

动力电池组热分析与风冷散热措施研究

针对电动汽车用动力锂离子电池在工作过程中产生的热量影响电池的容量、寿命和安全等问题,基于有限元理论,采用ANSYS Workbench 15.0软件对圆柱形磷酸铁锂(LiFePO₄) 26650电池建立了三维电化学-热耦合模型,并进行了热分析。仿真分析得出强制风冷可以使电池工作在适宜的温度范围内。故对强制风冷的通风方式、散热结构和风机控制策略等方面进行了研究分析,对电池热管理系统的工程设计具有一定的借鉴意义。

范兴明¹ 房冠平¹ 杨家志² 张 鑫¹/1.桂林电子科技大学电气工程及其自动化系 2.桂林理工大学信息科学与工程学院

0 引言

近年来,我国大部分城市出现了雾霾等环境污染天气。其中,燃油汽车的尾气排放是主要原因之一。当前政府和各个车企、科研单位投入了大量的人力、物力和财力致力于新能源汽车的研究^[1]。其中,电动汽车是新能源汽车的主要组成部分。电动汽车可分为纯电动汽车(BEV)、混合动力电动汽车(HEV)和燃料电池电动汽车(FCEV)^[2]。其中,纯电动汽车和混合动力电动汽车得到了很快的发展。电池是电动汽车的主要能量来源,也是制约电动汽车发展的瓶颈^[3]。电池较适宜的温度一般是20~40℃,当电池温度超过50℃时,电池的性能和寿命会减少^[4]。电动汽车在行驶过程中,电池会产生很大的热量。若这些热量不能够

及时排除会造成电池温度过高,进而影响电池的性能和使用寿命^[5]。故很有必要对电池进行产热特性和散热特性研究。

1 建立仿真模型

本文研究的对象是26650磷酸铁锂(LiFePO₄)电池,正极活性材料为LiFePO₄,负极活性材料为石墨,标称电压为3.2 V,标称容量为3 200 mA·h。

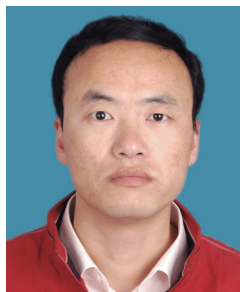
电池工作中产生的热量主要分为欧姆热占54%、活性极化热占30%和反应热占16%^[6]。为了简化模型,本文主要针对欧姆热进行了产热特性分析。

基于能量守恒定律,锂离子电池生热模型计算公式^[7]如式(1)所示。式(1)中等号左边为电池单位时间内电池微元体热力学能的增量(非稳态量),等号的右侧前三项之和为电池微元体通过传热作用在单位时间内增加的能量(扩散量),右侧最后一项 q 为电池的生热速率(源项)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (1)$$

式中, ρ 为电池平均密度,kg/m³; C_p 为电池平均比热容,取值为1 050 J/(kg·K)^[8]; T 为电池温度,K; t 为时间,s; k_x 、 k_y 和 k_z 为电池内部沿 x 轴、 y 轴和 z 轴方向的热导率,W/(m·K); q 为电池单位体积生热速率,W/m³。

电池单体体积较小,在计算中可把电池视为均一发热源,电池的热量来源主要是电芯生热。美国加州大学伯克利分校的Bernardi D.建立电池单体生热速率模型^[8]



范兴明/教授

关键词/Keywords

电动汽车·
动力电池·
热分析·
强制风冷·
风机·
散热·

国家自然科学基金(51067002, 51167004),广西科技攻关重大专项(桂科重1348003-8),广西制造系统与先进制造技术重点实验室主任课题(13-051-09-002Z),桂林电子科技大学研究生教育创新计划(GDYCSZ201441)。

$$q = \frac{I}{V_b} [(U - U_0) + T \frac{dU_0}{dT}] \quad (2)$$

式中, V_b 为电池体积, m^3 ; I 为电池充、放电电流, A, 充电时为负值, 放电时为正值; U 为电池单体电压, U_0 为电池开路电压, V; T 为电池温度, K; dU_0/dT 为温度系数, 取 $0.22 \text{ mV/K}^{[9]}$ 。

正、负极耳单位体积的生热速率为

$$q_{A1} = \frac{Q_{A1}}{V_{A1}} = \frac{I^2 R_{A1}}{V_{A1}} \quad (3)$$

$$q_{Cu} = \frac{Q_{Cu}}{V_{Cu}} = \frac{I^2 R_{Cu}}{V_{Cu}}$$

式中, q_{A1} 、 q_{Cu} 分别为电池正、负极耳的单位体积生热速率, W/m^3 ; Q_{A1} 、 Q_{Cu} 分别为电池正、负极耳的发热量, W; R_{A1} 、 R_{Cu} 分别为正、负极耳的电阻, Ω ; V_{A1} 、 V_{Cu} 分别为正、负极耳的体积, m^3 。

根据牛顿冷却定律得边界条件为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) \quad (4)$$

式中, h 为电池与周围流体的对流传热系数; T_∞ 为电池周围流体的温度; T 为电池表面温度; λ 为电池标称材料的导热系数; n 为垂直电池表面的矢量方向, 可为 x 、 y 和 z 轴方向。

联立式(1)~式(4), 可得出电池组温度场分布的数值解。

2 仿真分析

利用ANSYS Workbench 15.0软件对由3并联5串联成电池组建立了三维电化学-热耦合模型。在日常生活中, 最常用的散热介质是空气。以空气作为介质对电池组进行散热, 是通过空气和电池表面接触进行对流换热。空气对流换热分为自然对流换热和强制对流换热。其中自然对流换热系数为 5 W/m^2 , 强制风冷换热系数为 25 W/m^2 。

为了结合电动汽车运行的实际情况, 把电池放电倍率 $0.5 \sim 4.0 \text{ C}$ 划分为8个档位, 分别对电池组在8个不同放电倍率情况下进行了产热分析。电池组在自然风冷和强制风冷情况下的温度值如下表所示。

由下表可得, 在自然风冷情况下, 电池组温度

表 在不同放电倍率下电池组的温度

放电倍率/C	自然风冷/℃	强制风冷/℃
0.5	29.684	27.572
1.0	34.368	30.145
1.5	38.211	32.717
2.0	42.387	35.29
2.5	46.460	37.862
3.0	50.437	39.976
3.5	54.325	42.412
4.0	58.129	44.832

超过了 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 故电池组需要强制散热处理。在强制风冷情况下, 电池组温度在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内。故强制风冷可以使电池工作在较适宜的温度范围之内。

3 强制风冷分析

风冷方式具有结构简单, 重量小, 可以有效排除电池在工作过程中产生的有害气体, 成本较低, 易于维护等特点。故强制风冷可以广泛应用于电池热管理系统中。

3.1 通风方式

强制风冷按照通风方式可分为串行通风和并行通风^[10], 如图1所示。

串行通风, 一般是风机抽取外面的空气从电池组的一端流进, 从电池组的另一端流出。流经电池表面后的空气温度会逐步升高, 这样与电池表面温度的差值减小, 故靠近进风口的电池温度最低, 靠近出风口的电池温度最高。电

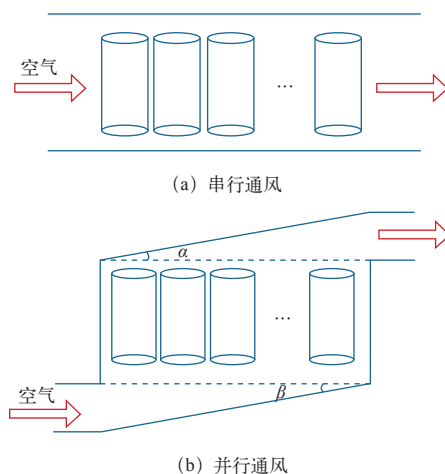


图1 通风方式

电池组的温度场分布不均匀,严重影响了电池组的一致性,故一般不采用该通风方式。

并行通风,与电池表面接触的空气都是直立上升的气流,使得每块电池温度降低的数值一样。从提高电池组工作性能角度,并行通风方式优于串行通风方式,在热管理系统中更为常用。

在实际应用中,一般是会在电池组的进风口处各设有风机,进风口风机往电池组送新风,出风口处风机往外排放高温和有害气体。在实际工程中,可以适当调节进风口角度 α 和出风口角度 β 的大小,以增加电池表面与空气的接触面积和空气的流速,实现充分利用强制风冷降温。

3.2 散热结构

空气冷却从散热结构可分为被动式冷却和主动式冷却^[11],如图2所示。其中被动式冷却根据空气的来源不同,可分为外界空气通风被动式冷却和乘客舱空气通风被动式冷却。图2a、b为被动式冷却,其中图2a的空气来自于外部环境,空气直接对电池包进行散热,对电池散热后的风被风机抽到电池包外并排除;图2b的空气来自于乘客舱,空气直接对电池包进行散热,经处理后的风大部分直接排到外界,有部分风回流到电池包内进行了二次利用;图2c为主动式冷却,该系统为全封闭式冷却系统。进入电池包的风来自乘客舱,

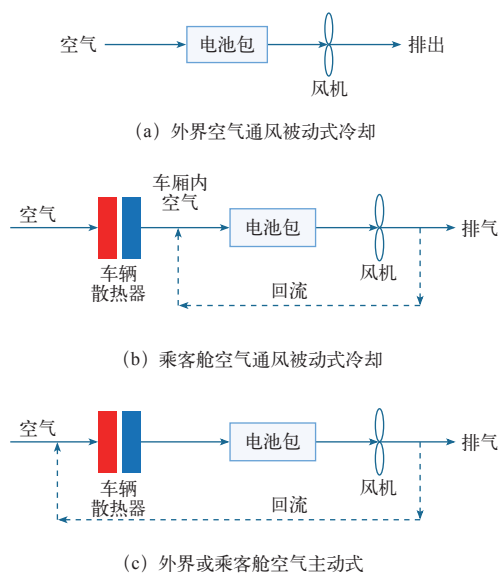


图2 强制风冷散热结构

经对电池冷却处理后的风一部分排除到外界,一部分回流到车辆散热器进行二次利用。

在实际应用中,图2c散热方式得到了广泛的应用。另外,散热器最好放在电池包内,这样可以有效利用新风。

3.3 风机控制策略

根据电池的生热速率确定空气的流量,进而选择相应型号的风机,以满足每个电芯的温升要求。为了节省电池的电量,最好选用带有脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)功能的风机。带有PWM功能的风机可以根据电池组温度的大小来调节风机的转速,即选择风机相应的档位,其工作流程图如图3所示。

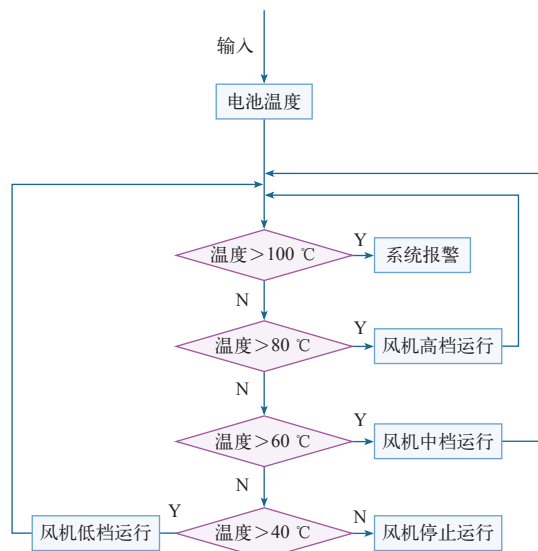


图3 风机运行流程图

根据该流程图所示,把风机分为了低、中和高档,共三个档位。当温度大于80℃的时候,风机运行在高档位;当电池温度小于80℃且大于60℃时,风机运行在中档位;当电池温度大于40℃且小于60℃时,风机运行在低档位。另外,当电池温度高于100℃时,系统报警;电池温度小于40℃时,风机停止运行。通过这种方式调节风机的转速,可以有效降低电池的温度,节省电能,提高电动汽车的续航能力。

另外,为了提高温度测量的准确性和稳定

性,应在电池表面布置一定数量的温度传感器数量,并且要保证温度传感器不能被风吹到。为了增加电池表面与风的接触面积,需改变电池排列方式,如采用梅花形等交错排列方式。改变风道的形状,如S形、Z形等,可以使新风与电池充分接触,并减少空气流动阻力。

4 结束语

1) 本文基于有限元理论,利用ANSYS Workbench 15.0软件对电池建立了三维电化学热耦合模型,并对一定放电倍率下电池自然风冷和强制风冷进行了仿真分析。

2) 在一定放电倍率情况下,强制风冷可以使电池工作在适宜的温度范围内。

3) 总结分析了强制风冷散热的通风方式、散热结构和风机控制策略,对电池热管理系统的研究与设计具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 曹秉刚. 中国电动汽车技术新发展 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (1): 114-118.
- [2] Chan C C, Bouscayrol Alain, Chen Keyu. Electric, hybrid, and fuel-Cell vehicles: architectures and modeling [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59 (2): 589-598.
- [3] Chan C C. The state of art of electric and hybrid vehicles [J]. Proceedings of IEEE, 2002, 90 (2): 247-275.
- [4] Sato Noboru, Yagi Kazuhiko. Thermal behavior

analysis of nickel metal hydride batteries for electric vehicles [J]. JSAE Review, 2000, 21 (2): 205-211.

- [5] 张剑波, 吴斌, 李哲. 车用动力锂离子电池热模拟与热设计的研发状况与展望 [J]. 集成技术, 2014, 3 (1): 18-26.
- [6] Zhang Xiongwen. Thermal analysis of a cylindrical lithium-ion battery [J]. Electrochimica Acta, 2010, 56 (11): 1246-1255.
- [7] Onda Kazuo, Ohshima Takamasa, Nakayama Masato, et al. Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles [J]. Journal of Power Source, 2006, 158 (1): 535-542.
- [8] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132 (1): 5-12.
- [9] Wu Maosung, Hung Yinghuei, Wang Yungyun, et al. Heat dissipation behavior of the nickel/metal hydride battery [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2000, 147 (3): 930-935.
- [10] 付正阳, 林成涛, 陈全世. 电动汽车电池组热管理系统的关键技术 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (3): 119-123.
- [11] Pesaran Ahmad. Battery thermal management in EVs and HEVs: issues and solutions [C]. Advanced Automotive Battery Conference, Colorado, 2001: 1-10.

(收稿日期: 2015-06-17) **EA**

114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告