来看,改进前的铰接销轴的最大弯曲正应力值接近材料的抗拉强度值,安全系数明显不足。

3 讨论

根据销轴受弯剪载荷作用的等效判断原则,铰接销轴在弯剪共同作用下的组合应力

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{max}^2 + \tau^2}$$

第三和第四强度理论计算相当应力^[5]

$$\sigma_{III} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} / \sigma_N = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

根据前面的计算结果,弹性接触方法计算的最大弯矩和最大弯曲正应力结果小于均匀分布方法计算的结果,故在实际计算中可按均匀分布方法进行分析。在均匀分布方法及不同强度理论下计算的应力结果以及有限元结果,案例 1 汇总于表 5,案例 2 汇总于表 6。

表 5 案例 1 按均匀分布的理论计算及有限元分析值

MPa			
强度类	改进前	改进后	优化后
剪切	18.2	18.2	35.7
弯曲	133.6	76.4	209.6
弯剪组合	134.8	78.5	212.4
第三理论	138.4	84.6	221.4
第四理论	137.2	82.6	218.5
有限元	292.6	259.8	359.5

表 6 案例 2 按均匀分布的理论计算及有限元分析值

MPa				
强度类	无杆端销轴		有杆端销轴	
	改进前	改进后	改进前	改进后
剪切	70.0	81.5	81.5	81.5
弯曲	945.0	428.5	875.0	428.5
弯剪组合	947.6	436.2	878.8	436.2
第三理论	955.3	458.4	890.1	458.4
第四理论	952.8	451.1	886.3	451.1
有限元	482.8	356.9	474.8	453.6

从表 5 和表 6 可知,当剪切强度值远小于弯曲正应力值时,弯剪组合及第三和第四理论计算的相当应力结果值相差不大。通过改进结构后,与改进前的一般结构相比,理论计算的铰接销轴弯曲及综合相关应力值有极大幅度的降低。因此,在实际机械设计工作中可以简化铰接销轴设计计算,初步进行弯曲正应力校核结合弯剪组合计算即可,同时也可以结合有限元计算。

另外,案例 1 中的计算结果表明,通过对改进结

构轴径进行进一步优化,降低结构尺寸,也能达到设计要求,可以优化整体结构并降低结构整体自重及负载。

基于本文提出的改进结构,并结合轻量化设计方法,对某一款 48 m 混凝土泵车相关进行改进设计,将原有整备质量由 43.65 t 减至 36.5 t,减重 16%,使该产品完全符合欧美公路法规并批量出口欧美,同时产品结构开裂故障至少降低了 90%。图 7 为优化前后的 48 m 泵车部分重量及相关参数对比。

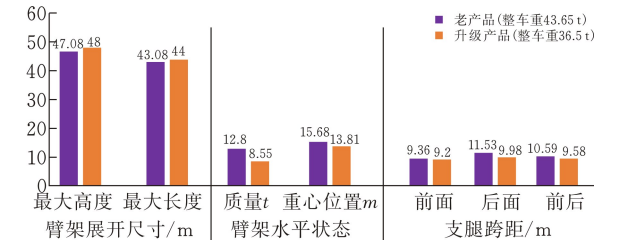


图 7 48m 泵车优化前后参数对比

臂架连杆铰接销轴的优化设计,一方面通过采用改进后的销轴结构,提高臂架连杆销轴强度的安全系数以及优化和减小销轴轴径,有效减小臂架连杆的铰接销轴周边的外形尺寸;另外一方面,将原有大量贯穿铰接部位全长的长轴优化为断开的两截短轴,轴径大幅减小,整体结构进一步优化。采用销轴改进结构优化设计,并结合多种结构改进优化技术,臂架整体结构重量大幅降低了 34%,臂架结构重心位置后移近 12%,从而大幅降低了臂架的倾翻力矩,因而可科学减小整车下装的支撑跨距,进一步优化设计并降低下装的重量,从而降低整车装备质量。

对优化后的臂架结构进行疲劳试验,1、2 臂组达 842 余万次,3、4 组臂达 1041 万次无开裂变形故障,均大于 720 万次;除去待料及故障排除等时间,按平均每年实际泵送混凝土工作 200 d,每天泵送时间 10 h,泵送频率 12 次/min,相当 5 年结构件疲劳运行了 720 万次数。较老产品 200 万次不到就出现较严重开裂问题,优化后产品的可靠性提升尤为显著。

4 结论

- 1)铰接销轴设计不仅需要进行剪切强度校核和有限元分析,而且必须要进行传统的弯曲正应力校核计算。
- 2)铰接销轴结构的这种优化改进,能有效地降低铰接销轴的最大弯矩,减小弯曲正应力,提高销轴安全系数。
- 3)与传统结构相比,改进后的铰接销轴可有效优化减小轴径而全面减小结构尺寸,降低结构整体

总重量,达到降低整个机构的负载、节能降耗的效果;在实际产品应用中,优化后产品的可靠性改善提升尤为显著。

[参 考 文 献]

[1] 高鑫. 基于 ABAQUS 的煤矿钻机铰接结构力学分析[J].机械研究与应用, 2019, 32(1):20-21+24.
[2] 陈战营, 李二闷. 铰接销轴破坏机理分析及抗疲劳设

计[J]. 建设机械技术与管理, 2014, 27(7): 104-106.
[3] 闻邦椿.机械设计手册[M]. 第五版.北京:机械工业出版社, 2010.
[4] 李立明,贾国宪,袁恩岭.基于 SolidWorks Simulation 液压支架平衡千斤顶铰接销轴有限元分析[J].煤矿机械, 2012, 33(12):86-88.
[5] 匡昊 李乡安. DIN18800 标准中销轴强度计算的探讨[J]. 建筑机械化,2012(1):76-77.

Improved Design of Articulated Hinge Pin Shaft Structure

ZHANG Fuxiang¹,WU Wen¹,LI Shaoan¹,LUO Wenbao¹, ZHANG Wenqian²

(1 *Department of Mechanical Design, Motus Tech. (Wuhan)Co., Ltd., Wuhan 430074,China*;
2 *School of Mechanical Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan, 430068*)

Abstract: Hinge pin shaft is an important connecting component in mechanical transmission system. Aiming at the shortcomings of existing design of hinge pin in construction machinery industry, this paper proposes the idea that the bending strength must be checked in the design of hinged pin shaft, and an improved structure of hinge pin is provided. Based on the basic theory of material mechanics, the strength calculation model of hinge pin is established. Through theoretical calculation and finite element calculation, the shear strength, bending strength and maximum stress of hinge pin before and after improvement are analyzed. The results show that the improved hinge pin structure can effectively reduce the maximum bending moment by 40%~55% and the bending normal stress and improve the safety factor of the hinge pin. Based on the proposed method, an improved design is carried out for a 48m concrete pump truck, which reduces the pin shaft diameter and then the overall structural size. As a result, the curb weight is reduced by 16% and the structure cracking fault is reduced by 90%.

Keywords: hinge pin shaft;structural improvement; flexural stress; bending section coefficient; finite element simulation

[责任编辑: 张 众]

[文章编号] 1003-4684(2021)05-0032-05

LLC 谐振变换器变模式—变频混合控制策略

潘 健, 刘松林, 宋豪杰, 石 迪, 熊嘉鑫

(湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 在数据中心、服务器电源应用中, 传统频率控制的 LLC 谐振变换器难以满足宽电压调节和高转换效率需求。针对这一问题提出一种变模式—变频混合控制策略, 以实现宽增益范围调节。谐振变换器有两种工作模式, 在正常模式下谐振变换器工作在最佳效率点, 开关频率等于谐振频率。当交流侧电压丢失时, 谐振变换器处于保持工作模式, 采用提出的变模式—变频混合控制调节输出电压。与传统频率控制相比, 该混合控制策略缩小了频率调节范围, 因此可以设计更大的励磁电感来减小开关的关断损耗和导通损耗。通过输入 150~400 V、输出 12 V、功率为 1 kW 的 MATLAB/Simulink 仿真结果验证了混合控制策略的有效性。

[关键词] 谐振变换器; 控制策略; 保持模式; 宽输入; 软开关

[中图分类号] TM464 [文献标识码] A

随着电信企业、互联网设备和移动通信技术的快速发展, 数据中心、服务器电源前端转换器的功率损耗越来越严重, 促进了数据中心、服务器电源向高效、高功率密度、模块化的方向发展^[1-2]。LLC 谐振变换器结构简单, 原边侧开关可以实现零电压导通 (ZVS), 副边侧二极管可以实现零电流关断 (ZCS), 具有高效、高功率密度等优良特性^[3-4], 被广泛应用于数据中心、服务器电源。然而, 传统频率控制的 LLC 谐振变换器频率调节范围宽, 不利于变压器的优化设计。当开关频率低于谐振频率时, 原边侧电路产生较大的循环电流, 严重降低了转换效率。

为了克服频率控制的不足, 国内外学者提出了不同的改进方法。文献[5]提出了一种四元件 LCLC 谐振变换器, 在励磁电感支路上串联一个辅助电容构成一个等效的励磁电感, 该变换器等效为励磁电感随频率变化的 LLC 谐振变换器, 通过调节励磁电感的大小调节输出电压, 有效降低了电路的导通损耗、关断损耗。文献[6]提出一种双桥 LLC 谐振变换器, 在全桥 LLC 谐振变换器的原边侧添加了一个双向开关, 构成全桥/半桥混合的谐振变换器。为了实现宽增益调节, 通过 PWM 控制双向开关的占空比调节谐振变换器工作在半桥或全桥的时间, 有效缩小频率调节范围。然而, 文献[5-6]提出的改进方法均需要额外辅助元器件, 增加了硬件设计成本。文献[7]提出了一种不对称的脉冲宽度调

制控制, 原边侧开关管的驱动脉冲互补但不对称, 通过调整开关管的占空比调节电压范围。这种控制方式缩小了频率调节范围, 然而增益范围受谐振网络的限制, 且电路存在直流偏置电流。

本文基于全桥 LLC 谐振变换器提出了一种变模式—变频混合控制策略。为了实现宽电压调节, 通过半桥—全桥的变模式控制调节输出电压, 而后在全桥模式下采用变频控制扩展增益调节范围。首先介绍了数据中心、服务器电源前端转换器的结构和工作模式应用需求; 其次描述了变模式—变频混合控制策略; 然后分析了混合控制策略下谐振变换器的工作特性; 最后用 MATLAB/Simulink 仿真结果验证了变模式—变频混合控制的有效性。

1 前端转换器结构和工作模式

1.1 两级结构

数据中心、服务器电源前端转换器由两级结构构成(图 1)。前级为带有功率因数校正电路(PFC)的 AC-DC 转换电路, 将电网侧交流电压转换为 400 V 的直流母线电压。为了满足负载侧电子芯片设备的电流谐波要求, PFC 使功率因数趋近为 1。后级为隔离型 LLC 谐振变换器, 实现电气隔离的同时将 400 V 直流母线电压转换为 12 V 的直流电压, 接入服务器负载母板向各电子负载恒压供电。中间母线连接电容 C_{link} 将两级电路衔接起来, 具有滤波的

[收稿日期] 2020-04-20

[基金项目] 太阳能发电及储能运行控制湖北省重点实验室开放基金(HBSEES201902)

[第一作者] 潘 健(1962—), 男, 湖北武汉人, 湖北工业大学教授, 研究方向为电力电子, 新能源发电

[通信作者] 刘松林(1994—), 男, 湖北黄冈人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为 LLC 谐振变换器

作用。

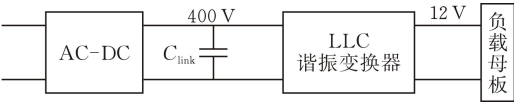


图 1 服务器电源前端两级结构图

1.2 工作模式

图 2 描述了数据中心、服务器电源后级 LLC 谐振变换器的工作模式。一般而言,包含两种工作模式:(1) 正常工作模式;(2) 保持工作模式。在正常工况下,当电网侧故障断电时,AC-DC 电路的交流输入电压丢失,连接电容 C_{link} 放电为后级电路提供能量。随着连接电容 C_{link} 持续放电,电容两端电压下降,谐振变换器的输入侧工作在宽电压范围,谐振变换器需要调节电压增益使输出电压稳定在额定值,直到不间断电源启动,这一过程称为保持时间过程,一般为几十 ms。为了满足服务器电源的应用需求,在正常模式下,谐振变换器以最高效率运行;在保持时间模式下,谐振变换器调节电压增益,维持输出电压的稳定。

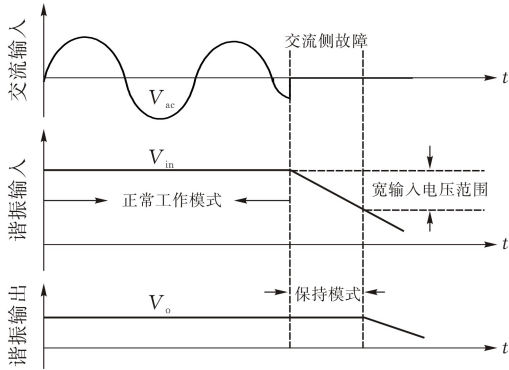


图 2 LLC 谐振变换器的工作模式图

2 变模式-变频混合控制策略

全桥 LLC 谐振变换器的拓扑见图 3。为了实现宽电压调节,文中研究了一种变模式-变频混合控制策略。在正常工作模式下,谐振变换器以半桥模式工作在谐振频率点,开关频率等于谐振频率,谐振变换器以最高效率运行;在保持工作模式下,谐振变换器采用变模式-变频混合控制调节输出电压。

在传统频率控制下,全桥 LLC 谐振变换器的原边侧开关 S_1 与 S_3 互补导通, S_2 与 S_4 互补导通, S_1 与 S_4 的驱动脉冲一致且 S_2 与 S_3 的驱动脉冲一致, S_1 与 S_3 之间设置一定的死区时间, S_2 与 S_4 之间设置一定的死区时间。当原边侧开关管 S_1 处于常开状态,开关管 S_3 处于常闭状态,全桥 LLC 谐振变换器等效为半桥 LLC 谐振变换器。

$$D_1 = 0, D_3 = 1 \tag{1}$$

式(1)中, D_1 为原边侧开关管 S_1 的导通占空比; D_3

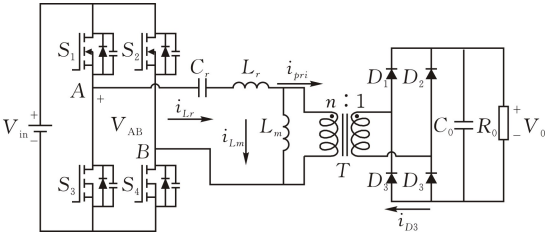


图 3 全桥 LLC 谐振变换器

为原边侧开关管 S_3 的导通占空比。

当谐振变换器作为全桥 LLC 谐振变换器工作时,谐振网络输入电压的基波分量为:

$$v_{in-FHA(full)} = \frac{4}{\pi} V_{in} \sin(\omega t) \tag{2}$$

当谐振变换器作为半桥 LLC 谐振变换器工作时,谐振网络输入电压的基波分量为:

$$v_{in-FHA(half)} = \frac{2}{\pi} V_{in} \sin(\omega t) \tag{3}$$

根据式(2)和式(3),谐振变换器在全桥模式下谐振网络输入电压的基频分量是半桥模式下基频分量的 2 倍,即:

$$v_{in-FHA(full)} = 2 v_{in-FHA(half)} \tag{4}$$

根据式(4),在电路参数一致的情形下,全桥 LLC 谐振变换器的电压增益是半桥的 2 倍。据此,原边侧开关管 S_1 、 S_3 采用占空比控制使谐振变换器由半桥模式过渡为全桥模式,谐振变换器自然可实现 2 倍的增益调节,变模式控制调制方式如图 4 所示。

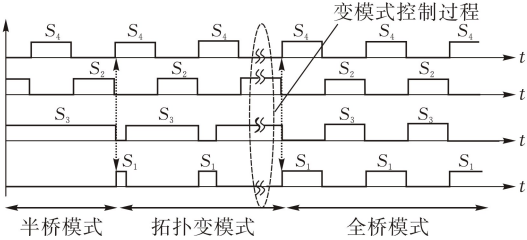


图 4 变模式控制策略

基于变模式控制研究的调制方式如图 5 所示。原边侧开关管 S_2 、 S_4 采用固定频率的互补脉冲控制,占空比为 50%(忽略死区时间),开关频率 f_s 等于串联谐振频率 f_r ;开关管 S_1 、 S_3 通过电压闭环控制, S_1 、 S_3 的占空比互补。其中, S_1 的占空比调节范围为 $[0, 0.5]$, S_3 占空比的调节范围为 $[0.5, 1]$ 。可以看到,谐振变换器的电压增益受 S_1 、 S_3 占空比的影响,电感比值对增益几乎没有影响。因此,从降低关断损耗和导通损耗的角度可以设计更大的励磁电感,提升转换效率。此外,变模式控制采用简单的单电压闭环 PWM 控制策略,可以简化控制电路的设计,易于实现。

然而,在拓扑变模式控制下谐振变换器的电压调节范围受开关 S_1 、 S_3 占空比的限制。当 S_1 、 S_3 的

占空比均为 0.5 时,谐振变换器由半桥模式完全转换为全桥模式,谐振变换器的最大增益为 2。在保持工作模式下,随着中间连接电容 C_{link} 放电谐振变换器的输入电压持续下降,采用变频控制进一步地调节输出电压,克服变模式控制的最大增益限制。

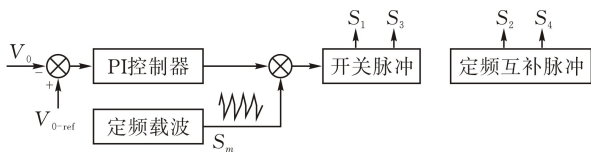


图 5 变模式控制调制策略

3 特性分析

3.1 工作模式

当前端转换器系统处于正常工作模式时,谐振变换器的输入电压 V_{in} 为 400 V,原边侧开关管 S_2 和 S_4 以 0.5 的占空比互补导通,开关频率 f_s 恒定且等于串联谐振频率 f_r , S_3 常闭, S_1 常开。很容易理解,此时谐振变换器工作在半桥模式,谐振电感 L_r 与谐振电容 C_r 谐振工作,原边侧电路中没有额外的环流损耗。励磁电感 L_m 被输出电压钳位,励磁电流 i_{Lm} 以三角波变化,其峰值电流如下:

$$i_{Lm-pk} = \frac{nV_o T_s}{4L_m} \quad (5)$$

其中, i_{Lm-pk} 为励磁电感的峰值电流, n 为变压器原边与副边的绕组匝数比, V_o 为输出电压, T_s 为开关周期, L_m 为励磁电感。

根据式(5),励磁电感 L_m 越大,励磁电流 i_{Lm} 越小,这意味着设计更大励磁电感可以有效减小原边侧电路的导通损耗、开关关断损耗、绕组损耗等。与此同时,原边侧开关管实现 ZVS 导通,副边侧整流二极管实现 ZCS 关断,将谐振变换器的开关损耗降到最低,在正常工作模式下谐振变换器以最高效率运行。

当电网发生意外故障导致交流侧电压丢失,两级电路中的连接电容 C_{link} 处于放电状态,电容 C_{link} 两端的电压随之下降,谐振变换器处于保持时间工作模式,通过变模式-变频混合控制调节输出电压。在变模式阶段, S_2 、 S_4 的驱动脉冲与正常工作模式一样。不同的是, S_1 、 S_3 采用电压闭环的 PWM 控制实现增益调节。在调节过程中,当且仅当 S_1 的占空比等于 S_3 的占空比,即 $D_1 = D_3 = 0.5$ 时,谐振变换器处于全桥模式,采用变频控制进一步调节输出电压,其工作原理与传统的频率控制一样。

3.2 谐振变换器的软开关

原边侧开关管的 ZVS 导通主要通过开关死区时间内谐振电流对开关管寄生电容的充放电实现,

在驱动脉冲信号到来之前开关管的寄生电容充放电完成,得到 ZVS 条件如下:

$$t_d \geq \frac{C_{ZVS}}{i_{Lm-pk}} V_{in} \quad (6)$$

其中, t_d 是死区时间, C_{ZVS} 是实现 ZVS 的开关管寄生电容之和,当且仅当寄生电容充放电完成,开关管的驱动脉冲到来,取“=”。

结合式(5)和式(6),得到死区时间

$$t_d \geq \frac{8C_{oss} L_m V_{in}}{nT_s V_o}$$

当开关管寄生电容的充放电时间小于死区时间 t_d ,在驱动信号到来之前,开关管的漏源极电压才能下降为 0,据此可以得到

$$L_m \leq \frac{nV_o T_s t_d}{8C_{oss} V_{in}}$$

因此,励磁电感 L_m 的设计需要综合考虑软开关条件和开关关断损耗。在保证软开关的条件下,设计较大的励磁电感减小关断损耗、导通损耗。

3.3 优化连接电容

当电网侧意外故障,前级 AC-DC 电路的交流输入电压丢失,后级谐振变换器进入保持工况。负载所需的能量完全由中间连接电容 C_{link} 放电提供,假设连接电容 C_{link} 放电的能量完全转换为谐振变换器的输出功率,则有如下关系:

$$\frac{1}{2} C_{link} (V_{nom}^2 - V_{min}^2) \geq P_o t \quad (7)$$

其中, V_{nom} 是正常工况下谐振变换器的输入电压(400 V), V_{min} 是保持工况下谐振变换器输入侧的最小工作电压, P_o 是谐振变换器的输出功率, t 是保持模式的时间间隔。

根据公式(7),得到中间连接电容 C_{link} 的设计需求,且

$$C_{link} \geq P_o t \times \frac{2}{V_{nom}^2 - V_{min}^2} \quad (8)$$

由式(8)可以看到,在保持工作模式下谐振变换器的最小工作电压越小,所需要的连接电容 C_{link} 越小。在变模式-变频混合控制策略下,谐振变换器可以实现更宽范围的电压调节,利于设计更小的连接电容,减小连接电容的尺寸提高功率密度,降低设计成本。

4 仿真分析

为了验证变模式-变频混合控制的有效性,构建 MATLAB/Simulink 仿真,谐振变换器的输入电压为 150~400 V,输出电压为 12 V,额定功率为 1 kW,谐振电感为 1.65 μH ,谐振电容为 15.32 nF,励磁电感为 16.5 μH ,谐振频率为 1 MHz,死区时间为 50 ns,变压器的原边与副边绕组的匝数比为

14.8.参考众多研究文献,一般根据工程经验估算电感比值 $k(L_m/L_r)$, k 值设计范围为 3 ~ 7。在参数设计时,结合开关管的软开关条件、保持模式下谐振变换器的增益调节能力, k 设计为 10,意味着设计较大的励磁电感降低励磁电流和谐振电流,从而降低系统的关断损耗、传导损耗、绕组损耗等。仿真结果如图 6、7、8 所示。

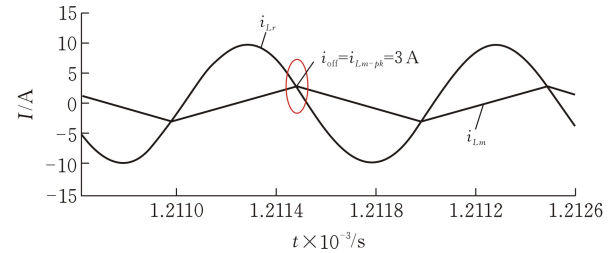


图 6 正常模式下的谐振电流与励磁电流波形图

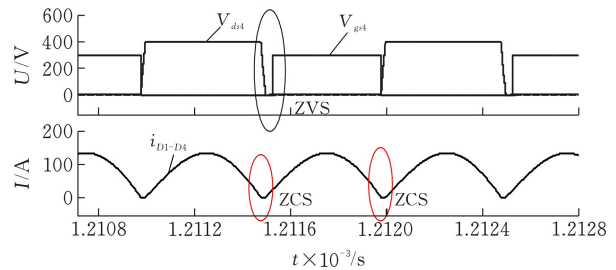


图 7 正常模式下的 ZVS 和 ZCS 波形图

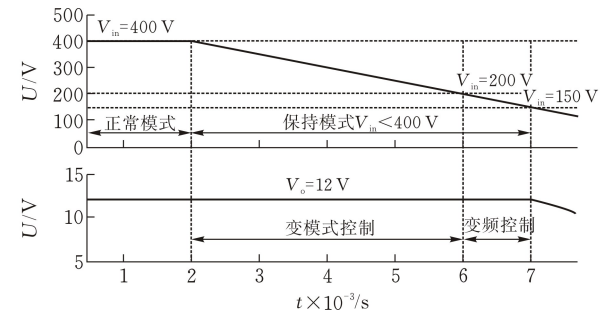


图 8 保持工作模式测试波形图

图 6 描述了正常模式下谐振电流与励磁电流波形,此时谐振变换器的输入电压为 400 V。谐振电感 L_r 与谐振电容 C_r 串联谐振工作,谐振电流 i_{Lr} 以正弦形式变化,励磁电感 L_m 被输出电压钳位不参与谐振过程,励磁电流 i_{Lm} 以三角波形式变化,电路中无额外的循环电流。在变模式-变频混合控制策略下,设计的励磁电感大小为谐振电感的 10 倍,开关管的关断电流非常小, $i_{off} = i_{Lm-pk} = 3$ A,可以降低开关管的关断损耗和电路导通损耗。从图 7 可以看到,在开关管的驱动脉冲 V_{gs4} 到来之前,其漏源极电压 V_{ds4} 下降为 0,开关管实现 ZVS 导通。与此同时,副边侧整流二极管实现 ZCS 关断,无反向恢复损耗,谐振变换器以高效运行。

图 8 为保持工作模式下的测试波形,当交流电压丢失谐振变换器的输入电压由 400 V 下降至 150

V 的过程中,采用提出的变模式-变频混合控制策略,谐振变换器调节输出电压稳定在 12 V。由于谐振变换器的最小工作电压为 150 V,可以优化连接电容 C_{link} 的设计。

5 结论

为了满足数据中心、服务器电源的高效率和宽电压调节应用需求,提出一种变模式-变频混合控制策略。在正常工况下,谐振变换器在半桥模式下工作在谐振频率点,以高效运行;在保持模式下,采用混合控制策略调节输出电压。该方法缩小了频率调节范围,可以设计较大的励磁电感降低导通损耗和关断损耗。文中分析了谐振变换器的工作特性,进一步地可以优化连接电容的设计,减小系统体积。最后,通过仿真验证了变模式-变频控制的宽电压调节能力和谐振变换器的软开关性能。

[参 考 文 献]

[1] YANAGI, HIROSHIGE, KOGA, et al. Circuit design techniques for reducing the effects of magnetic flux on GaN-HEMTs in 5-MHz 100-W high power-density LLC resonant DC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (8): 5953-5963.

[2] ZHANG W, WANG F, COSTINETT D J, et al. Investigation of gallium nitride devices in high-frequency LLC resonant converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1):571-583.

[3] 冯兴田,邵康,崔晓,等. 基于多模态切换的宽电压增益 LLC 谐振变换器控制策略[J].电工技术学报,2020, 35(20):4350-4360.

[4] 杨玉岗,邓申,姚君优.基于全耦合电感器的交错并联 LLC 谐振变换器均流特性研究[J].电机与控制学报, 2020,24(12):86-96.

[5] YANG C, HONGLIANG W, ZHIYUAN H, et al. LCLC converter with optimal capacitor utilization for hold-up mode operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(3):2385-2396.

[6] SUN X, LI X, SHEN Y, et al. Dual-Bridge LLC resonant converter with fixed-frequency PWM control for wide input applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics. 2017,32(1):69-80.

[7] KIM B C, PARK K B, MOON G W. Asymmetric PWM control scheme during hold-up time for LLC resonant converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7):2992-2997.

Variable Mode and Variable Frequency Hybrid Control Strategy of LLC Resonant Converter

PAN Jian, LIU Songlin, SONG Haojie, SHI Di, XIONG Jiaxin
(*Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy
and Operation Control of Energy Storage System,
School of Electrical and Electronic Engin.,
Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068 China*)

Abstract: In data center and server power applications, the conventional frequency-controlled LLC resonant converters are difficult to meet the requirements of wide voltage regulation and high conversion efficiency. In this paper, a variable mode and variable frequency hybrid control strategy is proposed to achieve a wide gain regulation range. The resonant converter has two operation modes. In the normal mode, the resonant converter operates at the optimal efficiency point, where the switching frequency is equal to the resonant frequency. When the AC voltage is lost, the resonant converter is in the hold-up mode, and the output voltage is regulated by the proposed variable mode and variable frequency hybrid control. Compared with conventional frequency control, the hybrid control strategy narrows the frequency regulation range, so that a larger magnetizing inductance can be designed to reduce the turn-off and conduction losses of switches. The effectiveness of the hybrid control strategy is verified by the MATLAB/Simulink simulation results of 150~400 V input, 12 V output, and 1 kW power.

Keywords: resonant converter; control strategy; hold-up mode; wide input; soft switching

[责任编辑：张岩芳]

(上接第 26 页)

Research on Magnetic Drive Method of Electric Power Inspection Robot

YAN Yu¹, HE Jianbo¹, XIONG Yifan¹, LIU Xuhui¹, XUXianjin²
(*1 State Grid Hunan Maintenance Company;Substation Intelligent Operation and Inspection
laboratory of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd, Changsha 410000, China ;
2 College of Mechanical Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China*)

Abstract: Considering the problem of slipping and abrasion in the large slope section near the high-voltage poles and towers when the inspection robot conducts electrical inspections, which leads to the low inspection efficiency, we proposed a magnetic drive method based on a high-voltage magnetic. Firstly, the physical model of the magnetic drive is established by using the magnetic field distribution characteristics around the high-voltage wire. The optimal size of the magnetic drive model of the robot is analyzed. The relationship between the driving force and the transmission current, the number of turns of the energized coil are studied. Furthermore, the binomial fitting method was used to obtain the quantitative relationship between the size of driving force and the number of turns of the coil; Finally, the theoretical calculation and simulation analysis of the magnetic drive method are carried out, which demonstrate simulation results and theoretical calculation are basically consistent, showing that the magnetic drive method is feasible to solve the problem of slipping and abrasion when the robot is inspecting the route of a large slope section.

Keywords: inspection robot; magnetic driver; energized coil; simulation analysis

[责任编辑：张 众]

[文章编号] 1003—4684(2021)05-0037-05

基于 PSO-RVM 模型的光伏出力日前区间预测

王 粟, 隗磊锋, 曾 亮

(湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 针对确定性点功率预测不能准确反映出光伏功率的随机性和波动性的问题, 提出一种基于粒子群优化算法(PSO), 优化相关向量机(RVM)的光伏功率区间预测模型。通过关联系数选出待预测日的相似日; 对于选出的相似日采用混合核 RVM 模型进行训练预测; 为了增加模型的精确度, 采用 PSO 算法对混合核 RVM 模型的参数进行优化。实验结果表明, 该方法具有更高的精度和可靠的区间宽度。

[关键词] 光伏功率; 区间预测; 相关向量机; 粒子群算法; 混合核

[中图分类号] TM615 [文献标识码] A

太阳能作为清洁、可持续的能源之一, 在世界各国中得到广泛应用, 电力需求占比也越来越高。到 2030 年太阳能将占美国电力需求的 14%, 到 2050 年将占 27%^[1]。然而, 大规模的光伏并网, 给电网稳定性造成的影响也逐渐增加, 因此对光伏发电进行预测也变得日益重要^[2]。

根据现有的研究成果, 光伏功率的预测可以分为两类: 确定性估计和概率估计两大类^[3]。文献[4]采用滚动时间窗的自适应 BP 神经网络对光伏功率进行预测。文献[5]采用灰狼群算法对 SVM 参数进行优化, 并用优化后的模型对光伏功率进行预测。文献[6]通过提升回归树建立预测模型, 对光伏功率进行预测, 并采用随机森林对残差进行预测, 两模型的预测值相加得到最终预测值。文献[7]通过自适应 Kmeans 对预测日进行聚类, 并采用 LSTM 模型进行发电功率的预测。与上述确定性估计不同, 区间预测能够在规定的置信水平对不确定度进行量化, 表示可能的预测。由于预测的不确定性, 具有预测精度指示的上下限范围比传统的预测点更可信, 根据预测结果, 如果准确地知道模型误差的概率分布, 就可以准确地计算预测区间^[8]。文献[8]提出一种基于 EEMD 和 RVM 的光伏功率区间预测, 通过 EEMD 对功率序列进行分解, 并采用样本熵(SE)对序列进行重构, 重构的序列采用 RVM 进行预测, 得到一定置信水平下的区间结果。文献[9]采用上下界法(LUBE)与极限学习机(ELM)相结合的方法, 构造多输入两输出的区间预测模型, 对光伏功率进

行区间预测。文献[10]采用分位数回归森林计算任意分位点下的预测结果, 并对预测值采用核密度估计得到概率密度预测。

文献[11]采用分位数 LightGBM 预测不同分位数的负荷值, 通过核密度估计方法得到预测点的概率密度函数。

本文先对预测日进行相似日的筛选, 将选出的相似日采用混合核相关向量机对光伏功率进行训练, 并采用粒子群算法(PSO)对混合核的参数进行优化, 利用优化后的模型进行预测, 得到不同时刻的区间预测。试验结果表明, 本文所提方法能够较好地预测出光伏输出功率的变化趋势以及区间范围。

1 建模原理

1.1 灰色关联分析与余弦相似系数

假设 $x = [x(1), x(2), \dots, x(n)]$ 表示预测日特征, $x_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)]$ 表示第 i 个历史日特征, $x(j)$ 与 $x_i(j)$ 表示预测日与历史日的第 j 个特征。则 $x(j)$ 与 $x_i(j)$ 之间的关联系数可表示为

$$\epsilon_i = \frac{\min_j \min_i \xi + \rho \max_j \min_i \xi}{\xi + \rho \max_j \max_i \xi}$$

其中, $\xi = |x(j) - x_i(j)|$, ρ 常数取值为 0.5。

因此, 第 i 个历史日与预测日之间的关联系数可表示为

$$r_i = \sum_{j=1}^n \epsilon_i(j)$$

预测日 $x(j)$ 与历史日 $x_i(j)$ 则之间的弦相似系数

[收稿日期] 2020—03—15

[第一作者] 王 粟(1964—), 女, 湖北松滋人, 湖北工业大学教授, 研究方向为智能控制算法

[通信作者] 曾 亮(1980—), 男, 湖南临湘人, 湖北工业大学教授, 研究方向为机器视觉与人工智能理论

$$D_{\cos i} = \frac{\sum_{j=1}^n x(j) * x_i(j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x(j)^2 \sum_{j=1}^n x_i(j)^2}}$$

由于灰色关联度反映的是历史日与预测日之间的总体相关性,余弦相似度反映历史日与预测日之间的变化趋势的相似性^[12]。因此,本文采用灰色关联分析与余弦相似相结合选择相似日,其表达式为

$$R_i = \alpha r_i + (1 - \alpha) D_{\cos i}$$

其中 α 设为 0.5。

1.2 相关向量机

相关向量机 (Relevance Vector Machine, RVM)是由 Tipping(2001)提出的具有高度稀疏性的贝叶斯学习方法^[13]。给定训练样本 x_n 和目标值 t_n ,则 RVM 模型可定义为

$$t_n = \sum_{i=1}^N w_i K(x, x_i) + w_0 + \xi_n$$

式中: w_i 为模型权重, N 为样本数量, $K(x, x_i)$ 为核函数, ξ_n 为服从 $N(0, \sigma^2)$ 的高斯分布。

假设目标值 t_n 相互独立,则训练样本的似然函数

$$p(tw, \sigma^2) = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{N}{2}} \cdot \alpha$$

式中, $\alpha = \exp\left(-\frac{\|t - \Phi w\|^2}{2\sigma^2}\right)$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & K(x_1, x_1) & \cdots & K(x_1, x_N) \\ 1 & K(x_2, x_1) & \cdots & K(x_2, x_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & K(x_N, x_1) & \cdots & K(x_N, x_N) \end{bmatrix}$$

通过训练样本的似然函数和先验概率分布,利用贝叶斯公式,计算得权重的后验概率分布为:

$$p(\omega t, \alpha, \sigma^2) = \frac{p(tw, \sigma^2) p(\omega \alpha)}{p(tw, \sigma^2)} = N(\mu, \Sigma)$$

式中, $\Sigma = (\sigma^{-2} \Phi^T \Phi + \mathbf{A})^{-1}$, $\mathbf{A} = \text{diag}(a_0, a_1, \cdots, a_M)$, $\mu = \sigma^{-2} \Sigma \Phi^T t$ 为均值。

最后,利用最大似然算法对超参数近似和方差近似进行估计。假设输入值为 x_i^* ,则相应的预测值为:

$$\begin{cases} y_* = \Phi(x_i^*) \mu \\ \sigma_*^2 = \sigma_{MP}^2 \Phi(x_i^*)^T \Sigma \Phi(x_i^*) \end{cases}$$

在给定的置信区间 α 下,区间预测结果可表示为:

$$[L, U] = \left[y_* - \frac{Z_\alpha}{2} \sigma_*, y_* + \frac{Z_\alpha}{2} \sigma_* \right]$$

其中 U, L 分别表示区间去测结果的上下限, $Z_\alpha/2$ 表示标准正太分布的双侧 α 分为点。

RVM 算法的常用核函数主要有高斯核函数、多项式核函数以及 Sigmoid 核函数。不同的核函数都有各自的特点,对不同趋势数据的预测精度不同^[15]。因此,选择高斯核函数和多项式核函数构造

混合核函数。

高斯核函数表达式为:

$$K_1(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{\sigma^2}\right)$$

多项式核函数表达式为:

$$K_2(x, x_i) = ((x \cdot x_i) + r)^q$$

组合和函数表达式为:

$$K = \alpha K_1 + (1 - \alpha) K_2$$

式中 σ 为核宽; r 为常数,本文设为 1; q 为整数; α 为权重。

1.3 粒子群算法

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法作为一种启发式优化算法。它只有两个参数,粒子的位置和速度,因此,具有数学分析简单、易于操作等优点^[14]。在 D 维空间中第 i 个例子的空间位置为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{iD})^T$,速度为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{iD})^T$,当前时刻的个体极值为 P_{ibest} ,全局极值为 g_{best} 。粒子 i 在迭代过程中根据如下公式更新自己的位置和速度。

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) &= \omega v_{ij}(t) + \alpha_1 + \alpha_2 \\ x_{ij}(t+1) &= x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \end{aligned}$$

式中, $\alpha_1 = c_1 r_1(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t))$, $\alpha_2 = c_2 r_2(t)(p_{gj}(t) - x_{ij}(t))$, $i = 1, 2, \cdots, N$ 个粒子; $j = 1, 2, \cdots, D$; c_1, c_2 为学习因子; ω 为权重因子; r, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的任意数。

2 基于 PSO-RVM 的光伏功率区间预测

针对确定性的光伏输出预测难以反映出光伏功率的波动性,本文建立了基于 PSO-RVM 的光伏功率区间预测,能够获取任何时刻光伏输出的区间范围。RVM 是具有高度稀疏性的贝叶斯学习方法,不仅能够预测任意时刻的平均值,同时也能够预测该时刻的方差。光伏功率的输出受到辐照度、温度、湿度、散射度、风速以及风向等的影响。如果将所有的影响因素都作为输入,则会增加模型的复杂性;如果影响因素选择过少,则会降低模型的预测精度。所以,本文选择影响因素较高的辐照度、温度、湿度和散射度作为主要的影响因素进行相似日的选取。在所选取的相似日中选择相似度最高的前 m 天作为训练集,将 $[GR_i^j, T_i^j, H_i^j, DR_i^j]^T$ 作为 RVM 的输入, P_i^j 作为输出对模型进行训练。采用 PSO 算法对 RVM 模型进行优化,利用优化后的模型进行预测,得到预测值 \hat{P} 和方差 $\hat{\sigma}^2$ 。基于 PSO-RVM 的光伏功率区间预测模型见图 1。

基于 PSO-RVM 的光伏功率区间预测模型建模具体步骤为:

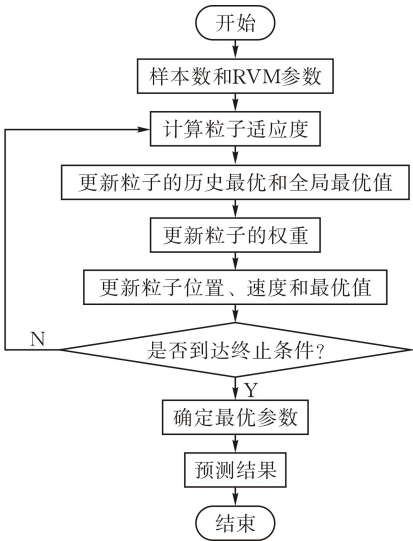


图 1 基于 PSO-RVM 的光伏功率区间预测模型

- 1)获取辐照度、温度、湿度、散射度等历史值,选择记录时间间隔为 10 min 的值。
- 2)通过灰色关联系数与余弦相似系数计算待预测日的相似日,并在筛选出来的相似日中选择相似度最高的前 m 天。
- 3)将选取的 m 天中的辐照度、温度、湿度和散射度值 $[GR_i^j, T_i^j, H_i^j, DR_i^j]^T$ 作为 RVM 模型的输入,功率 P_i^j 作为输出进行训练。其中 $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, n$ 为每天功率点的个数。
- 4)利用 PSO 算法对 RVM 模型参数进行寻优,利用优化后的模型进行预测,得到模型的预测值和方差分别为 \hat{P} 和 $\hat{\sigma}^2$ 。
- 5)模型评估,采用平均绝对误差(MPE)、均方根误差(RMSE)、区间覆盖率(PICP)和区间宽度(PINAW)衡量系统的预测性能。

$$\sigma_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_{\text{meas}}(i) - P_{\text{pred}}(i)|,$$
$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{\text{meas}}(i) - P_{\text{pred}}(i))^2}{N}},$$
$$PICP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i, \delta_i = \begin{cases} 1, \delta_i \in [L, U] \\ 0, \delta_i \notin [L, U] \end{cases}$$
$$PINAW = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - L_i)$$

式中: $P_{\text{meas}}(i)$ 为 i 时刻光伏功率实测值; $P_{\text{pred}}(i)$ 为 i 时刻光伏功率预测值; U 和 L 分别为预测区间的上下限; N 为选取的测试数据个数。

3 仿真算例分析

本文数据选择某电站每天(08:00—18:00)历史数据进行仿真。针对电站数据记录为 5 min 记录一次,因此,选择取样间隔为每 10 min 的数据进行仿真。为了验证所提 PSO 优化混合核 RVM 模型(简

称模型 3)的有效性,与高斯核 RVM(简称模型 1)和 PSO 优化的高斯核 RVM(简称模型 2)进行比较。选择不同的天气情况对模型进行了测试。同时,本文中采用 MAE、RMSE、PINAW 和 PICP 衡量系统的预测性能。

图 2 为不同天气的仿真图。表 1 为不同模型的预测值的 RMSE、MAE;表 2 为不同模型分别在 90%和 80%置信区间下的预测 PINAW 和 PICP。

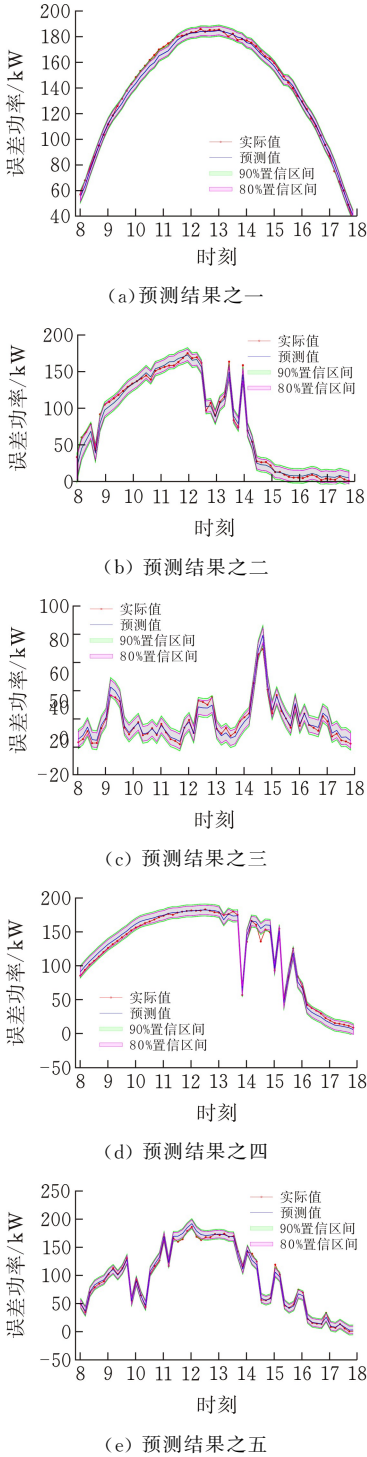


图 2 不同天气的区间预测

表 1 不同模型的预测误差

天气	模型	RMSE(kW)	MAE(kW)
a	模型 1	2.63	2.05
	模型 2	2.52	1.99
	模型 3	2.21	1.78
b	模型 1	9.12	6.36
	模型 2	5.30	4.10
	模型 3	3.88	3.21
c	模型 1	4.52	2.67
	模型 2	4.15	2.48
	模型 3	3.06	2.03
d	模型 1	6.86	5.46
	模型 2	5.19	4.09
	模型 3	4.86	4.04
e	模型 1	7.76	5.98
	模型 2	7.42	5.13
	模型 3	6.60	5.06

表 2 90%及 80%置信区间下不同模型的预测宽度和覆盖率

天气	模型	PINAW		PICP	
		90%置信区间	80%置信区间	90%置信区间	80%置信区间
a	模型 1	9.30	7.26	95.00	86.67
	模型 2	9.20	7.18	100	93.33
	模型 3	8.40	6.56	95.00	85.00
b	模型 1	21.74	16.97	98.33	96.67
	模型 2	21.36	16.67	100	98.33
	模型 3	20.73	15.96	100	96.67
c	模型 1	14.48	11.30	98.33	93.33
	模型 2	13.51	10.54	95.00	93.33
	模型 3	12.00	9.29	93.33	90.00
d	模型 1	20.49	15.99	91.67	86.67
	模型 2	18.22	14.22	95.00	90.00
	模型 3	17.80	13.89	95.00	91.67
e	模型 1	25.96	19.47	95.00	88.33
	模型 2	25.07	19.02	93.33	86.67
	模型 3	24.70	19.27	95.00	86.67

表 3 80%置信区间下不同模型的预测宽度和覆盖率

天气	模型	PINAW	PICP
a	模型 1	7.26	86.67
	模型 2	7.18	93.33
	模型 3	6.56	85.00
b	模型 1	16.97	96.67
	模型 2	16.67	98.33
	模型 3	15.96	96.67
c	模型 1	11.30	93.33
	模型 2	10.54	93.33
	模型 3	9.29	90.00

从图 2、表 1、表 2 中可以得到：

1)对于不同的天气情况，特别是图 2b 和图 2d

突变天气衰减严重的天气情况和图 2c 图 2e 连续变化较大的天气情况，模型 3 的预测均值能够有效跟随光伏功率的实际值。

2)当置信区间减小时，预测区间的平均宽度也会相应减小。

3)在相同的置信区间条件下，不同的天气状况得到的预测区间宽度。如图 2a 显示晴天预测区间的平均值则相对较小，而图 2b、c、d、e 则显示天气变化较大时，预测区间的平均值则相对较大。

4)从表 2 可以看出，对于几种不同的天气，当采用模型 3 预测时，得到的预测误差更小、区间覆盖率都能高于设定的置信区间并且具有更小的平均区间宽。

4 总结

本文提出基于 PSO-RVM 的光伏功率区间预测模型。通过算例分析，得出以下结论：

1)光伏功率的输出具有周期性和随机性，特别是天气因素的变化，对功率的输出有很大的影响。

2)混合核预测相较于单一核预测具有更低的平均绝对误差和均方根误差；在相同的置信区间下，混合核预测的平均宽度更窄。

3)相比于确定性点预测，区间预测能够提供各个时刻的预测范围，方便电力部门的调度，提高电力系统的安全性和稳定性。

[参 考 文 献]

[1] ZHANG J, FLORITA A, HODGE B M, et al. A suite of metrics for assessing the performance of solar power forecasting[J]. Solar Energy, 2015, 111(01): 157-175.

[2] 荆博, 谭伦农, 钱政, 等. 光伏发电短期预测研究进展综述[J]. 电测与仪表, 2017, 54(12): 1-6.

[3] QIANG NI, SHENGXIAN ZHUANG, HANMIN SHENG, et al. An optimized prediction intervals approach for short term PV power forecasting[J]. Energies 2017, 10, 1669, <https://doi.org/10.3390/en10101669>.

[4] HONGLU ZHU, WEIWEI LIAN, LINGXING LU, et al. An improved forecasting method for photovoltaic power based on adaptive bp neural network with a scrolling time window[J]. Energies 2017, 10, 1542, <https://doi.org/10.3390/en10101542>.

[5] 武小梅, 张琦, 田明正. 基于 VMD-SE 和优化支持向量机的光伏预测方法[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(9): 29-36.

[6] 李国, 江晓东. 基于提升回归树与随机森林的风电功

率集成预测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(11): 70-74.

[7] 陈瑶,陈晓宁.基于自适应 Kmeans 和 LSTM 的短期光伏发电预测[J/OL].电测与仪表:1-5[2021-10-07].http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200521.1438.014.html.

[8] SEN WANG, YONGHUI SUN, YAN ZHOU, et al. A new hybrid short-term interval forecasting of PV output power based on EEMD-SE-RVM[J]. Energies 2020, 13, 87, <https://doi.org/10.3390/en13010087>.

[9] QIANG NI, SHENGXIAN ZHUANG, HANMIN SHENG, et al. An ensemble prediction intervals approach for short-term PV power forecasting[J]. Solar Energy, 2017, 155: 1072-1083.

[10] 孙国强, 梁智, 俞娜燕, 等. 基于 EWT 和分位数回归森林的短期风电功率概率密度预测[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 158-165.

[11] 许佳辉,王向文,杨俊杰.基于 CNN-QRLightGBM 的短期负荷概率密度预测[J].电网技术, 2020, 44(9): 3409-3416.

[12] 陈通, 孙国强, 卫志农, 等. 基于相似日和 CAPSO-SNN 的光伏发电功率预测[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 66-71.

[13] JIA DING, MAOLIN WANG, ZUOWEI PING, et al. An integrated method based on relevance vector machine for short-term load forecasting [J]. European Journal of Operational Research, 2020, 287: 497-510.

[14] 王东, 朱永利. 基于模糊 C 均值聚类和改进相关向量的变压器故障诊断[J]. 电测与仪表, 2019, 56(12): 14-19.

[15] ESEYE A T, ZHANG J, ZHENG D. Short-term photovoltaic solar power forecasting using a hybrid Wavelet-PSO-SVM model based on SCADA and Meteorological information[J]. Renewable Energy, 2017, 118 (4): 357-367.

Day Ahead Interval Forecasting Model of PV Power Based on PSO-RVM

WANG Su, WEI Leifeng, ZENG Liang

(School of Electrical and Electronic Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: With the increase of photovoltaic grid connection, accurate photovoltaic power prediction is of great significance for the stable and safe operation of the grid. Deterministic power prediction cannot accurately reflect the randomness and volatility of photovoltaic power. Therefore, this paper proposes a photovoltaic power interval prediction model based on particle swarm optimization (PSO) optimization correlation vector machine (RVM). Firstly, the similar days of the days to be predicted are selected by the correlation coefficient; the hybrid kernel RVM model is used to train and predict the selected similar days; in order to increase the accuracy of the model, the PSO algorithm is used to optimize the parameters of the hybrid kernel RVM model. The experimental results show that the method proposed in this paper has higher accuracy and reliable interval width.

Keywords: photovoltaic power; interval prediction; relevance vector machine; particle swarm optimization; hybrid kernel

[责任编辑: 张岩芳]